

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

Zunächst möchte ich mich bei meinem Betreuer Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Michael Bader und meinen Kollegen am Institut für Maschinenelemente und Entwicklungsmethodik für die Unterstützung zu jedem Zeitpunkt meiner Arbeit bedanken. Ohne ihre fachliche und persönliche Unterstützung wäre eine Umsetzung in dieser Form nicht möglich gewesen.

Weiters bedanke ich mich bei meiner Familie, im Besonderen meinen Eltern, welche immer an mich geglaubt und mich in jeglicher Art und Weise unterstützt haben, wodurch dieser Weg erst möglich geworden ist.

Abschließender Dank gilt meiner Freundin Edvina für die Motivation und die Unterstützung, welche sie mir während dieser Arbeit gegeben hat.

Kurzfassung

Die vorliegende Masterarbeit befasst sich mit der Entwicklung und Inbetriebnahme eines Prüfstandes für thermische Untersuchungen von Schrägkugellagern unter besonderen Betriebsbedingungen. Diese Betriebsbedingungen sind Unterdruck und hohe Drehzahlen. Besonderer Fokus wird dabei auf die Wärmeleitfähigkeit der Lager gelegt, da dieser Wert bei höheren Drehzahlen und geringen Drücken in der Fachliteratur so gut wie nicht veröffentlicht ist. Die Wärmeleitfähigkeit solcher Lager stellt einen wichtigen Faktor bei speziellen Anwendungen dar. Als Beispiel seien Schwungräder erwähnt, welche in einem evakuierten Gehäuse bei hohen Drehzahlen betrieben werden. Durch auftretende Verluste erwärmt sich der Rotor in solchen Systemen. Unter starkem Unterdruck ist der konvektive Wärmetransport sehr gering, weshalb auf diese Weise der Rotor nur unzureichend gekühlt wird. Um die entstehende Wärme mittels Wärmestrahlung abzugeben, sind die auftretenden zulässigen Temperaturen zu gering. Als letzte Möglichkeit bleibt die Wärmeleitung, welche über die Lagerung erfolgen muss. Folglich rückt die Wärmeleitfähigkeit der Lagerung in den Fokus. Im Zuge dieser Arbeit wurde ein Prüfstand entwickelt, gebaut und erprobt, mit welchem unterschiedliche Einflussparameter auf die Wärmeleitung von Wälzlagern untersucht werden können. Diese Arbeit soll zudem ermitteln, in welche Richtung zukünftige Forschungen laufen sollen und eine Basis für künftige Untersuchungen darstellen. Die Ergebnisse dieser Masterarbeit ermöglichen es, die Kühlung von Schwungrädern besser auslegen zu können. Weiters können die Ergebnisse als Input für analytische sowie numerische Simulationen dienen, wodurch deren Genauigkeit verbessert werden kann.

Abstract

This master thesis approaches the thermal behavior of roller bearings under special environmental conditions. These special conditions mainly include low ambient pressure and high rotational speeds. As part of this master thesis a test bed was developed, built and operated to determine the influence of rotational speed, pressure and other parameters on the thermal behavior of roller bearings. The main focus was set on their thermal conductivity and how it is influenced by rotational speed. One important field of application where the thermal conductivity of rolling element bearings is of importance is flywheel energy storage. They usually operate inside a vacuum enclosure at high rotational speeds. Power dissipation causes the flywheel to increase its temperature, while low pressure decreases the convective heat transfer to a minimum. Cooling the rotor via heat radiation is not sufficient since the maximum permissible temperature is too low for this kind of cooling principle. The only cooling mechanism left is heat conduction. As the heat flows through the shaft over the bearings to the casing, the heat conductivity potential of the used bearings is crucial. This thesis is the first step to generate reliable data and it provides important insights for the direction of future research in this field. Additionally the results of this master thesis will help to design flywheel concepts and similar applications where the heat transport potential of bearings is a crucial factor. The results may also be used as an input for analytical and numerical simulation in order to increase reliability and accuracy.

Inhaltsverzeichnis

1. EINLEITUNG	1
2. THERMISCHE BETRACHTUNG VON WÄZLAGERN	3
2.1 EINLEITUNG	3
2.2 THERMISCHE BETRACHTUNG	5
2.2.1 <i>Allgemeines</i>	5
2.2.2 <i>Betriebstemperatur und Maßstablisierung</i>	8
2.2.3 <i>Schmierung</i>	9
2.2.3.1 Ermittlung des Faktors a_{DIN}	10
2.2.3.2 Fettschmierung	11
2.2.3.3 Ölschmierung	14
2.2.4 <i>Gestaltung von Lagerungen</i>	16
2.2.4.1 Fest – Loslagerung.....	18
2.2.4.2 Angestellte Lagerung.....	19
2.2.4.3 Schwimmende Lagerung	20
2.2.4.4 Reibungsmoment und thermische Bezugsdrehzahl	20
2.2.4.5 Wälzlagerwerkstoffe	22
2.2.4.6 Lagerluft und Betriebsspiel.....	25
2.3 TEMPERATURMESSUNG ZUR ÜBERWACHUNG DES BETRIEBSZUSTANDES.....	26
2.4 SCHRÄGKUGELLAGER	28
2.4.1 <i>Maximaldrehzahl</i>	29
2.4.2 <i>Statische und dynamische Tragfähigkeit</i>	30
2.4.3 <i>Anschaffungskosten</i>	31
2.4.4 <i>Gegenüberstellung Wälzkörperdurchmesser - Maximaldrehzahl</i>	32
3. METHODISCHE PRÜFSTANDSENTWICKLUNG.....	33
3.1 ANALYSIEREN UND PLANEN.....	33
3.1.1 <i>Klären der Rahmenbedingungen</i>	33
3.1.2 <i>Anforderungsliste</i>	35
3.2 KONZEPTIONSPHASE.....	38
3.2.1 <i>Mind-Map</i>	39
3.2.1.1 Drehzahl	40
3.2.1.2 Lagerung.....	41
3.2.1.3 Temperatur	42
3.2.1.4 Druck, Druckkammer.....	42
3.2.1.5 Drehende Masse	43
3.2.2 <i>Bewertung der Ansätze</i>	43

3.2.2.1	Heizung.....	43
3.2.2.2	Motor	45
3.2.2.3	Kupplung	46
3.2.3	<i>Zusammenfassung der Konzeption</i>	47
3.3	KONSTRUKTIONSPHASE - ENTWERFEN.....	48
3.3.1	<i>Vakuumgehäuse</i>	49
3.3.2	<i>Messflansch</i>	50
3.3.3	<i>Welle und Lagerung</i>	50
3.3.4	<i>Induktionsheizung</i>	51
3.3.5	<i>Antriebskonzept</i>	52
3.3.5.1	Magnetkupplung	52
3.3.5.2	Motor	57
3.4	FEHLER- MÖGLICHKEITS- UND EINFLUSS-ANALYSE (FMEA) FÜR KRITISCHE KOMponenten	58
3.4.1	<i>Induktionsheizung</i>	61
3.4.2	<i>Magnetkupplung</i>	63
3.5	ENTWICKLUNGSPHASE - AUSARBEITUNG.....	64
3.6	PRAKTISCHE UMSETZUNG.....	64
3.6.1	<i>Induktionsheizung</i>	65
3.6.2	<i>Antrieb</i>	66
4.	MESSKONZEPT	67
4.1	MESSPRINZIP	67
4.2	MESSHARDWARE	68
4.2.1	<i>Temperaturmessung</i>	68
4.2.1.1	Messung mittels Pyrometern	68
4.2.1.2	Messung mit Widerstandsthermometern	69
4.2.2	<i>Druckmessung</i>	70
4.2.3	<i>Drehzahlmessung</i>	71
4.3	BERECHNUNG DES WÄRMELEITWERTES.....	73
4.4	VAKUUMDURCHFÜHRUNG	76
4.5	AUSWERTUNG.....	77
4.6	MESSUNSICHERHEIT	78
5.	AUSWERTUNG UND INTERPRETATION DER ERGEBNISSE	84
5.1	KALIBRIERUNG DER TEMPERATURSENSOREN.....	84
5.2	THERMISCHES EINSCHWINGEN IM PRÜFBETRIEB	86
5.3	MESSUNG DER WÄRMELEITFÄHIGKEIT	89
5.3.1	<i>Erste Messreihe – hohe Drehzahlen</i>	90
5.3.2	<i>Zweite Messreihe – geringe Drehzahlen</i>	93

5.3.3	<i>Dritte Messreihe – Vorspannung</i>	100
6.	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	102
6.1	ZUSAMMENFASSUNG.....	102
6.2	AUSBLICK UND ZUKÜNFTIGE FORSCHUNGSGEBIETE	103
7.	LITERATURVERZEICHNIS	106
8.	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	108
9.	TABELLENVERZEICHNIS	110
10.	FORMELVERZEICHNIS	112
11.	ANHANG	113
11.1	PRÜFSTAND	113
11.2	A_{DIN} -FAKTOR FÜR ROLLENLAGER	115
11.3	DATENBLATT SCHMIERFETT LGLT 2.0.....	116
11.4	DATENBLATT SPINDELLAGER 7008 ACEGA/P4A (UNTERSUCHTES LAGER).....	118
11.5	LAGERSTEIFIGKEIT IN ABHÄNGIGKEIT VON DER VORSPANNUNG	120
11.6	DATENBLATT KLEBSTOFF (UHU-ENDFEST 300).....	121
11.7	DREHZAHLABHÄNGIGKEIT DER SICHERHEIT DER KLEBUNG AN DER WELLE	124
11.8	DATENBLATT MODELLBAUMOTOR + STEUERUNG	125
11.9	DATENBLATT FERROFLUIDDICHTUNG.....	126
11.10	DATENBLATT MAGNETKUPPLUNG ZUKAUF.....	127
11.11	HARDWARE PRÜFSTAND.....	128
11.11.1	<i>Drucksensor</i>	129
11.11.2	<i>Pyrometer</i>	131
11.11.3	<i>Pt-1000 Widerstandsthermometer</i>	133
11.11.4	<i>Kontrastsensor</i>	136
11.11.5	<i>Drehschieberpumpe E2M2</i>	137
11.12	THERMISCHES EINSCHWINGEN AM FLANSCH	140
11.13	EINFLUSS EINER TEMPERATURERHÖHUNG AUF DIE LOSLAGERFUNKTION	141
11.14	WERKSTOFFDATENBLATT 1.3505 (100Cr6)	142
11.15	WERKSTOFFDATENBLATT 1.4311	143
11.16	WERKSTOFFDATENBLATT 1.4301	145
11.17	WUCHTEN DER MAGNETKUPPLUNG.....	147
11.18	WÄRMELEITWERT IN ABHÄNGIGKEIT VON DER DREHZAHL	148
11.19	SCHADENSBILDER NACH DEM BRUCH EINER KLEBUNG AN DER MAGNETKUPPLUNG BEI 15000 UPM.....	149

1. Einleitung

Die thermische Betrachtung von Wälzlagern ist Gegenstand aktueller Forschungen im Bereich des Maschinenbaus. Im Rahmen eines Forschungsprojektes der *TU-Graz* zum Thema Schwungräder ist das thermische Verhalten von Schrägkugellagern unter besonderen Betriebsbedingungen von Interesse. Dazu zählen unter anderem hohe Drehzahlen von über 10000 Umdrehungen pro Minute und der Betrieb bei Unterdruck. Bei geringen Drücken verliert der konvektive Wärmetransport als Kühlung der Schwungräder an Bedeutung und die durch Wärmestrahlung abgeführte Wärme ist ebenfalls unbedeutend. Aus diesem Grund rückt der Wärmetransport durch Wärmeleitung über die Wälzlager in den Fokus aktueller Forschungen. Die potentiellen Einflussparameter auf die Wärmeleitfähigkeit der Lagereinheiten sind bislang nur in geringem Umfang untersucht worden.

Aufgabenstellung und Zielsetzung

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Prüfstand entwickelt, gebaut und in Betrieb genommen, mit welchem die thermischen Eigenschaften unterschiedlicher Wälzlager ermittelt werden können. Dabei werden vorwiegend stationäre Vorgänge untersucht. Um den konvektiven Wärmetransport zu minimieren und die Betriebsbedingungen jenen von Schwungrädern anzugleichen, werden die Versuche bei Unterdruck durchgeführt. Das Hauptaugenmerk liegt auf der Veränderung des Parameters Drehzahl. Diese Arbeit soll außerdem aufzeigen, welche Probleme und Fragestellungen noch ungeklärt sind und weitere Untersuchungen bzw. einer genaueren Betrachtung erfordern.

Ziel dieser Arbeit ist somit die Entwicklung, Umsetzung und Erprobung eines Prüfstandes, mit welchem die unterschiedlichen Parameter, welche Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit von Wälzlagern haben, qualitativ und quantitativ untersucht werden können. Dabei sollen die entscheidenden Einflussgrößen identifiziert werden. Abschließend folgt ein Ausblick darüber, welche Phänomene noch ungeklärt sind und wie diese erforscht werden könnten. Es soll eine Basis geschaffen werden, um festzustellen, in welche Richtung zukünftige Forschungen führen sollen.

Diese Masterarbeit baut auf zwei Bachelorarbeiten auf, welche am *Institut für Maschinenelemente und Entwicklungsmethodik* im Jahr 2012 abgeschlossen wurden. Die erste der beiden Arbeiten trägt den Titel: *“Betrachtung des Wärmedurchgangs von fettgeschmierten Wälzlagern unter für den Betrieb von Schwungrädern charakteristischen Bedingungen“* und wurde durchgeführt von Stefan Riepan.

Die zweite Arbeit, welche von Florian Kopeinig verfasst wurde, trägt den Titel: *“Konzeption eines geeigneten Messkonzeptes zur Bestimmung von Wärmeflüssen in rotierenden und ruhenden Komponenten.“*

2. Thermische Betrachtung von Wälzlagern

2.1 Einleitung

Die Hauptaufgabe von Wälzlagern liegt darin, die Reibung bei rotierenden Elementen zu minimieren. Es sind zwei bewegliche Komponenten, der Innenring und der Außenring, durch sich dazwischen abwälzende Körper, den Wälzkörpern, voneinander getrennt. Die Wälzkörper werden vom Käfig umschlossen, weiters benötigt das System Wälzlager eine Schmierung. Optional können Wälzlager auch mit einer Deckscheibe bzw. Dichtung versehen sein. (Schaeffler Technologies GmbH & Co. KG, 2008, S. 4-5)

Wälzen bedeutet „überwiegendes Rollen mit geringen Gleitanteilen“. Aus diesem Funktionsprinzip leitet sich der Name Wälzlager ab. Sie übernehmen eine Schlüsselrolle in beinahe allen Maschinen, welche Drehbewegungen ausführen, wodurch sich auch ihre wirtschaftliche und technische Wichtigkeit erklärt. Abbildung 1 zeigt den grundlegenden Aufbau eines Wälzlagers. (Albert & Köttritsch, 1987, S. 4)

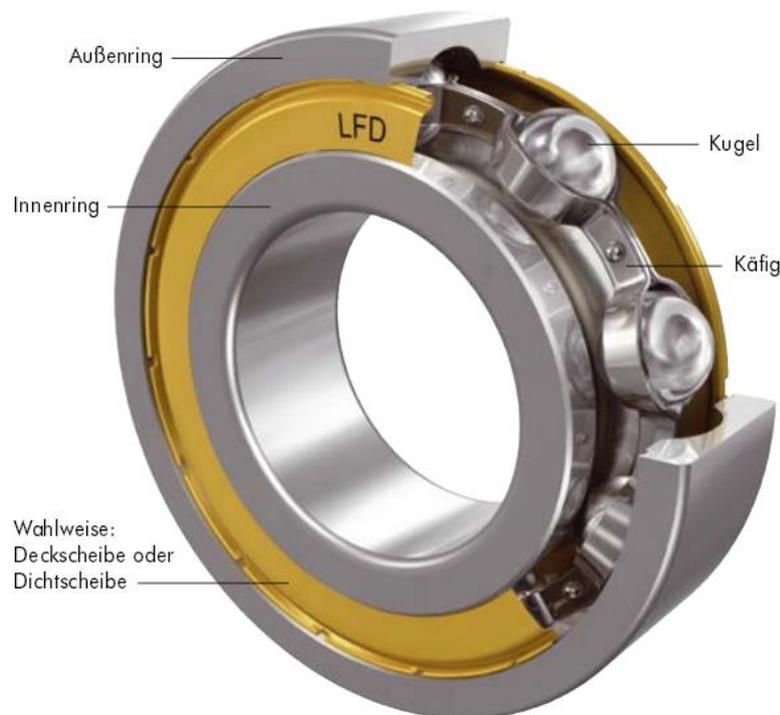


Abbildung 1 - Aufbau Rillenkugellager
(LFD Wälzlager GmbH, 2010, S. 8)

Bei Innen- und Außenringen handelt es sich um ringförmige Körper. Bei Außenringen befinden sich an der Innenseite Laufbahnen, in welchen die Wälzkörper laufen. An der Außenseite weisen sie eine Passfläche auf. Innenringe besitzen dagegen an der Außenseite Laufbahnen für die Wälzkörper und an der Innenseite eine Passfläche. (Albert & Köttritsch, 1987, S. 5)

Wälzkörper sind einfache Körper, welche zwischen den Laufbahnen des Innen- und Außenringes abrollen. Es gibt viele unterschiedliche Wälzkörper, die wesentlichen sind Kugeln, Zylinderrollen, Tonnenrollen und Kegelrollen. (Albert & Köttritsch, 1987, S. 5)

Der Käfig, welcher die Wälzkörper umschließt, hat nach Albert & Köttritsch (1987) folgende Funktionen (Albert & Köttritsch, 1987, S. 6):

- Führen der Wälzkörper
- Dämpfungsaufgaben
- Halten der Wälzkörper zwischen den Laufbahnen
- Verhindern, dass sich die Wälzkörper untereinander berühren
- Festhalten der Wälzkörper im Käfig
- Beeinflussen der Schmierung und Grenzdrehzahl

Die Schmierung dient nach Schaeffler Gruppe (2006) zur:

- Ausbildung eines Schmierfilms an den Kontaktflächen von Wälzkörper und Lagerringen, wodurch Verschleiß vermindert und vorzeitige Ermüdung vermieden wird
- Dämpfung des Laufgeräusches
- Schutz vor Korrosion

Grundlegend können drei verschiedene Schmiervverfahren für Wälzlager unterschieden werden, welche sich primär durch das eingesetzte Schmiermedium unterscheiden (Albert & Köttritsch, 1987, S. 119):

- Fettschmierung
- Ölschmierung
- Feststoffschmierung

Fettschmierung ist bei Wälzlagern das am häufigsten eingesetzte Schmierverfahren. Es zeichnet sich durch eine einfache konstruktive Ausführung, wartungsarme Lagerstellen und folglich eine hohe Wirtschaftlichkeit aus. Einen weiteren Vorteil der Fettschmierung stellt der Schutz der Lager vor Verunreinigungen von außen dar. (Albert & Kötttritsch, 1987, S. 121)

Ölschmierung kommt vorrangig dort zum Einsatz, wo andere Bauteile bereits eine Ölversorgung erfordern, wie z. B. in Getrieben. Ansonsten entsteht infolge des konstruktiven Aufbaus der Schmierung ein enormer zusätzlicher Aufwand. Vorteile der Ölschmierung sind die mögliche Wärmeabfuhr durch den Schmierstoff, das Ausspülen von Schmutz und Verschleißpartikeln und die bei speziellen Ölschmierverfahren erreichbaren Grenzdrehzahlen, welche höher sind als jene bei Fettschmierung. (Schaeffler Gruppe, 2006, S. 67)

Feststoffschmierung wird in der Regel nur in Sonderfällen angewendet - z. B. bei hohen Temperaturen (Künne, 2008, S. 169).

2.2 Thermische Betrachtung

2.2.1 Allgemeines

Abhängig von der Anwendung werden Wälzlager nach DIN ISO 76 auf statische Tragfähigkeit oder nach DIN ISO 281 auf dynamische Tragfähigkeit hin ausgelegt (Künne, 2008, S. 150-152).

Statische Tragfähigkeit

Bei der Berechnung auf statische Tragfähigkeit handelt es sich um einen Nachweis der Sicherheit gegen eine bleibende Gesamtverformung um das 0,0001 - fache des Wälzkörperdurchmessers, gemessen im Mittelpunkt des höchstbelasteten Berührungspunktes von Laufbahn und Wälzkörper (Künne, 2008, S. 150).

$$S_0 = \frac{C_0}{P_0} \quad [1]$$

S_0 ... *statische Sicherheit*

C_0 ... *statische Tragzahl in N*

P_0 ... *statisch äquivalente Lagerbelastung*

Dynamische Tragfähigkeit – nominelle Lebensdauer

Der Berechnung der dynamischen Tragfähigkeit von Wälzlagern liegt die Werkstoffermüdung an den Wälzkörpern und Laufflächen zu Grunde. Es wird errechnet, wie viele Umdrehungen ein Lager mit einer Erlebenswahrscheinlichkeit von 90 % schafft. Dabei sei vorausgesetzt, dass während des Einsatzes übliche Betriebsbedingungen vorherrschen. (Künne, 2008, S. 152)

Die nominelle Lebensdauer eines Lagers errechnet sich nach Künne (2008) durch:

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^p * 10^6 \quad [2]$$

L_{10} ... *Nominelle Lebensdauer in Umdrehungen*

C ... *dynamische Tragzahl in N*

P ... *dynamische äquivalente Lagerbelastung in N*

p ... *Lebensdauerexponent*

Zuvor genannte übliche Betriebsbedingungen beinhalten nach Künne (2008):

- Erwartungsgemäß bei einem Lager vorherrschende Bedingungen
- Sachgemäßer Einbau
- Vor Fremdkörpern geschützte Lagerstellen
- Normal geschmiert
- Keine extremen Belastungen und Temperaturen
- Keine außergewöhnlich hohe oder niedrige Umlaufgeschwindigkeit

Dynamische Tragfähigkeit – erweiterte modifizierte Lebensdauer

Um höhere Erlebenswahrscheinlichkeiten als 90 % und weitere Betriebsbedingungen wie Schmierung und Verunreinigung miteinbeziehen zu können, wurde die erweiterte modifizierte Lebensdauerberechnung entwickelt. Sie erweitert die nominelle Lebensdauerberechnung um die Faktoren a_1 und a_{DIN} . (Schaeffler Gruppe, 2006, S. 38)

$$L_{na} = a_1 * a_{DIN} * L_{10} \quad [3]$$

- L_{na} ... *Erweiterte modifizierte Lebensdauer in Umdrehungen (Index n bezeichnet die Differenz zwischen 100% und der geforderten Erlebenswahrscheinlichkeit)*
- a_1 ... *Beiwert zur Berücksichtigung der geforderten Erlebenswahrscheinlichkeit*
- a_{DIN} ... *Lebensdauerbeiwert zur Berücksichtigung der Betriebsbedingungen*

Beiwert a_1 :

Beiwert a_1 berücksichtigt von 90 % abweichende Erlebenswahrscheinlichkeiten des Lagers. Folgende Tabelle 1 zeigt die Werte des Faktors a_1 für unterschiedliche gewünschte Erlebenswahrscheinlichkeiten (Schaeffler Gruppe, 2014, S. 38).

Tabelle 1 – Erlebenswahrscheinlichkeit
(Schaeffler Gruppe, 2014)

Erlebenswahrscheinlichkeit	Erweiterte modifizierte Lebensdauer	Lebensdauerbeiwert
%	L_{nm}	a_1
90	L_{10m}	1
95	L_{5m}	0,64
96	L_{4m}	0,55
97	L_{3m}	0,47
98	L_{2m}	0,37
99	L_{1m}	0,25

Beiwert a_{DIN} :

Durch den Beiwert a_{DIN} werden nach Schaeffler (2006) unterschiedliche Einflussparameter zusammengefasst berücksichtigt, dazu gehören:

- Belastung des Lagers
- Schmierzustand (Viskosität und Art des Schmierstoffes, Drehzahl, Lagergröße, Additive)
- Ermüdungsgrenze des Werkstoffes
- Lagerbauart
- Eigenspannungen im Werkstoff
- Umgebungsbedingungen
- Verunreinigung

2.2.2 Betriebstemperatur und Maßstabilisierung

Übliche Betriebstemperaturen bei Wälzlagern betragen maximal 70 °C (Schaeffler Gruppe, 2006, S. 103). Übersteigt die Betriebstemperatur diese Grenze so muss dem thermischen Aspekt der Lagerung besondere Aufmerksamkeit zugesprochen werden. Überschreitet die Betriebstemperatur 150 °C kann sich das Gefüge des Werkstoffes ändern und wodurch Maßänderungen und Härteverluste auftreten. Den Maßänderungen wird durch eine Wärmebehandlung der Lagerringe begegnet, weshalb sich jedoch deren Härte verringert. Aus diesem Härteverlust folgt eine Reduktion der dynamischen Tragfähigkeit, welche der Faktor f_T bzw. f_H berücksichtigt. (Albert & Kötritsch, 1987, S. 102)

Maßstabilisierte Lager sind mit den Nachsetzzeichen S1 bis S4 gekennzeichnet, wie in Tabelle 2 aufgelistet (Schaeffler Gruppe, 2006, S. 103).

Tabelle 2 - Nachsetzzeichen für Maßstabilisierung
(Schaeffler Gruppe, 2006, S. 103)

Nachsetzzeichen	S1	S2	S3	S4
max. Betriebstemperatur	+200 °C	+250 °C	+300 °C	+350 °C

Die Reduktionsfaktoren f_H bzw. f_T können für die Berechnung der statischen und der dynamischen Tragfähigkeit herangezogen werden. Abbildung 2 zeigt den Reduktionsfaktor f_H bzw. f_T in Abhängigkeit von der Härte der Lagerringe, gemessen nach Rockwell. (Schlecht, 2010, S. 187-193)

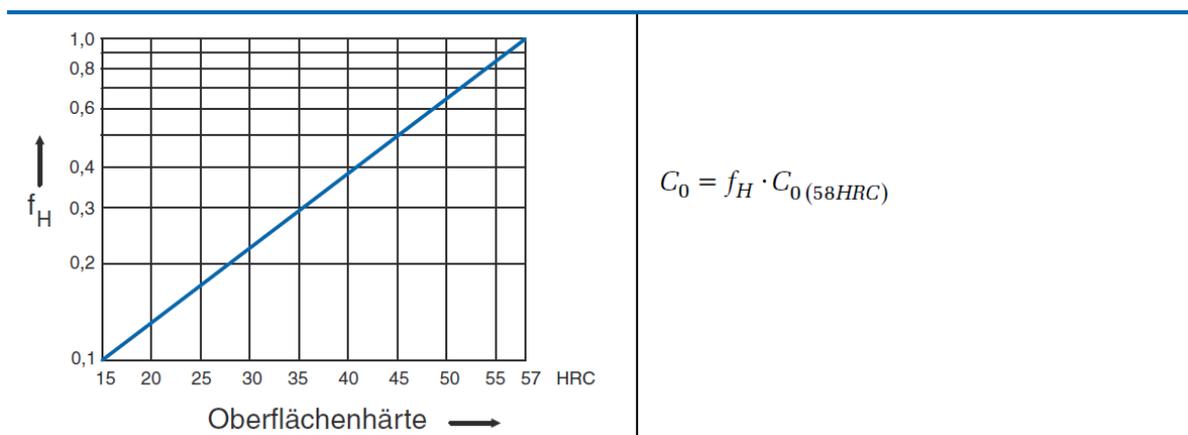


Abbildung 2 - Reduktionsfaktor f_H bei unterschiedlicher Härte der Lagerringe
(Schlecht, 2010, S. 187)

2.2.3 Schmierung

Entscheidend für eine zweckmäßige Schmierung von Wälzlagern ist die Ausbildung eines ausreichenden Schmierfilmes. Beschrieben wird dieser Vorgang durch die Theorie der elastohydrodynamischen (EHD) Schmierung. Dieser Theorie zufolge beeinflussen folgende Faktoren die Schmierfilmbildung wesentlich: (Albert & Köttritsch, 1987, S. 118)

- Lagerbelastung
- Drehzahl
- Betriebsviskosität des Schmierstoffes
- Lagergröße
- Makro und Mikrogeometrie der Berührflächen (Summe der maximalen Oberflächenrauigkeiten)

Die Viskosität des Schmierstoffes nimmt mit steigender Temperatur ab, für die Ausbildung eines ausreichenden Schmierfilmes ist jedoch eine Mindestviskosität erforderlich. Dieser Anforderung wird durch das Viskositätsverhältnis $\kappa = \frac{\nu}{\nu_1}$ Rechnung getragen. Es beschreibt das Verhältnis der Viskosität bei Betriebstemperatur ν zur erforderlichen Mindestviskosität ν_1 . Es soll ein Wert von $\kappa > 1$ angestrebt werden. (Albert & Köttritsch, 1987, S. 119)

Die Mindestviskosität ν_1 wird über die Hilfsgröße des mittleren Lagerdurchmessers $d_M = \frac{D+d}{2}$ und der Betriebsdrehzahl n nach Abbildung 3 ermittelt (Albert & Köttritsch, 1987, S. 118-119).

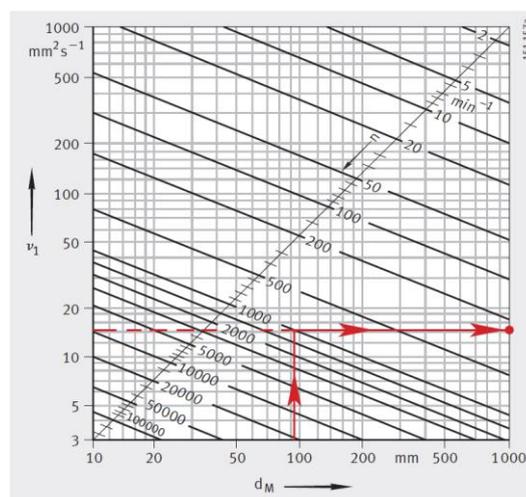


Abbildung 3 - Mindestviskosität
(Schaeffler Gruppe, 2006, S. 37)

2.2.3.1 Ermittlung des Faktors a_{DIN}

Der Faktor a_{DIN} hängt ab vom Viskositätsverhältnis κ , der Ermüdungsgrenzbelastung C_u , der dynamisch äquivalenten Lagerbelastung P und dem Lebensdauerbeiwert für Verunreinigung e_c . Abbildung 4 veranschaulicht den Zusammenhang zwischen dem Viskositätsverhältnis κ , dem Faktor $\frac{e_c \cdot C_u}{P}$ und dem a_{DIN} Wert für Radial- und Axial-Kugellager. Das Diagramm für Rollenlager ist im Anhang beigelegt. (Schaeffler Gruppe, 2006, S. 38-40)

$$a_{DIN} = f\left[\frac{e_c \cdot C_u}{P}, \kappa\right]$$

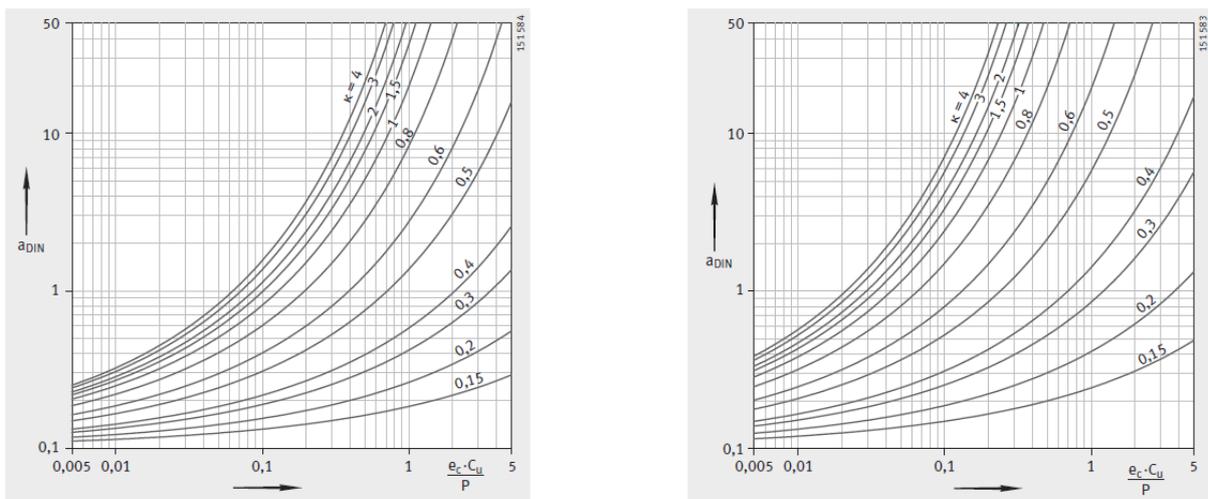


Abbildung 4 - a_{DIN} Faktor für Axial-Kugellager (links) und Radial-Kugellager (rechts)
(Schaeffler Gruppe, 2006, S. 40)

Der Beiwert e_c wird nachfolgender Tabelle 3 entnommen.

Tabelle 3 - Beiwert e_c für Verschmutzung
(Schaeffler Gruppe, 2006, S. 41)

Verschmutzung	Beiwert e_c	
	$d_M < 100 \text{ mm}^1$	$d_M \geq 100 \text{ mm}^1$
Größte Sauberkeit <ul style="list-style-type: none"> ■ Partikelgröße in Größenordnung der Schmierfilmhöhe ■ Laborbedingungen 	1	1
Große Sauberkeit <ul style="list-style-type: none"> ■ Schmieröl feinstgefiltert ■ abgedichtete, befettete Lager 	0,8 bis 0,6	0,9 bis 0,8
Normale Sauberkeit <ul style="list-style-type: none"> ■ Schmieröl feingefiltert 	0,6 bis 0,5	0,8 bis 0,6
Leichte Verunreinigungen <ul style="list-style-type: none"> ■ leichte Verunreinigungen im Schmieröl 	0,5 bis 0,3	0,6 bis 0,4
Typische Verunreinigungen <ul style="list-style-type: none"> ■ Lager mit Abrieb von anderen Maschinenelementen kontaminiert 	0,3 bis 0,1	0,4 bis 0,2
Starke Verunreinigungen <ul style="list-style-type: none"> ■ Umgebung der Lager stark verschmutzt ■ Lagerung unzureichend abgedichtet 	0,1 bis 0	0,1 bis 0
Sehr starke Verunreinigungen	0	0

2.2.3.2 Fettschmierung

Zum größten Teil kommt heutzutage bei technischen Anwendungen Fettschmierung zum Einsatz. Auf die chemische und physikalische Kompatibilität des Schmierstoffes gegenüber Elastomeren (Käfige, Dichtungen) ist zu achten. Um ein Auslaufen des Fettes aus den Lagerstellen zu verhindern ist eine Mindestviskosität von $12 \frac{mm^2}{s}$ notwendig. (Albert & Kötttritsch, 1987, S. 104, 121)

Die Einsatzdauer des Schmierstoffes ist begrenzt, hauptverantwortlich dafür sind die mechanische Beanspruchung und die chemische Alterung. Bei fettgeschmierten Lagern wird zwischen Dauerschmierung und Nachschmierung unterschieden. Dauerschmierung bedeutet, dass die Lagerlebensdauer geringer ist als die des Schmierfettes und folglich keine Erneuerung der Schmierung erforderlich ist. (Albert & Kötttritsch, 1987, S. 121)

Bei Nachschmierung erfolgt nach festgelegten Abständen ein Nachfüllen des Schmiermittels, als Richtwert wird sie mit 50 % der Fettgebrauchsdauer angegeben, welche wiederum nach Rücksprache mit den Lager- und Schmierfetherstellern festgelegt werden sollte. (Albert & Kötttritsch, 1987, S. 124)

Bei der konstruktiven Ausführung der Lagerstellen muss darauf geachtet werden, dass altes Schmierfett bei Bedarf ungehindert aus dem Lager austreten kann. Im Rahmen der Erstbefüllung sollte das Fettvolumen etwa 30% - 100% des freien Lagervolumens betragen. Ein vorhandener Fettvorrat kann die Fettgebrauchsdauer positiv beeinflussen, die Größe des Fettvorrates ist nicht direkt proportional zur Steigerung der Fettgebrauchsdauer. Der Fettvorrat soll etwa so dimensioniert sein wie das Volumen des Lagers zwischen Innen- und Außenring, wobei Wälzkörper und Käfig nicht berücksichtigt werden. Exemplarisch illustriert Abbildung 5 die konstruktive Ausführung einer Fettschmierung eines Zylinderrollenlagers. (Schaeffler Gruppe, 2006, S. 74-81)

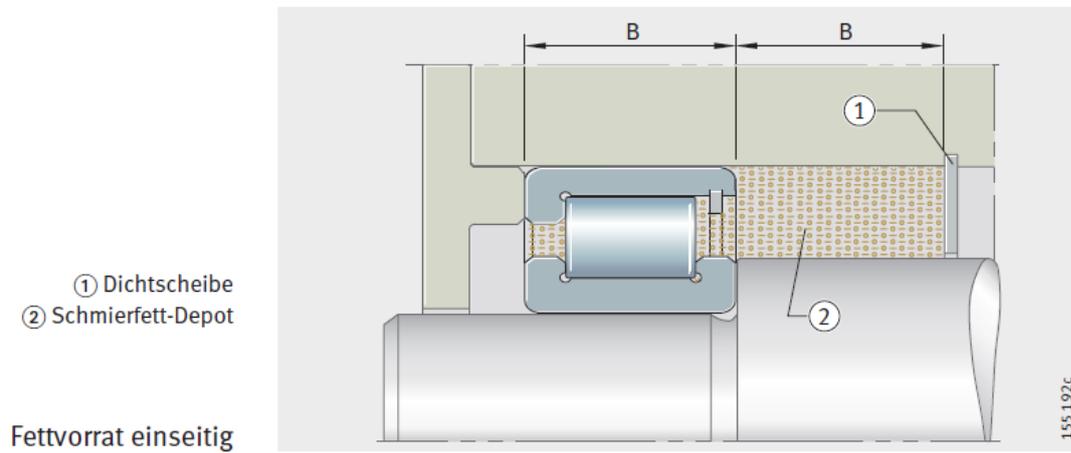


Abbildung 5 - Konstruktive Ausführung Fettschmierung
(Schaeffler Gruppe, 2006, S. 81)

Grundsätzlich stellen Schmierfette eingedickte Synthese- oder Mineralöle dar. Einen Überblick über die wichtigsten Fettschmierstoffe, deren Zusammensetzung und deren grundlegenden Eigenschaften und Anwendungsgebiete gibt Tabelle 4. (NSK-Wälzlagerkatalog, 2009, S. A112)

Tabelle 4 - Hauptfettarten und deren wichtigsten Eigenschaften
(NSK-Wälzlagerkatalog, 2009, S. A112-A113)

Name (gängige Bezeichnung)	Lithiumfett		Natriumfett	Kalziumfett	Grundölmischfett	Komplexes Grundfett (Komplexseife)	Seifenfreies Grundfett (seifenfreies Fett)
	Li Seife						
Verdicker							
Grundöl	Diester-Öl, Polyatomares Esteröl	Silikonöl					
	Mineralöl						
Eigenschaften							
Tropfpunkt, °C	170~195	200~210	170~210	70~90	160~190	180~300	230~
Betriebs-temperaturen, °C	-20~+110	-50~+160	-20~+130	-20~+60	-20~+80	-20~+130	-10~+130
Betriebs-drehzahl, %(')	70	60	70	40	70	70	70
Mechanische Stabilität	gut	gut	gut	schlecht	gut	gut	gut
Für hohe Lasten	geeignet	nicht geeignet	geeignet	nicht geeignet	geeignet bis empfohlen	geeignet bis empfohlen	geeignet
Wasserbeständigkeit als Korrosionsschutz	gut	gut	schlecht	gut	schlecht für Na Seifenfett	gut	gut
Anmerkungen	Mehrzweckfett für verschiedene Anwendungen geeignet	Vor allem für Anwendung mit hohen Temperaturen. Für Lager mit hoher oder niedriger Drehzahl, Kleinformen und Instrumentenlager verwendet. Es ist auf Rost, der durch Isolierlack verursacht wurde, zu achten.	Lang- und kurzfasrige Arten sind verfügbar. Langfaseriges Fett ist für hohe Drehzahlen ungeeignet. Wasser und hohe Temperaturen müssen berücksichtigt werden.	Hochdruckfett mit hochviskosem Mineralöl und Hochdruckadditiven (Pb Seife, etc.) besitzt hohen Druckwiderstand.	Oft für Rollenlager und große Kugellager verwendet.	Für Hochdruckanwendungen geeignet, mechanisch stabil.	Grundöl auf Mineralölbasis eignet sich als Schmierstoff für mittlere bis hohe Temperaturen. Grundöl auf Synthetikölbasis wird für niedrige oder hohe Temperaturen empfohlen. Einige Fette auf Silikon- oder Fluorölbasis eignen sich nicht für den Rostschutz und laufen nicht geräuscharm.

2.2.3.3 Ölschmierung

Verglichen mit fettgeschmierten Lagerstellen kann durch die Verwendung von Ölschmierung eine höhere zulässige Maximaldrehzahl erreicht werden. Je nach Art der Ölschmierung ist auch eine Wärmeabfuhr aus dem Lager möglich. Der große Nachteil besteht im hohen konstruktiven Aufwand, weshalb sie üblicherweise nur dann eingesetzt wird, wenn bereits andere Maschinenelemente eine Schmierung mit Öl erfordern, wie dies z. B. in Getrieben der Fall ist. (Albert & Kötttritsch, 1987, S. 128)

Die Schmierölviskosität richtet sich nach unterschiedlichen Faktoren wie unter anderem nach der Größe und Bauart des Lagers, Drehzahl, Belastung, Erfahrungswerte, etc. weshalb bei der Wahl des Schmieröls der Lagerhersteller miteinbezogen werden sollte. (Albert & Kötttritsch, 1987, S. 128)

Eine Einteilung bezüglich zulässiger Höchstdrehzahlen unterschiedlicher Schmierverfahren erlaubt der Faktor $n * d_m$. Abbildung 6 zeigt die Ölbad Schmierung eines Zylinderrollenlagers mit Ölablassschraube. Diese Ausführung ist geeignet solange $n * d_m \leq 300\,000 \frac{mm}{min}$. Wenn $n * d_m \leq 150\,000 \frac{mm}{min}$ darf das Lager vollständig in das Ölbad eintauchen. (Schaeffler Gruppe, 2006, S. 88)

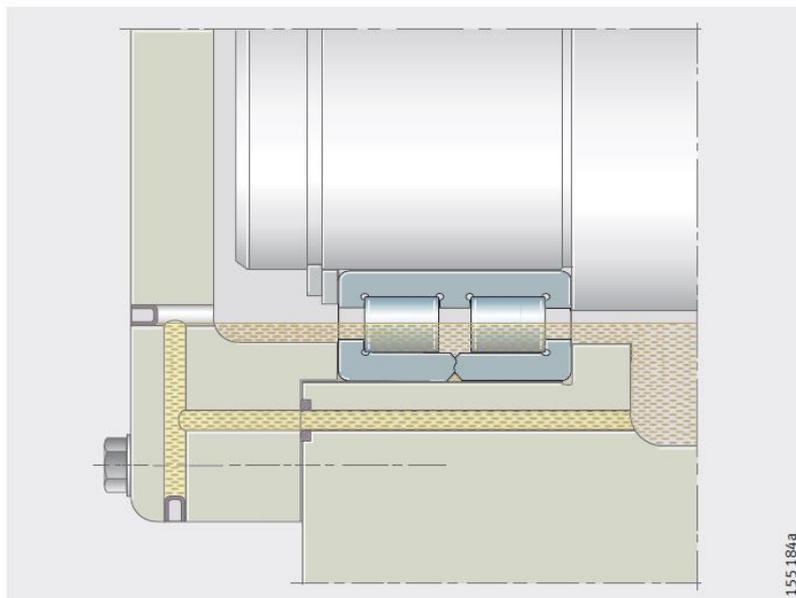


Abbildung 6 – Ölbad Schmierung
(Schaeffler Gruppe, 2006, S. 88)

Nachfolgende Tabelle 5 zeigt unterschiedliche Ölschmierverfahren, die jeweiligen Grenzwerte des Faktors $n \cdot d_m$ und grundlegende Bemerkungen zu den jeweiligen Verfahren. Zuerst sind die Daten für Fettschmierung angeführt.

Tabelle 5 - Vergleich unterschiedlicher Schmierverfahren
(Albert & Kötritsch, 1987, S. 120)

Schmierverfahren	Drehzahl-Kennwert $n \cdot d_m$ in $mm \cdot min^{-1}$	Bemerkungen	Schmiermittel
Fettschmierung	$\leq 0,5 \cdot 10^6$ ($1,0 \cdot 10^6$)	Vorrats- und/oder Verlustschmierung; wartungsarm, dennoch Schmierfristen beachten; keine Wärmeabfuhr durch Schmierstoff	Handpresse, automatische Presse, Zentralanlage mit Zugehör, Fettmengenregler
Tropfölschmierung		Verlustschmierung; kleine Ölmenge, keine Wärmeabfuhr	Tropföler, Zentralanlage mit Pumpe, Dosiereinheit, Behälter, Leitungen
Eigenförderung der Lager	$\leq 0,5 \cdot 10^6$	Vorratschmierung; Wärmeabfuhr über Ölverrat und Gehäuseform, Ölstandshöhe beachten (kontrollieren); große Ölmenge	Ölkanäle, Druckausgleichsbohrungen; Ölstab, Ölstandsrohr, Überlaufbohrungen
Ölbadschmierung		Umlaufschmierung; gute Wärmeabfuhr; Filterung und Rückkühlung möglich; Eigenförderung der Lager beachten; Ölablauf ausreichend dimensionieren; große Ölmenge	Pumpe, Filter, Behälter, Ventile; Ölkühler
Öltauschschmierung	$\leq 0,8 \cdot 10^6$	Verlustschmierung; Wärmeabfuhr unbedeutend, Dichtwirkung durch Sperrluft verstärkt, problematisch bei kinematisch schwierigen Lagerbauformen, Eigenförderung der Lager beachten	Pumpe, Behälter, Düsen, Leitungen, Dosiereinheit, Absaugung
Ölumlaufschmierung	$\leq 1,5 \cdot 10^6$	Umlaufschmierung; gute Wärmeabfuhr; Ölstrahlgeschwindigkeit $> 15 m \cdot s^{-1}$ vorsehen; Ölablauf ausreichend dimensionieren	Pumpe, Filter, Behälter, Düsen, Leitungen, Ventile, Ölkühler
Öldurchlaufschmierung	$\leq 3,0 \cdot 10^6$		
Ölnebel-Ö/Luftschmierung	$> 0,8 \cdot 10^6$		
Sonder-einrichtungen	$\leq 3 \cdot 10^6$		
Öleinspritzschmierung			
Sonder-einrichtungen			

Tabelle 6 stellt Öl- und Fettschmierung einander gegenüber.

Tabelle 6 - Gegenüberstellung Öl- und Fettschmierung
(NSK-Wälzlagerkatalog, 2009, S. 107)

Bezeichnung	Fettschmierung	Ölschmierung
Gehäuseaufbau und Dichtungsmethode	einfach	Kann komplex sein, sorgfältige Wartung erforderlich.
Drehzahl	Grenzdrehzahl beträgt 65 % bis 80 % der Ölschmierung.	Höhere Grenzdrehzahl
Kühleffekt	schwach	Wärmeausleitung mit Zwangsölumlauf möglich.
Fluidität	schwach	gut
Kompletter Schmierstoffaustausch	manchmal schwierig	einfach
Entfernen von Fremdkörpern	Entfernung der Partikel aus dem Fett ist nicht möglich.	einfach
Externe Verunreinigung durch Leckage	Umliegende Bereiche selten durch Leckagen verunreinigt.	Oft Leckagen ohne angemessene Gegenmaßnahmen. Nicht geeignet, wenn externe Verunreinigung vermieden werden soll.

2.2.4 Gestaltung von Lagerungen

Eine umlaufende Welle erfordert grundsätzlich mindestens zwei Lagerstellen um geführt und abgestützt zu werden. Als einführendes Beispiel dient eine Hohlwelle aus Edelstahl (1.4301) mit einer Länge von 100mm, wie in Abbildung 7 dargestellt.

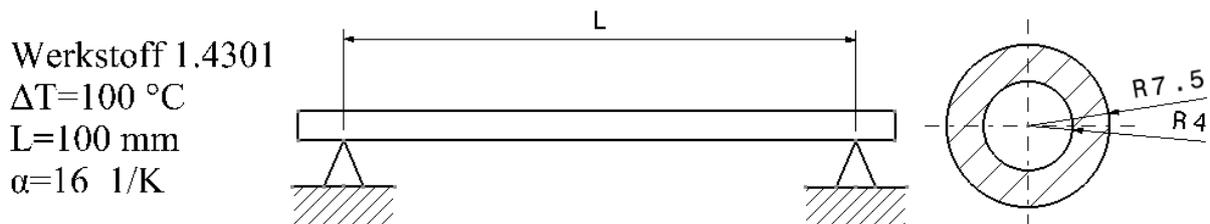


Abbildung 7 - Fest - Festlagerung

Eine Temperaturdifferenz von $100 \text{ }^\circ\text{C}$ zwischen Ausgangs- und Endzustand verursacht eine Längenänderung von $0,16 \text{ mm}$. Im Falle einer Lagerung mit zwei Festlagern resultiert aus dieser Längenänderung eine Verspannung des Systems mit einer Axialkraft, welche direkt von der Steifigkeit der Lager abhängt. Die Welle kann als Feder mit einer Federkonstante von

rund $1,3 \cdot 10^5 \frac{N}{\mu m}$ modelliert werden. Im Vergleich dazu beträgt die Steifigkeit des Schrägkugellagers 7008-CD/P4A laut SKF-Lagerkatalog $38 \frac{N}{\mu m}$. Aufgrund der wesentlich höheren Steifigkeit der Welle wird diese im Modell als starr angenommen. Weiters sei das Gehäuse inklusive Lagersitze ebenfalls starr. Daher muss die gesamte Längenänderung von den Lagern aufgenommen werden, wodurch sich eine Verschiebung von 0,08 mm für jedes der beiden Lager ergibt. Es ist in Abbildung 8 die resultierende Axialkraft in Abhängigkeit von der Lagersteifigkeit angegeben. Im „Best-Case“ Szenario, bei welchem die Federsteifigkeit der Lager mit $38 \frac{N}{\mu m}$ als konstant angenommen wird, verursacht die Längenänderung eine Axialkraft von 3000 N.

