

**Entwicklung eines Sensorsystems
zur kontinuierlichen
Ölqualitätsmessung und
Verschleißidentifikation in
Getrieben und anderen Aggregaten**

Manfred R. Mauntz



Höchstfrequenztechnik
und Quantenelektronik



Entwicklung eines Sensorsystems zur kontinuierlichen Ölqualitätsmessung und Verschleißidentifikation in Getrieben und anderen Aggregaten

genehmigte
DISSERTATION
zur Erlangung des Grades eines Doktors
der Ingenieurwissenschaften

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Manfred R. Mauntz
aus Kaiserslautern

eingereicht bei der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät
der Universität Siegen
Siegen 2012

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Peter Haring Bolívar
2. Gutachter: Prof. Dr. rer. nat. habil. Jürgen Gegner
Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Günter Schröder

Tag der mündlichen Prüfung: 26. Juli 2013

Band 3 aus der Schriftenreihe
Höchstfrequenztechnik und Quantenelektronik
Prof. Dr.-Ing. Peter Haring Bolívar
Naturwissenschaftlich-Technische Fakultät
Universität Siegen
57068 Siegen

urn:nbn:de:hbz:467-7540

Gedruckt auf alterungsbeständigem holz- und säurefreiem Papier.

Zusammenfassung

Es wurde ein Ölsensorsystem zur kontinuierlichen Online-Messung der von der Ölqualität abhängigen Parametern der elektrischen Leitfähigkeit, sowie der Dielektrizitätszahl von Ölen entwickelt. Mit dem Sensorsystem und dem grundsätzlichen Ansatz einer Messung der Veränderung des Systems Öl-Maschine werden bereits ab Inbetriebnahme kontinuierliche Analysen und Bewertungen von Maschinenverschleiß und Ölalterung ermöglicht. Warnungen vor kritischen Betriebszuständen, wie zu hohem Abrieb oder Schmierstoffversauerung und auch die treffsichere Indikation von vorbeugenden Wartungsmaßnahmen werden angezeigt. Beim Abrollen der Wälzkörper auf Lagerlaufbahnen können unter bestimmten, oft nur kurzzeitig herrschenden Betriebsbedingungen, etwa in Windgetrieben, hohe, durch lokale Reibung hervorgerufene, Zugspannungen zur Bildung scharfkantiger, spaltbruchartiger spröder Gewaltbruchrisse von der Oberfläche führen. Dieser Schadensmechanismus steht mit Frühausfällen in Verbindung. Durchgeführte praktische Messungen und Berechnungen nach Mischungsregeln von Maxwell-Garnett, Lichtenecker und Piekara unterstützen diese Hypothese. Vielversprechende Einsatzbereiche sind Industriegetriebe, Windenergieanlagen, Schiffsgetriebe, Turbinen und Motoren, Hydraulikanlagen und Transformatoren. Es werden Betriebszeiten vergrößert, Stillstandzeiten reduziert und eine verbesserte ökonomische und ökologische Effizienz erreicht. Wirksamere Maschinenausnutzung, gezielte Schadensverhütung, Lebensdauererhöhung und Reduktion der Ausfallzeiten sind dadurch realisierbar.

Summary

An oil sensor system for the continuous, online measurement of oil quality has been developed using the quality dependent parameters, electrical conductivity and permittivity. The sensor system permits the evaluation of the 'total machine system' by the basic approach of measuring the changes and degradation in the oil system. Warnings of critical operating conditions, such as excessive wear or lubricant acidification and also accurate indication of the need for preventive maintenance are realised. The rolling of bearings on the raceway can cause localised friction stress, resulting in the formation of sharp edged, brittle, hairline cracks. Often these are caused by only briefly prevailing conditions, e.g. high wind gusts in wind turbines. This crack formation is the first stage in the failure mechanism commonly associated with early failure of the machine. Practical measurements and calculations employing the laws of Maxwell-Garnett, Lichtenecker and Piekara support this hypothesis. Promising applications include industrial drives, wind turbines, marine gearboxes, turbines and engines, hydraulic systems and transformers. Benefits include increased uptime, reduced maintenance and an improvement in both economic and environmental efficiency. More effective utilization of machines, targeted prevention, increased serviceable life and reduced downtime are thereby realised.

Inhaltsverzeichnis

0.1	Formelzeichen	7
0.2	Kurzfassung	13
1.	Einleitung und Aufgabenstellung	17
2.	Zum Stand der Technik	21
2.1	Neutralisationszahlbestimmung	22
2.2	Restaschegehaltbestimmung	23
2.3	Spektroskopische Ölanalyse	25
2.4	Optische Partikelanalyse	27
2.5	Induktive Partikelzähler	28
2.6	Online-ATR-Spektroskopie	28
2.7	Kapazitive Vermessung von Zeolithen	29
2.8	Tuning-Fork-Quarzresonator	30
2.9	Messung mechanischer Schwingungen	33
2.10	Walzölsensor ConduSens®	34
2.11	Ölleitfähigkeitsmessgerät	37
2.12	Zusammenfassende Bewertung des Standes der Technik	39
3.	Sensorentwicklung	41
3.1	Basissensorkonzept	41
3.2	Temperaturabhängigkeit der Zellkonstante	51
3.3	Sensorelektronikkonzept	53
3.4	Sensorelektronik des OilQSens®	56
3.5	Sensorelektronik des CapHSens®	59
3.6	Reduktion von Messabweichungen durch die Sensorelektronik	61
3.7	Temperatursensor	64
3.8	Selbstlernende adaptive Temperaturkompensation	66
4.	Praktische Realisierung	73
4.1	Sensorelektronik	73
4.2	Basissensorrealisierung	75
5.	Realisierung der Laborprüfaufbauten	81
5.1	Laborprüfstand für Öl	81
5.2	Laborprüfstand für Gasfeuchte	82
5.3	Getriebeprüfstand	85
6.	Diskussion der Messergebnisse	89
6.1	Überprüfung des Basissensors und der Auswerteelektronik	89
6.2	Öl-Labormessungen	92

6.3	Messung der Neutralisationszahl oxidativ gealterter Hydrauliköle	96
6.4	Messung der spezifischen Leitfähigkeiten und Dielektrizitätszahlen des Hydrauliköls Energol HM46	97
6.5	Messung der spezifischen Leitfähigkeiten und Dielektrizitätszahlen des Getrieböls Energol GR–XP 220	100
6.6	Viskositätsmessungen	103
6.6.1	Dynamische Viskosität, Leitfähigkeit und Dielektrizitätszahl von HLP HM46	103
6.6.2	Dynamische Viskosität, Leitfähigkeit und Dielektrizitätszahl von GR XP 220	105
6.7	Gasfeuchtemessungen	108
6.8	Praktischer Vorversuch zur Eignung des Sensorsystems als Multi-Fuel-Sensor	109
6.9	Messergebnisse am Lagerprüfstand	111
6.10	Vergleichsmessung mit einem Leitfähigkeitsmessgerät	127
6.11	Praktischer Versuch zur Bestimmung der spezifischen Leitfähigkeit und Dielektrizitätszahl in unadditiviertem Öl FVA03	130
6.11.1	Zudosierung von Wasser	132
6.11.2	Zudosierung von Kupferpulver	132
6.12	Berechnung der Dielektrizitätszahl und der Leitfähigkeit mit anschließendem Vergleich der gemessenen Werte	133
6.12.1	Auswertung der Wasserzudosierung	134
6.12.2	Lineare Approximation der Messergebnisse	136
6.12.3	Zudosierung von Kupferpulver	139
6.12.4	Vergleich der berechneten Werte mit Hilfe der Taylorreihenentwicklung bei der Zudosierung von Kupferpulver	141
7.	Zusammenfassung und Ausblick	145
8.	Anhang	149
8.1	Abbildungsverzeichnis	149
8.2	Berechnung der Taylorreihen	152
8.2.1	Berechnung der Dielektrizitätszahl nach Maxwell-Garnett	152
8.2.2	Berechnung der Dielektrizitätszahl nach Lichtenecker	153
8.2.3	Berechnung der Dielektrizitätszahl nach Piekara	154
8.3	Datenblatt OilQSens®	155
8.4	Datenblatt CapHSens®	156
8.5	Konstruktionszeichnungen	157
8.6	Literaturverzeichnis	158

0.1 Formelzeichen

α_D	Ausdehnungskoeffizient der Durchführung
α_p	Ausdehnungskoeffizient der Elektrodenplatten
a	Polynomkoeffizient
a_l	Anstieg der Regressionsgerade
a_k	verbrauchte Kalilauge in ml
A	Fläche
ΔA	Flächenänderung
β	Parameter
b	Polynomkoeffizient
B	Bandbreite
B_m	magnetische Induktion
c	Polynomkoeffizient
C	Kapazität
C_{EP}	Polarisationskapazität
C_{FP}	Grenzflächenpolarisationskapazität
C_{GP}	Polarisationskapazität
C_n	Integrationskondensator
C_0	Basissensorkapazität im Vakuum
C_{OP}	Polarisationskapazität
C_p	parasitäre Kapazität
C_t	Teilkapazität des Basissensors
C_{p1}	parasitäre Kapazität 1
C_{p2}	parasitäre Kapazität 2
C_{p3}	parasitäre Kapazität 3
C_{p21}	parasitäre Kapazität 21
C_{p23}	parasitäre Kapazität 23
C_s	simulierte Sensorkapazität
C_x	elektrische Sensorkapazität
ΔC	Kapazitätsänderung
d	Störunterdrückung
dl_x	differentieller Strom der Wegkomponente x
dl_y	differentieller Strom der Wegkomponente y
dl_z	differentieller Strom der Wegkomponente z
$d\vec{I}$	differentieller Strom
dt	differentielle Zeitkomponente
dU_x	differentielle Spannung der Wegkomponente x
dU_y	differentielle Spannung der Wegkomponente y
dU_z	differentielle Spannung der Wegkomponente z
dV	differentielle Volumenkomponente
$d\vec{U}$	differentielle Spannung
dx	differentielles Wegelement x
dy	differentielles Wegelement y
dz	differentielles Wegelement z

d_0	Plattendicke bei Referenztemperatur
Δd	Plattendickenänderung
D	Determinante
$\vec{D}$	dielektrische Verschiebung
D_P	Plattendurchmesser
ϵ	dielektrische Permittivität, Dielektrizität
ϵ_r	Dielektrizitätszahl
ϵ_{rAdd}	Dielektrizitätszahl der Zudosierung
ϵ_{rc}	berechnete Dielektrizitätszahl des Gemisches
ϵ_{rG}	Dielektrizitätszahl der „feuchten“ Luft
ϵ_{rL}	Dielektrizitätszahl von Luft
ϵ_{rWd}	Dielektrizitätszahl von Wasserdampf
ϵ_{Oel}	Dielektrizitätszahl des Öls ohne Zudosierung
ϵ_0	Dielektrizitätskonstante
e	Eulersche Zahl
E	Einwaage der Öl-Probe in g
E_{Add}	Elektrische Feldstärke der Zudosierung
E_{Oel}	Elektrische Feldstärke des Öls
$\vec{E}$	elektrische Feldstärke
f	Frequenz
f_S	Störfrequenz
f_v	Volumenverhältnis von „feuchter“ Luft
f_0	Entwicklungspunkt der Taylorreihe
f	Volumenanteil der Zudosierung
F_n	Normalkraft
F_r	Reibungskraft
η	dynamische Viskosität
η_{40}	dynamische Viskosität bei einer Temperatur von 40°C
i	Laufindex
i_C	Kondensatorstrom
i_{Cx}	kapazitiver Sensorstrom
I	elektrische Stromstärke
I_n	invertierender Eingangsstrom
I_A	Ausgangsstrom
I_P	nichtinvertierender Eingangsstrom
I_R	Eingangsruhestrom
I_0	Offsetstrom
κ	elektrische Leitfähigkeit
κ_c	berechnete Leitfähigkeit des Gemisches
κ_i	nicht temperaturkompensierter Messwert der Leitfähigkeit
κ_{Add}	Leitfähigkeit der Zudosierung
κ_{Oel}	Leitfähigkeit des Öls ohne Zudosierung

κ_{40}	elektrische Leitfähigkeit bei Referenztemperatur 40°C
κ_{50}	elektrische Leitfähigkeit bei Referenztemperatur 50 °C
κ_{T0}	angenäherte elektrische Leitfähigkeit bei Referenztemperatur T_0
$\Delta\kappa$	Änderung der elektrischen Leitfähigkeit
k_g	geometrieabhängige Konstante
k_k	dimensionslose Kalibrierkonstante
k_z	temperaturabhängige Zellkonstante
k_{z0}	Zellkonstante bei Referenztemperatur
K	Einheit der Temperatur (Kelvin)
λ	Parameter der Gewichtungsfunktion
l	Länge
l_0	Plattenabstand bei Referenztemperatur
l_1	Länge der Durchführung
l_2	Länge der Durchführung und des Plattenabstandes
Δl	Längenänderung
L	Induktivität
L_{ZUL}	Impedanz der Zuleitungsinduktivität
μ	Reibungskoeffizient
M	Drehmoment
Me	Metalle
MeO	Metalloxide
Me_2O	Metalloxide
$MeOR$	metallorganische Verbindung
$MeSO_4$	Metallsulfate
Me_2SO_4	Metallsulfate
MeX	Metallhalogenide
$M(KOH)$	Molmasse KOH (56,1g/mol)
M_1	Moment Antriebsmaschine
M_2	Moment Bremsmaschine
n	Drehzahl
N	Normalität (Konzentration) der KOH- Lauge
$N_{\bar{U}}$	Übersetzungsverhältnis
Q	Ladung
Q_v	Volumendurchfluss
ppm/v	Volumenmischungsverhältnis
P	Leistung
$P_g(f)$	Taylorreihenentwicklung an Stelle der Zudosierung
ΔP	Verlustleistung im Getriebe
ρ	spezifischer elektrischer Widerstand
r_a	Radius Außenelektrode
r_i	Radius Sensorelektrode
R	elektrischer Widerstand
R_a	Ausgangswiderstand

R_e	Eingangswiderstand
R_s	Symetriewiderstand
R_S	simulierter Sensorwiderstände
R_{EP}	Serienwiderstand
R_{GP}	Gitterpolarisationswiderstand
R_i	Risikofunktion
R_L	Lastwiderstand
R_m	Shuntwiderstand
R_M	Strommesswiderstand
R_{OP}	Gitterpolarisationswiderstand
R_x	Elektrischer Sensorwiderstand
R_{ZUL}	Zuleitungswiderstand
ΔR_1	Änderung des elektrischen Widerstandes R_1
ΔR_2	Änderung des elektrischen Widerstandes R_2
s	Weg
SR	maximale zeitliche Spannungsänderung (SlewRate)
Sz	Säurezahl
$\vec{j}$	Stromdichte
τ_{EP}	Relaxationszeitkonstante der Elektrodenpolarisation
τ_{FP}	Relaxationszeitkonstante der Grenzflächenpolarisation
t	Zeit
t_h	Halbwertszeit
Δt	Zeitintervall
T	Temperatur
T_i	aktuelle Temperatur des Öls
T_w	Isttemperatur
T_0	Referenztemperatur
ΔT	Differenztemperatur
T_I	Periodendauer, Integrationszeit
T_ε	Sprungzeit
T_K	High-Zeit
T_2	Low-Zeit
ΔT_K	Änderung der High-Zeit
u_a	Ausgangsspannung
u_d	Differenzeingangsspannung
u_I	Integratorausgangsspannung
u_n	invertierende Eingangsspannung
u_p	nichtinvertierende Eingangsspannung
$\bar{u}$	arithmetischer Spannungsmittelwert
U	elektrische Spannung
U_{amax}	maximale Ausgangsspannung
U_{amin}	minimale Ausgangsspannung
U_{aX1}	Ausgangsspannung des Schmitt-Triggers
U_{aX2}	Ausgangsspannung des Komparators
U_{Ch}	elektrochemische Störgleichspannung

U_E	Eingangsspannung
U_{IS}	Schaltspannung
U_{PT100}	Temperaturmessspannung
U_Q	durchflussproportionale Spannung
U_{Sp}	Spannungssprung
U_{Tr}	Triggerspannung
U_{XOR}	Ausgangsspannung des XOR-Gatters
$\hat{U}_s$	Störspannungsamplitude
v_0	Leerlaufverstärkung
V	Volumen
$\dot{V}$	zeitliche Ableitung des Volumens
ω	Winkelgeschwindigkeit
ω_1	Winkelgeschwindigkeit des Antriebs
ω_2	Winkelgeschwindigkeit der Last
x	Bewegungsrichtung
$\underline{X}$	komplexe Impedanz
Z	Konstante
$1-f$	Volumenanteil des Öls

0.2 Kurzfassung

Es wird ein Ölsensorsystem zur kontinuierlichen Online-Messung der von der Ölqualität abhängigen Parameter elektrische Leitfähigkeit und Dielektrizitätszahl von Ölen entwickelt. Mit dem heute unter der Bezeichnung OilQSens[®] technisch verfügbaren Sensorsystem und dem grundsätzlichen Ansatz einer Messung der Veränderung des Systems Öl-Maschine werden bereits ab Inbetriebnahme kontinuierliche Analysen und Bewertungen von Maschinenverschleiß und Ölalterung ermöglicht. Warnungen vor kritischen Betriebszuständen, wie zu hohem Abrieb oder Schmierstoffversauerung und auch die treffsichere Indikation von vorbeugenden Wartungsmaßnahmen sollen angezeigt werden können. Vielversprechende Einsatzbereiche sind Industriegetriebe, Windenergieanlagen, Papiermaschinen, Trockner, Schiffsgetriebe, Turbinen und Generatoren, Motoren, Hydraulikanlagen und Transformatoren.

Beim Abrollen der Wälzkörper auf Lagerlaufbahnen können unter bestimmten, oft nur kurzzeitig herrschenden Betriebsbedingungen etwa in Windgetrieben hohe, durch lokale Reibung hervorgerufene Zugspannungen zur Bildung scharfkantiger spaltbruchartiger spröder Gewaltbruchnarben von der Oberfläche führen. Dieser Schadensmechanismus steht mit Frühausfällen in Verbindung. Verzweigendes und aufweitendes Risswachstum bei zumeist nur moderater Last wird unter Mitwirkung des eindringenden, alternden Öls durch Schwingungsrissskorrosion (Korrosionsermüdung) rasch vorangetrieben. Beispielsweise durch Rissrückläufer kommt es im weiteren Betrieb zu größeren Materialausbruch, etwa als pockenförmig beginnende Laufbahnschälungen. Mittels Schwingungsanalysen kann dieser bereits fortgeschrittene Verschleißzustand schließlich detektiert werden. Zu dem Zeitpunkt ist zwar zumeist noch nicht das gesamte Getriebe, wohl aber zumindest das betroffene Wälzlager ausgefallen und muss aufwändig ersetzt werden.

Mit Hilfe des neuen Ölsensorsystem werden neben mikroskopischen Abriebpartikeln auch schon Ölalterungs- und Korrosionsprodukte, Ionen oder Ölversauerung lange vor einer Zerstörung des Maschinenelements detektiert. Es wird die Hypothese aufgestellt, dass die zeitliche Ableitung der gemessenen, temperaturkompensierten elektrischen Leitfähigkeit des Öls mit dem momentanen Verschleiß u. a. von Getrieben korreliert ist. Die Leitfähigkeit der Verunreinigungen des Öls ist wesentlich größer als die des Öls selbst. Metallabrieb, gebrochene Ölmoleküle, Säuren oder Ölseifen bewirken eine Leitfähigkeitserhöhung. Durchgeführte praktische Messungen und Berechnungen nach Mischungsregeln von Maxwell-Garnet, Lichtenecker und Piekara unterstützen diese Hypothese. Die dielektrischen Eigenschaften der Öle werden insbesondere durch den Wassergehalt bestimmt, der deshalb bei nicht additiven Produkten über eine zusätzliche genaue Messung der Dielektrizitätszahl ermittelt wird. Bei additiven Ölen lässt sich, zumindest in bisher untersuchten Anwendungen, über die Zeitableitung der temperaturkompensierten Dielektrizitätszahl der Abbau von Additiven bestimmen.

Der kapazitive Basissensor wird zur Vermeidung von Polarisierungseffekten mit mittelwertfreien, rechteckförmigen Wechsellspannungssignalen beaufschlagt. Während der abschnittsweise konstanten Spannung wird über eine Integration die elektrische Leitfähigkeit bestimmt. Die Eingangssignalfanken werden zur Messung der Kapazität genutzt. Durch die Integration der extrem kleinen ohmschen Ströme wird eine ausreichende Störunterdrückung auch gegenüber eingestreuten elektromagnetischen Feldern erreicht. Eine Messung mit

sinusförmigen Wechselgrößen wäre hingegen weniger geeignet, da der kapazitive Strom erheblich größer wäre als die ohmsche Komponente des Stroms. Aus dem gemessenen Widerstand und der Kapazität werden dann mit Kenntnis der Geometrie der Elektrodenanordnung bzw. der Zellkonstante die Leitfähigkeit und die Dielektrizitätszahl berechnet.

Das Sensorsystem ermöglicht selbsttätige überlagerte Verschleißbegrenzungsregelungen. So kann beispielsweise bei Windturbinen der Getriebeverschleiß in Abhängigkeit des momentanen Strompreises über die Pitcheinstellung beschränkt werden.

Über die Einbindung des Ölsensorsystems in eine webbasierte Kommunikationsstruktur, ein „Internet der Maschinen“, wird wiederum ein webbasiertes Online-Monitoringsystem realisiert. Die LAN- und WLAN- Schnittstellen des OilQSens[®] dienen sowohl zur Übertragung der Messsignale an einen Datenbankserver, als auch zur Präsentation der lokalen Messdaten als HTML-Seiten. Hierzu ist ein kleiner Webserver im Ölsensorsystem integriert. Der Zugriff autorisierter Bediener auf den Datenbankserver des Monitoringsystems erfolgt ebenfalls über das Internet. Ein automatisiertes Senden warnender E-Mails, SMS, usw., ist an jedem beliebigen Rechner oder Smartphone mit Netzzugang möglich.

Die Nutzung des Ölsensors zur Überwachung, einschließlich der Empfehlung daraus abzuleitender, vorbeugender Wartungsmaßnahmen, kann als anwenderorientierte Dienstleistung vorgenommen werden. Dieses entlastet die Anlagenbetreiber, erhöht die Sicherheit und spart Kosten. Die Anwendung des Ölsensorsensorsystems erhöht die Betriebszuverlässigkeit. Es werden Betriebszeiten vergrößert, Stillstandzeiten reduziert, Ölwechselintervalle dem tatsächlichen Bedarf angepasst und eine verbesserte ökonomische und ökologische Effizienz erreicht. Wirksamere Maschinenausnutzung, gezielte Schadensverhütung, Lebensdauererhöhung und Reduktion der Ausfallzeiten sind dadurch realisierbar.

Abstract

An oil sensor system has been developed for continuous online measurement of the oil quality dependent parameters of electrical conductivity and dielectric constant of oils. With the sensor system, technically available today under the designation of OilQSens[®], and the fundamental approach of a measurement of the alteration of the oil-machine system, continuous analyses and assessments of machine wear and oil aging is provided already as of commissioning. Warning of critical operating conditions, such as excessive wear debris or lubricant acidification, and the accurate indication of preventative maintenance measures are due to be displayed. Promising areas of application are industrial gears, wind turbines, paper machines, dryers, marine gears, turbines and generators, engines, hydraulic systems and transformers.

During overrolling of rolling elements on bearing raceways, high local frictional tensile stresses frequently acting only temporarily under certain operating conditions, e.g. in wind turbine gearboxes, can lead to the initiation of sharp-edged cleavage-like brittle spontaneous incipient cracks from the surface. This damage mechanism is connected with early failures. Branching and spreading crack growth at usually only moderate load is rapidly driven by corrosion fatigue under the assistance of penetrating aging oil. During further operation, for instance, crack returns cause larger material removals, e.g., in the form of pock-like initial raceway pitting. This already advanced state of wear can be detected by vibration analysis

eventually. Though usually not yet the complete gearbox, at least, however, the affected rolling bearing is failed at that time and needs to be replaced demandingly.

With the new oil sensor system, apart from microscopic wear particles, also oil aging and corrosion products, ions, or oil acidification can already be detected long before the damage of the machine element. The hypothesis is introduced that the time derivative of the measured temperature-compensated electrical conductivity of the oil correlates with the instantaneous wear, e.g., of gearboxes. The conductivity of the contaminations of the oil is substantially higher than that of the oil itself. Metal debris, broken oil molecules, acids or oil soaps provoke a conductivity increase. Performed practical measurements calculations according to the mixing rules of Maxwell-Garnet, Lichtenecker and Piekara support this hypothesis. The dielectric properties of the oils are determined, in particular, by the water content, which for non-additivated oils, therefore, is obtained by an additional accurate measurement of the permittivity. In additivated oils, at least in the applications investigated so far, the consumption of the additives can be determined by the time derivative of the temperature-compensated dielectric constant.

The capacitive sensor uses zero-mean rectangular AC voltage signals to avoid polarization effects. The electrical conductivity is determined during the stepwise constant voltage by an integration. The input signal edges are used to measure the capacitance. The integration of the extremely low resistance currents ensures sufficient interference suppression also with respect to scattered electromagnetic fields. A measurement with sinusoidal alternating quantities would be less suitable, however, as the capacitive current would be significantly higher than the resistive component of the current. From the measured resistance and the capacitance, together with the knowledge of the geometry of the electrode arrangement or the cell constant, the conductivity and dielectric constant are subsequently calculated.

The sensor system enables automatic superimposed of wear limit regulations. This way, the gearbox wear, e.g., of wind turbines, can be restricted by means of the pitch setting, depending on the current electricity tariff.

By the implementation of the oil sensor system in a web-based communication structure, an "Internet of Machines", on the other hand, a web-based online monitoring system is realized. The OilQSens[®] LAN and WLAN interfaces serve for both transmitting the measured signals to a database server as well as presenting the local measurement data as HTML pages. For this, a small web server is integrated into the oil sensor system. The access of authorized users to the database server of the monitoring system also occurs via the internet. It is possible to send automated warning e-mails, SMS, etc., to any computer or smart phone with internet access.

The use of the oil sensor for monitoring purposes, including the recommendation of deduced preventive maintenance measures, can be performed as user-oriented service. This relieves the plant operator, improves the safety and saves costs. The application of the oil sensor system increases operational reliability. Service times are increased, downtimes are reduced, oil change intervals are adapted to the actual need and an improved economic as well as ecological efficiency is achieved. Therefore, more effective utilization of machines, targeted failure prevention, life increase and reduction of idle times are feasible.

1. Einleitung und Aufgabenstellung

Zur Sicherstellung der Qualität von zum Schmieren, Kühlen und Isolieren eingesetzten Ölen eignet sich ein elektrisches Ölsensorsystem zur kontinuierlichen Online-Messung der ölqualitätsabhängigen Parameter Leitfähigkeit κ und Dielektrizitätszahl ϵ_r der Öle. Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung eines solchen Werkzeugs für die Zustandsüberwachung (Condition Monitoring). Mit dem neuen Sensorsystem sollen die Verschmutzung und Abnahme der Qualität der Schmierstoffe bestimmt und eine kontinuierliche Bewertung des Maschinenverschleißes ermöglicht werden. Aus den Komponenten der spezifischen komplexen Impedanz $\underline{X}$ der Öle, bzw. deren Veränderung, und der Öltemperatur T kann auf Verunreinigungen und Verschleiß geschlossen werden. Sowohl Abriebkomponenten als auch u. a. gebrochene Ölmoleküle, Säuren oder Ölseifen bewirken eine Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit κ . Basierend auf dem Umstand, dass die elektrische Leitfähigkeit von Öl außerordentlich gering gegenüber der Leitfähigkeit der Kontaminationsprodukte ist, besteht ein direkter Zusammenhang zwischen der elektrischen Leitfähigkeit und dem Verschmutzungsgrad. Die Dielektrizitätszahlen der Öle und von Wasser liegen in einer Größenordnung von $\epsilon_r \approx 2,2$ bzw. $\epsilon_r \approx 81$. Über eine genaue Messung der Dielektrizitätszahl soll zusätzlich der Wassergehalt der Öle ermittelt und gegebenenfalls der Einfluss des Wassers auf die Leitfähigkeit der Öle kompensiert werden können.

Mit dem Ansatz einer Messung der Veränderung des Systems Öl-Maschine sollen eine quasi kontinuierliche Bewertung des Maschinen- und Ölverschleißes ermöglicht und vorbeugend Wartungsmaßnahmen anstelle von Instandsetzungen angezeigt werden. Es werden die Betriebssicherheit erhöht, Standzeiten vergrößert, Stillstandszeiten reduziert, Ölwechselintervalle dem tatsächlichen Bedarf angepasst und eine verbesserte ökonomische und ökologische Effizienz erreicht. Beispielanwendungen sind die Überwachung von Ölen in Getrieben, Turbinen und Generatoren (z. B. zur Windenergienutzung), Hydraulikanlagen, Transformatoren [1][2], Motoren und vielen weiteren Systemen.

Es ist bekannt, dass die jährlichen Verluste durch Reibung und Verschleiß in den Industrieländern ca. 4,5% des Bruttosozialproduktes betragen [3]. Die Gesellschaft für Tribologie e.V. geht davon aus, dass hier ein Einsparpotential von ca. 5 G€ pro Jahr besteht. Mit Hilfe des neuen Ölsensors soll ein Beitrag zur Hebung dieses Einsparpotentials geleistet werden.

Die wirtschaftlich bedeutsamste Anwendung von Industriegetrieben liegt bei Windkraftanlagen. Hier legt die Gefahr vorzeitiger Wälzlagerschäden eine leistungsfähige Online-Überwachung des Schmierölzustands sehr nahe. Da der Ölsensor in der maschinenbaulichen Anwendung deshalb ganz besonders für den Einsatz in Windkraftgetrieben vorgesehen ist, soll nachstehend ein kompakter Hintergrund zu dieser stark aufstrebenden alternativen Energietechnologie geboten werden.

Die das Gesicht der USA ab Mitte des 19. Jahrhunderts mitgestaltenden „Westernmills“ arbeiten vorwiegend als Pumpen. Der Beginn der Erzeugung von elektrischem Strom durch Windkraft datiert auf Anfang 1888: Die 12 kW-Anlage von Cleveland nutzt 144 Rotorblätter von 17 m Durchmesser. Der Pionier der ingenieurtechnischen Windkraftnutzung stammt jedoch aus der Wälzlagerstadt Schweinfurt: Dank Professor Albert Betz (siehe Bild 1.1) ist z.B. bekannt, dass eine Turbine ohne Reibungsverluste maximal 59,26% Leistungsentnahme liefern kann [4]. Dabei muss die Windgeschwindigkeit (typisch 5 bis 15 m/s,

Weibull-Verteilung) auf ein Drittel des ursprünglichen Werts verringert werden. Tatsächlich erzielte Leistungsbeiwerte liegen bei unter 20% bis zu 50% [5]. Das 1926 unter dem Titel „Wind-Energie und ihre Ausnutzung durch Windmühlen“ erschienene Werk von Betz [6], das die Tragflügeltheorie zur Auslegung von Rotorblättern begründet, eröffnet die wissenschaftliche Entwicklung hin zu modernen Großanlagen. Derzeit wird bei Nabenhöhen über 100 bis 150 m mit maximal 6 MW Nennleistung ein Energieertrag von bis zu 20 GWh pro Jahr erreicht. Die Standardgröße heutiger Windkraftanlagen liegt bei 2 bis 3 MW. Erfahrungsgemäß wird an Land durchschnittlich etwa ein Drittel der installierten (Nenn-) Leistung erzielt (z. B. 0,9 aus 3 MW). Luftströmungen besitzen nur geringe Energiedichte, was relative lange (Durchmesser heute meist über 90 m) und entsprechend langsam drehende Rotoren in großer Höhe und damit hohen Bauaufwand bedingt.

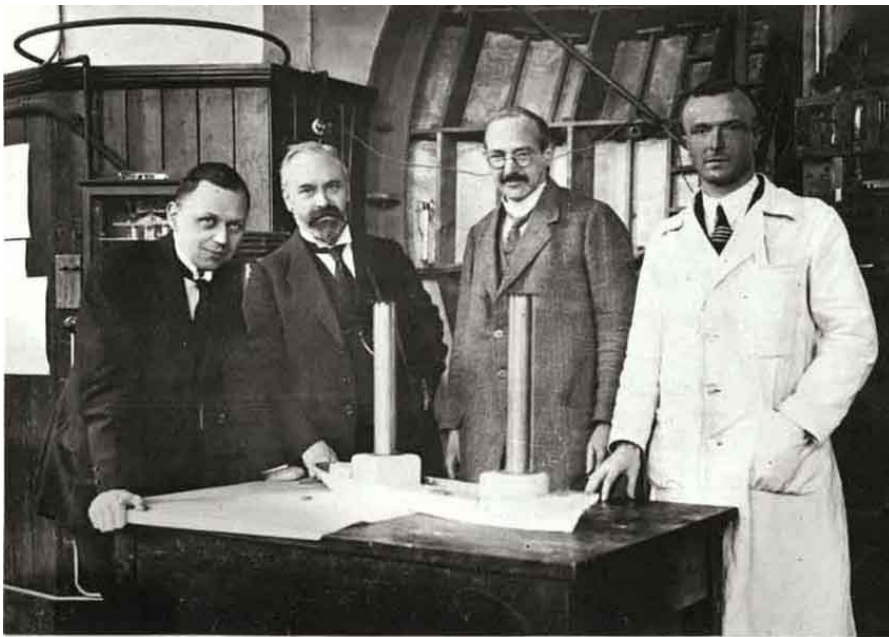


Bild 1.1: Prof. Dr. Albert Betz (Zweiter von rechts, 1885–1968), Pionier der Windkraftnutzung aus Schweinfurt

Ein technologischer Meilenstein bleibt, trotz ausgedehnter Stillstandszeiten, die zwischen 1983 und 1987 an der Nordsee in der Dithmarscher Südermarsch betriebene und zeitweilig mit 3 MW weltweit nennleistungsstärkste „große Windkraftanlage“ GROWIAN. Der in Bild 1.2 dargestellte Zweiblattläufer mit einem Rotordurchmesser von 100 m dreht mit 18,5 U/min bei einer Gesamtübersetzung des Getriebes von 1:81. Das damals von Naturschützern erstrittene, an zwei Masten befestigte Netz rettet das Leben von Vögeln.

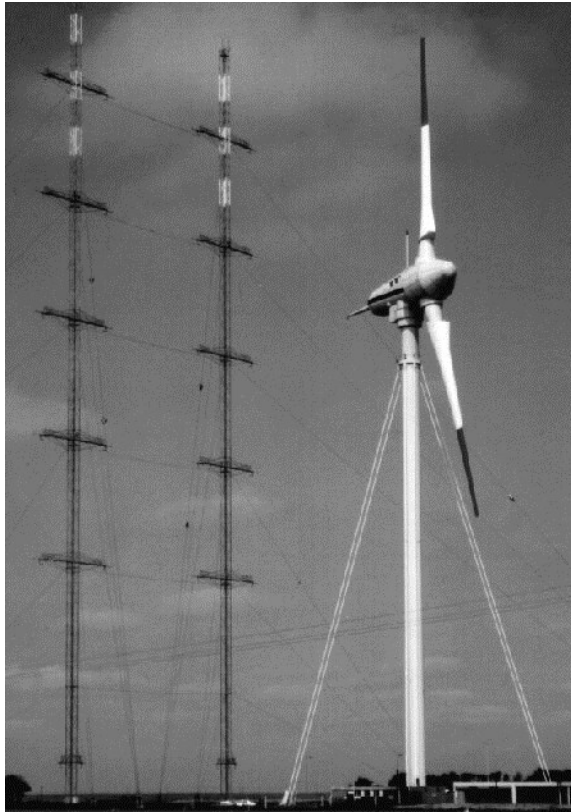


Bild 1.2: Teile der zur Mitte der 1980er Jahre Aufsehen erregenden GROWIAN können heute im Auto- und Technik Museum Sinsheim besichtigt werden

Global beträgt die installierte Windkraftgesamtleistung, bei einem weiterhin prognostizierten jährlichen Anstieg von über 10%, derzeit ca. 240 GW, wovon Deutschland mit rund 30 GW aus etwa 20000 Turbinen knapp ein Drittel des europäischen Anteils hält. Es rangiert damit hinter den Flächenstaaten China und USA auf Platz 3. Über die Hälfte aller Komponenten und um 40% der kompletten Windkraftanlagen stammen aus Deutschland. Die Exportquote erreicht derzeit fast 70% bei einem mittelfristigen Ziel bis über 80%. Die nationale Wertschöpfung der auch für den Arbeitsmarkt sehr wichtigen Branche beträgt ungefähr 40%. Dank nachhaltiger staatlicher Förderung deckt die Windkraft, mit größeren Schwankungen durch wechselnde Wetterbedingungen, momentan mit ca. 6% etwa die Hälfte des Gesamtbeitrags regenerativer Energien am deutschen Stromerzeugungsmix ab. Günstige Schätzungen rechnen hier bis zum Jahr 2020 mit Anteilen von über 20% im Inland und 12% weltweit.

Wegen günstigerer Windverhältnisse über Meeresflächen (onshore im Jahresdurchschnitt nur etwa 20% Betriebszeit auf Nennleistungsniveau) führen auf hoher See errichtete Offshore-Anlagen, ungeachtet möglicher Naturschutzbedenken (u. a. Ölverschmutzung), zu einer deutlichen Steigerung des Energieertrags. Speziell in Deutschland kommt hinzu, dass mit als Folge des bereits spürbaren Verlusts an landwirtschaftlicher Nutzfläche etwa für den Getreideanbau kaum noch freie Landmasse verfügbar und die geplante Aufrüstung von Systemen an bestehenden Standorten kostspielig ist. In 20 Jahren sollen deshalb Offshore-Windparks mit 20 bis 25 GW Nennleistung aufgebaut sein, was den prognostizierten Onshore-Anteil egalisieren würde. Wegen der für die Errichtung und auch zu Reparatur- und Austauscharbeiten wesentlich erschwerten Zugänglichkeit von See oder aus der Luft, kann Rentabilität nur bei bester Betriebszuverlässigkeit erreicht werden. Trotz Fortschritten in der Frequenzumrichtertechnologie, die wartungsfreundlicheren getriebelosen Turbinen

entgegenkommen, weist die überwiegende Mehrzahl aller Windkraftanlagen konventionelle Triebstrangkonstruktion meist in teilintegrierter Bauform auf. Unrentable Sonderentwicklungen, deutlich höheres Gewicht und der erhebliche Kupferverbrauch werden dadurch vermieden, wobei der Wirkungsgrad des Übersetzungsgetriebes zwischen Rotor und Generator mit ca. 98% praktisch 1 beträgt.

Durch das in der vorliegenden Arbeit entwickelten Sensorsystem wird die wichtige technische Aufgabe gelöst, Schäden an Zahnrädern (z. B. durch Graufleckigkeit) und Wälzlagern in einem so frühen Stadium zu erkennen, dass die Kosten für Betriebsausfall und Reparatur begrenzt bleiben. Bei genauer Kenntnis des Einflusses von Alterungsreaktionsprodukten des Öls und der Additive auf die äußerst präzise gemessenen elektrischen Größen besteht sogar die Aussicht, durch rechtzeitigen Schmierstoffwechsel bereits die Schadensentstehung zu vermeiden. Hier eröffnet sich ein sehr lohnendes Gebiet für künftige interdisziplinäre Forschung von Elektrotechnik, Tribologie und Chemie.

2. Zum Stand der Technik

Die Tribologie (griechisch tribos: reiben) beschäftigt sich mit dem Zusammenspiel relativ zueinander bewegter Oberflächen: der Reibung, der Schmierung und dem Verschleiß. Seit der Mensch Lasten bewegt, wird er mit der Tribologie konfrontiert. Schon im 19. Jahrhundert vor Christus wurde im alten Ägypten zur einfacheren Beförderungen von schweren Gegenständen Öl als Schmiermittel eingesetzt [7]. Guillaume Amontons [7] formulierte im späten 17. Jahrhundert, dass die Reibungskraft F_r von der Ausdehnung der Reibfläche unabhängig und die Reibungskraft F_r der Normalkraft F_n direkt proportional ist [8]. Dieses wurde bereits ca. hundert Jahre früher von Leonardo da Vinci [9] entdeckt. Der Proportionalitätsfaktor ist der Reibungskoeffizient μ , er wird auch als Reib(bei)wert bezeichnet. Bild 2.1 zeigt die relevanten Kräfte zum Reibungsgesetz, die Bewegungsrichtung ist mit x gekennzeichnet.

$$F_r = \mu \cdot F_n \quad (2.1)$$

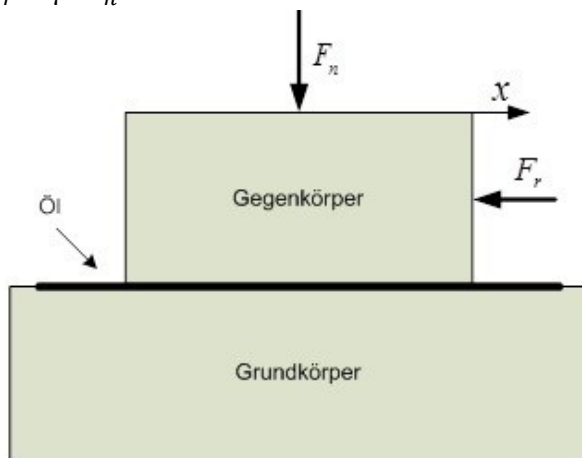


Bild 2.1: Bewegungssystem mit Reibung

Auf diesem Gesetz aus Gl. (2.1) beruhte das Verständnis der Tribologie bis in die 50er Jahre des letzten Jahrhunderts. Genauere Betrachtungen zeigen zusätzliche geschwindigkeitsabhängige Kraftkomponenten der Reibungskraft F_r . D. Tabor entdeckte, dass die grundlegenden Ursachen für die Phänomene der Tribologie auf der molekularen Ebene zu suchen sind. Seine Vorstellungen von Reibung und Schmierung sind auch noch heute, ca. 57 Jahre nach Erscheinen des Standardwerkes „Friction and Lubrication of Solids“ [10], eine wichtige Grundlage für Anwendung und Forschung. Besonders die Entwicklung des Rasterkraft- bzw. Reibungskraftmikroskops erlaubten es, die Vorgänge auf molekularer Ebene genauer zu untersuchen. Die moderne Tribologie ist Teilgebiet des Maschinenbaus und wird interdisziplinär von Maschinenbauern, Werkstoffwissenschaftlern, Physikern und Chemikern betrieben. Ziel der angewandten Wissenschaft der Tribologie ist die Optimierung von Bewegungssystemen unter funktionellen, ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten in Bezug auf die Minimierung von Reibungsverlusten und Teileverschleiß.

Die Schmierstoffe müssen sorgfältig auf das Tribosystem abgestimmt sein [11]. Ihre wichtigsten Funktionalitäten sind: Schmieren zur Verminderung von Reibung und Verschleiß, Kühlen des Kontakts, Abtransport von Abrieb und Verschmutzungen, Verhindern von Korrosion und Schutz der Oberflächen [12]. In ca. 93% aller Anwendungsfälle werden Erdölprodukte zur Schmierung eingesetzt [13].

Durch das Beimischen von Additiven zum Schmierstoff, oft in abgestimmten Paketen, werden verbesserte Eigenschaften oder besondere Beanspruchbarkeit erreicht. Beispiele sind

Inhibitoren zur Verlangsamung der Ölalterung, Viskositätsverbesserer, Verschleißschutzadditive und Additive zur Korrosionsverzögerung.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird ein Sensorsystem zur kontinuierlichen Online-Messung der Qualitätsveränderung von Ölen als Schmier- und Isoliermittel entwickelt. In den folgenden Abschnitten 2.1 bis 2.11 sowie 2.12 werden verschiedene heute eingesetzte Messverfahren zur Schmierölqualitätsmessung diskutiert bzw. zusammenfassend bewertet.

2.1 Neutralisationszahlbestimmung

Ein im Bereich der Ölanalyse häufig eingesetztes Messverfahren ist die Bestimmung der Neutralisationszahl. Sie wird auch als Säurezahl (Sz) bezeichnet und gibt an, wieviel Milligramm Kaliumhydroxid zur Neutralisation der in einem Gramm Öl vorhandenen freien Säuren notwendig sind. Eine Vorgabe zur Bestimmung der Säurezahl wird in der DIN 53402 [14] und der DIN EN 12634 [15] beschrieben. Internationale Normen für die nichtwässrige potentiometrische Titration sind die Standards ASTM 664 und ISO 6619 [16].

Zur Bestimmung der Säurezahl nach DIN 53402 werden typischerweise 0,1mol/l Kaliumhydroxidlösung in n- oder iso-Propanol verwendet. Die Ölprobe wird dann in diesen Lösungsmitteln oder mit ihnen mischbaren Lösungsmitteln gelöst. Eine KOH-Lösung wird in Tropfenform eingebracht über eine Bürette in die gerührte Probelösung und es wird mit einem geeigneten Farbindikator oder einer pH-Elektrode die Änderung des pH-Wertes gemessen. Eine mögliche Wertekurve ist in Bild 2.2 dargestellt. Für gealtertes Öl liegt der Startpunkt typischerweise bei pH 3.

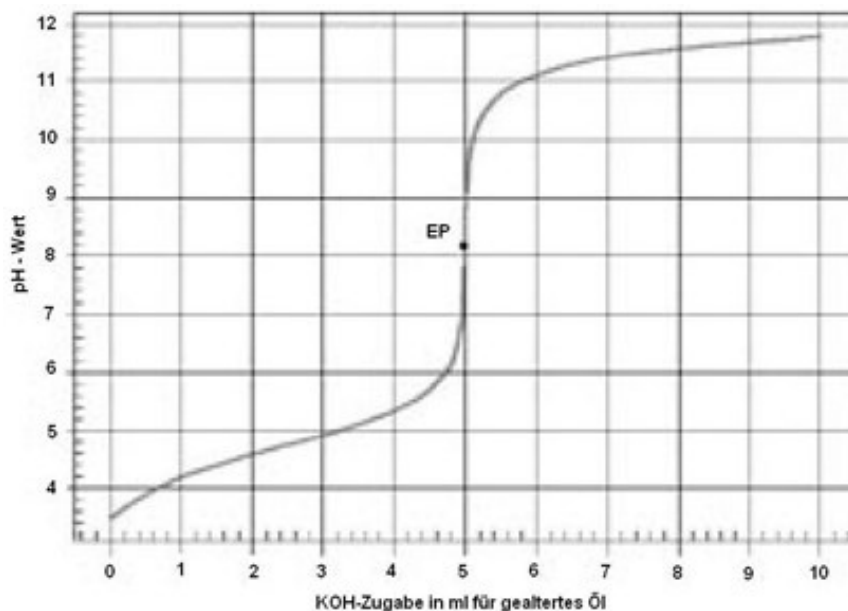


Bild 2.2: Mögliche Wertekurve von pH-Wert als Funktion der KOH-Zugabe [17], mit EP wird der Äquivalenzpunkt bezeichnet

Der Verbrauch der KOH-Lösung a_K für die Titration bis zum Endpunkt wird notiert und geht zusammen mit der Konzentration der Lösung und der Einwaage E der Probe in die Rechnung ein:

$$Sz = \frac{M(KOH) \cdot a_K \cdot N}{E}, [Sz] = \frac{mg\ KOH}{g} \quad (2.2)$$

Der Molmassewert KOH in g/mol ergibt sich aus der Summe der Molmassen von Kalium (K), Sauerstoff (O) und Wasserstoff (H)

$$M(KOH) = (39,1 + 16,0 + 1,0) \frac{g}{mol} = 56,1 \frac{g}{mol} \quad (2.3)$$

Als ein Anwendungsbeispiel für die Säurezahlmessung soll im Folgenden kurz der Einfluss von Wasser und Katalysatoren auf die Säurezahl eines Motoröls diskutiert werden. Ist Motoröl beispielsweise mit Wasser und / oder Metallabrieb verunreinigt, so wirkt sich dieses auf die Qualität des Motoröls aus. Bestimmt man die Säurezahl eines Motoröls in Abhängigkeit von der Betriebsstundenzahl sowie der Gegenwart von Wasser und / oder metallischen Katalysatoren (z. B. Eisen oder Kupfer), so stellt man fest, dass sich die Säurezahl in Anwesenheit von Katalysatoren und Wasser signifikant durch Oxidation (Ölalterung) erhöht. Tabelle 1 zeigt diese Abhängigkeiten der Säurezahl.

Probe Nr.	Katalysator	Wasserzugabe	Betriebszeit in h	Säurezahl in mgKOH/g
1	ohne	ohne	> 3.500	0,17
2	ohne	mit	> 3.500	0,90
3	Eisen	ohne	> 3.500	0,65
4	Eisen	mit	400	8,10
5	Kupfer	ohne	> 3.000	0,89
6	Kupfer	mit	100	11,2

Tabelle 1: Typische Praxiswerte der Säurezahl [18]

Die Säurezahl eines wasserfreien Motorenöls nach über 3500 Betriebsstunden war 0,17 mg/g. Selbst bei Zugabe von Wasser steigt die Säurezahl nach 3500 Betriebsstunden lediglich auf 0,90 mg/g an. Eine Zugabe allein von Katalysatoren, wie z. B. Eisen oder Kupfer, ohne Gegenwart von Wasser, lässt die Säurezahl ebenfalls nur sehr leicht ansteigen. Die Anwesenheit von Wasser und Katalysatoren bewirkt eine wesentlich schnellere Alterung des Motorenöls. Die Säurezahl steigt schon nach wenigen Betriebsstunden um ein Vielfaches an. Während bei Eisenzugabe nach 400 Betriebsstunden der Wert von 9,1 mg/g erreicht wird, ergibt sich für einen Kupferkatalysator eine Säurezahl von 11,2 mg/g.

Aus den Ergebnissen kann geschlossen werden, dass für eine Erhöhung der Säurezahl (Oxidation des Öls) sowohl ein Katalysatormetall als auch Wasser vorhanden sein muss. Im Vergleich der katalytisch aktiven Metalle ist zu beobachten, dass Kupfer eine vielfach höhere Aktivität zeigt als Eisen. Nach 100-stündigem Betrieb lässt sich schon eine Säurezahl über 10 bestimmen, die bei Eisenzugabe nach der vierfachen Zeit noch nicht erreicht wird.

2.2 Restaschegehaltbestimmung

Der Aschegehalt ist der Teil anorganischen Materials im Öl, der nach Veraschen als Rückstand anfällt. Bei Schmierstoffen unterscheidet man zwischen Oxid- und Sulfatasche. Die Bestimmung des Aschegehalts erfolgt nach DIN 51575 [19] [20]. Der Aschegehalt ist die Masse des Rückstandes, bezogen auf die Einwaage. Unter Oxidasche versteht man den bei 750 bis 800 °C unter Luftzutritt unverbrennbarem Rückstand. Die Bestimmung des Gehaltes an Oxidasche dient bei frischen Ölen ohne Zusätze zur Beurteilung des Reinheitsgrades. Bei frischen Ölen mit Zusätzen werden die Bestandteile von metallorganischen Öladditiven

bestimmt, bei Gebrauchttölen aber auch der Anteil an Staub (Siliziumdioxid) und metallischem Abrieb. Bei der Oxidaschebildung werden Metalle (Me) und metallorganische Verbindungen (MeOR) in ihre Metalloxide (MeO bzw. Me₂O) überführt:

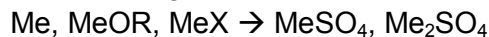
Oxidaschebildung:



Me: Metall
 MeOR: metallorganische Verbindung
 MeO, Me₂O: Metalloxide

Unter Sulfatasche versteht man den von 575 bis 600 °C unter Luftzutritt unverbrennbaren Rückstand. Mit Hilfe der Sulfatasche-Bestimmung werden nichtflüchtige anorganische Verunreinigungen ermittelt. Im Gegensatz zur Oxidaschebestimmung wird die Verflüchtigung von Alkalihalogeniden vermieden, indem sie durch Zusatz von Schwefelsäure in schwerflüchtige Alkalisulfate überführt werden. Bei der Sulfataschebildung werden Metalle (Me) und metallorganische Verbindungen (MeOR) in ihre Metallsulfate (MeSO₄ bzw. Me₂SO₄) überführt.

Sulfataschebildung:



Me: Metalle
 MeOR: metallorganische Verbindung
 MeSO₄, Me₂SO₄: Metallsulfate
 MeX: Metallhalogenide

Bestimmt man sowohl vom Frisch- als auch vom Gebrauchtöl den Sulfataschegehalt, kann der Anteil an betriebsbedingten Verunreinigungen ermittelt werden. Der Sulfataschegehalt zwischen Frisch- und Gebrauchtschmierstoffen verändert sich z. B. durch metallischen Abrieb und feste Verunreinigungen, wie u. a. Staub. Bei Motorenölen bestimmt man normalerweise die Sulfatasche, da Sulfate durch Kontakt mit schwefelhaltigem Kraftstoff entstehen. Der Aschegehalt lässt zudem Rückschlüsse auf eine mögliche Ablagerung von Öladditiven an heißen Motorteilen zu.

Tabelle 2 zeigt typische Gehalte an Sulfatasche in qualitativ hochwertigen, frischen Motorölen:

Einsatz	Kraftstoff	Motorentyp	Sulfatasche [%]
Motorrad	Otto	Zwei-Takt	0,1 – 0,2
PKW	Otto	Vier-Takt	1,0 – 1,3
PKW	Diesel	Vier-Takt	1,1 – 1,5
LKW	Diesel	Vier-Takt	1,5 – 2,0
Schiff (Kolbensmieröl)	Diesel	Vier-Takt	bis >10

Tabelle 2: Typische Gehalte von Sulfatasche in frischen Motorölen [21]

2.3 Spektroskopische Ölanalyse

Bei der spektroskopischen Ölanalyse werden in bestimmten Zeitabständen an ein und derselben Stelle des Ölkreislaufs Proben entnommen. Die Ölproben werden an ein Ölanalyselabor geschickt und auf verschiedene Parameter, wie Verschmutzung, Metallpartikel, Qualität der Additive, Wasseranteil, Viskosität und Dichte, überprüft. Hierbei handelt es sich um eine Offline-Messung, ebenso wie bei der Säurezahl- und Sulfataschebestimmung. Die Schäden am Getriebe, Alterung sowie Qualität des Öls werden erst mit einer gewissen Zeitverzögerung erkannt. Somit können vorhandene Schäden zunächst wachsen und auch weitere Folgeschäden verursachen, ohne dass eine frühzeitige Behebung möglich ist.

Als spektroskopische Methoden zur Untersuchung der Ölqualität kann die Infrarotspektroskopie (Fourier Transformations-Infrarotspektroskopie, FT-IR), die Atomabsorptionsspektrometrie (AAS), die Röntgenfluoreszenzspektrometrie (RFA) oder die Atom-Emissions-Spektroskopie (induktiv gekoppelte Plasma-AES, ICP-AES) eingesetzt werden. Mit Hilfe der Infrarotspektroskopie (FT-IR) nach DIN 51 451 [22] können, überwiegend qualitativ, eine Vielzahl der in Motorölen enthaltenen Verbindungen nachgewiesen werden. Dabei handelt es sich sowohl um Grundölbestandteile und Additive als auch um Alterungsprodukte. Häufig werden auf Grund der qualitativen Ergebnisse der Infrarotanalyse spezifischere Untersuchungsmethoden nachgeschaltet. Hierzu werden die Atomabsorptionsspektrometrie (AAS) nach DIN 51 396-3 [23], DIN 51 397-1 [24] und DIN 51 397-2 [25], die Röntgenfluoreszenzspektrometrie (RFA) nach DIN 51 396-2 [26] oder die oben genannte induktiv gekoppelte Plasma-Atom-Emissions-Spektroskopie (ICP-AES) nach DIN 51 396-1 [27] angewendet.

Die IR-Spektroskopie (FT-IR) basiert auf dem Einsatz von Infrarotlicht. Eine kleine Ölmenge wird gleichmäßig auf einen Kristall verteilt oder in eine dünne Küvette eingefüllt. Bei der Bestrahlung eines Stoffes mit elektromagnetischen Wellen aus dem Infrarotbereich werden bestimmte Frequenzbereiche absorbiert. Infrarotstrahlung liegt energetisch im Bereich der Schwingungsniveaus von Molekülbindungen, d. h. die Absorption führt zu einer Schwingungsanregung der Bindungen. Der einfachste Fall ist ein zweiatomiges Molekül. Bei mehratomigen Molekülen kommt es zur Überlagerung von Grundschwingungen. Dementsprechend sieht man eine Reihe von Absorptionsbanden, die interpretiert werden müssen.

Das Infrarotspektrum einer Probe liefert neben einem typischen Fingerabdruck eines Frisch- oder Referenzöls auch Informationen über Veränderungen des Öls und der enthaltenen Additive. Liegen dem Analysenlabor ausreichende Daten unterschiedlicher Öle vor, so wird in der Regel kein Referenzöl benötigt, da eine eindeutige Zuordnung anhand des Spektrums möglich ist. Durch den Vergleich informiert die Infrarotspektroskopie über Öloxidation, Nitration, Sulfation und enthaltenes Wasser. Welche Banden des IR-Spektrums für die Ölprobe zur Beurteilung der Alterung herangezogen werden hängt vom Typ und Einsatz des Schmierstoffes ab [28]. Bild 2.3 zeigt ein FT-IR-Gerät zur Untersuchung der Ölqualität und Bild 2.4 ein damit gemessenes IR-Spektrum.



Bild 2.3: FT-IR-Gerät zur Untersuchung der Ölqualität [29]

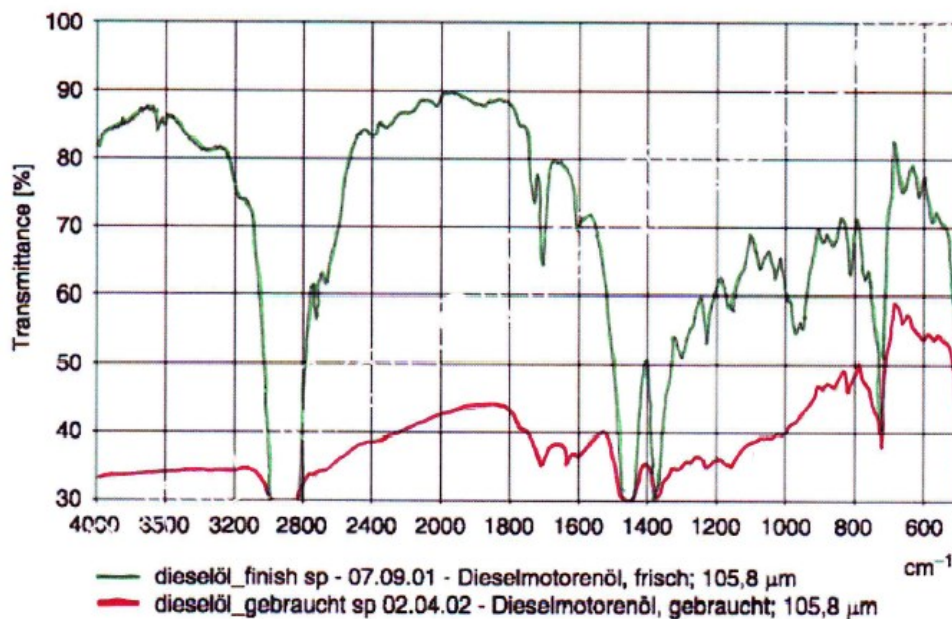


Bild 2.4: IR-Spektrum von frischem und gebrauchtem Dieselmotorenöl [30]

Die Atom-Emissions-Spektroskopie (ICP-AES) ist in der Gebrauchtölanalytik das am häufigsten eingesetzte spektroskopische Messverfahren. An einem Arbeitstag können mit dieser Analysenmethode hunderte von Proben geprüft werden. Die AES kann nach dem RDE-(Rotating Disc Electrode) oder nach dem ICP- (Inductive Coupled Plasma) Verfahren durchgeführt werden. In beiden Fällen ist das Messprinzip gleich, nur die Anregung der Atome und der Probeneintrag sind unterschiedlich realisiert. Diese Methode beruht darauf, dass thermisch hoch angeregte Elemente in der Gasphase ein Lichtspektrum aussenden. Jedes Element besitzt typische Wellenlängen, die zur Analyse einer Probe herangezogen werden: z. B. Natrium 589 nm, Eisen 310 nm, Phosphor 213 nm. Eine flüssige Probe wird durch eine Pumpe (ca. 1 ml/min) in einen Zerstäuber gepumpt, dort mit Argon ein Aerosol gebildet und in einem Plasmabrenner auf ca. 6000 bis 8000°C erhitzt. Die Probe verdampft, die gelösten Salze dissoziieren, spalten sich in ihre Ionen auf und werden zur Ausstrahlung eines Spektrums angeregt. Über einen Monochromator (optische Gitter, früher Prismen) können einzelne Wellenlängen in einem Detektor in elektrische Signale umgewandelt werden. Bei Verwendung geeigneter Detektoren kann die Messung simultan für eine Reihe von verschiedenen Elementen durchgeführt werden. Über die Strahlungsintensität kann mit Hilfe von Kalibrierfunktionen die Konzentration bestimmt werden.

Mit Hilfe der ICP-Analytik können gleichzeitig eine Reihe von Elementen quantifiziert werden, die Aussagen über die Ölqualität und den Zustand des Getriebes zulassen [31]. Tabelle 3 zeigt typische Grenzwerte für spezifische Sorten von Metallabrieb.

Metall	Zeichen	Grenzwerte in mg/kg		
		mobile Industriegetriebe	stationäre Industriegetriebe	Schneckengetriebe
Eisen	Fe	15 – 850	50 – 1500	10 – 220
Chrom	Cr	2 – 40	4 – 40	2 – 35
Aluminium	Al	5 – 250	8 – 300	5 – 600
Kupfer	Cu	10 – 180	5 – 360	6 – 600
Blei	Pb	3 – 80	6 – 145	15 – 90
Zinn	Sn	2 – 40	2 – 60	15 – 90
Nickel	Ni	2 – 25	2 – 35	2 – 15
Molybdän	Mo	3 – 500	10 – 500	5 – 25
Zink	Zn	15 – 400	18 – 450	40 – 600

Tabelle 3: Übersicht typischer Grenzwerte für spezifischen Metallabrieb [31]

Bislang wurden Labormessverfahren beschrieben. Die nachfolgend diskutierten Messmethoden und Sensorkonzepte sind auch für industrielle Online-Anwendungen geeignet.

2.4 Optische Partikelanalyse

Bei der optischen Partikelanalyse (OPA) können sowohl Anzahl und Größe als auch Form und Art von Partikeln ermittelt werden. Die registrierten Partikel werden computergestützt bestimmten Verschleißmechanismen (z. B. adhäsiver Verschleiß, Ermüdungsschälungen, abrasive Fremdpartikel) oder auch Verunreinigungen (Tribopolymere, Wasser) zugeordnet. Dadurch kann eine Aussage über den Verschleißgrad erfolgen. Die optische Partikelanalyse wird zur Früherkennung von Getriebeschäden bei Routineanalysen eingesetzt [32] [33].

Die Ölprobe wird homogenisiert und mit kontinuierlicher Geschwindigkeit durch eine mit sehr hellem Laserlicht ausgeleuchtete Messzelle gepumpt. Die Umrisse der erfassten Partikel werden durch das Laserlicht sichtbar und nach Vergrößerung mit Hilfe einer Linse mittels einer Hochgeschwindigkeitskamera aufgenommen und elektronisch ausgewertet. Die Form und Größe der Partikel wird analysiert und bestimmten Kategorien wie Ermüdungsver-schleiß, spanendem Verschleiß, nichtmetallischen Verunreinigungen (Tribopolymeren), Wassertröpfchen, usw., zugeordnet [34]. Es können sowohl Partikelanzahl als auch -größe angegeben werden. Bild 2.5 zeigt das Schema der Bildgenerierung und Auswertung bei der optischen Partikelmessung. Unterschiedliche Partikelformen lassen auf unterschiedliche Verschleißmechanismen schließen.

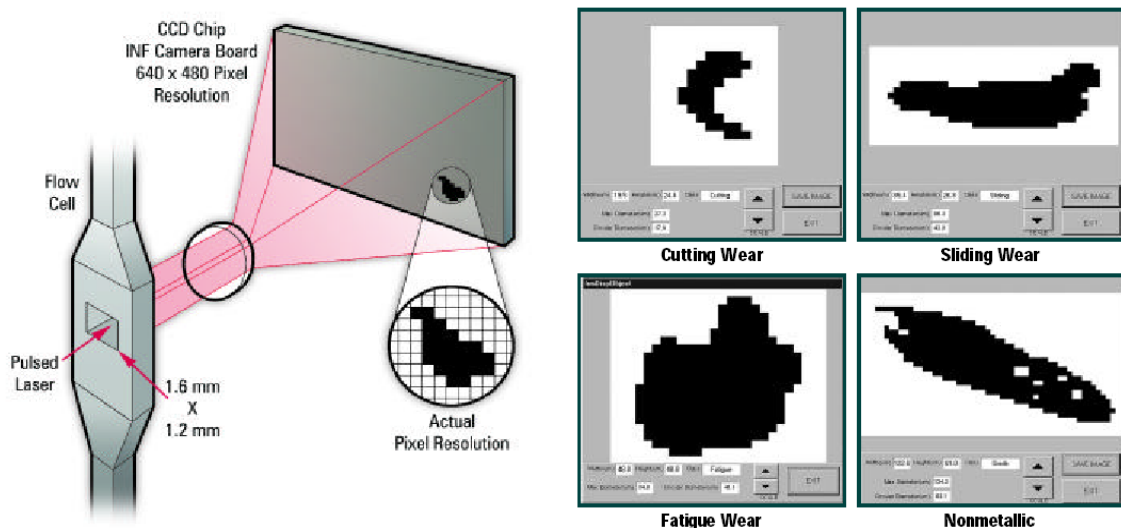


Bild 2.5: Schema der Bildgenerierung und Auswertung bei der OPA [35]

2.5 Induktive Partikelzähler

Dieses in Kanada entwickelte Verfahren benutzt die induktive Messmethode zur Bestimmung von Partikeln in Öl [36]. Der Partikelzähler MetalSCAN [36] basiert auf der Änderung von Magnetfeldern durch Metallpartikel. Dabei erzeugt eine Helmholtzanordnung zweier Spulen ein Magnetfeld in Strömungsrichtung. Zwischen diesen Spulen fließt der Ölstrom. Ferromagnetische Partikel verursachen eine Veränderung des Magnetfeldes, die über das Induktionsgesetz mittels einer dritten Spule registriert wird. Die zwei angebotenen Sensoren unterscheiden sich in der Größe der erkannten Eisenpartikel (min. 125 µm; 200 µm; 260 µm) und des Volumenstroms (0,5-50 l/min; 4-400 l/min; 10-1000 l/min). Es wird sowohl die Anzahl der absolut gezählten Partikel als auch die Steigerung der Anzahl der ferromagnetischen Metallpartikel in einem bestimmten Zeitraum ausgewertet.

Die Anzahl der gescannten Metallpartikel korreliert mit der Schädigung von Bauteilen. Bei einem unbeschädigten Getriebe wurden z. B. zwischen 2 und 4 Metallpartikel pro Tag gezählt. Für ein kurz vor dem Ausfall laufendes Lager wurden hingegen ca. 1500 Metallpartikel pro Tag gezählt. Der Einbau des Sensors erfolgt in öllumlaufgeschmierten Getrieben in der Rücklaufleitung vor dem Filter, wobei jedes Partikel bei einem 100% funktionierenden Filter genau einmal gezählt würde, bevor es ausgefiltert wird. Die maximale Partikel-Erkennungsgeschwindigkeit liegt beim MetalSCAN bei 65 Partikeln/s. Die Öltemperatur darf zwischen -40 und +85 °C betragen.

2.6 Online-ATR-Spektroskopie

Die ATR-Spektroskopie beruht auf dem Prinzip der Abgeschwächten Total-Reflexion (ATR). Dabei wird als ATR-Zelle eine optische Faser oder ein Kristall verwendet. Der prinzipielle Aufbau ist in Bild 2.6 dargestellt. Die Strahlung einer Infrarotquelle wird in die ATR-Zelle eingekoppelt und mittels Totalreflexion geführt. Ein kleiner Lichtanteil tritt dabei an den Grenzflächen der ATR-Zelle, auch Evaneszenzfeld genannt, heraus. Die Abschwächung ist

vom Brechungsindex des sich auf der Oberfläche befindlichen Mediums oder der Änderung in der Oberflächenbelegung abhängig. Ändert sich der Brechungsindex des auf der Oberfläche befindlichen Mediums, so wird die Totalreflexion unterschiedlich stark abgeschwächt.

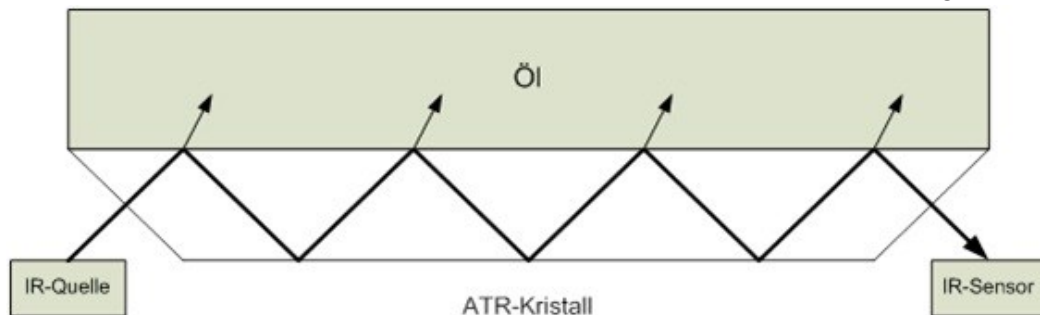


Bild 2.6: Sensorkonzept der ATR Spektroskopie

Das Öl umfließt die ATR-Zelle in diesem Bereich. Durch die stoffspezifische Absorption des Evaneszenzfeldes entsteht eine von der Verschmutzung abhängige, frequenzabhängige abgeschwächte Totalreflexion. Die Absorptionsänderung wird detektiert. Bestimmten Frequenzen bzw. Wellenlängen können entsprechende Stoffzusammensetzungen zugeordnet und somit Verunreinigungen im Öl detektiert werden. Für jede mögliche Verunreinigung und Stoffzusammensetzung müssen im Vorfeld Absorptionstests durchgeführt und die Auswertesoftware kalibriert werden. Tabelle 4 enthält eine Übersicht über detektierbare Verunreinigungen.

Verunreinigung	Absorption bei Wellenlänge in cm^{-1}
Wasser	1659, zwischen 3000 und 3700
Ethylenglykol	880, 1037, 1077
Verdünnung des Öls durch Additiv ZDDP, sichtbar als Absorptionsverringerung	976
Diesel, Benzin	mehrere Banden zwischen 650 und 850
gebrauchtes Öl - frisches Öl → Sulfation Zunahme Oxidations- und Nitrationsprodukte durch Alterung und Verbrauch der Additive	Verschiebung der Basislinie → stärkere Absorption zwischen 1120 und 1180, (1150) zwischen 1600 und 1800
Ruß	2000-2250, 2400-2500, >4000

Tabelle 4: Übersicht von ATR-detektierbaren Verunreinigungen [37]

Um Messfehler zu vermeiden, muss eine automatische Reinigung gewährleistet sein. Sonst würden Verschmutzungspartikel, die sich an der ATR-Zelle festgesetzt haben, mitgemessen und darüber fließende Verschmutzungspartikel nicht detektiert.

2.7 Kapazitive Vermessung von Zeolithen

Eine weitere Methode zur Bestimmung des Wassergehaltes in Öl wurde 2004 vom Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM [38] in Freiburg entwickelt und vorgestellt. Grundlage dieser Messmethode ist die Änderung der dielektrischen Eigenschaften von Zeolithen durch Einlagerung von Wasser in das Kristallgitter. Bringt man diese Zeolithe

zwischen die Platten eines Plattenkondensators, so kann man eine Änderung der Kapazität des Kondensators in Abhängigkeit vom Wassergehalt feststellen.

