

Kapazitive Messung von Innendurchmessern

Vom Fachbereichsrat des
Fachbereichs Maschinenbau und Verfahrenstechnik
der Universität Kaiserslautern
zur Erlangung des akademischen Grades

Dr.-Ing.

genehmigte Dissertation

Vorgelegt von

Dipl.-Ing. Gunther Röder

Eingereicht am: 22. April 2009

Mündliche Prüfung am: 22. Januar 2010

Prüfungskommission:

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Peter Mitschang

Referenten: Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Haberland

Prof. Dr.-Ing. Jörg Seewig

Dekan: Prof. Dr.-Ing. Siegfried Ripperger

Abstract

In this thesis, possibilities of measuring the diameter of bore holes in electrically conducting materials by capacitive measurement methods have been investigated. Measurement electrodes on a probe, that is introduced into a bore hole, form capacitors with the bore hole wall. Their capacitance can be measured using a corresponding measurement circuit, allowing for calculation of the bore hole diameter from the capacitance.

Approaches with probes with one single and with multiple electrodes have been addressed. In practice, probes with multiple electrodes lead to problems with manufacture and accurate detection of their capacitances. Probes with a single annular electrode are easier to manufacture and to evaluate, however, they have the disadvantage, that decentration of the probe in the bore hole can cause a significant measurement error.

In order to eliminate this error, a special property of cylindrical capacitors can be utilized. The capacitance of the cylindrical capacitor exhibits a minimum value in the centered position of the probe in the bore hole. In a measurement system that has been constructed as a part of this thesis, a probe with an annular electrode has been attached to a mechanical centering mechanism which is capable to position the probe inside the bore hole. A centring algorithm has been developed, which detects the position of the probe in the bore hole solely on basis of the measured capacitance and the movements of the centering mechanism. After successful centring, a measurement of the bore hole diameter can be carried out without decentration error. Additional measurement systems for measuring the position of the probe relative to the bore hole are not required.

On basis of the calculation of the electrical field of a cylindrical capacitor, a universal calibration and diameter calculation method has been developed. It allows to calibrate the system completely with three measurements in bore holes with known diameters. With a recalibration in this manner, it is possible to use different probes in the same system without any further change. Also, drift and ageing can be eliminated by a recalibration of this type.

A measurement system built in this way and corresponding testing are accounting for good accuracy of bore hole diameters measurements with probes having a single annular capacitive measurement electrode. The calibration and calculation methods and a measurement chain consisting of a relaxation oscillator are well suited for the special requirements of this measurement type.

The measurement errors of the system have been identified by extensive theoretical considerations and calculations. The dominating error influences have been detected in order to allow for optimized design of the system.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand zum Teil im Rahmen meiner Tätigkeit als Assistent des Lehrstuhls für Feinwerktechnik an der Universität Kaiserslautern, zu einem weiteren Teil während meiner Tätigkeit als Unternehmer und schließlich zu einem dritten Teil parallel zu meiner Ausbildung zum Patentanwalt.

Besonderen Dank möchte ich meinem Doktorvater Professor Dr.-Ing. Rüdiger Haberland aussprechen, der mir diese Arbeit auch lange nach meinem Ausscheiden aus der Universität noch ermöglicht hat und mir stets mit Rat und Tat zur Seite stand. Insbesondere danke ich ihm für die vielen spannenden und erhellenden Diskussionen sowie die Vielzahl an technischen Prinzipien und Details, die ich von ihm lernen durfte.

Des weiteren möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Jörg Seewig herzlichen Dank für die Übernahme der Aufgaben des zweiten Berichterstatters aussprechen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Mitschang danke ich für die Übernahme des Vorsitzes der Promotionskommission und für die langjährige fruchtbare Zusammenarbeit.

Mein Dank gilt auch den wissenschaftlichen Hilfskräften und Studien- und Diplomarbeitern, die an dieser Arbeit mitgewirkt haben. Besonders möchte ich in diesem Zusammenhang Herrn Dipl.-Ing. Heiko Maas erwähnen. Für die vielen Gespräche, das kollegiale Miteinander und für unvergessliche Aktivitäten außerhalb der Arbeitszeiten danke ich meinen ehemaligen Kollegen am Lehrstuhl für Feinwerktechnik und von anderen Lehrstühlen, insbesondere in den Arbeitsgruppen von Prof. Wehn, Prof. Hillebrands und Prof. Tielert.

Nicht zuletzt danke ich allen, die mich moralisch unterstützt und dazu beigetragen haben, dass ich dieses Ziel trotz einiger widriger Umstände nun erreicht habe. Besonderer Dank gilt meinem Vater und meiner Lebensgefährtin Susanne.

Kurzum, was lange währt, wird endlich gut.

Gernlinden, im November 2010

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	3
1 Einleitung	1
2 Stand der Technik - Innendurchmessermessung	2
2.1 Formabweichungen.....	2
2.2 Mechanische Innendurchmessermessung.....	2
2.3 Optische Sensoren.....	3
2.4 Pneumatische Sensoren.....	3
2.5 Induktive Sensoren.....	4
2.6 Bekannte kapazitive Durchmessersensoren.....	4
2.6.1 Messkopf mit Streifenelektroden.....	4
2.6.2 Messkopf mit Kreissegmenten	4
3 Stand der Technik - Messung elektrischer Kapazitäten	6
3.1 Charakterisierung von Kapazitätsmessungen.....	6
3.1.1 Messbereich.....	6
3.1.2 Auflösung.....	6
3.1.3 Parasitäre Kapazitäten.....	6
3.1.4 Drift.....	7
3.1.5 Linearität.....	8
3.1.6 Genauigkeit.....	9
3.1.7 Reproduzierbarkeit.....	9
3.2 Messverfahren.....	9
3.3 Schutzschirmtechnik.....	10
4 Physikalische Grundlagen der kapazitiven Innendurchmesser- messung	12
4.1 Berechnung der Kapazität eines Zylinderkondensators.....	12
4.2 Berechnung der Kapazität eines konischen Zylinderkondensators	13
4.3 Berechnung der Kapazität eines exzentrischen Zylinderkondensators.....	15
4.4 Berechnung der Kapazität eines verkippten Zylinderkondensators.....	17
5 Konzepte kapazitiver Messgeräte für den Innendurchmesser	19
5.1 Grundlegende Betrachtungen.....	19
5.2 Messköpfe mit Ringflächen.....	19
5.3 Messköpfe mit Abschnitten von Ringflächen.....	21
5.4 Materialien.....	23
5.5 Positionierer.....	24
5.5.1 Grundlegende Betrachtungen.....	24
5.5.2 Führungen.....	24
5.5.3 Antrieb.....	24
5.5.4 Antrieb mit Elektromotor.....	26
5.5.5 Magnetischer Direktantrieb.....	27
5.5.6 Weg- und Kraftübersetzung	28
5.6 Konzeptauswahl für kapazitive Durchmessermesssysteme.....	28
5.6.1 Grundlegende Betrachtungen.....	28

5.6.2 Material.....	29
5.6.3 Elektrodenanordnungen	31
5.6.4 Messelektronik.....	32
5.6.5 Positionierer.....	33
5.6.6 Antrieb.....	34
5.6.7 Fazit.....	35
6 Messköpfe.....	36
6.1 Ausführungen mit Ringsegmenten als Messflächen.....	36
6.1.1 Vier Ringsegmente aus Aluminiumschicht auf Glas.....	36
6.1.2 Ringsegmente aus Messing auf Glaskeramik.....	38
6.1.3 Ringsegmente aus Aluminiumschicht auf Glas mit Guardflächen.....	40
6.2 Ausführungen mit ringförmiger Messfläche.....	42
6.2.1 Ringelektrode aus Aluminiumschicht auf Glas.....	42
6.2.2 Edelstahl geklebt.....	44
7 Ausführungen der Kapazitätsmessschaltungen und der Auswerteeinheiten.....	49
7.1 Relaxationsoszillator.....	49
7.2 Schutzschirmtechnik.....	52
7.3 Invertierschaltung.....	53
7.4 Messbereichsanpassung.....	54
7.5 Rauschen.....	55
7.6 Parasitäre Kapazitäten.....	56
7.7 Drift.....	58
7.8 Linearität.....	59
7.9 Wahl des Auswertungsprinzips.....	59
8 Zentrierer.....	61
8.1 Einleitung.....	61
8.2 Anforderungen	61
8.3 Ausführungen.....	63
8.3.1 Fräsmaschine.....	63
8.3.2 Fünf-Achsen-Positionierer.....	63
8.3.3 Handbetätigter elastischer Zentrierer.....	64
8.3.4 Elektromagnetischer elastischer Zentrierer I	64
8.3.5 Elektromagnetischer elastischer Zentrierer II.....	66
8.3.6 Kreuztisch mit Schrittmotoren	67
9 Positionsregelung.....	70
9.1 Grundlegende Betrachtungen.....	70
9.2 Dreidimensionale Fixpunkt-Aufgabe.....	70
9.3 Verfahren zur Minimumsuche.....	71
9.3.1 Zweidimensionale Fixpunktaufgabe.....	73
9.3.2 Sekantenverfahren.....	75
9.3.3 Newton-Verfahren.....	77
9.3.4 Bisektionsverfahren	77
9.3.5 Methode der schrittweisen Mittenannäherung	78
9.4 Implementierung.....	83

10 Auswertung und Kalibrierung	85
10.1 Grundlegende Betrachtungen.....	85
10.2 Festlegung der Auswertungsfunktion	86
10.3 Kalibrierung.....	87
10.3.1 Ansatz.....	87
10.3.2 Berechnung der Kalibrierwerte.....	88
10.4 Berechnung des Messergebnisses.....	90
11 Genauigkeit	91
11.1 Begriffsdefinitionen und allgemeine Zusammenhänge.....	91
11.1.1 Rauschen und Jitter.....	91
11.1.2 Drift	91
11.1.3 Auflösung und Messbereich	91
11.1.4 Statistische Messfehler.....	94
11.1.5 Systematische Messfehler.....	95
11.1.6 Genauigkeit.....	95
11.2 Messkette und deren Fehler.....	96
11.2.1 Stufen der Messkette.....	96
11.2.2 Kondensator.....	97
11.2.3 Primärwandler.....	108
11.2.4 Genauigkeit des Zählers.....	108
11.2.5 Genauigkeit der Kalibrierung und der Durchmesserberechnung	109
11.2.6 Rechengenauigkeit.....	115
11.2.7 Temperaturbedingte Fehler.....	117
12 Messergebnisse	119
12.1 Versuchsaufbau und Versuchsbedingungen.....	119
12.2 Ergebnisse.....	120
12.3 Vergleich der Ergebnisse mit der Theorie.....	121
13 Ausblick	123
14 Zusammenfassung	125
15 Literaturverzeichnis	126
16 Verzeichnis der Studien- und Diplomarbeiten	128

1 Einleitung

Die fortschreitende Entwicklung in der Technik führt heute zu zunehmend optimierten Prozessen und Produkten. Treiber dabei sind die Erhöhung von Genauigkeiten und die Miniaturisierung.

Die Möglichkeit, präzise fertigen zu können, ist jedoch im allgemeinen nicht allein ausreichend. Die Messung der erzeugten Eigenschaften während und nach dem Fertigungsprozess ist ebenfalls ein wesentlicher Bestandteil einer modernen Produktion. Mit der zunehmenden Fertigungsgenauigkeit entsteht somit auch ein Bedarf an erhöhter Messgenauigkeit. Dies erfordert es wiederum, kostengünstige, hochgenaue Messgeräte zu entwickeln bzw. die Grenzen des Messbaren weiter auszuweiten.

In vielen Produkten, Maschinen und Anlagen gibt es mechanische Komponenten, deren geometrische Abmessungen sehr genau definiert sind. Insbesondere trifft dies für Passungen zu. Eine besondere Stellung unter den Passungen nehmen die zylindrischen Passungen ein. Auf eine linear bewegliche Passung bezogen haben sie wegen ihres Kreisquerschnitts ein minimales Oberflächen-Volumenverhältnis und sind vergleichsweise einfach herzustellen. Dies prädestiniert sie für den Einsatz in Kolbentrieben z.B. in Verbrennungsmotoren oder an Hydraulik- und Pneumatikzylindern, kurz, überall, wo es auf minimale Leckage, minimale Reibung oder einfache Herstellung verschieblicher Teile ankommt. Außerdem sind die zylindrisch gepassten Teile ineinander drehbar, weshalb diese Passung schon seit der Erfindung der Achse als Lagerstelle verwendet wird. Heute findet diese Lagerungstechnik ihren Höhepunkt in hochpräzise laufenden Gaslagern, die sehr hohe Anforderungen an die Genauigkeit der Bauteile stellen. Dies bezieht sich sowohl auf die Abweichungen der Oberflächen von der Zylinderform als auch auf die mittleren Durchmesser der Welle und der Bohrung.

Bei der Herstellung solcher Passungen ist häufig die Vermessung der Geometrie der Funktionsflächen erforderlich. An der Oberfläche einer Welle oder eines Kolbens ist dies durch die gute Zugänglichkeit relativ leicht möglich. An der Innenfläche einer Bohrung oder eines Zylinders kann die Messung, insbesondere bei kleinen Bohrungen, durch die beengten Platzverhältnisse oder durch hohe Aspektverhältnisse jedoch deutlich erschwert sein. Hier setzt die grundlegende Idee dieser Arbeit an, diese Messaufgabe durch Anwendung eines berührungslosen kapazitiven Messverfahrens mit hoher Genauigkeit zu lösen.

2 Stand der Technik - Innendurchmessermessung

2.1 Formabweichungen

Die mathematische Beschreibung annähernd zylindrischer Oberflächen kann in Zylinderkoordinaten besonders einfach durchgeführt werden. Es sind dafür Parameter in axialer, Umfangs-, und radialer Richtung erforderlich. Diese stellen sich je nach Formabweichung als verschiedene Funktionen dar, z.B. kann die Koordinate in Achsrichtung bei einer konischen Bohrung durch eine Geradengleichung bestimmt und die radiale Koordinate bei einer Vielzähligkeit durch eine harmonische Funktion angenähert werden. Prinzipiell ist eine Fouriertransformation der radialen Koordinate bezüglich der Umfangsrichtung möglich, wodurch Vielzähligkeit und weitere überlagerte Abweichungen in Umfangsrichtung mit den Fourierkoeffizienten beschreibbar werden. Die Anzahl der insgesamt erforderlichen Parameter zur Beschreibung der Oberfläche ergibt sich daher aus der Kompliziertheit der Bohrungsgeometrie. So kann auch die Rauigkeit in Umfangsrichtung als Ortsrauschen bei höheren Frequenzen beschrieben werden.

Für die Bohrungsdurchmessermessung bedeuten Formabweichungen und Rauigkeit, dass für eine exakte Beschreibung der Bohrung mehr als ein Parameter erforderlich sind. In den Fällen, in denen nur der Hauptparameter Bohrungsdurchmesser gemessen wird, gehen die Abweichungen in das Messergebnis ein, bzw. es können vom Messgerätehersteller für eine spezifizierte Messgenauigkeit zulässige Abweichungen von der Zylinderform angegeben werden.

2.2 Mechanische Innendurchmessermessung

Ein Vorteil der mechanischen Innendurchmessermessung ist die Einfachheit der Messgeräte. Der zu messende Durchmesser wird im klassischen Fall vom Messgerät mechanisch übersetzt und auf einer Skala zur Anzeige gebracht. Bei manchen Messgeräten wird auch das Prinzip des Nonius zur Steigerung der Empfindlichkeit eingesetzt. Ein weiterer Vorteil ist die Möglichkeit, den Innendurchmesser an kleinen Messstellen anzutasten. Eine nahezu punktuelle Messung ist dadurch möglich. Durch mehrfache Messung können so weitergehende Informationen über die Geometrie der Bohrung gewonnen werden. Durch die mechanische Messung erhält man den Innendurchmesser an den Spitzen der Oberflächenrauigkeit. Dies ist von Vorteil, wenn Spiel- oder Übergangspassungen hergestellt werden sollen. Die Oberflächenrauigkeit muss dann nicht berücksichtigt werden.

Ein Problem der mechanischen Innendurchmessermessung stellt die Berührung des Werkstückes durch tastende Teile des Messwerkzeugs dar. Dies hat je nach Messkraft eine mehr oder weniger starke Verformung der Oberfläche und damit Messfehler zur Folge. Die Größe des Messfehlers hängt außerdem von der Steifigkeit der Bohrung ab, was bei genauen, nicht auf die Messaufgabe kalibrierten Messwerkzeugen problematisch sein kann. Es ist außerdem erforderlich, die tastenden Teile des Messwerkzeugs langsam an die Oberfläche zu führen, um keine dynamische Verstärkung

der Messkraft beim Auftreffen auf die Oberfläche zu erzeugen. Hierdurch kann eine Fehlmessung verursacht werden, wenn der Messwert sofort aufgenommen wird. Dies wiederum begrenzt die machbare Messdynamik, was auf Fertigungsstraßen kritisch sein kann. Außerdem besteht die Gefahr der Beschädigung der Oberfläche.

Beispiele für mechanische Messmittel für den Innendurchmesser sind Lehrdorne, Messschieber, Zweipunkt und Dreipunkt-Innenfeinmessgerät und Innenmikrometerschraube für erhöhte Genauigkeit, auch ,mit elektronischer Auslesung, sowie Hebeltaster und Gabeltaster für schnelle Messungen. Mit Koordinatenmessmaschinen können ebenfalls Innendurchmesser vermessen werden, wobei auch Formabweichungen bestimmt werden können. Der Aufwand ist jedoch vergleichsweise hoch.

2.3 Optische Sensoren

In der Literatur sind verschiedene Verfahren zur optischen Vermessung von Bohrungsdurchmessern bekannt geworden. Dies beschränkt sich jedoch auf sehr spezielle Anwendungen. Kommerzielle vertriebene, standardisierte Versionen speziell für die Messung von Bohrungsdurchmessern sind nicht bekannt.

Im einzelnen sind ein Gebrauchsmuster [Aut93] und eine Offenlegungsschrift [Bot94] zu nennen. In dem Gebrauchsmuster wird ein Verfahren beschrieben, für welches der Strahlengang zweier Lasertriangulationssensoren mittels eines Spiegelsystems in das Innere einer Bohrung gelenkt wird. Durch Drehen der Bohrung wird der gesamte Umfang abgetastet. Die Offenlegungsschrift beschreibt ein Verfahren, bei dem die Bohrungswand schräg angeleuchtet wird und die Reflexionen an der Bohrungswand über eine Optik auf einer CCD-Kamera abgebildet werden. Das Verfahren ist einer zweidimensionalen Triangulationsmessung ähnlich.

Weiter ist es möglich, Bohrungsdurchmesser mit Hilfe von Bildverarbeitung zu messen. Dabei können auch Formabweichungen bestimmt werden.