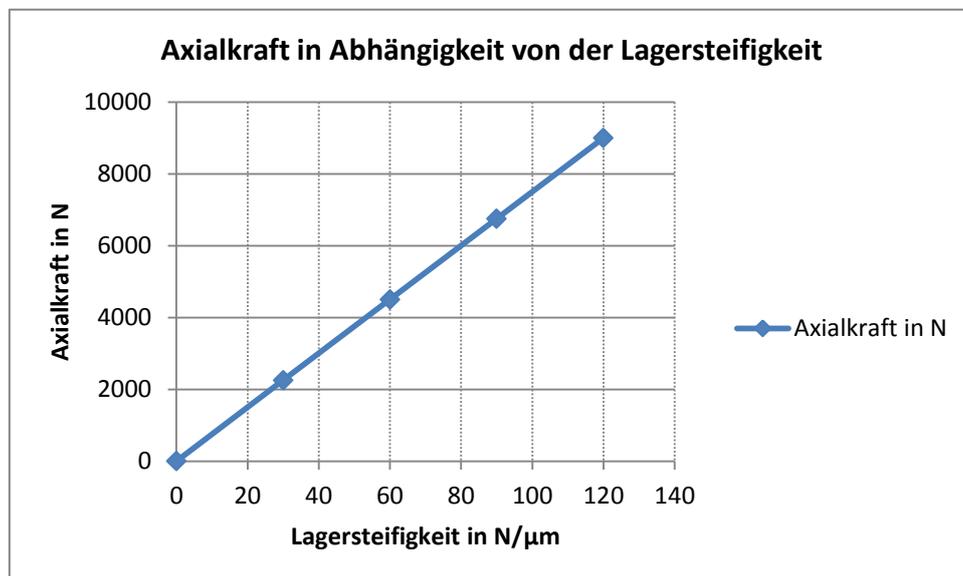


Abbildung 8 - Axialkraft in Abhängigkeit von der Lagersteifigkeit

Aufgrund des progressiven Verlaufes der Federsteifigkeit in Abhängigkeit vom Weg wird die Axialkraft in der Realität höher ausfallen. Mit zunehmender Länge der Welle erhöht sich die aus der Verspannung resultierende Axialkraft ebenfalls.

Eine weitere Möglichkeit, welche zu Verspannungen bei Fest-Festlagerungen führen kann sind Fertigungstoleranzen. Häufig ist bei Fertigungszeichnungen die Allgmeintoleranz ISO 2768-m angeführt. Bei einer Welle mit einer Länge von 100 mm entspricht dies einer höchstzulässigen Maßabweichung von 0,3 mm. Wenn dieser Fall eintritt und ein Lager um

0,3 mm nachgibt, ist die sich daraus ergebende Verspannung ähnlich groß wie bei der zuvor behandelten Erwärmung um 100 °C.

Um ein Verspannen des Systems wie zuvor beschrieben zu vermeiden, gibt es unterschiedliche konstruktive Ansätze:

- Fest-Loslagerung
- Angestellte Lagerung
- Schwimmende Lagerung

Oben genannte Ansätze stellen die gängigsten Ausführungen dar, es wird jedoch kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben. (Schlecht, 2010, S. 166)

2.2.4.1 Fest – Loslagerung

Im Allgemeinen erfordert jede Lagerung eines Maschinenteils zwei Lagerstellen. Ein Festlager, welches Axial- und Radialkräfte aufnimmt und ein Loslager, welches eine Verschiebung in axialer Richtung zulässt, jedoch radiale Belastungen aufnehmen kann. Dabei wird die axiale Führung der Welle vom Festlager übernommen. Die Verschiebbarkeit des Loslagers verhindert ein Verspannen der Lagerung. Dadurch können Fertigungsungenauigkeiten wie auch Längenänderungen aufgrund von Wärmedehnungen in gewissem Maße ausgeglichen werden, wie in Kapitel 2.2.4 behandelt. Abbildung 9 zeigt zwei typische fest-losgelagerte Wellen, wobei 1 bzw. 3 als Festlager und 2 bzw. 4 als Loslager fungieren. (Künne, 2008, S. 160)

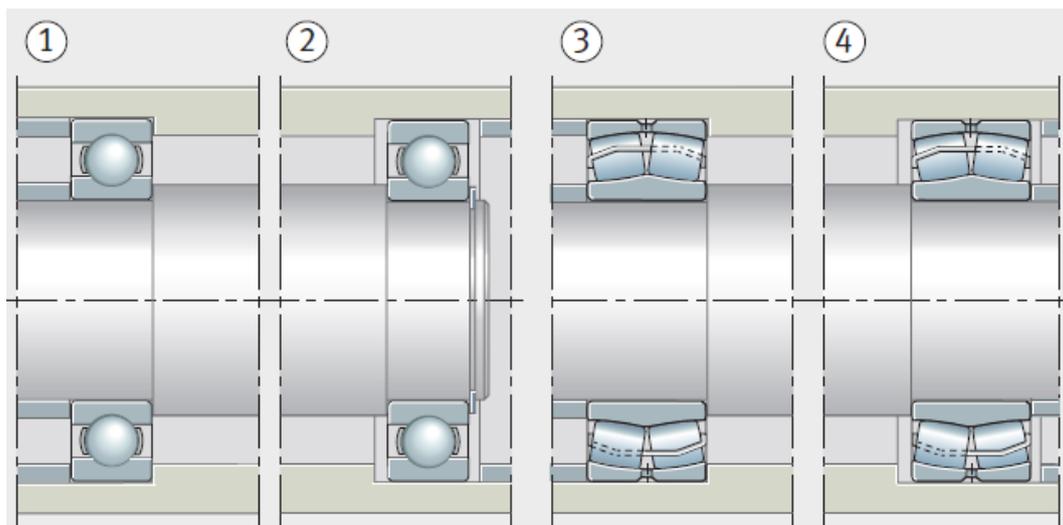


Abbildung 9 - Fest-Loslagerung
(Schaeffler Gruppe, 2006, S. 126)

Weiters müssen auftretende Temperaturdifferenzen zwischen Welle und Gehäuse beachtet werden. Sollte sich der Lageraußenring stärker erwärmen als der Lagersitz im Gehäuse, so kann durch die thermische Ausdehnung des Lagers ein Gleiten des Außenringes im Gehäuse verhindert werden. Als Folge wäre die Loslagerfunktion nicht mehr gewährleistet und ein Verspannen wie in Kapitel 2.2.4 beschrieben könnte das Lager beschädigen. (Künne, 2008, S. 164).

2.2.4.2 Angestellte Lagerung

Eine weitere Möglichkeit eine Lagerung zu gestalten stellt die sogenannte angestellte Lagerung dar. Es werden in der Regel zwei Schrägkugel- bzw. Kegelrollenlager spiegelbildlich arrangiert, wodurch eine X-, oder O-Anordnung resultiert. Je größer der Stützabstand H , desto steifer ist die Lagerung. In der folgenden Abbildung 10 zeigt Punkt 1 eine Lagerung in O-Anordnung und Punkt 2 eine Lagerung in X-Anordnung. (Schaeffler Gruppe, 2006, S. 128)

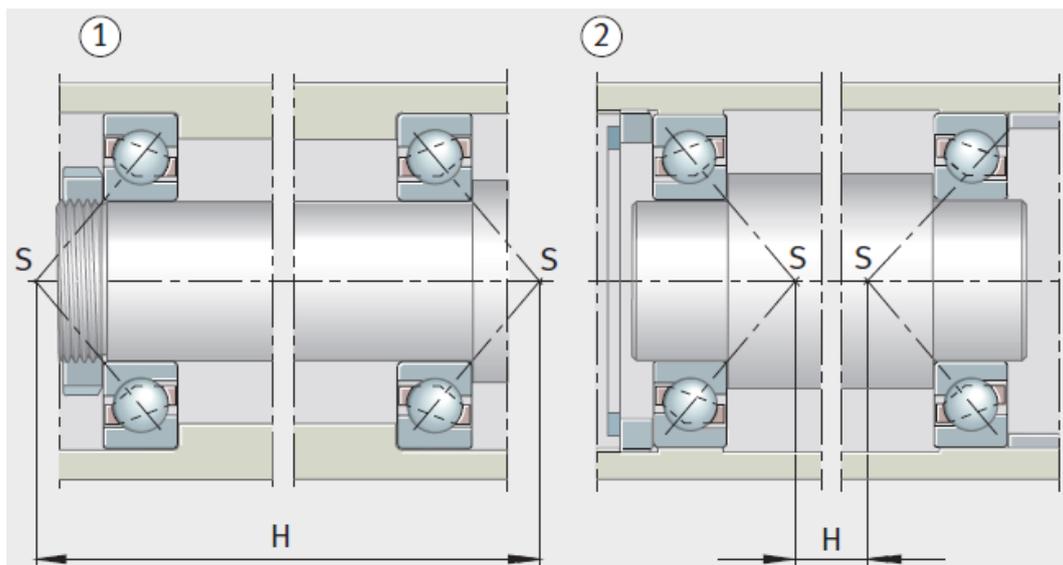


Abbildung 10 - Angestellte Lagerung
(Schaeffler Gruppe, 2006, S. 128)

Die Lagerung der Welle dieses Prüfstandes wird durch zwei in X-Anordnung verbaute „Hochgenauigkeits-Schrägkugellager“ realisiert. Infolge der thermischen Ausdehnung der Welle ändert sich die Vorspannung der Lagerung nur in vernachlässigbarem Umfang. Unter Verwendung der Vorspannungsklasse leicht und geringer Fettfüllmenge eignet sich diese Form der Lagerung besonders für hohe Betriebsdrehzahlen bis über 40000 upm.

2.2.4.3 Schwimmende Lagerung

Bei der schwimmenden Lagerung kann sich die Welle relativ zum Gehäuse um das Axialspiel s verschieben. Dieses muss so festgelegt werden, dass etwaige Fertigungsungenauigkeiten bzw. Wärmedehnungen aufgenommen werden können und sich das System nicht verspannt. (Schaeffler Gruppe, 2006, S. 130)

2.2.4.4 Reibungsmoment und thermische Bezugsdrehzahl

Während des Betriebes erwärmen sich Wälzlager infolge der Reibung. Die Haupteinflussfaktoren sind dabei (SKF-Gruppe, 2008, S. 88):

- Belastung
- Lagerart- und Größe
- Drehzahl
- Schmierung

Der Laufwiderstand von Wälzlagern setzt sich zusammen aus (SKF-Gruppe, 2008, S. 88):

- Roll- und Gleitreibung in der Wälzkontakten
- Reibung zwischen Wälzkörperführung und Wälzkörpern
- Schmierstoffreibung
- Gleitreibung von Berührungsdichtungen

Eine überschlägige Abschätzung des Reibmomentes erlaubt nach SKF-Gruppe (2008) folgende Beziehung:

$$M_{Reib} = 0,5 * P * d * \mu \quad [4]$$

M_{Reib} ... Gesamtreibungsmoment in $N*mm$

P ... äquivalente Lagerbelastung in N

d ... Bohrungsdurchmesser in mm

μ ... Reibbeiwert (aus entsprechender Literatur – z. B. SKF-Lagerkatalog S. 88)

Genauere Betrachtung des Reibungsmomentes

Wichtig für die thermische Betrachtung von Wälzlagern ist das auftretende Reibungsmoment im Lager, weil es infolge dieser Reibung als Wärmequelle fungiert. Im Zuge einer genaueren Betrachtung der Reibung in Wälzlagern gibt es zwei unterschiedliche Ansätze. Der erste Ansatz teilt das gesamte Reibungsmoment in einen belastungsabhängigen und einen drehzahlabhängigen Anteil auf. Schmierungsart und Schmiervorgang, sowie Viskosität und Betriebstemperatur werden berücksichtigt. Diese Betrachtungsweise hat den Nachteil, dass *„die im lastunabhängigen Reibungsmoment dominierenden hydrodynamischen Verluste im Schmierstoff zu einem gewissen Teil doch lastabhängig sind.“* (SKF-Gruppe, 2008, S. 88)

Im zweiten Ansatz wird das gesamte Reibungsmoment in vier ursachenbezogene Teilmomente zerlegt, wobei das Gesamtreibungsmoment aus der Summe der Einzelmomente gebildet wird (SKF-Gruppe, 2008, S. 89).

$$M_{Reib} = M_{rr} + M_{sl} + M_{seal} + M_{drag} \quad [5]$$

M_{rr} ... Rollreibungsmoment in $N \cdot mm$

M_{sl} ... Gleitreibungsmoment in $N \cdot mm$

M_{seal} ... Reibungsmoment durch Berührungsdichtungen in $N \cdot mm$

M_{drag} ... Reibungsmoment infolge von Strömungs-, Plansch- oder Spritzverlusten

Thermische Bezugsdrehzahl

Nach ISO 15312 ist die thermische Bezugsdrehzahl genormt, welche eine Hilfsgröße zur Berechnung der thermisch zulässigen Höchstdrehzahl darstellt. Sie repräsentiert jene Drehzahl, bei welcher unter definierten Rahmenbedingungen sich im stationären Betrieb eine Lagertemperatur von 70 °C einstellt. Grundlage für die Berechnung der thermisch zulässigen Höchstdrehzahl ist die Wärmebilanz am Lager. Im stationären Zustand stellt sich ein Gleichgewicht zwischen der von der Drehzahl abhängigen Reibleistung und der temperaturdifferenzabhängigen Wärmeabfuhr ein. (Schaeffler Gruppe, 2006, S. 62-63)

2.2.4.5 Wälzlagerwerkstoffe

Die wichtigsten Anforderungen an Wälzlagerwerkstoffe sind nach Albert und Köttritsch (1987):

- Gute Festigkeitseigenschaften
- Hohe Härte
- Große Zähigkeit
- Gute Verschleißfestigkeit

Als Standardwerkstoff für Wälzlager wird der Wälzlagerstahl 100Cr6 (1.3505) eingesetzt. Bei größeren Bauteilabmessungen und Querschnitten kommt häufig der Werkstoff 100CrMnMo8 (1.3539) zum Einsatz, da aufgrund der zusätzlichen Legierungselemente eine bessere Durchhärtung erzielt wird. In den USA wird bevorzugt Einsatzstahl verwendet und bei besonderen Betriebsbedingungen finden vereinzelt Vergütungsstähle, rostfreie und warmfeste Stähle Verwendung. Die Wälzkörper werden auch aus Keramikwerkstoffen hergestellt. Aufgrund der hohen Härte, der Verschleißfestigkeit, der im Vergleich zu Stahlkugeln geringeren Reibung und des geringen Gewichtes eignen sich Wälzlager mit Keramikugeln besonders für hohe Drehzahlen, auch bei Fettschmierung. (Albert & Köttritsch, 1987, S. 13-15)

Tabelle 7 gibt einen Überblick über verschiedene zum Einsatz kommende Werkstoffe für die unterschiedlichen Komponenten eines Wälzlagers.

Tabelle 7 – Lagerwerkstoffe
(Schaeffler Gruppe, 2006, S. 99)

Werkstoff	Lagerkomponente – Beispiel
durchhärtender Chromstahl – Wälzlagerstahl nach ISO 683-17	Außen- und Innenring, Axialscheibe
HNS – High Nitrogen Steel	Außen- und Innenring
nichtrostender Stahl – Wälzlagerstahl nach ISO 683-17	Außen- und Innenring
Einsatzstahl	z.B. Außenring der Stützrollen
flamm- und induktionsgehärteter Stahl	Bolzen der Kurvenrollen
Stahlband nach EN 10139, SAE J403	Außenring der Nadelhülsen und Nadelbüchsen
Siliziumnitrid	Keramikkugeln
Messinglegierung	Käfig
Aluminiumlegierung	Käfig
Polyamid – thermoplastischer Kunststoff	Käfig
NBR, FPM, PUR	Dichtring

Eine Alternative zu verbreiteten Wälzlagerwerkstoffen stellt synthetischer Diamant dar. Aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit, Härte und Verschleißfestigkeit eignet sich dieses Material grundsätzlich sehr gut als Werkstoff für Wälzlager. In der folgenden Tabelle 8 sind die mechanischen Eigenschaften von Diamant, Stahl, Keramik und einigen weiteren Werkstoffen einander gegenübergestellt. (US Synthetic Bearings, 2014)

Tabelle 8 - Eigenschaften unterschiedlicher Werkstoffe
(US Synthetic Bearings, 2014)

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 ² K)	543	70	42.6	30	85
Fracture Toughness (MPa√m)	13-15	10-25	50	4	3.5-4
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

*ASI 4140 Steel, annealed at 815°C (1500°F) furnace cooled 11°C (20°F)/hour to 665°C (1230°F), air cooled, 25 mm (1 in.) round(1100°F) temper)

** PCD on PCD in H₂O, dynamic, dynamic

†Tungsten Carbide on Tungsten Carbide, static

‡Steel (Hard) on Steel (Hard), dynamic

YAt 100°C

Sources: 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

Stahlkugeln vs. Keramikugeln

Als Werkstoff für die Wälzkörper kommen primär Stahl und Keramik zum Einsatz. Wälzlager mit Keramikwälzkörpern werden als Hybridlager bezeichnet, welche einige Vorteile gegenüber konventionellen Lagern aufweisen. Die Wichtigsten sind nach SNFA-Gruppe (06/07):

- Geringere Dichte, daher reduzierte Zentrifugalkraft und höhere Höchstdrehzahlen

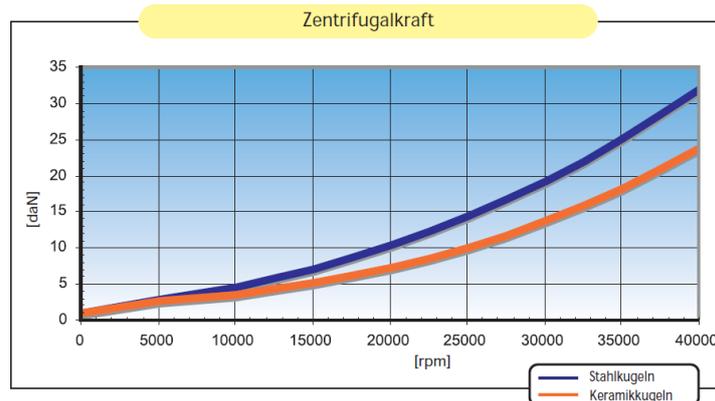


Abbildung 11 - Zentrifugalkraft Stahllager – Hybridlager (SNFA-Gruppe, 06/07, S. 21)

- Geringerer Reibbeiwert, folglich geringere Eigenerwärmung und Verlustleistung (Abbildung 12 – links)
- Höhere Steifigkeit (Abbildung 12 – mittig)
- Bessere Korrosions- und Verschleißbeständigkeit (Abbildung 12 – rechts)

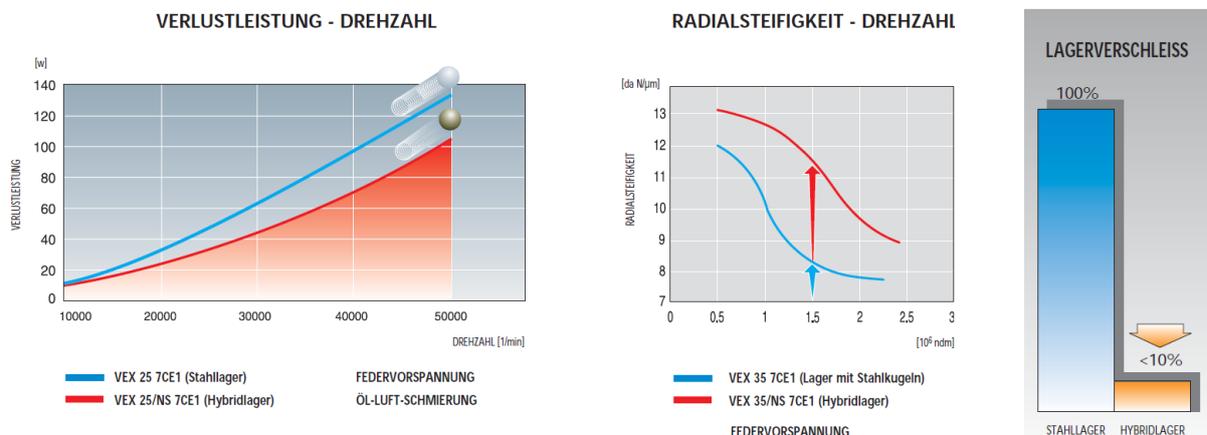


Abbildung 12 - Hybridlager vs. Stahllager: Verlustleistung, Steifigkeit, Verschleiß (SNFA-Gruppe, 06/07, S. 22)

In Tabelle 9 werden die wichtigsten Materialeigenschaften von Kugellagerstahl und -keramik verglichen.

Tabelle 9 - Vergleich Materialeigenschaften Hybridlager – Stahllager
(SNFA-Gruppe, 06/07, S. 22)

Materialeigenschaften			Keramik Si ₃ N ₄	Kugellagerstahl
Dichte	ρ	[g/cm ³]	3,19	7,80
Ausdehnungskoeffizient	α	[10 ⁻⁹ /°C]	20 - 1000 °C	3,20
			20 - 300 °C	-
E-modul	E	[kN/mm ²]	20 °C	315
Poissonsche Zahl	ν			0,26
Härte HV10			20 °C	1700
Bruchzähigkeit	K _{IC}	[MN/m ^{3/2}]	20 °C	6 - 8
Wärmeleitfähigkeit	λ	[W/m °C]	20 °C	30-40
Temperatureinsatzgrenze		[°C]		ca. 1000
Wärmebeständigkeit				ca. 300
Formbeständigkeit				gut
Korrosionsverhalten				gut
Magnetismus				schlecht
Elektr. Isolation				keiner
				ja
				gut
				schlecht

2.2.4.6 Lagerluft und Betriebsspiel

Lagerluft

Als Lagerluft wird bei konventionellen Lagern der Verschiebeweg des Innenringes im ausgebauten Zustand von der einen Grenzstellung zur anderen verstanden. Der Verschiebeweg in radialer Richtung wird als radiale Lagerluft bezeichnet, analog verhält es sich mit der axialen Lagerluft. Die radiale Lagerluft ist in fünf Gruppen von CN bis C5 eingeteilt. Einen Überblick gibt Abbildung 13. (Schaeffler Gruppe, 2006, S. 96)

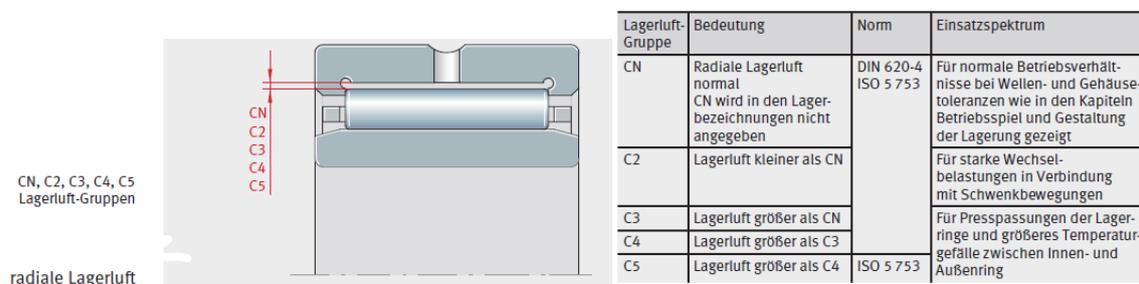


Abbildung 13 - radiale Lagerluft
(Schaeffler Gruppe, 2006, S. 96)

Betriebsspiel

Im Vergleich zur Lagerluft wird das Betriebsspiel s , veranschaulicht in Abbildung 14, am eingebauten, betriebswarmen Lager ermittelt. Es repräsentiert jenes Maß, um welches sich die Welle radial zwischen den Grenzstellungen verschieben lässt.

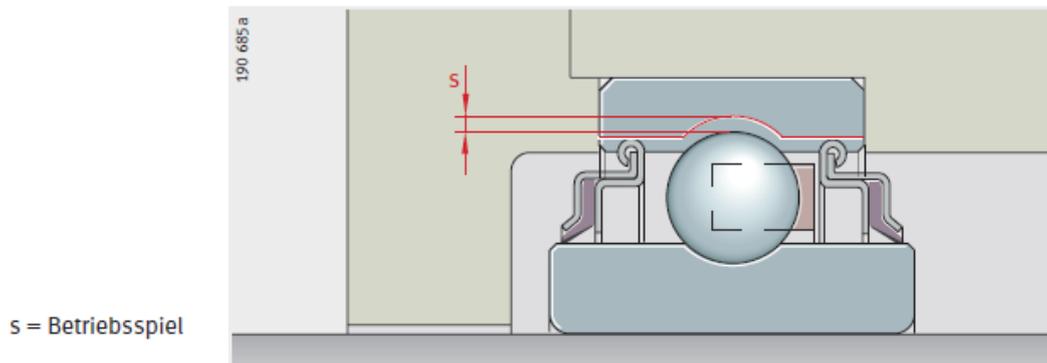


Abbildung 14 – Betriebsspiel
(Schaeffler Gruppe, 2006, S. 97)

Das Betriebsspiel soll größer als in der Standardausführung gewählt werden, wenn über die Welle Wärme zugeführt wird, bei nicht zu vernachlässigenden Wellendurchbiegungen und wenn Fluchtungsfehler ausgeglichen werden müssen (Schaeffler Gruppe, 2006, S. 97).

Berechnet wird das Betriebsspiel aus der radialen Lagerluft und deren passungsbedingten und temperaturbedingten Minderung nach folgender Beziehung (Schaeffler Gruppe, 2006, S. 97):

$$s = s_r - \Delta s_p - \Delta s_T \quad [6]$$

s ... radiales Betriebsspiel des eingebauten, betriebswarmen Lagers in μm

s_r ... radiale Lagerluft in μm

Δs_p ... passungsbedingte Minderung der radialen Lagerluft in μm

Δs_T ... temperaturbedingte Minderung der radialen Lagerluft in μm

2.3 Temperaturmessung zur Überwachung des Betriebszustandes

Eine sehr wirtschaftliche Methode um schmierstoffbedingte Wälzlagerschäden zu identifizieren stellt die Temperaturüberwachung des Lagers dar. Intakte Lager streben im stationären

Betrieb einer Beharrungstemperatur entgegen. Dieses Verhalten verdeutlicht Abbildung 15. Linkes Diagramm zeigt den Temperaturverlauf bei intakter Hauptspindellagerung einer Werkzeugmaschine. Das rechte Bild illustriert den Temperaturverlauf bei gestörter Loslagerfunktion. Es ist jener Punkt nach etwa 50 Minuten klar ersichtlich, bei welchem die Temperaturverläufe einen leichten Knick aufweisen. Für beide Fälle gilt $n * d_m = 750000 \frac{mm}{min}$. (FAG, 2000, S. 5)

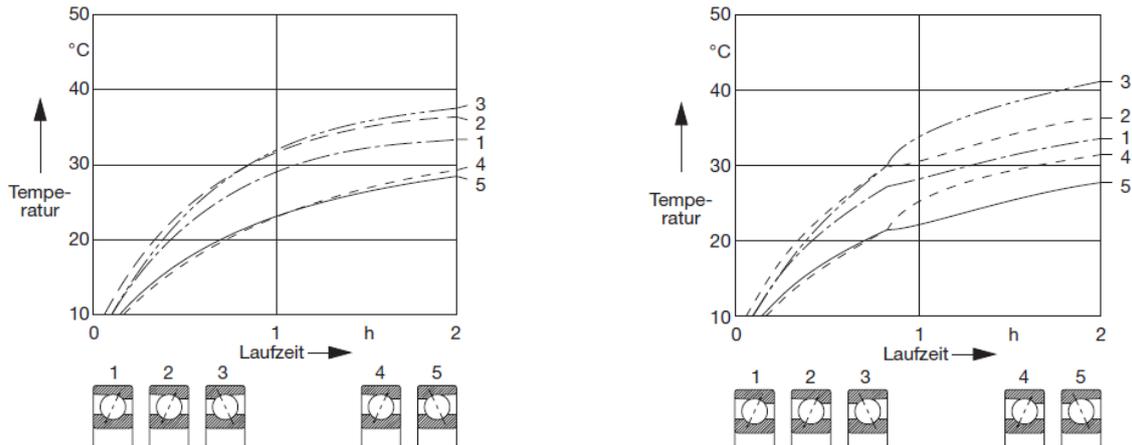


Abbildung 15 - Temperaturmessung zur Schadenserkennung
(FAG, 2000, S. 5)

Als weiteres Beispiel für die Temperaturüberwachung einer Lagerung ist Abbildung 16 angeführt. Sie stellt den Temperaturverlauf eines Lagers bei versagender Fettschmierung dar, Versuchsbedingung: $n * d_m = 200\ 000 \frac{mm}{min}$. Die Lagertemperatur strebt keiner Beharrungstemperatur entgegen. (FAG, 2000, S. 5)

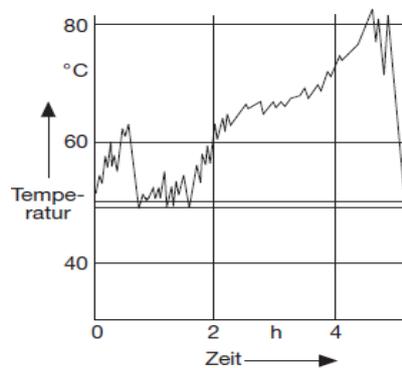


Abbildung 16 - Temperaturverlauf bei versagender Fettschmierung
(FAG, 2000, S. 5)

2.4 Schrägkugellager

In den Kapiteln 2.4.1 bis 0 werden die nachfolgend angeführten Schrägkugellagerbauformen einander in den Punkten Tragfähigkeit, Maximaldrehzahl und Preis gegenübergestellt. Die Daten für die einzelnen Diagramme stammen von der *Firma FAG*. Speziell in Bezug auf die Drehzahl unterscheiden sich die Angaben der einzelnen Hersteller mitunter signifikant.

Einreihige Schrägkugellager

Abbildung 17 zeigt schematisch ein konventionelles einreihiges Schrägkugellager. Diese können je nach Ausführung hohe Radial- und Axialkräfte aufnehmen. Der Druckwinkel α bestimmt maßgeblich die axiale Belastbarkeit des Lagers, je größer dieser ist umso höhere Axialkräfte sind zulässig. Allerdings können axiale Belastungen nur in einer Richtung aufgenommen werden, daher werden sie meist gegen ein weiteres Lager angestellt. Schrägkugellager gibt es in unterschiedlichen Ausführungen, eine Auswahl der wichtigsten ist nachfolgend aufgelistet. (Schaeffler Gruppe, 2006, S. 233)

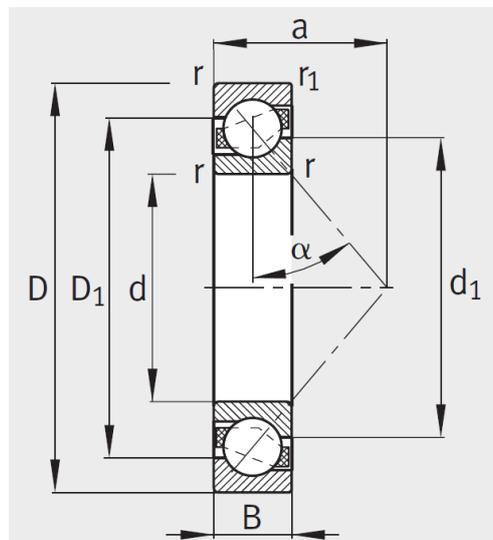


Abbildung 17 - Einreihiges Schrägkugellager
(Schaeffler Gruppe, 2006, S. 240)

Zweireihige Schrägkugellager

Zweireihige Schrägkugellager entsprechen hinsichtlich ihres Aufbaus zwei einreihigen Schrägkugellagern, paarweise in O-Anordnung verbaut. Diese Ausführung kann Axialkräfte

in beide Richtungen aufnehmen und ist empfindlich gegenüber Schrägstellung. (Albert & Kötritsch, 1987, S. 26)

Vierpunktlager

Vierpunktlager entsprechen einreihigen Schrägkugellagern, welche einen geteilten Innenring aufweisen. Sie können Axialkräfte in beiden Richtungen aufnehmen und erfordern bedeutend weniger Bauraum als zweireihige Schrägkugellager. Sie sind für hohe Drehzahlen geeignet, erfordern jedoch eine gewisse axiale Mindestbelastung um die Reibung zu minimieren. Die Axialkraft soll so hoch sein, dass die Wälzkörper die Laufbahnen des Innen- und Außenringes je nur in einem Punkt berühren. Dies ist der Fall, wenn $F_a \geq 1,2 * F_r$ gegeben ist. (Schaeffler Gruppe, 2006, S. 317ff)

Spindellager

Diese Ausführungsvariante entspricht einem einreihigen Schrägkugellager, wobei die einzelnen Komponenten sehr geringe Toleranzen aufweisen. Folglich werden Spindellager primär dort eingesetzt, wo die Anforderungen an Laufgenauigkeit und Höchstdrehzahl sehr hoch sind. Eines der Haupteinsatzgebiete stellt die Lagerung von Spindeln in Werkzeugmaschinen dar, woher sich auch die Bezeichnung ableitet. (Schaeffler Gruppe, 2006, S. 273)

2.4.1 Maximaldrehzahl

Die zulässigen Höchstdrehzahlen nehmen mit zunehmendem Lagerdurchmesser rapide ab. Die höchsten zulässigen Drehzahlen werden mit Spindellagern erreicht, wobei die in Abbildung 18 verwendeten Werte bei Öl-Minimalschmierung gültig sind. Für andere Schmierungsvarianten sind die Maximaldrehzahlen entsprechend niedriger. Die Hybridausführungen erreichen um 30 % - 40 % höhere Drehzahlen als die Ausführungen mit Stahlwälzkörpern.

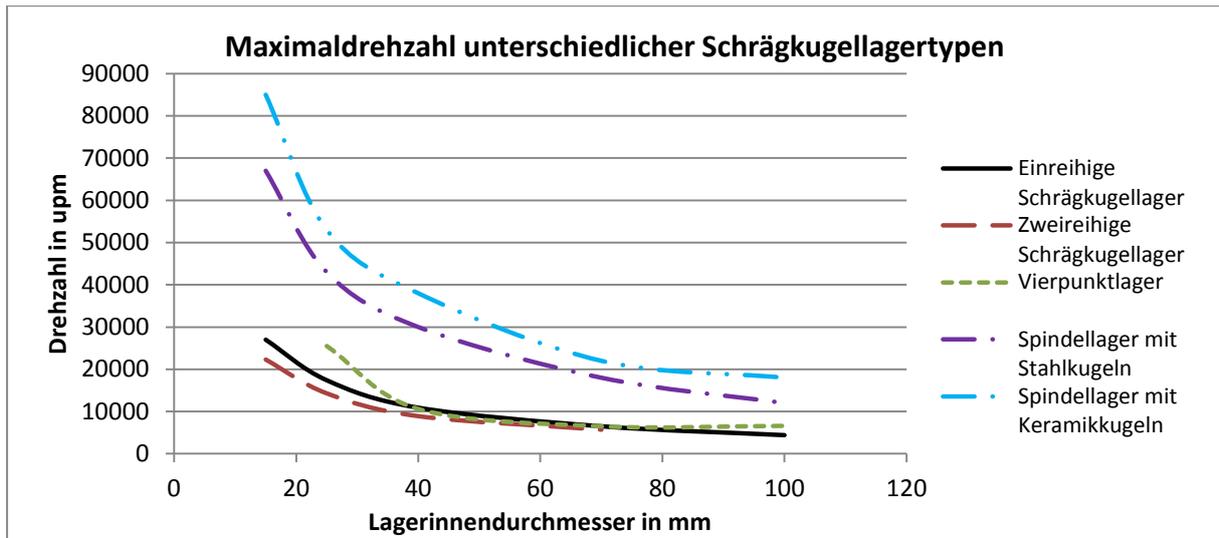


Abbildung 18 - Maximaldrehzahl unterschiedlicher Schrägkugellagertypen

2.4.2 Statische und dynamische Tragfähigkeit

Bezüglich dynamischer (Abbildung 19) und statischer Tragfähigkeit (Abbildung 20) ergibt sich ein ähnlicher Verlauf. Vierpunktlager weisen die größten Tragfähigkeiten auf, gefolgt von zweireihigen Schrägkugellagern. Einreihige Schrägkugellager und Spindellager mit Stahlkugeln unterscheiden sich kaum, die geringste Tragfähigkeit weisen Hybridlager auf. Bei kleinen Durchmessern liegen die dynamischen Tragfähigkeiten geringfügig über den statischen, mit zunehmender Lagergröße verschwindet diese Diskrepanz vollständig. Bei den größten der angeführten Lager liegt die statische Tragfähigkeit höher als die Dynamische.

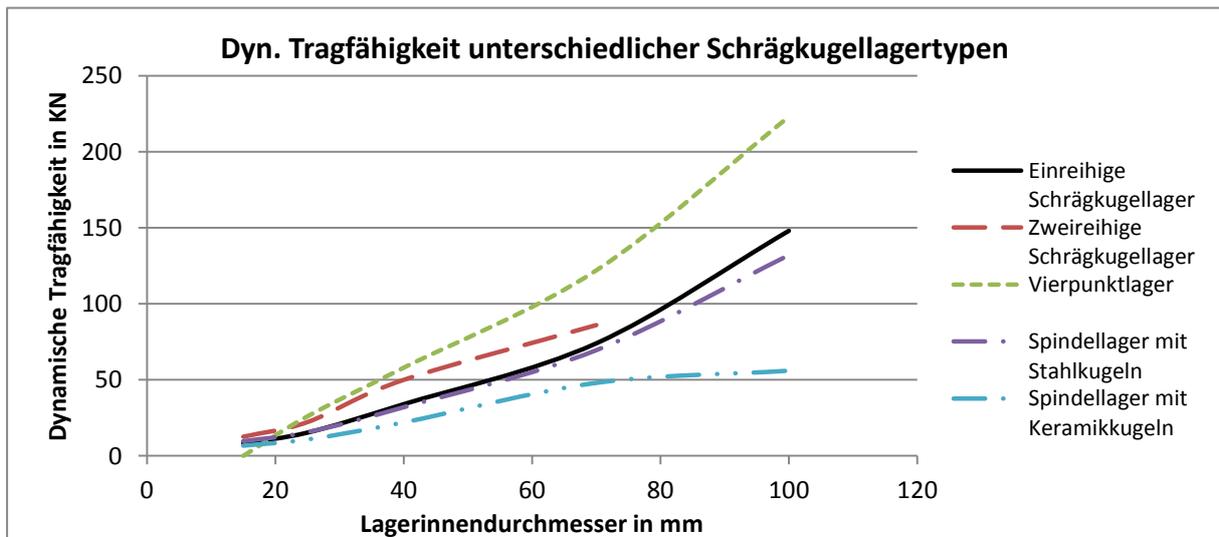


Abbildung 19 - Dynamische Tragfähigkeit unterschiedlicher Schrägkugellagertypen

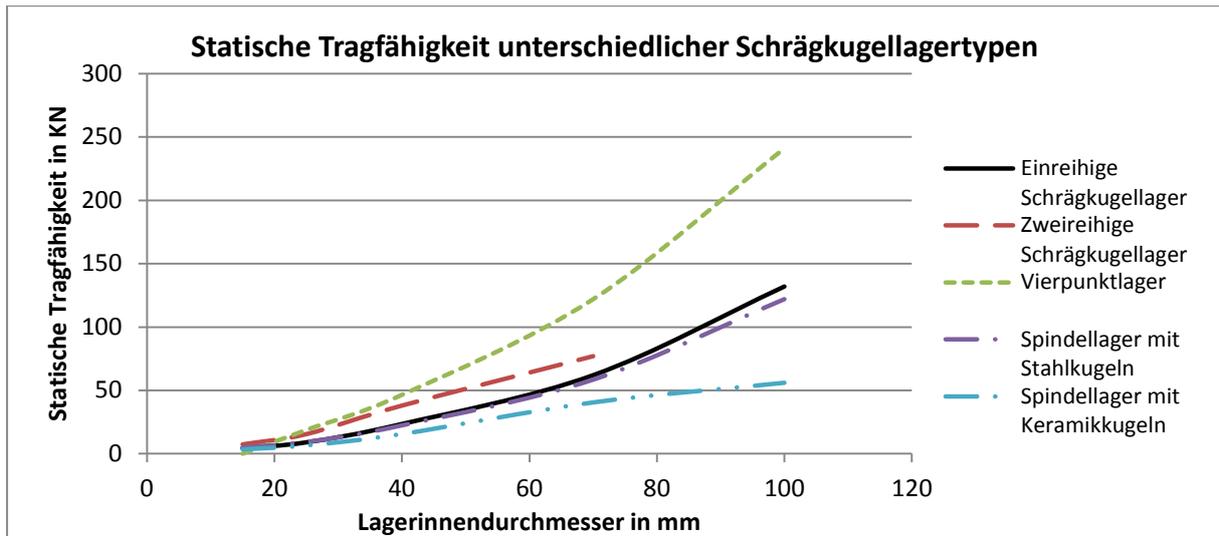


Abbildung 20 - Statische Tragfähigkeit unterschiedlicher Schrägkugellagertypen

2.4.3 Anschaffungskosten

Abbildung 21 verdeutlicht die unterschiedlichen Anschaffungskosten der betrachteten Schrägkugellagerausführungen. Spindellager sind bedeutend teurer als die weiteren betrachteten Ausführungen, welche sich bezüglich des Preises nur geringfügig unterscheiden. Lediglich bei Vierpunktlagern steigt der Preis bei den größten miteinbezogenen Ausführungen stärker als bei den beiden anderen Standardvarianten.

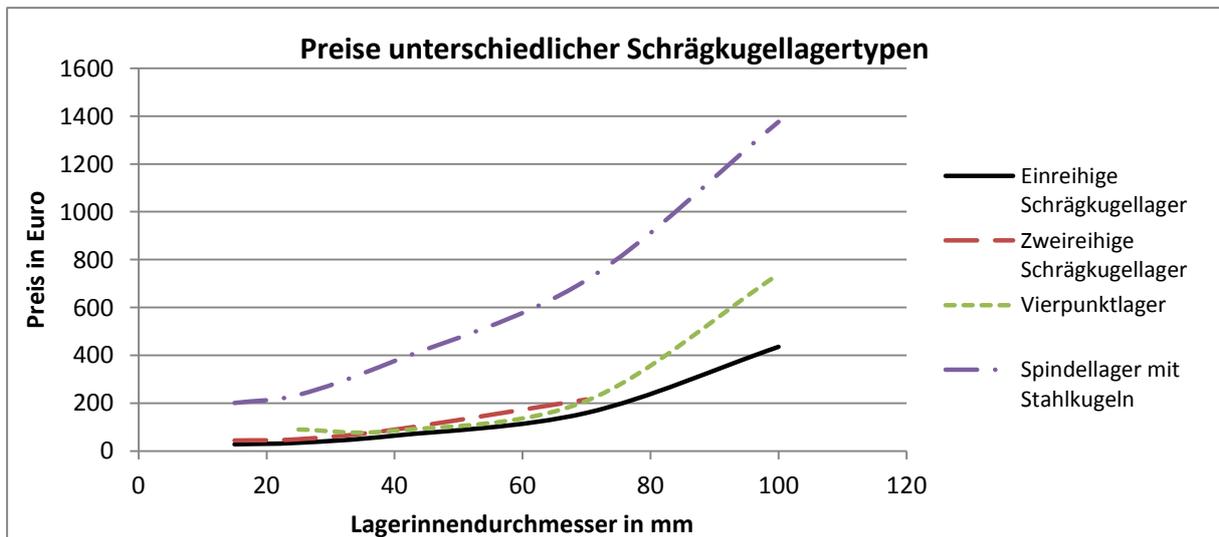


Abbildung 21 - Preise unterschiedlicher Schrägkugellagertypen

2.4.4 Gegenüberstellung Wälzkörperdurchmesser - Maximaldrehzahl

Mit steigendem Wälzkörperdurchmesser sinkt die Maximaldrehzahl der Lager. Der Verlauf in Abbildung 22 wurde aus den Daten eines Spindellagers der Firma GMN generiert. Ursache für die Reduktion der Maximaldrehzahl ist die zunehmende Fliehkraft der Wälzkörper und des Außenringes, welcher sich mit steigendem Wälzkörperdurchmesser vergrößert.

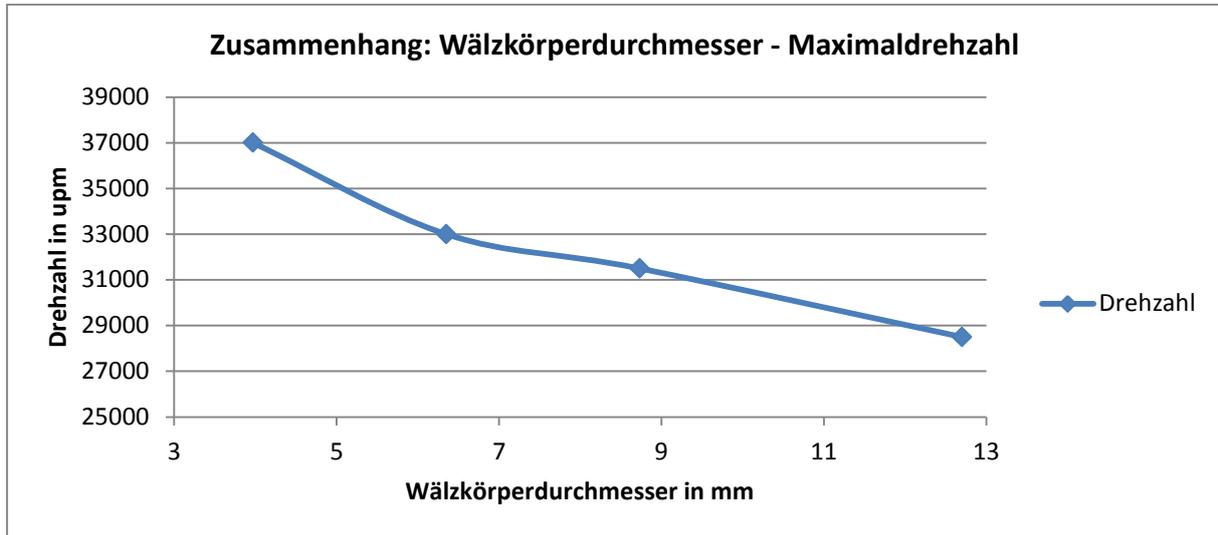


Abbildung 22 - Zusammenhang Wälzkörperdurchmesser – Maximaldrehzahl

3. Methodische Prüfstandsentwicklung

Im Rahmen der Entwicklung dieses Prüfstandes wird die VDI-Richtlinie für methodisches Konstruieren (VDI 2222) angewendet, nach welcher der Konstruktionsprozess in vier Stufen eingeteilt wird (Conrad, 2010, S. 77):

- Analysieren/Planen:
Klären der Aufgabe / Erfassen der Anforderungen
- Konzipieren:
Funktion, Wirkprinzip und Lösungsprinzip festlegen
- Entwerfen:
Gestaltung der Teile bis zum fertigen Produkt
- Ausarbeiten:
Ausarbeiten der Unterlagen

3.1 Analysieren und Planen

3.1.1 Klären der Rahmenbedingungen

Anfangs werden die Aufgabenstellung und die Rahmenbedingungen durch das Stellen von Fragen stellen und Diskutieren behandelt. Nachfolgend sind jene Fragen nach Conrad (2010) aufgelistet, welche im Rahmen dieser Masterarbeit als zielführend erachtet werden. (Conrad, 2010, S. 87)

1. Welches Kernproblem muss für die Aufgabe gelöst werden?
2. Welchen Zweck muss die Aufgabe erfüllen?
3. Welche Produkteigenschaften sind zu erfüllen?
4. Welche Forderungen („*muss*“) und welche Wünsche („*soll*“) sind zu erfüllen?
5. Welche Bedingungen müssen beachtet werden?
6. Welche Schwachstellen können auftreten?

1. Welches Kernproblem muss für die Aufgabe gelöst werden?

Das Kernproblem stellt die Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit von Wälzlagern mit Fettschmierung dar. Dabei sollen mögliche Einflussparameter eruiert und deren Einfluss festge-

stellt werden. Zur Evaluierung der Wärmeleitfähigkeit ist die Generierung eines Temperaturgradienten zwischen Innen- und Außenring des Lagers notwendig.