Die Bezeichnung Zeolithe [39] wurde im Jahre 1756 von dem schwedischen Mineralogen Axel Fredrick Cronstedt (*1722, †1765) geprägt. Er hatte beobachtet, dass bestimmte Mineralien beim Erhitzen sehr viel Wasser abgaben und scheinbar siedeten. Minerale dieser Gruppe können je nach Typ bis etwa 40 Prozent ihres Trockengewichtes an Wasser speichern. Die Wasseraufnahme und -abgabe ist reversibel und selbst bei höheren Temperaturen bleibt das Kristallgerüst erhalten. Der Name Zeolith wurde inzwischen zu einer Sammelbezeichnung für kristalline Metall-Alumo-Silikate. Er leitet sich aus dem Griechischen *zeein* für „sieden“ und *lithos* für „Stein“ her, bedeutet daher „siedender Stein“.

Seit Anfang der 1950er Jahre werden mehr als 100 Zeolithtypen (beispielsweise Zeolith Typ-A) von der chemischen Industrie für eine Vielzahl von Anwendungen synthetisiert, etwa als Katalysatoren in Crackprozessen, Füllstoffe, Luftentfeuchter für Doppelglasfenster, Wasserenthärter in Waschmitteln (Ionenaustauscher), usw..

Die Änderung der dielektrischen Eigenschaften von Zeolithen durch Wasseraufnahme kann über die Messung der Permittivität ϵ bestimmt werden. Vom Fraunhofer IPM wurde ein Sensor zur Bestimmung von Wasser in Öl auf Basis eines Plattenkondensators vorgestellt, zwischen dessen Kondensatorplatten ein Zeolithgranulat eingebracht wurde. Bei diesem Sensor werden zwei vergoldete Aluminiumelektroden über einen Distanzring auf Abstand gehalten. Das Öl durchströmt die Elektroden durch Öffnungen von innen nach außen. Das die Elektroden umfassende Material ist in Teflon ausgeführt, um die parasitäre Kapazität zum druckdichten Metallgehäuse zu minimieren. Die Teflonbestandteile werden durch Kunststoffschrauben fixiert und durch den umgebenden Metalldruckbehälter stabilisiert.

Mit diesem Sensorkonzept wurden Mischungen aus gebrauchtem und frischem Öl mit unterschiedlichen Wasseranteilen vermessen. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass die Messsignale weitgehend unabhängig von einer Ölalterung sind.

2.8 Tuning-Fork-Quarzresonator

Die Firma Hella AG hat einen Kombinationssensor für den Ölstand und die Ölqualität in Fahrzeugen vorgestellt. Der entwickelte Sensor basiert auf einem mechanischen Biegeschwinger, einer sogenannten „Tuning Fork“ [40].

Ein einkristalliner Quarz ist das piezoelektrische Grundmaterial der „Tuning Fork“. Mit Hilfe von aufgebrachten Elektroden auf der Oberfläche wird mittels elektrischer Wechselspannung eine periodische elastische Verformung (Vibration) des Grundkörpers hervorgerufen. Diese erzeugt dann einen Wechselstrom. Die elektrische Impedanz, d. i. das Verhältnis zwischen anregender Wechselspannung und resultierendem Wechselstrom, ist eine Funktion der Anregungsfrequenz, der hydrodynamischen Eigenschaften der Sensoroberfläche, der elastischen Eigenschaften des Materials sowie der physikalischen Eigenschaften des Umgebungsmediums. Bild 2.7 zeigt das elektrische Ersatzschaltbild eines Tuning-Fork-Sensors [41] [42].

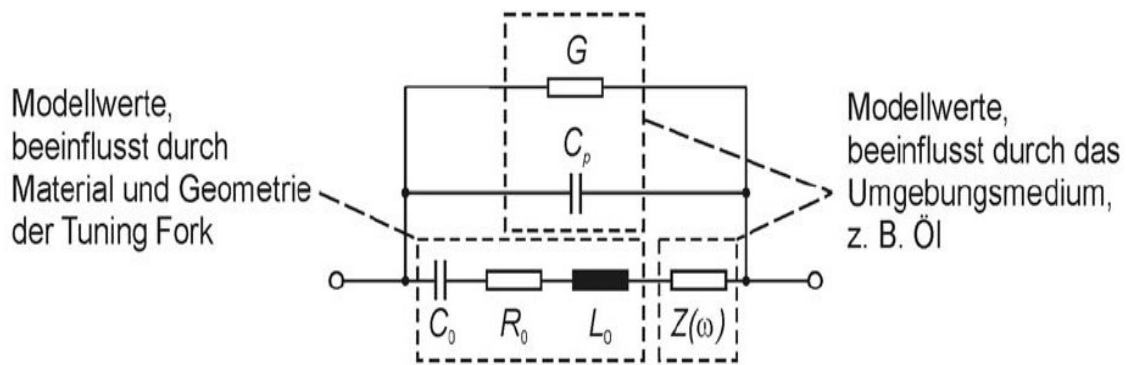


Bild 2.7: Elektrisches Ersatzschaltbild des Tuning-Fork-Sensors [40]

Nach Angaben von Hella wird aus der ermittelten Impedanz der erzeugte Strom an den Sensorelektroden der „Tuning Fork“ gemessen, bzw. nach Anregung der „Tuning Fork“ mit einer sinusförmigen Wechselspannung über einen speziell entwickelten ASIC. Dieses Signal wird vorverarbeitet, die Admittanz berechnet und diese, zusammen mit der Öltemperatur und Anregungsfrequenz, als digitales Signal an der Datenschnittstelle zur Verfügung gestellt. Ein externer Mikrocontroller berechnet aus der gemessenen Admittanzkurve die dynamische Viskosität, die Dielektrizitätszahl, die Dichte und den elektrischen Leitwert mittels des elektromechanischen Modells. Die berechneten Werte werden mit der Öltemperatur dem Ölzustandsalgorithmus zur Ölqualitätsbewertung übergeben. Das Basissensorelement ist mit einem ASIC und weiteren passiven Elementen in einem Multichipmodul vereint. Dabei darf die „Tuning Fork“ nur einseitig eingespannt werden und es muss ein direkter Kontakt zum Öl gewährleistet sein. Der realisierte Aufbau ist in Bild 2.8 dargestellt. Da die Viskosität des Öls stark nichtlinear temperaturabhängig ist, wird zusätzlich eine Temperaturmessung mittels eines auf dem ASIC integrierten siliziumbasierten Temperatursensors durchgeführt.

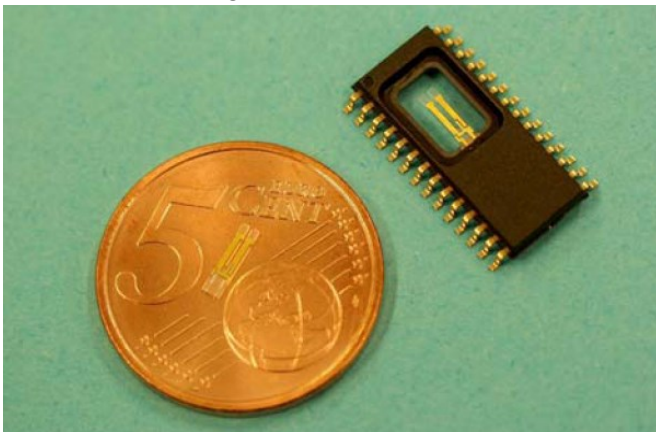


Bild 2.8: Foto des Multichipmoduls [40]

Mit einem Laboraufbau [43] wird der Einfluss verschiedener Fremdstoffe im Öl auf die gemessenen Öleigenschaften untersucht. Beim Eindringen von Wasser oder Kraftstoff ist ein Viskositätsabfall und somit eine Verschlechterung des Schmierverhaltens des Öls zu erwarten. Weiterhin werden eine Minderung der Schmierfähigkeit durch die Ölalterung, ein Viskositätsanstieg durch thermische Degradation und eine Zunahme von Abriebpartikeln durch Verschleiß hervorgerufen. In Bild 2.9 ist der Einfluss von Wasser in Öl auf die dynamische Viskosität und spezifische Dichte sowie Dielektrizitätszahl dargestellt.

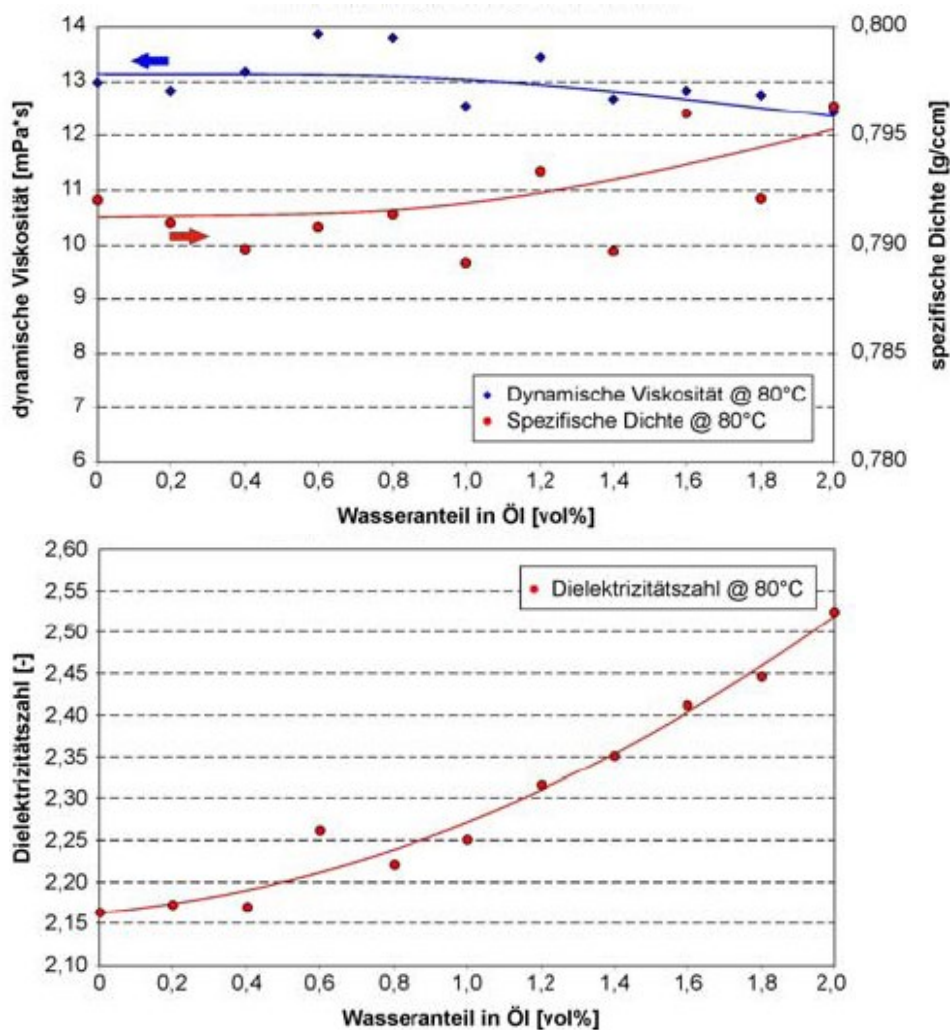


Bild 2.9: Einfluss von Wasser auf Viskosität, Dichte und Dielektrizitätszahl [40]

Dabei ist zu beachten, dass es sich hierbei um Laboruntersuchungen handelt, die nur begrenzt die reale Anwendung widerspiegeln, da im Fahrzeug störende Einwirkungen, wie Vibrationen, Querschleunigungen oder Ölverschäumungen, auftreten können, die die Untersuchung der Basiseffekte behindern. Der HELLA Oil-Condition-Algorithm (OCA) liefert einen Ölzustand, der aus den gemessenen Ölparametern berechnet wird. Ziel ist es, eine Klassifikationsroutine zu entwickeln, die jedem Satz von Eingangsparametern einen vorher definierten Ölzustand zuordnet. Damit sollen dann Ölqualitätskennwerte, wie Gehalt an Ruß, Wasser oder Kraftstoff, angegeben werden können. In Bild 2.10 ist eine qualitative Darstellung des Einflusses der Alterung, Oxidation und Verschmutzung durch Wasser, Kraftstoff und Ruß skizziert.

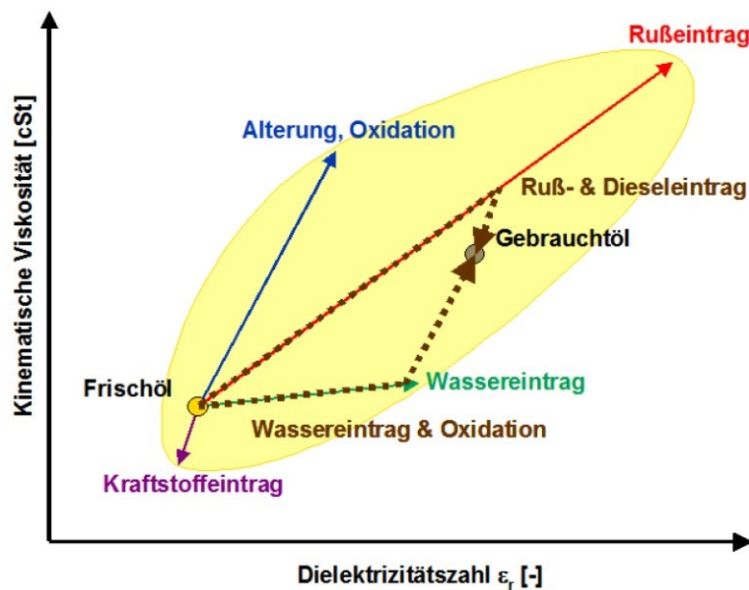


Bild 2.10: Einflusstendenz der angegebenen Faktoren auf Viskosität und Dielektrizitätszahl [40]

2.9 Messung mechanischer Schwingungen

Ein verbreitetes Verfahren zur Erkennung von Schäden in Getrieben ist die Messung mechanischer Schwingungen. Dabei werden an bestimmten Punkten des Getriebes Beschleunigungs- und Körperschallsensoren angebracht. Bild 2.11 zeigt einen typischen Beschleunigungssensor für die Schwingungsanalyse von Getrieben.

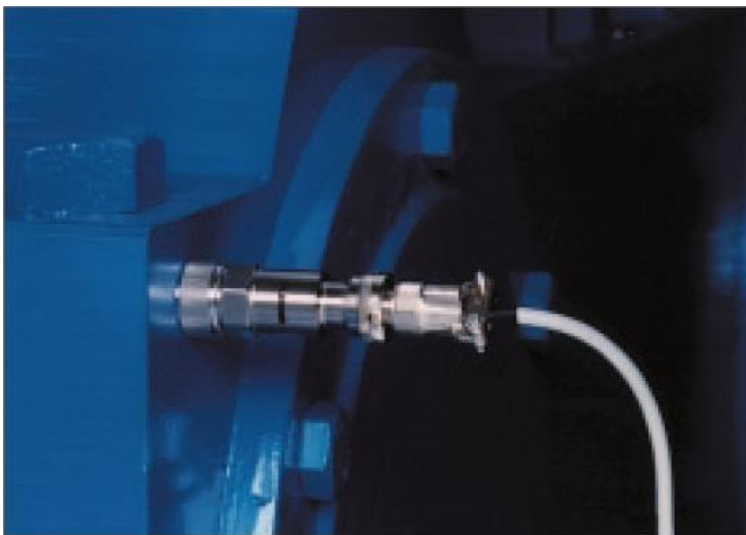


Bild 2.11: Beschleunigungssensor für die Schwingungsanalyse [44]

Diese Sensoren erfassen frequenzbezogene Körperschall- und Schwingungsspektren des Getriebes. Dabei werden bevorzugt Schwingungen im Frequenzbereich von 0,2 bis 15 kHz gemessen. Durch interaktive, komplexe Auswertungsverfahren wird der Ist- mit dem Sollzustand des Getriebes verglichen und es können, mit entsprechenden Erfahrungen, Schäden erkannt werden. Während der Inbetriebnahme der Getriebe sind Kalibrierläufe der Schwingungssensoren und der Analyseeinheit notwendig.

Bei Windturbinenanwendungen kennt die Auswerteeinheit charakteristische Spektren bei typischen Wind- und Lastzuständen, bei denen das Element parametrisiert wird. Die gemessenen Frequenzspektren werden mit schon archivierten Frequenzspektren verglichen und qualitativ bewertet. Mit vielen Erfahrungen kann eine relativ genaue Lokalisierung des defekten Bauteils durchgeführt werden [45]. Die Auswertung der Daten geschieht nach Übermittlung der Messdaten an ein Servicezentrum. Dort werden sie dann von Service- und Schwingungsexperten ausgewertet [46]. Die Qualität des Öls wird hierbei nicht berücksichtigt. Ebenfalls werden Verschmutzungen und Wasser im Getriebe nicht erkannt.

2.10 Walzölsensor ConduSens®

Dieser Sensor wurde im Rahmen eines Kooperationsprojektes zwischen der Firma Achenbach Buschhütten GmbH, Kreuztal, und Herrn Professor Dr. Ulrich Kuipers von der Fachhochschule Südwestfalen zur Messung der Verschmutzung von Walzölen und zur Überwachung elektrostatischer Aufladungsvorgänge während des Auswalzens von Aluminiumfolien entwickelt. Er wird insbesondere zur Überwachung und Optimierung der Walzölfilter eingesetzt. Das Ölsensorsystem ConduSens® (siehe Bild 2.12) ermöglicht eine kontinuierliche Online-Messung der Feinstverschmutzung von Ölen [48].

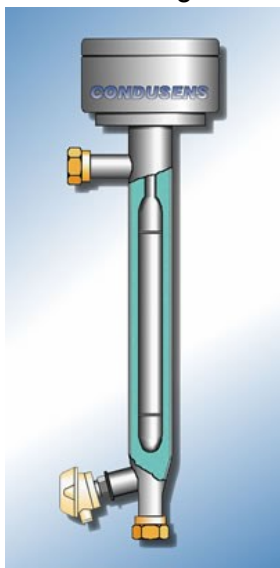


Bild 2.12: ConduSens [48]

Das Basissensorkonzept basiert auf einer Online-Messung der Leitfähigkeit der Walzöle. Die gemessenen Leitfähigkeiten erhöhen sich mit steigender Ölverschmutzung. Mit dem Ölsensorsystem können der Walzprozess und die Einsatzdauer des Walzöles verbessert werden. Der Filtervorgang des Öls und die Dosierung von Filterhilfsmitteln werden optimiert. Neben einer Reduktion der Menge des als Sondermüll zu entsorgenden Filtermaterials werden über die verbesserte Prozesssteuerung durch dieses Sensorsystem die Rektifikationsintervalle der Öle vergrößert. Versuche mit reaktiven Filterhilfsmitteln ergaben gute Filtrierergergebnisse, wodurch die elektrische Leitfähigkeit entsprechend reduziert wird. Bei den erreichten, sehr geringen Leitfähigkeiten des Walzöles besteht wegen möglicher hoher elektrostatischer Aufladungen die Gefahr von unkontrollierten Verpuffungen. Mit Hilfe des ConduSens® Ölsensorsystems kann über die Regelung des Filtervorganges oder über eine Leitfähigkeitsaddi-

tivierung die elektrostatische Aufladung vermieden werden. Hierdurch wird ein sicherer Betrieb mit erheblich geringerem Energieaufwand zur Filterung ermöglicht.

Der Basissensor des ConduSens® ist eine koaxiale Elektrodenanordnung, mit dem zu messenden Öl als Dielektrikum. Das elektrische Ersatzschaltbild kann als Parallelschaltung des Widerstandes des Öles im Basissensor R_x und dessen Kapazität C_x modelliert werden.

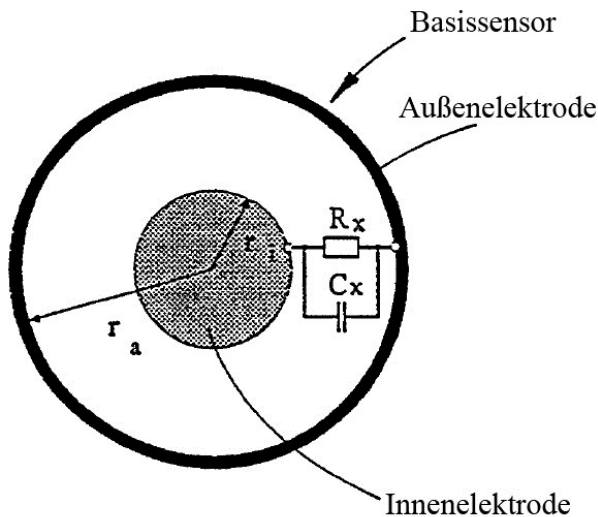


Bild 2.13: Sensorelektronik des ConduSens [47]

Das in der Patentschrift [47] beschriebene Verfahren zur Messung der elektrischen Leitfähigkeit und der Dielektrizitätszahl über getaktete Gleichspannungen oder getaktete Gleichströme als Messsignale hat sich in der Anwendung als außerordentlich vorteilhaft erwiesen.

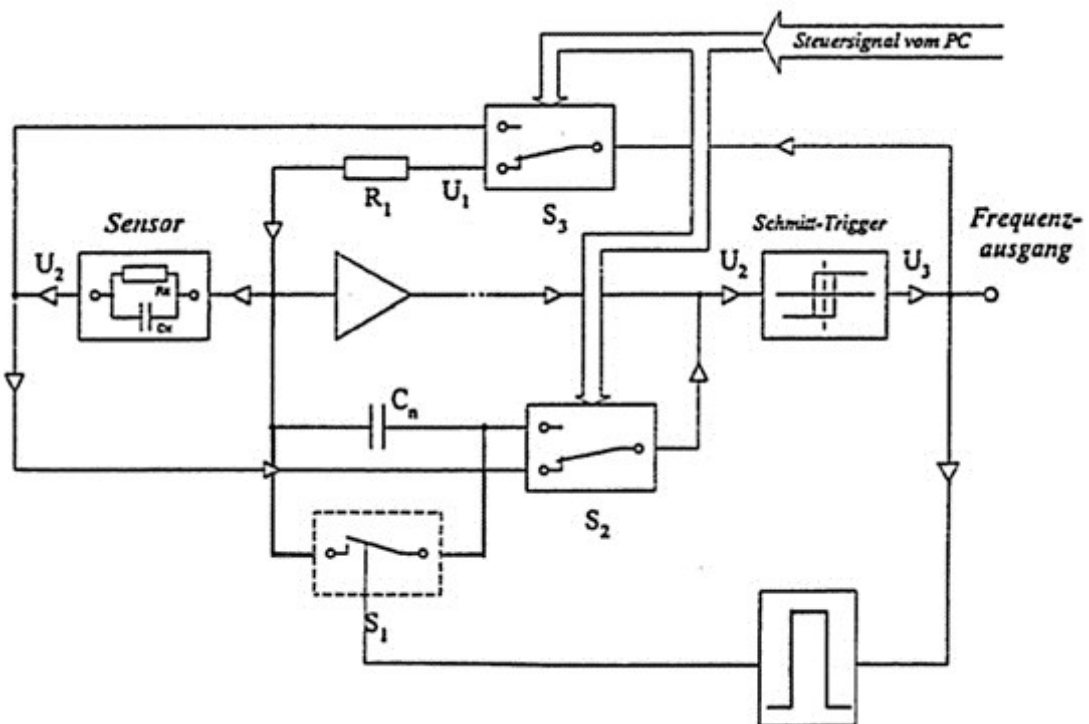


Bild 2.14: Gesamtsystem der Sensorelektronik des ConduSens [47]

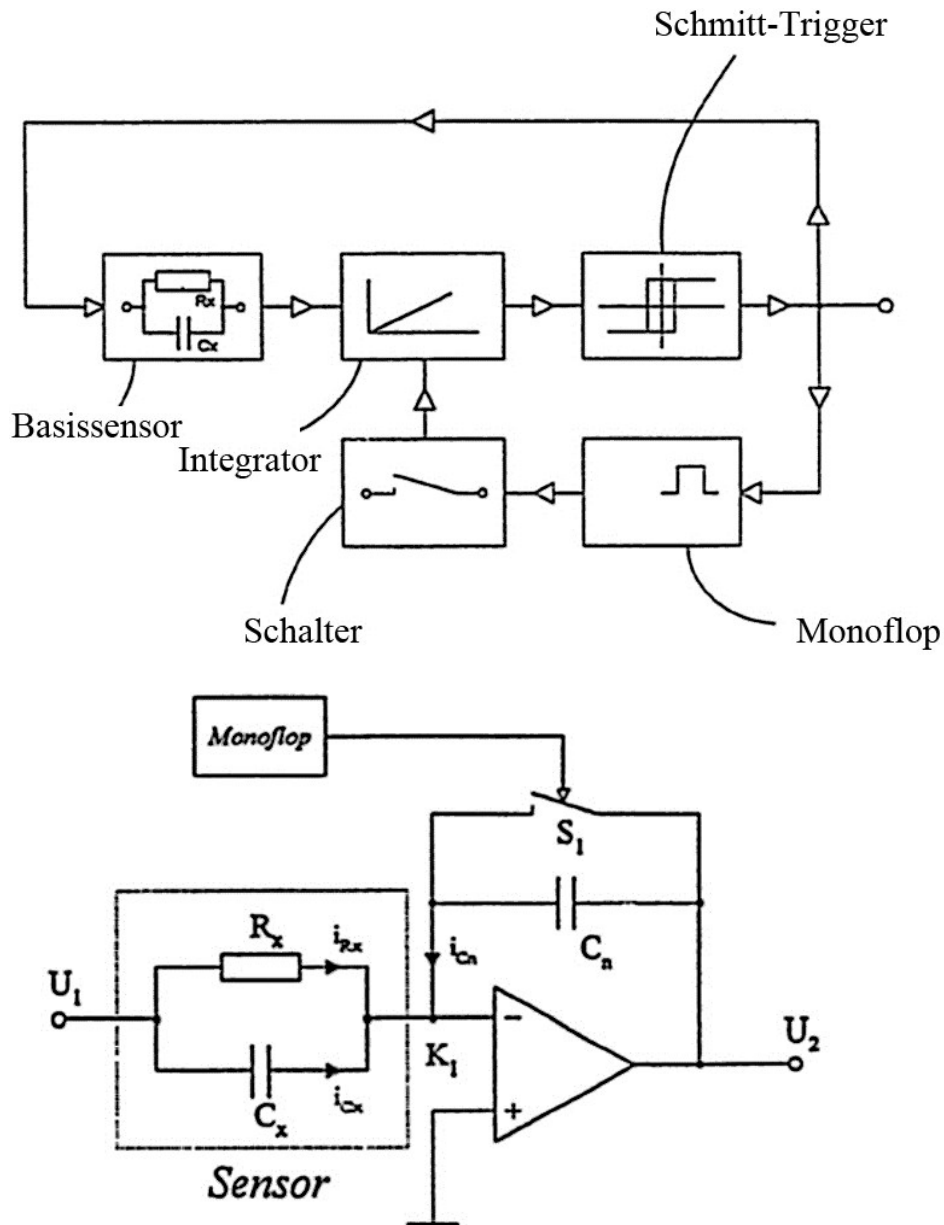


Bild 2.15: Sensorelektronik des ConduSens zur Messung der Leitfähigkeit [47]

Das Schaltungskonzept der Sensorelektronik des ConduSens besteht aus einer astabilen Kippstufe mit einem Umkehrintegrator und einem nichtinvertierenden Schmitt-Trigger. Durch einen Monoflop wird der Integrator während der Polaritätswechsel des Testsignals deaktiviert und auf Null gesetzt. Das auf den Basissensor geschaltete Testsignal ist eine getaktete Gleichspannung. Sie ist gleichzeitig das Messsignal (Ausgangssignal) der analogen Sensorelektronik. Die Frequenz f des Messsignals ist proportional zur elektrischen Leitfähigkeit κ und ansonsten nur von den eingesetzten elektronischen Bauelementen und den geometrischen Abmessungen des Sensors abhängig.

Über eine Schaltungsänderung kann zudem die Dielektrizitätszahl des Öles gemessen werden. Hierzu werden der Basissensor in die Rückkopplung des Integrators und ein ohmscher Widerstand in den Eingangszweig des Integrators geschaltet.

Ein Nachteil des elektronischen Verfahrens zur Leitfähigkeitsmessung ist jedoch, dass die Integration bei jeder Änderung des Testsignals (Flanken) auf Null gesetzt wird. Auch beim

Öffnen des Analogschalters entsteht eine Ladungsinjektion (Charge Injection), die das Messergebnis verfälscht. Zudem ist die Sensorelektronik relativ komplex und sie beinhaltet weitere Fehlerquellen. Die mechanische Realisierung des Basissensors ist ebenfalls sehr aufwendig. Ein weiterer Nachteil ist, dass mit dem beschriebenen Sensorkonzept die zu messenden Ölparameter und damit letztlich auch die Ölqualität nicht im eigentlichen Schmier-spalt gemessen werden können.

2.11 Ölleitfähigkeitsmessgerät

Das MLA 900 ist ein Leitfähigkeitsmessgerät, das von der Firma Sick Maihak, Reute, entwickelt wurde und aktuell von der Firma MBA Instruments, einer Tochterfirma der SMB Group (beide Quickborn), vermarktet wird. Der Sensor basiert auf einer Leitfähigkeitsmessung mittels zweier großen konzentrischen Tauchelektroden, zwischen denen der Widerstand gemessen und der Kehrwert, die Leitfähigkeit, angezeigt wird [49]. Es können Leitfähigkeiten im Messbereich von 0 bis 1999 pS/m bestimmt werden. Mögliche Störeffekte, die über eine Grenzflächenpolarisation und einer Entionisierung zwischen den Messelektroden entstehen, sollen durch die sehr geringe Messspannung minimiert werden.

Die Temperatur im Messmedium wird mit einem Temperaturfühler im Bereich von -20 bis +60 °C gemessen. Durch die thermische Entkopplung des Temperaturfühlers von der Messsonde sind schnelle Temperaturänderungen am digitalen Display erkennbar.

Die Energieversorgung des für den mobilen Einsatz ausgelegten Leitfähigkeitsmessgerätes erfolgt über eine 9 Volt Zink-Kohle-Batterie. Das Messgerät ist für den Betrieb in explosionsgefährdeten Bereichen nach ATEX II 1/2 G EEx ia IIB T6 zugelassen und wird vorrangig zur Bestimmung der Leitfähigkeit von Flugbenzin, leichten Erdölprodukten und anderen industriellen Flüssigkeiten eingesetzt.

Über die Aktivierung eines Reed-Kontaktes mit einem seitlich am Gerät befindlichen Magneten durch die Berührung der Sonde kann eine Überprüfung der Anzeigegenauigkeit des Gerätes durchgeführt werden. Dies erfolgt durch Umschalten des Sondeneinganges auf einen präzisen Messwiderstand, womit eine Leitfähigkeit von 1000 pS/m simuliert wird. Bei größeren Abweichungen empfiehlt der Hersteller die Einsendung des Gerätes zur Kalibrierung. Bild 2.16 veranschaulicht das Prinzip des Kalibrationstestes.

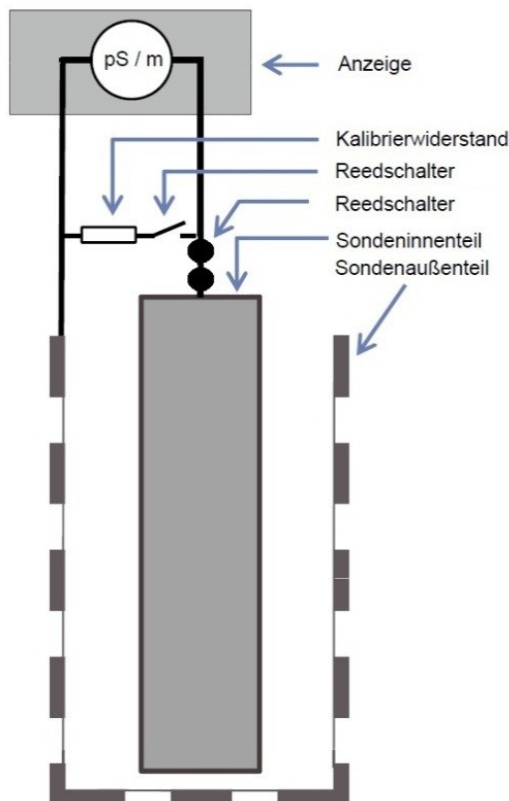


Bild 2.16: Prinzip des Kalibrationstestes am MLA 900 [49]

Das folgende Bild 2.17 zeigt ein Foto des Leitfähigkeitsmessgerät MLA 900.



Bild 2.17: Leitfähigkeitsmessgerät MLA 900 [49]

Ein großer Nachteil dieses Verfahrens ist jedoch, dass zur Vergleichbarkeit der Messungen idealerweise immer die gleiche Betriebstemperatur der Messflüssigkeit vorliegen sollte. Bei unterschiedlichen Temperaturen stellen sich in der gleichen Messflüssigkeit verschiedene Werte ein, was ein Vergleichen und damit klare Rückschlüsse über die Entstehung der Änderung sehr erschwert. Polarisationseffekte werden durch die kleine Messspannung zwar reduziert, aber nicht kompensiert.

2.12 Zusammenfassende Bewertung des Standes der Technik

Im Rahmen der durchgeführten Recherche wurden insbesondere die Verfahren Neutralisationszahlbestimmung, Restaschegehaltbestimmung, spektroskopische Ölanalyse, optische Partikelanalyse, induktive Partikelzähler, Online-ATR-Spektroskopie, kapazitive Vermessung von Zeolithen, Tuning-Fork-Quarzresonator und die Messung mechanischer Schwingungen zur Zustandsüberwachung von Getrieben näher betrachtet. Tabelle 5 zeigt einen qualitativen Vergleich der einzelnen Methoden. Die Bewertungsskala lautet „+“, „0“ und „–“, in der Reihenfolge des Erfüllungsgrades des jeweils zu bewertenden Kriteriums. Wie im Weiteren noch erläutert wird, liefert keines der diskutierten Verfahren im vorgegebenen Anwendungsbereich die wesentlichen Vorteile des im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelten und realisierten elektrischen Ölsensorsystems.

Verfahren	Online-Messung	Labor-messung	geringe Quer-empfindlichkeit	hohe re-produzierbare Empfindlichkeit	geringer apparativer und manueller Aufwand
Neutralisationszahlbestimmung	–	+	+	0	0
Restaschegehaltbestimmung	–	+	0	–	–
Spektroskopische Ölanalyse	–	+	+	+	–
optische Partikelanalyse	+	0	–	–	0
induktive Partikelzähler	+	0	+	0	0
On-Line ATR-Spektroskopie	+	0	0	0	+
kapazitive Vermessung von Zeolithen	+	0	0	0	+
Tuning-Fork-Quarzresonator	+	0	0	0	+
Walzölsensorsystem ConduSens®	+	0	+	+	0
Messung mechanischer Schwingungen	+	–	0	0	–
MLA 900	–	+	0	0	+
OilQSens®	+	+	+	+	+

Tabelle 5: Bewertung der vorgestellten Verfahren zur Öluntersuchung

3. Sensorentwicklung

3.1 Basissensorkonzept

Das Basissensorkonzept des OilQSens® beruht auf Messungen der elektrischen Leitfähigkeit κ , der Dielektrizitätszahl ϵ_r und der Öltemperatur T der Öle. Zur Messung der elektrischen Leitfähigkeit und der Dielektrizitätszahl wird das Öl durch eine Elektrodenanordnung geleitet und der elektrische Widerstand sowie die Kapazität dieser Basissensoranordnung mit dem Öl als Widerstandsmaterial und Dielektrikum bestimmt. Zur Beschreibung der elektrischen Leitfähigkeit wird zunächst das Ohmsche Gesetz in Differentialform betrachtet [50].

$$d\vec{I} = \begin{pmatrix} \frac{\kappa \, dydz}{dx} dU_x \\ \frac{\kappa \, dx dz}{dy} dU_y \\ \frac{\kappa \, dx dy}{dz} dU_z \end{pmatrix} \Rightarrow \vec{J} = \begin{pmatrix} \frac{dI_x}{dydz} \\ \frac{dI_y}{dx dz} \\ \frac{dI_z}{dx dy} \end{pmatrix} = \kappa \cdot \begin{pmatrix} \frac{dU_x}{dy} \\ \frac{dU_y}{dx} \\ \frac{dU_z}{dz} \end{pmatrix} = \kappa \cdot \vec{E} \quad (3.1)$$

$d\vec{I}$: differentieller Strom

$d\vec{U}$: differentielle Spannung

$\vec{J}$: Stromdichte

$\vec{E}$: elektrische Feldstärke

dx, dy, dz : differentielle Wegelemente

κ : elektrische Leitfähigkeit

Bild 3.1 zeigt das Anliegen der differentiellen Spannungen dU_x , dU_y und dU_z sowie der differentiellen Ströme dI_x , dI_y und dI_z an einem differentiellen Quader aus einem Material mit der elektrischen Leitfähigkeit κ .

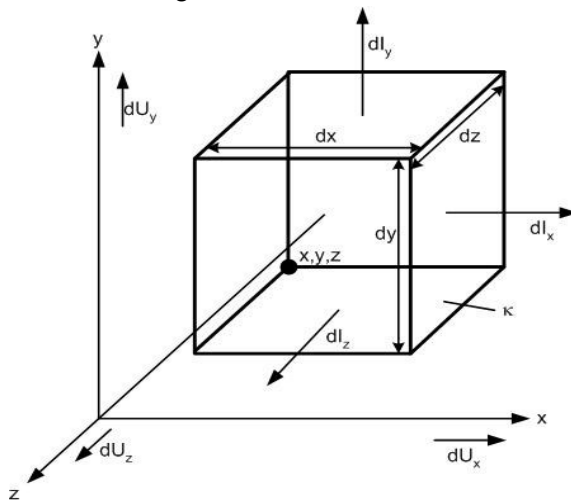


Bild 3.1: Zusammenhang der differentiellen Spannungen und Ströme und der elektrischen Leitfähigkeit κ

Über das verallgemeinerte Ohmsche Gesetz für ein isotropes Medium:

$$\vec{J} = \kappa \cdot \vec{E}, \quad \kappa = \frac{1}{\rho} \quad (3.2)$$

ρ : spezifischer Widerstand

und die Grundgleichung für die elektrische Feldstärke, analog zum Ohmschen Gesetz in Differentialform, gilt für die dielektrische Verschiebung in einem isotropen Medium [51]:

$$\vec{D} = \varepsilon \cdot \begin{pmatrix} \frac{dU_x}{dx} \\ \frac{dU_y}{dy} \\ \frac{dU_z}{dz} \end{pmatrix} = \varepsilon \cdot \vec{E} \quad (3.3)$$

Mit $\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$ (3.4)

$\vec{D}$: dielektrische Verschiebung

ε : dielektrische Leitfähigkeit, Permittivität

ε_0 : Dielektrizitätskonstante

ε_r : Dielektrizitätszahl

Hieraus können die gesuchten Größen κ und ε_r , wie nachfolgend beschrieben, über das Messen von Spannungen oder Strömen bestimmt werden.

Es wurden verschiedene Vorschläge für Basissensoren mit unterschiedlichen Elektrodenanordnungen und Messbereichen erarbeitet. Zwischen mindestens zwei Nutzelektroden strömt das zu untersuchende Öl. Ein Basissensor ist ein einfacher Plattenkondensator mit Öl als Dielektrikum bzw. ein mit Öl gefüllter Widerstand (siehe Bild 3.2).

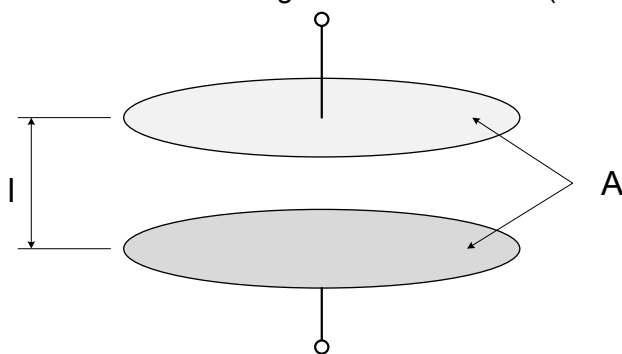


Bild 3.2: Basissensor als Plattenkondensator

Eine ausführliche Beschreibung der Ersatzschaltbilder von Kondensatoren wird z. B. in [52] geboten. Das hieraus entnommene Ersatzschaltbild wird für die elektrische Modellierung des Basissensors um die Impedanzen der Anschlussleitungen, um elektrochemische Störspannungen an den Elektroden und um durchflussabhängige transformatorische Störgleichspannungen [53] ergänzt.

Die Metallelektroden können mit dem verschmutzten Öl galvanische Elemente bilden, deren Spannung insbesondere von den Ölverschmutzungen, der Oberflächenbeschaffenheit der Elektroden und der Temperatur abhängt. Da diese Gleichspannung zwischen den Elektroden und der Flüssigkeit an beiden Elektroden unterschiedlich sein kann, ist die Differenz als elektrochemische Störgleichspannung U_{ch} im Ersatzschaltbild berücksichtigt. Mit dem in Abschnitt 3.3 beschriebenen Messverfahren wird die Auswirkung der elektrochemischen Störgleichspannung auf das Messergebnis eliminiert.

Durch äußere Magnetfelder wird in den Sensor nach dem Induktionsgesetz eine durchflussproportionale Spannung U_Q induziert [53]. Die elektrische Restleitfähigkeit des im Magnetfeld

bewegten Öles bewirkt nach dem Induktionsgesetz eine zwischen den Elektrodenplatten liegende Spannung

$$U_Q = k_g \cdot B_m \cdot Q_V \quad (3.5)$$

U_Q : durchflussproportionale Spannung

B_m : magnetische Induktion

Q_V : Volumendurchfluss

k_g : geometrieabhängige Konstante

$$Q_V = \dot{V} = \frac{dV}{dt} \quad (3.6)$$

V : Volumen

$\dot{V}$: zeitliche Ableitung des Volumens

Auch dieser Einfluss der durchfluss- und magnetfeldabhängigen, quasistationären Spannung auf das Messergebnis des in Abschnitt 3.3 beschriebenen Messverfahrens wird eliminiert.

Dielektrika werden unter der Einwirkung elektrischer Felder polarisiert, d. h. es entstehen gerichtete Dipole oder es werden vorhandene Dipole ausgerichtet. Dabei sind im Dielektrikum die Elektronenpolarisation, die Ionenpolarisation und die Orientierungspolarisation zu unterscheiden [54]. Bei der Elektronenpolarisation findet eine Deformation der Elektronenhülle der Atome statt und damit eine Verschiebung der Ladungsschwerpunkte. Sie erfolgt sehr rasch und tritt über ein breites Frequenzspektrum auf, das den Lichtbereich einschließt. Bei der Gitterpolarisation [55] - sie wird auch als Ionenpolarisation bezeichnet - wird durch das elektrische Feld eine elastische Verschiebung im Kristallgitter von Ionen hervorgerufen. Wegen der größeren Masse der Ionen und der geringeren Rückstellkraft ist die ionische Polarisation langsamer als die Elektronenpolarisation. Die Orientierungspolarisation tritt bei polaren Molekülen auf. Im elektrischen Feld werden die ansonsten statistisch verteilten Orientierungen der Moleküle ausgerichtet. Die thermische Bewegung der Dipole wirkt der Ausrichtung entgegen, d. h. die Orientierungspolarisation ist stark temperaturabhängig. Die Orientierungspolarisation erfolgt wiederum langsamer als die Ionenpolarisation. Noch niedrigerfrequenter ist die an den Grenzflächen des Öles zu den Elektroden auftretende Grenzflächenpolarisation. Während die vorgenannten Polarisationsarten vom Fluid zwischen den Elektroden abhängig sind, ist die Grenzflächenpolarisation zudem von den Elektroden abhängig.

Unter Berücksichtigung dieser Polarisierungseffekte kann das Ersatzschaltbild des Basis-sensors gemäß Bild 3.3 modelliert werden.

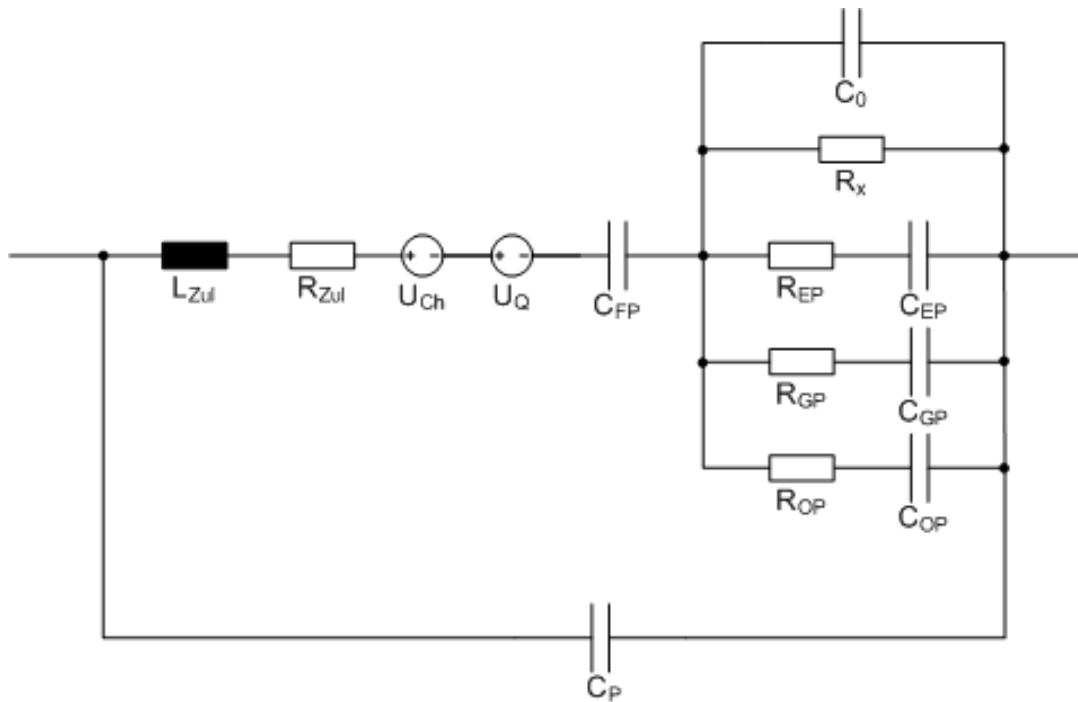


Bild 3.3: Ersatzschaltbild des Basissensors

Die einzelnen Polarisierungseffekte sind im Ersatzschaltbild jeweils durch ein RC-Glied repräsentiert. Im Öl tritt insbesondere die Elektronenpolarisation auf. Deren Relaxationszeitkonstante:

$$\tau_{EP} = R_{EP} \cdot C_{EP} \quad (3.7)$$

ist mit einer Größenordnung unter 1 ps allerdings so klein, dass deren Serienwiderstand R_{EP} hier vernachlässigt werden kann. Die Polarisationskapazität C_{EP} liegt somit parallel zur Basissensorkapazität C_0 im Vakuum. Verschmutzungskomponenten im Öl bewirken eine Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit κ und eine Verminderung des Sensorwiderstandes R_x im Ersatzschaltbild. Zudem bewirken sie Orientierungs- und Gitterpolarisationen. Während die Relaxationszeitkonstanten der Gitterpolarisation, bzw. deren Kehrwerte, im optischen Frequenzbereich liegen, sind die Relaxationszeitkonstanten der Orientierungspolarisation in der Größenordnung ns [56]. Bei den in dieser Arbeit entwickelten Messverfahren sind die Orientierungs- und Gitterpolarisationswiderstände R_{GP} und R_{OP} ebenfalls vernachlässigbar. Die Kapazitäten C_{GP} und C_{OP} können somit ebenfalls der Basissensorkapazität zugeschlagen werden.

Der bei der Messung der elektrischen Leitfähigkeit durch das Fluid zwischen den Basissensorelektroden fließende Strom entspricht einer Ionenwanderung zu den Elektrodenplatten. Die Kationen fließen zur negativ geladenen, die Anionen zur positiv geladenen Elektrode und lagern sich dort an. An den Elektroden treten unterschiedliche Polarisierungsspannungen auf, die der Messspannung entgegenwirken und die Messung stören. Im Ersatzschaltbild ist dieser Einfluss durch die Grenzflächenpolarisationskapazität C_{FP} modelliert. Die Relaxationszeitkonstante der Grenzflächenpolarisation schreibt sich wie folgt:

$$\tau_{FP} = C_{FP} \cdot R_x \quad (3.8)$$

Durch eine Messung mit Wechselspannungen, d. h. durch die ständige Umkehr der Stromrichtung, kann der gestörte elektrische Kontakt zwischen den Elektroden und dem Fluid vermieden werden. Bei dem in der vorliegenden Arbeit entwickelten Messverfahren wird die

Wirkung dieses sehr langsamen Effekts daher durch einen mittelwertfreien, rechteckförmig getakteten Messstrom eliminiert [57].

Der Zuleitungswiderstand R_{Zul} im Ersatzschaltbild von Bild 3.3 ist bei realen Sensorrealisierungen sehr viel kleiner als der sich aus der Leitfähigkeit und der Zellkonstante (vergleiche Gl. (3.15) später im Text) ergebene Sensorwiderstand R_x und wird daher vernachlässigt. Die Impedanz der Zuleitungsinduktivität ist bei den in der Sensorelektronik genutzten Messfrequenzen (siehe Abschnitt 3.4) hier interessierenden Frequenzen ebenfalls vernachlässigbar. U_Q und U_{Ch} werden durch das in Abschnitt 3.3 beschriebene Messverfahren eliminiert.

Das Ersatzschaltbild des Basissensors kann daher durch das in Bild 3.4 dargestellte, vereinfachte elektrische Parallelersatzschaltbild angenähert werden. Die parasitäre Kapazität C_p wird an späterer Stelle hinzugefügt.

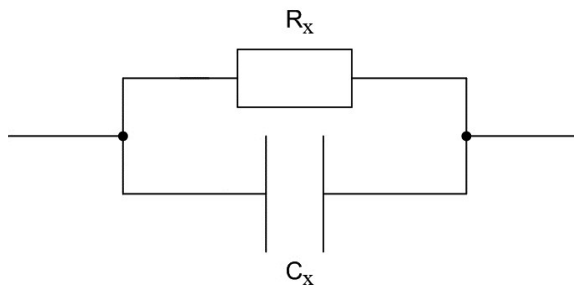


Bild 3.4: Vereinfachtes elektrisches Ersatzschaltbild des Basissensors

Der Widerstand beinhaltet die Leitfähigkeit κ und geometrische Größen der Elektrodenanordnung, der Kondensator die Dielektrizitätszahl und dieselben geometrischen Größen der Elektrodenanordnung. Die Berechnung des Widerstandes R_x erfolgt über das Ohmsche Gesetz

$$R_x = \frac{U}{I} , \quad (3.9)$$

R_x : elektrischer Sensorwiderstand

U : elektrische Spannung

I : elektrische Stromstärke

mit der Integration der Feldstärke und der Stromdichte

$$U = \int_0^l \vec{E} \cdot d\vec{s} \quad (3.10)$$

l : Elektrodenabstand

$$I = \int_A \vec{J} \cdot d\vec{A} \quad (3.11)$$

A : Querschnittsfläche der Stromdichte

und mit Gl. (3.9) folgt:

$$R_x = \frac{\int_0^l \vec{E} \cdot d\vec{s}}{\int \kappa \cdot \vec{E} \cdot d\vec{A}} \quad (3.12)$$

Für den Fall einer konstanten elektrischen Feldstärke zwischen den Elektroden ist:

$$R_x = \frac{\vec{E} \cdot \int_0^l d\vec{s}}{\kappa \cdot \vec{E} \cdot \int d\vec{A}} = \frac{l}{A \cdot \kappa} \quad (3.13)$$

bzw. mit

$$k_z = \frac{l}{A} \quad (3.14)$$

$$\kappa = \frac{k_z}{R_x} \quad (3.15)$$

Der Quotient $\frac{l}{A}$ wird als Zellkonstante k_z bezeichnet. Sie ist ausschließlich von der Geometrie der Sensoranordnung abhängig.

Öle sind elektrische Nichtleiter. Die elektrische Restleitfähigkeit reiner Öle liegt im Bereich kleiner 1 pS/m. Zum Vergleich erreicht die elektrische Leitfähigkeit des elektrischen Nichtleiters destilliertes Wasser einen um sechs Zehnerpotenzen höheren Wert. Tabelle 6 zeigt Leitfähigkeiten verschiedener Stoffe.

Medium	Größenordnung der elektrischen Leitfähigkeit in S/m
Glas	10^{-11}
Transformatoröl	10^{-11}
Getriebeöl	10^{-9}
Motoröl	10^{-8}
Destilliertes Wasser	10^{-6}
Meerwasser	1
Eisen	10^7
Aluminium	10^8

Tabelle 6: Leitfähigkeit κ für verschiedene Stoffe [58]

Abrieb, Ionen, gebrochene Ölmoleküle, Säuren, Ölseifen, usw., bewirken eine Erhöhung der Leitfähigkeit κ der Öle. Sie wächst mit steigender Ionenkonzentration und Ionenbeweglichkeit. Die elektrische Leitfähigkeit nahezu aller Verschmutzungsprodukte ist groß im Vergleich zu der extrem geringen Leitfähigkeit reiner Öle. Es besteht ein direkter Zusammenhang zwischen der elektrischen Leitfähigkeit und dem Verschmutzungsgrad der Öle. Eine Vergrößerung der elektrischen Leitfähigkeit von Ölen im Betrieb, etwa als Schmierstoff in einem Getriebe, kann als Zeichen für zunehmende Ölverschmutzung (z. B. durch Abrieb, Fremdpartikel, Wasser), Ölalterung oder steigenden Verschleiß interpretiert werden.

Die Ionenbeweglichkeit und damit auch die elektrische Leitfähigkeit sind von der inneren Reibung der Öle und damit auch von deren Temperatur abhängig. Die Leitfähigkeit steigt mit der Öltemperatur. Zur Bewertung der Ölverschmutzungen sind daher eine Temperaturkompensation der Leitfähigkeitsmesswerte und eine Umrechnung auf eine Referenztemperatur erforderlich. Danach kann über den temperaturkompensierten Leitfähigkeitswert eine integrale Veränderung der Ölqualität bewertet werden. Eine Aussage über die Art der Verschmutzung ist dagegen nicht möglich.

Konzeptionell vergleichbare Messungen haben sich bei der Leitfähigkeitsbestimmung von Wasser etabliert. Dabei sind die elektrischen Leitfähigkeiten allerdings um viele Zehnerpotenzen größer und daher sehr viel einfacher zu ermitteln. Auch bei der Wassermessung ist die elektrische Leitfähigkeit ein Summenparameter für die Ionenkonzentration. Der Leitfähigkeitsgrenzwert für Trinkwasser liegt bei 250 mS/m [60].

Die Messung der Dielektrizitätszahl kann über die gleiche Basissensoranordnung erfolgen über die auch die elektrische Leitfähigkeit bestimmt wird.

Die Kapazität C_x wird über die Definitionsgleichung der Kapazität

$$C = \frac{Q}{U} \quad (3.16)$$

mit

$$Q = \oint \vec{D} \cdot d\vec{A} \quad (3.17)$$

mit den Gleichungen (3.4) und (3.10) berechnet:

$$C = \frac{\oint \vec{D} \cdot d\vec{A}}{\int_0^l \vec{E} \cdot d\vec{s}} = \frac{\oint \epsilon \cdot \vec{E} \cdot d\vec{A}}{\int_0^l \vec{E} \cdot d\vec{s}} \quad (3.18)$$

Die Kapazität ist das Verhältnis von Verschiebungsfluss zwischen zwei Elektroden zur Spannung zwischen den Elektroden. Bei räumlich konstanter elektrischer Feldstärke $\vec{E}$ kann diese in Gl. (3.18) vor das Integral gezogen und gekürzt werden:

$$C = \frac{\epsilon \cdot \oint d\vec{A}}{\int_0^l d\vec{s}} = \frac{\epsilon \cdot A}{l} \quad (3.19)$$

bzw.

$$\epsilon_r = \frac{C \cdot l}{A \cdot \epsilon_0} = \frac{C \cdot k_z}{\epsilon_0} \quad (3.20)$$

Der Quotient $\frac{l}{A}$ ist wiederum die Zellkonstante k_z . Bei konstanter Dielektrizitätszahl ist die Kapazität nur durch die geometrische Form des Kondensators und die dielektrischen Materialeigenschaften bestimmt.

Die Dielektrizitätszahl von Ölen liegt in der Größenordnung $\epsilon_r \approx 2,2$, die Dielektrizitätszahl von Wasser beträgt etwa $\epsilon_r \approx 81$. Wegen der sich mit steigendem Wassergehalt verstärkenden Ölalterung soll der Wassergehalt der Öle zusätzlich über eine genaue Messung der Dielektrizitätszahl bestimmt werden. Zudem kann mit dieser Information der Einfluss des Wassers auf die Leitfähigkeitsänderung der Öle kompensiert werden. Tabelle 7 zeigt Beispiele von Dielektrizitätszahlen verschiedener Stoffe:

Dielektrikum	ϵ_r
Vakuum	1
Trockene Luft	1,000594
Papier	2
Silikonöl	2,1-2,8
Mineralöl	2,15
Transformatoröl	2,3
Glas	3-15
Porzellan	6
Wasser destilliert	81

Tabelle 7: Dielektrizitätszahlen [61]

Die Kalibrierung der Sensoren kann durch eine Messung der Kapazität des mit trockener Luft oder Stickstoff gefüllten Basissensors erfolgen. Die Bestimmung der Kalibrierkonstante k_z in den Gl. (3.14) und (3.19) soll während der Fertigung der Sensoren erfolgen. Auswirkungen mechanischer Fertigungstoleranzen auf das Messergebnis können so eliminiert werden.

Eine einfache Modellierung des Basissensors ist das elektrische Ersatzschaltbild mit einem Netzwerk aus einer R-C Kombination zwischen den Elektrodenplatten. Es ist in Bild 3.5 dargestellt.

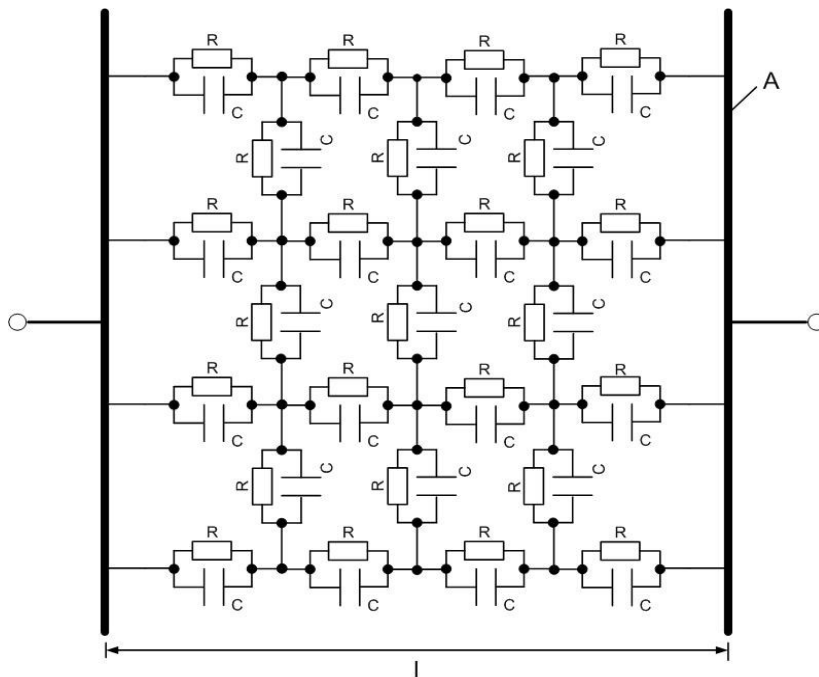


Bild 3.5: Netzwerk-Ersatzschaltbild [59]

Unter der Annahme eines homogenen Feldes liegen die Äquipotentiallinien innerhalb des Kondensators parallel zu den Elektroden. Über die senkrechten Zweige fließt daher kein Strom und sie können folglich vernachlässigt werden.

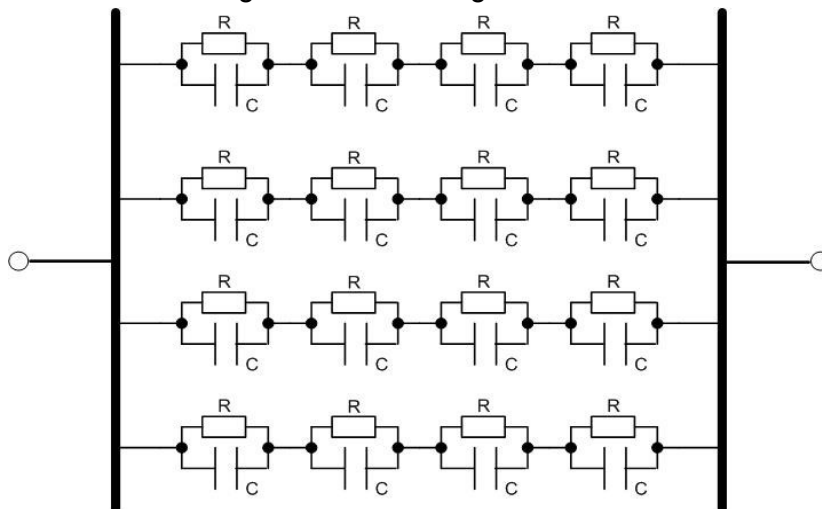


Bild 3.6: Vereinfachtes Ersatzschaltbild [59]

Durch Ölqualitätsveränderungen bzw. dabei erzeugte Ionen und hinzukommende Fremdpartikel werden einzelne Zweige kurzgeschlossen.

Zur Vermeidung von Polarisierungseffekten wird die Basissensoranordnung mit mittelwertfreien Wechselspannungssignalen beschaltet. Eine Messung mit sinusförmiger Wechselspannung ist jedoch weniger geeignet, da der kapazitive Strom erheblich größer als die ohmsche Komponente des Stromes wäre und die Stromkomponenten nur mit erheblichem Elektronikaufwand getrennt werden können.

Für die Messung der Leitfähigkeit wird daher an die Elektroden eine abschnittsweise konstante Spannung angelegt. Im eingeschwungenen Zustand fließt über die Kondensatoren des Ersatzschaltbildes kein Strom. Aus der Ableitung von Gl. (3.16) folgt für einen Kondensator:

$$i_c = \frac{dQ}{dt} = C \cdot \frac{du}{dt} = 0 \quad (3.21)$$

Die Messelektronik soll daher so konzipiert werden, dass während der Leitfähigkeitsmessung eine konstante Spannung an den Elektroden anliegt. Dann kann das Gleichspannungsersatzschaltbild in der vereinfachter Form von Bild 3.7 dargestellt werden:

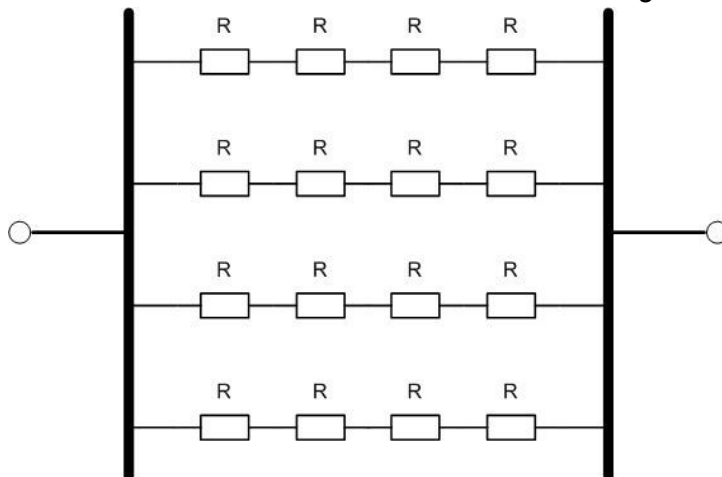


Bild 3.7: Gleichspannungsersatzschaltbild

Die vielen einzelnen Widerstände des Ersatzschaltbildes können zu einem Widerstand zusammengefasst werden. N in Serie geschaltete Widerstände R in N parallelen Zweigen ergeben wiederum den resultierenden Widerstand R . Aus dieser Größe wird dann mit Kenntnis der Geometrie der Elektrodenanordnung - bzw. der Zellkonstante k_z - die Leitfähigkeit bestimmt.

Nach dem Anlegen einer höherfrequenten Wechselspannung an die Elektroden ist der über die Kondensatoren des Ersatzschaltbildes fließende Strom wesentlich größer als der Strom über die hochohmigen Widerstände des Öls. Als vereinfachtes Wechselspannungsersatzschaltbild kann dann das in Bild 3.8 skizzierte Ersatzschaltbild angenommen werden:

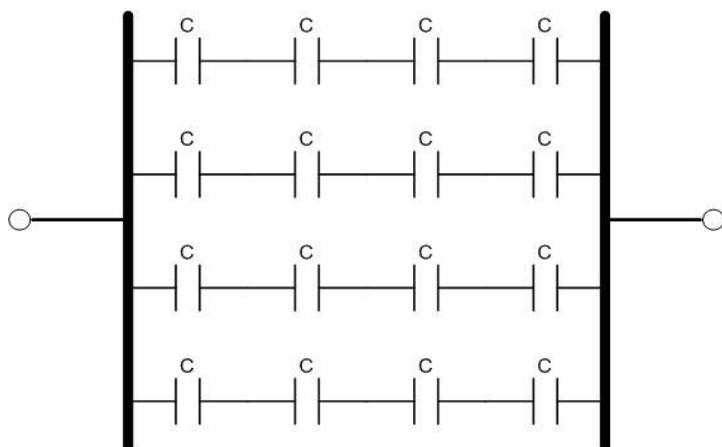


Bild 3.8: Kapazitives Ersatzschaltbild

Die Einzelkondensatoren können wiederum zu einer gemeinsamen Kapazität C zusammengefasst werden. Mit Kenntnis der Sensorgeometrie bzw. der Zellkonstante k_z wird daraus die gesuchte Dielektrizitätszahl über Gl. (3.20) bestimmt.

Der Widerstand und die Kapazität sollen unabhängig voneinander gemessen werden. Zur Vermeidung von Polarisierungseffekten werden hierzu mittelwertfreie Wechselgrößen genutzt. Die Verwendung sinusförmiger Testsignale ist wegen des extrem hochohmigen Widerstandes R_x und den geringen ohmschen Stromkomponenten im Vergleich zu den kapazitiven Verschiebungsströmen über die Sensorkapazität C_x problematisch. Daher sollen mit getakteten, mittelwertfreien, abschnittsweise konstanten Testsignalen die Kapazität und der Widerstand des Basissensorsystems gemessen werden. Hierzu wird an die Elektroden eine abschnittsweise konstante Spannung angelegt und der verursachte elektrische Strom aufintegriert und zur Leitfähigkeitsmessung ausgewertet. Zusätzlich werden die Dielektrizitätszahl und die Temperatur des Öles gemessen. Mit Hilfe des konzeptionierten neuen Messverfahrens zur Messung der elektrischen Leitfähigkeit und der Dielektrizitätszahl aus einem Messsignal über mittelwertfreie getaktete Gleichspannungen können eine Miniaturisierung und eine sehr hohe reproduzierbare Auflösung und Genauigkeit des Sensorelements erreicht werden (siehe Abschnitt 3.3).

Das Sensorsystem kann als Durchfluss- und Tauchsensorsystem realisiert werden. Durchflusssensorsysteme haben den Vorteil, dass eine Schichtung des Öls ebenso wie die Ablagerung von Verschmutzungen weitgehend vermieden werden können. Durch die Bewegung des hier als elektrischer Leiter wirkenden Öls werden in das Öl, wegen unvermeidbarer Magnetfelder, nach dem Induktionsgesetz strömungsgeschwindigkeitsproportionale Störspannungen in die Elektrodenanordnung induziert. Diese sind dem eigentlichen Messsignal überlagert. Bereits das konstante Erdmagnetfeld kann diesen Effekt bewirken. Sich ändernde Magnetfelder werden sowohl bei den Durchfluss- als auch den Tauchsensoren weitere transformatorische Störspannungen induzieren. Die neue Sensorelektronik kompensiert diese Störeffekte.

Die elektrische Leitfähigkeit κ ist temperaturabhängig, wobei der Temperaturkoeffizient weniger vom Öl, sondern insbesondere von den Ölverschmutzungen abhängig ist. Zudem verändert sich die Sensorgeometrie in Abhängigkeit von der Temperatur. Für eine zu realisierende Temperaturkompensation wird die Öltemperatur zusätzlich gemessen.

Die extreme Hochohmigkeit der Basissensoren und die daraus resultierenden extrem kleinen Messströme bedingen eine hohe Störempfindlichkeit gegenüber eingestreuten elektromagnetischen Feldern. Durch eine Integration der extrem kleinen Ströme wird eine ausreichende Störunterdrückung erreicht. Zu Vermeidung von Polarisierungseffekten wird mit mittelwertfreien Wechselspannungen als Testsignalen gearbeitet. Bei der Leitfähigkeitsmessung dürfen allerdings keinerlei kapazitive Stromkomponenten mitgemessen werden, da der kapazitive Strom um Größenordnungen höher ist als dessen ohmsche Komponente. Hier werden außerordentlich hohe Anforderungen an die analoge Sensorelektronik gestellt und mit dem neu entwickelten elektronischen Messverfahren erfüllt.

Als Messbereich der elektrischen Leitfähigkeitsmessung wurden 0,1 bis 50.000 pS/m festgelegt. Der Messbereich der Dielektrizitätszahl reicht von 1 bis 5. Als Temperaturbereich des Basissensors wurde -20 bis +200 °C vorgegeben.

3.2 Temperaturabhängigkeit der Zellkonstante

Zur Auslegung der Sensorgeometrie wurde der Plattenabstand l_0 viel größer als der zu erwartende Partikel- oder Wassertropfchendurchmesser auf 1 mm festgelegt. Wie in Abschnitt 4.2 erläutert, wurde der Plattenabstand später auf 2 mm verdoppelt. Der Plattendurchmesser D_P ist durch die maximale Baugröße des Sensors vorgegeben. Er wurde auf $D_P=38$ mm festgelegt. Sowohl die elektrische Leitfähigkeit, als auch die Dielektrizitätskonstante und die Zellkonstante sind temperaturabhängig. Während die beiden erstgenannten Effekte nicht quantitativ bekannt sind (die Temperaturabhängigkeit der Dielektrizitätszahl und der elektrischen Leitfähigkeit sind insbesondere auch von der Verschmutzung der Öle abhängig, da diese den wesentlichen Beitrag zur Leitfähigkeitsänderung tragen), soll nachfolgend die temperaturabhängige Ausdehnung des Basissensors und damit auch der Zellkonstante betrachtet werden. Zunächst wird die Wirkung der temperaturabhängigen Ausdehnung der beiden Durchführungsstifte zur Elektrodenhalterung diskutiert (siehe Bild 3.9). Dabei wird vorausgesetzt, dass die Temperatur der beiden Durchführungsstifte gleich ist.