2.4 Pneumatische Sensoren

Schon vor 1930 wurden pneumatische Messgeräte zur Innendurchmessermessung in Frankreich verwendet. Während des zweiten Weltkrieges fanden sie in den USA große Verbreitung [Rot81]. Dabei wird ein zylinderförmiger Messkopf, der seitlich mehrere Luftaustrittsöffnungen trägt, mit Druckluft beaufschlagt und in die Bohrung eingeführt. In der Bohrung bilden die Luftaustrittsöffnungen mit der Bohrungswand einen Strömungswiderstand, dessen Größe vom Abstand des Messkopfes von der Bohrungswand abhängt. Bei der Messung wird der Druck konstant gehalten und der Volumenstrom erfasst. Damit kann eine Messgenauigkeit bis zu $0,1\mu\text{m}$ erreicht werden. Der Messbereich ist allerdings durch die relative Messgenauigkeit von etwa 10^{-3} beschränkt. Eine Kalibrierung ist nach einigen Messungen erforderlich. Dieser Typ von Innendurchmessermessgerät wird vor allem in der

Serienproduktion eingesetzt. Ein Vorteil ist hierbei, dass durch die Druckluft die Messstelle gereinigt wird, und dadurch das Messgerät auch in verschmutzter Umgebung einsetzbar ist. Ein Nachteil ist die relativ lange Ansprechzeit bis ein Messergebnis vorliegt [Lee84].

2.5 Induktive Sensoren

Bohrungsdurchmesser können auch mit dem Wirbelstrommessverfahren vermessen werden. Dazu sind ein Patent der Firma Robert Bosch GmbH [Rob89] und ein kommerziell hergestelltes Messgerät der Firma Marposs SpA bekannt.

2.6 Bekannte kapazitive Durchmessersensoren

2.6.1 Messkopf mit Streifenelektroden

In Zusammenarbeit mit der Firma Boeing wurde an der University of Washington eine Arbeit zur Erlangung des Master of Science mit dem Thema „Development of a fringing capacitive hole probe for hole geometry and surface finish measurement“ angefertigt [Lee84]. Hier wird ein kapazitives Messgerät beschrieben, das mit vier kapazitiv ausgelesenen Streifenelektroden ausgestattet ist. Dabei sind vier Kanten der Streifen in einem zylindrischen Messkopf so angeordnet, dass sie auf dem Umfang des Messkopfes liegen und mit der Bohrungswand einen Kondensator bilden. Durch die schmalen Streifenkanten ist es bei geringem Unterschied der Durchmesser von Messkopf und Bohrung möglich, auch ein Maß für die Rauigkeit der Oberfläche zu erhalten. Für eine Messung wird der Messkopf in der Bohrung rotiert. Der Messkopf kann außerdem in axialer Richtung in der Bohrung verschoben werden. Dadurch können Konizität und andere Formabweichungen in Achsrichtung bestimmt werden. Die Auflösung des Systems liegt bei einigen Mikrometern.

2.6.2 Messkopf mit Kreissegmenten

In dieser Arbeit [Lee84] wird außerdem ein kapazitives Messgerät zur Vermessung von Bohrungsform und -durchmesser erwähnt, das bei der Firma Lockheed verwendet wird. Auf einem Keramikstab sind in axialer Richtung acht leitfähige Ringe aus je vier Kreissegmenten, insgesamt also 32 Messelektroden, angeordnet. Dieser Messkopf wird in die Bohrung eingeführt und die Bohrungsgeometrie und der Durchmesser bestimmt. Eine detaillierte Beschreibung konnte jedoch nicht recherchiert werden.

In der Patentschrift [Sem94] ist ein kapazitiver Sensor zur Vermessung des Durchmessers von Kanonenrohren und insbesondere zur Messung des Verschleißes der Züge beschrieben. Der Sensor weist 8 Messflächen am Umfang auf, die zueinander beabstandet sind. Um die Züge im Rohr mit den Messflächen auf dem Sensor zu treffen, sind Messflächenbreite und -abstand auf die Züge abgestimmt und die Messergebnisse werden entsprechend der Messflächen werden entsprechend miteinander verrechnet. Der Nenndurchmesser der Rohre ist mit 25 bzw. 27 mm angegeben.

Des Weiteren wurde 2008 von dem deutschen Unternehmen Micro-Epsilon Messtechnik GmbH & Co. KG ein kapazitiver Molch zum kontinuierlichen Vermessen von Bohrungsdurchmessern vorgestellt. Dieser trägt auf einem zylindrischen Umfang mehrere kapazitiv ausgemessene Segmente, aus deren Signalen der Durchmesser berechnet wird. Der Molch kann durch lange Bohrungen geschoben werden und misst den Durchmesser kontinuierlich. Der Nenndurchmesser der Bohrungen ist mit 40mm angegeben.

3 Stand der Technik - Messung elektrischer Kapazitäten

3.1 Charakterisierung von Kapazitätsmessungen

Im Allgemeinen können Messsysteme an Hand der Größen Messbereich, Auflösung, Drift, Linearität, Genauigkeit und Reproduzierbarkeit beurteilt werden. Für Kapazitätsmessungen sind außerdem die parasitären Kapazitäten von besonderer Bedeutung.

Dabei wird generell zwischen absoluten und relativen Größen unterschieden. Absolute Größen werden in der entsprechenden Einheit angegeben. Die dimensionslosen relativen Größen erhält man, wenn die absolute Auflösung durch den nutzbaren Messbereich geteilt wird. Die absoluten Messgrößen sind für eine konkrete Messaufgabe bedeutsam, während die relativen Messgrößen zur Charakterisierung der Qualität des Messsystems und zur Auslegung benutzt werden.

Der kleinste mögliche Kapazitätswert ist 0. Negative Kapazitäten kommen bei passiven Kondensatoren nicht vor. Sie können jedoch durch geeignete elektronische Schaltungen simuliert werden [Tie71].

3.1.1 Messbereich

Der Messbereich beginnt im Allgemeinen bei Null. Jedoch kann das untere Ende des Messbereichs nicht genutzt werden, da der interessierenden Kapazität eine parasitäre Kapazität (s.u.) parallelgeschaltet ist, und den Beginn des nutzbaren Messbereiches über Null anhebt. Hierbei spricht man auch von einem Offset der Messung. Das obere Ende des Messbereichs kann durch die Kapazitätsmesselektronik oder durch den Wandler, der die Messgröße in eine Kapazität wandelt, begrenzt sein. Z. B. kann das vollständige Füllen des Wandlerkondensators oder das Erreichen einer Maximalspannung oder -frequenz in der Messelektronik das Ende des Messbereichs definieren.

3.1.2 Auflösung

Die Auflösung ist generell vom Rauschen begrenzt. Messwertänderungen gehen dabei in den stochastischen Signalschwankungen unter. Charakteristisch für das Rauschen ist jedoch, dass ein Mittelwert der verrauschten Werte gebildet werden kann und dieser im Allgemeinen als echter Messwert definiert werden kann. Dies kann genutzt werden, um die Auflösung zu verbessern. Voraussetzung dafür ist jedoch, dass die Messrate höher als die geforderte Messdynamik ist. Mit den „überzähligen“ Werten kann dann eine Mittelwertbildung durchgeführt werden. Dies kann grundsätzlich in jeder Wandlerstufe in einem Messsystem stattfinden. Auf diese Weise kann häufig eine geringe geforderte Messdynamik in höhere Genauigkeit umgesetzt werden.

3.1.3 Parasitäre Kapazitäten

Einen weiteren Einfluss auf die Auflösung haben parasitäre Kapazitäten, die parallel zur interessie-

renden Kapazität liegen und sich zu deren Wert hinzu addieren. Da der Messbereich des Messsystems dann die auch parasitären Kapazitäten beinhaltet, reduziert sich der nutzbare Messbereich. Dadurch wird die relative Auflösung schlechter. Durch geeignete Schaltungen und Elektrodenanordnungen können diese parasitären Kapazitäten weitestgehend eliminiert, jedoch nie vollständig beseitigt werden. Ein Konzept hierfür ist die Verwendung eines Referenzmesszweigs, in dem eine identische parasitäre Kapazität addiert wird [Ber73]. Ein weiteres Konzept ist die Addition negativer Kapazitäten, die mit Impedanzkonvertern erzeugt werden können. Dieser Ansatz ist jedoch von erheblichen Stabilitätsproblemen des Impedanzkonverters geplagt. Außerdem kann durch geeignete Auswahl der Schaltung, der Bauteile und des Layouts der Einfluss der parasitären Kapazitäten verringert werden. Mit Hilfe eines getriebenen Schutzschirms können parasitäre Kapazitäten zwischen dem Schirm und der Messelektrode unwirksam gemacht werden. Sie werden durch das identische Potential von Schutzschirm und Elektrode nicht geladen. Durch eine Ummantelung aller Teile der Messelektrode, die nicht zur Messung genutzt werden, mit einem Schutzschirm können parasitäre Kapazitäten weitgehend unterdrückt werden.

3.1.4 Drift

Drift ist von Bedeutung, wenn über eine längere Zeit gemessen wird. Dies ist ein langsames Auswandern des Messwertes vor allem unter dem Einfluss von Temperaturänderung (thermische Drift). Die Auflösung nach Durchführung der oben beschriebenen Mittelwertbildung wird bei sehr geringer Messdynamik von der Drift begrenzt. Im Prinzip ist die Drift eine Fortsetzung des Rauschens ins Niederfrequente.

Grundsätzlich kann zwischen Absolutmessungen und Relativmessungen unterschieden werden. Bei einer Relativmessung ist es möglich, die interessierende Größe in Bezug auf eine ähnliche Größe zu messen, die jedoch konstant ist oder sich genau entgegengesetzt zu interessierenden Größe verändert. Diese beiden Größen werden in zwei separaten Zweigen gemessen. Diese Konstellation eröffnet Kompensationsmöglichkeiten für die Drift, die unten weiter erläutert werden. Bei einer Absolutmessung kann kein zweiter Zweig aufgebaut werden, da eine ähnliche zu messende Größe nicht zur Verfügung steht. Die Kompensationsmöglichkeiten stehen deshalb nicht oder nur eingeschränkt zur Verfügung.

Die thermische Drift ist in der Erwärmung und der damit einhergehenden Änderung der Bauteilwerte begründet. Eine Möglichkeit der Abhilfe ist, an kritischen Stellen driftarme Bauteile zu verwenden. Eine weitere Möglichkeit ist die Temperierung der ganzen Schaltung oder maßgeblicher Teile davon, was allerdings erheblichen Aufwand verursachen kann. Dazu wird die Schaltung auf einen festen Wert, typisch zwischen 30 und 70°C, erwärmt und mit einem Regler auf dieser Temperatur gehalten. Bei einer Relativmessung ist es auch möglich, die thermische Drift dadurch zu eliminieren, dass ein Messzweig und ein Referenzzweig symmetrisch aufgebaut und deren Signale anschließend derart verarbeitet werden, dass sich die Drift kompensiert. Alternativ können beide Zweige einzeln gemes-

sen und die Messwerte geeignet verrechnet werden. Als Rechenoperationen werden hier vor allem die Subtraktion (Kompensation der Offsetdrift) und die Division (Kompensation der Empfindlichkeitsdrift) verwendet. Wenn einer der Zweige eine stabile Referenz darstellt, die von der Messgröße nicht verändert wird, und eine Kompensation des Drifteinflusses mit Hilfe dieser Referenz automatisch stattfindet, spricht man von einer Auto-Zero-Schaltung. Eine weitere Möglichkeit ist die Messung der Temperatur relevanter Bauteile und die rechnerische oder schaltungstechnische Kompensation des Temperatureinflusses. Nicht zuletzt kommt es in der Praxis vor, dass die Form eines Messkondensators thermisch verzerrt wird und/oder sich die Dielektrizitätskonstante thermisch verändert.

Ebenso wie die thermische Drift wirkt die Alterung von Bauteilen, mit dem Unterschied, dass sie nicht reversibel ist.

3.1.5 Linearität

Mit dem Begriff der Linearität einer Messung wird beurteilt, ob die gemessene Größe und die Ausgangsgröße der Messung einen linearen Zusammenhang haben. Mathematisch lässt sich dies durch Annäherung der Übertragungsfunktion mit Polynomen quantifizieren. Als Merkmal für die Nichtlinearität werden die Koeffizienten der Terme höherer Potenzen herangezogen. Eine andere Möglichkeit ist die Verwendung der Regressionsrechnung. Dabei dient der lineare Regressionskoeffizient als Maß für die Linearität. Wenn die Nichtlinearität bekannt ist, kann der Einfluss nach der Messung durch Rückrechnung eliminiert werden (rechnerische Kalibrierung). Eine weitere, heute häufig genutzte Form der Kalibrierung ist die Verwendung einer Eich-tabelle. Bei Kalibrierungsmessungen mit bekannten Messgrößen werden die zugehörigen Messwerte ermittelt und beides als Satz von Kalibrierwerten in der Eich-tabelle abgelegt. Bei einer Messung beim Einsatz des Messgerätes wird das dann rohe Messergebnis zur Ermittlung der interessierenden Größe zwischen den nächsten Sätzen von Kalibrierwerten interpoliert. In manchen Systemen ist eine Kalibrierung jedoch zu aufwendig, sodass hier eine schaltungstechnische Linearisierung realisiert wird.

Die Linearität bei einer kapazitiven Messung hängt wesentlich von dem Messverfahren ab, das zum Einsatz kommt. Beispielsweise ist der Zusammenhang zwischen Abstand von plattenförmigen Elektroden und der Kapazität umgekehrt proportional. Bei einer Messung, bei der dieser Effekt verwendet wird, muss die Messschaltung für eine gute Linearität zwischen Abstand und Ausgangssignal aus diesem Zusammenhang eine lineare Übertragungsfunktion erzeugen. In diesem Fall muss das Ausgangssignal aus der Messschaltung folglich ebenfalls umgekehrt proportional zur Kapazität sein. Werden die Fläche oder die Dielektrizitätskonstante verwendet, so muss die Übertragungsfunktion des Messwandlers linear sein.

Die verbleibende Nichtlinearität der Gesamtmessung entsteht bei einem System ohne Kalibrierung aus den schaltungstechnischen Unzulänglichkeiten wie Streuung von Bauteilwerten, nicht-Idealen Bauelementen mit realen Eigenschaften, wie zum Beispiel parasitären Größen, endlicher Verstär-

kung usw., sowie prinzipiellen Nichtlinearitäten im Gesamtkonzept. Bei einem Messsystem mit rechnerischer Kalibrierung tritt eine verbleibende Nichtlinearität dadurch auf, dass die Übertragungsfunktion anders berechnet wird, als sie tatsächlich ist. Der Fehler ist die Abweichung der Realität von der berechneten Größe und kann über den Messbereich schwanken. Bei einer Kalibrierung mit Eich-tabelle tritt ein Restfehler durch die Interpolation und durch Fehler bei der Aufnahme der Sätze von Kalibrierwerten auf.

3.1.6 Genauigkeit

Die Genauigkeit einer Messung ist die Summe aller auftretenden Messfehler. Diese setzen sich aus den oben angeführten Größen Auflösung, Drift und Linearität zusammen. Die parasitären Kapazitäten schränken, solange sie stabil sind, nur den Messbereich ein. Für eine gegebene Messaufgabe müssen die Fehler aus den einzelnen Quellen so weit reduziert werden, dass deren Summe die Genauigkeitsanforderungen erfüllt. Dies wird als Fehlerhaushalt bezeichnet.

3.1.7 Reproduzierbarkeit

Die Reproduzierbarkeit ist nicht für alle Messungen sinnvoll definierbar und geht über die Genauigkeit hinaus. Sie beinhaltet als zusätzlichen Fehler den Einfluss von variierenden Messbedingungen, die in der Praxis bei mehrfacher Messung vorkommen können. Dies ist beispielsweise der Einfluss der Geschicklichkeit des Ausführenden oder variierende Einflüsse aus der Messumgebung [Hof99]. Bei automatisierten Messungen kann deshalb eine Reproduzierbarkeit nicht immer definiert werden. Da die Einflüsse hier meist bekannt sind, können sie im Rahmen der normalen Berechnung der Genauigkeit verwendet werden. Bezogen auf kapazitive Messungen ist die Reproduzierbarkeit vor allem für die Messkapazitäten relevant, beispielsweise hängt bei der Messung mit kapazitiven Abstandssonden die Messgenauigkeit von der sorgfältigen Ausrichtung auf Parallelität hin ab [Har96]. Die Messschaltungen sind nicht ohne weiteres veränderbar und haben deshalb auf die Reproduzierbarkeit wenig Einfluss.

3.2 Messverfahren

Zur Messung von Kapazitäten sind verschiedene Verfahren gebräuchlich. In jedem von ihnen wird die Kapazität auf eine andere Weise in ein weiterverarbeitbares Signal verwandelt, sei es eine Spannung, ein Strom, eine Ladung oder eine Pulsdauer.

Diese Arbeit beschränkt sich jedoch auf Verfahren, bei denen der Messkondensator mit einer Elektrode auf Masse liegen kann. Lässt man diese Bedingung fallen, so ergibt sich eine Vielzahl von weiteren Möglichkeiten, die Kapazität zu messen. Die besten hieraus resultierenden Messverfahren übertreffen die mögliche Genauigkeit der hier dargestellten Alternativen erheblich. Sie sind jedoch für den hier vorliegenden Fall nicht universell anwendbar, da davon ausgegangen werden muss, dass sich eine zu vermessende Bohrung in einem Werkstück befinden kann, das man elektrisch nicht von

seiner Umgebung isolieren kann, oder das hohe parasitäre Kapazitäten zu umliegenden Potenzialen aufweist, die von entsprechenden Treibern nur schwer getrieben werden können. Für Werkstücke mit Bohrungen, für die diese Kriterien nicht zutreffen, können solche Verfahren eingesetzt werden. Die über die reine Kapazitätsmessschaltung hinausgehenden Prinzipien und Berechnungen sind mit solchen Messverfahren natürlich ebenso gültig.

Bis in die 50er Jahre wurden vor allem LC-Resonanzschwinger eingesetzt. Einen wesentlichen Fortschritt in Auflösung und Messbarkeit sehr kleiner Kapazitäten brachte der seit etwa 1960 zunehmende Einsatz der Trägerfrequenzmesstechnik mit kapazitiven Brückenschaltungen. Mit der breiten und kostengünstigen Einführung von Halbleiterbausteinen wurden etwa ab 1980 verstärkt Messschaltungen auf der Basis von Relaxationsoszillatoren entwickelt. Diese sind in ihrer Messgenauigkeit guten Trägerfrequenzmessschaltungen unterlegen, jedoch sehr viel kostengünstiger herstellbar. Sie werden deshalb in Massenanwendungen mit mittlerer Anforderung an die Genauigkeit eingesetzt. Seitdem sehr schnelle und niederohmige elektronische Analogschalter kostengünstig verfügbar sind, werden zunehmend Messschaltungen mit umgeschalteter Kapazität (switched capacitor technique) verwendet. Diese sind etwas aufwendiger als Relaxationsoszillatoren, bieten jedoch den Vorteil, die Messfrequenz auf einfache Weise verändern zu können. Dies ist zum Beispiel für Messungen, bei denen das Dielektrikum eine besondere Rolle spielt, von Bedeutung.