2. Welchen Zweck muss die Aufgabe erfüllen?

Der Zweck besteht darin, allgemeine Aussagen über das thermische Verhalten von Wälzlagern bei der Variation gewisser Betriebsparameter wie Druck und Drehzahl zu treffen. Dabei stellt die Lagerung von Schwungrad-Energiespeichern die praktische Anwendung dar. Somit sollen am Prüfstand jene Einflussparameter und Lager untersucht werden, welche für den Einsatz in Schwungradspeichern relevant sind.

3. Welche Produkteigenschaften sind zu erfüllen?

Mit Hilfe dieses Prüfstandes sollen sowohl transiente, als auch stationäre Wärmeleitvorgänge untersucht werden können. Aus diesem Grund muss der Prüfstand für einen Dauerbetrieb von mehreren Stunden geeignet sein, sodass sich ein thermisch stationärer Zustand einstellen kann. Weiters sollen möglichst viele relevante Parameter auf einfache Weise variiert werden können.

4. Welche Forderungen („*muss*“) und welche Wünsche („*soll*“) sind zu erfüllen?

Die Möglichkeit der Variation bzw. Steuerung von Drehzahl und Druck stellen Muss-Kriterien dar, da Schwungräder unter starkem Unterdruck und bei hohen Drehzahlen laufen. Als geringster erforderlicher Absolutdruck werden 10 Pa festgelegt, da dies den unteren Druckbereich darstellt, bei welchem Schwungräder betrieben werden. Aus dieser Bedingung kann abgeleitet werden, dass ein Antriebskonzept entwickelt werden muss, welches vakuumtauglich ist.

Weiters stellt die Möglichkeit der Adaption des Prüfstandes zum Einbau unterschiedlicher Wälzlager ein Soll-Kriterium dar.

Optimal wäre es, wenn die gesamte Bandbreite an Drehzahlen abgedeckt werden würde, welche bei Schwungradspeichern auftreten. Folglich soll ein Drehzahlspektrum zwischen 0 und 40000 upm abgedeckt werden, wobei jene Bereiche mit hohen Gradienten fein aufgelöst werden sollen. Dies stellt ein Wunschkriterium dar.

5. Welche Bedingungen müssen beachtet werden?

Aufgrund der notwendigen Temperaturgradienten müssen die eingesetzten Bauelemente erhöhten Temperaturen standhalten ohne durch auftretende Kräfte beschädigt oder unzulässig

verformt zu werden. Eine weitere Bedingung stellt die Vakuumtauglichkeit der verwendeten Elemente dar. Die Vakuumkammer für den Prüfstand ist bereits vorhanden, weshalb der weitere Aufbau an diese angepasst wird.

Außerdem muss die Maschinendynamik des Prüfstandes beachtet werden um den Betrieb bei kritischen Drehzahlen zu vermeiden.

6. Welche Schwachstellen können auftreten?

Eine grundlegende Herausforderung stellt die Tatsache dar, dass die genauen Anforderungen an einen Prüfstand für die Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit im Vorfeld genau abschätzbar sind. Im schlimmsten Fall könnte es passieren, dass die Anforderungen an die Messgenauigkeit, etc. so hoch sind, dass keine repräsentativen Ergebnisse mit einem gewissen Prüfstandskonzept gewonnen werden können.

Eine weitere große Herausforderung stellt das hohe Maß an Interdisziplinarität dar. Folglich ergeben sich viele potentielle Problembereiche, wobei für jeden dieser Bereiche Experten aus unterschiedlichen Fachgebieten zu Rate gezogen werden müssen. Dabei ist es äußerst wichtig, den Überblick während jeden Stadiums der Entwicklung, Fertigung, Inbetriebnahme und des Betriebes zu wahren. Weiters besteht die Gefahr, dass sich unterschiedliche Teilbereiche und Schnittstellen gegenseitig beeinflussen. Als Beispiel sei zu diesem Punkt die Heizung erwähnt. Die Verwendung einer Induktionsheizung hat einen starken Einfluss auf das Rauschen der Messsignale. Durch den Einsatz einer Wirbelstromheizung wird dieses Problem zwar gelöst, dafür hat eine Wirbelstromheizung einen großen Einfluss auf den Antrieb, da sie ein Verlustmoment bezogen auf die rotierende Welle verursacht. Die Heizleistung muss vom Antrieb zusätzlich aufgebracht werden und dieser Heizungstyp versagt bei geringen Drehzahlen. In diesem Fall entstehen durch die Lösung eines Problems mehrere Weitere.

Als Abschluss des Klärens der Rahmenbedingungen wird eine Anforderungsliste erstellt. Sie stellt eine strukturierte und übersichtliche Zusammenfassung der eben erarbeiteten Punkte dar. In weiterer Folge wird sie als Ausgangsbasis für die Erarbeitung und Bewertung der Lösungsansätze herangezogen.

3.1.2 Anforderungsliste

Die Anforderungsliste dient als Hilfestellung beim Definieren und Sammeln der Forderungen, Aufgaben und Wünsche. Dabei sind in ihr alle wichtigen Daten und Informationen in Bezug

auf den Prüfstand in einer strukturierten und übersichtlichen Art und Weise enthalten. Mit „F“ sind die Forderungen, welche erfüllt werden müssen und mit „W“ die Wünsche, welche nach Möglichkeit erfüllt werden sollen, gekennzeichnet (Conrad, 2010, S. 89ff).

Tabelle 10 - Anforderungsliste Teil 1

		<u>Anforderungsliste</u>		F = Forderung W = Wunsch
		Thermische Betrachtung von Wälzlagern		Bearbeiter und Verantwortlicher: Peter Haidl
		Prüfstandskonzept		
Anforderungen				
Forderung / Wunsch	Nr.	Bezeichnung	Werte, Daten, Erläuterungen, Änderungen	
F	1	Funktion: Messung der erforderlichen Parameter zur Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit von Wälzlagern sowie die Variation etwaiger Einflussfaktoren	Es muss ein Temperaturgradient zwischen Innen- und Außenring des Lagers geschaffen werden, was durch eine Heizung umgesetzt wird. Weiters muss der Wärmestrom vor und nach dem Lager ermittelt werden sowie die Temperaturen der Übergangsflächen von Innen und Außenring zur Welle bzw. zum Gehäuse	
	2	Allgemeine Anforderungen		
F	2.1	Kosten	Gesamtkosten gering halten und bereits verfügbares Material verwenden	
F	2.2	Montageaufwand	Die Montage soll möglichst einfach und schnell durchführbar sein	
F	2.3	Fertigungsaufwand	Der Fertigungsaufwand soll möglichst gering sein - Zurückgreifen auf in der Industrie verfügbare Komponenten und Module	
W	2.4	Zeitgerechte Umsetzbarkeit	Beinhaltet etwaige Lieferzeiten für Material, benötigtes Sonderwerkzeug, etc.	
	3	Heizung	Ist erforderlich um den notwendigen Temperaturgradienten zu erzeugen	
F	3.1	Leistung	Ausreichende Leistung um signifikante Temperaturgradienten zu erhalten	
F	3.2	Montierbarkeit in engem Raum	Das Vakuumgehäuse ist bereits vorhanden und die Heizung muss darin verwendet werden können	
F	3.3	Energieversorgung	Die Heizung muss durch das Gehäuse hindurch ohne Beeinträchtigung des Vakuums versorgt werden	
W	3.4	Kein Einfluss auf die Drehzahl		
W	3.5	Kein Einfluss auf die Güte und die Übertragung der Messsignale		
W	3.6	Punktuelle Wärmezufuhr	Die Wärmeeinbringung soll auf einen kleinen Bereich konzentriert werden	

Tabelle 11 - Anforderungsliste Teil 2

		<u>Anforderungsliste</u>		F = Forderung W = Wunsch
		Thermische Betrachtung von Wälzlagern		Bearbeiter und Verantwortlicher: Peter Haidl
		Prüfstandskonzept		
Anforderungen				
Forderung / Wunsch	Nr.	Bezeichnung	Werte, Daten, Erläuterungen, Änderungen	
	4	Antriebskonzept	Ist erforderlich um den Parameter Drehzahl variieren zu können	
F	4.1	Drehmoment	Das Drehmoment muss größer sein als das Reibmoment des Versuchsaufbaus	
F	4.2	Vakuumtauglichkeit	Das Antriebskonzept muss in der vorgesehenen Ausführung den Antrieb im Vakuum ermöglichen	
F	4.3	Dauerbetriebsfähigkeit	Der Motor muss für Dauerbetrieb geeignet sein	
F	4.4	Drehzahlbereich	Ein Muss-Drehzahlbereich zwischen 1000 upm und 10000 upm muss abgedeckt werden	
W	4.5	Erweiterter Drehzahlbereich	Möglichst großer Drehzahlbereich, von unter 10 upm bis 50 000 upm	
W	4.6	Regelbarkeit	Die Drehzahl soll möglichst konstant gehalten werden können	
	5	Messtechnik		
F	5.1	Temperaturen - Steg	Die Temperaturunterschiede am Steg werden gering ausfallen, daher ist eine hohe Genauigkeit notwendig	
F	5.2	Temperaturen - Welle	Messung an rotierendem Objekt erforderlich, die erforderliche Genauigkeit ist geringer als beim Steg, da die zu erwartenden Gradienten größer sind	
F	5.3	Temperaturen - Sonstige	Temperaturmessung zur Betriebsüberwachung	
F	5.4	Drehzahl	Überprüfung der tatsächlichen Drehzahl	
F	5.5	Vakuumdurchführung	Eine Durchführung der Messsignale aus dem Vakuum ist erforderlich	
W	5.6	Modifikationen gering halten	Die Messhardware soll möglichst wieder in den Ausgangszustand zurückversetzt werden können	
W	5.7	Automatische Aufzeichnung	Die Messwerte sollen möglichst vollautomatisch aufgezeichnet und gesichert werden	

3.2 Konzeptionsphase

Phase zwei der VDI-Richtlinie für methodisches Konstruieren ist die Konzeptionsphase. In dieser Phase werden die Funktion und das Wirkprinzip bzw. Lösungsprinzip festgelegt.

„Das Konzipieren umfasst alle Tätigkeiten zur prinzipiellen Festlegung der Lösung. Durch Abstrahieren und Funktionsanalyse ist ein geeignetes Lösungsprinzip zu finden und ein Konzept zu erarbeiten.“ (Conrad, 2010, S. 113)

Ziel dieser Phase stellt folglich die Erarbeitung eines Lösungsprinzips dar. Im Rahmen dieser Masterarbeit wird in Kapitel 3.2.1 die Kreativtechnik „*Mind-Map*“ verwendet um unterschiedliche Lösungsansätze zu erarbeiten. Anschließend müssen die erarbeiteten Lösungsansätze bewertet werden um unpassende Lösungen frühzeitig auszuschließen.

Die Bewertung wird direkt im Anschluss an die „*Mind-Map*“ in Kapitel 3.2.2 durchgeführt und liefert als Ergebnis die Ansätze, mit welchen die einzelnen Anforderungen erfüllt und potentielle Probleme gelöst werden. Jene Ansätze, welche sich bei der Bewertung durchgesetzt haben, sind in der „*Mind-Map*“ mit einem Häkchen markiert um die Übersichtlichkeit zu erhöhen.

3.2.1 Mind-Map

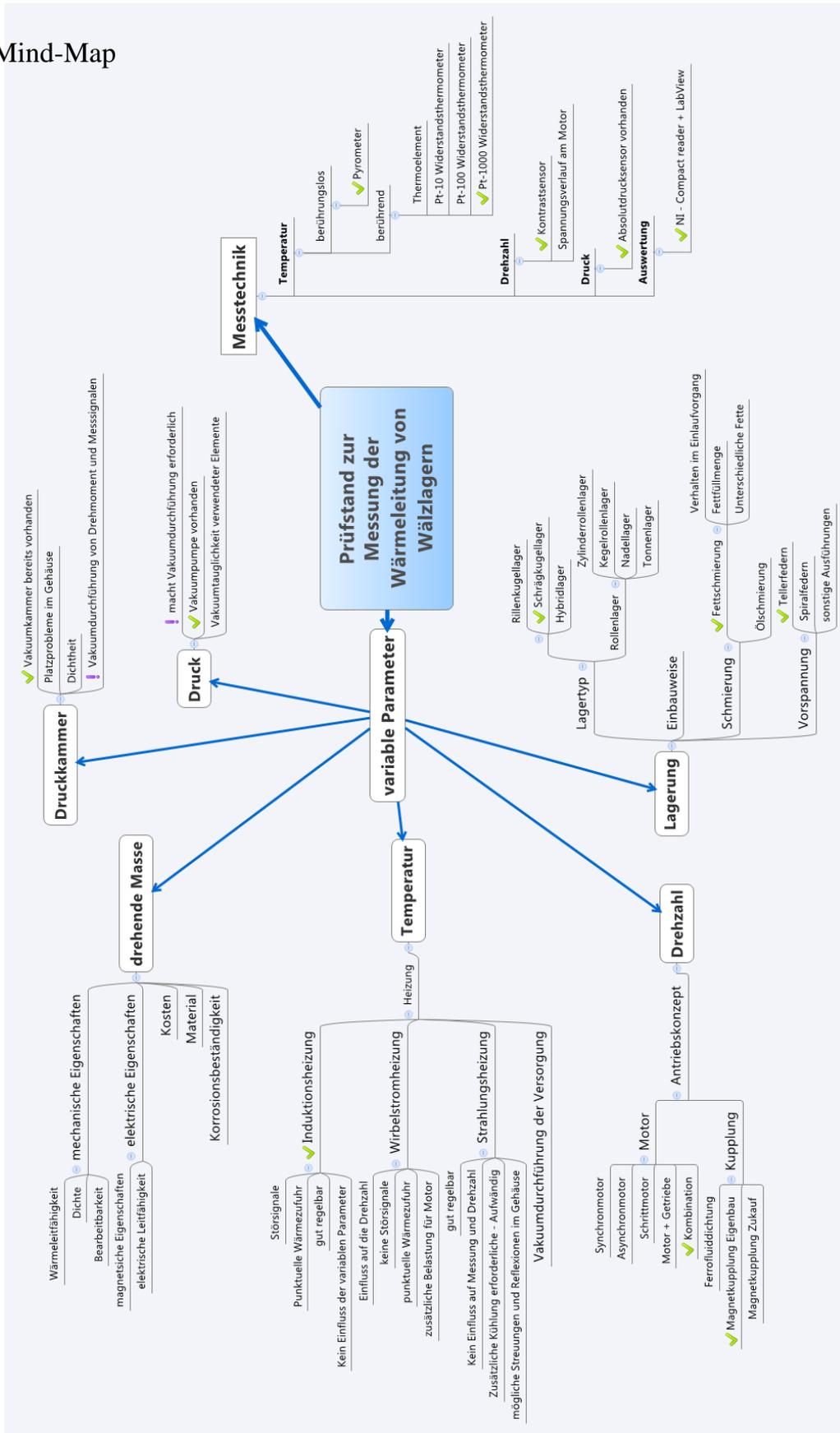


Abbildung 23 – Mind-Map

Den Ausgangspunkt für die „*Mind-Map*“ in Abbildung 23 stellt die Aufgabenstellung dar, wie sie in der Anforderungsliste in Kapitel 3.1.2 definiert ist. Ausgehend davon ergeben sich die Hauptzweige: variable Parameter und Messtechnik. Für die Erstellung des Zweiges Messtechnik und der Unterkategorie Heizung wurden Experten des *Instituts für Elektrische Messtechnik und Messsignalverarbeitung* der *TU-Graz* zu Rate gezogen, welche auch bei der praktischen Umsetzung involviert waren.

Es gliedert sich die Messtechnik in die Auswertung und die Erfassung der unterschiedlichen physikalischen Größen, welche im Rahmen dieser Arbeit von Interesse sind. Dies sind der Druck, die Temperatur und die Drehzahl. Eine weitere Unterteilung der Temperaturmessung kann in berührende und berührungslose Messverfahren unternommen werden. Zu den berührenden Temperatursensoren gehören die sogenannten Widerstandsthermometer Pt-10, Pt-100 und Pt-1000 sowie die Gruppe der Thermoelemente. Zu den berührungslosen Sensoren zählt die Gruppe der Pyrometer.

Zur Druckmessung kommt ein Drucksensor zum Einsatz, welcher Teil des Inventars des *Instituts für Maschinenelemente und Entwicklungsmethodik* ist.

Mittels eines Kontrastsensors und eines Oszilloskops wird die Drehzahl der Welle gemessen.

Der Ast „*variable Parameter*“ gliedert sich in die Punkte Druck, Druckkammer, drehende Masse, Temperatur, Drehzahl und Lagerung. Daraus ergeben sich folgende zu erwartende grundlegende Einflussparameter auf das Wärmeleitverhalten von Wälzlagern:

- Umgebungsdruck
- Temperatur
- Lagertyp und Größe
- Vorspannung
- Drehzahl
- Schmierung

3.2.1.1 Drehzahl

Als Forderung der Anforderungsliste aus Kapitel 3.1.2 muss die Drehzahl eine variable Größe darstellen. Damit der Parameter Drehzahl im Zuge der Untersuchungen variiert werden kann

ist die Entwicklung eines Antriebskonzeptes notwendig. Dieses umfasst neben der Wahl des Motors auch dessen Anbindung an die Welle. Aufgrund des bereits vorhandenen Vakuumgehäuses ist der Betrieb des Motors im Gehäuse aus Platzgründen ausgeschlossen. Folglich muss durch eine Kupplung der Motor durch das Gehäuse hindurch die Welle des Prüfstandes antreiben. Zu diesem Zweck werden zwei mögliche Ansätze näher betrachtet. Den ersten Ansatz stellt eine Magnetkupplung dar, welche entweder selbst entwickelt, konstruiert und gebaut oder zugekauft wird. Bei der zweiten Möglichkeit handelt es sich um eine Ferrofluidichtung. Im Rahmen der im Anschluss folgenden Bewertung in Kapitel 3.2.2.3 fällt die Wahl auf die Eigenkonstruktion der Magnetkupplung.

Für die Wahl des Motors stehen nach Rücksprache und Vorauswahl mit dem *Institut für Elektrische Messtechnik und Messsignalverarbeitung* der *TU-Graz* folgende Ansätze in der engeren Auswahl:

- Modellbau-Synchronmotor mit dazugehöriger Modellbausteuerung
- Drehspindel-Asynchronmotor
- Schrittmotor
- Motor + Getriebe
- Kombinationen der oben genannten

Die Entscheidung für eine Kombination aus Synchronmotor und Schrittmotor wird in Kapitel 3.2.2.2 beschrieben.

3.2.1.2 Lagerung

Einen weiteren Aspekt stellt die Gestaltung der Lagerung dar. Da sich diese Masterarbeit am Einsatz in Schwungrädern orientiert, werden auch jene Lager untersucht, welche bei solchen Schwungrädern zum Einsatz kommen. Konkret handelt es sich dabei um Präzisions-Schrägkugellager für geringe Vorspannung und hohe Drehzahlen der Firma *SKF* mit der Bezeichnung *7008 ACEGA/P4A*. Die Lager werden in X-Anordnung eingebaut und als Schmierung kommt Fett zum Einsatz, wie aus Kapitel 3.1.1 hervorgeht. Die Lagerung wird mit einer Kraft von 45 N vorgespannt, was durch den Einsatz von Tellerfedern realisiert wird. Die Wahl der Schmierung, Vorspannung und Einbauweise wurde unter Rücksprache mit Experten der Firma *SKF* getroffen.

3.2.1.3 Temperatur

Ein Subkapitel der Temperatur ist die Heizung, welche in Induktionsheizung, Wirbelstromheizung und Strahlungsheizung unterteilt wird. Jedes dieser Heizkonzepte hat spezifische Vor- und Nachteile, worauf in Kapitel 3.2.2.1 genauer eingegangen wird.

3.2.1.4 Druck, Druckkammer

Um die Messungen bei Unterdruck durchführen zu können ist ein vakuumdichter Prüfaufbau sowie die Möglichkeit des Evakuierens erforderlich. Herzstück des Prüfstandsbaus stellt eine auf Vakuumdichtheit geprüfte Kammer dar. Diese ist bereits vorhanden, weshalb sich der weitere Aufbau des Prüfstandes an dieser orientiert. Aufgrund des im Prüfstand während der Versuche vorherrschenden Unterdrucks müssen die verwendeten Elemente (Sensoren, Schmierung der Lager, Heizung, etc.) für den Betrieb in starkem Unterdruck geeignet sein. Weiters wird eine Durchführung der Messsignale sowie der Drehbewegung des Antriebes durch die hermetische Gehäusewand erforderlich, welche Kapitel 3.2.1.1 genauer behandelt.

Zum Evakuieren des Gehäuses wird eine Drehschieberpumpe mit der Bezeichnung *E2M2* der Firma *Edwards High Vacuum International* verwendet. Diese wird vom *Institut für Elektrische Messtechnik und Messsignalverarbeitung* bereitgestellt. Die Eckdaten fasst Tabelle 12 zusammen.

Tabelle 12 - Datenblatt Pumpe E2M2

Drehschieberpumpe E2M2			
Maximales Saugvermögen		2,8	$\frac{m^3}{h}$
Maximale Saugleistung	(Pneurop)	2,4	$\frac{m^3}{h}$
Motordrehzahl		1450	<i>upm</i>
Endvakuum	ohne Gasballast (Teildruck)	$2,5 * 10^{-2}$	<i>Pa</i>
	ohne Gasballast (Gesamtdruck)	$1 * 10^{-1}$	<i>Pa</i>
	mit maximalem Gasballast (Teildruck)	3	<i>Pa</i>
Maximaler Einlaßdruck	(Wasserdampf)	$15 * 10^2$	<i>Pa</i>
Maximaler Durchsatz	(Wasserdampf)	0,03	$\frac{kg}{h}$
Gewicht		18,2	<i>kg</i>

3.2.1.5 Drehende Masse

Wesentliche Aspekte des Zweiges *drehende Masse* stellen der *Preis*, *chemische* und *mechanische Eigenschaften*, im Besonderen die *Wärmeleitfähigkeit*, dar.

3.2.2 Bewertung der Ansätze

Im folgenden Kapitel werden die erarbeiteten Lösungsansätze zu den Funktionsgruppen *Kupplung*, *Motor* und *Heizung* in den Tabelle 13 bis 15 bewertet. Als Mittel zur Bewertung wird die Bewertungsliste verwendet, wie sie nach Richtlinie VDI-2225 vorgesehen ist. Basis für die Bewertung stellt eine Punkteskala zwischen null und vier Punkten dar. Bewertet werden die unterschiedlichen Varianten, jeweils in unterschiedlichen Bewertungskriterien. Dabei orientieren sich die Bewertungskriterien stark an der Anforderungsliste aus Kapitel 3.1.2. Jedem Bewertungskriterium wird eine Gewichtung zwischen null und eins zugesprochen, wobei die Summe der Gewichtungen den Wert Eins ergeben muss. Die Gewichtung wird mit den jeweils vergebenen Punkten des Kriteriums multipliziert, woraus sich eine gewichtete Punktezahl ergibt. Diese gewichteten Punktezahlen der jeweiligen Varianten werden addiert und ergeben die Gesamtwertung einer Variante. Je höher die Gesamtwertung, desto besser geeignet ist diese. Ergebnis dieser Bewertung stellt ein Ranking dar, welches die Eignung der einzelnen Ansätze widerspiegelt. In der durchgeführten Bewertung ist jene Variante grau markiert, welche die höchste Gesamtpunktezahl erreicht und folglich im Rahmen dieser Arbeit umgesetzt wird. Es handelt sich trotz der möglichst objektiv vorgenommenen Bewertung um eine subjektive Analyse, weshalb das Ergebnis nicht als absolut objektiv angesehen werden darf. Vielmehr stellt es eine Entscheidungshilfe dar.

3.2.2.1 Heizung

Als Ergebnis der Bewertung hat sich, wie aus Tabelle 13 hervorgeht, die Induktionsheizung gegenüber der Wirbelstromheizung und der Strahlungsheizung durchgesetzt. Aus diesem Grund wird die Variante Induktionsheizung gewählt.

Die Wirbelstromheizung erhält große Abzüge im Punkt Leistung, da die Heizleistung drehzahlabhängig ist und dieser Heizungstyp bei geringen Drehzahlen versagt. Der Aufwand und die Montierbarkeit sind mäßig, liegen jedoch im grünen Bereich. Einen weiteren Nachteil im Vergleich zu den beiden anderen Varianten stellt der Einfluss der Heizung auf die Drehzahl dar.

Wesentliche Abzüge gibt es bei der Induktionsheizung für dessen Einfluss auf die Messung, da Störsignale in die Messleitungen induziert werden. Punktabzüge gibt es auch für den Aufwand und die Montierbarkeit, bei diesen Aspekten ist die Induktionsheizung mit der Wirbelstromheizung vergleichbar.

Die Strahlungsheizung erhält im Punkt Montierbarkeit klar die beste Bewertung. In Bezug auf Aufwand liegt die Strahlungsheizung hinter den Alternativen zurück. Dies ist durch die notwendige Kühlung aufgrund vernachlässigbarer konvektiver Wärmeabfuhr begründet. Ein weiterer großer Nachteil der Strahlungsheizung ist die diffuse Strahlung durch Reflexionen im Gehäuse, welche problematisch werden könnte. Infolge von Streuungen würden auch andere Teile wie etwa das Gehäuse mitgeheizt werden. Diesem Aspekt wird durch eine schlechte Bewertung des Punktes punktuelle Wärmezufuhr Rechnung getragen. Auch die Kosten der Strahlungsheizung liegen über jenen der Alternativen.

Für den Fall, dass im Rahmen der Realisierung der Induktionsheizung unerwartete Probleme auftreten, fungieren die verbleibenden Varianten als Alternativlösungen. Im Allgemeinen ist es immer sinnvoll, zu jeder Lösung ein/zwei Alternativen zu haben.

Tabelle 13 - Bewertungsliste Heizungskonzepte

TU Graz Graz University of Technology			Bewertungsliste Heizungskonzepte						 entwickeln messen berechnen prüfen Maschinenelemente und Entwicklungsmethodik	
Ziel: Erzeugung des Temperaturgradienten im Prüfstand										
Wertskala nach VDI2225 mit Punktvergabe P von 0 bis 4: 0 = unbefriedigend, 1= gerade noch tragbar, 2 = ausreichend, 3 = gut, 4 = sehr gut										
Bewertungskriterien nach Bewertungskatalog für die Konzeptphase. Gewichtungsfaktoren g vergeben, wenn Bewertungskriterien nicht gleichwertig sind.										
Konzeptvarianten			Induktionsheizung		Strahlungsheizung		Wirbelstrom- heizung			
Nr.		g	P	P*g	P	P*g	P	P*g		
1	Leistung	0,2	4	0,8	3	0,6	1	0,2		
2	Montierbarkeit	0,15	2	0,3	4	0,6	2	0,3		
3	Einfluss auf Drehzahl	0,1	4	0,4	4	0,4	1	0,1		
4	Einfluss auf Messung	0,1	1	0,1	4	0,4	4	0,4		
5	Kosten	0,15	4	0,6	1	0,15	4	0,6		
6	Aufwand	0,15	2	0,3	1	0,15	2	0,3		
7	Punktuelle Wärmezufuhr	0,15	4	0,6	1	0,15	4	0,6		
8										
9										
Summen		1	21	3,1	18	2,45	18	2,5		
Technische Wertigkeit Wt			0,75		0,64		0,64			
Technische Wertigkeit Wt mit Gewichtung			0,78		0,61		0,63			
Rangfolge			<u>1</u>		<u>3</u>		<u>2</u>			

3.2.2.2 Motor

Im Vorfeld wurde eine Vorauswahl an in Frage kommender Motore durchgeführt. In der engeren Auswahl sind:

- Synchron-Modellbaumotor mit dazugehöriger Steuerung
- Asynchron-Drehspindelmotor mit Steuerung
- Schrittmotor PSM57BYGHM201
- Motor + Getriebe
- Kombination der oben genannten Varianten

Alle erarbeiteten Ansätze haben Vor- und Nachteile. Der Modellbau-Synchronmotor mit der dazugehörigen Steuerung weist große Defizite im Punkt Drehzahl auf, da er Drehzahlen unter 5000 upm nicht abdecken kann. Diese Variante liegt mit Anschaffungskosten von 281 Euro im mittleren Bereich und der erforderliche Aufwand bezüglich Montage und Inbetriebnahme ist ebenfalls moderat. Die Regelbarkeit ist vorab schwer abschätzbar.

Ähnlich wie der Modellbaumotor schneidet die Asynchron-Drehspindel ab, lediglich die Anschaffungskosten sind bedeutend höher.

Der Schrittmotor erreicht nicht die notwendigen hohen Drehzahlen, weshalb der Antrieb ausschließlich über einen Schrittmotor nicht in Frage kommt. In Bezug auf Montageaufwand, Kosten und Regelbarkeit stellen Schrittmotoren jedoch die überlegene Variante dar. Ursache für die Punktabzüge beim Punkt Drehzahl ist die Abhängigkeit des Drehmomentes von der Drehzahl.

Die Kombination eines Motors mit einem Getriebe stellt einen überlegenswerten Ansatz dar, jedoch unterliegt diese Variante letztendlich aufgrund der hohen Kosten und des enormen Aufwandes.

Eine Kombination von Synchronmotor und einem Schrittmotor schneidet am besten ab. In den Kategorien Drehmoment, Drehzahl und Regelbarkeit erhält diese Variante die Maximalpunktzahl. Die Kosten und der Aufwand sind mäßig aber vertretbar. Daher erhält eine Kombination aus Synchronmotor und Schrittmotor die Höchstpunktzahl und wird weiter verfolgt.

Tabelle 14 - Bewertungsliste Motorvarianten

TU Graz Graz University of Technology		Bewertungsliste Motorvarianten											
Ziel: Erzeugung des Temperaturgradienten im Prüfstand													
Wertskala nach VDI2225 mit Punktvergabe P von 0 bis 4: 0 = unbefriedigend, 1 = gerade noch tragbar, 2 = ausreichend, 3 = gut, 4 = sehr gut													
Bewertungskriterien nach Bewertungskatalog für die Konzeptphase. Gewichtungsfaktoren g vergeben, wenn Bewertungskriterien nicht gleichwertig sind.													
Konzeptvarianten			Modellbau- Synchronmotor + Modellbausteuerung		Asynchron- Drehspindel		Schrittmotor PSM57BYGHM201		Motor + Getriebe		Kombination Synchronmotor / Schrittmotor		
Nr.		g	P	P*g	P	P*g	P	P*g	P	P*g	P	P*g	
1	Drehmoment	0,1	4	0,4	4	0,4	2	0,2	4	0,4	4	0,4	
2	Drehzahl	0,25	2	0,5	2	0,5	0	0	4	1	4	1	
3	Dauerbetriebsfähig	0,05	3	0,15	3	0,15	4	0,2	4	0,2	4	0,2	
4	Regelbarkeit	0,15	1	0,15	1	0,15	4	0,6	1	0,15	4	0,6	
5	Kosten	0,2	2	0,4	1	0,2	4	0,8	1	0,2	2	0,4	
6	Montageaufwand	0,25	2	0,5	2	0,5	3	0,75	0	0	2	0,5	
7													
8													
9													
Summen		1	14	2,1	13	1,9	17	2,55	14	1,95	20	3,1	
Technische Wertigkeit Wt			0,58		0,54		0,71		0,58		0,83		
Technische Wertigkeit Wt mit Gewichtung			0,53		0,48		0,64		0,49		0,78		
Rangfolge			3		3		2		5		1		

3.2.2.3 Kupplung

Bei der Bewertung der Ansätze für die Kupplung erreicht die Magnetkupplung – Eigenbau die höchste Punktzahl. Die meisten Abzüge erhält diese Variante beim Fertigungsaufwand.

Für die anderen beiden Varianten gibt es erhebliche Punktabzüge für die hohen Kosten und die Wartezeit, mit welcher bei der Bestellung gerechnet werden muss. Im Vergleich dazu ist die Wartezeit bis zur Fertigstellung der Eigenbauvariante der Magnetkupplung sehr gering. Geringe Abzüge gibt es im Punkt Drehmoment bei der Ferrofluidichtung, da diese im Vergleich zu den Magnetkupplungen nicht als Überlastsicherung fungieren kann.

3. Methodische Prüfstandsentwicklung

Tabelle 15 - Bewertungsliste Kupplungsvarianten

TU Graz Graz University of Technology		Bewertungsliste Kupplungsvarianten							
Ziel: Erzeugung des Temperaturgradienten im Prüfstand									
Wertskala nach VDI2225 mit Punktvergabe P von 0 bis 4: 0 = unbefriedigend, 1 = gerade noch tragbar, 2 = ausreichend, 3 = gut, 4 = sehr gut									
Bewertungskriterien nach Bewertungskatalog für die Konzeptphase. Gewichtungsfaktoren g vergeben, wenn Bewertungskriterien nicht gleichwertig sind.									
Konzeptvarianten			Magne tkupplung Eigenbau		Magne tkupplung Zukauf		Fe rrofluiddichtung		
Nr.		g	P	P*g	P	P*g	P	P*g	
1	Drehmoment	0,15	4	0,6	4	0,6	3	0,45	
2	Drehzahl	0,2	3	0,6	4	0,8	4	0,8	
3	Fertigungsaufwand	0,15	2	0,3	4	0,6	4	0,6	
4	Kosten	0,15	4	0,6	1	0,15	0	0	
5	Montageaufwand	0,2	3	0,6	3	0,6	3	0,6	
6	Zeit	0,15	3	0,45	1	0,15	2	0,3	
7									
8									
9									
Summen		1	19	3,15	17	2,9	16	2,75	
Technische Wertigkeit Wt			0,79		0,71		0,67		
Technische Wertigkeit Wt mit Gewichtung			0,79		0,73		0,69		
Rangfolge			<u>1</u>		<u>2</u>		<u>3</u>		

3.2.3 Zusammenfassung der Konzeption

Eine übersichtliche schematische Zusammenfassung der möglichen Lösungsvarianten wird in Tabelle 16 gegeben. Zu diesem Zweck wird der Prüfstand in dessen Teilaufgaben aufgeteilt und die unterschiedlichen Möglichkeiten der praktischen Umsetzung dieser angeführt. Grau markiert sind jene Varianten, welche sich durch die in Kapitel 3.2.2 durchgeführte Bewertung als am besten geeignet herauskristallisiert haben. Die Punkte 1,2 und 7 wurden vorab durch Rücksprache mit Experten aus den jeweiligen Gebieten geklärt, weshalb eine Bewertung nicht erforderlich war.

Tabelle 16 - Morphologischer Kasten

Teilfunktion		1	2	3	4	5
1	Temperaturmessung Steg	Thermoelement	Pt - 10	Pt - 100	Pt - 1000	
2	Messung Drehzahl	Kontrastsensor				
4	Antrieb	Modellbau-Synchronmotor + Modellbausteuerung	Asynchron-Drehspindel	Schrittmotor PSM57BYGHM201	Motor + Getriebe	Kombination aus 1 und 3
5	Kupplung	Magnetkupplung Eigenbau	Magnetkupplung Zukauf	Ferrofluiddichtung		
6	Heizungstyp	Induktionsheizung	Wirbelstromheizung	Strahlungsheizung		
7	Vorspannung der Lagerung	Tellerfeder				

Um unterschiedliche Lagerungen untersuchen zu können ist eine gesonderte Ausführung der Welle und des Messflansches für jedes Lager mit unterschiedlichen Abmessungen erforderlich. Infolge des daraus entstehenden Aufwandes wird im Rahmen dieser Arbeit nur ein einzelnes Lager untersucht, weshalb dieser Aspekt in Tabelle 16 nicht angeführt wird. Alle weiteren Teilfunktionen ergeben sich direkt aus der „*Mind-Map*“ von Kapitel 3.2.1.

3.3 Konstruktionsphase - Entwerfen

In dieser Phase des Entwicklungsprozesses werden die zuvor mit Hilfe der Bewertungsliste als geeignet eingestuften Lösungsansätze konkretisiert und ausgearbeitet. Den Abschluss dieser Arbeitsschritte stellt ein vollständiger Entwurf dar, in welchem Anordnung, Gestalt und Eigenschaften eines Produktes festgehalten sind. (Conrad, 2010, S. 180)

Nach Conrad (2010) beinhaltet dies unter anderem:

- Festlegung der Hauptabmessungen
- Untersuchung der räumlichen Verhältnisse
- Wahl der Werkstoffe
- Berechnung der Auslegungsgrößen
- Ergänzung des Lösungsprinzips
- Festlegung von Fertigungsverfahren
- Gestaltung aller Bauteile und Verbindungen
- Festlegung von Baugruppen
- Festlegung der Teilearten
- Festlegung der Zulieferteile
- Analyse auf Schwachstellen
- Bewertung und Auswahl

Einen schematischen Aufbau des Prüfstandes zeigt Abbildung 24, die einzelnen benannten Elemente sind im Anschluss genauer beschrieben.

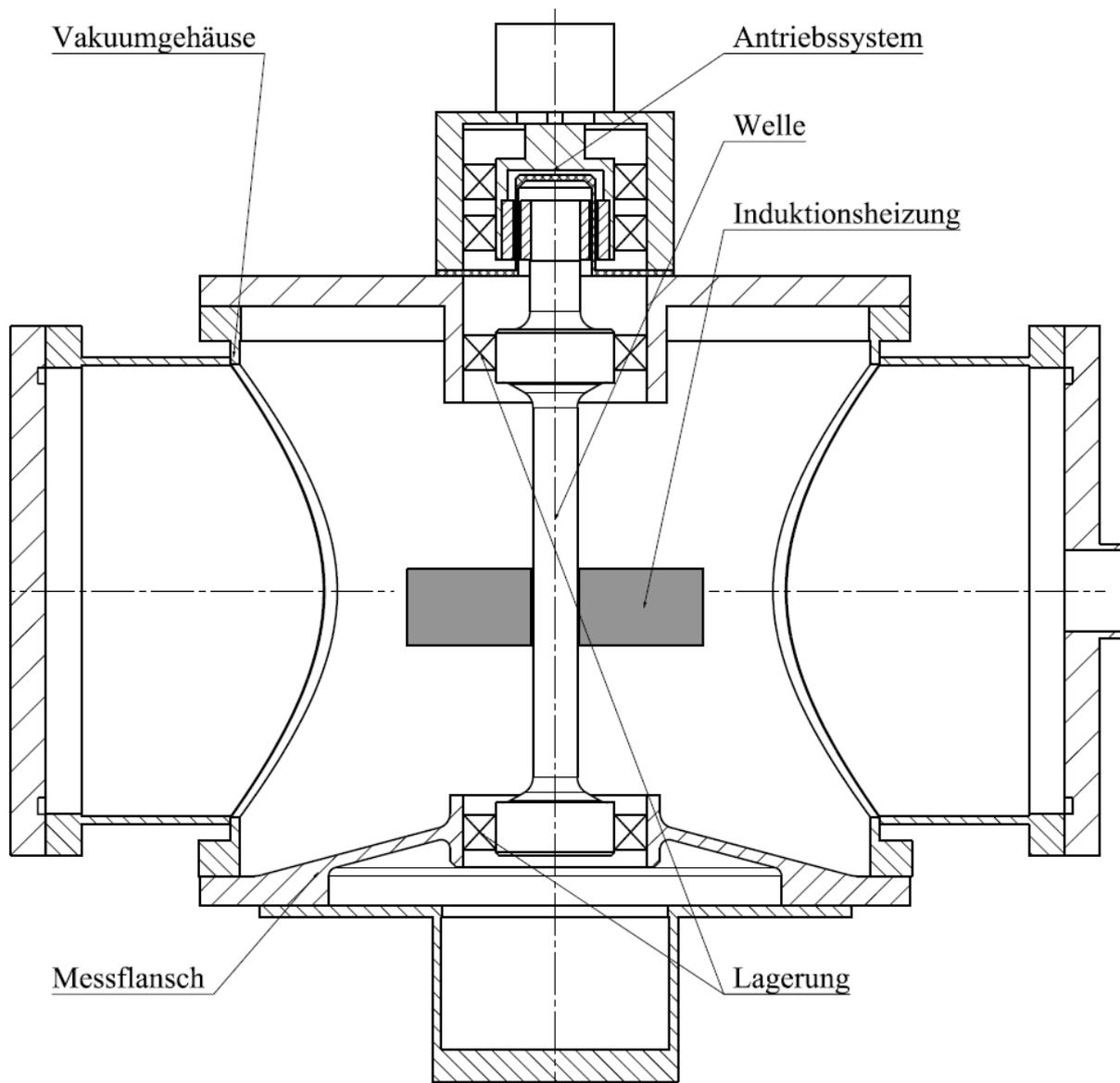


Abbildung 24 - Schema Prüfstand

3.3.1 Vakuumgehäuse

Das Vakuumgehäuse besteht aus Edelstahl 1.4301, wurde vor Beginn dieser Arbeit als Einheit zugekauft, stellt die Ausgangsbasis des Prüfstandes dar und ist in Abbildung 24 ersichtlich. Am Deckel, in der Zeichnung links vom Gehäuse, werden Modifikationen durchgeführt, um eine Vakuumdurchführung der Messsignale und der Spannungsversorgung der Heizung zu ermöglichen. Zu diesem Zweck werden an den Deckeln Einfräsungen vorgenommen, in welche *Sub-D Stecker* eingeklebt werden. Diese sind, wie in Kapitel 4.4 beschrieben, abgedichtet.

3.3.2 Messflansch

Am Messflansch wird der Wärmestrom gemessen, welcher von der Lagerung in radialer Richtung nach außen an das Gehäuse weitergeleitet wird. Der Flansch ist konisch ausgeführt, der Steg hat dabei eine konstante Breite von 4 mm. Als Material wird Edelstahl – 1.4311 verwendet. Dieses Material weist im Vergleich zu herkömmlichem Stahl eine geringe Wärmeleitfähigkeit auf, wodurch die Temperaturgradienten am Steg größer ausfallen. Daher kann der Wärmestrom bei gleicher Messgenauigkeit genauer bestimmt werden. Ein weiterer Grund für diese Werkstoffwahl stellt die Korrosionsbeständigkeit dieses Werkstoffes dar. Der Messflansch stellt das Verbindungselement zwischen Gehäuse und Lagerung dar, wie aus Abbildung 24 ersichtlich.

3.3.3 Welle und Lagerung

Die Welle wird ebenfalls aus Edelstahl – 1.4301 gefertigt. Durch diese Werkstoffwahl wird möglicher Korrosion vorgebeugt und die Temperaturgradienten werden größer ausfallen als bei Werkstoffen mit höherer Wärmeleitfähigkeit. Als Lagerung kommen, wie in Kapitel 3.2.1 beschrieben, Schrägkugellager der Firma *SKF* zum Einsatz. Diese werden in X-Anordnung eingebaut und mit einer Kraft von 45 N vorgespannt. Die Vorspannung wird durch eine serielle Anordnung von zwei Tellerfedern realisiert. Die Federkennlinie dieser Kombination wurde messtechnisch in drei Durchgängen ermittelt, das Ergebnis zeigt Abbildung 25.

Durch eine Mutter werden die Federn auf den Lager-Außenring gedrückt und so vorgespannt. Geschmiert wird die Lagerung mit speziellem vakuumtauglichem Fett für geringe Drehzahlen und geringe Temperaturen der Firma *SKF* mit der Bezeichnung *LGLT 2.0*, welches nach Rücksprache mit Experten Der Firma *SKF* ausgewählt wurde. Die Fettfüllmenge beträgt 1,36 cm³.

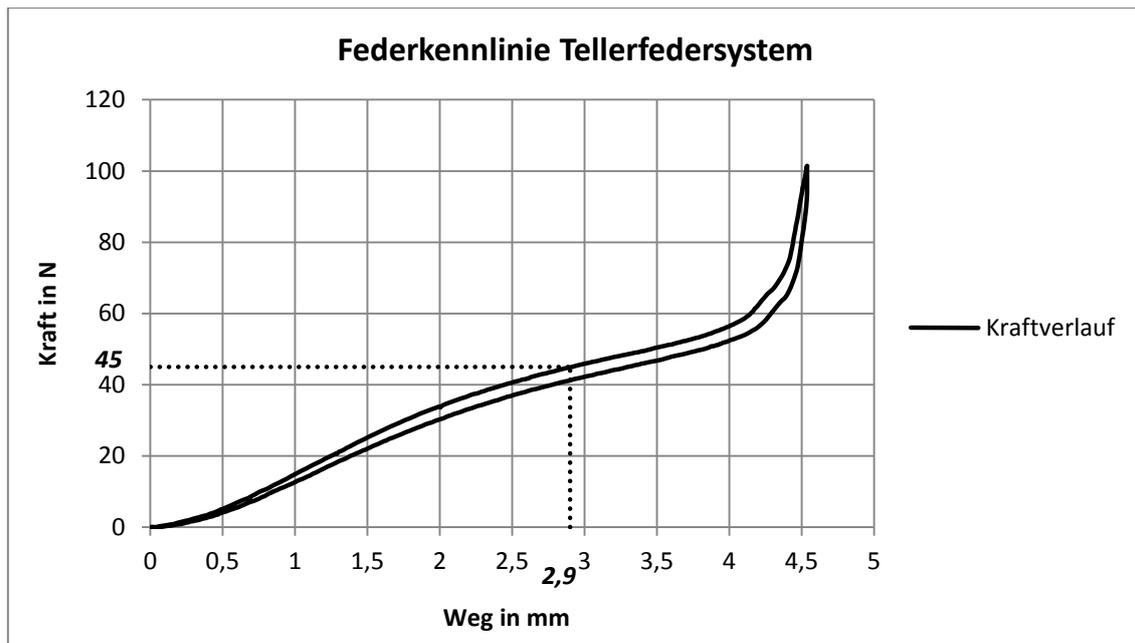


Abbildung 25 - Federkennlinie Tellerfedersystem

3.3.4 Induktionsheizung

Als Heizelement kommt eine Induktionsheizung zum Einsatz, wie in Kapitel 3.2.2.1 bestimmt wurde. Die Kupferspulen der Heizung werden im Prüfstand im eingebauten Zustand gewickelt und kann eine Maximalleistung von 70 Watt bereitstellen, wenn etwaige Verluste vernachlässigt werden. Versorgt wird die Heizung mit 70 V, einem Maximalstrom von 1 A und einem Rechtecksignal mit einer Frequenz von maximal 10 kHz. Diese Grenzen ergeben sich aufgrund der verwendeten Netzgeräte und sonstiger Hardware. Entsprechende Informationen sind im Anhang beigelegt. Durch einen abgedichteten *Sub-D Stecker*, wie er in Kapitel 4.4 beschrieben ist, wird die Energiedurchführung durch das Gehäuse realisiert. Abbildung 26 zeigt den schematischen Aufbau der Heizung.

Die Konstruktion und das Herstellungsverfahren sind nach Rücksprache mit dem *Institut für Elektrische Messtechnik und Messsignalverarbeitung* der TU-Graz festgelegt worden. Da die Heizung eines der kritischen Elemente des Prüfstandes darstellt und der Aufwand vergleichsweise groß ist, wird sie einer FMEA (Fehler-Möglichkeiten-Einfluss-Analyse) unterzogen. Diese ist in Kapitel 3.4.1 zu finden.

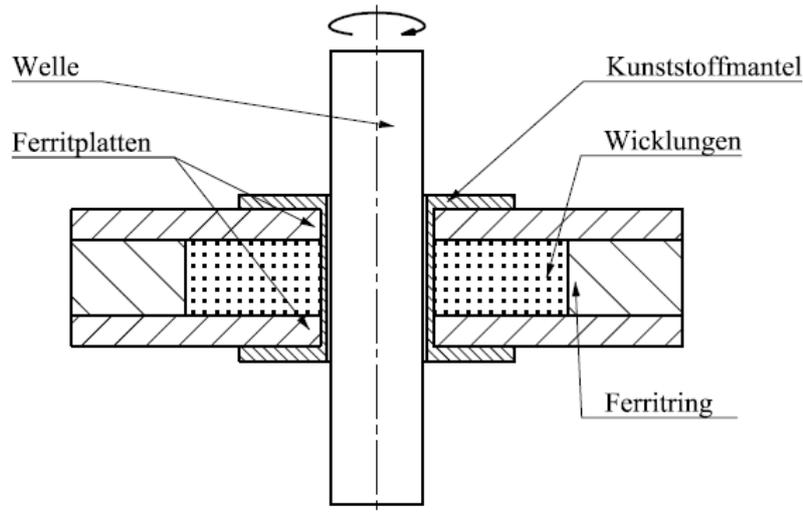


Abbildung 26 - Grundschematische Induktionsheizung

3.3.5 Antriebskonzept

3.3.5.1 Magnetkupplung

Wie in Kapitel 3.1.1 erklärt befindet sich der Motor außerhalb des Prüfstandes, muss jedoch die Welle im Inneren antreiben. Folglich muss das Moment durch eine hermetisch dichte Hülse hindurch, den sogenannten Spalttopf, auf die Welle übertragen werden. Zu diesem Zweck kommt eine Magnetkupplung zum Einsatz. Wie in Kapitel 3.2.2.3 festgelegt, wird diese Magnetkupplung eigens entwickelt. Der grundlegende Aufbau einer solchen Magnetkupplung ist in Abbildung 27 dargestellt. Rot markiert sind jene Magnete, welche an der Glocke der Kupplung befestigt sind. Diese wird von einem Motor angetrieben. Dabei wird das Drehmoment von den rot markierten Magneten durch den Spalttopf hindurch auf die blau markierten Magnete im Inneren des Prüfstandes und somit auf die Welle übertragen.