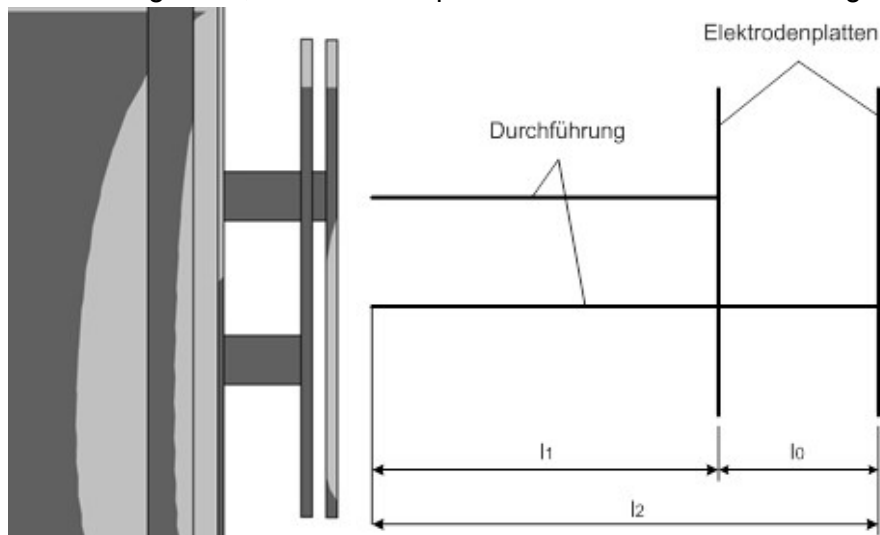


Bild 3.9: Schematische Betrachtung des Basissensors [62]

Bei einer Temperaturänderung ΔT ändern sich die Längen

$$\Delta l_1 = \alpha_D \cdot l_1 \cdot \Delta T \quad \text{und} \quad \Delta l_2 = \alpha_D \cdot (l_1 + l_0) \cdot \Delta T$$

und der Plattenabstand des Basissensors:

$$\Delta l = \Delta l_2 - \Delta l_1 = \alpha_D \cdot l_0 \cdot \Delta T. \quad (3.22)$$

Mit der Zellkonstante entsprechend Gl. (3.14) ergibt sich:

$$k_Z = \frac{l}{A} = \frac{l_0 + \Delta l}{A} = \frac{l_0(1 + \alpha_D \cdot \Delta T)}{A} \quad (3.23)$$

$$\frac{k_Z}{k_{Z0}} = 1 + \alpha_D \cdot \Delta T \quad \text{und} \quad \Delta T = T_W - T_0 \quad (3.24)$$

l_0 : Plattenabstand bei Referenztemperatur

l_1 : Länge der Durchführung

l_2 : Länge der Durchführung und Plattenabstandes

α_D : Ausdehnungskoeffizient der Durchführung

k_{Z0} : Zellkonstante bei Referenztemperatur

k_Z : temperaturabhängige Zellkonstante

T_0 : Referenztemperatur

T_W : Isttemperatur

Hierzu kommt die Veränderung der Elektrodenplattengeometrie. Dabei ist sowohl die temperaturabhängige Veränderung der Plattendicke, als auch die Änderung der Plattenfläche zu beachten. Bei der Betrachtung der Plattendicke wird, wie in Bild 3.10 skizziert, von gleichen Befestigungspunkten der beiden Platten an den Durchführungsstiften ausgegangen.

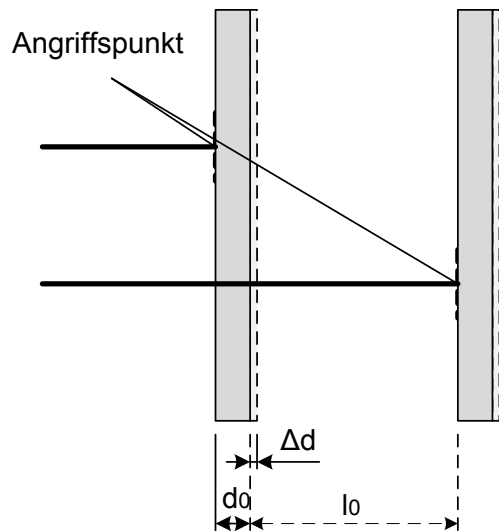


Bild 3.10: Ausdehnung der Plattendicke [62]

Die Größe Δl erfährt eine zusätzliche Änderung aufgrund der temperaturabhängigen Ausdehnung der Plattendicke:

$$\Delta d = \alpha_P \cdot \Delta T \quad (3.25)$$

α_P : thermischer Ausdehnungskoeffizient der Platten

Gl. (3.26) beinhaltet die Dickenausdehnung der Platten und die Längenausdehnung der Durchführungen:

$$\frac{k_Z}{k_{Z_0}} = 1 + \alpha_D \cdot \Delta T - \alpha_P \cdot \frac{d_0}{l_0} \cdot \Delta T \quad (3.26)$$

d_0 : Plattendicke bei Referenztemperatur

Bild 3.10 zeigt den Einfluss der Änderung der Ausdehnung der Durchführungsstifte und der Plattendicke in Abhängigkeit von der Temperatur. Die zusätzliche Berücksichtigung der temperaturabhängigen Ausdehnung der Plattenfläche ergibt:

$$\frac{k_Z}{k_{Z_0}} = \frac{1 + \Delta T \cdot \left(\alpha_D - \alpha_P \cdot \frac{d_0}{l_0} \right)}{(1 + \alpha_P \cdot \Delta T)^2} \quad (3.27)$$

Da die Sensortemperatur mitgemessen wird, könnte diese Gleichung im Mikrorechner der digitalen Auswerteelektronik hinterlegt und so eine Kompensation der Temperaturabhängigkeit des Basissensors durchgeführt werden. Allerdings sind, wie bereits erwähnt, auch die elektrische Leitfähigkeit und die Dielektrizitätszahl selbst temperaturabhängig. Es wird daher ein anderer Weg über einen gemäß Abschnitt 3.8 entwickelten, selbstlernenden Temperaturkompensationsalgorithmus bzw. eine Umrechnung auf eine möglichst der Nennbetriebstemperatur entsprechende Referenztemperatur beschritten.

3.3 Sensorelektronikkonzept

Das Sensorelektronikkonzept ist auf den extrem hochohmigen Basissensor abgestimmt. Es erfordert eine sehr hohe Störfestigkeit gegenüber elektromagnetischen Störungen und gleichzeitig eine sehr hohe reproduzierbare Auflösung. Der zu messende Sensorwiderstand liegt bei reinen Ölen in der Größenordnung $T\Omega$, die zu messenden Ströme im pA-Bereich. Der hochohmige Basissensor erfordert daher eine außerordentlich empfindliche und dennoch sehr störungsrobuste Elektronik. Beides kann durch eine integrierende Messelektronik und eine umgehende Umwandlung der Messinformationen in digitale Signale erreicht werden. Hierzu werden der Basissensorwiderstand und die Basissensorkapazität über Operationsverstärkerschaltungen (OPs) in Frequenz- bzw. Zeitsignale umgewandelt. Die Zeitmessungen erfolgen über einen Mikrocontroller, der zudem die digitale Signalvorverarbeitung übernimmt. Zur Vermeidung von Polarisierungseffekten darf der Basissensor nur mit mittelfreien Testsignalen beaufschlagt werden. Andernfalls würden zusätzliche Polarisierungsspannungen das Messergebnis verfälschen oder die Messung sogar unmöglich machen.

Es wurde ein spezielles Relaxationsoszillatorkonzept entwickelt, bei dem der Strom durch den Basissensorwiderstand aufintegriert wird. Die Mittelwertbildung wird über eine Integration durchgeführt:

$$\bar{u} = \frac{1}{T_I} \int_{t_0}^{t_0+T_I} u(t) dt = \frac{1}{T_I} \int_0^{T_I} u(t) dt \quad (3.28)$$

T_I : Integrationszeit

Dem Eingangssignal überlagerte Wechselspannungsstörrößen - wie z. B. transformatorische, induktive oder kapazitive Störspannungen - werden ebenso wie Störsignale durch energietechnische Frequenzen mithilfe der zeitlichen Mittelwertbildung unterdrückt. Berechnet man die Störunterdrückung d durch die Integration in Abhängigkeit der Störfrequenz f_s

$$d = 20 \cdot \log \left| \frac{\bar{U}_s}{\int_0^{T_I} \bar{U}_s \cdot \cos(2\pi \cdot f_s \cdot t) dt} \right| \quad (3.29)$$

$$d = 20 \cdot \log \left| \frac{1}{\frac{1}{2\pi \cdot f_s} [-\sin 2\pi \cdot f_s \cdot t]_0^{T_I}} \right| \quad (3.30)$$

$$d = 20 \cdot \log \left| \frac{2\pi f_s}{\sin 2\pi f_s T_I} \right|, \quad (3.31)$$

so ergibt sich der in Bild 3.11 dargestellte Verlauf.

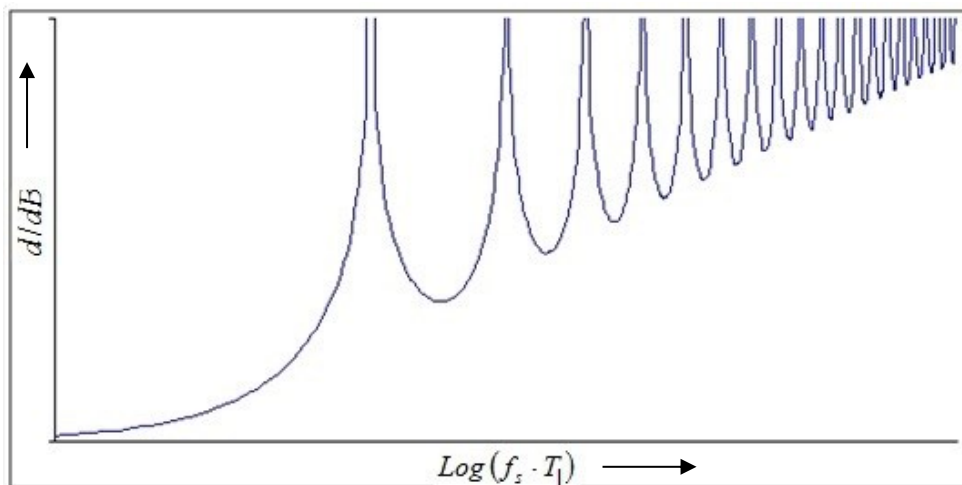


Bild 3.11: Störunterdrückung durch integrierende Sensorelektronik

Zudem sei bereits jetzt angemerkt, dass die in den Abschnitt 3.6 diskutierten Fehler realer Operationsverstärker keine Auswirkung auf das Sensorausgangssignal haben.

Als analoge Sensorelektronik wird das Konzept des Relaxationsoszillators genutzt. Bild 3.12 zeigt dessen Blockschaltbild mit einem Integrator und einem invertierenden Schmitt-Trigger:

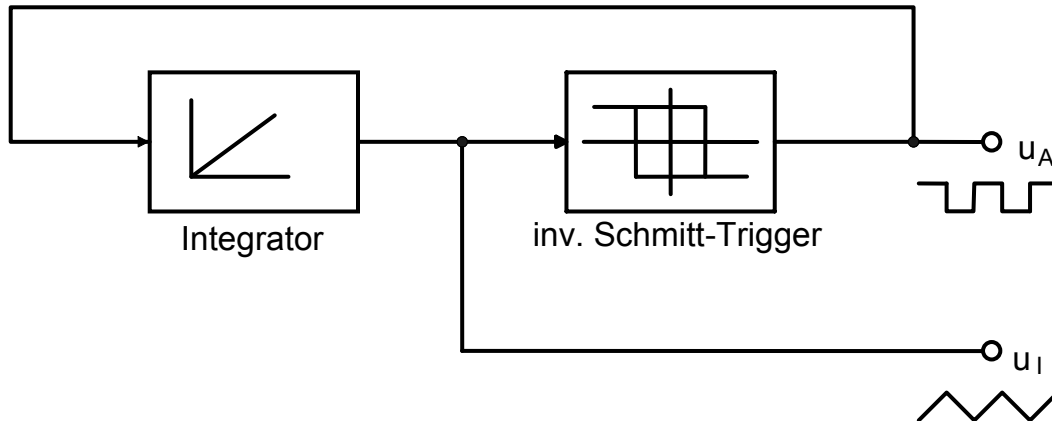


Bild 3.12: Blockschaltbild eines Relaxationsoszillators

Die Ausgangsspannung u_I des Integrators wird auf den Eingang des invertierenden Schmitt-Triggers geschaltet, wobei die Ausgangsspannung u_A des Schmitt-Triggers wieder als Eingangsspannung für den Integrator verwendet wird. Erreicht u_I die Schwell-/bzw. Umschaltspannung U_{es} des Schmitt-Triggers, wird dessen Ausgangsspannung umgeschaltet und die Integration erfolgt in die umgekehrte Richtung, bis die negative Schwellspannung des Schmitt-Triggers erreicht wird. Dann wird u_A wieder positiv und der Vorgang beginnt von neuem. Ein Datenflussgraph des OilQSens[®] Sensorsystems ist in Bild 3.13 dargestellt.

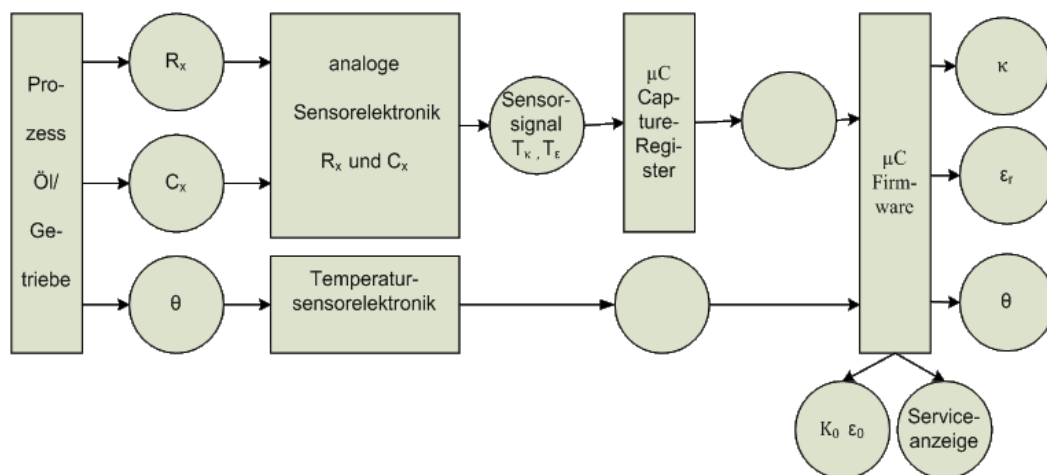


Bild 3.13: Instanzennetz des OilQSens[®]

Datenflussgraphen, die auch als Instanzennetze bezeichnet werden, bestehen aus rechteckig dargestellten Funktionseinheiten, den sogenannten Instanzen, und kreisförmig dargestellten Datenräumen. Instanzen sind Funktionseinheiten mit Autonomie und definierten Zuständigkeiten. Sie sind durch Eingänge und rückkopplungsfreie Ausgänge charakterisiert. Instanzen kommunizieren über die als Kreise dargestellten Datenräume miteinander. Datenzugriffe werden über Pfeile zwischen Datenräumen und Instanzen charakterisiert. Ein Instanzennetz veranschaulicht den Datenfluss durch ein System. Es erlaubt eine statische Inter-

pretation des Einzugsbereichs der einzelnen Funktionseinheiten. Instanzen und Instanzenetze können stufenweise verfeinert werden. Beispiele für Instanzen sind Hardwarekomponenten, Softwareprogramme, Sensoren, Prozessoren, Automatisierungssysteme oder auch der Bediener eines Messsystems. Datenräume sind z. B. Signale auf Leitungen, Arbeitsspeicher, Messsignale, Bildschirme oder Drucker.

Die analoge Sensorelektronik des OilQSens® Sensorsystems besteht aus einem Relaxationsoszillator, wobei der Basissensor in den Eingangskreis des Integrators geschaltet ist. Aus dem analogen Ausgangssignal des Integrators werden über einen Mikrocontroller sowohl die elektrische Leitfähigkeit als auch die Dielektrizitätszahl bestimmt. Hierzu werden, wie in Abschnitt 3.4 dargestellt, zu den gesuchten Messgrößen proportionale Zeitintervalle des Sensorsignals gemessen. Dabei muss eine minimale Restleitfähigkeit $\kappa_{\min}$ überschritten werden. Im Rahmen dieser Arbeit ist $\kappa_{\min}$ aus theoretischen Überlegungen gewonnen worden. Selbst die Messung eines hochreinen, für medizinische Zwecke hergestellten Silikonöles wird ohne Anpassungen des Sensors problemlos durchgeführt. Zur Temperaturkompensation der Leitfähigkeitswerte wird zusätzlich die Temperatur über einen PT100 gemessen. Dieser Sensor ist an der Elektrodenhalterung auf der Elektronikseite der Glas-Metalldurchführung angeordnet. Die Temperaturmesselektronik ist in Abschnitt 3.7 beschrieben. Der im Instanzenetz des CapHSens® eingetragene Wert κ_{40} wird über eine adaptive, selbstlernende Temperaturkompensation ermittelt (siehe Abschnitt 3.8). Der dreiwertige Ausgabewert (OK, Wartung empfohlen, Wartung erforderlich) der Ölqualität über die Serviceanzeige wird nicht mehr im Rahmen dieser Arbeit realisiert. Hierfür müssen weitere Erfahrungen aus der praktischen Anwendung des Sensorsystems gewonnen werden.

Mithilfe des OilQSens® wird mit einer Sensorelektronik aus einem Sensorsignal sowohl die elektrische Leitfähigkeit als auch die Dielektrizitätszahl der Öle bestimmt. Allerdings ist eine Mindestleitfähigkeit auch für die Messung der Dielektrizitätszahl erforderlich. Zur Kompensation von Herstellungstoleranzen des Basissensors soll dessen Kalibrierung mit Hilfe eines Referenzgases ermöglicht werden. Daher wird eine zweite Sensorelektronik entwickelt, mit der eine Messung der Feuchte (englisch: humidity) elektrisch nichtleitender, flüssiger und gasförmiger Fluide mit der gleichen Basissensoranordnung möglich ist. Auch hiermit wird die Dielektrizitätszahl gemessen. Es ist jedoch keine elektrische Mindestrestleitfähigkeit $\kappa_{\min}$ erforderlich. Dieser Sensor wird CapHSens® genannt. Die direkte Messung der Dielektrizitätszahl des Fluids zwischen den beiden Elektroden ermöglicht in Verbindung mit der hochauflösenden Sensorelektronik sowohl eine Feuchtebestimmung als auch die genaue Kalibrierung der Basissensoren. Bei der Kalibrierungsmessung werden die Sensoren mit Stickstoff der Qualität 6.0 (99,9999% N₂) gefüllt und die Zellenkonstanten der Basissensoren gemäß Gl. (3.14) bestimmt. Bei einer späteren Produktion des OilQSens® kann die Kalibrierung wegen der geringen Genauigkeitsanforderungen ggf. auch mit ungefüllten, bzw. mit Luft gefüllten Sensoren erfolgen.

3.4 Sensorelektronik des OilQSens®

Die Sensorelektronik des OilQSens® ist detailliert in den Patentanmeldungen des Autors [63] [64] beschrieben. Bild 3.14 zeigt die konduktive Sensorelektronik mit der Parallelschaltung des Sensorwiderstandes R_x und der Sensorkapazität C_x .

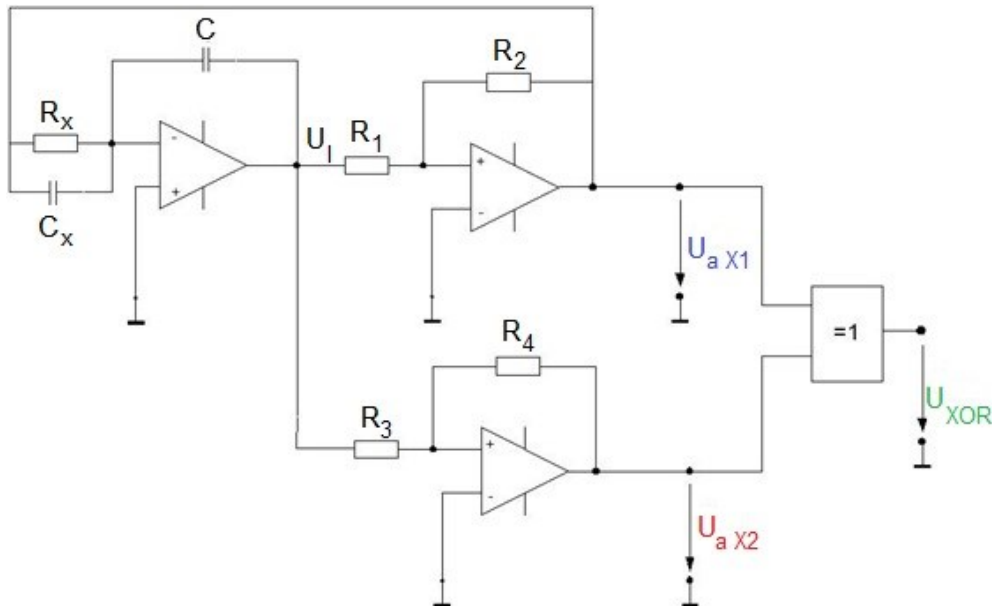


Bild 3.14: konduktive Sensorelektronik

Der untere Schmitt-Trigger arbeitet als Komparator mit kleiner Hysterese. Das Ausgangssignal des Integrators U_i , die Ausgangssignale der beiden Schmitt-Trigger U_{aX1} und U_{aX2} und das Ausgangssignal des Exklusiv-Oder-Gatters sind in Bild 3.15 skizziert.

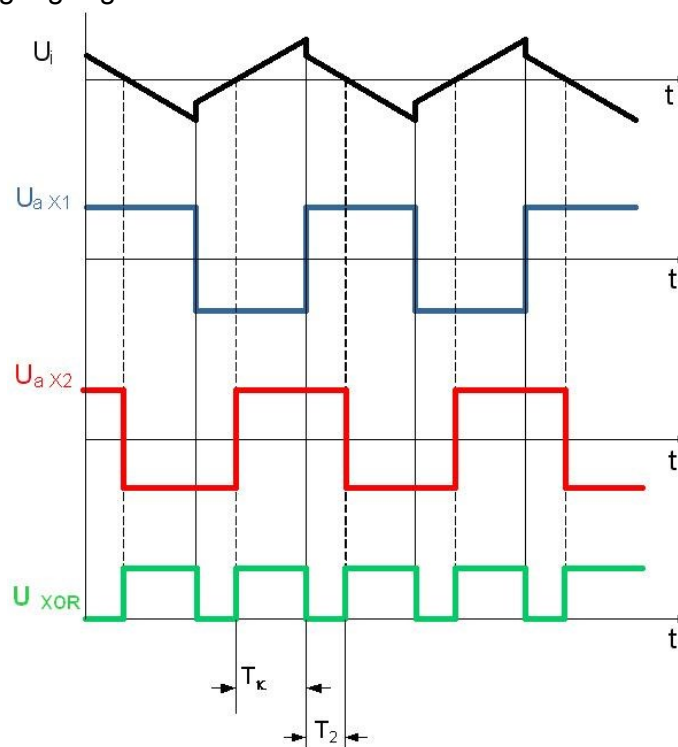


Bild 3.15: Sensorelektroniksignale

Die Ausgangsspannungen der beiden Schmitt-Trigger werden auf ein XOR-Gatter geschaltet. Dessen Ausgangssignal beinhaltet die mit T_K bezeichnete High-Zeit, sie ist dem spezifischen Widerstand ρ proportional und umgekehrt proportional zur elektrischen Leitfähigkeit κ :

$$\kappa = \frac{1}{\rho} \quad (3.32)$$

Die Differenz aus T_K und der Low-Zeit T_2 ist, wie später gezeigt wird, proportional zur Dielektrizitätszahl ϵ_r .

Bei der Beschreibung der Operationsverstärkerschaltungen wird zunächst von idealen Operationsverstärkern mit

unendlich hoher Leerlaufverstärkung: $v_0 = \frac{U_a}{U_d} = \frac{U_a}{U_p - U_n} \rightarrow \infty$,

unendlich hohen Eingangswiderständen: $R_e \rightarrow \infty$,

sehr kleinem Ausgangswiderstand: $R_a \rightarrow 0$,

und unendlich großer Bandbreite $B \rightarrow \infty$,

bzw. einer unendlichen maximalen Änderungsgeschwindigkeit der Ausgangsspannung (Slew-Rate)

$$SR = \left. \frac{\Delta U_a}{\Delta t} \right|_{max} \rightarrow \infty$$

ausgegangen. Weitere Eigenschaften idealer Operationsverstärker sind vernachlässigbare Ruhe-, Offset- und Driftgrößen und die Rausch- und Rückwirkungsfreiheit.

Während der Zeit T_K wird die elektrische Leitfähigkeit des Öls gemessen. Die Eingangsspannung des Integrators und damit auch die Spannung über der Sensorkapazität C_x ist in diesem Zeitintervall konstant. Aus Gl. (3.21) folgt für eine zeitlich konstante Kapazität unmittelbar:

$$i_{C_x} = C_x \cdot \frac{dU}{dt} = 0. \quad (3.33)$$

Für die Integratorausgangsspannung u_I (siehe Bild 3.16) folgt damit zum Umschaltzeitpunkt des Schmitt-Triggers

$$u_I = -\frac{1}{R_x \cdot C} \int_0^{T_K} U_{ax_1}(\tau) d\tau \quad (3.34)$$

und für $U_{ax_1} = konst.$

$$u_I = -\frac{1}{R_x \cdot C} \cdot U_{ax_1} \cdot T_K. \quad (3.35)$$

Der Umschaltzeitpunkt des Schmitt-Triggers ist über

$$u_I = \frac{R_1}{R_2} \cdot U_{ax_1} \quad (3.36)$$

gegeben. Eingesetzt in Gl. (3.34) errechnet sich:

$$R_x = \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{T_K}{C} \quad (3.37)$$

Dadurch ergibt sich mit Gl. (3.15) für die Leitfähigkeit κ :

$$\kappa = \frac{R_1}{R_2} \cdot \frac{l}{A} \cdot \frac{C}{T_K} \quad (3.38)$$

oder schließlich mit Gl. (3.14):

$$\kappa = \frac{R_1}{R_2} \cdot k_Z \cdot \frac{C}{T_K} \quad (3.39)$$

Die Detektion des Nulldurchgangs der Integratorausgangsspannung erfolgt über den in Bild 3.19 unten dargestellten, als Schmitt-Trigger mit kleiner Hysterese beschalteten Komparator.

Wie in Bild 3.14 dargestellt, wird durch die parallele Kapazität C_x des Sensors ein Sprung der Integratorausgangsspannung verursacht. Dieser Sprung ermöglicht eine Bestimmung der Dielektrizitätszahl aus dem einen Messsignal, zusätzlich zur Leitfähigkeitsmessung.

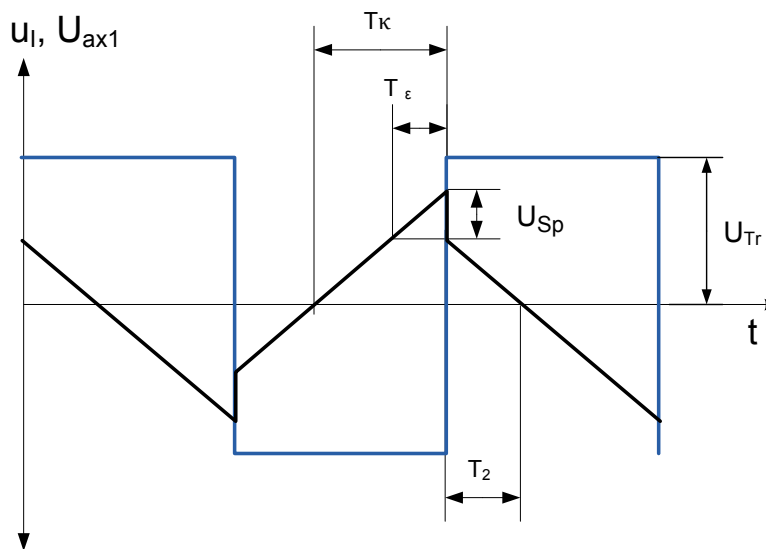


Bild 3.16: Zusammenhang zwischen T_K und T_ϵ

Zur Berechnung benötigt man die Zeit T_ϵ (siehe Bild 3.16). Dieses ist die Integrationszeit für die Integration über die durch C_x verursachte Sprunghöhe U_{Sp} und entspricht der Differenz der Zeiten T_K und T_2 :

$$T_\epsilon = T_K - T_2 \quad (3.40)$$

Die Zeiten T_K und T_2 werden in der Sensorelektronik durch das der analogen Sensorelektronik nachgeschaltete XOR-Gatter ermittelt (siehe Bild 3.15). T_K ist dann die High-Zeit und T_2 die Low-Zeit der Ausgangsspannung des XOR-Gatters. Mit Hilfe der vereinfachten Integratorformal aus Gleichung 3.35 lässt sich die Beziehung für die Sprungspannung beschreiben:

$$U_{Sp} = -\frac{U_A}{R_X C} T_\epsilon \quad (3.41)$$

Zum Zeitpunkt der Umschaltung der Ausgangsspannung des Schmitt-Triggers, und damit auch der Eingangsspannung des Integrators, kann das in Bild 3.17 skizzierte Ersatzschaltbild angenommen werden.

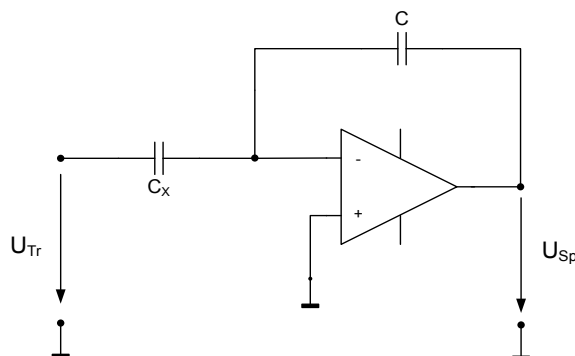


Bild 3.17: Verhältnis U_{Tr} zu U_{Sp}

Die Summe der Ströme in den Knoten am invertierenden Eingang ist unter der Voraussetzung eines idealen OPs wie folgt gegeben:

$$C_x \cdot \frac{dU_{ax1}}{dt} + C \cdot \frac{du_I}{dt} = 0 \quad (3.42)$$

Durch Integration dieser Gleichung von einem Zeitpunkt unmittelbar vor dem Umschaltzeitpunkt bis unmittelbar nach dem Umschaltzeitpunkt folgt:

$$C_x \cdot 2 \cdot U_{Tr} = -C \cdot U_{Sp} \quad (3.43)$$

Umgeschrieben nimmt Gl. (3.43) folgende Form an:

$$2 \cdot U_{Tr} \cdot \frac{C_x}{C} = -U_{Sp} \quad (3.44)$$

mit den Gln. (3.41) und (3.43) ergibt sich:

$$C_x = \frac{T_\varepsilon}{2 \cdot R_x} \quad (3.45)$$

Für die zu bestimmende Dielektrizitätszahl wird

$$\varepsilon_r = (T_k - T_2) \cdot \frac{\kappa}{2 \cdot \varepsilon_0} \quad (3.46)$$

oder mit den Gln. (3.14) und (3.38)

$$\varepsilon_r = \left(1 - \frac{T_2}{T_k}\right) \cdot \frac{R_1}{R_2} \cdot k_z \cdot \frac{C}{2 \cdot \varepsilon_0} \quad (3.47)$$

Somit kann die Dielektrizitätszahl ε_r aus der Leitfähigkeit κ und der Zeit T_ε berechnet werden.

3.5 Sensorelektronik des CapHSens®

Zur genauen Dielektrizitätszahlbestimmung wurde mit dem gleichen Basissensor ein spezieller Dielektrizitätszahlsensor entwickelt. Die analoge Messelektronik für den Dielektrizitätszahlsensor CapHSens® ist in Bild 3.18 skizziert. Bei diesem Relaxationsoszillator wird die Integrationskapazität C durch den Basissensor ersetzt. Beim OilQSens® wird die Elektrizitätszahl ε_r bzw. die Sensorkapazität C_x während des Umschaltsprungs, also bei sehr hohen Frequenzkomponenten gemessen. Beim CapHSens® dient die Sensorkapazität C_x zur Integration eines abschnittsweise konstanten Stromes. Hier wird die die Sensorkapazität C_x mit abschnittweisen konstanten Strömen beaufschlagt und somit bei niedrigen Frequenzkomponenten gemessen. Während beim OilQSens® eine Mindestleitfähigkeit vorhanden sein muss, kann der CapHSens® mit trockener Luft oder Stickstoff kalibriert werden. Die analoge Messelektronik besteht ebenfalls aus einem Umkehrintegrator und einem Schmitt-Trigger. Der Basissensor ist wiederum durch den Widerstand R_x und die Kapazität C_x symbolisiert.

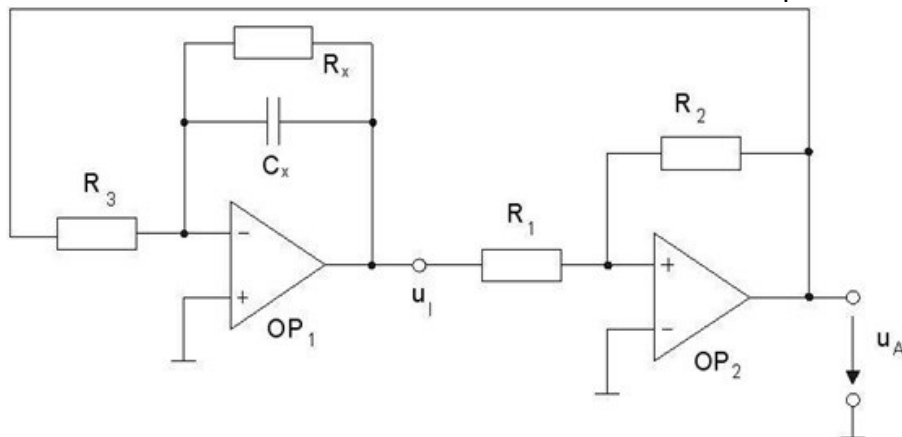


Bild 3.18: Relaxationsoszillator

Der parallele Sensorwiderstand kann hier vernachlässigt werden, da der Strom durch den Kondensator sehr viel größer ist als der Strom durch R_x .

Der Operationsverstärker OP_1 ist als invertierender Integrator beschaltet. Über die Summe aller Ströme in dem Knotenpunkt am invertierenden Eingang des Integrators errechnet sich

$$u_I(t) = -\frac{1}{R_3 \cdot C} \int_0^t u_A(\tau) d\tau + u_I(0) \quad (3.48)$$

und bei konstanter Eingangsspannung u_A und $u_I(0)=0$:

$$u_I(t) = -\frac{u_A}{R_3 \cdot C} \cdot t. \quad (3.49)$$

Der mit OP_2 aufgebaute Schmitt-Trigger liefert die vom Umkehrintegrator aufintegrierte, abschnittsweise konstante Ausgangsspannung u_{Amax} bzw. u_{Amin} . Erreicht die Integratorspannung u_I den Trigger-Pegel des Schmitt-Triggers $|U_{IS}|$, ändert die zu integrierende Spannung u_A ihr Vorzeichen. Dadurch läuft der Ausgang des Integrators in umgekehrter Richtung, bis der andere Trigger-Pegel erreicht ist. In Bild 3.19 sind die beiden Signalverläufe dargestellt. Die Amplituden der Dreieckschwingung am Ausgang des Integrators und gleichzeitig die Umschaltspannungen des Schmitt-Triggers $|U_{IS}|$ sind ebenfalls eingetragen.

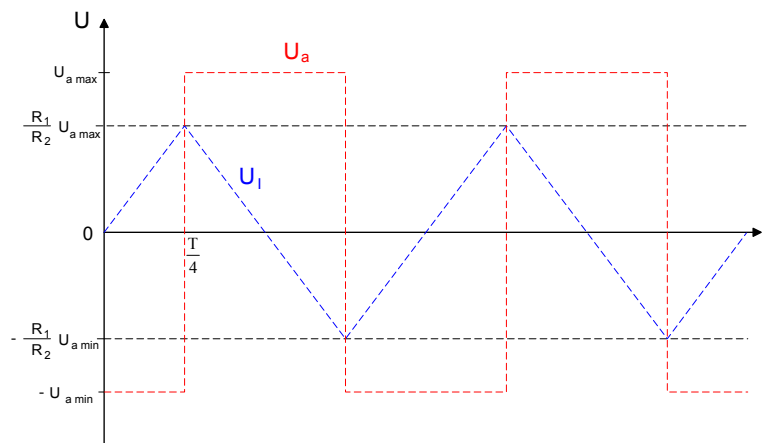


Bild 3.19: Spannungsverläufe am Relaxationsoszillator

Die Umschaltung des Schmitt-Triggers erfolgt bei den Schaltspannungen:

$$|U_{IS}| = \left| -\frac{R_1}{R_2} \cdot U_{a \min} \right| = \frac{R_1}{R_2} \cdot U_{a \max} = \frac{R_1}{R_2} \cdot |U_{a \max/\min}| \quad (3.50)$$

Es folgt für $t = \frac{T}{4}$

$$|U_{IS}| = \frac{|U_{a \max/\min}|}{R_3 \cdot C} \cdot \frac{T}{4} \quad (3.51)$$

T ist die Periodendauer der Dreieck- und der Rechteckschwingung. Mit Gl. (3.37) gilt:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{4R_1R_3}{R_2} \cdot C \quad (3.52)$$

Die Periodendauer des Relaxationsoszillators ist also direkt proportional zur gesuchten Kapazität des Basissensors und zur Dielektrizitätszahl:

$$\varepsilon = T \cdot \frac{R_2}{4R_1R_3} \cdot \frac{1}{A} \quad (3.53)$$

Die Herleitung von Gl. (3.52) basiert auf einem Medium sehr geringer Leitfähigkeit, so dass der Sensorwiderstand R_x vernachlässigt wird. Die Integratorausgangsspannung ist zeitproportional. Bei Ölen mit einer höheren Leitfähigkeit wird die Ausgangsspannung eine Exponentialfunktion $1 - e^{-t/\tau}$, mit $\tau = R_x \cdot C_x$. Die Oszillogramme in Bild 3.20 verdeutlichen diesen Effekt durch ansteigende Öltemperatur bei zunehmender Leitfähigkeit.

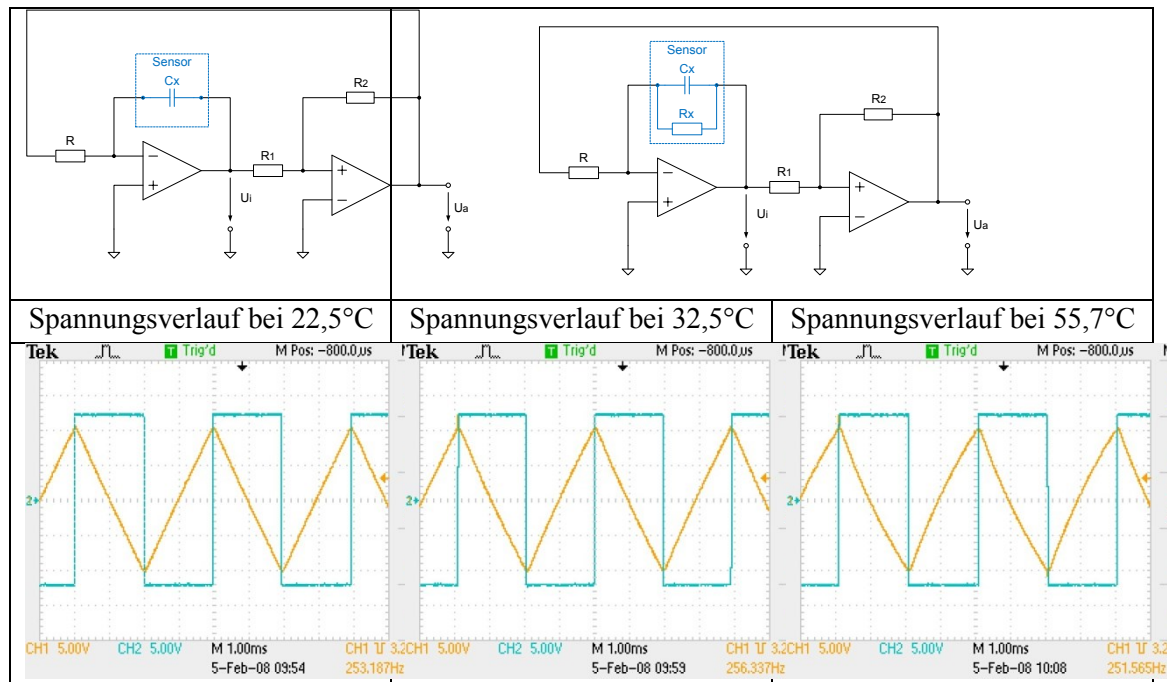


Bild 3.20: Vergleich der Spannungsverläufe bei unterschiedlichen Leitfähigkeiten

Bei höheren Leitfähigkeiten erreicht die Integratorausgangsspannung nicht mehr die Umschaltsschwellen des Schmitt-Triggers. Diese Grenze liegt für den aktuellen CapHSens[®] Sensor bei ca. 30.000 pS/m und kann über das Widerstandsverhältnis R_1/R_2 sowie über R_3 angepasst werden.

3.6 Reduktion von Messabweichungen durch die Sensorelektronik

Die realen Eingangswiderstände von Operationsverstärkern bewirken den Eingangsruhestrom

$$I_R = \left| \frac{I_p + I_n}{2} \right| \quad (3.54)$$

und den Offsetstrom:

$$I_0 = |I_p - I_n| \quad (3.55)$$

Bild 3.21 zeigt ein Ersatzschaltbild eines realen Operationsverstärkers.

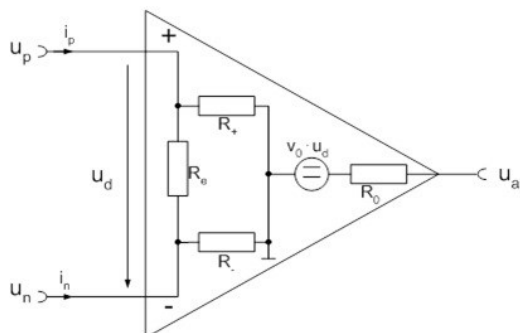


Bild 3.21: Ersatzschaltbild eines realen OPs

Die Eingangsströme bewirken in der Sensorelektronik eine Verschiebung des Tastverhältnisses des Rechtecksignals u_a . Die Frequenz wird dagegen nicht verändert. Da jeweils über eine Periode oder ein ganzzahliges Vielfaches einer Periode von u_i gemessen wird, wirken sich die Eingangsruhe- und Offsetströme nicht auf das Messergebnis aus. Voraussetzung ist jedoch, dass der Eingangsruhestrom kleiner ist als der Messstrom durch den Sensorwiderstand R_x . Dieses ist ein Auswahlkriterium des Operationsverstärkers. Bild 3.22 zeigt die Integratorausgangsspannung mit und ohne Fehlerströme.

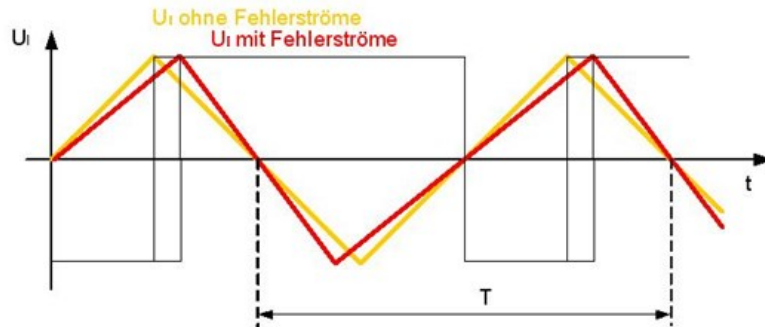


Bild 3.22: Auswirkungen der Fehlerströme auf die Integratorspannung

Durch die Eingangs-Offset-Spannung werden in der analogen Sensorelektronik die Schwellen verschoben, die gemessene Frequenz des Ausgangssignals wird jedoch nicht verändert. Die zu messenden Sensorkapazitäten und Kapazitätsänderungen sind sehr klein. Im Vorgriff auf nachfolgende Kapitel 4 wird daher die Auswirkung parasitärer Kapazitäten diskutiert. In Bild 3.23 sind die parasitären Kapazitäten in die analoge Sensorelektronik eingetragen, Bild 3.24 zeigt die gleichen parasitären Kapazitäten in der Basissensoranordnung.

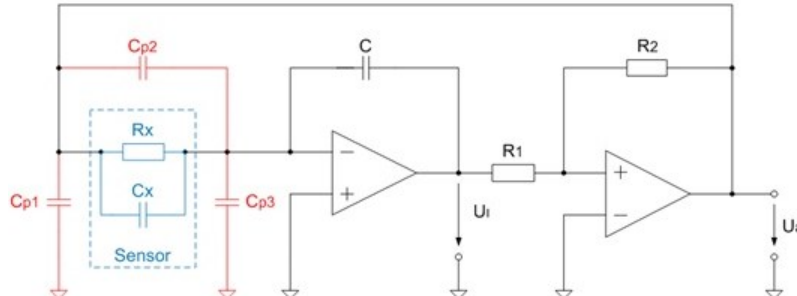


Bild 3.23: Messschaltung mit parasitären Kapazitäten

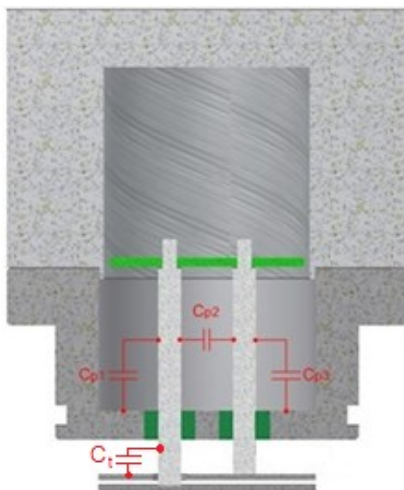


Bild 3.24: Parasitäre Kapazitäten in der Sensoranordnung [62]

Die Kapazität C_{P1} liegt parallel zum Ausgang des Schmitt-Triggers und hat keinen negativen Einfluss auf die Schaltung. C_{P2} liegt parallel zur Sensorkapazität C_X . Zur Reduktion von C_{P2} wird ein Schirm eingefügt und damit die Kapazität C_{P2} den Kapazitäten C_{P1} und C_{P3} zugeordnet. C_{P3} liegt wiederum zwischen der virtuellen Masse am invertierten Eingang des Operationsverstärkers und Masse. Es fällt also keine Spannung über C_{P3} ab, C_{P3} ist daher vernachlässigbar. Die Bild 3.25 und Bild 3.26 zeigen die modifizierte Schaltung bzw. die praktische Realisierung im Basissensor. Auf der Platine wird dasselbe Schirmkonzept umgesetzt.

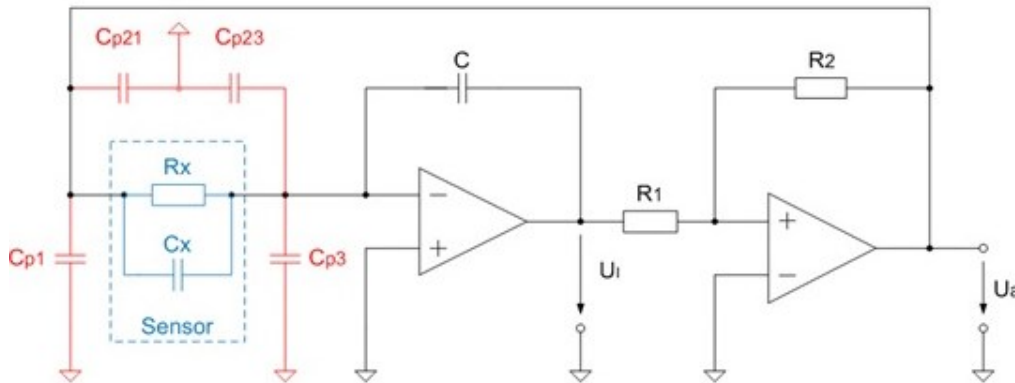


Bild 3.25: modifizierte Messschaltung mit parasitären Kapazitäten

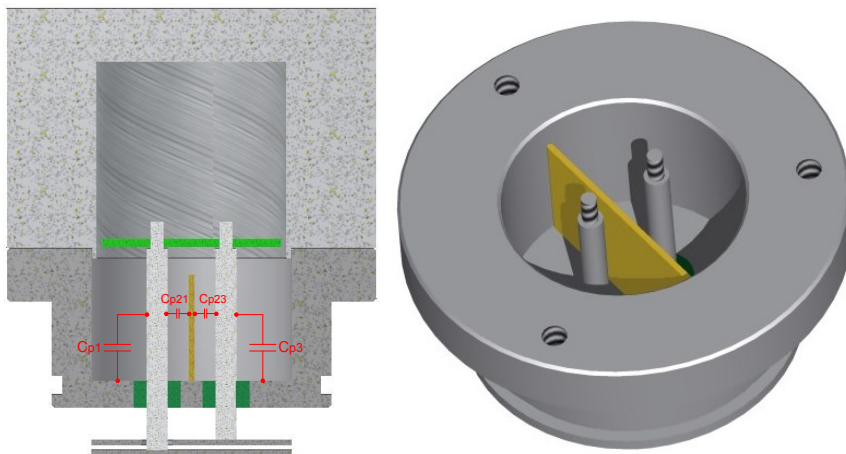


Bild 3.26: praktische Realisierung des Schirms im Basissensor [62]

Eine Restleitfähigkeit der Isolierteile der Glasdurchführung kann in Bild 3.26 durch parallele Widerstände zu C_{P1} und C_{P2} modelliert werden. Sie wirken sich ebenso wie die parasitären Kapazitäten nicht auf das Messergebnis aus. Beispielhaft ist in Bild 3.26 eine Teilkapazität C_t des Basissensors eingezeichnet. Die Gesamtkapazität des Basissensor C_X bzw. die Zellkonstante k_Z wird durch eine Kalibrierungsmessung, wie in Abschnitt 5.2 beschrieben, festgelegt.

Zur Vermeidung von Polarisierungseffekten sind mittelwertfreie Testsignale erforderlich mit denen der Basissensor beaufschlagt wird. Es werden Rail-To-Rail Operationsverstärker mit symmetrischer Versorgungsspannung verwendet. Eine verbesserte Symmetrierung kann über einen Spannungsteiler mit zwei gleichen Widerständen zwischen den Versorgungsspannungen erreicht werden. Dessen Mittelabgriff dient als Bezugspotential des Relaxationsoszillators. Da die Ausgangsspannung des Schmitt-Triggers den Versorgungsspannungen der Rail-To-Rail Operationsverstärker entspricht, ist das auf den Basissensor geschaltete Testsignal bei gleichen Widerständen R_s (siehe Bild 3.27).

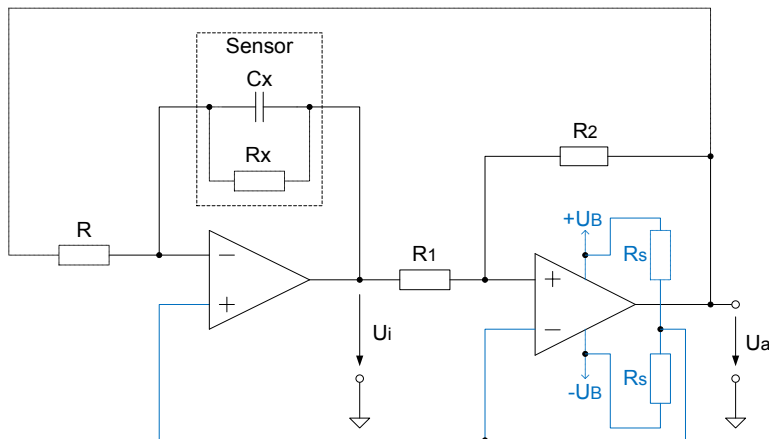


Bild 3.27: Symetrische Masse am Beispiel des CapHSens® Sensors

3.7 Temperatursensor

Die Messgrößen elektrische Leitfähigkeit κ und Dielektrizitätszahl ε_r sind temperaturabhängig. Zur Realisierung einer Temperaturmessung soll wegen der gewünschten hohen Genauigkeit der Temperaturmessung ein PT100 Messfühler Klasse A eingesetzt werden. Die folgende Abbildung zeigt die idealisierte Kennlinie eines PT100 in Abhängigkeit der Temperatur.

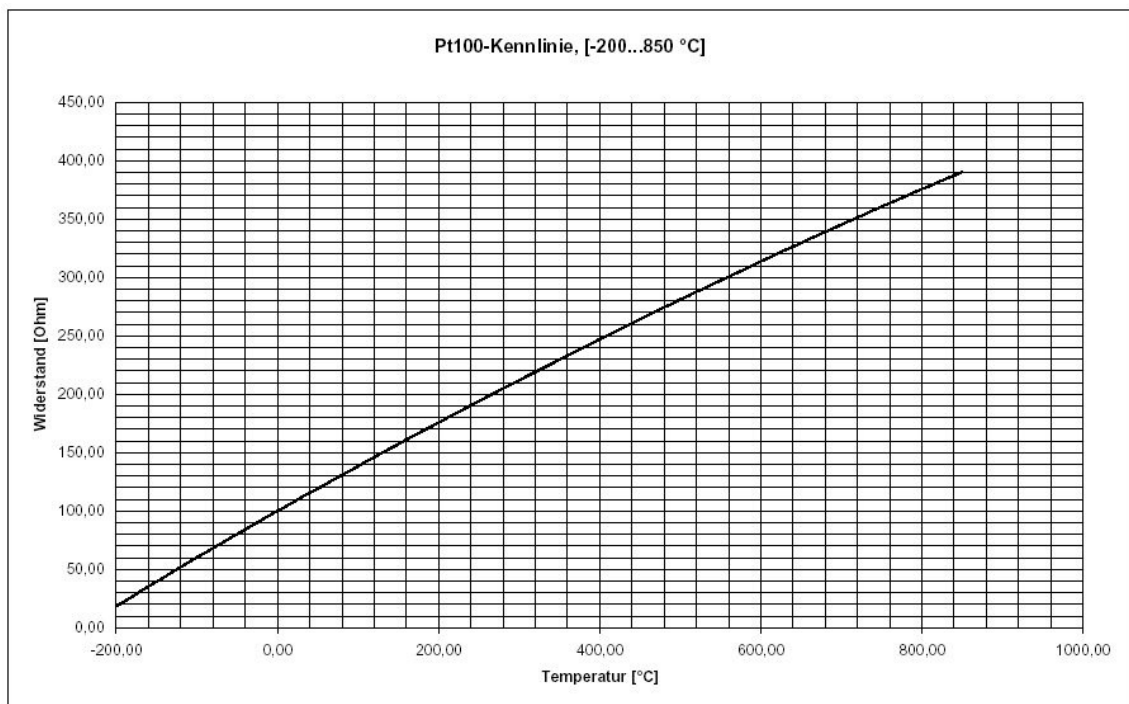


Bild 3.28: Kennlinie des PT100-Temperaturfühlers [65]

Der Zusammenhang zwischen Temperatur und Widerstandswert wird gemäß DIN EN 60 751 [66] durch ein Polynom beschrieben. Die Temperaturmesselektronik beruht auf einer Konstantstromquelle und Vierleiteranschlusstechnik des Temperatursensors (siehe Bild 3.29).

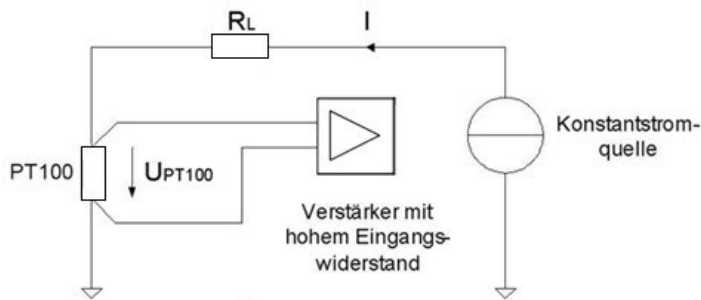


Bild 3.29: Prinzipbild der Vierleitermessschaltung

Die Realisierung der Konstantstromquelle zeigt Bild 3.30.

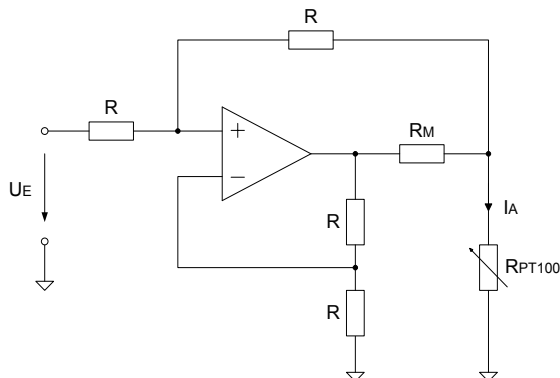


Bild 3.30: spannungsgesteuerte Stromquelle

Unter der Voraussetzung, dass die Rückkopplungswiderstände sehr viel hochohmiger sind als der Strommesswiderstand R_M gilt:

$$I_A = \frac{U_E}{R_M} \quad (3.56)$$

Als Messverstärker wird ein Instrumentierungsverstärker eingesetzt (siehe Bild 3.31).

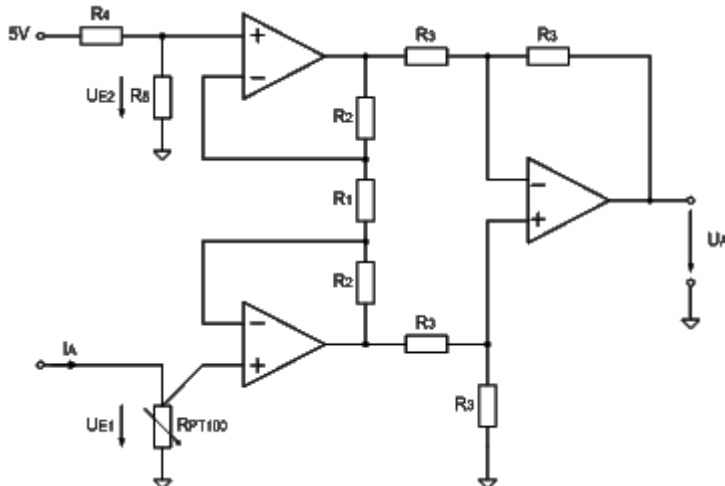


Bild 3.31: Instrumentierungsverstärker

Der aus den Widerständen R_4 und R_5 aufgebaute Spannungsteiler ist so dimensioniert, dass bei einer Temperatur von -20°C am Ausgang eine Spannung U_A von 0 V anliegt. Die Verstärkung des Instrumentierungsverstärkers beträgt:

$$U_A = (U_{E1} - U_{E2}) \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{R_2}{R_1}\right) \quad (3.57)$$

Die verstärkte PT100-Spannung wird dem AD-Wandler des Mikrocontrollers zugeführt.

3.8 Selbstlernende adaptive Temperaturkompensation

Die gemessenen elektrischen Leitfähigkeits- und Dielektrizitätszahlwerte sind von der jeweiligen Öltemperatur abhängig. Diese Temperaturabhängigkeiten sind sowohl vom Öl, aber insbesondere auch von dessen Verschmutzung abhängig. Die Art der Verschmutzung und deren Temperaturabhängigkeit können nicht als bekannt vorausgesetzt werden. Zur Verbesserung der Vergleichbarkeit der Messwerte soll daher im Rahmen dieser Arbeit ein selbstlernender, adaptiver Temperaturkompensationsalgorithmus entwickelt werden. In Bild 3.32 sind beispielhaft die Änderung der elektrischen Leitfähigkeit und der Temperatur während einer Messreihe dargestellt.

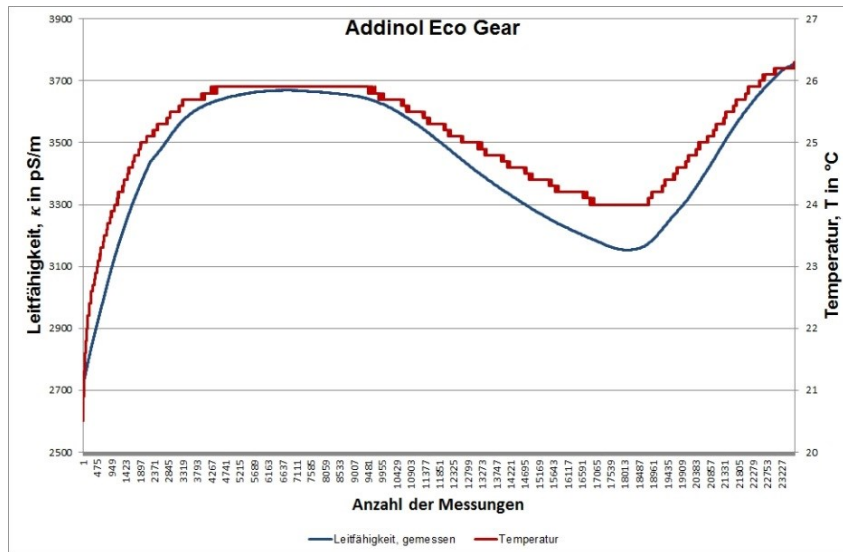


Bild 3.32: Leitfähigkeit κ in Abhängigkeit von der Temperatur T

Bild 3.33 zeigt die gemessene Leitfähigkeit κ in Abhängigkeit der Temperatur ΔT . Bereits bei ca. 3°C Temperaturänderung verändert sich die Leitfähigkeit um ca. 25%. Zur Verbesserung der Vergleichbarkeit der gemessenen Werte sollen die Messwerte der elektrischen Leitfähigkeit und der Dielektrizitätszahl auf eine Referenztemperatur T_0 bezogen werden. T_0 soll möglichst in der Nähe der Betriebstemperatur der Öle liegen und wird auf 40°C festgelegt.

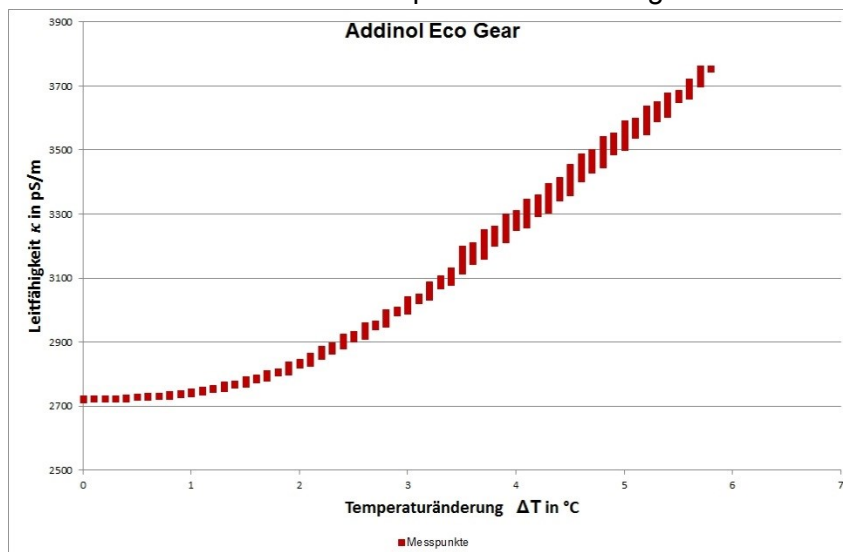


Bild 3.33: Temperaturabhängigkeit der Leitfähigkeit κ

Die Berechnung der elektrischen Leitfähigkeit und der Dielektrizitätszahl bei der Referenztemperatur kann über ein für die Temperaturabhängigkeit approximierendes Polynom der Form

$$\kappa_i = \kappa_{T_0} + a\Delta T_i + b\Delta T_i^2 + c\Delta T_i^3 \quad (3.58)$$

erfolgen. κ_{T_0} ist die angenäherte elektrische Leitfähigkeit des Öles bei der Referenztemperatur T_0 , κ_i ist der nicht temperaturkompensierte Messwert der elektrischen Leitfähigkeit, a , b und c sind die adaptiv zu bestimmenden Koeffizienten des approximierenden Polynoms,

$$\Delta T_i = T_0 - T_i \quad (3.59)$$

ist die Temperaturdifferenz. Die Annäherung durch ein Polynom dritten Grades gewährleistet eine gute Annäherung bei vertretbar geringem Rechenaufwand für den eingesetzten Mikrorechner. Für die Bestimmung der Koeffizienten des Polynoms wird auf der Basis der Gaußschen Methode der kleinsten Fehlerquadrate aus den N Messwertepaaren und dem approximierenden Polynom eine Risikofunktion definiert, deren Minimierung eine Bestimmung der gesuchten Koeffizienten ermöglicht. Bild 3.34 zeigt die prinzipielle Methode.

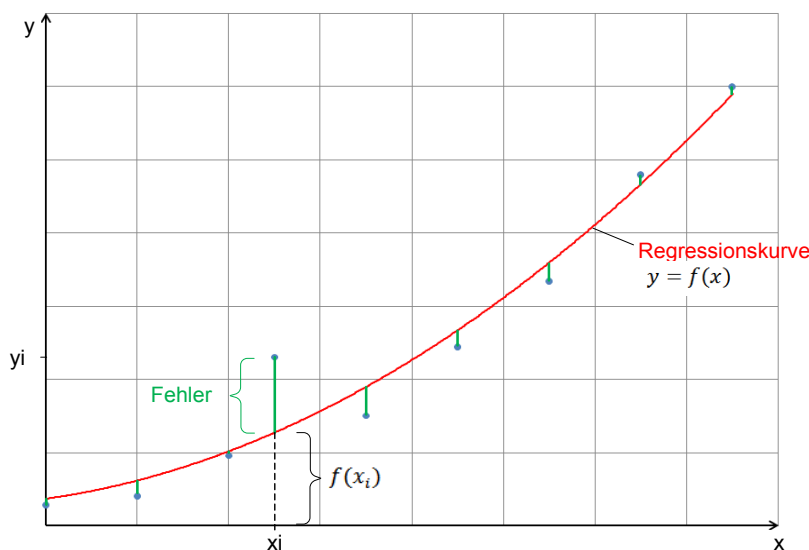


Bild 3.34: zum Gaußschen Least Square Verfahren

Gegeben sind n Wertepaare, deren Zusammenhang durch eine Regressionskurve beschrieben werden soll. Dazu wird die quadratische Summe aller (vertikalen) Abstandsqadrate zwischen den gemessenen Werten y_i und dem approximierenden Polynom $f(x_i)$ gebildet. Diese Summe

$$R_i = \sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i))^2 \quad (3.60)$$

wird als Risikofunktion R_i bezeichnet. Die Annäherung ist optimal, wenn die Risikofunktion ein Minimum annimmt.

$$R_i(a, b, \dots) = \sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i))^2 \rightarrow \text{Minimum} \quad (3.61)$$

Dies ist genau dann der Fall, wenn die partiellen Ableitungen der Risikofunktion nach den Polynomkoeffizienten verschwinden:

$$\frac{\partial R_i}{\partial a} = 0, \quad \frac{\partial R_i}{\partial b} = 0, \quad \dots \quad (3.62)$$

Für ein Polynom N-ten Grades liefert diese Beziehung ein Gleichungssystem mit N+1 Gleichungen für die N+1 unbekannten Polynomkoeffizienten, welche eindeutig bestimmt werden können.

Dieses Verfahren soll auf die adaptive Temperaturkompensation angewendet werden. Die Risikofunktion als Maß für die Summe der quadratischen Abweichungen wird:

$$R_i = \sum_{i=1}^N \left(\kappa_{T0} - \kappa_{T0a} - \kappa_m (a \Delta T_i - b \Delta T_i^2 - c \Delta T_i^3) \right)^2 \quad (3.63)$$

Für die Minimierung der Risikofunktion werden deren partielle Ableitungen nach den drei Koeffizienten a, b und c berechnet und auf Null gesetzt.

$$\begin{aligned} \frac{\partial R_i}{\partial a} &= 0 = 2 \sum_{i=1}^N \left(\kappa_{T0} - \kappa_{T0a} - \kappa_m (a \Delta T_i - b \Delta T_i^2 - c \Delta T_i^3) \right) (-\Delta T_i) \\ \frac{\partial R_i}{\partial b} &= 0 = 2 \sum_{i=1}^N \left(\kappa_{T0} - \kappa_{T0a} - \kappa_m (a \Delta T_i - b \Delta T_i^2 - c \Delta T_i^3) \right) (-\Delta T_i^2) \\ \frac{\partial R_i}{\partial c} &= 0 = 2 \sum_{i=1}^N \left(\kappa_{T0} - \kappa_{T0a} - \kappa_m (a \Delta T_i - b \Delta T_i^2 - c \Delta T_i^3) \right) (-\Delta T_i^3) \end{aligned} \quad (3.64)$$

Es ergeben sich drei linear unabhängige Gleichungen für die drei gesuchten Koeffizienten

$$\begin{aligned} 0 &= \sum_{i=1}^N \left((\kappa_{T0} - \kappa_{T0a}) \Delta T_i - \kappa_m (a \Delta T_i^2 - b \Delta T_i^3 - c \Delta T_i^4) \right) \\ 0 &= \sum_{i=1}^N \left((\kappa_{T0} - \kappa_{T0a}) \Delta T_i^2 - \kappa_m (a \Delta T_i^3 - b \Delta T_i^4 - c \Delta T_i^5) \right) \\ 0 &= \sum_{i=1}^N \left((\kappa_{T0} - \kappa_{T0a}) \Delta T_i^3 - \kappa_m (a \Delta T_i^4 - b \Delta T_i^5 - c \Delta T_i^6) \right) \end{aligned} \quad (3.65)$$

oder in Matrixschreibweise:

$$\begin{pmatrix} \kappa_m \sum_{i=1}^N \Delta T_i^2 & \kappa_m \sum_{i=1}^N \Delta T_i^3 & \kappa_m \sum_{i=1}^N \Delta T_i^4 \\ \kappa_m \sum_{i=1}^N \Delta T_i^3 & \kappa_m \sum_{i=1}^N \Delta T_i^4 & \kappa_m \sum_{i=1}^N \Delta T_i^5 \\ \kappa_m \sum_{i=1}^N \Delta T_i^4 & \kappa_m \sum_{i=1}^N \Delta T_i^5 & \kappa_m \sum_{i=1}^N \Delta T_i^6 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^N (\kappa_{T0} - \kappa_{T0a}) \Delta T_i \\ \sum_{i=1}^N (\kappa_{T0} - \kappa_{T0a}) \Delta T_i^2 \\ \sum_{i=1}^N (\kappa_{T0} - \kappa_{T0a}) \Delta T_i^3 \end{pmatrix} \quad (3.66)$$

Hieraus lassen sich die drei gesuchten Koeffizienten z.B. mit Hilfe der Cramerschen Regel bestimmen:

$$a = \frac{D_1}{D}; \quad b = \frac{D_2}{D}; \quad c = \frac{D_3}{D} \quad (3.67)$$

mit der Determinante

$$D = \begin{vmatrix} \kappa_m \sum_{i=1}^N \Delta T_i^2 & \kappa_m \sum_{i=1}^N \Delta T_i^3 & \kappa_m \sum_{i=1}^N \Delta T_i^4 \\ \kappa_m \sum_{i=1}^N \Delta T_i^3 & \kappa_m \sum_{i=1}^N \Delta T_i^4 & \kappa_m \sum_{i=1}^N \Delta T_i^5 \\ \kappa_m \sum_{i=1}^N \Delta T_i^4 & \kappa_m \sum_{i=1}^N \Delta T_i^5 & \kappa_m \sum_{i=1}^N \Delta T_i^6 \end{vmatrix} \quad (3.68)$$

Die Determinanten D_1 , D_2 und D_3 ergeben sich aus der Determinante D durch das Austauschen der Elemente der i-ten Spalte durch den Lösungsvektor auf der rechten Seite des Gleichungssystems.

Bild 3.35 demonstriert die Wirkung der Temperaturkompensation.

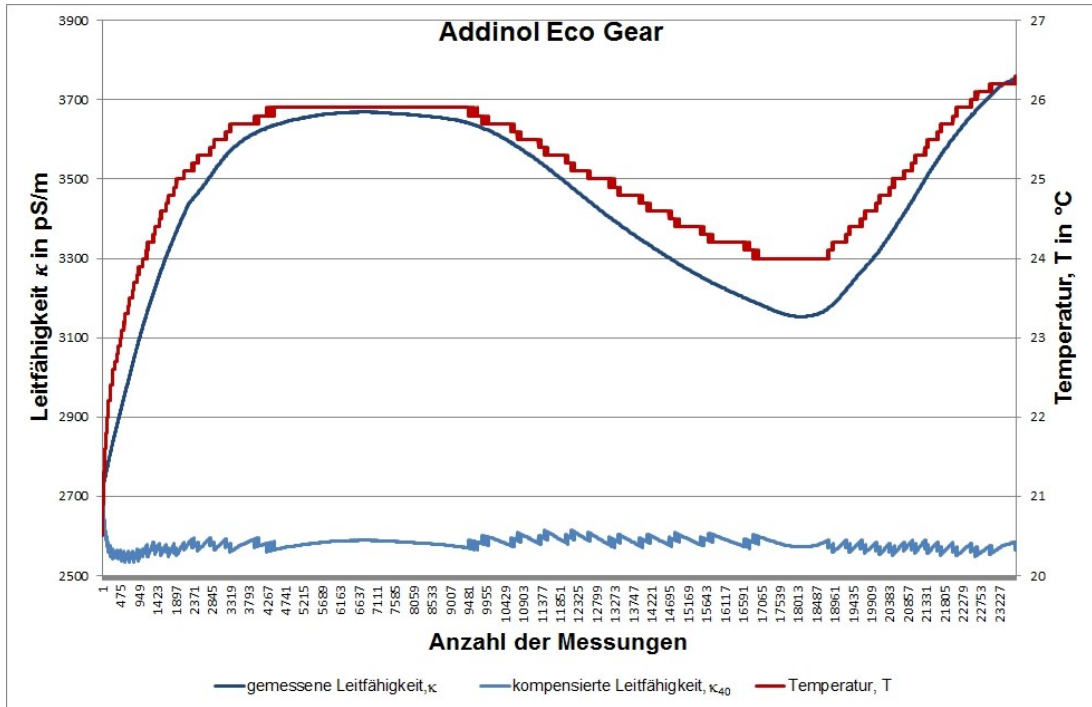


Bild 3.35: Temperaturkompensation

Der dargestellte Temperaturverlauf zeigt die begrenzte Digitalisierungsaufösung der Temperaturenaufösung von ca. 0,1 °C. Bei einer Optimierung des Sensorsystems soll die Temperaturenaufösung verbessert werden.