Es gibt außerdem hybride Schaltungen, die charakteristische Merkmale der vorgenannten Schaltungstypen vereinen und daher nicht eindeutig zuzuordnen sind, sowie weitere Verfahren, die z.B. über Phasendrehung arbeiten, die jedoch weniger Verbreitung gefunden haben.

3.3 Schutzschirmtechnik

Eine wesentliche Verbesserung in vielen praktischen Anwendungen kapazitiver Messtechnik bringt der Einsatz der Schutzschirmtechnik. Dabei wird die Messelektrode mit einer weiteren Elektrode umgeben, die auf das selbe Potential wie die Messelektrode getrieben wird. Dies hat mehrere Vorteile.

Grundsätzlich existiert zwischen der Messelektrode und dem Schirm eine Kapazität. Diese stellt im Fall herkömmlicher Schirmung mit Massepotential eine parasitäre Kapazität dar, die parallel zur Messkapazität liegt. Sie nutzt einen Teil des verfügbaren Messbereichs ohne zum Messeffekt beizutragen und verschlechtert dadurch die relative Auflösung. Bei Verwendung der Schutzschirmtechnik wird diese parasitäre Kapazität unwirksam, da sie nicht geladen wird.

Ein weiterer Vorteil ist, dass das elektrische Feld an der Messstelle durch Schirmelektroden von einem Schirmfeld umgeben werden kann. Die Schirmelektroden schützen die Messung vor Einkopplung von Störgrößen von außen.

Das Schirmfeld kann außerdem genutzt werden, um Randeffekte von Messfeld auf das für die Mes-

sung unwirksame Schirmfeld zu verlagern. Dadurch können weitgehend homogene Felder auf der Messelektrode erzeugt werden.

Meist werden die Schutz Elektroden bzw. der Schutzschirm mit einem Masseschirm umgeben, um damit das Schutzpotential keinen störenden Einflüssen auszusetzen. Die Stabilität des Schutzschirms wird so verbessert. Leitungen, die das Messsignal führen, werden bei Verwendung dieser Methode häufig als Triaxialkabel ausgeführt, wobei die Seele an die Messkapazität, der innere Schirm an das Schutzschirmpotential und der äußere Schirm an Masse angeschlossen werden.

Zur Erzeugung des Schutzschirmpotentials werden Halbleiterverstärker oder Transformatoren eingesetzt. Letztere finden vor allem in der Trägerfrequenzmesstechnik Verwendung, weil dort zur Erzeugung der Messspannung ohnehin Transformatoren verwendet werden. Auf diesen kann eine weitere Wicklung mit gleicher Windungszahl aufgebracht werden, die dieselbe Spannung liefert, die auch für die Brücke verwendet wird.

4 Physikalische Grundlagen der kapazitiven Innendurchmesser-messung

4.1 Berechnung der Kapazität eines Zylinderkondensators

Die Kapazität eines Zylinderkondensators kann mit Hilfe einer entsprechenden Verteilung des elektrostatischen Feldes berechnet werden [Wol68, Oll32]. Das Feld, das bei einem Zylinderkondensator vorliegt, wird durch zwei zylinderförmige Flächenladungen erzeugt. Bei einem zentrischen Zylinderkondensator sind die Flächenladungen zueinander konzentrisch und das Feld kann durch gerade Feldlinien und kreisförmige Äquipotenziallinien beschrieben werden. Es entspricht einem Feld um eine ideale Linienladung. Die kreisförmigen Äquipotenziallinien dieses Feldes dürfen durch identisch geformte, unendlich gut leitende Elektroden ersetzt werden, ohne dass sich der Feldverlauf ändert (Eindeutigkeitsprinzip). Damit ist ein zentrischer Zylinderkondensator beschreibbar. Das tatsächlich vorliegende Feld ist dabei auf den Bereich zwischen den entsprechenden zwei Äquipotenziallinien beschränkt.

Da die Anordnung rotationssymmetrisch und symmetrisch bezüglich der Achse ist, kann das Feld vollständig mit der radialen Koordinate r beschrieben werden. Für das Potential φ des elektrostatischen Feldes außerhalb der Linienladung gilt als Berechnungsansatz [Wol68]:

$$\Delta \varphi = 0$$

Für Zylinderkoordinaten ergibt sich mit Berücksichtigung der Unabhängigkeit von Rotations- und Achskoordinate der Laplace-Operator zu

$$\frac{\partial}{\partial R} \cdot \left(R \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial R} \right) = 0$$

Daraus lässt sich mittels zweifacher Integration und der Anwendung der 4. Maxwell'schen Gleichung die Potentialfunktion φ für Äquipotenziallinien mit dem Radius R_a zu

$$\varphi = -\frac{q}{2 \pi \epsilon_0} \cdot \ln \left(\frac{R_a}{R_i} \right)$$

bestimmen [Wol68], wobei q die Linienladung pro Längeneinheit, R_i der Radius der inneren und R_a der Radius der äußeren betrachteten Äquipotenziallinien bedeuten. Als Bezugspotential wird für die innere Äquipotenziallinie $\varphi = 0$ angenommen. Die an den Zylinderkondensator angelegte Spannung entspricht damit φ . Durch Einführen der Kondensatorlänge l und Umformen erhält man die Kapazität des Zylinderkondensators zu

$$C = \frac{2\pi\epsilon l}{\ln\left(\frac{D_a}{D_i}\right)}$$

Bemerkenswert ist dabei, dass die Kapazität nicht vom absoluten Durchmesser der Zylinder, sondern nur von deren Verhältnis abhängt. Dadurch können in dieser Formel die Durchmesser durch die Radien ersetzt werden.

4.2 Berechnung der Kapazität eines konischen Zylinderkondensators

Die Kapazität eines Kondensators, der aus einem inneren Zylinder und einem konischen Innenzylinder besteht, kann durch Zerlegung des Kondensators in infinitesimal kurze Abschnitte und anschließende Integration der Einzelkapazitäten in Achsrichtung angenähert werden. Randeffekte und Feldlinienkrümmung werden dabei vernachlässigt. Deren Berücksichtigung ist über eine Feldberechnung möglich, die jedoch durch die Komplexität der Anordnung nicht ohne weiteres analytische Lösung zulässt. Für die Auslegung des Messsystems ist eine analytische Lösung jedoch besser handhabbar, sodass die Fehler in Kauf genommen werden, zumal dies der Fehlerabschätzung dient und damit kein Messergebnis berechnet wird.

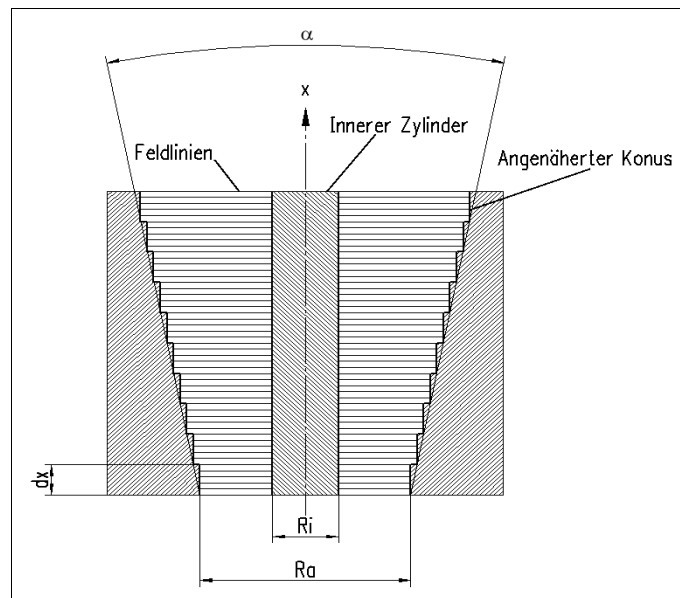


Abbildung 4.1: Annäherung des Feldes eines Kondensators aus zylindrischer Innenelektrode und konischer Außenelektrode

Es gilt näherungsweise für die Kapazität des konischen Zylinderkondensators C_k :

$$C_k = 2\pi\epsilon \cdot \int_0^l \frac{1}{\ln\left(\frac{R_{a0} + kx}{R_i}\right)} dx$$

Dabei beschreibt κ die Zunahme des Radius, womit der Kegelwinkel α zusammenhängt:

$$\alpha = 2 \cdot \tan(\kappa)$$

Das Integral kann für weitere Betrachtungen vereinfacht werden, indem statt Absolutwerten für R_a und R_i deren Verhältnis $R_a/R_i = \rho$ verwendet wird. Der Kegelwinkel wird mit $\kappa = k/R_i$ normiert. So kann die Kapazität in Abhängigkeit des Radien- oder Durchmesserverhältnisses und des Kegelwinkels mit nur zwei Variablen beschrieben werden. Damit gilt:

$$C_k = 2\pi\epsilon \cdot \int_0^l \frac{1}{\ln(\rho + \kappa x)} dx$$

Zur Einschätzung der Auswirkungen von Formabweichungen ist die Abweichung der Kapazität des konischen Zylinderkondensators von der eines idealen Zylinderkondensators von Bedeutung. Es gilt näherungsweise (Randeffekte werden vernachlässigt):

$$\Delta C = C_k - C_{zyl} = 2\pi\epsilon \cdot \left(\int_{-l/2}^{l/2} \frac{1}{\ln(\rho + \kappa x)} dx - \frac{l}{\ln(\rho)} \right)$$

In Abbildung 4.2 ist diese Abweichung der Kapazität über dem Durchmesser dargestellt. Die Abweichung bezieht sich dabei auf die Kapazität eines rein zylindrischen Kondensators mit dem mittleren Durchmesser des Konus.

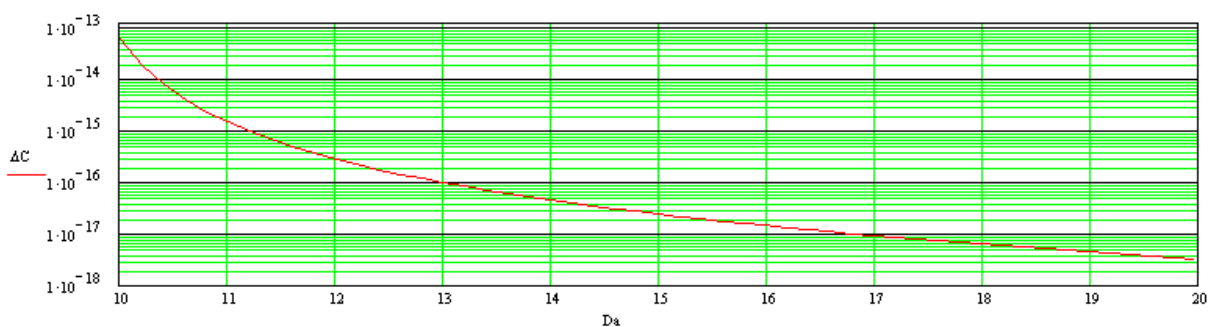


Abbildung 4.2: Abweichung der Kapazität in F eines konischen Zylinderkondensators mit einem Kegelwinkel α von 1° von einem idealen Zylinderkondensator mit mittlerem Durchmesser des konischen Zylinderkondensators für einen Messkopfdurchmesser von 9,602mm über dem angemessenen Durchmesser in mm

Die Abbildung 4.2 zeigt, dass die Kapazitätsänderung durch Konizität bei einem kleinen Durchmesserverhältnis ρ größer ist als bei einem großen, das heißt, der Einfluss von κ sinkt mit steigendem ρ .

Die Abbildung 4.3 zeigt, dass die Abweichung eines konischen Zylinderkondensators von einem idealen Zylinderkondensator mit dem Konuswinkel erwartungsgemäß zunimmt. Die Zunahme ist je-

doch mit zunehmendem Konuswinkel degressiv. Die Darstellung für drei verschiedene angemessene Durchmesser zeigt außerdem, dass der Einfluss des angemessenen Durchmessers erheblich stärker ist.

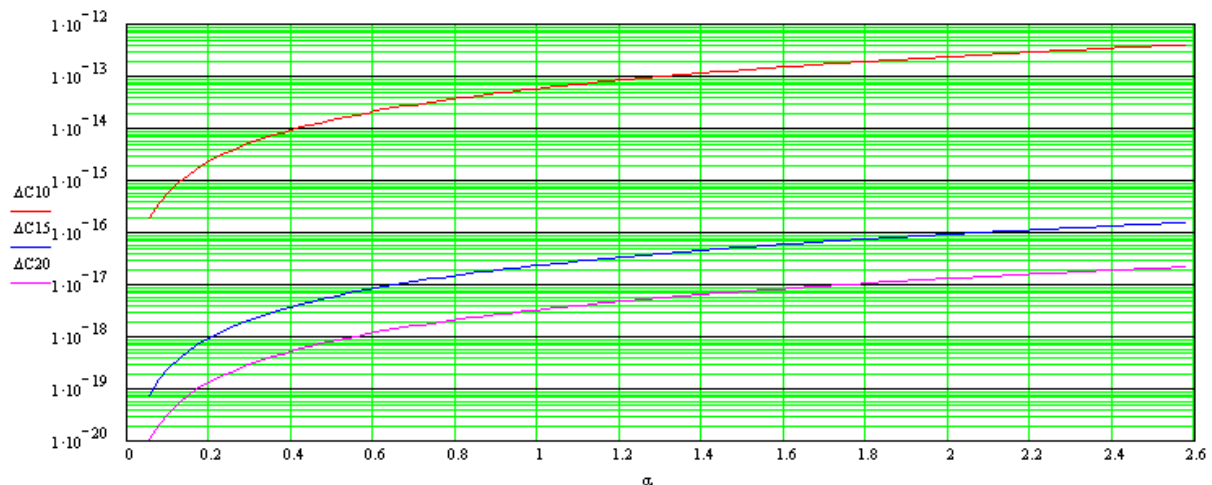


Abbildung 4.3: Abweichung der Kapazität in F eines konischen Zylinderkondensators für Bohrungsdurchmesser von 10mm ($\Delta C10$), 15mm ($\Delta C15$) und 20mm ($\Delta C20$) von einem idealen Zylinderkondensator mit mittlerem Durchmesser des konischen Zylinderkondensators und für einen Messkopfdurchmesser von 9,602mm über dem Konuswinkel in $^{\circ}$.

Diese Näherungsrechnung enthält einen Fehler, der darauf zurückzuführen ist, dass die Feldlinien nach der Feldtheorie beim Austritt aus leitfähigen Flächen senkrecht stehen müssen [Wol68]. Dies ist durch die Annäherung durch viele einzelne Zylinderkondensatoren nicht gegeben, auch wenn die Stufung infinitesimal klein ist. Der Verlauf der Feldlinien führt in der Realität dazu, dass das Feld an der offenen Seite aus dem Konus austritt und sich an der geschlossenen Seite axial nicht bis an den Rand erstreckt. Insgesamt sind dadurch die Feldlinien länger als in der rechnerischen Näherung. Da kürzere Feldlinien eine größere Kapazität bedeuten, wird durch die Näherung eine zu große Kapazität berechnet.

Ein weiterer Fehler entsteht durch eine Verdichtung der Feldlinien am kleinsten Durchmesser des Konus. Dies entspricht verstärkter Ansammlung von Ladung an der Stelle des kleinsten Abstands der Elektroden. Dies führt zu einer weiteren Vergrößerung der Kapazität im Vergleich zu der Näherungsrechnung.

4.3 Berechnung der Kapazität eines exzentrischen Zylinderkondensators

Die Kapazität eines Zylinderkondensators mit außermittigem innerem Zylinder kann aus der Feldtheorie mit Hilfe der Spiegelungsmethode berechnet werden. Diese bezieht sich in diesem Fall auf das Feld zweier punktförmiger Ladungsträger gleicher Ladung, zwischen denen sich eine gerade Äquipotenziallinie, die Spiegellinie, ausbildet. Die Äquipotenziallinien um die Ladungsträger herum sind exzentrische Kreise (Apollonische Ringe, siehe Abbildung 4.4).

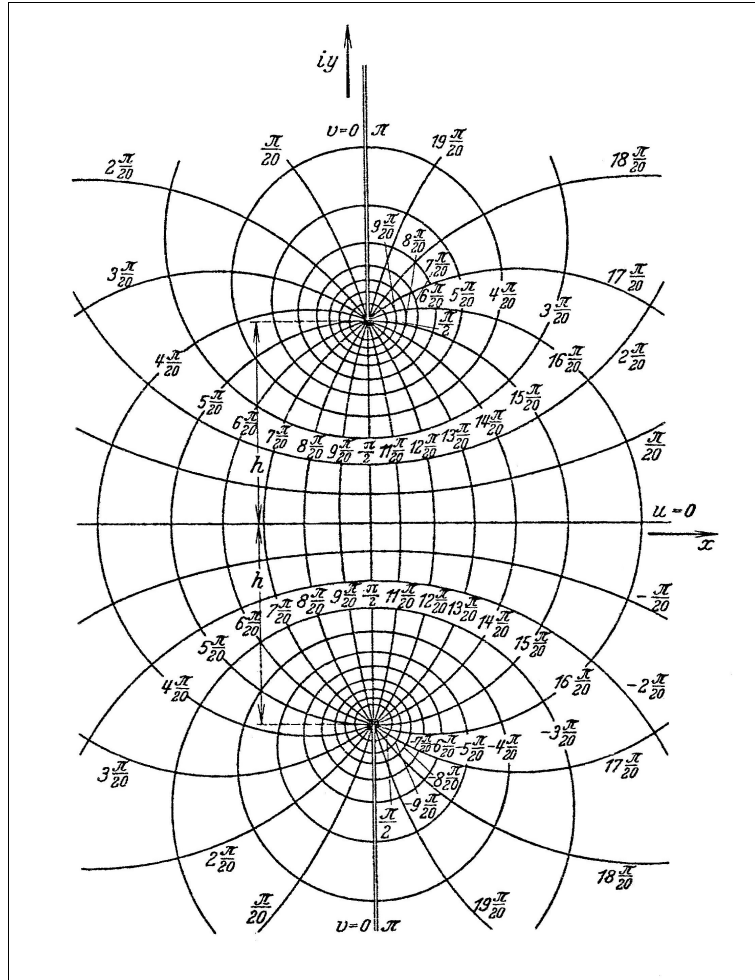


Abbildung 4.4 (aus [Oll32], dort Abbildung 131): Apollonische Ringe als Ergebnis der Spiegelung zweier Punktladungen. Die Feldlinien verlaufen von Ladung zu Ladung; die Äquipotenziallinien sind kreisförmig und geschlossen; Äquipotenziallinien und Feldlinien stehen senkrecht aufeinander

Diese Äquipotenziallinien können als Elektroden eines exzentrischen Zylinderkondensators betrachtet werden. Die Punktladungen werden dabei zu gedachten Linienladungen durch die Zeichnungsebene erweitert. Mit Hilfe der Beschreibung des Feldes kann die Kapazität zwischen den Elektroden berechnet werden. Dabei ergibt sich [Oll32]:

$$C_{ex} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot l}{\operatorname{acosh} \left(\frac{R_a^2 + R_i^2 - ex^2}{2 \cdot R_a \cdot R_i} \right)}$$

Dabei werden ideal runde und glatte Oberflächen sowie eine homogene Verteilung des elektrischen Feldes in Achsrichtung vorausgesetzt.

