



Marcel Prem, B.Sc.

# Konzeptentwicklung für Schmierkreislaufuntersuchungen an Schwenkprüfständen

## **Masterarbeit**

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplomingenieur

Masterstudium Maschinenbau

eingereicht an der

**Technischen Universität Graz**

Betreuer: Assoc.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Michael Bader

Institut für Maschinenelemente und Entwicklungsmethodik

Institutsvorstand: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Hannes Hick

Graz, 2016

## 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 marked all material which has been quoted either literally or by content from used sources. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis

.....

(Date)

(Signature)

## Zusammenfassung

Getriebe finden in technischen Anwendungen zum Wandeln von Drehzahl und Drehmoment einen breiten Einsatz und stellen so eine Schlüsselkomponente zur Darstellung technisch und wirtschaftlich erfolgreicher Systeme dar. Neben den mechanischen Basiskomponenten spielt der Schmierkreislauf ölgeschmierter Systeme eine zentrale Rolle. Ohne ausreichende Schmierung entstehen im Betrieb hohe Verluste, Bauteilschädigung wird begünstigt, die zu frühzeitigem Systemausfall führen kann. Auch zu große Schmierstoffmengen sind ebenfalls in Bezug auf Wirkungsgrad und Systemzuverlässigkeit kritisch zu sehen. Somit besteht aus technischer und wirtschaftlicher Sicht ein Optimierungspotential. Auslegung, Verifikation und Optimierung des Schmierkreislaufes wird nach aktuellem Stand der Technik durch Prüfstandtests in Kombination mit Simulationen und analytischen Ansätzen durchgeführt, wobei die Prüfstandtests einerseits zur Bedatung der numerischen Modelle und andererseits als Entwicklungstool zur Verifikation dienen. Die zu entwickelnden Systeme erfordern dabei eine aufwändige, individuelle Abstimmung. Die Komplexität der Öl-Strömungssituation und die Vielzahl an Einflussgrößen wie Drehzahl, Temperatur, Öleigenschaften und viele konstruktive Größen sowie deren gegenseitige Beeinflussung stehen in Wechselwirkung.

Aktuell werden Prüfstanduntersuchungen zur Schmierungsentwicklung an Getrieben optisch mit Hilfe von Sichtelementen (Sichtfenster, Schläuche, Rohre) oder Transparentgehäusen durchgeführt und bewertet. Diese Methoden weisen großes Optimierungspotenzial bezüglich Applikationsaufwand, Nutzen und Automatisierbarkeit auf. Auch eine auf einer technischen Messgröße basierende Erfassung oder Quantifizierung der Beölung ist so nicht gegeben. Aus diesem Anlass wurde diese Masterarbeit durchgeführt. Ziel dabei ist die Entwicklung und Verifikation messtechnischer Methoden, die sowohl zur Analyse für Prototypen als auch Serienprodukte genutzt werden können.

Im Zuge der Arbeit wurde die sensorunterstützte Analyse des Schmierkreislaufes durchgeführt, wobei eine Unterteilung in Öldetektion und Ölschichtdickenbestimmung stattgefunden hat. Mit der Öldetektion wird die Versorgung der zu schmierenden Komponenten überprüft. Das System erlaubt die automatisierte Aufzeichnung und Auswertung von Prüfläufen und ermöglicht eine effiziente und effektive Entwicklung. Parallel zur Untersuchung am Prüfstand kann der Schmierkreislauf mittels CFD-Simulationen beschrieben werden. Eine Simulation liefert rasch Ergebnisse und birgt großes Potenzial bezüglich Systemoptimierung, erfordert jedoch einen Input von, bzw. Abgleich mit Messergebnissen. Hier kommt die im Zuge dieser Arbeit entwickelte Ölschichtdickenmessung zum Einsatz. Sie erlaubt eine einfache und schnelle Parametrierung der Simulation. Neben den technischen, entstehen auch wirtschaftliche Vorteile durch die Schmiersystemoptimierung.

Diese werden am Beispiel eines PKW-Getriebes gezeigt:

- Zustandsüberwachung (Condition Monitoring) im Betrieb bei Serienfahrzeugen wird ermöglicht. Fehlfunktionen (Trockenlauf) werden detektiert bevor der Schaden eintritt. Dadurch wird auch die Fahrzeugsicherheit erhöht und Instandsetzungskosten reduziert.
- Kosteneinsparung in der Prototypenentwicklung durch objektive, automatisierte Aufzeichnung und Auswertung des Schmiersystems. Teure Transparentgetriebe und Sonderaufbauten mit Schaugläsern können durch dieses System ersetzt werden.
- Wirkungsgradsteigerung des Getriebes durch Optimalschmiermittelversorgung und folglich reduzierter Treibstoffverbrauch und CO<sub>2</sub> Emissionen.

## Abstract

Gearboxes are widely used in technical applications for converting speed and torque and are to be considered key components for the design of technically and economically successful systems. In addition to the basic mechanical components, the lubrication circuit of oil-lubricated systems plays an important role. Without sufficient lubrication, high losses occur during operation and component damage may occur, which can ultimately lead to premature system failure. Too high lubricant quantities are also critical with regard to efficiency and system reliability. Hence, there is huge potential for optimization from a technical and economic point of view. In this work, design, verification and optimization of the lubrication cycle is carried out according to the latest state of the art by test rig tests in combination with simulations and analytical approaches. On the one hand the test rig determines the specification of the numerical models and on the other hand it acts as a development tool for verification. The systems to be developed require a complex, individual coordination. The complexity of the oil flow situation and the large number of influencing variables like speed, temperature, oil properties and many constructive parameters, as well as their mutual influence.

At the moment test benches for lubrication development are evaluated optically with the help of viewing windows or transparent housings. These methods have great potential for optimization in terms of application complexity, utility and automation. The goal of the master thesis was the development and verification of methods, which can be used for the analysis of detection and quantification of the oiling in prototypes and serial products.

In the course of the work, a sensor-assisted analysis of the lubrication circuit was carried out, whereby it was distinguished between oil detection and oil layer thickness determination. With the oil detection, the supply of the components to be lubricated is monitored. The system allows automated recording and evaluation of test runs and enables an efficient and effective development process. The lubrication circuit can also be described by CFD simulations. A simulation provides results quickly and has great potential for system optimization, but requires input from and/or matching with measurement results. Here the developed oil layer thickness measurement system can be used. It allows simple and fast parameterization of the simulation. Next to the technical advantages, are also economic advantages.

These advantages are shown with the example of a car gearbox:

- Condition monitoring during operation in serial vehicles is enabled. Malfunctions (dry) are detected before the damage occurs. This also increases vehicle safety and reduces maintenance costs.
- Cost reduction in prototype development by objective, automated recording and evaluation of the lubrication system. Expensive transparent gears and special constructions with suction blowers can be replaced by this system.
- Efficiency increase of the transmission due to optimum lubricant supply and consequently reduced fuel consumption and CO<sub>2</sub> emissions.

# Inhalt

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | Einleitung.....   | 1  |
| 1.1   | Getriebetechnik.....  | 1  |
| 1.1.1 | Ölsumpfschmierung .....   | 1  |
| 1.1.2 | Ölumlaufschmierung .....  | 2  |
| 1.2   | Allgemeines zum Schwenkprüfstand .....                            | 3  |
| 1.3   | Prüfstandgenauigkeit .....  | 5  |
| 1.4   | Alternative Schwenkprüfstände .....                               | 7  |
| 1.5   | Prüfkörper Präparation .....                                      | 11 |
| 1.6   | Ziel der Arbeit.....  | 12 |
| 2     | Getriebeöl.....   | 13 |
| 2.1   | Definition von Öl.....  | 13 |
| 2.2   | Basisöl und Additive .....  | 16 |
| 2.2.1 | Verschleißminderer .....  | 16 |
| 2.2.2 | Reibungsminderer .....  | 16 |
| 2.2.3 | V.I. Verbesserer .....  | 17 |
| 2.2.4 | Schauminhibitoren .....   | 18 |
| 2.3   | Nutzen des Öls.....   | 18 |
| 2.3.1 | Schmierwirkung von Öl .....                                       | 18 |
| 2.3.2 | Kühlwirkung von Öl .....  | 22 |
| 2.3.3 | Dichtwirkung des Öls.....   | 22 |
| 3     | Strömungsgrundlagen .....   | 24 |
| 3.1   | Erhaltungsgleichungen .....                                       | 24 |
| 3.2   | Navier-Stokes Gleichung .....                                     | 25 |
| 3.2.1 | Grundlagen zu reibungsbehafteter Strömung .....                   | 25 |
| 3.2.2 | Stokes'sches Reibungsgesetz und die Navier-Stokes Gleichung ..... | 26 |
| 3.2.3 | Laminare Strömung .....   | 28 |
| 3.3   | Grenzschichttheorie .....   | 32 |
| 3.3.1 | Geschwindigkeitsgrenzschicht .....                                | 32 |
| 3.3.2 | Temperaturgrenzschichten .....                                    | 33 |
| 3.4   | Kennzahlen .....  | 33 |
| 3.4.1 | Reynolds-Zahl .....   | 33 |
| 3.4.2 | Prandtl-Zahl .....  | 34 |
| 3.4.3 | Nußelt-Zahl.....  | 35 |
| 3.4.4 | Grashof-Zahl .....  | 35 |
| 3.4.5 | Fourier-Zahl .....  | 35 |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 3.5   | Turbulente Strömung .....                                  | 36 |
| 3.5.1 | Turbulenzmodell.....                                       | 37 |
| 3.6   | Wärmelehre.....  | 38 |
| 3.6.1 | Strahlung .....  | 38 |
| 3.6.2 | Leitung.....   | 38 |
| 3.6.3 | Konvektion.....  | 39 |
| 3.7   | Zusammenfassung.....                                       | 39 |
| 4     | CFD Simulation .....                                       | 40 |
| 4.1   | Allgemeines und Vernetzung .....                           | 40 |
| 4.2   | Solver.....  | 42 |
| 4.2.1 | Pressured Based .....                                      | 43 |
| 4.2.2 | Density Based Coupled Solver .....                         | 43 |
| 4.2.3 | Solver Anwendung auf Schmierkreislaufuntersuchung .....    | 44 |
| 4.3   | Zweiphasen Systeme .....                                   | 44 |
| 4.3.1 | Discrete Phase Model.....                                  | 45 |
| 4.3.2 | Eulerian Multiphase Model .....                            | 45 |
| 4.3.3 | Mixture Model.....   | 46 |
| 4.4   | Aussagekraft und Verbesserungspotential .....              | 46 |
| 5     | Konzepterstellung.....                                     | 47 |
| 5.1   | VDI 2222 .....   | 47 |
| 5.1.1 | Anwendung der VDI 2222.....                                | 48 |
| 5.1.2 | Methodenentwicklung zur Schmierkreislaufuntersuchung ..... | 49 |
| 5.2   | VDI 2225 .....   | 52 |
| 6     | Messverfahren.....   | 53 |
| 6.1   | Öldetektion.....   | 53 |
| 6.1.1 | Radioaktiver Zerfall.....                                  | 54 |
| 6.1.2 | Akustische Dämpfung.....                                   | 55 |
| 6.1.3 | Optische Verfahren .....                                   | 58 |
| 6.1.4 | Änderung elektrischer Größen .....                         | 61 |
| 6.1.5 | Temperaturänderung .....                                   | 63 |
| 6.2   | Durchflussmenge.....                                       | 65 |
| 7     | Bewertung der Verfahren.....                               | 67 |
| 7.1   | Beurteilung der Öldetektion.....                           | 67 |
| 7.1.1 | Beurteilung Radioaktiver Zerfall.....                      | 67 |
| 7.1.2 | Beurteilung akustische Dämpfung .....                      | 68 |
| 7.1.3 | Beurteilung optische Verfahren .....                       | 70 |

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 7.1.4 | Beurteilung Änderung elektrischer Größen .....      | 71  |
| 7.1.5 | Bewertung Temperaturänderung .....                  | 72  |
| 7.2   | Beurteilung Durchflussmenge .....                   | 73  |
| 8     | Zusammenfassung der Methoden .....                  | 75  |
| 8.1   | Feste Isotope .....                                 | 75  |
| 8.2   | Körperschall.....                                   | 77  |
| 8.3   | Laser Doppler Anemometrie .....                     | 79  |
| 8.4   | Fluoreszenz.....                                    | 80  |
| 8.5   | Änderung der Kapazität.....                         | 81  |
| 8.6   | Thermoelement.....                                  | 82  |
| 8.7   | Seppeler.....                                       | 84  |
| 8.8   | Durchflusszähler .....                              | 85  |
| 8.9   | Bewertung nach VDI 2225.....                        | 85  |
| 9     | Prinzipversuchsbeschreibung.....                    | 90  |
| 9.1   | Prinzipversuch Änderung der Kapazität .....         | 90  |
| 9.2   | Prinzipversuch Thermoelement .....                  | 92  |
| 9.3   | Prinzipversuch LDA.....                             | 93  |
| 10    | Versuchsdurchführung und Interpretation .....       | 95  |
| 10.1  | Versuchsdurchführung „Änderung der Kapazität“ ..... | 95  |
| 10.2  | Versuchsdurchführung Thermoelement.....             | 101 |
| 10.3  | Versuchsdurchführung LDA.....                       | 102 |
| 11    | Zusammenfassung und Ausblick .....                  | 106 |
| 11.1  | Zusammenfassung der Erkenntnisse.....               | 106 |
| 11.2  | Ausblick.....                                       | 106 |
| 11.3  | Schlusswort .....                                   | 107 |
| 12    | Quellverzeichnis .....                              | 109 |
| 13    | Anhang.....   | 111 |

## Abbildungsverzeichnis

|   |    |
|---|----|
| Abbildung 1-1: Schematische Darstellung Ölsumpfschmierung .....       | 1  |
| Abbildung 1-2: Schematische Darstellung Umlaufschmierung .....        | 2  |
| Abbildung 1-3: Schwenkprüfstand [1] .....                             | 3  |
| Abbildung 1-4: Fahrzeug – Drehwinkel [2] .....                        | 4  |
| Abbildung 1-5: Bewegungsabstraktion .....                             | 4  |
| Abbildung 1-6: Schrägungswinkel [2] .....                             | 5  |
| Abbildung 1-7: Querkraft Reifen [2] .....                             | 5  |
| Abbildung 1-8: Belastungsbestimmung .....                             | 6  |
| Abbildung 1-9: Low-Tech Schwenker .....                               | 7  |
| Abbildung 1-10: Low-Tech Schwenker Lateral .....                      | 8  |
| Abbildung 1-11: Low-Tech Schwenk Frontal; Lochbild .....              | 9  |
| Abbildung 1-12: Magna – Schwenkprüfstand [3] .....                    | 9  |
| Abbildung 1-13: Rollneigung (links), Nickneigung (rechts) [4] .....   | 10 |
| Abbildung 1-14: Novotest – Schwenkprüfstand [4] .....                 | 10 |
| Abbildung 1-15: Schwenkuntersuchung mit Transparentgetriebe [5] ..... | 11 |
| Abbildung 2-1: Dichte-Temperatur Öl [6] .....                         | 13 |
| Abbildung 2-2: Viskositätsbeschreibung [6] .....                      | 14 |
| Abbildung 2-3: Kapillarviskosimeter [7] .....                         | 15 |
| Abbildung 2-4: Schmierungsarten [10] .....                            | 19 |
| Abbildung 2-5: Adhäsion [11] .....                                    | 20 |
| Abbildung 2-6: Oberflächenzerrüttung [11] .....                       | 20 |
| Abbildung 2-7: Tribochemische Reaktion [11] .....                     | 20 |
| Abbildung 2-8: Stribeck-Kurve .....                                   | 21 |
| Abbildung 2-9: Radialwellendichtring – Dichtlippe [12] .....          | 23 |
| Abbildung 3-1: Längs/Querströmung .....                               | 28 |
| Abbildung 3-2: Gehäuseschnitt Ölmitnahme .....                        | 28 |
| Abbildung 3-3: Druck-Schlepp-Strömung .....                           | 29 |
| Abbildung 3-4 Filmströmung an freier Oberfläche .....                 | 30 |
| Abbildung 3-5: Grenzschichten [13] .....                              | 32 |
| Abbildung 3-6: Temperaturgrenzschicht .....                           | 33 |
| Abbildung 3-7: Moody Diagramm [14] .....                              | 34 |
| Abbildung 3-8: Schichten der Strömung [13] .....                      | 36 |
| Abbildung 4-1: Gitterskizze .....                                     | 41 |
| Abbildung 4-2: Implizit/Explizit .....                                | 42 |
| Abbildung 4-3: PB Solver [15] .....                                   | 43 |
| Abbildung 4-4: DBCS [15] .....  | 43 |
| Abbildung 4-5: Symbiose .....   | 46 |
| Abbildung 5-1: Bierglasmodell [17] .....                              | 48 |
| Abbildung 5-2: Mindmap – Theorie [18] .....                           | 49 |
| Abbildung 5-3: Mindmap der Schmierkreislaufuntersuchung .....         | 50 |
| Abbildung 5-4: Voraussetzung empirische Forschung [17] .....          | 51 |
| Abbildung 5-5: s-Diagramm [19] .....                                  | 52 |
| Abbildung 6-1: Standardgetriebe Prinzip .....                         | 53 |
| Abbildung 6-2: Prinzip „Radioaktiver Zerfall“ .....                   | 55 |
| Abbildung 6-3: Prinzip „Beschleunigungssensor“ .....                  | 55 |
| Abbildung 6-4: Prinzip "Saitenschwingung" .....                       | 56 |
| Abbildung 6-5: Prinzip "Gehäuse" .....                                | 57 |

|   |     |
|---|-----|
| Abbildung 6-6: Prinzip "Körperschall" .....                           | 57  |
| Abbildung 6-7: Prinzip "Erzwungene Eigenfrequenz" .....               | 58  |
| Abbildung 6-8: Prinzip "LDA" .....                                    | 59  |
| Abbildung 6-9: Prinzip "Endoskop Kamera" .....                        | 59  |
| Abbildung 6-10: Prinzip "PIV" .....                                   | 60  |
| Abbildung 6-11: Prinzip "Fluoreszenz" .....                           | 60  |
| Abbildung 6-12 Prinzip "Lichtschranke" .....                          | 61  |
| Abbildung 6-13: Prinzip "Änderung der Kapazität" .....                | 62  |
| Abbildung 6-14: Prinzip "elektische Leitfähigkeit" .....              | 62  |
| Abbildung 6-15: Prinzip "Magnetismus" .....                           | 63  |
| Abbildung 6-16: Prinzip "Thermoelement" .....                         | 64  |
| Abbildung 6-17: Prinzip "Berührungsloses Messen" .....                | 64  |
| Abbildung 8-1: RD2014, Radioaktiver Zerfall [20] .....                | 75  |
| Abbildung 8-2: Schalenmodell .....                                    | 76  |
| Abbildung 8-3: Anstrahlwinkel [20] .....                              | 76  |
| Abbildung 8-4: Piezoelement [22] .....                                | 77  |
| Abbildung 8-5: PCB Beschleunigungssensor [23] .....                   | 77  |
| Abbildung 8-6: Messverstärker National Instruments [24] .....         | 78  |
| Abbildung 8-7: LDA Beschreibung [25] .....                            | 79  |
| Abbildung 8-8: LDA Laserköpfe [26] und Spektral Analysator [27] ..... | 80  |
| Abbildung 8-9: Fluoreszenz Eosin Y [28] .....                         | 80  |
| Abbildung 8-10: Kapazitiver Sensor Aufbau [29] .....                  | 81  |
| Abbildung 8-11: Kapazitiver Sensor [30] .....                         | 82  |
| Abbildung 8-12: Signalverstärker IFM Sensoren[31] .....               | 82  |
| Abbildung 8-13: Thermoelement Schnitt [32] .....                      | 83  |
| Abbildung 8-14: Messverstärker Thermoelement [33] .....               | 83  |
| Abbildung 8-15: Prinzipskizze Seppeler .....                          | 84  |
| Abbildung 8-16: Durchflusszähler [34] .....                           | 85  |
| Abbildung 9-1: Prinzipversuch "Änderung der Kapazität" .....          | 90  |
| Abbildung 9-2: Referenzweganzeige .....                               | 91  |
| Abbildung 9-3: Ölnebel simulieren .....                               | 92  |
| Abbildung 9-4: Thermoelement, Messung Öl .....                        | 92  |
| Abbildung 9-5: Thermoelement, Messung Oberfläche .....                | 93  |
| Abbildung 9-6: Messvolumen LDA .....                                  | 93  |
| Abbildung 9-7: LDA Fließaufbau .....                                  | 94  |
| Abbildung 9-8: LDA Sichtfenstertest .....                             | 94  |
| Abbildung 10-1: Kennlinie - kein Öl .....                             | 95  |
| Abbildung 10-2: Kennlinie - 1,8 mm dicker Ölfilm .....                | 96  |
| Abbildung 10-3: Kennlinie - 3,7 mm dicker Ölfilm .....                | 96  |
| Abbildung 10-4: Einbau kapazitive Sensor .....                        | 97  |
| Abbildung 10-5: 8 mm Sensorabstand .....                              | 98  |
| Abbildung 10-6: Kontaktkennlinie Sensorspitze Öloberfläche .....      | 99  |
| Abbildung 10-7: Ölnebelsimulation .....                               | 100 |
| Abbildung 10-8: Ergebnisse Thermoelement .....                        | 101 |
| Abbildung 10-9: Grundsignal .....                                     | 102 |
| Abbildung 10-10: Ölflusssignal .....                                  | 102 |
| Abbildung 10-11: Ölnebelsimulator LDA .....                           | 102 |
| Abbildung 10-12: Ölnebelsignal .....                                  | 103 |
| Abbildung 10-13: Grundsignal mit Acrylglas .....                      | 103 |

|  |     |
|--|-----|
| Abbildung 10-14: Ölflusssignal mit Acrylglas .....               | 103 |
| Abbildung 10-15: Verschiebung des Brennpunktes .....             | 104 |
| Abbildung 10-16: Ölnebelsignal mit Acrylglas.....                | 104 |
| Abbildung 10-17: Signalausfall Acrylglas; Ölnebel; Ölfluss ..... | 105 |
| Abbildung 11-1: Verbau Thermoelement .....                       | 106 |
| Abbildung 11-2: Verbau kapazitiver Sensor .....                  | 107 |

## Tabellenverzeichnis

|  |     |
|--|-----|
| Tabelle 1-1: Fz 1.500 N .....                                  | 6   |
| Tabelle 1-2: Fz 6.000 N .....                                  | 6   |
| Tabelle 2-1: Verschleißarten [11] .....                        | 19  |
| Tabelle 5-1: Anforderungsliste .....                           | 49  |
| Tabelle 7-1: Zusammenfassung Radioaktiver Zerfall .....        | 68  |
| Tabelle 7-2: Zusammenfassung Akustische Dämpfung.....          | 69  |
| Tabelle 7-3: Zusammenfassung Optische Verfahren .....          | 71  |
| Tabelle 7-4: Zusammenfassung Änderung elektrischer Größe ..... | 72  |
| Tabelle 7-5: Zusammenfassung Temperaturänderung .....          | 73  |
| Tabelle 7-6: Zusammenfassung Durchflussmessung .....           | 74  |
| Tabelle 8-1: Bewertung Person 1 .....                          | 86  |
| Tabelle 8-2: Bewertung Person 2 .....                          | 87  |
| Tabelle 8-3: Bewertung Person 3 .....                          | 88  |
| Tabelle 8-4: Zusammenfassung der Bewertung.....                | 89  |
| Tabelle 8-5: Gemittelte Ergebnisse .....                       | 89  |
| Tabelle 10-1: Messreihen - kapazitiver Sensor.....             | 95  |
| Tabelle 10-2: Fehlerabweichung - fixer Abstand.....            | 98  |
| Tabelle 10-3: Fehlerabweichung – planer Einbau .....           | 99  |
| Tabelle 10-4: Ölnebelsimulation - kapazitiver Sensor.....      | 100 |

# Symbole

## Variable

|            |                                      |                                |
|------------|--------------------------------------|--------------------------------|
| $\alpha$   | Schräglaufwinkel                     | (°)                            |
| $v_w$      | Resultierender Fahrriktungsvektor    | (/)                            |
| $x_w$      | Vertikaler Fahrriktungsvektor        | (/)                            |
| $y_w$      | Horizontaler Fahrriktungsvektor      | (/)                            |
| $F_Z$      | Kraft auf Viertelfahrzeug            | (N)                            |
| $g$        | Erdbeschleunigung (9,81)             | $\left(\frac{m}{s^2}\right)$   |
| $\Delta$   | Delta, Differenz zweier Werte        | (/)                            |
| $\rho$     | Dichte                               | $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$  |
| $\alpha_T$ | Dichteänderungskoeffizient           | $\left(\frac{1}{K}\right)$     |
| $T$        | Temperatur                           | (K)                            |
| $u$        | Geschwindigkeit                      | $\left(\frac{m}{s}\right)$     |
| $\tau$     | Schubspannung                        | $\left(\frac{N}{mm^2}\right)$  |
| $F$        | Kraft                                | (N)                            |
| $A$        | Fläche                               | (mm)                           |
| $\eta$     | Dynamische Viskosität                | $\left(\frac{kg}{m\ s}\right)$ |
| $\nu$      | Kinematische Viskosität              | $\left(\frac{m^2}{s}\right)$   |
| $\mu$      | Reibbeiwert                          | (/)                            |
| $F_R$      | Reibkraft                            | (N)                            |
| $F_N$      | Normalkraft                          | (N)                            |
| $L$        | Viskosität des texanischen BezugsÖls | (/)                            |

|                 |   |                                |
|-----------------|---|--------------------------------|
| H               | Viskosität des pennsylvanischen Bezugsöls   | (/)                            |
| P               | Viskosität der Probe                        | (/)                            |
| t               | Zeit  | (s)                            |
| $\nabla$        | Differentialoperator                        | (/)                            |
| $\vec{u}$       | Geschwindigkeitsvektor (u,v,w) <sup>T</sup> | $\left(\frac{m}{s}\right)$     |
| $\sigma$        | Spannung (Normal und Schubspannungen)       | $\left(\frac{N}{mm^2}\right)$  |
| $f^b$           | Volumenkraftvektor                          | $\left(\frac{m^4}{s^2}\right)$ |
| q               | Wärme                                       | (W)                            |
| $\dot{q}_Q$     | Wärmestromdicht                             | $\left(\frac{W}{s}\right)$     |
| e               | spezifische innere Energie                  | (J)                            |
| p               | Druck                                       | $\left(\frac{N}{mm^2}\right)$  |
| $\tau$          | Schubspannungen                             | $\left(\frac{N}{mm^2}\right)$  |
| E               | Elastizitätsmodul                           | $\left(\frac{N}{mm^2}\right)$  |
| $\varepsilon$   | Dehnung                                     | (/)                            |
| $\vec{u}^*$     | Verschiebung zufolge mechanischer Belastung | (m)                            |
| $\vec{x}$       | Koordinatenvektor (x,y,z) <sup>T</sup>      | (m)                            |
| $\varepsilon_i$ | Dehnung in i-Koordinate                     | (/)                            |
| $\gamma_{ij}$   | Verzerrung in i- und j-Koordinate           | (/)                            |
| j               | Volumendilatation                           | (/)                            |
| G               | Schubmodul                                  | $\left(\frac{N}{mm^2}\right)$  |
| $\nu_N$         | Querkontraktionszahl                        | (/)                            |
| $U_{ZR}$        | Umfangsgeschwindigkeit des Zahnrades        | $\left(\frac{m}{s}\right)$     |

|              |  |                                 |
|--------------|--|---------------------------------|
| $\beta$      | Allgemeiner Neigungswinkel                           | (°)                             |
| $\delta$     | Filmschichtdicke                                     | (mm)                            |
| $a$          | Temperaturleitfähigkeit                              | $\left(\frac{m^2}{s}\right)$    |
| $\lambda_F$  | Wärmeleitfähigkeit                                   | $\left(\frac{W}{mK}\right)$     |
| $\alpha_F$   | Wärmeübergangszahl                                   | $\left(\frac{W}{m^2K}\right)$   |
| $L_F$        | Charakteristische Länge                              | (mm)                            |
| $T_W$        | Temperatur an der Wand                               | (K)                             |
| $T_\infty$   | Temperatur weit entfernt                             | (K)                             |
| $\sigma_s$   | Stefan-Boltzmann-Konstante ( $5,67 \cdot 10^{-8}$ )  | $\left(\frac{W}{m^2K^4}\right)$ |
| $\alpha_v$   | Volumenbeladung                                      | (/)                             |
| $g_i$        | Gewichtung   | (/)                             |
| $p_i$        | Punkteverteilung                                     | (/)                             |
| $H_i$        | Herstellkosten                                       | (€)                             |
| $i(t)$       | Stromstärke in Abhängigkeit der Zeit                 | (A)                             |
| $u(t)$       | Spannung in Abhängigkeit der Zeit                    | (V)                             |
| $C$          | Elektrische Kapazität                                | (F)                             |
| $\vec{E}$    | Elektrische Feldstärke                               | $\left(\frac{V}{m}\right)$      |
| $\vec{D}$    | Elektrische Flussdichte                              | $\left(\frac{As}{m^2}\right)$   |
| $\epsilon_0$ | elektrische Feldkonstante ( $9,854 \cdot 10^{-12}$ ) | $\left(\frac{As}{Vm}\right)$    |
| $\epsilon_r$ | relative Permittivität                               | (/)                             |

## Abkürzungen

|   |                |
|---|----------------|
| Institut für Maschinenelemente und Entwicklungsmethodik | IME            |
| Anstalt für Verbrennungskraftmaschinen List             | AVL            |
| National Instruments                                    | NI             |
| Kompressionsmodul                                       | K-Modul        |
| Extreme Pressure Additive                               | EP-Additive    |
| Reibungsminderer  | AW-Additiv     |
| Viskositätsindex Verbesserer                            | VI-Verbesserer |
| Polymethacrylate  | PMA            |
| Reynolds- Zahl  | Re             |
| Prandtl-Zahl  | Pr             |
| Grashof-Zahl  | Gr             |
| Fourier-Zahl  | Fo             |
| Nußelt-Zahl   | Nu             |
| Direkte Numerische Simulation                           | DNS            |
| Reynolds Average Numerical Simulation                   | RANS           |
| Reynold Stress Transport                                | RST            |
| Size Ratio  | SR             |
| Aspect Ratio  | AR             |
| Equi Angle Skewness                                     | EAS            |
| Crank-Nicolson  | CN             |
| Pressured Based   | PB             |
| Density Based Coupled Solver                            | DBCS           |
| Courant Friedrich Lewy                                  | CFL            |
| Discrete Phase Model                                    | DPM            |
| Eulerian Multiphase Model                               | EMM            |
| Verein Deutscher Ingenieure                             | VDI            |
| Laser Doppler Anemometrie                               | LDA            |
| Particle Image Velocimetry                              | PIV            |
| Fast Fourier Transformation                             | FFT            |
| Diskreten Fourier Transformation                        | DFT            |

# 1 Einleitung

## 1.1 Getriebetechnik

Getriebe sind seit langem zum Wandeln von Drehzahl und Drehmoment im Einsatz. In der Automotiv-Branche sind Getriebe fundamentaler Bestandteil, aber auch in anderen Bereichen wie dem Energiesektor oder in der industriellen Fertigung kann nicht auf Getriebe verzichtet werden. Grundsätzlich wenn eine Differenz zwischen der Antriebsdrehzahl und der Abtriebsdrehzahl besteht ist eine Nutzung von Getrieben unumgänglich.

Um die Lebensdauer des Getriebes, und so implizit die Lebensdauer der im Getriebe verbauten Komponenten, aufrecht zu erhalten, ist ein Schmierkreislauf erforderlich. Schmierkreislauf wird als Überbegriff für einen geschlossenen Kreislauf der Schmierung und Kühlung durch Öl verwendet. Für eine hinreichende Schmierung der Getriebe besteht einerseits die Möglichkeit einer Ölumpfschmierung und andererseits die Möglichkeit der Ölumlaufschmierung. Ölumpfschmierung bedeutet, dass sich eine Menge Öl am Boden des Getriebes ansammelt und aufgrund der in den Ölumpf eintauchenden Zahnräder Öl gefördert wird. Durch das Herumschleudern und konstruktive Maßnahmen, wie Rinnen, im Getriebe wird das Schmiermittel zu den Bauteilen befördert. Bei einer Ölumlaufschmierung ist ein Reservoir vorhanden, in dem eine gewisse Menge Öl gelagert ist. Von dort wird mittels einer Pumpe das Öl direkt zu den notwendigen Stellen im Getriebe transportiert.

### 1.1.1 Ölumpfschmierung

Aufgrund der Rotationsbewegung der Zahnräder taucht ein Zahnrad kontinuierlich in das Öl ein. Die Zahnluken der Zahnräder füllen sich mit dem Schmierstoff und befördern diesen in höhere Lagen. Durch die Zentrifugalkraft wird das Öl aus dem Hohlraum geschleudert und landet an der Getriebegehäuseinnenwand. Aufgrund der Gehäusekonstruktion fließt das Öl von den Wänden zu den Bauteilen, welche geschmiert werden sollen (Wälzlager, Dichtringe). Aufgrund dieses Schmiervorganges und der damit verbundenen Fluidbewegung des Öls wird auch die Wärme, welche in den Bauteilen aufgrund von Reibung entsteht, abtransportiert.

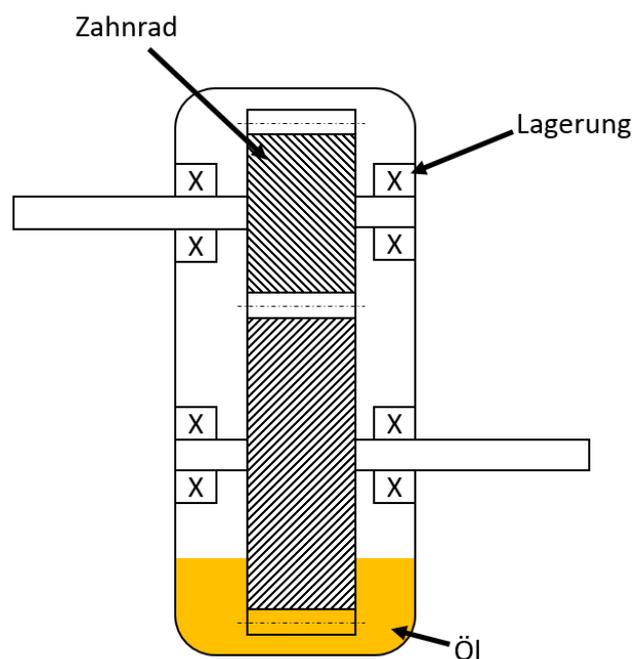


Abbildung 1-1: Schematische Darstellung Ölumpfschmierung

### 1.1.2 Ölumlaufschmierung

Als Startpunkt der Ölumlaufschmierung wird das Ölreservoir definiert. Es besteht zwei Möglichkeiten zum platzieren des Reservoirs. Einerseits am tiefsten Punkt im Getriebe, andererseits an der Seite des Getriebes. Der tiefste Punkt wird definiert, da folglich keine weiteren Pumpen notwendig sind, um das Öl vom Getriebeboden zum Reservoir zu befördern. Wenn das Reservoir an einer freien Stelle platziert wird, ist eine Pumpe notwendig um das Öl vom Getriebeboden in das Behältnis zu fördern.

Vom Reservoir wird durch eine Pumpe das Öl zum höchsten Punkt im Getriebe befördert. Durch Leitkanäle fließt das Öl zu den umliegenden Bauteilen. Als weitere Variante der Ölumlaufschmierung werden Einspritzdüsen direkt bei den Bauteilen verbaut, um an den benötigten Stellen Öl einzuspritzen. Diese Variante wird bei Getrieben eingesetzt, die keinen konstruktiv möglichen Ölfluss zulassen, oder wenn größere Mengen Öl benötigt werden. Auch bei der Ölumlaufschmierung fungiert das Öl als Wärmetransporter. Durch diesen Fluidtransport wird eine ausreichende Schmierung und Kühlung gewährleistet.

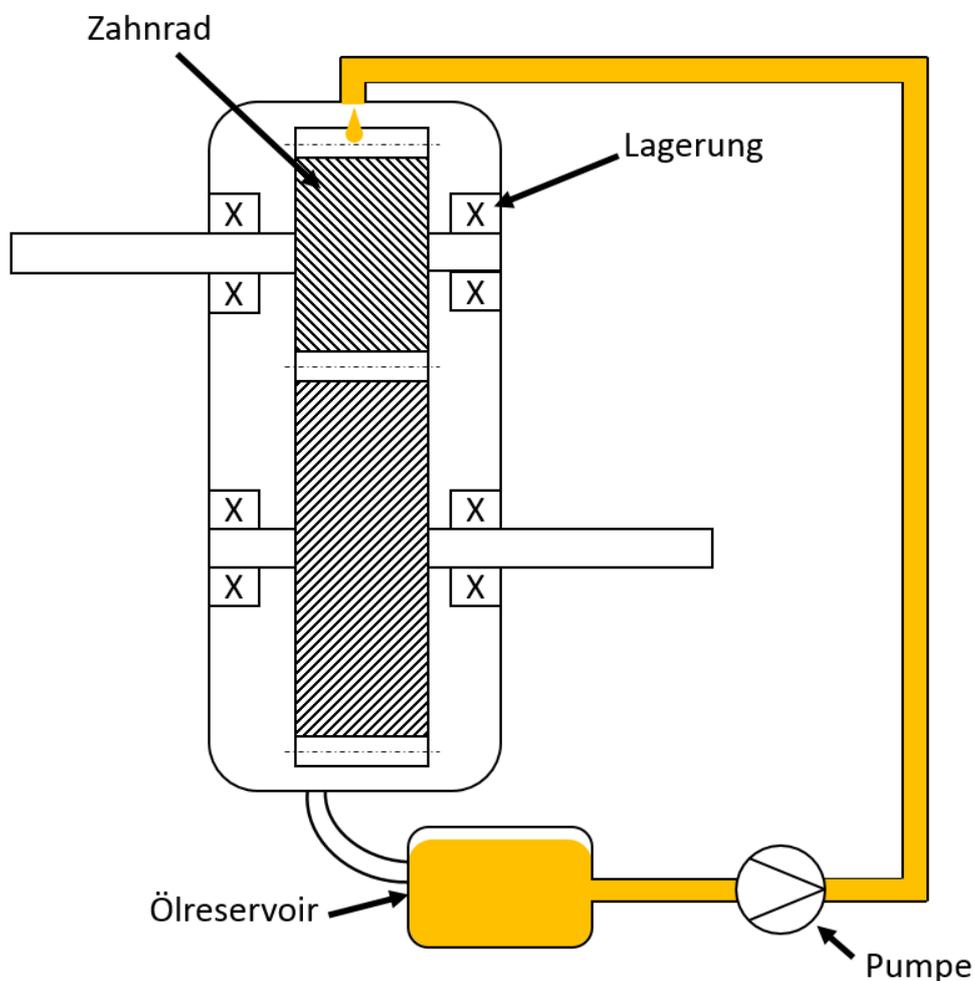


Abbildung 1-2: Schematische Darstellung Umlaufschmierung

## 1.2 Allgemeines zum Schwenkprüfstand

Ein Schwenkprüfstand ist ein Prüfsystem zur Untersuchung von Prüfkörpern, welche um definierte Winkellagen verdreht werden. Diese Drehung kann über alle drei Koordinatenachsen erfolgen. Durch eine Koppelung der Drehungen ist es möglich ein reales, fahrzeugbezogenes Belastungsverhalten der Konstruktionen nachzustellen. Bevor dies Belastungszyklen getestet werden, müssen zuerst die Belastungen erfasst werden.

Im Falle von Schmierkreislaufuntersuchungen von Getrieben sind die Belastungen:

- Kurvenfahrten
- Beschleunigungs-/Bremszyklen
- Schaltvorgänge

Diese drei Aspekte führen zu einer veränderten Verteilung des Fluides (Schmierstoffes) im Getriebe. Als Folge der Umverteilungen kann eine Unterversorgung der zu schmierenden und zu kühlenden Komponenten eintreten. Bei der Unterversorgung treten erhöhte Wärme und erhöhter Verschleiß auf. Bei einer Anstauung des Schmierstoffes, im Bereich der Wälzlager oder dem Ölumpfhöheniveau, erhöhten ist eine Erhöhung der Schleppverluste im Getriebe die Folge sowie eine Senkung des Wirkungsgrades.

Dem „Institut für Maschinenelemente und Entwicklungsmethodik“ (kurz IME) steht ein Prüfstand zur Untersuchung der Fluidverteilung in Getrieben zur Verfügung. In Abbildung 1-3 ist der Prüfstand abgebildet, welcher für die Untersuchungen verwendet wird. Der Prüfstand wurde vom Unternehmen „Anstalt für Verbrennungskraftmaschinen List“ (kurz AVL), konstruiert und gebaut. Um die Schwenklagen zu realisieren, werden Servomotoren verwendet, wodurch der Prüfkörper um eine bestimmte Winkellage gedreht wird. Durch dieses Verdrehen treten Schmierstoffumverteilungen ein, die das Getriebe im realen Fahrbetrieb erfährt. Für den Antrieb der Getriebeeingangswelle, welcher eine Simulation des im Fahrzeug angebauten Motors darstellt, kommen ebenfalls Servomotoren zum Einsatz. Ohne den Antrieb ist es nicht möglich eine Verteilung wie im Fahrbetriebs nachzustellen, da folglich die Zahnräder im Getriebe stehen und keine Fluidförderung eintritt.



Abbildung 1-3: Schwenkprüfstand [1]

In Abbildung 1-3 ist der Schwenkprüfstand dargestellt. Wie am Bild dargestellt wird ein Getriebe (Prüfkörper) montiert und durch Schwenken wird die Fluidumverteilung nachgestellt.

Um ein Getriebe unabhängig vom Prüfstand zu schwenken bestehen mehrere Möglichkeiten. Die erste Möglichkeit den Prüfkörper zu schwenken besteht darin, den ganzen Prüfstand zu drehen und somit eine reale Kurve nachzustellen. Aufgrund der Belastungen, sowie der Trägheit des Systems ist dies technisch, wie wirtschaftlich, zum aktuellen Zeitpunkt, in keiner Weise vertretbar. Um solch eine Drehung zu realisieren, müsste der ganze Prüfstand auf ein Axiallager gestellt werden und durch einen Motor eine Drehung eingeleitet werden ähnlich wie bei Baustellenkränen welche auf Axiallagern montiert sind und mittels Großrad und Ritzel angetrieben werden.

Durch diese Erkenntnis bleiben noch zwei weitere mögliche Drehachsen zur Verdrehung des Prüfkörpers im System vorhanden. In Abbildung 1-4 ist ein Fahrzeug abgebildet, mit den Drehachsen in Koordinatenrichtung „x“ und „y“. Die Drehung um die y-Achse wird als Nicken bezeichnet („Pitch“). Eine Drehung um die x-Achse wird als Wanken („Roll“) bezeichnet.

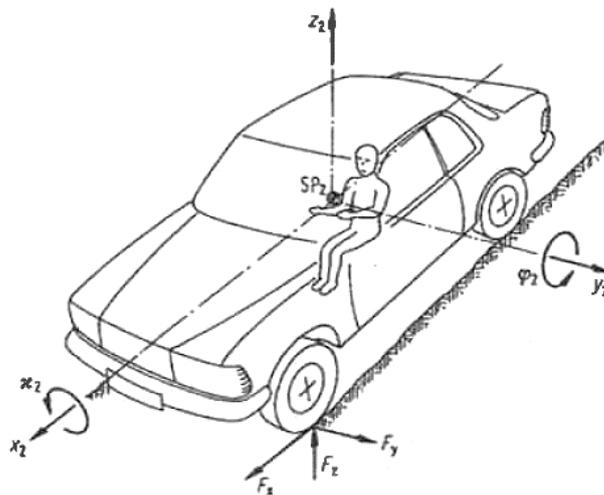


Abbildung 1-4: Fahrzeug – Drehwinkel [2]

In Abbildung 1-5 ist die Prinzipskizze des Prüfstands abgebildet. Bei einem querverbauten Getriebe (wie in Abbildung 1-5) simulieren die „Pitch“ Winkel Neigungsfahrten und Beschleunigungs- und Bremsvorgänge. Die „Roll“ Winkel simulieren Kurvenfahrten.

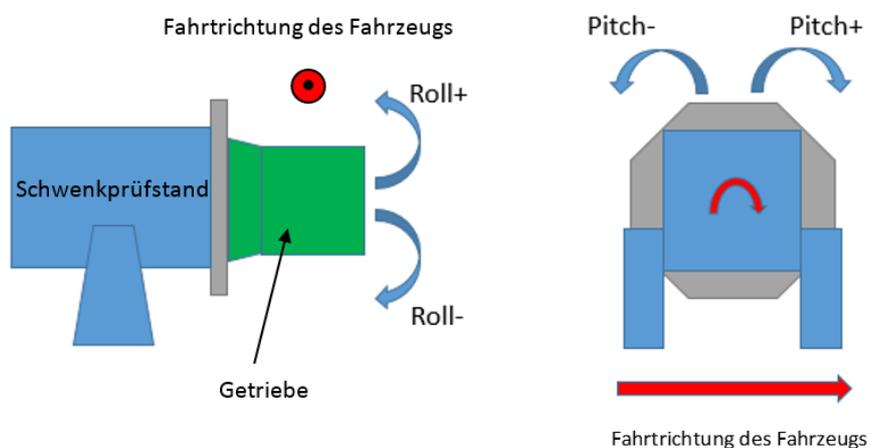


Abbildung 1-5: Bewegungsabstraktion

### 1.3 Prüfstandgenauigkeit

Um die Realitäts- und folglich auch die Genauigkeitseinbußen vom realen Fahrzeug zum Prüfstand beschreiben zu können, müssen verschiedene Parameter verglichen werden. Vorerst muss überprüft werden wieviel der Längsbeschleunigung, die ein Fahrzeug aufbringt, in Querbeschleunigung umgesetzt wird. Um dies zu überprüfen wird ein Querkraft-Schräglaufwinkeldiagramm herangezogen (Abbildung 1-7). Unter dem Schräglaufwinkel  $\alpha$  versteht man die Neigung des Rades zur Fahrtrichtung des Fahrzeuges (siehe Abbildung 1-6).

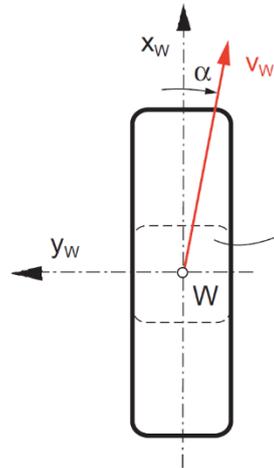


Abbildung 1-6: Schräglaufwinkel [2]

Der Geschwindigkeitsvektor  $v_w$  stellt die reale Fahrtrichtung dar, als geometrische Addition der Fahrtrichtungs-komponenten  $x_w$  und  $y_w$ . Der Schräglaufwinkel  $\alpha$  ist dabei der Winkel um den das Rad gedreht wird um eine Kurve zu fahren. In Abbildung 1-7 ist die Querkraft in Abhängigkeit zum Schräglaufwinkel dargestellt. Die Kraft  $F_z$  ist jene Kraft mit der das Viertelfahrzeug auf ein Rad wirkt.  $F_z$  in Höhe von 1.500 N hat das Fahrzeug folglich 600 kg.

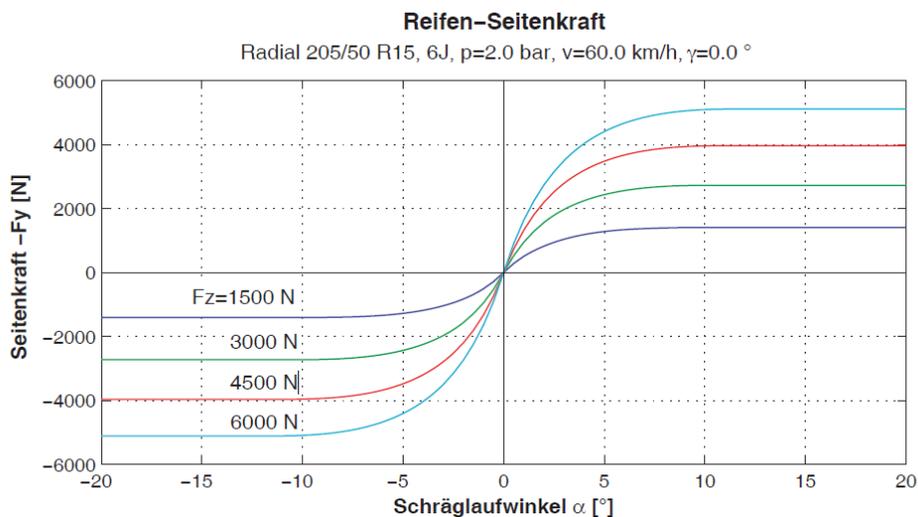


Abbildung 1-7: Querkraft Reifen [2]

In Abbildung 1-7 ist ersichtlich, dass der Schräglaufwinkel ab  $10^\circ$  die maximale Seitenkraft aufweist und die Vorzeichen von Kraft und Winkel ident sind. Bei negativem Schräglauf ist auch die Kraft negativ. Weiter kann der Abbildung entnommen werden, dass bei steigenden Fahrzeugmasse die maximal übertragbare Seitenkraft steigt. Werden die Extremwerte 1.500 N und 6.000 N als Referenz verwendet, kann ein Kräfteverhältnis gebildet werden, wodurch auf die Querbeschleunigung geschlossen wird.

Nach Auswertung aller Verhältnisse ist eine maximale Querschleunigung von ca. 1/10 der Erdbeschleunigung möglich. In Tabelle 1-1 und Tabelle 1-2 sind alle Verhältnisse angeführt. Wie ersichtlich ändern sich die Faktoren ab 5° Schräglaufwinkel nicht mehr.