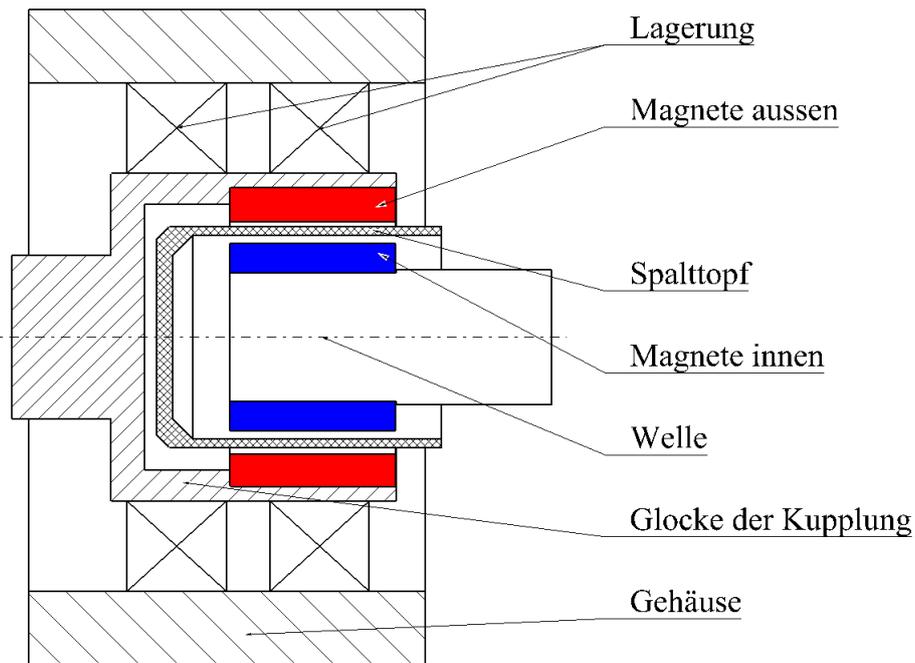


Abbildung 27 - Schema Magnetkupplung

Es kommen jeweils 10 Magnetpaare zum Einsatz, welche in Bezug auf ihre Polarität korrekt angeordnet sein müssen. Jedes Magnetpaar wird auf die Welle bzw. in die Glocke eingeklebt. Um eine radiale Stützwirkung zu erzielen und somit hohe Drehzahlen zu ermöglichen sind zwei Schrägkugellager in der Magnetkupplung verbaut. Diese sind in angestellter Einbauweise durch ein System aus Tellerfedern mit einer Kraft von 45 N vorgespannt. Durch den Einbau in X-Anordnung wird die Steifigkeit der Lagerung gering gehalten um etwaige Ungenauigkeiten ausgleichen zu können, dennoch handelt es sich um ein statisch überbestimmtes System. Den ersten Entwurf dieser Kupplung zeigt Abbildung 28. Die Magnetlagereinheit kann im Gehäuse verschoben werden und wird durch die Fixierschraube in der gewünschten Position gehalten. Dieser Aufbau ermöglicht es, durch Anheben der Einheit, das übertragbare Moment nach Belieben zwischen null und dem Maximalwert einzustellen.

Die Klebeverbindung zwischen rotierenden Magneten und Welle ist während des Betriebs großen Belastungen ausgesetzt. Eine Abschätzung der Tragfähigkeit wird nachfolgend angeführt:

$$\sigma_{Kleb} = \frac{F_{Flieh}}{A_{Kleb}} = \frac{m_{Magnet} * r_{Magnet} * \omega^2}{A_{Kleb}} \quad [7]$$

Ein Magnetpaar besitzt eine Masse von $3,14 * 10^{-3} \text{ kg}$, der Abstand r_{Magnet} beträgt $10,25 * 10^{-3} \text{ m}$ und $A_{Kleb} = 10^{-4} \text{ m}^2$. Die Winkelgeschwindigkeit ω errechnet sich direkt aus der Drehzahl. Für eine Drehzahl von 15000 upm ergibt sich eine Spannung in der Klebung von $0,79 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$. Als Maximalwert der Temperatur bei den Klebungen an der Welle werden $100 \text{ }^\circ\text{C}$ angenommen. Bei dieser Temperatur liegt die zulässige Spannung des Klebers bei $5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ woraus sich in weiterer Folge eine Sicherheit $S = 6,3$ errechnet. Für Drehzahl von 20000 upm resultiert eine Sicherheit von $S = 3,5$. Das Datenblatt des Klebers ist im Anhang zu finden.

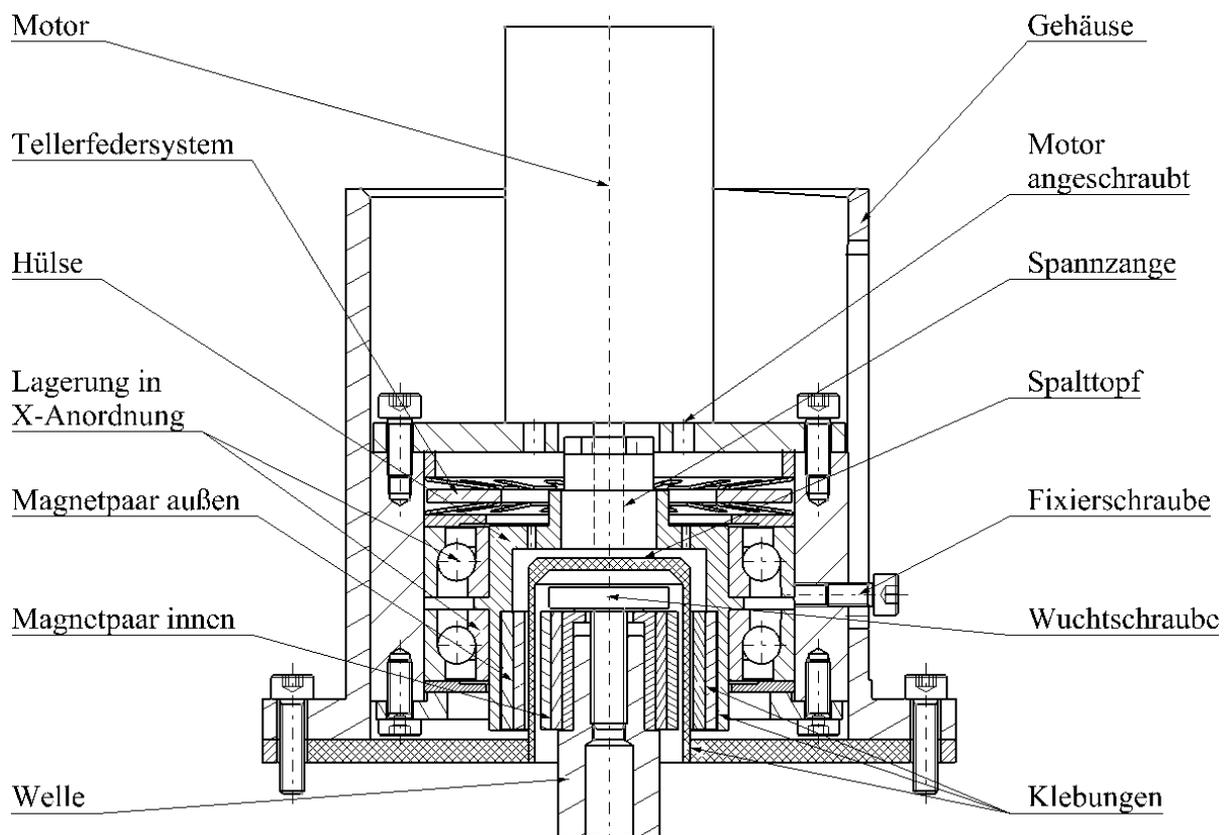


Abbildung 28 - Magnetkupplung Schnittdarstellung

Eine Simulation, welche vom *Institut für elektrische Messtechnik und Messsignalverarbeitung* der *TU-Graz* durchgeführt wurde, hat ermittelt, dass das übertragbare Moment dieser Ausführung bei etwa 2,2 Nm liegen wird. Das maximale Drehmoment wird bei einem Verdrehwinkel von 18° zwischen Glocke und Welle erreicht. In Abbildung 29 ist der Verlauf des Drehmomentes in Abhängigkeit des magnetischen Winkels aufgetragen. Ein magnetischer Winkel von 180° entspricht einer Verdrehung von 36° . Auf der Ordinate ist das Drehmoment in Nm pro Meter Kupplungslänge und auf der Abszisse der magnetische Winkel in Grad aufgetragen.

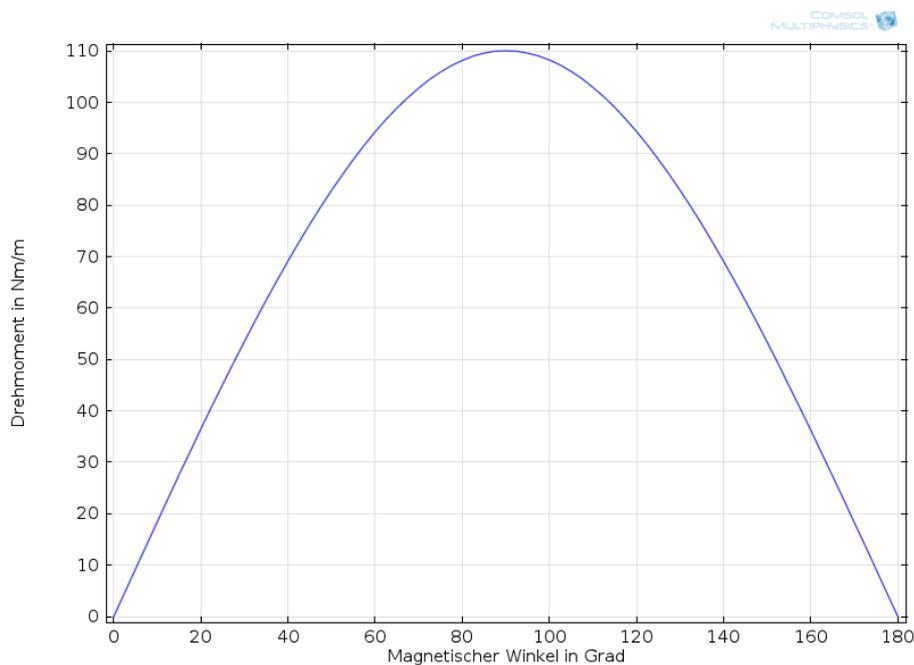


Abbildung 29 - Magnetkupplung: Momentenverlauf über Drehwinkel

Mit einer Kupplungslänge von 0,02 m ergibt sich ein Maximalmoment von 2,2 Nm. Da das Maximalmoment der zum Einsatz kommenden Motore bei 0,9 Nm und das Losbrechmoment der Welle unter 0,1 Nm liegt sind die 2,2 Nm der Kupplung ausreichend. Details bezüglich der Motore sind in Kapitel 3.3.5.2 angeführt.

Abbildung 30 zeigt das Magnetfeld in der Kupplung bei maximalem Drehmoment, also einem magnetischen Winkel von 90° . In diesem Zustand sind die Nord- und Südpole Magnete in der Glocke sowie jene der Welle um eine halbe Polteilung verschoben. Es stellt den Zustand maximaler Magnetfeldverdrängung und folglich maximalen Moments dar.

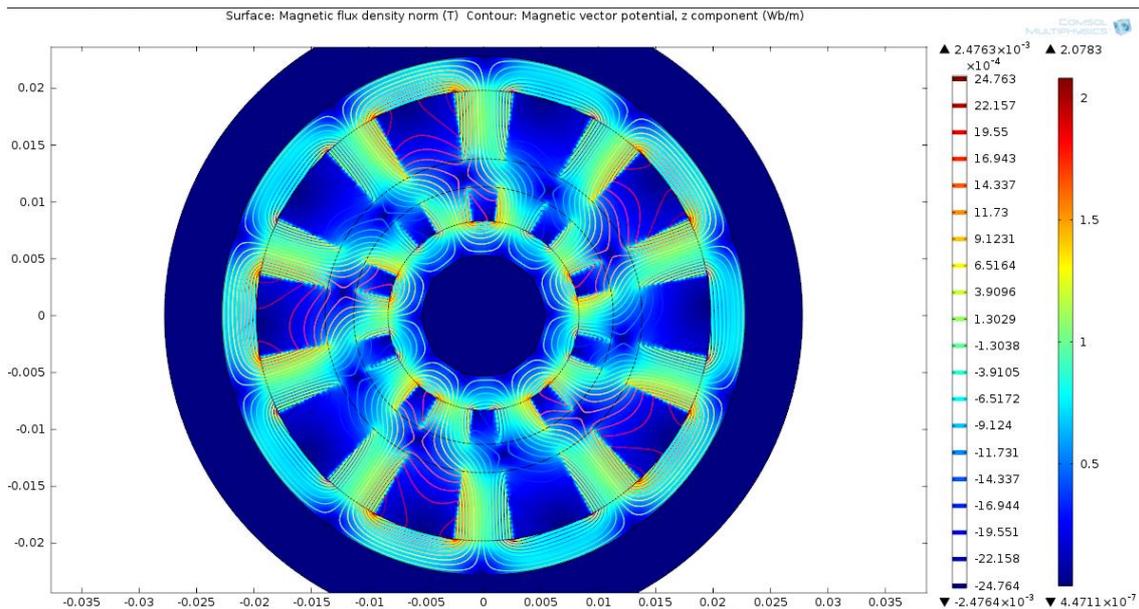


Abbildung 30 - Magnetkupplung: maximaler Verdrehwinkel
 (Riepan, 2012, S. 48)

Erste Tests dieser Konstruktion resultierten in Lagerschäden des Motors, welche auf Ver-
 spannungskräfte infolge der statischen Überbestimmung zurückzuführen waren. Aus diesem
 Grund wird ein elastisches Element eingebaut, um einen Ausgleich zu ermöglichen, sodass
 die statische Überbestimmung aufgehoben wird. Die Anbindung des Motors mit dem elasti-
 schen Element zeigt Abbildung 31.

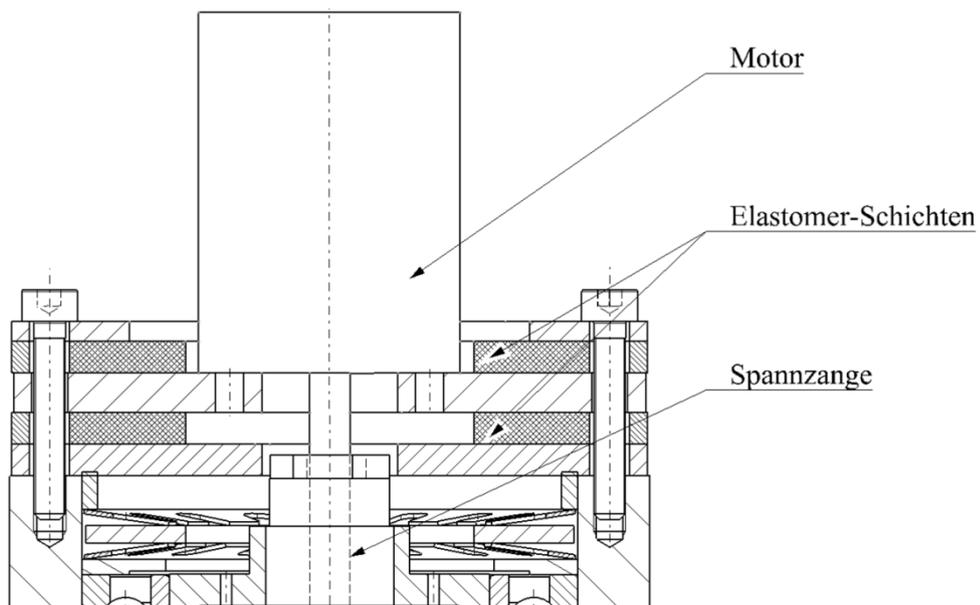


Abbildung 31 - Magnetkupplung mit elastischem Element

3.3.5.2 Motor

Um den gesamten gewünschten Drehzahlbereich abdecken zu können kommen zwei verschiedene Motoren zum Einsatz, wie in Kapitel 3.2.2.2 festgelegt wurde.

Für die hohen Drehzahlbereiche kommt ein Modellbau-Synchronmotor mit dazugehöriger Steuerung zum Einsatz. Die endgültige Wahl fiel auf das Modell 1940-8 von *Lehner Motoren*. Mit einer Maximaldrehzahl von 60000 upm im Leerlauf ist dieser Motor hervorragend für die Drehzahlbereiche über 5000 upm geeignet. Bei Drehzahlen unter 5000 upm versagt jedoch die verwendete Steuerung. Der wassergekühlte Mantel verhindert ein Überhitzen des Motors, wodurch die Dauerbetriebsfähigkeit gegeben ist. Das Datenblatt des Motors ist im Anhang beigelegt.

Als Antrieb für geringe Drehzahlen kommt ein Schrittmotor mit der Bezeichnung *PSM57BYGHM201* zum Einsatz. Tabelle 17 zeigt das Datenblatt des Motors.

Tabelle 17 - Datenblatt Schrittmotor
(Neuhold-Elektronik, 2014)

<i>PHASE</i>	<i>2 PHASE</i>
<i>STEP ANGLE</i>	<i>0.9± 5% ° /STEP</i>
<i>VOLTAGE</i>	<i>6.8V</i>
<i>CURRENT</i>	<i>1.7 A/PHASE</i>
<i>RESISTANCE</i>	<i>4± 10% Ω/PHASE</i>
<i>INDUCTANCE</i>	<i>14± 20% mH/PHASE</i>
<i>HOLDING TORQUE</i>	<i>90 N.cm Min</i>
<i>DETENT TORQUE</i>	<i>2.6N.cm Max</i>
<i>INSULATION CLASS</i>	<i>B</i>
<i>LEAD STYLE</i>	<i>AWG22 UL1007</i>
<i>ROTOR TORQUE</i>	<i>240 g.cm²</i>

Der Verlauf des Drehmoments in Abhängigkeit von der Drehzahl ist in Abbildung 32 dargestellt. Auf der Abszisse sind die Pulse pro Sekunde aufgetragen, auf der Ordinate das Drehmoment in Ncm. Dieser Motor weist einen Schrittwinkel von 0.9° auf, wodurch eine Umdrehung in 400 Schritte unterteilt wird. Aufgrund des Halbschrittbetriebs, welcher für die Erstellung dieses Diagramms verwendet wurde, verdoppelt sich die Schrittzahl pro Umdrehung auf 800. Daraus errechnet sich bei 0,36 Nm eine Drehzahl von 4,69 Umdrehungen pro Se-

kunde bzw. 281,3 Umdrehungen pro Minute. Daraus ergibt sich weiter, dass der Drehzahlbereich zwischen 280upm und 0upm mit Sicherheit abgehandelt werden kann.

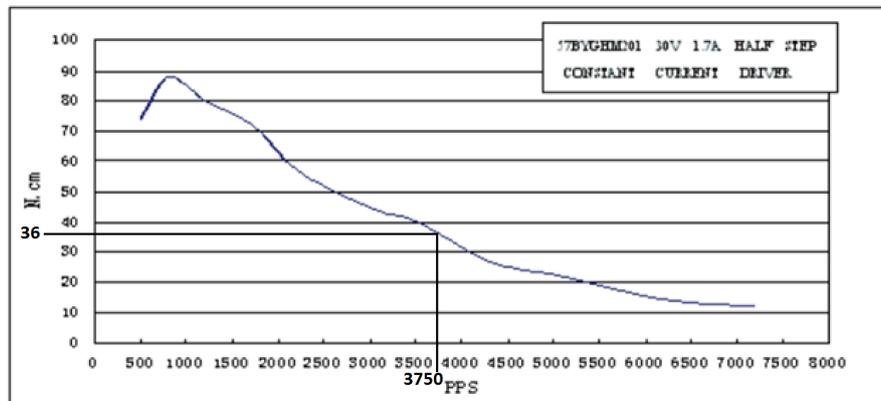


Abbildung 32 - Kennlinie Schrittmotor
(Neuhold-Elektronik, 2014)

Es werden Maßnahmen ergriffen, um die Maximaldrehzahl weiter zu erhöhen, wie das Erhöhen der Speisespannung der Schrittmotorsteuerung und das Umschalten auf Vollschrittbetrieb. Außerdem ist das erforderliche Drehmoment geringer als 0,36 Nm, mit welchem diese Grenzdrehzahl errechnet wurde. Sie wird herangezogen, da es das Maximaldrehmoment des Synchronmotors darstellt, mit welchem der Prüfstand zu Testzwecken erfolgreich angetrieben werden konnte.

3.4 Fehler- Möglichkeits- und Einfluss-Analyse (FMEA) für kritische Komponenten

„Eine FMEA ist eine weitgehend formalisierte analytische Methode zur systematischen Erfassung möglicher Fehler und zur Abschätzung der damit verbundenen Risiken (Auswirkungen). Hauptziel ist die Risikoverminderung bzw. –vermeidung.“ (Pahl & Beitz, 2007, S. 702)

Als Fehler wird nach ISO 9000:2005 die Nichterfüllung einer Anforderung verstanden (DIN EN ISO, 2005, S. 27).

Folglich stellt die Anforderungsliste aus Kapitel 3.1.2 die Ausgangsbasis dar. Im Rahmen der FMEA werden drei unterschiedliche Aspekte bewertet:

- Bedeutung bei Auftreten des Fehlers (B)
- Auftretenswahrscheinlichkeit von Fehlerursachen (A)
- Entdeckungswahrscheinlichkeit (E)

Ausgehend von der Bewertungsskala nach Conrad (2010) wird jeder dieser drei Aspekte mit Punkten zwischen eins und zehn beurteilt, wobei eins die bestmögliche und zehn die am schlechtesten mögliche Einstufung darstellt. Als Ergebnis wird die Risikoprioritätszahl errechnet, welche sich als das Produkt der drei Bewertungszahlen ergibt. Je höher die Risikoprioritätszahl desto mehr Beachtung muss dem jeweiligen Aspekt zugesprochen werden. Grau markiert sind dabei jene Maßnahmen und Kombinationen, welche letztendlich umgesetzt werden.

Bei den folgenden FMEAs stellt die erste Zeile, in welcher der mögliche Fehler eingetragen ist, den Fall ohne Zusatzmaßnahmen dar. In der Folgezeile sind die Verbesserungsmaßnahmen mit aktualisierter Bewertung der entsprechenden Aspekte angeführt. Ziel der Analyse stellt die Erreichung einer Risikoprioritätszahl von unter 200 Punkten dar. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Skala von Conrad mit geringfügigen Änderungen bezüglich Auftretenswahrscheinlichkeit und Entdeckungswahrscheinlichkeit übernommen. Die Modifikationen sind erforderlich, da die dort vorgesehenen Skalen der jeweiligen Kategorien nicht für den Prototypen- bzw. Prüfstandsbau konzipiert sind. Folgende FMEAs beinhalten bereits jene Erkenntnisse, welche im Zuge des Zusammenbaus und der Inbetriebnahme gewonnen werden. Tabelle 18 zeigt die für die FMEAs modifizierte Bewertungsskala.

Tabelle 18 - Bewertungszahlen für FMEA

Bewertungszahlen für FMEA				
Beurteilung	Bewertung	Bedeutung B von Fehlerfolgen	Auftretenswahrscheinlichkeit A von Fehlerursachen	Entdeckungswahrscheinlichkeit E
		<i>Mögliche Fehlerfolgen</i>	<i>Zeitraum / Wahrscheinlichkeit</i>	<i>Definition</i>
schlecht  gut	10	Verletzung eines Kunden oder eines Mitarbeiters	>50% der Versuche	Entdeckung erst bei Auftreten möglich
	9	Rechtsverstoß	>10% der Versuche	Entdeckung kurz vor Auftreten mit geringer Interventionsmöglichkeit
	8	Produkt oder Leistung werden unbrauchbar	kaum abschätzbar bzw. Sicherheit < 4	Entdeckung kurz vor Auftreten mit potentieller Interventionsmöglichkeit
	7	Kunde ist äußerst unzufrieden	schwer abschätzbar & Sicherheit > 4	Aufwändig mit Messeinrichtungen und fortlaufender Kontrolle
	6	Teilweise Funktionsstörung	ungenau abschätzbar & Sicherheit > 4	Aufwändig mit Messeinrichtungen und sporadischer Kontrolle
	5	Funktionseinbuße führt wahrscheinlich zu Beanstandung	abschätzbar & Sicherheit > 3	Durch Messgeräte mit geringem Aufwand
	4	Verursacht geringe Funktionseinbuße	abschätzbar, Auftreten unwahrscheinlich	Sofort, eindeutig, mit einfachen Messgeräten, im Betrieb erkennbar
	3	Verursachte geringe Unannehmlichkeiten; ohne Funktionseinbußen	sehr gut abschätzbar, Auftreten unwahrscheinlich	Sofort, eindeutig, mit einfachen Messgeräten, vor Betrieb erkennbar
	2	Unbemerkt, geringe Auswirkung auf die Funktion	praktisch nur durch Bedienfehler	Sofort, eindeutig, ohne Messgeräte, im Betrieb erkennbar
	1	Unbemerkt und keine Auswirkung auf die Funktion	praktisch ausgeschlossen	Sofort, eindeutig, ohne Messgeräte, vor Betrieb erkennbar

3.4.1 Induktionsheizung

Tabelle 19 - FMEA Induktionsheizung

		Fehler-Möglichkeiten- und Einfluss-Analyse (FMEA)									FMEA-Nr.: 1
										Seite 1/1	
Typ/Modell/Fertigung/Charge: Induktionsheizung											
Funktion/Aufgabe: Generierung Temperaturgradient											
Mögliche Fehlerfolgen	B	Möglicher Fehler	Mögliche Fehlerursachen	Vermeidungsmaßnahmen	A	Entdeckungsmaßnahmen	E	RPZ	Verantwortlicher / Termin		
Bruch von Klebungen; Unzulässige Verformung des Kunststoffgehäuses; Heizung wird beschädigt oder zerstört.	8	unzulässig hohe Erwärmung	Aufgrund eines Wirkungsgrades kleiner 100%, Wärmeleitung des Gestells und Wärmestrahlung der Welle wird die gesamte Heizung erwärmt.		8			8	512	Peter Haidl	
				A: Hochtemperaturfesten Klebstoff verwenden	7	Applikation von Temperatursensoren	4	224			
				B: Optimierung der Heizungsgeometrie und Ausführung (Luftspalte)	5			160			
				Kombination von A und B	4			128			
Kontakt zwischen Heizung Welle; Abbremsen und Beschädigung der Welle	8	unzureichend genaue Positionierung der Heizung	Zu geringe Toleranzen für die Positionierung der Heizung		9		3	216	Peter Haidl		
				Optimierung der Heizungsgeometrie und Ausführung (Luftspalt auf mehrere mm erhöhen)	2	Kontrolle mittels eigens angefertigten Abstandsmesselementen	3	48			
			Unzulässige Verformung des Kunststoffkäftigs aufgrund von Erwärmung		5			320			
				Optimierung der Heizungsgeometrie und Ausführung (Luftspalt auf mehrere mm erhöhen)	2		8	128			
Zu geringe Leistung der Heizung	6	Fehlerhafte Konzipierung der Heizung	Fehler in der Simulation der Heizleistung		3	Messung der Temperaturgradienten an der Welle	4	72			

Im Falle des Fehlers der unzulässig hohen Erwärmung werden beide Vermeidungsmaßnahmen parallel umgesetzt. Die Verwendung hochtemperaturfesten Klebstoffes alleine würde nicht ausreichen, aber dessen Einsatz schafft kombiniert mit der Optimierung der Heizungsgeometrie zusätzliche Sicherheit. Besondere Aufmerksamkeit wird auf die Optimierung der

Heizungsgeometrie mit Fokus auf den Luftspalt gelegt, da diese Maßnahme drei potentielle Fehlerursachen zugleich positiv beeinflusst. Eine Simulation der Heizung mit der angepassten Geometrie liefert einen Anhaltspunkt, ob die geplanten Modifikationen in Bezug auf die erforderliche Heizleistung zulässig sind.

Als Ergebnis der FMEA hat sich die Modifikation der Heizungsgeometrie hin zu einem größeren Luftspalt zwischen Welle und Kunststoffgehäuse, dem Einsatz hochtemperaturfesten Klebstoffs sowie der Modifikation des Kunststoffgehäuses für höhere Stabilität ergeben.

Die modifizierte Ausführung des Kunststoffgehäuses für höhere Stabilität wird in Abbildung 33 gezeigt.

Weil die Festigkeit des Klebers mit zunehmender Temperatur sinkt und die Temperaturentwicklung der Heizung vorab nicht bekannt ist, wird zur Überwachung ein Temperatursensor auf den Ferritplatten appliziert.

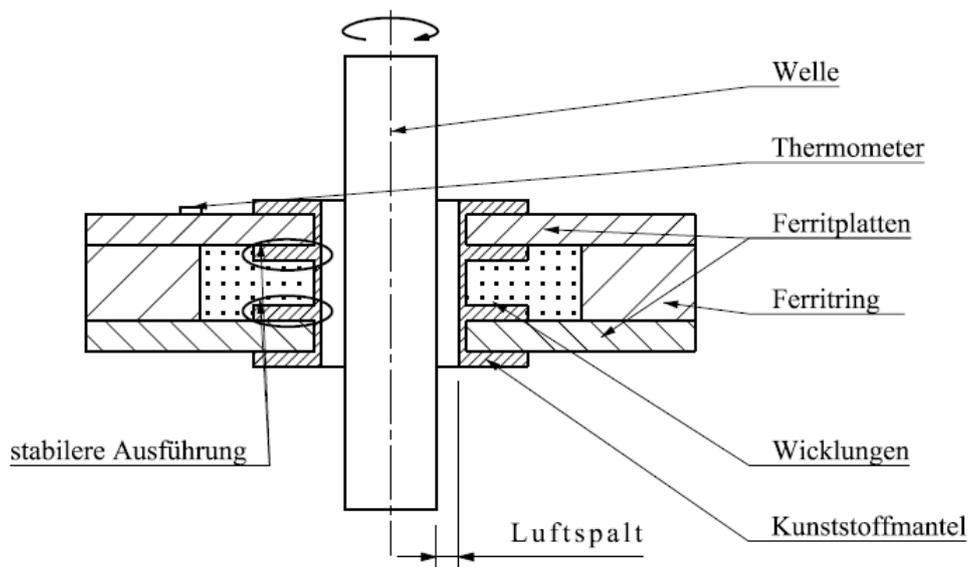


Abbildung 33 - optimiertes Schema Induktionsheizung

3.4.2 Magnetkupplung

Tabelle 20 - FMEA Magnetkupplung

TU Graz Graz University of Technology		Fehler-Möglichkeiten- und Einfluss-Analyse (FMEA)						FMEA-Nr.: 2		
								Seite 1/1		
Typ/Modell/Fertigung/Charge: <i>Magnetkupplung</i>										
Funktion/Aufgabe: <i>Drehmomentübertragung durch Gehäuse hindurch</i>										
Mögliche Fehlerfolgen	B	Möglicher Fehler	Mögliche Fehlerursachen	Vermeidungsmaßnahmen	A	Entdeckungsmaßnahmen	E	RPZ	Verantwortlicher / Termin	
Bruch der Verklebung von Welle und Magnete; Magnetkupplung und Prüfstand werden stark beschädigt	8	unzulässig hohe Erwärmung in Kombination mit zu hoher Drehzahl	Durch die Heizung wird das Wellenende mit den Klebungen stark erhitzt, wodurch die Festigkeit der Klebungen reduziert wird		8		10	640	Peter Haidl	
					A: Reduktion der Heizleistung sodass die Klebung maximal 100°C erreicht			6		288
					B: Hochtemperaturfesten Klebstoff verwenden			7		336
					C: Reduktion der Maximaldrehzahl auf 15000 upm			5		240
					Kombination aus A, B und C			4		192
Zu hohe Lagerbelastung durch Unwucht, Beschädigung der Lager	7	starke Vibrationen, Beschädigung der Lagerung	Fertigungsungenauigkeiten		6		8	336		
				Einsatz von Wuchtschrauben	4	Einsatz eines Beschleunigungssensors	3	84		
				Reduktion der Drehzahl	2		5	70		

Vergleichsweise hohe Risikoprioritätszahlen ergeben sich bei der Analyse der Magnetkupplung. Besondere Aufmerksamkeit sei auf den möglichen Fehler der unzulässig hohen Erwärmung der Klebungen in Kombination mit hoher Drehzahl gelegt. Als höchstzulässige Temperatur der Klebungen wird 100 °C definiert, mit der entsprechenden Festigkeit und der Fliehkraft wird die Sicherheit der Klebung errechnet.

Die einzelnen Parameter sind schwer abschätzbar und es ergibt sich eine Risikoprioritätszahl von 192. Dies stellt den höchsten Wert unter allen vorkommenden Risikoprioritätszahlen der FMEAs dar.

Eine Reduktion der Drehzahl, welche eine Verbesserung zweier unterschiedlicher Aspekte bedeutet, macht den Einsatz von Wuchtschrauben überflüssig.

Ausgehend von der FMEA leitet sich die Reduktion der Drehzahl auf einen Wert von maximal 15000 upm, eine Reduktion der Heizleistung und die Verwendung eines hochtemperaturfesten Klebstoffes ab. Die Nichterfüllung des Wunschkriteriums des erweiterten Drehzahlbereiches wird für die Erhöhung der Sicherheit gegen Beschädigung in Kauf genommen.

3.5 Entwicklungsphase - Ausarbeitung

Während der Ausarbeitungsphase werden alle erforderlichen Informationen bezüglich des Produktes so aufbereitet, dass dieses umgesetzt werden kann (Conrad, 2010, S. 285).

Dies umfasst nach Conrad (2010):

- Einzelteilzeichnungen erstellen
- Berechnungen durchführen
- Baugruppenzeichnungen erstellen
- Montagezeichnungen oder Gesamtzeichnungen anfertigen
- Stücklisten aufstellen
- Fertigungs- und Montageanweisungen festlegen
- Zeichnungs- und Stücklistenprüfung durchführen
- Betriebsanleitung und Dokumentation erarbeiten

3.6 Praktische Umsetzung

Nach dem Durchlaufen der vier Abschnitte für methodisches Konstruieren nach VDI-2222 wird mit der praktischen Realisierung des Prüfstandes begonnen. Einen wichtigen Punkt bei diesem Prozess stellt die fortlaufende Dokumentation etwaiger auftretender Änderungen, Probleme und deren Lösung dar. Nachfolgend werden die wesentlichen Erkenntnisse und Modifikationen, welche sich im Rahmen des Zusammenbaus und der Inbetriebnahme ergeben, genauer ausgeführt.

3.6.1 Induktionsheizung

Für die Herstellung der Induktionsheizung sind vier Komponenten erforderlich:

- Zwei Ferritplatten
- Ein Ferritring
- Ein Kunststoffmantel
- Kupferdraht

Grundsätzlich ist die Heizung aus zwei Halbschalenelementen aufgebaut, welche durch die Wicklungen zusammengehalten werden. Weiters werden die Ferritplatten durch ein Gestell in ihrer Position geklemmt. Für den Wickelvorgang wird der Kunststoffmantel durch eine Hülse mit der Welle verbunden, wodurch sich die gesamte Heizung mit der Welle mitdrehen lässt. Dies erleichtert den Wickelprozess, da durch die Magnetkupplung das System von außen gedreht werden kann. Ein Ende des Drahtes wird mit Klebstoff am Kunststoffmantel befestigt um ein Durchrutschen des Drahtes beim Wickeln zu verhindern.

Bei der Planung muss berücksichtigt werden, dass die erforderlichen Ferritplatten sehr lange Lieferzeiten aufweisen. Nach einer Wartezeit von mehreren Monaten wurde der Entschluss gefasst, die Ferritplatten aus einzelnen kleinen Ferritplättchen zusammenzukleben. Für diese beträgt die Lieferzeit weniger als eine Woche.

Ein weiteres Problem stellt die Bearbeitung von Ferrit dar. Nach einem Test, bei welchem versucht wurde, ob die Plättchen durch konventionelles Bohren bearbeitbar sind, wurde entschieden, die erforderliche Kontur wasserstrahlschneiden zu lassen.

Der erste Versuch die Heizung zu wickeln musste abgebrochen werden. Durch die auftretenden Kräfte beim Wickeln begann die Kunststoffhülse durchzudrehen. Diesem Problem wird mit einer Modifikation des Kunststoffmantels begegnet. Abbildung 33 zeigt die modifizierte Version des Kunststoffmantels. Dieser Punkt ist in der FMEA für die Heizung unter der Fehlerursache „*Verspannung der Heizung beim Wickelprozess zu groß*“ aufgelistet. Durch die Modifikation wird der Kunststoffmantel beim Wickelvorgang nicht entlastet, wodurch ein Durchrutschen vermieden wird. In dieser Ausführung konnte die Heizung erfolgreich hergestellt und in Betrieb genommen werden.

3.6.2 Antrieb

Das Antriebssystem, bestehend aus Magnetkupplung und Motor, hat im praktischen Test die Erwartungen bezüglich des übertragbaren Drehmomentes übertroffen.

Die Magnetkupplung überträgt Drehmomente bis maximal 2,2 Nm. Dieser Wert entspricht jenem der Simulation, welche im Vorfeld durchgeführt wurde. Der Schrittmotor deckt einen Drehzahlbereich zwischen 0 und 1400 Umdrehungen pro Minute ab. Dieser Wert übertrifft die in Kapitel 3.3.5.2 getroffene Mindestabschätzung um ein Vielfaches.

Für die Magnetkupplung ist die Möglichkeit des Wuchtens durch Wuchtschrauben vorgesehen. Um die Belastung auf die Schrauben bei hohen Drehzahlen möglichst gering zu halten fiel die Wahl auf Madenschrauben. Während der Wucht und Testläufe wanderten die Madenschrauben aufgrund der Winkelbeschleunigung und ihres Trägheitsmomentes aus den Gewindebohrungen heraus. Um diesem Problem vorzubeugen werden anstelle der Madenschrauben Senkkopfschrauben verwendet. Abbildung 34 zeigt die Magnetkupplung nach dem Zwischenfall.



Abbildung 34 - Magnetkupplung Schaden

4. Messkonzept

Im folgenden Kapitel wird das Messprinzip, welches im Rahmen dieses Prüfstandes zum Einsatz kommt, beschrieben. Anschließend wird auf die Hardware eingegangen und die in dieser Arbeit zum Einsatz kommende Formel für die Berechnung des Wärmeleitwertes behandelt, wobei kurz die getroffenen Vereinfachungen und Rahmenbedingungen erläutert werden. Zuletzt werden die Auswertung und die Messgenauigkeit abgehandelt.

4.1 Messprinzip

Für die Berechnung des Wärmeleitkoeffizienten sind drei Größen erforderlich (Takeuchi, Dickey, Demsky, Lue, Kirsch, & Frantz, 2004, S. 5):

- zufließender Wärmestrom
- abfließender Wärmestrom
- Temperaturdifferenz zwischen Lagerein- und Lageraustritt.

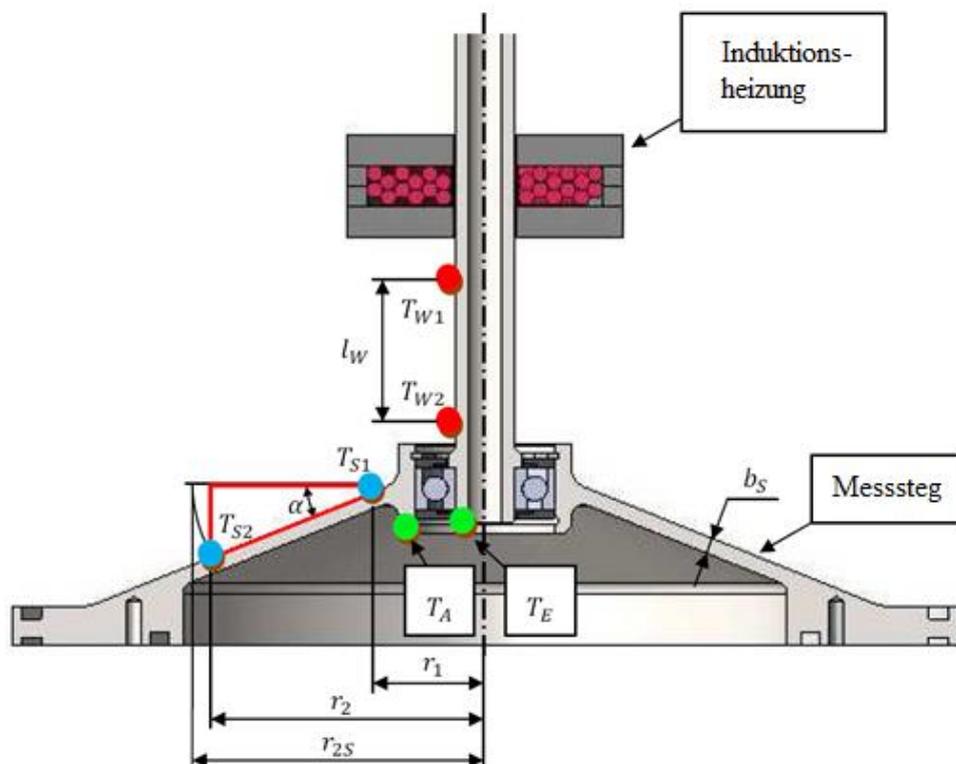


Abbildung 35 - Messprinzip/Aufbau
(Riepan, 2012, S. 32)

Abbildung 35 zeigt die zur Bestimmung des Wärmeleitwertes erforderlichen Parameter am Prüfaufbau. Um den zufließenden Wärmestrom errechnen zu können müssen zwei Temperaturen in einem definierten Abstand l_w bekannt sein. Diese beiden Temperaturen sind in Abbildung 35 mit T_{W1} und T_{W2} benannt. Weiters muss die Temperatur T_E am Lagersitz an der Welle sowie die Temperatur T_A am Lagersitz des Flansches bekannt sein. Vorausgesetzt sei eine in radialer sowie in Umfangsrichtung isotherme Temperaturverteilung.

Der abfließende Wärmestrom wird indirekt durch eine Temperaturmessung am Messflansch gemessen. Grundsätzlich sind zwei Messstellen ausreichend, um die Genauigkeit der Messung zu erhöhen sind in Umfangsrichtung bei den Messstellen T_{S1} und T_{S2} je drei Sensoren verteilt appliziert. Die dadurch ermittelten Temperaturen werden im Rahmen der Auswertung gemittelt. In diesem Fall sei vorausgesetzt, dass die Temperatur in Umfangsrichtung keinen Gradienten aufweist.

4.2 Messhardware

4.2.1 Temperaturmessung

4.2.1.1 Messung mittels Pyrometern

Messpunkte, welche im Laufe der Messungen eine Relativbewegung zum Gehäuse ausführen, erfordern eine berührungslose Temperaturerfassung, welche mittels Pyrometer durchgeführt wird. Dies sind die drei Punkte an der Welle: T_{W1} , T_{W2} und T_E . Die Pyrometer sind als fertige Systeme erhältlich, sie wurden lediglich für die Vakuumdurchführung modifiziert. Um einen definierten Emissionsgrad des Prüfaufbaus von $\varepsilon = 0,97$ zu gewährleisten wurden die entsprechenden Messstellen schwarz lackiert. Die Elektronikboxen, welche die Messsignale verarbeiten, befinden sich außerhalb des Prüfstandes. Die Eckdaten der verwendeten Pyrometer mit Vorsatzoptik sind in Tabelle 21 angeführt.

Tabelle 21 - Datenblatt Pyrometer

Temperaturmessung - berührungslos (Pyrometer)	
Hersteller	Optris
Bezeichnung	CT LT
Vorsatzoptik	CF, D:S = 22:1
minimale Messfleckgröße; Abstand	ø0.8 mm; 10 mm
Systemgenauigkeit (bei Umgebungstemperatur 25°C)	±1 % bzw. ±1 °C
Reproduzierbarkeit (bei Umgebungstemperatur 25°C)	±0.5 % bzw. ±0.5 °C



Abbildung 36 – Pyrometer
(Optris infrared thermometers, 2014)

4.2.1.2 Messung mit Widerstandsthermometern

Zur Erfassung der Temperaturen an den Messstellen T_{S1} und T_{S2} am Flansch und der Betriebstemperaturen kommen Pt-1000 Widerstandsthermometer zum Einsatz. Diese werden direkt an den definierten Positionen am Prüfaufbau befestigt. Tabelle 22 fasst die wichtigsten Eckdaten der Pt-1000 Elemente tabellarisch zusammen.

Tabelle 22 - Datenblatt Pt-1000 Widerstandsthermometer

Temperaturmessung - berührend (Pt-1000)	
Bezeichnung	Pt-1000 Temperatursensoren in SMD-Bauform
Norm	DIN EN 60 751
Temperaturbereich	-50 °C bis 150 °C
Nennwiderstand	1000 Ω
Toleranzklasse	B
Abmessungen L*B*H	2.0 mm * 1.3 mm * 0.5 mm

Die Anschlussdrähte werden über modifizierte *Sub-D Stecker* aus dem Gehäuse geführt, wo die Messsignale über eine Brückenschaltung weiterverarbeitet und anschließend ausgewertet werden. Die verwendete Brückenschaltung zeigt Abbildung 37.

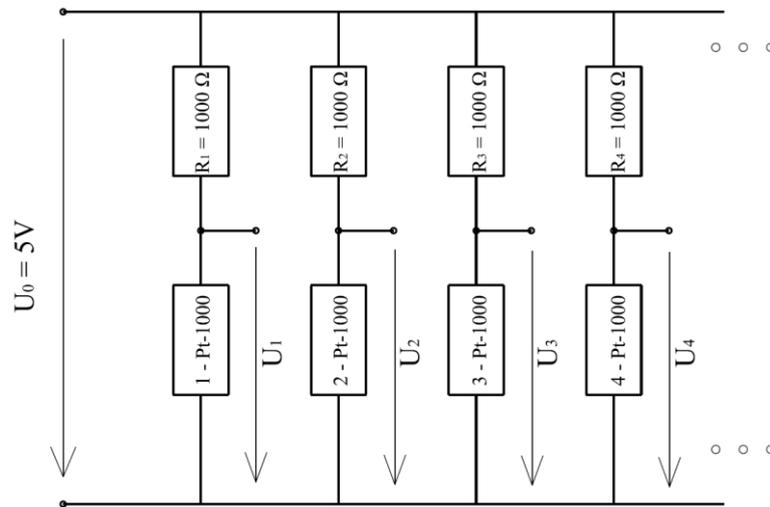


Abbildung 37 - Brückenschaltung Pt-1000

In weiterer Folge werden die Spannungen U_1 , U_2 , U_3 , etc. durch die Messhardware ausgewertet und einer Temperatur zugeordnet. Es wird die Versorgungsspannung U_0 fortlaufend mitgemessen und bei der Auswertung miteinbezogen um die Messunsicherheit der Temperaturmessungen zu verringern.

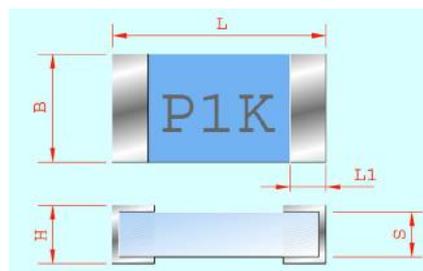


Abbildung 38 - Pt-1000

(Jumo GmbH& Co. KG, 2014)

4.2.2 Druckmessung

Um den Druck im Prüfstandsgehäuse zu bestimmen wird ein aktiver *Pirani-Vakuumsensor* mit der Bezeichnung *CVM-211* der Firma *VACOM* eingesetzt. Tabelle 23 fasst die wichtigsten Leistungsdaten zusammen.

Tabelle 23 - Datenblatt Drucksensor

Druckmessung	
Bezeichnung	CVM211 "Stinger" Konvektions-Pirani-Vakuummeter
Messbereich	0.01 - 1.33E+5 Pa
Genauigkeit	±2 % vom Messwert (500 ... 1000 mbar)
	±10% vom Messwert (<500 mbar)



Abbildung 39 – Drucksensor

(Vacom - Vakuum Komponenten & Messtechnik GmbH, 2014)

4.2.3 Drehzahlmessung

Die Drehzahlmessung wird mittels Kontrastsensor durchgeführt. Als Kontrast zur Welle fungiert eine mit Aluminium bedampfte Kunststoffklebefolie. Der Kontrastsensor gibt bei einer Änderung der Kontrastverhältnisse eine Spannung von 0 bzw. 5 V aus. Das Messsignal wird ebenfalls durch den *Sub-D Stecker* nach außen geführt und mittels eines Oszilloskops verarbeitet. In Tabelle 24 sind die Eckdaten des Sensors zur Erfassung der Wellendrehzahl aufgelistet.

Tabelle 24 - Datenblatt Kontrastsensor

Drehzahlmessung - Kontrastsensor	
Bezeichnung	ROS - Remote Optical Sensor (Monarch Instrument)
Drehzahlbereich	1 - 250 000 upm
Energieversorgung	3 - 15Vdc @ 40 mA

Durch das starke Rauschen, hervorgerufen durch die Induktionsheizung, kann eine Auswertung der Drehzahl nicht automatisiert durchgeführt werden. Aus diesem Grund kann die

Drehzahl auch nicht automatisiert geregelt werden. Abbildung 40 zeigt exemplarisch das Signal des Sensors bei einer Drehzahl von 3800 upm. Gut ersichtlich ist das durch die Heizung verursachte Rauschen, wie es trotz geschirmter Verkabelung noch auftritt.