Bei geringer Temperaturdynamik und starken Ölqualitätsänderungen kann die Temperaturkompensation vorteilhaft durch eine zeitliche Gewichtung vergangener Messwerte ergänzt werden. Mit der exponentiellen Gewichtungsfunktion $e^{-\lambda t}$ und der vorgebbaren Halbwertszeit t_h mit

$$0,5 = e^{-t_h \cdot \lambda} \quad (3.69)$$

errechnet sich:

$$\lambda = \frac{\ln(2)}{t_h} \quad (3.70)$$

kann die Risikofunktion als

$$R(\kappa_{40}, a, b) = \sum_{i=1}^m (\kappa_i - f(\Delta T_i) \cdot e^{-(t_i \cdot \ln(2)/th)})^2 \quad (3.71)$$

definiert werden, die praktischen Ergebnisse zeigten, daß ein Polynom zweiten Grades zur Approximation der Temperaturabhängigkeit ausreicht:

$$R(\kappa_{40}, a, b) = \sum_{i=1}^m (\kappa_i \cdot e^{-(t_i \cdot \ln(2)/th)} - \kappa_{40} \cdot e^{-(t_i \cdot \ln(2)/th)} - a \Delta T_i \cdot e^{-(t_i \cdot \ln(2)/th)} - b \Delta T_i^2 \cdot e^{-(t_i \cdot \ln(2)/th)})^2 \quad (3.72)$$

Mit dem Nullsetzen der partiellen Ableitungen

$$\frac{\partial R}{\partial \kappa_{40}} = 2 \sum_{i=1}^m (\kappa_i \cdot e^{-(t_i \cdot \ln(2)/th)} - \kappa_{40} \cdot e^{-(t_i \cdot \ln(2)/th)} - a \Delta T_i \cdot e^{-(t_i \cdot \ln(2)/th)} - b \Delta T_i^2 \cdot e^{-(t_i \cdot \ln(2)/th)}) (-e^{-(t_i \cdot \ln(2)/th)}) = 0$$

$$\frac{\partial R}{\partial a} = 2 \sum_{i=1}^m (\kappa_i \cdot e^{-(t_i \cdot \ln(2)/th)} - \kappa_{40} \cdot e^{-(t_i \cdot \ln(2)/th)} - a \Delta T_i \cdot e^{-(t_i \cdot \ln(2)/th)} - b \Delta T_i^2 \cdot e^{-(t_i \cdot \ln(2)/th)}) (-\Delta T_i \cdot e^{-(t_i \cdot \ln(2)/th)}) = 0$$

$$\frac{\partial R}{\partial b} = 2 \sum_{i=1}^m (\kappa_i \cdot e^{-(t_i \cdot \ln(2)/th)} - \kappa_{40} \cdot e^{-(t_i \cdot \ln(2)/th)} - a \Delta T_i \cdot e^{-(t_i \cdot \ln(2)/th)} - b \Delta T_i^2 \cdot e^{-(t_i \cdot \ln(2)/th)}) (-\Delta T_i^2 \cdot e^{-(t_i \cdot \ln(2)/th)}) = 0$$

wird

$$\sum_{i=1}^m (\kappa_i \cdot e^{-2(t_i \cdot \ln(2)/th)}) = \sum_{i=1}^m (\kappa_{40} \cdot e^{-2(t_i \cdot \ln(2)/th)} + a \Delta T_i \cdot e^{-2(t_i \cdot \ln(2)/th)} + b \Delta T_i^2 \cdot e^{-2(t_i \cdot \ln(2)/th)})$$

$$\sum_{i=1}^m (\kappa_i \cdot \Delta T_i \cdot e^{-2(t_i \cdot \ln(2)/th)}) = \sum_{i=1}^m (\kappa_{40} \cdot \Delta T_i \cdot e^{-2(t_i \cdot \ln(2)/th)} + a \Delta T_i^2 \cdot e^{-2(t_i \cdot \ln(2)/th)} + b \Delta T_i^3 \cdot e^{-2(t_i \cdot \ln(2)/th)})$$

$$\sum_{i=1}^m (\kappa_i \cdot \Delta T_i^2 \cdot e^{-2(t_i \cdot \ln(2)/th)}) = \sum_{i=1}^m (\kappa_{40} \cdot \Delta T_i^2 \cdot e^{-2(t_i \cdot \ln(2)/th)} + a \Delta T_i^3 \cdot e^{-2(t_i \cdot \ln(2)/th)} + b \Delta T_i^4 \cdot e^{-2(t_i \cdot \ln(2)/th)})$$

oder in Matrixform:

$$\begin{pmatrix} \sum_{i=1}^m (e^{-2(t_i \cdot \ln(2)/th)}) & \sum_{i=1}^m (\Delta T_i \cdot e^{-2(t_i \cdot \ln(2)/th)}) & \sum_{i=1}^m (\Delta T_i^2 \cdot e^{-2(t_i \cdot \ln(2)/th)}) \\ \sum_{i=1}^m (\Delta T_i \cdot e^{-2(t_i \cdot \ln(2)/th)}) & \sum_{i=1}^m (\Delta T_i^2 \cdot e^{-2(t_i \cdot \ln(2)/th)}) & \sum_{i=1}^m (\Delta T_i^3 \cdot e^{-2(t_i \cdot \ln(2)/th)}) \\ \sum_{i=1}^m (\Delta T_i^2 \cdot e^{-2(t_i \cdot \ln(2)/th)}) & \sum_{i=1}^m (\Delta T_i^3 \cdot e^{-2(t_i \cdot \ln(2)/th)}) & \sum_{i=1}^m (\Delta T_i^4 \cdot e^{-2(t_i \cdot \ln(2)/th)}) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \kappa_{40} \\ a \\ b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^m (\kappa_i \cdot e^{-2(t_i \cdot \ln(2)/th)}) \\ \sum_{i=1}^m (\kappa_i \cdot \Delta T_i \cdot e^{-2(t_i \cdot \ln(2)/th)}) \\ \sum_{i=1}^m (\kappa_i \cdot \Delta T_i^2 \cdot e^{-2(t_i \cdot \ln(2)/th)}) \end{pmatrix}$$

Hieraus wird wiederum κ_{40} errechnet.

Im Mikrocontroller wird die Exponentialfunktion durch Geradenabschnitte angenähert:

$$e(t) \approx \begin{cases} a_1 \cdot t + b_1 & \text{für } 0 \leq t < t_h \\ a_2 \cdot t + b_2 & \text{für } t_h \leq t < 2t_h \\ a_3 \cdot t + b_3 & \text{für } 2t_h \leq t < 3t_h \\ a_4 \cdot t + b_4 & \text{für } 3t_h \leq t < 4t_h \\ a_5 \cdot t + b_5 & \text{für } 4t_h \leq t < 6t_h \\ 0 & \text{für } t > 6t_h \end{cases} \quad (3.73)$$

Bild 3.36 zeigt die gewählte Approximation.

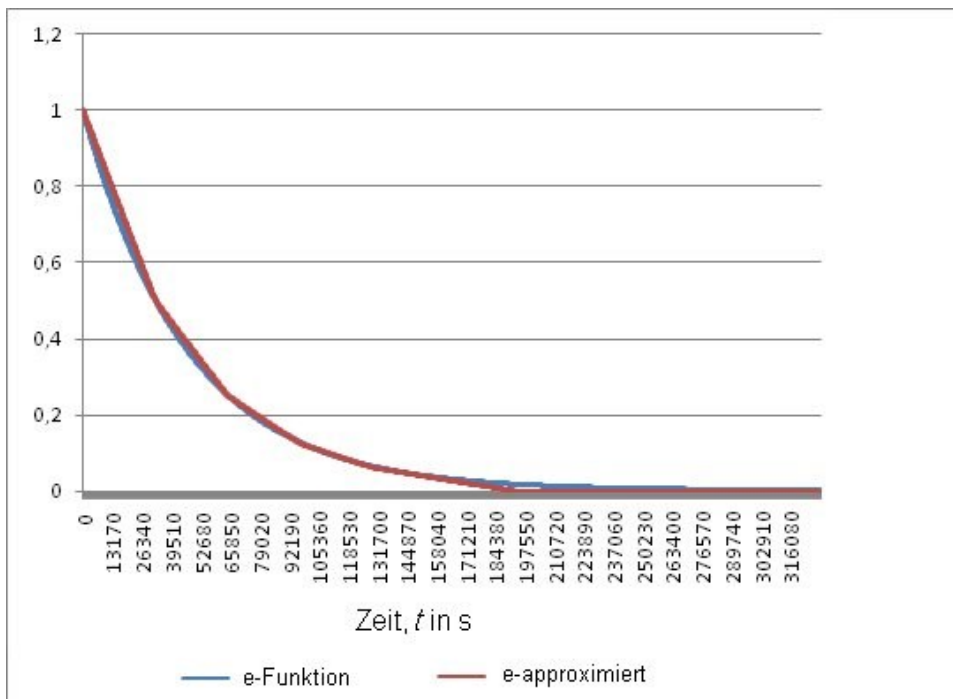


Bild 3.36: Approximation der Exponentialfunktion

Bild 3.37 zeigt die Testreihe mit gewichteten Exponentialfunktionen, Bild 3.38 die mit gewichteten approximierten Exponentialfunktionen.

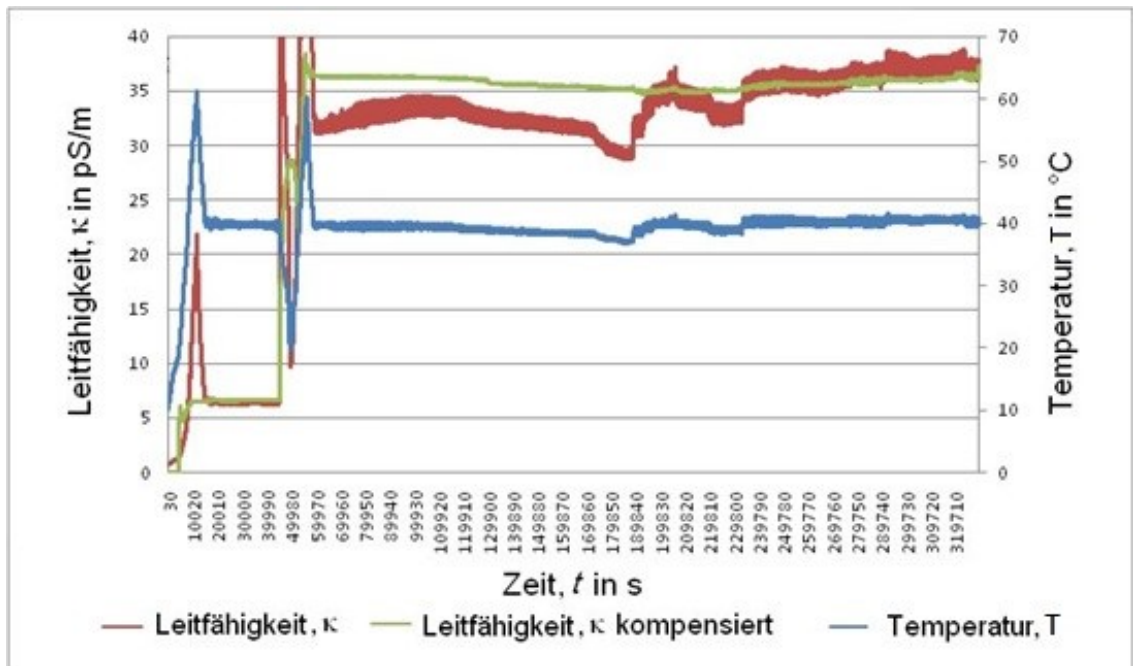


Bild 3.37: Testreihe mit gewichtender Exponentialfunktion

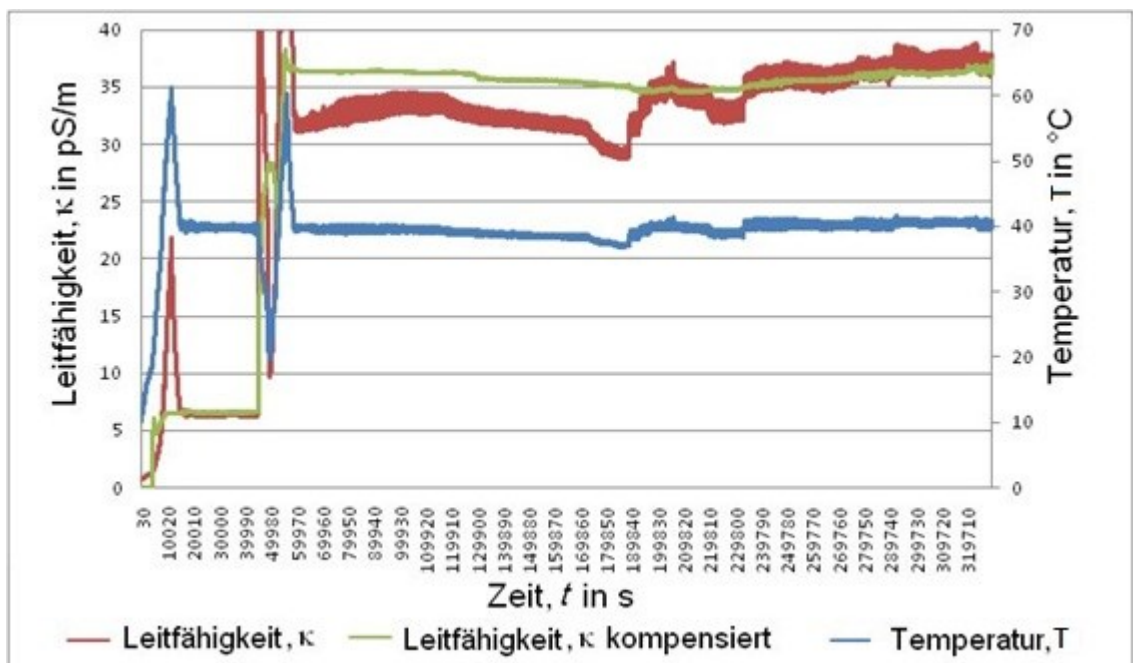


Bild 3.38: Testreihe mit gewichtender approximierter Exponentialfunktion

4. Praktische Realisierung

4.1 Sensorelektronik

Aus Gründen einer erhöhten elektromagnetischen Störunterdrückung wurde bei der Realisierung des Sensorsystems eine Trennung der analogen Sensorelektronik und der Digitalelektronik vorgenommen. Im Sensorgehäuse sind der Relaxationssoszillator mit Beschaltung und die Temperaturmessschaltung angeordnet. Die Spannungsversorgung sowie die zur Auswertung benötigte Digitalelektronik sind in der Auswerteeinheit enthalten. Ein Blockschaltbild der beiden Sensorsysteme ist in Bild 4.1 skizziert.

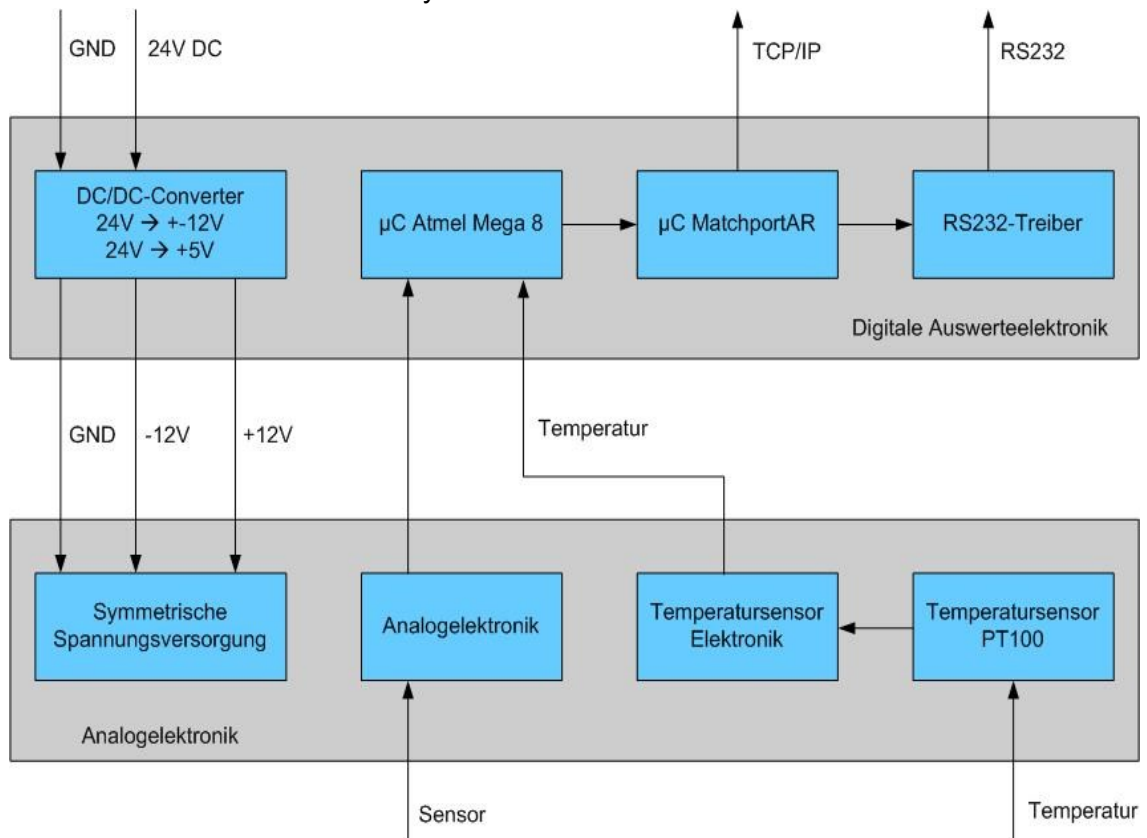


Bild 4.1: Blockschaltbild des OilQSens®

Die digitalen Auswerteelektronikschaltungen für den CapHSens® und den OilQSens® sind gleich.

Bei der Erstellung der Platinenlayouts wurde auf ein elektromagnetisch verträgliches Platindesign geachtet. Kurze Leitungen zu den Basissensoren, verteilte Masseflächen, Abblockkondensatoren sind weitere Maßnahmen zur Minimierung elektromagnetischer Beeinflussungen. Beispielhaft wird hier die Anordnung der Abblockkondensatoren erläutert. Bild 4.2 zeigt einen parallel zu Elektronikschaltung angeordneten Abblockkondensator mit parasitären Leitungsinduktivitäten. Bei hohen Frequenzen wird der Kondensator durch die proportional zur Frequenz steigende Impedanz der Zuleitungen wirkungslos.

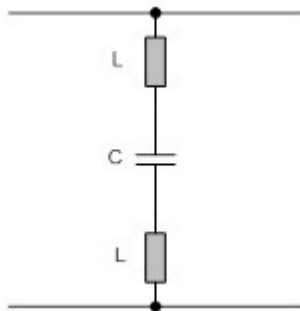


Bild 4.2: Kondensator mit parasitären Zuleitungsinduktivitäten

Bei einer geeigneten, in Bild 4.3 dargestellten, Leiterbahnführung unterstützen dagegen die Zuleitungsinduktivitäten zum Abblockkondensator die beabsichtigte Filterwirkung zur Erhöhung der Störfestigkeit und Reduktion der elektromagnetischen Störaussendung.

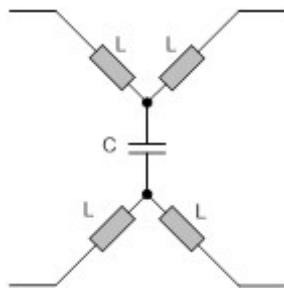


Bild 4.3: Kondensator mit verteilten parasitären Leitungsinduktivitäten

Die nachfolgenden Bilder zeigen Fotos der Platinenlayouts der analogen Sensorelektronik, der Auswerteelektronik und des realisierten Sensorsystems:

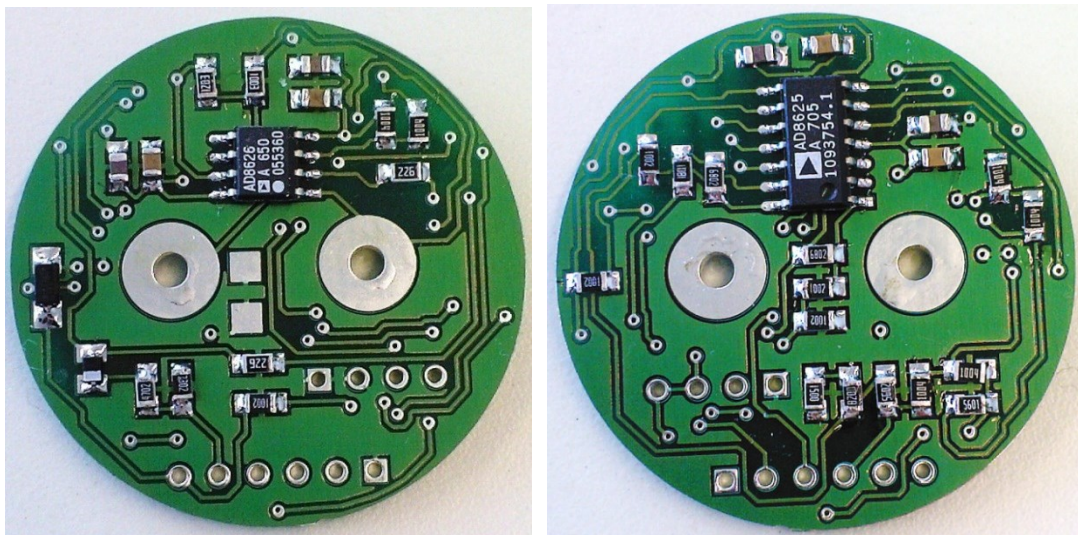


Bild 4.4: bestückte CapHSens[®] Analogplatine (links: Top, rechts: Bottom) [62]

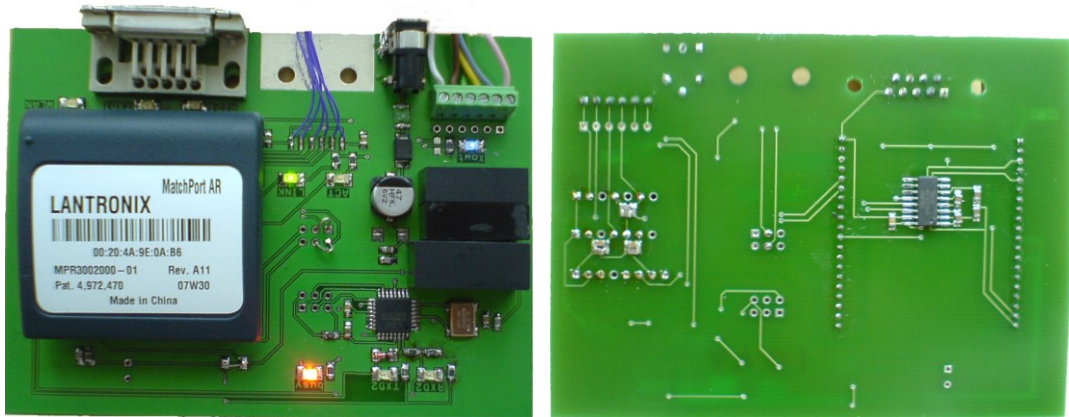


Bild 4.5: bestückte Auswerteelektronik Platine (links: Top, rechts: Bottom) [62]



Bild 4.6: Integration im Sensorgehäuse [62] Bild 4.7: Gesamtdarstellung des Sensorsystems [62]

Das Sensorsystem wurde erfolgreich auf elektromagnetische Verträglichkeit geprüft [67].

4.2 Basissensorrealisierung

In einer ersten Ausführungsform bestand das Basissensorsystem zur Leitfähigkeits- und Dielektrizitätszahlmessung aus zwei parallelen Elektrodenplatten, die sich in einer aus Edelstahl gefertigten Messkammer befanden (siehe Bild 4.8). Zwei jeweils als Glas/Metall Durchführungen realisierte Elektrodenträger tragen die ebenfalls aus Edelstahl gefertigten Sensorplatten. Auf der nicht medienberührenden Seite der Elektrodenträgerstifte der Glas/Metall-durchführungen, die sowohl die mechanische, als auch die elektrische Verbindung realisieren, ist die Elektronik befestigt. Der Abstand der Elektrodenplatten soll im Sinne einer großen Messkapazität C_x möglichst klein sein, aber erheblich größer, als die maximale Ausdehnung von Verschmutzungspartikeln oder Wassertropfchen. Dagegen soll die Elektrodenfläche möglichst groß sein. Mit der hochempfindlichen und genauen Sensorelektronik ist bei einem Plattenabstand $d = 1\text{mm}$, eine Fläche von $A = \frac{1444\text{mm}^2 \cdot \pi}{4}$ ausreichend. Eine Konstruktionszeichnung des Basissensors befindet sich im Anhang (8.4). Die Platten des Basissensors sind mittig in der Messkammer platziert, so dass eine günstige Anströmung des durchfließenden Mediums gewährleistet ist. Eine spezielle Ausrichtung der Sensorgehäuseteile ist bei dieser Konstruktion nicht erforderlich.

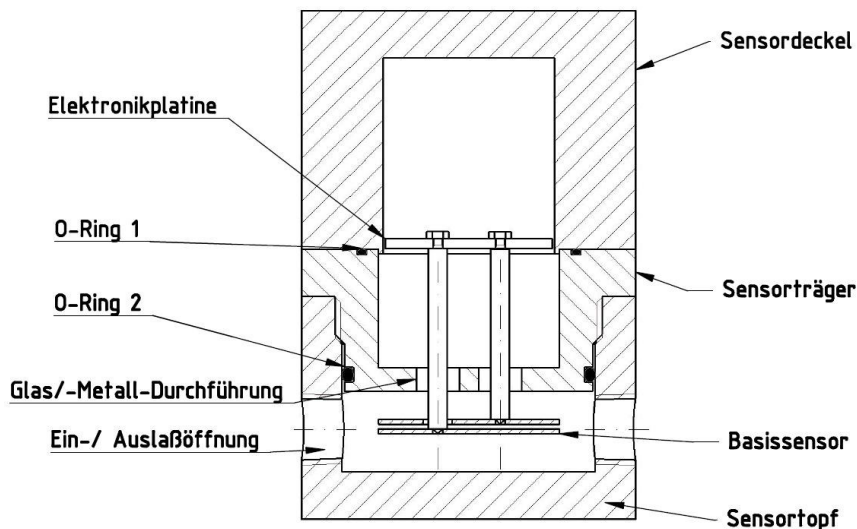


Bild 4.8: Konstruktionsskizze des Sensors

Bei der Entwicklung des Basissensors war zu berücksichtigen, dass die Leitfähigkeit elektrischer Durchführungen in gleichen Größenordnungen liegt, wie die elektrische Leitfähigkeit der zu messenden reinen Öle. Die Leitfähigkeiten der Durchführungen und Trägermaterialien dürfen allerdings nicht in das Messergebnis eingehen. In Abschnitt 3.6 wird erläutert, wie bei der geeigneten Sensorkonstruktion in Verbindung mit der präzisen Messelektronik die Leitfähigkeit und die Dielektrizitätszahl der Durchführungen und Trägermaterialien nicht gemessen werden. Bild 4.9 zeigt ein Foto der Glas/Metall-Durchführungen im Sensorgehäuse.



Bild 4.9: Sensorträger mit Glasdurchführung

Die Stifte der Glas/Metall-Durchführung sind aus Edelstahl Werkstoff Nr. 1.4523 (Sandvik 1802) ausgeführt. Dieses ist ein ferritischer nichtrostender, säurefester, mit Titan und Schwefel legierter Stahl. Der Wärmeausdehnungskoeffizient von Sandvik 1802 und des verarbeiteten Glases sind nahezu gleich. Dies gewährleistet sowohl beim Einschmelzen des Glases als auch beim Betrieb des Sensors eine langfristig stabile und sichere Durchführung. Der Wärmeausdehnungskoeffizient bei dem verwendeten Glas liegt bei $8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ und bei Sandvik 1802 bei $10 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Konstruktiv ist das Messkammervolumen durch die äußeren

Abmessungen der Sensorplatten und die notwendigen Bohrungen für die Ölschlüsse von $\frac{1}{4}$ " NPT vorgegeben. Das kleine Messkammervolumen von 38 ml begünstigt kurze Ansprechzeiten des Sensors. Bild 4.10 zeigt ein Foto der Messkammer, in Bild 4.11 wurde die Messkammer vom Sensor abgeschraubt. Die Glas/Metall-Durchführung ist für einen Druck bis 200bar und einen Temperaturbereich von -40 bis 200 °C ausgelegt.



Bild 4.10: Messkammer des Basissensors



Bild 4.11: Sensormechnik

Sämtliche Edelstahlteile sind elektropoliert. Durch diese elektrochemische Behandlung wird die metallische Oberfläche geebnet, wobei Rauigkeitsspitzen und Werkstoffkanten bevorzugt abgetragen werden und eine Verringerung der Rauheit erreicht. Dies führt zu geringeren Produktanhaftungen und Verschmutzungen aufgrund der verbesserten Rauigkeitswerte des Oberflächenprofils in der Messkammer, der ölberührenden Teile des Sensorträgers und der Sensorplatten.

Eine alternative Basissensorrealisierung ist eine planare Elektrodenanordnung. Sie wurde versuchsweise als eine gedruckte Gold-Platin-Legierung auf einem Keramiksubstrat hergestellt. Das Herstellungsverfahren entspricht der Dickschicht-Hybrid-Technik. Diese Elektrodenanordnung zeigt Bild 4.12.

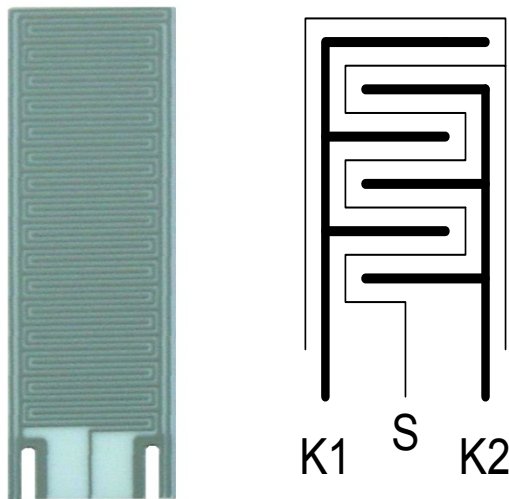


Bild 4.12: Photo und Prinzipskizze der planaren Elektrodenanordnung

Zwischen den beiden kammförmigen Elektroden K1 und K2 ist eine meanderförmige Schirmelektrode S angeordnet. Auf diese wird auf das gleiche, über einen Impedanzwandler getrennte, Spannungspotential wie auf einer der beiden Elektroden geschaltet. Durch die hierdurch geschaffenen Äquipotentialbereiche wird erreicht, dass Ablagerungen und Restleitfähigkeiten auf der Platine nicht mitgemessen werden. In Bild 4.13 ist ein Feldlinienbild der Elektrodenanordnung skizziert.

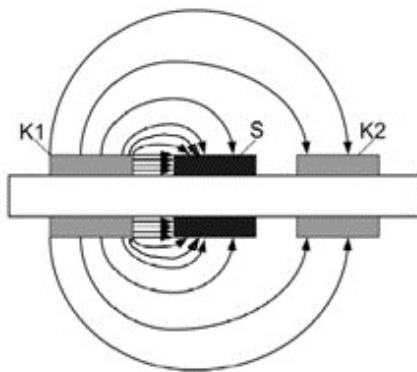


Bild 4.13: planare Elektrodenanordnung

Bei ersten Messreihen zeigte sich, dass bei der Zudosierung von Wasser, das nicht mehr im Öl gelöst werden kann, über einzelne Tropfen Kurzschlüsse zwischen den Elektroden auftreten können. Bei der planaren Elektrodenanordnung können zudem durch Schmutzablagerungen auf dem Keramiksubstrat gleiche Effekte auftreten. Aus diesen Gründen wurde der Plattenabstand verdoppelt. Zugleich wurde anstelle einer Zwei-Platten-Anordnung eine Drei-Platten-Anordnung realisiert. Wegen der geometrischen Ähnlichkeit der Sensorgeometrie (proportionale Vergrößerung von Plattenabstand und -fläche) kann auf eine Anpassung der realisierten Analogelektronik verzichtet werden. Die Zellkonstante bleibt unverändert. Bild 4.14 zeigt die Drei-Platten-Anordnung.

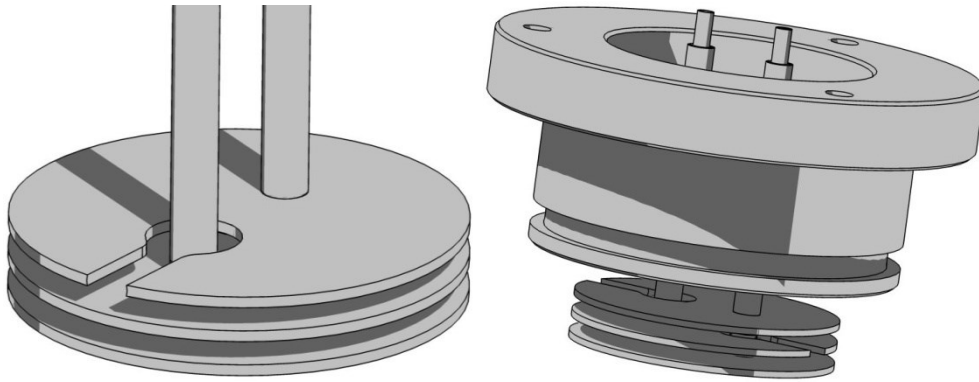


Bild 4.14: Basissensor mit Drei-Platten-Elektrodenanordnung [62]

Es würde den Rahmen der vorliegenden Arbeit überschreiten, die Zwei-Platten-Elektrodenanordnung und die planare Basissensorgeometrie noch weiter zu betrachten, doch stellen sie interessante Konzeptvarianten für die zukünftige Serienentwicklung dar. Bei den planaren Basissensoren ist allerdings zu beachten, dass der Keramikträger aufgrund starker äußerer mechanischer Schwingungen brechen kann. Ansonsten wird das Messergebnis durch mechanische Schwingungen wegen der in Bild 3.11 dargestellte Störunterdrückung das Messergebnis kaum beeinflussen.

5. Realisierung der Laborprüfaufbauten

5.1 Laborprüfstand für Öl

Für erste Tests der grundlegenden Sensorfunktionen wurde ein Laborprüfstand in Form einer Kreislaufanlage für Öle aufgebaut. Bild 5.1 zeigt das Fließschema.

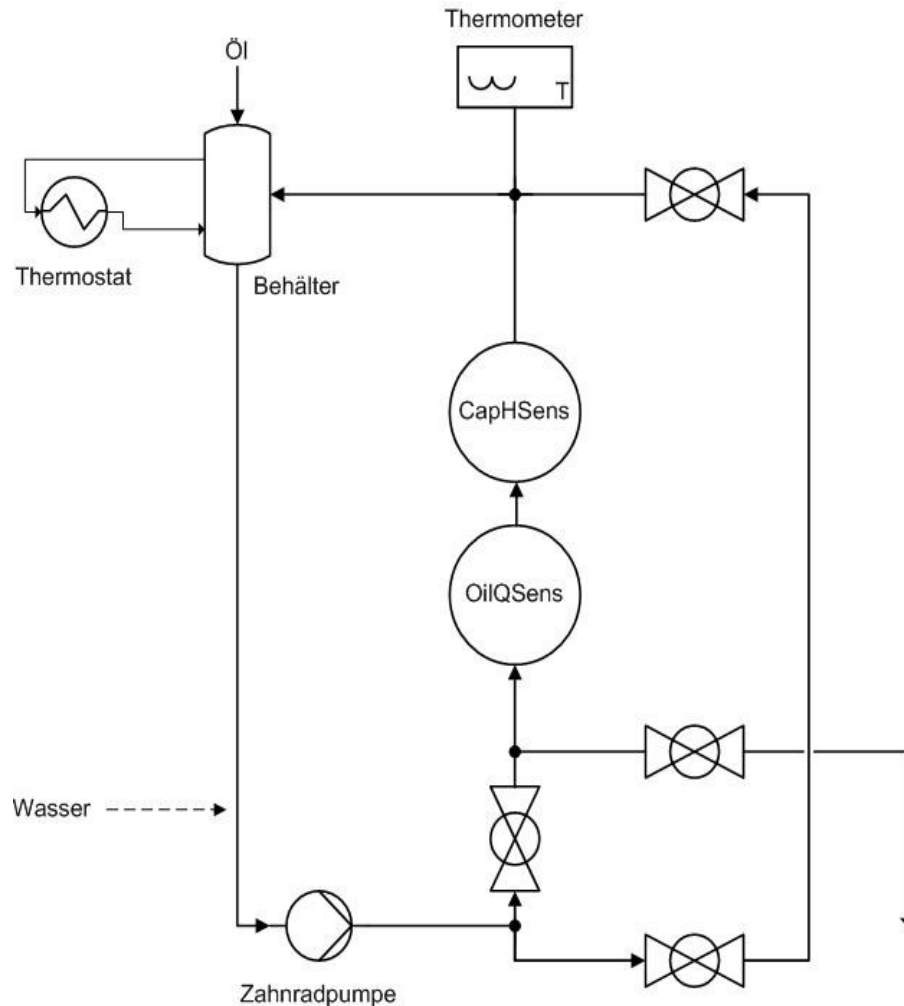


Bild 5.1: Skizze des Laborprüfaufbaus

Der beheizbare Ölkreislauf besitzt die Möglichkeit einer Wasserzudosierung. Das Öl wird über den Behälter in den Kreislauf eingebracht. Die Heizung erfolgt durch Triethylenglykol als Wärmeträger aus einem Thermostat. Unmittelbar am Behälterausgang können über ein Septum mit einer Spritze Wasser oder andere Zusatzstoffe zudosiert werden. Eine Zahnradpumpe befördert das Öl aus dem Behälter zu den Sensoren (Bild 5.1) und zurück in den Behälter. Bild 5.2 zeigt ein Foto des Laborprüfaufbaus mit den eingebauten Sensoren.



Bild 5.2: Foto des Laborprüfaufbaus [68]

Der erste Sensor nach der Pumpe ist der OilQSens[®]. Er misst die Temperatur T an der Glasdurchführung, die elektrische Leitfähigkeit κ und die Dielektrizitätszahl ϵ_r . Der nachgeschaltete CapHSens[®] misst die Dielektrizitätszahl ϵ_r und ebenfalls die Temperatur T .

Die Leitungen bestehen aus elektropolierten 6 mm Edelstahlrohren. Hierdurch wird die Mikrooberflächenrauigkeit und damit die Möglichkeit der Haftung von Wasser und Verschmutzungsstoffen an der Innenoberfläche vermindert. Zusätzlich wurde für Probeentnahmen, z. B. zur Säurezahlbestimmung, ein Ablasshahn eingebaut. Das Leitungsvolumen beträgt 26 ml; mit den Sensoren (2 x 38 ml) und der Pumpe wird ein Gesamtvolumen für den Kreislauf (ohne Bypass und Behälter) von 102 ml benötigt. Der Volumendurchfluss wird bei den Messungen auf ca. 83 ml pro Minute eingestellt (5 l/h).

5.2 Laborprüfstand für Gasfeuchte

Zur Kalibrierung der Sensoren und zur Qualifizierung des Feuchtesensors CapHSens[®] wurde ein zweiter Laborprüfstand zur Gasfeuchtemessung durch Umbau eines vorhandenen Gasfeuchteprüfstands realisiert. Der prinzipielle Aufbau ist in Bild 5.3 dargestellt.

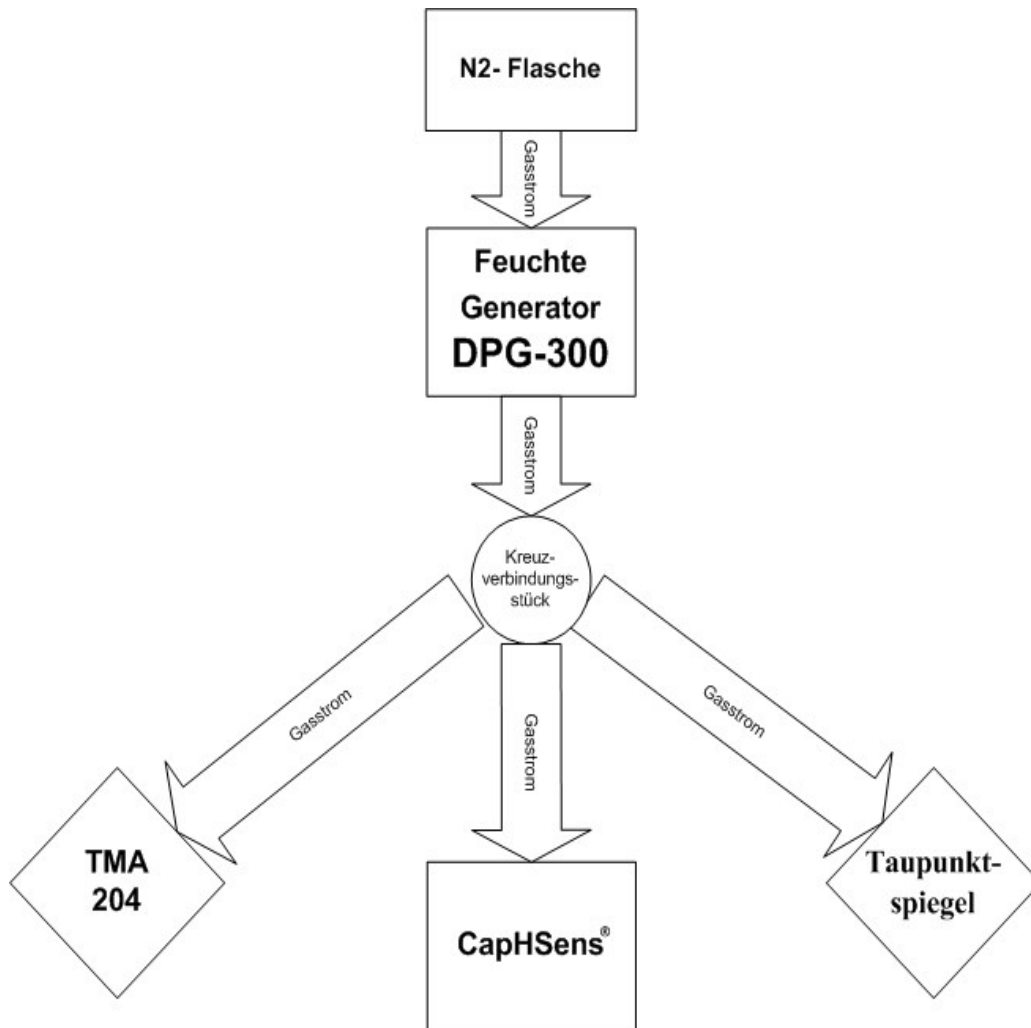


Bild 5.3: Prinzipskizze des Laboraufbaus zur Gasfeuchtemessung

Als Trägergas für den Prüfstand wird Stickstoff der Qualität 5.6 verwendet. Dieser Stickstoff hat eine Reinheit von 99,9996%, also eine Restverunreinigung kleiner 4 ppm und weniger als 1 ppm Wasser (Feuchte). Der Stickstoff wird in einem Feuchtegenerator (General Eastern DPG-300, [69]) kontrolliert mit Feuchte beaufschlagt. Damit können Feuchten im Bereich von 0,5 bis 16.000 ppm erzeugt werden. Über ein Kreuzverbindungsstück wird der Gasstrom drei Messgeräten zugeführt. Diese sind das realisierte CapHSens®, ein TMA 204 [70] Feuchtespurenmessgerät der Firma cmc Instruments GmbH und ein Taupunktspiegel des Typs 1311DR mit entsprechendem Monitor HYGRO M4 der Firma General Eastern [71]. Alle drei Messgeräte werden mit einem Gasfluss von je 20 l/h versorgt.

Am Feuchtespurenmessgerät TMA 204 wird der gemessene Feuchtwert in ppm pro Volumen angezeigt. Der Taupunktspiegel liefert die Taupunkttemperatur, die als ein direktes Maß für den Wassergehalt des Gases genutzt werden kann. Mithilfe einer Tabelle wird der zugehörige Feuchtwert in ppm pro Volumen umgerechnet. Mit dem CapHSens® wird die Dielektrizitätszahl des Gasstroms gemessen.

Bild 5.4 zeigt ein Blockschaltbild und Bild 5.5 ein Foto des realisierten Prüfaufbaus.

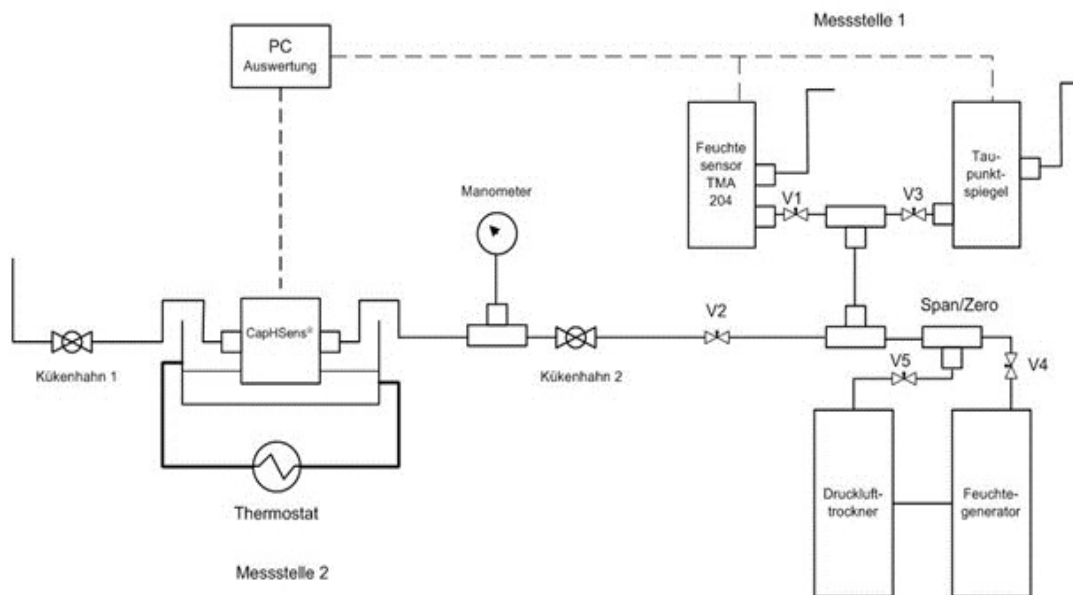


Bild 5.4: Prüfstand zur Gasfeuchtemessung



Bild 5.5: Foto des Prüfstands zur Gasfeuchtemessung

Alternativ kann die Vorgabe der Luftfeuchte über verschiedene Volumenverhältnisse von Wasserdampf- und Luftmolekülen durchgeführt werden. Die feuchte Luft wird dabei wiederum im Feuchtegenerator DPG-300 erzeugt. Dazu wird getrocknete Druckluft mit einem Restfeuchtegehalt kleiner 1,6 ppm als Eingangsluft für den Feuchtegenerator verwendet. Die „feuchte“ Luft wird vom Feuchtegenerator mittels eines T-Stücks mit der trockenen Luft gemischt und den Feuchtemessgeräten zugefügt.

Über ein weiteres, in Bild 5.4 nicht eingezeichnetes Dreiwegeventil kann der Benutzer unmittelbar zwischen trockener Luft vom Druckluftherzeuger und feuchter Luft vom Feuchtegenerator umschalten. Mit Hilfe eines Thermostates wird der CapHSens® auf konstanter Temperatur gehalten.

5.3 Getriebeprüfstand

Zur Durchführung von praktischen Getriebeölmessungen wurde auf einem Prüfstand der Universität Kaiserslautern am Lehrstuhl für Maschinenelemente und Getriebetechnik, parallel zu dort laufenden Lagerprüfungen, mit dem OilQSens® die elektrische Leitfähigkeit und die Dielektrizitätszahl gemessen. Die experimentellen Untersuchungen wurden mit einem als VarioGear bezeichneten Prüfgetriebe am Antriebsprüfstand durchgeführt. Bild 5.6 zeigt den prinzipiellen Aufbau des Prüfstands. Zwei in den Prüfzahnradern Z_p gelagerte Prüflager werden über jeweils zwei Belastungszahnräder Z_1 und Z_2 belastet. Hierzu wird das Prüfgetriebe zwischen einen Elektromotor (Asynchronmaschine) und einen als Bremsmaschine arbeitenden Generator geschaltet

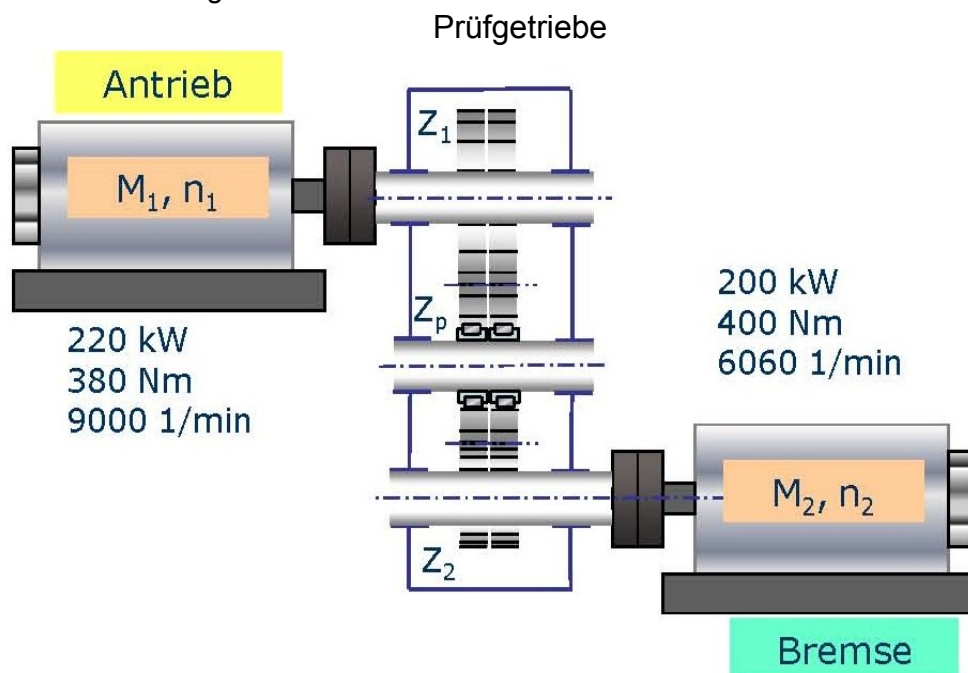


Bild 5.6: Skizze des Prüfstands für experimentelle Untersuchungen [72]

Bild 5.7 zeigt im Teil a die prinzipielle Anordnung und im Teil b das Realisierungskonzept der Planetenradlagerung und die Belastungssituation.

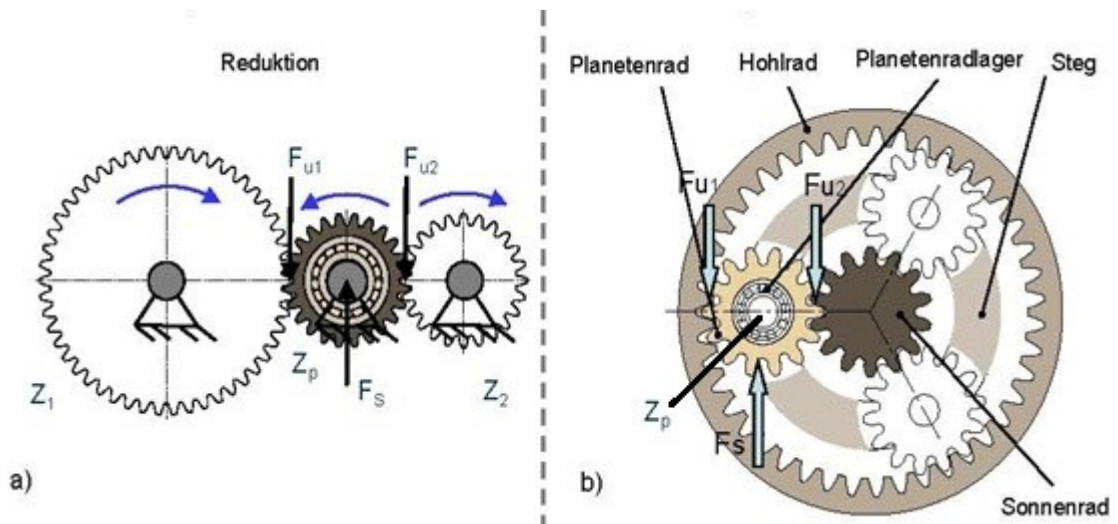


Bild 5.7: Planetenradlagerung und Belastungssituation [72]

Bild 5.8 zeigt das Prüflager eingebaut im Planetenradlager

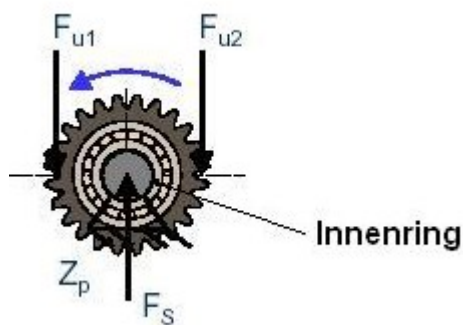


Bild 5.8: Planetenradlager als Prüflager [72]

Im Gegensatz zu üblichen Planetenradgetrieben ist der Steg durch eine ortsfeste Lagerbockkonstruktion ersetzt, sodass der im Lagerbock aufgenommene Innenring nicht umläuft. Das Versuchsgetriebe *VarioGear* wird weder beheizt noch gekühlt. Die Ölsumpftemperatur stellt sich als Beharrungstemperatur ein.

Bild 5.9 zeigt ein Foto des Getriebeprüfstands mit dem Versuchsgetriebe *VarioGear*.

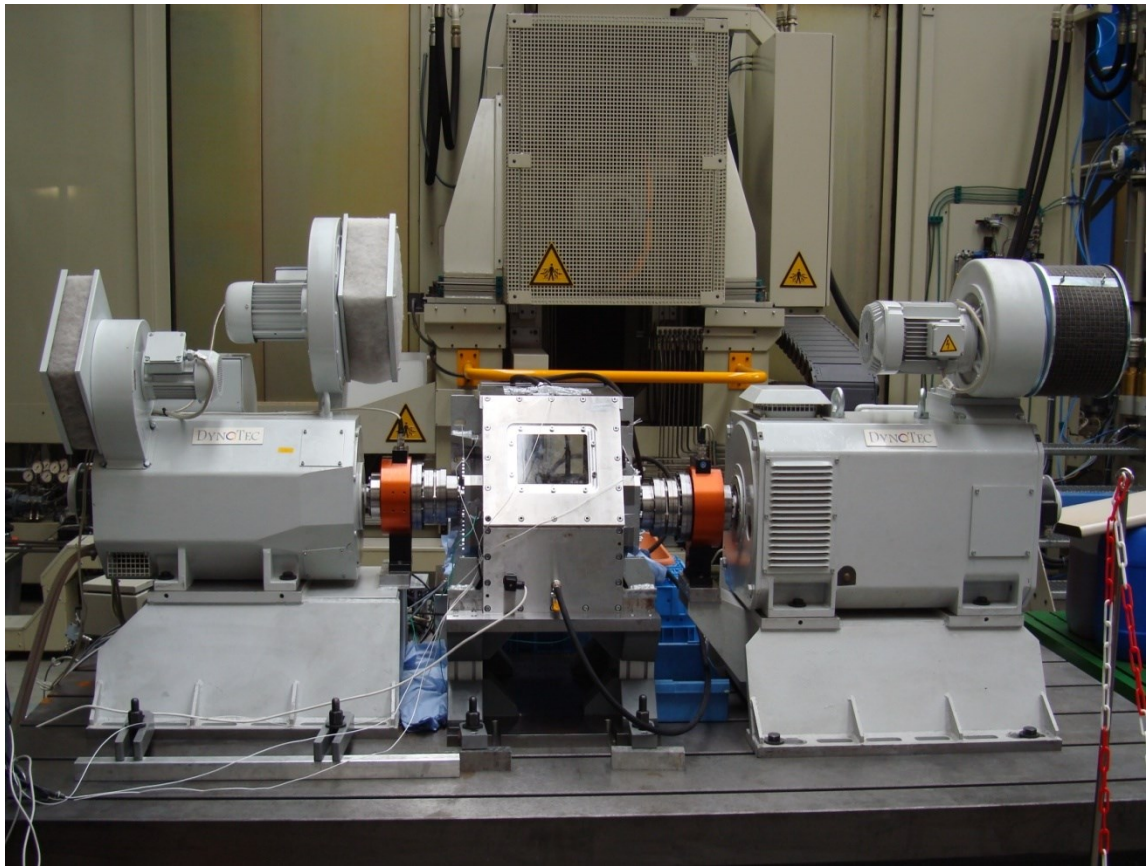


Bild 5.9: Foto des Prüfstands

Der Elektromotor ermöglicht Drehmomente bis 380Nm bei gleichzeitiger Änderung der Drehzahl bis $n = 9000 / \text{min}$. Die Versuchsparameter wie Drehzahl, Ölsumpftemperatur, Antriebs und Belastungsdrehmoment werden während der Versuchsdurchführung aufgezeichnet [72].

6. Diskussion der Messergebnisse

6.1 Überprüfung des Basissensors und der Auswerteelektronik

Im Folgenden wird eine Analyse der Messabweichungen des Sensorsystems am Beispiel der Leitfähigkeitsmessung durchgeführt. Aus Gl. (3.38) folgt für die partiellen Ableitungen für die maximale Messabweichung bei der Leitfähigkeitsbestimmung nach dem Gesetz der Fehlerfortpflanzung

$$\left| \frac{\Delta \kappa}{\kappa} \right| = \left| \frac{\Delta R_1}{R_1} \right| + \left| \frac{\Delta R_2}{R_2} \right| + \left| \frac{\Delta l}{l} \right| + \left| \frac{\Delta A}{A} \right| + \left| \frac{\Delta C}{C} \right| + \left| \frac{\Delta T_K}{T_K} \right| \quad (6.1)$$

mit den gewählten Widerständen $\frac{\Delta R}{R} = 0,5\%$,

$$\frac{\Delta l}{l} = 1\%, \frac{\Delta A}{A} = 1\%, \frac{\Delta C}{C} = 2\%$$

$\frac{\Delta T_K}{T_K}$ wird so mit dem redigierten Softwarealgorithmus im vorgegebenen Messbereich von 0,1 bis 50.000 ps/m auf besser als 0,1% abgeschätzt. Die maximale Messabweichung ist demnach 5,1%. Mit der Kalibrierung können die Messabweichungen der konstanten Elemente R_1 , R_2 , l , A und C eliminiert werden. Es bleibt eine Messabweichung in der Größenordnung der Summe aus der Kalibrierungsgenauigkeit und der Genauigkeit der Zeitmessung. Die resultierende Messabweichung kann zu

$$\left| \frac{\Delta \kappa}{\kappa} \right| \leq 1\% \quad (6.2)$$

abgeschätzt werden.

Die Überprüfung der Funktion der Sensorelektronik und des Basissensors erfolgt über eine manuelle Auswertung des Ausgangssignals der analogen Sensorelektronik und das Ersetzen des Basissensors durch die elektronischen Bauelemente Widerstände R_s und Kondensatorenkapazitäten C_s .

Über die High-Zeiten wird die Leitfähigkeit berechnet. Die Low-Zeit wird zusätzlich für die Berechnung der Dielektrizitätszahl genutzt. Bild 6.1 zeigt zwei typische Oszillogramme des Ausgangssignals des Integrators und des XOUT-Signals des Exclusive-Oder-Gatters.

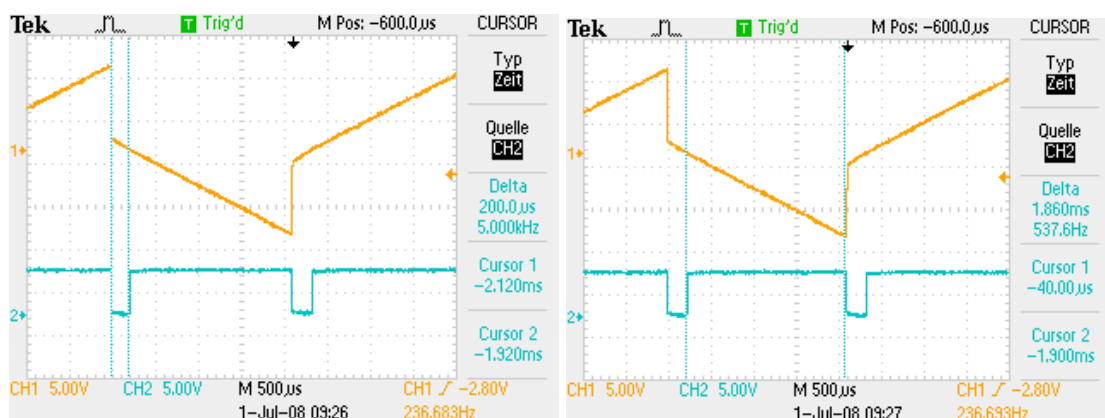


Bild 6.1: Oszillogramme zur Messung von Low- und High-Zeit

Die Leitfähigkeit wird aus Gl. (3.39) berechnet. Ersetzt man das konstante Produkt aus

$$\frac{l}{A} \cdot \frac{R_1}{R_2} \cdot C \text{ durch die Konstante } Z:$$

$$Z = \frac{l}{A} \cdot \frac{R_1}{R_2} \cdot C \quad (6.3)$$

so wird

$$\kappa = \frac{Z}{T_K} \quad (6.4)$$

Die Dielektrizitätszahl wird aus Gl. (3.46) berechnet oder mit der Konstanten Z

$$\varepsilon_r = \frac{Z \cdot \left(1 - \frac{T_2}{T_K}\right)}{2 \cdot \varepsilon_0} \quad (6.5)$$

Zur Versuchsdurchführung wurden jeweils 200 ml mit 0,1% Kupfer (II)-chlorid Dihydrat und 0,1% VE-Wasser künstlich gealtertes Öl der Marke Castrol Optigear Synthetic X mit einer Leitfähigkeit von 1.500 pS/m bei 42,5 °C im Kreislauf gepumpt und es wurden insgesamt 60 ml 23,5°C warmes, noch ungebrauchtes frisches Öl der Marke Castrol Optigear Synthetic X zugegeben. Es kommt zu einer Vermischung und dem erwarteten Abfall der Leitfähigkeit und der Dielektrizitätszahl.

In Bild 6.2 und Bild 6.3 sind für den Versuch künstlich gealtertes Öl bei Zugabe von frischem Öl die gemessenen Werte, die errechneten und die mit Widerständen R_s und Kondensatoren C_s simulierten Messwerte für den drei Plattensensor mit 2 mm Plattenabstand, dargestellt.

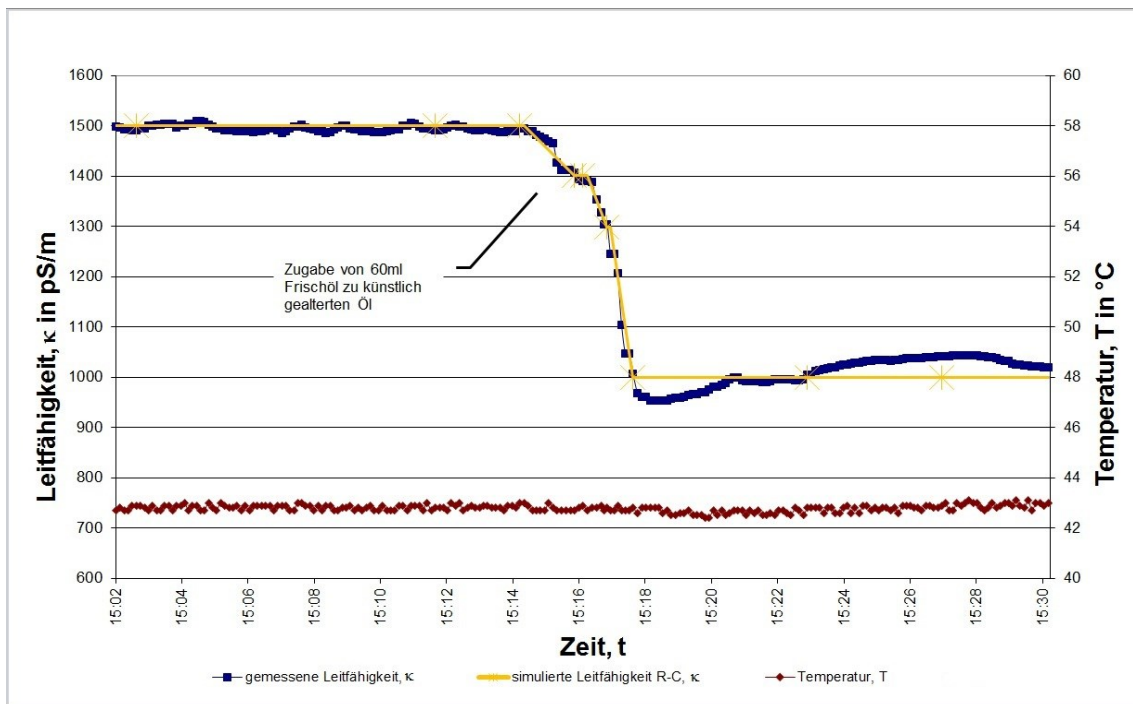


Bild 6.2: Gemessene und simulierte Leitfähigkeitswerte von künstlich gealtertem Öl bei Zugabe von frischem Öl

Die hier gemessene maximale Messabweichung ist insbesondere auf die Messabweichung der elektrischen Ersatzbauelemente für die Sensorkapazität C_s und den Sensorwiderstand R_c von

$$\left| \frac{\Delta C_s}{C_s} \right| \leq 5\% \text{ und } \left| \frac{\Delta R_s}{R_s} \right| \leq 1\% \text{ zurückzuführen.}$$

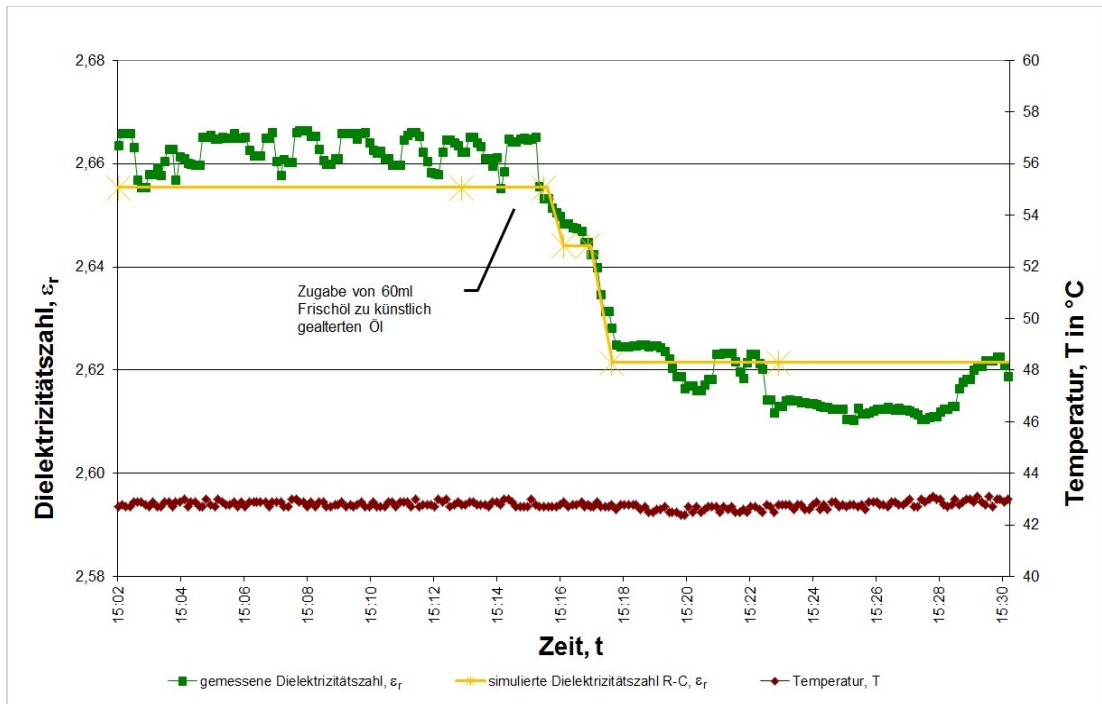


Bild 6.3: Gemessene und simulierte Dielektrizitätszahlwerte ϵ_r von künstlich gealtertem Öl bei Zugabe von frischem Öl

Das nachfolgende Bild 6.4 zeigt die Differenz der simulierten Leitfähigkeits- und Dielektrizitätszahlwerte zu den im Versuch gemessenen Werten. Die Differenz ist $< 1\%$.

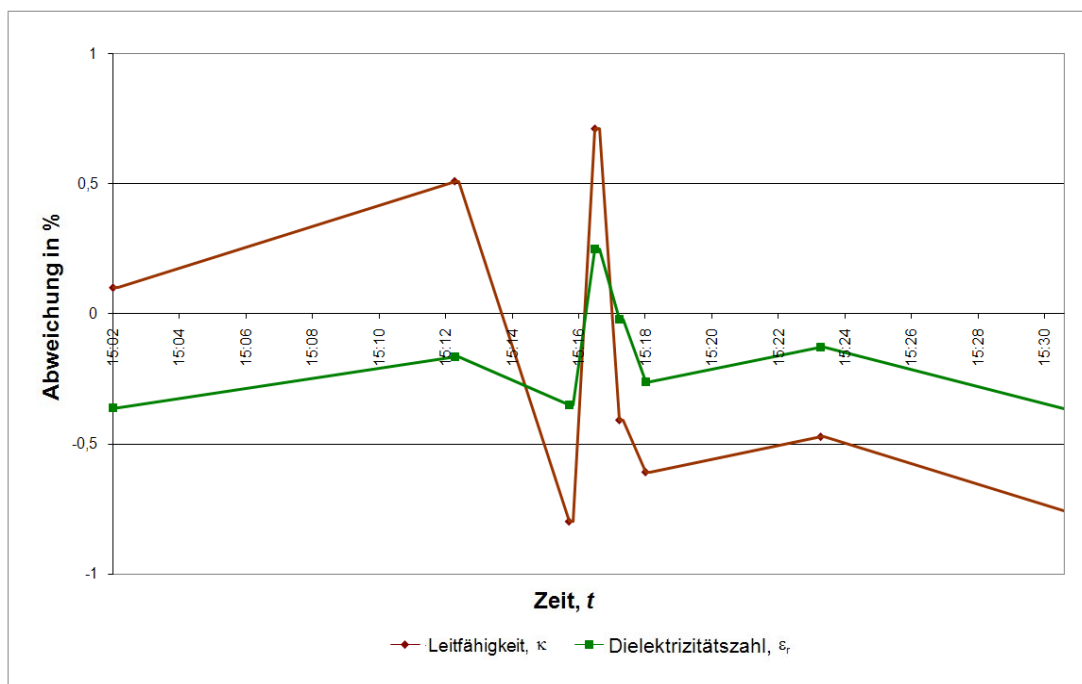


Bild 6.4: Differenz der berechneten Leitfähigkeits- und Dielektrizitätszahlwerte zu den gemessenen Werten; künstlich gealtertes Öl bei Zugabe von frischem Öl

Das nachfolgende Bild 6.5 zeigt die Differenz der simulierten Leitfähigkeits- und Dielektrizitätszahlwerte zu den gemessenen Werten. Die Differenz ist kleiner als 2%.