Tabelle 1-1: Fz 1.500 N

| Schrägungswinkel $\alpha$ [°] | Fz [N] | Fy [N] | a [m/s <sup>2</sup> ] | Faktor |
|-------------------------------|--------|--------|-----------------------|--------|
| 0                             | 1.500  | 1.600  | 1,07                  | 0,109  |
| 5                             | 1.500  | 1.700  | 1,13                  | 0,116  |
| 10                            | 1.500  | 1.700  | 1,13                  | 0,116  |
| 15                            | 1.500  | 1.700  | 1,13                  | 0,116  |
| 20                            | 1.500  | 1.700  | 1,13                  | 0,116  |

Tabelle 1-2: Fz 6.000 N

| Schrägungswinkel $\alpha$ [°] | Fz [N] | Fy [N] | a [m/s <sup>2</sup> ] | Faktor |
|-------------------------------|--------|--------|-----------------------|--------|
| 0                             | 6.000  | 4.500  | 0,75                  | 0,076  |
| 5                             | 6.000  | 5.000  | 0,83                  | 0,085  |
| 10                            | 6.000  | 5.000  | 0,83                  | 0,085  |
| 15                            | 6.000  | 5.000  | 0,83                  | 0,085  |
| 20                            | 6.000  | 5.000  | 0,83                  | 0,085  |

Um die Prüfstandgrenzen zu bestimmen wird der analytische Ansatz mittels trigonometrischen Funktionen verwendet. Ein maximaler Schwenkwinkel von 30° und das Verhältnis der Sinus und Kosinus Funktion ergibt eine maximale Belastung von 0,577g. 30° Schwenkwinkel sind als Richtwert zur Veranschaulich zu vernehmen. Im Vergleich zu den aus Tabelle 1-1 und Tabelle 1-2 ermittelten Werten ist der Prüfstand überdimensioniert. Folglich können Systemparameter wie erhöhte Belastungsfälle, erhöhtes Fahrzeuggewicht, höhere Fahrgeschwindigkeit, etc. abgedeckt werden.

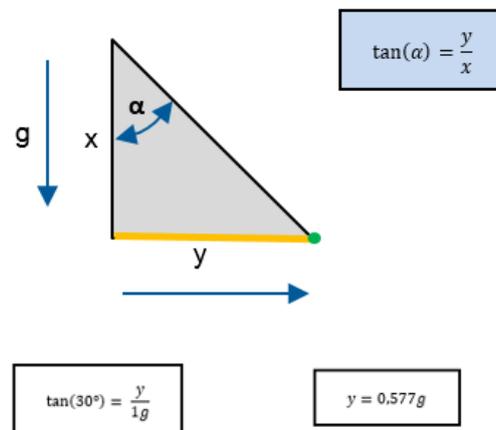


Abbildung 1-8: Belastungsbestimmung

Die Erläuterung jener Realitätsabweichung wird durch die Lage des Momentanpols des Prüfstandes stark beeinflusst. Der Momentanpol legt den Abstand für die Momente fest. Um jenen Abstand im Fahrzeug zu ermitteln und auf den Prüfstand anzuwenden ist nicht trivial. Folglich bestehen immer Diskrepanzen zwischen Fahrzeugtest und Prüfstandtest.

Durch diese Abstände kommt es im Bereich der Beschleunigung zu Abweichungen, die je nach Getriebelänge und Einbauweise stark variieren. Zusammengefasst entspricht der Ölstand im Getriebe im Fahrzeug zufolge einer Schwenklage nie dem Ölstand im Getriebe am Prüfstand. Dies ist jedoch bei statischen Lagen vernachlässigbar aufgrund der statischen Verteilung nach endlicher Zeit.

#### 1.4 Alternative Schwenkprüfstände

Um die Grenzen und mögliches Verbesserungspotential des Schwenkprüfstandes der AVL aufzuzeigen werden im Zuge der Masterarbeit mehrere Schwenkprüfstände von verschiedenen Herstellern mit einander verglichen. Aufgrund der hohen Auslastung des Schwenkprüfstandes wurde am IME ein eigener Schwenkprüfstand konstruiert und gebaut. In Abbildung 1-9 ist die Konstruktion dargestellt, welchen als „Low Tech Schwenker“ bezeichnet wird. Die Bezeichnung „Low Tech“ wird in Folge der geringen Dynamik des Schwenkprüfstandes gewählt. Im Gegensatz zum Schwenkprüfstand der AVL sind keine automatisch verstellbaren Drehachsen an diesem vorhanden. Die Regelung lässt keine dynamischen Fahrzyklen zu. Folglich können nur statische Untersuchungen durchgeführt werden.

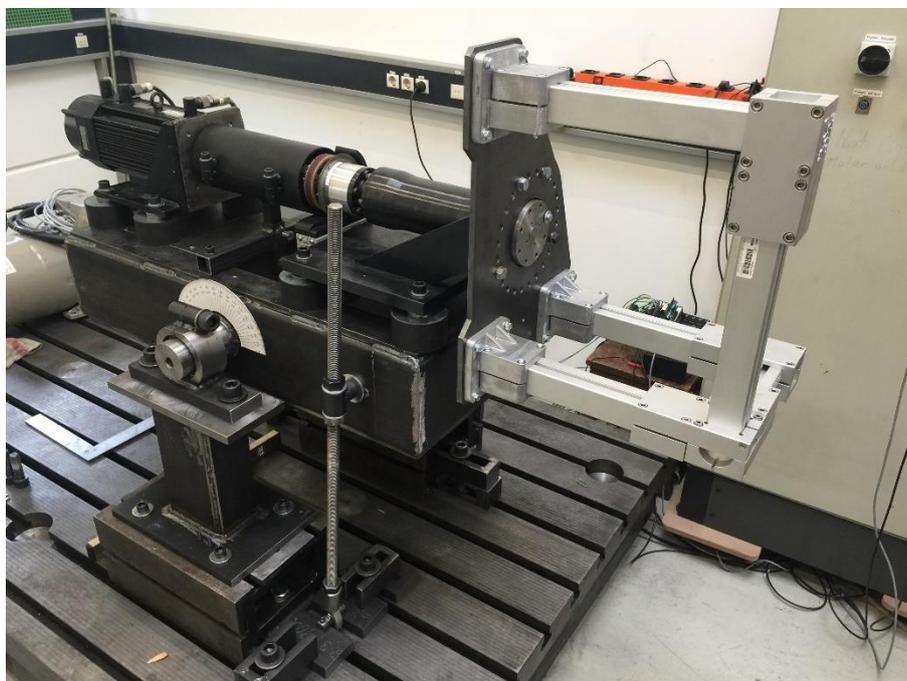


Abbildung 1-9: Low-Tech Schwenker

Der Roll-Winkel kann maximal  $45^\circ$  erreichen und wird durch eine Gewindestange justiert. Um ein Lösen und so eine Veränderung der Winkellage zu verhindern, wird die Gewindestange mittels Mutter geklemmt und durch eine Mutter an der anderen Seite des Gelenks gekontert (siehe Abbildung 1-10).

Der Pitch-Winkel wird mittels Lochbild umgesetzt (siehe Abbildung 1-11). Aufgrund der Anzahl der Bohrungen (24 Stück) ist eine minimale Winkeländerung auf  $15^\circ$  beschränkt. Gesichert wird das Getriebe im Lochbild mit 4 Schrauben. Aufgrund der beschränkten Anzahl an Bohrungen sowie der arbeitsintensiven Einstellung des Schwenkadaptors, welcher nur eine Verstellung zulässt, wenn kein Prüfkörper am Prüfstand montiert ist, kann der Low-Tech Schwenkprüfstand des IME nur für statische Untersuchungen verwendet werden. Als mögliche Adaptierung sind Klemmen vorgesehen, die ein freies Verstellen mit montierten Prüfkörper ermöglichen.

Der Elektromotor, welcher die Eingangsdrehzahl definiert, wird durch ein National Instruments (kurz „NI“) Regelungsprogramm geregelt. Neben der Rampengeschwindigkeit, also der Vorgabe des Drehzahlgradienten, die Solldrehzahl und Grenzwerte (Limits) eingestellt werden. Reale Fahrbetriebe, wie beispielsweise Beschleunigungs- und Bremszyklen, sind nicht abbildbar. Eine Temperaturüberwachung wird berücksichtigt, ist jedoch aufgrund der Hardwareanschlüsse stückmäßig beschränkt.

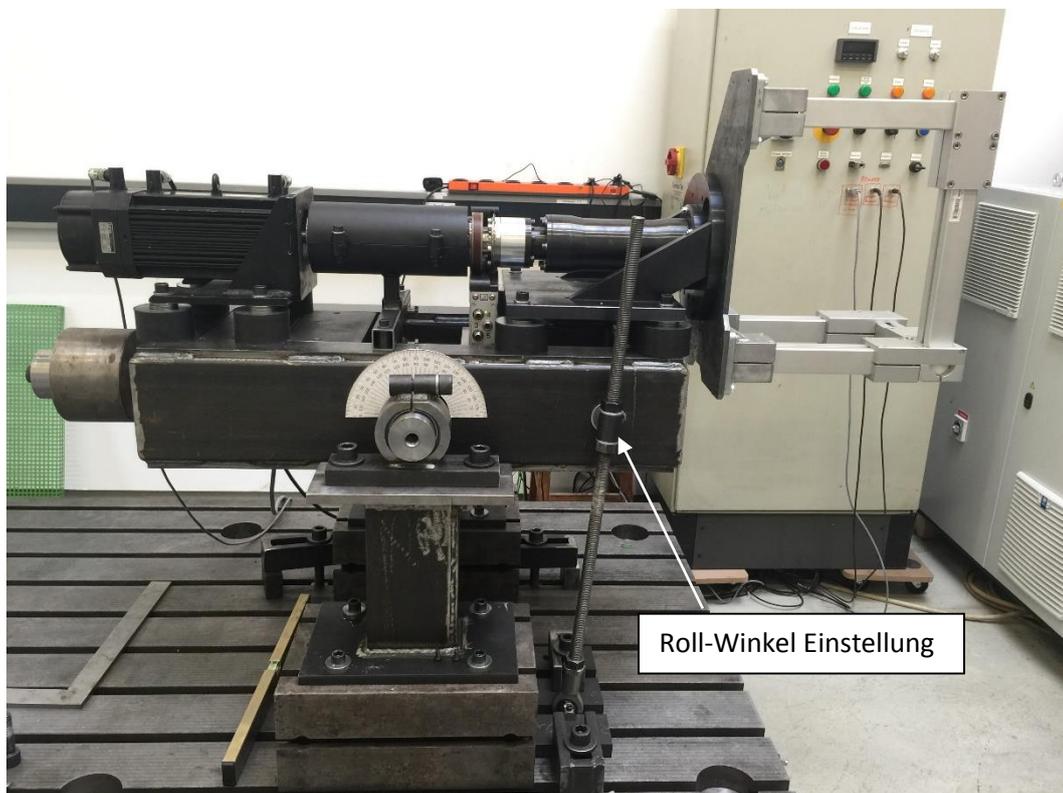


Abbildung 1-10: Low-Tech Schwenker Lateral

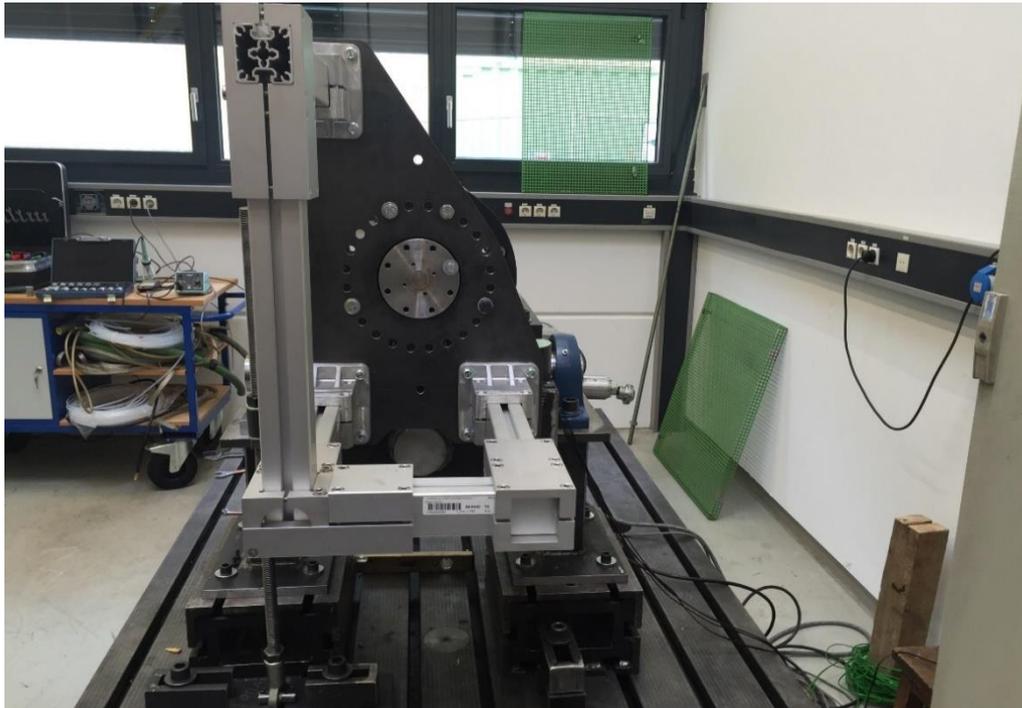


Abbildung 1-11: Low-Tech Schwenk Frontal; Lochbild

Neben dem Schwenkprüfstand der AVL und dem selbstgebauten IME Prüfstandes besteht noch die Option des Zukaufes. Das Unternehmen „Magna Steyr AG & Co KG“ bietet einen Prüfstand zur Untersuchung von Schmierkreisläufen an. Dieser Prüfstand ist in Abbildung 1-12 dargestellt. Um Winkellagen einnehmen zu können, wird mittels eines Hydraulikzylinders die Lage verändert. Diese Lageänderung ist lediglich um den Roll-Winkel möglich. Nach Rücksprache mit dem Hersteller sind keine dynamischen Testzyklen möglich, lediglich eine fixe Winkelvorgabe mit anschließendem statischen Testprogramm. Die Eingangsdrehzahl wird mit einem Servomotor geregelt, wobei über diese Regelung keine Informationen bekannt sind.

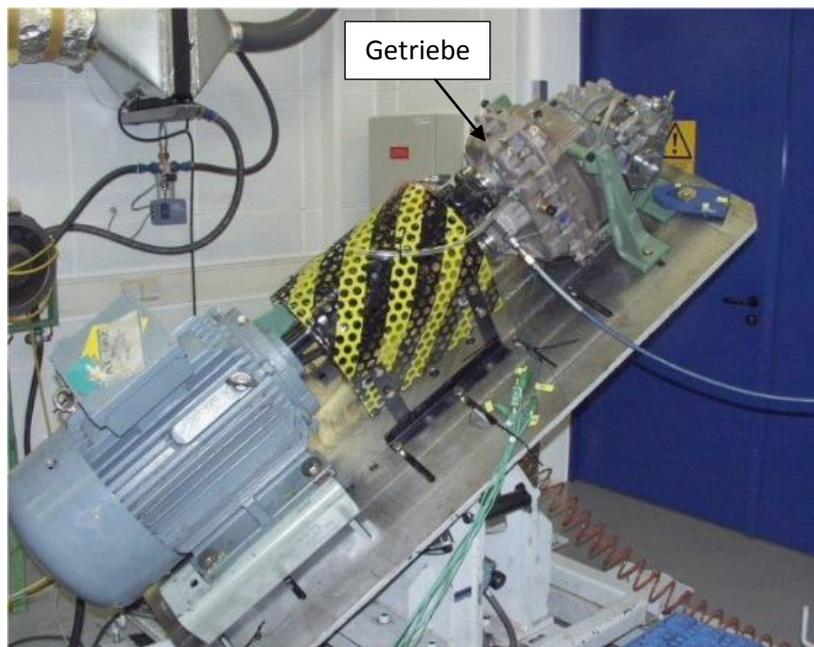


Abbildung 1-12: Magna – Schwenkprüfstand [3]

Das Unternehmen „Blum-Novotest GmbH“ bietet Schwenkprüfstände für Getriebeuntersuchungen nur zum Kauf an. Wie in Abbildung 1-13 dargestellt, bestehen die Möglichkeiten des Wankens und des Nickens. Laut Datenblatt [4] ist eine Nick-, sowie Rollneigung von je 65° möglich. Weiter wird der Prüfkörper mit einer Drehzahl von bis zu 3.200 U/min angetrieben. Da das Unternehmen Wert auf Produktschutz legt sind keine weiteren Informationen bekannt, lediglich bei der Option des Kaufes werden genaue Systemgrenzen bekannt gegeben.

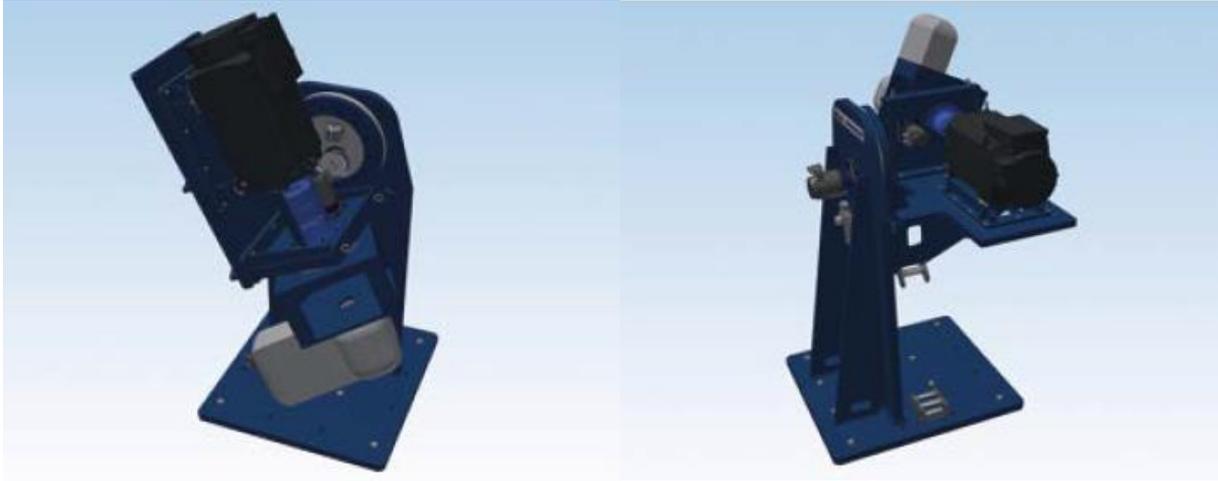


Abbildung 1-13: Rollneigung (links), Nickneigung (rechts) [4]



Abbildung 1-14: Novotest – Schwenkprüfstand [4]

## 1.5 Prüfkörper Präparation

Getriebe, wie sie in realen Fahrzeugen verbaut werden, können ohne große Umbauten auf einem Prüfstand montiert werden. Diese liefern jedoch nur bedingt verwertbare Ergebnisse, da keine Möglichkeit der Analyse besteht. Folglich müssen Adaptionen am Getriebe vorgenommen werden um am Prüfstand verwertbare Messdaten zu generieren.

Für Schmierkreislaufuntersuchungen sind Transparentgetriebe, also ein Austausch aller Gehäusekomponenten durch Gehäuseteile aus Acrylglas, nicht ideal. Der Vorteil von Transparentgetrieben liegt in der direkten Erkennung der Fluidverteilung. Der Nachteil von Transparentgetrieben ist der Verlust wichtiger Informationen über die Oberflächenrauheit. Weiter ist die Festigkeit, sowie die Härte von Acrylglas im Vergleich zu den gängigen Werkstoffen für Getriebegehäuse (typischerweise Aluminium-Druckguss) stark unterschiedlich. Die Temperaturgrenzen spielen bei den Acrylgehäusen eine große Rolle, da bei zu hoher Temperatur eine Trübung des Acryls eintritt. Zudem ist es nicht möglich das im Getriebe verwendet Öl bei Betriebstemperatur zu testen, da diese meist über 50 °C liegen und dadurch die Grenzen des Prüflings überschritten werden. Als Alternative kann ein anderes Öl verwendet werden, welches dieselbe Viskosität bei Raumtemperatur besitzt wie das Nutzöl bei Betriebstemperatur. Es gehen jedoch Öleigenschaften, wie beispielsweise die maximale Scherspannung, verloren. Diese Eigenschaften beschreiben das Fluidverhalten und ändern folglich die Schmierstoffverteilung.

Auch die dämpfenden Eigenschaften von Acrylglas sind stark unterschiedlich zu den gängigen Getriebegehäusewerkstoffen. Dies spiegelt genau den Zielkonflikt zwischen realitätsnahen Prüfkörpern und Laborsystemen zur wissenschaftlichen Beschreibung wieder. Üblicherweise werden für Getriebe im Kraftfahrzeugsektor Werkstoffe wie Aluminiumguss, oder bei höheren Belastungen Stahlguss, verwendet. Diese Gussflächen unterscheiden sich stark von glatten Acrylglasoberflächen. Zum aktuellen Zeitpunkt werden für die Schmierkreislaufuntersuchung die Getriebe mit Sichtfenstern versehen. Sichtfenster sind kleine Aussparungen am Gehäuse, welche mit Kunststofffenster verschlossen werden. Diese werden vor kritischen Stellen im Getriebe platziert, wie zum Beispiel vor Lagern, um deren Schmierung zu untersuchen. Für die Prototypentwicklung ist es aber unumgänglich ein Acrylgehäuse zu verwenden, wobei ein modifiziertes Prüfprogramm verwendet wird.

In Abbildung 1-15 ist ein Demonstrationsgetriebe am Schwenkprüfstand. Als Gehäusewerkstoff wird Acrylglas verwendet, welches für Demonstrationszwecke ausreicht, jedoch für genaue Messungen nicht verwendet werden kann, aufgrund der wie bereits beschriebenen Oberflächeneigenschaften, Temperatur- und Festigkeitsgrenzen.



Abbildung 1-15: Schwenkuntersuchung mit Transparentgetriebe [5]

## 1.6 Ziel der Arbeit

Primäres Ziel der Masterarbeit ist die Ölfluss- und Ölversorgungserfassung. Dabei wird auf eine hinreichende Beölung aller Komponenten geachtet.

Die grundlegende Frage, ob die Bauteile und Komponenten mit Öl versorgt werden oder nicht, liegt im Fokus der Arbeit. Ob eine hinreichende Beölung vorhanden ist, ist einerseits konstruktiv, andererseits drehzahlabhängig. Diese Drehzahlabhängigkeit, sowie auf Basis der konstruktiven Auslegung, soll am Ende in einem eindeutigen Zusammenhang gestellt werden. Die Grundversorgung ist ausschlaggebend für eine ausreichende Lebensdauer aller Bauteile. Weiter soll die Erfassung von Öl zukünftig als Basis für die Kontrolle der Erhaltungsgleichungen der Strömungsmechanik dienen. Dieser Abgleich der Erhaltungsgleichungen spielt im Bereiche der „Computational Fluid Dynamics“ (kurz CFD) Simulationen eine wichtige Rolle. In der heutigen Zeit, mit steigenden Prüfstandkosten und kürzeren Produktentwicklungszeiten, spielen Simulationen eine immer größere Rolle. Simulation und Wirklichkeit können stark divergieren. Daher ist es wichtig an Kontrollpunkten einen Abgleich von Realität und Simulation zu schaffen.

## 2 Getriebeöl

### 2.1 Definition von Öl

In der Getriebebranche werden Öle verwendet um ein System zu kühlen oder zu schmieren. Es wird grundsätzlich zwischen den Automatikgetriebeölen und den Handschaltgetriebeölen unterschieden. In dieser Arbeit wird lediglich von Getriebeölen für Handschaltgetriebe gesprochen. Getriebeöl besteht aus einem Basisöl und aus hinzugefügten Additiven. Das Basisöl wird aus Rohöl gewonnen und besteht aus gesättigten Kohlenwasserstoffketten. Additive sind Stoffe (Säuren, Polymerketten), die die Eigenschaften des Öls beeinflussen.

Rohöl wird durch physikalische (zentrifugieren) oder chemische (destillieren oder hydrieren) Behandlungen soweit verarbeitet, dass Paraffinketten (Basisöl) entstehen. Es wird zwischen n-Paraffinen (geradkettig), Isoparaffine (verzweigte Kette) oder cyclischen Strukturen (Naphthenen) unterschieden. All diese Paraffinstrukturen besitzen unterschiedliche Eigenschaften wie Wärmeleitfähigkeit, innere Reibung, etc.. Neben Paraffin Basisölen gibt es die Kategorie der Hydrocracköle. Die Hydrocracköle werden aus Mineralölfractionen oder aus Rohparaffinen hergestellt. Das bedeutet, dass als Rohöl ein bereits behandeltes Basisöl verwendet wird. Somit werden bereits einschlägige Eigenschaften vom Basisöl weiter ausgeprägt. Weiter gibt es noch synthetische Öle, welche im Labor aus Kohlenstoff und Wasserstoff chemisch zusammengesetzt werden.

Jedes Basisöl hat verschiedene Grundeigenschaften, welche für die Klasse des Öls ausschlaggebend sind. Je nach Behandlungsaufwand des Basisöls variiert der Preis enorm.

Wie jedes Fluid, hat auch Öl physikalische Eigenschaften, die Abhängigkeiten von Systemparameter (Temperatur, Druck, etc.) aufweisen. Bei Ölen ist die Temperaturabhängigkeit stark ausgeprägt. Diese Ausprägung spiegelt sich in der Dichteänderung wider.

Prinzipiell ist der Zusammenhang bei konstanter Masse durch

$$-\frac{\Delta\rho}{\rho} = \alpha_T * \Delta T \quad (2.1)$$

definiert.  $\frac{\Delta\rho}{\rho}$  beschreibt die Änderung der Dichte, bezogen auf die Ausgangsdichte.  $\alpha_T$  ist der Dichteänderungskoeffizient und zeigt das Verhältnis der Dichteänderung in Bezug auf eine Temperaturänderung.  $\Delta T$  beschreibt den Temperaturgradienten.

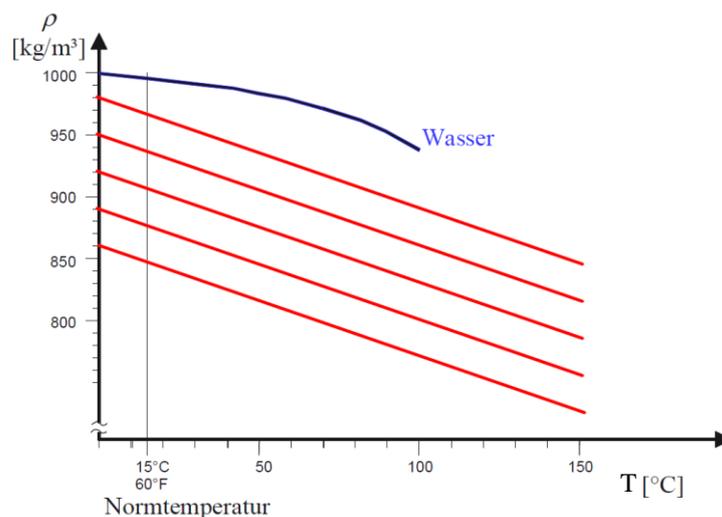


Abbildung 2-1: Dichte-Temperatur Öl [6]

In Abbildung 2-1 wird die Dichteänderung von Öl (rote Linie) und von Wasser durch den Temperaturanstieg dargestellt. Es sind mehrere rote Linien abgebildet, da das Linearverhalten hervorgehoben werden soll. Der Dichteänderungskoeffizient (Raumausdehnungskoeffizient) ist bei Wasser nicht linear. Die Kennlinie des Wassers endet bei 100 °C, da dort eine Aggregatzustandsänderung eintritt. Auch Öle verdampfen, oder gasen bei höheren Temperaturen aus, was zu einem nicht linearen Verhalten führt. Diese Änderung tritt jedoch erst bei hohen Temperaturen ein.

Neben der Temperatur hat auch der Druck einen Einfluss auf die Dichte. Bei hohen Druckgradienten ändert sich die Dichte des Öls. Dies ist auf den Kompressionsmodul (K-Modul) zurückzuführen. Die K-Module von Ölen belaufen sich auf  $10^9$  Pascal. Aufgrund der Definition des K-Modul ändert sich bei einer Druckänderung von 100 bar das Volumen um 1%. In Getrieben treten im Zahneingriff keine so hohen Drücke auf, wodurch die Druckabhängigkeit für die Dichteänderung in Getriebeölen keine Rolle spielt.

Physikalisch betrachtet handelt es sich beim Öl um ein newtonsches Fluid. Newtonsche Fluide sind über den Zusammenhang von Schubspannungen und Fließverhalten definiert.

$$\tau = \frac{F}{A} = \eta * \frac{du}{dy} \quad (2.2)$$

In Gleichung (2.2) ist dieser Zusammenhang dargestellt.  $\tau$  ist die Schubspannung und wird durch den Quotienten von Kraft  $F$  und Fläche  $A$  definiert. Der rechte Teil der Gleichung beschreibt die Verbindung von Schubspannung und Fließverhalten. Das Fließverhalten ist über die dynamische Viskosität und den Geschwindigkeitsgradienten definiert. Die dynamische Viskosität ist ein Stoffwert der experimentell ermittelt wird. Bildlich kann sich darunter ein Gleiten der Molekülschichten vorgestellt werden. Um die Viskosität rechnerisch zu ermitteln wird ein Gedankenexperiment durchgeführt bei dem eine Flüssigkeit zwischen zwei Platten untersucht wird.

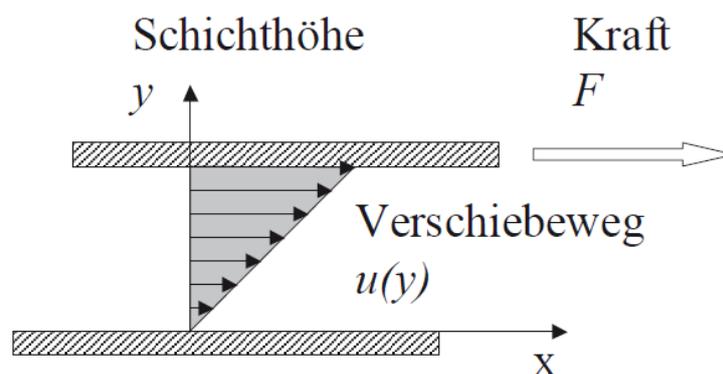


Abbildung 2-2: Viskositätsbeschreibung [6]

Hierbei müssen die Fläche  $A$  der Platten und der Abstand  $y$  zueinander bekannt sein. Bewegt sich die obere Platte mit der Geschwindigkeit  $u$  (siehe Abbildung 2-2), zufolge der an der Platte angreifenden Kraft  $F$ , entsteht eine Schubspannung  $\tau$ , welche einerseits über die Geschwindigkeit, andererseits über die Kraft beschrieben werden kann.

Die dynamische Viskosität ein Stoffwert, der experimentell nicht ermittelt werden kann. Es ist hingegen möglich die kinematische Viskosität  $\nu$  zu bestimmen. Die kinematische Viskosität steht im analytischen Zusammenhang zur dynamischen Viskosität durch:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (2.3)$$

In Gleichung (2.3) ist auch indirekt die Temperaturabhängigkeit der kinematischen Viskosität durch die Dichte erkennbar. Experimentell kann die kinematische Viskosität mittels Kapillarviskosimeter ermittelt werden, dabei wird das Öl auf die gesuchte Temperatur. Anschließend fließt ein definiertes Volumen durch die Kapillare. Eine Kapillare ist ein Gefäß mit definierten geometrischen Größen und Oberflächenrauigkeit, durch das Öl fließt. Die Kapillare besitzt eine Kapillarkonstante. Durch eine Zeitmessung und Multiplikation mit der Kapillarkonstanten wird auf die kinematische Viskosität zurückgerechnet. Die Kapillarkonstante wird experimentell ermittelt und basiert auf empirischen Werten.



Abbildung 2-3: Kapillarviskosimeter [7]

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass bei Temperaturanstieg die Viskosität bei Getriebeölen sinkt und somit bei hohen Temperaturen dünnflüssiger wird. Betrachtet man dieses Phänomen physikalisch, bedeutet das, dass sich die Moleküle im Öl weiter voneinander entfernen, somit nimmt die innere Reibung ab. Die innere Reibung steht linear im Verhältnis zur Viskosität.

## 2.2 Basisöl und Additive

In Kapitel 2.1 wird bereits auf die Erzeugung von Basisöl eingegangen, sowie die physikalischen und schmierkreislaufrelevanten Eigenschaften. Basisöl besitzt grundlegende Eigenschaften, welche für eine kommerzielle Nutzung als Getriebeöl unbrauchbar sind. Um diese Eigenschaften zu verändern werden dem Öl Additive zugefügt. Additive sind öllösliche Stoffe und kommen in Konzentrationen zwischen 5 % und 25 % vor [8]. Um eine Wirkung der Additive zu erzielen, müssen mindestens 5 % mit dem Basisöl gemischt werden. Über 25 % tritt eine Übersättigung des Öls ein. Additive werden in Kategorien eingeteilt, die ihre Funktionsweise charakterisieren. Dies Kategorien lauten:

- Oberflächenschützende Additive
- Ölverbessernde Additive
- Ölschützende Additive

Aus tribologischer Sicht werden vier Kategorien unterschieden: [8]

- Verschleißminderer (EP-Additiv)
- Reibungsminderer (AW-Additiv)
- Viskositätsindex Verbesserer (VI-Verbesserer)
- Schauminhibitoren

Für Motoröle gibt es weitere Kategorien, welche bei Getriebeölen nicht berücksichtigt werden. Diese sind aufgrund der veränderten thermodynamischen Eigenschaften im Motor ausschlaggebend.

### 2.2.1 Verschleißminderer

Verschleißminderer, sogenannte EP-Additive (Extreme Pressure Additive), werden bei Ölen eingesetzt um den Verschleiß zu mindern. Verschleiß entsteht wenn sich zwei Bauteile berühren und die Rauheitsspitzen abgetrennt werden. Rauheitsspitzen entstehen aufgrund von der Bearbeitung der Bauteile. Bei hohen Belastungen, hohen Kräften und Momenten, steigt der Verschleiß.

In diesem Falle sind EP-Additive in Schmierstoffen unentbehrlich. Unter hohen Belastungen entstehen im Schmierstoff hohe Temperaturen. Bei solchen hohen Temperatur wird aus dem EP-Additiv Schwefel (Schwefelträger), Phosphorsäurederivat (phosphorhaltige Verbindungen) oder Chlorkohlenwasserstoff (Chlorparaffine) freigesetzt. Die freigesetzten Substanzen reagieren bei diesen Bedingungen sofort mit der Bauteiloberfläche zu Metallsulfiden, -phosphaten oder -chloriden. Die Verbindungen bilden auf der Oberfläche dünne Schichten, die unter dem hohen Druck abgeschert werden, wodurch ein Verschweißen der Bauteiloberfläche vermindert wird [9].

### 2.2.2 Reibungsminderer

Reibungsminderer, sogenannte AW-Additive (Anti Wear Additive), werden öfters auch als milde EP-Additive bezeichnet. Die AW-Additive werden dazu verwendet, um den Reibungskoeffizienten von zwei sich berührenden Bauteilen, wie z.B. zwei Zahnrädern oder einem Wälzkörper und der Wälzlagerlaufbahn, herabzusetzen. Dafür werden chemische Verbindungen, wie Fettsäuren, Fettsäurederivate oder organische Amine verwendet [8].

Unter Amine werden Derivate von Ammoniak verstanden. Durch die Zuführung der Additive zu den jeweiligen Kontaktflächen spalten sich die Säuren oder jeweiligen Derivate auf und es wird ein Stickstoffderivat (Methylamin, Dimethylamin, Trimethylamin, Betain) frei. Durch Hinzufügen jener Molekülteile, tritt eine Oberflächenverhärtung ein. Diese Verhärtung ist auf den Einschub von Atomen in die Gitterstruktur des Werkstoffes zurückzuführen. Durch diese lokale Verhärtung ändert sich der Reibungskoeffizient, welcher auch zu einer Reibungsminderung führt.

### 2.2.3 V.I. Verbesserer

V.I. Verbesserer sind Additive die den Viskositätsindex (V.I.) eines Öls verbessern. Der V.I. wird empirisch bestimmt. Je höher der V.I., desto geringer ist der Temperatureinfluss auf das Öl. Bestimmt wird der V.I. durch zwei extrem unterschiedlich temperaturempfindliche Bezugsöle. Als Grenzen der Skala werden ein pennsylvanisches und ein texanisches Öl verwendet. Beim pennsylvanischen Bezugsöl steigt die Viskosität mit sinkender Temperatur nur langsam (also unempfindlich bei Temperaturänderung), beim texanischen Bezugsöl steigt die Viskosität mit sinkender Temperatur schnell (starke Viskositätsänderung bei veränderter Temperatur). Das pennsylvanische Bezugsöl hat einen V.I. von 100, das texanische Bezugsöl hingegen von Null [8].

Um den V.I. zu bestimmen, wird die Viskosität vom pennsylvanischen und texanischen Bezugsöl bei der Bezugstemperatur aus Tabellen bestimmt. Anschließend wird die Viskosität des Öls dessen V.I. gesucht ist, mittels Viskosimeter (Kapillarviskosimeter) bestimmt. Um den V.I. zu quantifizieren wird die Formel

$$V.I. = 100 * \frac{L-P}{L-H} \quad (2.4)$$

verwendet.

Die Anforderungen an das Öl für die breite Nutzung ist bei geringen Temperaturen eine niedrige Viskosität zu besitzen und bei hohen Temperaturen eine ausreichend hohe Viskosität für sichere Schmierung. Diese Eigenschaft besitzen nur Mehrbereichsöle. Mehrbereichsöle besitzen über ein breites Temperaturspektrum eine brauchbare Viskosität. Selbst bei Basisölen mit hohem V.I. sind die geforderten Voraussetzungen nicht erfüllt, was dazu führt, dass Additive beigemischt werden um die Breitbandigkeit des Öls zu Erhöhen. Die Additive die dem Öl diese Eigenschaft verleihen werden V.I.-Verbesserer genannt.

V.I.-Verbesserer sind Polymerverbindungen (Polymethacrylate PMA), die in ungeordneter Struktur auftreten. Bei geringen Temperaturen liegen die unstrukturierten Polymerketten eng aneinander und haben aufgrund ihres geringen Raumbedarfs nur wenig Einfluss auf die Viskosität. Bei Erhöhung der Temperatur weiten sich die Ketten (sie entwirren sich) und nehmen mehr Raum im Öl ein und „verdicken“ das Öl künstlich. Bei erhöhten Temperaturen wandern die Moleküle im Öl auseinander, wobei die Lücke durch die Kunststoffketten gefüllt wird. Bei der Auswahl der V.I.-Verbesserer ist zu beachten, dass die zulässige Scherspannung nicht überschritten wird. Bei Überschreiten der Scherspannung werden die PMA zerschnitten und haben folglich keinen Einfluss mehr auf die Viskosität.

## 2.2.4 Schauminhibitoren

Bei Getrieben drehen sich die Zahnräder mit hohen Umfangsgeschwindigkeiten, was zu Verwirbelungen im Ölsumpf führt. Diese Verwirbelungen entstehen durch den Einschlag der Zähne in den Sumpf und durch das Einschleusen von Luft. Die Luft sammelt sich in den umfangsseitigen Zwischenräumen der Zahnräder und wird so in den Sumpf gefördert. Aufgrund des Dichteunterschiedes von Luft und Öl entsteht im Sumpf Auftrieb, der zusätzliche Quelle generiert und zu einer Dichteveränderung des Öls führt (heterogenes zweiphasen Gemisch). Dieser Lufteinschluss im Öl führt weiter zu einer beschleunigten Alterung (erzwungene Oxidationsvorgänge).

Neben den bereits genannten Phänomenen führt das Einschlagen der Zähne in die Öloberfläche zu einer Schaumbildung. Schaum an der Oberfläche ist die Ursache für eine Unterversorgung der Getriebeteile mit Öl da die erhöhte Oberflächenspannung des Schaumes eine Ölmitnahme verhindert.

Um dem entgegenzuwirken werden dem Öl unlösliche Stoffe beigesetzt, die eine niedrigere Oberflächenspannung als das Öl aufweisen. Diese niedrigere Oberflächenspannung wirkt jener des Schaumes entgegen und ermöglicht so die Ölmitnahme an den Zahnflanken. Als gängiger Zusatz haben sich Silikonöle bewährt, welche jedoch den Nachteil haben, dass sie das Aufsteigen von Luftblasen im Öl verhindern. Folglich bleibt die Luft im Öl und beschleunigt somit den Alterungsprozess.

## 2.3 Nutzen des Öls

Öl hat in Getrieben mehrere Aufgaben, welche bauteilübergreifend abgedeckt werden müssen. Neben den Zahnrädern müssen die Lagerung und die Dichtung mit Öl versorgt werden.

Das Öl erfüllt folgende Funktionen:

- Schmieren
- Kühlen
- Dichten
- Schutz vor Ablagerungen
- Korrosionsschutz
- etc.

Die Hauptaufgaben sind Schmieren, Kühlen und Dichten. Beim Ausfall einer dieser Funktionen führt es zum Ausfall des Getriebes und folglich zum Ausfall des Gesamtsystems. Um die Aufgabe des Öls zu verstehen werden in Folge die drei Hauptfunktionen explizit erläutert.

### 2.3.1 Schmierwirkung von Öl

Schmieren ist das Vermindern von Verschleiß und Reibung durch den Aufbau eines dünnen Flüssigkeitsfilmes zwischen zwei Bauteilen die sich relativ zu einander bewegen. Sollte die Schmierung ausfallen, kommt es zu einem sogenannten Trockenlauf, welcher für den Normalbetrieb vermieden werden soll. Verschleiß und Reibung stehen in direktem Kontakt. Je höher die Reibung ist, desto höher ist der Verschleiß. Eine Ausnahme stellt die Flüssigkeitsreibung dar. Reibung ist definiert durch

$$F_R = \mu * F_N \quad (2.3)$$

$F_R$  ist die Reibkraft,  $\mu$  ist der Reibungskoeffizient und  $F_N$  die Normalkraft.

Aus Gleichung (2.3) ist der lineare Zusammenhang von Reibkraft und Normalkraft ersichtlich. Die Normalkraft hängt vom Druck, oder dem Gewicht ab, mit dem zwei Bauteile belastet werden, wenn sie eine Relativbewegung zu einander ausführen. Um folglich die Reibkraft zu mindern muss der Reibungskoeffizient gesenkt werden. Um  $\mu$  zu verkleinern, muss die Reibungsart von trockener Gleitreibung zu geschmierter Mischreibung übergeführt werden.

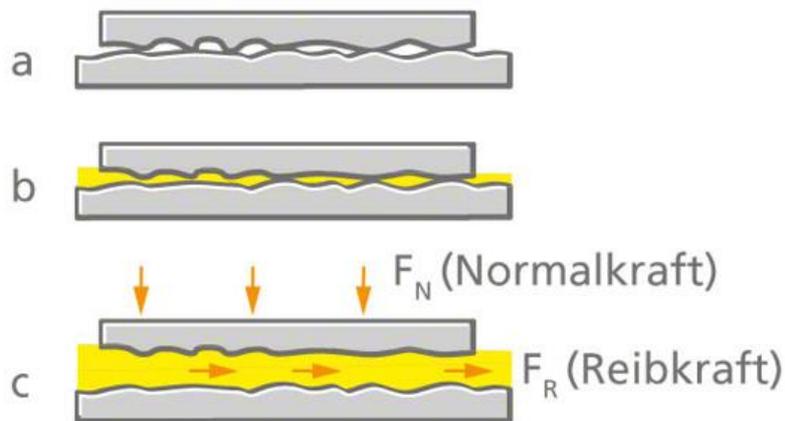


Abbildung 2-4: Schmierungsarten [10]

Wie in Abbildung 2-4 ersichtlich, ist im Punkt „a“ keine Schmierung vorhanden. Dies führt zu großen Reibkräften und somit zu einem hohen Verschleiß (Grenzreibung). Bei Grenzreibung werden die Rauigkeitsspitzen der Bauteile abgeschert. Unter Verschleiß wird der Materialverlust an der Bauteiloberfläche verstanden der zufolge mechanischen Ursachen hervorgerufen wird. Zuzufolge von Grenzreibung sind in der Getriebetechnik folgende Verschleißarten von Relevanz (Tabelle 2-1). Mit „H“ gekennzeichnete Mechanismen erzeugen starke Einflüsse, mit „N“ gekennzeichnete treten nebensächlich auf. Mit „/“ gekennzeichnete Mechanismen treten in den jeweiligen Verschleißfällen nicht auf.

Tabelle 2-1: Verschleißarten [11]

| Verschleißart         | Bewegungsform  | Wirkende Mechanismen |          |                        |                         |
|-----------------------|----------------|----------------------|----------|------------------------|-------------------------|
|                       |                | Adhäsion             | Abrasion | Oberflächen-zerrüttung | tribochemische Reaktion |
| Gleitverschleiß       | Gleiten        | H                    | N        | N                      | H                       |
| Rollverschleiß        | Rollen, Wälzen | N                    | N        | H                      | N                       |
| Schwingungsverschleiß | Oszillieren    | H                    | H        | H                      | H                       |
| Stoßverschleiß        | Stoßen         | N                    | N        | H                      | N                       |
| Prallverschleiß       | Stoßen         | /                    | H        | H                      | N                       |

In Abhängigkeit von der Bewegungsform wird die Verschleißart zugeordnet. Abhängig vom Verschleiß wird zwischen Adhäsion, Abrasion, Oberflächenzerrüttung und tribochemischen Reaktionen unterschieden. Adhäsion bezeichnet ein lokales Kaltverschweißen zweier Bauteile. Durch eine Relativbewegung werden die verschweißten Teile aus der Bauteiloberfläche gelöst. Es treten Löcher, Kuppen und Schuppen an der Oberfläche auf [11].

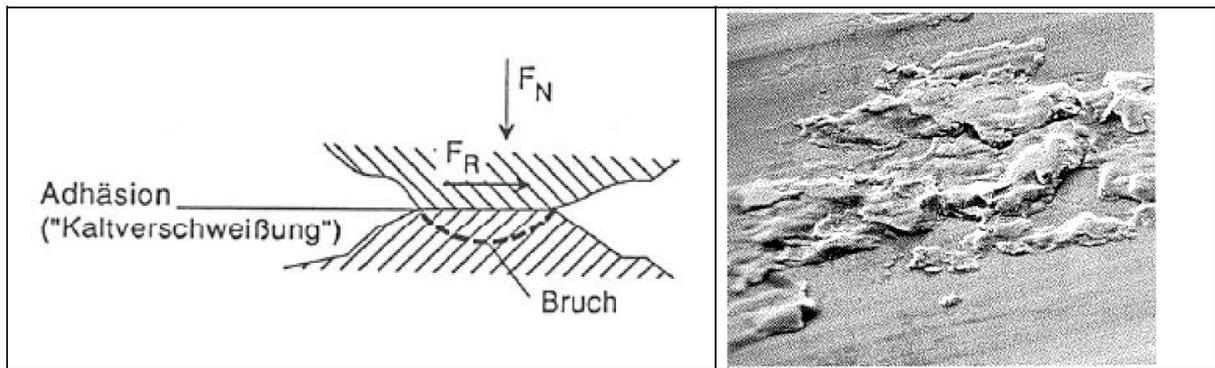


Abbildung 2-5: Adhäsion [11]

Abrasion tritt zufolge unterschiedlichen Härtegraden, von Bauteilen die sich relativ zueinander bewegen, auf. Es entstehen Kratzer, Riefen oder Mulden an den Bauteilen mit geringerer Härte [11].

Oberflächenzerrüttung entsteht aufgrund von Wechselbeanspruchung (Schwingungen) welche normal oder parallel zur Richtung der Kontaktfläche angeordnet [11].

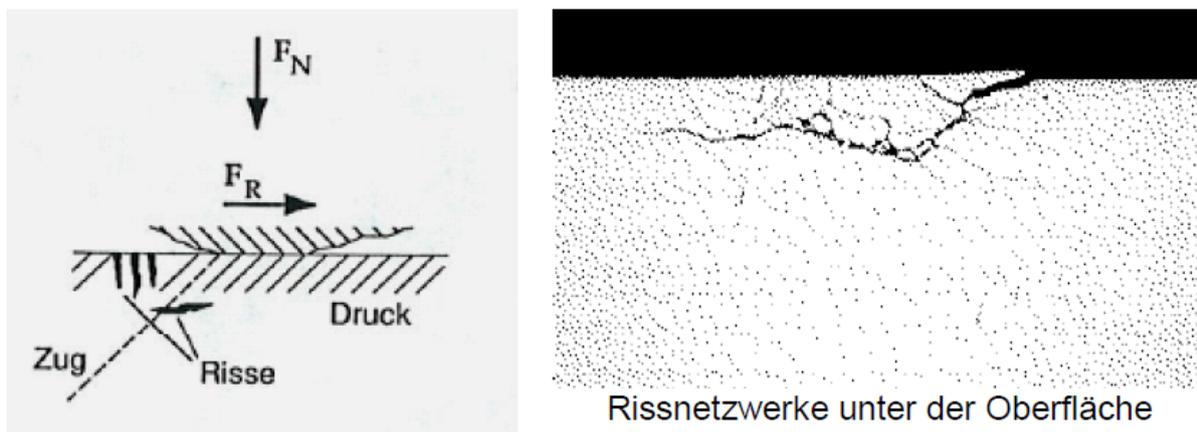


Abbildung 2-6: Oberflächenzerrüttung [11]

Tribochemische Reaktionen entstehen zufolge des Abriebes von reaktionshemmenden Schichten und Temperaturerhöhung. Folglich entstehen neue Reaktionsschichten, welche den Abrieb erhöhen [11].