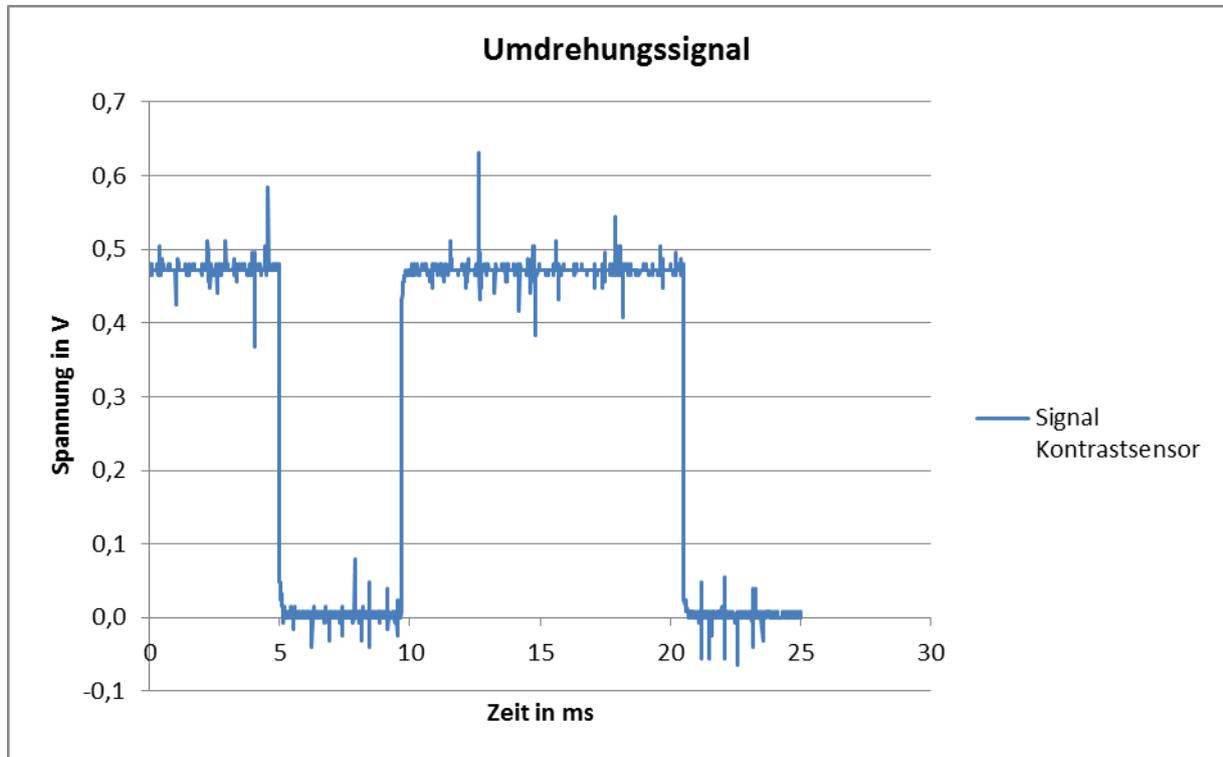


Abbildung 40 - Umdrehungssignal Kontrastsensor (Rauschen)



Abbildung 41 – Kontrastsensor
(Monarch Instrument)

4.3 Berechnung des Wärmeleitwertes

Unter der Annahme, dass an den Kontaktstellen Wälzkörper-Innenring und Wälzkörper-Außenring dieselbe Wärmemenge generiert wird, kann die Wärmeleitung über das Wälzlager im Stillstand sowie im Betrieb durch folgende Beziehung ausgedrückt werden (Takeuchi, Dickey, Demsky, Lue, Kirsch, & Frantz, 2004, S. 5):

$$G_b = \frac{1}{2} * \frac{\dot{Q}_{in} + \dot{Q}_{out}}{T_E - T_A} \quad [8]$$

Wärmeleitung in der Welle - \dot{Q}_{in} (Riepan, 2012, S. 32)

$$\dot{Q}_{in} = \frac{\lambda * A_W}{l_W} * (T_{W1} - T_{W2}) \quad [9]$$

Der Wärmeleitwert $\lambda = 15 \frac{W}{m \cdot K}$ wird durch den Werkstoff der Welle bestimmt, die Messlänge l_W beträgt $30 * 10^{-3} m$ und die Querschnittfläche $A_W = 126,45 * 10^{-6} m^2$.

In weiterer Folge ergibt sich der Faktor $\frac{\lambda * A_W}{l_W} = 0,06322 \frac{W}{K}$. Somit errechnet sich die Wärmeleitung in der Welle durch

$$\dot{Q}_{in} = 0,06322 * (T_{W1} - T_{W2}) \quad [10]$$

Wärmeleitung im Steg \dot{Q}_{out} (Riepan, 2012, S. 33)

$$\dot{Q}_{out} = \frac{\lambda_S * 2 * \pi * b_S}{\ln\left(\frac{r_1}{r_{2S}}\right)} * (T_{S1} - T_{S2}) \quad [11]$$

Der Wärmeleitwert $\lambda = 15 \frac{W}{m \cdot K}$ wird durch das Material des Flansches bestimmt, die Stegbreite b_S beträgt $4 * 10^{-3} m$. Weiters ergeben sich die Radien $r_1 = 42 * 10^{-3} m$ und r_{2S} errechnet sich aus folgender Beziehung (siehe Abbildung 35):

$$r_{2S} = r_1 + \frac{r_2 - r_1}{\cos(\alpha)} \quad [12]$$

Mit den Werten $r_2 = 71 * 10^{-3} \text{ m}$ und $\alpha = 15^\circ$ resultiert $r_{2S} = 72,023 * 10^{-3} \text{ m}$ errechnet sich weiters der Faktor $\frac{\lambda_S * 2 * \pi * b_S}{\ln\left(\frac{r_1}{r_{2S}}\right)} = -0,6990 \frac{\text{W}}{\text{K}}$. Somit kann die Wärmeleitung im Steg wie folgt angeschrieben werden:

$$\dot{Q}_{out} = -0,6990 * (T_{W1} - T_{W2}) \quad [13]$$

Temperaturen T_E und T_A

Durch einen Pyrometer, wird die Temperatur T_E an der Wellenschulter gemessen. Um die Temperatur T_A zu ermitteln wird der Temperaturverlauf am Steg linear bis zum Lagersitz extrapoliert, wie in Abbildung 43 dargestellt. Es sind die Werte der wichtigsten Punkte eingetragen. Der erste Wert entspricht dem Radialabstand in mm und der zweite Wert der Temperatur in °C. Ein Radialabstand von 31 mm kommt der Position des Lagersitzes, 42 mm dem ersten und 71 mm dem zweiten Messpunkt am Flansch gleich.

Abbildung 43 zeigt den Temperaturverlauf, wie er sich aufgrund der linearen Extrapolation ergibt im Vergleich zu den Simulationsergebnissen einer thermischen Analyse des Flansches. Als Eingangswerte für die Simulation dienten die Messergebnisse der zweiten Messreihe, Durchgang drei, erste Messung (Stillstand). Der Wärmefluss über den Flansch hin zum Gehäuse beträgt 3,45 W. Als Software für die Simulation diente das FEM-Package des Programmes *Inventor*. Eine Netz-Abhängigkeits-Analyse wurde durchgeführt um Sicherzustellen, dass das verwendete Netz nur einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Ergebnisse hat. Konvektiver Wärmetransport sowie Wärmestrahlung wurden vernachlässigt.

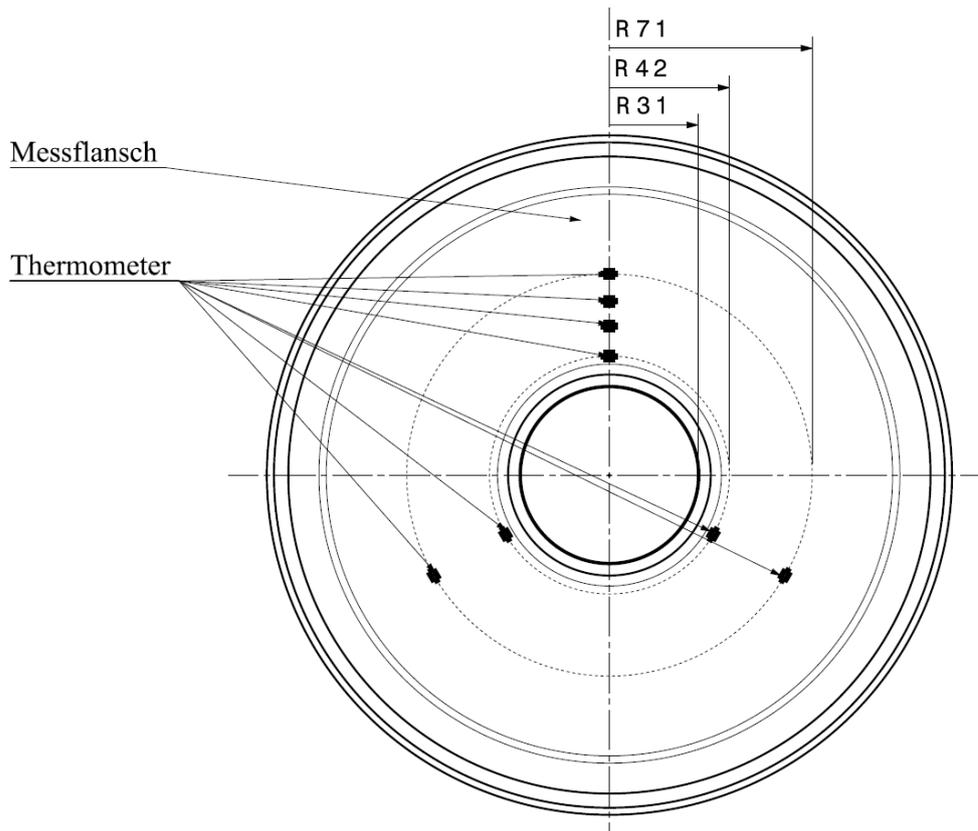


Abbildung 42 - Messflansch: Position der Temperatursensoren

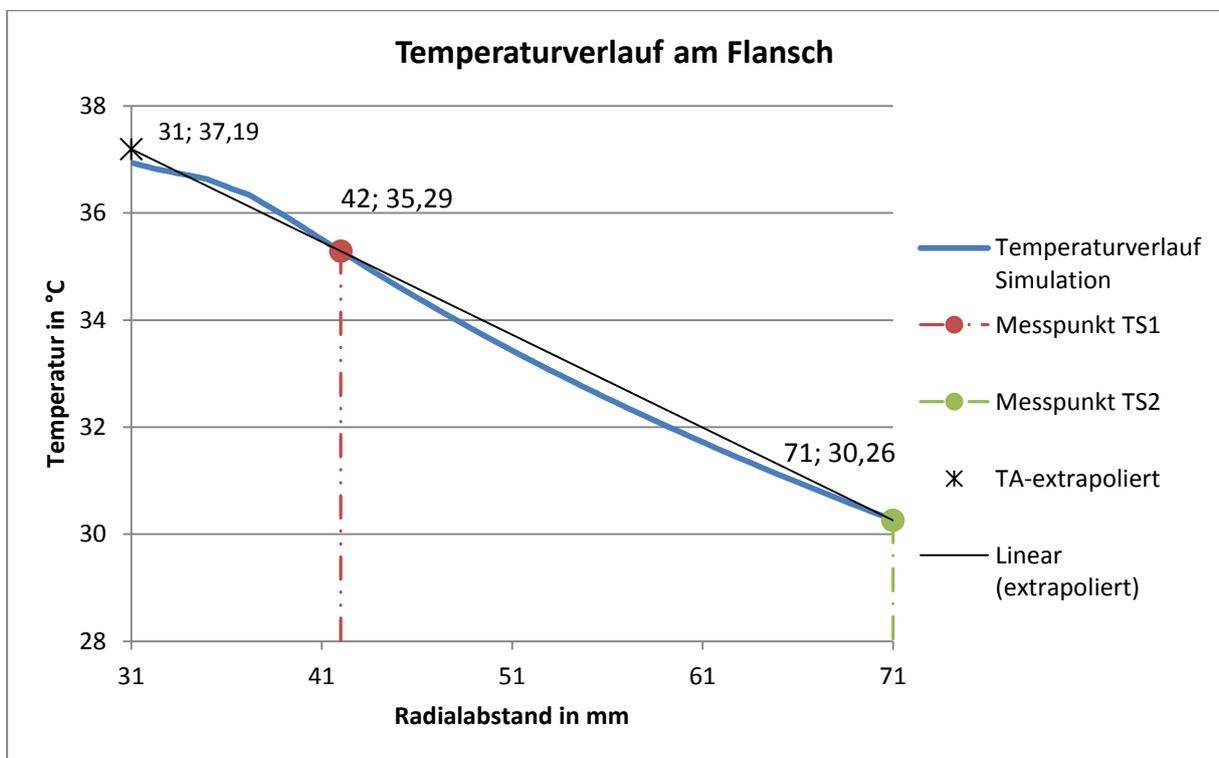


Abbildung 43 - Temperaturverlauf am Flansch

Die Diskrepanz zwischen der Interpolation und der Simulation entspricht für diesen Fall 0,25 °C.

Tabelle 25 - Gegenüberstellung Simulation – Extrapolation

	Radialabstand in mm	Temperatur in °C
$T_{A\text{-simuliert}}$	31	36,94
$T_{A\text{-extrapoliert}}$	31	37,19
ΔT_A	31	0,25

4.4 Vakuumdurchführung

Die Vakuumdurchführung der Messsignale erfolgt mittels modifizierter *Sub-D Stecker*. Es handelt sich dabei um zwei 25-polige Stecker in nicht geschlitzter Ausführung. Ein weiterer 15 poliger *Sub-D Stecker* wird für die Vakuumdurchführung des Messsignals der Messstelle an der Wellenschulter verwendet. Alle *Sub-D Stecker* sind bei den Pins mit Sekundenkleber ausgegossen um eine Abdichtung zu erzielen. Weiters sind die einzelnen Stecker mit Epoxidharz in die entsprechenden Ausfräsungen der Deckel eingeklebt. Mit den eingebauten Vakuumdurchführungen liegt der Minimaldruck im Prüfstand, welcher bei kontinuierlichem Laufen der Pumpe erreicht werden kann, bei etwa 7 Pa.



Abbildung 44 - Vakuumdurchführung 25-poliger Sub-D Stecker

4.5 Auswertung

Für die Auswertung der Messsignale kommt ein Compact-reader der Firma *National Instruments* zum Einsatz. Als Software wird *LabVIEW 14* eingesetzt. Die Messsignale werden mit einer Frequenz von 10 Hertz über einen definierten Zeitraum aufgezeichnet und anschließend gemittelt. Diese Mittelung reduziert den Einfluss des Rauschens.

Störrauschen durch die Induktionsheizung

Durch das sich ändernde Magnetfeld der Induktionsheizung wird, solange diese in Betrieb ist, ein Störsignal in die Messleitungen der Sensoren induziert. Dies gilt jedoch nicht für die Pyrometer, da diese aufgrund ihrer geschirmten Messleitungen gegenüber Störsignalen von außen unempfindlich sind. Abbildung 45 zeigt den Verlauf des Temperatursignals eines der Pt-1000 Elemente bei aktiver und inaktiver Heizung. Der dazugehörige Mittelwert und die Maximalabweichungen vom Mittelwert sind in Tabelle 26 angeführt.

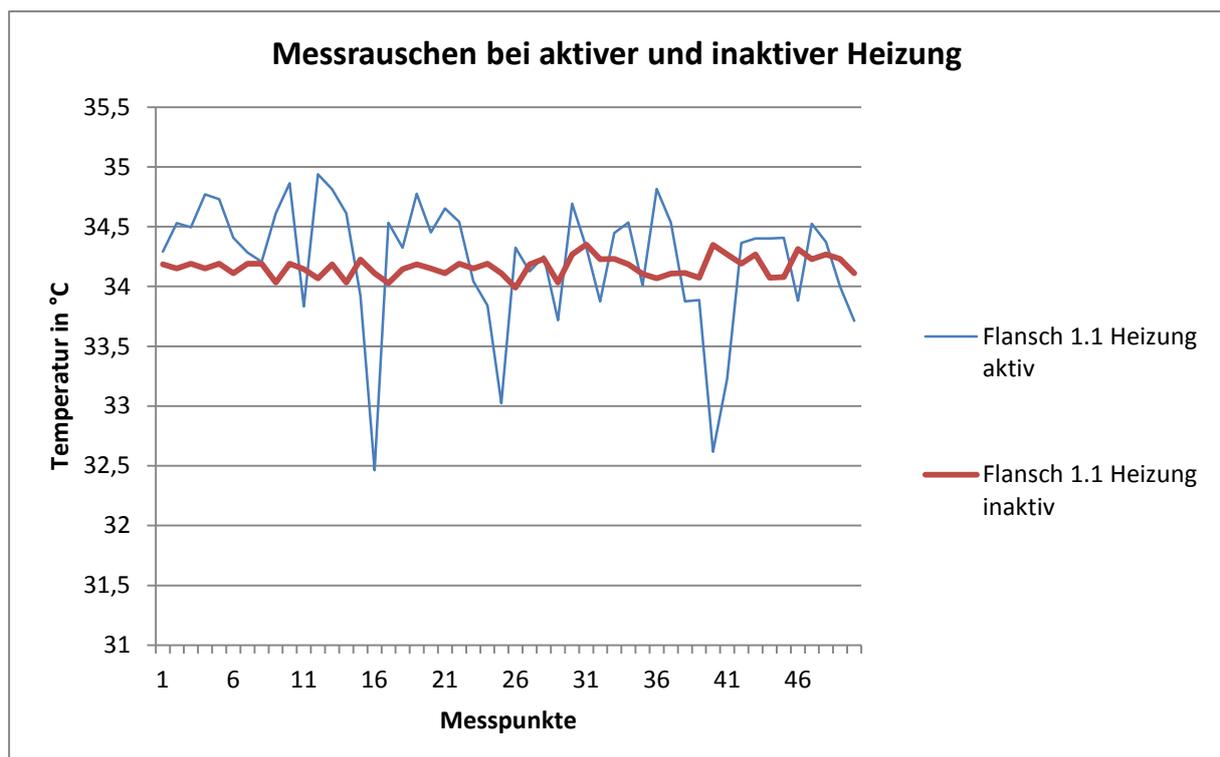


Abbildung 45 - Vergleich Messrauschen Heizung aktiv und inaktiv

Bezogen auf die obere und untere Abweichung vergrößert sich die Streuung durch die aktive Heizung etwa um den Faktor 5 bis 10. Die Abweichung bezogen auf die Mittelwerte der beiden Messungen liegt bei 0,062 °C in diesem Beispiel. In Extremfällen liegt die Diskrepanz bei bis zu 0.3 °C, abhängig von der Anzahl an gemittelten Messwerten. Das Temperatursignal wird mit einer Abtastgeschwindigkeit von 10 Hz aufgezeichnet, weshalb 50 Messwerte einer Messdauer von fünf Sekunden entsprechen.

Tabelle 26 - Messrauschen Heizung inaktiv

	Heizung inaktiv	Heizung aktiv
Mittelwert	34,163 °C	34,226 °C
Obere Maximalabweichung	0,186 °C	0,713 °C
Untere Maximalabweichung	0,172 °C	1,764 °C

Um eine hinreichende Genauigkeit der Messungen zu gewährleisten wird während des Messvorganges die Heizung inaktiviert. Auf diese Weise wird die Streuung der Messwerte verringert. Weiters werden die Messwerte über einen Zeitraum von fünf Sekunden gemittelt.

4.6 Messunsicherheit

Bei jeder Messung treten gewisse Messabweichungen auf. Diese werden durch die Umweltbedingungen, das Messverfahren und die Messeinrichtung selbst verursacht. Als Folge entspricht der gemessene nicht exakt dem tatsächlichen Wert. Im Folgenden sollen diese Abweichungen vom Ist-Wert genauer untersucht werden. (Mühl, 2008, S. 29)

Grundsätzlich werden Messabweichungen in zwei Kategorien eingeteilt:

Systematische Messabweichungen:

„Systematische Messabweichungen haben während der Messung einen konstanten Betrag mit einem bestimmten Vorzeichen oder unterliegen nur einer sehr langsamen Veränderung aufgrund einer Ursache, die die Messgröße determiniert verändert. Sie führen zu einer immer gleichen, zeitlich konstanten Differenz des Messwerts vom wahren Wert.“ (Mühl, 2008, S. 32).

Systematische Fehler im Rahmen dieses Prüfstandsbaus entstehen durch:

- Fertigungsungenauigkeiten der Welle und des Messflansches
- Abweichung der Widerstände des Spannungsteilers vom Soll-Wert
- zusätzliche Widerstände infolge der Vakuumdurchführung
- Abweichung der Messabstände vom Soll-Wert
- Fehler durch die lineare Interpolation der Temperatur T_A

Zufällige Messabweichungen:

„Zufällige Messabweichungen entstehen aufgrund nicht beherrschbarer, nicht determinierter Einflüsse während der Messungen. Sie sind nicht vorausbestimmbar. Wird die Messung am selben Messobjekt unter gleichen Bedingungen wiederholt, führen sie zu einer Streuung der Messwerte.“ (Einführung in die elektrische Messtechnik, Mühl, S31)

- Messungenauigkeit Pyrometer
- Messungenauigkeit Pt-1000
- Genauigkeit Auswertung CRIO
- Störsignale von außen

Im Rahmen einer vereinfachten Abschätzung des Messfehlers werden folgende Parameter berücksichtigt:

- Messungenauigkeit Pyrometer
- Messungenauigkeit Pt-1000
- Toleranz Messabstand Pt-1000
- Toleranz Messabstand Pyrometer

Nicht berücksichtigt werden in dieser Betrachtung die Fertigungstoleranzen der Welle und des Steges, die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Temperatur und dessen Bandbreite. Weiters werden Abweichungen der Widerstände des Spannungsteilers vom Nennwert vernachlässigt. Eine überschlägige Abschätzung der Fehler dieser Parameter hat ergeben, dass diese im Vergleich zu den Verbleibenden nicht signifikant sind.

Tabelle 27 – Messungenauigkeiten / Toleranzen

Benennung	Bezug	Messungenauigkeit/ Reproduzierbarkeit
Pyrometer:	@ T = 140 °C	1,4 °C / 0,7 °C
	@ T < 100 °C	1,0 °C / 0,5 °C
Pt-1000	@ T = 50 °C	0,5 °C
Toleranz Messabstand Welle		0,5 mm
Toleranz Messabstand Flansch r _{2s}		0,5 mm
Toleranz Messabstand Flansch r ₁		0,5 mm

Der Wärmeleitwert G_b ist, wie bereits in Gleichung [8] angeführt, durch folgenden Zusammenhang definiert:

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

Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird die Ungenauigkeitsanalyse in zwei Punkte unterteilt. Der erste Punkt behandelt den zufließenden, der Zweite den abfließenden Wärmestrom. Anschließend werden die beiden Teilergebnisse kombiniert und die Maximalabweichung des Wärmeleitwertes errechnet.

Zufließender Wärmestrom

Der zufließende Wärmestrom errechnet sich wie in Gleichung [9] durch:

$$\dot{Q}_{in} = \frac{\lambda * A}{L} * (T_{w1} - T_{w2})$$

Aufgrund der zuvor getroffenen Vereinfachungen errechnet sich die maximale Messungenauigkeit unter Anwendung des Gesetzes der Gauß'schen Fehlerfortpflanzung aus (Kiencke & Eger, 2008, S. 184):

$$\Delta \dot{Q}_{in_{max}} = \left| \frac{\partial \dot{Q}_{in}}{\partial L} \right| * \Delta L + \left| \frac{\partial \dot{Q}_{in}}{\partial T_{w1}} \right| * \Delta T_{w1} + \left| \frac{\partial \dot{Q}_{in}}{\partial T_{w2}} \right| * \Delta T_{w2} \quad [14]$$

Die Werte für ΔL , ΔT_{we} und ΔT_{wa} entsprechen den jeweiligen Messungenauigkeiten bzw. Toleranzen, wie sie in Tabelle 27 angeführt sind. Die partiellen Ableitungen werden nachfolgend einzeln angeführt, um ein Nachvollziehen der Rechnung zu erleichtern.

$$\frac{\partial \dot{Q}_{in}}{\partial L} = -\frac{\lambda * A}{L^2} * (T_{w1} - T_{w2}) \quad [15]$$

$$\frac{\partial \dot{Q}_{in}}{\partial T_{we}} = \frac{\lambda * A}{L} \quad [16]$$

$$\frac{\partial \dot{Q}_{in}}{\partial T_{wa}} = -\frac{\lambda * A}{L} \quad [17]$$

Abfließender Wärmestrom

Der abfließende Wärmestrom ergibt sich durch die Beziehung von Gleichung [11]:

$$\dot{Q}_{out} = \frac{2 * \pi * \lambda * b}{\ln\left(\frac{r_1}{r_{2s}}\right)} * (T_{s1} - T_{s2})$$

In weiterer Folge ergibt sich die Messungenauigkeit als:

$$\Delta \dot{Q}_{out_{max}} = \left| \frac{\partial \dot{Q}_{out}}{\partial r_1} \right| * \Delta r_1 + \left| \frac{\partial \dot{Q}_{out}}{\partial r_{2s}} \right| * \Delta r_{2s} + \left| \frac{\partial \dot{Q}_{in}}{\partial T_{s1}} \right| * \Delta T_{s1} + \left| \frac{\partial \dot{Q}_{in}}{\partial T_{s2}} \right| * \Delta T_{s2} \quad [18]$$

$$\frac{\partial \dot{Q}_{out}}{\partial r_1} = \frac{2 * \pi * \lambda * b}{r_1 * \left[\ln\left(\frac{r_1}{r_{2s}}\right) \right]^2} * (T_{s2} - T_{s1}) \quad [19]$$

$$\frac{\partial \dot{Q}_{out}}{\partial r_{2s}} = -\frac{2 * \pi * \lambda * b}{r_{2s} * \left[\ln\left(\frac{r_1}{r_{2s}}\right) \right]^2} * (T_{s2} - T_{s1}) \quad [20]$$

$$\frac{\partial \dot{Q}_{out}}{\partial T_{s1}} = \frac{2 * \pi * \lambda * b}{\ln\left(\frac{r_1}{r_{2s}}\right)} \quad [21]$$

$$\frac{\partial \dot{Q}_{out}}{\partial T_{s2}} = -\frac{2 * \pi * \lambda * b}{\ln\left(\frac{r_1}{r_{2s}}\right)} \quad [22]$$

Wärmeleitwert

Die Maximalabweichung des Wärmeleitwertes wird nun durch die zuvor errechneten maximalen Abweichungen der Wärmeströme und der Messungenauigkeiten der Temperatur am Innen- und am Außenring ermittelt. Wie auch zuvor bei den Wärmeströmen werden die einzelnen Terme von Gleichung [23] einzeln angeführt.

$$\Delta G_{b_{max}} = \left| \frac{\partial G_b}{\partial \dot{Q}_{in}} \right| * \Delta \dot{Q}_{in} + \left| \frac{\partial G_b}{\partial \dot{Q}_{out}} \right| * \Delta \dot{Q}_{out} + \left| \frac{\partial G_b}{\partial T_E} \right| * \Delta T_E + \left| \frac{\partial G_b}{\partial T_A} \right| * \Delta T_A \quad [23]$$

$$\frac{\partial G_b}{\partial \dot{Q}_{in}} = \frac{1}{2 * (T_E - T_A)} \quad [24]$$

$$\frac{\partial G_b}{\partial \dot{Q}_{out}} = \frac{1}{2 * (T_E - T_A)} \quad [25]$$

$$\frac{\partial G_b}{\partial T_E} = -\frac{\dot{Q}_{in} + \dot{Q}_{out}}{2 * (T_E - T_A)^2} \quad [26]$$

$$\frac{\partial G_b}{\partial T_A} = \frac{\dot{Q}_{in} + \dot{Q}_{out}}{2 * (T_A - T_E)^2} \quad [27]$$

Exemplarisch wird nachfolgend die Messabweichung gemäß oben angeführter Rechnung für die erste Messung der zweiten Messreihe Durchgang Eins (Messung im Stillstand bei 10 Pa) angeführt. Für die Ermittlung der Maximalabweichung Wärmeleitwert relativ werden anstelle der Messunsicherheiten die Reproduzierbarkeiten der Messinstrumente herangezogen. Weiters werden die Toleranzen der Messabstände vernachlässigt, da sich diese im Rahmen der Prüfstandsversuche nicht ändern.

Tabelle 28 - Messungenauigkeit Beispiel

Initialwerte			
T_{w1}	130,57 °C	λ	15 W/m*K
T_{w2}	76,45 °C	A_{Welle}	1,26E-04 m ²
T_E	53,06 °C	r_1	4,20E-02 m
T_A	37,32 °C	r_{2s}	7,20E-02 m
T_{S1}	35,69 °C	l_w	3,00E-02 m
T_{S2}	30,46 °C		

Maximalabweichung Wärmeleitwert absolut	0,034 W/K
Maximalabweichung Wärmeleitwert relativ	0,025 W/K

5. Auswertung und Interpretation der Ergebnisse

Folgendes Kapitel fasst zuerst die unterschiedlichen durchgeführten Versuche kurz zusammen. Es wird darauf eingegangen, welche Parameter variiert und wie der Messablauf festgelegt wurde. Anschließend werden die Ergebnisse angeführt, interpretiert und diskutiert. Die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse wird ebenso behandelt wie etwaige Diskrepanzen und Hypothesen, um diese zu erklären.

5.1 Kalibrierung der Temperatursensoren

Infolge des Messaufbaus im Rahmen des Prüfstandes entstehen zusätzliche ohmsche Widerstände in den Messleitungen der Widerstandsthermometer. Urheber dessen sind die Vakuumdurchführung und diverse Lötstellen am Spannungsteiler, wie er in Abbildung 37 illustriert ist. Damit diese Folgen des Messaufbaus keinen Einfluss auf die Messung selbst haben, werden sie bei der Auswertung programmtechnisch berücksichtigt. Dies geschieht im Rahmen der Kalibrierung. Dabei verweilt der Prüfstand drei Tage lang im Labor, wobei ein geeichter Kalibrierstab im Inneren die Temperatur misst. In diesen drei Tagen soll das Gesamtsystem thermisch möglichst nicht beeinflusst werden. Dies bedeutet:

- geschlossene Fenster
- ausgeschaltete Computer
- möglichst keine Personen im Raum

Nach Ablauf der Verweilzeit wird angenommen, dass der Kalibrierstab und das ganze System Prüfstand dieselbe Temperatur aufweisen. In der Auswertung der Thermometer werden nun die zuvor erwähnten zusätzlichen Widerstände so bestimmt, dass die Temperaturanzeige der einzelnen Thermometer mit jener des Kalibrierstabes übereinstimmen. Abbildung 46 zeigt die Einstellungen der Kalibrierung, wie sie im Rahmen der folgenden Prüfstandsversuche verwendet wurde.

pt temp settings				
	delta R/Ohm	R1/Ohm	t_min/°C	t_max/°C
base 1	1,805	1000	-20	180
base 2	1,404	1000	-20	180
base 3	2,03	1000	-20	180
flange 1.1	1,675	1000	-20	180
flange 1.2	3,63	1000	-20	180
flange 1.3	2,541	1000	-20	180
flange 1.4	1,59	1000	-20	180
flange 2.1	2,28	1000	-20	180
flange 2.2	1,1	1000	-20	180
flange 3.1	1,38	1000	-20	180
flange 3.2	2,185	1000	-20	180
ferrite	0,425	1000	-20	180
bearing top	1,785	1000	-20	180
ind. heater	3,85	1000	-20	180
mag. clutch	3,3	1000	-20	180

pyro temp settings					
	offset pyro/°C	tp1/°C	tp2/°C	t_max/°C	t_min/°C
shaft top	-0,059	0	200	180	-20
shaft bottom	-0,139	0	200	180	-20
shaft front	0,64	0	200	180	-20

Abbildung 46 - Kalibrierung Prüfstand

Vor jedem Messdurchgang wird eine Testmessung über einen Zeitraum von einer Minute durchgeführt um die zuvor beschriebene Kalibrierung des Prüfaufbaus zu überprüfen. Ähnlich wie bei der Kalibrierung verweilt der Prüfstand mindestens 48 Stunden zuvor thermisch möglichst unbeeinflusst. In dieser Zeit darf der Prüfstand weder in Betrieb genommen, noch auf sonstige Weise thermisch beeinflusst werden. Zum Zeitpunkt der Überprüfung wird davon ausgegangen, dass alle Messstellen dieselbe Temperatur aufweisen. Es wird der Mittelwert aller Messstellen am Flansch (Pt-1000 Thermometer) und der Welle (Pyrometer) gebildet. Anschließend werden die Werte der einzelnen Sensoren mit den entsprechenden Mittelwerten verglichen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 29 angeführt.

Tabelle 29 - Kalibrierung: Temperaturen und Abweichungen

Temperaturen während des Kalibriervorganges in °C											
Datum	flange 1.1	flange 1.2	flange 1.3	flange 1.4	flange 2.1	flange 2.2	flange 3.1	flange 3.2	shaft bottom	shaft front	shaft top
22. Feb. 14	19,50	19,52	19,53	19,54	19,55	19,56	19,56	19,55	19,28	19,54	19,41
27. Feb. 14	21,32	21,36	21,40	21,36	21,35	21,38	21,39	21,38	21,36	21,23	21,20
1. Mrz. 14	19,62	19,59	19,63	19,62	19,62	19,67	19,68	19,63	19,65	19,50	19,39
15. Mrz. 14	20,93	20,87	20,89	20,90	20,92	20,96	20,99	20,95	20,97	20,59	20,94
27. Mrz. 14	21,22	21,24	21,25	21,27	21,23	21,23	21,25	21,26	21,16	21,29	21,33
29. Mrz. 14	21,35	21,36	21,37	21,38	21,31	21,37	21,41	21,34	21,10	21,32	21,49

Maximale Abweichung vom Mittelwert des Flansches bzw. der Pyrometer in °C											
Datum	flange 1.1	flange 1.2	flange 1.3	flange 1.4	flange 2.1	flange 2.2	flange 3.1	flange 3.2	shaft bottom	shaft front	shaft top
22. Feb. 14	-0,04	-0,01	-0,01	0,00	0,01	0,02	0,02	0,01	-0,13	0,13	0,00
27. Feb. 14	-0,05	-0,01	0,03	-0,01	-0,02	0,01	0,03	0,01	0,10	-0,03	-0,06
1. Mrz. 14	-0,01	-0,05	0,00	-0,01	-0,01	0,04	0,05	0,00	0,14	-0,01	-0,12
15. Mrz. 14	0,00	-0,05	-0,03	-0,03	-0,01	0,03	0,06	0,02	0,13	-0,24	0,11
27. Mrz. 14	-0,02	-0,01	0,01	0,03	-0,02	-0,01	0,01	0,01	-0,10	0,03	0,07
29. Mrz. 14	-0,01	0,00	0,01	0,02	-0,05	0,01	0,05	-0,02	-0,21	0,01	0,19

Zusammenfassend zeigt Tabelle 30 die maximalen und die mittleren Abweichungen der Kategorien Pyrometer und Widerstandsthermometer. Die dort angeführten Ergebnisse bedeuten, dass im Rahmen der oben angeführten Überprüfungen der Kalibrierung, bei den Pyrometern eine Maximalabweichung von 0,192 °C und eine Mittlere von 0,101 °C aufgetreten sind. Bei den Pt-1000 Thermometern liegen die Maximalabweichung bei 0,062 °C und die mittlere Abweichung bei 0,021 °C.

Tabelle 30 - Kalibrierung: max., min. und mittlere Abweichung

	max. obere Abweichung	max. untere Abweichung	mittlere Abweichung
Pyrometer	0,192 °C	-0,240 °C	0,101 °C
Pt-1000	0,062 °C	-0,052 °C	0,021 °C

5.2 Thermisches Einschwingen im Prüfbetrieb

Damit der Wärmeleitwert, wie in Kapitel 4.3 definiert, bestimmt werden kann muss sich ein thermisch stationärer Zustand einstellen. Jene Zeitspanne bis zum Erreichen dieses Gleichgewichtes wurde im Zuge dieser Arbeit versuchsgestützt ermittelt. Dabei wurden die Tempera-

turen der einzelnen Messstellen im gleichbleibenden Zeitabstand von 10 min aufgezeichnet. Aus diesen Messungen wurden die jeweiligen Temperaturgradienten $\Delta T/\Delta t$ errechnet.

Abbildung 47 illustriert die zuvor erwähnten Gradienten in Abhängigkeit von der Zeit. Die ersichtlichen Peaks im Temperaturverlauf resultieren aus den Drehzahländerungen des Motors. Während der ersten zweieinhalb Stunden stand der Motor still, anschließend wurde die Drehzahl alle folgenden eineinhalb Stunden erhöht.

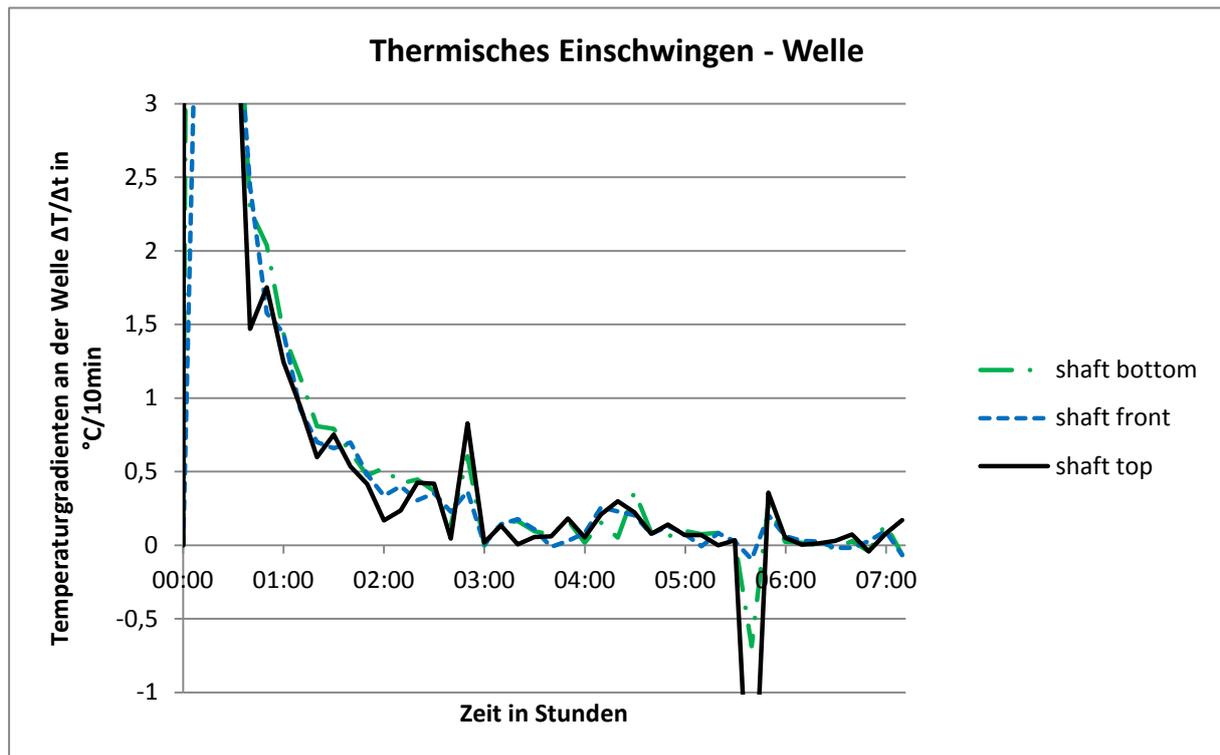


Abbildung 47 - Thermisches Einschwingen Welle

Zur Bestimmung des Zeitpunktes, ab welchem das System thermisch eingeschwungen ist, wird die thermische Zeitkonstante τ_{th} in Sekunden ermittelt. Sie entspricht jenem Zeitraum, in welchem sich der Gradient des Temperaturverlaufes auf den Faktor $\frac{1}{e}$ bzw. 37 % seines ursprünglichen Wertes reduziert (Reisch, 2007, S. 170).

Als erster Bezugspunkt wird Punkt 1 nach 30 min gewählt, da sich ab dieser Zeit die einzelnen Gradienten einander angeglichen haben. Abbildung 48 zeigt dieses Verhalten. Infolge dieser Definition resultiert eine Zeitkonstante von 25 Minuten. Nach einem Zeitraum von fünf Zeitkonstanten gilt das System als thermisch eingeschwungen. Dies entspricht einer Zeitspan-

ne von 125 Minuten. Zuzüglich der Zeitspanne bis zum Erreichen des Punktes 1 ergibt sich die Dauer für das thermische Einschwingen von 2 Stunden 35 Minuten.

Letztendlich wurde der Prüfablauf so definiert, dass 2 Stunden 30 Minuten nach dem Start die erste Messung durchgeführt wird.

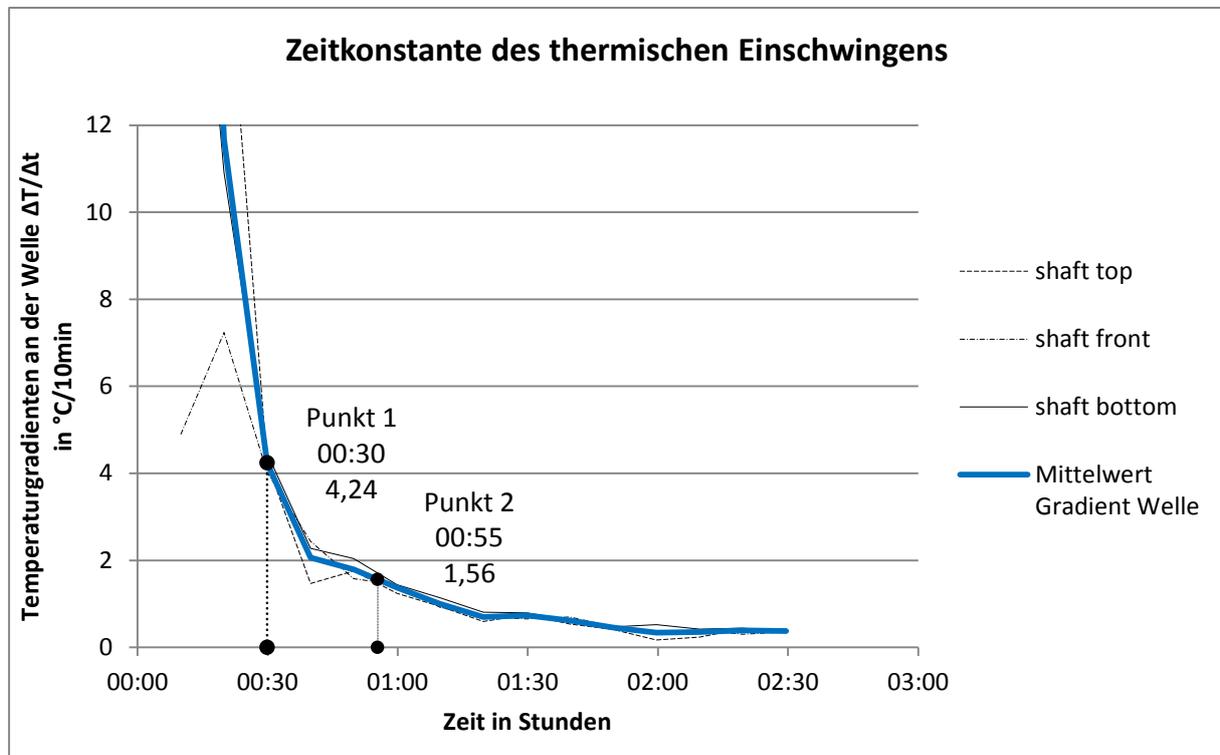


Abbildung 48 - Thermisches Einschwingen – Zeitkonstante

Die Temperaturgradienten am Flansch sind geringer als jene an der Welle, der entsprechende Verlauf ist im Anhang beigelegt. Dies kann auf die größere thermische Masse des Flansches, die größere Entfernung zur Heizung und die geringeren Temperaturunterschiede im Vergleich zur Ausgangstemperatur zurückgeführt werden. Bei ausschließlicher Änderung der Drehzahl aus dem eingeschwungenen Zustand wird dieser schneller wieder erreicht als beim Start der Heizung. Aus diesem Grund wird nach einer Änderung der Drehzahl nur 50 min bis zur Durchführung der nächsten Messung gewartet.

Der Ablauf der Durchgänge sieht daher aus wie in Tabelle 31 gezeigt:

Tabelle 31 - Ablauf Messdurchgänge

<i>Zeitspanne in hh:mm</i>			<i>Drehzahl</i>	Am Ende der jeweiligen Zeitspanne wird die Messung durchgeführt und anschließend der Parameter Drehzahl variiert.
Start	-	02:30	0	
02:30	-	03:20	n1	
03:20	-	04:10	n2	
04:10	-	05:00	n3	
05:00	-	05:50	n4	
05:50	-	06:40	n5	

5.3 Messung der Wärmeleitfähigkeit

Die nachfolgende Tabelle 32 gibt einen kurzen Überblick über die durchgeführten Versuchsreihen und Parametervariationen. In der ersten Messreihe variieren die Motordrehzahl und der Umgebungsdruck.

Im Zuge der zweiten Versuchsreihe wurde ausschließlich der Einfluss der Drehzahl untersucht. Diese war deutlich geringer und feiner abgestuft als in der ersten Messreihe. Für die dritte Messreihe wurden der Druck und die Drehzahl konstant gehalten, lediglich die Vorspannung der Lagerung variierte.

Untersucht wurde ein Spindellager mit der Bezeichnung *7008 ACEGA/P4A* von der Firma *SKF*. Dieses wurde mit dem Schmierfett *LGLT 2.0* von der Firma *SKF* und einer Fettfüllmenge von $1,36 \text{ cm}^3$

Tabelle 32 - Überblick Messreihen

<i>1. Messreihe</i>		
Drehzahl in upm	Druck in Pa	Vorspannung in N
0	10, 1000, 10000	undefiniert
6000	10, 1000, 10000	undefiniert
8000	10, 1000, 10000	undefiniert
10000	10, 1000, 10000	undefiniert
12000	1000	undefiniert

2. Messreihe		
Drehzahl in upm	Druck in Pa	Vorspannung in N
0	10	45
100	10	45
200	10	45
300	10	45
400	10	45
500	10	45
1000	10	45
1300	10	45
6000	10	45

3. Messreihe		
Drehzahl in upm	Druck in Pa	Vorspannung in N
0	10 ⁵	45
0	10 ⁵	500
0	10 ⁵	1000

5.3.1 Erste Messreihe – hohe Drehzahlen

Im Rahmen der ersten Messreihe liegt der Schwerpunkt auf der Wärmeleitfähigkeit bei hohen Drehzahlen. Während einer Drehzahl von 15000 upm und 1000 Pa Prüfstandsdruck löste sich eine Klebung zwischen den Magneten der Magnetkupplung an der Welle, wodurch der Prüfstand stark beschädigt wurde. Versagensursache war die Fliehkraft infolge der hohen Drehzahl in Kombination mit der reduzierten Festigkeit des Klebers, welche auf dessen hohe Temperatur zurückzuführen ist. Diese potentielle Schwachstelle wurde im Vorfeld im Rahmen einer FMEA erkannt, die ergriffenen Maßnahmen waren jedoch nicht ausreichend. Diese FMEA behandelt Kapitel 3.4.2. Bilder der Schäden sind im Anhang beigelegt.

Nachfolgende Tabelle 33 veranschaulicht die unterschiedlichen Parameter im Rahmen der durchgeführten Versuche, wobei die höchste Drehzahl bei 12000 upm liegt. Bei der Demontage und nachfolgenden Reparatur der Magnetkupplung wurde festgestellt, dass die Vorspannung der Lagerung nicht wie vorgesehen funktioniert. Der Außenring des federbelasteten Lagers ließ sich im Lagersitz nicht ohne mäßigen Kraftaufwand verschieben. Daraus folgt eine potentiell undefinierte Vorspannung der Lagerung während aller zuvor durchgeführten Versuche, was die gesamte erste Messreihe beinhaltet.

Tabelle 33 - Parameter erste Messreihe

1. Messreihe		
Drehzahl in upm	Druck in Pa	Vorspannung in N
0	10, 1000, 10000	undefiniert
6000	10, 1000, 10000	undefiniert
8000	10, 1000, 10000	undefiniert
10000	10, 1000, 10000	undefiniert
12000	1000	undefiniert

Der erste Durchgang von Messreihe Eins umfasst vier Messungen bei den Drehzahlen 0 upm, 6000 upm, 8000 upm, 10000 upm. Der Umgebungsdruck liegt bei 10000 Pa. Es zeigt sich ein Anstieg der Wärmeleitfähigkeit um 48% vom Stillstand bis 6000 upm. Ab dieser Drehzahl steigt die Wärmeleitfähigkeit annähernd linear mit einem Wert zwischen 0,012 W/K – 0,016 W/K pro 1000 upm. Tabelle 34 zeigt die entsprechenden Messergebnisse der ersten Messreihe Durchgang Eins.

Tabelle 34 - 1. Messreihe Durchgang Eins

1. Messreihe - Durchgang 1			
<i>Lager: 7008 ACEGA/P4A - Fettfüllmenge 1,36 cm³</i>			
Drehzahl in upm	Wärmeleitwert in W/K	Druck in Pa	Datum
0	0,342	10000	2. Dez. 13
6000	0,505	10000	
8000	0,536	10000	
10000	0,560	10000	

Ein ähnliches Verhalten zeigt sich in Durchgang Zwei der ersten Messreihe bei 1000 Pa Umgebungsdruck und den Drehzahlen 0 upm, 6000 upm, 8000 upm, 10000 upm und 12000 upm. Der Anstieg der Wärmeleitfähigkeit vom Stillstand bis 6000 upm liegt bei 41 %, der weitere Verlauf ist mit guter Näherung linear und weist im Mittel eine Erhöhung um 0,0142 W/K pro 1000 upm auf. Zusammenfassend werden die entsprechenden Messergebnisse der ersten Messreihe Durchgang 2 in Tabelle 35 angeführt.