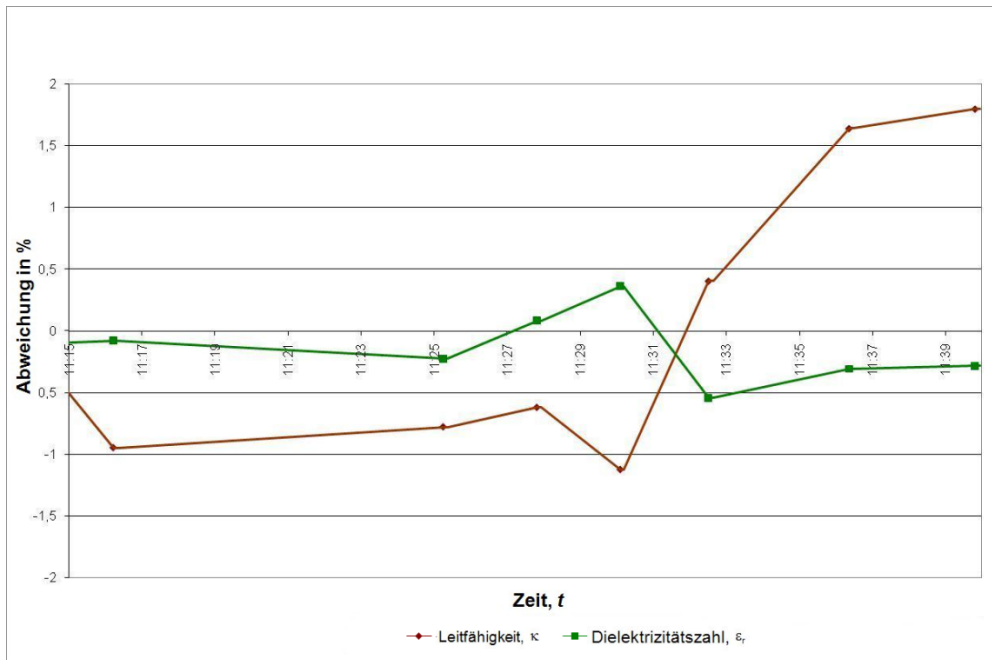


Bild 6.5: Differenz der gemessenen und simulierten Leitfähigkeits- und Dielektrizitätszahlwert bei 1 mm Sensorplattenabstand

Die Versuchsergebnisse zeigen im direkten Vergleich zum Dreiplattensensor nur geringe, innerhalb der Messtoleranz liegende Abweichungen.

6.2 Öl-Labormessungen

Zur ersten Prüfung der Sensorfunktionen sollen die Wirkungen der Zudosierung von Wasser auf die Leitfähigkeits- und die Dielektrizitätszahl des Öls mit Hilfe des Laborprüfstands untersucht werden [79].

Hierzu wurde Öl der Marke Castrol Optigear Synthetic X verwendet. Dieses ist ein synthetisches Getriebeöl, das bevorzugt im Hauptgetriebe von Windkraftanlagen eingesetzt wird. Es basiert auf synthetischen Schmierstoffen und enthält spezielle Additive zur Verbesserung der plastischen Deformation und zur Oberflächenverbesserung. Die Additive werden durch hohe spezifische Lasten und die entsprechenden Temperaturen aktiviert und tragen so zu einem Glätten von Unebenheiten der Oberflächen bei. Die Betriebstemperatur liegt je nach Anwendung im Bereich zwischen -30 und $+95^{\circ}\text{C}$. Nach Herstellerangaben zeichnet sich das Getriebeöl durch ein hohes Lasttragevermögen, guten Schutz gegen mikrobiell beeinflusste Korrosion, deutliche Reibungsreduzierung sowie gute Schmiereigenschaften aus.

Für den Versuch wurde eine künstliche Ölalterung unter Zudosierung von 100 Gewichts-ppm Cobaltnaphthenat als Katalysator durchgeführt. 450 ml Öl wurden für die Alterung verwendet und 14 Tage bei 40°C unter Luftsauerstoffzutritt ständig umgerührt. Die Säurezahl änderte sich um 0,5 mg KOH/g von 3,8 mg KOH/g auf 4,3 mg KOH/g Probe nach der künstlichen Alterung. Im Anschluss erfolgte der Test im Kreislauf, wobei täglich eine Wasserzudosierung von 40 μl VE-Wasser erfolgte. Die Säurezahl erfuhr nach erfolgter Zudosierung von VE-Wasser im Kreislauf (Gesamtwassermenge 480 μl) einen geringen Anstieg um 0,5 auf 4,8

mg KOH/g. Jedoch wirkt sich der Gesamtanstieg von 1 mg KOH/g in dieser Größenordnung schon verschleißverstärkend in der Praxis aus [73] [74].

Die Bild 6.6 und Bild 6.7 zeigen die Änderung der Leitfähigkeit bzw. der Dielektrizitätszahl bei der Zudosierung von 0,2 ml VE-Wasser in frisches Öl. Deutlich ist die Abnahme der Leitfähigkeit bei Wasserzudosierung zu erkennen. Die Schwankungen des Temperaturmesssignals in beiden Diagrammen um weniger als 0,5 K beruhen insbesondere auf Digitalisierungsfehlern. Bei einer späteren Designanpassung des Sensorsystems sollen diese Digitalisierungsfehler reduziert werden.

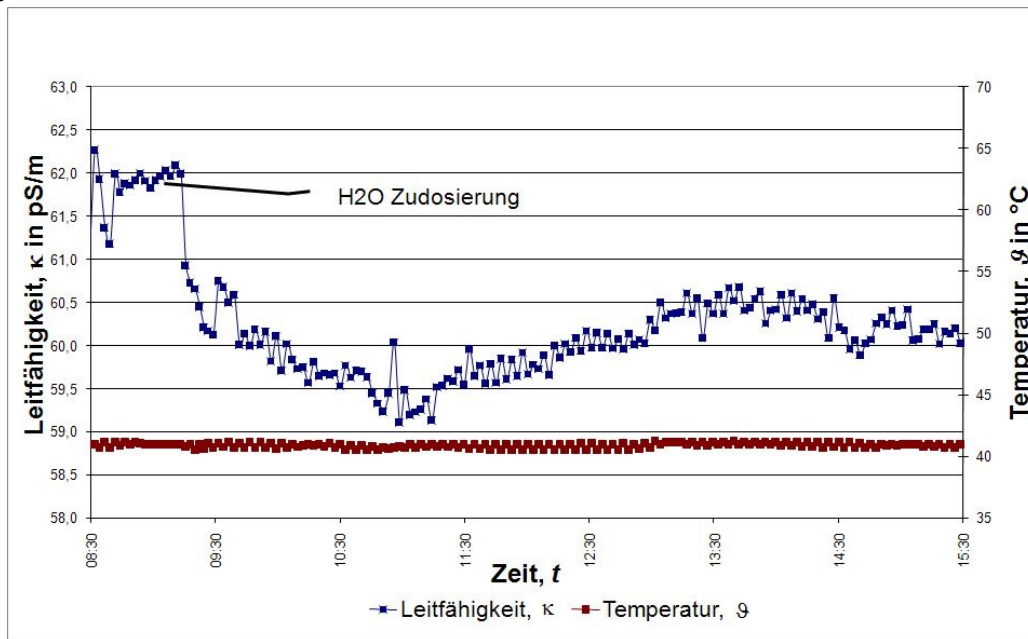


Bild 6.6: Leitfähigkeitsänderung bei Zudosierung von VE Wasser

In Bild 6.7 ist die Abnahme der Dielektrizitätszahl bei VE-Wasserzudosierung zu erkennen.

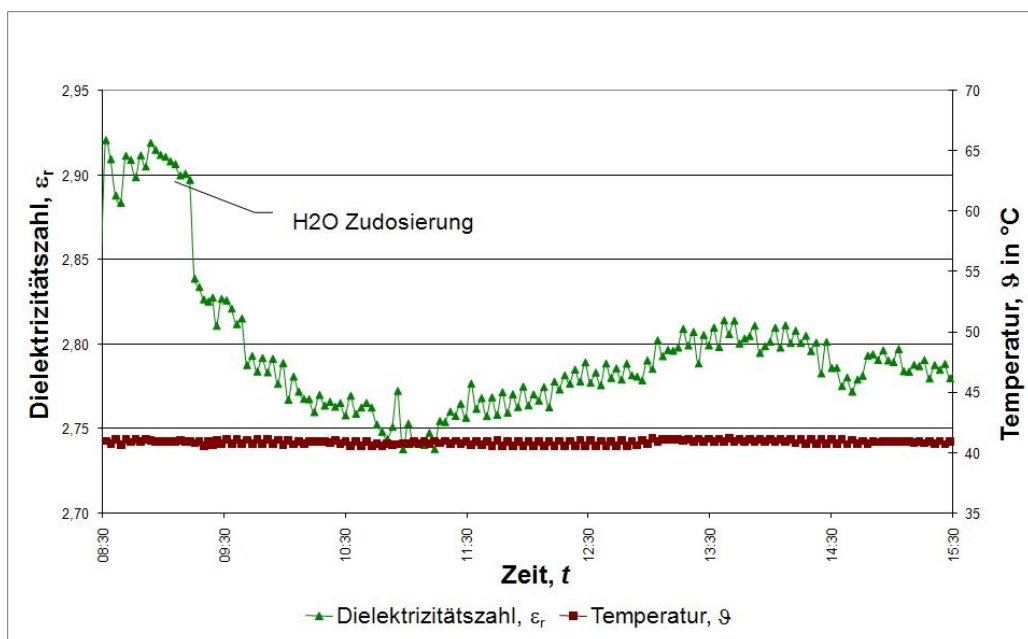


Bild 6.7: Dielektrizitätszahländerung bei Zudosierung von VE-Wasser

Bei Zudosierung von VE-Wasser zu reinem Öl wäre eine Erhöhung sowohl der elektrischen Leitfähigkeit als auch der Dielektrizitätszahl zu erwarten. Die elektrische Leitfähigkeit reiner Öle liegt in einer Größenordnung von 5 pS/m. Die Leitfähigkeit von voll entsalztem Wasser ist ca. 6 Zehnerpotenzen größer. Die dimensionslose Dielektrizitätszahl reiner Öle liegt im Bereich 2 bis 3, dagegen hat Wasser eine Dielektrizitätszahl von ca. 80. Das verwendete Getriebeöl ist stark additiviert. Eine Aufgabe der Additive ist das Binden von Wasser. Entsprechende Additive werden auch als Dispersanten bezeichnet. Diese Additive umhüllen die Wassermoleküle und binden Sie.

Die Dispersanten bestehen hauptsächlich aus metallorganischen Zusätzen wie Calcium- und Magnesiumsulfonate. Diese haben eine Leitfähigkeit in der Größenordnung von $20 \cdot 10^6$ S/m und einen Anteil von bis zu 10% [73][74][75][76]. Nach der Wasserzugabe kommt es mit Hilfe der Dispersanten zur Ausbildung von Micellen. Dabei nimmt die Konzentration an freiem Wasser ab und es werden Additive „verbraucht“. Es kommt zu einer Verringerung der Dielektrizitätszahl und Leitfähigkeit durch Solubilisierung. Hierunter versteht man die Erhöhung der Löslichkeit durch Hinzufügen eines dritten Stoffes. Dabei unterscheidet man zwischen Lösungsvermittlern, die die Löseeigenschaften des Lösungsmittels durch homogene Mischung ändern und Tensiden, die die Löslichkeit durch Mizellenbildung erhöhen. Tenside (lat. Tendere: spannen) sind organische Verbindungen mit grenzflächen aktiven Eigenschaften. Sie setzen die Oberflächenspannungen herab. In der Regel sind Tenside amphiphile Verbindungen, d.h. sie tragen sowohl polare als auch unpolare Gruppen. Ihre beiden wichtigsten Eigenschaften sind die Absorption an Grenzflächen und die Aggregation (Mizellenbildung) in der Volumenphase. Die Tensidmoleküle bestehen zum einen aus einem fettlöslichen (lipophilen) und zum anderen aus einem wasserlöslichen (hydrophilen) Teil. Häufig bezeichnet man diese Moleküle als Kopf–Schwanz–Moleküle (siehe Bild 6.8), da sie meist aus einer langen Kohlenwasserstoffkette und aus einer deutlich kürzeren polaren Kopfgruppe bestehen.

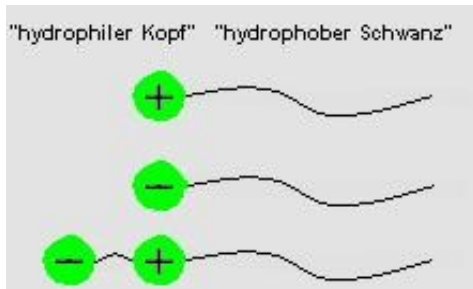


Bild 6.8: Aufbau von Tensiden, „Kopf-Schwanz-Moleküle“

Die in Schmierölen enthaltenen korrosionshemmenden Additive auf Basis von nichtionischen Tensiden umhüllen somit Wassermoleküle wie in Bild 6.9 dargestellt.

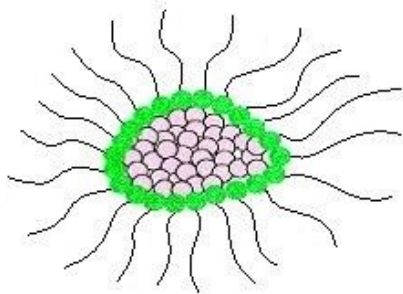


Bild 6.9: Solubilisierung von Wassermolekülen durch Tenside

In einem weiteren Test wurden die Änderungen der Leitfähigkeit und der Dielektrizitätszahl bei der Zudosierung von Wasser zum Öl untersucht. In den Bild 6.10 und Bild 6.11 sind die Ergebnisse dargestellt.

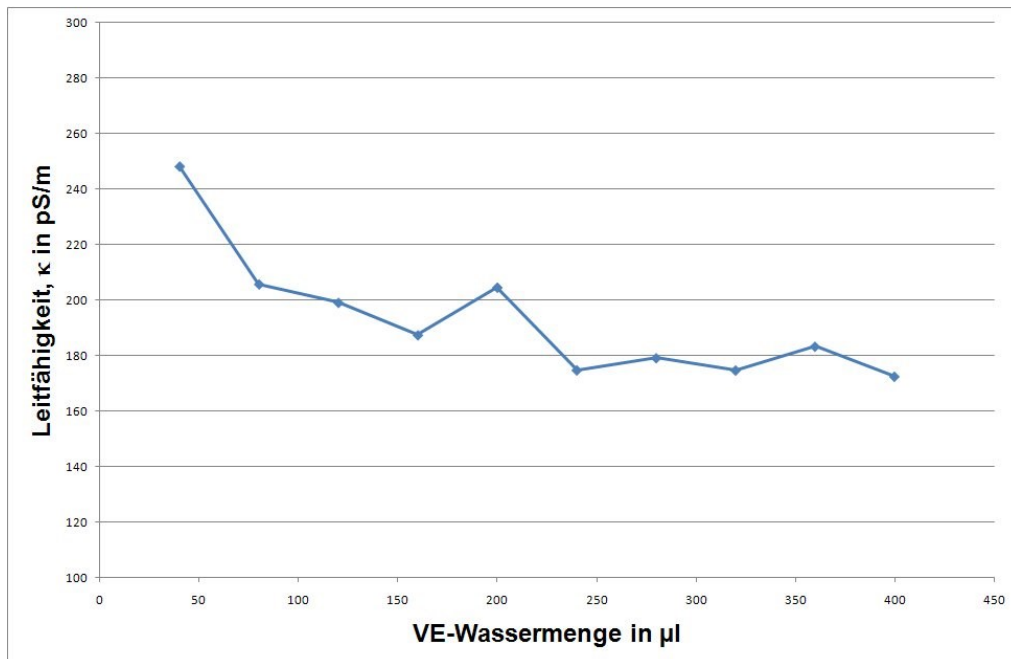


Bild 6.10: Veränderung der Leitfähigkeit κ bei VE-Wasserdosierung [79]

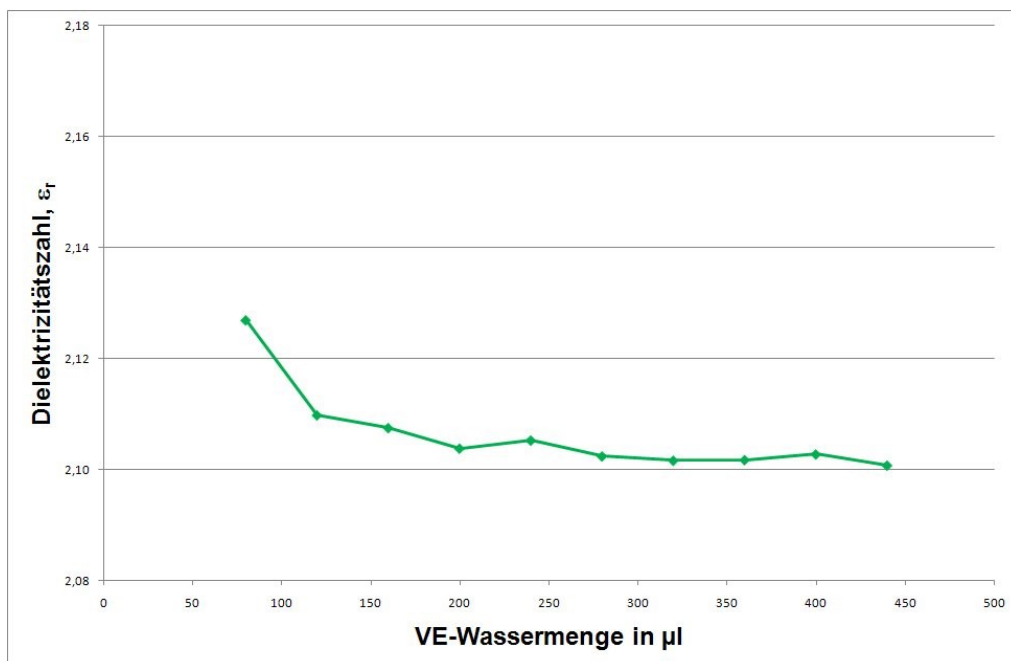


Bild 6.11: Veränderung der Dielektrizitätszahl ϵ_r bei VE-Wasserdosierung [79]

In einer weiteren Prüfung sollen die Möglichkeiten zur Messung des Abbaus von Additiven untersucht werden. Hierzu wurde ein Hydraulik- sowie ein Getriebeöl der Firma Energol verwendet. Das Hydrauliköl Energol HM46 ist ein Qualitätshydrauliköl und wird in hoch belastenden Hydrauliksystemen von Werkzeugmaschinen, in Getrieben sowie zur Lager-schmierung verwendet. Es erfüllt die Anforderungen an „Hydrauliköle HLP“ nach DIN 51524

Teil 2 [76] und entspricht der Klassifizierung Hydrauliköl Typ HM nach ISO 6743/4 [77]. Das Getriebeöl Energol GR-XP220 ist ein hochwertiges Getriebeöl auf Mineralölbasis und entspricht den Anforderungen an „Schmieröle CLP“ nach DIN 51 517 Teil 3 [78].

Dazu wurden die Öle künstlich gealtert. Die Alterungsversuche wurden mit den Ölen Energol HM46 sowie Energol GR-XP220 bei 150°C mit Rückflusskühler unter Zusatz eines Oxidationskatalysators und Luftsauerstoffzutritt durchgeführt. Durch regelmäßige Bestimmung der Neutralisationszahl erfolgte die Erfassung der Alterungskinetik. Nach Erreichen eines Plateaus der Neutralisationszahl wurden die Alterungsversuche beendet. Mit Hilfe der „künstlich“ gealterten Öle wurden Mischreihen mit Neuölen erstellt, so dass verschiedene Alterungs- bzw. Verschmutzungsgrade reproduzierbar zur Verfügung standen. Das nachfolgende Bild 6.12 zeigt den Prüfstand zur oxidativen Ölalterung.

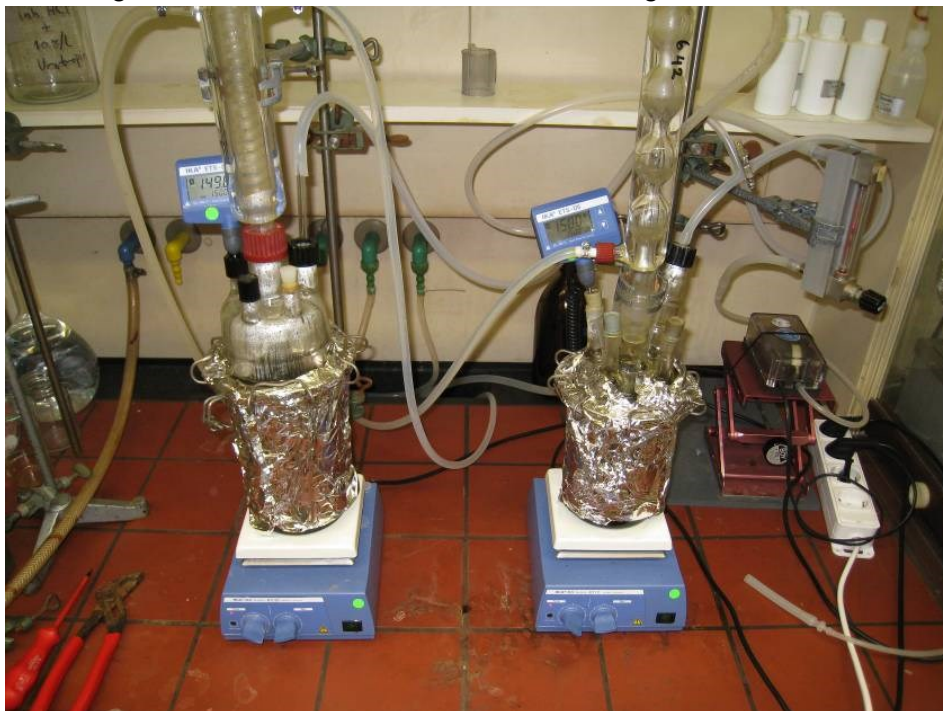


Bild 6.12: Foto des Prüfstandes zur oxidativen Ölalterung bei verschiedenen Temperaturen [79]

Die erhaltenen Resultate wurden mit der Neutralisationszahl sowie mit dem Grad der Alterung korreliert.

6.3 Messung der Neutralisationszahl oxidativ gealterter Hydrauliköle

Die oxidative Ölalterung für die Versuchsdurchführung erfolgte an dem Hydrauliköl Energol HM46 sowie dem Getriebeöl Energol GR-XP220 [68] [79]. Die beiden Öle wurden auf eine Temperatur von 150°C mit Rückflusskühler erwärmt. In regelmäßigen Abständen erfolgte die Entnahme einer Probe für die Bestimmung der Neutralisationszahl. Nach dem Erreichen eines stationären Zustandes für die Neutralisationszahl wurden die Alterungsversuche beendet. Bild 6.13 zeigt die Alterungskinetik für beide Öle anhand der Neutralisationszahl. Dabei ist eine Messabweichung bei der manuellen Bestimmung der Neutralisationszahl zu berücksichtigen.

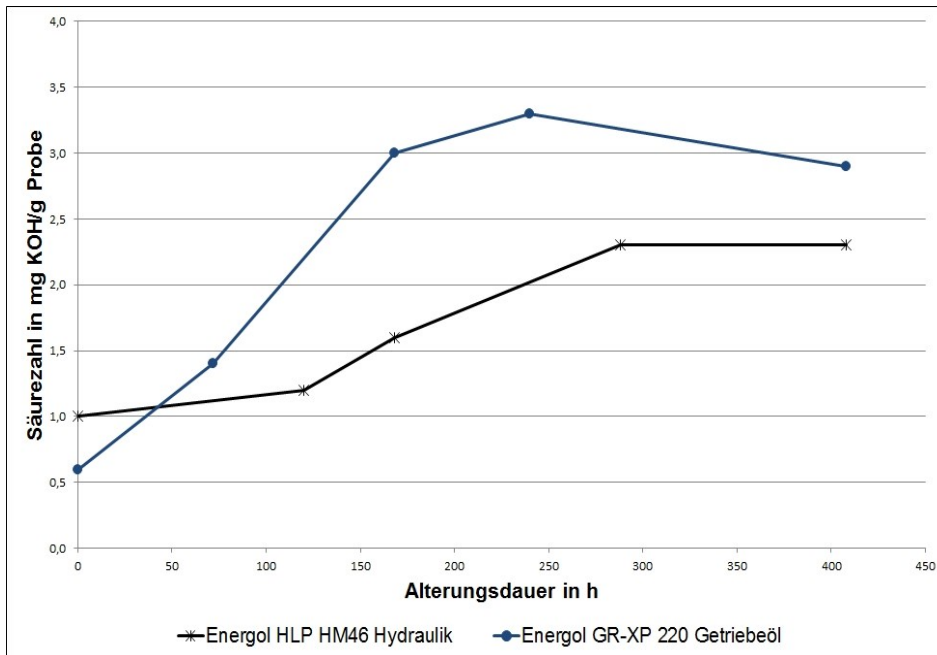


Bild 6.13: Neutralisationszahl im Verlauf der Alterungsdauer in Stunden [79]

Die oxidativ gealterten Öle dienen als Grundlage für die Simulation verschiedener Verschmutzungsgrade für die folgenden Versuche. Dazu erfolgte eine prozentuale Mischung des oxidativ gealterten Öls mit dem entsprechenden Neuöl z.B. 25% oxidativ gealtertes Öl mit 75% Neuöl.

6.4 Messung der spezifischen Leitfähigkeiten und Dielektrizitätszahlen des Hydrauliköls Energol HM46

Bild 6.14 zeigt die Neutralisationszahl bzw. die Säurezahl der hergestellten verschiedenen Alterungsstufen für das Hydrauliköl HM46 [68].

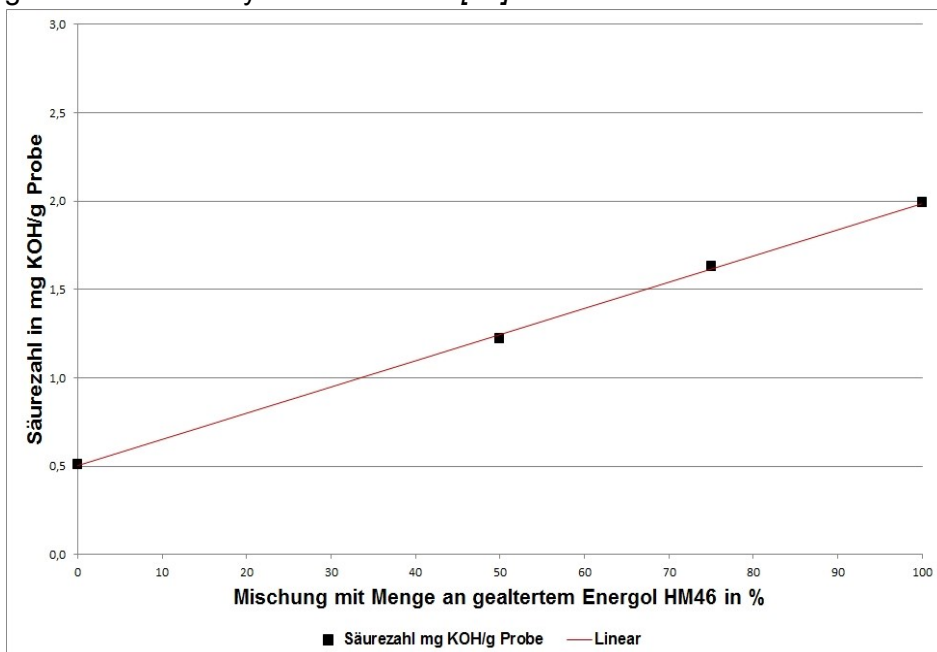


Bild 6.14: Säurezahl von Hydraulikölen unterschiedlicher Alterungsstufen [79]

Bild 6.15 zeigt die Dielektrizitätszahl ϵ_{r40} für das Hydrauliköl Energol HM46 in Abhängigkeit der Alterungsstufe. Es zeigt sich bei zunehmendem Alterungsgrad ein Ansteigen der Dielektrizitätszahl ϵ_{r40} bei gleicher Wasserzudosierung. Dies zeigt, dass bei zunehmender Alterung ein vermehrter Abbau der Additive zu beobachten ist.

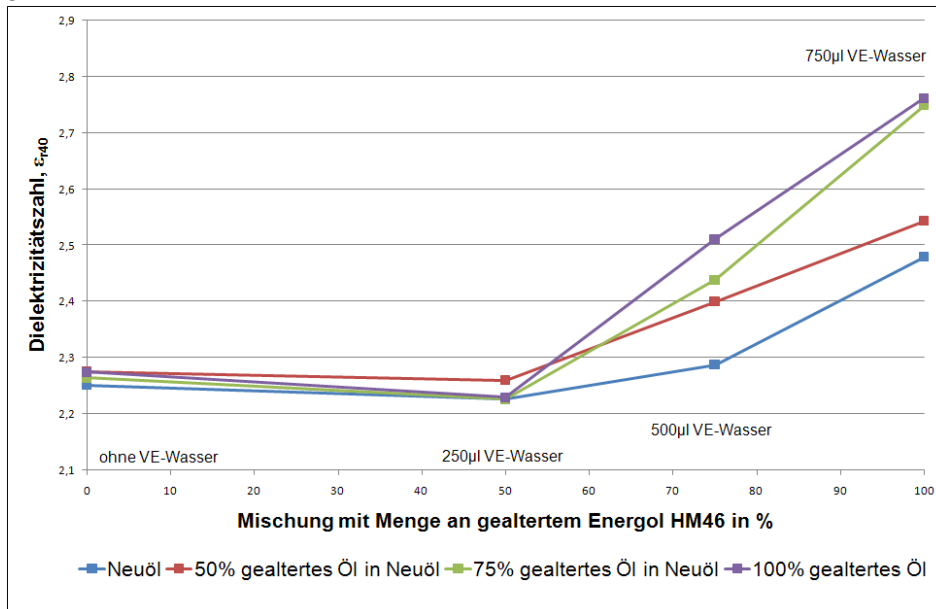


Bild 6.15: Dielektrizitätszahl ϵ_{r40} - Mischung an gealtertem Hydrauliköl [79]

Bild 6.16 zeigen die erhaltenen Messwerte für die Dielektrizitätszahl ϵ_{r40} in Abhängigkeit der zudosierten Wassermenge. Deutlich ist bei dem Neuöl, sowie bei dem Alterungsgrad 50% ein deutliches Abflachen im erhaltenen Signal der kompensierten Dielektrizitätszahl. Zurückzuführen ist dieser Effekt auf Zusätze im Öl welche Bindungsmöglichkeiten für Wasser bieten. Erst ab einem gewissen Alterungsgrad >50% ist mit zunehmender Wasserzudosierung ein Anstieg in der Dielektrizitätszahl erkenntlich.

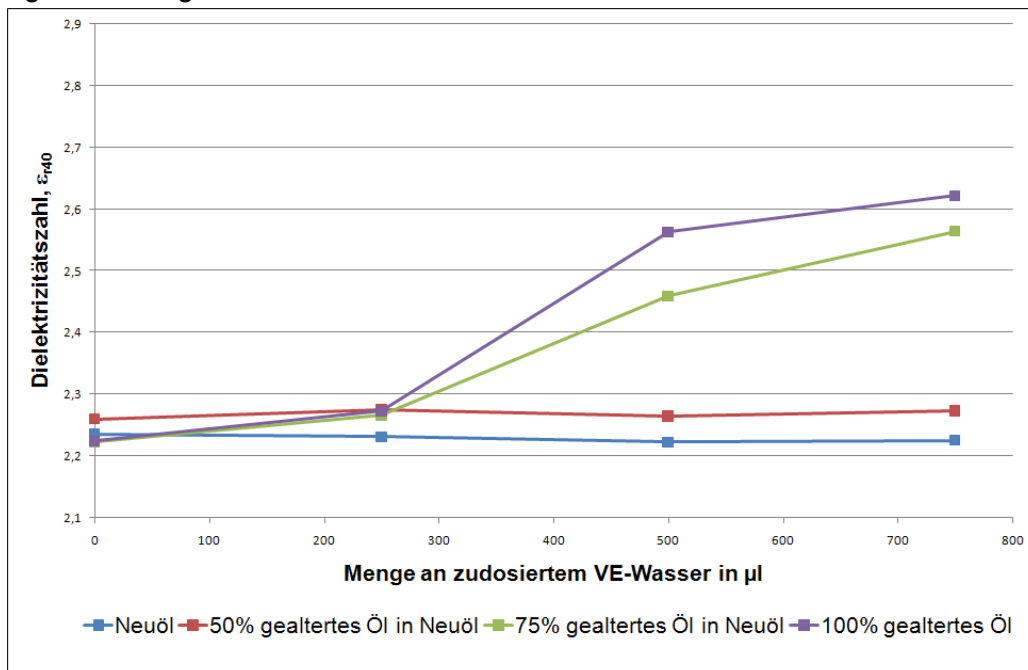


Bild 6.16: Dielektrizitätszahl ϵ_{r40} - Menge an zudosiertem VE-Wasser [79]

Bild 6.17 zeigt die gemessene spezifische Leitfähigkeit κ_{40} in Abhängigkeit des Verschmutzungsgrades. An der Trendlinie ist der Leitfähigkeitsanstieg mit steigendem Verschmutzungsgrad eindeutig zu sehen.

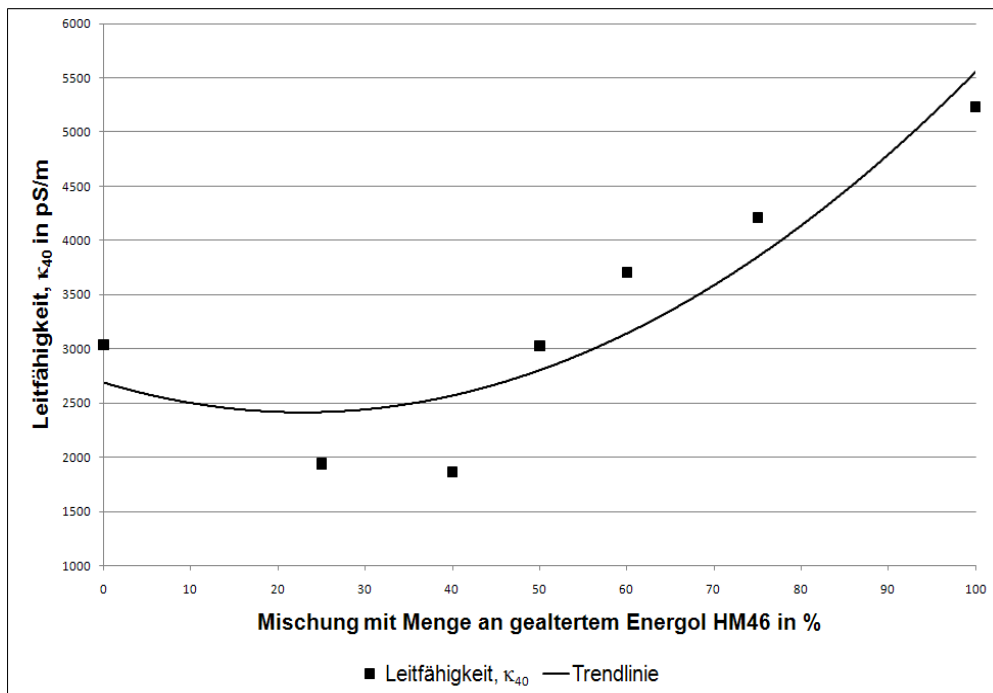


Bild 6.17: Spezifische Leitfähigkeit κ_{40} verschiedener Alterungsstufen [79]

Bild 6.18 zeigt den Verlauf der Neutralisationszahl bzw. Säurezahl in Abhängigkeit der Mischung an gealtertem Energol HM 44 in %. Mit steigendem Anteil an vorzeitig „künstlich“ oxidativ gealtertem Hydrauliköl steigt die Neutralisationszahl. Der Abfall der Leitfähigkeit bei geringen Anteilen an gealterten Energol HM46 ist auf die Wirkung der hohen Additivierung zurückzuführen.

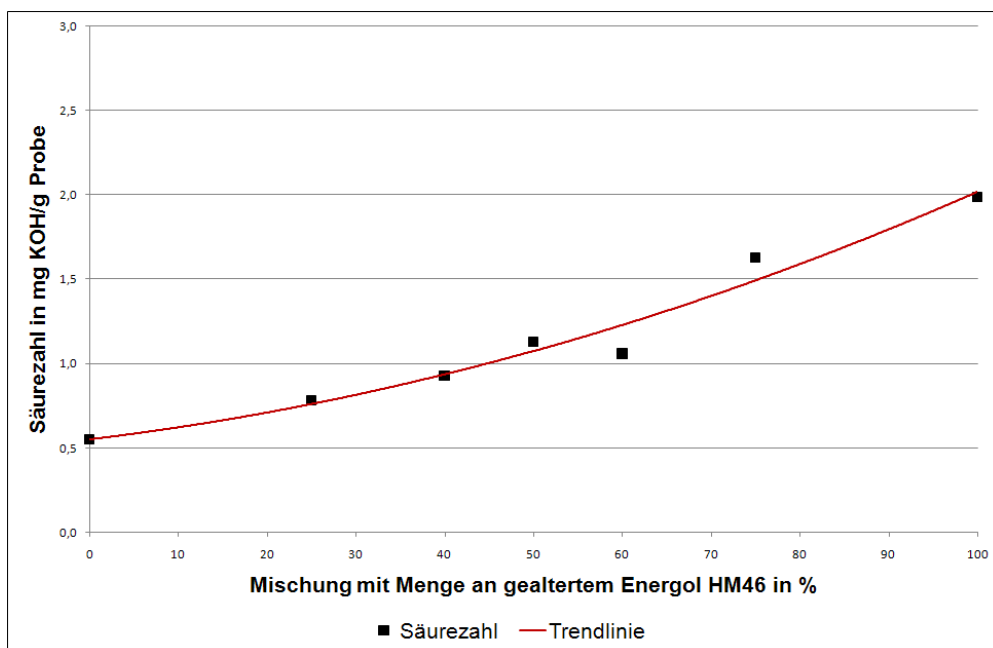


Bild 6.18: Säurezahl der verschiedenen Alterungsstufen des Hydrauliköls Energol HM46 [79]

Bild 6.19 zeigt die Korrelation der Säurezahl mit den gemessenen Leitfähigkeiten κ_{40} . Die gemessenen Messwerte für die spezifischen Leitfähigkeiten korrelieren mit der Neutralisationszahl und somit mit dem Alterungsgrad.

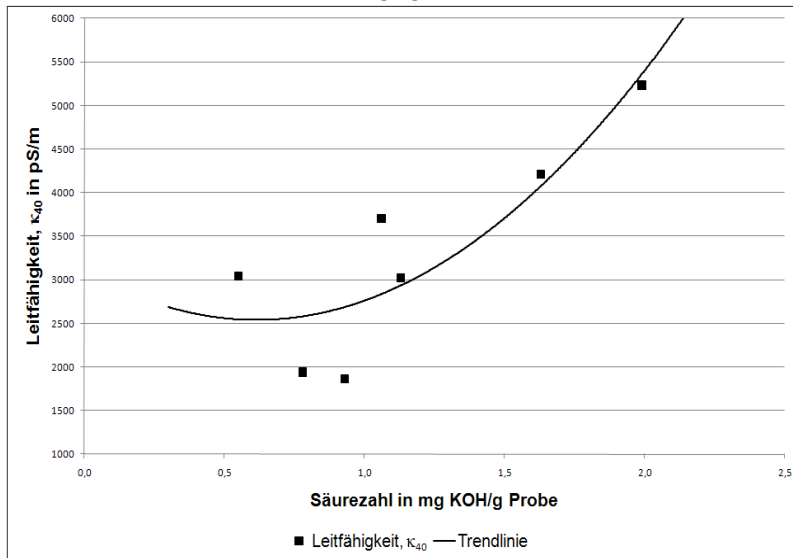


Bild 6.19: Neutralisationszahl in Abhängigkeit der Leitfähigkeit κ_{40} verschiedener Alterungsstufen [79]

6.5 Messung der spezifischen Leitfähigkeiten und Dielektrizitätszahlen des Getriebeöls Energol GR-XP 220

Der gleiche Versuch erfolgte analog mit dem Getriebeöl Energol GR-XP220. Zusätzlich sollte der Effekt der absinkenden Dielektrizitätszahl ϵ_{r40} bzw. Leitfähigkeit κ_{40} bei Wasserzudosierung zu einem geringfügig gealterten Öl erneut mit temperaturkompensierten erhaltenen Messwerten belegt werden. Hier wurden lediglich die Werte bei Neuöl, 25% gealtertes Öl und 50% gealtertes Öl ausgewertet. Bild 6.20 zeigt die Neutralisationszahl bzw. die Säurezahl der simulierten Alterungsstufen für das Getriebeöl Energol GR-XP220.

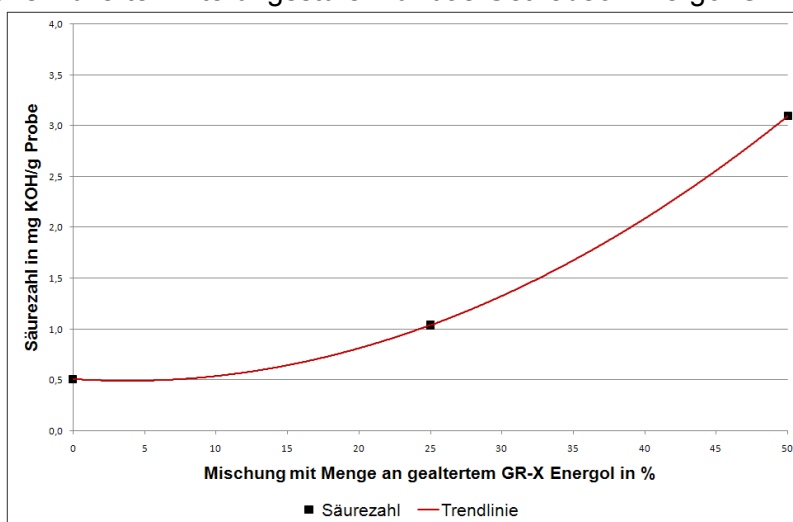


Bild 6.20: Neutralisationszahl von Getriebeölen unterschiedlicher Alterungsstufen [79]

Über einen Zeitraum von 7 Tage wurde den Alterungsstufen portionsweise eine definierte Menge an VE-Wasser zu dosiert. Bild 6.21 zeigt die Dielektrizitätszahlen für das Getriebeöl

GR-XP220 in Abhängigkeit der Alterungsstufe. Mit zunehmendem Alterungsgrad steigt bei gleicher Wassermengenzudosierung die Dielektrizitätszahl ϵ_{r40} stärker an. Der Abfall der Dielektrizitätszahl ϵ_{r40} zeigt sich noch der ersten Wasserzudosierung bei einem geringen Alterungsgrad wie bereits beim Hydrauliköl HM46. Das zugegebene Wasser bindet sich an polare Stoffgruppen im Öl. Das zeigt erst ab einem gewissen Sättigungs- bzw. Alterungsgrad eine Erhöhung an.

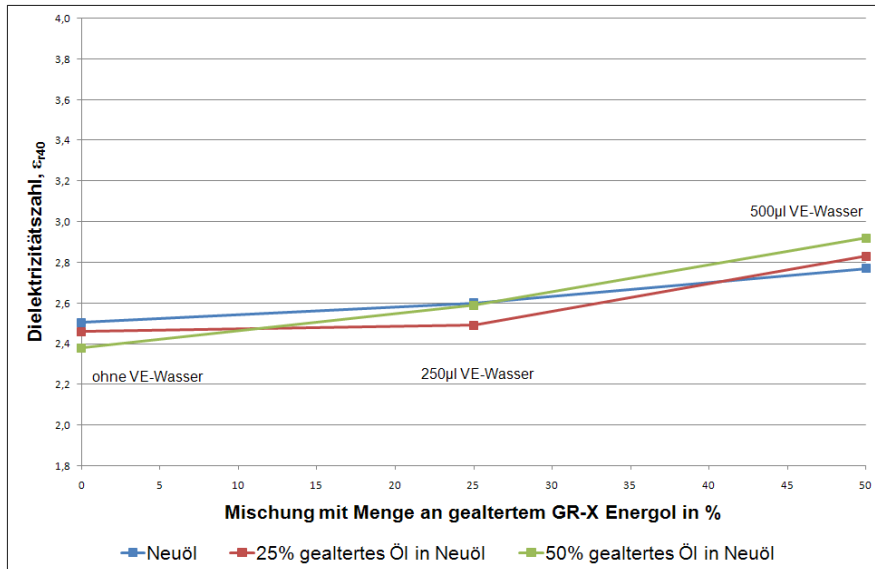


Bild 6.21: Dielektrizitätszahl ϵ_{r40} - Mischung an gealtertem Getriebeöl [79]

Bild 6.22 zeigt die erhaltenen Messwerte für die Dielektrizitätszahl ϵ_{r40} in Abhängigkeit der zudosierten Wassermenge an. Erst ab einem gewissen Alterungsgrad (>25%) ist mit zunehmender Wasserzudosierung ein Anstieg in der Dielektrizitätszahl klar erkenntlich. Analog dem untersuchten Hydrauliköl kann das auch für das Getriebeöl festgestellt werden, dass erst ab einem bestimmten Alterungs- bzw. Sättigungsgrad ein signifikanter Anstieg der Dielektrizitätszahl ϵ_{r40} erfolgt. Bei geringem Alterungsgrad wird das Wasser über die Additive durch Solubilisierung und Micellbildung gebunden.

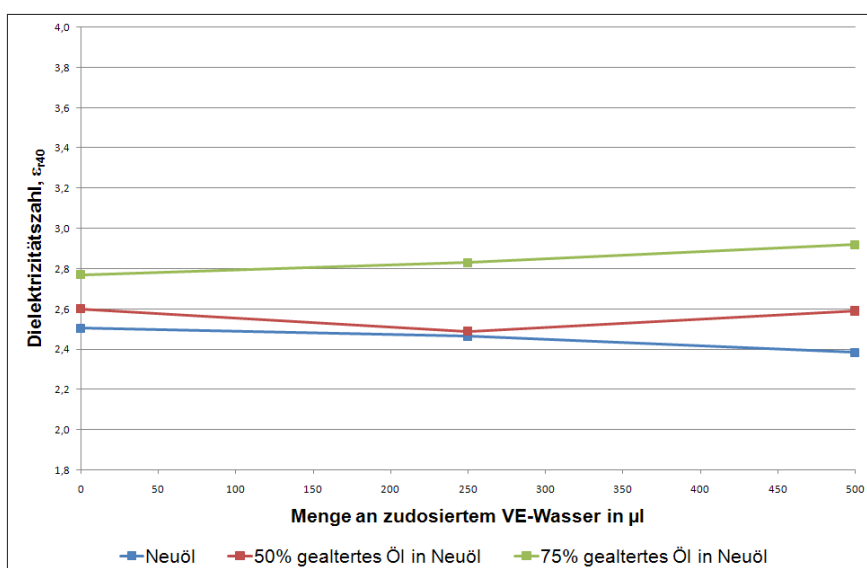


Bild 6.22: Dielektrizitätszahl ϵ_{r40} - Menge an zudosiertem VE-Wasser [79]

Bild 6.23 zeigt die gemessenen spezifischen Leitfähigkeiten κ_{40} in Abhängigkeit des Verschmutzungsgrades. An der Trendlinie ist der Leitfähigkeitsanstieg mit steigenden Verschmutzungsgrad eindeutig zu sehen.

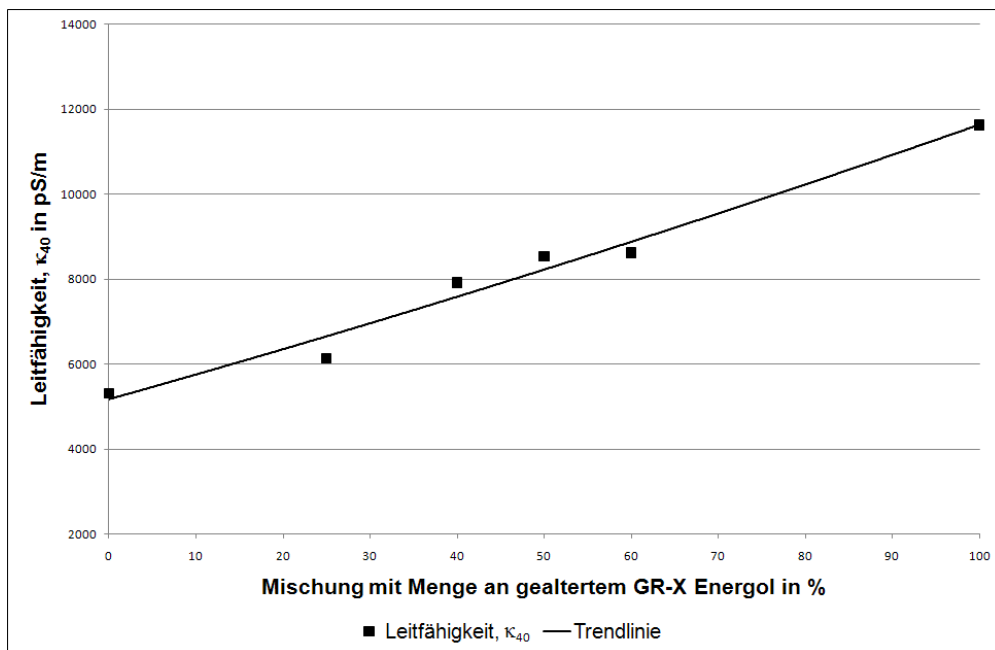


Bild 6.23: Kompensierte Leitfähigkeit κ_{40} verschiedener Alterungsstufen [79]

Bild 6.24 zeigt die Neutralisationszahl bzw. die Säurezahl der verwendeten Alterungsstufen. Mit steigendem Gehalt an vorzeitig „künstlich“ oxidativ gealtertem Getriebeöls steigt die Neutralisationszahl. Bild 6.25 zeigt die Korrelation der Säurezahl mit den gemessenen Leitfähigkeiten κ_{40} .

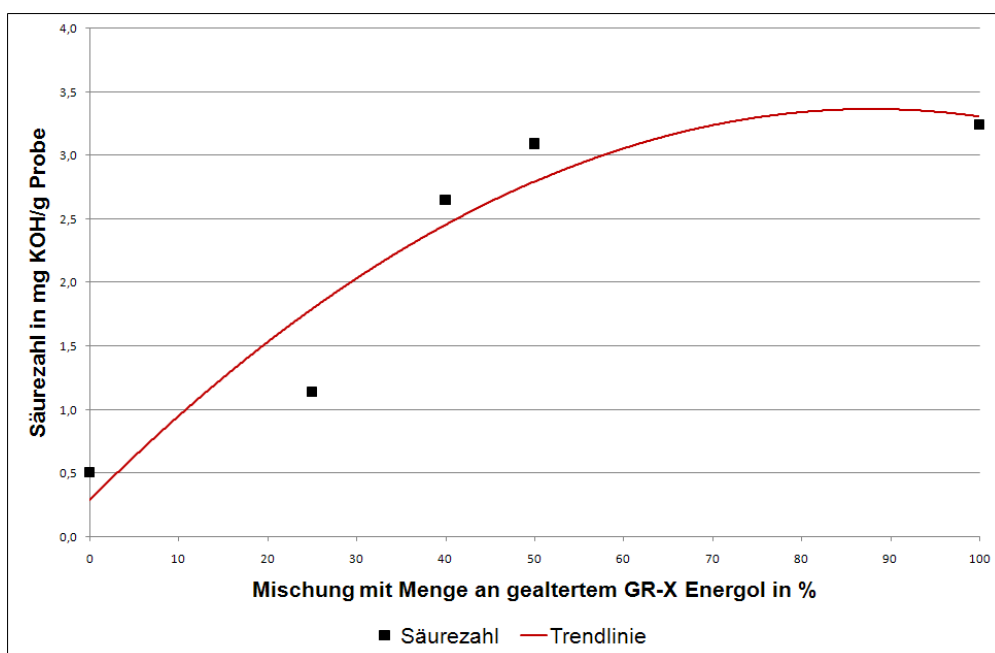


Bild 6.24: Neutralisationszahl der verschiedenen Alterungsstufen des Getriebeöls Energol GR-XP220 [79]

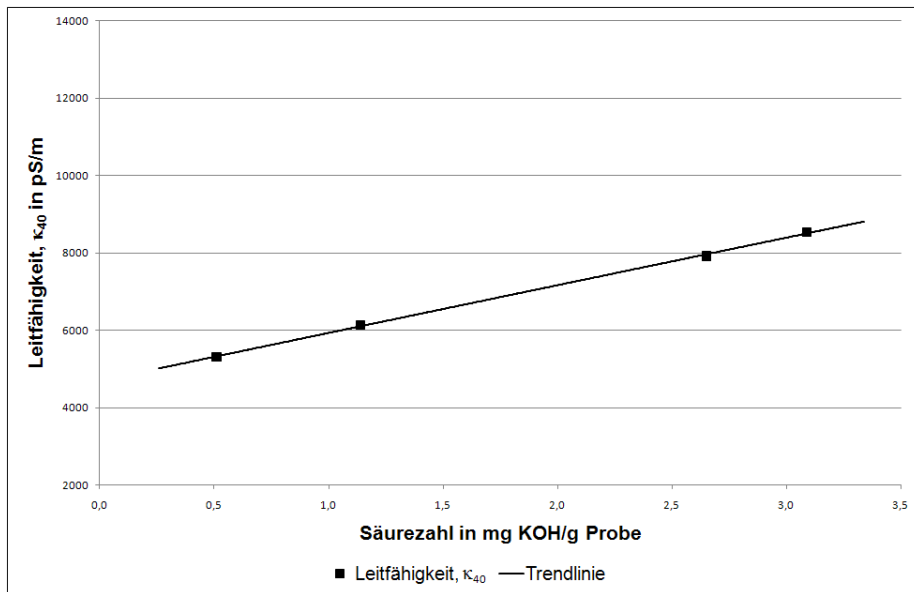


Bild 6.25: Säurezahl in Abhängigkeit der Leitfähigkeit κ_{40} verschiedener Alterungsstufen [79]

6.6 Viskositätsmessungen

Eine Erhöhung der dynamischen Viskosität kann durch Öloxidation, Ruß- oder Staubeintrag, Wasser, oder durch oxidierte Additive verursacht werden. Eine Verringerung der Viskosität kann durch den Abbau von Viskositätsverbesserern verursacht werden. Die innere Reibung von Fluiden wird durch ihre dynamische Viskosität η beschrieben. Die dynamische Viskosität η eines Fluids stellt dessen Widerstand gegen einen erzwungenen irreversiblen Ortswechsel seiner Volumenelemente dar. Die dynamische Viskosität von Fluiden ist außer vom Strömungszustand von der Temperatur und vom Druck abhängig. Gemessen wurde die dynamische Viskosität mit einem Viskosimeter des Typs Rheomat R140 der Firma proRheo.

6.6.1 Dynamische Viskosität, Leitfähigkeit und Dielektrizitätszahl von HLP HM46

Tabelle 8 zeigt die Messwerte der dynamischen Viskositätsmessung, die gemessene Leitfähigkeit und die Dielektrizitätszahl bei einer Temperatur von 40°C.

	dynamische Viskosität, η_{40} in mPa s	Leitfähigkeit, κ_{40} in pS/m	Dielektrizitätszahl, ϵ_{r40}
HLP-HM 46 neu	38	3041	2,25199
HLP-HM 46 25% gealtert	39	1940	2,22738
HLP-HM 46 40% gealtert	41	1867	2,20238
HLP-HM 46 50% gealtert	42	3025	2,24789
HLP-HM 46 60% gealtert	42	3702	2,38894
HLP-HM 46 100% gealtert	41	5234	2,47993

Tabelle 8: Dynamische Viskositätsmessung, Leitfähigkeit und Dielektrizitätszahl HLP HM46

Bild 6.26 zeigt die gemessene dynamische Viskosität in Abhängigkeit von der Ölalterung.

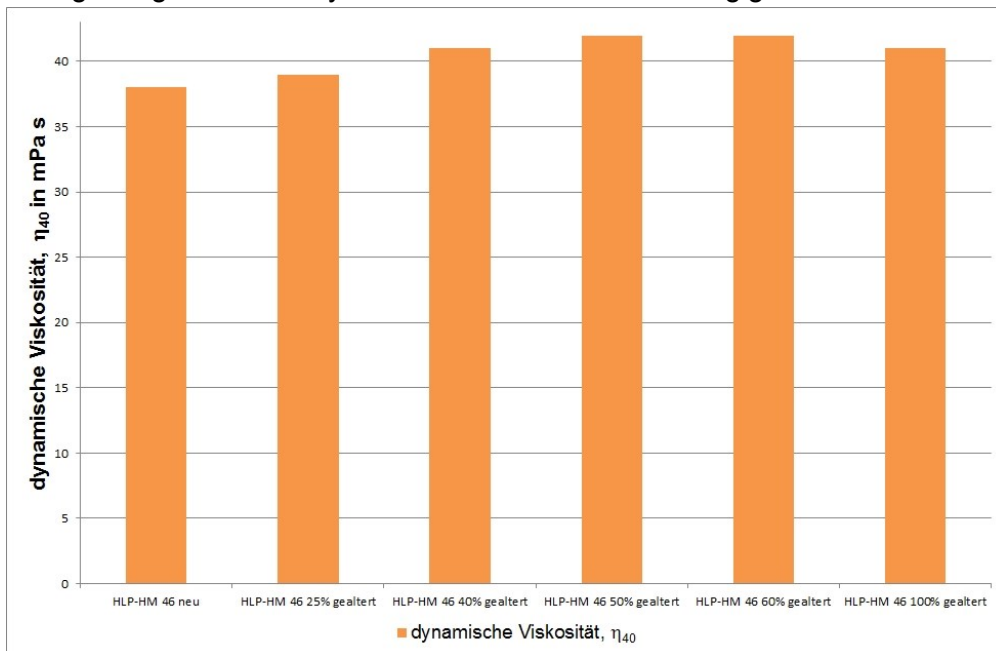


Bild 6.26: Dynamische Viskosität von HLP HM46

Bild 6.27 zeigt die gemessene Leitfähigkeit in Abhängigkeit der Ölalterung.

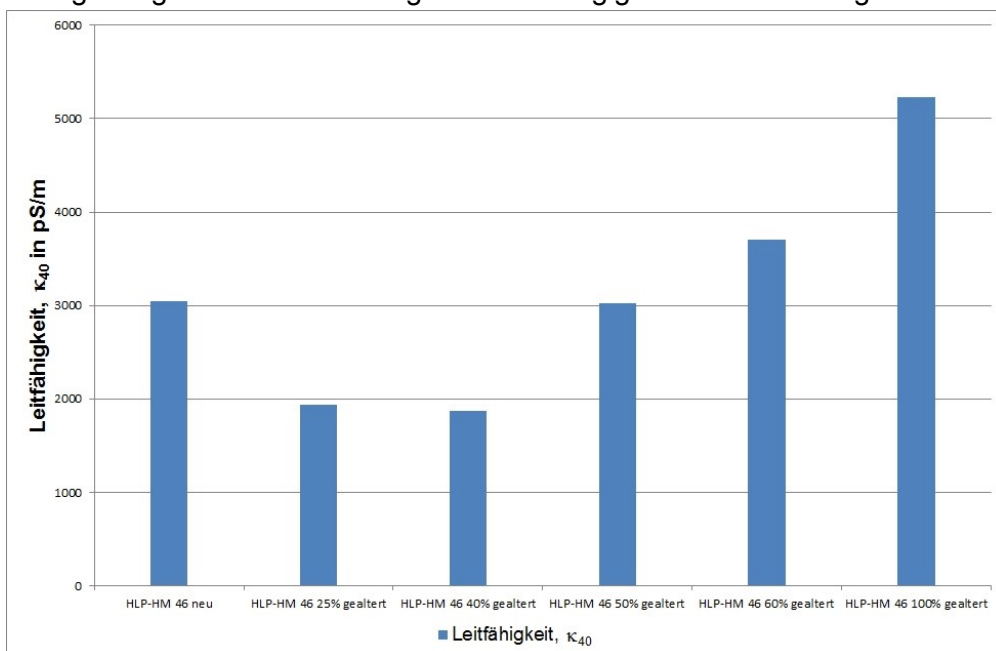


Bild 6.27: Leitfähigkeit von HLP HM46

Es ist zu erkennen, dass es bei der Zudosierung von gealtertem Öl in Frischöl zu einem geringen Anstieg der dynamischen Viskosität kommt. Jedoch bemerkt man, dass die Werte der temperaturkompensierten Leitfähigkeit erst geringer werden, was auf den Abbau von Additiven zurückzuführen ist. Danach steigt die Leitfähigkeit auf Grund der Ölalterung an. Die gleiche Tendenz ist auch bei der temperaturkompensierten Dielektrizitätszahl zu erkennen.

Nach dem Abbau der Additive zeigt sich bei steigenden Werten der Dielektrizitätszahl und Leitfähigkeit ein Anstieg der Viskosität. Eine erhöhte Viskosität bedeutet auch schlechtere Fließeigenschaften des Öls. Bild 6.28 zeigt die gemessene Dielektrizitätszahl in Abhängigkeit der Ölalterung.

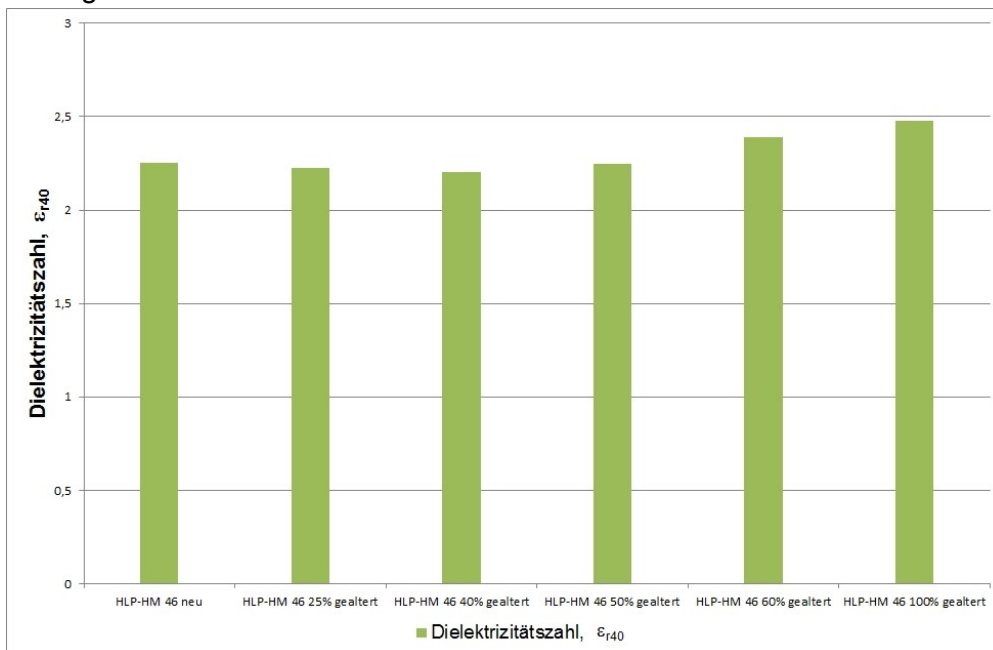


Bild 6.28: Dielektrizitätszahl von HLP HM46

6.6.2 Dynamische Viskosität, Leitfähigkeit und Dielektrizitätszahl von GR XP 220

Tabelle 9 zeigt die Messwerte der dynamischen Viskositätsmessung, die gemessene Leitfähigkeit und die Dielektrizitätszahl bei einer Temperatur von 40°C. Es wurden jeweils 750µl H₂O zudosiert.

	dynamische Viskosität, η_{40} in mPa s	Leitfähigkeit, κ_{40} in pS/m	Dielektrizitätszahl, ϵ_{r40}
GR-XP 220 neu	220	5306	2,50440
GR-XP 220 neu + H ₂ O	233	4837	2,36906
GR-XP 220 25% gealtert + H ₂ O	238	6439	2,83013
GR-XP 220 50% gealtert + H ₂ O	263	8945	2,92115
GR-XP 220 100% gealtert	303	11628	2,96167

Tabelle 9: Dynamische Viskositätsmessung, Leitfähigkeit und Dielektrizitätszahl GR-XP 220

Bild 6.29 zeigt die gemessene dynamische Viskosität und Leitfähigkeit in Abhängigkeit der Ölalterung.

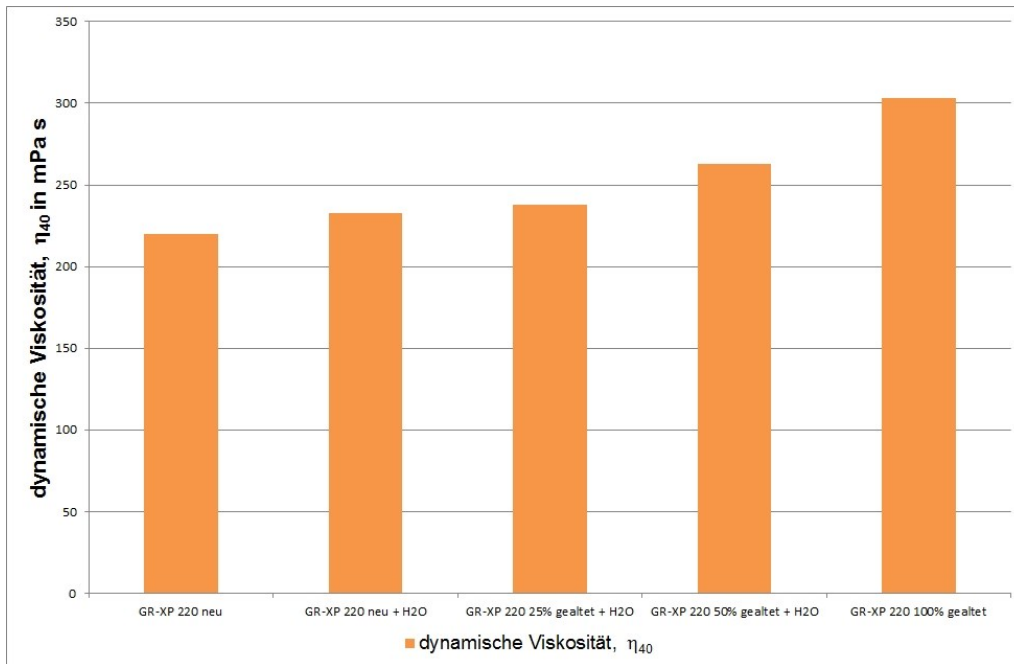


Bild 6.29: Dynamische Viskosität von GR-XP 220

Bild 6.30 zeigt die gemessene Leitfähigkeit in Abhängigkeit der Ölalterung.

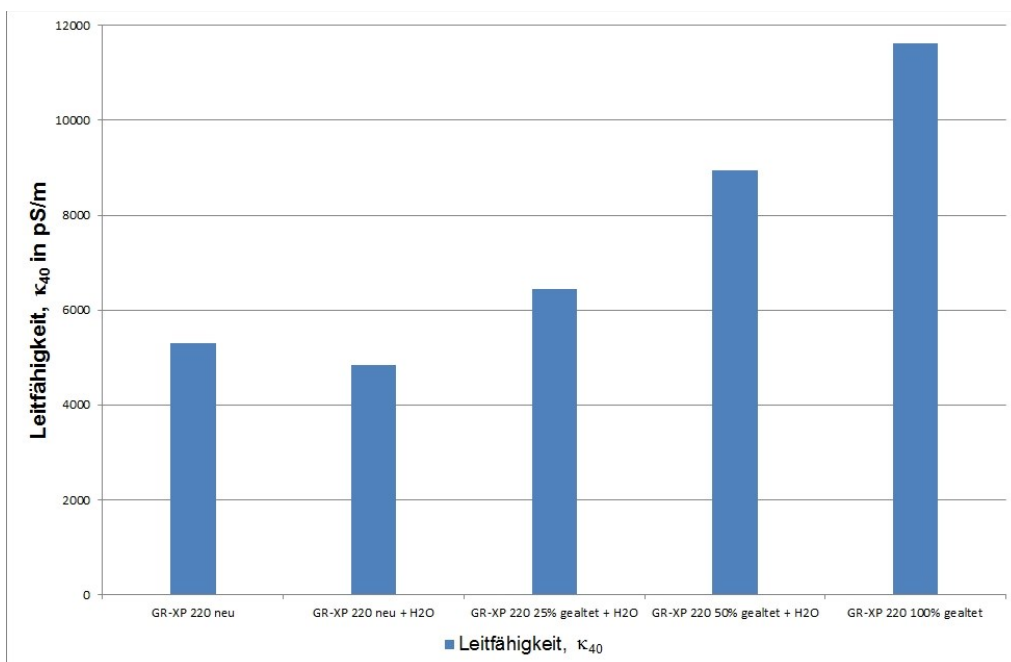


Bild 6.30: Leitfähigkeit von GR-XP 220

Es ist zu erkennen, dass es bei der Zudosierung von Wasser in Frischöl zu einer Erhöhung der Viskosität kommt. Das Hinzufügen von gealtertem Öl hat einen weiteren Anstieg der Messwerte zur Folge.

Die Werte der temperaturkompensierten Leitfähigkeit werden wegen des Additivabbaues durch die Wasserzudosierung geringer. Danach ist ein Anstieg mit zunehmender Ölalterung festzustellen. Einen ähnlichen Verlauf zeigt die temperaturkompensierte Dielektrizitätszahl.

Bild 6.31 zeigt die gemessene dynamische Viskosität und Dielektrizitätszahl in Abhängigkeit der Ölalterung.

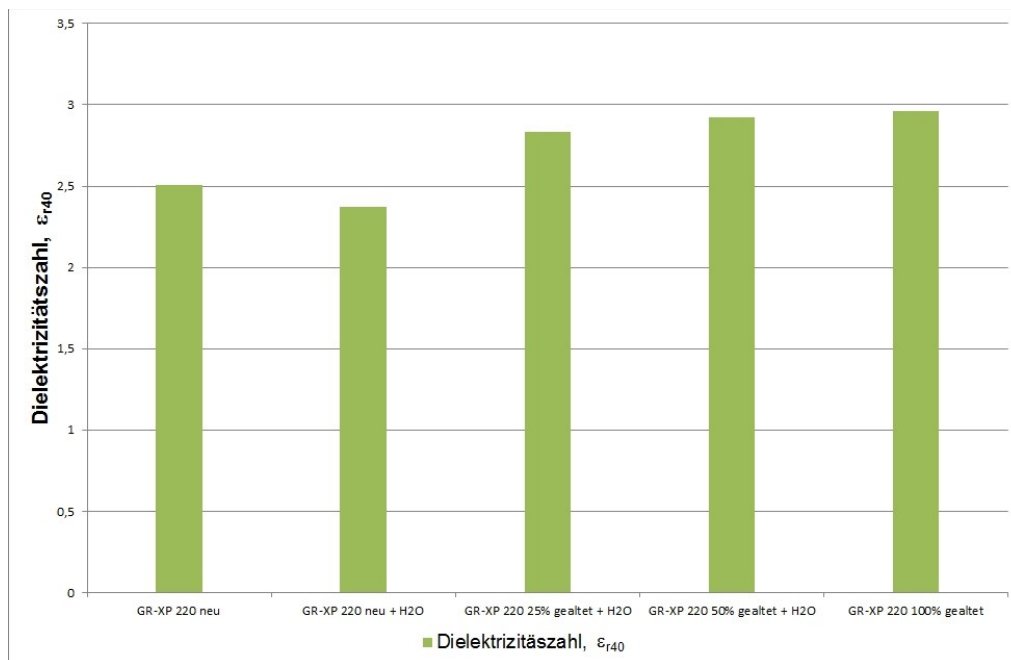


Bild 6.31: Dynamische Viskosität und Dielektrizitätszahl von GR-XP220

In den Bild 6.32 und Bild 6.33 ist die Abhängigkeit der Leitfähigkeit bzw. Dielektrizitätszahl von der Viskosität dargestellt.