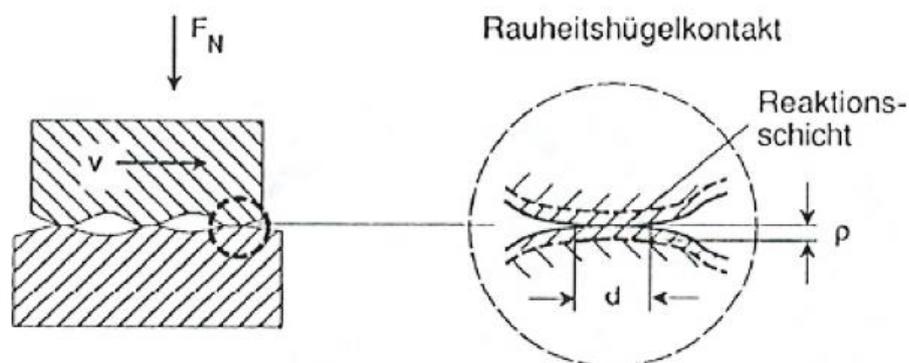


Abbildung 2-7: Tribochemische Reaktion [11]

Im Punkt „b“ ist eine ideale Schmierung dargestellt. Die Täler zwischen den Rauigkeitsspitzen der Bauteile sind mit Öl befüllt und es kommt zu keinem oder nur minimalen Festkörperkontakt (Mischreibung).

Im Punkt „c“ ist ein zu großer Schmierfilm vorhanden. Wenn zu viel Schmierstoff zwischen zwei Bauteilen vorhanden ist tritt Flüssigkeitsreibung ein. Flüssigkeitsreibung wirkt der Bewegungsrichtung entgegen und führt folglich zu erhöhten Reibkräften. In Abbildung 2-8 ist die Stribeck-Kurve dargestellt, in der der Zusammenhang zwischen dem Reibungsbeiwert  $\mu$  und der Geschwindigkeit  $v$  darstellt.

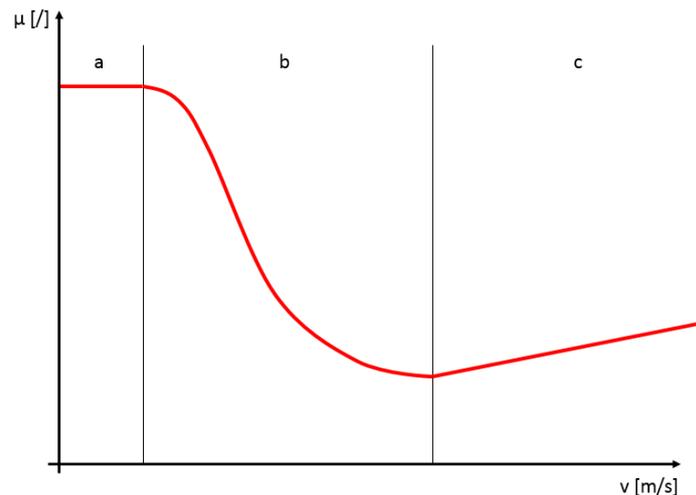


Abbildung 2-8: Stribeck-Kurve

Zu Beginn ( $v=0$ ) besteht Haftreibung. Um diesen Zustand zu überwinden wirkt eine Grenzkraft auf die Bauteile. Folglich tritt Grenzreibung (a) auf. Mit steigender Schmierfilmdicke entsteht Mischreibung (b). Bei Mischreibung werden die Rauigkeitsspitzen der Bauteile völlig mit Öl bedeckt. Bei anwachsendem Schmierfilm tritt Flüssigkeitsreibung ein (c). Die Stribeck-Kurve trägt entlang der Ordinate die Geschwindigkeit auf. Um auf die Schichtdicke zu gelangen, muss die Impulsgleichung für kleine Strömungsgeschwindigkeiten gelöst werden (siehe Kapitel 3).

Das Ziel ist ein Optimum der Menge an Schmierstoff zu finden, um in den Bereich der Mischreibung zu agieren. Bei Flüssigkeitsreibung steigt die Reibkraft linear mit der Relativgeschwindigkeit. Im Schmierfilm bilden sich Wirbel, die gegen die Relativbewegung der Bauteile gerichtet sind, und so die Reibkraft erhöhen. Der Verschleiß ist bei Flüssigkeitsreibung am geringsten, da kein Abscheren der Rauigkeitsspitzen eintritt. Für die Bauteilbelastung ist dieser Zustand aber nicht anzustreben. Bei Wälzkörpern erhöht der dicke Fluidfilm die Reibkräfte und folglich Wälzlagerreibung. Neben der erhöhten Reibung kann dies bei zu großen Schmierfilmen auch zum Gleiten der Wälzkörper führen, wodurch diese zerstört werden.

### 2.3.2 Kühlwirkung von Öl

Bei vielen Anwendungen übernimmt der Schmierstoff einen wesentlichen Teil der Kühlung. Kühlung ist erforderlich, da aufgrund der Reibung Wärme entsteht. Reibung entsteht im Kontakt zwischen zwei Bauteilen, wie zum Beispiel bei Wälzlagern. Im Kontaktbereich zwischen Wälzkörper und Laufbahn entsteht reibungsbedingt Wärme, welche von den Bauteilen abgeführt werden muss. Bei Wälzlagern besteht ein Zusammenhang von Vorspannung und Drehzahl zu Reibleistung, welche wieder direkt in Wärme umgewandelt wird. Infolge des Zahneingriffes der Zahnräder entsteht an den umfangsseitig wirkenden Tangentialkräften reibungsbedingt Wärme. Ein hoher Wärmeeintrag an metallischen Oberflächen führt ohne Kühlung zu Gefügeänderungen im Werkstoff. In weiterer Folge verändern sich die mechanischen Eigenschaften, wie zum Beispiel die Festigkeit.

Um die entstehende Wärme abzutransportieren, muss ein Transportstoff im Getriebe verwendet werden. Diese Aufgabe übernimmt das Öl. Aufgrund des nullten Hauptsatzes der Thermodynamik, welcher besagt, dass Wärme vom System höherer Temperatur zum System niedriger Temperatur übergeht, wird die Wärme der heißen Bauteile vom kalten Öl entzogen und abtransportiert. Neben dem Ölfluss befinden sich, zufolge der feinen Zerstäubung durch das einschlagen der Zähne in die Ölsumpfoberfläche, Öltropfen in der Luft. Dieses heterogene Luft-Öl Gemisch benetzt und kühlt Bauteile, die vom definierten Ölfluss nicht erreicht werden. Das Gemisch wandert zu den warmen Bauteilen. An der Oberfläche schlägt sich das kältere Öl nieder. Beim Überschreiten einer Grenzmenge fließt das gesammelte Öl ab und kühlt so die umströmten Bauteile zusätzlich zu den schmierkreislaufbedingen Ölflüssen.

Wenn das mit Wärmeenergie angereicherte Öl erneut in den Ölsumpf fließt, kommt es in diesem zu einem Temperatenausgleich. Aufgrund der eingebrachten Wärmeenergie erwärmt sich das Öl im Sumpf kontinuierlich. Durch die Drehung der Zahnräder wird leicht erwärmtes Öl mittransportiert und fließt zu den warmen Bauteilen. Dort erwärmt sich das Öl wieder und fließt in den Sumpf zurück. Durch diesen kontinuierlichen Vorgang erwärmt sich der Sumpf bis zu einer Grenztemperatur. Die Grenztemperatur wird vom Öl vorgegeben, da die Lebensdauer des Öls von der Temperatur abhängt.

Zusammenfassend kann über die Kühlwirkung des Öls gesagt werden, dass bei kaltem Öl mehr Wärme entzogen werden kann, da der Temperaturgradient größer ist. Dieses Phänomen ist auf die Wärmetransportarten zurückzuführen. Auf die Art des Wärmetransportes wird in Kapitel 3 genauer eingegangen.

### 2.3.3 Dichtwirkung des Öls

Das Öl fungiert wie bereits bekannt als Reibungsminderer und Wärmetransportmedium, erfüllt aber zusätzlich häufig eine Dichtfunktion. Aufgrund des Einsatzgebietes von Getrieben, welcher weder Laborbedingungen entspricht, noch absolut sauber sind, ist immer mit Schmutz und parasitären Stoffen zu rechnen. Von außen einwirkende Stoffe führen im Getriebeinnenraum zu Beschädigungen. Je nach Relativbewegung unterscheidet man statische und dynamische Dichtungen.

Statische Dichtelemente werden bei stehenden Bauteilen verwendet, oder zum Abdichten von Verschlusselementen, wie Deckeln oder Stützelementen. Beispiele für statische Dichtelemente sind der O-Ringen oder eine Flachdichtung.

Führen zwei Bauteile eine Relativbewegung aus, wie etwa eine Getriebewelle zum Gehäuse, kommen dynamische Dichtelemente zum Einsatz. Die gängigste Art um in Getrieben sich relativ zueinander bewegenden Bauteilen (z.B.: Wellen und Gehäuse) gegeneinander abzudichten ist mittels Radialwellendichtring. Jene Bauteile werden fest mit dem Gehäuse (stehende Komponente) verbaut und haben eine Dichtlippe, welche Kontakt mit der Welle (rotierende Komponente) hat. Die Ausführung eines Radialwellendichtringes fordert das Vorhandensein von Öl, da das Schmiermittel als Reibungsminderer zwischen Dichtlippe und Welle fungiert. Durch den vorhandenen Schmierstoff schwimmt die Dichtlippe auf der Welle. Zusätzlich transportiert der Schmierstoff die entstehende Wärme ab. Bei Anstauung von Wärme würde der aus Kunststoff bestehende Radialwellendichtring thermisch überlasten und versagen.

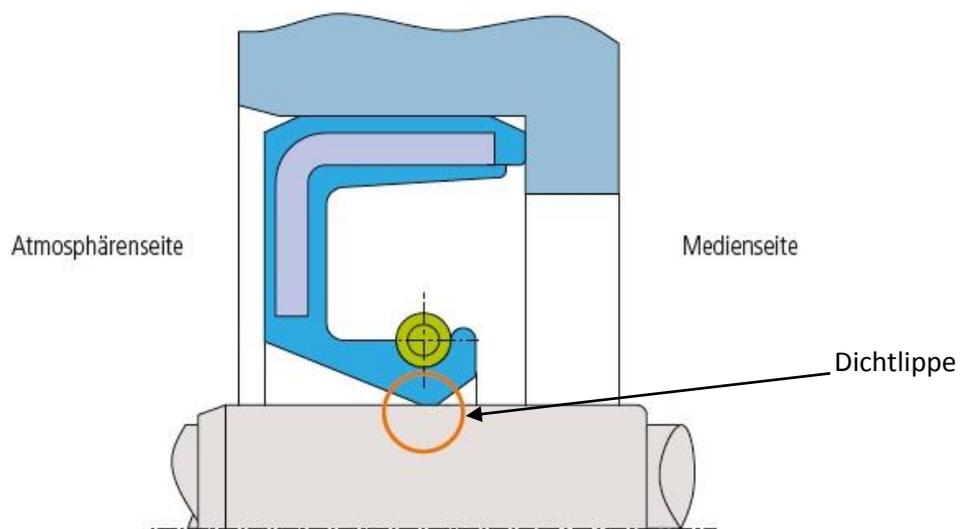


Abbildung 2-9: Radialwellendichtring – Dichtlippe [12]

### 3 Strömungsgrundlagen

Um Schmierkreisläufe zu untersuchen bestehen mehrere Möglichkeiten. Neben dem Prüfstandtest kann der Schmierkreislauf rechnerisch analysiert werden. Die rechnerische Beurteilung unterteilt sich wiederum in eine analytische und eine numerische Rechnung, wobei die Numerik der Analytik zugrunde liegt. Daher müssen die theoretischen Zusammenhänge einer Strömung geklärt und beschrieben werden. Im folgenden Kapitel werden all jene strömungstechnischen Aspekte erklärt und angeführt, welche in einem Getriebe auftreten.

Die Kenntnis analytischer Zusammenhänge im Schmierkreislauf sind von großem Wert, da folglich bei Neukonstruktionen von Getrieben erste grobe Abschätzungen getroffen werden. Bei der Planung des Schmierkreislaufes wird auf Erfahrung und auf analytisches Wissen zurückgegriffen.

#### 3.1 Erhaltungsgleichungen

Inhaltlich stützt sich das folgende Kapitel auf die Quelle [13].

Die Grundgleichungen der Strömungslehre sind die Kontinuitätsgleichung, die Impulsgleichung und die Energiegleichung. Diese Gleichungen sind unter dem Begriff Erhaltungsgleichung zusammengefasst. Mit diesen drei Gleichungen ist es möglich eine einfache laminare Strömung analytisch zu beschreiben. Die Kontinuitätsgleichung basiert auf der Massenerhaltung. Die Massenerhaltung besagt, dass die zeitliche Änderung der Masse im inneren des Kontrollvolumens gleich der Summe durch zu- und abfließenden Massen sein muss.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla}(\rho \vec{u}) = 0 \quad (3.1)$$

$\frac{\partial \rho}{\partial t}$  beschreibt die Änderung der Dichte  $\rho$  (folglich der Masse) nach der Zeit  $t$  im Kontrollvolumen.  $\vec{\nabla}(\rho \vec{u})$  stellt den Massentransport über die Grenzen des Kontrollvolumens dar.

Die Impulsgleichung definiert, dass die Änderung des Impulses im Kontrollvolumen gleich den am Kontrollvolumen angreifenden Kräften sein muss. Die Änderung des Impulses beinhaltet die zeitliche Änderung des Impulses, zuzüglich des austretenden, abzüglich des eintretenden Impulses. Die angreifenden Kräfte unterteilen sich in Oberflächenkräfte und Volumenkräfte.

$$\frac{\partial \rho \vec{u}}{\partial t} + \vec{\nabla}(\rho \vec{u} \vec{u}) = \vec{\nabla} \vec{\sigma} + \rho \vec{f}^b \quad (3.2)$$

$\frac{\partial \rho \vec{u}}{\partial t}$  definiert die zeitliche Änderung des Impulses.  $\vec{\nabla}(\rho \vec{u} \vec{u})$  beschreibt die Impulsänderung zufolge des über die Systemgrenzen tretenden Impulses.  $\vec{\nabla} \vec{\sigma}$  stellt die Kräfte zufolge Spannungen dar, die am System angreifen.  $\rho \vec{f}^b$  berücksichtigt die Massenkräfte des Kontrollvolumens.

Die Energiegleichung beschreibt die Änderungen der Energien im Kontrollvolumen. Die Energieänderung (kinetische und innere Energie) kann aufgrund einer zeitlichen Änderung, oder zufolge des Energietransportes über die Systemgrenzen erfolgen. Diese Änderungen basieren auf den Änderungen der Leistungen, der am Kontrollvolumen angreifenden äußeren Kräften, und der übertragenen Wärmeleistungen durch Leitung und innere Quellen.

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[ \rho \left( e + \frac{\vec{u}^2}{2} \right) \right] + \left[ \vec{\nabla} * \rho \vec{u} \left( e + \frac{\vec{u}^2}{2} \right) \right] = \rho (\vec{u} * \vec{f}^b) - (\vec{\nabla} p \vec{u}) + \vec{\nabla}(\vec{u} * \vec{v}) - (\vec{\nabla} * \vec{q}) + \dot{q}_Q \quad (3.3)$$

$\frac{\partial}{\partial t} \left[ \rho \left( e + \frac{\bar{u}^2}{2} \right) \right]$  beschreibt die zeitliche Änderung der inneren Energie  $e$  und der kinetischen Energie  $\frac{\bar{u}^2}{2}$ .  
 $\bar{\nabla} * \rho \bar{u} \left( e + \frac{\bar{u}^2}{2} \right)$  definiert die Änderung der Energien zufolge eines Übertrittes über die Systemgrenzen.  
 $\rho(\bar{u} * \vec{f}^b)$  beschreibt die Änderung der Leistung der Massenkraft,  $(\bar{\nabla} p \bar{u})$  die Leistungsänderung zufolge Druckkräften,  $\bar{\nabla}(\bar{u} * \vec{\tau})$  die Änderung der Leistung der Schubspannungsterme.  $(\bar{\nabla} * \vec{q})$  und  $\dot{q}_Q$  beschreiben die Leistungsänderung durch Wärmeleitung ( $q$ ) und die Einbringung innerer Quellen  $q_Q$ .

Mit den drei Erhaltungsgleichungen ist es möglich eine Strömung zu charakterisieren. Im Fall der Schmierkreislaufuntersuchungen hat die Impulsgleichung die größte Aufgabe und wird folglich genauer behandelt. Bei geschlossenen Systemen und ohne einen Energieeinschub erfahren die Kontinuitätsgleichung und die Energiegleichung keine großen Änderungen.

Demnach tritt die erste Einschränkung ein, da folglich Energiequellen wie Wärmeeinschübe durch Lagerreibung unberücksichtigt bleiben. Aufgrund der Komplexität der Thematik sind in der Analytik Vereinfachungen unumgänglich.

## 3.2 Navier-Stokes Gleichung

Inhaltlich stützt sich das folgende Kapitel auf die Quelle [13].

Die Navier-Stokes Gleichung, kurz NSG, vereinfachen die Impulsgleich. Im Fall von Schmierkreislaufuntersuchungen und folglich quasi inkompressiblen Medien, sowie unter Berücksichtigung der Viskosität (dynamisch und kinematisch), kann die Impulsgleichung in eine Form gebracht werden, die sie für breite Anwendungen vereinfacht und nutzbar macht.

### 3.2.1 Grundlagen zu reibungsbehafteter Strömung

Bei reibungsbehafteten Strömungen treten in den Erhaltungsgleichungen unbekannte Terme auf wie:

- $\rho$
- $p$
- $\bar{u}$
- $e$
- $\bar{\sigma}$

Um die Gleichungen analytisch zu lösen muss vorher die Anzahl der unbekanntem ermittelt werden. Der Geschwindigkeitsvektor  $\bar{u}$  beinhaltet drei unbekanntem Größen. Der Spannungstensors 2. Ordnung  $\bar{\sigma}$  beinhaltet 9 unbekanntem Größen. Zuzüglich der Dichte  $\rho$ , der spezifische innere Energie  $e$  und dem Druck  $p$  sind 15 unbekanntem Größen vorhanden. Mit den Erhaltungsgleichungen werden fünf Gleichungen zum Lösen des Problems gelöst. Um eine eindeutige Lösung zu erhalten müssen weitere 9 Gleichungen ermittelt werden.

Durch das Hinzufügen der thermischen und kalorischen Zustandsgleichung, Boltzmann-Axiom und Stoffgesetze wird das System analytisch eindeutig gelöst [13]. Das Stoffgesetz liefert den Zusammenhang zwischen Spannung und Geschwindigkeit (siehe Gleichung (2.2)). Dieser Zusammenhang führt zum Stokeschen Reibungsgesetz und fortan zu den Navier-Stokes Gleichungen.

### 3.2.2 Stokes'sches Reibungsgesetz und die Navier-Stokes Gleichung

Die Verzerrung eines Kontinuums zufolge einer Strömung basiert analytisch auf der mechanischen Verzerrung. Die mechanische Verzerrung (Dehnung  $\varepsilon$ ) ist laut Hook'sches Gesetz eine Kombination aus:

$$\bar{\sigma} = E * \varepsilon \quad (3.4)$$

Die Dehnung  $\varepsilon$  wird allgemein mit:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (3.5)$$

Die Dehnung ist Einheitenlos. Wie in Gleichung (3.5) stellt sie das Verhältnis der Längenänderung  $\Delta l$  zur Ausgangslänge  $l_0$  dar.

Die Deformation eines infinitesimalen Teilchens kann in Analogie zur Dehnung durch:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u^*}{\partial x} \quad (3.6)$$

definiert werden. Bei Änderung einer Verschiebung  $u^*$  in der jeweiligen Hauptkoordinate (u-x; v-y; w-z) spricht man von einer Dehnung  $\varepsilon_x$ .

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u^*}{\partial y} + \frac{\partial v^*}{\partial x} \quad (3.7)$$

beschreibt eine Verzerrung in mehrere Koordinaten. Diese Koordinaten entsprechen nicht den Hauptkoordinaten.

Die Dehnungen in x, y und z Richtung können addiert und zusammenfassend als Volumendilatation  $j$  geschrieben werden mit:

$$j = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z \quad (3.8)$$

Betrachtet man kleine Winkeländerungen unter Berücksichtigung des Hook'schen Gesetzes für Schubspannungen mit:

$$\tau_{xy} = G \gamma_{xy} \quad (3.9)$$

wobei  $G$  als Schubmodul mit:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu_E)} \quad (3.10)$$

definiert ist.

Die Querkontraktionszahl  $\nu_N$  stellt die Quer- zu Längsdehnung dar. Abschließend kann die Normalspannung  $\sigma_{xx}$  mit den gewonnenen Erkenntnissen beschrieben werden mit:

$$\sigma_{xx} = 2G \varepsilon_x + 2Gj \frac{\nu_E}{1-2\nu_E} \quad (3.11)$$

Um die Festkörpermechanik in die Strömungsmechanik überzuführen, wird die Beziehung

$$\vec{u}^* \rightarrow \vec{u} \quad (3.12)$$

verwendet.

Unter Berücksichtigung aller Gleichungen (3.1) bis (3.12) und der Annahme, dass die Volumendilatation  $j$  zufolge des Druckes  $p$  entstehen kann zusammenfassend geschrieben werden:

$$\tau_{xx} = \eta \left( 2 \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \operatorname{div} \vec{u} \right) \quad (3.13)$$

Wobei mit „ $\operatorname{div} \vec{u}$ “ die Divergenz vom Geschwindigkeitsvektor  $\vec{u}$  definiert ist.

Divergenz ist definiert durch:

$$\operatorname{div} \vec{u} = \vec{\nabla} * \vec{u} = \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial z} \end{pmatrix} \quad (3.14)$$

Die Gleichung (3.13) wird auf  $\tau_{yy}$  und  $\tau_{zz}$  angewandt. Die Schubspannungen, z.B.  $\tau_{xy}$ , basieren auf einer Kombination aus den Verzerrungen, sowie der dynamische Zähigkeit  $\eta$  mit

$$\tau_{xy} = \eta * \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (3.15)$$

Abschließend kann die Navier-Stokes'sche Gleichung angeschrieben werden mit:

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} * \vec{\nabla}) \vec{u} = -\frac{1}{\rho} \vec{\nabla} p + \nu \Delta \vec{u} + \vec{f}^b \quad (3.16)$$

$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t}$  definiert die zeitliche Änderung des Impulses bei konstanter Dichte (inkompressible Medien).  $(\vec{u} * \vec{\nabla}) \vec{u}$  beschreibt die Impulsänderung zufolge räumlicher Änderung,  $-\frac{1}{\rho} \vec{\nabla} p$  beinhaltet die Druckänderung,  $\nu \Delta \vec{u}$  beschreibt den diffusiven Impulstransport und  $\vec{f}^b$  die Volumenkraft.

Durch die gewonnene Erkenntnis der NSG ist es nur unter einer Vielzahl von Einschränkungen möglich Strömungen analytisch zu beschreiben. Allein die NSG in der Form von Gleichung (3.16) können nur für inkompressible Newtonsche Fluide ohne Wärmeübergang verwendet werden.

Die Vereinfachung der Inkompressibilität ist für niedrige Drücke bei Ölen ein geringes Problem. Die Schwierigkeit liegt im Informationsverlust durch die isotherme Sichtweise. Die Temperaturabhängigkeit der Viskosität muss folglich vernachlässigt werden, welche zu enormen Reduktionen der Aussagegüte führen.

Weitere Vereinfachungen, die in den folgenden Kapiteln gültig sind:

- inkompressible (bei geringen Drücke vertretbar)
- kein Wärmeübergang (Isotherm; großer Einschnitt in die Realität)

### 3.2.3 Laminare Strömung

Die laminare Strömung ist ein Überbegriff für eine Schichtströmung, was einer Strömung entspricht die nur Längsbewegungen, keine Querbewegungen aufweist (siehe Abbildung 3-1). Der Name Schichtströmung leitet sich ab aus den Schichten, die gestapelt übereinander gleiten.

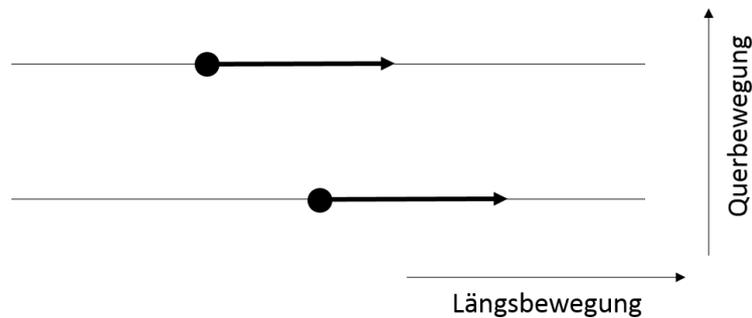


Abbildung 3-1: Längs/Querströmung

Laminare Strömungen treten in Getrieben, bei 2-dimensional Betrachtung und reibungsfreien Oberflächen, in vielen Bereichen auf. Beispielsweise zwischen der Stirnseite der Zahnräder und der Gehäuseinnenwand. In Abbildung 3-2 ist ein Schnittbild eines Getriebes dargestellt. Der konstruktive Schnitt zeigt das volle Zahnrad mit den gefüllten Zahnräumen. Folglich ist der laminare Schleppfall eindeutig ersichtlich.

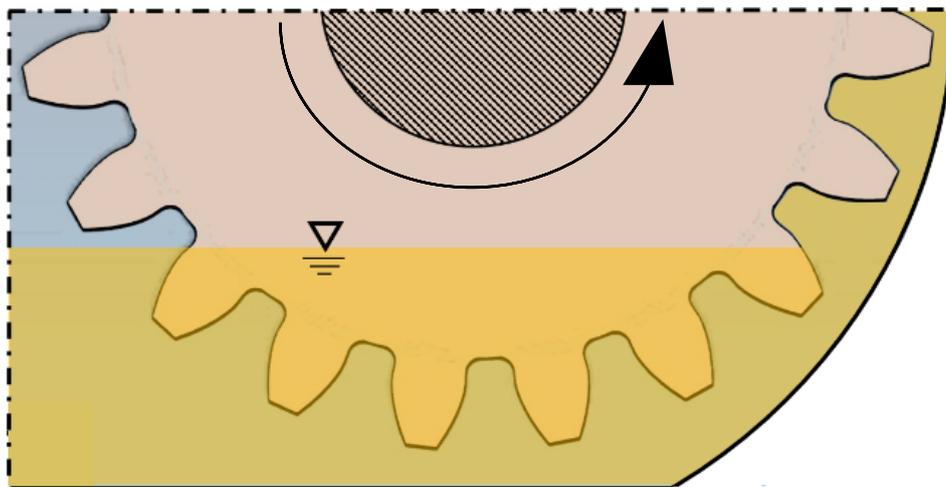


Abbildung 3-2: Gehäuseschnitt Ölmitnahme

Für die analytische Beschreibung von laminaren Strömungen sind folgende Vereinfachungen anzuwenden:

- die Strömung ist entwickelt (Geschwindigkeitsprofil konstant in Fließrichtung)
- die Wand ist undurchlässig (keine Querbewegung, folglich laminare Strömung)
- die Strömung ist stationär (zeitliche Änderungen werden vernachlässigt)
- gewichtskräfte des Öls werden vernachlässigt

Eine Strömung die all diese Vereinfachungen erfüllt wird als Druck-Schlepp-Strömung bezeichnet.

### 3.2.3.1 Druck – Schlepp - Strömung

Die Druck-Schlepp-Strömung setzt sich, wie aus dem Namen ersichtlich, aus einem Druck- und einem Schleppanteil zusammen. Der Schleppteil entsteht zufolge von Zugkräften von beispielsweise einer Platte die über den Schmierfilm gezogen wird. Der Druckanteil basiert auf der Impulsgleichung.

In Abbildung 3-3 ist ein solches Druck-Schlepp-Strömungsprofil dargestellt. Das resultierende Profil basiert auf einer Summation der Einzelprofile.

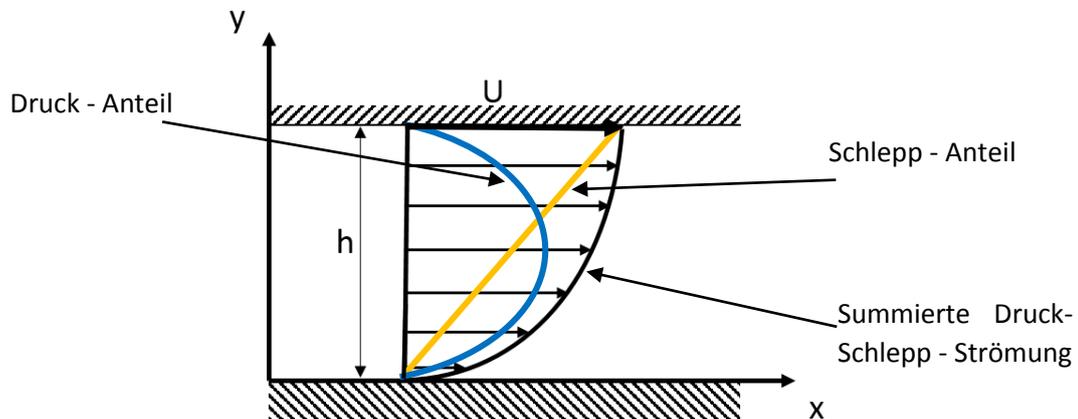


Abbildung 3-3: Druck-Schlepp-Strömung

Bei Anwendung aller Vereinfachungen aus 3.2.3, vereinfacht sich die Kontinuitätsgleichung zu:

$$\frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (3.17)$$

Aufgrund der entwickelten Strömung ist die Änderung  $\frac{\partial}{\partial x}$  Null. Aus Gleichung (3.17) ist ersichtlich, dass die Geschwindigkeit  $v$  im gesamten Strömungsfeld konstant sein muss.

Die Impulsgleich in x-Koordinate vereinfacht sich infolge der Bedingungen zu:

$$0 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (3.18)$$

Die Impulsgleichung in y-Koordinate zu:

$$0 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \quad (3.19)$$

Aus der Gleichung (3.19) geht hervor, dass der Druck keine Funktion der y-Koordinate ist, da die Änderung des Druckes nach  $y$  Null ist. Bei doppelter Integration von (3.18), sowie den Randbedingungen:

- $y$  gleich Null (an der Wand)
- $u$  gleich Null (stehende Strömung)
- $y$  gleich  $h$
- $u$  gleich der Umfangsgeschwindigkeit  $U_{ZR}$

Zusammenfassend lautet das Geschwindigkeitsprofil für die Druck-Schlepp-Strömung:

$$u(y) = U_{ZR} \frac{y}{h} - \frac{1}{\eta} \frac{dp}{dx} \frac{h^2}{2} \left( \frac{y}{h} - \left( \frac{y}{h} \right)^2 \right) \quad (3.20)$$

Die Umfangsgeschwindigkeit des Zahnrades  $U_{ZR}$  ist definiert durch:

$$U_{ZR} = Dn\pi \quad (3.21)$$

Mit der gewonnenen Erkenntnis aus der Gleichung (3.20) kann eine erste Abschätzung getroffen werden, welche für die Schmierung ausschlaggebend ist. Die Kenntnis über den maximalen Spaltabstand zwischen der Zahnradflanke und dem Gehäuse ist ausschlaggebend für:

- die Menge des beförderten Schmierstoffes
- implizit die Mindestdrehzahl bis eine Schmierung eintritt
- die Kenntnis der Mindestviskosität

Bei erfolgreicher Förderung des Schmierstoffes in höhere Lagen beginnt das Fluid, infolge der Schwerkraft, sich zu verteilen und die Getriebekomponenten zu schmieren. Die schwerkraftgedrängte Filmströmung wird im folgenden Kapitel beschrieben.

### 3.2.3.2 Filmströmung an einer freien Oberfläche

Durch die Zahnradrotation wird Schmierstoff in höhere Lagen gefördert. Von diesen Positionen fließt das Fluid aufgrund der Schwerkraft nach unten, dabei schmiert und kühlt es die reibungsbehafteten Komponenten. Der Fließvorgang, der vom Schmierstoff ausgeführt wird, ist analytisch ohne Vereinfachungen nicht zu beschreiben. Die angenommene Vereinfachung, die zu starken Abweichungen der Realität führt, ist die Annahme der Betrachtung einer reibungsfreien Oberfläche. Dadurch wird die Strömung unter atmosphärischem Druck beschrieben, wodurch keine erhöhten Drücke, welche in Getrieben auftreten können, berücksichtigt werden. In Abbildung 3-4 ist eine Filmströmung dargestellt, die diesen Vereinfachungen unterliegt.

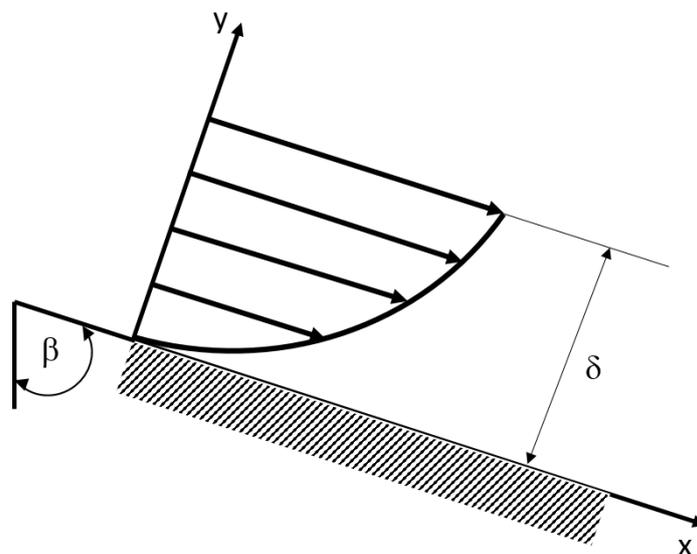


Abbildung 3-4 Filmströmung an freier Oberfläche

Neben den genannten Randbedingungen sind weitere Vereinfachungen anzuwenden, um eine Filmströmung mit einem analytischen Ansatz zu beschreiben:

- die Umgebung gasförmig ist und weist kein viskoses Verhalten aufweist (vereinfacht ein Getriebe dahin, dass der Ölnebel unberücksichtigt bleibt)
- inkompressibles Newton'sches Fluid
- Strömung in x-Richtung ist entwickelt
- stationäre Strömung
- Druckgradient in x-Richtung ist nicht vorhanden

Wie bei den meisten strömungsmechanischen Betrachtungen ist die Wand undurchlässig. In der Gleichung (3.17) wird die Vereinfachung der Kontinuitätsgleichung für eine Filmströmung dargestellt.

Durch Anwendung der Vereinfachungen, sowie der aus Gleichung (3.17) gewonnenen Erkenntnis, bleibt bei der Betrachtung der Impulsgleichung für die x- Koordinate lediglich:

$$\frac{\eta}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + g \cos(\beta) = 0 \quad (3.22)$$

und für die y-Koordinate:

$$0 = -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dy} - g \sin(\beta) = 0 \quad (3.23)$$

Durch zweimaliges Integrieren der Gleichung (3.22) und unter Berücksichtigung der Randbedingung:

- Geschwindigkeit  $u$  an der Wand ( $y = 0$ ) gleich Null
- Geschwindigkeitsgradient  $\frac{\partial u}{\partial y}$  an der Stelle  $\delta$  gleich Null (kein Impulsaustausch zwischen Öl und dem gasförmigen Medium)

$$u(y) = \frac{\rho g \cos(\beta)}{\eta} y \left( \delta - \frac{y}{2} \right) \quad (3.24)$$

Durch die Gleichung (3.24) ist das Geschwindigkeitsprofil der freien, schwerkraftbasierten, Filmströmung beschrieben.

Die Druck-Schlepp Strömung und die freie Filmströmung sind die am häufigsten auftretenden laminaren Strömungsfelder. Neben den laminaren gibt es jedoch noch die turbulenten Strömungen, welche jedoch anderen Berechnungsvorschriften unterliegen. Ob nun eine Strömung laminar oder turbulent ist, hängt von mehreren Faktoren ab. Dies Faktoren werden als dimensionslose Kennzahlen bezeichnet. Bevor turbulente Strömungen und strömungsorientierte Kennzahlen beschrieben werden, muss der Hintergrund geklärt werden, warum reibungsbehaftete Strömungen auftreten. Dieses Phänomen basiert auf der Grenzschichttheorie.

### 3.3 Grenzschichttheorie

Inhaltlich stützt sich das folgende Kapitel auf die Quelle [13].

Als Grenzschicht wird eine dünne, über eine Länge aufrecht erhaltene Schicht verstanden, die aufgrund von Reibung oder Temperaturunterschieden zwischen dem vorbeiströmenden Medium und der Oberfläche entstehen. Folglich wird zwischen Geschwindigkeitsgrenzschichten (reibungsbasiert) und Temperaturgrenzschicht (basierend auf einem Temperaturunterschied von Wand und vorbeiströmenden Fluid) unterschieden.

#### 3.3.1 Geschwindigkeitsgrenzschicht

Die Geschwindigkeitsgrenzschichten können „relativ“ Dick werden, wobei dann die Gefahr des Ablösens besteht. Unter Ablösen wird ein Abheben der Grenzschicht und somit ein Lösen und örtliches Entfernen verstanden. In Abbildung 3-5 ist die Einteilung von Geschwindigkeitsgrenzschichten bezüglich ihres Ablöseverhaltens dargestellt.

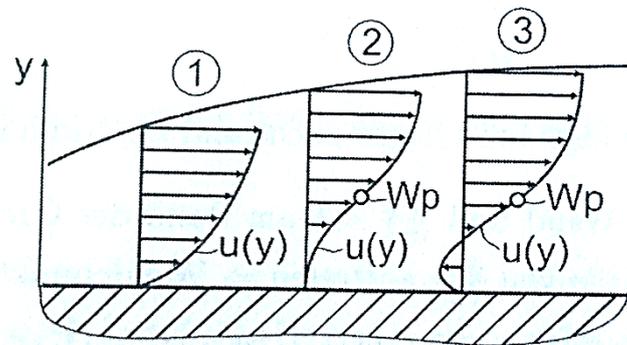


Abbildung 3-5: Grenzschichten [13]

Die erste Grenzschicht (mit 1 gekennzeichnet) zeigt ein normales, für eine Grenzschicht typisches Geschwindigkeitsprofil. Im zweiten Profil ist am Rand zur Oberfläche ein spitzeres Ende sichtbar, welches zufolge des Wendepunktes (WP) auftritt. Dieses Profil ist als Grenzschicht gerade noch zulässig und es tritt kein Ablösen auf. Im dritten Profil ist eine Bewegungsumkehr des Geschwindigkeitsprofils dargestellt, was auf ein Ablösen der Grenzschicht hindeutet. Die Ablösung der Grenzschicht basiert auf einem energetischen Grundsatz. Die Teilchen in der Grenzschicht besitzen ab einer bestimmten Dicke zu wenig Energie um gegen den erhöhten Druckgradienten anzukämpfen, wodurch es zum Ablösen kommt.

Zu den charakteristischen Eigenschaften von Geschwindigkeitsgrenzschichten ist zu sagen, dass die Geschwindigkeit an der Wand immer null ist und an der Oberkante der Grenzschicht der Geschwindigkeit des vorbeifließenden Mediums entspricht.

### 3.3.2 Temperaturgrenzschichten

Neben den Geschwindigkeitsgrenzschichten, basierend auf Reibungseinfluss in der Strömung, existieren Temperaturgrenzschichten. Als Temperaturgrenzschicht bezeichnet man eine Grenzschicht die infolge eines Temperaturunterschiedes zwischen einem vorbeiströmenden Medium und der umströmten Oberfläche entsteht.

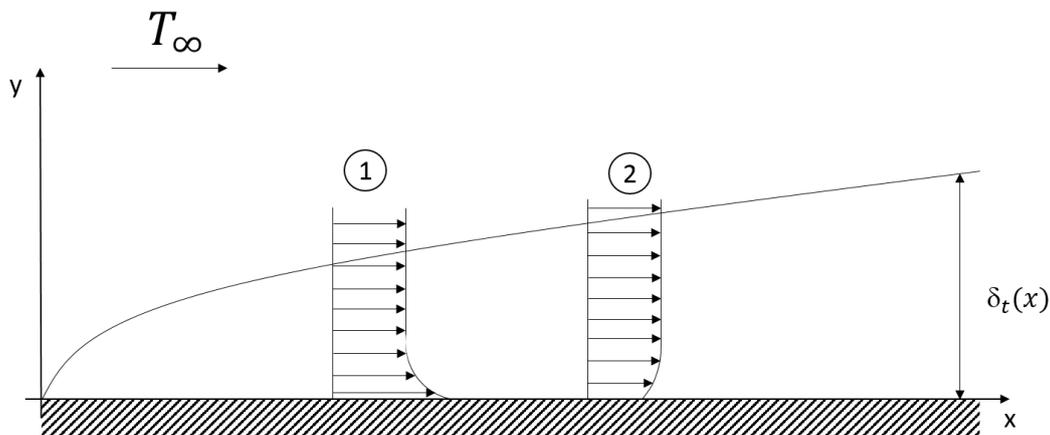


Abbildung 3-6: Temperaturgrenzschicht

In Abbildung 3-6 sind zwei Temperaturgrenzschichten dargestellt. Die erste Temperaturgrenzschicht (mit 1 gekennzeichnet) ist eine Grenzschicht, welche zufolge einer warmen Wand und kalten Strömung entsteht. Im zweiten Anwendungsfall (mit 2 gekennzeichnet) ist die Wandtemperatur geringer als die Fluidtemperatur.

Als Randbedingung wird bei Temperaturgrenzschichten immer die Temperatur an der Wand (bei  $y$  gleich null) und die Temperatur weit von der Wand entfernt ( $y \gg \delta_t$ ) angenommen. Geschwindigkeitsgrenzschichten und Temperaturgrenzschichten treten normalerweise nie separiert auf, sondern immer in Kombination. Welche dominierend in der Strömung auftritt wird über die Prandtl-Zahl bestimmt. Jene dimensionslose Kennzahl wird im folgenden Kapitel genauer beschrieben.

## 3.4 Kennzahlen

Inhaltlich stützt sich das folgende Kapitel auf die Quelle [13].

Kennzahlen sind ein hilfreiches Werkzeug das sich die Entdimensionierung von Größen durch Multiplikation und Division zunutze macht, um Vorgänge durch Quantifizierung in Schemen einzuordnen. Die wichtigste strömungstechnische Kennzahl ist die Reynolds-Zahl. Um Grenzschichten einzuordnen wird die Prandtl-Zahl verwendet. Nußelt-, Grashof- und Fourier-Zahl sind Kennzahlen, die im Metier der Wärmelehre Fuß fassen.

### 3.4.1 Reynolds-Zahl

Die strömungstechnisch wichtigste und am häufigste verwendete, dimensionslose Kennzahl ist die Reynolds-Zahl. Die Reynolds-Zahl, kurz „Re“, ist definiert durch:

$$Re = \frac{u \cdot L}{\nu} = \frac{\text{Trägheitskräfte}}{\text{Zähigkeitskräfte}} \quad (3.25)$$

Die Herleitung der Reynolds-Zahl basiert auf der Impulsgleichung. Mit der Reynolds-Zahl wird charakterisiert, ob eine Strömung laminar oder turbulent ist. Je nach Strömungsprofil, Oberfläche und wärmetechnischem Szenario ist die kritische Reynolds-Zahl unterschiedlich. Die kritische Reynolds-Zahl stellt die Schranke dar, die als Grenze zwischen laminar und turbulent angesehen wird.

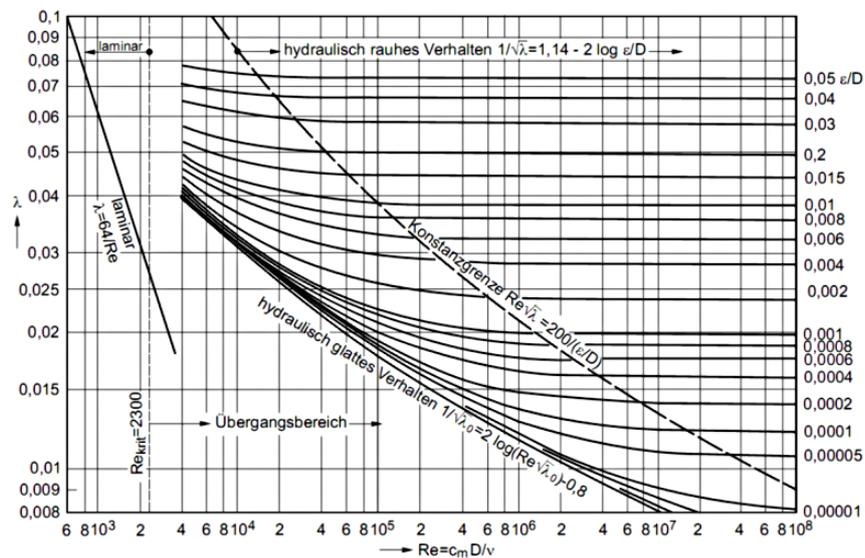


Abbildung 3-7: Moody Diagramm [14]

In Abbildung 3-7 ist ein Moody Diagramm dargestellt, welches als Schaubild dient, um bei bekannter Reynolds-Zahl und bekannter Rauigkeit auf die Strömung hinzuweisen.

### 3.4.2 Prandtl-Zahl

Die Prandtl-Zahl, kurz „Pr“, ist in der Energiegleichung enthalten, fundiert im Leitungsterm. Definiert wird die Prandtl-Zahl als Geschwindigkeitsdiffusion zur Temperaturdiffusion.

$$Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{c_p \eta}{\lambda} = \frac{\text{Geschwindigkeitsdiffusion}}{\text{Temperaturdiffusion}} \quad (3.26)$$

Die Prandtl-Zahl stellt einen Kennwert für Grenzschichten dar. Mittels der Prandtl-Zahl wird klassifiziert, ob es sich bei vorliegenden Strömungen um Temperaturgrenzschichten oder um Geschwindigkeitsgrenzschichten handelt. Es könne 3 Fälle definiert werden:

- Pr < 0
- Pr = 1
- Pr > 0

Geht die Prandtl-Zahl gegen Null, muss laut Gleichung (3.26) die Temperaturleitfähigkeit um vieles größer sein als die Geschwindigkeitsgrenzschicht. Diese Art von Grenzschicht tritt zum Beispiel bei flüssigen Metallen auf. Die Oberflächentemperatur liegt weit über 1.000 °C wobei die umströmende Lufttemperatur um vieles kühler ist. Auch die Strömungsgeschwindigkeit um das flüssige Metall ist sehr gering. Somit kann zusammenfassend gesagt werden, dass  $\delta_T \gg \delta$  ist.

Tritt der Fall ein, dass die Prandtl-Zahl größer als 0 ist und sich gegen  $\infty$  bewegt ist die Geschwindigkeitsgrenzschicht dominierend. Jenes Grenzschichtverhalten ist bei annähernd gleichen Temperaturen zwischen dem strömenden Fluid und dem umströmten Körper der Fall.

Wenn die Prandtl-Zahl gleich 1 ist, tritt der Sonderfall ein, dass beide Grenzschichten gleichbedeuteten sind. Jener Spezialfall schlägt sich explizit in der Nußelt-Zahl wieder. Bei Ölen ist die Prandtl-Zahl ungefähr 300. Folglich dominiert bei Ölen die Geschwindigkeitsgrenzschicht.

### 3.4.3 Nußelt-Zahl

Die Nußelt-Zahl, kurz „Nu“, ist eine dimensionslose Kennzahl, die zu Beschreibung des konvektiven Wärmeüberganges, welcher zwischen dem strömenden Medium und der Körperoberfläche auftritt, dient. Die Nußelt-Zahl ist definiert durch:

$$Nu = \frac{\alpha_F \cdot L_F}{\lambda_F} \quad (3.27)$$

### 3.4.4 Grashof-Zahl

Die Grashof-Zahl, kurz „Gr“, ist ausschlaggebend bei der Beschreibung von Wärmeflüssen durch Temperaturgrenzschichten.

$$Gr = \frac{g\beta(T_w - T_\infty)L_F^3}{\nu^2} = \frac{\text{Auftriebskräfte}}{\text{Zähigkeitskräfte}} \quad (3.28)$$

Die Grashof-Zahl in Verbindung mit der Reynold-Zahl ist ein Charakteristikum zur Klassifizierung der Konvektion. Die Konvektion ist eine Art von Wärmeeintrag. Die Wärmearten werden im weiteren Verlauf genauer erläutert. Bezüglich der Kombination von Grashof-Zahl und Reynolds-Zahl ist zu sagen

- $Gr \ll Re^2 \rightarrow$  erzwungene Konvektion
- $Gr \gg Re^2 \rightarrow$  freie Konvektion
- $Gr \sim Re^2 \rightarrow$  gemischte Konvektion

### 3.4.5 Fourier-Zahl

Die Fourier-Zahl, kurz „Fo“, definiert das wärmetechnische Speichervermögen eines Körpers.

$$Fo = \frac{\text{geleitete Wärmemenge}}{\text{gespeicherter Wärmemenge}} \quad (3.29)$$

Die Fourier-Zahl ist ausschlaggebend für die Wärme die im Getriebegehäuse gespeichert ist und beeinflusst die Temperaturgrenzschicht des Öls.

### 3.5 Turbulente Strömung

Inhaltlich stützt sich das folgende Kapitel auf die Quelle [13].

Auf Basis der Größe der Reynolds-Zahl wird folglich zwischen laminarer und turbulenter Strömung unterschieden. All jene genannten Methoden zur analytische Beschreibung von Strömungen in Getrieben sind zur Vordimensionierung zulässig, jedoch ausschließlich für laminare Strömungen anwendbar. Um turbulente Strömungen zu beschreiben, muss vorher der Begriff der Turbulenz beschrieben werden. In Abbildung 3-8 ist der Aufbau einer turbulenten Grenzschicht dargestellt.