Tabelle 35 - 1. Messreihe Durchgang Zwei

1. Messreihe Durchgang 2			
<i>Lager: 7008 ACEGA/P4A - Fettfüllmenge 1,36 cm³</i>			
Drehzahl in upm	Wärmeleitwert in W/K	Druck in Pa	Datum
0	0,338	1000	20. Dez. 13
6000	0,476	1000	
8000	0,487	1000	
10000	0,527	1000	

Im Rahmen des Durchgangs Drei zeigt sich ein ähnliches Bild wie in den beiden Durchgängen zuvor. Der Umgebungsdruck liegt bei 10 Pa und die Drehzahlen umfassen 0 upm, 6000 upm, 8000 upm und 10000 upm. Die Erhöhung um 47 % vom Stillstand bis 6000 upm ist vergleichbar mit Durchgang Eins. Der weitere Verlauf folgt dem linearen Muster ähnlich wie die Durchgänge zuvor. Die entsprechenden Messergebnisse zeigt Tabelle 36.

Tabelle 36 - 1. Messreihe Durchgang Drei

1. Messreihe Durchgang 3			
<i>Lager: 7008 ACEGA/P4A - Fettfüllmenge 1,36 cm³</i>			
Drehzahl in upm	Wärmeleitwert in W/K	Druck in Pa	Datum
0	0,300	10	4. Dez. 13
6000	0,414	10	
8000	0,420	10	
10000	0,446	10	

Zusammenfassend sind in Abbildung 49 die Ergebnisse der Durchgänge Eins bis Drei grafisch dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Wärmeleitwerte umso tiefer liegen, je weiter das Umgebungsdruck-Niveau sinkt. Da im Rahmen dieser Untersuchung ausschließlich die Wärmeleitung und nicht die Konvektion von Interesse ist, stellt dieser Unterschied lediglich einen Plausibilitätscheck dar. Mit steigendem Umgebungsdruck erhöht sich die konvektive Wärmeabfuhr, woraus der höhere Wärmeleitwert resultiert. In Kapitel 5.3.2 ist ein ähnlicher Versuch erläutert, dieser beinhaltet jedoch ausschließlich die Wärmeleitung im Stillstand bei unterschiedlichen Druckniveaus.

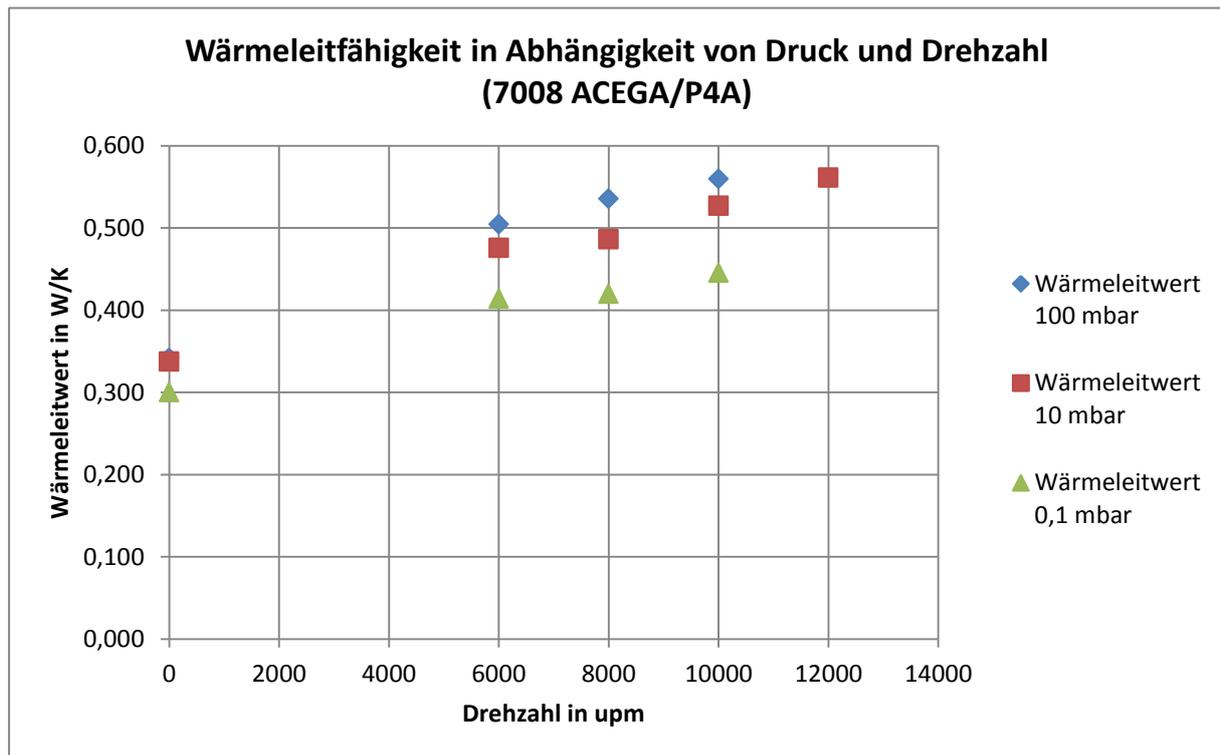


Abbildung 49 - Wärmeleitfähigkeit: hohe Drehzahlen

Weiters kann gezeigt werden, dass die Wärmeleitfähigkeit zwischen 6000 upm und 10000 upm steigt. Die Linearität des Anstieges über weite Drehzahlbereiche müsste durch weitere Messungen bestätigt bzw. widerlegt werden.

5.3.2 Zweite Messreihe – geringe Drehzahlen

Die zweite Messreihe behandelt schwerpunktmäßig die Wärmeleitfähigkeit bei geringen Drehzahlen bis maximal 1300 upm. Tabelle 37 gibt einen Überblick über die Betriebsbedingungen/Parameter während der einzelnen Durchgänge. Um die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse zu überprüfen wurde derselbe Ablauf dreimalig in den Durchgängen Eins bis Drei durchgeführt. Die Durchgänge Vier und Fünf behandeln die Wärmeleitfähigkeit bei einer Drehzahl von 6000 upm bzw. im Stillstand. Diese Werte können direkt den Ergebnissen aus Messreihe Eins gegenübergestellt werden. Etwaige Diskrepanzen zwischen der ersten und zweiten Messreihe werden am Ende dieses Kapitels behandelt.

Tabelle 37 - Parameter zweite Messreihe

2. Messreihe		
Drehzahl in upm	Druck in Pa	Vorspannung in N
0	10	45
100	10	45
200	10	45
300	10	45
400	10	45
500	10	45
1000	10	45
1300	10	45
6000	10	45

Die Wärmeleitfähigkeit der untersuchten Lagerung nimmt wie erwartet tendenziell mit steigender Drehzahl zu. Im Stillstand weist sie Streuungen von bis zu 30 % auf. Mit steigender Drehzahl reduziert sich diese Streuung. Diese Tendenz verdeutlicht Abbildung 50, welche die Standardabweichung der Messergebnisse bei den unterschiedlichen Drehzahlen illustriert.

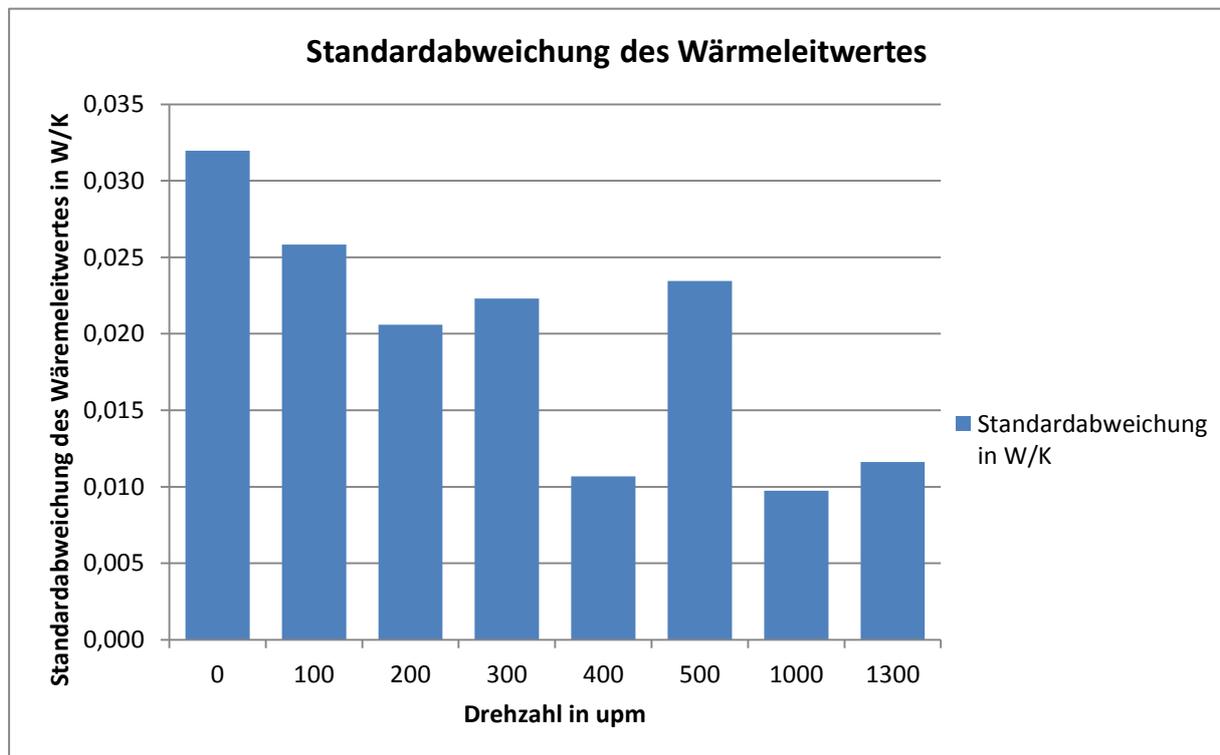


Abbildung 50 - Standardabweichung bei unterschiedlichen Drehzahlen

Abbildung 51 die obere und untere Maximalabweichung einzelner Messwerte vom Mittelwert der entsprechenden Drehzahlen.

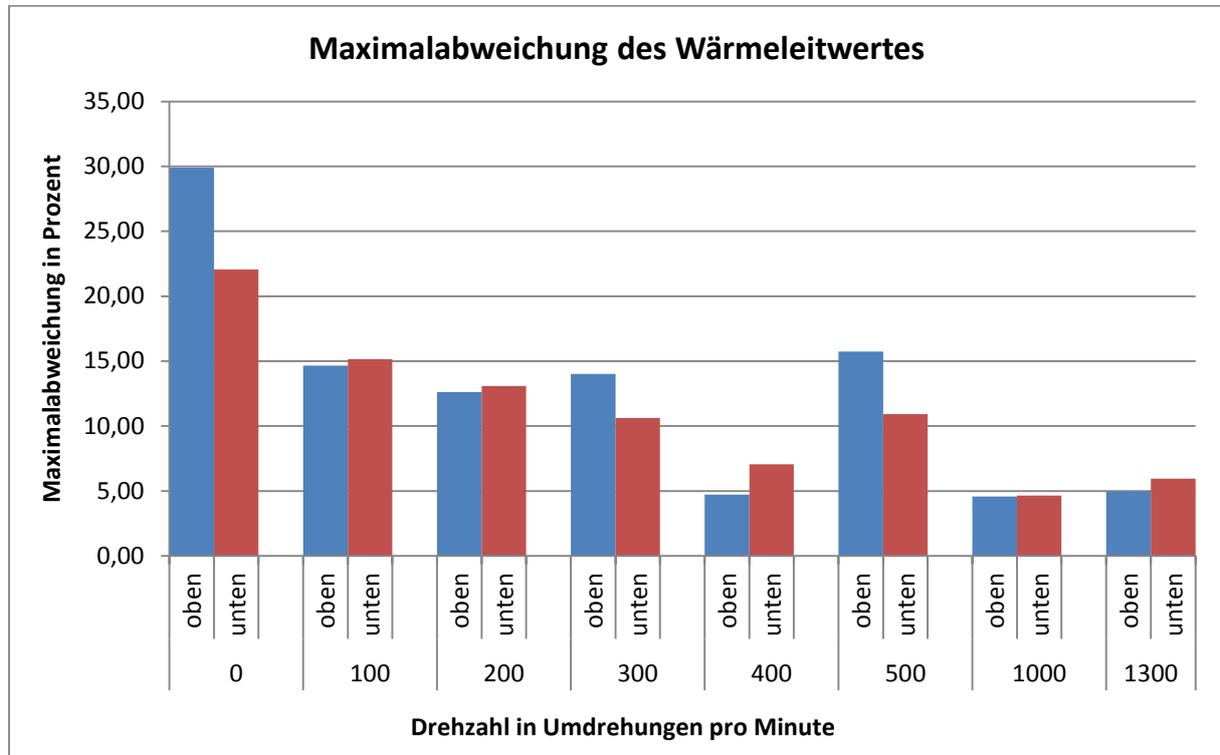


Abbildung 51 - Maximalabweichung bei unterschiedlichen Drehzahlen

In Tabelle 38 sind die ausgewerteten Messergebnisse der ersten drei Durchgänge von Messreihe Zwei angeführt. Wohingegen Tabelle 39 die Ergebnisse der Durchgänge Vier und Fünf veranschaulicht. Grün markiert sind jene Messwerte, welche sich nach einer Einschwingdauer von 2 Stunden und 30 Minuten im Stillstand ergaben. Rot markiert sind die letzten Messwerte, welche ebenfalls im Stillstand am Ende jedes Durchganges ermittelt wurden. Zwischen den einzelnen Messreihen wurde der Prüfstand mindestens 36 Stunden nicht in Betrieb genommen.

5. Auswertung und Interpretation der Ergebnisse

Tabelle 38 - Messungen geringe Drehzahlen 1

Lager: 7008 ACEGA/P4A - Fettfüllmenge 1,36 cm ³																																																																																						
2. Messreihe Durchgang 1				2. Messreihe Durchgang 2				2. Messreihe Durchgang 3																																																																														
Drehzahl in upm	Wärmeleitwert in W/K	Druck in mbar	Datum	Drehzahl in upm	Wärmeleitwert in W/K	Druck in mbar	Datum	Drehzahl in upm	Wärmeleitwert in W/K	Druck in mbar	Datum																																																																											
0	0,225	0,1	8. Mrz. 14	0	0,223	0,1	13. Mrz. 14	0	0,153	0,1	15. Mrz. 14																																																																											
1000	0,261	0,1		500	0,281	0,1		0	0,211	0,1		100	0,241	0,1	200	0,220	0,1	300	0,247	0,1	400	0,233	0,1	0	0,186	0,1	1300	0,278	0,1	0	0,191	0,1	0	0,223	0,1	1000	0,251	0,1	0	0,145	0,1	100	0,212	0,1	200	0,197	0,1	300	0,194	0,1	400	0,208	0,1	500	0,217	0,1	0	0,186	0,1	1300	0,250	0,1	0	0,151	0,1	0	0,230	0,1	6000	0,348	0,1	0	0,179	0,1	0	0,230	0,1	6000	0,336	0,1	0	0,167	0,1	0	0,180	0,1
500	0,281	0,1		0	0,211	0,1		100	0,241	0,1		200	0,220	0,1	300	0,247	0,1	400	0,233	0,1	0	0,186	0,1	1300	0,278	0,1	0	0,191	0,1	0	0,223	0,1	1000	0,251	0,1	0	0,145	0,1	100	0,212	0,1	200	0,197	0,1	300	0,194	0,1	400	0,208	0,1	500	0,217	0,1	0	0,186	0,1	1300	0,250	0,1	0	0,151	0,1	0	0,230	0,1	6000	0,348	0,1	0	0,179	0,1	0	0,230	0,1	6000	0,336	0,1	0	0,167	0,1	0	0,180	0,1			
0	0,211	0,1		100	0,241	0,1		200	0,220	0,1		300	0,247	0,1	400	0,233	0,1	0	0,186	0,1	1300	0,278	0,1	0	0,191	0,1	0	0,223	0,1	1000	0,251	0,1	0	0,145	0,1	100	0,212	0,1	200	0,197	0,1	300	0,194	0,1	400	0,208	0,1	500	0,217	0,1	0	0,186	0,1	1300	0,250	0,1	0	0,151	0,1	0	0,230	0,1	6000	0,348	0,1	0	0,179	0,1	0	0,230	0,1	6000	0,336	0,1	0	0,167	0,1	0	0,180	0,1						
100	0,241	0,1		200	0,220	0,1		300	0,247	0,1		400	0,233	0,1	0	0,186	0,1	1300	0,278	0,1	0	0,191	0,1	0	0,223	0,1	1000	0,251	0,1	0	0,145	0,1	100	0,212	0,1	200	0,197	0,1	300	0,194	0,1	400	0,208	0,1	500	0,217	0,1	0	0,186	0,1	1300	0,250	0,1	0	0,151	0,1	0	0,230	0,1	6000	0,348	0,1	0	0,179	0,1	0	0,230	0,1	6000	0,336	0,1	0	0,167	0,1	0	0,180	0,1									
200	0,220	0,1		300	0,247	0,1		400	0,233	0,1		0	0,186	0,1	1300	0,278	0,1	0	0,191	0,1	0	0,223	0,1	1000	0,251	0,1	0	0,145	0,1	100	0,212	0,1	200	0,197	0,1	300	0,194	0,1	400	0,208	0,1	500	0,217	0,1	0	0,186	0,1	1300	0,250	0,1	0	0,151	0,1	0	0,230	0,1	6000	0,348	0,1	0	0,179	0,1	0	0,230	0,1	6000	0,336	0,1	0	0,167	0,1	0	0,180	0,1												
300	0,247	0,1		400	0,233	0,1		0	0,186	0,1		1300	0,278	0,1	0	0,191	0,1	0	0,223	0,1	1000	0,251	0,1	0	0,145	0,1	100	0,212	0,1	200	0,197	0,1	300	0,194	0,1	400	0,208	0,1	500	0,217	0,1	0	0,186	0,1	1300	0,250	0,1	0	0,151	0,1	0	0,230	0,1	6000	0,348	0,1	0	0,179	0,1	0	0,230	0,1	6000	0,336	0,1	0	0,167	0,1	0	0,180	0,1															
400	0,233	0,1		0	0,186	0,1		1300	0,278	0,1		0	0,191	0,1	0	0,223	0,1	1000	0,251	0,1	0	0,145	0,1	100	0,212	0,1	200	0,197	0,1	300	0,194	0,1	400	0,208	0,1	500	0,217	0,1	0	0,186	0,1	1300	0,250	0,1	0	0,151	0,1	0	0,230	0,1	6000	0,348	0,1	0	0,179	0,1	0	0,230	0,1	6000	0,336	0,1	0	0,167	0,1	0	0,180	0,1																		
0	0,186	0,1		1300	0,278	0,1		0	0,191	0,1		0	0,223	0,1	1000	0,251	0,1	0	0,145	0,1	100	0,212	0,1	200	0,197	0,1	300	0,194	0,1	400	0,208	0,1	500	0,217	0,1	0	0,186	0,1	1300	0,250	0,1	0	0,151	0,1	0	0,230	0,1	6000	0,348	0,1	0	0,179	0,1	0	0,230	0,1	6000	0,336	0,1	0	0,167	0,1	0	0,180	0,1																					
1300	0,278	0,1		0	0,191	0,1		0	0,223	0,1		1000	0,251	0,1	0	0,145	0,1	100	0,212	0,1	200	0,197	0,1	300	0,194	0,1	400	0,208	0,1	500	0,217	0,1	0	0,186	0,1	1300	0,250	0,1	0	0,151	0,1	0	0,230	0,1	6000	0,348	0,1	0	0,179	0,1	0	0,230	0,1	6000	0,336	0,1	0	0,167	0,1	0	0,180	0,1																								
0	0,191	0,1	0	0,223	0,1	1000	0,251	0,1	0	0,145	0,1	100	0,212	0,1	200	0,197	0,1	300	0,194	0,1	400	0,208	0,1	500	0,217	0,1	0	0,186	0,1	1300	0,250	0,1	0	0,151	0,1	0	0,230	0,1	6000	0,348	0,1	0	0,179	0,1	0	0,230	0,1	6000	0,336	0,1	0	0,167	0,1	0	0,180	0,1																														
0	0,223	0,1	1000	0,251	0,1	0	0,145	0,1	100	0,212	0,1	200	0,197	0,1	300	0,194	0,1	400	0,208	0,1	500	0,217	0,1	0	0,186	0,1	1300	0,250	0,1	0	0,151	0,1	0	0,230	0,1	6000	0,348	0,1	0	0,179	0,1	0	0,230	0,1	6000	0,336	0,1	0	0,167	0,1	0	0,180	0,1																																	
1000	0,251	0,1	0	0,145	0,1	100	0,212	0,1	200	0,197	0,1	300	0,194	0,1	400	0,208	0,1	500	0,217	0,1	0	0,186	0,1	1300	0,250	0,1	0	0,151	0,1	0	0,230	0,1	6000	0,348	0,1	0	0,179	0,1	0	0,230	0,1	6000	0,336	0,1	0	0,167	0,1	0	0,180	0,1																																				
0	0,145	0,1	100	0,212	0,1	200	0,197	0,1	300	0,194	0,1	400	0,208	0,1	500	0,217	0,1	0	0,186	0,1	1300	0,250	0,1	0	0,151	0,1	0	0,230	0,1	6000	0,348	0,1	0	0,179	0,1	0	0,230	0,1	6000	0,336	0,1	0	0,167	0,1	0	0,180	0,1																																							
100	0,212	0,1	200	0,197	0,1	300	0,194	0,1	400	0,208	0,1	500	0,217	0,1	0	0,186	0,1	1300	0,250	0,1	0	0,151	0,1	0	0,230	0,1	6000	0,348	0,1	0	0,179	0,1	0	0,230	0,1	6000	0,336	0,1	0	0,167	0,1	0	0,180	0,1																																										
200	0,197	0,1	300	0,194	0,1	400	0,208	0,1	500	0,217	0,1	0	0,186	0,1	1300	0,250	0,1	0	0,151	0,1	0	0,230	0,1	6000	0,348	0,1	0	0,179	0,1	0	0,230	0,1	6000	0,336	0,1	0	0,167	0,1	0	0,180	0,1																																													
300	0,194	0,1	400	0,208	0,1	500	0,217	0,1	0	0,186	0,1	1300	0,250	0,1	0	0,151	0,1	0	0,230	0,1	6000	0,348	0,1	0	0,179	0,1	0	0,230	0,1	6000	0,336	0,1	0	0,167	0,1	0	0,180	0,1																																																
400	0,208	0,1	500	0,217	0,1	0	0,186	0,1	1300	0,250	0,1	0	0,151	0,1	0	0,230	0,1	6000	0,348	0,1	0	0,179	0,1	0	0,230	0,1	6000	0,336	0,1	0	0,167	0,1	0	0,180	0,1																																																			
500	0,217	0,1	0	0,186	0,1	1300	0,250	0,1	0	0,151	0,1	0	0,230	0,1	6000	0,348	0,1	0	0,179	0,1	0	0,230	0,1	6000	0,336	0,1	0	0,167	0,1	0	0,180	0,1																																																						
0	0,186	0,1	1300	0,250	0,1	0	0,151	0,1	0	0,230	0,1	6000	0,348	0,1	0	0,179	0,1	0	0,230	0,1	6000	0,336	0,1	0	0,167	0,1	0	0,180	0,1																																																									
1300	0,250	0,1	0	0,151	0,1	0	0,230	0,1	6000	0,348	0,1	0	0,179	0,1	0	0,230	0,1	6000	0,336	0,1	0	0,167	0,1	0	0,180	0,1																																																												
0	0,151	0,1	0	0,230	0,1	6000	0,348	0,1	0	0,179	0,1	0	0,230	0,1	6000	0,336	0,1	0	0,167	0,1	0	0,180	0,1																																																															
0	0,230	0,1	6000	0,348	0,1	0	0,179	0,1	0	0,230	0,1	6000	0,336	0,1	0	0,167	0,1	0	0,180	0,1																																																																		
6000	0,348	0,1	0	0,179	0,1	0	0,230	0,1	6000	0,336	0,1	0	0,167	0,1	0	0,180	0,1																																																																					
0	0,179	0,1	0	0,230	0,1	6000	0,336	0,1	0	0,167	0,1	0	0,180	0,1																																																																								
0	0,230	0,1	6000	0,336	0,1	0	0,167	0,1	0	0,180	0,1																																																																											
6000	0,336	0,1	0	0,167	0,1	0	0,180	0,1																																																																														
0	0,167	0,1	0	0,180	0,1																																																																																	
0	0,180	0,1																																																																																				

Tabelle 39 - Messung geringe Drehzahlen 2

2. Messreihe Durchgang 4				2. Messreihe Durchgang 5				
Drehzahl in upm	Wärmeleitwert in W/K	Druck in mbar	Datum	Drehzahl in upm	Wärmeleitwert in W/K	Druck in mbar	Datum	
0	0,239	0,1	22. Mrz. 14	0	0,230	0,1	27. Mrz. 14	
6000	0,348	0,1		0	0,179	0,1		0
0	0,179	0,1	0	0,167	0,1			

Signifikant ist die Diskrepanz zwischen der letzten Messung der einen und der ersten Messung der folgenden Messreihe, wie Tabelle 40 zeigt. Mit Ausnahme des Vergleichs von zweiter und dritter Messreihe weisen alle weiteren einen signifikanten Anstieg der Wärmeleitfähigkeit auf.

Tabelle 40 - Einfluss der Ruhezeit auf den Wärmeleitwert

Messdurchgang	Differenz des Wärmeleitwertes in W/K	Differenz des Wärmeleitwertes in %
1. auf 2. Durchgang	0,032	17
2. auf 3. Durchgang	0,003	2
3. auf 4. Durchgang	0,059	33
4. auf 5. Durchgang	0,051	28

Tabelle 40 zeigt, dass die Wärmeleitfähigkeit nach einem Stillstand von mindestens 36 Stunden tendenziell höher liegt als unmittelbar nach dem Betrieb bei einer Drehzahl von mindestens 500 upm. Die Ausnahme stellt die 3. Messung dar, bei welcher der Wärmeleitwert vor und nach dem Betrieb annähernd identische Werte aufweist.

Dieses Verhalten könnte durch eine Umverteilung des Schmierfettes hervorgerufen werden. Wenn der Schmierstoff während des Betriebs aus der Lauffläche verdrängt wird, verschlechtert sich der Wärmeübergang zwischen den Lagerringen und den Wälzkörpern. Im Stillstand führt dies zu einer Verminderung der Wärmeleitfähigkeit des Lagers. Während längerer Phasen des Stillstandes könnte der Schmierstoff langsam wieder zurück in die Laufflächen wandern, dort die Lagerringe und die Wälzkörper nahe der Kontaktzone benetzen und so den Wärmeübergang beeinflussen. Sollten hohe Drehzahlen zu einer gleichmäßigeren Schmierstoffverteilung führen, könnte dies die, mit steigender Drehzahl, sinkenden Streuungen erklären.

Ein weiterer Vorgang, welcher die beschriebenen Streuungen erklären könnte ist die Fettumverteilung infolge des Aufhebens des Vakuums am Ende jedes Durchganges. Die eindringende Luft muss, um jeden Bereich des Prüfstandes zu erreichen, auch durch die Lager strömen. Im Zuge dessen könnte das Fett durch die Luft im Lager neu verteilt werden.

Diese Hypothesen, welche den Schmierstoff als Ursache des Anstiegs identifizieren werden durch eine Publikation aus den USA mit dem Titel „*A Methodology for Measuring Thermal Properties of Bearings in Motion*“ gestützt. In der besagten Publikation wird bezüglich der Wärmeleitfähigkeit von Wälzlagern eine Unterscheidung zwischen eingelaufenen und nicht eingelaufenen Lagern getroffen. Die Wärmeleitfähigkeit sinkt im eingelaufenen Zustand, wie auch die Ergebnisse dieser Arbeit gezeigt haben. Auch das Phänomen, dass nach einer gewissen Ruhephase die Wärmeleitfähigkeit wieder ansteigt wurde beobachtet. Die Ursache wird auf die Benetzung von Wälzkörper und Lauffläche mit dem Schmierstoff zurückgeführt. (Takeuchi, Dickey, Demsky, Lue, Kirsch, & Frantz, 2004)

In Abbildung 52 sind die Ergebnisse von Tabelle 38 und Tabelle 39 grafisch dargestellt. Es zeigt den Verlauf der Wärmeleitfähigkeit mit steigender Drehzahl.

Im Stillstand schwankt der Wärmeleitwert zwischen 0,239 W/K und 0,144 W/K. Eine eindeutige Systematik konnte nicht festgestellt werden. Mit steigender Drehzahl sinkt die Maximalstreuung im Rahmen der Messreihen auf $\pm 6\%$ bei 1300 upm. Es sind die Mittelwerte der

Messungen bei den einzelnen Drehzahlen durch rote Punkte dargestellt. Als punktierte Linien sind die Mittelwerte plus/minus der Standardabweichung eingetragen. Es wird die tendenzielle Abnahme der Standardabweichung mit steigender Drehzahl ersichtlich, was einer Abnahme der Streuung entspricht. Bei geringen Drehzahlen sind die auftretenden Maximalstreuungen größer als die Messunsicherheitsbereiche, wie sie in Kapitel 4.6 ermittelt wurden. Folglich wird die Messungenauigkeit als ausschließliche Ursache für die Streuung ausgeschlossen. Im Anhang ist ein weiteres Diagramm der Wärmeleitfähigkeit bei unterschiedlichen Drehzahlen mit unterschiedlicher Skalierung und anderen Grenzen beigelegt.

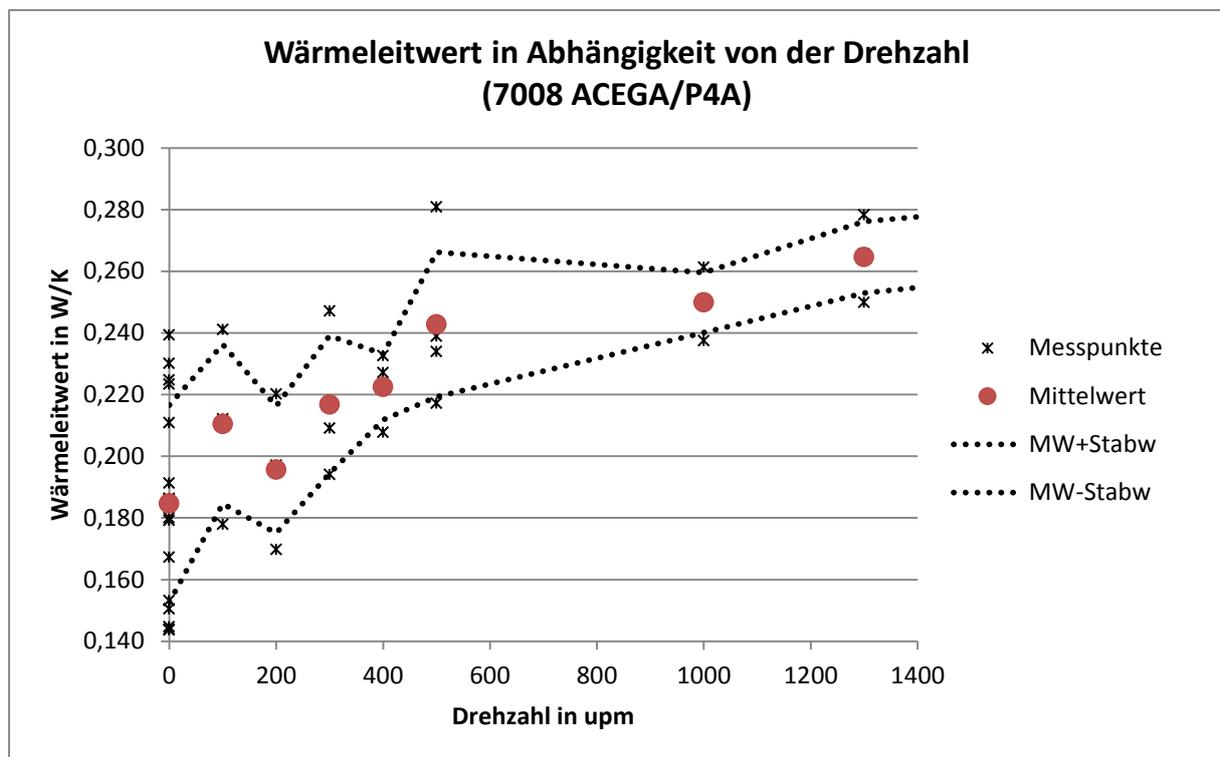


Abbildung 52 - Wärmeleitwert: geringe Drehzahlen

Einfluss des Umgebungsdrucks

Der vorherrschende Umgebungsdruck hat einen signifikanten Einfluss auf die Messung, welcher in Tabelle 41 ersichtlich ist. Grundsätzlich kann gesagt werden, dass der Wärmeleitwert mit steigendem Druck zunimmt. Wie im Kapitel zuvor beschrieben kann es jedoch sein, dass durch das Einlassen von Luft der Schmierstoff in den Lagern umverteilt wird und dadurch die Wärmeleitung beeinflusst wird.

Tabelle 41 - Wärmeleitwert: unterschiedliche Drücke

2. Messreihe Durchgang 6			
<i>Lager: 7008 ACEGA/P4A</i> <i>Fettfüllmenge 1,36 cm³</i>			
Drehzahl in upm	Wärme- leitwert in W/K	Druck in Pa	Datum
0	0,180	10	15. Mrz. 14
0	0,254	1000	
0	0,287	10000	

Gegenüberstellung der ersten und zweiten Messreihe

Aufgrund der hohen Streuung bei geringen Drehzahlen und im Stillstand sind die ersten beiden Messreihen nur bedingt vergleichbar. Da sich die Streuung mit steigender Drehzahl reduziert werden die Messwerte bei 6000 upm zum Vergleich herangezogen.

Tabelle 42 beinhaltet die Wärmeleitwerte der ersten Messreihe - Durchgang Drei zusammengefasst unter 1. Messreihe und den Mittelwert der Durchgänge Vier und Fünf aus der zweiten Messreihe. Grundsätzlich ist ersichtlich, dass die Werte im Rahmen der zweiten Messreihe um 17 % gegenüber der ersten Messreihe bzw. 0,072 W/K tiefer liegen.

Tabelle 42 - Vergleich Messreihe Eins und Zwei

Vergleich erster und zweiter Messreihe		
	1. Messreihe	2. Messreihe
Drehzahl in upm	Wärmeleitwert in W/K	Wärmeleitwert in W/K
6000	0,414	0,342

Ursache dieser Diskrepanz könnte die undefinierte Vorspannung im Rahmen der ersten Messreihe sein, wie in Kapitel 5.3.1 erläutert.

Mit Hilfe der Ergebnisse aus Kapitel 5.3.3 kann auf die Vorspannung rückgerechnet werden, welche notwendig wäre, dass ein Anstieg um 0,072 W/K resultiert. Unter der Annahme, dass die Wärmeleitfähigkeit bis zu einer Vorspannung von 1,9 KN weiterhin linear zunimmt kann

angenommen werden, dass eine thermisch verursachte Verspannung mit einer Kraft von 1,9 KN erforderlich wäre, um diese Diskrepanz zu verursachen.

Im Beispiel von Kapitel 2.2.4, welches grob einem Modell des Prüfstandes mit halber Wellenlänge entspricht, wird eine Verspannung von maximal 3000 N bei einer Temperaturdifferenz von 100 °C errechnet. Aufgrund der doppelten Wellenlänge des realen Prüfaufbaus verdoppelt sich dieser Wert. Daraus folgt, dass die höchstmögliche thermisch verursachte Verspannung bei etwa 6000 N liegt. Daher wäre es theoretisch möglich, die unterschiedlichen Messergebnisse durch die Vorspannung zu erklären. Allerdings ist fraglich, ob der Lagerring bei einer Belastung dieser Größe nicht im Lagersitz geglitten wäre. Eine weitere Erklärung für die auftretenden Unterschiede könnte die Demontage, Reparatur und anschließende Wiederinbetriebnahme nach Beschädigung des Prüfstandes liefern. Es besteht auch die Möglichkeit, dass die Position der Pyrometer sich geringfügig geändert hat und die Abweichungen dadurch zu begründen sind. Nicht auszuschließen sind weitere Ursachen, welche den Schmierstoff betreffen bzw. damit einhergehen.

5.3.3 Dritte Messreihe – Vorspannung

Im Vergleich zu den ersten beiden wird in Messreihe Drei der Prüfstand im Stillstand, also bei unbewegten Wälzlagern, bei Umgebungsdruck betrieben. Der variable Parameter ist die Vorspannung, welche zwischen 45 N und 1000 N variiert wird. In Tabelle 43 sind die einzelnen Werte tabellarisch zusammengefasst.

Tabelle 43 - Parameter dritte Messreihe

3. Messreihe		
Drehzahl in upm	Druck in Pa	Vorspannung in N
0	10 ⁵	45
0	10 ⁵	500
0	10 ⁵	1000

Die Wärmeleitfähigkeit des untersuchten Schrägkugellagers im Bereich zwischen 45 N und 1000 N Vorspannung kann mit guter Näherung als linear bezeichnet werden. Eine Zunahme der Vorspannung um 955 N bewirkt eine Zunahme der Wärmeleitfähigkeit um 0,038 W/K bzw. 11,8 %. In Abbildung 53 ist der lineare Verlauf der Wärmeleitfähigkeit über die Vorspannkraft grafisch dargestellt.

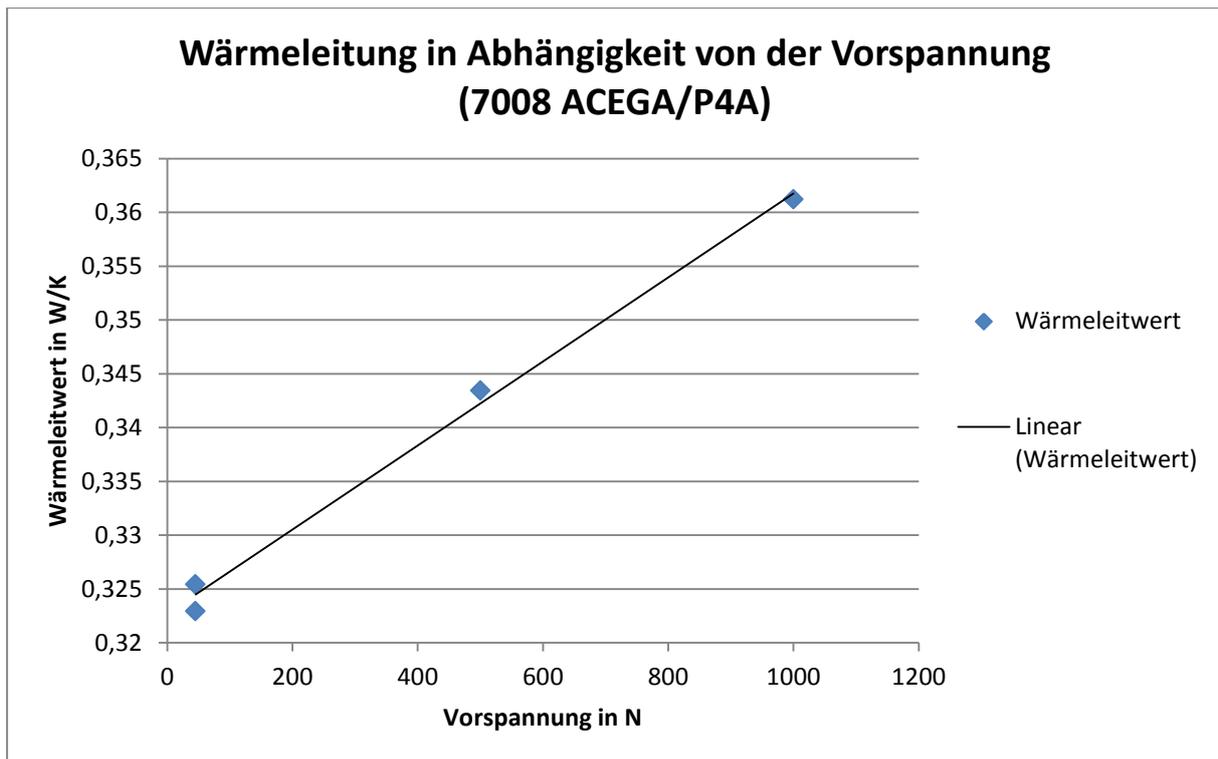


Abbildung 53 - Wärmeleitwert in Abhängigkeit von der Vorspannung

Tabelle 44 beinhaltet die entsprechenden Zahlenwerte. Im Stillstand beträgt die Differenz des Wärmeleitwerts vor und nach der erhöhten Vorspannung unter 1 %.

Tabelle 44 - Wärmeleitwert in Abhängigkeit von der Vorspannung

3. Messreihe		
<i>Lager: 7008 ACEGA/P4A - Fettfüllmenge 1,36 cm³</i>		
Vorspannung in N	Wärmeleitwert in W/K	Druck in Pa
45	0,323	10 ⁵
500	0,343	
1000	0,361	
45	0,325	

In einer Publikation aus den USA wurde bei ölgeschmierten Schrägkugellagern im Stillstand ein linearer Anstieg der Wärmeleitfähigkeit mit zunehmender Vorspannung der Lagerung festgestellt (Takeuchi, Eby, Blake, Demsky, & Dickey, 2006, S. 298). Damit korrelieren die Ergebnisse aus den USA bezüglich der Vorspannung mit jenen dieser Arbeit.

6. Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde die Wärmeleitfähigkeit des Schrägkugellagers mit der Bezeichnung 7008 ACEGA/P4A von SKF untersucht. Das Lager war mit dem Schmierfett LGLT 2.0 und einer Fettfüllmenge von 1,36 cm³ geschmiert. Anhand der Untersuchungen dieses Lagertyps wurden allgemeine Aussagen für das thermische Verhalten von Wälzlagern abgeleitet.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass mit steigender Drehzahl die Wärmeleitfähigkeit von Wälzlagern zunimmt. Im Stillstand weisen die Messungen die größten Streuungen auf, welche bis zu 30% betragen können. Mit Zunahme der Drehzahl verringert sich diese Streuung, wobei auch der Gradient abnimmt. Die Streuung bei 1300 upm liegt im Rahmen der Untersuchungen bei 6 %. In weiterer Folge zeigt sich zwischen 6000 upm und 10000 upm ein mit guter Näherung als linear zu bezeichnender Anstieg von im Mittel 0,045 W/K.

Tabelle 45 - Zusammenfassung Drehzahlabhängigkeit der Wärmeleitung

Zusammenfassung Drehzahlabhängigkeit			
<i>Lager: 7008 ACEGA/P4A</i>			
<i>Fettfüllmenge 1,36 cm³</i>			
Drehzahl in upm	Wärme- leitwert in W/K	Druck in Pa	
0	0,239	10	max
	0,144		min
1300	0,278	10	max
	0,250		min
6000	0,348	10	max
	0,336		min

Weiters konnte eine lineare Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Vorspannung abgeleitet werden. Eine Zunahme der Vorspannung von 45 N auf 1000 N erhöht die Wärmeleitfähigkeit im Stillstand um 12 %.

Tabelle 46 - Zusammenfassung Vorspannungsabhängigkeit der Wärmeleitung

Zusammenfassung Vorspannungsabhängigkeit		
<i>Lager: 7008 ACEGA/P4A - Fettfüllmenge 1,36 cm³</i>		
Vorspannung in N	Wärme- leitwert in W/K	Druck in Pa
45	0,324	10 ⁵
500	0,343	
1000	0,361	

Damit ist die Streuung der Wärmeleitfähigkeit bei 1300 upm ähnlich groß wie der Einfluss der Vorspannung. Bis zu einer Vorspannung von 1000 N wurde der lineare Zusammenhang zur Wärmeleitfähigkeit im Stillstand nachgewiesen, wie weit darüber hinaus dieser Zusammenhang Gültigkeit besitzt ist nicht geklärt worden. Der Einfluss der Vorspannung wurde nur im Stillstand bei Umgebungsdruck untersucht.

6.2 Ausblick und zukünftige Forschungsgebiete

Einfluss Schmierung

Die Ergebnisse der Versuche legen nahe, dass die Streuung der Werte für die Wärmeleitfähigkeit auf die Schmierung zurückzuführen ist, da bei allen durchgeführten Untersuchungen Lagertyp, Temperatur, die Lagerabmessungen und Toleranzen gleich geblieben sind. Bei steigender Drehzahl könnte die Fettumwälzung und der daraus folgenden gleichmäßigeren Verteilung dafür verantwortlich sein, dass die Streuung abnimmt. Um diese These bestätigen oder widerlegen zu können sind weitere Untersuchungen auf diesem Gebiet erforderlich. Einen weiteren Einflussfaktor könnte die Fettgebrauchsdauer darstellen.

Durch Untersuchungen eines Lagers ohne oder mit minimaler Schmierung könnte untersucht werden, ob die Streuungen geringer werden als bei normaler Schmierstoffmenge. Somit würde der Schmierstoff als Ursache der Streuungen bestätigt oder widerlegt werden.

Es könnte festgestellt werden, ob der Fetttransport oder die Wärmeübertragung durch die Kugeln hauptverantwortlich für die Wärmeleitung ist. Zu diesem Zweck könnten zwei baugleiche Lager untersucht werden, wobei zuerst ein herkömmliches Lager mit Stahlkugeln und anschließend ein Lager in Hybridbauweise mit Keramikugeln untersucht wird. Hierfür eignet sich der Versuchsstand in der aktuellen Ausführung nicht. Durch den Einsatz einer modifizierten Induktionsheizung, welche den Ein- und Ausbau der Welle ermöglicht, könnte dieser Parameter auf einfache Weise untersucht werden. Weiters würde diese Modifikation die Testung unterschiedlicher Lagertypen sowie Abmessungen ermöglichen.

Erweiterte Untersuchungen bezüglich Vorspannung

Eine erweiterte Betrachtung des Einflusses der Vorspannung wäre durch den Einsatz unterschiedlicher Tellerfedern möglich. So könnte ein möglicher Einfluss der Vorspannung bei unterschiedlichen Drehzahlen untersucht werden.

Ebenso wäre es möglich, die Verlustleistung der Lager bei unterschiedlichen Vorspannungen und Drehzahlen zu ermitteln.

Untersuchungen bei höheren Drehzahlen

Um Versuche bei höheren Drehzahlen durchführen zu können ist eine Neukonstruktion der Magnetkupplung erforderlich. Da für Drehzahlen über 10000 Umdrehungen pro Minute die Belastung auf die Klebungen infolge der Fliehkraft der Magnete sehr hoch wird, müsste diese Problematik neu aufgerollt werden. Ein möglicher Ansatz wäre die Unterstützung der Klebungen durch das Umwickeln mit Kohlefasern. Allerdings müsste anschließend die Welle gewuchtet werden und die Maschinendynamik des gesamten Prüfstandes erneut betrachtet werden um einen Resonanzbetrieb zu vermeiden. Bei einer Neukonstruktion der Magnetkupplung könnte diese so ausgeführt werden, dass sie während des Betriebes abgezogen werden kann. Diese Modifikation würde die Durchführung eines Spin-down Tests ermöglichen. Ein weiterer Aspekt, welcher im Rahmen eines Umbaus der Magnetkupplung bedacht werden sollte ist der Antrieb. Die aktuellen Messungen haben gezeigt, dass der Wärmeleitwert zwischen 0 und 100 Umdrehungen pro Minute keiner exakteren Auflösung bedarf. Daher ist der Einsatz eines Schrittmotors überflüssig. Es sollte darauf geachtet werden, dass der zum Einsatz kommende Antrieb möglichst alle gewünschten Drehzahlbereiche ohne Umbau abdeckt.

Versuchsreihen mit Ölschmierung

Auch die Untersuchung von Lagern mit Ölschmierung ist möglich. Zu diesem Zweck müsste eine Ölablassmöglichkeit vorgesehen werden und die Temperaturmessung an der Wellenschulter überdacht werden. Auch ohne jegliche Modifikation ist die Induktionsheizung für den Einsatz einer Ölschmierung geeignet.

Allgemeines Verbesserungspotential

Im Rahmen weiterer Untersuchungen ist es sinnvoll, die Verkabelung der Messtechnik und der Heizung zu erneuern bzw. komplett zu überarbeiten. Dabei sollten nur geschirmte Kabel verwendet werden, wodurch der Einfluss der Heizung auf die Messwerte reduziert wird. Dann würde sich das Ausschalten der Heizung während der Messungen erübrigen und der gesamte Ablauf könnte besser automatisiert werden. Weiters sollte der Druck automatisch mit den anderen Messwerten aufgezeichnet werden. Eine automatisierte Regelung des Druckes wäre wünschenswert.