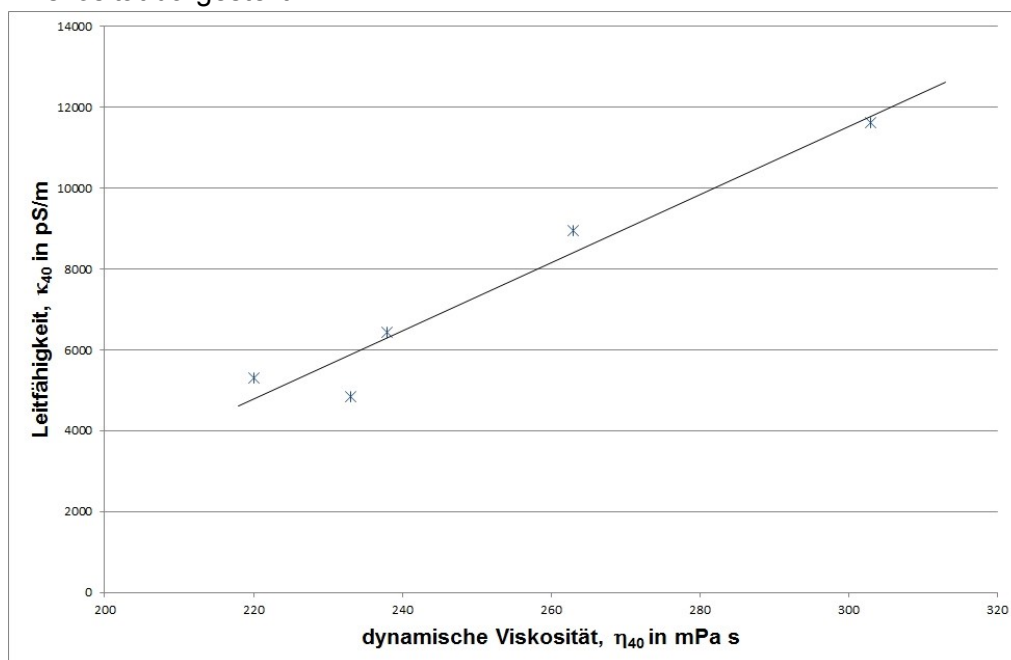


Bild 6.32: Leitfähigkeit in Abhängigkeit von der dynamischen Viskosität von GR-XP220

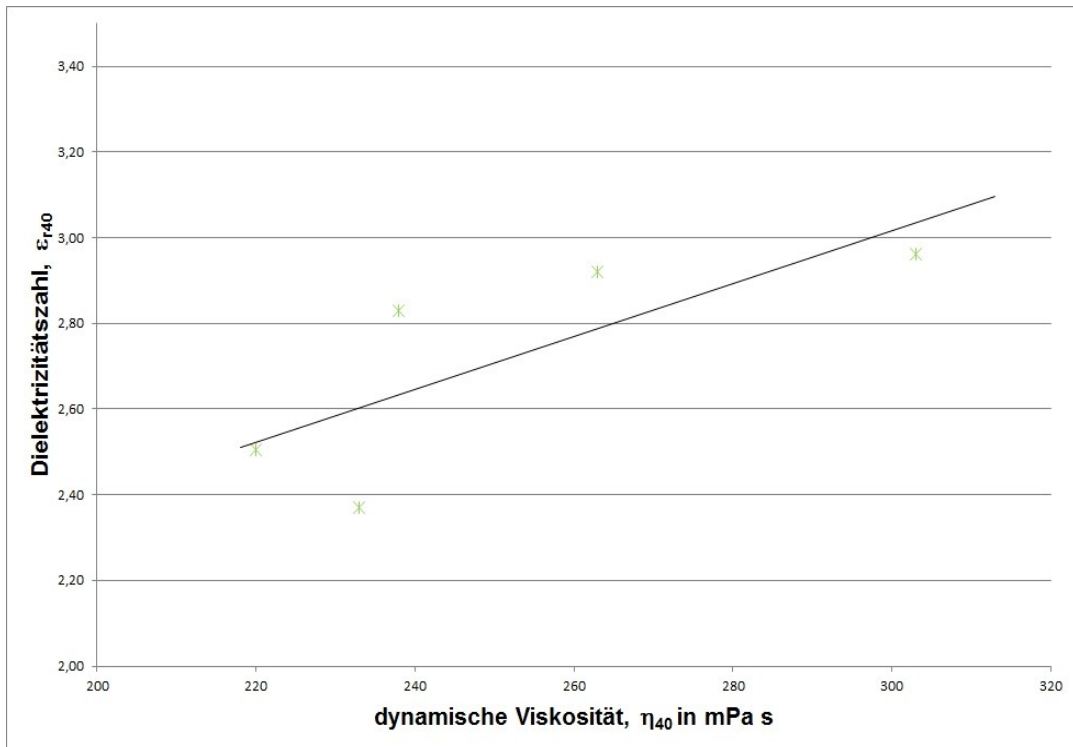


Bild 6.33: Dielektrizitätszahl in Abhängigkeit von der dynamischen Viskosität von GR-XP220

6.7 Gasfeuchtemessungen

Das Volumenverhältnis des Gasgemisches f_v drückt den volumenbezogenen Anteil der Wassermoleküle an der Gesamtheit der im Gasvolumen enthaltenen Moleküle aus. Es ist ein Maß für die Volumenkonzentration von Wasserdampf in einem Gasgemisch [80]. Das in diesem Laborversuch verwendete Gasgemisch ist Luft. Die theoretische Dielektrizitätszahl der „feuchten“ Luft berechnet sich über die Volumenverhältnisse [81].

$$\epsilon_{rG} = \frac{(\epsilon_{rWd} \cdot f_v + \epsilon_{rL} \cdot (1 - f_v))}{1} \quad (6.6)$$

mit

- ϵ_{rWd} : Dielektrizitätszahl von Wasserdampf
- ϵ_{rL} : Dielektrizitätszahl von Luft (1,000594)
- f_v : Volumenverhältnis von „feuchter“ Luft
- ϵ_{rG} : Dielektrizitätszahl der „feuchten“ Luft

Die Dielektrizitätszahl erhöht sich in Gasgemischen mit dem Anstieg der Volumenkonzentration von Wasserdampfmolekülen im Gasgemisch. Über den Prüfstand für die Gasfeuchtemessung wurde der CapHSens® mit unterschiedlichen Feuchten beaufschlagt und der Feuchtemesswert über Gl. (6.6) [81] aus der gemessenen Dielektrizitätszahl ϵ_r bestimmt. Bild 6.34 zeigt den Verlauf der mit dem CapHSens® ermittelten Feuchtwerte und zum Vergleich die mit Hilfe des Spurenfeuchtmessgeräts TMA 204 voreingestellten Feuchtwerte des Feuchtegenerators.

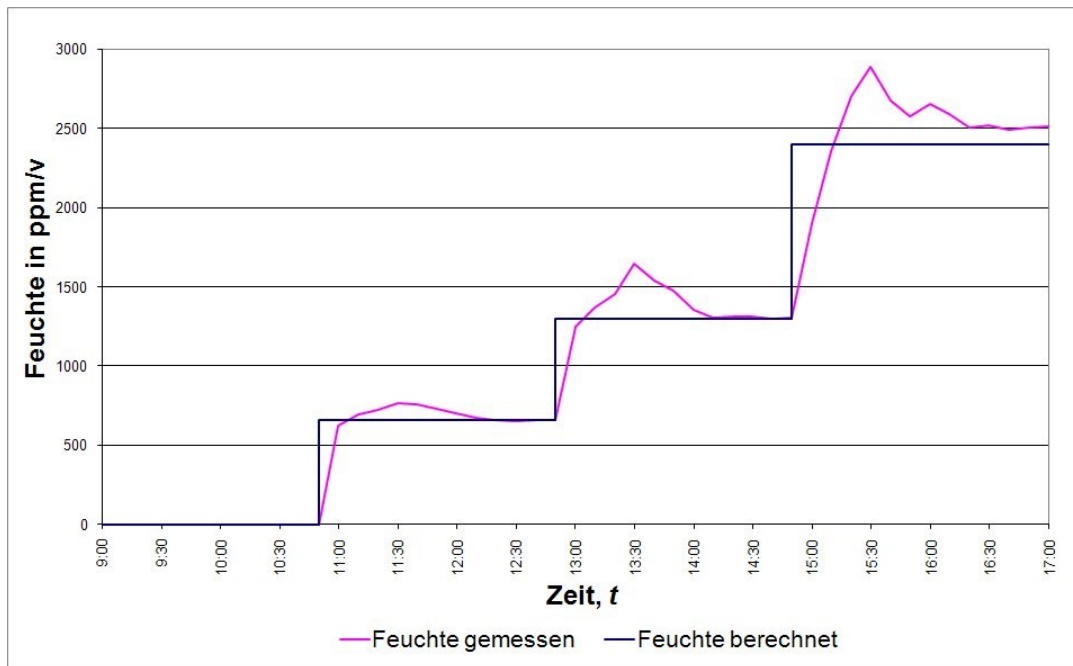


Bild 6.34: Berechnete und voreingestellte Feuchtwerte im Vergleich

Der Versuchsaufbau ermöglicht zwar weitgehend das Umschalten verschiedener Feuchtwerte ohne Druckänderung, jedoch bei der Umschaltung von trockenem auf mit Feuchte beaufschlagtem Gasgemisch aus dem Feuchtegenerator kommt es zu Überschwingungen, unter anderem bedingt durch die nicht für Gasspurenmessung ausgelegte Messkammer des Zwei-Platten-Sensors sowie durch kleinere Temperatureffekte. Hier ist zukünftig eine neue Basissensorentwicklung speziell für die Messung von Wasserspurenmessung in Gasen über die direkte Dielektrizitätszahlmessung geplant. Besondere Anwendungen könnten in der Feuchtemessung in aggressiven Gasen, wie z. B. in Erdgaspipelines, sein. Für diese Anwendungen sind derzeit keine langzeitstabilen Sensoren erhältlich.

6.8 Praktischer Vorversuch zur Eignung des Sensorsystems als Multi-Fuel-Sensor

Zur Reduzierung von CO₂-Emissionen werden neue Kraftstoffformulierungen mit Kohlenwasserstoffen aus fossilen und aus nachwachsenden Rohstoffen entwickelt und eingesetzt [82]. Während Biodieselsätze für den Kraftfahrzeugverkehr in vielen Ländern bereits gesetzlich vorgeschrieben sind, bringen FAME-Zusätze (Fettsäuremethylester, Biodiesel) [83] in Flugzeugkerosin derzeit erhebliche technische und logistische Probleme. Sie können in hierfür nicht geeigneten Flugzeugmotoren zu Leistungsabfällen bei niedrigen Temperaturen, zu Verstopfungen von Kontrollsystemen und Filtern und zu Pumpenausfällen führen. Bei vielen älteren Antriebsaggregaten sind die Auswirkungen von FAME-Zusätzen in Kerosin nicht ausreichend bekannt. FAME-Zusätze zu Treibstoffen solcher Flugzeuge werden daher als Verunreinigungen bewertet. Derzeit werden hierfür Grenzwerte von 5 ppm bis 400 ppm diskutiert. Bislang kann ein Biodieselsatz nur durch sehr aufwendige Beprobungen und Laboranalysen detektiert werden [84].

Fluggesellschaften wie z.B. Lufthansa oder Continental Airlines möchten künftig etwa 10% des Kerosinbedarfs durch FAME-Zusätze ersetzen. Die komplexe Versorgungskette für die

verschiedenen Treibstoffe wird dadurch erschwert, dass verschiedene Treibstoffprodukte über dieselben Pipelines (Multiproduktpipelines) transportiert werden. In einem praktischen Versuch soll eine prinzipielle Eignung des Sensorsystems zur Messung des FAME-Anteils in Kerosin geprüft werden. Im Falle positiver Messergebnisse kann darauf basierend eine Entwicklung eines Separationssystems für Multiproduktpipelines für Treibstoffe initiiert werden. Hierdurch können gegebenenfalls aufwändige Spülvorgänge und das Verwerfen großer Treibstoffmengen reduziert werden.

Es wurden Diesel mit 0% und 5% Biodieselanteil aus einer Raffinerie, sowie Diesel mit „bis zu 7% Biodiesel“ und 100% von einer Tankstelle beschafft und gemessen. Zusätzlich wurden Dieselmischungen mit ca. 53,5% und 78,5% aus Diesel mit bis zu 7% und 100% Biodiesel gemischt und vermessen.

Die Abhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit und der Dielektrizitätszahl von Diesel bei der Zudosierung von Biodieselanteil zeigen die beiden nachfolgenden Bilder [82].

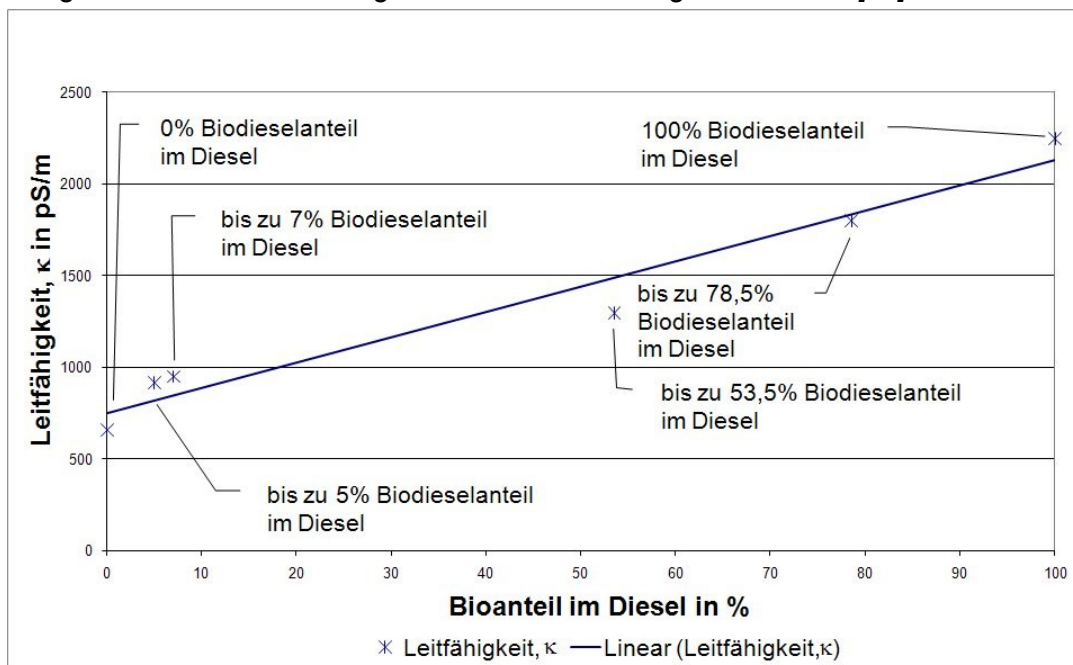


Bild 6.35: Elektrische Leitfähigkeit κ in Abhängigkeit des Biodieselanteils in Diesel

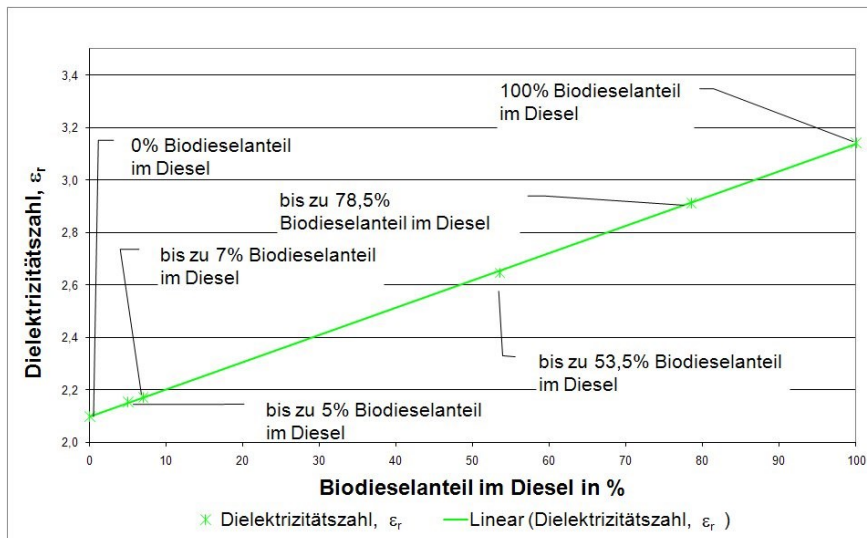


Bild 6.36: Dielektrizitätszahl bei Zudosierung von Biodieselanteil in Diesel

Die elektrische Leitfähigkeit von Diesel mit 0% Biodieselanteil liegt bei ca. 680 pS/m, bei reinem Biodieselanteil ca. 5500 pS/m. Die gemessene Dielektrizitätszahl von Diesel ohne Biodieselanteil liegt bei ca. 2,1. Hingegen ist der Wert der Dielektrizitätszahl von Biodiesel ca. 3,0. Dieser erste Test lässt vermuten, dass das Basissensorkonzept für Multi-Fuel-Sensorsysteme und eine Anwendungen in Multiproduktpipelines geeignet sein könnte. Eine Weiterentwicklung und Optimierung für diese Anwendung ist jedoch nicht Gegenstand dieser Arbeit, sondern soll in einem Anschlussprojekt durchgeführt werden.

6.9 Messergebnisse am Lagerprüfstand

Bei den durchgeführten Versuchen wird die Änderung der Leitfähigkeit und der Dielektrizitätszahl durch die Messung im Öl des Prüfgetriebes VarioGear gemessen und ausgewertet. Die im Versuch aufgenommen Messreihen werden mit den Drehzahlen und Drehmomenten und der daraus berechneten Verlustleistung im Getriebe verglichen. Die in diesem Abschnitt 6.9 skizzierten Ansätze zur Interpretation der Messergebnisse stellen lediglich erste Versuche zur Erkenntnisgewinnung durch die Anwendung des entwickelten Sensorsystems dar. Im Praxiseinsatz ist noch ein erheblicher Know-How-Aufbau erforderlich. Bereits jetzt zeigt sich jedoch ein erhebliches technisches Potential durch die Anwendung des QilQSens®. Die schnelle Online-Messung kann Optimierungen sowohl der Schmierstoffe, der Lager- und Getriebekonstruktion und der Belastungszyklen ermöglichen und vorsorgliche Wartungsmaßnahmen auslösen.

Im berichteten Prüfstandversuch wurde das Öl der Marke AVIA FLUID RSL 22, 32, 46, 68 [85] verwendet. Es ist ein Gemisch aus hochraffiniertem Mineralöl und Additiven. Die Veränderungen des Öls wurden zusätzlich an Hand von Laboranalysen des frischen und des benutzten Öls nach Ende des Versuchs bewertet.

Über das Drehmoment und die Winkelgeschwindigkeit lässt sich die drehzahlabhängige Leistung $P(n)$ des Getriebes berechnen.

$$P = M \cdot \omega \quad (6.7)$$

mit

$$\omega = 2\pi \cdot n \quad (6.8)$$

P: Leistung

M: Drehmoment

ω : Winkelgeschwindigkeit

n: Drehzahl

mit dem Übersetzungsverhältnis $N_{\ddot{U}}$ ist die Winkelgeschwindigkeit der Last

$$\omega_2 = N_{\ddot{U}} \cdot \omega_1 \quad (6.9)$$

$N_{\ddot{U}}$: Übersetzungsverhältnis

ω_1 : Winkelgeschwindigkeit des Antriebs

ω_2 : Winkelgeschwindigkeit der Last

Die im Getriebe umgesetzte Verlustleistung ΔP ist

$$\Delta P = \omega_1 \cdot (M_1 - N_{\ddot{U}} \cdot M_2) \quad (6.10)$$

ΔP : Verlustleistung im Getriebe

M_1 : Moment Antriebsmaschine

M_2 : Moment Bremsmaschine

Das Übersetzungsverhältnis des Prüfgetriebes ist $N = 1$. Im ersten Versuch auf dem Lagerprüfstand wurde durch hohe Belastung gezielt ein Lagerschaden erzeugt. In Bild 6.37 ist der Verlauf der Drehmomente der Antriebs- und der Bremsmaschine sowie die Drehzahl über den gesamten Versuchsverlauf dargestellt. Dieser Versuch wurde mit zwei eingebauten Prüflagern durchgeführt. Bedingt durch den Versuchsaufbau ist es notwendig, erst die Drehzahlen und Drehmomente auf 0 herunterzufahren, bevor eine neue Drehzahl und ein neues Drehmoment eingestellt werden kann. Bei der Lastumschaltung gegen 10:15 Uhr löste die Schwingungsüberwachung eine Abschaltung aus. Bei einem weiteren Versuch lief die Maschine hoch. Die dargestellten Schwankungen der abschnittsweise konstanten Drehzahlen sind Digitalisierungsfehler der Drehzahlmessung.

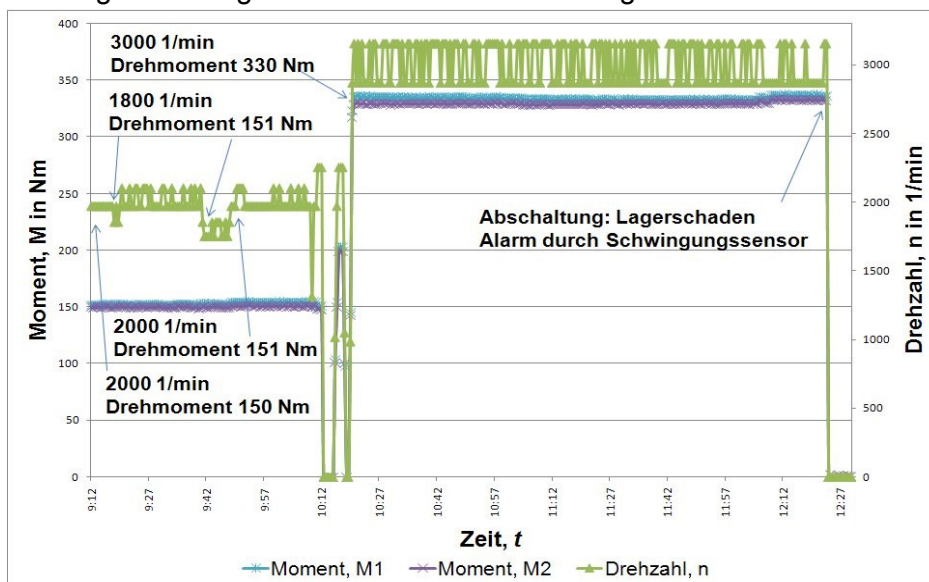


Bild 6.37: Drehzahlen und Drehmomente M

Aus den dargestellten Messsignalverläufen kann über Gl. (6.10) die zeitabhängige Verlustleistung im Getriebe berechnet werden. Diese ist in Bild 6.38 dargestellt. Die ungünstige Fortpflanzung der Messabweichung bei der Differenzbildung der Drehmomente bedingt

allerdings nennenswerte Messabweichungen in diesem Diagramm. Um 9:42 Uhr wurde kurzzeitig die Drehzahl reduziert und um 9:50 Uhr wieder auf 2000 Umdrehungen pro Minute hochgefahren. Mit der Drehzahlerhöhung vergrößerte sich die gemessene Verlustleistung.

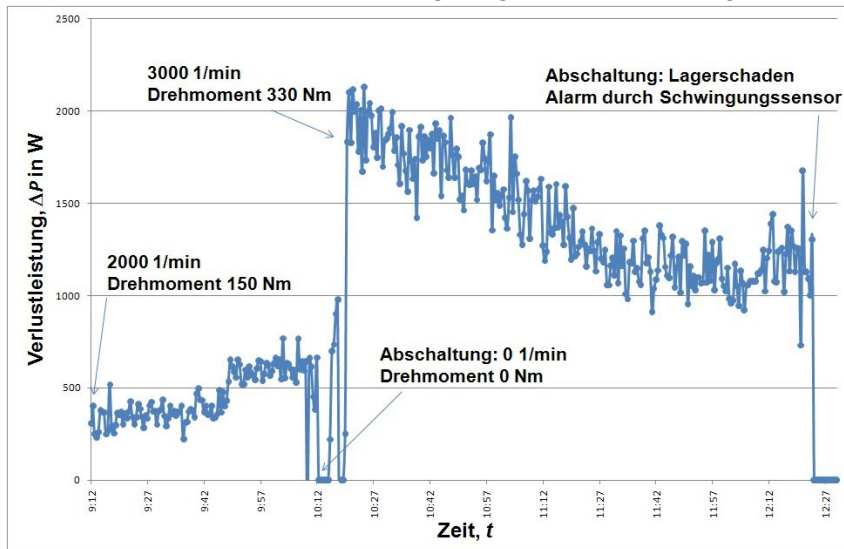


Bild 6.38: berechnete Verlustleistung ΔP

Nach dem Umschalten auf die höhere Last steigt die Verlustleistung sprunghaft auf ca. 2000W an. Nach dieser Änderung der Belastungssituation passen sich die Oberflächen der Wälzlagerkörper an, das Lager „läuft sich ein“. Zudem veränderten sich die Viskosität des Öls und die Ölströmung im Schmierpalt durch Temperaturerhöhungen. Beides resultiert in einer Verringerung der Verlustleistung im Getriebe. Der Verschleiß des Lagers ist vermutlich zunächst höher und nimmt dann kontinuierlich ab. Gegen Ende des Versuches, ist ein kurzzeitiger Anstieg der Verlustleistung zu erkennen. Vermutlich ist der Lagerverschleiß jetzt stark fortgeschritten und ein breiter Schmierpalt vorhanden, der allerdings hohe Schwingungsamplituden zulässt, die letztlich zur Abschaltung des Prüfstandes führten. Bild 6.39 zeigt die Messergebnisse der Leitfähigkeitsmessung des Getriebeöles.

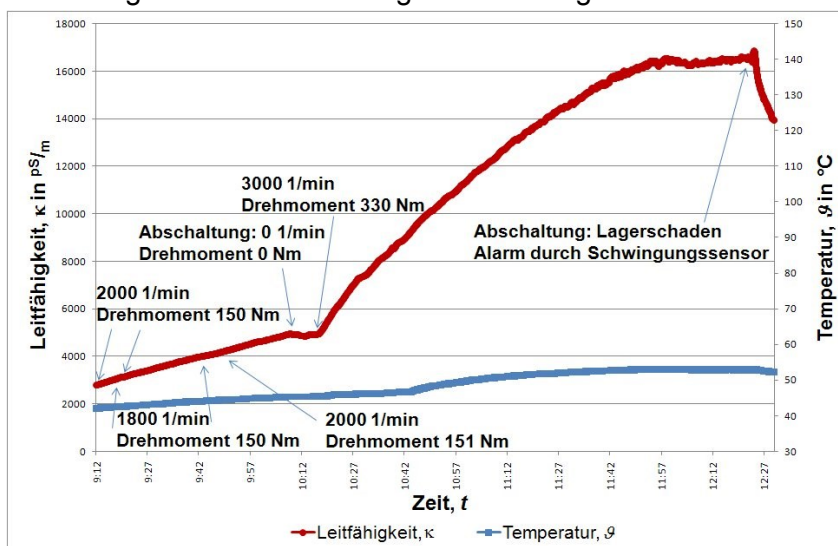


Bild 6.39: Leitfähigkeitsmessung κ

Die Änderung der Leitfähigkeit bildet im wesentlichen den vermuteten aktuellen Verschleiß des Lagers und des Öls im Versuch ab. Das neue Öl aus dem Vorratsbehälter hat eine Leitfähig-

keit κ von 2312 pS/m. Nach dem Einfüllen in das Versuchsgetriebe und vor dem Anlaufen des Versuchsstandes wurde eine Leitfähigkeit von 2791 pS/m gemessen. Die Erhöhung ist auf im Getriebe vorhandene Restverunreinigungen zurückzuführen. Während des Versuches änderte sich die Leitfähigkeit κ des Getriebeöls auf 16.868 pS/m. Ursache der Leitfähigkeits-erhöhung sind abgelöste Verschleißpartikel, Verschmutzungsprodukte, zerrissene Ölmoleküle, sich bildende Ölseifen usw. sowie Temperaturveränderungen. Die Temperaturabhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit des verwendeten Getriebeöls wurde im Labor gemessen und eine Umrechnung der jeweils im Getriebeversuch gemessenen Ölleitfähigkeit auf den entsprechenden Leitfähigkeitswert bei 40 °C durchgeführt. Bild 6.40 zeigt die gemessene Temperaturabhängigkeit der Ölleitfähigkeit und Bild 6.41 den temperaturkompensierten Ölleitfähigkeitsverlauf während des Getriebeversuchs.

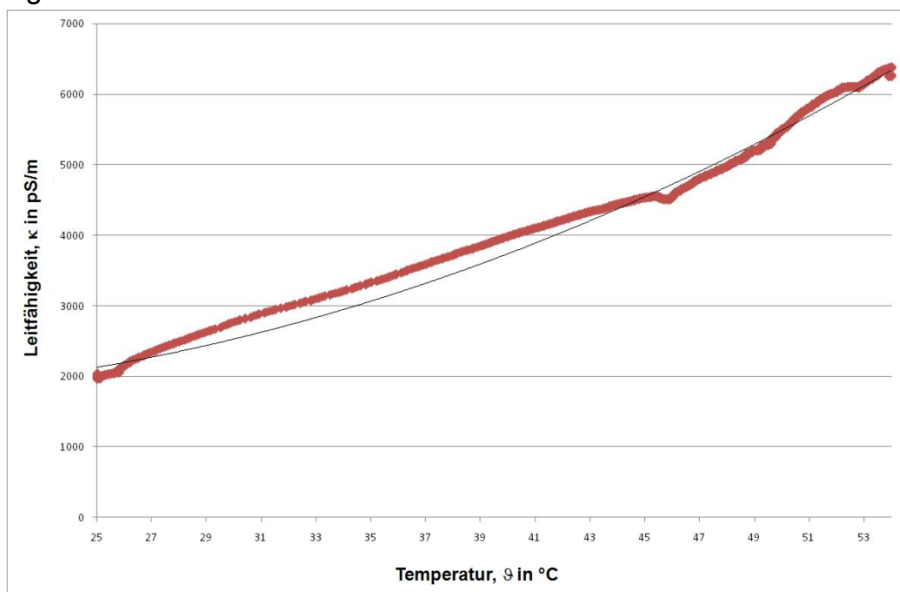


Bild 6.40: Temperaturabhängigkeit der Ölleitfähigkeit κ

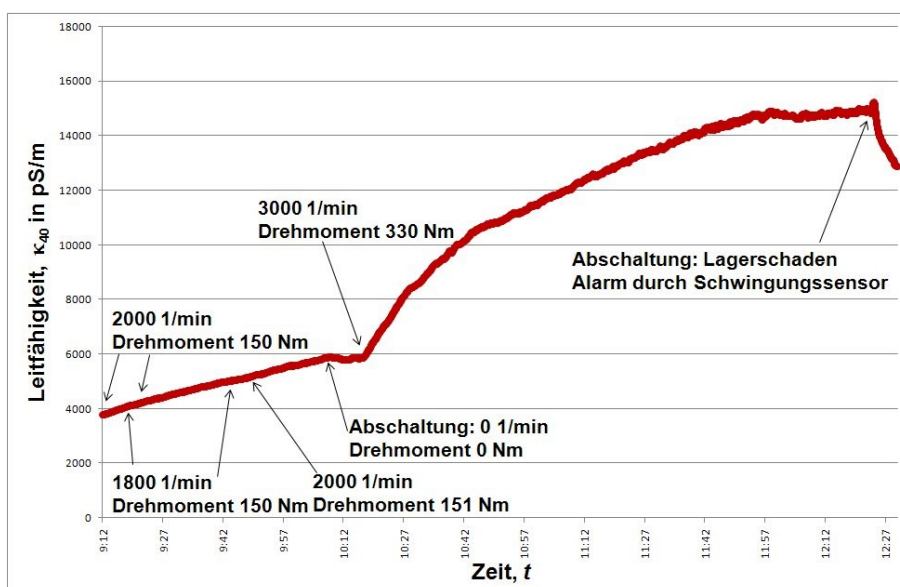


Bild 6.41: temperaturkompensierter Ölleitfähigkeitsverlauf κ_{40}

Bei der zunächst geringen Belastung stieg die elektrische Leitfähigkeit linear mit der Zeit. Vermutlich wächst der in diesem Bereich geringe Lagerverschleiß ebenfalls zeitproportional.

Während der notwendigen Abschaltung der Antriebsmaschine und dem Hochfahren der Antriebsmaschine auf 330 Nm, ist die Leitfähigkeit quasi konstant. Nach dem Umschalten auf die höhere Last steigt die Ölleitfähigkeit stark an. Das „Einlaufen“ der Lager zeigt sich hier in einer Reduktion der Steigerung der Leitfähigkeit. Ab ca. 30 Minuten vor der Zwangsabschaltung des Versuchs durch einen Schwingungssensor bleibt die Leitfähigkeit näherungsweise konstant, bevor unmittelbar vor der Abschaltung noch ein kurzzeitiger Anstieg festzustellen ist. Nach der Abschaltung des Prüfgetriebes sinkt die Ölleitfähigkeit stark ab. Hier zeigt sich deutlich die Wirkung der Additive. Während der Belastungsphasen werden mehr Verschmutzungsprodukte pro Zeiteinheit erzeugt, als über Additive gebunden werden können. Nach der Abschaltung des Prüfstandes fallen keine Verschmutzungsprodukte mehr an, wobei die Wirkung der Additive fort dauert.

In Bild 6.42 sind die aus jeweils über Drei-Minuten-Mittelwerte berechneten Änderungen der elektrischen Leitfähigkeit dargestellt.

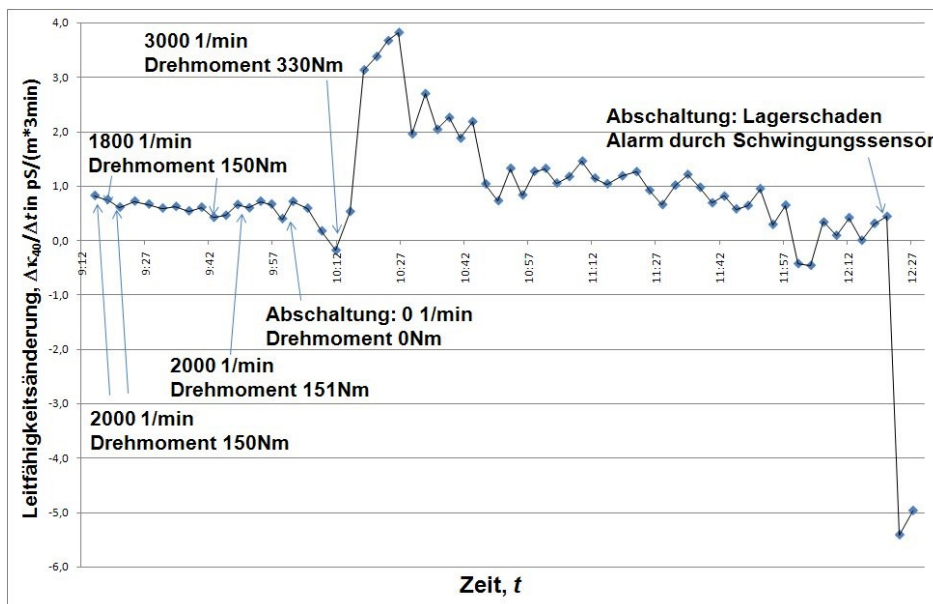


Bild 6.42: Steigung der Leitfähigkeit $\Delta\kappa_{40}/\Delta t$

Beim Anfahren mit 2000 rpm und einem Drehmoment von 150 Nm zeigt sich eine relativ konstante Leitfähigkeitsänderung von 0,6 bis 0,8 pS/m³ min (3,3 bis 4,4 fS/m s). Nach der Änderung des Drehmoments auf 330 Nm und der Drehzahl auf 3000 min⁻¹ steigt die Leitfähigkeitsänderung stark an, was auf die Bildung von ersten Mikroschälungen schließen lässt [86].

In diesem Zusammenhang ist es interessant, kurz auf die Schädigungseinleitung bei Frühausfällen von Wälzlagern z. B. in Industriegetrieben durch sogenannte weiß anätzende Risse einzugehen [87]. In Bild 6.43 zeigt im metallografischen Schliff eines Pendelrollenlagerinnenrings ein ausgedehntes Rissnetzwerk, das sich von der Initiierung an der Laufbahnoberfläche in Überrollrichtung (links nach rechts) verzweigend in die Tiefe und auch seitlich aufweitend entwickelt hat. Die Risspfade sind teilweise mit weiß anätzendem Gefüge dekoriert. Diese Gefügeumwandlung wird durch Wasserstoff bewirkt [87], der aus den Alterungsprodukten des eindringenden Schmieröls und dessen Additiven freigesetzt wird und an den

blanken Metalloberflächen der reibenden Rissflanken in die Stahlmatrix eindringen kann. Dieser Frühausfall wurde durch Ermüdungshaarrisse an der Laufbahnoberfläche ausgelöst.

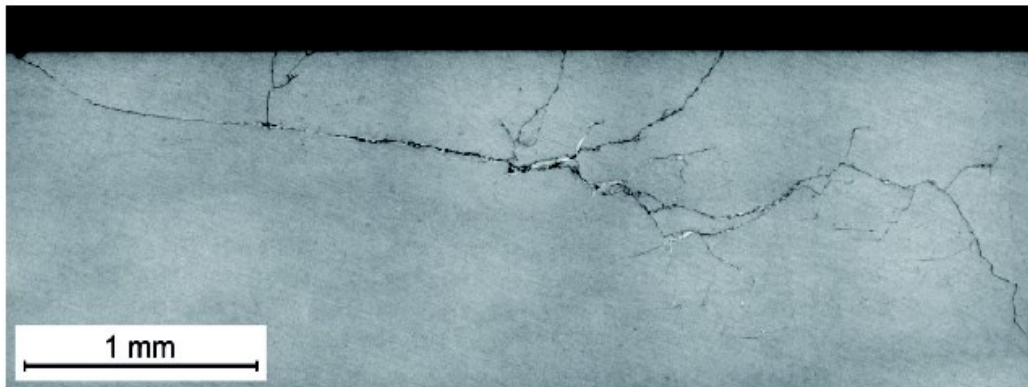


Bild 6.43: Weiß anätzendes Rissystem in einem frühausgefallenen Rollenlager aus einer Papiermaschine [86]

Noch häufiger werden weiß anätzende Risse an auf der Laufbahn axiale orientierten, spröden Gewaltbruchanrissen initiiert, die eine typische Tiefe um 100 bis 200 μm erreichen. Hier gilt eine Normalspannungshypothese [88]. Die Rissausbreitung folgt stets dem Mechanismus der Schwingungsrisskorrosion (Korrosionsermüdung). Der abgegebene Wasserstoff äußert sich auch in einer lokalen Versprödung des umgebenden Bruchgefüges bei präparativem Gewaltbruch zwecks Rissöffnung. Ein Beispiel zeigt Bild 6.44. Der hohe interkristalline Bruchanteil belegt die lokale Wasserstoffversprödung nur in der Umgebung von Korrosionsermüdungsrissen. Der entferntere Werkstoffbereich, auch direkt an der Laufbahnoberfläche, ist hiervon nicht betroffen.

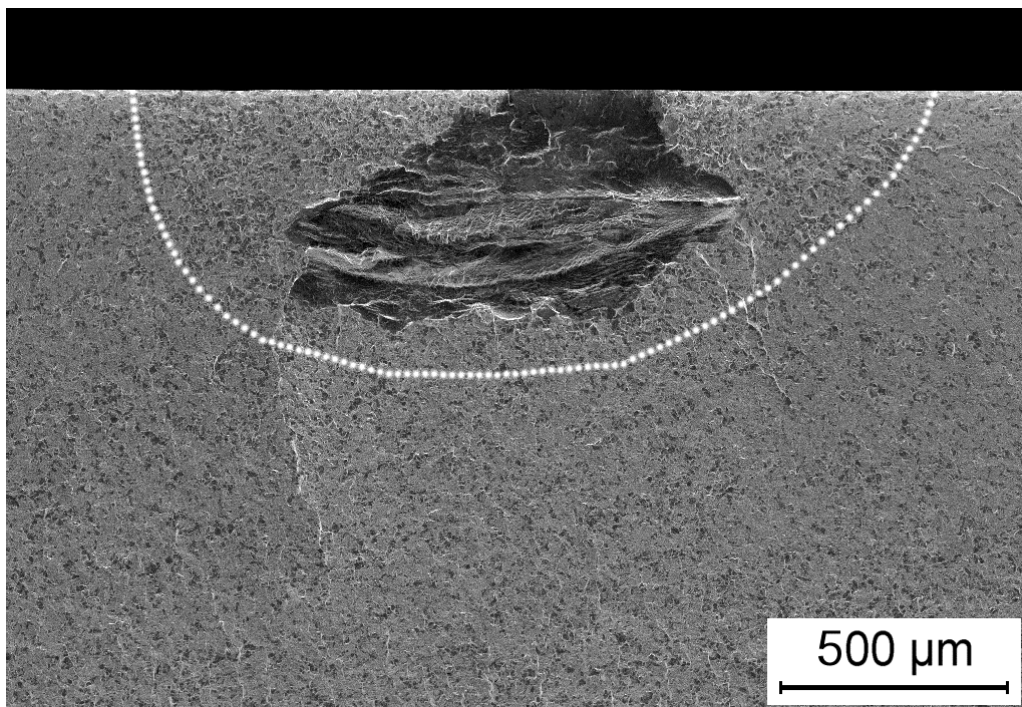


Bild 6.44: Durch lokale Wasserstoffversprödung verursachter erhöhter interkristalliner Anteil in präparativ erzeugten Gewaltbruchgefüge um einen originalen weiß anätzenden Riss [88].

Beide Anrissarten, Ermüdungshaarrisse und spröde Gewaltbruchanrisse werden durch Mischreibung im Wälzkontakt ausgelöst. Ursache dieser kritischen Mischreibungszustände sind Schwingungen [89]. Der Einsatz des neuen Ölsensorsystems erscheint insbesondere in Windenergiegetrieben zur Verbesserung der Zustandsüberwachung (Condition Monitoring) sehr vielversprechend.

Im Prüfstandslauf zeigt sich nach der Belastungserhöhung eine steigende Dynamik (Spitzen) in der Änderung der Ölleitfähigkeit. Dies lässt auf zeitlich schwankenden Verschmutzungsanfall und Veränderungen der Lagerbelastungen schließen, wie es beim Bilden von Pittings zu erwarten ist [90]. Die Sprünge in der Steigung der elektrischen Leitfähigkeit vor dem Abschalten sind ein Indiz für den endgültigen Lagerschaden. Bild 6.45 zeigt den beschädigten Lagerinnenring mit starken Pittings des Planetenradlagers nach Ende des Versuches.



Bild 6.45: Ausgedehnte Grübchenbildung auf einem Planetenradlagerinnenring

Betrachtet man die Änderung der Leitfähigkeit κ über den Verlauf der Verlustleistung im Getriebe, so ergibt sich der in Bild 6.46 dargestellte Zusammenhang. Sowohl die steigende Änderung der Ölleitfähigkeit als auch die Getriebeverlustleistung sind mit dem Lagerverschleiß korreliert.

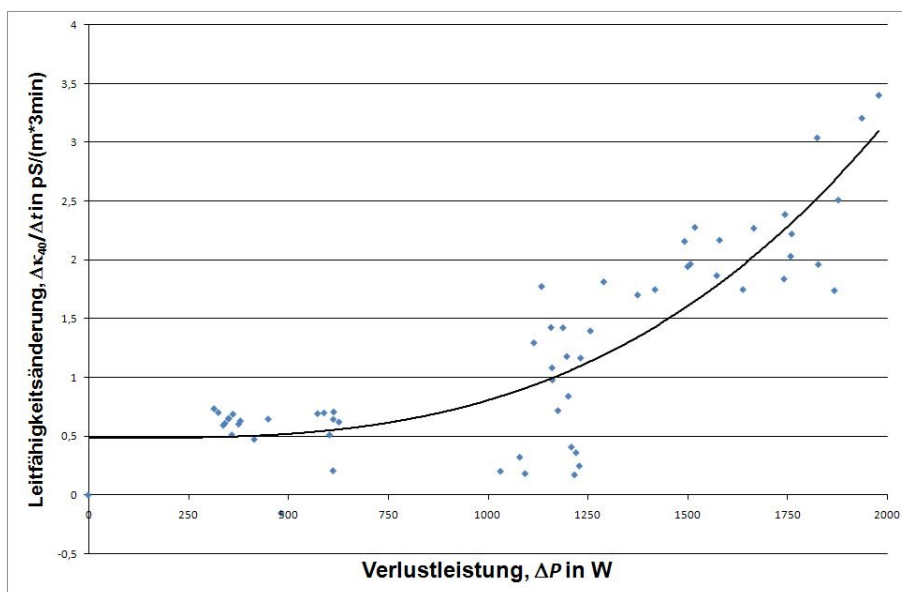


Bild 6.46: Leitfähigkeitsänderung $\Delta\kappa_{40} / \Delta t$ in Abhängigkeit der Getriebeverlustleistung

Im Diagramm ist eine Trendlinie als Polynom dritten Grades eingezeichnet. Je größer die Steigungen der Leitfähigkeit und je größer die Verlustleistung im Getriebe desto größer ist auch der Lagerverschleiß. Außergewöhnliche Änderungen des Systems, wie z. B. die Umschaltung der Lastbedingungen sind nicht berücksichtigt.

Zusätzlich zur elektrischen Leitfähigkeit wird die Dielektrizitätszahl des Öls gemessen. Ursprünglich war eine Bestimmung des Wassergehaltes aus der Dielektrizitätszahl beabsichtigt. Dieses erscheint aus den in Abschnitt 6.1 diskutierten Gründen nur bei nicht additierten Ölen sinnvoll. Es ist zu klären, ob die nachlassende Wirksamkeit der Additive über die Dielektrizitätszahlmessung detektiert werden kann. Hierzu sind, im Anschluss an diese Arbeit, weitere Messreihen erforderlich. Mit steigendem Wassergehalt wird der Ölverschleiß größer. Bild 6.47 zeigt den zeitlichen Verlauf der Dielektrizitätszahl während des Versuchs. Wegen der Temperaturabhängigkeit ist zudem der Temperaturverlauf dargestellt.

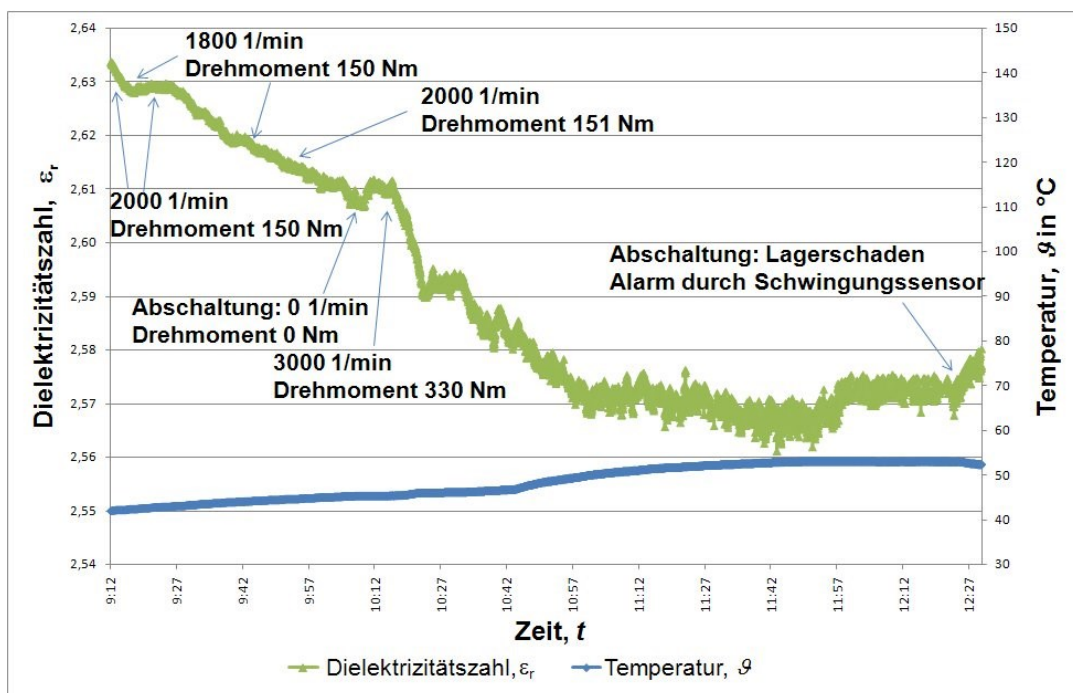


Bild 6.47: Dielektrizitätszahl- und Temperaturverlauf

Die Änderung der Dielektrizitätszahl beruht auf einer Kombination von Effekten einer chemischen Reaktion der Additive, dem Ausdampfen von Wasser aus dem Öl, einer Temperaturabhängigkeit der Zellkonstanten (vergleiche Abschnitt 3.2) und einer Temperaturabhängigkeit der Dielektrizitätszahl selbst. Die Temperatur erhöht sich während des Versuchs von 42 auf 52,9 °C. Die Temperaturabhängigkeit begründet die in Abschnitt 3.8 entwickelte adaptive, selbstlernende Temperaturkompensation. Bei dem Getriebeversuch kam diese jedoch noch nicht zum Einsatz. Anstelle dessen wurde die Temperaturabhängigkeit der Dielektrizitätszahl des verwendeten Getriebeöles im Labor gemessen und eine Umrechnung der jeweils im Versuch gemessenen Dielektrizitätszahl auf den Wert bei 40 °C durchgeführt. Bild 6.48 zeigt den temperaturkompensierten Dielektrizitätszahlverlauf während des Getriebeversuchs.

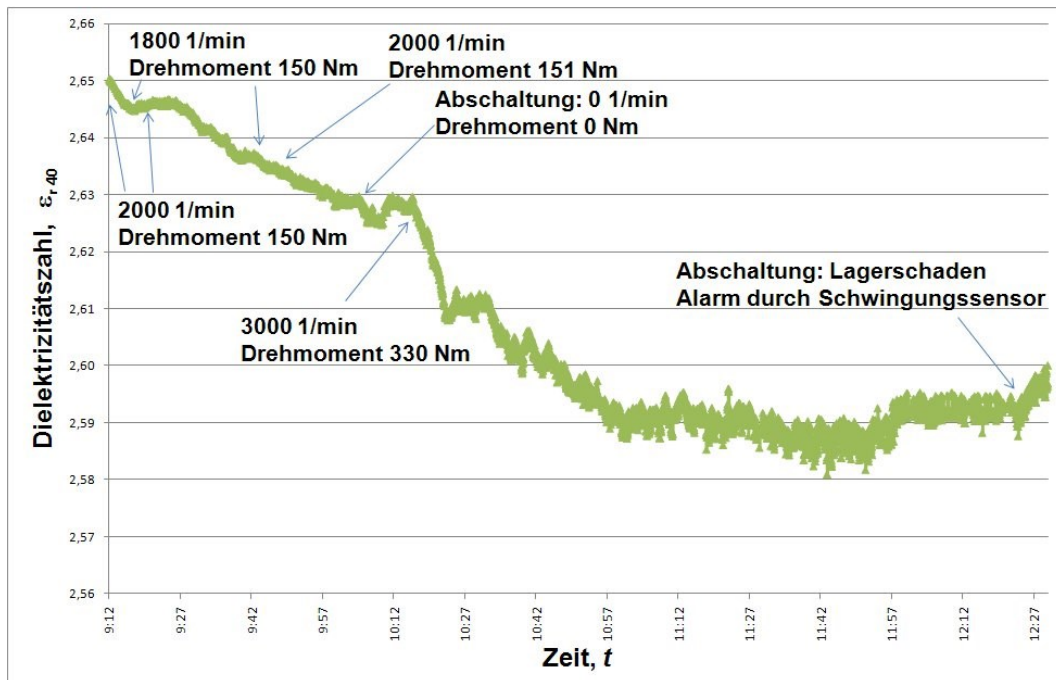


Bild 6.48: temperaturkompensierter Dielektrizitätszahlverlauf ϵ_{r40}

Vor dem Versuch, 30 Minuten vor dem Versuchsende und nach dem Versuch wurden dem Prüfgetriebe Ölproben für eine Laboranalyse entnommen. Die in einem externen Labor durchgeführten Messungen sind die Bestimmung von Abriebkomponenten, Verschleißpartikeln und Verunreinigungen nach DIN 51396-1 [91], Änderung der Viskosität nach DIN 51562-1 [92] und Bestimmung des Viskositätsindex nach DIN ISO 2909 [93]. Zudem wurde eine Bestimmung der Neutralisationszahl (Säurezahl) nach DIN 51558, Teil 1 [94] durchgeführt.

Tabelle 10 zeigt die Untersuchungsergebnisse.

		Probe 1 unbenutztes Öl	Probe 2 30 Minuten vor Ende	Probe 3 nach Versuchs- ende
VERSCHLEISS				
Eisen	Fe mg/kg	1	1	2
Chrom	Cr mg/kg	0	0	0
Zinn	Sn mg/kg	0	0	0
Aluminium	Al mg/kg	0	0	1
Nickel	Ni mg/kg	0	0	0
Kupfer	Cu mg/kg	0	0	0
Blei	PB mg/kg	0	4	4
PQ-Index		ok	ok	ok
VERUNREINIGUNG				
Silizium, Staub	Si mg/kg	1	1	1
Kalium	K mg/kg	0	0	1
Natrium	Na mg/kg	2	2	3
Wasser	%	<0,10	<0,10	<0,10
ÖLZUSTAND				
Viskosität bei 40°C	mm ² /s	22,22	22,15	22,1
Viskosität bei 100°C	mm ² /s	4,18	4,26	4,18
Viskositätsindex		81	93	84
Oxidation	A/cm	1	1	1
ADDITIVE				
Kalzium	Ca mg/kg	59	68	57
Magnesium	Mg mg/kg	8	6	6
Bor	B mg/kg	1	0	0
Zink	Zn mg/kg	244	254	246
Phosphor	PB mg/kg	224	224	214
Barium	Ba mg/kg	0	0	0
Molybdän	Mo mg/kg	0	0	0
Schwefel	S mg/kg	1835	1795	1719
ZUSATZTEST				
Neutralisationszahl	mgKOH/g	0,24	0,20	0,29

Tabelle 10: Laboranalyse des Öls aus dem ersten Getriebeversuch

Die Ergebnisse der Untersuchung der drei entnommenen Ölproben zeigen auch im direkten Vergleich kaum verwertbare Änderungen. Bei der Bestimmung der Verunreinigungen und Verschleißpartikel wurden nur geringe Änderungen festgestellt. Die gemessene Viskositätsänderung liegt innerhalb der geschätzten Messabweichungen dieser Messungen. Der Viskositätsindex ist ein Maß für die Viskositätsänderung bei Temperaturänderung. Hier zeigt sich eine minimale Verbesserung der temperaturbedingten Viskositätsänderung bei der zweiten Probe. Die Messergebnisse zur Neutralisationszahl zeigen ebenfalls nur geringe, innerhalb der Messtoleranz liegende Abweichungen. Der entstandene Lagerschaden ist mit den hier eingesetzten, herkömmlichen Methoden der Ölanalyse nicht detektierbar.

Es wurde ein zweiter Versuch mit nur einem Prüflager durchgeführt. Zur Untersuchung der Pittingbildung sollte ein früherer Abbruch des Versuchs erfolgen. In Bild 6.49 ist die Drehzahl und der Verlauf der Drehmomente der Antriebsmaschine und der Bremsmaschine über den Versuchsverlauf dargestellt.

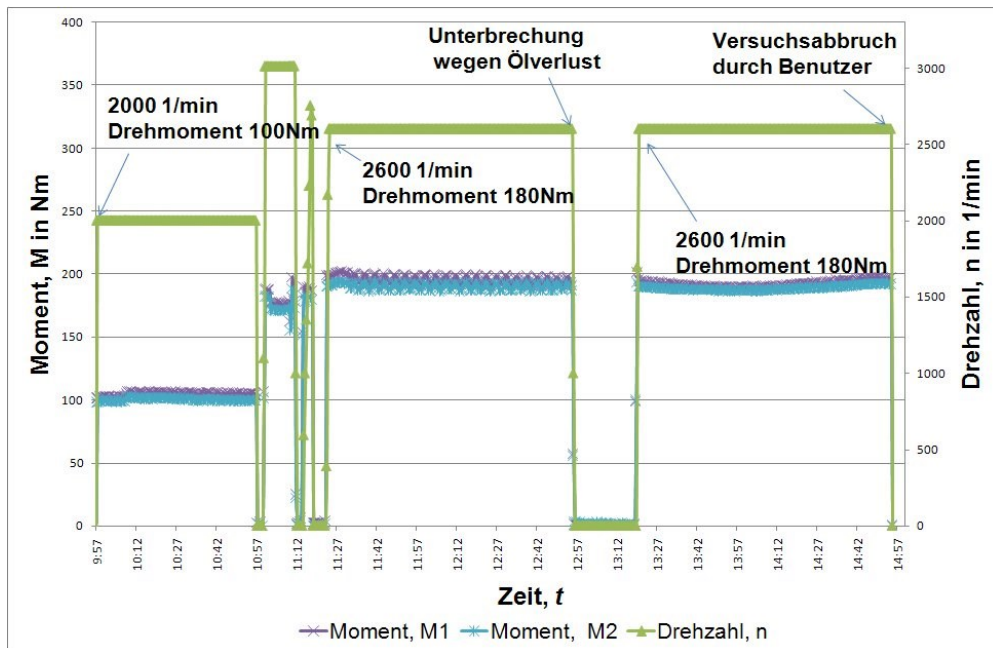


Bild 6.49: Drehzahlen und Drehmomente mit einem Prüflager

Um 10:57 Uhr wurde auf eine höhere Last umgeschaltet, um 12:55 Uhr wurde der Versuch wegen einer Ölleckage am Getriebe unterbrochen. Bild 6.50 zeigt die aus den in Bild 6.49 dargestellten Messdaten berechnete Verlustleistung im Getriebe; es sei jedoch auch hier angemerkt, dass das Diagramm durch die ungünstige Fehlerfortpflanzung bei der Differenzbildung der Drehmomente große Messabweichungen beinhalten kann.

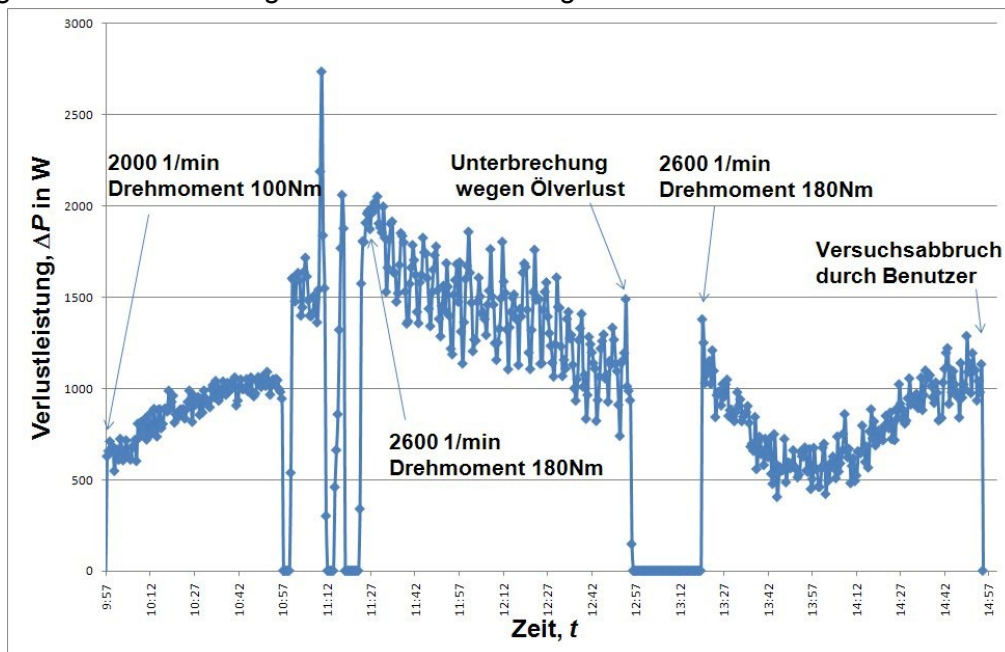


Bild 6.50: Berechnete Verlustleistung ΔP beim Versuch mit einem Prüflager

Bild 6.51 zeigt den zeitlichen Verlauf der gemessenen Leitfähigkeit des Getriebeöles.

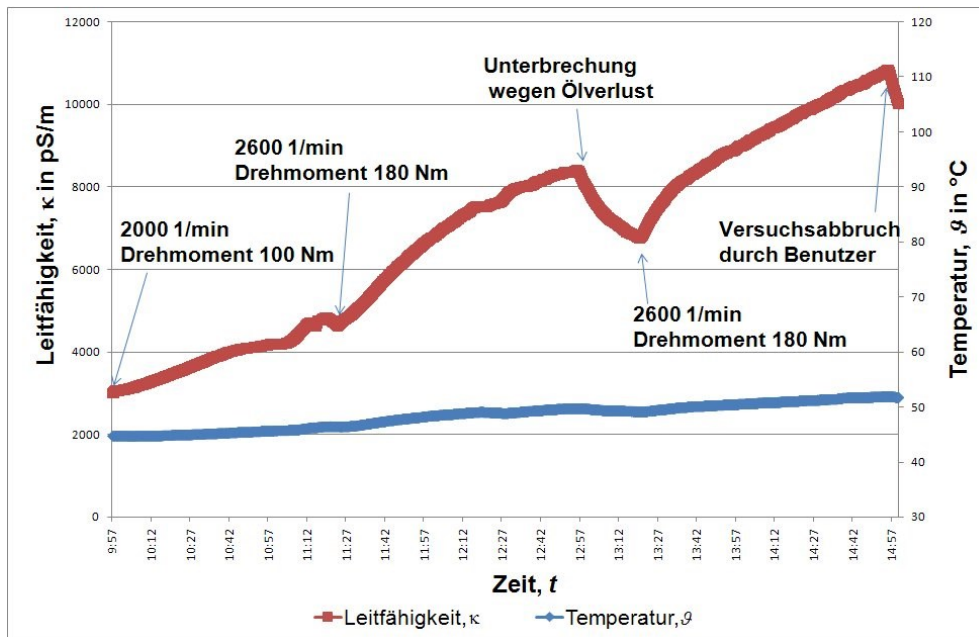


Bild 6.51: Ölleitfähigkeit κ beim Versuch mit einem Prüflager

Nach dem Einfüllen des neuen Öls aus dem Vorratsbehälter in das Getriebe wurde eine Leitfähigkeit κ von 2955 pS/m gemessen. Die Leitfähigkeitserhöhung um 643 pS/m vor Versuchsbeginn ist durch Restverunreinigungen im Getriebe verursacht. Im Laufe des Versuches ändert sich die Leitfähigkeit κ des Getriebeöles auf 10.960 pS/m. Der temperaturkompensierte Ölleitfähigkeitsverlauf ist in Bild 6.52 skizziert.

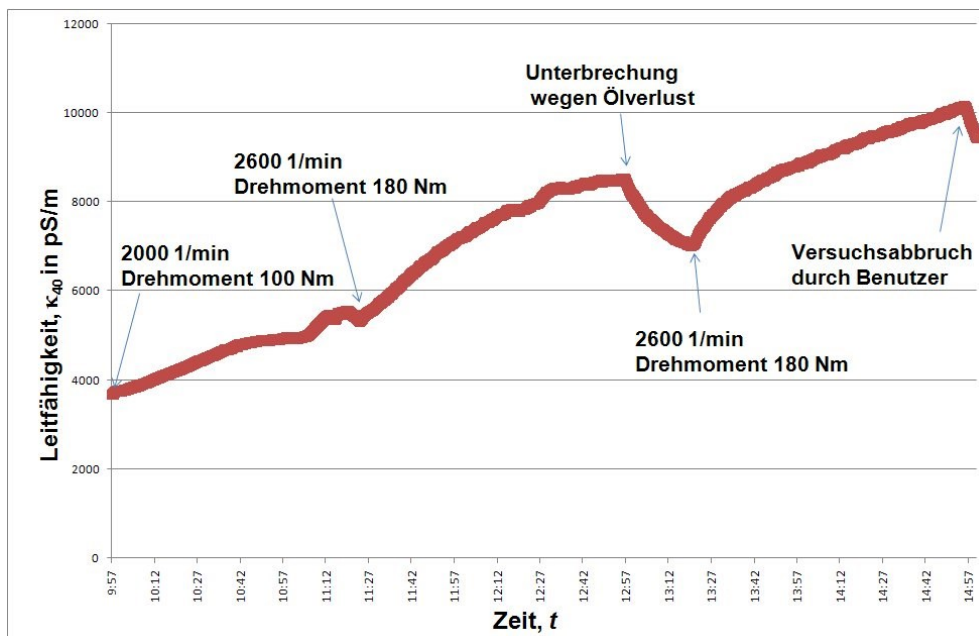


Bild 6.52: temperaturkompensierter Ölleitfähigkeitsverlauf κ_{40} mit einem Prüflager

Während der Belastungsphasen des Getriebes steigt die Ölleitfähigkeit kontinuierlich. Die Wirkung der Additive wird bei abgeschaltetem Antrieb in der Reduktion der Leitfähigkeit deutlich. Nach dem Wiedereinschalten wird ein starker Anstieg der Leitfähigkeit und damit vermutlich auch des Verschleißes gemessen. Die zeitliche Ableitung, wiederum nach der Bildung von Drei-Minuten-Mittelwerten, ist in Bild 6.53 dargestellt.

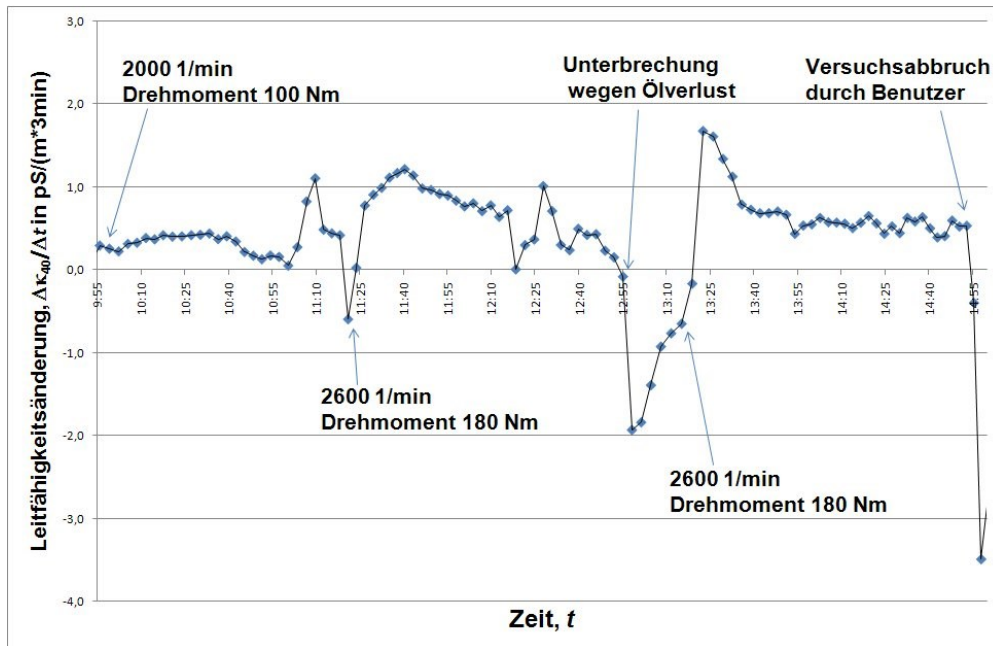


Bild 6.53: Steigung der Leitfähigkeit $\Delta\kappa_{40} / \Delta t$

Auffallend sind die starken Veränderungen der Leitfähigkeitsgradienten ab 12:10 Uhr. Eine denkbare Ursache sind unterschiedliche Belastungszustände im Lager während der Schädigungseinleitung, einhergehend mit beginnender Grübchenbildung [95]. Nachdem um 13:30 Uhr eine Leckage behoben und Öl nachgefüllt wurde, treten maximale Leitfähigkeitsänderungen von 1,7 pS/m³ min auf. Anschließend deutet sich wieder ein „Einlaufen“ des Lagers an. Verstärkte Schwankungen der Leitfähigkeit, etwa in der letzten Stunde vor der Abschaltung durch den Schwingungssensor, deuten auf das Entstehen weiterer Grübchen bzw. Schälungen im Wälzlager hin.

Bild 6.54 zeigt den Temperatur- und den Dielektrizitätszahlverlauf.

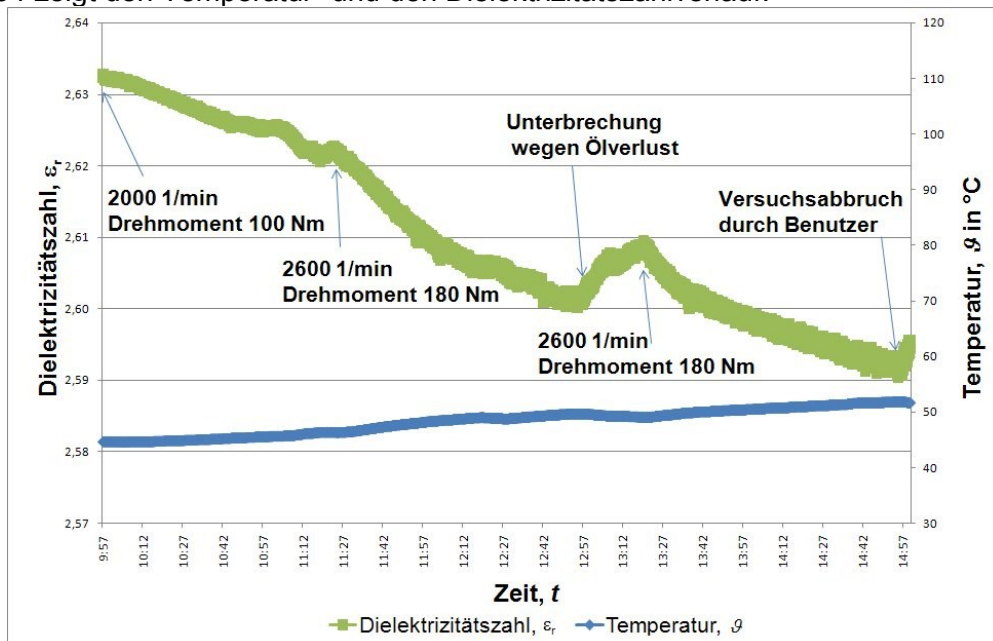


Bild 6.54: Dielektrizitätszahlmessung ε_r mit einem Prüflager

Die gemessene Temperatur erhöht sich während des Versuchs von 44,6 auf 51,8 °C. Analog zum ersten Versuch zeigen sich hier gleiche Effekte wie beim ersten Versuch. Während der Versuchsunterbrechung wegen der Ölleckage steigt die Dielektrizitätszahl durch Temperatureffekte und der Wirkung der Additive wieder an. Bild 6.55 zeigt den temperaturkompensierten Dielektrizitätszahlverlauf.