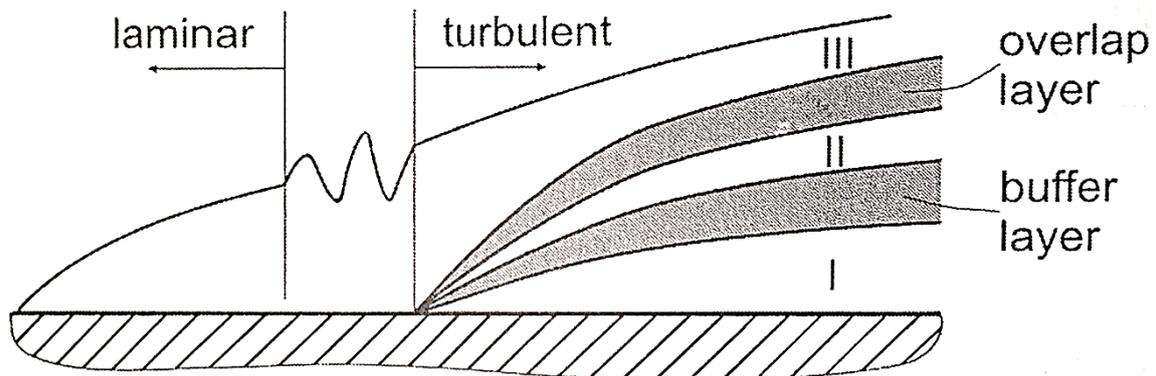


Abbildung 3-8: Schichten der Strömung [13]

In Wandnähe spricht man von einer „laminaren Unterschicht“. Darüber liegt ein „Buffer Layer“, der auf erste Querbewegungen hindeutet. Über dieser Trennschicht liegt die „turbulente Innenschicht“ in welcher bereits starke Querbewegungen nachweisbar sind. Über der „turbulenten Innenschicht“ befindet sich eine weitere Trennschicht mit der Bezeichnung „overlap layer“, welche starke Querbewegungen beinhaltet und nur noch wenig Anteil einer laminaren Strömung aufweist. Als Abschluss wird die „turbulente Oberschicht“ angeführt. In diese „turbulenten Oberschicht“ sind nur noch turbulente Bewegungen vorhanden. Starke Verwirbelungen treten auf und eine analytische Beschreibung ist nur noch im stark eingeschränkten Maße möglich.

Zur Beschreibung turbulenter Strömungen müssen Turbulenzmodelle herangezogen werden, welche jedoch auf unterschiedlichen Theorien basieren. Es existiert je nach Ansatz der Wandschubspannungsvergleiche, Mischwegansatz oder statistische Abweichungen von Strömungsfluktuationen. Da die meisten CFD Programme auf einem Fluktuationsansatz basieren wird dieser genauer erläutert.

### 3.5.1 Turbulenzmodell

Zur Kategorisierung der Strömung wird die  $Re$  herangezogen, wobei als Schwelle  $Re > Re_{krit}$  festgelegt ist. Ist die kritische Reynolds Zahl größer als die vorliegende Reynolds Zahl ( $Re < Re_{krit}$ ) so handelt es sich um eine laminare Strömung.

Prinzipiell gilt, dass turbulente Strömungen immer 3-Dimensional und instationär sind. Die NSG können in solchen Fällen nur bei extrem hohen  $Re$  Zahlen ( $Re > 10^5$ ) gelöst werden. Mittels „Direkte Numerische Simulation“, kurz „DNS“, könnten die Gleichungen gelöst werden, es werden aber viele Stützpunkte benötigt, was beim aktuellen Rechnerstand nicht umsetzbar ist. Daher stützt man sich auf Mittelung der Gleichungen. Die „Reynolds Average Numerical Simulation“, kurz „RANS“, ist die bekannteste und in der Strömungsmechanik am weitesten verbreitete. Bei den RANS werden die aktuelle Werte in einen Mittelwert und eine Fluktuation (Schwankung) unterteilt.

$$U_i = \bar{U} + u_i \quad (3.30)$$

Die RANS aus Gleichung (3.30) wird auf die Erhaltungsgleichungen angewandt. Aufgrund der Vereinfachung, dass die Fluktuation sehr klein ist und folglich die  $u_i^2$  sehr klein ist, vereinfachen sich die Kontinuitätsgleichung und die Impulsgleichung zu:

$$\frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_j} = 0 \quad (3.31)$$

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial t} + \bar{U}_j \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{U}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial x_j} \quad (3.32)$$

Jeder Term der Gleichung (3.31) und (3.32) ist analytisch beschreibbar, mit Aufnahme der Änderung der gemittelten Fluktuation von zwei Dimensionen nach einer Koordinate.

Um dies zu bestimmen muss das sogenannte „Schließungsproblem der Turbulenz“ gelöst werden. Die gemittelten Fluktuationen werden in einem Tensor zusammengefasst und fungieren scheinbar als eine Spannung. Um diese Scheinspannungen zu ermitteln gibt es zwei Möglichkeiten. Einerseits den Wirbelviskositätsansatz von Boussinesq und andererseits mittels RST (Reynold Stress Transport).

Der Wirbelviskositätsansatz besagt, dass die gemittelte Fluktuation als turbulente kinetische Energie betrachtet wird, welche eine Wirbelviskosität besitzt, die durch die gemittelten Geschwindigkeiten zu einem abklingen der turbulenten kinetischen Energie führen.

$$R_{ij} = \overline{u_i u_j} = \frac{2}{3} k \delta_{ij} - \nu_T \left( \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.33)$$

Die turbulente kinetische Energie  $k$  ist mit

$$k = \frac{\overline{u_1 u_1 + u_2 u_2 + u_3 u_3}}{2} \quad (3.34)$$

definiert.

Das RST ist eine Methode, die eigene Transportgleichungen herleitet, um die Scheinspannungen zu lösen. Es werden bis zu sechs Transportgleichungen schlagend.

Die strömungstechnischen Aspekte sind über Kennzahlen und Turbulenzansätze analytisch, mit Einschränkungen, beschreibbar. Aufgrund von Reibung entsteht im Getriebe Wärme, welche zum jetzigen Stand unberücksichtigt blieb. Um die Dissipationsenergien in einen analytischen Zusammenhang mit den anderen Energien, und in Zusammenhang mit der Strömungsanalytik zu bringen, muss der Begriff der Wärmelehre genauer erläutert werden.

### 3.6 Wärmelehre

Im Kapitel der Wärmelehre werden alle Phänomene beschrieben, die zu einem Austausch von Wärmeenergie beitragen. Weiter werden Kombinationen erläutert zwischen Strömungen und Wärme. Prinzipiell gibt es drei mögliche Arten wie ein Wärmeaustausch stattfinden kann.

#### 3.6.1 Strahlung

Jeder Körper mit einer Temperatur über dem absoluten Nullpunkt emittiert Strahlung. Das Strahlungsgesetz lautet

$$\dot{Q} = \sigma_s AT^4 \quad (3.35)$$

Aufgrund dieser Definition bestrahlen sich Körper gegenseitig. Die Strahlung gliedert sich in Absorption, Emission und Reflexion, wobei alle drei gemeinsam in Summe ein ergeben. Diese Erkenntnis lässt darauf schließen, dass die drei Phänomene quotienten sind, welche immer in Relation zur gesamten Strahlung stehen.

Neben der Strahlung muss die Strahlungseigenschaft des Körpers berücksichtigt werden. Ein idealer Körper, der bei einer bestimmten Temperatur die maximal mögliche Wärmestrahlung emittiert, wird schwarzer Körper genannt. Die Sonne ist ein schwarzer Körper, ansonsten existieren nur graue Körper. Graue Körper sind Körper, die bei einer bestimmten Temperatur nur einen gewissen Anteil (durch das Emissionsverhältnis gekennzeichnet) an Strahlung emittieren. Jenes Emissionsverhältnis ist abhängig von der Wellenlänge des Lichtes. Strahlung ist jenes wärmetechnische Phänomen, dass in Getrieben vernachlässigt werden kann, da durch die Größenordnung von  $\sigma_s$  der Wärmeeintrag aus der Temperaturdifferenz verschwindend gering ist.

#### 3.6.2 Leitung

Wärmeleitung ist definiert durch:

$$\vec{q} = -\lambda_F \vec{\nabla} T \quad (3.36)$$

Je nach Material unterscheidet sich die Wärmeleitung aufgrund des Wärmeleitungskoeffizienten  $\lambda_F$ . Weiter spielt auch die Schichtdicke und der Temperaturgradient für die Wärmeübertragung durch Wärmeleitung eine große Rolle.

$$\dot{Q} = \lambda A \frac{dT}{\delta} \quad (3.37)$$

Wie aus Gleichung (3.37) ersichtlich, treten alle Größen linear auf. Folglich ist eine Vorabschätzung einfacher. Die Wärmeleitung ist kein punktueller Vorgang, da sich bei einem Wärmeeintrag die umliegende Fläche auch erwärmen und so eine Streuung der Wärmeleitung eintritt. Materialien die Wärme leiten, speichern diese auch zwangsläufig. Die gespeicherte Wärmemenge wird mittels Fourier-Zahl definiert. Die Wärmeleitung ist jener Aspekt im Getriebe, der für eine Erwärmung ganzer Bauteile zufolge punktuell auftretender Reibung verantwortlich ist.

### 3.6.3 Konvektion

Konvektion basiert auf einem Wärmetausch zufolge von Stofftransport. Je nach Strömungsgeschwindigkeit spielt ein Auftriebsterm (fundiert in der Grashof-Zahl) eine Rolle, wodurch eine Unterscheidung zwischen:

- erzwungener Konvektion
- freier Konvektion
- gemischte Konvektion

herrscht.

Die grundlegende Bestimmung der Wärmeübertragung durch Konvektion ist definiert durch:

$$\dot{Q} = \alpha_F A dT \quad (3.38)$$

Die Wärmeübertragungszahl  $\alpha_F$  wird aus der Nußelt-Zahl bestimmt. Die Nußelt-Zahl ist eine Funktion mehrere Größen.

$$Nu = f(Re, Pr, Geometrie, \frac{T_1}{T_2})$$

In dieser Ansammlung mehrerer Kenngrößen spielt die Strömungsgeschwindigkeit eine große Rolle (Reynolds-Zahl). Dadurch ändert sich die Nußelt-Zahl und folglich auch  $\alpha_F$ .

Um Strömungen in Getrieben zu beschreiben, ist mit den bekannten analytischen Zusammenhängen möglich, jedoch aufgrund der diversen Einbußen an Realität nicht zielführend. Aufgrund der immer stärker werdenden Rechenleistungen von PCs treten CFD-Simulationen immer mehr in den Vordergrund. Alle CFD-Simulationen basieren auf den in Kapitel 3 gewonnenen Erkenntnissen, wodurch es unumgänglich ist diese zu verinnerlichen.

## 3.7 Zusammenfassung

Alle angeführten analytischen Zusammenhänge sind ausschließlich mit den ebenfalls angeführten Vereinfachungen verwendbar. Um diese groben Einschnitte in der Realität zu kompensieren ist die Numerik in den Vordergrund gerückt. Alle strömungstechnischen Aspekte sind lediglich für Vorabschätzungen verwendbar. Stützstellennachweise können nicht analytisch beschrieben werden.

Die Numerik basiert auf der Analytik (auf den Erhaltungsgleichungen). Folglich kann nicht von Numerik gesprochen werden, wenn nicht der Begriff der Analytik beschrieben wurde. Um einen Einblick in die Numerik zu schaffen wird die CFD Simulation erläutert.

## 4 CFD Simulation

Als CFD Simulation wird eine strömungstechnische Analyse verstanden. Basierend auf einem vernetzten Körper (Volumen) um Aufschluss über Strömungsverhalten zu erlangen. CFD Simulationen verfolgen das gleiche Schema:

1. Vernetzen des Systems
2. Randbedingungen festlegen
3. Solver wählen
4. Erhaltungsgleichungen lösen bis eingestelltes Residuum erreicht ist

Alle beschriebenen Schritte werden in den folgenden Kapiteln erläutert. Weiter wird ein Überblick über zweiphasen Systeme geschaffen, sowie die technische Relevanz der Solver diskutiert.

### 4.1 Allgemeines und Vernetzung

Inhaltlich stützt sich das folgende Kapitel auf die Quelle [15]

Um ein System analytisch zu untersuchen werden die Erhaltungsgleichungen gelöst. Bei komplexen Systemen ist ein analytisches Lösen der Erhaltungsgleichungen nicht mehr möglich. Um Strömungen mit komplexen Zusammenhängen zu beschreiben, werden CFD Simulationen verwendet. Die Simulation löst die Erhaltungsgleichungen numerisch. Dieser Vorgang wiederholt sich, bis ein Residuum erreicht ist. Residuum ist die vordefinierte Schranke, die zwischen zwei Rechenschritten als Differenz auftreten darf. Um die Rechnung durchführen zu können, muss das zu untersuchende Volumen vernetzt werden. Vernetzen bedeutet, dass ein Gitter über das Volumen gelegt wird, in dessen Knotenpunkten die Informationen der Erhaltungsgleichungen (Geschwindigkeit, Druck, Dichte) gespeichert sind.

Grundsätzlich können CFD Programme selbständig ein Netz aufbereiten, dies führt jedoch zu ungenauen Resultaten, aber kurzen Rechenzeiten. Eigenständig erzeugte Netze sind grob mit wenig Knotenpunkten, worauf die Ungenauigkeit beruht. Ungenau Ergebnisse folgen aus der Unkenntnis des Programmes von möglichen Grenzschichten, Stößen oder Wärmeeinträgen, die vom Nutzer des Programmes vorab ermittelt werden müssen. Wenn das Gitter zu fein ist folgen unnötig lange Rechenzeiten zufolge der Vielzahl an Knoten.

Bei den Vernetzungsmöglichkeiten wird zwischen „Bottom up“ und „Top down“ unterschieden. „Bottom up“ bedeutet, dass das Gitter von Grund auf vom Nutzer erzeugt wird. Diese Netzgenerierung ist Zeitaufwendig, aber sehr genau, da an Körperkonturen feinere Netze von Beginn an erzeugt werden und an Stellen mit geringem Gradienten grobe Netze manuell gelegt werden. Die „Bottom up“ Methode fordert höhere Vernetzungszeiten, ist für die Simulation an sich aber Zeitoptimiert.

Beim „Top down“ Verfahren findet eine automatische Vernetzung statt. Hier vernetzt das Programm automatisch, also ohne Berücksichtigung von Konturen oder Anbauteilen. Die „Top down“ Variante generiert schnell ein Gitter und liefert rasche Simulationsergebnisse.

Für grobe Abschätzungen ist die „Top down“ Methode geeignet und für genaue und aufwendige Rechnungen ist die „Bottom up“ Variante.

Gitter sind eine Anordnung von geometrischen Formen. Prinzipiell können folgende Formen unterschieden werden:

- Dreiecke (2-Dimensional)
- Quadrate (2-Dimensional)
- Tetraeder (3-Dimensional)
- Hexagon (3-Dimensional)
- Prismen (3-Dimensional)
- Pyramiden (3-Dimensional)

Bei CFD Simulationen werden bevorzugt Quadrate und Hexagon-Netze verwendet, da diese die geringste numerische Diffusion aufweisen. Unter numerischer Diffusion wird der Fehler verstanden, der bei der Rechnung von einer Zelle zur nächsten weitergegeben wird. Im Bereich von Grenzschichten ist es von Vorteil mehrere Layer zu verwenden. Als Layer werden die Gitter bezeichnet die sich horizontal in einer Ebene befinden. In den Grenzschichten ändern sich zufolge der Druck- und Geschwindigkeitsgradienten die Erhaltungsgleichungen stark. Bei großen Gradienten müssen mehrere Layer verwendet werden, um Informationsverlust vorzubeugen.

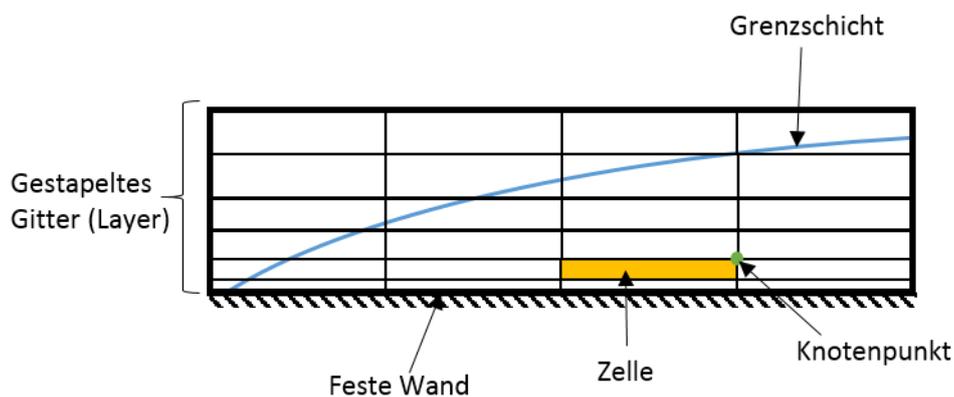


Abbildung 4-1: Gitterskizze

Je weiter sich Zellen von der Wand entfernen, desto größer dürfen Zellen werden. Der Größenanstieg von Zellen ist durch das „Size Ratio“ (SR) begrenzt. SR darf nie mehr als 20 % sein, da sonst die Zellenqualität leidet. Definiert ist SR als Quotient zweier Zellen. Neben SR begrenzt „Aspect Ratio“ (AR) die Zellen geometrisch. AR ist das Längen zu Höhen Verhältnis, das bei 2-Dimensional Zellen nie größer als fünf sein darf, bei 3-Dimensionalen Zellen nie größer als 20.

Aufgrund der Beschaffenheit der zu benetzenden Oberfläche verzerren sich die Zellen, was als „Equi Angle Skewness“ (EAS) definiert ist. EAS ist der maximale Verzerrungswinkel, unabhängig ob der Winkel spitz oder stumpf ist. Bei EAS unter 0,95 ist die Zellverzerrung in einem Ausmaß vorhanden, dass keine zufriedenstellenden Ergebnisse erzielt werden.

Neben Vernetzungen und Zellgrößen werden Zellen noch in Gitterstrukturen gegliedert. Es wird zwischen unstrukturiertem und strukturiertem Gitter unterschieden. Bei strukturierten Gittern ist zufolge der Indizes eine direkte Zuordnung von Nachbarzellen möglich, wodurch sich der Informationstransport beschleunigt. Bei „Top down“ Vernetzung ist eine fortlaufende Indexvergabe nicht inkludiert. „Bottom up“ verteilt die Indizes bei der Gittererzeugung.

Nach der Benetzung stellt sich die Frage des Solver, also des Lösungsalgorithmus, den das Programm verwenden soll um die CFD Simulation durchzuführen.

## 4.2 Solver

Inhaltlich stützt sich das folgende Kapitel auf die Quelle [15].

CFD-Lösungsalgorithmen basieren auf der Finiten Volumen Methode, also einer Einteilung des Volumens in Teilkontrollvolumen (Gitter). Dieser Unterteilungsvorgang wird als Diskretisierung bezeichnet. Jede Zelle im Gitter ist mit Informationen gefüllt, beinhaltet Werte für Geschwindigkeiten, Dichte, Viskosität etc.

Die Randzelle des Benetzten Volumens sind mit den Randbedingungen befüllt, jede weitere Zelle besitzt zu Beginn den Wert 1. Fortlaufend werden auf die Nachbarzellen die drei Erhaltungsgleichungen (3.1), (3.2) und (3.3) angewandt. Anschließend gibt die Zelle die Information an die umliegenden Zellen weiter. Je nach Rechenverfahren wird zwischen Explizit, Implizit und „Crank-Nicolson“, kurz „CN“, Verfahren unterschieden.

Ein explizites Verfahren ist dadurch definiert, dass sich der Zellwert aus zeitlich früheren Werten bildet. Ein implizites Verfahren berechnet seine Zellinformation aus Zellen, die gleichzeitig Informationen erhalten. Es handelt sich also um ein nicht kausales System. CN ist eine Kombination aus explizitem und implizitem Verfahren. Implizite Verfahren und CN sind stabil. Stabil bedeutet, dass der Zeitschritt zwischen zwei Zellen frei gewählt wird. Beim expliziten Verfahren muss ein Stabilitätskriterium (je nach Strömung oder Wärmetransport) verwendet werden und daraus der Zeitschritt zwischen zwei Zellen bestimmt werden.

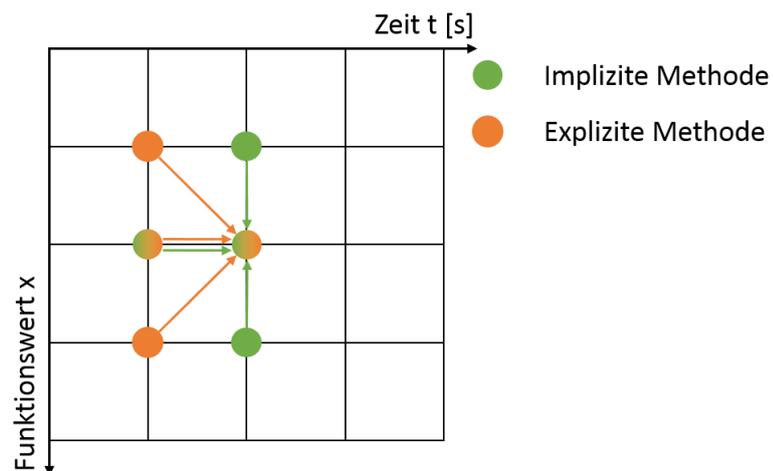


Abbildung 4-2: Implizit/Explizit

In Abbildung 4-2 ist die implizite und explizite Rechenweise grafisch dargestellt.

Zum Lösen von einphasigen Strömung existieren mehrere Solver. Die Auswahl basiert auf der Konstanz der physikalischen Größen. Es wird zwischen „Pressured Based“, kurz „PB“, und „Density Based Coupled Solver“, „DBCS“, unterschieden.

#### 4.2.1 Pressured Based

Beim PB Solver werden Impuls- und Druckgleichung primär als Variablen verwendet und zu einem Rechenverfahren zusammengesetzt, welches Druck und Geschwindigkeit beinhaltet um die Kontinuitätsgleichung (3.1) neu zu berechnen. Anschließend werden die Energie-, Spezies und Turbulenzgleichungen gelöst. Der PB Solver rechnet implizit, ist folglich immer stabil. In Abbildung 4-3 wird in einem Flussdiagramm die Rechenweise des PB Solvers dargestellt.

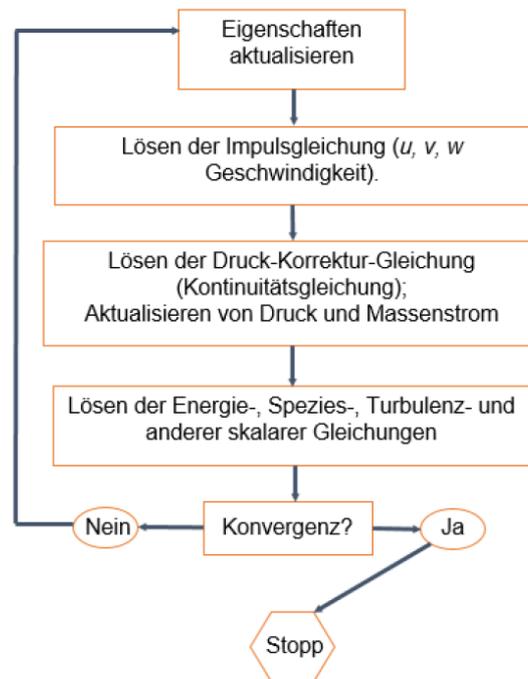


Abbildung 4-3: PB Solver [15]

#### 4.2.2 Density Based Coupled Solver

Beim DBCS werden alle Erhaltungsgleichungen und die Speziesgleichungen simultan gelöst, wodurch keine Priorität entsteht und eine Gleichung zufolge eines Ergebnisses einer anderen Gleichung beeinflusst wird. Aufbauend auf den Ergebnissen werden die Turbulenzgleichungen und skalaren Gleichungen gelöst. In Abbildung 4-2 wird in einem Flussdiagramm die Rechenweise des DBCS Solvers dargestellt.

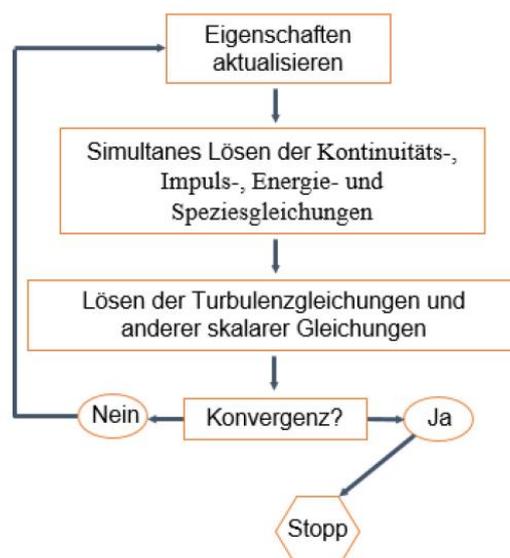


Abbildung 4-4: DBCS [15]

### 4.2.3 Solver Anwendung auf Schmierkreislaufuntersuchung

Im Fall von Getriebesimulationen wird der PB verwendet, da er bei schwach und inkompressiblen Fluiden eine starke Stabilität besitzt. Wenn Druck und Geschwindigkeitsterme im Getriebe zufolge der Druckkorrektur berichtigt wurden, startet eine Reihenberechnung der Erhaltungsgleichungen.

Da diese nicht vollständig lösbar sind, aufgrund zu vieler Variablen, werden Speziesgleichungen herangezogen. Dissipation hat einen großen Einfluss auf das Getriebeöl, wodurch eine turbulente Strömung entsteht. Diese Turbulenz muss durch ein Turbulenzmodell gelöst werden, basierend auf den Erkenntnissen aus Kapitel 3.

Der DBCS findet Einsatz bei kompressiblen Strömungen sowie in Zweiphasen Strömungen. Der DBCS kann entweder implizit oder explizit gelöst werden. Beim expliziten Verfahren ist ein Stabilitätskriterium erforderlich. Meistens wird die „Courant Friedrich Lewy“, kurz „CFL“, Zahl verwendet. Um aus der CFL-Zahl die Schrittweite zu ermittelt wird folgende Form verwendet:

$$\Delta t = \frac{(CFL)\Delta x}{u} \quad (4.1)$$

Wenn zweiphasen Strömungen, also heterogene Gemische, simuliert werden wird der DBCS verwendet. Zweiphasen Systeme sind aufgrund verschiedener Parameter in unterschiedliche Solver eingeteilt. Die Entscheidungskriterien für den jeweiligen Solver werden im folgenden Kapitel genau erläutert.

## 4.3 Zweiphasen Systeme

Inhaltlich stützt sich das folgende Kapitel auf die Quelle [15].

Zweiphasen Systeme sind eine Kombination aus zwei Phasen, wobei keine Gesetzmäßigkeit besteht in welchen Aggregatzuständen die Phasen auftreten müssen. Eine Aggregatzustandsänderung während der Simulation ist nicht möglich. Jegliche Kombination aus festen, flüssigen und gasförmigen Partikeln erzeugt eine mehrphasen Strömung. Beim Bezug auf das Getriebe handelt es sich um eine mehrphasen Strömung der Kombination gasförmig-flüssig.

Primär stellt sich die Frage nach der Hauptphase, sprich welche Phase als Basis der Berechnung verwendet wird. Im Fall des Ölnebels im Getriebe ist Luft die Hauptphase, wodurch Öl die sekundäre Phase darstellt. Nach Festlegung der Phasenreihenfolge stellt sich die Frage nach der Volumenbeladung, also der Menge der sekundären Phase die in der primären Phase gelöst ist. Die Volumenbeladung  $\alpha_V$  ist definiert als Volumenanteil der sekundären Phase zur Gesamtzelle. Wie aus der Definition hervor geht, beziehen sich die Berechnungen auf das Zellenvolumen das zur Bedatung zur Verfügung steht. Wenn die Volumenbeladung unter 10% fällt bleiben jegliche Wechselwirkungen zwischen den Phasen unberücksichtigt.

Neben der Volumenbeladung ist noch die Partikelbeladung ausschlaggebend für mehrphasen Systeme. Die Partikelbeladung ist das Verhältnis von

$$\frac{\alpha_V \text{ Partikel} \rho_{\text{Partikel}}}{\alpha_V \text{ Kontinuum} \rho_{\text{Kontinuum}}} \quad (4.2)$$

Sobald das Verhältnis von (4.2) eins entspricht muss ein zweiphasen System berücksichtigt werden. Wenn die Partikelbeladung in Kombination mit der Dichte nicht äquivalent der Hauptphase ist, kann die sekundär Phase vernachlässigt werden.

#### 4.3.1 Discrete Phase Model

Das Discrete Phase Model, kurz „DPM“, auch als Euler – Lagrange Modell bezeichnet, beschreibt die Bahnen der Partikel in der Primärphase, also dem Öl im Ölnebel, mit Lagrange Gleichungen. Lagrange bedeutet, dass ein Teilchen verfolgt wird und dessen Veränderung (Geschwindigkeitsänderung, Druckänderung) aufgezeichnet wird. Im Gegensatz dazu gibt es die Eulerbetrachtung. Bei der Euler Methode wird ein Raumpunkt betrachtet, durch den verschiedene Massenteilchen hindurchwandern. Mit dem DPM ist es möglich turbulente Bewegungen zu simulieren. Da das DPM mit Sub-Modellen arbeitet können neben der Turbulenz wärmetechnische Einflüsse wie warmes Spritzöl zusätzlich simuliert werden. Primär wird das Model bei Partikelströmungen mit verdünnter Volumenbeladung eingesetzt. Bezüglich der Partikelbeladung ist zu sagen, dass nur geringe Mengen vorhanden sein dürfen, da sonst das Model ungenau wird. Die Turbulenzmodellierungen sind uneingeschränkt anwendbar, besitzen aber hohen Rechenzeiten durch sehr genaue Konvergenzbestimmung.

Da die Lagrange Methode ein Partikel verfolgt ist jenes Verfahren für die Ölnebelsimulation nicht geeignet, da Partikel nicht oder nur schwer direkt zu einer Bahn zugeordnet werden. Hingegen ist der Raumpunkt fix definiert, wodurch eine Euler – Euler Methode vorzuziehen ist.

#### 4.3.2 Eulerian Multiphase Model

Das Eulerian Multiphase Model, kurz „EMM“, oder auch Euler – Euler Model, nutzt eine Euler Betrachtung zur Verfolgung der sekundären Phase. Als Unterscheidungsmerkmal für die Raumteilchen wird die Größe der Partikel gewählt und für jede Größenklasse eine Transportgleichung bestimmt. Folglich sind für N Partikelgrößen gleich N Transportgleichungen notwendig, wodurch die Rechnung erweitert wird und dies zu längeren Rechenzeiten führt. Im Gegensatz zu DPM, das Sub-Modelle verwendet, existieren beim EMM alle Phasen gleichzeitig werden auch gleichzeitig als Einphasensysteme gelöst. Ein wichtiger Aspekt des EMM ist die Berücksichtigung von Grenzflächentermen, welche stark nichtlinear sind und den Austausch (Information, Impuls, Wärme, Stoff, etc.) zwischen den beiden, für sich als Einphasensysteme existierenden Strömungen, ermöglicht.

Da eine hohe Partikelbeladung, im Ölnebel, in Getrieben auftreten kann, muss eine Kollisionssimulation der sekundären Phase per se betrachtet werden, wofür die EMM als Molekülwolksimulation geeignet ist. Auch die modellbasierte Berücksichtigung der Geschwindigkeitsdifferenz der beiden Phasen ist beim EMM fundiert. Aufgrund der Vielzahl an Vorteilen, sowie treffenden Randbedingungen werden Ölnebelsimulationen, sofern benötigt mit dem EMM bestimmt.

### 4.3.3 Mixture Model

Für einfachere Erstabschätzungen wird das „Mixture Model“ verwendet, welches auch als vereinfachtes Euler – Euler Model bezeichnet wird. Grundsätzlich wird angenommen, dass Partikelgeschwindigkeit und Partikelrichtung gleich der primären Phase sind. Weiter werden nicht N Transportgleichungen, sondern nur eine Impulsgleichung als Mischungsansatz verwendet. Eine Phasentrennung ist bei dieser Methode nicht möglich.

### 4.4 Aussagekraft und Verbesserungspotential

Simulationen haben den Vorteil der einfachen und schnellen Variation von Parametern, die Abstimmung mit der Realität ist hingegen aufwändig und zeitintensiv. Analytik, Simulation und Prüfstandtest stehen in enger Beziehung zueinander. Jeder Punkt kann auch separiert betrachtet werden, eine Symbiose ist jedoch anzustreben um zeit- und ressourcenschonend zu Arbeiten.

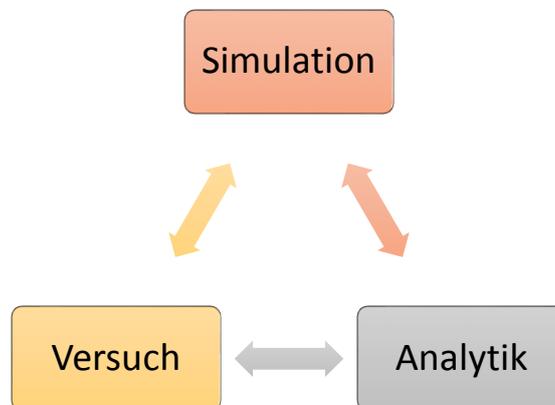


Abbildung 4-5: Symbiose

Aus diesem Grund liegt die Aufgabe der Ingenieure darin, einen möglichst einfachen und schnellen Abgleich von den drei Kategorien zu schaffen. Eine Simulation ist ein Versuch, welcher die Realität modellhaft beschreiben. Demzufolge sind Prüfstanduntersuchungen zur Überprüfung von Simulationsergebnissen nötig. Um Werte zu erhalten die von der Simulation generiert werden und mit dem am Prüfstand erhaltenen Ergebnissen abzugleichen sind moderne Messsysteme notwendig.

Um diese Messsysteme zu schaffen müssen Konzepte erstellt und bewertet werden um eine freie, ohne Präferenzen existente Lösung zu generieren.

## 5 Konzepterstellung

Zufolge der physikalischen Eigenschaften von Öl und der unterschiedlichen Analysemethoden zur Ermittlung der Beschaffenheitsveränderung ist eine Ordnung und Strukturierung der möglichen Methoden von Vorteil. Für das Erstellen von neuen Konzepten wird die VDI 2222 verwendet. Die VDI 2222 umfasst den Prozess für die Erstellung von prinzipiellen Lösungen eines technischen Produktes [16].

### 5.1 VDI 2222

Inhaltlich stützt sich das folgende Kapitel auf die Quelle [16].

Die VDI 2222 behandelt das methodische Vorgehen zum Entwickeln von Lösungsprinzipien. Gegliedert wird die VDI in vier Phasen, wobei jede Phase Unterpunkte enthält, welche miteinander in Wechselwirkung stehen. Die Phasen überlappen sich stark, wodurch keine klare Zuweisung möglich ist.

In der ersten Phase wird die Aufgabenstellung geklärt und präzisiert. Für diesen Vorgang wird eine Anforderungsliste erstellt. Die Anforderungsliste wird in Hauptziele, Nebenziele und Wunschziele gegliedert. Als Hauptziele werden Ziele verstanden, die zwingend erfüllt werden müssen. Nebenziele sind Ziele, welche nicht wegweisend sind, aber als Hilfen zur Entscheidungsfindung bei gleichbedeutenden Hauptzielbeurteilung verwendet werden. Wunschziele sind nicht zwingend notwendig zu erfüllen, werden also bei der Umsetzung als zusätzlicher Nutzen angesehen.

Die zweite Phase umfasst die Funktionsanalyse, sowie eine vorläufige Gliederung von möglichen Modulen. In dieser Phase werden drei Hauptkategorien unterschieden:

- ermitteln von Funktionen und Strukturen
- suche nach Lösungsprinzipien, -strukturen
- gliedern in realisierbare Module

Die Randbedingungen des ersten Punktes (Funktionsermittlung) beziehen sich auf das Gesamtsystem. Es werden die Anforderungen definiert, die eine Methode erfüllen muss. Folgende Fragen dienen der Einteilung:

- welchen Einfluss
- welche Wechselwirkung
- welche Störfälle

können im System auftreten. Der zweite Punkt (Lösungsprinzipien) beinhaltet die Ideen, die zur Umsetzung der Anforderungsliste führen. Ausschlaggebend ist, dass keine Ideen vorweg ausgeschlossen werden, aufgrund der in Punkt eins ermittelten Funktionen. Im dritten Punkt werden die Konzepte in Module gegliedert. Es werden Überkategorien definiert, in diese die einzelnen Lösungsprinzipien eingeordnet werden.

Die dritte Phase überlappt sich stark mit der zweiten. Die dritte Phase ist für den Entwurf verantwortlich und greift auf die in Phase zwei erstellten Module zurück und beeinflusst diese. Phase zwei und drei stehen in Wechselwirkung. Es werden die in Module gegliederten Lösungsprinzipien herangezogen und in spezielle, für den Anwendungsfall spezifische Systeme verbaut, um Konzepte zu entwickeln.

In der vierten Phase werden die Konzepte und Methoden erarbeitet. In der dritten und vierten Phase werden die Methoden mit Vor- und Nachteilen bewertet, um anschließend wenige gute Konzepte weiter zu verfolgen.

### 5.1.1 Anwendung der VDI 2222

Um die Einteilung der vier Phasen anschaulicher aufzubereiten, werden den Phasen Begriffe zugewiesen, um eine klare Zuordnung zu ermöglichen. Die erste Phase wird als „Planen und Analysieren“, die zweite als „Konzipieren“, die dritte als „Entwerfen“ und die vierte als „Ausarbeiten“ bezeichnet. Zur Veranschaulichung des ganzen Entwicklungsprozesses wird das „Bierglasmodell“ verwendet [17].

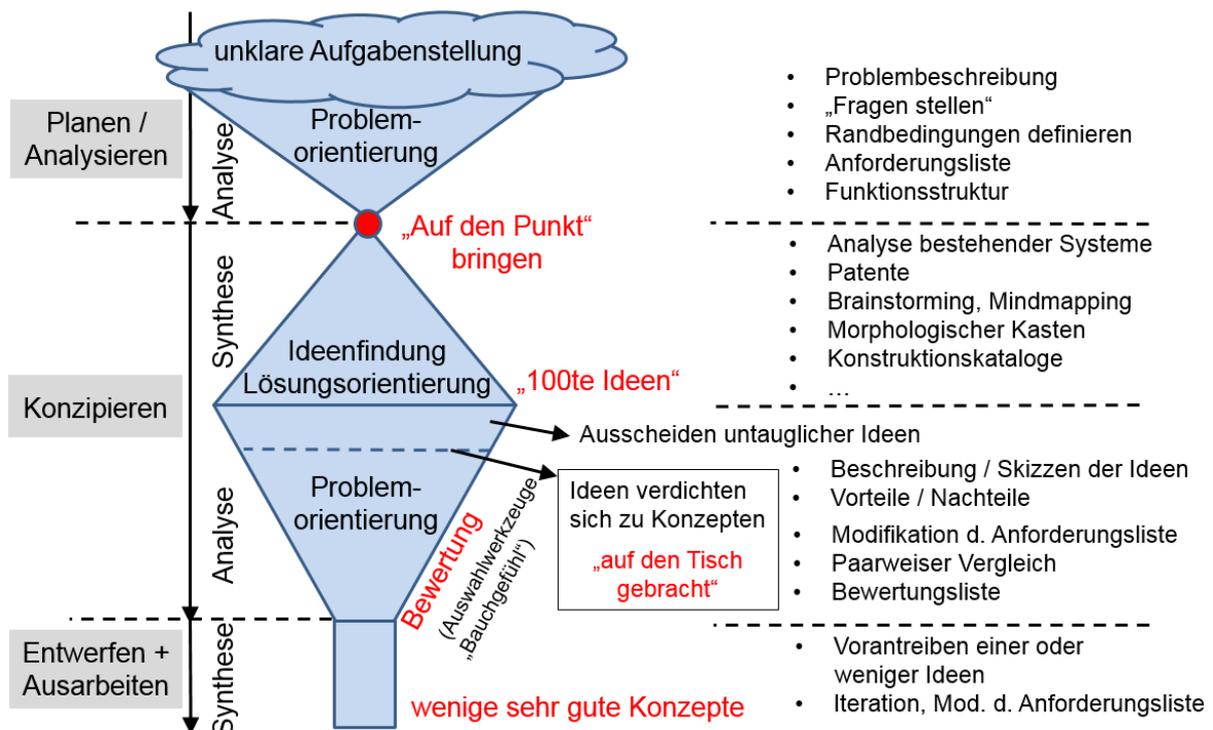


Abbildung 5-1: Bierglasmodell [17]

Das Bierglasmodell stellt alle Phasen grafisch dar. Zu Beginn wird die Aufgabenstellung definiert und die Fragestellungen geklärt, sowie die Randbedingungen festgelegt. Sobald die Fragestellung „Auf den Punkt gebracht“ wurde, beginnt die Synthese. Unter Synthese wird die Analyse des Systems und die Erstellung von Modulen verstanden.

Um die Methoden aufzuarbeiten und eine Übersicht zu schaffen, kann eine Mindmap verwendet werden. Eine Mindmap wird verwendet, um komplexe Zusammenhänge darzustellen und miteinander in Verbindung stehende Systeme zu visualisieren. Grafisch basiert die Mindmap auf einem konkreten Thema, das als Ausgangspunkt dient. Ausgehend von diesem Thema werden Äste gezogen, die zu weiteren Ideen oder Informationen führen (siehe Abbildung 5-2).

Nach der Synthese-Phase, wird begonnen prinzipiell untaugliche Ideen auszuschneiden. Fortan wird jede Idee durch Vor- und Nachteile bewertet. Nach der Vorbewertung werden die Konzepte mittels Bewertungsbogen (VDI 2225) beurteilt. Durch diese Bewertung entstehen wenige, jedoch gute Konzepte, die umgesetzt werden.

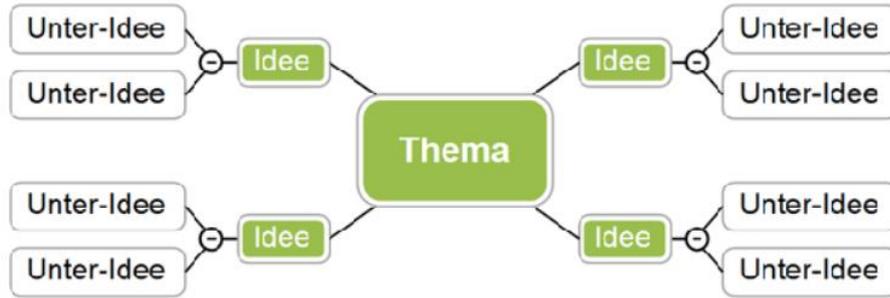


Abbildung 5-2: Mindmap – Theorie [18]

### 5.1.2 Methodenentwicklung zur Schmierkreislaufuntersuchung

Zur Analyse des Schmierkreislaufes wird eine Anforderungsliste erstellt, um die Ziele der Methode festzulegen. Das Hauptziel ist ein funktionierender Schmierkreislauf. Die Überprüfung der Funktionstauglichkeit wird an vordefinierten Stützstellen durchgeführt. Das Nebenziel ist so wenig Komponenten wie möglich am Getriebe zu verändert. Die Wunschziele bei der Schmierkreislaufuntersuchung sind die Ermittlung der Schichtdicke, die Viskositätsbestimmung, die Bestimmung des Schäumungsgrad, die Ermittlung der Geschwindigkeitsverteilung der Strömung, geringe Material und Prozesskosten. Alle Ziele sind in Tabelle 5-1 zusammengefasst.

Tabelle 5-1: Anforderungsliste

| Hauptziel  | Nebenziel  | Wunschziel   |
|--|--|--|
| Sicherstellung der Ölversorgung aller Komponenten durch sicheren Nachweis von Öl | Geringe Beeinflussung der Strömung durch das Messsystem          | Bestimmung des Schäumungsgrades, Zusammensetzung des Zweiphasensystems im Önebel |
|  | Signal liefert ein eindeutiges Ergebnis, keine lange Auswertzeit | Bestimmung der Dichte, Rückschluss auf die Viskosität                            |
|  | Normteileprinzip   | Bestimmung der Schichtdicke  |
|  |  | Bestimmung der Geschwindigkeitsverteilung im Getriebe                            |

Um die Ziele zu erfüllen stehen mehrere Möglichkeiten zur Verfügung. Alle Möglichkeiten zur Erfüllung des Hauptziels sind in der Mindmap (siehe Abbildung 5-3) grafisch aufgearbeitet. Das zentrale Thema der Mindmap ist die Getriebeuntersuchung. Die drei Hauptäste führen zu den Arten der Untersuchungsmöglichkeiten:

- Simulation
- Fahrzeugtest
- Prüfstandtest

Um Konzepte für die Untersuchung am Schwenkprüfstand zu ermitteln liegt der Schwerpunkt der Mindmap bei dem Prüfstandtest.



Um Prüfstandtests durchführen zu können müssen mehrere Aspekte berücksichtigt werden.

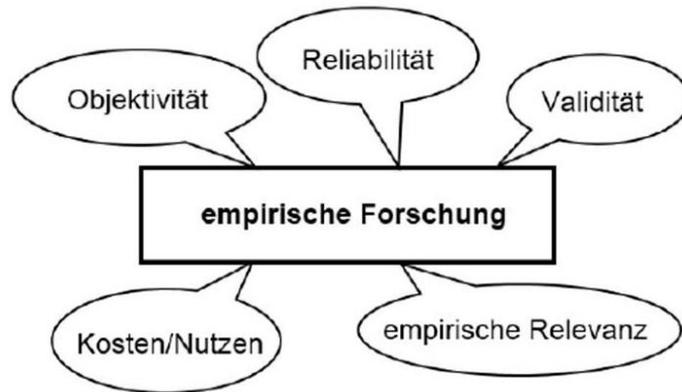


Abbildung 5-4: Voraussetzung empirische Forschung [17]

Im Folgenden werden die Aspekte kurz erklärt, da diese Grundlegend für Erfüllung des Hauptzieles sind [17]:

- „Objektivität“ beschreibt die Unabhängigkeit des Ergebnisses von der Person die die Messung durchführt.
- „Reliabilität“ beschreibt die Genauigkeit und die Reproduzierbarkeit. Bei vollständiger Reliabilität wäre das Messergebnis das „wahre“ Ergebnis ohne Fehler.
- „Validität“ beschreibt die Aussagekraft eines Messergebnisses.
- „Empirische Relevanz“ beschreibt die Übertragbarkeit von Messergebnissen aus einer experimentellen Situation.
- „Kosten/Nutzen“ beschreibt die Effizienz der eingesetzten Verfahren.

Nach der Festlegung der Anforderungen und Abklärung der Voraussetzungen werden mehrere Module definiert mit denen die Detektion von Öl nachgewiesen werden kann.

Die Kategorien der Masterarbeit sind:

- radioaktiver Zerfall
- akustische Dämpfung
- optische Verfahren
- Änderung elektrischer Größen
- Änderung der Temperatur

All jene Kategorien basieren auf der Änderung einer physikalischen Eigenschaft des oder durch das Öl. Nach der Erstellung der Überkategorien werden für jedes Modul Methoden erstellt, einen Ölnachweis liefern.

Alle erfolgversprechenden Methoden werden mit dem VDI 2225 Bogen bewertet, um anschließend Prinzipversuche durchzuführen, welche die Funktionstauglichkeit der Verfahren nachweisen.

## 5.2 VDI 2225

Inhaltlich stützt sich das folgende Kapitel auf die Quelle [19].

Die VDI 2225 beurteilt das technische und wirtschaftliche Konstruieren. Es werden mehrere Hauptkategorien erstellt, welche Unterkategorien besitzen. Jede Kategorie wird in eine technische und eine wirtschaftliche Kategorie unterteilt. Bewertet werden die Unterkategorien mit Zahlen, wobei „4“ das beste Ergebnis darstellt und „0“ unzureichend ist. Wenn eine Kategorie mit „0“ bewertet wird, so ist das Konzept nicht befriedigend und die Methode scheidet als Ganzes aus. Neben der grundlegenden Bewertung besteht noch die Möglichkeit der Gewichtung. Die Gewichtungen sind frei wählbar und ohne Grenzen nach oben. Beim Bewertungsbogen nach VDI 2225 wird anschließend ein s-Diagramm erstellt. Ein s-Diagramm ist ein Diagramm, auf dessen Abszisse die technische Wertigkeit „x“ aufgetragen ist und auf der Ordinate die wirtschaftliche Wertigkeit „y“. Mit dem s-Diagramm wird eine Tendenz der Präferenzen einer Methode festgestellt.

Die technische Wertigkeit „x“ ist definiert durch

$$x = \frac{g_1 p_1 + g_2 p_2 + \dots + g_n p_n}{(g_1 + g_2 + \dots + g_n) p_{\max}} \quad (5.1)$$

$g_i$  stellt die Gewichtung des jeweiligen Punktes dar,  $p_i$  die erhaltenen Punkte und  $p_{\max}$  die maximalen Punkte. Somit entsteht ein gewichtetes Verhältnis der Methode.

Die wirtschaftliche Wertigkeit  $y$  ist definiert durch:

$$y = \frac{H_i}{H} \quad (5.2)$$

Wobei  $H_i$  die idealen Herstellkosten sind und  $H$  die realen Herstellkosten.

Nach Bestimmung der Wertigkeiten wird ein s-Diagramm erstellt (siehe Abbildung 5-4). In einem Winkel von 45° verläuft eine Gerade, welche ein grafisches Verhältnis der Wertigkeiten zueinander darstellt. Wenn ein Punkt rechts von der Geraden eingezeichnet ist, so liegt die Stärke der Methode in der technischen Wertigkeit, bei einem Punkt links der Geraden in der Wirtschaftlichkeit. Das Optimum liegt im Punkt 1/1.

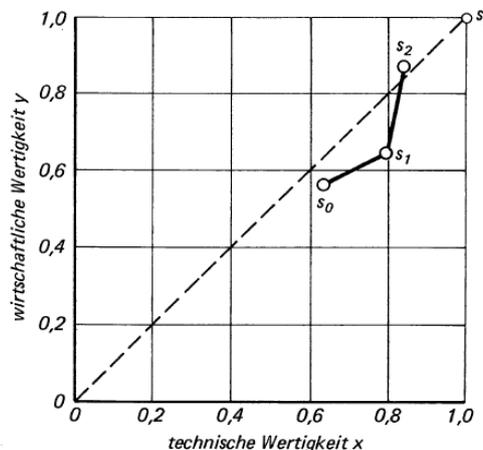


Abbildung 5-5: s-Diagramm [19]

## 6 Messverfahren

Nach der Klärung der physikalischen Eigenschaften von Öl und der Erstellung der Bewertungskategorien wurden Methoden erarbeitet, welche das Hauptziel erfüllen. Neben der Öldetektion werden Methoden zur Durchflussmessung erstellt. In den folgenden Unterkapiteln werden für jene Hauptkategorie die Methoden mit dem jeweiligen Arbeitstitel, einer Erklärung der Funktionsweise und einer Prinzipskizze der Methode vorgestellt.