Die Auswirkungen der Exzentrizität sind in dem Diagramm in Abbildung 4.5 darstellen.

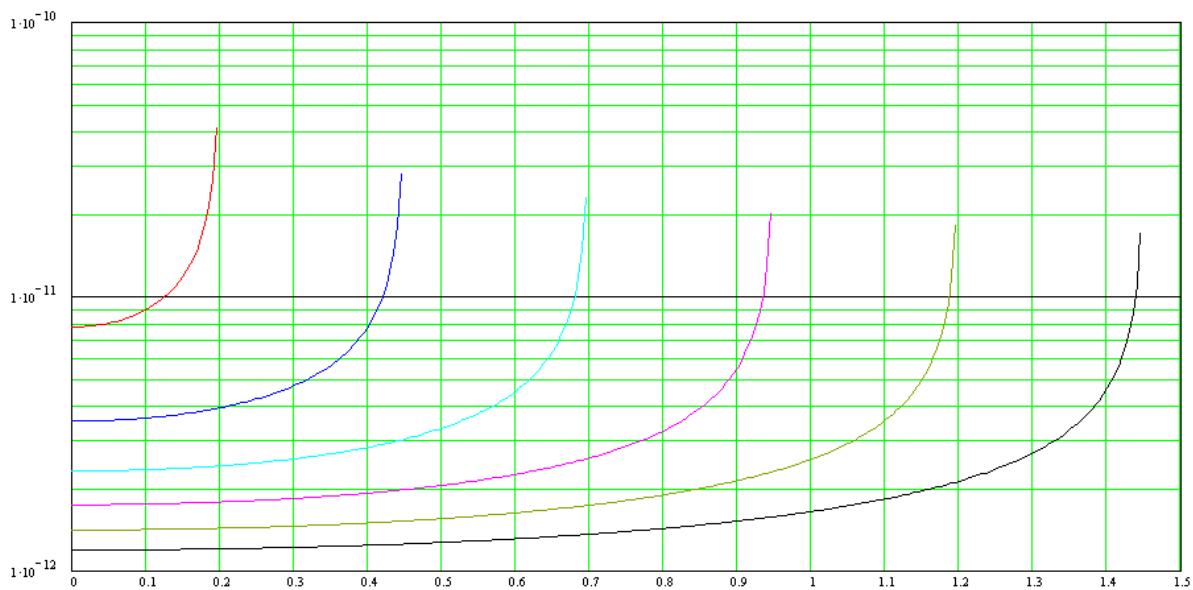


Abbildung 4.5: Auswirkungen der Exzentrizität auf die Kapazität eines exzentrischen Zylinderkondensators. Kapazität in F über Exzentrizität in mm; Durchmesser innere Elektrode 9,602mm; Elektrodenlänge 5,6mm; Durchmesser äußere Elektrode: rot 10mm, blau, 10,5mm, türkis 11mm, violett 11,5mm, oliv 12mm, schwarz 12,5mm.

4.4 Berechnung der Kapazität eines verkippten Zylinderkondensators

Die Kapazität eines verkippten Zylinderkondensators kann näherungsweise berechnet werden, indem der Kondensator in axialer Richtung in infinitesimale kurze ringförmige Elemente zerlegt wird und diese entlang einer um den Winkel α verkippten Mittelachse angeordnet werden. Er stellt sich so als ein Stapel aus exzentrischen Zylinderkondensatoren mit infinitesimal kleiner Länge und linear variierender Exzentrizität dar. Ein zentrischer Zylinderkondensator sei in der Mitte angenommen. Dann gilt: für die Kapazität des verkippten Zylinderkondensators C_v

$$C_v = \int_{-l/2}^{l/2} \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot dx}{\operatorname{acosh} \left(\frac{R_a^2 + R_i^2 - (x \cdot \tan \alpha)^2}{2 \cdot R_a \cdot R_i} \right)}$$

Die Abweichungen bezogen auf einen idealen Zylinderkondensator lassen sich mit

$$C_v = \int_{-l/2}^{l/2} \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot dx}{\operatorname{acosh} \left(\frac{R_a^2 + R_i^2 - (x \cdot \tan \alpha)^2}{2 \cdot R_a \cdot R_i} \right)} - \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot l}{\ln \left(\frac{R_a}{R_i} \right)}$$

berechnen. Grafisch ist die Abweichung in Abbildung 4.6 dargestellt.

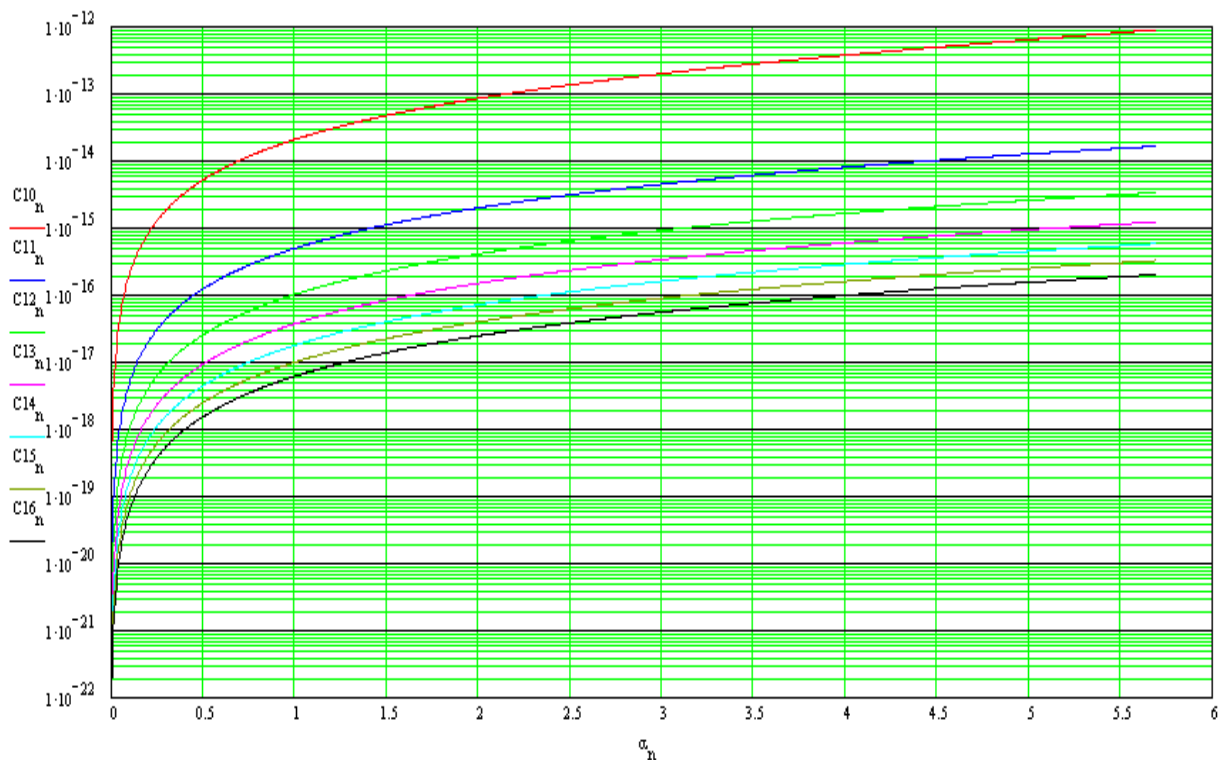


Abbildung 4.6: Kapazitätsabweichung in F über dem Verkippwinkel in $^\circ$ für Verhältnisse wie bei den Versuchen: Kondensatorhöhe 5,6 mm. Durchmesser des Innenzylinders 9,604mm; die Zahl x in den Bezeichnungen der Spuren C_x bezeichnet den Durchmesser des äußeren Zylinders in mm

Der Einfluss ist bei kleinerem Durchmesser des äußeren Zylinders geringer. Die Kapazitätzunahme ist mit der Annäherung der Zylinder zueinander progressiv. Wenn die Teile von innerem und äußerem Zylinder nahe beieinander zu liegen kommen, ist der Effekt schon bei kleineren Verkippwinkeln wirksam.

Fehler im Rechenmodell gegenüber der Realität entstehen dadurch, dass Feldlinien nicht senkrecht aus den zueinander verkipperten Elektroden austreten. Außerdem bleibt unberücksichtigt, dass die beiden Enden des verkipperten Innenzylinders in der Realität durch die Verkippung nicht mehr in einer Ebene liegen, die senkrecht zur Längsachse steht. Dies wird durch das Modell jedoch angenommen.

Wenn der Kondensator gleichzeitig eine Exzentrizität aufweist, kann dies in der Funktion der Exzentrizität mit einem additiven Term berücksichtigt und damit die Abweichung zum idealen Zylinderkondensator berechnet werden.

5 Konzepte kapazitiver Messgeräte für den Innendurchmesser

5.1 Grundlegende Betrachtungen

Die Nutzung des Kondensatoreffekts zur Messung von Bohrungsdurchmessern in leitfähigen Materialien kann durch Einführen eines Messkopfes in die Bohrung realisiert werden, wobei der Messkopf eine oder mehrere elektrisch leitfähige Flächen trägt. Diese bilden mit der Bohrungswand Kondensatoren, deren Kapazitäten gemessen und weiterverarbeitet werden. Die Teile der Kondensatoren auf dem Messkopf werden als Messflächen bezeichnet. Eine grundlegende Unterscheidung von möglichen Typen von kapazitiven Innendurchmessermessgeräten betrifft die Anzahl und die Form von kapazitiven Messflächen am Messkopf. Es sind hier viele Kombinationen aus Ringflächen und einzelnen Segmenten denkbar und teilweise auch schon realisiert worden.

Ein Grundprinzip der Messtechnik ist, dass die Messung einer gewissen Anzahl von unabhängigen Parametern grundsätzlich die gleiche Anzahl von unabhängigen Messungen erfordert. Die Parameter sind hier der mittlere Bohrungsdurchmesser, können aber auch zusätzliche Größen sein, wie zum Beispiel das Ausmaß bestimmter Formabweichungen vom idealen Zylinderkondensator. Dadurch bedingt gibt es prinzipiell eine Vielzahl von Möglichkeiten für die Messung mechanischer Parameter von Bohrungen und deren Abweichungen von einer Idealform. Die Auswahl der Gestaltung des Messkopfes hängt deshalb im Wesentlichen von der Messaufgabe ab. Die häufigste Aufgabe ist die Vermessung des Durchmessers kreisrunder Bohrungen mit kleinen Formabweichungen, auf die sich die folgenden Ausführungen beschränken.

Ein weiteres, grundlegendes Prinzip ist die Ermittlung von zusätzlichen Parametern des Kondensators aus Messkopf und Bohrung durch Verschieben des Messkopfes in der Bohrung. Beispielsweise können durch Verschieben des Messkopfes in Längsrichtung Formabweichungen entlang der Bohrung gemessen werden, wie etwa Konizität oder Bauchigkeit.

Eine wichtige Rolle spielt auch die Verwendung der Schutzschirmtechnik, bei der die Messelektrode von einer weiteren Elektrode vollständig umgeben ist, welche aktiv auf das gleiche Potential wie die Messfläche getrieben wird. Dadurch werden Randeffekte des Messfeldes auf die Schutzelektrode verlagert. Das Messfeld wird auf diese Weise homogener und einfacher berechenbar. Außerdem schützt der Schutzschirm das Messfeld vor Störungseinkopplung von außen.

5.2 Messköpfe mit Ringflächen

Die einfachste Möglichkeit zur Realisierung eines Messkopfes besteht in der Verwendung einer einzelnen ringförmigen Messfläche. Diese liefert dementsprechend nur ein Messsignal, wodurch ohne weitere Maßnahmen nur ein mittlerer Durchmesser gemessen werden kann. Formabweichungen können deshalb nicht ohne weiteres erkannt werden. Es kann deshalb sinnvoll sein, bei der Anwen-

dung solcher Sensoren für den Herstellprozess der Bohrungen zulässige Formabweichungen vorzugeben. Für die idealisierte, optimale Messung sind eine Bohrung und der Messkopf mit idealer Geometrie, ideale Zentrierung der Zylinder zueinander, sowie zwei Schutzringe in Achsrichtung erforderlich.

Sind Formabweichungen der Bohrung vorhanden, treten dadurch bei der Berechnung des mittleren Durchmessers aus der Kapazität Messfehler auf. Berechnungen mit den im Kapitel 4.2 hergeleiteten Formeln zeigen jedoch, dass diese Fehler die Messgenauigkeit im Vergleich zu anderen Faktoren nur geringfügig verschlechtern, wenn Formabweichungen angenommen werden, die die Bohrungen für ihre jeweilige Anwendung nicht unbrauchbar machen würden.

Bei Exzentrizität und Verkipfung der Messfläche in der Bohrung liegt eine Kapazitätsabweichung vor, deren Ursache mit dieser Messanordnung nicht von einem abweichenden Durchmesser unterschieden werden kann. Diese Situation ist jedoch durch definiertes Bewegen der Messfläche in der Bohrung beeinflussbar. Durch Auswertung der oben angegebenen Formeln für exzentrische und verkippte Zylinderkondensatoren zeigt sich, dass die Kapazität sowohl bei exakter Zentrierung als auch bei idealer Achsparallelität in den entsprechenden Funktionen ein Minimum aufweist. Es ist deshalb möglich, die Messfläche nur an Hand des Messergebnisses, das heißt, ohne zusätzliche Messmittel für die Position des Messkopfes in der Bohrung, mit einer verstellbaren Zentrier- bzw. Verkippeeinheit und einer entsprechenden Regelung in das Kapazitätsminimum zu bewegen. In der zentrierten und achsparallelen Stellung liegen die bestmöglichen Bedingungen vor und der Durchmesser kann aus dem Messwert ohne diese Fehlereinflüsse errechnet werden.

Rechnungen mit den Formeln für den exzentrischen und verkippten Zylinderkondensator zeigen, dass zum Erreichen einer bestimmten Messgenauigkeit die Anforderungen an Zentrierung und Achsparallelität um so höher sind, je kleiner das Verhältnis des Durchmessers der Bohrung zu dem der Messfläche ist. Die insgesamt erreichbare Messgenauigkeit hängt daher sowohl vom Verhältnis des Bohrungsdurchmessers zum Messkopfdurchmesser ab, als auch von der Zentriergenauigkeit, sowie naturgemäß von der Genauigkeit der Messelektronik. Daraus ergibt sich, dass für die bestmögliche Genauigkeit unter den Prämissen einer vorgegebenen Genauigkeit der Messelektronik und des Zentrierers, also eine bestimmte Messvorrichtung, für einen vorgegebenen zu vermessenden Bohrungsdurchmesser ein optimaler Messkopfdurchmesser existiert. Die Genauigkeit von Messungen um den für den Messkopfdurchmesser optimalen Bohrungsdurchmesser herum sinkt entweder auf Grund der abnehmenden Wirkung des Bohrungsdurchmessers auf die Kapazität oder durch den zunehmenden Fehler durch schlechtere Zentrierung.

In der Praxis zeigt sich, dass bei Zentrierung und Achsausrichtung mit einer Qualität, die mit mäßigem mechanischem Aufwand erreichbar ist, die Verkipfung einen geringen Einfluss hat, die Exzentrizität jedoch einen merklichen Fehler hervorruft. Es ist deshalb im allgemeinen ausreichend, eine

Minimierung der Kapazität durch genaues Zentrieren durchzuführen. Ausreichende Achsparallelität kann häufig durch die mechanische Ausführung der Befestigung des Messkopfs in Bezug auf die Bohrung sichergestellt werden.

Eine weitere prinzipielle Möglichkeit der Kompensation der Exzentrizität besteht darin, eine zweite ringförmige Messfläche mit geringerem Durchmesser am Messdorn anzubringen. Dadurch erhält man zwei Kondensatoren, deren Kapazitäten in einem bestimmten Verhältnis zueinander stehen. Dadurch wird eine Relativmessung ermöglicht. Rechnungen zeigen jedoch, dass die rechnerische Kompensation des Fehlers selbst stark fehleranfällig ist. Das Problem ist, dass der Unterschied der Durchmesser nicht zu klein sein darf, damit eine signifikant verschiedene zweite Messung vorhanden ist. Dies ist für die Fehleranfälligkeit der Exzentrizitätskorrekturrechnung maßgebend. In einer solchen Ausführung liegt jedoch der kleinere Durchmesser des Messkopfs weit weg vom optimalen Durchmesser, was eine schlechte Genauigkeit dieser Messung, und damit wiederum eine schlechte Genauigkeit der Exzentrizitätskompensation zur Folge hat. Außerdem ist eine analytische Lösung für die Kompensationsrechnung nicht möglich, sodass hier ein numerisches Vorgehen erforderlich ist.

5.3 Messköpfe mit Abschnitten von Ringflächen

Eine weitere Möglichkeit zur Kompensation der Exzentrizität ist die Verwendung von geteilten Ringflächen, wobei die Kapazität der einzelnen Segmente einzeln gemessen wird. Auf diese Weise erhält man mehrere unabhängige Messsignale. Beim Messen mit einem einzelnen Segment liegt an diesem ein Wechselfeld an. Anders als bei einer geschlossenen Ringfläche bildet sich jedoch kein annähernd homogenes Feld zur Bohrungswand hin aus. Dies liegt unter anderem daran, dass das Innere des Messkopfes nicht feldfrei bleibt.