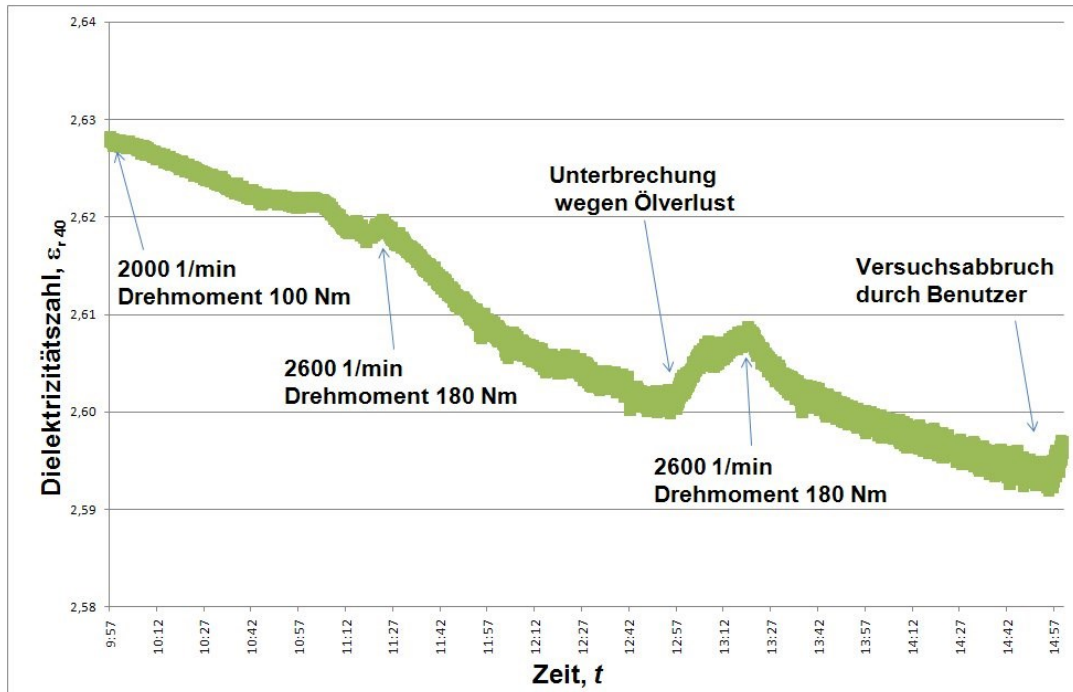


Bild 6.55: temperaturkompensierter Dielektrizitätszahlverlauf ϵ_{r40} mit einem Prüflager

Die Laboruntersuchungen der Ölproben zeigen analog zum vorherigen Versuch kaum Änderungen in der Zusammensetzung des gebrauchten Öls im Vergleich zum neuen Öl. Die gemessene Neutralisationszahl stieg von 0,24 auf 0,31 mg KOH/g. Die nachfolgende Tabelle 11 zeigt die Ergebnisse des Ölanalyselabors.

			Probe 1 unbenutztes Öl	Probe 2 nach Versuchs- ende
VERSCHLEISS				
Eisen	Fe	mg/kg	1	1
Chrom	Cr	mg/kg	0	0
Zinn	Sn	mg/kg	0	0
Aluminium	Al	mg/kg	0	0
Nickel	Ni	mg/kg	0	1
Kupfer	Cu	mg/kg	0	0
Blei	PB	mg/kg	0	1
PQ-Index			ok	ok
VERUNREINIGUNG				
Silizium, Staub	Si	mg/kg	1	0
Kalium	K	mg/kg	0	0
Natrium	Na	mg/kg	2	3
Wasser		%	<0,10	<0,10
ÖLZUSTAND				
Viskosität bei 40°C		mm ² /s	22,22	22,23
Viskosität bei 100°C		mm ² /s	4,18	4,19
Viskositätsindex			81	83
Oxidation		A/cm	1	1
ADDITIVE				
Kalzium	Ca	mg/kg	59	58
Magnesium	Mg	mg/kg	8	5
Bor	B	mg/kg	1	0
Zink	Zn	mg/kg	244	251
Phosphor	PB	mg/kg	224	217
Barium	Ba	mg/kg	0	0
Molybdän	Mo	mg/kg	0	0
Schwefel	S	mg/kg	1835	1713
ZUSATZTEST				
Neutralisationszahl		mgKOH/g	0,24	0,31

Tabelle 11: Ergebnisse der Laboranalyse zum Versuch mit einem Prüflager

Bild 6.56 zeigt ein Foto der Pittings am Innenring des Planetenradlagers nach Ende des Versuches.



Bild 6.56: Schälungen auf einem Planetenradlagerinnenring

Bild 6.57 zeigt eine Korrelation zwischen der Verlustleistung im Getriebe und der Änderung der Leitfähigkeit. Änderungen der Belastungszustände durch Umschalten des Getriebes sind nicht berücksichtigt.

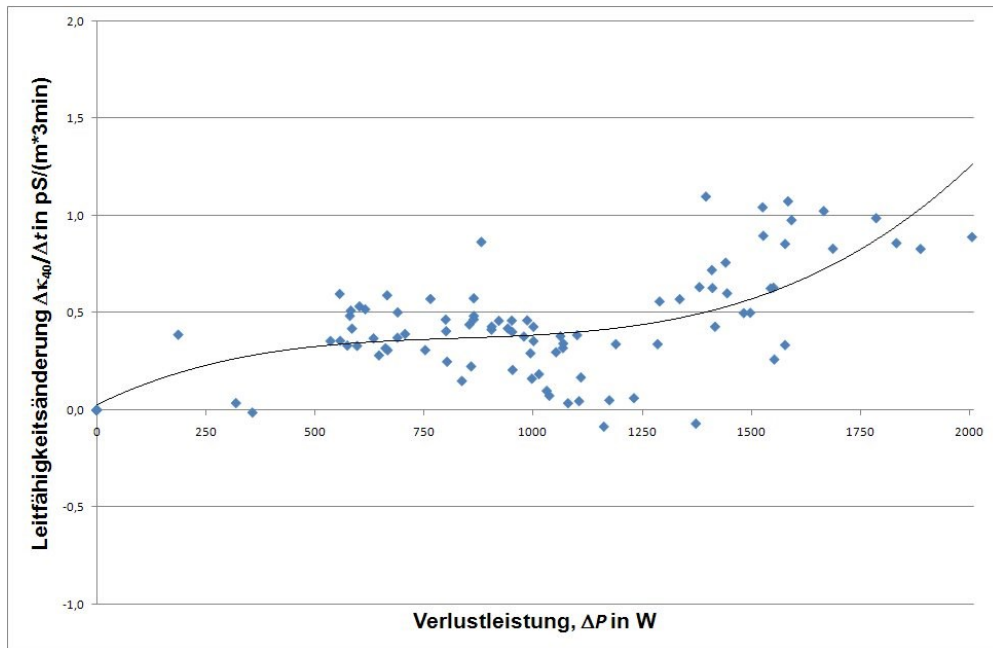


Bild 6.57: Leitfähigkeitsänderung über Verlustleistung ΔP mit nur einem Prüflager

Bild 6.58 skizziert den Versuch einer schematischen Bewertung der Ölleitfähigkeitsmessergebnisse in späteren Einsatzbereichen. Der zulässige Arbeitsbereich liegt unterhalb eines für die jeweilige Anwendung vorgegebenen Leitfähigkeitsgrenzwertes. Zusätzlich wird ein maximaler Grenzwert der Steigung der Ölleitfähigkeit vorgegeben. In Bild 6.58 ist dieser durch die grünen Steigungslinien angedeutet. Eine Überschreitung dieses Grenzwertes ist ein Indiz für eine unzulässige Beanspruchung.

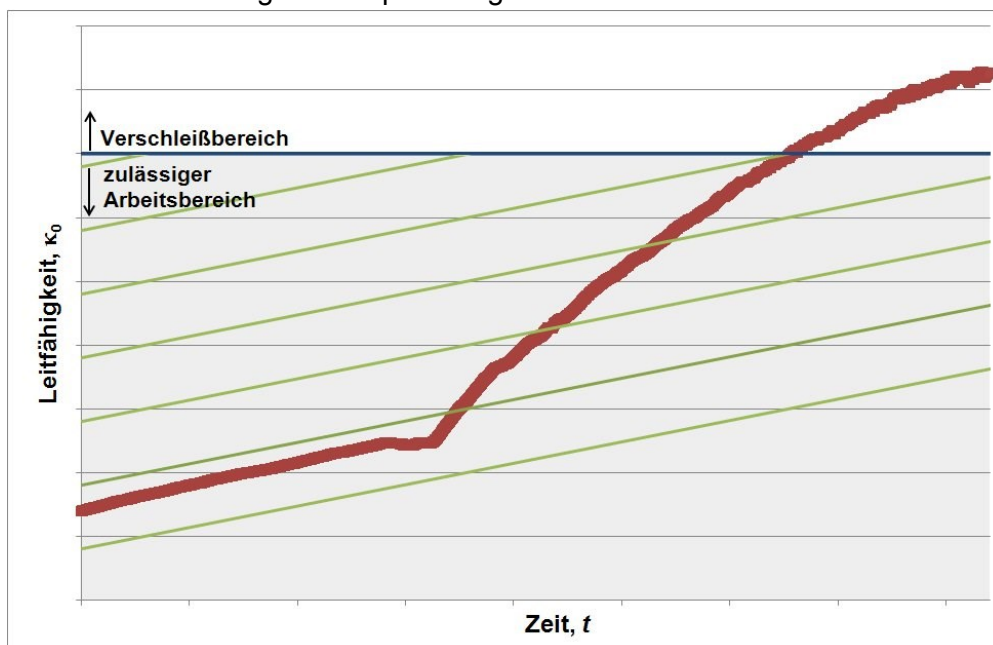


Bild 6.58: Zulässige Betriebsbereiche

6.10 Vergleichsmessung mit einem Leitfähigkeitsmessgerät

Das nicht temperaturkompensierte Messgerät MLA 900 ist laut Hersteller für die Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit im Bereich von 0 bis 1999 pS/m und der gleichzeitigen Temperaturmessung entwickelt [96]. Einsatzbereiche sind die Leitfähigkeits- und Temperaturmessung von Benzin, Kerosin und Ölen/Fetten gemäß DIN 51 412-T02-79 [97]. Die Messtoleranz ist mit $\pm 2\%$ vom Anzeigewert und ± 2 pS/m, die Genauigkeit der Temperaturmessung mit $\pm 0,5$ °C im Bereich -20 bis 40 °C und $\pm 0,2$ °C im Bereich 40 bis 60 °C angegeben [98]. Die Messung der Leitfähigkeitswerte in der Versuchsdurchführung erfolgte in dem unadditiven Öl Somentor 44 und FVA02, sowie in dem Hydrauliköl AVIA FLUID RSL 22 und dem Getriebeöl Optigear Synthetic A320 und zwar im Bereich von 1,5pS/m bis 1999pS/m. Gemessen wurde jeweils bei den Temperaturen 20, 30 und 40 °C. Die gemessenen Leitfähigkeitsmesswerte des OilQSens® wurden mit denen des MLA 900 verglichen und in Bild 6.59 und in der Tabelle 12 dargestellt. Beim OilQSens® werden ebenfalls die nichttemperaturkompensierten Messwerte dargestellt.

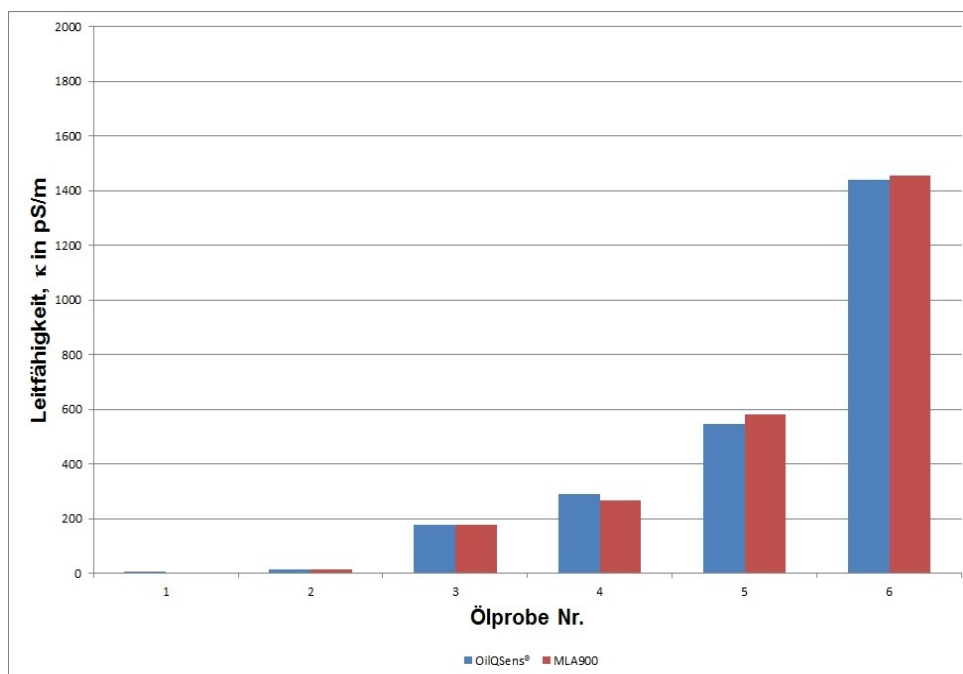


Bild 6.59: Vergleich der Leitfähigkeiten κ bei einer Temperatur von 20 °C

Ölproben Öltyp	Ölprobe Nr.	gemessene Leitfähigkeit in pS/m bei 20°C		
		OilQSens®	MLA 900	Abweichung in %
Somentor	1	1,2	0	*
FVA 02	2	14,3	14	-2,14
FVA 02 75%+RSL22 25%	3	175	176	0,57
FVA 02 50%+RSL22 50%	4	290	266	-9,02
RSL22	5	545	579	5,87
Optigear	6	1439	1457	1,24

Tabelle 12: Gemessene Leitfähigkeiten von OilQSens® und MLA 900 bei 20 °C

* Da bei Ölprobe Nr. 1 das Leitfähigkeitsmessgerät MLA 900 eine Leitfähigkeit von 0 pS/m angezeigt hat, kann für diesen Wert keine sinnvolle Abweichung berechnet werden.

In Bild 6.60 und in Tabelle 13 sind die gemessenen spezifischen Leitfähigkeiten der beiden Messsysteme OilQSens® und MLA 900 sowie deren Abweichungen voneinander, bei einer Temperatur von 30°C dargestellt.

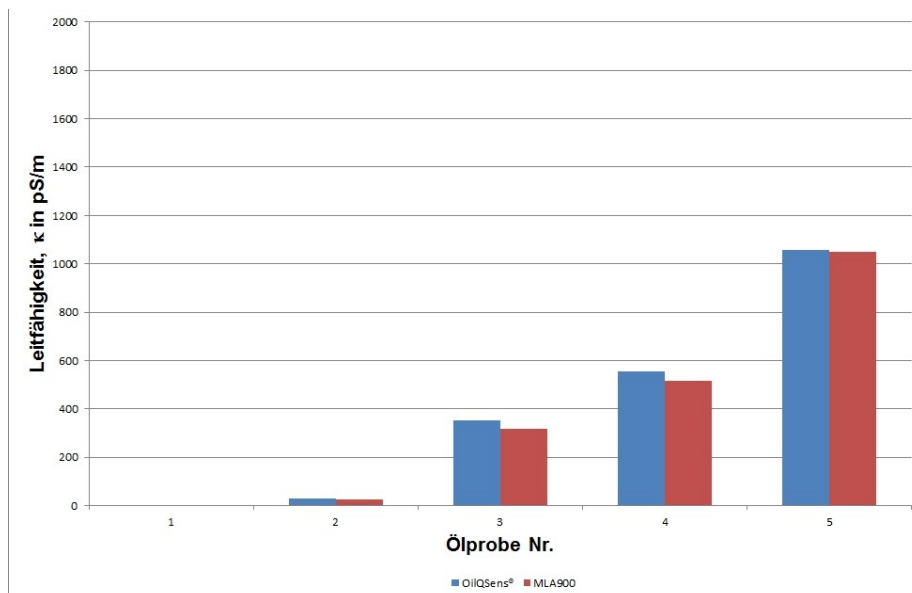


Bild 6.60: Vergleich der Leitfähigkeiten κ bei einer Temperatur von 30 °C

Ölproben Öltyp	Ölprobe Nr.	gemessene Leitfähigkeit in pS/m bei 30°C		
		OilQSens®	MLA 900	Abweichung in %
Somentor	1	3,6	1	-260,00
FVA02	2	30	27	-11,11
FVA 02 75%+RSL22 25%	3	353	318	-11,01
FVA 02 50%+RSL22 50%	4	554	516	-7,36
RSL22	5	1057	1050	-0,67

Tabelle 13: Gemessene Leitfähigkeiten von OilQSens® und MLA 900 bei 30 °C

Das Bild 6.61 und Tabelle 14 zeigen die gemessenen spezifischen Leitfähigkeiten der beiden Messsysteme OilQSens® und MLA 900 sowie deren Abweichungen voneinander, bei einer Temperatur von 40 °C.

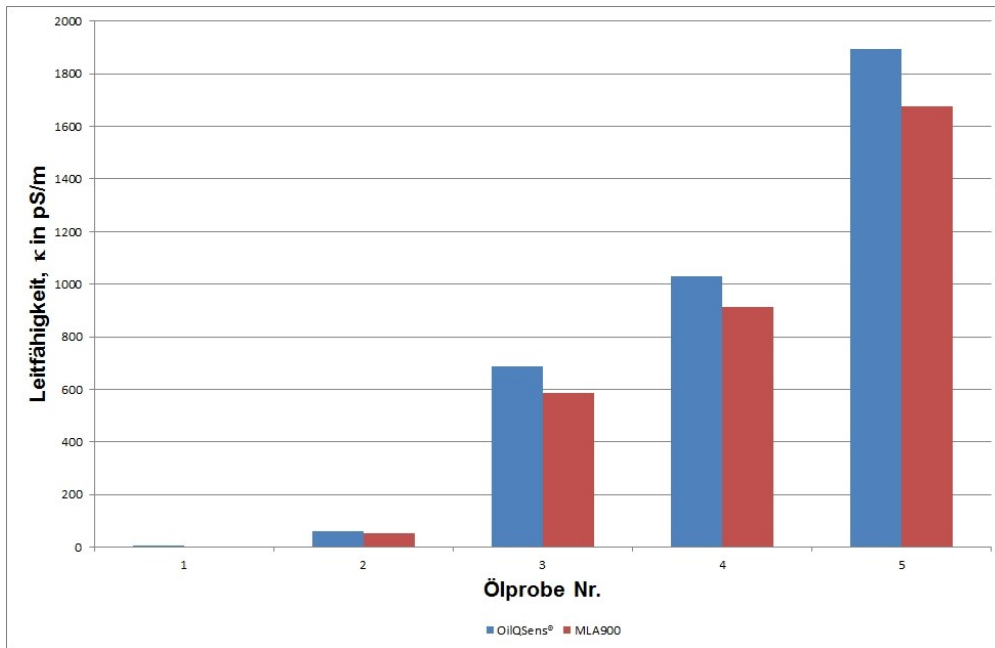


Bild 6.61: Vergleich der Leitfähigkeiten κ bei einer Temperatur von 40 °C

Ölproben Öltyp	Ölprobe Nr.	gemessene Leitfähigkeit in pS/m bei 40°C		
		OilQSens®	MLA 900	Abweichung in %
Somentor	1	6,7	3	-123,33
FVA02	2	60,9	52	-17,12
FVA 02 75%+RSL22 25%	3	686,9	588	-16,82
FVA 02 50%+RSL22 50%	4	1031	912	-13,05
RSL22	5	1895	1678	-12,93

Tabelle 14: Gemessene Leitfähigkeiten von OilQSens® und MLA 900 bei 40°C

In Tabelle 13, Tabelle 14 und Bild 6.62 ist bei 30°C und 40°C Probe 6 nicht mehr aufgeführt. Das Messgerät MLA 900 zeigte hier „Over Range“ an. Daher wurde die Messreihe für Ölprobe 6 abgebrochen.

Bild 6.62 zeigt die Messabweichungen des MLA 900 vom OilQSens®.

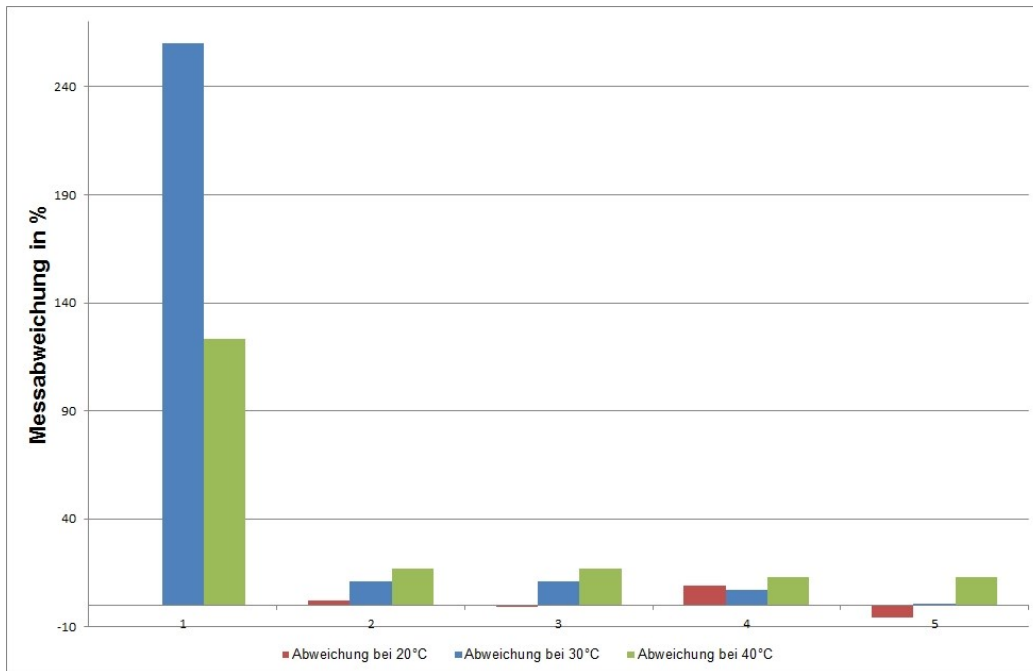


Bild 6.62: Messabweichungen des MLA 900 vom OilQSens® in %

Die Messwerte des MLA 900 sind bei allen Proben bei den Temperaturen 30°C und 40°C geringer als die des OilQSens®. Bei 20°C sind die Messwerte der Ölprobe 4 und Ölprobe 5 größer als die des OilQSens®.

Bei geringen Leitfähigkeiten bestehen erhebliche relative Abweichungen. Bei 20 °C zeigt beispielsweise das MLA 900 bei der Ölprobe 1 einen Messwert von 0 pS/m an, der OilQSens® einen Messwert von 1,2 pS/m.

6.11 Praktischer Versuch zur Bestimmung der spezifischen Leitfähigkeit und Dielektrizitätszahl in unadditiviertem Öl FVA03

Zur Minimierung von Temperatureinflüssen wurde der OilQSens® Sensor (4) und der Ölbehälter (3) zur Versuchsdurchführung in ein mit dem Thermostat (1) auf 40 °C temperiertes Wasserbad (2) eingebracht. Bild 6.63 zeigt das Fließschema des Versuchsaufbaus.

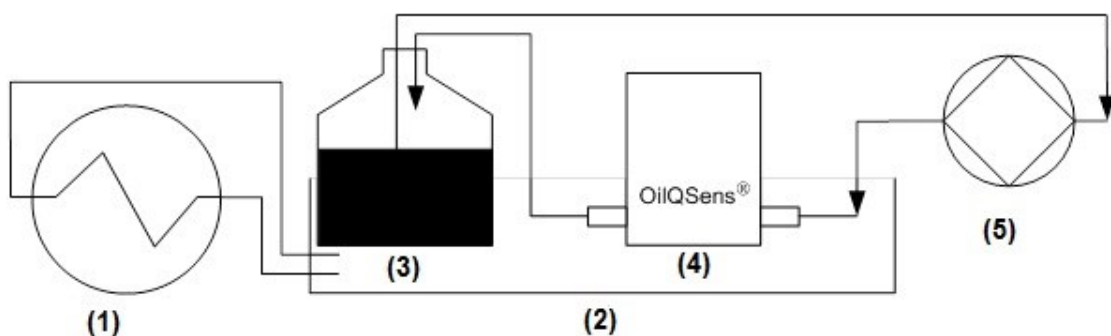


Bild 6.63: Skizze des Versuchsaufbaus

Über eine Schlauchpumpe (5) wird die Ölprobe im Kreislauf umgepumpt. Die verwendeten Geräte sind in Tabelle 15 aufgelistet.

Bei der zu untersuchenden Probe wurde das unadditivierte Öl Typ FVA 03 mit einer Dichte von $0,865 \text{ g/cm}^3$ bei 40°C als Grundöl verwendet [99] und Wasser bzw. Partikel zudosiert.

Geräte-nummer	Bezeichnung	Typ
1	Heizung	Badthermostat Julabo MC-4
2	Behälter	Edelstahlbehälter GN 1/2-150
3	Behälter Öl	Zweihals-Rundkolben nach DIN 12394 mit Glasstopfen
4	OilQSens®	SN: M10-k-0024
5	Schlauchpumpe	Typ TP4000

Tabelle 15: Liste der verwendeten Geräte des Prüfaufbaus

Bild 6.64 zeigt ein Foto des Prüfaufbaus.



Bild 6.64: Foto des Prüfsstands

Für die Einwaage der zudosierten Partikelmengen wurde eine Laborwaage des Typs PCB 350-3 genutzt. Nach Herstellerangaben hat diese eine Reproduzierbarkeit von $0,001 \text{ g}$ und eine Linearität von $\pm 0,003 \text{ g}$. Die Zudosierung des destillierten Wassers erfolgte mit Hilfe einer Saugkolben-Messpipette 5 ml mit der Teilung $0,05 \text{ ml}$. Die zudosierten Mengen an destillierten Wasser und Partikel wurden von Gewicht auf Volumen umgerechnet.

Für die definierte Zudosierung wurde das Öl gewogen und entsprechende Massenanteile destilliertem Wasser oder Kupferpulver hinzugefügt. Das Gemisch wurde jeweils intensiv verrührt (mindestens 30 Minuten).

6.11.1 Zudosierung von Wasser

In Bild 6.65 sind für den Versuch Wasserzudosierung in frischem unadditiviertem Öl, die gemessenen Dielektrizitätszahlen ϵ_r und die gemessenen Leitfähigkeitswerte κ in Abhängigkeit der zudosierten Menge an VE Wasser dargestellt.

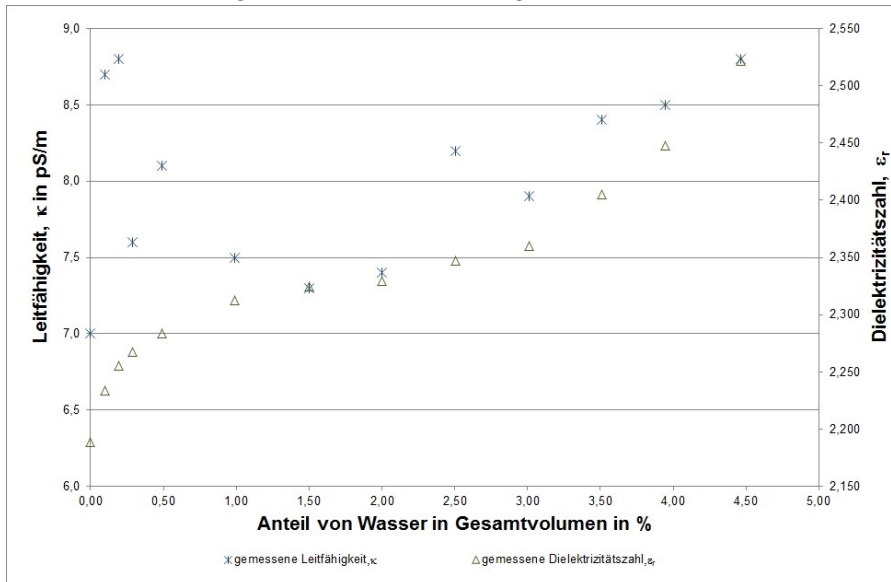


Bild 6.65: Dielektrizitätszahl ϵ_r und Leitfähigkeit κ bei Zugabe von VE Wasser

Die elektrische Leitfähigkeit ändert sich bei der Zudosierung von Wasser nur geringfügig. Bei der Zudosierung von Wasser zu unadditiviertem Öl steigt die Dielektrizitätszahl kontinuierlich an.

6.11.2 Zudosierung von Kupferpulver

Das Bild 6.66 zeigt den Verlauf der Dielektrizitätszahl ϵ_r und der Leitfähigkeit κ in Abhängigkeit der zudosierten Menge an Kupferpulver.

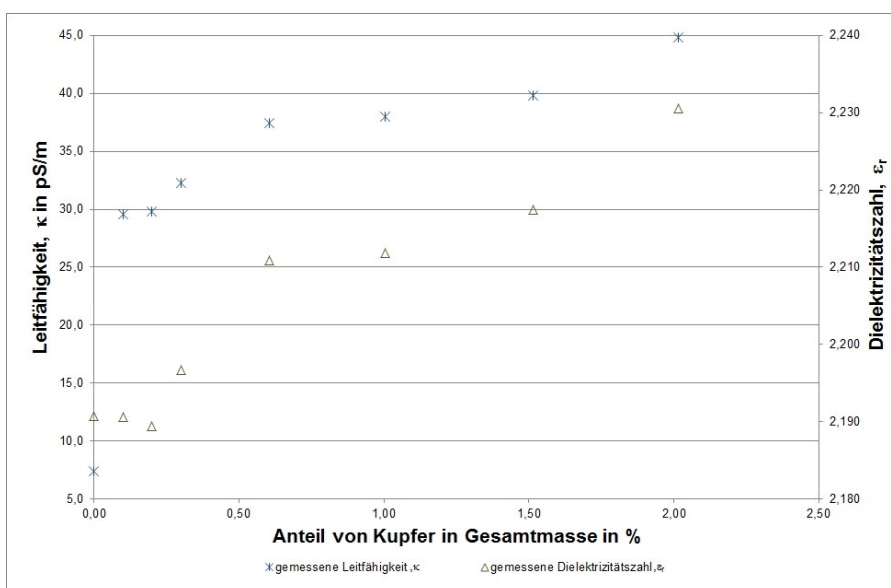


Bild 6.66: Dielektrizitätszahl ϵ_r und Leitfähigkeit κ bei Zugabe von Kupferpulver

Nach jeder Zudosierung wurde eine Stunde intensiv verrührt. Das zudosierte Kupferpulver hat einer Reinheit von $\geq 99,8\%$, die Partikel sind kleiner $< 63 \mu\text{m}$. Die Dielektrizitätszahl steigt kontinuierlich an. Die Leitfähigkeit ändert sich nach der ersten Zudosierung von $0,1\%$ (Massenprozent) Kupferpulver sprunghaft von $7,4$ auf $29,6 \text{ pS/m}$, bei weiteren Zudosierungen zeigt sich ein positiver, aber geringer Anstieg der Messwerte.

6.12 Berechnung der Dielektrizitätszahl und der Leitfähigkeit mit anschließendem Vergleich der gemessenen Werte

Physikalische Theorien zur Bestimmung der Leitfähigkeit κ und der Dielektrizitätszahl ϵ_r aus ihren physikalischen Konstanten gehen bis ins 19. Jahrhundert zurück [100] [101] [102] [103].

Maxwell-Garnett bestimmt über die dielektrische Verschiebung D

$$D = \epsilon \cdot E \quad (6.11)$$

E : elektrische Feldstärke

und die elektrische Feldstärke E die entsprechende Feldstärke und Flussdichte über die Volumenanteile der Zudosierung f der Mischung [104]:

$$E = fE_{Add} + (1 - f)E_{Oel} \quad (6.12)$$

$$D = f\epsilon_{rAdd}E_{Add} + (1 - f)\epsilon_{Oel}E_{Oel} \quad (6.13)$$

E : dielektrische Permittivität, Dielektrizität
 E_{Add} : Elektrische Feldstärke der Zudosierung
 E_{Oel} : Elektrische Feldstärke des Öls
 ϵ_{Oel} : Dielektrizitätszahl des Öls ohne Zudosierung
 ϵ_{rAdd} : Dielektrizitätszahl der Zudosierung
 f : Volumenanteil der Zudosierung
 $1 - f$: Volumenanteil des Öls

Die Kombination der Gln. (6.12) und (6.13) ergibt:

$$\epsilon_{rc} = \frac{D}{E} = \frac{f \cdot \epsilon_{rAdd} \cdot E_{Add} / E_{Oel} + \epsilon_{Oel} (1 - f)}{f \cdot E_{Add} / E_{Oel} + (1 - f)} \quad (6.14)$$

ϵ_{rc} : berechnete Dielektrizitätszahl des Gemisches

Über das Verhältnis der elektrischen Feldstärken $\frac{E_{Add}}{E_{Oel}}$ ergibt sich für dielektrische Kugeln im ursprünglich elektrischen Feld nach [105]:

$$\frac{E_{Add}}{E_{Oel}} = \frac{3\epsilon_{Oel}}{\epsilon_{rAdd} + 2\epsilon_{Oel}} \quad (6.15)$$

Durch einsetzen in Gl. (6.14) folgt nach einer arithmetischen Umformung [106][55]:

$$\varepsilon_{rc} = \frac{\varepsilon_{rAdd} \cdot \varepsilon_{Oel} \cdot (2f+1) + \varepsilon_{Oel}^2 \cdot (2-2f)}{\varepsilon_{Oel} \cdot (f+2) + \varepsilon_{rAdd} \cdot (1-f)} \quad (6.16)$$

Lichtenecker entwickelte empirisch die Berechnungsformel für die Dielektrizitätszahl von homogenen Mischungen [107]:

$$\varepsilon_{rc} = \varepsilon_{rAdd}^f \varepsilon_{Oel}^{1-f} \quad (6.17)$$

Piekara hat in seiner Arbeit die Theorie auf die Dielektrizitätszahl von Emulsionen vergleichbar wie in dieser Arbeit für kleine Wassereinträge in Transformatorenöle angewandt [100]. Er entwickelte die Gleichung für die Dielektrizitätszahl des Gemisches.

$$\varepsilon_{rc} = 3\varepsilon_{Oel} \cdot \frac{\varepsilon_{Add} - \varepsilon_{Oel}}{\varepsilon_{Add} + 2\varepsilon_{Oel}} \cdot f + \varepsilon_{Oel} \quad (6.18)$$

6.12.1 Auswertung der Wasserzudosierung

In einer Versuchsreihe wurde dem frischen unadditiviertem Öl FVA03 VE Wasser bis zu einem Volumen von 4,46% zudosiert. Die gemessenen Dielektrizitätszahlen und die berechneten Dielektrizitätszahlen, sowie die gemessenen und berechneten Leitfähigkeitswerte nach Maxwell-Garnett, Lichtenecker und Piekara wurden in Tabelle 16 verglichen und in Bild 6.67 dargestellt.

		berechnete Dielektrizitätszahl, ε_{rc} des Gemisches		
Anteil von Wasser im Gemisch in %	gemessene Dielektrizitätszahl, ε_r des Gemisches	Maxwell-Garnett	Lichtenecker	Piekara
0,00	2,1884	2,1884	2,1884	2,1884
0,10	2,2336	2,1953	2,1971	2,1953
0,19	2,2556	2,2008	2,2043	2,2008
0,29	2,2674	2,2068	2,2122	2,2068
0,49	2,2833	2,2192	2,2284	2,2190
0,99	2,3129	2,2499	2,2690	2,2493
1,50	2,3248	2,2814	2,3110	2,2801
2,00	2,3296	2,3128	2,3532	2,3105
2,50	2,3473	2,3445	2,3963	2,3409
3,01	2,3600	2,3770	2,4408	2,3718
3,51	2,4051	2,4093	2,4852	2,4021
3,95	2,4479	2,4375	2,5245	2,4284
4,46	2,5218	2,4714	2,5720	2,4598

Tabelle 16: gemessene und berechnete Dielektrizitätszahl ε_r und ε_{rc} bei VE Wasserzudosierung

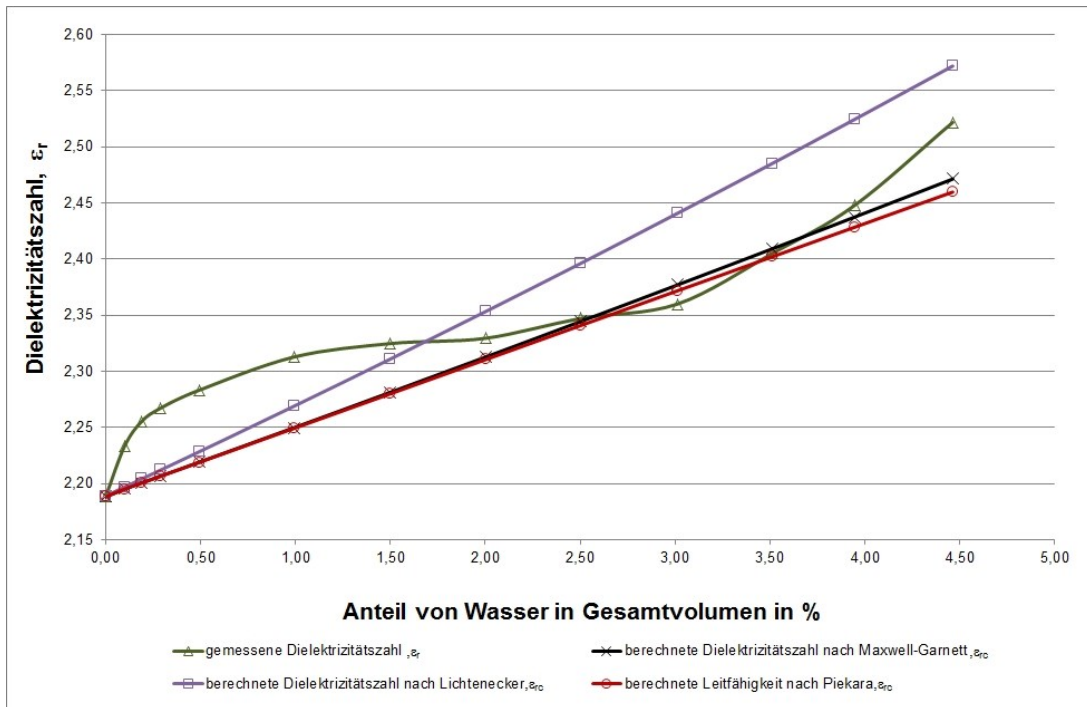


Bild 6.67: Berechnete und gemessene Dielektrizitätszahl ϵ_{rc} und ϵ_r von frischem Öl bei Zugabe von VE Wasser nach Maxwell-Garnett, Lichtenecker und Piekara

Tabelle 17 zeigt den Vergleich der gemessenen zu der berechneten Leitfähigkeit κ und κ_c .

		berechnete Leitfähigkeit, κ_c des Gemisches in pS/m		
Anteil von Wasser im Gemisch in %	gemessene Leitfähigkeit, κ des Gemisches in pS/m	Maxwell-Garnett	Lichtenecker	Piekara
0,00	7,00	7,00	7,00	7,00
0,10	8,70	7,02	7,08	7,02
0,19	8,80	7,04	7,15	7,04
0,29	7,60	7,06	7,23	7,06
0,49	8,10	7,10	7,40	7,10
0,99	7,50	7,21	7,82	7,21
1,50	7,30	7,32	8,28	7,31
2,00	7,40	7,43	8,75	7,42
2,50	8,20	7,54	9,26	7,53
3,01	7,90	7,65	9,80	7,63
3,51	8,40	8,21	10,94	8,18
3,95	8,50	8,31	11,48	8,28
4,46	8,80	8,44	12,16	8,39

Tabelle 17: Gemessene und berechnete Leitfähigkeit κ und κ_c bei VE Wasserzudosierung

In Bild 6.68 ist für den Versuch Wasserzudosierung in frischem unadditiviertem Öl, die gemessene Leitfähigkeit κ , die errechnete Leitfähigkeit κ_c nach Maxwell-Garnett, Lichtenecker und Piekara, dargestellt.

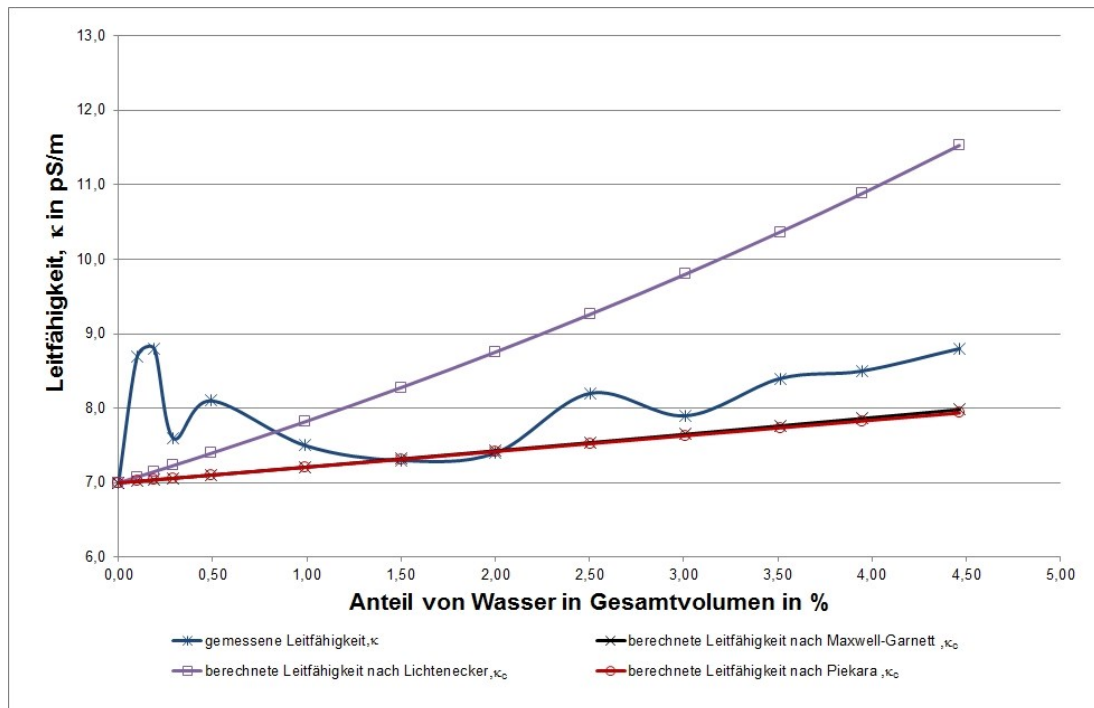


Bild 6.68: berechnete und gemessene Leitfähigkeit κ_c und κ von frischem Öl bei Zugabe von VE Wasser nach Maxwell-Garnett, Lichtenecker und Piekara

6.12.2 Lineare Approximation der Messergebnisse

Im vorgegebenen Anwendungsbereich ergeben sich näherungsweise Geraden als funktionelle Zusammenhänge zwischen den berechneten Dielektrizitätszahlen und Leitfähigkeiten in Abhängigkeit der Zudosierungen. Zum einfachen Vergleich der verschiedenen Modelle und Messergebnisse werden jeweils approximierende Geraden berechnet, bei den Modellen jeweils über eine Taylorreihenentwicklung mit Abbruch nach dem linearen Term und bei den Messgrößen über eine lineare Regression.

Die detaillierten Berechnungen der durchgeführten Taylorreihenentwicklung sind im Anhang (Abschnitt 8.2) beigefügt.

Für die Gleichung nach Maxwell-Garnett wird die Taylorreihe $P_{MG}(f)$:

$$P_{MG}(f) = \varepsilon_{Oel} + \frac{3\varepsilon_{Oel}(\varepsilon_{rAdd} - \varepsilon_{Oel})}{(\varepsilon_{rAdd} + 2\varepsilon_{Oel})} f + \frac{3\varepsilon_{Oel}(\varepsilon_{rAdd} - \varepsilon_{Oel})^2}{(\varepsilon_{rAdd} + 2\varepsilon_{Oel})^2} f^2 + \dots \quad (6.19)$$

Die Taylorreihe für die nach Lichtenecker berechneten Dielektrizitätszahlen wird $P_L(f)$:

$$P_L(f) = \varepsilon_{Oel} + \varepsilon_{Oel} \cdot (\ln(\varepsilon_{rAdd}) + \ln(\varepsilon_{Oel}))f + \frac{\{ \ln(\varepsilon_{rAdd}) \cdot [\varepsilon_{Oel} \cdot (\ln(\varepsilon_{Oel}) + \ln(\varepsilon_{rAdd}))] + \ln(\varepsilon_{Oel}) \cdot [\varepsilon_{Oel} \cdot (\ln(\varepsilon_{Oel}) + \ln(\varepsilon_{rAdd}))] \}}{2} f^2 + \dots \quad (6.20)$$

Die Berechnungsfunktion nach Piekara ist linear:

$$P_P(f) = \varepsilon_{Oel} + 3\varepsilon_{Oel} \frac{\varepsilon_{rAdd} - \varepsilon_{rOel}}{\varepsilon_{rAdd} + 2\varepsilon_{Oel}} f + \dots \quad (6.21)$$

Die Taylorreihe und die lineare Approximation für die berechneten Werte der Leitfähigkeiten errechnen sich entsprechend.

Die lineare Regression zu den gemessenen Dielektrizitätszahlen und Leitfähigkeitswerten zeigen Bild 6.69 und Bild 6.70. In Tabelle 18 und Tabelle 19 sind die Steigungen der Regressionsgeraden und der jeweiligen Taylorreihen dargestellt.

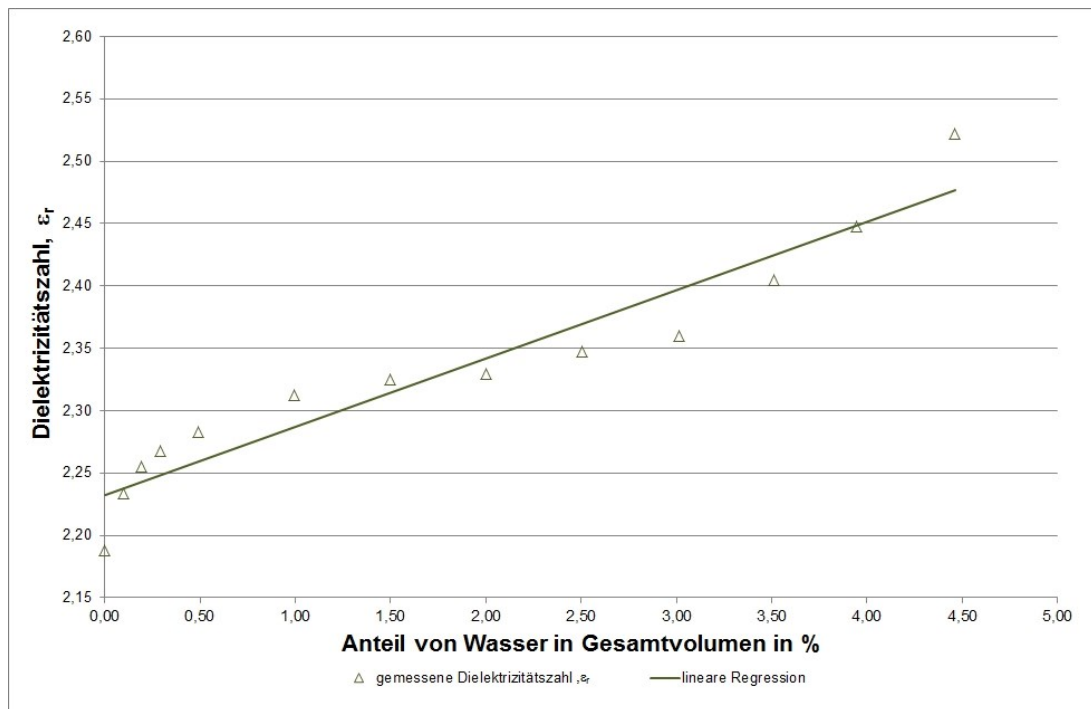


Bild 6.69: gemessene Dielektrizitätszahl ε_r und lineare Regressionsgerade

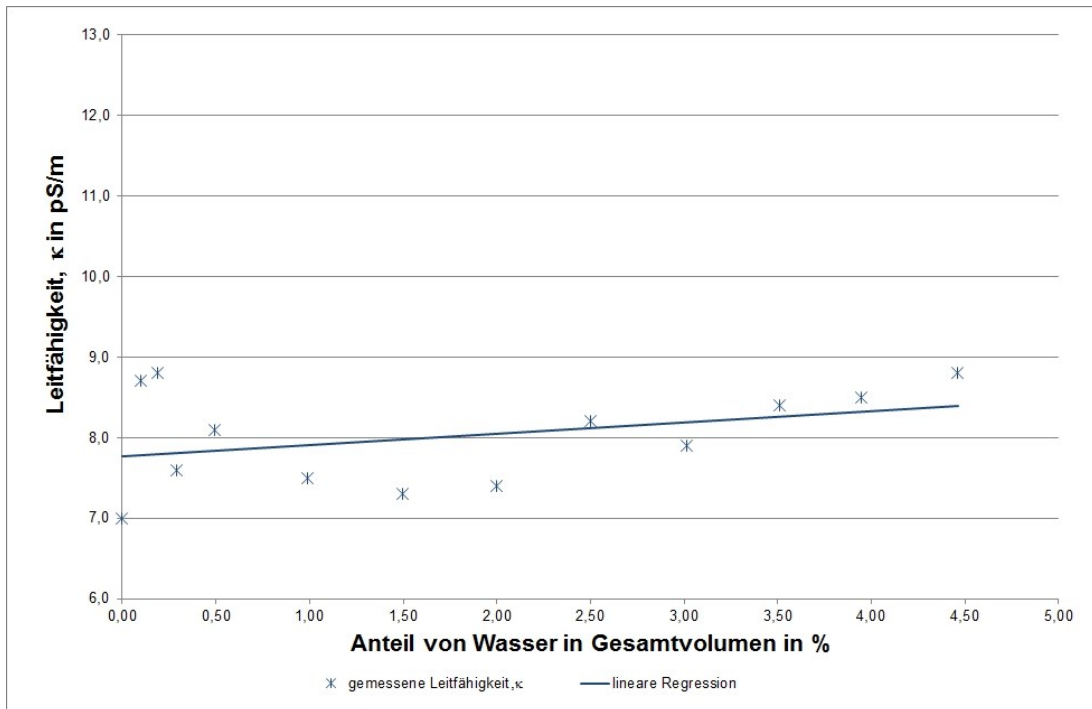


Bild 6.70: gemessene Leitfähigkeit κ und lineare Regressionsgerade

	Anstieg a_l
Anstieg der gemessenen Dielektrizitätszahl, ϵ_r	0,07
Anstieg der berechneten Dielektrizitätszahl nach Maxwell-Garnett-Taylor, ϵ_{rc}	0,06
Anstieg der berechneten Dielektrizitätszahl nach Lichtenecker-Taylor, ϵ_{rc}	0,12
Anstieg der berechneten Dielektrizitätszahl nach Piekara-Taylor, ϵ_{rc}	0,06

Tabelle 18: Anstiege a_l der gemessenen und berechneten Dielektrizitätszahl ϵ_r und ϵ_{rc} bei Wasserzudosierung

	Anstieg a_l in pS/m
Anstieg der gemessenen Leitfähigkeit, κ	0,39
Anstieg der berechneten Leitfähigkeit nach Maxwell-Garnett-Taylor, κ_c	0,22
Anstieg der berechneten Leitfähigkeit nach Lichtenecker-Taylor, κ_c	1,13
Anstieg der berechneten Leitfähigkeit nach Piekara-Taylor, κ_c	0,21

Tabelle 19: Anstiege a_l der gemessenen und berechneten Leitfähigkeiten κ und κ_c bei Wasserzudosierung

6.12.3 Zudosierung von Kupferpulver

In einer weiteren Versuchsreihe wurde dem frischen unadditiviertem Öl FVA03 Kupferpulver für analytische Zwecke mit der Reinheit >99,8% und einer Partikelgröße von < 63 µm bis zu einem Volumen von 2% zudosiert. Die gemessenen und die berechneten Dielektrizitätszahlen, sowie die gemessenen und berechneten Leitfähigkeitswerten nach Maxwell-Garnett, Lichtenecker und Piekara wurden verglichen und dargestellt. Tabelle 20 zeigt den Vergleich der gemessenen zu den berechneten Dielektrizitätszahlen ϵ_r und ϵ_{rc} .

		berechnete Dielektrizitätszahl, ϵ_{rc} des Gemisches		
Anteil von Kupfer im Gemisch in %	gemessene Dielektrizitätszahl, ϵ_r des Gemisches	Maxwell-Garnett	Lichtenecker	Piekara
0,00	2,1908	2,1908	2,1908	2,1908
0,10	2,1907	2,1969	2,1987	2,1969
0,20	2,1894	2,2030	2,2067	2,2029
0,30	2,1967	2,2092	2,2148	2,2091
0,61	2,2109	2,2277	2,2392	2,2275
1,01	2,2119	2,2523	2,2717	2,2518
1,52	2,2175	2,2840	2,3140	2,2827
2,02	2,2305	2,3154	2,3561	2,3131

Tabelle 20: gemessene und berechnete Dielektrizitätszahl ϵ_r und ϵ_{rc} bei Kupferpulver Zudosierung

In Bild 6.71 für den Versuch Kupferpulver Zudosierung in frischem unadditiviertem Öl, die gemessenen Dielektrizitätszahlen ϵ_{rc} , die errechneten Dielektrizitätszahlen ϵ_r nach Maxwell-Garnett, Lichtenecker und Piekara, entsprechend Tabelle 20, dargestellt.

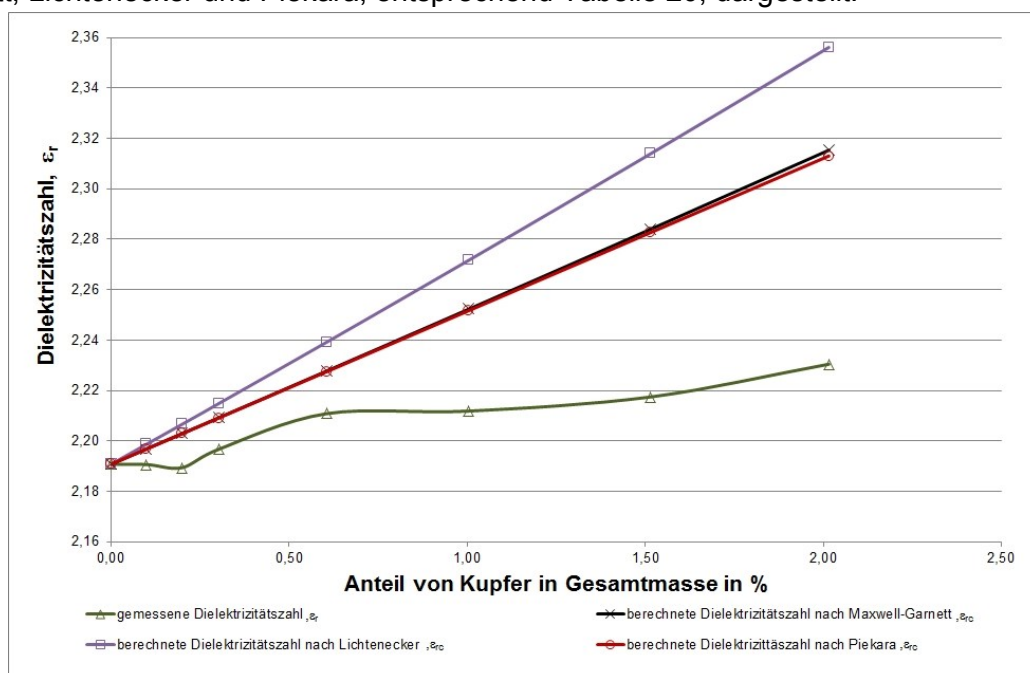


Bild 6.71: berechnete und gemessene Dielektrizitätszahl ϵ_{rc} und ϵ_r bei Zugabe von Kupferpulver nach Maxwell-Garnett, Lichtenecker und Piekara

Tabelle 21 zeigt den Vergleich der gemessenen zu der berechneten Leitfähigkeit κ und κ_c .

		berechnete Leitfähigkeit, κ_c des Gemisches in pS/m		
Anteil von Kupfer im Gemisch in %	gemessene Leitfähigkeit, κ des Gemisches in pS/m	Maxwell-Garnett	Lichtenecker	Piekara
0,00	7,40	7,40	7,40	7,40
0,10	29,60	7,42	7,68	7,42
0,20	29,80	7,44	7,96	7,44
0,30	32,30	7,47	8,27	7,47
0,61	37,40	7,54	9,23	7,53
1,01	38,00	7,63	10,69	7,62
1,52	39,80	7,74	12,89	7,74
2,02	44,80	7,86	15,48	7,85

Tabelle 21: gemessene und berechnete Leitfähigkeit κ und κ_c bei Kupferpulver Zudosierung

Bild 6.72 zeigt den Verlauf der gemessenen Leitfähigkeitswerten κ mit den berechneten Leitfähigkeitswerten κ_c und den offsetkompensierten Leitfähigkeitswerten nach Maxwell-Garnett, Lichtenecker und Piekara.

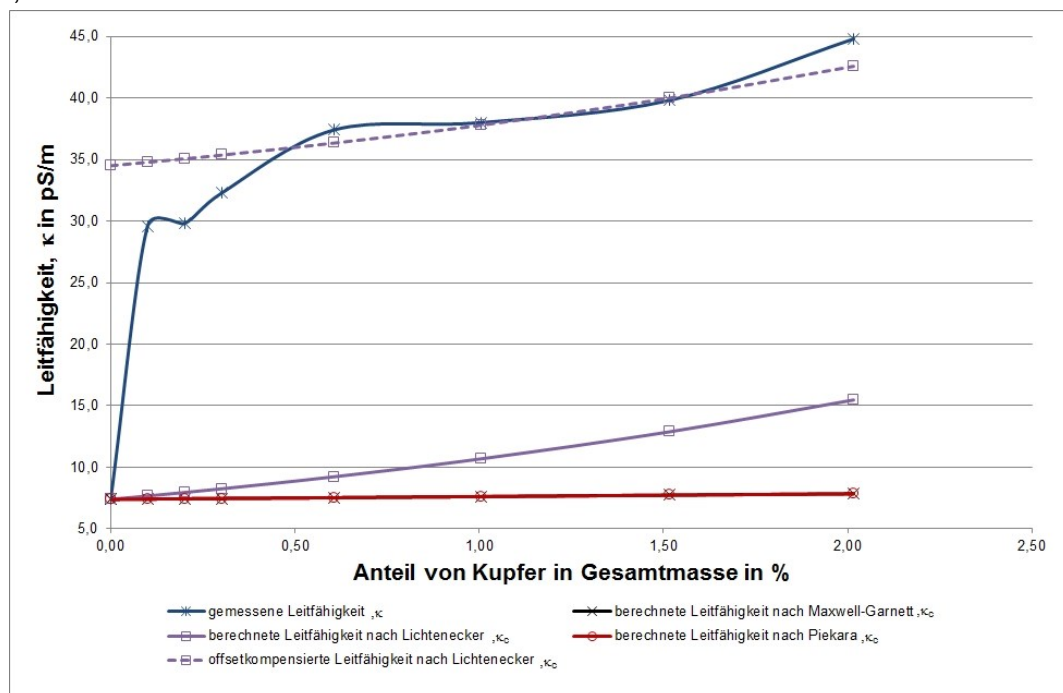


Bild 6.72: berechnete und gemessene Leitfähigkeit κ_c und κ bei Zugabe von Kupferpulver nach Maxwell-Garnett, Lichtenecker und Piekara

Nach Zudosierung von 0,1% Kupferpulver kommt es zu einem Anstieg von 7,4 auf 29,6pS/m. Dieses weist auf eine Versauerung / Säurebildung des Öls im Zusammenhang mit der Kupferzudosierung hin. Für die reine Betrachtung der Kupferzudosierung kann prinzipiell ein Offset durch die gebildete Säure herausgerechnet werden. Die gestrichelte Linie in Bild 6.72 demonstriert die berechnete Änderung.

Die berechneten Leitfähigkeiten nach Lichtenecker stimmen mit den gemessenen Änderungen überein.

6.12.4 Vergleich der berechneten Werte mit Hilfe der Taylorreihenentwicklung bei der Zudosierung von Kupferpulver

Zur Vergleichbarkeit der berechneten Werte mit Hilfe der Taylorreihenentwicklung wurde eine lineare Regression der Werte durchgeführt. Diese sind in der Tabelle 22 und Tabelle 23 dargestellt. Das Bild 6.73 zeigt den graphischen Verlauf der gemessenen Dielektrizitätszahlwerte und deren linearen Regressionsgerade.

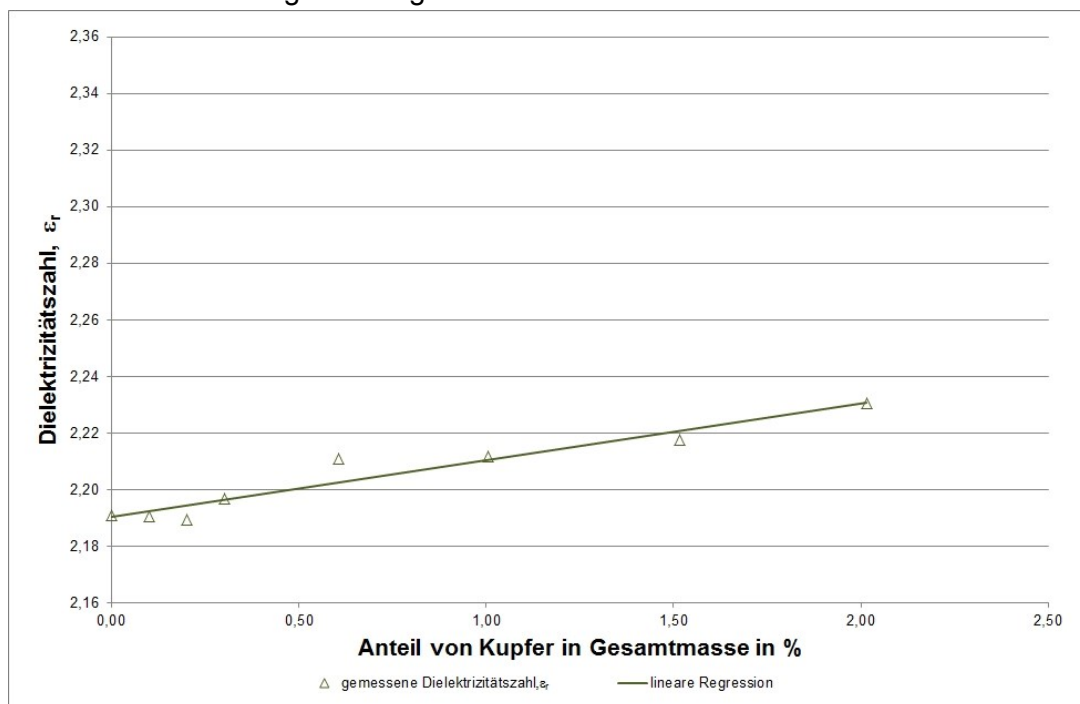


Bild 6.73: gemessene Dielektrizitätszahl ϵ_r und lineare Regressionsgerade

In Tabelle 22 sind die Anstiege a_i der linearen Regressionsgeraden der gemessenen und berechneten Dielektrizitätszahlwerte dargestellt.

	Anstieg a_i
Anstieg der gemessenen Dielektrizitätszahl, ϵ_r	0,02
Anstieg der berechneten Dielektrizitätszahl nach Maxwell-Garnett-Taylor, ϵ_{rc}	0,06
Anstieg der berechneten Dielektrizitätszahl nach Lichtenecker-Taylor, ϵ_{rc}	0,12
Anstieg der berechneten Dielektrizitätszahl nach Piekara-Taylor, ϵ_{rc}	0,02

Tabelle 22: Anstiege a_i der gemessenen und berechneten Dielektrizitätszahl ϵ_r und ϵ_{rc} bei Kupferzudosierung

Das Bild 6.74 zeigt den grafischen Verlauf der gemessenen Leitfähigkeitswerte und deren linearen Regressionsgerade sowie deren offsetkompensierte lineare Regressionsgerade.

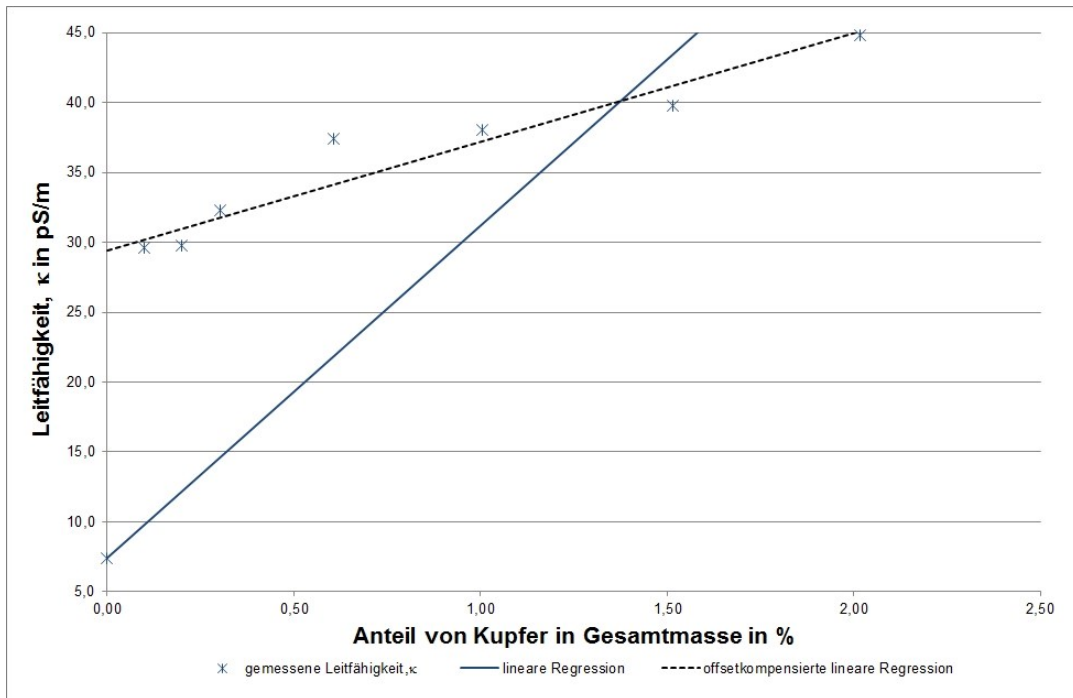


Bild 6.74: gemessene Leitfähigkeit κ und lineare Regressionsgerade

In Tabelle 23 sind die Anstiege a_i der linearen Regressionsgeraden der gemessenen und berechneten Leitfähigkeitswerte κ und κ_c dargestellt.

	Anstieg a_i in pS/m
Anstieg der gemessenen Leitfähigkeit, κ bei Berücksichtigung aller Werte	23,82
Anstieg der offsetkompensierten gemessenen Leitfähigkeit, κ	7,78
Anstieg der berechneten Leitfähigkeit nach Maxwell-Garnett-Taylor, κ_c	0,23
Anstieg der berechneten Leitfähigkeit nach Lichtenecker-Taylor, κ_c	3,96
Anstieg der berechneten Leitfähigkeit nach Piekara-Taylor, κ_c	0,22

Tabelle 23: Anstiege a_i der gemessenen und berechneten Leitfähigkeiten κ und κ_c bei Kupferzudosierung

Die starke Versauerung bei Wasser und Katalysatoreintrag kann erhebliche Korrosion verursachen. Bild 6.75 zeigt ein besonders augenfälliges Beispiel eines wie chemische Ätzung erscheinenden Glättungsabtrags durch korrosiven Schmierstoff infolge Kupferkontamination (Graphit-Messing-Erdungskontakt). Es handelt sich um den Außenring eines Zylinderrollenlagers aus einem Schienenfahrzeug.

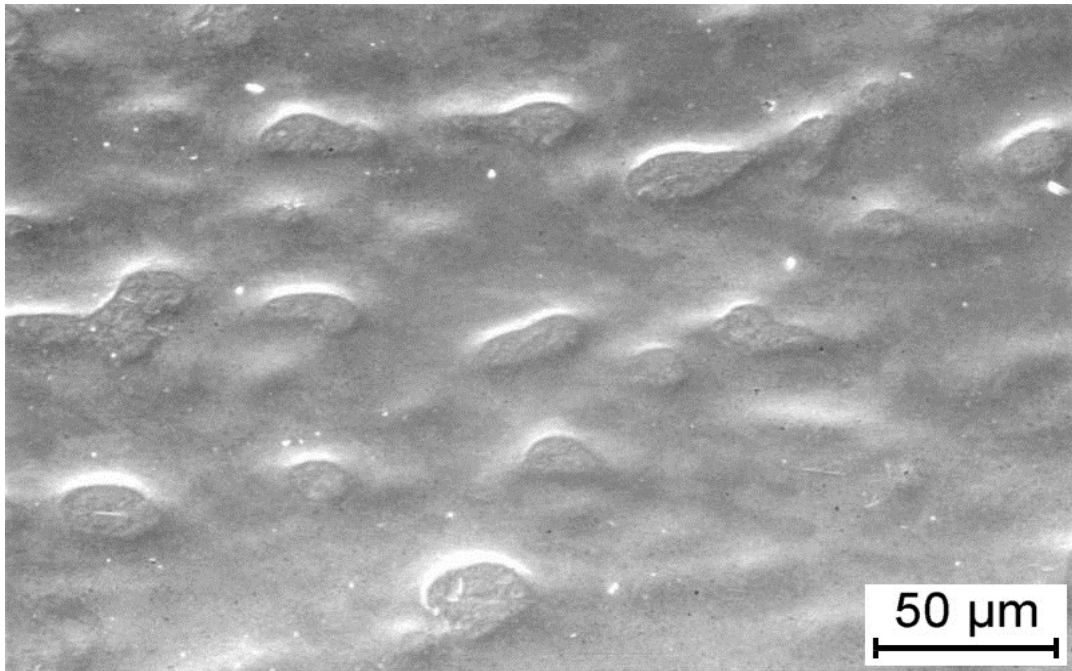


Bild 6.75: Ätzfiguren auf der Außenringlaufbahn eines Eisenbahnradlagers; Eindrückungen vom Abrieb des Erdungskontakts sind ebenfalls erkennbar [86]

In der Praxis wird durch Zusätze von Antioxidantien im Schmieröl diesem Effekt entgegengewirkt [108]. Ein wichtiger Schritt im Verschleißschutz kommt aus den 30er und 40er Jahren des letzten Jahrhunderts mit der Entdeckung des Zinkdialkyldithiophosphate (ZDDP). Diese Verbindungen wurden zunächst zum Schutz von Korrosion in Lagern eingesetzt. Der Zusatz von ZDDP unterdrückt die Bildung von Peroxiden und verhindert die Korrosion von Cu / Pb Lager durch organische Säuren. Es bildet sich eine dünne sichernde Schicht zum Schutz der Oberflächen aus.

7. Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde ein elektrisches Sensorsystem zur kontinuierlichen Online-Ölqualitätsmessung und Verschleiß- bzw. Abriebidentifikation in Getrieben und anderen Aggregaten entwickelt. Mit diesem Sensor erfolgen bereits ab der Inbetriebnahme eine kontinuierliche Überwachung der Systeme und eine Warnung vor kritischen Betriebszuständen, wie beispielsweise überhöhter Verschleiß. Lange vor möglichen Anzeigen bekannter Überwachungssysteme mit Schwingungsmessungen, Partikelzählungen, Temperaturüberwachungen, usw., können so gezielte Systemeingriffe oder Wartungsmaßnahmen vorgenommen werden. Effizientere Maschinenausnutzung, gezielte Schadensverhütung, Lebensdauererhöhung und Reduktion der Ausfallzeiten werden damit erreichbar. Mit dem Ölsensorsystem werden die momentane Ölverschmutzung und deren zeitliche Veränderung gemessen, um Bewertungen der Ölalterung und des Maschinenverschleißes durchzuführen. Die Früherkennung von kritischen Schmierölzuständen erlaubt vorbeugende Wartungsmaßnahmen am Getriebe, noch bevor ein Schaden eintritt. Ziel sind vorbeugende Wartungsmaßnahmen anstelle vorbeugender Instandsetzungen.

Der Sensor beruht auf einer Messung der elektrischen Leitfähigkeit und der Dielektrizitätszahl des Öls in einer kapazitiven Basissensoranordnung. Zur Vermeidung von Polarisations-effekten wird der Basissensor mit mittelwertfreien Wechselspannungssignalen beaufschlagt. Dabei werden während der abschnittsweise konstanten Spannung über eine Integration die elektrische Leitfähigkeit und während der Eingangssignalfanken die Kapazität gemessen. Durch die Integration der extrem kleinen ohmschen Ströme wird eine ausreichende Stör- unterdrückung auch gegenüber eingestreuten elektromagnetischen Feldern erreicht. Eine Messung mit sinusförmigen Wechselgrößen wäre hingegen weniger geeignet, da der kapazitive Strom erheblich größer als die ohmsche Komponente des Stroms wäre und die Stromkomponenten nur mit beträchtlichem Elektronikaufwand getrennt werden könnten. Aus dem gemessenen Widerstand und der Kapazität werden dann mit Kenntnis der Geometrie der Elektrodenanordnung bzw. der Zellkonstante die Leitfähigkeit und die Dielektrizitätszahl bestimmt. Ölqualitätsverschlechterungen und dabei erzeugte Ionen und Partikel erhöhen die elektrische Leitfähigkeit.