### 6.1 Öldetektion

Im Kapitel der Öldetektion sind alle Methoden zusammengefasst, die für die Detektion von Öl erstellt wurden. Neben der direkten Messung der Änderung der Beschaffenheit des Öls werden auch Theorien angeführt, die zufolge passiver Erscheinungen auftreten (das Öl fungiert beispielsweise als „Transportstoff“). Es ergeben sich fünf Kategorien:

- radioaktiver Zerfall
- akustische Dämpfung
- optische Beurteilung
- Änderung der elektrischen Eigenschaften
- Änderung der Temperatur

Jede Kategorie beinhaltet Methoden, die sowohl direkte als auch indirekte Änderungen vom bzw. durch das Öl wahrnehmen. Zur Veranschaulichung der Methoden werden Prinzipskizzen nach der Methodenerklärung angeführt. Standardmäßig wird das Getriebe in Abbildung 6-1 verwendet. Das „Zahnrad 1“ dreht sich und fördert Öl in das „Kontrollvolumen“. Im „Kontrollvolumen“ wird das Öl detektiert und fließt in die Bohrung um die Lagerung des „Zahnrades 2“ zu beölen.

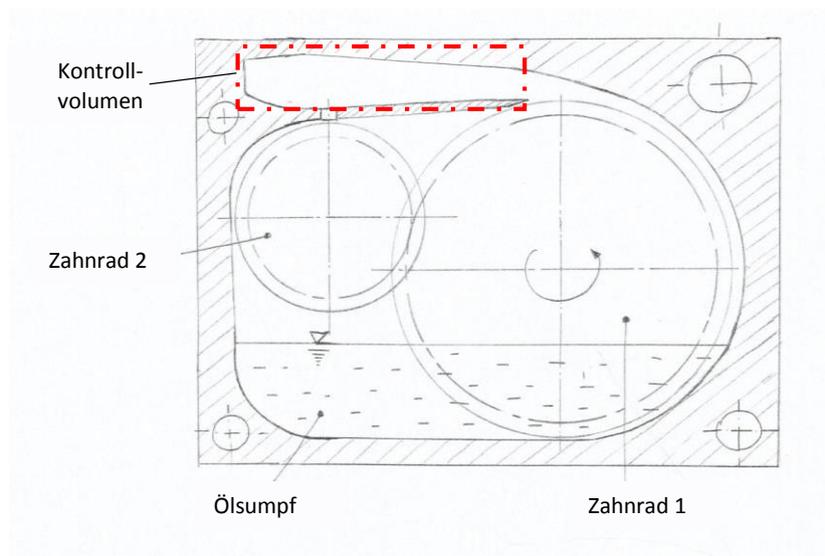


Abbildung 6-1: Standardgetriebe Prinzip

### 6.1.1 Radioaktiver Zerfall

In der Kategorie „Radioaktiver Zerfall“ fungiert das Öl als Transportstoff. Das Öl an sich hat keine radioaktiven Eigenschaften, kann jedoch mit Isotopen vermischt werden und zufolge der freiwerdenden Strahlungsenergie kann Öl detektiert werden.

#### Methode: Natürlicher Abrieb

Beschreibung: Das Zahnrad wird mittels Deuteronenbeschuss aktiviert. Unter Deuteronenbeschuss versteht man eine Aktivierung von Eisen mit einem Proton und einem Neutron. Folglich wird das Fe<sup>56</sup> zu Co<sup>58</sup>. Co<sup>58</sup> ist nicht stabil und verliert sofort ein Neutron (Direktreaktion) und wandelt sich zu Co<sup>57</sup> um. Co<sup>57</sup> besitzt eine Halbwertszeit von 271,8 Tagen. Es emittiert Energie von 122 keV. Nach der Aktivierung wird das Zahnrad im Getriebe verbaut und durchläuft einen Einlaufvorgang bei einer bestimmten Drehzahl, bis im Ölsumpf eine gewisse Menge an radioaktiven Isotopen nachgewiesen wird. Durch den Abrieb des Zahnrades, welcher aufgrund des Zahneingriffes unumgänglich ist, wandern angereicherte Isotope ins Öl. Nun kann mittels Strahlungsmesser (z.B. Gamma Strahlen) der Zerfall dieser Isotope gemessen werden (freiwerden von Energie). Aufgrund der statistischen Verteilung des Zerfalls, welche grobe Toleranzen hat, kann auf die Vermischung und die statistische Verteilung der Partikel im Öl abgesehen werden.

#### Methode: Feste Isotope

Beschreibung: Dem Getriebeöl werden radioaktive Isotope beigemischt (z.B. Co<sup>57</sup>). Die Isotope befinden sich in einem festen Zustand und müssen im µm Größenbereich sein um im Öl nicht abzusinken. Co<sup>57</sup> besitzt eine Halbwertszeit von 271,8 Tagen. Es emittiert Energie von 122 keV. Durch das einschlagen des Zahnrades in das Öl bleibt eine homogene Vermischung aufrecht. Anschließend wird das Öl aufgrund der Förderwirkung des Getriebes an die zu untersuchenden Stellen gefördert. An den Messstellen befindet sich ein Sensor zur Detektion von Strahlung ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ). Durch das Freisetzen von Elektronen kann Öl an den Messstellen nachgewiesen werden.

#### Methode: Flüssige Isotope

Beschreibung: Dem Getriebeöl werden radioaktive Isotope beigemischt (z.B. Fl<sup>18</sup>) welche mit dem Öl eine homogene Mischung eingehen. Konkret würde Fl<sup>18</sup> als aktivierte Substanz verwendet werden. Fl<sup>18</sup> wird aus O<sup>18</sup> gewonnen und hat eine Halbwertszeit von ~110 Minuten und emittiert ausschließlich Beta<sup>+</sup> Strahlung in der Höhe von 0,634 MeV. Durch das Einschlagen des Zahnrades in das Öl bleibt eine homogene Vermischung aufrecht. Anschließend wird das Öl aufgrund der Förderwirkung des Getriebes an die zu untersuchenden Stellen gefördert. An den Messstellen befindet sich ein Sensor zur Detektion von Strahlung ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ). Durch das Freiwerden von Elektronen kann Öl an den Messstellen nachgewiesen werden.

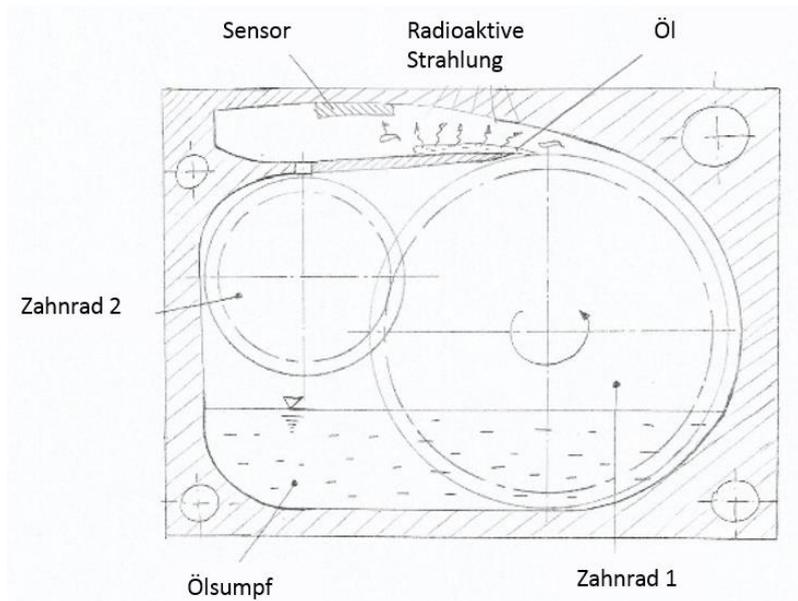


Abbildung 6-2: Prinzip „Radioaktiver Zerfall“

### 6.1.2 Akustische Dämpfung

In der Kategorie „Akustische Dämpfung“ sind alle Phänomene zusammengefasst die eine Änderung von Schwingungen durch das Öl hervorruft. Es wird nicht zwischen Schallausbreitung im Medium Luft oder einer Schallausbreitung im Festkörper unterschieden.

Methode: Beschleunigungssensor

Beschreibung: Es wird eine Bohrung an der zu überprüfenden Stelle im Gehäuse gesetzt. In diese Bohrung wird ein Beschleunigungssensor mit piezotechnischem Messprinzip verbaut (geschraubt oder geklebt). Folglich misst das piezoelektrische Messsystem, welches im Beschleunigungssensor verbaut ist, die Aufschläge des Öls an der Gehäusewand und somit eine Körperschallausbreitung im Getriebegehäusematerial. Ein Piezoelement ist ein dynamischer Sensor, welcher nur zeitliche Änderungen des zu überprüfenden Signales misst. Ob das Öl nun in die jeweilige Richtung fließt, nachdem es an der Gehäusewand detoniert ist, muss konstruktiv vorkonditioniert werden.

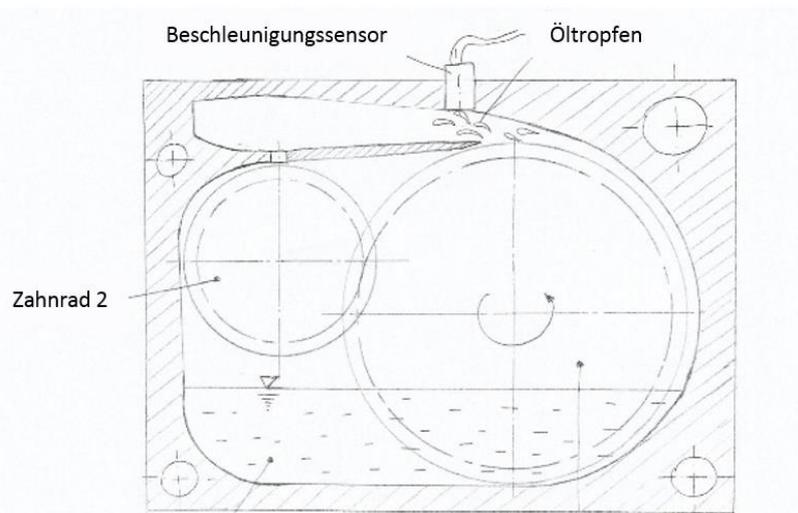


Abbildung 6-3: Prinzip „Beschleunigungssensor“

#### Methode: Saitenschwingung

Beschreibung: An der zu überprüfenden Stelle wird das Gehäuse mit einer Bohrung versehen. Durch diese Bohrung wird ein dünner Stab geführt und axial fixiert. Am äußeren Ende wird ein Beschleunigungssensor mit piezotechnischem Messprinzip montiert, welcher die kontinuierliche Schwingung des Stabes aufzeichnet. Der Stab schwingt harmonisch im Getriebe, zufolge der rotatorischen Bewegung der Getriebewelle. Landet ein Öltröpfchen auf dem Stab ändert sich dessen Dämpfungseigenschaften. Diese Änderung wird zeitaktuell an den Beschleunigungssensor übertragen. Dieser vergleicht die Schwingungsamplituden und kann auf die Existenz von Öl schließen.

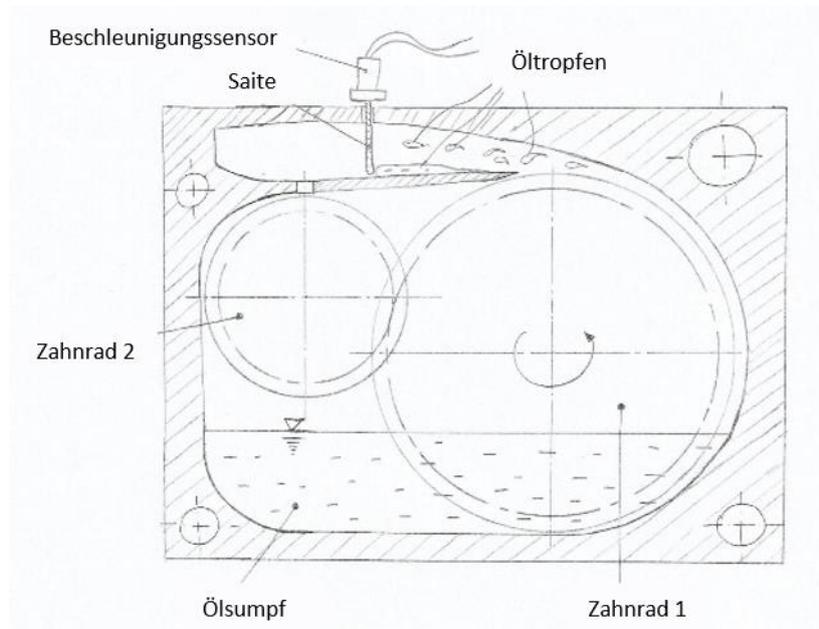


Abbildung 6-4: Prinzip "Saitenschwingung"

#### Methode: Gehäuse

Beschreibung: Im Gehäuse wird ein Mikrophon und ein Lautsprecher verbaut. Der Lautsprecher erzeugt einen Ton mit einer konstanten Frequenz und hoher Intensität. Dieser Ton muss sich von den umliegenden Geräuschen, welche im Getriebe erzeugt werden, abheben. Dafür eignen sich höhere Frequenzen besser, da sich diese von den tiefen Frequenzen, welche in der Hardware des Getriebes erzeugt werden, stark unterscheiden. Sobald Ölförderung eintritt befinden sich im Kontrollbereich zusätzliche Medien, welche den Schall brechen. Durch diese Brechung und Absorption des Schalles ändert sich die Intensität des vom Lautsprecher erzeugten Tons. Aufgrund dieser Änderung kann Öl im Kontrollbereich detektiert werden.

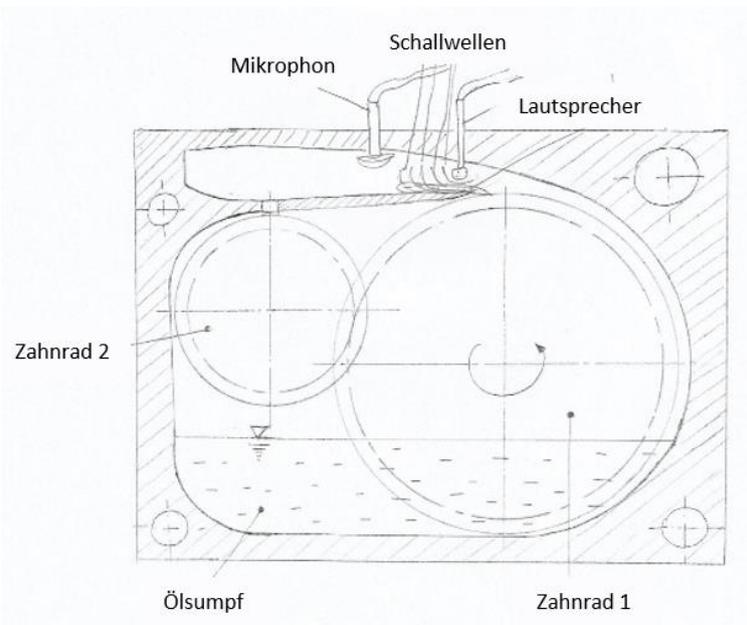


Abbildung 6-5: Prinzip "Gehäuse"

#### Methode: Körperschall

Beschreibung: In der Nähe der Lagerschalen wird ein Beschleunigungssensor an der Gehäuseaußenwand angebracht. Hinter den Lagerschalen befinden sich die verbauten Wälzlager, welche je nach vorhandener Menge von Schmierstoff unterschiedliche Laufeigenschaften aufweisen. Der Beschleunigungssensor registriert die Festkörperschwingungen die beim Trockenlauf, welcher zu Beginn bei niedrigen Drehzahlen auftritt, auftreten. Durch eine Ölförderung wird der Schmierstoff zu den Lagern befördert. Folglich tritt eine Schmierung der Wälzkörper und dem Außen- und Innenring ein. Durch diese Schmierung ändern sich die Schwingungen die vom Wälzlager erzeugt werden. Jenes Phänomen beruht auf der dämpfenden Eigenschaft des Schmierstoffes (Viskosität). Im Schmierstoff befinden sich Moleküle die aneinander reiben und folglich Energie wandeln, wodurch die Schwingungsamplitude betragsmäßig verringert wird. Wenn eine Schmierung eintritt, so registriert der Sensor Schwingungen mit gedämpften Amplituden und es wird indirekt auf einen vorhanden Ölfluss geschlossen.

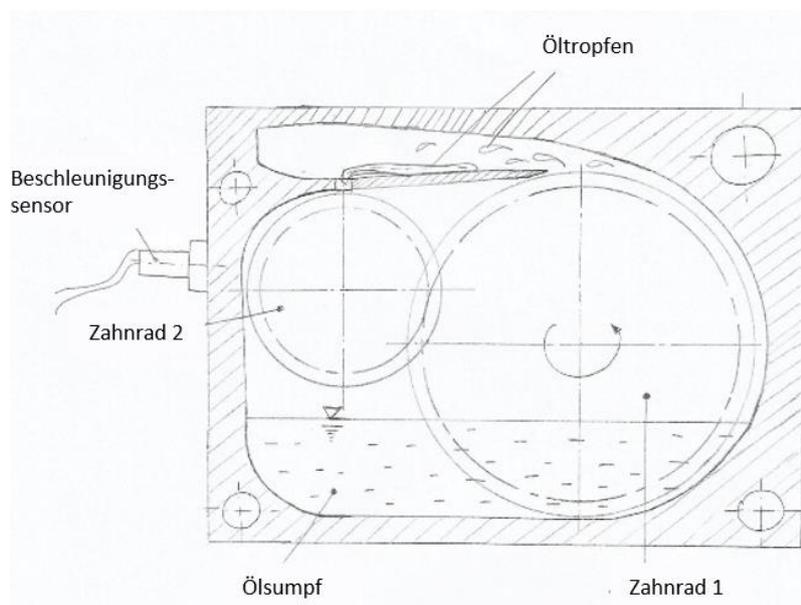


Abbildung 6-6: Prinzip "Körperschall"

### Methode: Erzwungene Eigenfrequenz

Beschreibung: Ein dünner Körper, zum Beispiel ein dünner Blechstreifen, wird an der zu überprüfenden Stelle angebracht. An diesen Körper wird ein Schwingungserzeuger montiert. Als Schwingungserzeuger wird eine kleine oszillierende Masse verwendet. Die Frequenz der Schwingung wird so gewählt, dass sich der Körper in Eigenschwingung (Resonanz) versetzt. Aufgrund der Förderwirkung der Zahnräder wird Öl im Getriebeinnenraum herumgeschleudert. Durch konstruktiv vorgesehene Rinnen fließt das Öl zum schwingenden Körper. Bei Kontakt des Körpers mit dem Öl ändert sich aufgrund der geänderten Masse die Eigenfrequenz. Mit einem Beschleunigungssensor wird die Amplitude der Schwingung gemessen. In der Eigenfrequenz treten durch das Aufschwingen höhere Amplituden als beim gedämpften Fall auf. Das vorhandene Öl trifft auf den dünnen Körper, wodurch dieser eine größere Masse besitzt. Durch den Vergleich der Amplituden wird Öl lokal detektiert und eine vorhandene Schmierung nachgewiesen.

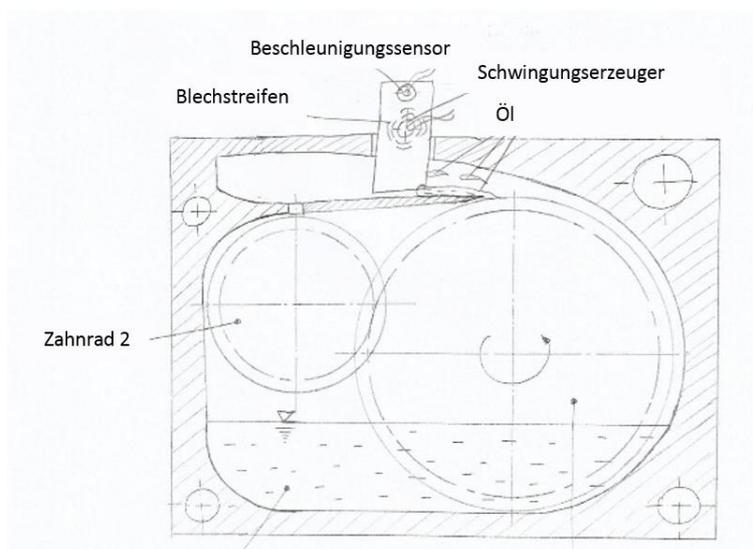


Abbildung 6-7: Prinzip "Erzwungene Eigenfrequenz"

### 6.1.3 Optische Verfahren

„Optische Verfahren“ basieren auf den lichtabsorbierenden Eigenschaften des Öls, sowie der Veränderung des Lichtes durch die Brechungseigenschaften.

### Methode: Laser Doppler Anemometrie (LDA)

Beschreibung: An der zu kontrollierenden Stelle wird eine Bohrung gesetzt und ein Schauglas eingebaut. Schaugläser werden üblicherweise aus Acrylglas hergestellt. Acrylglas hat durch Produktionsprozesse innere Spannungen, wodurch es für die Anwendung getempert wird. Tempern bedeutet, dass das Glas auf 100 °C angelassen wird um einen amorphen Spannungszustand zu generieren. Alternativ kann Sicherheitsglas verbaut werden, welches nicht nachbearbeitet werden muss. An dem Sichtfenster wird ein Transmitter platziert. Der Transmitter hat die Aufgabe zwei Laserstrahlen, die im Hintergrund erzeugt werden, mit einer Linse zu schneiden. Je nach Linsenwölbung sind unterschiedlich Brennweiten realisierbar. Im Schnittpunkt der Laserstrahlen wird ein Messvolumen generiert. Diese Messtechnik ist nur für punktuelle Messungen geeignet. Sobald durch das Kontrollvolumen Partikel wandern, im vorliegenden Fall Öl, tritt eine Phasenverschiebung der Strahlen ein. Diese Phasenverschiebung wird von einem Detektor registriert (Dopplerverschiebung), welche auf die Existenz von Öl schließen lässt.

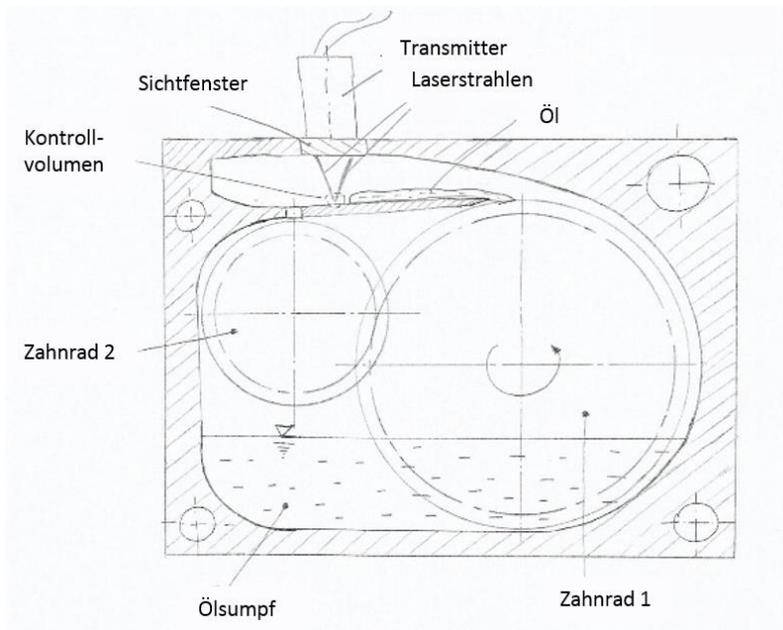


Abbildung 6-8: Prinzip "LDA"

Methode: Endoskop-Kamera

Beschreibung: An der zu kontrollierenden Stelle wird eine Bohrung im Gehäuse gesetzt, welche direkten Sichtkontakt auf den Messbereich bietet. In dieser Bohrung wird eine Endoskop-Kamera verbaut. Bei Endoskop-Kameras sind um die Linse LEDs verbaut, wodurch die Messstelle mit Licht versorgt wird. Durch die Verbindung der Endoskop-Kamera mit einem PC wird das Bild übermittelt und ein Nutzer oder ein Programm (abhängig vom Einsatz von Algorithmen), bestätigen die Detektion von Öl.

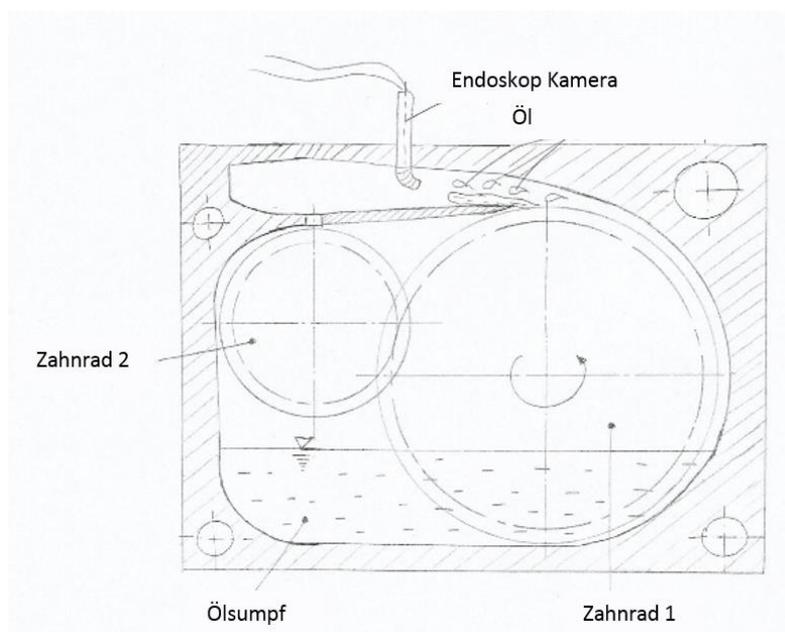


Abbildung 6-9: Prinzip "Endoskop Kamera"

### Methode: Particle Image Velocimetry (PIV)

Beschreibung: Beim PIV Verfahren werden große Bereiche des Gehäuses durch transparente Teile ersetzt. Mit einer High-Speed Kamera werden in kurzer Folge zwei Bilder des Strömungsprofils erstellt. Durch die beiden Bilder wird auf die Geschwindigkeit und die Flussrichtung des Öls gerechnet. Das Öl kann mit dieser Methode auf zwei Arten detektiert werden. Einerseits ist durch das Transparentgetriebe ein Ölfluss sichtbar, wodurch Öl eindeutig detektiert wird. Andererseits können mit der Geschwindigkeit und der Flussrichtung des Öls umliegende Strömungsfelder berechnet werden. Folglich kann für tiefere Getriebeebenen eine Prognose zur Schmierung erstellt werden.

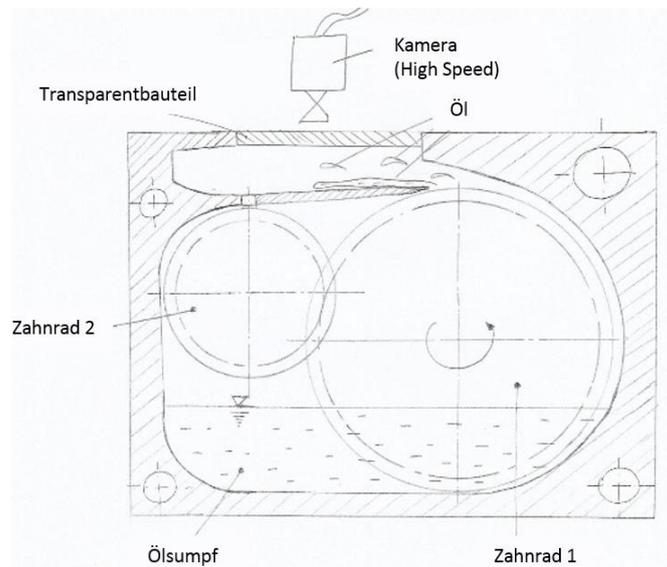


Abbildung 6-10: Prinzip "PIV"

### Methode: Fluoreszenz

Beschreibung: Dem Öl wird Eosin Y, ein roter Farbstoff der unter UV Einstrahlung fluoresziert, zugemischt. Weiter wird im Gehäuse eine kleine UV Lichtquelle so nah wie möglich an der zu untersuchenden Stelle platziert. Eine Kamera, welche im Gehäuse eingesetzt wird, ist auf die Messstelle gerichtet. Durch die ölfördernde Wirkung der Zahnräder im Getriebe wird das mit Eosin Y versehene Öl zur Messstelle gefördert. Durch die UV-Quelle fluoresziert das Öl. Das abgegebene Licht wird von der Kamera erfasst und an einem PC weitergeleitet. Dieser bestätigt die Detektion von Öl.

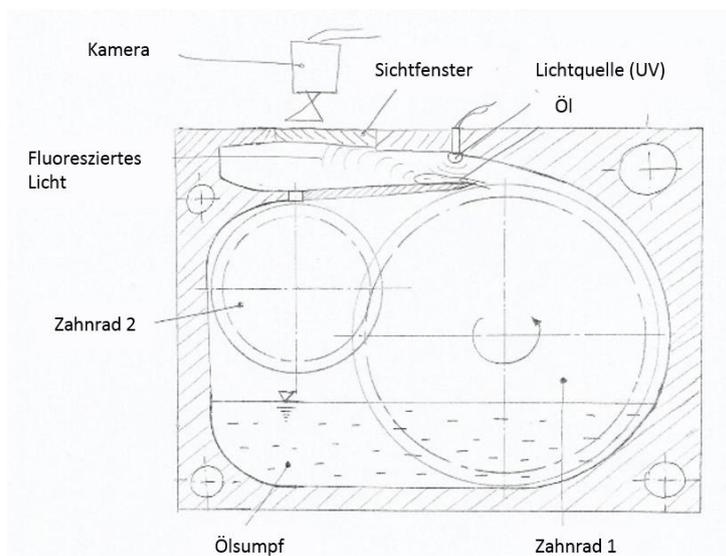


Abbildung 6-11: Prinzip "Fluoreszenz"

### Methode: Lichtschranke

**Beschreibung:** An der Gehäuseaußenwand wird ein Schauglas eingebaut, an dessen Außenseite eine Lichtschranke platziert wird. Schaugläser werden üblicherweise aus Acrylglas hergestellt. Acrylglas hat durch Produktionsprozesse innere Spannungen. Durch temperieren wird das Acrylglas für die Anwendung im optischen Bereich nutzbar. Tempern bedeutet, dass das Glas auf 100 °C angelassen wird um einen amorphen Spannungszustand zu generieren. Alternativ kann Sicherheitsglas verbaut werden, welches nicht nachbearbeitet werden muss. Die Lichtschranke strahlt plan auf eine blanke Fläche im Getriebe und wird von dieser reflektiert, wodurch eine optische Referenz entsteht. Wenn Öltropfen oder Ölfluss auftritt wird die Lichtschranke durchbrochen, wodurch die Systemüberwachung auf Ölfluss schließen lässt.

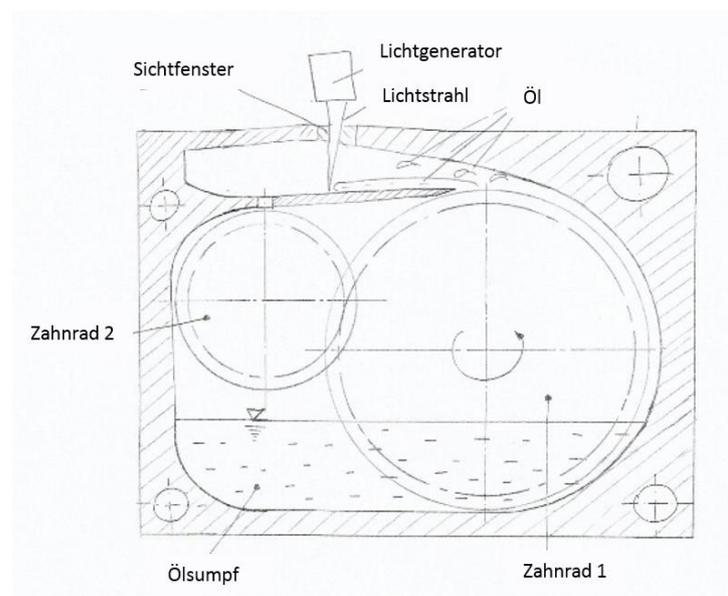


Abbildung 6-12 Prinzip "Lichtschranke"

### 6.1.4 Änderung elektrischer Größen

Die Methode „Änderung elektrischer Größen“ beschreibt alle Methoden die auf Basis von Elektrizität funktionieren, wobei eine Änderung der Eigenschaften durch das Öl ausgelöst wird. Das Öl ist ein Fluid ohne elektrische Leiteigenschaften wodurch kein Ionenfluss und folglich kein Stromfluss möglich ist. Eigenschaften wie eine Permittivität besitzt Öl wie jeder Stoff. Wie bei den Methoden „radioaktiver Zerfall“ basiert das Öl auch bei „Änderung elektrischer Größen“ als Transportstoff.

### Methode: Änderung der Kapazität

**Beschreibung:** Im Gehäuse wird eine Bohrung genau gegenüber der zu überprüfenden Stelle gesetzt. In diese Bohrung wird ein kapazitiver Sensor im Abstand von ca. 10 mm (je nach Sensorgröße variabel) Lotrecht zur Messstelle montiert. Um die Sensorspitze wird ein elektrisches Feld erzeugt. Wenn ein Medium, in untersuchten Falle Öl, in die Nähe dieses Feldes gelangt, ändert sich dieses aufgrund der physikalischen Eigenschaft (Permittivität) des Öls. Durch die Änderung des Feldes ändert sich die Spannung bei konstanter Stromstärke, oder die Stromstärke bei konstanter Spannung. Die Änderung wird vom Messverstärker registriert und mittels Ausgabeoption wird Öl detektiert.

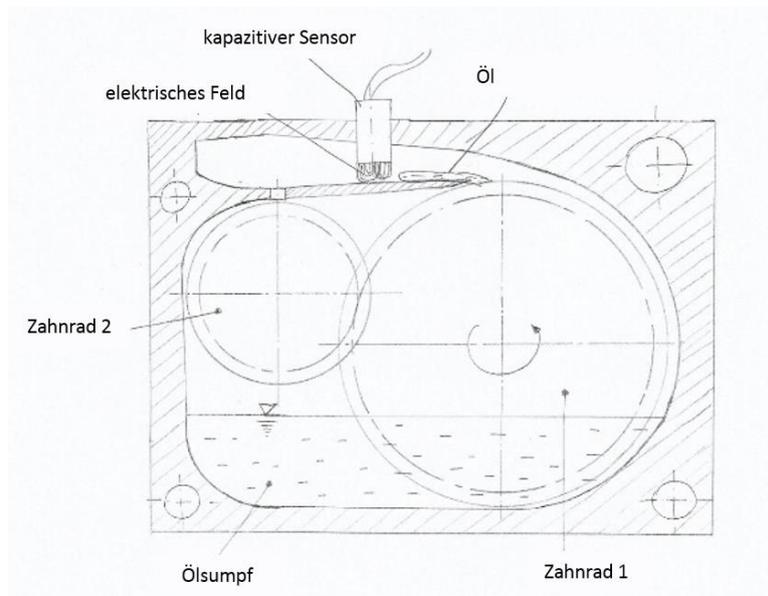


Abbildung 6-13: Prinzip "Änderung der Kapazität"

**Methode:** Elektrische Leitfähigkeit

**Beschreibung:** Es werden zwei Leiterplatten (Kohlenstoffplatten) nahe zueinander platziert. Zwischen den beiden Platten ist geometrisch ein kleiner Spalt vorhanden. Aufgrund des Abstandes baut sich ein elektrisches Feld (ähnlich des kapazitiven Sensors) auf. Die Luft zwischen den Platten hat eine unterschiedliche Permittivitätskonstante als Öl. Wenn Öl zur Messstelle wandert und folglich zwischen die beiden Kondensatorplatten fließt, ändert sich das elektrische Feld zufolge der unterschiedlichen Dielektrizität. Durch die Änderung des Feldes ändert sich die Spannung oder der Strom, je nach Variable des Kondensators. Durch diese Änderungen kann Öl an der Messstelle detektiert werden.

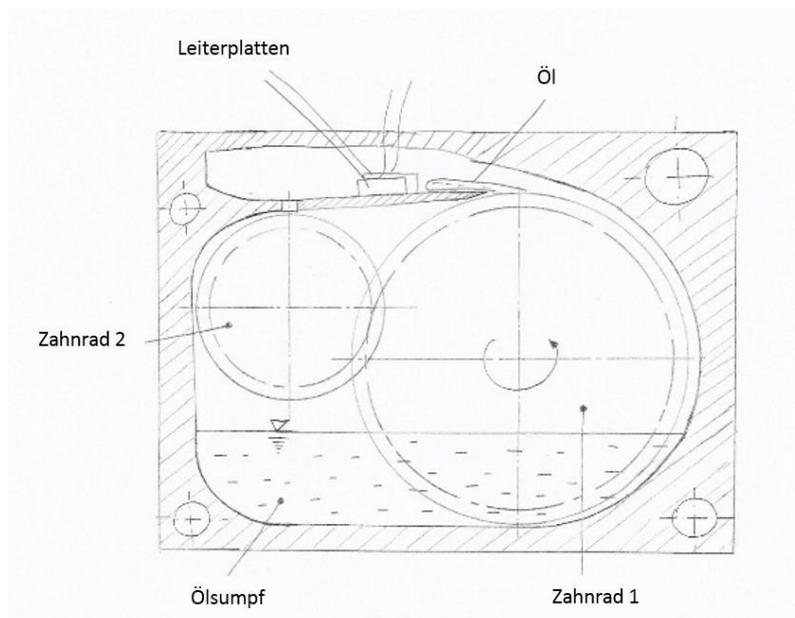


Abbildung 6-14: Prinzip "elektrische Leitfähigkeit"

### Methode: Magnetismus

**Beschreibung:** In das Öl werden kleine Eisenpartikel ( $\mu\text{m}$  Größenbereich) eingebracht, welche als Überwachungsstoff dienen. Durch die Drehung der Zahnräder mischen sich das Öl und die Eisenpartikel. Abhängig von der Drehzahl schweben die Partikel im Öl und werden durch die fördernde Wirkung der Zahnräder zu den Messstellen befördert. An der zu überprüfenden Stelle wird ein Stabmagnet platziert, welcher durch Strom ein Magnetfeld aufbaut. Wenn Öl mit Eisenpartikel zum Stab gefördert wird, bleiben die Eisenpartikel am Stab haften. Aufgrund der Wechselwirkung des magnetischen Feldes, des Stromes und des Stabes, ändert sich der notwendige Stromverbrauch und es kann auf Ölfluss geschlossen werden.

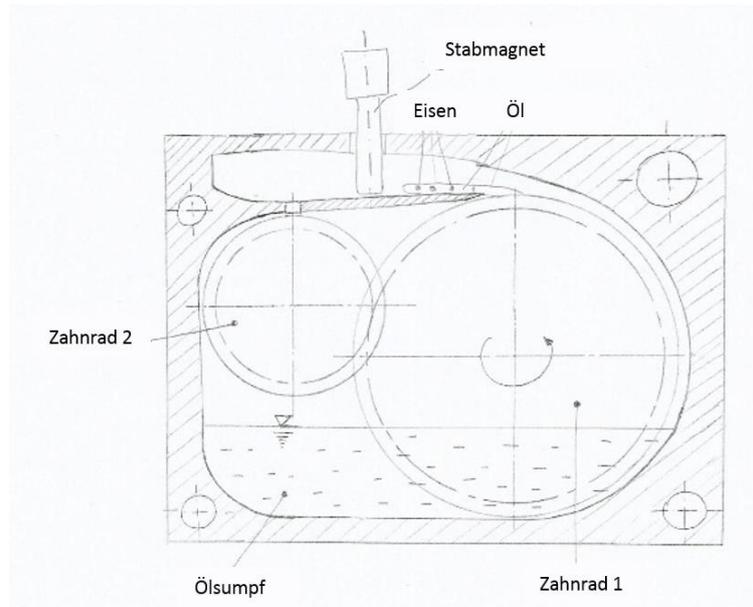


Abbildung 6-15: Prinzip "Magnetismus"

### 6.1.5 Temperaturänderung

Die Methoden der „Temperaturänderung“ beschreibt die Detektion von Öl durch die Erfassung der Temperaturänderung im direkten Zusammenhang mit Öl. Durch reibungsbehaftete Vorgänge im Getriebe (Reibung in den Wälzlagern, Reibung zwischen den Zahnflanken) erwärmt sich der Ölsumpf kontinuierlich. Folglich ist das Öl wärmer als das Gehäuse an den Messpunkten. Dieses Phänomen wird bei „Temperaturänderung“ genutzt.

### Methode: Thermoelement

**Beschreibung:** Es werden mehrere Thermoelemente, unter anderem im Ölsumpf und im Umkreis der Messstelle, sowie direkt an der zu überprüfenden Stelle verbaut. Wenn das Öl aufgrund der Drehung der im Getriebe verbauten Zahnräder herumgeschleudert wird, wobei das Öl eine höhere Temperatur als die Gehäusewand besitzt, ändert sich aufgrund des Auftreffens des warmen Öls die Temperatur lokal am Gehäuse. Diese Änderung wird von den Referenzthermoelementen wahrgenommen. Sobald jenes Element, welches direkt an der zu überprüfenden Stelle platziert wird, einen Temperaturanstieg vernimmt, wird Öl detektiert.

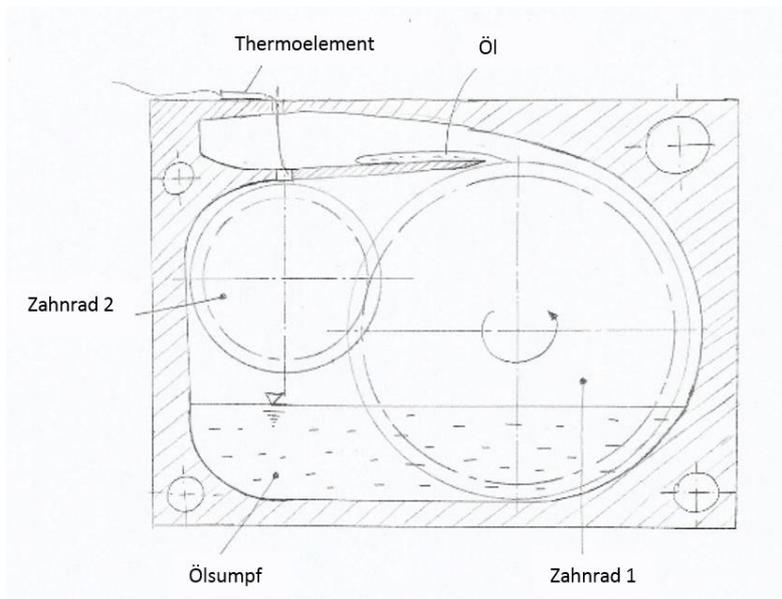


Abbildung 6-16: Prinzip "Thermoelement"

Methode: Berührungsloses Messen

Beschreibung: An der Gehäuseaußenwand wird eine Bohrung für einen berührungslosen Temperatursensor (Infrarotlaser) vorgesehen, in welche dieser dann verklebt oder verschraubt ist. Die Spitze des Infrarotlaserstrahls wird auf die zu überprüfende Stelle gerichtet. Aufgrund der Wärmeeinbringung des vorbeifließenden warmen Öls tritt eine Erhöhung der Frequenz des Infrarotstrahles ein. Aufgrund der Erhöhung (Temperaturgradient von Öl und Gehäuse), welche im Abgleich mit der bekannten Ölsumpftemperatur bewertet wird, wird auf die Existenz von Öl geschlossen.

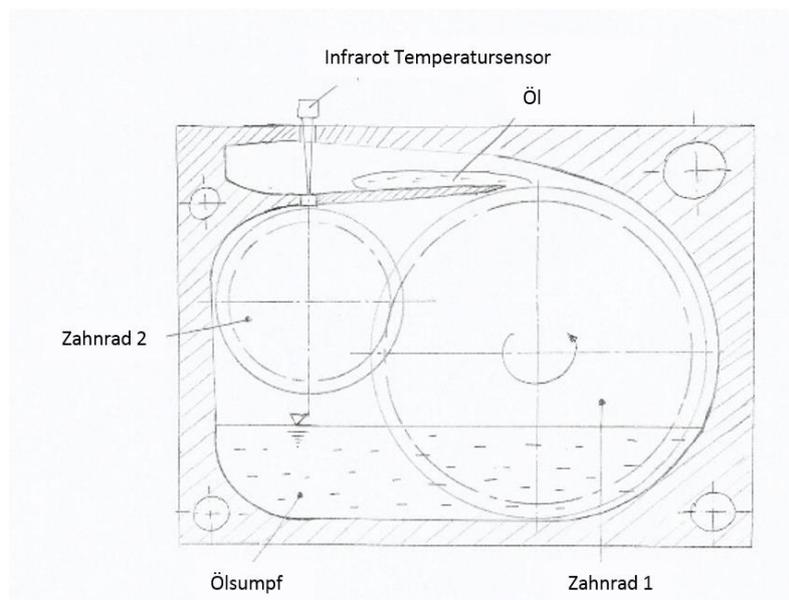


Abbildung 6-17: Prinzip "Berührungsloses Messen"

## 6.2 Durchflussmenge

Neben der Öldetektion und somit der Grundversorgung stellt sich bei hochbelasteten Bauteil die Frage, ob die der Volumenstrom ausreichen um die erzeugte Wärme abzutransportieren. Um diese Frage zu beantworten, muss eine Durchflussmessung durchgeführt werden. Viele der Methoden basieren auf den Methoden der Öldetektion. Die Methoden werden adaptiert und weiterverarbeitet.

### Methode: Fluoreszenz

Beschreibung: Das mit Eosin Y versetzte Öl wird von einer UV Lichtquelle angestrahlt. Durch die fluoreszierende Wirkung von Eosin Y wird Licht emittiert. Je dicker die Ölschicht umso mehr Eosin Y befindet sich im Fluid und folglich wird mehr Licht abgestrahlt. Folglich wird durch die Messung der Lichtstärke auf die Ölschichtdicke geschlossen. Durch eine zusätzliche Zeitmessung wird der Durchfluss bestimmt.

### Methode: Seppeler

Beschreibung: Ein Schlauch wird aus dem Getriebe geführt, optional nach den Wälzlager um den Fluss über die Wälzlager zu ermitteln. An die Leitung wird das „Seppeler“ angebracht. Hierbei handelt es sich um einen Glaskolben mit einer Kugel in der Mitte. Nach der Kugel ist eine Absperrung angebracht, um das Öl zu sammeln. Zu Beginn wird nach der Kontrollkugel das Ventil verschlossen. Durch das geschlossene System sammelt sich Öl im Volumen. Am Kontrollkörper befinden sich zwei Markierungen. Wenn die erste Markierung von Öl abgedeckt ist beginnt eine Zeitaufzeichnung. Beim Erreichen der zweiten Markierung endet die Zeitaufzeichnung. Durch das bekannte Volumen und die gemessene Zeit kann der Durchfluss berechnet werden. Am zweiten Ende des „Seppeler“ wird eine Leitung angebracht die zurück ins Getriebe führt um einen Rückfluss des Öls zu ermöglichen.

### Methode: Durchflusszähler

Beschreibung: Es wird ein Schlauch aus dem Getriebe herausgeführt, optional nach den Wälzlager um den Fluss über die Wälzlager zu ermitteln. An die Leitung wird ein Durchflusszähler, mit verbautem Flügelrad angeschlossen, welcher für Öl konzipiert ist. Das Gerät zeigt direkt den Durchfluss in  $\text{m}^3$  pro Sekunde an.

### Methode: Particle Image Velocimetry (PIV)

Beschreibung: Ein Teil des Getriebes wird transparent ausgeführt. Es werden Partikel ins Öl gegeben, sogenannte Tracer, um Stoffe mit definierten bekannten geometrischen Größen zu verwenden. Anschließend wird eine High-Speed Kamera auf das Getriebe gerichtet und es werden zwei Bilder in kurzer Zeit hintereinander aufgenommen. Ein Algorithmus berechnet im Hintergrund den Weg den ein Partikel in der kurzen Zeit zurück legt und berechnet die Geschwindigkeit. Mit bekannter Fläche und Geschwindigkeit kann der Durchfluss berechnet werden.

#### Methode: Tracerzugabe

Beschreibung: Dem Öl werden Isotope zugeführt, diese zerfallen und somit wird radioaktive Strahlung freigesetzt. Durch das Montieren von zwei Strahlungssensoren entlang einer bekannten Länge kann aufgrund der detektierten Strahlung auf die Strömungsgeschwindigkeit geschlossen werden. Durch die bekannten geometrischen Abmessungen im Getriebe und der bekannten Geschwindigkeit wird der Durchfluss rechnerisch ermittelt.

#### Methode: Gehäuse

Beschreibung: Im Gehäuse wird ein Mikrofon und ein Lautsprecher verbaut. Der Lautsprecher erzeugt einen Ton mit einer konstanten Frequenz und hoher Intensität. Dieser Ton muss sich von den umliegenden Geräuschen, welche im Getriebe erzeugt werden, abheben. Dafür eignen sich höhere Frequenzen besser, da sich diese von den tiefen Frequenzen, welche in der Hardware des Getriebes erzeugt werden, stark unterscheiden. Sobald Ölförderung eintritt, befinden sich im Kontrollbereich zusätzliche Medien welche den Schall brechen. Durch diese Brechung und Absorption des Schalles ändert sich die Intensität des vom Lautsprecher erzeugten Tons. Zuzugabe der Stärke der Signaldämpfung kann auf die Ölmenge rückgeschlossen werden, welche sich an der jeweiligen Stelle befindet. Durch die Menge und die Zeit kann auf den Volumenstrom geschlossen werden.