7. Literaturverzeichnis

- Albert, M., & Kötttritsch, H. (1987). *Wälzlager*. Wien, New York: Springer-Verlag.
- Conrad, K.-J. (2010). *Grundlagen der Konstruktionslehre - Methoden und Beispiele für den Maschinenbau*. München: Carl Hanser Verlag.
- DIN EN ISO, 9. (Dezember 2005). *Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe*.
- FAG. (2000). *Wälzlagerschäden - Schadenserkennung und Begutachtung gelaufener Wälzlager*.
- Jumo GmbH & Co. KG. (2014). *www.jumo.net*. Abgerufen am Juli 2014 von www.jumo.net
- Kiencke, U., & Eger, R. (2008). *Messtechnik - Systemtheorie für Elektrotechniker*. Karlsruhe: Springer-Verlag.
- Kopeinig, F. (2012). *Konzeption eines geeigneten Messkonzeptes zur Bestimmung von Wärmeflüssen in rotierenden und ruhenden Komponenten*. Graz: TU-Graz, Institut für Maschinenelemente und Entwicklungsmethodik.
- Künne, B. (2008). *Köhler/Rögnitz Maschinenteile 2*. Dortmund: Vieweg+Teubner.
- LFD Wälzlager GmbH. (2010). *Rillenkugellager Katalog*.
- Monarch Instrument. (kein Datum). Von www.monarchinstrument.com abgerufen
- Mühl, T. (2008). *Einführung in die elektrische Messtechnik*. Aachen: Vieweg + Teubner.
- Neuhold-Elektronik. (2014). *www.neuhold-elektronik.at*. Abgerufen am Juli 2014 von http://www.neuhold-elektronik.at/catshop/product_info.php?cPath=96_100&products_id=4938
- NSK-Wälzlagerkatalog. (2009). *www.nsk-europe.de*. Abgerufen am 2014
- Optris infrared thermometers. (2014). Abgerufen am Juli 2014 von www.optris.de
- Pahl, G., & Beitz, W. (2007). *Konstruktionslehre: Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung - Methoden und Anwendung*. Berlin: Springer.
- Reisch, M. (2007). *Elektronische Bauelemente - Funktion, Grundschaltungen, Modellierung mit SPICE*. Kempten: Springer-Verlag.

- Riepan, S. (2012). Betrachtung des Wärmedurchgangs von fettgeschmierten Wälzlagern unter für den Betrieb von Schwungrädern charakteristischen Bedingungen. Graz: TU-Graz, Institut für Maschinenelemente und Entwicklungsmethodik.
- Schaeffler Gruppe. (2006). Lager Hauptkatalog HR 1. Deutschland.
- Schaeffler Gruppe. (2014). <http://medias.schaeffler.com/medias/de!hp.tg/>. Von http://medias.schaeffler.com/medias/de!hp.tg.cat/tg_hr*ST4_102027403 abgerufen
- Schaeffler Technologies GmbH & Co. KG. (08 2008). Kleine Wälzlagerkunde.
- Schlecht, B. (2010). *Maschinenelemente 2 Getriebe - Verzahnung - Lagerungen*. München: Pearson Studium.
- SKF-Gruppe. (2008). Hauptkatalog.
- SNFA-Gruppe. (06/07). SNFA-Hauptkatalog. www.skf.com.
- Takeuchi, Dickey, Demsky, Lue, Kirsch, & Frantz. (2004). A Methodology for Measuring Thermal Properties of Bearings in Motion. Los Angeles.
- Takeuchi, Y., Eby, M., Blake, B., Demsky, S., & Dickey, J. (2006). Influence of Oil Lubrication on Spacecraft Bearing Thermal Conductance. Los Angeles.
- US Synthetic Bearings. (2014). ussbearings.com. Abgerufen am Juli 2014 von http://ussbearings.com/bearings_site/research_article/949/
- Vacom - Vakuum Komponenten & Messtechnik GmbH. (2014). www.vacom.de. Abgerufen am Juli 2014 von www.vacom.de

8. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 - Aufbau Rillenkugellager.....	3
Abbildung 2 - Reduktionsfaktor f_H bei unterschiedlicher Härte der Lagerringe	8
Abbildung 3 - Mindestviskosität.....	9
Abbildung 4 - a_{DIN} Faktor für Axial-Kugellager (links) und Radial-Kugellager (rechts)	10
Abbildung 5 - Konstruktive Ausführung Fettschmierung.....	12
Abbildung 6 – Ölbad schmierung	14
Abbildung 7 - Fest - Festlagerung.....	16
Abbildung 8 - Axialkraft in Abhängigkeit von der Lagersteifigkeit.....	17
Abbildung 9 - Fest-Loslagerung.....	18
Abbildung 10 - Angestellte Lagerung	19
Abbildung 11 - Zentrifugalkraft Stahllager – Hybridlager.....	24
Abbildung 12 - Hybridlager vs. Stahllager: Verlustleistung, Steifigkeit, Verschleiß	24
Abbildung 13 - radiale Lagerluft.....	25
Abbildung 14 – Betriebsspiel	26
Abbildung 15 - Temperaturmessung zur Schadenserkenung	27
Abbildung 16 - Temperaturverlauf bei versagender Fettschmierung	27
Abbildung 17 - Einreihiges Schrägkugellager.....	28
Abbildung 18 - Maximaldrehzahl unterschiedlicher Schrägkugellagertypen.....	30
Abbildung 19 - Dynamische Tragfähigkeit unterschiedlicher Schrägkugellagertypen.....	30
Abbildung 20 - Statische Tragfähigkeit unterschiedlicher Schrägkugellagertypen	31
Abbildung 21 - Preise unterschiedlicher Schrägkugellagertypen	31
Abbildung 22 - Zusammenhang Wälzkörperdurchmesser – Maximaldrehzahl	32
Abbildung 23 - MindMap	39
Abbildung 24 - Schema Prüfstand	49
Abbildung 25 - Federkennlinie Tellerfedersystem	51
Abbildung 26 - Grundschemata Induktionsheizung.....	52
Abbildung 27 - Schema Magnetkupplung.....	53
Abbildung 28 - Magnetkupplung Schnittdarstellung	54
Abbildung 29 - Magnetkupplung: Momentenverlauf über Drehwinkel	55
Abbildung 30 - Magnetkupplung: maximaler Verdrehwinkel	56
Abbildung 31 - Magnetkupplung mit elastischem Element	56
Abbildung 32 - Kennlinie Schrittmotor	58
Abbildung 33 - optimiertes Schema Induktionsheizung.....	62
Abbildung 34 - Magnetkupplung Schaden	66

8. Abbildungsverzeichnis

<i>Abbildung 35 - Messprinzip/Aufbau</i>	67
<i>Abbildung 36 – Pyrometer</i>	69
<i>Abbildung 37 - Brückenschaltung Pt-1000</i>	70
<i>Abbildung 38 - Pt-1000</i>	70
<i>Abbildung 39 – Drucksensor</i>	71
<i>Abbildung 40 - Umdrehungssignal Kontrastsensor (Rauschen)</i>	72
<i>Abbildung 41 – Kontrastsensor</i>	72
<i>Abbildung 42 - Messflansch: Position der Temperatursensoren</i>	75
<i>Abbildung 43 - Temperaturverlauf am Flansch</i>	75
<i>Abbildung 44 - Vakuumdurchführung 25-poliger Sub-D Stecker</i>	76
<i>Abbildung 45 - Vergleich Messrauschen Heizung aktiv und inaktiv</i>	77
<i>Abbildung 46 - Kalibrierung Prüfstand</i>	85
<i>Abbildung 47 - Thermisches Einschwingen Welle</i>	87
<i>Abbildung 48 - Thermisches Einschwingen – Zeitkonstante</i>	88
<i>Abbildung 49 - Wärmeleitfähigkeit: hohe Drehzahlen</i>	93
<i>Abbildung 50 - Standardabweichung bei unterschiedlichen Drehzahlen</i>	94
<i>Abbildung 51 - Maximalabweichung bei unterschiedlichen Drehzahlen</i>	95
<i>Abbildung 52 - Wärmeleitwert: geringe Drehzahlen</i>	98
<i>Abbildung 53 - Wärmeleitwert in Abhängigkeit von der Vorspannung</i>	101
<i>Abbildung 54 - Wuchten Ausgangszustand</i> <i>Abbildung 55 - Wuchten abgeschlossen</i>	147

9. Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 1 – Erlebenswahrscheinlichkeit</i>	7
<i>Tabelle 2 - Nachsetzzeichen für Maßstablisierung</i>	8
<i>Tabelle 3 - Beiwert e_c für Verschmutzung</i>	10
<i>Tabelle 4 - Hauptfettarten und deren wichtigsten Eigenschaften</i>	13
<i>Tabelle 5 - Vergleich unterschiedlicher Schmierverfahren</i>	15
<i>Tabelle 6 - Gegenüberstellung Öl- und Fettschmierung</i>	16
<i>Tabelle 7 – Lagerwerkstoffe</i>	22
<i>Tabelle 8 - Eigenschaften unterschiedlicher Werkstoffe</i>	23
<i>Tabelle 9 - Vergleich Materialeigenschaften Hybridlager – Stahllager</i>	25
<i>Tabelle 10 - Anforderungsliste Teil 1</i>	36
<i>Tabelle 11 - Anforderungsliste Teil 2</i>	37
<i>Tabelle 12 - Datenblatt Pumpe E2M2</i>	42
<i>Tabelle 13 - Bewertungsliste Heizungskonzepte</i>	44
<i>Tabelle 14 - Bewertungsliste Motorvarianten</i>	46
<i>Tabelle 15 - Bewertungsliste Kupplungsvarianten</i>	47
<i>Tabelle 16 - Morphologischer Kasten</i>	47
<i>Tabelle 17 - Datenblatt Schrittmotor</i>	57
<i>Tabelle 18 - Bewertungszahlen für FMEA</i>	60
<i>Tabelle 19 - FMEA Induktionsheizung</i>	61
<i>Tabelle 20 - FMEA Magnetkupplung</i>	63
<i>Tabelle 21 - Datenblatt Pyrometer</i>	69
<i>Tabelle 22 - Datenblatt Pt-1000 Widerstandsthermometer</i>	69
<i>Tabelle 23 - Datenblatt Drucksensor</i>	71
<i>Tabelle 24 - Datenblatt Kontrastsensor</i>	71
<i>Tabelle 25 - Gegenüberstellung Simulation – Extrapolation</i>	76
<i>Tabelle 26 - Messrauschen Heizung inaktiv</i>	78
<i>Tabelle 27 – Messungenauigkeiten / Toleranzen</i>	80
<i>Tabelle 28 - Messungenauigkeit Beispiel</i>	83
<i>Tabelle 29 - Kalibrierung: Temperaturen und Abweichungen</i>	86
<i>Tabelle 30 - Kalibrierung: max., min. und mittlere Abweichung</i>	86
<i>Tabelle 31 - Ablauf Messdurchgänge</i>	89
<i>Tabelle 32 - Überblick Messreihen</i>	89
<i>Tabelle 33 - Parameter erste Messreihe</i>	91
<i>Tabelle 34 - 1. Messreihe Durchgang eins</i>	91

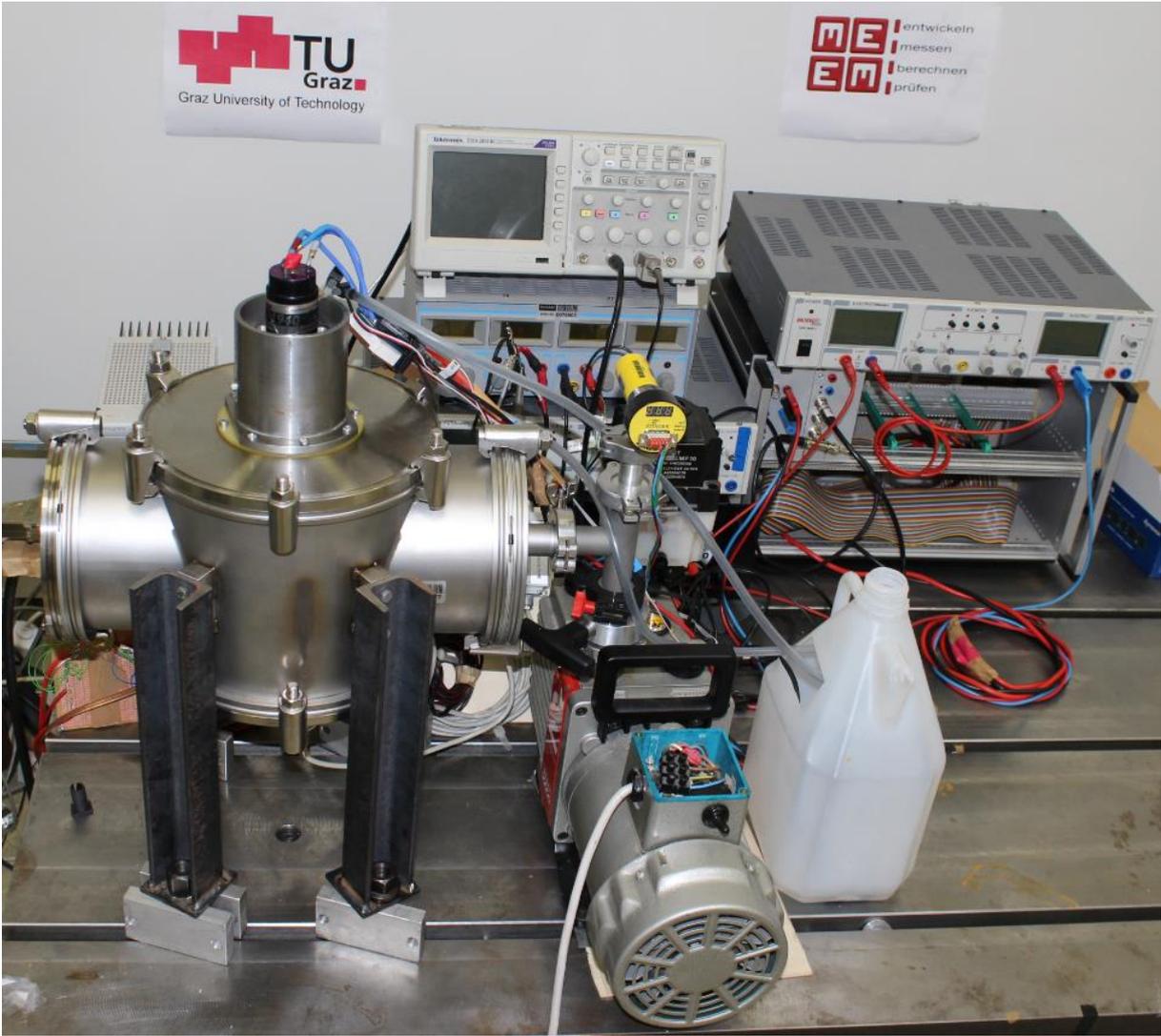
<i>Tabelle 35 - 1. Messreihe Durchgang 2</i>	92
<i>Tabelle 36 - 1. Messreihe Durchgang 3</i>	92
<i>Tabelle 37 - Parameter zweite Messreihe</i>	94
<i>Tabelle 38 - Messungen geringe Drehzahlen 1</i>	96
<i>Tabelle 39 - Messung geringe Drehzahlen 2</i>	96
<i>Tabelle 40 - Einfluss der Ruhezeit auf den Wärmeleitwert</i>	96
<i>Tabelle 41 - Wärmeleitwert: unterschiedliche Drücke</i>	99
<i>Tabelle 42 - Vergleich Messreihe eins und zwei</i>	99
<i>Tabelle 43 - Parameter dritte Messreihe</i>	100
<i>Tabelle 44 - Wärmeleitwert in Abhängigkeit von der Vorspannung</i>	101
<i>Tabelle 45 - Zusammenfassung Drehzahlabhängigkeit der Wärmeleitung</i>	102
<i>Tabelle 46 - Zusammenfassung Vorspannungsabhängigkeit der Wärmeleitung</i>	103

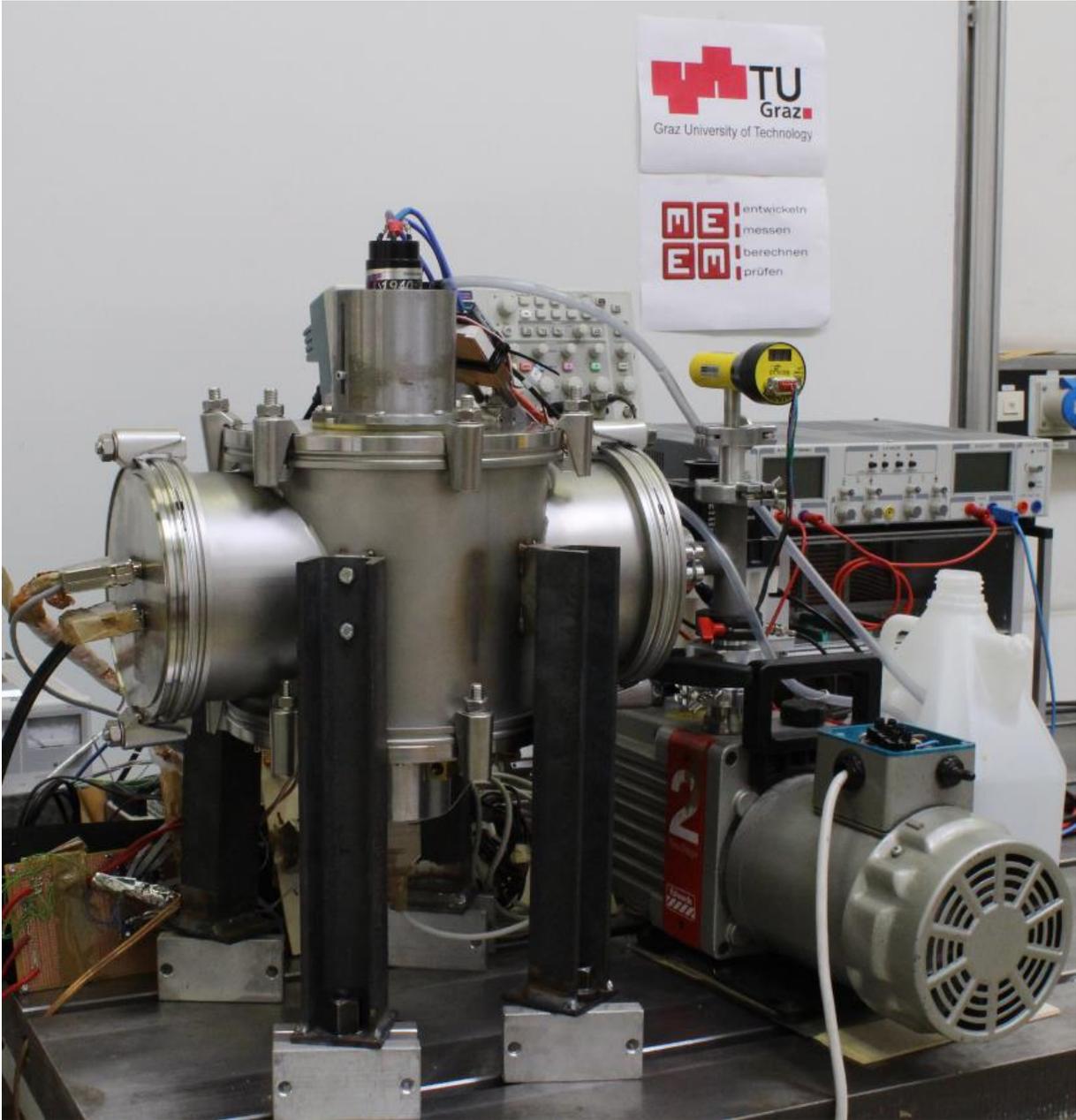
10. Formelverzeichnis

<i>Gleichung 1 - Statische Tragfähigkeit</i>	5
<i>Gleichung 2 - Nominelle Lebensdauer</i>	6
<i>Gleichung 3 - Erweiterte modifizierte Lebensdauerberechnung</i>	6
<i>Gleichung 4 - Überschlägige Abschätzung des Reibmomentes</i>	20
<i>Gleichung 5 - Ursachenbezogener Ansatz zur Abschätzung des Reibungsmomentes</i>	21
<i>Gleichung 6 - Berechnung Betriebsspiel</i>	26
<i>Gleichung 7 - Nachweis Sicherheit Klebung</i>	54
<i>Gleichung 8 - Wärmeleitwert</i>	73
<i>Gleichung 9 - Zufließender Wärmestrom allgemein</i>	73
<i>Gleichung 10 - Zufließender Wärmestrom mit eingesetzten Zahlenwerten</i>	73
<i>Gleichung 11 - Abfließender Wärmestrom allgemein</i>	73
<i>Gleichung 12 - Berechnung radialer Abstand der Messstellen</i>	74
<i>Gleichung 13 - Abfließender Wärmestrom mit eingesetzten Zahlenwerten</i>	74
<i>Gleichung 14 - Lineares Fehlerfortpflanzungsgesetzt angewendet auf Gleichung [9]</i>	80
<i>Gleichung 15 - Term 1 von Gleichung 13</i>	81
<i>Gleichung 16 - Term 2 von Gleichung 13</i>	81
<i>Gleichung 17 - Term 3 von Gleichung 13</i>	81
<i>Gleichung 18 - Lineares Fehlerfortpflanzungsgesetzt angewendet auf Gleichung [11]</i>	81
<i>Gleichung 19 - Term 1 von Gleichung 18</i>	81
<i>Gleichung 20 - Term 2 von Gleichung 18</i>	81
<i>Gleichung 21 - Term 3 von Gleichung 18</i>	81
<i>Gleichung 22 - Term 4 von Gleichung 18</i>	82
<i>Gleichung 23 - Lineares Fehlerfortpflanzungsgesetzt angewendet auf die Wärmeleitungsgleichung</i>	82
<i>Gleichung 24 - Term 1 von Gleichung 23</i>	82
<i>Gleichung 25 - Term 2 von Gleichung 23</i>	82
<i>Gleichung 26 - Term 3 von Gleichung 23</i>	82
<i>Gleichung 27 - Term 4 von Gleichung 23</i>	82

11. Anhang

11.1 Prüfstand





11.2 a_{DIN} -Faktor für Rollenlager

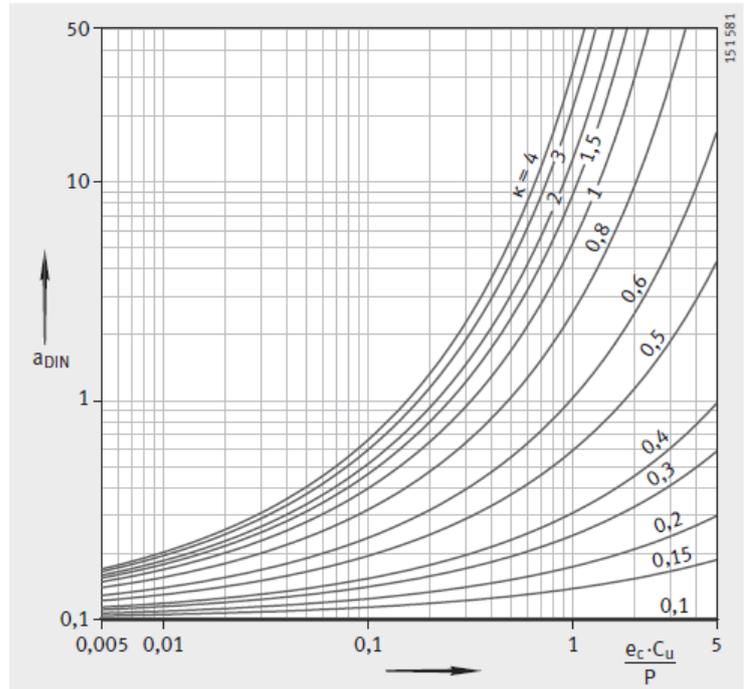


Bild 4
Lebensdauerbeiwert a_{DIN}
für Radial-Rollenlager

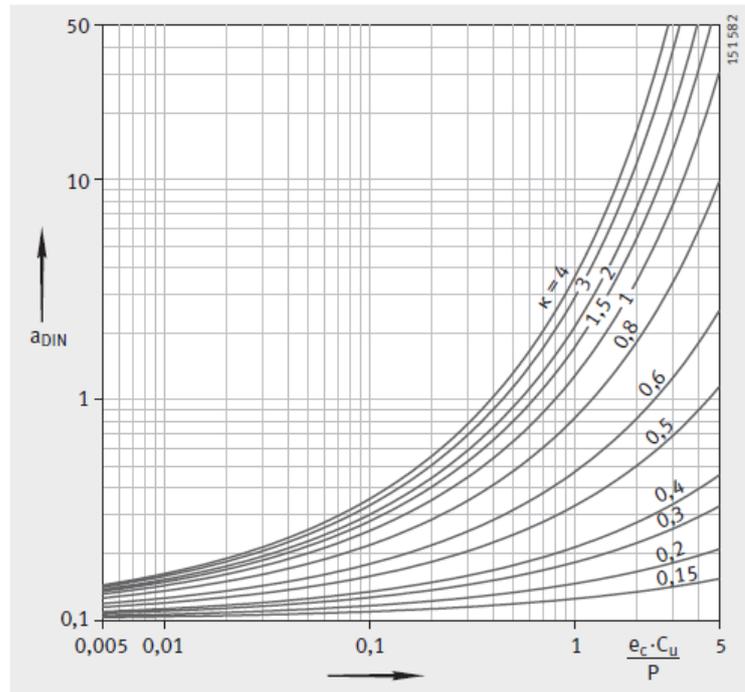


Bild 5
Lebensdauerbeiwert a_{DIN}
für Axial-Rollenlager

11.3 Datenblatt Schmierfett LGLT 2.0

LGLT 2

SKF Tieftemperaturfett für sehr schnell laufende, geräuscharme Lagerungen

Das Schmierfett LGLT 2 ist ein hochwertiges Lithiumseifenfett mit synthetischem Mineralöl (PAO) als Grundöl. Aufgrund der besonderen Beschaffenheit des Dickungsmittels und der sehr geringen Viskosität des Grundöls, eignet es sich hervorragend für Anwendungsfälle mit niedrigen Betriebstemperaturen (-50°C) und relativ hohen Drehzahlen.

- Geringes Laufreibungsmoment
- Gute Leislaufeigenschaften
- Ausgezeichnete Alterungsbeständigkeit und Korrosionsschutzeigenschaften

Typische Einsatzgebiete:

- Textilmaschinen-Spindeln
- Werkzeugmaschinen-Spindeln
- Technische Instrumente und Steuergeräte
- Kleine Elektromotoren für Dentalgeräte und andere medizinisch-technische Geräte
- Inline-Skates
- Druckzylinder
- Roboter

Betriebsbedingungen

Temperaturbereich	niedrig bis mittel
Drehzahlbereich	mittel bis sehr hoch
Belastbarkeit	leicht
Senkrechte Welle	○
Umlaufender Außenring	—
Oszillierende Bewegungen	—
Starke Schwingungen	—
Stoßbelastungen und häufiges Anlaufen	○
Geräuscharmer Lauf	+
Geringe Reibung	+
Korrosionsschutzeigenschaften	○
+ = Empfohlen ○ = Geeignet — = Nicht geeignet	

Erhältliche Gebindegrößen LGLT 2

200 g Tube	1 kg Dose	25 kg Eimer
180 kg Faß		

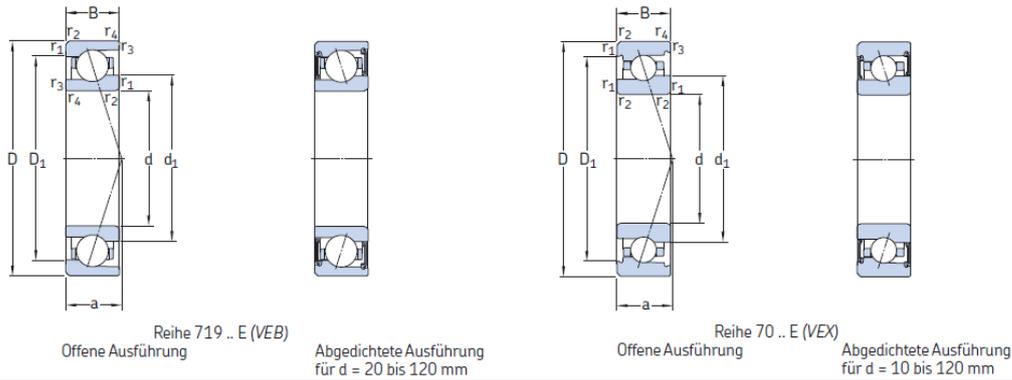
Technische Daten

SKF Schmierfett	LGLT 2		
DIN 51825 Bezeichnung	KP2G-50	Verhalten gegenüber Wasser	
Konsistenz (NLGI-Klasse)	2	DIN 51 807 Teil 1, 3 Stunden bei 90 °C	max. 1
Dickungsmittel	Lithium-Komplex	Ölabscheidung	
Farbe	Gelb	DIN 51 817, 7 Tage bei 40 °C, statisch, %	<4
Grundöl	Synthetisches Mineralöl	Schmierfähigkeit	
Temperaturbereich, °C	-50 bis +110	SKF R2F, Laufprüfung B bei 120 °C	-
Tropfpunkt (DIN ISO 2176), °C	min. 180	Kupferkorrosion	
Kinematische Viskosität des Grundöls:		DIN 51 811, 110 °C	max. 1 (150 °C)
bei 40 °C, mm ² /s	18	Wälzlagerfett-Gebrauchsdauer	
bei 100 °C, mm ² /s	4,5	SKF R0F-Prüfung L50, Gebrauchsdauer bei 10000 min ⁻¹ , Stunden	> 1 000, 20 000 min ⁻¹ bei 100 °C
Walk-Penetration (DIN ISO 2137):		Druckaufnahmevermögen	
Nach 60 Doppeltakten, 10 ⁻¹ mm	265 - 295	VKA-Verschleißkennwert (DIN 51 350 Teil 5) bei 1 400 N, mm	-
Differenz nach 100000 Doppeltakten, 10 ⁻¹ mm	max. +50	VKA-Schweißkraft (DIN 51 350 Teil 4), N	min. 2 000
Mechanische Stabilität:		Reibverschleißverhalten	
Walkstabilität, 50 Stunden bei 80 °C, 10 ⁻¹ mm	max. +380	ASTM D4170-82 (mg)	-
SKF V2F-Test	-	Kurzzeichen	LGLT 2/ (Gebindegröße)
Korrosionsschutz: SKF Emcor			
- Standardprüfung, ISO 11007	0 - 1		
- Auswaschtest, destilliertes Wasser	-		
- Prüfung, 100 % Meerwasser	-		

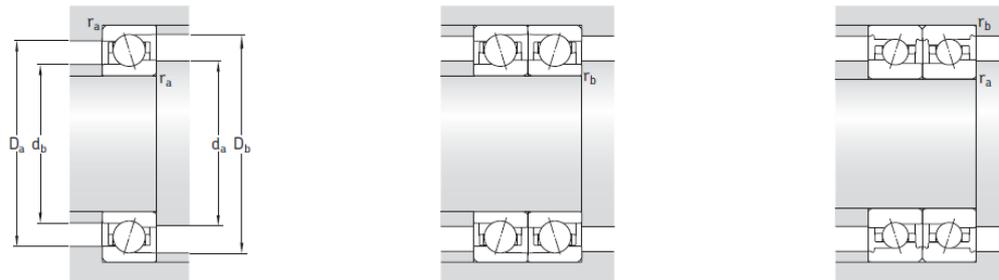
11.4 Datenblatt Spindellager 7008 ACEGA/P4A (untersuchtes Lager)

Bezeichnungsschema für SKF-SNFA Hochgenauigkeits-Schrägkugellager der Reihe 719 .. E (VEB) und 70 .. E (VEX)											
Einzellager: S7014 CEGB/PA9AH1	S	70	14	CE	GB	/		PA9A		H1	
Lagersatz für den satzweisen Einbau: 71910 ACE/HCP4AQBCA	Vorsetzzeichen	Reihe	Größe	Berührungswinkel und Ausführung	Ausführung und Vorspannung (Einzellager)		Kugelmateriale	Toleranzklasse	Anordnung	Vorspannung	Nachsetzzeichen
		719	10	ACE		/	HC	P4A	QBC	A	
Ausführung (Vorsetzzeichen)						Lagersatz – Vorspannung					
– Offenes Lager (kein Vorsetzzeichen)						A Leichte Vorspannung					
S Abgedichtetes Lager						L Leichte Vorspannung (nur für asymmetrische, zusammengepasste Lagersätze in TBT-, TFT-, QBT- und QFT-Anordnungen)					
V Lager mit Ringen aus NitroMax-Stahl und Kugel aus für Wälzlager geeignetem Siliziumnitrid Si ₃ N ₄ (Hybridlager)						B Mittlere Vorspannung					
Lagerreihe						M Mittlere Vorspannung (nur für asymmetrische, zusammengepasste Lagersätze in TBT-, TFT-, QBT- und QFT-Anordnungen)					
719 Nach ISO-Maßreihe 19						C Hohe Vorspannung					
70 Nach ISO-Maßreihe 10						F Hohe Vorspannung (nur für asymmetrische, zusammengepasste Lagersätze in TBT-, TFT-, QBT- und QFT-Anordnungen)					
Lagergröße						G Sondervorspannung, angegeben in daN, z.B. G240					
6 Bohrungsdurchmesser 6 mm ¹						Ausführung (Nachsetzzeichen)					
7 Bohrungsdurchmesser 7 mm ¹						H Zwei Schmierlöcher im Außenring für die direkte Ölschmierung					
8 Bohrungsdurchmesser 8 mm						H1 Zwei Schmierlöcher im Außenring (optimierte Position) für die direkte Ölschmierung					
9 Bohrungsdurchmesser 9 mm						L Umfangsnut mit zwei Schmierbohrungen und zwei Umfangsnuten, O-Ringe im Außenring für die direkte Ölschmierung					
00 Bohrungsdurchmesser 10 mm						L1 Umfangsnut mit zwei Schmierbohrungen und zwei Umfangsnuten, O-Ringe im Außenring (optimierte Position) für die direkte Ölschmierung					
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)											
Kugelmateriale											
– Chromstahl (kein Nachsetzzeichen)											
HC Für Wälzlager geeignetes Siliziumnitrid Si ₃ N ₄ (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											
¹ Lager der Reihe 719 .. E (VEB) sind nur für Bohrungsdurchmesser ab d = 8 mm verfügbar.											
² Weitere Auskünfte erteilt die Technische Beratung von SKF.											

Hochgenauigkeits-Schrägkugellager
d 35 – 55 mm



Hauptabmessungen			Tragzahlen dynamisch statisch		Ermüdungs- grenzbelas- tung	Berechnungs- faktor	Drehzahlen bei Schmierung mit Fett	Drehzahlen mit Öl-Luft ¹	Gewicht ¹	Bezeichnungen von offenen Lagern ²	
d	D	B	C	C ₀	P _u	f ₀			kg	SKF	SNFA
mm			kN		kN	-	U/min			-	
35	55	10	7,61	4,75	0,2	8,3	36 000	54 000	0,075	71907 CE/P4A	VEB 35 7CE1
	55	10	7,61	4,75	0,2	8,3	43 000	65 000	0,067	71907 CE/HCP4A	VEB 35 /NS 7CE1
	55	10	7,28	4,5	0,19	-	32 000	50 000	0,075	71907 ACE/P4A	VEB 35 7CE3
	55	10	7,28	4,5	0,19	-	38 000	60 000	0,067	71907 ACE/HCP4A	VEB 35 /NS 7CE3
	62	14	11,4	6,55	0,28	7,9	34 000	50 000	0,15	7007 CE/P4A	VEX 35 7CE1
	62	14	11,4	6,55	0,28	7,9	40 000	63 000	0,13	7007 CE/HCP4A	VEX 35 /NS 7CE1
	62	14	11,1	6,3	0,265	-	31 000	46 000	0,15	7007 ACE/P4A	VEX 35 7CE3
	62	14	11,1	6,3	0,265	-	36 000	56 000	0,13	7007 ACE/HCP4A	VEX 35 /NS 7CE3
40	62	12	9,75	6,1	0,26	8,3	32 000	49 000	0,10	71908 CE/P4A	VEB 40 7CE1
	62	12	9,75	6,1	0,26	8,3	38 000	58 000	0,088	71908 CE/HCP4A	VEB 40 /NS 7CE1
	62	12	9,23	5,85	0,245	-	28 000	44 000	0,10	71908 ACE/P4A	VEB 40 7CE3
	62	12	9,23	5,85	0,245	-	34 000	52 000	0,088	71908 ACE/HCP4A	VEB 40 /NS 7CE3
	68	15	12,4	7,65	0,32	8,1	30 000	45 000	0,19	7008 CE/P4A	VEX 40 7CE1
	68	15	12,4	7,65	0,32	8,1	36 000	56 000	0,17	7008 CE/HCP4A	VEX 40 /NS 7CE1
	68	15	11,7	7,2	0,305	-	27 000	41 000	0,19	7008 ACE/P4A	VEX 40 7CE3
	68	15	11,7	7,2	0,305	-	32 000	50 000	0,17	7008 ACE/HCP4A	VEX 40 /NS 7CE3



Abmessungen					Anschlussmaße					
d	d ₁	D ₁	r _{1,2} min.	r _{3,4} min.	a	d _a , d _b min.	D _a max.	D _b max.	r _a max.	r _b max.
mm						mm				
35	41,7	48,3	0,6	0,3	11	38,2	51,8	52,6	0,6	0,3
	41,7	48,3	0,6	0,3	11	38,2	51,8	52,6	0,6	0,3
	41,7	48,3	0,6	0,3	16	38,2	51,8	52,6	0,6	0,3
	41,7	48,3	0,6	0,3	16	38,2	51,8	52,6	0,6	0,3
	43,7	52,3	1	0,6	14	39,6	57,4	57,8	1	0,6
	43,7	52,3	1	0,6	14	39,6	57,4	57,8	1	0,6
	43,7	52,3	1	0,6	18	39,6	57,4	57,8	1	0,6
	43,7	52,3	1	0,6	18	39,6	57,4	57,8	1	0,6
40	46,5	54,2	0,6	0,3	13	43,2	58,8	59,6	0,6	0,3
	46,5	54,2	0,6	0,3	13	43,2	58,8	59,6	0,6	0,3
	46,5	54,2	0,6	0,3	19	43,2	58,8	59,6	0,6	0,3
	46,5	54,2	0,6	0,3	19	43,2	58,8	59,6	0,6	0,3
	49,7	58,3	1	0,6	15	44,6	63,4	63,8	1	0,6
	49,7	58,3	1	0,6	15	44,6	63,4	63,8	1	0,6
	49,7	58,3	1	0,6	20	44,6	63,4	63,8	1	0,6
	49,7	58,3	1	0,6	20	44,6	63,4	63,8	1	0,6

11.5 Lagersteifigkeit in Abhängigkeit von der Vorspannung

Steifigkeitswerte in Abhängigkeit von der Vorspannung des Lagers 7008 CD/P4A (nicht jene Ausführung, welche im Prüfstand verbaut wurde).

Vorspannung, nicht montiert [N]

O-Anordnung, X-Anordnung

Vorspannungsklasse

A	B	C	D
60	120	240	480

Static axial stiffness [N/μm]

(guideline value)

Vorspannungsklasse

A	B	C	D
38	51	69	96

Quelle: SKF-Katalog – 7008 CD/P4A

11.6 Datenblatt Klebstoff (UHU-Endfest 300)

UHU Technisches Merkblatt

UHU plus endfest 300

suter-kunststoffe ag
swiss-composite.ch
 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 Klebebindungen 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/cm³]	Binder: ca. 1,2 Härter: ca. 0,96
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 Funktionsfestigkeit Endfestigkeit	6 h 12 h 24 h
Zugscherfestigkeiten (Aluminium)	Mischungsverhältnis (Volumen) 1:1, Prüfung bei Raumtemperatur 10 h: 500 N/cm² 24 h: 1200 N/cm² 5 Tage: 1700 N/cm² 1 Monat: 1700 N/cm²
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.

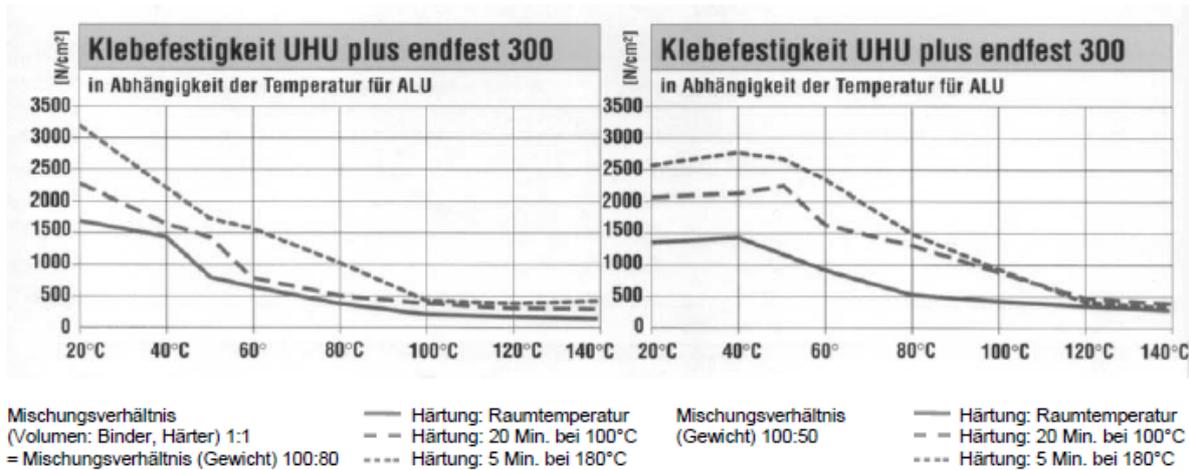
Temperaturen unter 18 °C bremsen den Härtungsvorgang und ergeben schlechte Bindefestigkeiten, deshalb ist für die Verarbeitung in kühlen Arbeitsräumen oder im Freien Wärmezufuhr notwendig (Heizlüfter, Infrarotstrahler oder dergleichen).

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 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 mm²,
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 ²
40°C	3 h	ca. 1800 N/cm ²
70°C	45 min	ca. 2000 N/cm ²
100°C	10 min	ca. 2500 N/cm ²
180°C	5 min	ca. 3000 N/cm ²

* 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.

11.7 Drehzahlabhängigkeit der Sicherheit der Klebung an der Welle

$$\sigma_{\text{zulässig}} := 5 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

$$m_{\text{Magnetstack}} := 3.14 \times 10^{-3} \text{ kg}$$

$$r_{\text{Magnet}} := 9.846 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$b_{\text{Magnet}} := 5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$l_{\text{Magnet}} := 20 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

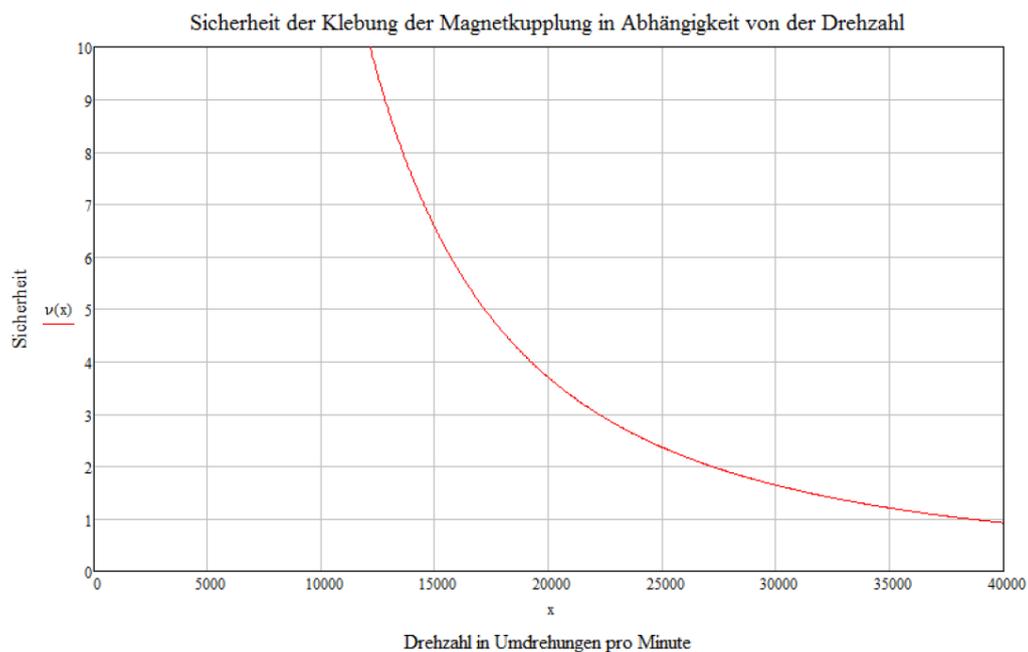
$$\nu := \frac{\sigma_{\text{zulässig}}}{\sigma_{\text{vorhanden}}}$$

$$\sigma_{\text{vorhanden}} := \frac{F_{\text{vorhanden}}}{b_{\text{Magnet}} \cdot l_{\text{Magnet}}}$$

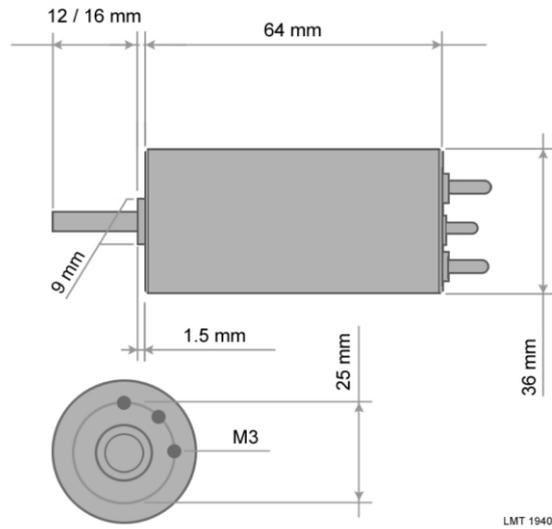
$$F_{\text{vorhanden}} := m_{\text{Magnetstack}} \cdot r_{\text{Magnet}} \left[\frac{(x - \pi)}{30} \right]^2$$

$$\sigma_{\text{vorhanden}} := \frac{m_{\text{Magnetstack}} \cdot r_{\text{Magnet}} \left[\frac{(\pi - x)}{30} \right]^2}{b_{\text{Magnet}} \cdot l_{\text{Magnet}}}$$

$$\nu(x) := \frac{\sigma_{\text{zulässig}}}{\frac{m_{\text{Magnetstack}} \cdot r_{\text{Magnet}} \left[\frac{(x - \pi)}{30} \right]^2}{b_{\text{Magnet}} \cdot l_{\text{Magnet}}}}$$



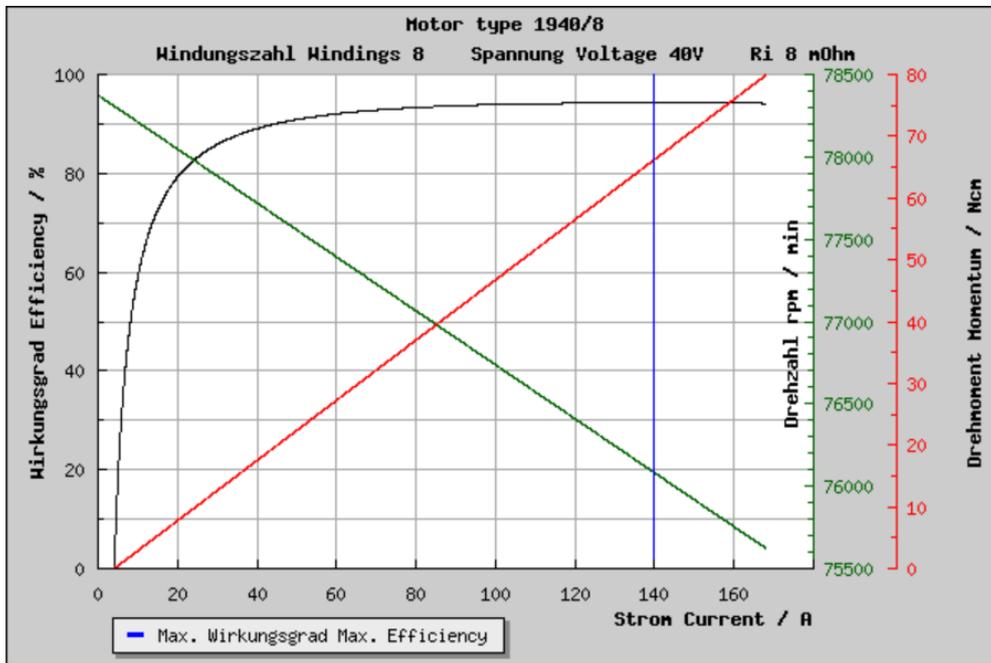
11.8 Datenblatt Modellbaumotor + Steuerung



Desired operating voltage: in Volt
 (ca. 3,6 V pro LiPo-Zelle)

Motor:

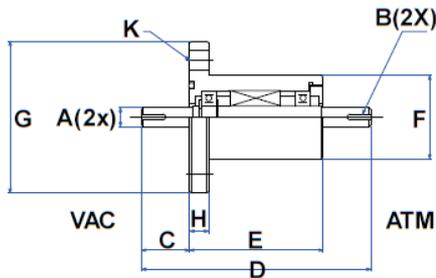
[show diagram](#)



Motor type 1940/8, Windungen Windings 8, Spannung Voltage 40 V, Ri 8 mΩ

11.9 Datenblatt Ferrofluididdichtung

Flange Mount Feedthroughs



INCH SIZES

Model Number	SS-250-SLCB	SS-250-SLCA	SS-375-SLCBW	SS-375-CFCB**	SS-500-SLFA	SS-500-SLCB	SS-750-SLFA	HD750SLFFW**2
Part Number	103532	103915	103912	121060	103244	103909	103246	103904
Shaft diameter [in]	A	0.250	0.250	0.375	0.375	0.500	0.500	0.750
Shaft termination [in]	B	.030d x .40L (flat)	.030d x .40L (flat)	.030d x .40L (flat)	.030d x 40L (flat)	.126w x 0.77d x 1.0L (keyway)	.126w x 0.77d x 1.0L (keyway)	.188w x .114d x 1.0L (keyway)
Shaft extension (Vac) [in]	C	0.75	0.75	0.75	0.750	1.25	2.5	1.218
Overall length [in]	D	4.06	3.25	4.56	4.50	6.03	8.656	6.03
Housing overall length [in]	E	2.56	1.75	3.06	3.00	3.56	4.906	3.562
Housing diameter [in]	F	1.50	0.75	1.50	1.50	2.87	2.375	2.87
Flange diameter [in]	G	2.73	1.33	2.73	2.73	6.00	2.73	6.00
Flange thickness [in]	H	0.50	0.28	0.50	0.50	0.38	0.50	0.38
Fitting locations for optional water cooling		n/a	n/a	1.07, 1.24	0.75 (p/n 121099)	0.5, 1.74 (p/n 103182)	n/a	n/a
Mounting holes	K	0.265, 6x on 2.312 bc.	0.172, 6x on 1.062 bc.	0.265, 6x on 2.312 bc.	0.265, 6x on 2.312 bc.	0.750, 4x on 4.750 bc.	0.265, 6x on 2.312 bc.	0.750, 4x on 4.750 bc.
Torque capacity [lb-in]		15	15	67	67	180	180	670
Bearing type/material		R4/SS	R4/SS	R6/SS	6800/SS	R8/SS	R8/SS	R12/SS
Maximum no-load speed [rpm]		10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	8,100
Face seal O-ring		ConFlat Flange	ConFlat Flange	ConFlat Flange	ConFlat Flange	2-234	ConFlat Flange	2-234
								2-337

** cantilevered configuration

** heavy duty

METRIC SIZES

Model Number	SFL-006-NN	SFL-010-NN	SFL-012-NN	SFL-020-NN	SFL-030-WH
Part Number	09295	09297	09299	09264	04094
Shaft diameter [mm]	A	6 $\frac{2}{018}$	10 $\frac{2}{022}$	12 $\frac{2}{027}$	20 $\frac{2}{033}$
Shaft termination [mm]	B	0.5d x 12L (flat)	3w x 1.8d x 14L (keyway)	4w x 2.5d x 20L (keyway)	6w x 3.5d x 25L (keyway)
Shaft extension (Vac) [mm]	C	20	25	30	35
Overall length [mm]	D	97.5	119.5	133.5	151.5
Housing overall length [mm]	E	57.5	69.5	73.5	81.5
Housing diameter [mm]	F	38	44	48	63
Flange diameter [mm]	G	80	80	90	105
Flange thickness [mm]	H	10	10	10	10
Mounting holes	K	10, 4 x on a 60mm bc	10, 4 x on a 60mm bc	10, 4 x on a 70mm bc	10, 4 x on a 85mm bc
Torque capacity [Nm]		2.5	13.5	23.5	108.5
Bearing type/material		627/SUS440C	6001/SUS440C**	6002/SUS440C	6005/SUS440C
Face seal O-ring		G25	G30	G35	G50

* For additional ConFlat® and ISO Flange feedthroughs see page 13.