Je nach Ausführung des Messkopfes gibt es außerdem weitere leitfähige Teile, die das elektrische Feld beeinflussen und weiter verformen. Dazu zählen auch die anderen Segmente, die neben dem aktuell messenden Feld liegen. Der Bohrungsdurchmesser ist daher aus einer solchen Messung nur schwer zu bestimmen. Eine Möglichkeit, diese Problematik zu umgehen, besteht darin, alle Segmente gleichzeitig mit einem identischen Wechselfeld zu beaufschlagen, sodass sich näherungsweise wieder eine Ringfläche ergibt. Dadurch werden die Felder vor den Segmenten homogen und mit der Theorie für den Zylinderkondensator gut berechenbar, wodurch eine Messung ermöglicht wird. Eine gleichzeitige Messung mit allen Segmenten ist jedoch nur mit Trägerfrequenzmesstechnik und Switched-Capacitor-Verfahren möglich, da sich bei den anderen Verfahren die Messfrequenzen verastern, was zu Sprüngen in der Kennlinie der Messung führt. Für andere Messverfahren bietet sich jedoch die Möglichkeit, die anderen Segmente aktiv auf das Potential der Messfläche zu treiben, während sie nicht für eine Messung aktiv sind. Problematisch hierbei ist jedoch, dass die derzeit kommerziell erhältlichen elektronischen Analogschalterbausteine keine ausreichende Qualität bieten, um eine hochempfindliche kapazitive Messstelle mit ausreichender Qualität umzuschalten. Eine

weitere Alternative ist, die Segmente in Richtung des inneren des Messkopf mit einem Schutzschirm zu hinterlegen, wodurch das Feld im inneren des Messkopfes für die Messung unwirksam wird. Es ist jedoch aufwendig, eine solche Anordnung herzustellen.

Die Bestimmung des Bohrungsdurchmessers aus n einzelnen Messergebnissen stellt sich als Lösung eines n -dimensionalen Gleichungssystems dar. Die Parameter darin sind der Bohrungsdurchmesser, die Position des Zentrums des Messkopfes in der Bohrung bzgl. des Zentrums der Bohrung in radialer Richtung und die Winkelstellung des Messkopfes bezüglich der Stelle, an der sich Messkopf und Bohrung am nächsten sind. Folglich sind prinzipiell mindestens drei Segmente erforderlich. Falls jedoch eine mechanische Optimierung der Position des Messkopfes der Bohrung erreicht werden soll, ist ein vierter Parameter erforderlich, da damit die Position des Messkopfes bezüglich der Bohrung in zwei Koordinatenrichtungen und somit eindeutig festgelegt wird. Ohne diese eindeutige Positionsbestimmung ist es einem nachgeschalteten Positionsoptimierungsalgorithmus nicht ohne weiteres möglich, eine Richtung zu bestimmen, in die der Messkopf verfahren werden soll. In diesem Fall sind somit mindestens vier Segmente erforderlich.

Das zugehörige n -dimensionale Gleichungssystem ist nichtlinear und analytisch nicht lösbar. Es bleiben deshalb die Möglichkeiten, es numerisch oder mittels Kalibriertabellen zu lösen. Eine numerische Lösung ist jedoch auch mit modernen Mikroprozessoren oder DSPs vergleichsweise zeitaufwendig, was die Messdynamik merklich verschlechtert. Die Erstellung von Kalibriertabellen ist sehr umfangreich und erfordert viele genau vermessene Kalibrierbohrungen, sowie einen geeigneten Interpolationsalgorithmus. Für jeden Messkopf muss außerdem eine eigene Kalibriertabelle erstellt werden.

Eine weitere Möglichkeit, eine Bohrung kapazitiv zu vermessen, besteht darin, ein einzelnes messendes Ringsegment auf einem Messkopf in der Bohrung auf einem Kreis um einem Mittelpunkt zu drehen, der mit dem Bohrungsmittelpunkt nicht zusammenfallen muss. Man bekommt dann über den Drehwinkel ein Abstandssignal, das man anschließend zur Geometrie der Bohrung zusammensetzen kann. Ein Vorteil ist, dass so auch Formabweichungen wie Unrundheit oder Vielzähligkeiten erfassbar sind. Nachteilig ist jedoch, dass eine relativ große Fläche benötigt wird, um ausreichende Messkapazität zu bekommen. Dies führt insbesondere bei kleineren Bohrungen dazu, dass ein relativ großer Winkelbereich des Umfangs als Messfläche dienen muss. Dadurch werden kurzwelligere Formabweichungen nicht mehr messbar. Ein weiterer Nachteil ist, dass die Führungsabweichung des Messkopfs präziser als die Messgenauigkeit sein muss, was bei genaueren Messungen, insbesondere in tieferen Bohrungen, aufwendig ist. Nicht zuletzt muss das einzelne Segment vollständig von einem Schutzschirm umgeben werden, das heißt, auch in Richtung der Mittelachse des Messkopfes, was bei kleinen Messköpfen zu Herstellungsschwierigkeiten führen kann.

5.4 Materialien

Da die Messung auf dem elektrischen Feld beruht, müssen die Messflächen am Messkopf und die Bohrungswand als Potentialflächen wirken können, d.h., ausreichend leitfähig sein. Eine Grenze besteht darin, dass die Leitfähigkeit der Flächen mit der flächenbezogenen Kapazität eine Zeitkonstante bildet, die die Ausbreitung des Messfeldes nicht störend behindern darf. Geringfügige Änderungen der Leitfähigkeit unterhalb dieser Grenze haben daher auch keine störende Auswirkung auf die Messung. Die Messflächen am Messkopf können daher aus einem Metall, leitfähigem Kunststoff, leitfähiger Keramik oder aus einer leitfähigen Schicht auf einem nichtleitenden Grundkörper bestehen. Die zu vermessenden Bohrungen können ebenfalls in Metall eingebracht sein, aber beispielsweise auch in leitfähigem Kunststoff, leitfähigem Gummi, leitfähige Keramik oder in leitfähig beschichtetes Nichtmetall.

Eine Besonderheit der kapazitiven Durchmesser messung mit einer zentrierten ringförmigen Messfläche – unabhängig davon, ob sie aus Segmenten zusammengesetzt oder ein durchgehender Ring ist – ist, dass die Kapazität der Anordnung aus Messfläche und Bohrungswand nur vom Verhältnis der beiden Durchmesser abhängt, und nicht von deren absoluten Durchmessern. Dies ergibt sich aus der Formel für die Kapazität eines Zylinderkondensators, die in Kapitel 4.3.1 hergeleitet wird. Dies bedeutet auch, dass das Messergebnis bei gleichen Materialien von Messkopf und Bohrung von deren Temperatur unabhängig ist (Herleitung siehe Kapitel 4.3.1), obwohl beide einer Temperaturdehnung unterliegen. Dies gilt für gleiche Temperaturen von Messkopf und Bohrung. Dabei ist jedoch zu beachten, dass der temperaturunabhängig gemessene Durchmesser als Absolutwert nur bei einer bestimmten Temperatur gültig ist. Diese Temperatur ist diejenige, bei der die Kalibrierung des Messsystems durchgeführt wurde. Der tatsächliche absolute Durchmesser kann mit Hilfe von Temperaturmessung und dem entsprechenden Temperaturdehnungskoeffizienten berechnet werden. Für unterschiedliche Materialien von Messkopf und Bohrung ist das Messergebnis nicht von der Temperatur unabhängig. Es kann jedoch in den tatsächlichen absoluten Bohrungsdurchmesser umgerechnet werden, wenn die Temperatur bei der Messung und die Kalibrierung sowie die relevanten Temperaturdehnungskoeffizienten bekannt sind.

Da diese Rückrechnung mit unterschiedlichen Temperaturdehnungskoeffizienten stärker fehlerbehaftet ist, kann es bei sehr genauen Messungen vorteilhaft sein, Messkopf und Bohrung aus demselben Material zu fertigen. Optimal ist es jedoch, die Temperaturen bei der Kalibrierung und der Messung mit ausreichender Genauigkeit gleich zu halten. Dadurch wird der gemessene absolute Durchmesser von den Materialien unabhängig. Eine weitere Optimierungsmöglichkeit ist, den Messkopf aus einem Material mit sehr geringen Temperaturdehnungskoeffizienten herzustellen, zum Beispiel Quarzglas, Glaskeramik oder der Eisen-Nickel-Legierung Invar (FeNi36). In diesem Fall wird unter allen Temperaturbedingungen der tatsächliche absolute Durchmesser gemessen.

5.5 Positionierer

5.5.1 Grundlegende Betrachtungen

Für eine Elektrodenanordnung mit einer Ringelektrode als Messelektrode ist ein Positionierer für die relative Position zwischen Messkopf und Bohrung erforderlich.

Ein Positionierer muss als wesentliche Funktionen „Führen“ und „Verstellen“ erfüllen. Außerdem muss er die Funktionen „Herstellen einer mechanischen Verbindung zwischen Messkopf und Bohrung“ und „Sicherstellen einer ausreichenden Fluchtung der Mittelachse von Messkopf und Bohrung“ übernehmen. Letzteres lässt sich in diesem Fall durch eine winkelstabile Führung, saubere Anlageflächen und genaue Bearbeitung der Teile ausreichend genau erreichen.

Der Positionierer muss in zwei Achsen arbeiten und typischerweise innerhalb einer Fläche von etwa $250 \times 250 \mu\text{m}$ positionieren können. Dies entspricht der mit mäßigem mechanischem Aufwand erreichbaren Vorpositionierung von Messkopf und Bohrung zueinander. Die zu erreichende Position ist nicht absolut (siehe Kapitel 8), sondern wird im Verlauf der Messung relativ zur Anfangsposition ermittelt. Für den Positionierer ist deshalb das kleinstmögliche Verstellinkrement relevant. Die erreichbare Messgenauigkeit hängt unter anderem von der möglichen Positionierungsgenauigkeit ab. Typische Werte für das kleinstmögliche Verstellinkrement für den Fall, dass die Genauigkeit der Positionierung keinen merklichen Einfluss mehr auf die Messung hat, liegen zwischen $0,1$ und $1 \mu\text{m}$.

5.5.2 Führungen

Für die Führung kommen vornehmlich zwei Prinzipien in Frage: Wälzführung und Federgelenkführung. Beide Prinzipien wurden im Rahmen dieser Arbeit erprobt (siehe Kapitel 7). Statische Gleitführungen erscheinen wegen des zu erwartenden Stick-Slip-Effekts als ungeeignet. Das Prinzip der Schneidenlagerung ist für diesen Fall konstruktiv schwierig umzusetzen.

Um eine Positionierung in zwei Richtungen zu ermöglichen, können zwei lineare Achsen gestapelt werden. Federführungen können jedoch auch so ausgeführt werden, dass mit einer Stufe von Federführungen in zwei Richtungen positioniert werden kann. Diese Lösung birgt jedoch die Gefahr der Kreuzkopplung zwischen den beiden Achsen. Konkret bedeutet dies, dass ein Aktor für eine Richtung bei seiner Bewegung eine Querbewegung an dem Aktor für die andere Richtung verursacht. Es muss konstruktiv berücksichtigt werden, dass auf diese Weise keine Kreuzkopplung verursacht wird.

5.5.3 Antrieb

Die Funktion „Antrieb“ bzw. „Verstellung“ kann durch eine Vielzahl von verschiedenen Prinzipien realisiert werden. Im Folgenden werden einige physikalisch verschiedene Aktorprinzipien bezüglich ihrer Vor- und Nachteile für diese Aufgabestellung kurz beleuchtet.

- Pneumatik. Dieses Prinzip ermöglicht einen schnellen, starken Antrieb. Nachteile sind allerdings die damit erforderliche Druckluftversorgung, aufwendige, elektrisch steuerbare Ventile und die relativ geringe Steifigkeit der Aktoren, die die Resonanzfrequenz des Zentrierers herabsetzt.
- Hydraulik. Hierdurch wird vom Aktor das beste Verhältnis von Masse zu Antriebskraft realisiert, was in einer schnellen Positionierung mit hoher Nutzlast resultiert. Der Antrieb ist außerdem vergleichsweise sehr steif. Allerdings werden hier ebenfalls aufwendige Ventile und ein Druckerzeuger mit der erforderlichen Aufbereitung des Mediums (Filtern, Gas abscheiden) benötigt. Durch die Betriebsflüssigkeit entsteht ein Risiko wegen möglicher Leckage.
- Elektrostatik. Die Kräfte sind bei einfach handzuhabenden Spannungen und Elektrodenflächen zu klein für die geforderte Nutzlast.
- Piezoelektrizität. Die Wege sind durch die direkte Dehnung von keramischem Material sehr begrenzt. Um größere Wege zu erreichen, sind Getriebe erforderlich. Ein Vorteil ist die relativ hohe Steifigkeit, die durch die erforderliche Übersetzung jedoch teilweise wieder verloren geht. Das Piezomaterial ist relativ teuer. Je nach Bauart sind hohe Spannungen zur Ansteuerung erforderlich.
- Elektrochemischer Antrieb. Durch Elektrolyse bzw. Flüssigkeitssynthese wird der Druck in einem Behälter variiert und dadurch eine Längenänderung hervorgerufen. Das Prinzip hat eine Dynamik im Sekunden- bis Minutenbereich, die für diese Anwendung nicht ausreicht.
- Thermische Aktoren. Durch Aufheizen und Abkühlen von Bimetallen oder Formgedächtnislegierungen können Bewegungen realisiert werden. Auch hier ist die Dynamik insbesondere beim Abkühlen kaum zu erreichen. Darüber hinaus sind diese Aktion mit Hysterese behaftet. Die Lebensdauer von Formgedächtnislegierungen ist außerdem begrenzt.
- Handverstellung. Diese ist nur für Systeme sinnvoll, die nicht vollautomatisch arbeiten; ein Beispiel ist eine Handmessgerät zur Verwendung auf einer handbetriebenen Drehmaschine. Als Prinzipien kommen hier Stellhebel und Stellschrauben in Betracht, die die vom Bediener eingestellte Position aufrechterhalten.
- Magnetismus. Hierdurch sind ausreichende Kräfte durch einfache elektrische Ansteuerung erzeugbar. Die Steifigkeit ist mäßig, die Dynamik jedoch gut. Das Antriebsprinzip ist rotatorisch als Elektromotor in fast beliebiger Ausgestaltung und kann auch linear als Magnetkreis realisiert werden. Insbesondere bei Elektromotoren wird die Steifigkeit durch hohe mögliche Übersetzungen gegenüber dem direkten Magneteffekt wesentlich erhöht. Beim magnetischen Prinzip überwiegen die Vorteile, so dass dieses als das geeignetste ausgewählt wird. Im Folgenden wird differenzierter auf mögliche Detaillösungen eingegangen.

5.5.4 Antrieb mit Elektromotor

Eine einfache Möglichkeit, einen Drehbewegung in eine lineare Bewegung umzusetzen, ist die Verwendung einer Taumelscheibe auf dem Antriebsmotor, auf der am Rande linearen Bewegung „abgenommen“ wird. Dabei bewegt sich das in Drehrichtung feststehende angetriebene Teil durch die Drehbewegung. Es führt eine lineare Bewegung durch, wenn es linear geführt ist. Vorteile sind ein relativ einfacher Aufbau und eine hohe Steifigkeit. Nachteilig sind die Einbringung von Querkräften in das angetriebene Teil, was unter Umständen zu Kreuzkopplung führen kann (s.o), sowie ein Bewegungsbereich, der auf auf eine halbe Motorumdrehung begrenzt ist. Dadurch muss die Drehbewegung sehr fein unterteilt werden, um eine feine Auflösung bei einem großen Bewegungsbereich zu erreichen. Darüber hinaus baut die Anordnung bei größeren Bewegungsbereichen recht groß, da ein starker Motor erforderlich wird. Das zuvor gesagte gilt identisch für einen Antrieb, bei dem statt der Taumelscheibe ein Exzenter eingesetzt wird, mit der Ausnahme, dass die Abnahme der linearen Bewegung quer zur Drehachse des Antriebsmotors erfolgt.

Eine weitere Möglichkeit zur Erzeugung einer Linearbewegung mit einem Elektromotor die Verwendung einer Spindel mit Mutter. Ein sehr großer Vorteil dieses Prinzips ist, dass die Wiederholung von Umdrehungen im Vergleich zur Taumelscheibe eine kontinuierlich weiterlaufende Linearbewegung zur Folge hat. Dadurch ist es möglich, die Übersetzung der Drehbewegung in Linearbewegung durch eine geringe Steigung theoretisch beliebig klein zu machen und damit sehr kleine Bewegungsinkremente zu erreichen, während gleichzeitig ein beliebiger Bewegungsbereich durch die Länge der Spindel eingestellt werden kann. Ein weiterer Vorteil des Systems ist die sehr hohe Steifigkeit. Ein Nachteil ist die relativ große Trägheit der Spindel, die die Dynamik begrenzt.. Außerdem ist der Praxis ist die Steigung der Spindel auf wenige Zehntel Millimeter begrenzt. Dennoch erscheint dieses Prinzip als die bessere Lösung für den vorliegenden Fall.

Für den Antrieb der Lineargetriebe kommen verschiedene Typen von Elektromotoren in Betracht. Vor allem bieten sich Gleichstrom-Servomotoren mit Encoder sowie Schrittmotoren an. Gleichstrom-Servomotoren bieten eine bessere Dynamik und je nach Encoder auch eine feinere Auflösung einer Umdrehung. Nachteilig sind jedoch der hohe Aufwand für die Ansteuerung und der relativ teure Encoder. Auch die Motoren sind im Vergleich zu Schrittmotoren teurer. Schrittmotoren sind ebenfalls mit sehr feiner Auflösung einer Umdrehung erhältlich (bis zu 1000 Vollschritte pro Umdrehung). Diese Fortschritte können durch eine Mikroschrittsteuerung weiter unterteilt werden, sodass ein extrem feine Unterteilung einer Unterredung ermöglicht ist. Die Genauigkeit der Mikroschrittsteuerung ist jedoch durch die Genauigkeit der Magnetkreis innerhalb der Schrittmotoren begrenzt. Es gibt deshalb speziell für Mikroschrittbetrieb konzipierte Schrittmotoren, bei denen die Mikroschritte sehr gleichmäßige Schrittweite haben. Diese Lösung ist preislich günstiger und leistet bis auf eine geringere Dynamik das gleiche wie ein entsprechender Servoantrieb. In dieser Arbeit sind ausschließlich Schrittmotorantriebe zum Einsatz gekommen.

5.5.5 Magnetischer Direktantrieb

Magnetische Kräfte können direkt für eine lineare Verschiebung genutzt werden. Dafür können verschiedene magnetische Prinzipien eingesetzt werden.

Eine Möglichkeit ist ein Antrieb mit einer Tauchspule in einem mit Magnetfeld durchsetzten Spalt (Lautsprecherantrieb). Die Tauchspule erzeugt durch den Stromfluss durch sie eine Lorentzkraft in Achsrichtung der Spule. Um die Anordnung als Positioniereinrichtung zu nutzen, muss die Kraft durch eine Feder in einen Weg umgewandelt werden. Hysterese ist bei diesem System nur sehr gering, da sich das Magnetfeld bei der Bewegung der Spule nur minimal ändert. Die Hysterese von metallischen Federn ebenfalls sehr gering, solange sie im elastischen Bereich betrieben werden.