#### Methode: Eigenfrequenz

Beschreibung: Ein dünner Körper wird an der zu überprüfenden Stelle angebracht (zum Beispiel ein dünner Blechstreifen). An diesem Körper wird ein Schwingungserzeuger montiert. Als Schwingungserzeuger wird eine kleine oszillierende Masse verwendet. Die Frequenz der Schwingung wird so gewählt, dass sich der Körper in Eigenschwingung (Resonanz) versetzt. Aufgrund der Förderwirkung der Zahnräder wird Öl im Getriebeinnenraum herumgeschleudert. Durch konstruktiv vorgesehene Rinnen fließt das Öl zum schwingenden Körper. Bei Kontakt des Körpers mit dem Öl ändert sich aufgrund der geänderten Masse die Eigenfrequenz. Mit einem Beschleunigungssensor wird die Amplitude der Schwingung gemessen. In der Eigenfrequenz treten durch das Aufschwingen höhere Amplituden auf, als bei einem gedämpften Fall. Durch das haftende Öl am dünnen Körper, entsteht eine größere Masse. Je weiter die Eigenfrequenz zu tieferen Frequenzen wandert, desto mehr Öl befindet sich am Kontrollkörper. Somit kann aufgrund der Frequenzänderung die Masse und der Durchfluss berechnet werden.

#### Methode: Änderung der Kapazität

Beschreibung: Im Gehäuse wird eine Bohrung genau gegenüber der zu überprüfenden Stelle gesetzt. In diese Bohrung wird ein kapazitiver Sensor in einem Abstand von ca. 10 mm (je nach Sensorgröße variabel) Lotrecht zur Messstelle montiert. Um die Sensorspitze baut sich ein elektrisches Feld auf. Wenn ein Medium, in diesem Fall Öl, in die Nähe dieses Feldes gelangt, ändert sich dieses aufgrund der physikalischen Eigenschaft (Permittivität) des Öls. Durch die Änderung des Feldes ändert sich die Spannung bei konstantem Strom, oder der Strom bei konstanter Spannung. Je stärker die Änderung, desto mehr Öl fließt vorbei. Diese Feldänderung lässt auf die Schichtdicke des vorbeifließenden Öls schließen. Durch die Schichtdicke und die weiteren geometrischen Größen wird der Durchfluss bestimmt.

## 7 Bewertung der Verfahren

Nach der Erläuterung der Methoden in Kapitel 6, müssen Rahmenbedingungen geklärt und technische Fakten erhoben werden, um die Verfahren zu bewerten. Die Bewertung basiert auf Expertengesprächen, Recherche und Erfahrungsberichten.

### 7.1 Beurteilung der Öldetektion

Zur Beurteilung der Methoden der Öldetektion wird mit Herstellern von Sensoren gesprochen, unter anderem der Unternehmen „NBN Elektronik Handelsgesellschaft mbH.“, „OMEGA Engineering GmbH“ und „IFM electronic GmbH“. Zudem wird eng mit dem Institut für thermische Turbomaschinen und Maschinendynamik zusammengearbeitet und deren Erfahrungswerte miteinbezogen.

Für die Bewertung aller Verfahren wird das selbe Schema verwendet. Zu Beginn wird mit Experten gesprochen, um die grundlegende Tauglichkeit der Methode zu prüfen. Bei positiver Rückmeldung wird mit Herstellern der Sensoren gesprochen und die Methode wird vom technischen Support des Unternehmens bewertet. Abschließend werden alle Verfahren in einer Kategorie verglichen und in einer Tabelle zusammengefasst.

Mit **Grün** wird ein positiver, mit **Rot** ein negativer Aspekt gekennzeichnet. Mit **Orange** wird eine Beurteilung gekennzeichnet, welche gerade noch akzeptabel ist.

#### 7.1.1 Beurteilung Radioaktiver Zerfall

Aufgrund von fehlender Erfahrung wurden mehrere Firmen kontaktiert, um einen Wissensschatz aufzubauen und die erstellten Hypothesen zu beurteilen. Das Unternehmen „Teviso Sensor Technologies Ltd“ ist der Hauptinformationsgeber der Konzepte mit radioaktivem Hintergrund.

„Natürlicher Abrieb“ ist zufolge der Bewertung des Unternehmens plausibel. Der Nachteil der Methode ist, dass dies mehr einer tribologischen Untersuchung ähnelt, als einer Schmierkreislaufuntersuchung. Der Abrieb der zufolge des Verschleißes entsteht ist sehr gering, folglich auch die ins Öl gelangenden Partikel.

„Flüssige Isotope“ wurde als plausibel eingestuft. Ein Vorteil der Methode ist die Öllöslichkeit des radioaktiven Stoffes  $^{18}\text{F}$ .  $^{18}\text{F}$  besitzt eine Halbwertszeit von ungefähr 110 Minuten, was für Schmierkreislaufuntersuchungen zu wenig ist. Folglich müssen kontinuierlich Isotope nachgefüllt werden um Untersuchungen über zwei Stunden durchzuführen.

„Feste Isotope“ wurde als plausibel eingestuft. Bei ausreichend kleinen Partikelgrößen entsteht ein scheinbar homogenes Ölgemisch. Durch die Drehung der Zahnräder schweben die Partikel im Öl und sinken nicht zum Boden. Bei längeren Stillstandszeiten müssten, durch Aufwirbelung des Ölsumpfes, die Partikel wieder in Schwebeposition gebracht werden.

Die Nachteile, die alle Methoden mit dem radioaktiven Strahlungshintergrund haben, ist die Aktivierung von Eisen das mit radioaktiven Isotopen in Kontakt tritt, sowie die gesellschaftlichen Bedenken an den Verfahren. Wenn aktive Isotope über eine metallische Oberfläche fließen, ist immer eine Reststrahlung vorhanden.

In Tabelle 7-1 sind die drei Methoden zusammengefasst und bewertet.

Tabelle 7-1: Zusammenfassung Radioaktiver Zerfall

|                    | Reststrahlung an Kontaktflächen | Halbwertszeit | Freigesetzte Energie | Anzahl Isotope im Öl | Reproduzierbarkeit der Ergebnisse |
|--------------------|---------------------------------|---------------|----------------------|----------------------|-----------------------------------|
| Natürlicher Abrieb | Red                             | Yellow        | Green                | Red                  | Red                               |
| Flüssige Isotope   | Red                             | Red           | Red                  | Green                | Green                             |
| Feste Isotope      | Red                             | Yellow        | Green                | Green                | Green                             |

- „Reststrahlung an Kontaktflächen“ bewertet die Menge an zurückgebliebenen Isotopen an überströmten Flächen
- „Halbwertszeit“ bewertet die Zeit bis zu wenig Strahlung vorhanden ist, um eine erneute Messung durchzuführen, unter Berücksichtigung von zu langen Zeiten und aufwendiger Entsorgung
- „Freigesetzte Energie“ bewertet die Strahlungsenergie, die beim Zerfall der Isotope freigesetzt wird und vom Sensor erfasst werden kann
- „Anzahl der Isotope im Öl“ bewertet die aktiven Partikel im Öl, unter Berücksichtigung von Durchmischung und Verweilmöglichkeit
- „Reproduzierbarkeit der Ergebnisse“ bewertet die Möglichkeit den Versuch zu Wiederholen und zu den gleichen Resultaten zu gelangen.

Zufolge der vertretbaren Halbwertszeit, der Menge an freigesetzter Energie, der kontrollierten Zugabe von Isotopen und der Ergebnisreproduzierbarkeit wird die Methode „Feste Isotope“ näher in Betracht gezogen.

### 7.1.2 Beurteilung akustische Dämpfung

„Akustische Dämpfung“ fasst alle Methoden zusammen, die auf Schwingungen basieren. Im Allgemeinen ist es nicht von Bedeutung, ob von Schallwellen im Medium Luft oder von Körperschall, welcher sich in festen Medien ausbreitet, gesprochen wird. Neben den Eigenerfahrungen und der Unterstützung durch Partnerinstitute wurden mehrere Expertengespräche mit dem Unternehmen „PCB Piezotronics“ geführt.

„Beschleunigungssensor“ wurde als nicht plausibel eingestuft. Zufolge der minimalen Ölmengen und der genauen Auflösung von Beschleunigungssensoren werden unzählige Signale im Getriebe erfasst, darunter eines vom auftreffenden Öl. Da auch rotordynamische Effekte auftreten, wie das Schwingen aufgrund von Unwuchten der Getriebewellen, kann keine klare Zuordnung von Ölaufschlag am Sensor und zum Beispiel Zahneintritt in den Ölsumpf gegeben werden.

„Saitenschwingung“ wurde als nicht plausibel eingestuft. Im Getriebeinnenraum treten harmonische Schwingungen mit konstanter Amplitude auf. Die Amplitudenstärke ändert sich nicht zufolge von Öl. Da Öl eine geringe Masse hat, tritt keine Dämpfung ein. Wenn eine Amplitudenveränderung erfasst wird, kann dies zufolge den rotordynamischen Effekten im Getriebe unzählige Ursachen haben. Bei Überschreiten einer bestimmten Drehzahl können Selbstzentrierungsvorgänge eintreten, zwischen

gleitenden Körpern kann sich ein Schmierkeil aufbauen der zur Dämpfung führt, das Gehäuse verspannt sich zufolge thermischen Einträgen und verändert die Schwingungsamplitude, etc.

„Gehäuse“ wurde als nicht plausibel eingestuft. Die hohen Frequenzen und hohen Intensitäten die benötigt werden um einen signifikanten Unterschied zu den umliegenden Geräuschen in Getrieben zu erhalten, werden nicht durch Öl im Analysevolumen beeinflusst. Die Schallintensität ist das Produkt aus Schalldruck und Schallschnelle. Der Schalldruck ist eine gerichtete Größe und wird vom Öl in den umfangsseitigen Freiräumen zwischen den Zahnflanken beeinflusst. Zudem treten im Getriebe akustische Phänomene auf, welche zu einer Dämpfung der Frequenz führen, jedoch auf mechanischen und rotordynamischen Effekten beruhen.

„Körperschall“ wurde als plausibel eingestuft. Die Aufgabe der Methode liegt in den Algorithmen zur Frequenzanalyse. Das Problem liegt in der eindeutigen Zuordnung der Frequenzen. Beispielsweise tritt zufolge von erhöhten Lagerbelastungen ein Minimalbruch von Wälzkörpern ein, so ist auch bei vorhandenem Schmierstoff eine überlappende Schwingung vorhanden, welche nicht zugeordnet werden kann. Zudem kann auch bei unterschiedlichen Gehäusewerkstoffen keine direkte Parameterübernahme für die Körperschalldämpfung erfolgen, da beispielsweise Aluminiumguss andere Dämpfungseigenschaften als Stahl besitzt.

„Erzwungene Eigenfrequenz“ wurde als nicht plausibel eingestuft. Aufgrund der geometrische Parameter des Bleches und somit des geringen Gewichtes, liegen die Eigenfrequenzen bei hohen Frequenzen. Die umliegenden Schwingungen sind aufgrund von Massen und Steifigkeiten dominanter und „schlucken“ die kleine Amplituden. Somit müssten hohe Ausschläge aufgebracht werden, welche dann wieder zu einer großen Auslenkung führen. Durch das Aufschlagen von kleinen Ölmengen ändert sich die Amplitude.

Tabelle 7-2: Zusammenfassung Akustische Dämpfung

|                             | Amplituden-<br>gradient | Störeinfluss<br>Gehäuse /<br>Getriebewelle | Auswertungs-<br>genauigkeit | Adaptions-<br>aufwand | Reproduzier-<br>barkeit der<br>Ergebnisse |
|-----------------------------|-------------------------|--|-----------------------------|-----------------------|---|
| Beschleunigungs-<br>sensor  | Red                     | Red  | Red                         | Yellow                | Green                                     |
| Saiten-<br>schwingung       | Yellow                  | Red  | Red                         | Yellow                | Yellow                                    |
| Gehäuse                     | Red                     | Red  | Red                         | Green                 | Red                                       |
| Körperschall                | Green                   | Red  | Yellow                      | Green                 | Yellow                                    |
| Erzwungene<br>Eigenfrequenz | Red                     | Red  | Red                         | Red                   | Red                                       |

- „Amplitudengradient“ bewertet die Amplitudendämpfende Eigenschaft des Öls
- „Störeinfluss Gehäuse / Getriebewelle“ bewertet die Einflüsse durch rotordynamische und akustische Eigenschaften im Getriebe
- „Auswertungsgenauigkeit“ bewertet die eindeutige Zuordnung der Veränderung der Amplitude zufolge des Öls
- „Adaptionsaufwand“ bewertet den Aufwand zur Adaption der Sensorik
- „Reproduzierbarkeit der Ergebnisse“ bewertet die Möglichkeit den Versuch zu Wiederholen und zu den gleichen Resultaten zu gelangen.

Unter Berücksichtigung all jener genannten Aspekte, ist „Körperschall“ eine Methode die weiterverfolgt wird. Alle anderen Methoden sind aufgrund von Störgrößen, basierend auf rotordynamischen und akustischen Phänomenen im Getriebe, nicht umsetzbar.

### 7.1.3 Beurteilung optische Verfahren

„Optische Verfahren“ fasst alle Methoden zusammen, die zufolge der optisch beeinflussenden Eigenschaften durch Öl auftreten. Neben den Eigenerfahrungen und der Unterstützung durch Partnerinstitute wurden mehrere Expertengespräche mit dem Unternehmen „IFM electronic GmbH“ geführt.

„Laser Doppler Anemometrie“ wurde als plausibel eingestuft. Die Methode ist in diversen maschinenbaulichen Bereichen ein etabliertes Verfahren. Für Partikelflussmessung (Geschwindigkeitsmessung) in Mehrphasenströmungen wie in Turbinen oder Rohren sind Kenntnisse vorhanden. Aufgrund der Funktionsweise des Verfahrens kann es nur in Kombination mit Sichtfenstern verwendet werden. Für die Untersuchung von Mehrphasenströmungen, deren Hauptphase gasförmig ist, sind keine Erfahrungen vorhanden. Das LDA Verfahren (zweckentfremdet als Lichtschranke) funktioniert zufolge der Messvolumenbeschaffenheit.

„Endoskop Kamera“ wurde als nicht plausibel eingestuft. Bei verbau der Kamera in den Getriebeinnenraum erblindet die Kameralinse zufolge des Spritzöls und des Ölnebels. Somit ist eine Auswertung nicht möglich.

„Particle Image Velocimetry (PIV)“ wurde als plausibel eingestuft. PIV wird bereits bei Strömungsuntersuchungen verwendet. Der große Nachteil der Methode sind die transparenten Bauteile. Zuzufolge der Grenzen von Drehzahl und Öltemperatur können keine realen Bedingungen nachgestellt werden. Weiter ist der Prüfkörperpräparationsaufwand enorm. Für Schwenklagenuntersuchungen kann die Methode nicht verwendet werden.

„Fluoreszenz“ wurde als plausibel eingestuft. Eosin Y ist öllöslich und kann zur Untersuchung verwendet werden. Die UV-Lichtquelle muss von Spritzöl geschützt werden. Probleme liegen in der Ölfilmstärke. Je mehr Eosin Y im Öl fluoresziert, desto mehr Licht absorbiert das Öl. Oberflächen mit geringen Mengen Restöl müssen aufwendig gesäubert werden, da kleinste Mengen Eosin Y Licht emittieren.

„Lichtschranke“ wurde als nicht plausibel eingestuft. Zuzufolge der Brechungseigenschaften von Acrylglas, den geringen Intensitäten der Lichtstrahlen und den Reflexionsbestimmungen im Getriebe ist es nicht möglich die Methode umzusetzen. Weiter ist zufolge des Ölnebels eine mögliche Absorption gegeben, die zu Scheinergebnissen führt.

Tabelle 7-3: Zusammenfassung Optische Verfahren

|                                  | Reproduzierbarkeit der Ergebnisse | Mindestölmenge | Auswertegenauigkeit | Realitätseinbußen |
|----------------------------------|-----------------------------------|----------------|---------------------|-------------------|
| Laser Doppler Anemometrie        | Grün                              | Grün           | Gelb                | Grün              |
| Endoskop Kamera                  | Rot                               | Grün           | Rot                 | Gelb              |
| Particle Image Velocimetry (PIV) | Grün                              | Grün           | Grün                | Rot               |
| Fluoreszenz                      | Gelb                              | Gelb           | Rot                 | Grün              |
| Lichtschanke                     | Rot                               | Rot            | Rot                 | Grün              |

In Tabelle 7-3 sind die Aspekte der Kategorie „Optische Beurteilung“ zusammengefasst. Die Beurteilungskategorien werden nachstehend kurz erläutert.

- „Reproduzierbarkeit der Ergebnisse“ bewertet die Möglichkeit den Versuch zu Wiederholen und zu den gleichen Resultaten zu gelangen
- „Mindestölmenge“ bewertet die erforderliche Menge an Öl um die Detektion zu bestätigen
- „Auswertungsgenauigkeit“ bewertet die eindeutige Zuordnung der Veränderung der optischen Eigenschaften zufolge des Öls
- „Realitätseinbußen“ bewertet die Veränderung des Ergebnisses zufolge von Umbauten oder adaptierten Komponenten am Getriebe

Abschließend ist zuzusagen, dass mit der optischen Beurteilung das erste Mal eine exakte Zuweisung möglich ist, also eine direkte Messung. Zuzufolge den Informationen und Erfahrungen werden die Methoden „Laser Doppler Anemometrie“ und „Fluoreszenz“ weiterverfolgt.

#### 7.1.4 Beurteilung Änderung elektrischer Größen

Bei der Kategorie „Änderung elektrischer Größen“ wurde auf Wissen des IME zurückgegriffen. Zuzufolge Firmenkooperationen mit „WayCon Positionsmesstechnik GmbH“, „Automation24 GmbH“, „Balluff GmbH“ und „IFM electronic GmbH“ wurden umfangreiche Vorabschätzungen durchgeführt.

„Änderung der Kapazität“ wurde als plausibel eingestuft. Das elektrische Feld muss sehr sensitiv zufolge der geringen Permittivität des Öls reagieren. Weiter muss ein hermetisch dichtes Sensorgehäuse verwendet werden, um das Eindringen von Öl zu verhindern. Beschränkt ist der kapazitive Sensor im Einbau. Ein lotrechter Einbau ist zwingend notwendig, da der Signalweg bei einer Abweichung vom lotrechten Einbau verkürzt wird.

„Elektrische Leitfähigkeit“ wurde als nicht plausibel eingestuft. Zuzufolge der Neuheit und der nicht erprobten Eigenschaften von Kohlenstoffplättchen, zum Aufbau eines elektrischen Feldes an Luft, wurde stark davon abgeraten. Bei Kontakt der Kohlenstoffplättchen entstünde ein Lichtbogen, welcher in einem Luft-Öl Gemisch zu einer Explosion führt.

„Magnetismus“ wurde als nicht plausibel eingestuft. Zuzufolge der geringen Änderung des Magnetfeldes müssen die Eisenpartikel vordefinierte geometrische Größen besitzen. Da die Partikelgröße bei Dauerversuchen zu Lagerschäden führt, kann die Methode nicht umgesetzt werden.

Tabelle 7-4: Zusammenfassung Änderung elektrischer Größe

|                           | Adaptionsaufwand | Auswertegenauigkeit | Reproduzierbarkeit | Mindestölmenge |
|---------------------------|------------------|---------------------|--------------------|----------------|
| Änderung der Kapazität    | Yellow           | Green               | Green              | Green          |
| Elektrische Leitfähigkeit | Red              | Yellow              | Yellow             | Green          |
| Magnetismus               | Yellow           | Red                 | Green              | Red            |

- „Adaptionsaufwand“ bewertet den Aufwand zur Adaption der Sensorik
- „Auswertungsgenauigkeit“ bewertet die eindeutige Zuordnung der Veränderung der elektrischen Eigenschaften zufolge des Öls
- „Reproduzierbarkeit der Ergebnisse“ bewertet die Möglichkeit den Versuch zu Wiederholen und zu den gleichen Resultaten zu gelangen
- „Mindestölmenge“ bewertet die erforderliche Menge an Öl um die Detektion zu bestätigen

Zusammenfassend ist zu sagen, dass aufgrund der vorliegenden Tatsachen die „Änderung der Kapazität“ weiterverfolgt wird. Neben Erfahrungen in anderen Bereichen, sowie des anfertigen Sensors, können einfach Messungen durchgeführt werden.

### 7.1.5 Bewertung Temperaturänderung

„Temperaturänderung“ fasst die Änderung der physikalischen Größe Temperatur in mehrere unterschiedlichen Methoden zusammen. Temperaturänderung tritt zufolge den in Kapitel 3 genannten Phänomenen auf.

„Thermoelement“ wurde als plausibel eingestuft. Aufgrund von Wärmeleitung zwischen Öl und der Sensorspitze wird ein Temperaturgradient erfasst. Folglich Konvektion kann die Temperaturmessung schwanken, bei einem Temperatursprung kann jedoch die Detektion bestätigt werden.

„Berührungsloses Messen“ wurde als nicht plausibel eingestuft. Der Messstrahl wird vom Ölnebel abgelenkt und gestreut. Weiter Strahlen die umliegenden Bauteile, wodurch ein Messfehler auftritt.

Tabelle 7-5: Zusammenfassung Temperaturänderung

|                           | Ansprechzeit | Messgenauigkeit | Adaptionsaufwand | Mindestölmenge |
|---------------------------|--------------|-----------------|------------------|----------------|
| Thermoelement             |              |                 |                  |                |
| Berührungslose<br>Messung |              |                 |                  |                |

- „Ansprechzeit“ bewertet die Dauer, die der Sensor benötigt um ein verwertbares Ergebnis zu generieren
- „Messgenauigkeit“ bewertet die Abweichung zwischen Sensormesswert und realem Wert. Die Messgenauigkeit wird dem Datenblatt entnommen
- „Adaptionsaufwand“ bewertet den Aufwand zur Adaption der Sensorik
- „Mindestölmenge“ bewertet die erforderliche Menge an Öl, um die Detektion zu bestätigen

Zufolge der Vorzüge des Thermoelements wird die Methode weiterverfolgt.

## 7.2 Beurteilung Durchflussmenge

Die Methoden zur Bestimmung der Durchflussmenge wurde ähnlich den Methoden der Öldetektion bewertet. Aufgrund der identen Funktionsweise scheiden die Methoden zur Durchflussbestimmung aus denselben Gründen aus.

„Fluoreszenz“ wurde als nicht plausibel eingestuft. Eosin Y fluoresziert unter der Einstrahlung von UV-Licht. Öl absorbiert Licht im sichtbaren Bereich. Je dicker der Ölfilm, desto größer ist die absorbierende Wirkung von Öl. Folglich kann nicht auf eine Schichtdicke geschlossen werden.

„Seppeler“ wurde als plausibel eingestuft. Das „Seppeler“ ist seit Jahrzehnten im Einsatz und kann für die Anwendung bei Schmierkreislaufuntersuchungen adaptiert werden.

„Durchflusszähler“ wurde als plausibel eingestuft. Diese Methode ist käuflich und für Getriebe adaptierbar. Temperatur- und Durchflussgrenzen müssen berücksichtigt werden, können aber mit Herstellern abgesprochen und modifiziert werden.

„Particle Image Velocimetry“ wurde als plausibel eingestuft. Die Ausführung von Getriebegehäuseteilen aus Acrylglas ermöglicht den Einblick in das Getriebe. Mit den Kamerabildern kann zufolge der Strömungsgeschwindigkeit und der geometrischen Größen auf den Durchfluss gerechnet werden.

„Tracerzugabe“ wurde als nicht plausibel eingestuft. Die Detektoren sind bezüglich der Messmethode zu träge, um auf verwertbare Durchflussmengen zu schließen.

„Gehäuse“ wurde als nicht plausibel eingestuft. Zufolge von rotordynamischen und akustischen Phänomenen sind die im Getriebe vorherrschenden Geräusche dominierend und verhindern eine genaue Durchflussbestimmung.

„Eigenfrequenz“ wurde als nicht plausibel eingestuft. Die Schwingungen im Getriebe sind zu dominant, um eine genaue Durchflussbestimmung zu ermöglichen.

„Änderung der Kapazität“ konnte keine Einteilung festgelegt werden. Zuzolge der Ungewissheit der Öldetektionsmethode kann keine klare Aussage über eine Schichtdickenermittlung und folglich eine Durchflussmengen Bestimmung durchgeführt werden.

Tabelle 7-6: Zusammenfassung Durchflussmessung

|                            | Streuung | Reproduzierbarkeit | Adaptionen | Umsetzung |
|----------------------------|----------|--------------------|------------|-----------|
| Fluoreszenz                | Red      | Red                | Yellow     | Red       |
| Seppeler                   | Green    | Green              | Yellow     | Green     |
| Durchflusszähler           | Green    | Green              | Yellow     | Green     |
| Particle Image Velocimetry | Green    | Green              | Red        | Red       |
| Tracerzugabe               | Red      | Red                | Red        | Red       |
| Gehäuse                    | Red      | Red                | Red        | Red       |
| Eigenfrequenz              | Red      | Red                | Red        | Red       |
| Änderung der Kapazität     | Yellow   | Yellow             | Yellow     | Yellow    |

- „Streuung“ bewertet die Abweichung der Messergebnisse, welche zuzolge mehrerer Messläufe auftritt
- „Reproduzierbarkeit der Ergebnisse“ bewertet die Möglichkeit den Versuch zu Wiederholen und zu den gleichen Resultaten zu gelangen
- „Adaptionsaufwand “ bewertet den Aufwand zur Adaption der Sensorik.
- „Umsetzung“ bewertet die Möglichkeit der Methode in kurzer Zeit eine Durchflussmessung durchzuführen.

Zuzolge der Käuflichkeit der Methode „Durchflusszähler“ wird diese weiter untersucht. Aufgrund von Temperatur- und Durchflussgrenzen der Methode „Durchflusszähler“ wird auch die Methode „Seppeler“ weiter untersucht.

## 8 Zusammenfassung der Methoden

Die Funktionsweisen der Methoden sind in Kapitel 6 zusammengefasst. In Kapitel 7 werden die Verfahren bewertet, wobei sechs Methoden näher untersucht werden. Diese sechs Methoden werden in diesem Kapitel erläutert und ihre physikalischen Eigenschaften erklärt. Abschließend werden die Methoden mit dem VDI 2225 Bogen bewertet und jene Verfahren bestimmt, die im Prinzipversuch verifiziert und validiert werden. Auch die durchflussbestimmenden Methoden werden in ihrer technischen Funktionsweise erklärt und bewertet.

### 8.1 Feste Isotope

Für die Methode „Feste Isotope“ ist ein Sensor notwendig, der radioaktive Strahlung erfasst. Das Unternehmen „Teviso Sensor Technologies Ltd“, stellt Sensoren dieser Art zur Verfügung. Die Methode verwendet für die Öldetektion  $\text{Co}^{57}$ , was bedeutet, dass ein Sensor verwendet werden muss, der  $\gamma$ -Strahlung detektieren kann.  $\text{Co}^{57}$  emittiert neben  $\gamma$ - auch  $\alpha$ -Strahlung, jedoch nicht in der selben Intensität. Somit müsste ein sensiblerer Sensor verwendet werden [21].



Abbildung 8-1: RD2014, Radioaktiver Zerfall [20]

In Abbildung 8-1 ist der Sensor RD2014 abgebildet. Der Sensor misst  $\gamma$ -Strahlung nach dem PIN-Dioden Prinzip. PIN-Dioden bestehen aus zwei dotierten Schichten (P-, N-Schicht) mit einer schwach leitenden Schicht dazwischen (I-Schicht). Sobald ein leitendes Teilchen aus der I-Schicht gelöst wird und in Richtung P- oder N-Schicht wandert fließt Strom.

Durch den Zerfall eines Isotopes wird ein  $\gamma$ -Teilchen frei das auf den Sensor zuwandert. Die PIN-Diode arbeitet in Sperrrichtung. Trifft das Teilchen ein Elektron einer Schale in der I-Schicht, löst sich das Elektron und fliegt frei herum (siehe Abbildung 8-2). Die gelösten Elektronen werden vom Sensor detektiert in dem das Elektron zur N-Diode wandert und demzufolge ein Strom fließt. An einem im Stromfluss liegenden Widerstand kann eine Spannung gemessen werden und folglich auch ein radioaktiver Zerfall festgestellt werden.

Die Temperaturgrenzen des Sensors liegen zwischen  $-65\text{ °C}$  und  $110\text{ °C}$ . Die Linearität des Sensors ist zwischen  $-30\text{ °C}$  und  $50\text{ °C}$  gegeben. Für die Korrekturbeziehungen höherer/niedrigerer Temperaturen wird auf das Datenblatt im Anhang verwiesen [20].

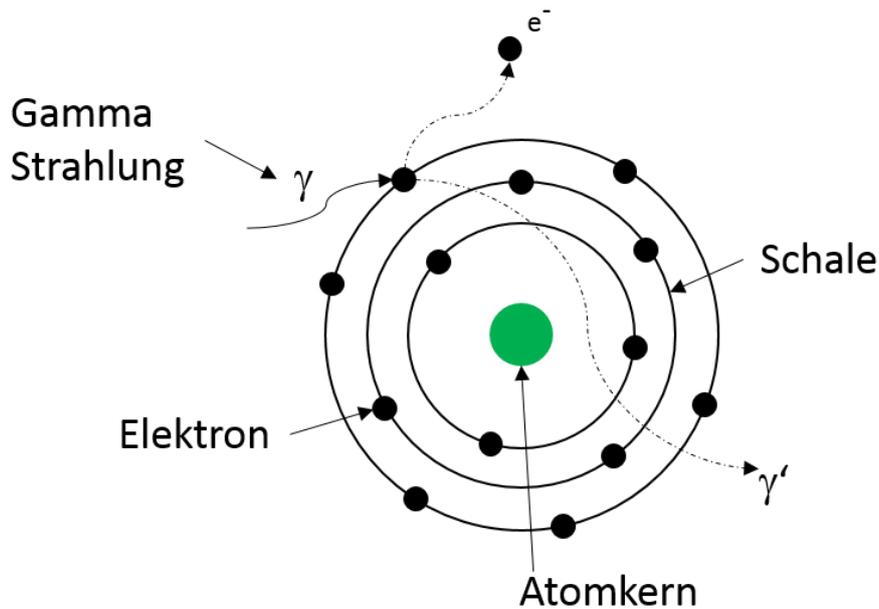


Abbildung 8-2: Schalenmodell

Durch das Zählen der freiwerdenden Elektronen wird Öl detektiert. Die Sensorensitivität liegt bei 5,8 Messpunkten pro Minute pro  $\mu\text{Sv/h}$ .  $\mu\text{Sv/h}$  ist die Einheit der Strahlendosen bei ionisierter Strahlung.  $\text{Co}^{57}$  emittiert bei 122 keV Strahlung in Höhe von  $40,9 \mu\text{Sv/h}$  bei einem Meter Messabstand [21]. Je näher die Isotope am Sensor zerfallen, desto höhere Strahlenwerte werden gemessen. Maximal können  $100 \text{ mSv/h}$  gemessen werden. Energetisch sind zwischen  $50\text{keV}$  und  $2\text{MeV}$  erfassbar.

Der relative Messfehler beläuft sich auf  $\pm 15 \%$  [20]. Der relative Messfehler bezieht sich auf den aktuell gemessenen Wert. Der Aufschlagwinkel der  $\gamma$ -Strahlen steht im nichtlinearen Verhältnis zum Messwert.

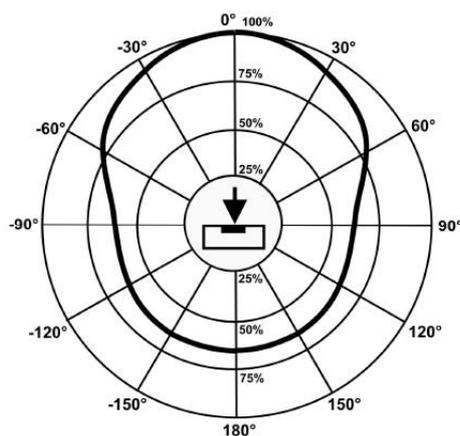


Abbildung 8-3: Anstrahlwinkel [20]

In Abbildung 8-3 ist der prozentuelle Messfehler in Abhängigkeit der Winkellage der Anstrahlrichtung dargestellt. Die aktive Zone am Sensor ist  $12 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ . In diesem Bereich müssen die  $\gamma$ -Strahlen auftreffen um erfasst zu werden.

## 8.2 Körperschall

Die Methode „Körperschall“ beruht auf der Funktionsweise eines Beschleunigungssensors mit einem piezotechnischen Messprinzip. Ein Beschleunigungssensor ist ein dynamischer Sensor und erfasst nur Signalwertänderungen.

Das Unternehmen „PCB Group, Inc.“ bietet diverse Beschleunigungssensoren an, welche für den spezifischen Anwendungsfall geeignet sind. Ein Beschleunigungssensor ist mit einem Piezoelement (Silizium Quarz) ausgestattet. Ein Piezoelement nutzt den Piezoeffekt, welcher auf dem Prinzip der Polarisation beruht. Polarisation bedeutet, dass durch eine Verformung des Piezoelements eine Verschiebung von elektrischen Ladungen eintritt und folglich ein elektrisches Feld entsteht. Bei unterschiedlichen Verformungen entstehen folglich unterschiedliche Felder. Bei Änderung des Feldes wird eine unterschiedliche Spannung gemessen. In Abbildung 8-4 ist ein Piezoelement dargestellt.

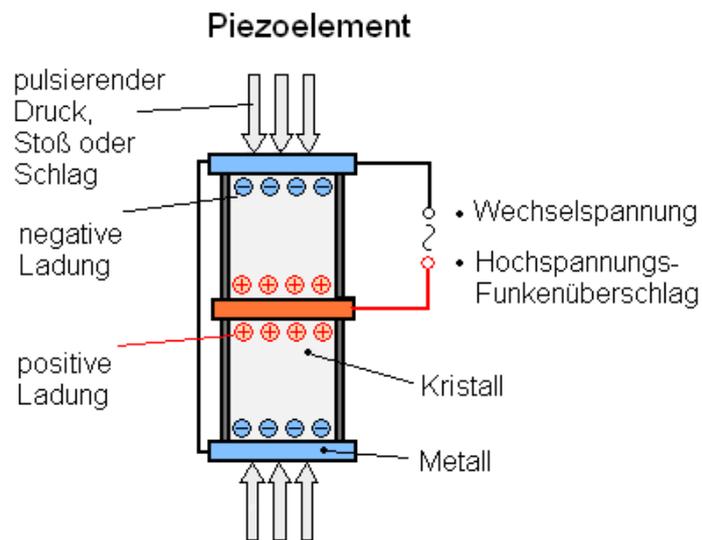


Abbildung 8-4: Piezoelement [22]

Der Quarz ist an der Ober- und Unterseite mit einem Leiter verbunden. Durch eine pulsierende Belastung, zum Beispiel eine Unwucht durch Drehung einer Welle im Getriebe, verformt sich der Quarz gering, überträgt so Ladung und erzeugt ein elektrisches Feld.



Abbildung 8-5: PCB Beschleunigungssensor [23]

In Abbildung 8-5 ist ein möglicher Beschleunigungssensor dargestellt. Für die Methode wird der Sensor „320C03“ verwendet. Der Sensor besitzt eine Messgenauigkeit von 0,005 g. Der Temperaturbereich liegt zwischen -73 °C und 163 °C. Für weitere Informationen wird auf den Anhang verwiesen.

Mit diesem Beschleunigungssensor werden die Schwingungen, welche vom Lager erzeugt werden, befriedigend genau erfasst. Der Sensor wird am Gehäuse montiert, indem die Messfläche mit Superkleber oder X60 bestrichen wird. Durch die dünne Schicht Klebstoff, haftet der Sensor an der Gehäuseaußenwand. Zum Lösen wird ein Gabelschlüssel am Sensor positioniert und stoßfrei gelöst. Beschleunigungssensoren sind sehr empfindlich auf Stoßbelastungen. Durch einen Stoß wird der Quarzkristall übermäßig verformt und beschädigt.



Abbildung 8-6: Messverstärker National Instruments [24]

Zum Auswerten der Signalwerte wird ein Signalverstärker benötigt. Der Beschleunigungssensor registriert eine Vielzahl an Schwingungen. Der Messverstärker erfasst die Schwingungen und sortiert vorab nach ähnlichen Amplituden mit wiederkehrenden Periodendauern. Mittels „Fast Fourier Transformation“, kurz „FFT“, unterteilt der Signalverstärker die Signale in Teilschwingungen und sortiert die Schwingungen.

Eine FFT basiert auf einem Algorithmus zur Berechnung der „Diskreten Fourier Transformation“, kurz „DFT“. Eine DFT bildet ein Frequenzspektrum. Ein Frequenzspektrum besteht aus einem zeitdiskreten endlichem Signal mit periodischer Wiederholung. Zuzufolge dieser Periodizität können bestimmten Frequenzen bestimmte Ursachen zugeordnet werden. Dies basiert auf dem Wissen von Drehzahlen und geometrischen Größen von Bauteilen im Getriebe. Bei einer vorhandenen Schwingung mit derselben Frequenz wie zum Beispiel der Getriebewelle ist eine Zuordnung der Schwingung möglich. Über die Geometrie kann zum Beispiel bei Wälzlagern eine Zuordnung durchgeführt werden.

Bei der FFT wird das Signal der DFT verwendet und durch einen Algorithmus in einzelne Frequenzanteile zerlegt, die genauer analysiert werden.

### 8.3 Laser Doppler Anemometrie

Das LDA Verfahren basiert auf zwei geteilten Laserstrahlen, die durch Kreuzung ein Messvolumen erzeugen. Der Laserstrahl wird in einer Röhre erzeugt, welche mit Heliumatomen und Neonatomen gefüllt ist. Die Gase stehen unter Druck und an den Enden befindet sich jeweils ein Brewster-Fenster. Das Brewster-Fenster polarisieren das Licht durch eine Abstrahlung im Polarisationswinkel. An den Enden der Röhre sind zwei Elektroden montiert, die für die Gasentladung notwendig sind. Durch Pulsation übertragen die Heliumatome Energie an die Neonatome und erzeugen durch Energieübergänge in den Bändern Licht. Das Licht des Helium-Neon-Lasers besitzt eine Wellenlänge von 633 nm (abhängig vom Druck in der Röhre).

Der Laserstrahl wird in die Braggzelle übergeführt. Die Braggzelle besitzt halbdurchlässige Spiegel und teilt den Laserstrahl in zwei Laserstrahlen mit gleicher Wellenlänge und halber Intensität. Die Strahlen werden mit Glasfaserkabel zum Transmitter geführt. Der Transmitter bündelt die beiden Strahlen durch eine Linse. Die Linse ist verstellbar, wodurch die Position des Brennpunktes verstellt werden kann. Der Brennpunkt stellt das Messvolumen dar.

Sobald ein Partikel durch das Messvolumen wandert, entsteht eine Verschiebung der Wellenlänge, eine sogenannte Dopplerverschiebung. Die Verschiebung wird an den Transmitter zurückgesendet und vom Photodetektor ausgewertet. Der Photodetektor überlagert die Schwingungen und ermittelt zufolge der bekannten Partikelgröße und der Größe der Verschiebung die Geschwindigkeit des Partikels.

In Abbildung 8-7 ist der schematische Aufbau des LDA Verfahrens dargestellt.

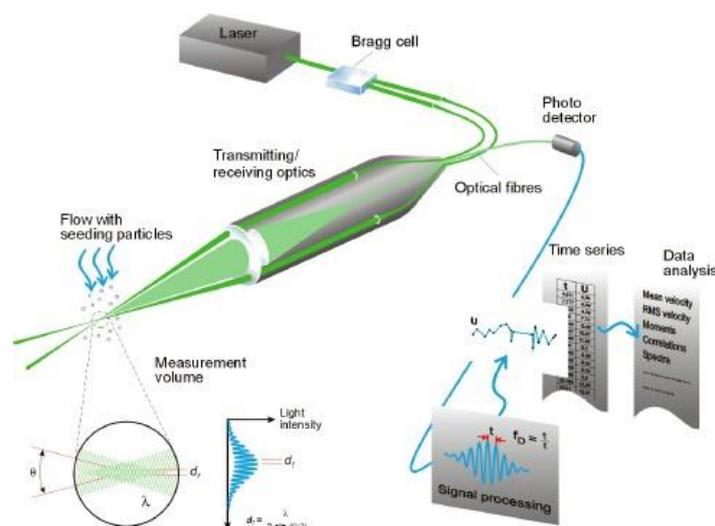


Abbildung 8-7: LDA Beschreibung [25]

In der Methode wird das LDA Verfahren zweckentfremdet und als Lichtschranke genutzt. Es wird das Messvolumen auf den Kontrollpunkt gerichtet und an ein Auslesegerät angeschlossen. Das Auslesegerät kann für einfache Anwendungen ein Oszilloskop sein, für Anwendungen mit höheren Anforderungen werden Spektralanalysator verwendet. Dieser Analysator wertet die Dopplerverschiebung aus und erkennt früher und eindeutiger eine Verschiebung. In Abbildung 8-8 sind verschiedene Transmitterköpfe und ein Spektralanalysator dargestellt.

Je nach Größe des Transmitterkopfes werden verschiedene Brennweiten des Messvolumens realisiert. Die Transmittergröße steht in direktem Zusammenhang mit der Linse und folglich auch mit der Brennweite.



Abbildung 8-8: LDA Laserköpfe [26] und Spektral Analysator [27]

Das Unternehmen „Dantec Dynamics GmbH“ bietet umfangreiches Equipment zur LDA Messung an. Für die Methode wäre die Serie „FlowLite LDA Systems“ geeignet.

#### 8.4 Fluoreszenz

Die Methode „Fluoreszenz“ nutzt das Phänomen der Lichtabsorption und –emission von fluoreszierenden Stoffen unter UV-Licht. Im Anwendungsfall wird Eosin Y mit dem Öl vermischt und durch eine UV-Lichtquelle mit energiereichem Licht angeregt. Das Eosin Y nimmt einen Teil der Energie des Lichtes auf und beginnt zu fluoreszieren.



Abbildung 8-9: Fluoreszenz Eosin Y [28]

Bei Eosin Y handelt es sich um ein Natriumsalz. Durch Absorption von kurzwelligem Licht (UV-Licht) erfolgt die Anregung des Elektronensystems, wodurch ein Übergang der angeregten Elektronen auf ein höheres Energieniveau stattfindet. Die Elektronen können sich jedoch auf diesem Niveau nur für kurze Zeit halten und kehren rasch auf ihr ursprüngliches Energieniveau zurück. Dabei wird die zuvor absorbierte UV-Energie in Form von längerwelliger Strahlung (633 nm; rotes Licht) wieder freigesetzt wodurch eine Emission des Fluoreszenzlichts stattfindet. [28]

## 8.5 Änderung der Kapazität

„Änderung der Kapazität“ basiert auf der Änderung des elektrischen Feldes, welches von einem Kondensator aufgebaut wird.

$$i(t) = C * \frac{du(t)}{dt} \quad (8.1)$$

Durch die konzentrische Anordnung von Ringelektronen, welche an eine Spannungsquelle angeschlossen werden, wird ein elektrisches Feld erzeugt. In Gleichung (8.1) wird der Zusammenhang zwischen Spannung, Stromstärke und Kapazität dargestellt, jedoch keine Relation zwischen der Kapazität des Sensors und dem elektrischen Feld. Das elektrische Feld  $\vec{E}$  ist definiert durch:

$$\vec{E} = \frac{\vec{D}}{\epsilon_0 \epsilon_r} \quad (8.2)$$

$\vec{D}$  stellt die elektrische Flussdicht,  $\epsilon_0$  ist die elektrische Feldkonstante und  $\epsilon_r$  die relative Permittivität des Stoffes dar. Die elektrische Flussdichte ergibt sich zufolge der Ladung pro Fläche. Die Ladung steht in Zusammenhang mit dem Strom. Über diese Beziehung wird Gleichung (8.1) und Gleichung (8.2) mit einander in Verbindung gebracht. Durch die dielektrische Eigenschaft des Öls ändert sich das Feld. Durch konstanten Strom ändert sich die Spannung (siehe Gleichung (8.1)). Durch die Spannungsänderung kann das Öl detektiert werden. In Abbildung 8-10 ist der Aufbau eines kapazitiven Sensors dargestellt.

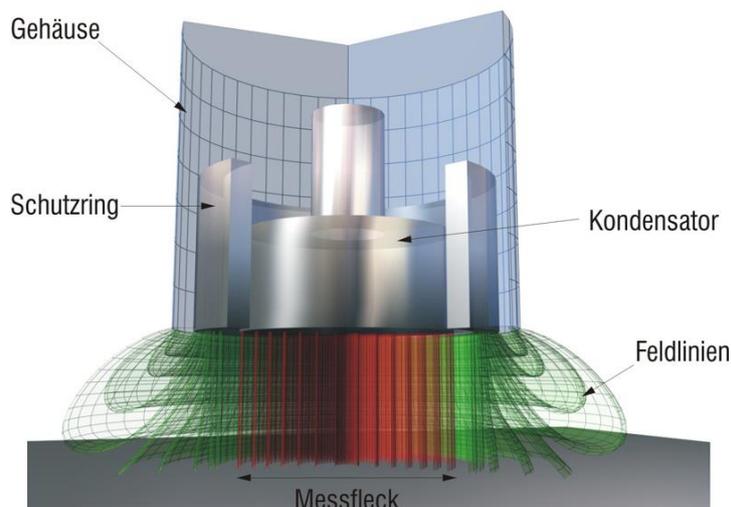


Abbildung 8-10: Kapazitiver Sensor Aufbau [29]

Das elektrische Feld besitzt einen durch den Sensor geometrisch definierten Schaltabstand. Dieser Weg begrenzt die Entfernung in der eine Änderung wahrgenommen wird. Alle diese Änderungen sind auf die Permittivität von Luft bezogen, wodurch eine Vorhersage für Öl nicht getroffen werden kann. An der Spitze des Sensors befindet sich der Messfleck. Im Messfleck sind die Feldlinien am stärksten und die Ergebnisse eindeutig. Für die Methode wurde der Sensor „KG5066“ des Unternehmens „IFM electronic GmbH“ gewählt. Der Sensor, in Verbindung mit dem IO-Link System zum Auslesen von Daten, weist eine Taktzeit von  $\frac{1}{10}$  Sekunde auf. Der Sensor besitzt eine Schaltfunktion, um bei einer bestimmten Ölmenge einen Schließ- oder Öffnungsvorgang zu bestimmen. Je nach Peripherie und Analysemedium besitzt der Sensor eine Hysterese Genauigkeit von 1 bis 15 %. Die Hysterese ist notwendig, um das Signalschwanken des Sensors zu unterdrücken und den Schalterpunkt klar zu definieren.



Abbildung 8-11: Kapazitiver Sensor [30]



Abbildung 8-12: Signalverstärker IFM Sensoren[31]

In Abbildung 8-12 ist das IO-Link System dargestellt, dass für die Auswertung von Daten benötigt wird. Das Auslesegerät verarbeitet die Signaländerung des Sensors und wandelt das Signal in einen für den PC verwendbaren Input.

## 8.6 Thermoelement

Die Methode „Thermoelement“ nutzt den Seebeck-Effekt. Der Seebeck-Effekt basiert auf der Thermospannung zweier Werkstoffpaarungen. Es wird die Spannung zwischen zwei Materialien bei einer bekannten Temperatur und einer unbekanntem Temperatur bestimmt. Durch die Wärmeleitwerte der Werkstoffe wird auf die Temperatur zurückgerechnet.

$$U = (k_a - k_b) * (T_a - T_b) \quad (8.3)$$

U ist die gemessene Spannung.  $k_a$  und  $k_b$  stellen die Thermoempfindlichkeit und  $T_a$  und  $T_b$  die Temperaturen dar. Bei bekannten Werkstoffen, bekannter Temperatur (zum Beispiel  $T_a$ ) und gemessener Spannung kann auf die gesuchte Temperatur zurückgerechnet werden.

In Abbildung 8-13 ist der Aufbau eines Thermoelements dargestellt. Die Thermodrähte sind in einer Keramik-Isolierung eingebettet. Die Spitze des Elements ist die Messstelle des Sensors.

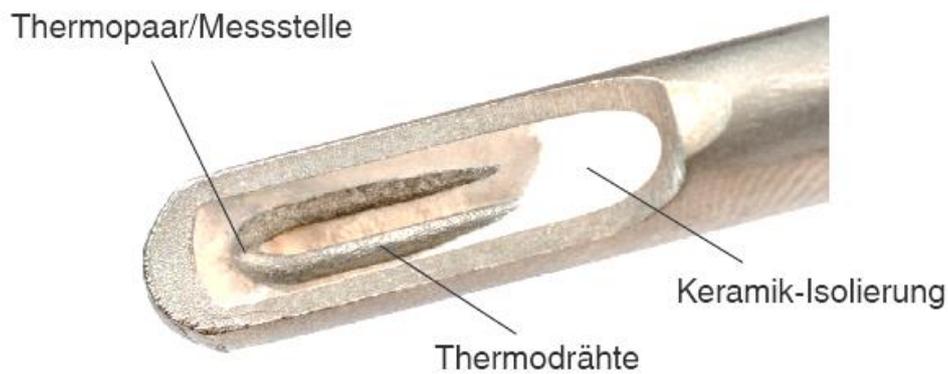


Abbildung 8-13: Thermoelement Schnitt [32]

Für die Methode wird ein Thermoelement Typ-K des Unternehmens „OMEGA Engineering GmbH“ verwendet. Typ-K Elemente verwenden eine Nickel-Chrom/Nickel Kombination. Typ-K Thermoelemente besitzen einen Messbereich zwischen  $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$  und  $1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Der relative Fehler liegt bei  $0,4\%$  (auf den Messwert bezogen). Die Mindestabweichung des Thermoelements liegt bei  $1,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Diese Mindestabweichung ist bei geringen Temperaturen von Relevanz.

Für schnelle Temperaturmessung wird ein dünnes Element ( $0,5\text{mm}$  Durchmesser) verwendet. Zuzufolge der geringen Dicke wird wenig umliegendes Material miterwarmt, wodurch kurze Ansprechzeiten entstehen. Neben der kurzen Ansprechzeit ist ein schneller Temperaturrückgang ein Vorteil von dünnen Elementen.