Für die Auswertung wird die Hypothese aufgestellt, dass die elektrische Ölleitfähigkeit als Maß für die Verschmutzung und (tribo-) chemische Alterung des Öls und den Maschinenverschleiß dienen kann. Im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Messungen und Berechnungen nach Mischungsregeln von Maxwell-Garnet, Lichtenecker und Piekara unterstützen diesen Ansatz. Eine Beispielanwendung ist die Vermeidung von Frühausfällen von Wälzlagern in Windenergieanlagen. Oberflächenrissbildung und anschließende Rissausbreitung nach dem Mechanismus der Schwingungsrisskorrosion führen bei Getriebelagern häufig zu unnötigen Stillstandzeiten und aufwändigen Reparaturen. Bei Offshore-Windturbinen wird die Problematik solcher Frühausfälle, die typischerweise zwischen 1% und 20% der nominellen L10-Lebensdauer (90% Überlebenswahrscheinlichkeit) erfolgen, noch wesentlich verschärft.

Die Ableitung der gemessenen und mit Hilfe der selbstlernenden adaptiven Temperaturkompensation auf 40 °C normierten Leitfähigkeitswerte κ_{40} dient als Maß für den momentanen Verschleiß. Mit diesem Verschleißsignal werden zukünftig selbsttätige überlagerte Verschleißbegrenzungsregelungen ermöglicht. Beim angesprochenen Beispiel kann die etwa in Abhängigkeit vom momentanen Strompreis vorgegebene Verschleißregelgröße über die

Pitcheinstellung begrenzt werden. Auch in anderen Anwendungen kann die Belastung in Abhängigkeit des Verschleißsignals limitiert werden.

Bei nicht additivierten Ölen kann der Wassergehalt des Öls über die im Sensorsystem integrierte zusätzliche Messung der Dielektrizitätszahl des Öls und die Berechnung der temperaturkompensierten Dielektrizitätszahl ϵ_{r40} bestimmt werden.

Ein Anwendungsbeispiel sind Transformatorenöle in Hochspannungstransformatoren. Durch Wassereintrag sinkt die Durchschlagfestigkeit und es verstärkt sich die Zellulosealterung. Bei hohen Betriebstemperaturen brechen die glycosidischen Bindungen der Cellulose, der Polymerisationsgrad und die Lebensdauer der Isolierpapiere werden reduziert [109]. Zusätzlich reduzieren Gasblasen (Bubble-Effekt) die elektrische Durchschlagfestigkeit. Fremdstoffe im Transformatorenöl, wie z. B. Verunreinigungen bei der Montage des Transformators, und Alterungsprodukte verstärken die Schadenswirkung im Transformatorenöl.

Bei additivierten Ölen ermöglicht die zeitliche Ableitung der temperaturkompensierten Dielektrizitätszahl ϵ_{r40} eine Bestimmung des Abbaus der Additive. Ein Wechsel des Vorzeichens der Ableitung kann den kompletten Abbau der Additive signalisieren, wobei die Reichweite der Gültigkeit dieser Aussage noch weiter untersucht werden muss. Mit Hilfe dieser Information kann zukünftig beispielsweise eine automatisierte Additivnachdosierung erfolgen. Hier öffnen sich breite Betätigungsfelder für interdisziplinäre Forschung mit der organischen und Schmierstoff-Chemie. Der genaue Zusammenhang der mit dem Ölsensorsystem in bisher unerreichter Präzision bestimmten elektrischen Messgrößen mit der für ihre Änderung ursächlichen Alterung des Öls und seiner Additive sowie einer möglichen Kontamination insbesondere mit Wasserkontamination ist für die treffsichere Bewertung des Messergebnisses von großer Bedeutung. Ein Ziel zukünftiger Entwicklungen kann es daher z. B. sein, die im Öl ablaufenden Reaktionen z. B. in Datenbanken des Sensors für verwendete Schmierölzusammensetzungen (Ölsorten, Additivpakete) zu integrieren, wodurch das spezifische Alterungsverhalten in die Beurteilung der elektrischen Messgrößen einbezogen werden kann.

Bevorzugte Einsatzbereiche des Sensorsystems werden dezentral angeordnete energie-, fertigungs- und automatisierungstechnische Anlagen wie z. B. Windturbinen, Transformatorstationen, Hydraulikanlagen, Getriebe oder Generatoren. Hierfür wird das Ölsensorsystem in eine webbasierte Kommunikationsstruktur, ein „Internet der Maschinen“, eingebunden und ein wiederum webbasiertes Monitoringsystem realisiert. Solange die Windenergieanlagen reibungslos arbeiten, interessieren sich die Anlagenbetreiber oftmals nicht für die Ölqualität. Zudem ist das für die Anwendung des Ölsensorsystems erforderliche spezielle, auch noch weiter zu erarbeitende Know-How bei den Anlagenbetreibern nur begrenzt vorhanden. Dennoch möchten die Betreiber die positiven Wirkungen der Ölzustandsüberwachung, wie die Erhöhung der Betriebssicherheit, die Reduktion von Stillstandszeiten, an den tatsächlichen Bedarf angepasste Ölwechselintervalle, usw., nutzen und eine verbesserte ökonomische und ökologische Effizienz erreichen. Wenn die Ölqualitätssensoren an den Anlagen montiert sind, kann die Messdatenpräsentation und -auswertung an anderer Stelle erfolgen. Im Zusammenhang mit versicherungstechnisch gewünschten neutralen Begutachtungen und Überwachungen der Zustände z. B. von Windturbinen kann Windparkbetreibern die Nutzung der Ölsensoren zur Überwachung als Serviceleistung angeboten werden. Die anwenderorientierte Dienstleistung der quantifizierten Bewertung der Veränderungen des Systems Öl – Maschine, inklusive der Empfehlung daraus abzuleitender, vorbeugender Wartungsmaßnah-

men entlastet die Anlagenbetreiber, erhöht die Sicherheit und spart Kosten. Das nachfolgende Bild 7.1 zeigt das Instanzenetz eines solchen Monitoringsystems.

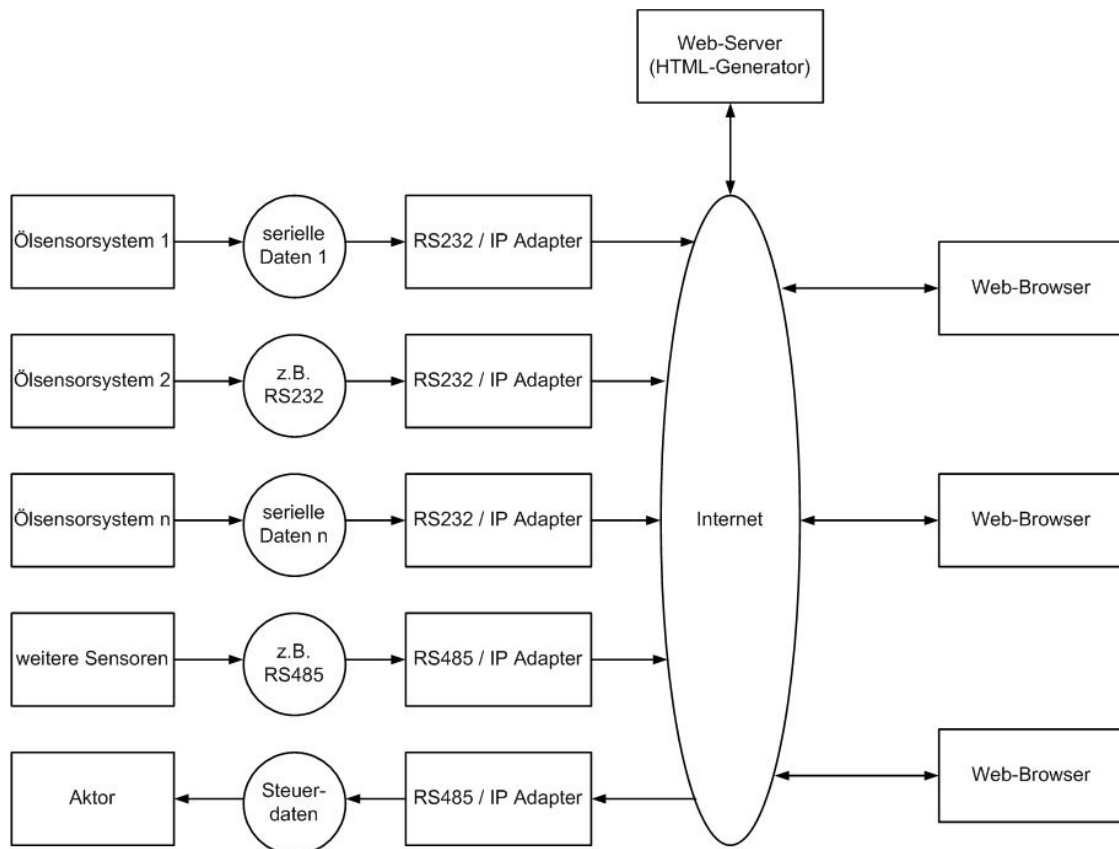


Bild 7.1: Instanzenetz des Monitoring- und Sensorsystems

Mithilfe des internetbasierten, dezentralen Monitoringsystems werden die Messergebnisse des OilQSens® via Internet übertragen, gespeichert und präsentiert. Die eingebauten LAN- oder WLAN-Schnittstellen dienen sowohl zur Übertragung der Messsignale an einen Datenbankserver, als auch zur Präsentation der lokalen Messdaten als HTML-Seiten. Hierzu ist bereits ein kleiner Webserver im OilQSens® integriert. Ein automatisiertes Senden von Warnhinweisen z. B. mittels E-Mail und/oder SMS ist an jeden beliebigen Rechner oder ein Smartphone mit Netzzugang möglich.

In einer anderen Ausgestaltung kann das Messverfahren in zu überwachende Lager und Zahnräder integriert und ggf. zusätzlich die Schmierfilmdicke gemessen werden. Dabei wird der Basissensor so realisiert, dass das Volumen zwischen den Elektrodenplatten der Schmierfilm im zu überwachenden Lager ist. Über die gemessene Kapazität C wird hier die Schmierpaltdicke I bestimmt. Ein mögliches Ausführungsbeispiel zeigt Bild 7.2 und Bild 7.3.

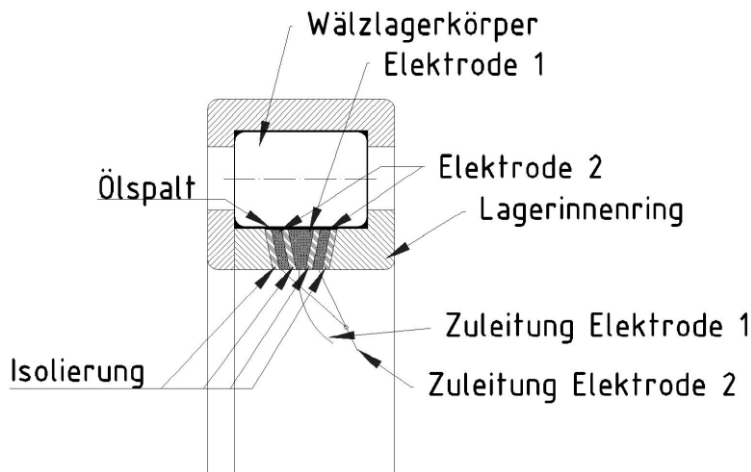


Bild 7.2: Schmierfilmdickensensor in einem Lager

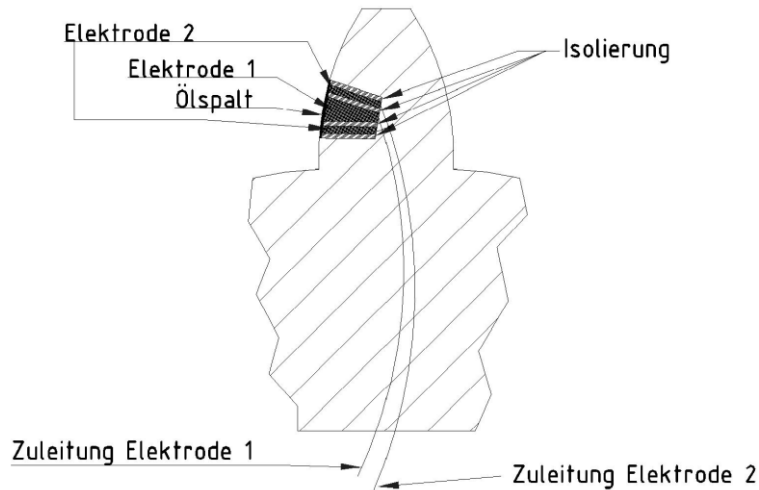


Bild 7.3: Schmierfilmsensor im Zahnrad

Zur Reduzierung der CO₂-Emmissionen werden neue Kraftstoffformulierungen mit Kohlenwasserstoffen aus fossilen und nachwachsenden Rohstoffen entwickelt und eingesetzt. Das Sensorsystem ermöglicht eine quasi kontinuierliche Messung des Biodieselanteils in Diesel. Dieses Verfahren kann zur Optimierung der Motorsteuerung in Dieselfahrzeugen, zukünftig voraussichtlich auch für mit Bioethanol / Benzin-Mischungen fahrende Flex-Fuel-Fahrzeuge genutzt werden.

Ein während dieser Arbeit ebenfalls identifizierter Anwendungsbereich des Ölsensorsystems ist die Optimierung der Erdölförderung (Crude Oil). In vielen Förderstätten werden über zusätzliche Bohrlöcher mit Hilfe von Injektionspumpen Wasser, Dampf und Chemikalien (Tenside) unter Druck in die Lagerstätten eingebracht, um das Erdöl auszulösen und an die Erdoberfläche zu treiben [110]. Ziel ist die Sicherstellung einer kontinuierlichen Förderung über einen langen Zeitraum. Sensormessungen im geförderten Crude Oils, direkt nach der Pumpe, lassen Rückschlüsse über die Wirksamkeit dieser ausbeuteerhöhenden Maßnahmen zu.

8. Anhang

8.1 Abbildungsverzeichnis

Bild 2.1: Bewegungssystem mit Reibung	21
Bild 2.2: Mögliche Wertekurve von pH-Wert als Funktion der KOH-Zugabe [17],	22
Bild 2.3: FT-IR-Gerät zur Untersuchung der Ölqualität [29]	26
Bild 2.4: IR-Spektrum von frischem und gebrauchtem Dieselmotorenöl [30]	26
Bild 2.5: Schema der Bildgenerierung und Auswertung bei der OPA [35]	28
Bild 2.6: Sensorkonzept der ATR Spektroskopie	29
Bild 2.7: Elektrisches Ersatzschaltbild des Tuning-Fork-Sensors [40]	31
Bild 2.8: Foto des Multichipmoduls [40]	31
Bild 2.9: Einfluss von Wasser auf Viskosität, Dichte und Dielektrizitätszahl [40]	32
Bild 2.10: Einflusstendenz der angegebenen Faktoren auf Viskosität und Dielektrizitätszahl [40]	33
Bild 2.11: Beschleunigungssensor für die Schwingungsanalyse [44]	33
Bild 2.12: ConduSens [48]	34
Bild 2.13: Sensorelektronik des ConduSens [47]	35
Bild 2.14: Gesamtsystem der Sensorelektronik des ConduSens [47]	35
Bild 2.15: Sensorelektronik des ConduSens zur Messung der Leitfähigkeit [47]	36
Bild 2.16: Prinzip des Kalibrationstestes am MLA 900 [49]	38
Bild 2.17: Leitfähigkeitsmessgerät MLA 900 [49]	38
Bild 3.1: Zusammenhang der differentiellen Spannungen und Ströme und der elektrischen Leitfähigkeit κ	41
Bild 3.2: Basissensor als Plattenkondensator	42
Bild 3.3: Ersatzschaltbild des Basissensors	44
Bild 3.4: Vereinfachtes elektrisches Ersatzschaltbild des Basissensors	45
Bild 3.5: Netzwerk-Ersatzschaltbild [59]	48
Bild 3.6: Vereinfachtes Ersatzschaltbild [59]	48
Bild 3.7: Gleichspannungsersatzschaltbild	49
Bild 3.8: Kapazitives Ersatzschaltbild	49
Bild 3.9: Schematische Betrachtung des Basissensors [62]	51
Bild 3.10: Ausdehnung der Plattendicke [62]	52
Bild 3.11: Störunterdrückung durch integrierende Sensorelektronik	53
Bild 3.12: Blockschaltbild eines Relaxationsoszillator	54
Bild 3.13: Instanzenetz des QilQSens [®]	54
Bild 3.14: konduktive Sensorelektronik	56
Bild 3.15: Sensorelektroniksignale	56
Bild 3.16: Zusammenhang zwischen T_{κ} und T_{ϵ}	58
Bild 3.17: Verhältnis U_{Tr} zu U_{Sp}	58
Bild 3.18: Relaxationsoszillator	59
Bild 3.19: Spannungsverläufe am Relaxationsoszillator	60
Bild 3.20: Vergleich der Spannungsverläufe bei unterschiedlichen Leitfähigkeiten	61
Bild 3.21: Ersatzschaltbild eines realen OPs	61
Bild 3.22: Auswirkungen der Fehlerströme auf die Integratorspannung	62
Bild 3.23: Messschaltung mit parasitären Kapazitäten	62
Bild 3.24: Parasitäre Kapazitäten in der Sensoranordnung [62]	62
Bild 3.25: modifizierte Messschaltung mit parasitären Kapazitäten	63
Bild 3.26: praktische Realisierung des Schirms im Basissensor [62]	63
Bild 3.27: Symetrische Masse am Beispiel des CapHSens [®] Sensors	64
Bild 3.28: Kennlinie des PT100-Temperaturfühlers [65]	64

Bild 3.29: Prinzipbild der Vierletermessschaltung	65
Bild 3.30: spannungsgesteuerte Stromquelle	65
Bild 3.31: Instrumentierungsverstärker	65
Bild 3.32: Leitfähigkeit κ in Abhängigkeit von der Temperatur T	66
Bild 3.33: Temperaturabhängigkeit der Leitfähigkeit κ	66
Bild 3.34: zum Gaußschen Least Square Verfahren	67
Bild 3.35: Temperaturkompensation	69
Bild 3.36: Approximation der Exponentialfunktion	70
Bild 3.37: Testreihe mit gewichtender Exponentialfunktion	71
Bild 3.38: Testreihe mit gewichtender approximierter Exponentialfunktion	71
Bild 4.1: Blockschaltbild des OilQSens [®]	73
Bild 4.2: Kondensator mit parasitären Zuleitungsinduktivitäten	74
Bild 4.3: Kondensator mit verteilten parasitären Leitungsinduktivitäten	74
Bild 4.4: bestückte CapHSens [®] Analogplatine (links: Top, rechts: Bottom) [62]	74
Bild 4.5: bestückte Auswerteelektronik Platine (links: Top, rechts: Bottom) [62]	75
Bild 4.6: Integration im Sensorgehäuse [62] Bild 4.7: Gesamtdarstellung des	75
Bild 4.8: Konstruktionsskizze des Sensors	76
Bild 4.9: Sensorträger mit Glasdurchführung	76
Bild 4.10: Messkammer des Basissensors	77
Bild 4.11: Sensormechanik	77
Bild 4.12: Photo und Prinzipskizze der planaren Elektrodenanordnung	78
Bild 4.13: planare Elektrodenanordnung	78
Bild 4.14: Basissensor mit Drei-Platten-Elektrodenanordnung [62]	79
Bild 5.1: Skizze des Laborprüfaufbaus	81
Bild 5.2: Foto des Laborprüfaufbaus [68]	82
Bild 5.3: Prinzipskizze des Laboraufbaus zur Gasfeuchtemessung	83
Bild 5.4: Prüfstand zur Gasfeuchtemessung	84
Bild 5.5: Foto des Prüfstands zur Gasfeuchtemessung	84
Bild 5.6: Skizze des Prüfstands für experimentelle Untersuchungen [72]	85
Bild 5.7: Planetenradlagerung und Belastungssituation [72]	86
Bild 5.8: Planetenradlager als Prüflager [72]	86
Bild 5.9: Foto des Prüfstands	87
Bild 6.1: Oszillogramme zur Messung von Low- und High-Zeit	89
Bild 6.2: Gemessene und simulierte Leitfähigkeitswerte von künstlich gealtertem Öl bei Zugabe von frischem Öl	90
Bild 6.3: Gemessene und simulierte Dielektrizitätszahlwerte ϵ_r von künstlich gealtertem Öl bei Zugabe von frischem Öl	91
Bild 6.4: Differenz der berechneten Leitfähigkeits- und Dielektrizitätszahlwerte zu den gemessenen Werten; künstlich gealtertes Öl bei Zugabe von frischem Öl	91
Bild 6.5: Differenz der gemessenen und simulierten Leitfähigkeits- und Dielektrizitätszahlwert bei 1 mm Sensorplattenabstand	92
Bild 6.6: Leitfähigkeitsänderung bei Zudosierung von VE Wasser	93
Bild 6.7: Dielektrizitätszahländerung bei Zudosierung von VE-Wasser	93
Bild 6.8: Aufbau von Tensiden, „Kopf-Schwanz-Moleküle“	94
Bild 6.9: Solubilisierung von Wassermolekülen durch Tenside	94
Bild 6.10: Veränderung der Leitfähigkeit κ bei VE-Wasserdosierung [79]	95
Bild 6.11: Veränderung der Dielektrizitätszahl ϵ_r bei VE-Wasserdosierung [79]	95
Bild 6.12: Foto des Prüfstandes zur oxidativen Ölalterung bei verschiedenen	96
Bild 6.13: Neutralisationszahl im Verlauf der Alterungsdauer in Stunden [79]	97

Bild 6.14: Säurezahl von Hydraulikölen unterschiedlicher Alterungsstufen [79]	97
Bild 6.15: Dielektrizitätszahl ϵ_{r40} - Mischung an gealtertem Hydrauliköl [79]	98
Bild 6.16: Dielektrizitätszahl ϵ_{r40} - Menge an zudosiertem VE-Wasser [79]	98
Bild 6.17: Spezifische Leitfähigkeit κ_{40} verschiedener Alterungsstufen [79]	99
Bild 6.18: Säurezahl der verschiedenen Alterungsstufen des Hydrauliköls Energol HM46 [79]	99
Bild 6.19: Neutralisationszahl in Abhängigkeit der Leitfähigkeit κ_{40} verschiedener Alterungsstufen [79]	100
Bild 6.20: Neutralisationszahl von Getriebeölen unterschiedlicher Alterungsstufen [79]	100
Bild 6.21: Dielektrizitätszahl ϵ_{r40} - Mischung an gealtertem Getriebeöl [79]	101
Bild 6.22: Dielektrizitätszahl ϵ_{r40} - Menge an zudosiertem VE-Wasser [79]	101
Bild 6.23: Kompensierte Leitfähigkeit κ_{40} verschiedener Alterungsstufen [79]	102
Bild 6.24: Neutralisationszahl der verschiedenen Alterungsstufen des Getriebeöls Energol GR-XP220 [79]	102
Bild 6.25: Säurezahl in Abhängigkeit der Leitfähigkeit κ_{40} verschiedener Alterungsstufen [79]	103
Bild 6.26: Dynamische Viskosität von HLP HM46	104
Bild 6.27: Leitfähigkeit von HLP HM46	104
Bild 6.28: Dielektrizitätszahl von HLP HM46	105
Bild 6.29: Dynamische Viskosität von GR-XP 220	106
Bild 6.30: Leitfähigkeit von GR-XP 220	106
Bild 6.31: Dynamische Viskosität und Dielektrizitätszahl von GR-XP220	107
Bild 6.32: Leitfähigkeit in Abhängigkeit von der dynamischen Viskosität von GR-XP220	107
Bild 6.33: Dielektrizitätszahl in Abhängigkeit von der dynamischen Viskosität von GR-XP220	108
Bild 6.34: Berechnete und voreingestellte Feuchtwerte im Vergleich	109
Bild 6.35: Elektrische Leitfähigkeit κ in Abhängigkeit des Biodieselanteils in Diesel	110
Bild 6.36: Dielektrizitätszahl bei Zudosierung von Biodieselanteil in Diesel	111
Bild 6.37: Drehzahlen und Drehmomente M	112
Bild 6.38: berechnete Verlustleistung ΔP	113
Bild 6.39: Leitfähigkeitsmessung κ	113
Bild 6.40: Temperaturabhängigkeit der Ölleitfähigkeit κ	114
Bild 6.41: temperaturkompensierter Ölleitfähigkeitsverlauf κ_{40}	114
Bild 6.42: Steigung der Leitfähigkeit $\Delta\kappa_{40}/\Delta t$	115
Bild 6.43: Weiß anätzendes Rissystem in einem frühausgefallenen Rollenlager aus einer Papiermaschine [86]	116
Bild 6.44: Durch lokale Wasserstoffversprödung verursachter erhöhter interkristalliner Anteil in präparativ erzeugten Gewaltbruchgefüge um einen originalen weiß anätzenden Riss [88].	116
Bild 6.45: Ausgedehnte Grübchenbildung auf einem Planetenradlagerinnenring	117
Bild 6.46: Leitfähigkeitsänderung $\Delta\kappa_{40}/\Delta t$ in Abhängigkeit der Getriebeverlustleistung	117
Bild 6.47: Dielektrizitätszahl- und Temperaturverlauf	118
Bild 6.48: temperaturkompensierter Dielektrizitätszahlverlauf ϵ_{r40}	119
Bild 6.49: Drehzahlen und Drehmomente mit einem Prüflager	121
Bild 6.50: Berechnete Verlustleistung ΔP beim Versuch mit einem Prüflager	121
Bild 6.51: Ölleitfähigkeit κ beim Versuch mit einem Prüflager	122
Bild 6.52: temperaturkompensierter Ölleitfähigkeitsverlauf κ_{40} mit einem Prüflager	122
Bild 6.53: Steigung der Leitfähigkeit $\Delta\kappa_{40}/\Delta t$	123
Bild 6.54: Dielektrizitätszahlmessung ϵ_r mit einem Prüflager	123
Bild 6.55: temperaturkompensierter Dielektrizitätszahlverlauf ϵ_{r40} mit einem Prüflager	124
Bild 6.56: Schälungen auf einem Planetenradlagerinnenring	125
Bild 6.57: Leitfähigkeitsänderung über Verlustleistung ΔP mit nur einem Prüflager	126
Bild 6.58: Zulässige Betriebsbereiche	126
Bild 6.59: Vergleich der Leitfähigkeiten κ bei einer Temperatur von 20 °C	127
Bild 6.60: Vergleich der Leitfähigkeiten κ bei einer Temperatur von 30 °C	128

Bild 6.61: Vergleich der Leitfähigkeiten κ bei einer Temperatur von 40 °C	129
Bild 6.62: Messabweichungen des MLA 900 vom OilQSens® in %	130
Bild 6.63: Skizze des Versuchsaufbaus	130
Bild 6.64: Foto des Prüfstands	131
Bild 6.65: Dielektrizitätszahl ϵ_r und Leitfähigkeit κ bei Zugabe von VE Wasser	132
Bild 6.66: Dielektrizitätszahl ϵ_r und Leitfähigkeit κ bei Zugabe von Kupferpulver	132
Bild 6.67: Berechnete und gemessene Dielektrizitätszahl ϵ_{rc} und ϵ_r von frischem Öl bei	135
Bild 6.68: berechnete und gemessene Leitfähigkeit κ_c und κ von frischem Öl bei Zugabe von VE Wasser nach Maxwell-Garnett, Lichtenecker und Piekara	136
Bild 6.69: gemessene Dielektrizitätszahl ϵ_r und lineare Regressionsgerade	137
Bild 6.70: gemessene Leitfähigkeit κ und lineare Regressionsgerade	138
Bild 6.71: berechnete und gemessene Dielektrizitätszahl ϵ_{rc} und ϵ_r bei Zugabe	139
Bild 6.72: berechnete und gemessene Leitfähigkeit κ_c und κ bei Zugabe von Kupferpulver nach Maxwell-Garnett, Lichtenecker und Piekara	140
Bild 6.73: gemessene Dielektrizitätszahl ϵ_r und lineare Regressionsgerade	141
Bild 6.74: gemessene Leitfähigkeit κ und lineare Regressionsgerade	142
Bild 6.75: Ätzfiguren auf der Außenringlaufbahn eines Eisenbahnradlagers; Eindrückungen vom Abrieb des Erdungskontakts sind ebenfalls erkennbar [86]	143
Bild 7.1: Instanzennetz des Monitoring- und Sensorsystems	147
Bild 7.2: Schmierfilmdickensensor in einem Lager	148
Bild 7.3: Schmierfilmsensor im Zahnrad	148
Bild 8.1: Datenblatt des OilQSens®	155
Bild 8.2: Datenblatt des CapHSens®	156
Bild 8.3: Konstruktionszeichnungen des Basissensorkonzepts	157

8.2 Berechnung der Taylorreihen

8.2.1 Berechnung der Dielektrizitätszahl nach Maxwell-Garnett

Nach Maxwell-Garnett wird die Taylorreihe mit folgender Funktion berechnet:

$$\epsilon_{rc} = \epsilon_{Oel} + 3f\epsilon_{Oel} \frac{\epsilon_{rAdd} - \epsilon_{Oel}}{\epsilon_{rAdd} + 2\epsilon_{Oel} - f(\epsilon_{rAdd} - \epsilon_{Oel})} = g(f, \epsilon_{rAdd}, \epsilon_{Oel}) \quad (8.1)$$

ϵ_{Oel} : Dielektrizitätszahl des Öls ohne Zudosierung

ϵ_{rAdd} : Dielektrizitätszahl der Zudosierung

ϵ_{rc} : berechnete Dielektrizitätszahl des Gemisches

f : Volumenanteil der Zudosierung

$$\text{mit: } \epsilon_{rAdd}, \epsilon_{Oel} = \text{konstant} \quad (8.2)$$

$$\text{gilt: } \epsilon_{rc} = g(f) \quad (8.3)$$

$$g(0) = \epsilon_{Oel} \quad (8.4)$$

Taylorreihe $P_{MG}(f)$ von $g(f)$ mit dem Entwicklungspunkt f_0 :

$$P_{MG}(f) = g(f_0) + \frac{g'(f_0)}{1!}(f - f_0) + \frac{g''(f_0)}{2!}(f - f_0)^2 + \dots + \frac{g^{(n)}(f_0)}{n!}(f - f_0)^n \quad (8.5)$$

Hier $f_0=0$

$$P_{MG}(f) = g(0) + \frac{g'(0)}{1!}f + \frac{g''(0)}{2!}f^2 + \dots + \frac{g^{(n)}(0)}{n!}f^n \quad (8.6)$$

Entwicklung der Reihe bis zum 2ten Taylorpolynom

$$P_{MG}(f) = g(0) + \frac{g'(0)}{1!}f + \frac{g''(0)}{2!}f^2 \quad (8.7)$$

Ableiten mithilfe der Quotientenregel

$$g(f) = c + \frac{d(f)}{h(f)} \quad (8.8)$$

$$g'(f) = \frac{d'(f) \cdot h(f) - d(f) \cdot h'(f)}{h^2(f)} \quad (8.9)$$

$$g'(f) = \frac{3\varepsilon_{Oel}(\varepsilon_{rAdd} - \varepsilon_{Oel})(\varepsilon_{rAdd} + 2\varepsilon_{Oel} - f(\varepsilon_{rAdd} - \varepsilon_{Oel})) + 3f\varepsilon_{Oel}(\varepsilon_{rAdd} - \varepsilon_{Oel})^2}{(\varepsilon_{rAdd} + 2\varepsilon_{Oel} - f(\varepsilon_{rAdd} - \varepsilon_{Oel}))^2} \quad (8.10)$$

$$g'(f) = \frac{3\varepsilon_{Oel}(\varepsilon_{rAdd} - \varepsilon_{Oel})(\varepsilon_{rAdd} + 2\varepsilon_{Oel})}{(\varepsilon_{rAdd} + 2\varepsilon_{Oel} - f(\varepsilon_{rAdd} - \varepsilon_{Oel}))^2} \quad (8.11)$$

$$g'(0) = \frac{3\varepsilon_{Oel}(\varepsilon_{rAdd} - \varepsilon_{Oel})(\varepsilon_{rAdd} + 2\varepsilon_{Oel})}{(\varepsilon_{rAdd} + 2\varepsilon_{Oel})^2} = \frac{3\varepsilon_{Oel}(\varepsilon_{rAdd} - \varepsilon_{Oel})}{(\varepsilon_{rAdd} + 2\varepsilon_{Oel})} \quad (8.12)$$

$$g''(f) = \frac{6\varepsilon_{Oel}(\varepsilon_{rAdd} - \varepsilon_{Oel})^2(\varepsilon_{rAdd} + 2\varepsilon_{Oel})}{(\varepsilon_{rAdd} + 2\varepsilon_{Oel} - f(\varepsilon_{rAdd} - \varepsilon_{Oel}))^3} \quad (8.13)$$

$$g''(0) = \frac{6\varepsilon_{Oel}(\varepsilon_{rAdd} - \varepsilon_{Oel})^2(\varepsilon_{rAdd} + 2\varepsilon_{Oel})}{(\varepsilon_{rAdd} + 2\varepsilon_{Oel})^3} = \frac{6\varepsilon_{Oel}(\varepsilon_{rAdd} - \varepsilon_{Oel})^2}{(\varepsilon_{rAdd} + 2\varepsilon_{Oel})^2} \quad (8.14)$$

Daraus folgt die lineare Approximation $P_{MG}(f)$:

$$P_{MG}(f) = \varepsilon_{Oel} + \frac{3\varepsilon_{Oel}(\varepsilon_{rAdd} - \varepsilon_{Oel})}{(\varepsilon_{rAdd} + 2\varepsilon_{Oel})}f + \frac{3\varepsilon_{Oel}(\varepsilon_{rAdd} - \varepsilon_{Oel})^2}{(\varepsilon_{rAdd} + 2\varepsilon_{Oel})^2}f^2 + \dots \quad (8.15)$$

Die Taylorreihen und die lineare Approximation für die berechneten Werte der Leitfähigkeiten errechnen sich entsprechend.

8.2.2 Berechnung der Dielektrizitätszahl nach Lichtenecker

Die Taylorreihe berechnet sich für die berechneten Werte der Dielektrizitätszahl nach Lichtenecker mit folgender Funktion:

$$\varepsilon_{rc} = \varepsilon_{rAdd}^f \cdot \varepsilon_{Oel}^{(1-f)} = g(f, \varepsilon_{rAdd}, \varepsilon_{Oel}) \quad (8.16)$$

$$\varepsilon_{rc} = \varepsilon_{rAdd}^f \cdot \varepsilon_{Oel}^{(1-f)} = g(f, \varepsilon_{rAdd}, \varepsilon_{Oel}) \quad (8.17)$$

$$\text{mit: } \varepsilon_{rAdd}, \varepsilon_{Oel} = \text{konstant} \quad (8.18)$$

$$\text{gilt: } \varepsilon_{rc} = g(f) \quad (8.19)$$

Wie bei der Taylorreihenbestimmung von Maxwell-Garnett gilt ebenfalls $f_0=0$ und Entwicklung der Reihe bis zum 2ten Taylorpolynom.

$$g'(f) = \varepsilon_{rAdd}^f \cdot \varepsilon_{Oel}^{(1-f)} \ln(\varepsilon_{rAdd}) + \varepsilon_{rAdd}^f \cdot \varepsilon_{Oel}^{(1-f)} \ln(\varepsilon_{Oel}) \quad (8.20)$$

$$g'(0) = \varepsilon_{rOel} \cdot (\ln(\varepsilon_{rAdd}) + \ln(\varepsilon_{rOel})) \quad (8.21)$$

$$g''(f) = \ln(\varepsilon_{rAdd}) \cdot [\varepsilon_{Oel}^{(1-f)} \cdot \varepsilon_{rAdd}^f \cdot (\ln(\varepsilon_{rOel}) + \ln(\varepsilon_{rAdd}))] + \ln(\varepsilon_{rOel}) \cdot [\varepsilon_{Oel}^{(1-f)} \cdot \varepsilon_{rAdd}^f \cdot (\ln(\varepsilon_{rOel}) + \ln(\varepsilon_{rAdd}))] \quad (8.22)$$

$$g''(0) = \ln(\varepsilon_{rAdd}) \cdot [\varepsilon_{Oel} \cdot (\ln(\varepsilon_{Oel}) + \ln(\varepsilon_{rAdd}))] + \ln(\varepsilon_{Oel}) \cdot [\varepsilon_{Oel} \cdot (\ln(\varepsilon_{Oel}) + \ln(\varepsilon_{rAdd}))] \quad (8.23)$$

Daraus folgt die lineare Approximation $P_L(f)$:

$$P_L(f) = \varepsilon_{Oel} + \varepsilon_{Oel} \cdot (\ln(\varepsilon_{rAdd}) + \ln(\varepsilon_{Oel}))f + \frac{\{ \ln(\varepsilon_{rAdd}) \cdot [\varepsilon_{Oel} \cdot (\ln(\varepsilon_{Oel}) + \ln(\varepsilon_{rAdd}))] + \ln(\varepsilon_{Oel}) \cdot [\varepsilon_{Oel} \cdot (\ln(\varepsilon_{Oel}) + \ln(\varepsilon_{rAdd}))] \}}{2} f^2 + \dots \quad (8.24)$$

Die Taylorreihen und die lineare Approximation für die berechneten Werte der Leitfähigkeiten errechnen sich entsprechend.

8.2.3 Berechnung der Dielektrizitätszahl nach Piekara

Die Taylorreihe berechnet sich für die berechneten Werte der Dielektrizitätszahl nach Piekara mit der folgenden Funktion:

$$\varepsilon_{rc} = 3\varepsilon_{Oel} \frac{\varepsilon_{rAdd} - \varepsilon_{Oel}}{\varepsilon_{rAdd} + 2\varepsilon_{Oel}} f + \varepsilon_{Oel} = g(f, \varepsilon_{rAdd}, \varepsilon_{Oel}) \quad (8.25)$$

$$\text{mit: } \varepsilon_{rAdd}, \varepsilon_{Oel} = \text{konstant} \quad (8.26)$$

$$\text{gilt: } \varepsilon_{rc} = g(f) \quad (8.27)$$

Wie bei der Taylorreihenbestimmung von Maxwell-Garnett gilt ebenfalls $f_0=0$ und Entwicklung der Reihe bis zum 2ten Taylorpolynom.

$$g(0) = \varepsilon_{Oel} \quad (8.28)$$

$$g'(f) = 3\varepsilon_{Oel} \frac{\varepsilon_{rAdd} - \varepsilon_{Oel}}{\varepsilon_{rAdd} + 2\varepsilon_{Oel}} \quad (8.29)$$

$$g'(0) = 3\varepsilon_{Oel} \frac{\varepsilon_{rAdd} - \varepsilon_{Oel}}{\varepsilon_{rAdd} + 2\varepsilon_{Oel}} \quad (8.30)$$

$$g''(f) = 0 \quad (8.31)$$

Daraus ergibt sich die lineare Approximation:

$$P_P(f) = \varepsilon_{Oel} + 3\varepsilon_{Oel} \frac{\varepsilon_{rAdd} - \varepsilon_{Oel}}{\varepsilon_{rAdd} + 2\varepsilon_{Oel}} f + \dots \quad (8.32)$$

Die Taylorreihen und die lineare Approximation für die berechneten Werte der Leitfähigkeiten errechnen sich entsprechend.

Ölqualitätssensor OilQSens®

Technische Daten



Sensorgehäuse

Sensortopf:	Edelstahl 316Ti
Sensorträger:	Edelstahl 316L
Sensordeckel:	Aluminium
Sensorkabel:	3 m, geschirmt ($I_{\max} = 300 \text{ m}$)
Abmessung:	103 mm hoch 70 mm Durchmesser
Gewicht:	1,6 kg

Druckfestigkeit

Messkammer: max. 60 barü

Ölanschlüsse: 1/4" Swagelok®

Beständigkeit gegenüber allen Ölen.

Stromversorgung: 90-264V - 50/60Hz
Leistungsaufnahme: 0,2 W

Einsatztemperatur: -20°C bis +85°C
Lagertemperatur: -20°C bis +120°C

Auswertesoftware: OilQSens®/SW

Messgrößen:

elektrische Leitfähigkeit: 0,1 bis 50.000 pS/m
Dielektrizitätszahl: 1 bis 5
Temperatur: -20°C bis +200°C

Messgrößen unabhängig von Viskosität des Öls

Messauflösung:

elektrische Leitfähigkeit: 0,1 pS/m
Dielektrizitätszahl: $1 \cdot 10^{-6}$
Temperatur: 0,1 K

Ansprechzeit: < 45 sek.
Messgenauigkeit: +/-1% vom SE

max. Öldruck: 60 bar bei 20°C
Öltemperatur: -20°C bis +85°C

zusätzliche Kommunikationsmöglichkeiten:

Ethernet/ WLAN
 RS232
 RS232/RS485 Adapter
 RS232/USB Adapter

Bei Fragen wenden Sie sich bitte unmittelbar an uns:



Technische Änderungen vorbehalten, SK 12/09

Bild 8.1: Datenblatt des OilQSens®

cmc Instruments GmbH

Meß-, Regel- und Analysetechnik
 Hauptstraße 388
 D-65760 Eschborn, Germany
 fon: + 49 6173 / 32 00 78
 fax: + 49 6173 / 6 50 50
 e-mail: cmcingmbh@aol.com
www.cmc-instruments.de

Ölqualitätssensor CapHSens®

Technische Daten



Sensorgehäuse

Sensortopf:	Edelstahl 316Ti
Sensorträger:	Edelstahl 316L
Sensordeckel:	Aluminium
Sensorkabel:	3 m, geschirmt ($I_{\max} = 300 \text{ m}$)
Abmessung:	103 mm hoch 70 mm Durchmesser
Gewicht:	1,6 kg

Druckfestigkeit	
Messkammer:	max. 60 barü

Ölanschlüsse:	1/4" Swagelok®
----------------------	----------------

Beständigkeit gegenüber allen Ölen.

Stromversorgung:	90-264V - 50/60Hz
Leistungsaufnahme:	0,2 W

Einsatztemperatur:	-20°C bis +85°C
Lagertemperatur:	-20°C bis +120°C

Auswertesoftware:	CapHSens®/SW
--------------------------	--------------

Messgrößen:

Dielektrizitätszahl:	1 bis 5
Temperatur:	-20°C bis +200°C

Messgrößen unabhängig von Viskosität des Öls

Messauflösung:

Dielektrizitätszahl:	$1 \cdot 10^{-6}$
Temperatur:	0,1K

Ansprechzeit:	< 45 sek.
Messgenauigkeit:	+/-1% vom SE

max. Öldruck:	60bar bei 20°C
Öltemperatur:	-20°C bis +85°C

zusätzliche Kommunikationsmöglichkeiten:

Ethernet/ WLAN
RS232
RS232/RS485 Adapter
RS232/USB Adapter

Bei Fragen wenden Sie sich bitte unmittelbar an uns:



Technische Änderungen vorbehalten, SK 12/09

cmc Instruments GmbH
Meß-, Regel- und Analystechnik
Hauptstraße 388
D-65760 Eschborn, Germany
fon: + 49 6173 / 32 00 78
fax: + 49 6173 / 6 50 50
e-mail: cmcingmbh@aol.com
www.cmc-instruments.de

Bild 8.2: Datenblatt des CapHSens®

8.5 Konstruktionszeichnungen

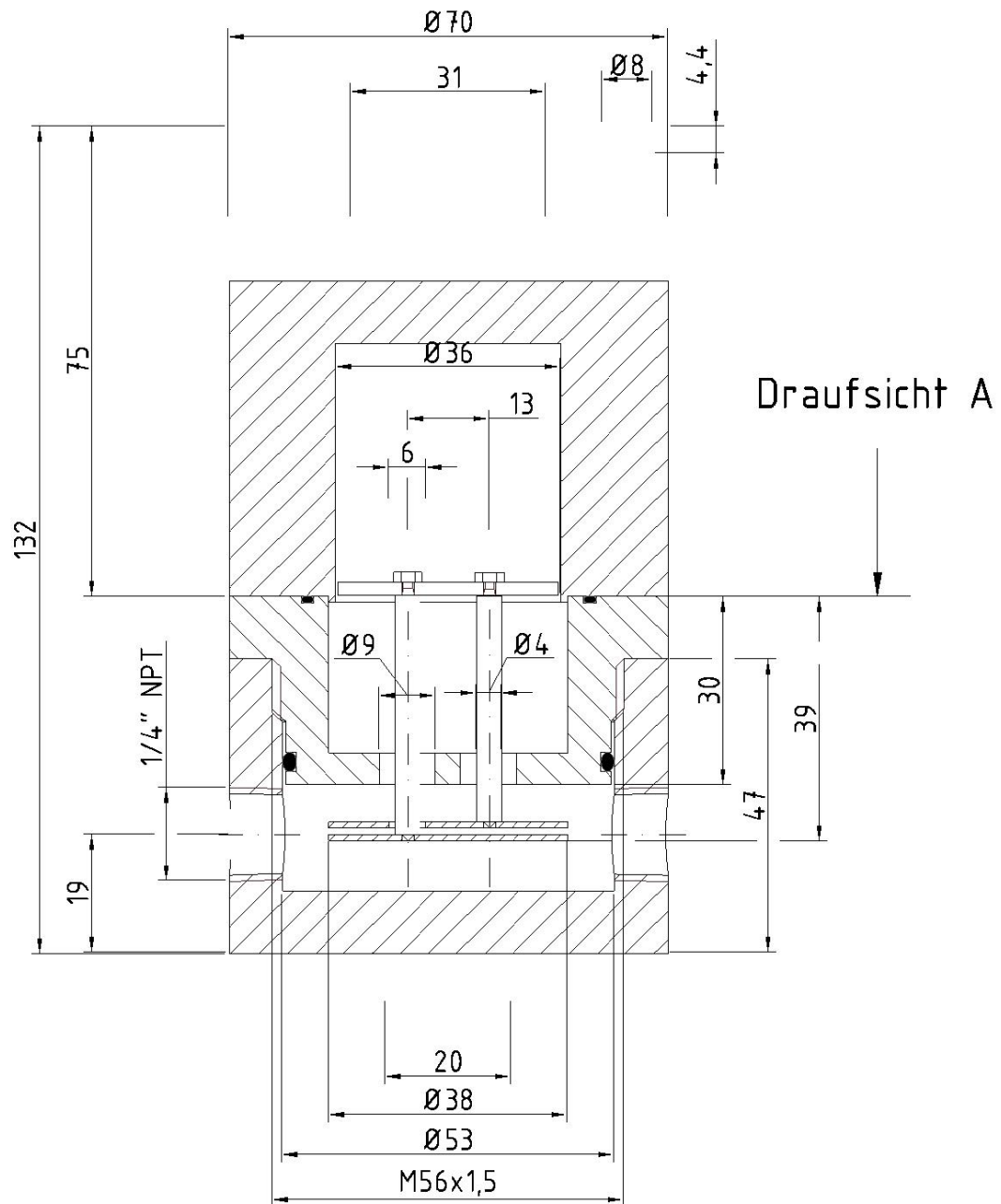


Bild 8.3: Konstruktionszeichnungen des Basissensorkonzepts

8.6 Literaturverzeichnis

- [1] Bhumiwat, S. and others: *Performance of Oil and Paper in Transformers Based on IEC61620 and Dielectric Response Techniques*, CIGRE SC D1 Colloquium, Budapest, Hungary, September 20–25, 2009
- [2] Key for Engineers and Associates, KEA consult, Auckland, New Zealand, 2011
- [3] Czichos, H., Habig, K.-H.: *Tribologie Handbuch: Tribometrie, Tribomaterialien, Tribotechnik*, Vieweg + Teubner Verlag, Heidelberg, 2010
- [4] Betz, A.: *Wind-Energie und ihre Ausnutzung durch Windmühlen*. Bandenhoeck & Ruprect, Göttingen, 1926
- [5] Gasch, R., Twele, J. (Hrsg.): *Windkraftanlagen – Grundlagen, Entwurf, Planung und Betrieb*. Teubner, Stuttgart, 2007
- [6] Betz, A.: *Wind-Energie und ihre Ausnutzung durch Windmühlen*. Bandenhoeck & Ruprect, Göttingen, 1926
- [7] Crockett, R.: *Medienmitteilung Swiss Tribology, damit das Netzwerk möglichst reibungslos läuft*, Dübendorf, St. Gallen, Thun, 2006
- [8] J. P. Davim, *Tribology for Engineers*, Woodhead Publishing, Cambridge, UK, 2011 S. 35
- [9] Popov, V.: *Kontaktmechanik und Reibungsphysik, Skript Einführung*, TU Berlin, Berlin, 17. Oktober 2006
- [10] Bowden, F., Tabor, D.: *The Friction and Lubrication of Solids*, Oxford University Press, Oxford, 2001
- [11] Bartz, W. J.: *Einführung in die Tribologie und Schmierungstechnik*, expert verlag GmbH, Renningen, 2010
- [12] Habig, K.-H., Santer, E., Woydt, M.: *Tribologie-Handbuch, 3., überarbeitete und erweiterte Auflage*, Vieweg und Teubner Verlag, Wiesbaden, 2010
- [13] Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle: *Mineralöldaten für die Bundesrepublik Deutschland, Entwicklung der Inlandsablieferungen von Schmierstoffen 1995-2007*, Eschborn, 2008
- [14] DIN 53402: *Bestimmung der Säurezahl*, 1990
- [15] DIN EN 12634: *Mineralölerzeugnisse und Schmierstoffe - Bestimmung der Säurezahl - Potentiometrische Titration in nichtwässrigen Medien*, Februar 1999
- [16] ASTM 664, ISO 6619: *Erdölprodukte und Schmierstoffe, Neutralisationszahl, Potentiometrisches Titrationsverfahren*, Dezember, 1988

- [17] Gros, L., Bruttel, P. A., von Kloeden, M.: *Praktikum der Titration, Ausbildungshandbuch für die titrimetische Massanalyse*, Metrohm AG, Herisau, Januar 2001
- [18] Kollek, W.: *Praxiswerte der Säurezahl*, Institut für Maschinenkonstruktion und –betrieb, Wroclaw, 2007
- [19] DIN 51575: *Mineralöle; Bestimmung der Sulfatasche*, Februar 1984
- [20] Phoenix SAS, Produktflyer, CEM GmbH, Carl-Friedrich-Gauß-Straße 9, Kamp-Lintfort, 2007
- [21] van Basshuysen, R., Schäfer, F.: *Öl, Eigenschaften und Kennwerte, Aschegehalt, Typische Gehalte an Sulfatasche in qualitativ hochwertigen europäischen Motorenölen*, Bad Wimpfen, 2008
- [22] DIN 51 451: *Prüfung von Mineralölerzeugnissen und verwandten Produkten – Infrarotspektrometrische Analyse - Allgemeine Arbeitsgrundlagen*, September 2004
- [23] DIN 51 396-3: *Bestimmung von Abriebelementen - Teil 3: Bestimmung von Chrom mittels Atomabsorptionsspektrometrie*, November 1999
- [24] DIN 51 397-1: *Prüfung von Schmierstoffen - Bestimmung des Gehaltes an Eisen von Schmierölen - Teil 1: Bestimmung durch Atomabsorptionsspektroskopie nach dem Veraschen*, Januar 1997
- [25] DIN 51 397-2: *Prüfung von Schmierstoffen - Bestimmung des Gehaltes an Eisen von Schmierölen - Teil 2: Direkte Bestimmung durch Atomabsorptionsspektroskopie*, Januar 1997
- [26] DIN 51 396-2: *Prüfung von Schmierstoffen - Bestimmung von Abriebelementen - Teil 2: Wellenlängendispersive Röntgenfluoreszenz-Analyse (RFA)*, Februar 2007
- [27] DIN 51 396-1: *Prüfung von Schmierstoffen - Bestimmung von Abriebelementen - Teil 1: Direkte Bestimmung durch optische Emissionsspektralanalyse mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP OES)*, August 2005
- [28] Robinson, N.: *Monitoring Oil Degradation with Infrared Spectroscopy*, Issue Number: 200711, Wearcheck, November 2007
- [29] Produktinformation Bio-Rad, FT-IR-Gerät, 1000 Alfred Nobel Drive, Hercules, CA 94547, 2007
- [30] van Basshuysen, R., Schäfer, F.: *Öl, Pflege des Öls, Gebrauchtölanalyse, Infrarotspektrum eines Gebrauchtöls*, Motorlexikon, Bad Wimpfen, 2008
- [31] PRÜFTECHNIK Condition Monitoring GmbH, Impressum, das Service-Magazin der Prüftechnik-Gruppe, Nr. 09, Ismaning, 2007

[32] Barraclough, Lukas, Anderson: *Comparison of Wear and Contaminant Particle Analysis Techniques*, Spectro Inc, Mahwah, NJ, 2003

[33] Produktinformation SPECTRO INC., *LaserNet Fines®-C, Particle Shape Classifier and Particle Counter*, Industrial Tribology Systems, 160 Ayer Road, Littleton, MA 01460, 2007

[34] Reintjes, Tucker, Schultz: *Real Time Optical Oil Debris Monitors*, Proceedings of 51st Meeting of the Society for Machinery Failure Prevention Technology, Virginia Beach, VA, April 1997

[35] Lukas, M., Anderson, D. P., Sebok, T., Filicky, D.: *A New Tool For The Oil Analysis Toolbox*, Practicing Oil Analysis Magazine, Elgin, September 2002

[36] Leske, S.: *MetalSCAN–effiziente Zustandsüberwachung von Getrieben*, Firmenschrift momac GmbH & Co.KG, Moers, 2007

[37] Jägle, M.: *Ölsensor, Zustand technischer Schmierstoffe online erfassen*, Fraunhofer IPM, Freiburg, August 2007

[38] Hartwig, S.: *Monitoring von Schmierstoffen*, Mineralöltechnik 50, No.10, Fraunhofer IPM, Freiburg, 2005

[39] Ginthör-Weinwurm, I.: *Die plastische Fassadengestaltung des Naturhistorischen Museums in Wien, eine Palastwand der Evolution*, Diplomarbeit, Universität Wien, März 2008

[40] Dobrinski, H., Buhrdorf, A., Lindemann, M., Lüdtke, O.: *Kombinationssensor für Ölfüllstands- und Ölqualitätsmanagement*, Haus der Technik, 2. Tagung Sensoren im Automobil, München, 11. – 12. September 2007

[41] Matsiev, L. F., Bennett, J- W., McFarland, E. W.: *Application of Low Frequency Mechanical Resonators to Liquid Property Measurements*, IEEE Ultrasonics Symposium, Sendai, Japan, 1998

[42] Matsiev, L. F.: *Application of Flexural Mechanical Resonators to High Throughput Liquid Characterization*, Ultrasonics Symposium, San Juan, Puerto Rico, 2000

[43] Tille, T. et al., *Sensoren im Automobil*, Dobrinski, H., Buhrdoff, A., Lüdtke, O.: *Hochintegrierter Mikrosensor auf Basis eines Tuning-Fork-Quarzresonators zur multiparametrischen Ölzustandsanalyse in Automobilanwendungen*, Expert Verlag, Renningen, 2006

[44] Becker, E.: *GearController® zur Betriebsüberwachung von Windkraftgetrieben*, Wind Kraft Journal, Karlsruhe, April 2001

[45] Becker, E.: *Condition Monitoring an Windkraftanlagen - Erfahrungen, Entwicklungen und Tendenzen*, Antriebstechnisches Kolloquium, RWTH, Aachen, Mai 2001

[46] Becker, E., Dahlhaus, N.: Automatisches Condition Monitoring mit WinTController®, Wind Kraft Journal, Karlsruhe, Mai 2002

[47] Kuipers, U., Kohlrausch, A., Barthen, A.: Verfahren und Meßsystem zur Messung physikalischer Größen von gering leitenden und nichtleitenden Fluiden, deutsche Patent Nr. 19628690, Anmelder: Achenbach Buschhütten GmbH, Deutsches Patentamt, München, 22. 4. 1999, Anmeldetag: 17. 7. 1996
europäische Patentanmeldung Nr. 97110884.0, Europäisches Patentamt, München, 2. 7. 1997
Process and measurement system for measuring physical quantities of poorly conductive and nonconductive fluids, US Patent Nr. 5,973,503 Washington, 26. 10. 1999
japanische Patentanmeldung Nr. 9(1997)-191420, Japanisches Patentamt, Tokio, 16. 7. 1997

[48] Barten, A. E.: Aluminium Rolling Mill Technology, Future concepts in thin-strip and foil rolling; Verlag moderne industrie GmbH, Landsberg, 2002

[49] Produktinformation MBA Instruments GmbH, Messung der Leitfähigkeit von leichten Erdölprodukten, Quickborn, April 2010

[50] Baier, P.: Grundlagen der Elektrotechnik I, Skript, Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern, 2004

[51] Bergmann, L., Schaefer, C., Gobrecht, H.: Lehrbuch der Experimentalphysik, Band II, Elektrizität und Magnetismus, sechste Auflage, Walter de Gruyter, Berlin, 1971

[52] Lisowski, M.: APTADM'2004 International Conference on Advances in Processing, Testing and Application of Dielectric Materials Scientific Papers of the Institute of Electrical Engineering Fundamentals of Wroclaw University of Technology, No 40, Conf. 15, Wroclaw, 2004

[53] Bonfig, K. W.: Technische Durchflussmessung unter besonderer Berücksichtigung neuartiger Durchflussmessverfahren, Vulkan-Verlag, Essen, 2004

[54] Münch, W. V.: Werkstoffe der Elektrotechnik, Teubner-Verlag, Stuttgart, 1989

[55] Küchler, A.: Hochspannungstechnik, Grundlagen – Technologie – Anwendungen, VDI-Verlag, Düsseldorf, 3. Auflage, 2009

[56] Beyer, M., Boeck, W., Möller, K., Zaengl, W.: Hochspannungstechnik, Theoretische und praktische Grundlagen für die Anwendung, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo, 1986

[57] Tenbohlen, S., Koch, M.: Ölleitfähigkeit und Grenzflächenpolarisation am Öl-Papier-Dielektrikum, VDE Fachtagung Grenzflächen in elektrischen Isoliersystemen, Hanau, 08-09. März 2005

[58] Wedler, G.: Lehrbuch der physikalischen Chemie, 5. Auflage, WILEY-VCH Verlag, Weinheim, 2004

- [59] Müller, A.: *Entwicklung und Aufbau des Ölsensorsystems OilQSens zur kontinuierlichen Messung der elektrischen Leitfähigkeit, der Dielektrizität und der Temperatur von Ölen*, Diplomarbeit, Fachhochschule Südwestfalen, 24.08.2007
- [60] *Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (Trinkwasserverordnung - TrinkwV 2001)*, Bundesgesetzblatt I 2001, 970 Teil I: Allgemeine Anforderungen an Wasser für den menschlichen Gebrauch, 2001
- [61] Kuchling, H.: *Taschenbuch der Physik*, VEB Fachverlag, Leipzig, 1986
- [62] Wagner, O., Pischel, P.: *Entwicklung und praktische Realisierung eines Ölverschmutzungs- und Verschleißsensorsystems mit adaptiver Temperaturkompensation, Messdatenübertragung über das Internet und webbasiertem Monitoring*, Diplomarbeit Fachhochschule Südwestfalen, 10.03.2008
- [63] Kuipers, U., Mauntz, M.: *Ölsensorsystem - Sensorsystem zur Messung von Komponenten der komplexen Impedanz elektrisch gering leitender und nichtleitender Fluide, dessen Realisierung und Anwendung*, Patentanmeldung Nr. 10 2008 047 366.9, Deutsches Patentamt, München, 2008
- [64] Kuipers, U., Mauntz, M.: *Verfahren, Schaltungsanordnung, Sensor zur Messung physikalischer Größen in Fluiden sowie deren Verwendung*, Patentanmeldung Nr. 10 2008 047 366.9, europäische Patentanmeldung, Europäisches Patentamt, München, 2008
- [65] Norkus, V.: *Praktikum Sensorik*, Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik, Institut für Festkörperelektronik, Technische Universität, Dresden, 2007
- [66] DIN EN 60751: *Industrielle Platin-Widerstandsthermometer und Platin-Messwiderstände*, Juli 1996
- [67] EMV Prüfbericht, SCHWILLE – ELEKTRONIK, Kirchheim, 2010
- [68] Kuipers, U., Mauntz, M., Schmitt, G.: *Entwicklung eines Sensorsystems zur kontinuierlichen online-Messung von Verschmutzung, Verschleiß und Wassergehalt von Getriebe-, Hydraulik und Motorölen*, Abschlussbericht zum Pro Inno II Projekt, Förderkennzeichen: KF0451601 WM7, BMBF - Bundesministerium für Bildung und Forschung über den Projektträger AiF – Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V., Köln, 2010
- [69] DPG-300 Dew Point Generator, *Measuring & Sensing Technologies General Eastern Instruments*, Wilmington, MA, USA, 2006
- [70] *Bedienungsanleitung TMA 204*, cmc Instruments GmbH, Eschborn, 2008
- [71] Hygro M4/E4 Dew Point Monitor *Operator's Manual*, *Measuring & Sensing Technologies General Eastern Instruments*, Wilmington, MA, USA, 1997

- [72] Sauer, B.: *Versuchsanleitung Prüfstand VarioGear, Lehrstuhl für Maschinenelemente und Getriebetechnik, Universität Kaiserslautern, 2008*
- [73] Göhler, O.-C., Schmidt, A.: *Einfluss der Alterung auf das tribologische Verhalten umweltverträglicher Ester, O + P : Zeitschrift für Fluidtechnik., Vereinigte Fachverlage, Mainz, 2004*
- [74] Krieger, H.: *Alterung von Schmierstoffen im Zahnradprüfstand und in Praxisgetrieben, O+ P : Zeitschrift für Fluidtechnik., Dissertation, Technische Universität München, 2004*
- [75] Heßler, T.: *Bewertung der Produkte NanoVit, TÜV Thüringen, Anlagentechnik GmbH & Co.KG, Arnstadt, Februar 2007*
- [76] DIN 51524-2: *Druckflüssigkeiten - Hydrauliköle - Teil 2: Hydrauliköle HLP; Mindestanforderungen, April 2006*
- [77] DIN EN ISO 6743-4: *Schmierstoffe, Industrieöle und verwandte Erzeugnisse (Klasse L) - Klassifizierung - Teil 4: Familie H (Hydraulische Systeme) (ISO 6743-4:1999); Deutsche Fassung EN ISO 6743-4:2001, April 2002*
- [78] DIN 51517-3: *Schmierstoffe - Schmieröle - Teil 3: Schmieröle CLP; Mindestanforderungen, Juni 2009*
- [79] Mauntz, M., Schmitt, G., Kuipers, U.: *Entwicklung eines Sensorsystems zur kontinuierlichen online-Messung von Verschmutzung, Verschleiß und Wassergehalt von Getriebe-, Hydraulik und Motorölen, Abschlussbericht zum Pro Inno II Projekt, cmc Instruments GmbH, Eschborn, 2010*
- [80] Wernecke, R.: *Industrielle Feuchtemesstechnik, WILEY-VCH Verlag, Weinheim, 2003*
- [81] Grigull, U.: *Dielektrizitätskonstante und Ionenprodukt von Wasser und Wasserdampf, Sonderdruck aus Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure für Energietechnik und Energiewirtschaft, Brennstoff-Wärme-Kraft, 35, Heft 6, München, 1983*
- [82] Gegner, J, Kuipers, U., Mauntz, M.: *Ölsensorsystem zur Echtzeit-Zustandsüberwachung von technischen Anlagen und Maschinen, tm – Technisches Messen, Nr. 77 (2010) 5, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München, 2010*
- [83] Rumizen, M.: *Special Airworthiness Information Bulletin NE-09-25, FAA Aircraft Certification Service, 12 New England Executive Park, Burlington, MA 01803, Mai 2009*
- [84] *Analysis of Jet Fuel Standard using the TruTOF® HAT TOFMS, Form No. 203-821-347, LECO Corporation, 3000 Lakeview Avenue, St. Joseph, Mi 49085, Mai 2008*
- [85] AVIA: *Sicherheitsdatenblatt gemäß 1907/2006/EG, Produkt (Handelsname): AVIA FLUID RSL 22, 32, 46, 68, AVIA Mineralöl-AG, Einsteinstraße 169, München, Januar 2008*

- [86] Gegner, J., Nierlich, W.: *Mechanical and tribochemical mechanisms of mixed friction induced surface failures of rolling bearings and modeling of competing shear and tensile stress controlled damage initiation*, International Conference FAILURES OF ROLLING BEARING BEARINGS, Bratislava 2010
- [87] Gegner, J.: *Tribological Aspects of Rolling Bearing Failures - Lubricants and Lubrication*, Chang-Hung Kuo (Ed.), ISBN: 978-953-307-371-2, InTech (2011), S. 33-94.
- [88] Gegner, J., Nierlich, W.: *Einführung der Normalspannungshypothese für Mischreibung im Wälz-Gleitkontakt*, VDI Tagung mit Fachausstellung GLEIT- UND WÄLZLAGERUNGEN, Schweinfurt, 14.-15. Mai 2011
- [89] Gegner, J., Nierlich, W.: *Operational Residual Stress Formation in Vibration-loaded Rolling Contact*. *Advances in X-ray Analysis* 52 (2008) S. 722-731.
- [90] Nierlich, W., Gegner, J., Brückner, M.: *XRD Residual Stress Analysis for the Clarification of Failure Modes of Rolling Bearings*. *Härterei-Technische Mitteilungen* 62 (2007) 1, 27-31.
- [91] DIN 51396-1: *Prüfung von Schmierstoffen - Bestimmung von Abriebelementen - Teil 1: Direkte Bestimmung durch optische Emissionsspektralanalyse mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP OES)*, August 2005
- [92] DIN 51562-1: *Viskosimetrie - Messung der kinematischen Viskosität mit dem Ubbelohde-Viskosimeter - Teil 1: Bauform und Durchführung der Messung*, Januar 1999
- [93] DIN ISO 2909: *Mineralölerzeugnisse - Berechnung des Viskositätsindex aus der kinematischen Viskosität*, August 2004
- [94] DIN 51 558, Teil 1: *Bestimmung der Neutralisationszahl*, Juli 1979
- [95] Gegner, J., Nierlich W.: *Mechanical and Tribochemical Mechanisms of Mixed Friction Induced Surface Failures of Rolling Bearings and Modeling of Competing Shear and Tensile Stress Controlled Damage Initiation*. *T+S Tribologie und Schmierungstechnik* 58 (2011) S. 10-21
- [96] MLA 900 Betriebsanleitung V2.0 8011380, MBA Instruments GmbH, Quickborn, Juni 2010
- [97] DIN 51 412-T02-79: *Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit – Teil 2: Feldverfahren* Ausgabe 2006-10
- [98] MLA 900 Datenblatt 8 009 763/11-2003 GBK/GBK, MAIHAK AG Analysen- und Prozessmesstechnik, Hamburg, Dezember 2003
- [99] *Datensammlung „Referenzöle“*, Heft 660 der FVA, Hamburg, November 2003

- [100] Bruggeman, D. A. G.: *Berechnung verschiedener physikalischer Konstanten von heterogenen Substanzen 1. Dielektrizitätskonstanten und Leitfähigkeiten der Mischkörper aus isotropen Substanzen*, *Annalen der Physik*, 5 Folge, Band 24, 1935
- [101] Haas, A.: *Bewertung von elektrischen Isolierstoffen für Bordnetze von Fahrzeugen mit elektrifiziertem Antrieb*, genehmigten Dissertation, TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN, Lehrstuhl für Hochspannungs- und Anlagentechnik, München, Juni 2010
- [102] Maxwell-Garnett, J.: *Colours in Metal Glasses and in Metallic Films*, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, Vol. 203, 1904
- [103] Maxwell-Garnett, J.: *Colours in Metal Glasses and in Metallic Films II*, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, Vol. 205, 1906
- [104] Levy, O., Stroud, D.: *Maxwell Garnett theory for mixtures of anisotropic inclusions: Application to conducting polymers*, *Physical Review B*, Volume 56, Number 13, college Park, Maryland USA, 1997
- [105] Jackson, J.: *Klassische Elektrodynamik*, de Gruyter, Berlin, 2006
- [106] Kornysushin, Y.: *Clausius-Mossotti approximation in the theory of polar materials*, *Ceramics International* 29, 333, Elsevier Ltd and Techna S.r.l., Oxford, UK, 2003
- [107] Lichteneker, K., Rother, K.: *Die Herleitung der logarithmischen Mischungsgesetzes aus allgemeinen Prinzipien der stationären Strömung*, *Physikalische Zeitschrift*, 1931, 32, S. 255 – 260
- [108] Ahmed, Nehal S., Nassar, Amal M.: *Lubricating Oil Additives - Lubricants and Lubrication*, Chang-Hung Kuo (Ed.), ISBN: 978-953-307-371-2, InTech (2011), S. 249-268
- [109] Bhumiwat, S. and others: *Performance of Oil and Paper in Transformers Based on IEC61620 and Dielectric Response Techniques*, CIGRE SC D1 Colloquium, Budapest, Hungary, September 20–25, 2009
- [110] Hirasaki, George J., and other: *Fuels Separation of Produced Emulsions from Surfactant Enhanced Oil Recovery Processes*, *Energy and Fuels*, DOI:10.1021/ef101087u, United States, Revised Manuscript Received October 20, 2010

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Haring Bolivar für seine hervorragende Betreuung und seine wertvollen Ratschläge, die das Gelingen der Arbeit erst ermöglichten. Großer Dank gebührt Herrn Prof. Dr. rer. nat. habil. Jürgen Gegner und Herrn Prof. Dr.-Ing. Ulrich Kuipers für die viele Anregungen für meine wissenschaftliche Arbeit und Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernd Sauer von der Technischen Universität Kaiserslautern für die zur Verfügungsstellung des Getriebeprüfstandes.

Eschborn, im Februar 2013



Manfred R. Mauntz studierte an der Universität Kaiserslautern Elektrotechnik mit Abschluss Diplom. Danach war er in der Industrie tätig. 1994 gründete er das Unternehmen cmc Instruments GmbH in Eschborn. Als Geschäftsführer und Entwicklungsleiter ist er für das Entwickeln von Geräten und Komponenten bis zur Serienreife und Markteinführung verantwortlich. 2013 hat er seine Promotion mit seiner Dissertation zum Thema „Entwicklung eines Sensorsystems zur kontinuierlichen Ölqualitätsmessung und Verschleißidentifikation in Getrieben und anderen Aggregaten“ abgeschlossen.

Es wurde ein Ölsensorsystem zur kontinuierlichen Online-Messung der von der Ölqualität abhängigen Parametern der elektrischen Leitfähigkeit, sowie der Dielektrizitätszahl von Ölen entwickelt. Mit dem Sensorsystem und dem grundsätzlichen Ansatz einer Messung der Veränderung des Systems Öl-Maschine werden bereits ab Inbetriebnahme kontinuierliche Analysen und Bewertungen von Maschinenverschleiß und Ölalterung ermöglicht. Warnungen vor kritischen Betriebszuständen, wie zu hohem Abrieb oder Schmierstoffversauerung und auch die treffsichere Indikation von vorbeugenden Wartungsmaßnahmen werden angezeigt. Beim Abrollen der Wälzkörper auf Lagerlaufbahnen können unter bestimmten, oft nur kurzzeitig herrschenden Betriebsbedingungen, etwa in Windgetrieben, hohe, durch lokale Reibung hervorgerufene, Zugspannungen zur Bildung scharfkantiger, spaltbruchartiger spröder Gewaltbrüchrisse von der Oberfläche führen. Dieser Schadensmechanismus steht mit Frühausfällen in Verbindung. Durchgeführte praktische Messungen und Berechnungen nach Mischungsregeln von Maxwell-Garnett, Lichtenecker und Piekara unterstützen diese Hypothese. Vielversprechende Einsatzbereiche sind Industriegetriebe, Windenergieanlagen, Schiffsgetriebe, Turbinen und Motoren, Hydraulikanlagen und Transformatoren. Es werden Betriebszeiten vergrößert, Stillstandzeiten reduziert und eine verbesserte ökonomische und ökologische Effizienz erreicht. Wirksame Maschinenausnutzung, gezielte Schadensverhütung, Lebensdauererhöhung und Reduktion der Ausfallzeiten werden ermöglicht.