Eine alternativen Möglichkeit ist der Einsatz von Linearschrittmotoren. Diese arbeiten wie ein abgewickelter rotatorischer Schrittmotor. Deshalb ist auch Mikroschrittbetrieb möglich, wodurch sehr kleine Schrittweiten erreicht werden können. Auch in einer Fläche verfahrbare, zweiachsige Varianten sind bekannt und kommerziell verfügbar. Die Dynamik von Linearmotoren ist hervorragend. Der Preis dieser Systeme ist jedoch noch so hoch, dass sie als Antrieb im Rahmen dieser Arbeit nicht in Frage kamen.

Eine weitere mögliche Variante ist die Nutzung von Magnetkräften in einem Spalt in einem Magnetkreis. Dazu wird ein Magnetkreis mit einer Spule zur Erzeugung einer magnetischen Durchflutung und einem Spalt aufgebaut, wobei eines der Teile, die an den Spalt grenzen, gegen eine Feder beweglich ausgeführt ist. Durch Änderungen des Stromflusses durch die Spule kann die Kraft auf das bewegliche Teil verändert und dadurch eine Bewegung bewirkt werden. Ein besonderer Vorteil dieser Anordnung ist, dass das bewegliche Teil in einer zweiachsigen Anordnung durch die berührungslose Kraftübertragung bei Querbewegung keinen Querkräften durch Reibung ausgesetzt ist. Mit dem System kann deshalb ein relativ simpler zweiachsiger Aufbau realisiert werden. Dazu wird ein rechteckiges, bewegliches Teil auf mindestens drei Federstäben gelagert, die eine laterale Bewegung in zwei Richtungen ermöglichen. Diese Federstäbe Stellen gleichzeitig die Führung und das Fehlerelement dar. In der einfachsten Version wird der magnetische Fluss von zwei Seiten eingeleitet. Auf diese Weise kann das bewegliche Teil bei guter magnetischer Auslegung ohne Kreuzkopplung bewegt werden. Ein Nachteil ist jedoch, dass der Magnetkreis bei Richtungsumkehr einer Hysterese unterliegt. Diese schlägt sich letztlich auch in einer Hysterese der Bewegung nieder. Daher ist es unbedingt erforderlich, ein hysteresearmes Material für die Teile zu verwenden, zum Beispiel die Eisen-Nickel-Legierung $M\mu$ -Metall. Nichtsdestotrotz verbleibt auch hier eine kleine Resthysterese. Ein weiterer Nachteil ist die Gefahr, dass bei Eigenschwingungen hohe Spannungen in der Spule erzeugt werden, die die Treiberstufen zerstören können. Die Steifigkeit der Anordnung hängt wesentlich von der magnetischen Auslegung ab, da bei starken Magnetkräften auch steife Federn verwendet werden können.

Da es sich um ein statisches Positioniersystem handelt, ist es nicht möglich, das System oberhalb seiner Resonanzfrequenz zu betreiben, da für diese Bewegungen der Bezug zum Nullpunkt verloren geht. Die Dynamik ist deshalb durch die Resonanzfrequenz begrenzt, und es ist kein gangbarer Weg, die Resonanzfrequenz extrem niedrig auszuliegen.

5.5.6 Weg- und Kraftübersetzung

Bei einem rotatorischen Antrieb ist für die vorliegende Anwendung ein Rotation-Weg-Getriebe erforderlich. Oben wurden mehrere Varianten beschrieben. Für eine besonders feinfühligere Verstellung kann sinnvoll sein, zwischen dem Antrieb und dem anzutreibenden Teil ein weiteres Getriebe vorzusehen, das eine Weg-Weg-Übersetzung bewirkt. Dadurch kann der Weg, den der Antrieb direkt bereitstellt, weiter untersetzt werden. Getriebe, die den Weg direkt übersetzen sind zum Beispiel Hebel- oder Keilgetriebe. Weitere Möglichkeiten bieten die Nutzung elastischer Knickfälle, z. B. das seitliche Durchbiegen eines gespannten Stahlbandes, wodurch sich die Einspannpunkte aufeinander zubewegen, oder die Nutzung von Querdehnung. Ein Vorteil dieser Getriebe ist die vergleichsweise hohe Steifigkeit. Ein Nachteil ist, dass die Bewegungen mit Reibung verbunden sind.

Wenn eine Federführung eingesetzt wird, die gleichzeitig eine Umwandlung einer antreibenden Kraft in den Weg erlaubt, ist es möglich, der Umwandlung von Kraft in Weg eine „Kraftübersetzungsstufe“ vorzuschalten. Kraftübersetzung bedeutet dabei das Drücken mit einer weichen Feder auf die Führungsfeder. Der Vorspannweg der weichen Feder ist dadurch um das Verhältnis der Federsteifigkeiten größer, als der Weg, den das geführte Teil durch die Vorspannung zurücklegt. Dadurch können die Verstellinkremente des Antriebs, der auf die weiche Feder wirkt, erheblich untersetzt werden, wodurch eine feinfühligere Verstellung im Submikrometerbereich möglich wird. Ein großer Vorteil dieser Kraftübersetzung ist, dass sie reibungsfrei ist, da ausschließlich elastische Verformung genutzt wird. Nachteilig ist jedoch, dass die Steifigkeit und damit die Resonanzfrequenz vergleichsweise gering sind.

5.6 Konzeptauswahl für kapazitive Durchmessermeßsysteme

5.6.1 Grundlegende Betrachtungen

Für die Auswahl eines möglichst optimalen Konzeptes müssen die Anforderungen an die Durchmessermessung und an das Meßsystem berücksichtigt werden. Diese sind wiederum vom beabsichtigten Einsatzzweck abhängig. Der Einsatz dieses Meßsystems erscheint dort sinnvoll, wo es seine Vorteile gegenüber anderen Durchmessermeßsystemen ausspielen kann. Diese liegen insbesondere in der extrem hohen möglichen Auflösung des Durchmessers, der berührungslosen Messung und der Tatsache, dass der Messkopf trotz der kubischen Volumenverringering mit nur linearem Genauigkeitsverlust ins Kleine skaliert werden kann. Denkbare Anwendungsbereiche sind deshalb die Messung bei sehr hohen Genauigkeitsanforderungen, z. B. bei der Herstellung von Luftlagern, in

präzise definierten Drosselstellen in Hydraulik oder Pneumatik oder die Bohrungen von anderen hochgenauen Passungen, die Messung in Bohrungen aus weichem oder empfindlichem Material oder mit empfindlicher Oberfläche und die Messung sehr kleiner Durchmesser.

Konkret betreffen die Anforderungen folgende Bereiche:

- ◆ Messbereich, Genauigkeit, Reproduzierbarkeit
- ◆ Umgang mit Formabweichungen der Bohrung
- ◆ Einsatz als Handmessgerät, als stationäres Messgerät, in einer Fertigungsstraße
- ◆ Mechanische Robustheit, elektronische Störunempfindlichkeit
- ◆ Skalierbarkeit von Messkopf und Messelektronik

Um die Anforderungen zu erfüllen, muss eine Auswahl bezüglich folgender Aspekte getroffen werden:

- ◆ Material des Messkopfes
- ◆ Konzept für die Elektrodenanordnung auf dem Messkopf
- ◆ Typ und Funktionalität der Messelektronik
- ◆ Typ und Automatisierungsgrad des Positionierers
- ◆ Herstellbarkeit, Aufwand und Kosten

Auf Herstellbarkeit, Aufwand und Kosten wird in den folgenden Unterabschnitten jeweils eingegangen.

5.6.2 Material

Bei der Materialauswahl für den Messkopf sind folgende Aspekte relevant:

- ◆ Bearbeitbarkeit/Herstellbarkeit
- ◆ Kontaktierungsmöglichkeiten
- ◆ Temperaturdehnung
- ◆ Robustheit
- ◆ Aufwand/Kosten

Im Rahmen dieser Arbeit wurden einige Prototypen von Messköpfen hergestellt und Experimente durchgeführt (siehe Kapitel 6). In der Tabelle 5.1 sind Merkmale und Eigenschaften der untersuchten Messköpfe aufgelistet.

Merkmal	Herstellung	Kontaktierung	Eigenschaften
Elektroden als Aluminiumschicht auf Quarzglas	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Kontaktierungslöcher bohren ◆ Kontaktierung einbringen ◆ Glas mit Kontaktstellen rundschleifen ◆ Schicht aufputtern ◆ Schicht in Segmente unterteilen 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Epoxy-Silber-Leitklebstoff 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Schicht kratzempfindlich und oxidationsgefährdet ◆ Glas bruchgefährdet ◆ Bohren, Schleifen und Beschichten aufwendig ◆ minimale Temperaturdehnung ◆ Material kostengünstig
Elektroden aus Messing auf Grundkörper aus der Glaskeramik Macor®	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Grundkörper herstellen ◆ Messing-Elektrodenring herstellen ◆ Kontaktierungslöcher bohren ◆ Anschlüsse in Messing einlöten ◆ Messingring auf Grundkörper kleben ◆ Grundkörper und Messingring auf Präzisionsdrehmaschine überdrehen ◆ Segmente ausfräsen 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Elektroniklot 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Kontaktierungsstelle empfindlich ◆ Glaskeramik bruchgefährdet ◆ Bohren, Drehen und Fräsen problemlos ◆ Geringe Temperaturdehnung ◆ Grundmaterial teuer
Aluminium- und Aluminiumnitridschicht auf Quarzglas	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Kontaktierungskanäle schleifen ◆ Kontaktierungsmaterial einbringen ◆ Glas und Kontaktierungsstellen rundschleifen ◆ Mehrere Sputtermasken anfertigen ◆ Mehrere Schichten verschiedener Materialien aufputtern 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Epoxy-Silber-Leitklebstoff 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Elektrodenschicht kratzempfindlich und oxidationsgefährdet ◆ Isolierung der Isolierschichten nicht zuverlässig ◆ Glas bruchgefährdet ◆ Schleifen und Beschichten aufwendig ◆ Minimale Temperaturdehnung ◆ Material kostengünstig

Merkmal	Herstellung	Kontaktierung	Eigenschaften
Grundkörper und Elektroden aus hochlegiertem Edelstahl 1.4305	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Grundkörper und Elektrodenringe drehen ◆ Ringe kontaktieren ◆ Ringe auf Grundkörper aufkleben ◆ Messkopf auf Präzisionsdrehmaschine überdrehen ◆ Segmente ausfräsen, wenn erforderlich 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Edelstahl-Weichlot 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Messkopf nicht oxidations- oder bruchgefährdet ◆ Drehen problemlos ◆ Merkliche Temperaturdehnung ◆ Material kostengünstig

Tabelle 5.1: Merkmale von Messköpfen, die im Rahmen der Arbeit hergestellt wurden, und deren Eigenschaften

Mit dieser Gegenüberstellung stellt sich der hochlegierte Edelstahl als optimales Material für die meisten Fälle dar. Sein einziger Nachteil, die relativ hohe Temperaturdehnung, kann dadurch entschärft werden, dass eine Eisen-Nickel-Legierung mit sehr geringer Temperaturdehnung („Invar®“) eingesetzt wird. Der Temperaturdehnungskoeffizient des verwendeten austenitischen Edelstahls 1.4305 liegt mit $16 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ zwischen den gängigen Materialien ferritischer Stahl ($12 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) und Aluminium ($23 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$), wodurch eine rechnerische Temperaturkompensation für viele Fälle mit ausreichender Genauigkeit möglich ist.

5.6.3 Elektrodenanordnungen

Im Rahmen dieser Arbeit wurden folgende Konzepte erprobt (siehe Kapitel 6):

- ◆ Vier Ringsegmente ohne Schutzschirm
- ◆ Vier Ringsegmente mit Schutzschirm
- ◆ Eine Ringelektrode ohne Schutzschirm
- ◆ Eine Ringelektrode mit Schutzschirm

Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, dass ein Schutzschirm unbedingt erforderlich ist. Ohne einen Schutzschirm ist die Messung von der Einstecktiefe des Messkopfes in die Bohrung abhängig. Bei Sacklöchern geht außerdem der Abstand zum Ende der Bohrung in die Messung ein. Ein Schutzschirm bietet außerdem die Möglichkeit, die Messelektronik von den Elektroden entfernt anzuordnen. Dazu kann als Anschlusskabel ein Triaxialkabel verwendet werden, dessen innerer Mantel auf das Schutzschirmpotential gelegt wird. Dadurch wird die parasitäre Kapazität des Kabels sehr effektiv unterdrückt (siehe Kapitel 3.4). Dies gewinnt vor allem bei kleinen Messköpfen an Bedeutung.

In Tabelle 5.2 sind die Vor- und Nachteile von Messköpfen mit Ringelektrode und mit vier Ringsegmenten gegenübergestellt.

Merkmale	Vorteile	Nachteile
Ringelektrode	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Herstellung einfacher ◆ Gute Skalierbarkeit ins Kleine ◆ Größere Kapazität ◆ Ringinneres prinzipbedingt feldfrei ◆ Berechnung des Messergebnisses vergleichsweise unkompliziert ◆ Kalibrierung des Messsystems einfach 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Sehr sorgfältige Positionierung gegenüber der Bohrung oder einstellbarer Positionierer grundsätzlich erforderlich ◆ Radiale Formabweichungen schlechter bis kaum erfassbar, insbesondere auf kurzen radialen Abschnitten
Ringsegmente	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Position des Messkopfes in der Bohrung kann prinzipbedingt ohne Bewegung des Messkopfes berechnet und kompensiert werden ◆ Radiale Formabweichungen besser erfassbar 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Herstellung aufwendiger ◆ Skalieren ins Kleine aufwendig ◆ Kapazität der einzelnen Segmente kleiner ◆ Vier Messelektroniken oder aufwendige Messstellenumschaltung erforderlich ◆ Schutzschirm muss auf inaktive Segmente geschaltet werden, um annähernd feldfreies Ringinneres zu erhalten ◆ Berechnung des Messergebnisses aufwendig ◆ Kalibrierung des Messsystems aufwendig

Tabelle 5.2: Merkmale von Messköpfen, die im Rahmen der Arbeit hergestellt wurden, und deren Eigenschaften

Wie man leicht sieht, überwiegen die Vorteile der Ringelektrode. Da die wirtschaftlich sinnvolle Anwendung eines solchen Messsystems unter anderem im Bereich sehr kleiner Bohrungen gesehen wird, hat die Skalierbarkeit ins Kleine starkes Gewicht, was die Auswahl der Ringelektrode als Optimum weiter forciert.

5.6.4 Messelektronik

Die verschiedenen Typen von Messelektroniken, die für die Auswertung des Messkopfes in Frage kommen, sind in Kapitel 3.3 dargestellt.

Die kapazitive Durchmessermessung stellt an die Messelektronik folgende Anforderungen:

- ◆ Hohe Auflösung
- ◆ Kleinstmögliche parasitäre Kapazität

- ◆ Großer Messbereich
- ◆ Sehr gute Linearität (kann auch durch Kalibrierung erreicht werden)
- ◆ Sehr geringe Drift
- ◆ Ansteuerung eines Schutzschirms
- ◆ Möglichst einfach und kostengünstig herstellbar

Alle der denkbaren Schaltungstypen können auf diese Anforderungen hin optimiert werden. Je nach Typ werden jedoch dabei verschiedenartige Nachteile erwartet, die das ideale Erfüllen der Anforderungen begrenzen. Diese sind in der Tabelle 5.3 zusammengestellt.

Merkmale	Erwartete Schwierigkeiten
Resonanzverfahren	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Driftgefährdet durch die Spule als zweites frequenzbestimmendes Element ◆ Nichtlineare Kennlinie ◆ Für gute Genauigkeit sehr sorgfältige Energiezufuhr erforderlich ◆ Ausfiltern unerwünschter Rauschfrequenzanteile durch variable Frequenz aufwendiger
Trägerfrequenzverfahren	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Relativ hoher Schaltungsaufwand ◆ Auflösung bzw. Messbereich durch A/D-Wandler begrenzt
Switched-Capacitor-Messschaltung	<ul style="list-style-type: none"> ◆ elektronischer Analogschalter ist ein genauigkeitsbestimmendes Element ◆ Auflösung bzw. Messbereich durch A/D-Wandler begrenzt
Relaxationsoszillator	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Ausfiltern unerwünschter Rauschfrequenzanteile durch variable Frequenz aufwendiger

Tabelle 5.3: Merkmale von Messköpfen, die im Rahmen der Arbeit hergestellt wurden, und deren Eigenschaften

Vor dem gegebenen Hintergrund erscheint der Relaxationsoszillator unter Berücksichtigung des Aufwand-Nutzen-Verhältnisses als die geeignetste Schaltung. Mit einer Trägerfrequenzschaltung wird mindestens dieselbe Auflösung erreicht, jedoch ist der Aufwand beträchtlich höher.

5.6.5 Positionierer

Führungen

In der Tabelle 5.4 sind die Vor- und Nachteile von Wälzführungen und Federgelenkführungen gegenübergestellt.

Die Vor- und Nachteile beider möglicher Lösungen wiegen sich recht genau auf. Deshalb kann an dieser Stelle keine allgemeingültige Auswahl getroffen werden. Es ist daher sinnvoll, die Auswahl auf

die spezifische Aufgabenstellung abzustimmen. Zum Beispiel kann es sinnvoll sein, Federführungen zu verwenden, wenn eine langgestreckte Bauform gefragt ist.

Merkmale	Vorteile	Nachteile
Wälzführung	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Geringe Bauhöhe ◆ Hohe Steifigkeit ◆ Reibungsarm ◆ Spielfrei ◆ Relativ robust ◆ Langlebig ◆ Führungen können zugekauft werden 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Bahnabweichungen im Mikrometerbereich ◆ Relativ teuer ◆ Kapselung erforderlich
Federgelenkführung	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Möglichkeit der Ansteuerung durch Kraftübersetzung oder Magnetkraft ◆ Sehr gute Führungsgenauigkeit ◆ Verschmutzungsunempfindlich ◆ Spielfrei ◆ Langlebig ◆ Relativ robust 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Herstellung relativ aufwendig ◆ relativ große Bauhöhe, was zu einem weit auskragenden Messkopf führt ◆ Mittlere Steifigkeit, die von der Position abhängig ist

Tabelle 5.4: Vor- und Nachteile von Wälzführungen und Federgelenkführungen

In der Tabelle 5.4 sind die aussichtsreichsten Kandidaten für einen zweiachsigen Bewegler für ein vollautomatisches, elektrisch angetriebenes System bezüglich ihrer Vor- und Nachteile gegenübergestellt.

5.6.6 Antrieb

Für die vorliegende Anwendung ist die wichtigste Anforderung eine feinfühligere Verstellbarkeit im Mikrometerbereich. Außerdem sind eine ausreichende Steifigkeit und damit eine hohe Eigenfrequenz wichtig, um eine gute Dynamik zu ermöglichen und die Amplituden von Eigenschwingungen gering zu halten. In Tabelle 5.5 sind Vor- und Nachteile verschiedener Prinzipien gegenübergestellt.