Zuzufolge der Methodenbeschreibung ist eine Referenzmessung der Temperatur notwendig. Daher ist ein Messverstärker notwendig, welcher mehrere Eingänge besitzt um intern einen Abgleich zu erzeugen und die Messstellentemperatur zu bestimmen. In Abbildung 8-14 ist ein Messverstärker mit mehreren Eingängen dargestellt welcher für die Anwendung der Methode geeignet ist.



Abbildung 8-14: Messverstärker Thermoelement [33]

## 8.7 Seppeler

Mit dem „Seppeler“ kann der Durchfluss manuell bestimmt werden. In Abbildung 8-15 ist ein Seppeler dargestellt.

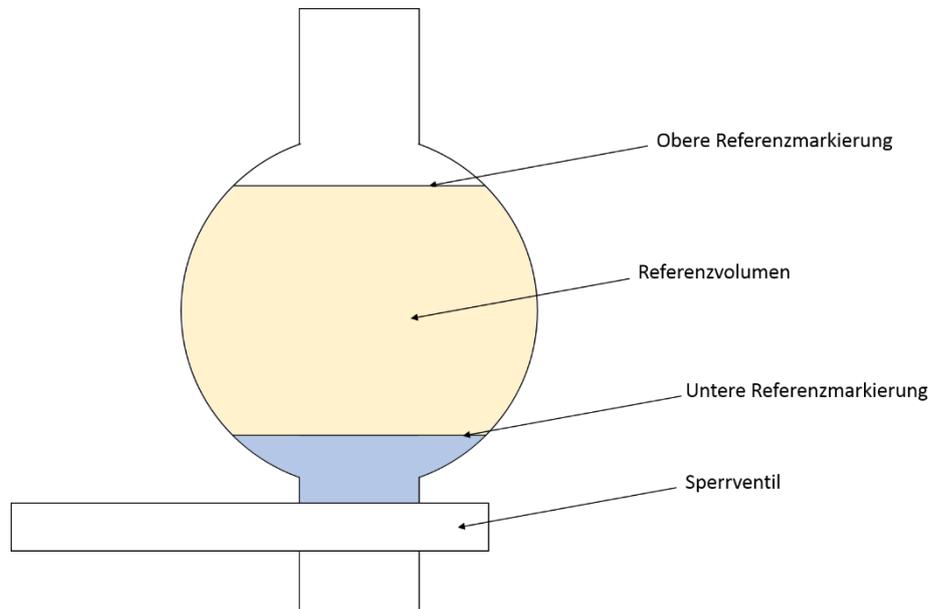


Abbildung 8-15: Prinzipskizze Seppeler

Bevor eine Durchflussmessung durchgeführt werden kann, muss der Prüfkörper präpariert werden. Unter Präparation versteht man ein Anbohren des Gehäuses und Montage einer Ölleitung. Die Bohrungen muss an einer markanten Stelle, zum Beispiel nach einer Lagerstelle, gesetzt werden, um dort den Ölfluss über das Wälzlager zu bestimmen. Eine zweite Bohrung wird in der Nähe des Ölsumpfes gesetzt, um einen Ölrückfluss zu ermöglichen.

Wie in Abbildung 8-15 dargestellt, wird das Seppeler senkrecht angeschlossen. Bei Start der Messung wird das Sperrventil auf die Sperrstellung gedreht, damit sich Öl sammelt. Folglich fließt Öl in das Messgerät bis es die untere Referenzmarkierung erreicht wird. Ist dies der Fall startet die Zeitmessung. Das Öl füllt das Messvolumen des Seppeler. Bei Erreichen der oberen Referenzmarkierung wird die Zeitmessung gestoppt. Mit dem bekannten Volumen  $V$  des Seppeler und der gemessenen Zeit  $t$  kann mit der Beziehung

$$Q = \frac{V}{t} \quad (8.4)$$

der Durchfluss  $Q$  bestimmt werden.

## 8.8 Durchflusszähler

Der Durchflusszähler ist ein voll automatisiertes System, welches bereits am Markt erhältlich ist.



Abbildung 8-16: Durchflusszähler [34]

In Abbildung 8-16 ist der Durchflusszähler dargestellt. Es sind 2 Anschlüsse vorhanden, welche wie beim Seppeler nach dem Lager und zum Ölsumpf hin angeschlossen werden. Jener Durchflusszähler ist mit einem Flügelrad ausgestattet, welches sich durch den Fluss vom Öl zu drehen beginnt und rechnerisch durch die Drehzahl auf den Durchfluss rechnet. Jenes Gerät hat eine Temperaturgrenze bei 80°C. Genauere Daten sind dem Anhang zu entnehmen.

## 8.9 Bewertung nach VDI 2225

In Tabelle 8-1 bis 8-3 sind die ausgefüllten VDI 2225 Bewertungsbögen abgebildet. Die Bögen wurden von Mitarbeitern des IME ausgefüllt.

Zum Beurteilungsschema ist zu sagen, dass 4 das beste und 0 das schlechteste Ergebnis darstellt. Der Bewertungsbogen ist in mehrere Kategorien gegliedert:

- Bewertung des Messprinzips
- Messstellen Vorbereitung
- Messen
- Auswerten

Die wirtschaftlichen Fakten bleiben unberücksichtigt, da für die Auswahl des Prinzipversuches nur die technischen Aspekte von Relevanz sind.

Tabelle 8-1: Bewertung Person 1

| Bewertung des Messprinzips             |  |  |   |  |   |   |                     |                      |   |                 |                                |     |
|--|--|--|---|--|---|---|---------------------|----------------------|---|-----------------|--------------------------------|-----|
| Methode                                | Bewertung des Messprinzips                                   |  |   |  |   |   |                     |                      |   |                 |                                |     |
| Gewichtungsfaktor g <sub>i</sub>       | 1  | 1  | 1   | 1  | 1   | 1   | 1                   | 1                    | 1 | 24              |                                |     |
|  | Ansprechverzögerung (Zeit bis Zustandsänderungen detektiert) | Auflösung (Detektieren eines Unterschieds) | Störeinflussanfälligkeit (Geräusch, Temperaturschwankung) | Resetierbarkeit (Möglicher Neustart der Messung) | Reperaturaufwand (Sensortausch, Eingegossene Systeme) | Sensorschutzmaßnahmen (vor Störeinflüssen, zB heißes Öl spritzt auf hintere Seite und erzeugt Fehler) |                     |                      |   |                 | Befriedigungsgrad (Voranalyse) |     |
| Erhöhter Abrieb                        | 4  | 2  | 2   | 1  | 1   | 3   | 13                  |                      |   |                 |                                | 54% |
| Körperschall                           | 4  | 2  | 1   | 4  | 4   | 4   | 19                  |                      |   |                 |                                | 79% |
| LDA                                    | 4  | 3  | 1   | 3  | 4   | 4   | 19                  |                      |   |                 |                                | 79% |
| Fluoreszenz                            | 3  | 1  | 1   | 1  | 1   | 1   | 8                   |                      |   |                 |                                | 33% |
| Änderung d. Kapazität                  | 4  | 4  | 4   | 4  | 4   | 3   | 23                  |                      |   |                 |                                | 96% |
| Thermoelement                          | 4  | 4  | 2   | 4  | 4   | 4   | 22                  |                      |   |                 |                                | 92% |
| <b>Methode</b>                         | <b>Messtellen vorbereiten (Technisch)</b>                    |  |   |  |   |   |                     |                      |   |                 |                                |     |
| <b>Gewichtungsfaktor g<sub>i</sub></b> | <b>Messen (Wirtschaftlich)</b>                               |  |   |  |   |   |                     |                      |   |                 |                                |     |
|  | Zugänglichkeit   | Prüfstellenbearbeitung                     | Anzahl der adaptierten Komponenten                        | Gewichtetes Ergebnis                             | Kosten Prüfkörper-vorbereitung                        | Zulässige Kosten [€]  | Kosten Zusatzstoffe | Kosten Messequipment |   |                 | Teilbeurteilung                |     |
| Erhöhter Abrieb                        | 3  | 4  | 4   | 11   |   |   |                     |                      |   |                 | 92%                            |     |
| Körperschall                           | 4  | 4  | 4   | 12   |   |   |                     |                      |   |                 | 100%                           |     |
| LDA                                    | 3  | 2  | 3   | 8  |   |   |                     |                      |   |                 | 67%                            |     |
| Fluoreszenz                            | 3  | 2  | 2   | 7  |   |   |                     |                      |   |                 | 58%                            |     |
| Änderung d. Kapazität                  | 4  | 4  | 3   | 11   |   |   |                     |                      |   |                 | 92%                            |     |
| Thermoelement                          | 4  | 4  | 3   | 11   |   |   |                     |                      |   |                 | 92%                            |     |
| <b>Methode</b>                         | <b>Messen (Technisch)</b>                                    |  |   |  |   |   |                     |                      |   |                 |                                |     |
| <b>Gewichtungsfaktor g<sub>i</sub></b> | <b>Messen (Wirtschaftlich)</b>                               |  |   |  |   |   |                     |                      |   |                 |                                |     |
|  | Größe des Messbereichs                                       | Genauigkeit                                | Einfluss vom Getriebe                                     | Reproduzierbarkeit                               | Gewichtetes Ergebnis                                  | Zulässige Kosten [€]  | Kosten Mensch       | Kosten je Messung    |   |                 | Teilbeurteilung                |     |
| Erhöhter Abrieb                        | 4  | 2  | 2   | 1  | 9   |   |                     |                      |   |                 | 56%                            |     |
| Körperschall                           | 1  | 1  | 1   | 3  | 6   |   |                     |                      |   |                 | 38%                            |     |
| LDA                                    | 4  | 4  | 2   | 4  | 14  |   |                     |                      |   |                 | 88%                            |     |
| Fluoreszenz                            | 4  | 1  | 1   | 1  | 7   |   |                     |                      |   |                 | 44%                            |     |
| Änderung d. Kapazität                  | 4  | 4  | 4   | 4  | 16  |   |                     |                      |   |                 | 100%                           |     |
| Thermoelement                          | 3  | 4  | 4   | 4  | 15  |   |                     |                      |   |                 | 94%                            |     |
| <b>Methode</b>                         | <b>Auswerten (Technisch)</b>                                 |  |   |  |   |   |                     |                      |   |                 |                                |     |
| <b>Gewichtungsfaktor g<sub>i</sub></b> | <b>Auswerten (Wirtschaftlich)</b>                            |  |   |  |   |   |                     |                      |   |                 |                                |     |
|  | Auflösung des Signals  | Auswerteaufwand                            | In-Time Messung   | Gewichtetes Ergebnis                             | Kostenstelle Mensch                                   | Zulässige Kosten [€]  | Dauer/ Rechenzeit   |                      |   | Teilbeurteilung |                                |     |
| Erhöhter Abrieb                        | 2  | 4  | 4   | 10   |   |   |                     |                      |   | 83%             |                                |     |
| Körperschall                           | 1  | 1  | 3   | 5  |   |   |                     |                      |   | 65%             |                                |     |
| LDA                                    | 4  | 4  | 4   | 12   |   |   |                     |                      |   | 100%            |                                |     |
| Fluoreszenz                            | 1  | 2  | 3   | 6  |   |   |                     |                      |   | 50%             |                                |     |
| Änderung d. Kapazität                  | 4  | 4  | 4   | 12   |   |   |                     |                      |   | 100%            |                                |     |
| Thermoelement                          | 4  | 4  | 4   | 12   |   |   |                     |                      |   | 100%            |                                |     |

Tabelle 8-2: Bewertung Person 2

| Bewertung des Messprinzips Stückler Thomas |  |  |   |  |   |   |                      |                   |                         |                                |  |
|--|--|--|---|--|---|---|----------------------|-------------------|-------------------------|--------------------------------|--|
| Methode                                    | 1  | 1  | 1   | 1  | 1   | 1   | 1                    | 1                 | 24                      | Befriedigungsgrad (Voranalyse) |  |
| Gewichtungsfaktor $g_i$                    | 1  | 1  | 1   | 1  | 1   | 1   | 1                    | 1                 | 1                       | Summe                          |  |
|  | Ansprechverzögerung (Zeit bis Zustandsänderungen detektiert) | Auflösung (Detektieren eines Unterschieds) | Störeinflussanfälligkeit (Geräusch, Temperaturschwankung) | Resetierbarkeit (Möglicher Neustart der Messung) | Reparaturaufwand (Sensortausch, Eingegossene Systeme) | Sensorschutzmaßnahmen (vorhinterseite und erzeugt Fehler) |                      |                   |                         |                                |  |
| Erhöhter Abrieb                            | 2  | 4  | 3   | 1  | 1   | 2   | 13                   | 54%               |                         |                                |  |
| Körperschall                               | 3  | 3  | 1   | 3  | 3   | 3   | 16                   | 67%               |                         |                                |  |
| LDA  | 3  | 3  | 3   | 3  | 3   | 3   | 18                   | 75%               |                         |                                |  |
| Fluoreszenz                                | 2  | 2  | 3   | 1  | 1   | 2   | 11                   | 46%               |                         |                                |  |
| Änderung d. Kapazität                      | 3  | 3  | 2   | 3  | 2   | 3   | 16                   | 67%               |                         |                                |  |
| Thermoelement                              | 3  | 2  | 1   | 1  | 4   | 3   | 14                   | 58%               |                         |                                |  |
|  |  |  |   |  |   |   |                      |                   |                         |                                |  |
| Methode                                    | Messteilenvorbereitung (Wirtschaftlich)                      |  |   |  |   |   |                      |                   |                         |                                |  |
| Gewichtungsfaktor $g_i$                    | 1  | 1  | 1   | 12   | Zulässige Kosten [€]                                  |   | Kosten Messequipment |                   | Teilbeurteilung         |                                |  |
|  | Zugänglichkeit   | Prüfstellenvorbereitung                    | Anzahl der adaptierten Komponenten                        | Gewichtetes Ergebnis                             | Kosten Prüfkörpervorbereitung                         | Kosten Zusatzstoffe                                       | Kosten Messequipment |                   |                         |                                |  |
| Erhöhter Abrieb                            | 1  | 1  | 1   | 3  |   |   |                      | 25%               |                         |                                |  |
| Körperschall                               | 3  | 3  | 2   | 8  |   |   |                      | 67%               |                         |                                |  |
| LDA  | 3  | 3  | 1   | 7  |   |   |                      | 58%               |                         |                                |  |
| Fluoreszenz                                | 1  | 1  | 1   | 3  |   |   |                      | 25%               |                         |                                |  |
| Änderung d. Kapazität                      | 3  | 3  | 2   | 8  |   |   |                      | 67%               |                         |                                |  |
| Thermoelement                              | 3  | 3  | 3   | 9  |   |   |                      | 75%               |                         |                                |  |
|  |  |  |   |  |   |   |                      |                   |                         |                                |  |
| Methode                                    | Messen (Wirtschaftlich)                                      |  |   |  |   |   |                      |                   |                         |                                |  |
| Gewichtungsfaktor $g_i$                    | 1  | 1  | 1   | 1  | 16  | Zulässige Kosten [€]                                      |                      | Kosten je Messung |                         | Teilbeurteilung                |  |
|  | Größe des Messbereichs                                       | Genauigkeit                                | Einfluss vom Getriebe                                     | Reproduzierbarkeit                               | Gewichtetes Ergebnis                                  | Kosten Mensch   | Kosten je Messung    |                   |                         |                                |  |
| Erhöhter Abrieb                            | 2  | 3  | 2   | 2  | 9   |   |                      | 56%               |                         |                                |  |
| Körperschall                               | 1  | 2  | 1   | 1  | 5   |   |                      | 31%               |                         |                                |  |
| LDA  | 2  | 2  | 3   | 3  | 10  |   |                      | 63%               |                         |                                |  |
| Fluoreszenz                                | 2  | 2  | 2   | 2  | 8   |   |                      | 50%               |                         |                                |  |
| Änderung d. Kapazität                      | 3  | 3  | 3   | 3  | 12  |   |                      | 75%               |                         |                                |  |
| Thermoelement                              | 1  | 2  | 2   | 2  | 7   |   |                      | 44%               |                         |                                |  |
|  |  |  |   |  |   |   |                      |                   |                         |                                |  |
| Methode                                    | Auswerten (Wirtschaftlich)                                   |  |   |  |   |   |                      |                   |                         |                                |  |
| Gewichtungsfaktor $g_i$                    | 1  | 1  | 1   | 12   | Zulässige Kosten [€]                                  |   | Teilbeurteilung      |                   | Gesamte Teilbeurteilung |                                |  |
|  | Auflösung des Signals  | Auswerteaufwand                            | In-Time Messung   | Gewichtetes Ergebnis                             | Kostenstelle Mensch                                   | Dauer/ Rechenzeit   |                      |                   |                         |                                |  |
| Erhöhter Abrieb                            | 4  | 1  | 1   | 6  |   |   | 50%                  | 46%               |                         |                                |  |
| Körperschall                               | 2  | 2  | 3   | 7  |   |   | 58%                  | 56%               |                         |                                |  |
| LDA  | 3  | 1  | 2   | 6  |   |   | 50%                  | 61%               |                         |                                |  |
| Fluoreszenz                                | 2  | 2  | 2   | 6  |   |   | 50%                  | 43%               |                         |                                |  |
| Änderung d. Kapazität                      | 3  | 3  | 3   | 9  |   |   | 75%                  | 71%               |                         |                                |  |
| Thermoelement                              | 2  | 4  | 3   | 9  |   |   | 75%                  | 63%               |                         |                                |  |

Tabelle 8-3: Bewertung Person 3

| Bewertung des Messprinzips     |  |  |   |  |   |   |                      |   |      |                                   |
|--------------------------------|--|--|---|--|---|---|----------------------|---|------|-----------------------------------|
| Methode                        | 1  | 1  | 1   | 1  | 1   | 1   | 1                    | 1 | 24   | Befriedigungsgrad<br>(Voranalyse) |
| Gewichtungsfaktor $\epsilon_i$ | 1  | 1  | 1   | 1  | 1   | 1   | 1                    | 1 | 1    | Summe                             |
|                                | Ansprechverzögerung<br>(Zeit bis Zustands-<br>änderungen detektiert) | Auflösung<br>(Detektieren eines<br>Unterschieds) | Störeinflussanfälligkeit<br>(Geräusch,<br>Temperaturschwankung) | Resetierbarkeit<br>(Möglicher Neustart<br>der Messung) | Reperaturaufwand<br>(Sensortausch,<br>Eingegossene Systeme) | Sensorschutzmaßnahmen (vor<br>Störeinflüssen, zB heißes Öl spritzt auf<br>hintere Seite und erzeugt Fehler) |                      |   |      |                                   |
| Erhöhter Abrieb                | 4  | 1  | 3   | 1  | 2   | 3   |                      |   | 14   | 58%                               |
| Körperschall                   | 2  | 1  | 2   | 4  | 4   | 4   |                      |   | 17   | 71%                               |
| LDA                            | 4  | 2  | 4   | 4  | 3   | 2   |                      |   | 19   | 79%                               |
| Fluoreszenz                    | 4  | 1  | 3   | 1  | 2   | 3   |                      |   | 14   | 58%                               |
| Änderung d. Kapazität          | 4  | 2  | 3   | 4  | 3   | 3   |                      |   | 19   | 79%                               |
| Thermoelement                  | 3  | 4  | 3   | 3  | 4   | 4   |                      |   | 21   | 88%                               |
| Methode                        | Messstellen vorbereiten (Technisch)                                  |  |   |  |   |   |                      |   |      | Teilbeurteilung                   |
| Gewichtungsfaktor $\epsilon_i$ | 1  | 1  | 1   | 12   | Messstellenvorbereitung (Wirtschaftlich)                    |   |                      |   |      |                                   |
|                                | Zugänglichkeit   | Prüfstellen-<br>bearbeitung                      | Anzahl der adaptierten<br>Komponenten                           | Gewichtetes Ergebnis                                   | Kosten Prüfkörper-<br>vorbereitung                          | Zulässige Kosten [€]<br>Kosten Zusatzstoffe   | Kosten Messequipment |   |      |                                   |
| Erhöhter Abrieb                | 1  | 1  | 1   | 3  |   |   |                      |   | 25%  |                                   |
| Körperschall                   | 4  | 4  | 4   | 12   |   |   |                      |   | 100% |                                   |
| LDA                            | 2  | 2  | 3   | 7  |   |   |                      |   | 58%  |                                   |
| Fluoreszenz                    | 1  | 1  | 1   | 3  |   |   |                      |   | 25%  |                                   |
| Änderung d. Kapazität          | 3  | 2  | 3   | 8  |   |   |                      |   | 67%  |                                   |
| Thermoelement                  | 3  | 2  | 3   | 8  |   |   |                      |   | 67%  |                                   |
| Methode                        | Messen (Technisch)   |  |   |  |   |   |                      |   |      | Teilbeurteilung                   |
| Gewichtungsfaktor $\epsilon_i$ | 1  | 1  | 1   | 1  | 16  | Messen (Wirtschaftlich)   |                      |   |      |                                   |
|                                | Größe des<br>Messbereichs  | Genauigkeit                                      | Einfluss vom Getriebe   | Reproduzierbarkeit                                     | Gewichtetes Ergebnis  | Zulässige Kosten [€]<br>Kosten Mensch   | Kosten je Messung    |   |      |                                   |
| Erhöhter Abrieb                | 4  | 4  | 2   | 2  | 12  |   |                      |   | 75%  |                                   |
| Körperschall                   | 4  | 2  | 2   | 2  | 10  |   |                      |   | 63%  |                                   |
| LDA                            | 2  | 2  | 4   | 3  | 11  |   |                      |   | 69%  |                                   |
| Fluoreszenz                    | 2  | 2  | 2   | 2  | 8   |   |                      |   | 50%  |                                   |
| Änderung d. Kapazität          | 3  | 4  | 3   | 4  | 14  |   |                      |   | 88%  |                                   |
| Thermoelement                  | 3  | 2  | 4   | 3  | 12  |   |                      |   | 75%  |                                   |
| Methode                        | Auswerten (Technisch)  |  |   |  |   |   |                      |   |      | Teilbeurteilung                   |
| Gewichtungsfaktor $\epsilon_i$ | 1  | 1  | 1   | 12   | Auswerten (Wirtschaftlich)                                  |   |                      |   |      |                                   |
|                                | Auflösung des Signals  | Auswerte-<br>aufwand                             | In-Time Messung   | Gewichtetes Ergebnis                                   | Zulässige Kosten [€]<br>Kostenstelle Mensch                 | Dauer/ Rechenzeit   |                      |   |      |                                   |
| Erhöhter Abrieb                | 2  | 1  | 1   | 4  |   |   |                      |   | 33%  |                                   |
| Körperschall                   | 1  | 1  | 4   | 6  |   |   |                      |   | 50%  |                                   |
| LDA                            | 3  | 2  | 3   | 8  |   |   |                      |   | 67%  |                                   |
| Fluoreszenz                    | 2  | 1  | 1   | 4  |   |   |                      |   | 33%  |                                   |
| Änderung d. Kapazität          | 4  | 4  | 4   | 12   |   |   |                      |   | 100% |                                   |
| Thermoelement                  | 3  | 4  | 3   | 10   |   |   |                      |   | 83%  |                                   |
| Gesamtwertung Teilbeurteilung  |  |  |   |  |   |   |                      |   |      |                                   |

In Tabelle 8-4 sind die Ergebnisse der Bewertungsbögen zusammengefasst.

Tabelle 8-4: Zusammenfassung der Bewertung

| Person 1               | Bewertung des Messprinzips | Messstellen vorbereiten | Messen | Auswerten | Gesamtbeurteilung |
|------------------------|----------------------------|-------------------------|--------|-----------|-------------------|
| Methode                |                            |                         |        |           |                   |
| Erhöhter Abrieb        | 54%                        | 92%                     | 56%    | 83%       | 71%               |
| Körperschall           | 79%                        | 100%                    | 38%    | 42%       | 65%               |
| LDA                    | 79%                        | 67%                     | 88%    | 100%      | 83%               |
| Fluoreszenz            | 33%                        | 58%                     | 44%    | 50%       | 46%               |
| Änderung der Kapazität | 96%                        | 92%                     | 100%   | 100%      | 97%               |
| Thermoelement          | 92%                        | 92%                     | 94%    | 100%      | 94%               |
| Person 2               |                            |                         |        |           |                   |
| Methode                |                            |                         |        |           |                   |
| Erhöhter Abrieb        | 54%                        | 25%                     | 56%    | 50%       | 46%               |
| Körperschall           | 67%                        | 67%                     | 31%    | 58%       | 56%               |
| LDA                    | 75%                        | 58%                     | 63%    | 50%       | 61%               |
| Fluoreszenz            | 46%                        | 25%                     | 50%    | 50%       | 43%               |
| Änderung der Kapazität | 67%                        | 67%                     | 75%    | 75%       | 71%               |
| Thermoelement          | 58%                        | 75%                     | 44%    | 75%       | 63%               |
| Person 3               |                            |                         |        |           |                   |
| Methode                |                            |                         |        |           |                   |
| Erhöhter Abrieb        | 58%                        | 25%                     | 75%    | 33%       | 48%               |
| Körperschall           | 71%                        | 100%                    | 63%    | 50%       | 71%               |
| LDA                    | 79%                        | 58%                     | 69%    | 67%       | 68%               |
| Fluoreszenz            | 58%                        | 25%                     | 50%    | 33%       | 42%               |
| Änderung der Kapazität | 79%                        | 67%                     | 88%    | 100%      | 83%               |
| Thermoelement          | 88%                        | 67%                     | 75%    | 83%       | 78%               |

Tabelle 8-5: Gemittelte Ergebnisse

| Gemitteltes Ergebnis   | Bewertung des Messprinzips | Gesamtbeurteilung |
|------------------------|----------------------------|-------------------|
| Methode                |                            |                   |
| Erhöhter Abrieb        | 55%                        | 55%               |
| Körperschall           | 72%                        | 64%               |
| LDA                    | 78%                        | 71%               |
| Fluoreszenz            | 46%                        | 44%               |
| Änderung der Kapazität | 81%                        | 84%               |
| Thermoelement          | 79%                        | 78%               |

Wie in Tabelle 8-5 ersichtlich wurden die Methode „LDA“, „Thermoelement“ und „Änderung der Kapazität“ für den Prinzipversuch gewählt. Die restlichen Methoden sind zufolge der Gesamtbeurteilung, aber auch der Voranalyse unzureichend. Keine der Methoden wurde mit 0 bewertet, wodurch theoretisch alle Methoden für den Prinzipversuch geeignet sind.

## 9 Prinzipversuchsbeschreibung

Im Stadium des Prinzipversuchs werden die Methoden auf ihre jeweilige Funktionstauglichkeit durch einfache Versuchsaufbauten untersucht. Zur Untersuchung wird das Getriebeöl des Unternehmens „Castrol“ mit der Bezeichnung „BOT 190 M“ verwendet. Für die genauen Inhaltsstoffe wird auf den Anhang verwiesen.

### 9.1 Prinzipversuch Änderung der Kapazität

Der Prinzipversuch zur Analyse der „Änderung der Kapazität“ wird mittels eines kapazitiven Sensors des Unternehmens „IFM electronic GmbH“ durchgeführt. Ein kapazitiver Sensor erzeugt an der Sensorspitze ein elektrisches Feld, welches zufolge von Umwelteinflüssen, wie dem Vorbeiströmen von Öl in der Feldnähe, beeinflusst wird. Für die genaue Funktionsbeschreibung wird auf Kapitel 8 verwiesen.

Für den Prinzipversuch wurde ein Sensor mit der Bezeichnung „KG5066“ verwendet. Für produktspezifische Details wird auf den Anhang verwiesen. Der „KG5066“ besitzt einen Signalweg von 12 mm beim Medium Luft. Als Signalweg wird jener Abstand bezeichnet, der von der Spitze des Sensors den Sichtbereich darstellt. Der Sichtbereich ist der maximale Bereich der Messergebnisse im Genauigkeitsbereich laut Herstellerangabe. Für Medien wie Öle oder heterogene Mischphasen liegen keine exakten Daten des Herstellers bezüglich des Signalwegs vor. Laut Hersteller wird bei 10 mm Signalweg der Toleranzbereich für die Genauigkeit aufgrund des Messverstärkers eingehalten.

Für die Messung wurde ein Messgefäß verwendet das geringe elektrisch beeinflussenden Eigenschaften besitzt ( $\epsilon_r <$ ), um die Ergebnisse nicht zu stark zu beeinflussen.

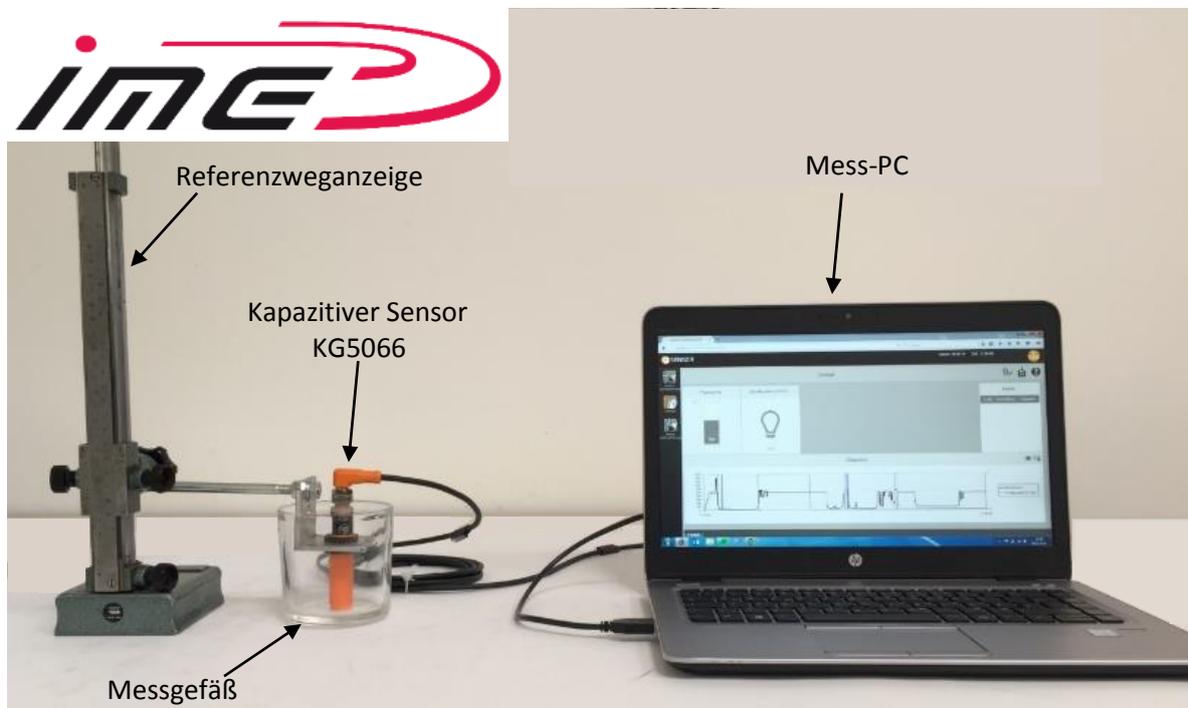


Abbildung 9-1: Prinzipversuch "Änderung der Kapazität"

Der kapazitive Sensor ist fest mit der Referenzweganzeige verbunden. Die Anzeige kann in der Höhe verstellt werden und besitzt eine Auflösungsgenauigkeit von 0,1 mm. Im Messgefäß befindet sich Öl mit einer bestimmten Schichtdicke.

Am Mess-PC wird das Signal quantitativ angezeigt und mittels Grafik die Ausschläge dargestellt. Der Sensor besitzt eine Schließfunktion. Die Schließfunktion bedeutet, dass ein Wert (Signalwert) voreingestellt wird, welcher auf Öl schließen lässt und folglich das Hauptziel Öldetektion bestätigt. Damit kein Flattern in der Nähe des Signalwertes entsteht, und folglich der Sensor zwischen den Stellungen offen und geschlossen springt, wird ein Hysteresewert definiert. Der Hysteresewert dämpft das Messsignal und schließt dadurch ein verfrühtes Öffnen/Schließen aus. Der Hysteresewert liegt in einem Bereich von 1 % bis 15 % und ist manuell einstellbar.

Mittels der Referenzweganzeige wird eine Datenbank erstellt, welche Prozesswerte in Abhängigkeit von der Schichtdicke im Messgefäß und des Abstandes des Sensors zur freien Oberfläche generiert (Siehe Abbildung 9-2). Als Prozesswert wird eine generalisierte Größe bezeichnet die entweder einer Spannungsänderung oder einer Stromstärkenänderung entspricht.

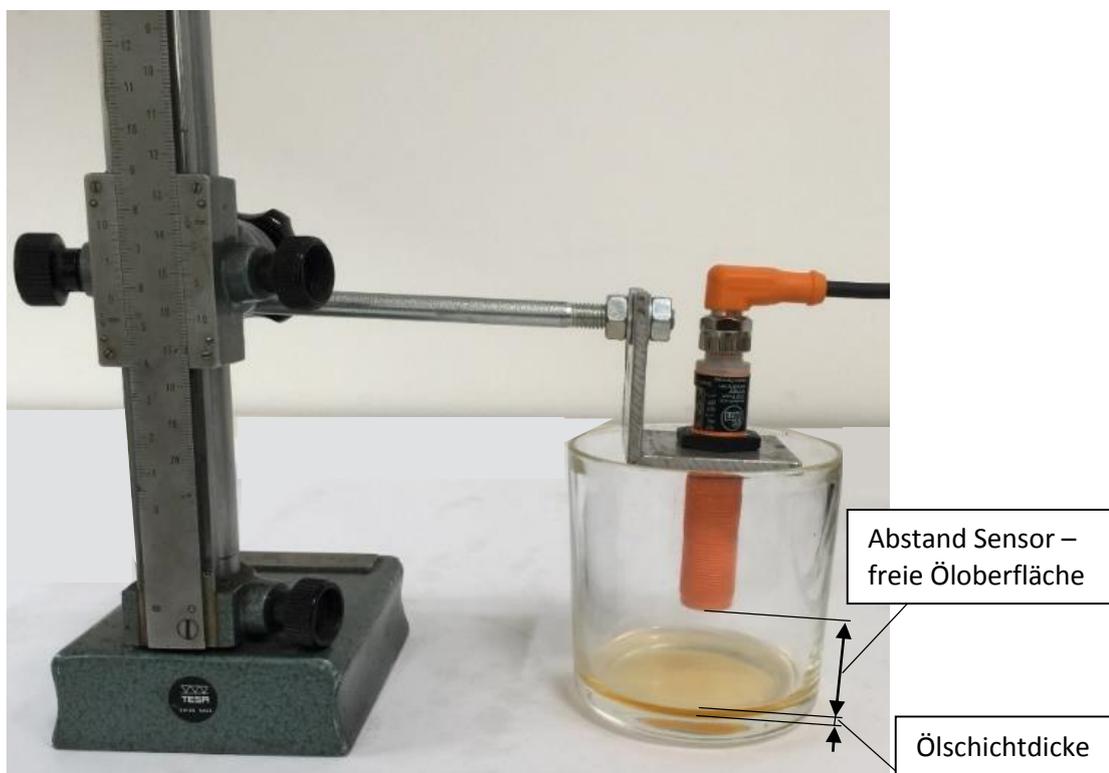


Abbildung 9-2: Referenzweganzeige

Da kein Signalwert für die Öldetektion bekannt ist, wird die Schließfunktion für den Prinzipversuch nicht genutzt. Folglich kann der Hysteresewert sehr klein gewählt werden (1 %), um den relativ Messfehler klein zu halten. Die Signalwerte des Sensors liegen zwischen 0 und 1.600. Der Signalwert ist ein einheitenloses Signal, welches auf einer Spannungs- oder Stromänderung basiert.

Aufgrund des Ölnebels, welcher im Innenraum des Getriebes entsteht, besteht die Möglichkeit, dass sich Öl an der Sensorspitze sammelt. Dadurch entsteht eine Ummantelung des Sensors mit Öl, was zu einem Ausfall des Signals führen könnte. Um dies zu untersuchen wird eine Ölnebelsimulation durchgeführt. Um Ölnebel zu simulieren, wird Öl durch einen Zerstäuber fein in der Luft verstreut und so ein zweiphasiges System generiert.



Abbildung 9-3: Ölnebel simulieren

## 9.2 Prinzipversuch Thermoelement

Zur Untersuchung der Funktionalität der Methode „Thermoelement“ werden zwei Thermoelemente vom Typ-K verwendet. Ein Temperaturfühler befindet sich im Öl, also in direktem Kontakt mit dem Öl. Der zweite Sensor wird über der freien Öloberfläche platziert und misst die Temperatur der Luft, welche durch die emittierte Wärme des Öls beeinflusst wird.

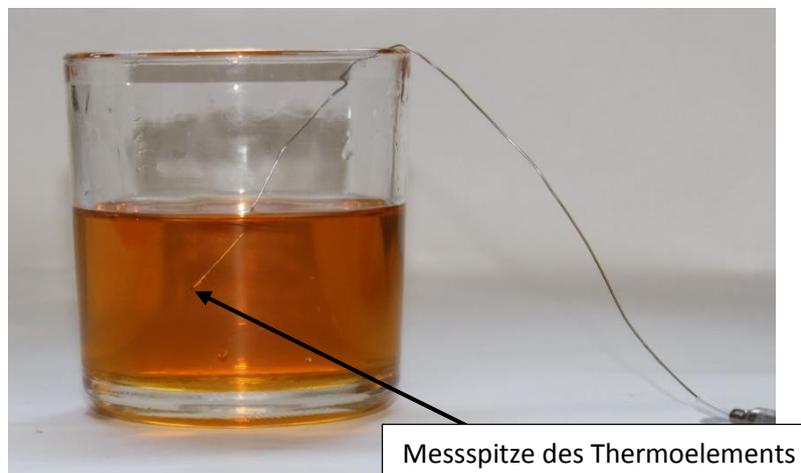


Abbildung 9-4: Thermoelement, Messung Öl

In Abbildung 9-4 ist das voll umhüllte Thermoelement, das die Momentantemperatur des Öls misst, dargestellt. Aufgrund des direkten Kontaktes von Öl und Sensor tritt ein Wärmeübergang zufolge Konvektion und Wärmeleitung auf. Aufgrund des sehr geringen Temperaturunterschieds von Öl und Sensorspitze wird die Strahlung vernachlässigt.

Die Wärmeleitung wurde in Gleichung (3.36) definiert. Da ein Typ-K Element gewählt wurde liegt der relative Fehler bei 0,4 %. Die Typ-K Thermoelemente besitzen einen Temperaturfehler von mindestens 1,1 °C.

Das zweite Thermoelement befindet sich über der wärmeemittierenden Öloberfläche. Bei diesem Aufbau, bei dem keine Strömungen vorliegen, tritt eine Kombination aus freier Konvektion und Strahlung auf. Aufgrund des geringen Temperaturgradienten zwischen Ölsumpftemperatur und Temperatur über der freien Öloberfläche ist der Anteil der Strahlung untergeordnet. Wie in Abbildung 9-5 ist der Messaufbau der freien Öloberflächenmessung dargestellt.



Abbildung 9-5: Thermoelement, Messung Oberfläche

Durch die Rotation der Zahnräder und folglich Eintauchen in den Ölsumpf entsteht im Getriebe ein Ölnebel. Folglich muss der Ölnebel durch den Ölnebelsimulator untersucht werden, um den Einfluss auf das Thermoelement an der freien Öloberfläche zu analysieren.

### 9.3 Prinzipversuch LDA

Der LDA Versuch gliedert sich im Gegensatz zu den Prinzipversuchen „Thermoelement“ und „Änderung der Kapazität“ in mehrere Teiluntersuchungen. Die Funktionsweise des LDA Verfahrens wird soweit vereinfacht, dass es als Lichtschranke mit vordefiniertem Messvolumen fungiert. Es wird gemäß dem Signal des LDAs auf Öl geschlossen. Im Gegensatz zu einer herkömmlichen Lichtschranke besitzt das LDA Lichtschrankensystem ein Messvolumen, welches bei Unterbrechung zu einer Signaländerung führt. Aufgrund von Unterbrechungen wird die Öldetektion bestätigt.

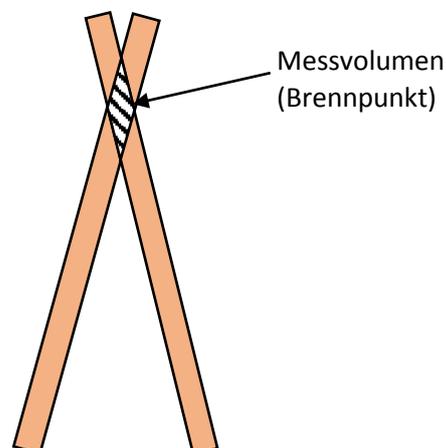


Abbildung 9-6: Messvolumen LDA

In Abbildung 9-6 sind zwei Laserstrahlen dargestellt die in dieser Form Transmitter verlassen und sich im Brennpunkt kreuzen. Das Messvolumen besitzt eine Länge von 1 mm und der Breite von 50  $\mu\text{m}$ . Das Messvolumen wird auf eine Fläche gerichtet, über die Öl fließt, um die Funktionsweise des Verfahrens zu testen.

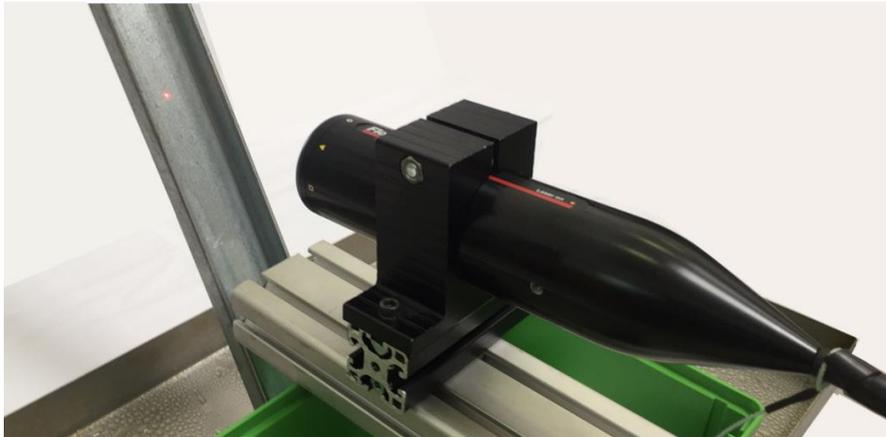


Abbildung 9-7: LDA Fließaufbau

Da die LDA-Linse nicht direkt in das Getriebe verbaut werden kann, muss ein Schauglas verwendet werden. Im Prinzipversuch wird wie am Prüfstand Acrylglas für die Simulation verwendet. In Abbildung 9-8 ist der Aufbau dargestellt. Durch die optischen Brechungseigenschaften des Sichtfensters muss der Laserkopf entweder neu justiert werden, da sich der Brennpunkt verschiebt, oder eine Rückrechnung im Messvolumen stattfinden.



Abbildung 9-8: LDA Sichtfenstertest

Auch bei der Methode LDA muss eine Ölnebelsimulation vorgenommen werden. Im Gegensatz zu den bisherigen Prinzipversuchsmethoden spielt der Ölnebel bei der Methode LDA zwei Rollen. Einerseits stört er das Messvolumen, andererseits kann das Sichtglas mit Ölnebel beschlagen und zusätzliche Modifikationen des Brechungsindex des Laserkopfes hervorrufen.

## 10 Versuchsdurchführung und Interpretation

### 10.1 Versuchsdurchführung „Änderung der Kapazität“

Um die Funktionstauglichkeit festzustellen muss eine Datenbank erstellt werden, die den Zusammenhang zwischen Abstandsänderung und Ölmenge darstellt. Mit dem Versuchsaufbau aus Abbildung 9-1 wird eine Datenbank generiert. Die Messergebnisse liefern eine Kurve wie sie in Abbildung 10-1 dargestellt ist.

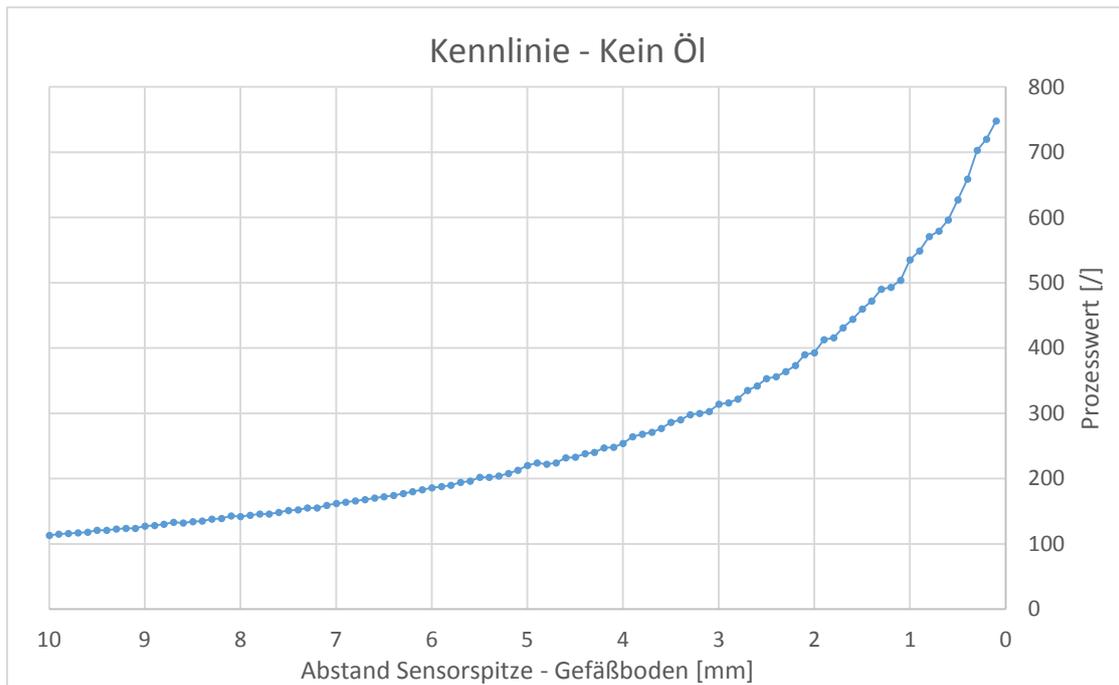


Abbildung 10-1: Kennlinie - kein Öl

In Abbildung 10-1 wird die Kennlinie dargestellt, wenn kein Öl im Messbehälter vorhanden ist. Mit abnehmendem Abstand von der Sensorspitze zum Boden des Gefäßes steigt der Prozesswert. Der Prozesswert ist das Ausgabeformat des Sensors.

Nach der Erstellung der Datenreihe ohne Öl, wurden Testreihen mit Ölschichtdicken im Messbehälter durchgeführt. Dabei wurden sechs Testreihen durchgeführt.

Tabelle 10-1: Messreihen - kapazitiver Sensor

| Messreihennummer  | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   |
|-------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Schichtdicke [mm] | 1,2 | 1,8 | 2,8 | 3,7 | 3,9 | 5,9 |

In Abbildung 10-2 ist die Kennlinie bei einer Schichtdicke von 1,8 mm dargestellt. Zu erkennen ist der Sprung im Prozesswert bei 1,8 mm, welcher zufolge des Kontakts von der Sensorspitze und dem Öl eintritt. Vor dem Sprung ähnelt die Kurve der Kennlinie ohne Öl. Zuzufolge des Offsets beim 10 mm ist der Grundwert erkennbar, welcher zufolge des Öls entsteht. Danach verläuft die Kennlinie flacher.

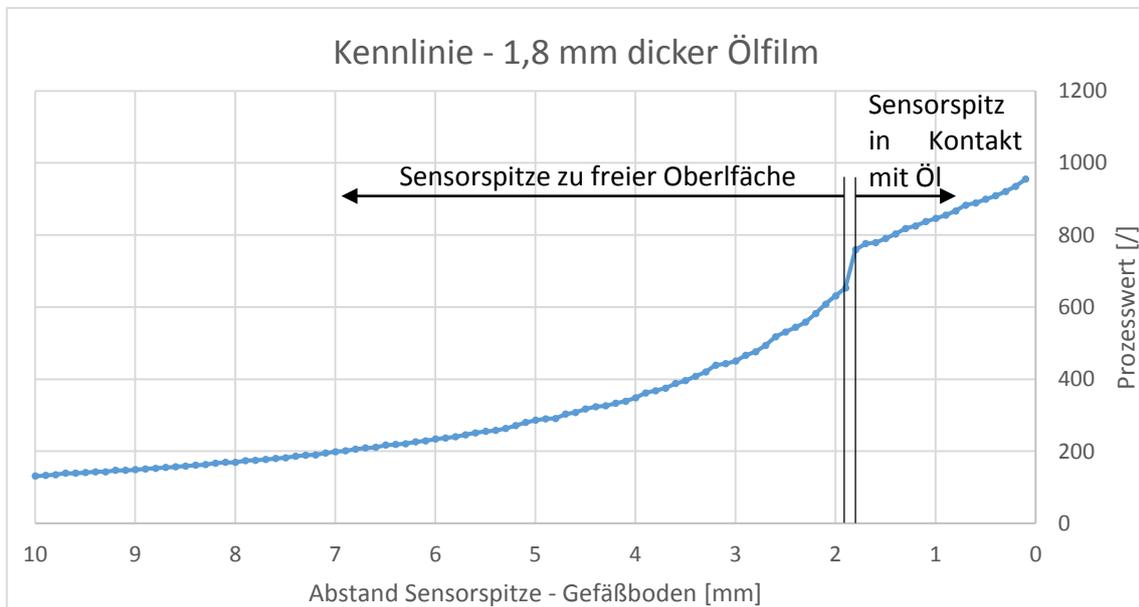


Abbildung 10-2: Kennlinie - 1,8 mm dicker Ölfilm

Durch den Vergleich von Abbildung 10-2 und Abbildung 10-3 ist erkennbar, dass die Kennlinien eine ähnliche Form aufweisen, lediglich der Sprung verschiebt sich.