** similar to ISO 1.4435

*** similar to ISO 1.3505

11.11 Hardware Prüfstand

Netzgerät 1
Voltcraft Plus - VSP 2405 HE
Versorgung Induktionsheizung
Spannung 75V

Netzgerät 2
Voltcraft Plus - VSP 2405 HE
Spannung 5V: Versorgung Pt-1000
Spannung 10V: Drucksensor, Beschleunigungssensor, Kontrastsensor

Netzgerät 3
Voltcraft Plus - VSP 2405 HE
Versorgung compact reader
Spannung: 15V

Netzgerät 4
Kenwood PR 36-3
Versorgung Pyrometer
Spannung 11V

Netzgerät 5
MRGN - 9000; regelbares Netzgerät; MC Power
Versorgung Antrieb
Spannung 32V

Drucksensor (Vacom)
Pirani-Vakuumsensor
STINGER Model CVM 211 GBA-B-L

Beschleunigungssensor
max Beschleunigung $\pm 5g$

Compact reader
National Instruments

Kontrastsensor
Monarch Instruments
ROS Serial Nr.: 1888985

Pyrometer
Optris
Bezeichnung: CTLT - CF

Widerstandsthermometer Pt-1000
Toleranzklasse B
Nennwiderstand 1000 Ohm

Drehschieberpumpe
Edwards - E2M2

11.11.1 Drucksensor



Aktiver Pirani-Vakuumsensor mit Konvektionsausgleich CVM-211

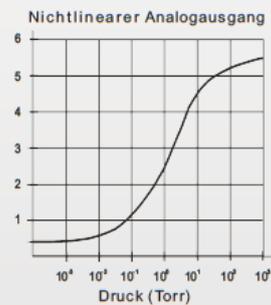
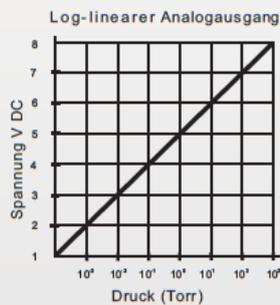
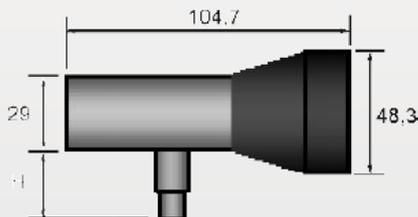
- Atmosphärendruck bis 10^{-4} mbar
- Stabile und reproduzierbare Messung
- Integrierte Digitalanzeige: mbar oder Torr (nicht umschaltbar)
- Analogausgang: nichtlinear oder log-linear
- 1 Relaisausgang
- Kompakte Bauform
- Einfache Installation
- Optimal für Prozesskontrolle
- Optional aufsteckbares Batterie-Netzteil
- Kompatibel zu Mini-Convector[®]-Basismodulen



www.vacom.de

Technische Daten

Typische Messgenauigkeit	±2 % im Bereich atm bis 500 mbar ±10 % im Bereich 500 bis 1 x 10 ⁻³ mbar
Inneres Volumen	26 cm ³
Leckrate	< 1 x 10 ⁻⁹ 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 ₂)
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	DN16KF	log-linear	33
CVM211GEB	DN16KF	nichtlinear	33
CVM211GEA	DN16CF	log-linear	37,3
CVM211GEB	DN16CF	nichtlinear	37,3

* 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



11.11.2 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 Programmertasten 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 _{alt} ; 0,4 A; potentialfrei
Ausgänge/digital (optional)	USB, RS232, RS485 (wahlweise), CAN-, Bus, Profibus DP, Ethernet
Ausgangsimpedanzen	mA max. 500 Ω (bei 8-36 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

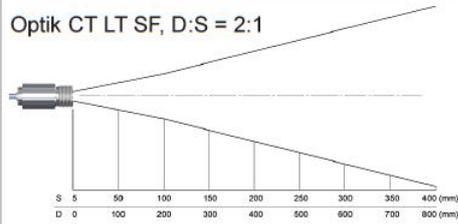
Messtechnische Parameter	
Temperaturbereiche (skalierbar über Programmertasten oder Software)	-50°C bis 975°C (LT22) -50°C bis 600°C (LT15) -50°C bis 600°C (LT02)
Spektralbereich	8-14 μm
Optische Auflösung (90 % Energie)	22:1 (Präzisionsglasoptik) 15:1 (Präzisionsglasoptik) 2:1 (mit Plan-Frontfenster)
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 ^{1,2)} (bei Umgebungstemperatur 23 ± 5°C)	± 1% oder ± 1°C
Reproduzierbarkeit ^{1,2)} (bei Umgebungstemperatur 23 ± 5°C)	± 0,5% oder ± 0,5°C
Temperaturaufösung (Anzeige)	0,1°C
NETD ^{2),3)}	0,05 K (LT22/LT15) 0,1 K (LT02)
Einstellzeit	150 ms (95 %)
Emissionsgrad/Verstärkung (einstellbar über Programmertasten oder Software)	0,100 - 1,100
Transmissionsgrad (einstellbar über Programmertasten oder Software)	0,100 - 1,100
Signalverarbeitung (Parameter einstellbar über Programmertasten oder Software)	Maximal-, Minimalwerthaltung, Mittelwert, erweiterte Haltefunktionen mit Treshold und Hysterese
Software	optris Compact Connect

¹⁾ es gilt der jeweils größere Wert
²⁾ bei Objekttemperaturen > 0°C, ε=1
³⁾ bei Zeitkonstante von 200 ms und T_{obj} 25°C

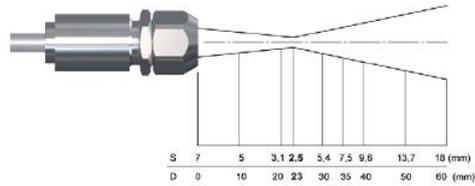
optris® CT LT

Optische Parameter

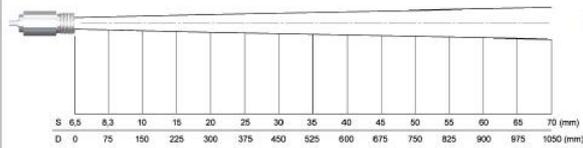
Optik CT LT SF, D:S = 2:1



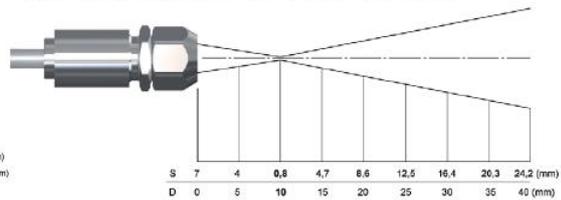
Optik CT LT CF, D:S = 2:1 (Fernfeld = 2,5:1)



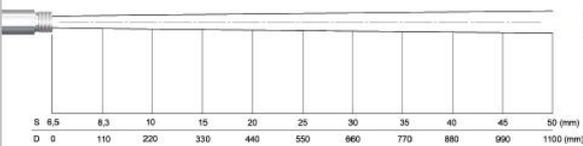
Optik CT LT SF, D:S = 15:1



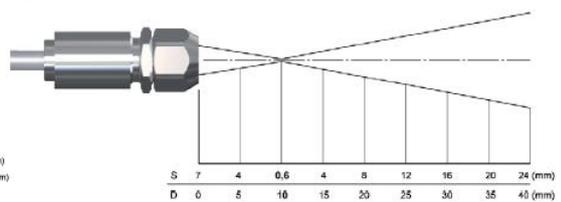
Optik CT LT CF, D:S = 15:1 (Fernfeld = 1,5:1)



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

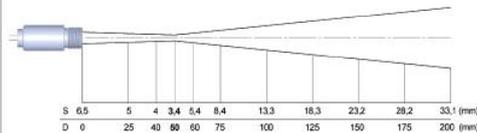


Optik CT LT CF, D:S = 22:1 (Fernfeld = 1,5:1)

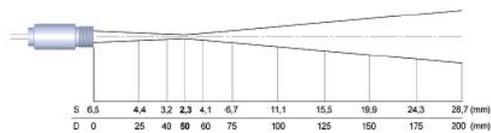


Varianten mit eingebauter CF-Linse

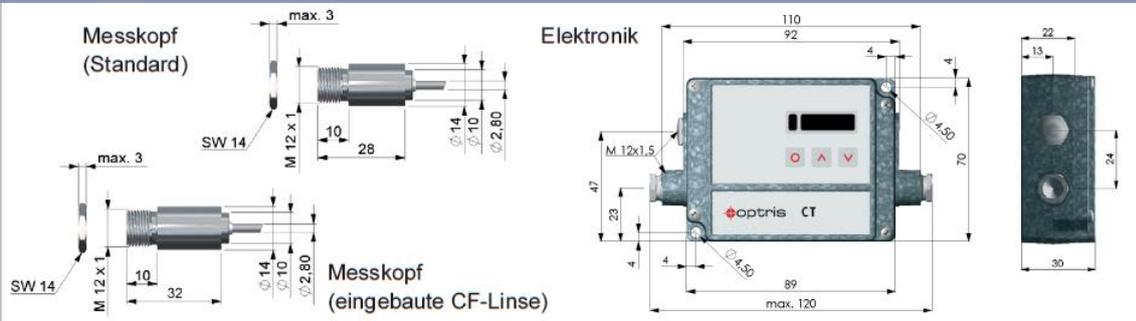
Optik CT LT CF, D:S = 15:1 (Fernfeld = 5:1)



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



Abmessungen



11.11.3 Pt-1000 Widerstandsthermometer

Quelle: <http://docs-europe.electrocomponents.com/webdocs/112e/0900766b8112e98f.pdf>

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 90.6125

Seite 1/3

Platin-Chip-Temperatursensoren in SMD-Bauform nach DIN EN 60 751

- Für Temperaturen von -50 ... +150°C
- Genormte Nennwerte und Toleranzen
- Galvanische Rundumkontaktierung
- Für maschinelle Großserienkonfektion
- Gurtverpackung nach DIN IEC 286-3

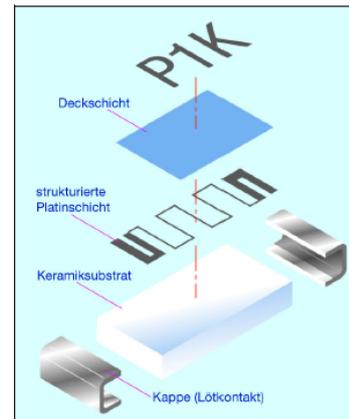
Einleitung

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.

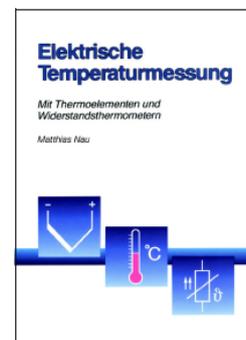
Die Temperatursensoren basieren auf einem temperaturabhängigen Widerstand, dessen Verlauf und zulässige Toleranz in der internationalen Norm DIN EN 60 751 definiert ist. Hohe Messgenauigkeit und gute Langzeitstabilität zählen zu den weiteren positiven Eigenschaften dieser Temperatursensoren. Durch die verwendete Dünnschicht-Technologie wird die Herstellung besonders kleiner und robuster Bauformen ermöglicht, welche zudem auch über hochohmige Nennwerte verfügen können.

Der Anwendungstemperaturbereich bei JUMO-SMD-Temperatursensoren erstreckt sich von -50 ... +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 Platine 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.

Februar 2003, 164 Seiten
 Fachaufsatz FAS 146
 Verkaufs-Artikel-Nr.: 90/00074750
 ISBN 3-935742-06-1

JUMO-Platin-Temperatursensoren

Aufbau und Anwendung von Platin-Temperatursensoren	Typenblatt 90.6000
Platin-Glas-Temperatursensoren	Typenblatt 90.6021
Platin-Keramik-Temperatursensoren	Typenblatt 90.6022
Platin-Folien-Temperatursensor	Typenblatt 90.6023
Platin-Glas-Temperatursensoren mit Glasverlängerung	Typenblatt 90.6024
Platin-Chip-Temperatursensoren mit Anschlussdrähten	Typenblatt 90.6121
Platin-Chip-Temperatursensoren auf Epoxidplatine	Typenblatt 90.6122
Platin-Chip-Temperatursensoren mit Anschlussklammern	Typenblatt 90.6123
Platin-Chip-Temperatursensoren in Rundbauform	Typenblatt 90.6124
Platin-Chip-Temperatursensoren in SMD-Bauform	Typenblatt 90.6125

01.05/00336645

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



Platin-Chip-Temperatursensoren in SMD-Bauform nach DIN EN 60 751

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 1000Ω nach DIN EN 60 751 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.

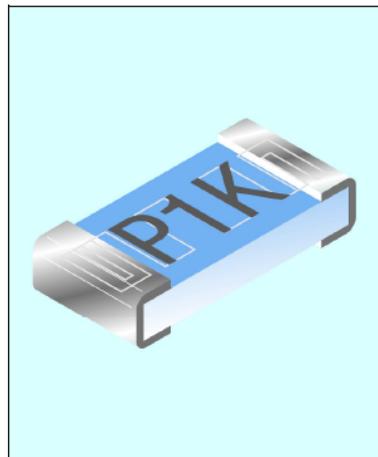
Ein guter linearer Kennlinienverlauf, großer Temperaturmessbereich und hohe Messgenauigkeit bei unvergleichbar guter Langzeitstabilität machen diese normierten Temperatursensoren zur ersten Wahl.

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

Temperatursensoren in Pappgurt-Verpackung*

Typ	Temperatursensor				
	R ₀ /Ω	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



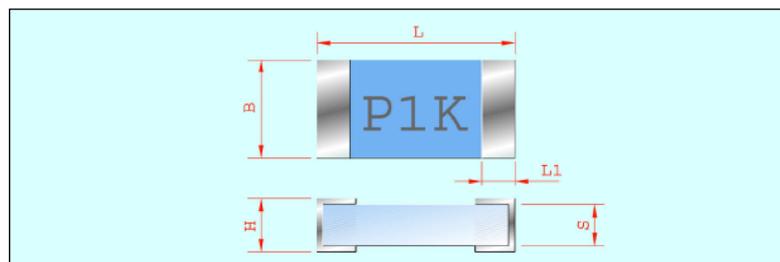
Verkaufs-Artikel-Nr. für Toleranzklasse		
1/3 DIN B	A	B
-	-	90/00427145
-	-	90/00427146
-	-	90/00427147
-	-	90/00309087
-	-	90/00358356
-	-	90/00374853

Maßtoleranzen: ΔB = ±0,2 / ΔL = ±0,2 / ΔH = ±0,2 / ΔS = ±0,06 / L1 = ca. Maße
 Maßangaben in mm.

* Kleinmengen, Lieferung auch lose verpackt in Tüten.

Definition der Toleranzklassen siehe
 Typenblatt 90.6000

Maßzeichnung



01 05/00336645

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

**Technische Daten**

Norm	DIN EN 60 751
Temperaturkoeffizient	$\alpha = 3,850 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (zwischen 0 und 100 °C)
Temperaturbereich	-50 ... +150 °C
Toleranz	Temperaturgültigkeitsbereich Klasse B: -50 ... +150 °C
Messstrom	Pt 100 empfohlen 1,0mA Pt 500 empfohlen 0,7 mA Pt 1000 empfohlen 0,1 mA
Maximalstrom	Pt 100 7,0mA Pt 500 3,0mA Pt 1000 1,0mA
SMD-Baugröße	Die Typen PCS 1.1503.x (Baugröße 1206) und PCS 1.1302.x (Baugröße 0805) erfüllen die Anforderungen der Normen CECC 40401-004/DIN 45 921.
Verarbeitung	- Reflowlöten (Löttemperatur/-zeit $\leq 240 \text{ } ^\circ\text{C}/8\text{s}$) - Schwall-Wellenlöten (Löttemperatur/-zeit $\leq 260 \text{ } ^\circ\text{C}/10 \text{ s}$)
Lötanschlüsse	galvanisch verzinnete Rundumkontaktierung mit Diffusionssperre, Lötbarkeit siehe DIN IEC 68 Teil 2
Einsatzbedingungen	Platin-Chip-Temperatur Sensoren 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 90.6121.4 „Hinweise für den Einsatz von Platin-Chip-Temperatur Sensoren.“
Langzeitstabilität	max. R_0 -Drift $\leq 0,05 \text{ } \%/ \text{Jahr}$ (Definition siehe Typenblatt 90.6000)
Isolationswiderstand	$> 10 \text{ M}\Omega$ bei Raumtemperatur
Eigenerwärmung	$\Delta t = I^2 \times R \times E$ (Definition siehe Typenblatt 90.6000)
Verpackung	Pappgurt, Kleinmengen auch lose verpackt in Tüten
Lagerung	In der (Standard-) Gurtverpackung können JUMO-Temperatur Sensoren 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.

Eigenerwärmungskoeffizienten und Ansprechzeiten

Typ	Eigenerwärmungskoeffizient E in K/mW		Ansprechzeiten in Sekunden			
	in Wasser (v = 0,2m/s)	in Luft (v = 2m/s)	in Wasser (v = 0,4m/s)		in Luft (v = 1m/s)	
			t _{0,5}	t _{0,9}	t _{0,5}	t _{0,9}
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

11.11.4 Kontrastsensor

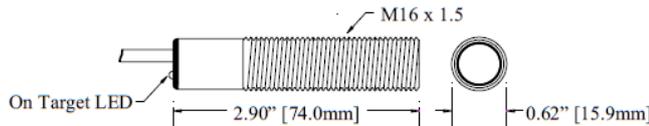


ROS - Remote Optical Sensor



SPECIFICATIONS:

Speed Range:	1-250,000 RPM	Power Requirement:	3.0 - 15 Vdc @ 40mA
Illumination:	Visible Red LED	Output Signal:	Negative pulse input voltage (+V) to 0
Operating Temp.:	14° to 158° F [-10° to 70° C]	On-Target Indicator:	Green LED on end cap
Operating Range:	up to 36" [0.9 m] and 45 degrees from target		
Cable Length:	ROS-W and ROS-P: 8 feet [2.4 m]; ROS-P-25: 25 feet [7.6 m]		
Connection:	Tinned wires (ROS-W); 3.5 mm [1/8 inch] male stereo plug (ROS-P, ROS-P-25)		
Material:	303 Stainless Steel supplied with two M16 Jam Nuts and Mounting Bracket		
Lens:	Acrylic Plastic		
Dimensions:	Threaded Tube 2.90 in x 0.62 in diameter [M16 x 1.5 x 74 mm] long		



CONNECTION DETAIL for Tinned Wires (ROS-W):			CONNECTION DETAIL for Plug (ROS-P, ROS-P-25):	
Wire Color	Function			
Brown	Positive Power Supply	(+V)		
Blue	Common	(Com)		
Black	Signal (+V to 0 Vdc Pulse)	(Sig)		
Shield	Housing Ground	(Com)		

OPERATING INSTRUCTIONS:

The ROS Remote Optical Sensor is capable of detecting a reflected pulse from a target consisting of T-5 Reflective Tape at distances of up to 36 inches [1 m] from the rotating object and angles up to 45 degrees. For most applications, a 1/2" [12 mm] square piece of Reflective Tape (T-5) should be applied to a clean area on the rotating object.

The ROS should be mounted (using the supplied jam nuts and aluminum mounting bracket) and optically aligned to illuminate the target once per revolution. The user must hold "steady" or mount the ROS to obtain an accurate measurement. It is recommended that the optical Sensor be placed at a slight angle (15 degrees) from perpendicular, so that the Sensor will receive only pulses from the reflective marker. The ROS should be at least 1 inch from the reflective target to avoid false triggering. The green LED On-Target Indicator will blink at the input frequency rate when the ROS is properly aimed. **NOTE:** The green LED On-Target Indicator will blink on and off at slow speeds and remain on steady at high speeds.

The ROS is supplied with an 8 foot [2.4 m] cable terminated with 4 tinned wires (ROS-W) or a 3.5 mm [1/8 inch] male stereo plug (ROS-P) or optionally a 25 foot [7.6 m] cable terminated with a 3.5 mm [1/8 inch] male stereo plug (ROS-P-25). The plug may be cut from the cable and the leads stripped and connected as shown in connection detail for tinned wire above. An optional 25 foot [7.6 mm] extension cable EC-25P is available with a female socket for the plug on one end, and a 3.5 mm [1/8 inch] male stereo plug on the other.

The ROS-W will work with all Monarch panel instruments that accept pulse inputs (e.g. ACT Series, DataChart 1250). The ROS-P and ROS-P-25 will work directly with all Monarch Handheld Tachometers, Deluxe Nova-Strobe models (DA+, DB+, dax, dbx) and Phaser Strobe (PB, pbx) Stroboscopes. A sensor power supply (SPS, SPSR) with BNC output is available for those applications that require a separate power source for the sensor.

Correct operation of the ROS can be checked at any time by aiming it at an original design fluorescent light and observing a 120 Hz or 100 Hz (two times your mains frequency) square wave on the signal output. If the sensor is being used with a tachometer, the tachometer will read 7200 RPM or 6000 RPM. The Sensor will not pick up newer "energy efficient" design fluorescent lights.

ACCESSORIES:

EC-25P	25 foot [7.6 m] Extension Cable	T-5	Reflective Tape - 5 foot [1.5 m] roll
ROS-NUT	Set of two M16 Jam Nuts	T-5WP	Waterproof Reflective Tape - 5 foot [1.5 m] roll
ROS-MNT	90° Slotted Mounting Bracket	SPSR-IM	Self Powered Sensor - Interface Module
WIRE	3-wire shielded Sensor Cable, bulk lengths	PLUG	3.5 mm [1/8 inch] male stereo plug

Monarch Instrument
 15 Columbia Drive, Amherst, NH 03031 USA
 Tel: (603) 883-3390
 www.monarchinstrument.com

Specifications are subject to change without notice.

1071-4854-118R

11.11.5 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.

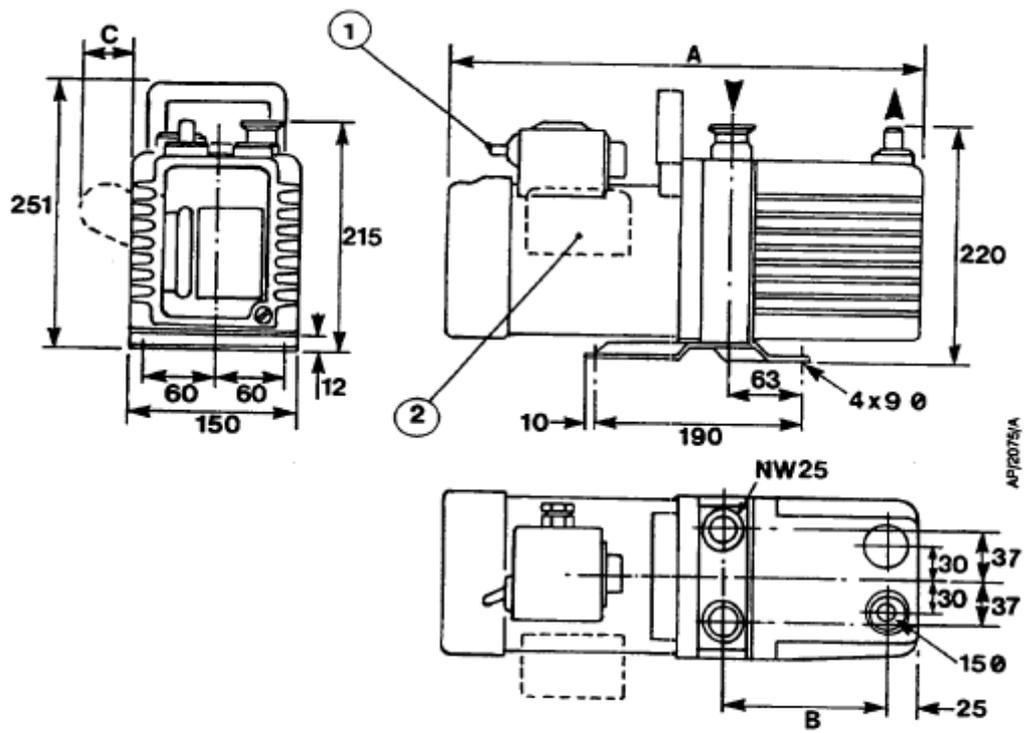
	E2M2	E1M5	E2M5	E1M8	E2M8	E2M12
Maximales Saugvermögen Netzfrequenz 50 Hz Netzfrequenz 60 Hz Max. Saugleistung (Pneurop) Netzfrequenz 50 Hz Netzfrequenz 60 Hz	2,8 m ³ h ⁻¹ 3,4 m ³ h ⁻¹ 2,4 m ³ h ⁻¹ 2,9 m ³ h ⁻¹	5,6 m ³ h ⁻¹ 6,7 m ³ h ⁻¹ 5,0 m ³ h ⁻¹ 6,0 m ³ h ⁻¹	2,5 x 10 ⁻⁴ mbar (2,5 x 10 ⁻² Pa) 1 x 10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

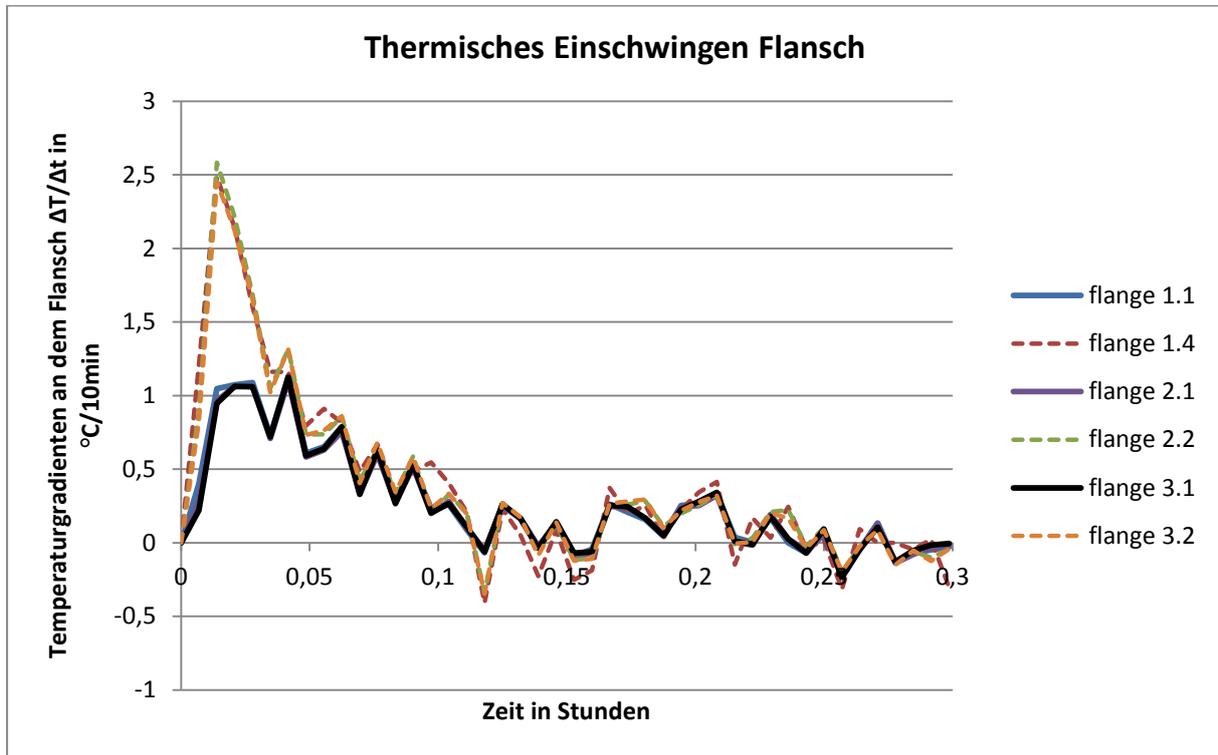
* Die Pumpen EM2, 5, 8 haben ein 3/4"-BSP-Rohrgewinde
Die Pumpen EM12 haben ein 1"-BSP-Rohrgewinde

Tabelle 4 - Mechanische Daten



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

11.12 Thermisches Einschwingen am Flansch



11.13 Einfluss einer Temperaturerhöhung auf die Loslagerfunktion

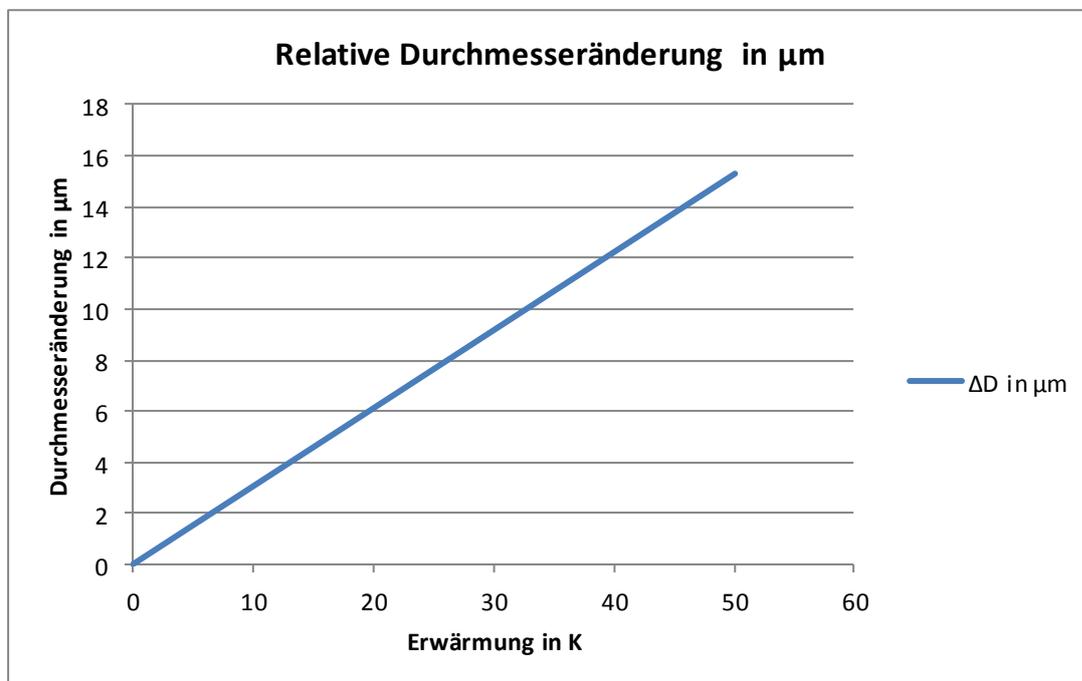
$$\Delta D = D * \alpha * \Delta T$$

$$\Delta D_{total} = D_{Nabe} - D_{Welle}$$

$$\Delta D_{total} = D * \Delta T * (\alpha_{Nabe} - \alpha_{Welle})$$

D	=	68 mm
α_{Nabe}	=	1,60E-5 1/K (Werkstoff 1.4301)
α_{Welle}	=	1,15E-5 1/K (Werkstoff 100Cr6)
ΔT	=	50 K
ΔD_{total}	=	0,0153 mm = 15,3 μm

Diese Betrachtung setzt voraus, dass sich Welle und Nabe um den selben Betrag erwärmen
Etwaige Temperaturdifferenzen zwischen Welle und Nabe müssen gesondert betrachtet
werden



Eine Erwärmung des Systems Loslager führt folglich zu einer Lockerung des Lagersitzes.

11.14 Werkstoffdatenblatt 1.3505 (100Cr6)

1.3505		Cr-legierter Wälzlagerstahl	
100Cr6		C 0,93 – 1,05 Si 0,15 – 0,35 Mn 0,25 – 0,45 Cr 1,35 – 1,60	
Normenzuordnung	AISI	52100	
	AMS	6440	
	BS		2S135, EN31, 534A99, 535A99
	JIS		SUJ2
	AFNOR		100C6
	SIS	14 2258	
	GOST		SCHCH15
	ISO 683-17		100Cr6
Hauptanwendung	Der Wälzlagerstahl 100Cr6 ist der klassische Stahl zum Einsatz in der Wälzlagerindustrie. Er eignet sich zur Herstellung von Kugellagern, Rollenlagern und Nadellagern. Er wird weiterhin im Maschinenbau für verschleißbeanspruchte Bauteile, z. B. für Pumpenwellen in verschleißfördernden Medien und für Bauteile in Automobleinspritzanlagen verwendet. Hierzu wird er zum Teil randschichtgehärtet.		
Technischer Lieferzustand	Kaltbrechbar		300 – 375 HB
	Kaltsägbar		Max. 300 HB
	Kaltscherbar		Max. 246 HB
	Weichgeglüht (GKZ)		Max. 207 HB
Schweißen	100Cr6 ist grundsätzlich nicht schweißbar.		
Warmumformung	100Cr6 wird bei 1100 °C – 850 °C warm umgeformt und soll anschließend an ruhender Luft oder langsamer abgekühlt werden.		
Physikalische Eigenschaften	Dichte (kg/dm ³)		7,61
	Elastizitätsmodul (10 ⁹ MPa)		210
	Elektr. Widerstand bei 20 °C (Ω mm ² /m)		0,19
	Wärmeleitfähigkeit bei 20 °C (W/m K)		42,6
	Spez. Wärmekapazität bei 20 °C (J/kg K)		470
	Wärmeausdehnung		
	im weichgeglühten Zustand (10 ⁻⁶ K ⁻¹)		
	20 – 100 °C		11,5
	20 – 200 °C		12,5
	20 – 300 °C		13,3
	20 – 400 °C		13,9
Wärmebehandlung	Ms: 250 °C	Ac ₁ : 750 °C	Ac ₃ : 800 °C
	Normalglühen:		
	Ein Normalglühen erfolgt bei 870 °C – 900 °C mit anschließender Abkühlung an Luft.		
	Weichglühen:		
	100Cr6 wird bei 750 °C – 800 °C weichgeglüht um kugeligen Zementit zu erhalten.		
	Spannungsarmglühen:		
	Das Spannungsarmglühen erfolgt bei 600 °C – 650 °C und anschließender Abkühlung an Luft.		
	Härten:		
	Das Härten erfolgt bei 800 °C – 830 °C mit Abschreckung in Wasser oder bei 830 °C – 870 °C mit Abschreckung in Öl oder einer wässrigen Polymerlösung mit einer vergleichbaren Abschreckwirkung.		

11.15 Werkstoffdatenblatt 1.4311

Werkstoff Nr. 1.4311					
Werkstoffeinteilung nach ISE/TR und IST/TR 15608:2005	8.1				
Zugehöriges Werkstoffblatt	DIN EN 10028-7				
Vergleichbare ASME- und UNS-Type	304LN / S30453				
Bezeichnung nach DIN/EN	X 2 CrNi 18-10				
Sonstige Bezeichnungen	V2A Nitro NK				
Werkstoffgruppe	Rost- und säurebeständiger Stahl				
Chemische Zusammensetzung (Richtwerte in %)	C	Si	N	Mn max.	P max.
	≤0,03	≤1,00	0,12-0,22	2	0,045
	Cr	Ni			S max.
	17,00-19,5	8,5-11,5			0,015
Herstellerbezeichnungen	Outokumpo (°Sandvik / Polarit)				4311
	CIJ-FAFER				ICL 472 HE
	Krupp Thyssen (Remanit)				4311
	Krupp Thyssen VDM (+Nicrofer / °Cronifer)				-
	R. Zapp (HAYNES) Zapp				-
Üblicher Lieferzustand	lösungsgeglüht, abgeschreckt				
Gefüge	Austenit				
Festigkeitseigenschaften bei Raumtemperatur bei Blechdicke max. 40mm	Streckgrenze oder 0,2-Grenze mind. Rp 0,2				270 Mpa
	Zugfestigkeit Rm				550 bis 750 Mpa
	Bruchdehnung $\leq 3 \leq 75$ mm Dicke A 5 längs/quer in %				40
	Kerbschlag Mittelwert ISO-V-Probe < 75 mm, quer				60 J
	1-% Dehngrenze mind. Rp 1,0				310 Mpa
	E-Modul				200.000 Mpa
Physikalische Eigenschaften	Wärmeausdehnung (m • 10 ⁻⁶ m • K 100) zwischen 20 und 100 °C: 16,0				
	Wärmeausdehnung (m • 10 ⁻⁶ m • K 100) zwischen 20 und 200 °C: 17,0				
	Wärmeausdehnung (m • 10 ⁻⁶ m • K 100) zwischen 20 und 300 °C: 17,0				
	Wärmeausdehnung (m • 10 ⁻⁶ m • K 100) zwischen 20 und 400 °C: 18,0				
	Wärmeleitfähigkeit (W m • K) bei 20 °C: 15				
	Dichte (g/cm ³): 7,9				
	Härte (HB): -				
Tiefstmögliche Betriebstemperatur (Beanspruchungsfall: III): -270° C					

Besondere Eigenschaften	Bis zu $\approx 350^{\circ}\text{C}$ zugelassen				
	gute Polierfähigkeit				
	hohe Korrosionsbeständigkeit				
	gut Tiefziehbar				
	Interkristallin beständig				
Bevorzugte Einsatzgebiete	Aufgrund seiner guten Widerstandsfähigkeit gegen Wasser, Feuchtigkeit und				
	schwache organische und anorganische Säuren, wird der Stahl vorallem in der				
	Chemischen und der Nahrungsmittelindustrie, aber auch in der Erdöl- und Bauindustrie verwendet.				
Schweißen	gute Schweißbarkeit				
	keine besonderen Maßnahmen oder Wärmenachbehandlungen erforderlich				
	Schweißzusatz-Werkstoffe: 1.4316 und 1.4551				
Temperatur bei Blechdicke max. 40mm	Streckgrenze oder 0,2-Grenze mind. Rp 0,2	1-% Dehn- grenze Rp 1,0	Zugfestigkeit Rm	E-Modul	α -Wert
	in N/mm ²	in N/mm ²	in N/mm ²	in N/mm ²	in 10 ⁻⁶ /K
bei erhöhten Tempertaur					
50°C	275	305	527	197.750	-
100°C	205	240	490	194.000	16,000
150°C	175	210	460	190.000	16,500
200°C	157	187	430	186.000	17,000
250°C	145	175	420	182.500	17,000
300°C	136	167	410	179.000	17,000
350°C	130	161	410	175.500	17,500
400°C	125	156	-	-	-
450°C	121	152	-	-	-
500°C	119	149	-	-	-
550°C	118	147	-	-	-
Wärmebehandlung	Warmformgebung in °C: 1150-750				
	Abkühlungsart: Luft				
	Weichglüh-/ [*] Lösungsgl-Temperatur in °C: 1000-1080				
	Abkühlungsart: < 2 mm bewegte Luft, > 2 mm Wasser				

11.16 Werkstoffdatenblatt 1.4301

1.4301		Nichtrostender austenitischer Chrom-Nickel-Stahl	
X5CrNi18-10		C max. 0,07 Cr 17,50 – 19,50 Ni 8,00 – 10,50	
Kurzbeschreibung	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.		
Aktuelle und veraltete Normen	EN 10088-3 AISI UNS BS JIS AFNOR DIN 17440 SIS	1.4301 304 S30400 304S31 SUS304 Z7CN18-09 1.4301 2333	X5CrNi18-10
Sondergüten	Feindrahtgüte Kalttauchgüte Zerspanungsoptimierte Güte Ziehgüte	Gemäß DIN-EN 10263-5 1.4301	
Allgemeine Eigenschaften	Korrosionsbeständigkeit Mechanische Eigenschaften Schmiedbarkeit Schweißbeignung Spanbarkeit	Gut Mittel Gut Ausgezeichnet Mittel	
Besondere Eigenschaften	Magnetische Eigenschaften $\mu_r \leq 1,3$ Für Tieftemperaturen geeignet Bis 700 °C verwendbar Verbesserte Zerspanung bei Sondergüte		
Physikalische Eigenschaften	Dichte (kg/dm ³) Elektr. Widerstand bei 20 °C (Ω mm ² /m) Magnetisierbarkeit Wärmeleitfähigkeit bei 20 °C (W/m K) Spez. Wärmekapazität bei 20 °C (J/kg K) Mittlerer Wärmeausdehnungsbeiwert (10 ⁻⁶ K ⁻¹) 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	
Hauptanwendung	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.		
Verarbeitung	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

**Korrosions-
beständigkeit
(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
Bruchdehnung (%)	A_5	500 – 700	500 – 700	660	660	640
Härte	HB	\geq 25	\geq 35	50	50	55
Kerbschlagarbeit (J)		\leq 215		195	195	190
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.

11.17 Wuchten der Magnetkupplung

Zum Wuchten der Magnetkupplung wird ein Beschleunigungssensor mittels eines Magneten am Gehäuse der Magnetkupplung befestigt. Die Kupplung liegt während des Wuchtvorganges auf einer Moosgummimatte.

In Abbildung 54 ist der Verlauf des Spannungssignals des Beschleunigungssensors bei einer Drehzahl von 20000 Umdrehungen pro Minute ohne dem Einsatz von Wuchtschrauben abgebildet. Ein Spannungsaus Schlag von 400mV entspricht einer Beschleunigung von 1g.

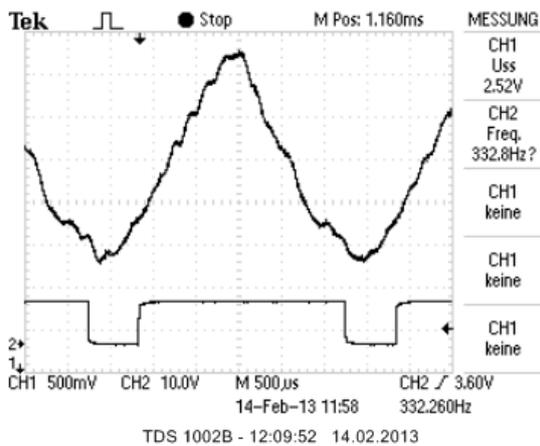


Abbildung 54 - Wuchten Ausgangszustand

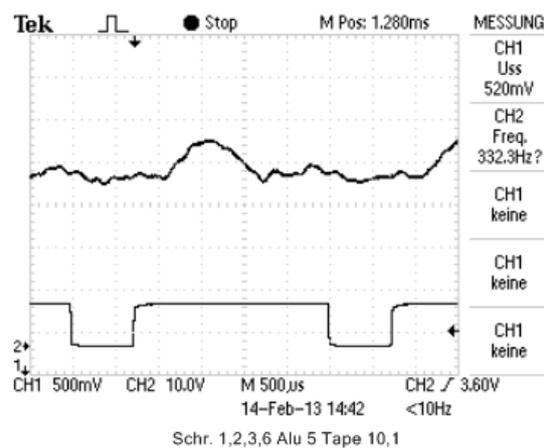
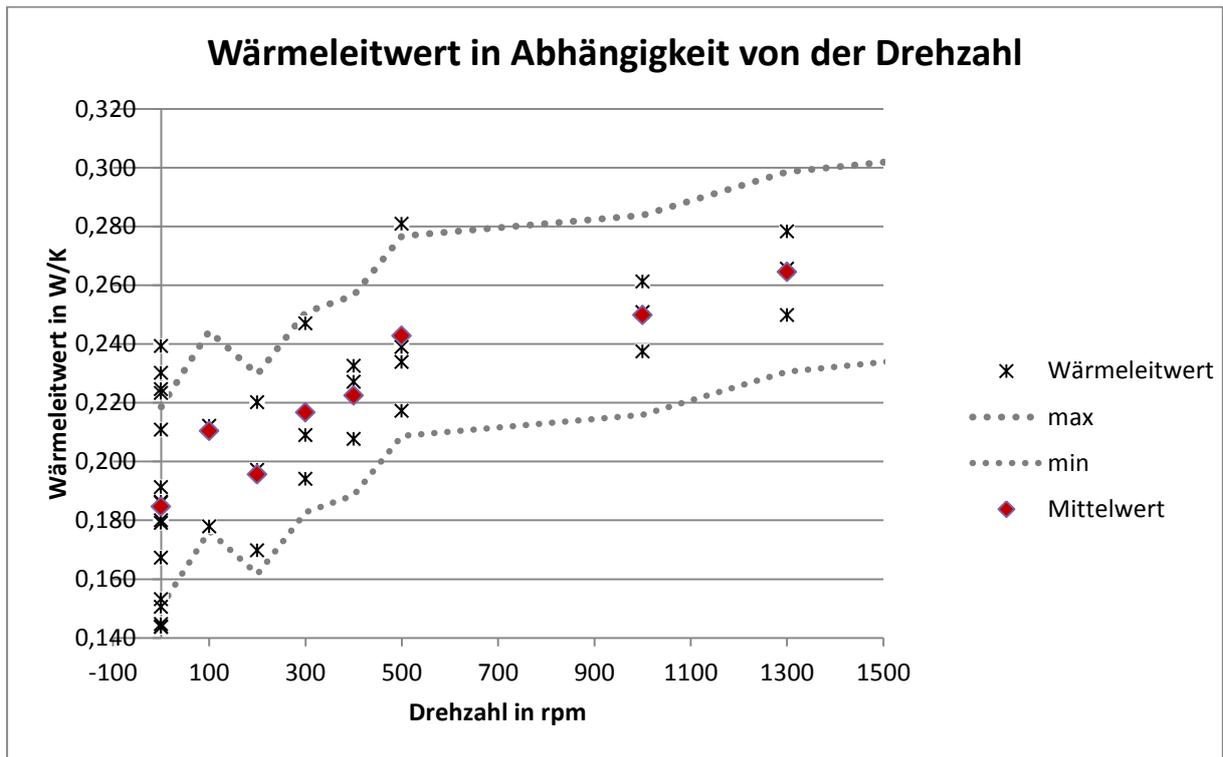


Abbildung 55 - Wuchten abgeschlossen

Im Vergleich dazu zeigt Abbildung 54 den Spannungsverlauf des Beschleunigungssensors nach Abschluss des Wuchtvorganges. Durch den Einsatz der Wuchtschrauben wird die Beschleunigung um den Faktor fünf reduziert. Aufgrund der geringen Drehzahlen im Rahmen der Prüfstandsversuche ist ein Wuchten jedoch nicht erforderlich.

11.18 Wärmeleitwert in Abhängigkeit von der Drehzahl



11.19 Schadensbilder nach dem Bruch einer Klebung an der Magnetkupp- lung bei 15000 upm