Merkmale	Vorteile	Nachteile
Schrittmotor mit Spindel	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Feine Verstellung möglich ◆ Vergleichsweise sehr hohe Steifigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Für Motor, Kupplung und Spindel großen Bauraum erforderlich ◆ Durch kleine Spindelsteigung relativ langsam
Magnetkreis mit Spalt	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Feinfühlig, mechanisch stufenlose Verstellung ◆ Berührungslos ◆ Kein Stapeln der Achsen erforderlich ◆ Führung und Rückholung können in der Federführung vereint werden ◆ schnelles Durchfahren des Verstellbereichs 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Hysterese ◆ Mäßige Steifigkeit ◆ Schwingungsneigung ◆ Durch Eigenschwingungen des Positionierers können hohe Spannungen in die Antriebsspule induziert werden ◆ Kreuzkopplung möglich ◆ Bindet magnetische Partikel ◆ Mittlerer Bauraum erforderlich ◆ In Ausführung mit hochwertigen Magnetwerkstoffen teuer
Tauchspulensystem	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Identisch mit Magnetkreis mit Spalt bis auf: ◆ Achsen müssen gestapelt werden, dadurch mehr Bauraum und geringere Steifigkeit als im Magnetkreis mit Spalt 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Identisch mit Magnetkreis mit Spalt bis auf: ◆ Weniger Hysterese als im Magnetkreis mit Spalt ◆ Keine Kreuzkopplung

Tabelle 5.5: Vor- und Nachteile von Antriebsprinzipien

5.6.7 Fazit

Die optimale Lösung für viele Fälle, in denen automatische Messung gefordert ist, hat damit für viele Anwendungsfälle folgendes Konzept:

- ◆ Elektroden und Grundkörper des Messkopfes aus hochlegiertem Edelstahl
- ◆ Messelektrode als Ringelektrode, die von zwei weiteren Ringelektroden mit Schutzschirmpotential umgeben ist
- ◆ Messelektronik als Relaxationsoszillator als unaufwendige, kostengünstige Lösung
- ◆ Zweiachsiger Positionierer mit Kreuzrollenführungen für kurzes Auskragen des Messkopfes (vor allem bei Tischgeräten) und Mikrometerschrauben oder mit Federgelenken und Magnetantrieb für langes Auskragen des Messkopfes (für Ausführung zum Einsatz auf Drehmaschinen).

6 Messköpfe

Wie in Kapitel 5 dargestellt können zur Realisierung eines kapazitiven Innendurchmessermesssystems verschiedene Konzepte verfolgt werden. Diesem Kapitel werden verschiedene Messköpfe für verschiedene Messkonzepte vorgestellt, die im Rahmen dieser Arbeit realisiert worden sind.

Dafür stand unter anderem eine Sputteranlage zur Verfügung. Dadurch war es möglich, Elektroden mittels Dünnschichttechnik herzustellen. Mit der Anlage können verschiedene Metalle abgeschieden werden, wobei Aluminium bezüglich der vorliegenden Arbeit folgende Vorteile auf sich vereint:

- Gute Leitfähigkeit
- Sehr gute Haftung auf Glas
- Hohe Sputterrate
- Gute Korrosionsfestigkeit
- Geringe Tagetkosten

Außerdem standen eine Rundschleifmaschine (Hersteller Studer), eine Werkzeugschleifmaschine (Hersteller Deckel), eine Fräsmaschine (Deckel FP 1) und eine Präzisionsdrehmaschine (Hersteller Hardinge) zur Verfügung.

6.1 Ausführungen mit Ringsegmenten als Messflächen

6.1.1 Vier Ringsegmente aus Aluminiumschicht auf Glas

Für erste Versuche wurde das Konzept eines Quarzglasrohrs mit vier aufgesputterten Ringsegment-Elektroden verfolgt. Der Nenndurchmesser betrug 10mm. Es wurde ein Quarzglasrohr verwendet, weil dieses einen extrem geringen Temperaturdehnungskoeffizienten (ca. $0,5 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) hat. Dadurch kann die thermische Drift der Geometrie der Messanordnung gering gehalten werden. Durch die Anwendung von Dünnschichttechnik geht eine thermische Drift durch die Dicke der Elektroden selbst praktisch nicht ein.

Eine besondere Schwierigkeit stellt dabei die Kontaktierung der Elektroden dar. Grundsätzlich kann die Kontaktierung außen über das Rohr, mit einer Durchkontaktierung nach innen oder über das Ende des Rohres nach innen realisiert werden. Da in dieser Version noch nicht mit Schutzschirntechnik gearbeitet wurde, waren kurze Zuleitungen zur Messelektronik erforderlich. Die Elektronik wurde daher so ausgeführt, dass sie im Inneren des Rohres untergebracht werden konnte.

In einer ersten Version wurde die Kontaktierung durch das Rohr realisiert. Dazu wurde das Quarzglasrohr mit einem 1mm-Bohrer durchbohrt. Anschließend wurden die Messelektronik in das Rohr

eingesetzt, die Anschlussdrähte für die Elektroden mit Silberleitkleber in die Bohrungen eingeklebt und die Klebestelle von außen geglättet. Dann wurden mit Hilfe einer Schablone die Messelektroden auf das Glas bzw. den Silberleitkleber aufgesputtert. Das Funktionieren einer elektrischen Verbindung, die hergestellt wird, indem eine Aluminiumschicht auf Silberleitkleber gesputtert wird, wurde zuvor in Versuchen überprüft. Dabei wurden auch Tests bei erhöhter Temperatur durchgeführt. Es zeigte sich in allen Fällen eine zuverlässige, niederohmige Verbindung.

Dieser erste Prototyp diente dazu, das Messverfahren und die Herstellbarkeit in einem ersten Ansatz zu bewerten. Der positive Verlauf erster Messungen führte zur Herstellung einer weiteren, verbesserten Version des Prototypen.

Die Kontaktierung der Elektroden wurde bei diesem Prototypen über das hintere Ende des Rohres realisiert, da sich die Montage der Anschlussdrähte des Vorgängers als nur sehr umständlich realisierbar herausgestellt hatte. Dies ist dadurch begründet, dass sich bei dem ersten Prototypen die Anschlussdrähte nur schwierig von der Längsachse des Rohres durch die Bohrungen fädeln ließen. Von außen durchgesteckte Anschlussdrähte ließen sich durch den scharfen Knick nicht nach innen ziehen. Vor diesem Hintergrund erscheint insbesondere die wünschenswerte Verkleinerung des Messkopf für kleinere Bohrungen in Frage gestellt.

Als Grundkörper für diesen wurde ein Quarzglasrohr auf einer Rundscheifmaschine außen mit $3\mu\text{m}$ Genauigkeit im Durchmesser und der Zylindrizität rundgeschliffen. Um die Anschlussstellen des neuen Prototypen am Rohrende gegen Beschädigungen zu schützen, wurden auf der Werkzeugschleifmaschine in das Rohrende Schlitze mit 1mm Tiefe und mit 90° Versatz zueinander eingeschliffen. Diese Schlitze erhielten einen Auslauf auf der Außenfläche des Rohres, der sich in die Messelektrode hinein erstreckt. Anschließend wurde das Rohr auf der Außenseite und am Rohrende mit Aluminium besputtert. Die Form der Messflächen aus Aluminiumschicht wurden in mehreren Schritten hergestellt. Zuerst wurde die Aluminiumschicht auf der Werkzeugschleifmaschine im Rundscheifverfahren an den Stellen außerhalb der Messelektroden wieder entfernt. Dadurch blieb ein Ring zurück. Die Schicht in den Ausläufen zu den Schlitzen hin blieb erhalten, da die Schicht nur an der zylindrischen Oberfläche entfernt wurde. Schließlich wurde der Ring auf der Werkzeugschleifmaschine mit einer schmalen Diamantschleifscheibe in vier Segmente unterteilt. Die Schlitze sind durch die Schicht in den Ausläufen mit den Elektroden verbunden. Als letzter Schritt der Herstellung wurde die Messelektronik in das Rohrinne eingesetzt und die Anschlussdrähte mit Silberleitkleber in die Schlitze eingeklebt.

Mit diesem Prototypen wurden umfangreiche Versuche durchgeführt. Dabei wurden mehrere gravierende Nachteile deutlich:

- Der Anschluss über das Rohrende führte zu einer erheblichen Empfindlichkeit gegenüber dem Ende der Bohrung, da die Anschlussdrähte eine störende Kapazität in Längsrichtung der Boh-

rung zur Folge haben.

- Das Messen mit einer einzelnen Messfläche misst nicht nur die Kapazität zur Bohrungswand vor der entsprechenden Elektrode, sondern auch die Kapazität zu Teilen der Messelektronik bzw. durch diese hindurch auf die andere Seite der Bohrung.
- Darüber hinaus waren die anderen Messelektroden durch die Messelektronik potenzialfrei geschaltet, sodass deren Potenzial durch die wechselnde Spannung auf der Messelektrode beeinflusst wurde, und dadurch die Messung beeinflusst wurde.
- Der Herstellungsaufwand des Grundkörpers durch Schleifen von Quarzglas erfordert den kostenintensiven Einsatz von Rundschleifmaschinen und Diamantschleifscheiben.

Dennoch konnte mit den einzelnen Messflächen eine Auflösung von im besten Fall 50nm erzielt werden.

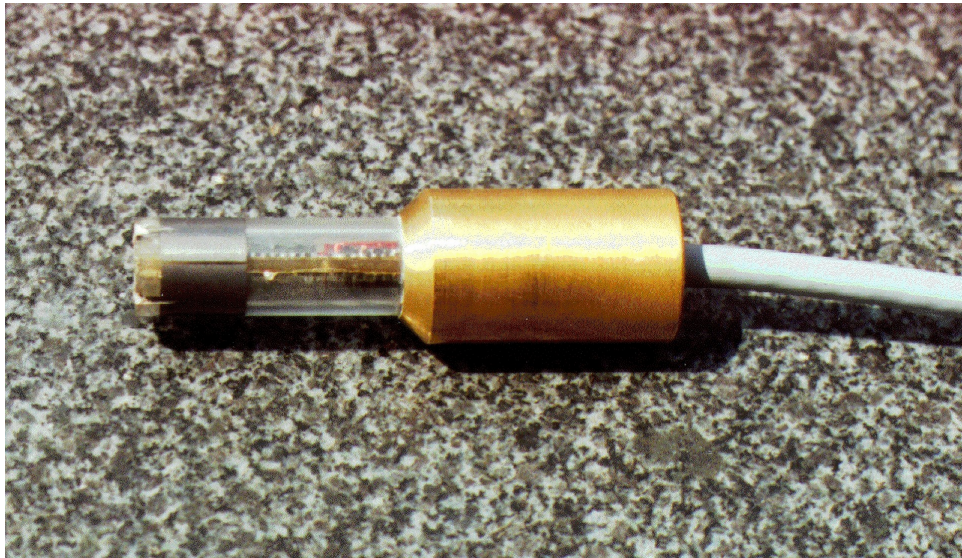


Abbildung 6.1 Messkopf mit 4 Segmenten, Aluminiumschicht auf Quarzglas

6.1.2 Ringsegmente aus Messing auf Glaskeramik

Um einige der vorgenannten Nachteile zu beseitigen, wurde ein weiterer Prototyp mit vier Ringsegmenten als Messelektroden realisiert. Insbesondere wurde durch andere Materialien die Anschlussproblematik gelöst.

Der Grundkörper wurde aus der Glaskeramik Macor® wiederum als Rohr hergestellt. Die Messelektroden wurden aus einem Messingring hergestellt. Dieser wurde geschlitzt und in eine Nut in dem Grundkörper eingeklebt. Nach der Aushärtung wurden der Grundkörper und die Messelektroden jeweils gemeinsam nach innen durchbohrt. Durch diese Bohrungen konnten die Anschlussdrähte von außen nach innen durchgezogen werden. Die innen verlaufenden Enden wurden mit der Messelek-

tronik verlötet, diese anschließend in das Rohrinne eingesetzt, die Drähte dabei passend wieder nach außen gezogen, abgelängt und in die Messingelektroden eingelötet. Dabei wurde die Lötstelle so ausgeführt, dass sie über die Messingoberfläche herausstand. Anschließend wurde der gesamte Messkopf fein überdreht, um auf diese Weise kleine Formabweichungen durch das Kleben zu beseitigen und das überstehende Lot zu entfernen. In einem letzten Schritt wurde der Ring auf einer Fräsmaschine mit einem 1mm-Fräser in vier Segmente unterteilt.

Auch mit diesen Prototypen wurden einige Versuche durchgeführt. Es zeigten sich dabei folgende Nachteile:

- Die Bruchempfindlichkeit des Grundkörpers führte zur Zerstörung des Grundkörpers beim Berühren der Bohrungswand mit dem Sensor.
- Nach wie vor bestanden Probleme mit dem Auswerten einzelner Messflächen (s.o.).

Um die Problematik mit bei der Auswertung einer einzelnen Messfläche auf einfache Weise zu umgehen, wurde klar, dass es vorteilhaft ist, das Prinzip des Faraday'schen Käfigs zu nutzen. Probe-weise wurden dazu alle Messflächen zusammengeschaltet, um auf diese Weise eine Quasi-Ringelektrode zu realisieren. Diese ist in ihrem Inneren potenzialfrei. Folglich treten keine Störungen mehr dadurch auf, dass die Segmente Kapazitäten mit Teilen der Messelektronik (Masse) oder anderen Teilen der Bohrungswand oder anderen Segmenten bilden.



Abbildung 6.2: Messkopf aus Macor® mit vier Messflächen aus Messing

6.1.3 Ringsegmente aus Aluminiumschicht auf Glas mit Guardflächen

Parallel zur Herstellung des Prototypen mit Macor®-Grundkörper wurde im Rahmen einer Studienarbeit ein weiteres Konzept erprobt, bei dem auch die Schutzschirmtechnik zum Einsatz kommt. Auf Grund der unerwünschten Beeinflussung durch Teile der Messelektronik beziehungsweise Teile der Bohrung, die eigentlich nicht angemessen werden sollen, wurde bei dem neuen Konzept vorgesehen, die Messflächen mit einer getriebenen Schutzschirmfläche zu hinterlegen. Außerdem wurde vorgesehen, die Messelektroden mit einem Rahmen aus getriebener Schutzschirmelektrode zu umgeben, so Randeffekte der aktiven Messelektroden zu benachbarten Elektroden auf den getriebenen Schutzschirm zu verlegen und dadurch unwirksam zu machen.

Damit einhergehend war auch ein neues Konzept für die Messelektronik erforderlich. Eine wesentliche Neuerung war, dass die Elektronik ein Schutzschirmsignal bereitstellen muss. Darüber hinaus muss Elektronik in der Lage sein, sowohl die Messelektroden, als auch die Schutzschirmelektrode von Inaktivität auf Aktivität und zurück umzuschalten.

Eine weitere Möglichkeit, die Messung zu verbessern, ist, die inaktiven Messelektroden auf Schutzschirmpotential zu schalten, um damit näherungsweise einen Newtonschen Käfig zu realisieren. Dabei ist jedoch nur eine aktiv geschaltete Messelektrode für die Messung wirksam, während die anderen dazu dienen, alle Elektroden auf demselben Potenzial zu halten. Dadurch wird das Innere des Rings aus Elektroden im wesentlichen feldfrei. Dieses Verfahren kann auch bei Sensoren mit Ringsegment-Elektroden eingesetzt werden, deren Messelektroden nicht mit Schutzschirmelektrode hinterlegt sind. In diesem Fall ist dennoch Erzeugung eines Schutzschirmpotentials für die inaktiven Ringsegment-Elektroden erforderlich.

Das Konzept wurde durch wechselweise Beschichtung eines Grundkörpers aus Quarzglas mit leitfähigen und isolierenden dünnen Schichten umgesetzt. Im dabei wurden folgende Schritte durchgeführt:

1. Einbringen von vier Schlitzten mit Ausläufen in ein Ende des Rohrs. Diese dienen der Übertragung des Signals auf der Innenseite des Rohrs auf die Außenseite.
2. Beschichtung der Innenseite des Rohrs und der Schlitze mit Aluminium.
3. Rundschleifen der Außenseite des Rohrs auf Endmaß
4. Aufsetzen einer mehrteiligen Maske, mit der die Mess- und Schutzschirmflächen und deren Anschlussleitungen aus Aluminiumschicht strukturiert werden
5. Aufsetzen einer weiteren mehrteiligen Maske für das Aufbringen einer Isolierschicht über die bisher außen erzeugten Flächen. Um eine Kontaktierung der im Anschluss darüber erzeugten

Schutzschirmschicht mit den Schutzschirmelektrode unter der Isolierschicht zu gewährleisten, wird eine Durchkontaktierungsstelle abgedeckt.

6. Mit einer weiteren mehrteiligen Maske wird am Ende des Rohrs eine Schutzschirmfläche aufgesputtert, die die Ringsegmente um die Messflächen miteinander und über die Schlitze mit der Schicht im inneren des Rohrs verbindet. In Richtung des anderen Endes des Rohrs wird oberhalb der Messflächen ein weiterer Schutzschirmring aufgebracht.
7. In diesem Schritt wird das gesamte Rohr bis auf die Enden der Anschlussleitungen aus Schicht das ganze Röhrchen mit isolierender und widerstandsfähiger Schicht aus Aluminiumnitrid beschichtet. Zum abdeckende der Enden der Anschlussleitungen dient wiederum eine Maske.
8. Zum Schluss wird mit Hilfe einer weiteren Maske eine Masseschicht aus Aluminium über den Teil hinter dem Schutzschirmring aufgebracht.



Abbildung 6.3: Masken zur Herstellung von Elektroden durch Sputtern

Die verwendete Sputteranlage bietet die Möglichkeit, Aluminium als leitfähige Schicht sowie Aluminiumnitrid als Isolierschicht abzuscheiden, sodass sie für alle Schritte verwendet werden konnte. Zur Herstellung des Aluminiumnitrids wird ebenfalls ein Aluminium-Target verwendet, wobei jedoch statt einem Argonplasma ein Stickstoffplasma erzeugt wird, und die Prozessparameter angepasst werden.

Die auf diese Weise hergestellten Sensoren weisen jedoch eine sehr schlechte Isolation zwischen den Schutzschirmelektrode und den Messelektroden auf. Um dieses Konzept zu realisieren, ist einer

wesentliche Verbesserung der Herstellung von geeigneten Isolierschichten erforderlich. Zur Untersuchung der Tatsache, dass die Schicht schlecht isoliert, obwohl Aluminiumnitrid ein guter Isolator ist, wurde die unter der Isolierung liegende Aluminiumschicht unter einem Rasterelektronenmikroskop untersucht. Dabei zeigte sich säulenförmiger Aufbau der Schicht mit Verwerfungen an der Oberfläche. Möglicherweise ist die Schicht daher zu uneben, um von der sehr dünnen Aluminiumnitridschicht vollständig bedeckt zu werden. Dadurch kommt es an deren Fehlstellen zu einer Verbindung mit der darüberliegenden Aluminiumschicht und zu der gemessenen schlechten Isolationswirkung.