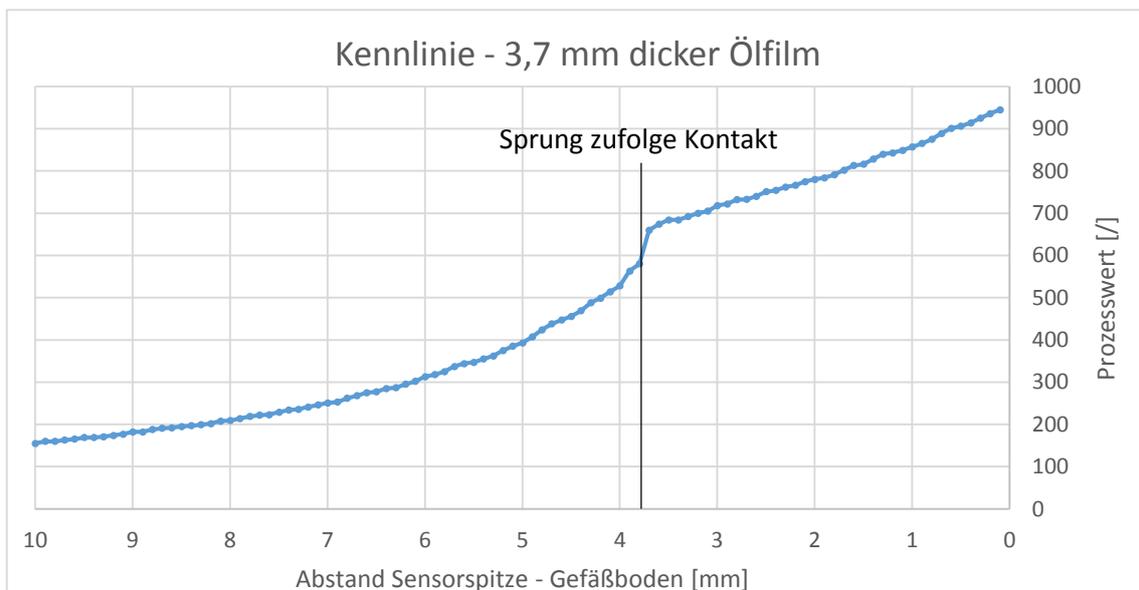


Abbildung 10-3: Kennlinie - 3,7 mm dicker Ölfilm

Zufolge den generierten Daten wird ein Zusammenhang bei fixen Abstandswerten und variablen Schichtdicken untersucht.

Es bestehen zwei Sensoreinbaumöglichkeiten, welche in Abbildung 10-4 dargestellt sind. Einbaumöglichkeit 1 zeigt den Sensor mit fixer Einbauhöhe und einer Sicht auf die Öloberfläche. Einbaumöglichkeit 2 ist plan mit der Oberfläche verbaut und der Ölfilm fließt über die Sensorspitze. Je nach Einbauvariante unterscheidet sich der Verlauf des Prozesswertes.

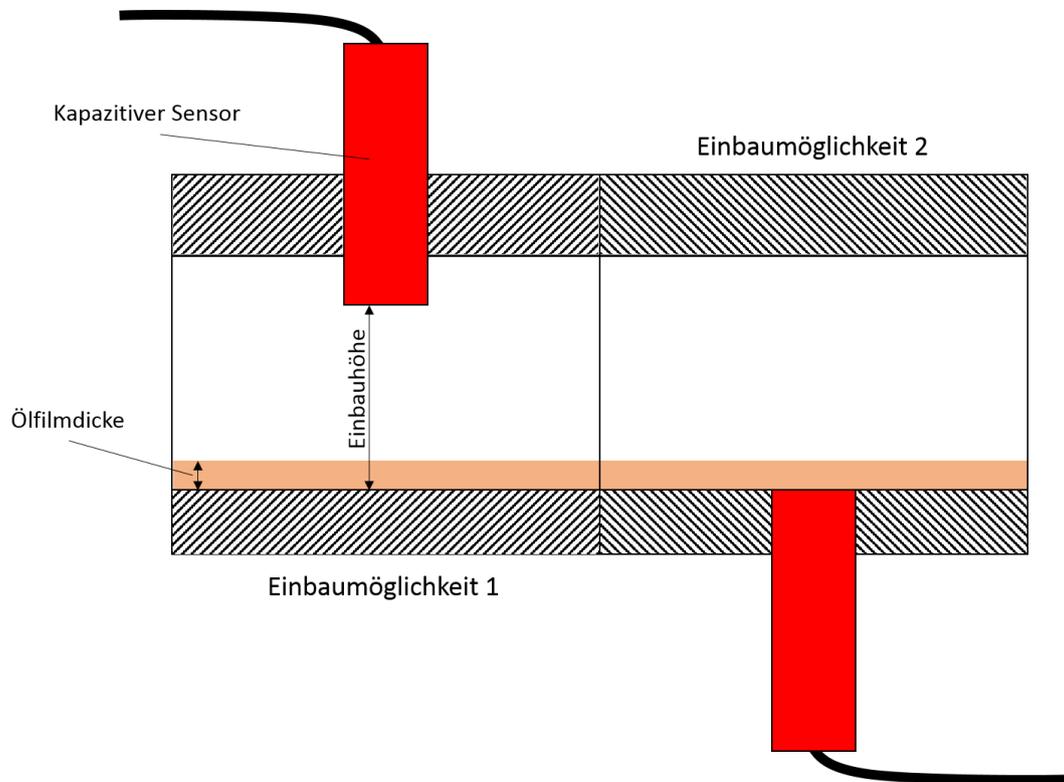


Abbildung 10-4: Einbau kapazitive Sensor

„Einbaumöglichkeit 1“ zeigt den Sensor in den Getriebeinnenraum ragend und auf die freie Oberfläche blickend. Die Einbauhöhe, oder Sensorabstand, ist sensorabhängig (begrenzt durch den Signalweg des Sensors). Entlang der freien Oberfläche strömt Öl mit einer bestimmten Schichtdicke. Diese Schichtdicke wird vom Sensor gemessen. Die Messergebnisse für die „Einbaumöglichkeit 1“ können von einer Einbauhöhe von 10 mm bis 5,9 mm verwendet werden, und Schichtdicken von 0 mm bis 5,9 mm können dargestellt werden.

„Einbaumöglichkeit 2“ zeigt einen planen Verbau des Sensors. Das Öl fließt über die Sensorspitze und ändert so das elektrische Feld des Sensors. Hierbei werden die Daten herangezogen, sobald der Sensor Kontakt mit dem Öl hat.

Die „Einbaumöglichkeit 1“ wird exemplarisch mit einem Fixabstand von 8 mm erläutert. In Abbildung 10-5 ist der Verlauf der Messpunkte dargestellt. Nach der Trendlinienbestimmung wurde der analytische Zusammenhang der Punkte definiert. Die Kurve ähnelt sehr einer Kurve 2. Ordnung

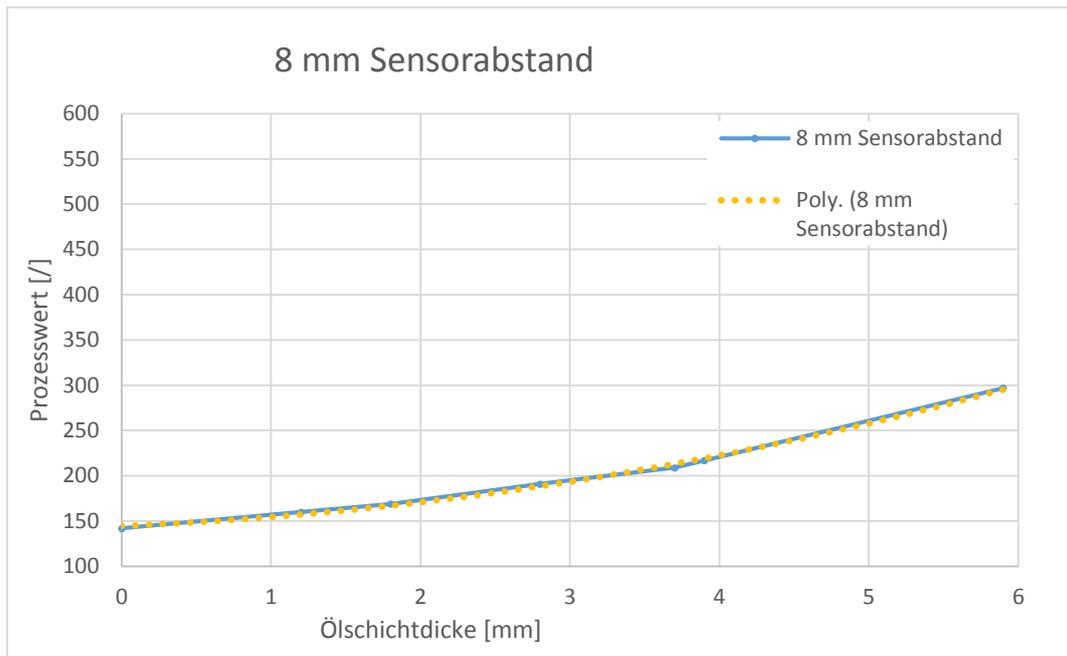


Abbildung 10-5: 8 mm Sensorabstand

Die Kurvenform ist bei allen Messpunkten der „Einbauvariante 1“ erkennbar. Bei Berechnung der Abweichungen von gemessenen zu analytischen Werten zeigen sich bei kleinen Ölmengen große Abweichungen. Mit zunehmender Schichtdicke reduziert sich die Abweichung bis in den einstelligen Prozentbereich.

Tabelle 10-2: Fehlerabweichung - fixer Abstand

|                            |     |     |     |     |     |     |     |
|----------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Prozesswert                | 142 | 160 | 169 | 191 | 209 | 217 | 297 |
| Ölschichtdicke (gemessen)  | 0   | 1,2 | 1,8 | 2,8 | 3,7 | 3,9 | 5,9 |
| Ölschichtdicke (berechnet) |     | 1,4 | 1,9 | 2,9 | 3,6 | 3,8 | 5,9 |
| Abweichung                 |     | 17% | 6%  | 4%  | 3%  | 3%  | 0%  |

Bei einem Prozesswert von 142 kann keine Ölschichtdicke berechnet werden, da das Polynom an dieser Stelle einen Grenzwert besitzt. Ab einem Wert von 145 ist das Ergebnis aussagekräftig.

Bei der Einbaumöglichkeit 2 können die Prozesswerte verwendet werden, wenn die Sensorspitze mit der Öloberfläche in Kontakt tritt. Die geringste gemessene Schichtdicke liegt bei 1,2 mm. Daher ist dies der Startwert der Messung.

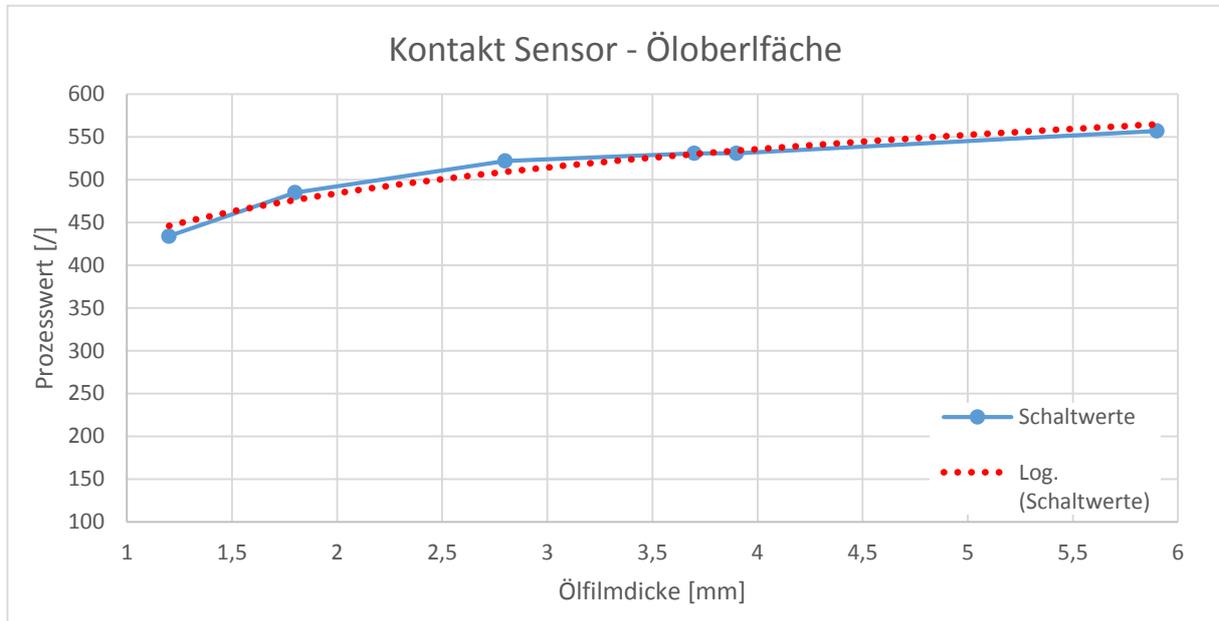


Abbildung 10-6: Kontaktkennlinie Sensorspitze Öloberfläche

In Abbildung 10-6 ist die Kennlinie dargestellt, welche für die Bestimmung der Ölschichtdicke verwendet wird. Die Trendlinie ist überlinear. Zuzugabe der Summe der Abweichungen verläuft die Kennlinie eher logarithmisch als quadratisch. Aufgrund der geringen Messpunktzahl ist keine eindeutige Aussage möglich. Dieses Gesetz ist infolge fehlender Messwerte erst ab einer Schichtdicke von 1,2 mm möglich.

Betrachtet man die Abweichung von gemessenen Werten zu berechneten Werten, ist eine höhere Abweichung als bei Einbaumöglichkeit 1 gegeben.

Tabelle 10-3: Fehlerabweichung – planer Einbau

|                            |     |     |     |     |     |     |
|----------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Prozesswert                | 434 | 485 | 522 | 531 | 531 | 560 |
| Ölschichtdicke (gemessen)  | 1,2 | 1,8 | 2,8 | 3,7 | 3,9 | 5,9 |
| Ölschichtdicke (berechnet) | 1   | 2   | 3,3 | 3,7 | 3,7 | 5,4 |
| Abweichung                 | 17% | 11% | 18% | 0%  | 5%  | 8%  |

Um auch den Einfluss des Ölnebels zu überprüfen, wurde durch Ölnebelsimulation eine Datenbank generiert und der Einfluss des Ölnebels grafisch dargestellt.

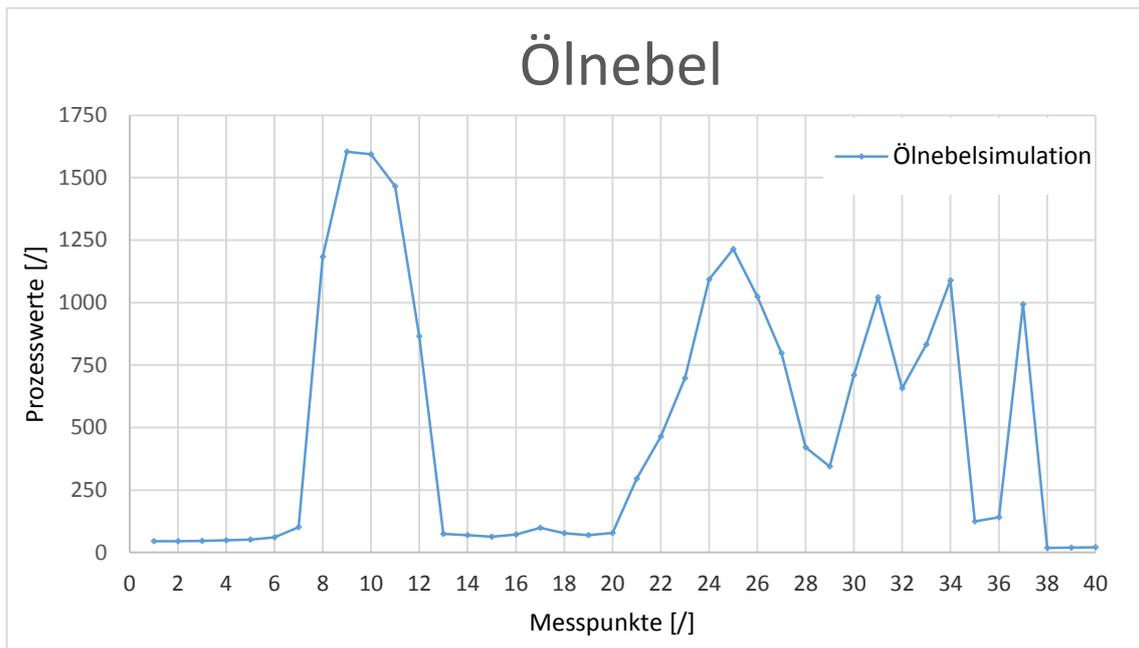


Abbildung 10-7: Ölnebelsimulation

Tabelle 10-4: Ölnebelsimulation - kapazitiver Sensor

| Bereich | Messpunkte | Beschreibung   |
|---------|------------|--|
| I       | 1 - 6      | Sehr geringer Ölnebel, keine Prozesswertänderung                     |
| II      | 7 - 9      | Starker Ölnebel, Ansammlung von Öl am Sensor                         |
| III     | 10 - 13    | Abtropfen des angestauten Ölnebels                                   |
| IV      | 14 - 20    | Sehr geringer Ölnebel, nur geringe Prozesswertänderung               |
| V       | 21 - 38    | Mäßiger Ölnebel, Ansammlung von Öl am Sensor mit folgendem Abtropfen |

Folglich ist ein geringer Ölnebel für den kapazitiven Sensor nicht ausschlaggebend. Sobald starker Ölnebel auftritt, wobei unter starkem Ölnebel jene Menge verstanden wird die zur Schmierung der Bauteile führt, ist eine Messung mit dem Sensor unmöglich.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass das Hauptziel mit einem kapazitiven System erfüllt ist. Das Wunschziel der Schichtdickenermittlung ist zum aktuellen Zeitpunkt bei isolierter Umgebung auch erfüllt und über die analytischen Zusammenhänge definiert.

## 10.2 Versuchsdurchführung Thermoelement

Der Prinzipversuch „Thermoelement“ wurde wie in Kapitel 9 beschrieben durchgeführt. Es wurde nur die freie Konvektion berücksichtigt. Bei freier Konvektion ist eine extreme Temperaturstreuung gegeben, da der Aufstieg des wärmen Öldampfes inhomogen verläuft. In Abbildung 10-8 ist die Ölsumpftemperatur, welche die Referenzgröße bildet, zur jeweiligen Temperatur über der Öloberfläche dargestellt. Bei hohen Ölsumpftemperaturen wurden hohe Schwankungen gemessen. Je nach Größe des Schwankungsbereichs wurden die freien Oberflächentemperaturmessungen in drei Kategorien eingeteilt. Eine konstante Temperatur wurde nur im Ölsumpf gemessen. Das an der Luft befindliche Thermoelement schwankte immer.

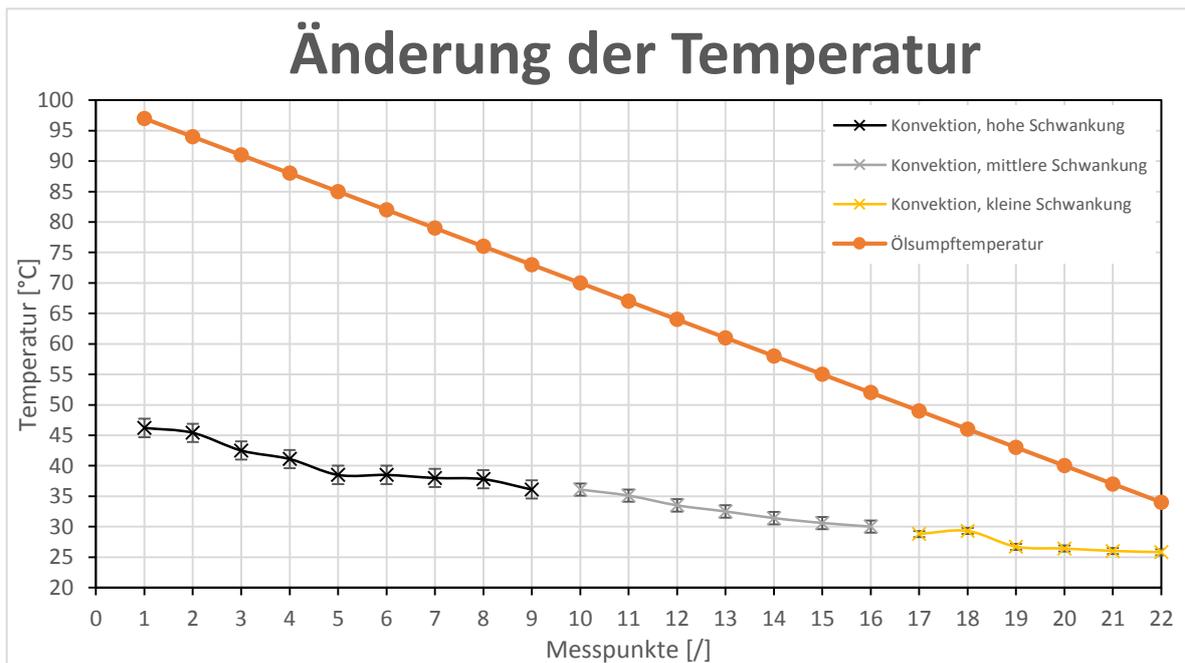


Abbildung 10-8: Ergebnisse Thermoelement

Zufolge den Ergebnisse aus Abbildung 10-8 kann Öl detektiert werden, wenn das Thermoelement an der Messstelle der freien Öloberfläche eine konstante Temperatur anzeigt.

Verwendet man exemplarisch einen Messpunkt, zum Beispiel Punkt 10, liegt die Sumpftemperatur bei 70 °C. Die Temperatur knapp über der Öloberfläche liegt zwischen 35 °C und 38 °C. Sobald Öl an die Messstelle befördert wurde erwärmt sich die örtliche Temperatur und zeigt einen fixen (nicht schwankenden) Wert an. Dies lässt auf Öl schließen.

Der Ölnebel wurde bei der Methode „Thermoelement“ mit dem Ölnebelsimulator simuliert. Der Ölnebel ummantelt das Thermoelement und isoliert die Messspitze. Durch die Ummantelung tritt eine statische Temperatur ein, wodurch eine Scheindetektion entsteht. Folglich ist es bei Ölnebel nicht möglich diese Methode zu nutzen.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass das Thermoelement zur Öldetektion in freien Räumen nicht verwendet werden kann. In geschützten Bereichen mit geringen Luftgeschwindigkeiten kann die Methode verwendet werden. Geschützte Bereiche sind etwa die Bohrungen, welche zur Ölverteilung verwendet werden.

### 10.3 Versuchsdurchführung LDA

Der Prinzipversuch des LDA Verfahrens ist in mehrere Schritte gegliedert, welche aufbauend zur Peripherie des Getriebes gestaltet sind. Zu Beginn wird, wie in Abbildung 9-7 dargestellt, der Laserstrahl zur Oberfläche justiert, um Ölfluss zu ermitteln. Das Kontrollvolumen endet kurz vor der Oberfläche, wodurch kleinste Ölmengen, die in das Volumen eintreten, erfasst werden. Die Signale werden mittels Oszilloskop dargestellt. Bei Veränderung der Amplitude wird die Ölexistenz bestätigt.

In Abbildung 10-9 ist das Grundsignal dargestellt. Durch einen vorhandenen Ölfluss änderte sich das Grundsignal zu einem geordneten, periodischen Signal. In Abbildung 10-10 ist das Signal dargestellt, welches bei vorbeifließendem Öl auftritt.

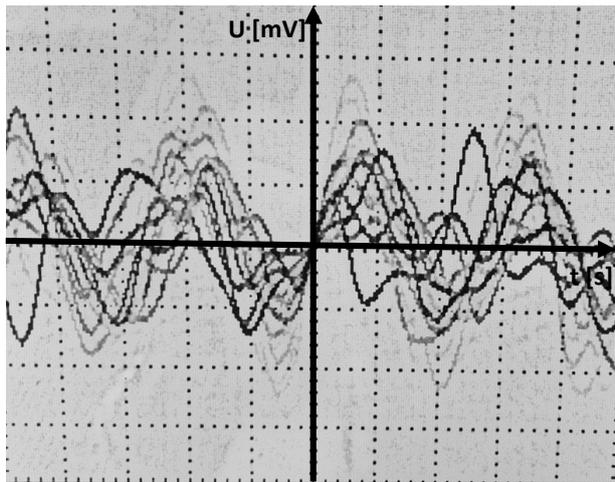


Abbildung 10-9: Grundsignal

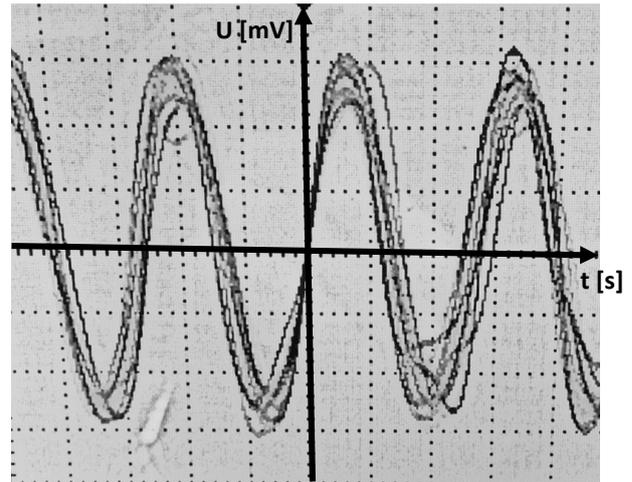


Abbildung 10-10: Ölflusssignal

Diese Erkenntnis bestätigt die Funktionstauglichkeit des Verfahrens. In weiterer Folge wird der Einfluss von Ölnebel überprüft.



Abbildung 10-11: Ölnebelsimulator LDA

Das LDA Verfahren wurde mittels Ölnebelsimulator untersucht (siehe Abbildung 10-11). In Abbildung 10-12 ist das Signal bei Ölnebel dargestellt. Im Vergleich zum Signal aus Abbildung 10-9 sind kleinere Amplituden vorhanden. Diese Dämpfung kann zufolge einer Brennpunktverschiebung oder einer absorbierenden Wirkung des Öls entstehen. Trotz Ölnebel bleibt das Signal vorhanden.

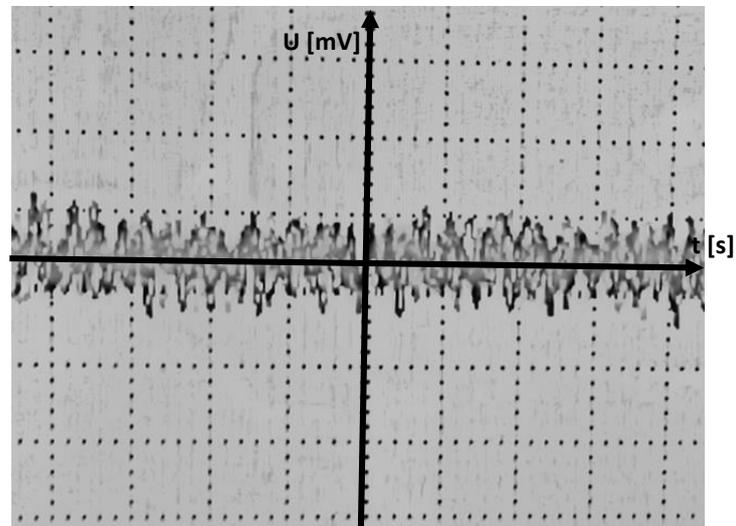


Abbildung 10-12: Ölnebelsignal

Aufgrund der bestätigten Funktionstauglichkeit des LDA Verfahrens wird die für den Prinzipversuch eine abgewandelte Getriebepерipherie adaptiert. Diese Adaption beläuft sich auf das Hinzufügen einer Acrylglascheibe, die ein Sichtfenster darstellt. Diese Versuchsdurchführung ist in Abbildung 9-9 dargestellt. Für das Sichtfenster wird handelsübliches, unbehandeltes Acrylglas verwendet.

Anfänglich wird eine Ölflussermittlung mit einer sauberen Acrylglascheibe, ohne Ölnebel, durchgeführt. Primär muss das Signal zugeordnet werden, welches bei vorhandenem Sichtfenster vom Oszilloskop ausgegeben wird.

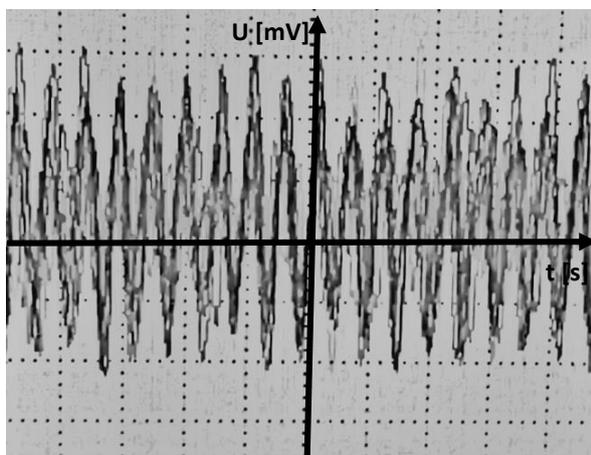


Abbildung 10-13: Grundsinal mit Acrylglas

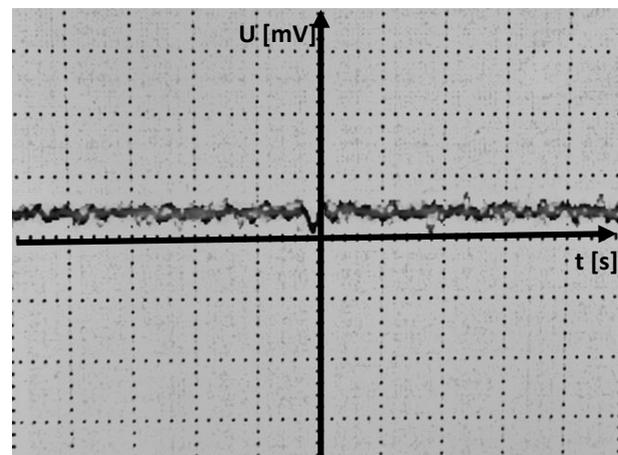


Abbildung 10-14: Ölflusssignal mit Acrylglas

Aus Abbildung 10-13 ist die erhöhte Amplitude des Signals im Vergleich zu Abbildung 10-9 erkennbar. Beide Signale unterscheiden sich in der Größe der Amplitude sehr stark, zufolge des vorhandenen Acrylglases. Das Sichtfenster verschiebt den Brennpunkt aufgrund der unterschiedlichen Brechungsindizes von Luft und Acrylglas.

In Abbildung 10-14 ist das Signal bei Ölfluss mit vorhandenem Schauglas dargestellt. Diese Erkenntnis lässt auf Ölexistenz schließen, da durch Acrylglas und Ölfluss die Amplitude des Signales sehr klein wird. Da Ölfluss detektiert ist, stellt sich die Frage nach dem Einfluss von Ölnebel bei vorhandenem Sichtfenster.

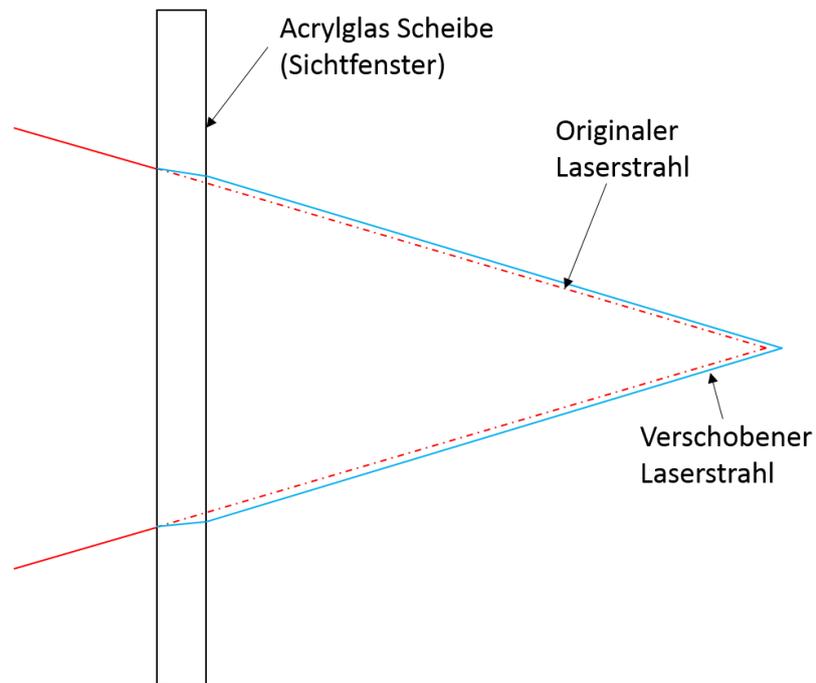


Abbildung 10-15: Verschiebung des Brennpunktes

In Abbildung 10-15 ist diese Verschiebung schematisch dargestellt. Durch das Verschieben der Laserstrahlen verschiebt sich das Messvolumen. Folglich tritt bereits zu Beginn eine Interferenzverschiebung ein, wodurch die Amplitude größer wird.

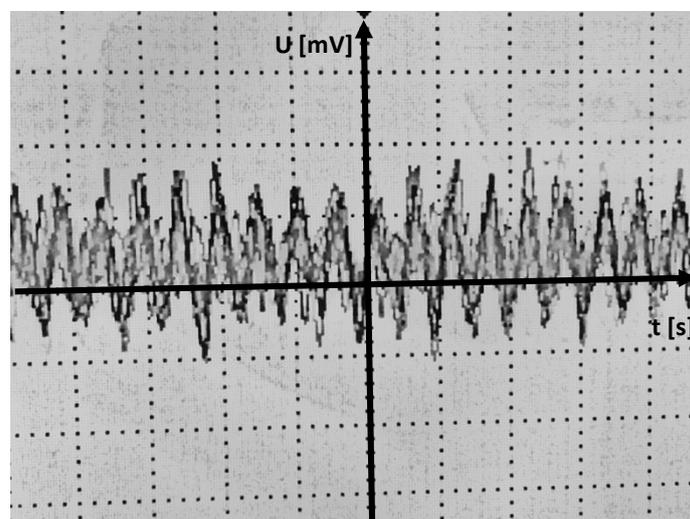


Abbildung 10-16: Ölnebelsignal mit Acrylglas

In Abbildung 10-16 ist erkennbar, dass (ähnlich des Messsignals ohne Acrylglas) das Signal gleichförmig wie das Grundsignal aussieht, lediglich gedämpft.

Abschließend wird das LDA Verfahren für eine Öldetektionsuntersuchung mit realen Bedingungen getestet. Hierbei wird der häufigste Fall analysiert, die Ermittlung der Ölexistenz bei vorhandenem Sichtfenster mit Öl am Acrylglas und vorhandenem Ölnebel.

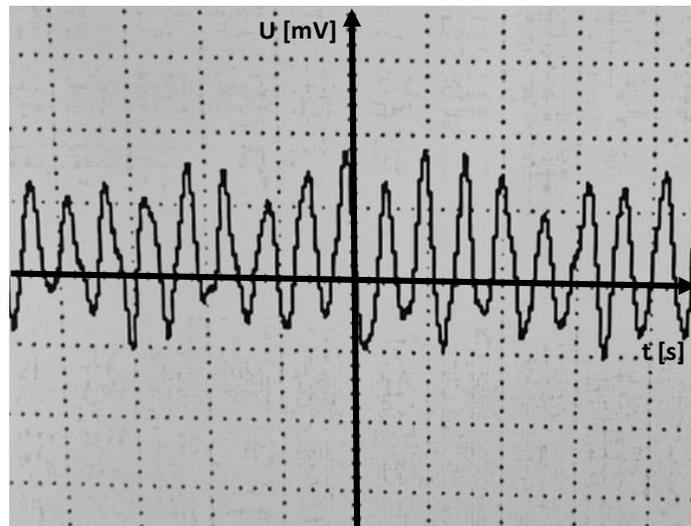


Abbildung 10-17: Signalausfall Acrylglas; Ölnebel; Ölfluss

In Abbildung 10-17 ist die Signallinie dargestellt, welche bei vorhandenem Ölfluss und benetzter Acrylglasplatte angezeigt wird. Dadurch dass nur eine stehende Linie am Oszilloskop angezeigt wurde ist kein Signal zum Auslesegerät übertragen worden. Folglich hat das LDA Verfahren kein verwertbares Signal erzeugt, was bedeutet, dass es für die Öldetektion nicht verwendet werden kann.

Zusammenfassend zum Prinzipversuch des LDA Verfahrens ist zu sagen:

- ohne Sichtfenster sind die Signale eindeutig
- mit Sichtfenster verändert sich der Brennpunkt und folglich die Signalausgabe, aber eindeutige Aussagen sind möglich
- mit Sichtfenster und benetzter Scheibe wird das Verfahren unbrauchbar

Das Ausfallen der Methode wird zufolge der absorbierenden Wirkung des Öls an der Acrylglasplatte vermuten. Das Öl absorbiert Licht im Wellenlängenbereich von 500 – 700 nm. Der Helium-Neon-Laser der zum Einsatz kommt, sendet Licht mit einer Wellenlänge von 633 nm aus. Diese Wellenlänge wird vom Öl absorbiert. Ob eine absolute Absorption, oder eine Kombination aus Messvolumenverschiebung, Ölnebel und Sichtfensterbenetzung das LDA Verfahren zum Ausfall bringen ist nicht bekannt.

# 11 Zusammenfassung und Ausblick

## 11.1 Zusammenfassung der Erkenntnisse

Von alle Methoden die mittels Prinzipversuche untersucht wurden, ist die „Änderung der Kapazität“ am Breitesten einsetzbar. Zuzolge der Prozesswertänderung kann Öl eindeutig detektiert werden. Weiter besteht die Möglichkeit der Schichtdickenmessung. Der Prinzipversuch zeigt analytische Zusammenhänge zwischen dem Prozesswert und der Ölschichtdicke.

Das „Thermoelement“ kann in geschützten Bereichen eingesetzt werden. Geschützte Bereiche sind, wie in Kapitel 6, bei den Prinzipskizzen dargestellt. Es wird die Sensorspitze in der Sammelbohrung positioniert und durch Temperaturanstieg oder konstante Temperaturmessung kann Öl detektiert werden.

Das LDA Verfahren ist in seiner Funktionsweise eingeschränkt, da dieses nicht verwendet werden kann, sobald Ölnebel im Getriebe vorherrscht. Demnach scheidet es für weitere Untersuchungen aus.

## 11.2 Ausblick

Basierend auf den Ergebnissen aus Kapitel 10 wird zusammengefasst, dass Öl abhängig von der Peripherie mit einem Sensor detektiert werden kann.

Um Öl mittels Thermoelement zu detektieren muss der Sensor in einer geschützten Umgebung verbaut werden. In Abbildung 11-1 ist ein theoretischer Verbau dargestellt.

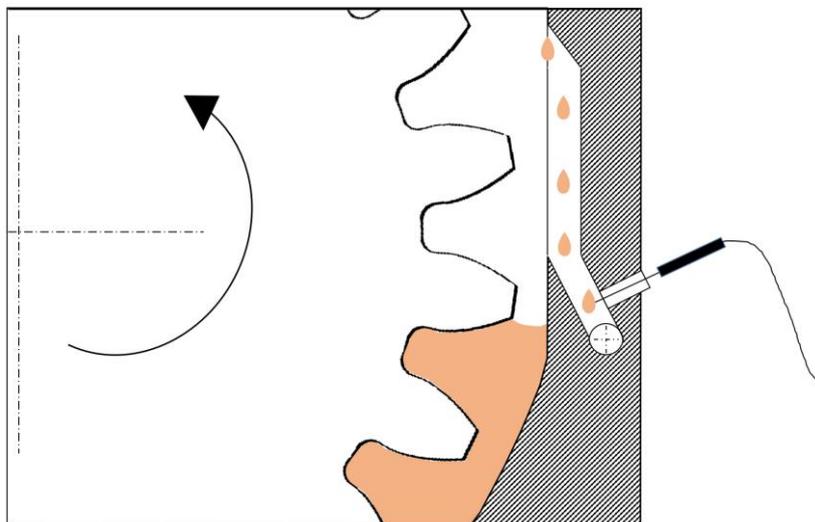


Abbildung 11-1: Verbau Thermoelement

Das Thermoelement wird in einer Bohrung platziert, welche als Sammelstelle fungiert um anschließen Bauteile, wie Lager, mit Öl zu versorgen. Sobald ein Tropfen Öl, der eine andere Temperatur besitzt als die Umgebungsluft, auf die Sensorspitze trifft. Tritt eine konstante Temperatur ein, kann auf Öl geschlossen werden. Wenn die Sensorspitze hingegen an der freien Oberfläche im Getriebe die Temperatur misst, wird der Ölnebel, welcher ein zweiphasen Gemisch darstellt, den Sensor isolieren und verfälscht das Ergebnis.

Auch für den CFD Abgleich ist die Thermoelementmethode adaptierbar, da für einen Vergleich der Kontinuitätsgleichung die Frage nach der Existenz beantwortet werden muss.

Die Vorteile der Methode „Thermoelement“ sind:

- minimaler Umbau des Gehäuses, welcher sich auf das Bohren von Löchern und einkleben von Buchsen beschränkt
- minimale Sensorkosten
- die Strömung im Getriebe wird nicht beeinflusst
- einfache Signalauswertung
- Wiederverwendbarkeit der einzelnen Thermoelemente

Zufolge der Vorteile könnte die Methode „Thermoelement“ in Schmierkreislaufuntersuchungen am Prüfstand verwendet werden. Für eindeutige Ergebnisse sind weitere Untersuchungen notwendig.

Die Methode „Änderung der Kapazität“ besitzt großes Potential, ist jedoch zufolge der isolierten Untersuchung nicht prüfstandtauglich. Um die Einflüsse des Gehäusewerkstoffs sowie der sich drehenden Zahnräder zu untersuchen, müssen weitere Testreihen durchgeführt werden.

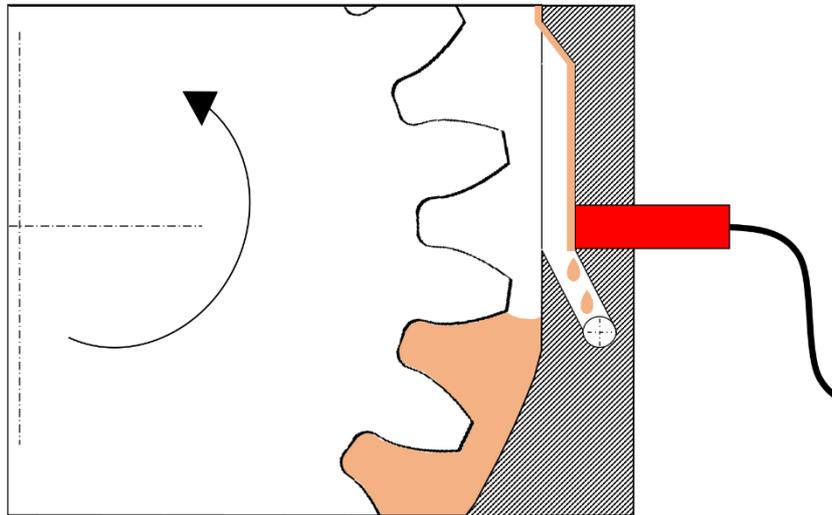


Abbildung 11-2: Verbau kapazitiver Sensor

In Abbildung 11-2 ist ein möglicher Verbau des kapazitiven Sensors dargestellt. Durch den konstruktiv vorgesehenen Sammelkanal wandert das Öl nach unten und am Öl Sensor vorbei. Durch den Ölfilm ändert sich der Prozesswert, wodurch auf die Existenz von Öl geschlossen wird.

Je nach Sensoreinbau existiert eine Rechenvorschrift um die Schichtdicke zu bestimmen. Die Rechenvorschriften sind aus dem Prinzipversuch in Kapitel 10 abgeleitet und deshalb ohne Getriebeperipherie bestimmt worden.

### 11.3 Schlusswort

Im Zuge dieser Arbeit wurde der Grundstein gelegt, um automatisiert Schmierkreislaufuntersuchungen durchzuführen. Es wurden Konzepte erstellt und bewertet, die für die Öldetektion vorgesehen waren. Aus den Erkenntnissen des Prinzipversuchs gingen Methoden hervor, die neben der Öldetektion eine zeitaktuelle Ölschichtdickenmessung ermöglichen.

Aufgrund des Forschungspotentials der Thematik sind folgende Arbeitspakete von Interesse:

- Bestimmung des Einflusses der erzwungenen Konvektion auf die Methode „Thermoelement“
- Prüfstandtest mit der Methode „Thermoelement“
- Prinzipversuch mit unterschiedlichen Ölen und unterschiedlichen kapazitiven Sensoren zur Analyse von verschiedener Elektrodenanordnung
- Adaption und Untersuchung von Getriebekomponenten mit der Methode „kapazitiver Sensor“
- Analyse der Prozesswertänderung durch elektrisch leitende Komponenten (Tracer Stoffe)
- Prüfstandtest mit der Methode „Kapazitiver Sensor“

## 12 Quellverzeichnis

[1]: [www.avl.com](http://www.avl.com), 15.7.2016

[2]: Univ.-Prof. Dr.techn. Wolfgang Hirschberg, Kraftfahrzeugtechnik, TU Graz, 9.Oktober 2012

[3]: <http://ecs.magna.com/Erprobung.3252.0.html>, 6.5.2016

[4]: [http://www.blum-novotest.de/uploads/media/Schwenkpruefstand\\_Getriebe\\_DE.pdf](http://www.blum-novotest.de/uploads/media/Schwenkpruefstand_Getriebe_DE.pdf), 6.5.2016

[5]: <https://www.avl.com/documents/1982862/2226340/Schwenkpr%C3%BCfstand.jpg/14377667-aa79-4114-94d1-abe7e539d51b>, 7.6.2016

[6]: H.Watter, Hydraulik und Pneumatik, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013

[7]: [http://mediando.wepa-apothekenbedarf.de/media/online/zoom/Kapillar\\_Viskosimeter\\_zoom.jpg](http://mediando.wepa-apothekenbedarf.de/media/online/zoom/Kapillar_Viskosimeter_zoom.jpg), 8.10.2016

[8]: Richard van Basshuysen, Handbuch Verbrennungsmotoren, Springer Vieweg, 2015

[9]: Werner Baumann, Chemikalien in der Metallbearbeitung, Springer Vieweg, 1995

[10]: <https://www.ksb.com/blob/189488/0b88df4af497c23c4ba560aa85faa488/gleitlager-3-data.jpg>, 28.9.2016

[11]: Gerhard Flores, Tribologie, HS Esslingen, 4.11.2016

[12]: [http://www.ludwigmeister.de/user/eesy.de/ludwig-meister.com/img/radialwellendichtring\\_dichtwirkung1.jpg](http://www.ludwigmeister.de/user/eesy.de/ludwig-meister.com/img/radialwellendichtring_dichtwirkung1.jpg), Ludwig Meister, 15.8.2016

[13]: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Günter Brenn, Strömungslehre und Wärmeübertragung I, Technische Universität Graz, Stand 2011

[14]: <http://owl.hermann-foettinger.de/img/moody.png>, Stand 1.9.2016

[15]: Univ. Prof. Dr. techn. Hochenauer, Numerische Verfahren in der Energietechnik, Technische Universität Graz, 2015

[16]: Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien, VDI 2222, Stand Juni 1997

[17]: Assoc.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Michael Bader, Der Versuch als Bestandteil des Entwicklungsprozesses – noch immer zeitgemäß, oder überholt?, Technische Universität Graz, Stand 2014

[18]: <http://www.mindmapping.com/de/mind-map.php>, 18.10.2016

- [19]: Technisch-wirtschaftliches Konstruieren, VDI 2225 Blatt 3, Stand November 1998  
7.9.2016
- [20]: <http://www.teviso.com/file/pdf/rd2014-dataspecification.pdf>, 6.9.2016
- [21]: <http://www.uq.edu.au/ohs/PPL/2-80-04/Co57-SDS.pdf>, 17.10.2016
- [22]: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/ee/Piezoelement.PNG>, 7.9.2016
- [23]: <http://www.boon.com.tw/ezadmin/ckfinder/userfiles/images/320C33.jpg>, 25.8.2016
- [24]: <http://getintopc.com/wp-content/uploads/2014/04/National-Instruments-Circuit-Design-Suite-Free.jpg>, 24.8.2016
- [25]: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/6/68/Doppler\\_Effekt\\_Laser-Dopper.jpg/800px-Doppler\\_Effekt\\_Laser-Dopper.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/6/68/Doppler_Effekt_Laser-Dopper.jpg/800px-Doppler_Effekt_Laser-Dopper.jpg), 28.8.2016
- [26]: <http://www.dantecdynamics.com/images/content/products-and-services/fluid-mechanics/lda/PROBER.jpg>, 29.8.2016
- [27]: [http://www.dantecdynamics.com/images/content/products-and-services/fluid-mechanics/lda/BSA%20Front%20DSC\\_0013%20low%20500pxl.jpg](http://www.dantecdynamics.com/images/content/products-and-services/fluid-mechanics/lda/BSA%20Front%20DSC_0013%20low%20500pxl.jpg), 29.8.2016
- [28]: [http://illumina-chemie.de/upload/437\\_173430442252e6b80393190.jpg](http://illumina-chemie.de/upload/437_173430442252e6b80393190.jpg), 29.8.2016
- [29]: <http://blog.micro-epsilon.de/wp-content/uploads/2010/06/capa-principle.jpg>, 28.8.2016
- [30]: [http://media.automation24.com/Artikelbilder/Shop800px/100129\\_1.jpg](http://media.automation24.com/Artikelbilder/Shop800px/100129_1.jpg), 28.8.2016
- [31]: [http://www.ifm.com/tedo/foto/z\\_1252.gif](http://www.ifm.com/tedo/foto/z_1252.gif), 28.8.2016
- [32]: [http://de-de.wika.de/upload/DS\\_IN0023\\_de\\_de\\_51541.pdf](http://de-de.wika.de/upload/DS_IN0023_de_de_51541.pdf), 14.09.2016
- [33]: [http://www.omega.de/temperature/images/DP9602\\_l.jpg](http://www.omega.de/temperature/images/DP9602_l.jpg), 28.8.2016
- [34]: [http://www.omega.com/green/images/FPD3000\\_l.jpg](http://www.omega.com/green/images/FPD3000_l.jpg), 28.8.2016

13 Anhang