Abbildung 6.4: Messkopf mit strukturierten Schichten aus Aluminium

Dieser Weg wurde deshalb im Rahmen dieser Arbeit nicht weiterverfolgt, obwohl er es erlaubt, relativ unaufwendig komplizierte Geometrien der Mess- und Schutzschirmflächen herzustellen, und insbesondere auch hinsichtlich der Verkleinerung über schlichte Verkleinerung der Masken sehr gute Möglichkeiten bietet. Da sich parallel eine ringförmige Messfläche als simple und ebenso wirksame Alternative herausgestellt hatte, wurde dieser Weg weiterverfolgt

6.2 Ausführungen mit ringförmiger Messfläche

Auf Grund der verschiedenen Schwierigkeiten mit Messköpfen mit Ringsegment-Elektroden wurden im weiteren Konzepte mit Ringflächen-Elektroden erprobt.

6.2.1 Ringelektrode aus Aluminiumschicht auf Glas

Für einen ersten Versuch und als Demonstrationsobjekt wurde ein batteriebetriebenes Handmessgerät konstruiert und aufgebaut. Dieses basiert auf einem Quarzglasrohr mit einer einzelnen ringförmigen Messfläche. Die Kontaktierung der Messfläche wurde realisiert, indem ein Anschlussdraht von

innen in eine Bohrung durch die Rohrwand eingeklebt wurde. Die Klebestelle wurde zusammen mit dem Rohr überschleift und das gesamte Rohr einschließlich der Klebestelle überschichtet. Im Anschluss wurde die Schicht mittels Rundschleifen mit einer schmalen Schleifscheibe in axiale Abschnitte unterteilt, sodass um die Anschlussstelle eine ringförmige Messelektrode entstand.

Die Auswertung wurde mit einem einfachen Relaxationsoszillator realisiert. Dieser nutzt CMOS-Logikbausteine und die Triggerschwellen von Schmitt-Triggern, um den Messkondensator über einen Widerstand umzuladen. Der Relaxationsoszillator ist in doppelter Ausführung vorhanden, wobei der zweite ladezeitbestimmende Kondensator als fester Referenzkondensator ausgeführt ist. Die Logik ist so aufgebaut, dass die Ladezeit des Referenzkondensators die Periodendauer und die Ladezeit des Messkondensators die Zeit bestimmt, in der das Ausgangssignal 1 ist. Aus diesem Signal wird mit einem analogen Tiefpassfilter eine Mittelwertspannung gebildet, deren Höhe von der Größe des Messkondensators abhängt. Diese Spannung wurde mit einem Einbau-Digitalmultimeter angezeigt.

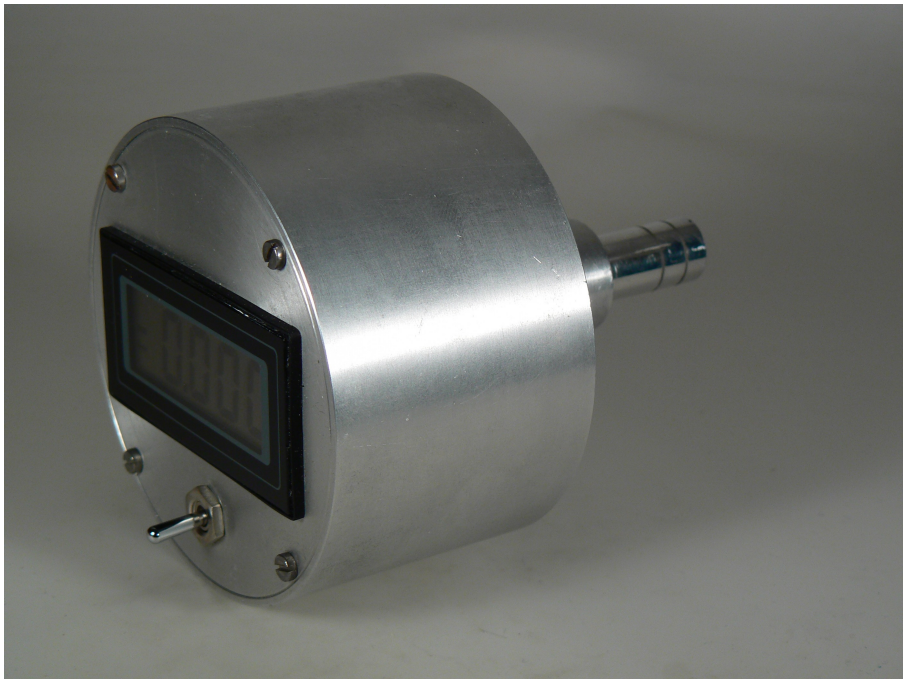


Abbildung 6.5: Prototyp mit einer ringförmigen Elektrode aus Aluminiumschicht auf Quarzglas

Zur Bestimmung von Durchmessern wurden mit Kalibrierungsbohrungen Referenzspannungen aufgenommen. Damit lässt sich eine entsprechende Interpolationformel erstellen, mit der dann zu beliebigen gemessenen Spannungen ein Bohrungsdurchmesser errechnet werden kann.

Da dieser Messkopf als Demonstrator dient, wurde die Zentrierung gegenüber der Bohrung durch eine Vorrichtung auf mechanischem Wege mit einer Genauigkeit von etwa einem Zehntel Millimeter sichergestellt. Dabei wurden Bohrungen verwendet, die in einen Aluminiumzylinder mit festgelegtem Außendurchmesser zentriert eingebracht sind. Der dadurch entstehende Messfehler wurde für den

Demonstrator in Kauf genommen.

6.2.2 Edelstahl geklebt

Die Erfahrungen mit dem in Kapitel 6.1.1 beschriebenen Messkopf machten deutlich, dass der Einsatz von Schutzschirmtechnik auch bei Ringelektroden erhebliche Vorteile bietet. Das Messergebnis wird dadurch von der Position der Messelektrode in Bezug auf Beginn und Ende der Bohrung unabhängig. Dabei werden die Schutzelektroden ebenfalls als Ringelektroden ausgeführt und sind axial vor und hinter der ringförmigen Messelektrode angeordnet. Dadurch werden Randeffekte der Messfläche auf die Schutzschirmelektroden verlagert und auf diese Weise für die Messung unwirksam. So können Sacklochbohrungen ebenso wie Durchgangsbohrungen vermessen werden. Beim definierten Führen des Messkopfes in axialer Richtung durch die Bohrung kann außerdem ein Durchmesserprofil ermittelt werden, z. B. eine Bauchigkeit oder eine Konizität.

Ein weiterer Nachteil des Messkopfes aus Kapitel 6.1.1 ist seine Empfindlichkeit durch den Einsatz von Glas als Grundkörper. Um den Anforderungen des Einsatzes in einer Werkstatt gerecht zu werden, wurde eine verbesserte Version aus hochlegiertem Edelstahl konstruiert. Hochlegierter Edelstahl bietet folgende Vorteile:

- Sehr gute Korrosionsfestigkeit
- Mechanische Robustheit
- Möglichkeit der Bearbeitung mit geometrisch definierten Schneiden (Drehen, Bohren usw.), aber auch durch Schleifen
- Gute Verfügbarkeit diverser Halbzeuge
- Verfügbarkeit der Eisen-Nickel-Legierung Invar® mit sehr geringer thermischer Dehnung von ca. $1 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
- Weichlöten mit speziellem Lot möglich, dadurch einfache und unaufwendige Möglichkeit der Kontaktierung

Zur elektrisch isolierten mechanischen Verbindung der Bauteile kann ein Polymerklebstoff verwendet werden, z.B. ein Epoxid-Klebstoff. Wenn der gesamte Messkopf aus demselben Material hergestellt wird, unterliegen die Klebestellen nur unwesentlicher thermischer Belastung. Durch Füllen mit Quarzglasmehl kann die hohe thermische Dehnung des Klebstoffs selbst verringert werden. Für die thermische Dehnung des auf diese Weise hergestellten Verbundwerkstoffs gilt die lineare Mischungsregel.

$$\alpha_{\text{Mischung}} = \alpha_{\text{Polymer}} \cdot a_{\text{Polymer}} + \alpha_{\text{Füllstoff}} \cdot a_{\text{Füllstoff}} = \alpha_{\text{Polymer}} \cdot (1 - a_{\text{Füllstoff}}) + \alpha_{\text{Füllstoff}} \cdot a_{\text{Füllstoff}}$$

wobei mit α die thermischen Bindungen und mit a der jeweilige Anteil am Verbund bezeichnet sind. Quarzglasmehl wurde unter anderem auf Grund seiner geringen thermischen Dehnung als Füllstoff ausgewählt, sodass durch einen hohen Füllgrad die hohe thermische Dehnung eines Polymerklebstoffs verringert werden kann. Dabei gilt

$$a_{\text{Füllstoff}} = \frac{\alpha_{\text{Verbund}} - \alpha_{\text{Polymer}}}{\alpha_{\text{Füllstoff}} - \alpha_{\text{Polymer}}}$$

Um die thermische Dehnung von hochlegiertem Edelstahl (ca. $12 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$) zu erreichen, muss der Klebstoff zu etwa 85% mit Quarz gefüllt werden. Ein derart hoher Füllgrad ist mit kugelförmig angenommenem Füllgut nicht möglich. Mit einem realistischen maximalen Füllgrad von 60% wird immerhin eine thermische Dehnung des Verbundes von $32 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ erreicht. Dies ist eine deutliche Reduktion gegenüber der angenommenen thermischen Dehnung des reinen Klebstoffs von $100 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ und führt zur Verbesserung der thermischen Eigenschaften des Messkopfes.

Durch das Füllen des Polymerklebstoffs mit Quarzglasmehl erhöhen sich ebenfalls nach der linearen Mischungsregel der Elastizitätsmodul sowie der Kompressionsmodul gegenüber einem reinen Polymer. Bei einem Füllgrad von 60% steigt der Elastizitätsmodul z. B. von 5 GPa auf 37,8 GPa. Dieses im Vergleich zu hochlegiertem Edelstahl mit etwa 210 GPa jedoch immer noch relativ wenig. Durch die insgesamt kleine Masse des Verbundes im Messkopf sowie den immer noch relativ geringen Elastizitätsmodul des Verbundes bleibt die Verformung der Teile des Messkopfes folglich gering. Der Faktor zwischen der thermischen Dehnung von Quarzglasmehl und Polymerklebstoff liegt zwischen 500 und 1000, während der Faktor zwischen den entsprechenden Elastizitätsmoduln nur zwischen 15 und 30 liegt. Durch den Einsatz des Füllstoffs verbleibt deshalb für die thermische Dehnung des Messkopfes ein Vorteil. Zusammenfassend kann folglich gesagt werden, dass mit Quarzglasmehl gefüllte Polymerklebstoffe zur Verbindung der Messkopfteile gut geeignet sind.

Um die elektrischen Funktionen des Messkopfes zu realisieren, ist die Kontaktierung der Schutzschirm-, Mess- und Masseflächen erforderlich. Die zwei Schutzschirmflächen müssen miteinander verbunden und deren Signal innen im Messkopf zur Elektronik geleitet werden. Das Messsignal muss ebenfalls innen durchs Rohr zur Elektronik geleitet werden. Dabei muss dieses Signal durchgehend von einem Schirm auf dem Potenzial des Schutzschirms umgeben sein. Dadurch werden parasitäre Kapazitäten zwischen der Leitung des Messsignals und umliegenden Masseflächen unterdrückt. Die Aufnahme des Messkopfes muss auf Masse liegen, um einen problemlosen Anbau an Haltevorrichtungen zu ermöglichen.

Eine einfache Konstruktion, um diese Vorgaben zu realisieren, besteht in dem Aufbau, der in Abbil-

Abbildung 6.6 zeigt einen Messkopf, der aus einem Anschlussstück, einem Trägerrohr und der Messkopfspitze mit der Messelektrode und den Schirmelektroden besteht. An der Spitze des Sensors kann man die vordere Schirmelektrode erkennen. Der nächste Ring, der sich daran anschließt, ist die Messelektrode. Der dritte, hinterste Ring ist die zweite Schirmelektrode, die mit dem Trägerrohr aus einem Stück besteht. Das Trägerrohr ist elektrisch von dem Anschlussstück isoliert und liegt auf Schutzschirmpotential. Das Anschlussstück stellt eine triaxiale elektrische Verbindung zu der Messelektronik her und gewährleistet die mechanische Verbindung mit einem Zentrierer. Es liegt auf Massepotential. Durch ein solches Anschlussstück kann der Messkopf einfach und schnell gewechselt werden. Das Gegenstück kann entweder direkt die Messelektronik enthalten, oder den Übergang auf ein Triaxialkabel darstellen, das das Messsignal unverfälscht zu einer Messelektronik überträgt. In dem Triaxialkabel ist die Seele mit dem Messsignal, der innere Mantel mit dem Schutzschirmpotential und der äußere Mantel mit Masse belegt.



Abbildung 6.6: Messkopf aus Edelstahl

In das Anschlussstück ist das Trägerrohr eingeklebt, und das sehr langgestreckt ausfallen kann, um die Messung in Tiefbohrungen zu ermöglichen. Die Messelektrode wird als Ring mit größerem Innendurchmesser als der des Schutzschirmrohrs gefertigt und mit Weichlot an einen Kupferlackdraht angelötet. Der Draht wird durch das Trägerrohr zu der Steckverbindung geführt. Der vordere Schutzschirmring ist durch einen Stopfen realisiert, in den einseitig ein Schlitz eingefräst ist. Auf diesen Stopfen wird die Messelektrode aufgesteckt, wobei die Lötstelle der Messelektrode zu dem Kupferlackdraht in dem Schlitz zu liegen kommt. Anschließend wird der Stopfen mit seinem Absatz in das Rohr eingepresst. Die Pressstelle sorgt für den elektrischen Kontakt zwischen dem Schutzschirmrohr und dem Schutzschirmstopfen.

Die erforderlichen Abstände und die elektrische Isolation zwischen der Messelektrode und den Schutzschirmelektroden werden realisiert, indem an den Verbindungsstellen ein Klebstoff appliziert wird, der mit Quarzglasmehl mit einer Körnung von einigen Hunderstel Millimeter gefüllt ist. Dadurch

ist ein dünner Spalt zwischen den Elektroden mit sicherer Isolierung gewährleistet. Dieses Vorgehen vereinfacht die Montage ganz erheblich. Um beim Verkleben die Messelektrode mit dem Rohr zu zentrieren, wird eine Hülse aus Teflon® über die ganze Konstruktion geschoben und nach dem Aushärten der Klebestelle wieder abgenommen. Anschließend wird der gesamte Messkopf auf einer Außenrundscheifmaschine fein nachgeschliffen, um die Toleranzen für Rundheit und den Außendurchmesser zu erreichen.



Abbildung 6.7: Montage der Messkopfspitze

Ein Nachteil dieser Konstruktion ist, dass bei verschiedener Eintauchtiefe des Messkopfes in die Bohrung die Kapazität zwischen der Schutzschirmelektrode und der Massefläche, die die Bohrungswand darstellt, variiert. Da trotz der sehr guten Unterdrückung des Einflusses der Kapazität zwischen den Schutzschirm und Masse noch ein Resteinfluss auf die Messung verbleibt, führt dies zu einer (sehr geringen) Variation des Messsignals mit der Eintauchtiefe. Um diesen Nachteil zu beseitigen, ist es möglich, das Rohr mit relativ großer Wandstärke auszuführen und mit einem Absatz zu versehen. Über den Absatz kann Richtung des Anschlussstücks ein dünnwandiges Rohr mit Massepotential geschoben und verklebt werden. Damit ist die Kapazität zwischen der Schutzschirmelektrode und Masse konstant, und die Variation beseitigt. Diese Konstruktion ist jedoch auf Grund des erhöhten Bauteilaufwandes um den Schwierigkeiten bei der Verkleinerung für kleinere Messbereiche nachteilig und wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht realisiert. Bei einer guten Auslegung der Elektronik bezüglich einer sehr guten Nachführung des Schutzschirmpotentials kann die Variation so gering gehalten werden, dass sie die Messgenauigkeit nur unwesentlich beeinflusst.

Der beschriebene Absatz im Trägerrohr bewirkt auch ohne ein zusätzliches Masserohr eine Verringerung des Einflusses, da dadurch der Abstand des Trägerrohrs zur Bohrungswand größer ist. Dadurch sinkt die parasitäre Kapazität zwischen dem Schutzschirmrohr und der Bohrungswand. Im Vergleich zum Einsatz eines übergesteckten Masserohrs ist der Aufwand hierfür geringer.

Besondere Vorteile bietet der Einsatz des Messgerätes im Bereich sehr kleiner Bohrungen. Der Verkleinerung des Messkopfes kommt daher besondere Bedeutung zu. Mit konventioneller Bearbeitungstechnik dürfte im Bereich von etwas unter 1 mm die Grenze erreicht sein. Durch mikromechanische Herstellungsverfahren kann diese Grenze jedoch sicherlich noch deutlich unterschritten werden. Das Anlöten der Anschlusskabel kann dann beispielsweise durch Bonden ersetzt werden.

7 Ausführungen der Kapazitätsmessschaltungen und der Auswerteeinheiten

Den verwendeten Messschaltungen ist gemeinsam, dass sie als Mixed-Signal-Relaxationsoszillatoren realisiert sind. Den verwendeten Relaxationsoszillatoren wiederum ist gemeinsam, dass der Messkondensator nach Masse geschaltet ist, was einige denkbare Schaltungstypen ausscheiden lässt. Es sind verschiedene Ausführungen erprobt worden.

7.1 Relaxationsoszillator

Kern eines Relaxationsoszillators ist ein Kondensator, der über einen oder mehrere Widerstände im Wechsel aufgeladen und wieder entladen wird. Ein solches RC-Glied hat nur einen Energiespeicher, den Kondensator. Ein RC-Glied als solches ist daher im Gegensatz zum LC-Glied nicht allein schwingungsfähig, da es keinen zweiten Energiespeicher gibt, sodass die Energie zwischen den beiden Speichern hin- und herschwingen könnte. Ein Relaxationsoszillator ist deshalb auf aktive Zufuhr von Energie in das System und Entnahme von Energie aus dem System angewiesen. Damit dieser Vorgang innerhalb handhabbarer Grenzen bleibt, ist das Laden und Entladen des Kondensators zwischen Triggerschwellen eine einfache Möglichkeit zur Realisierung eines Relaxationsoszillators. In diesem Fall werden im allgemeinen Schaltelemente verwendet, die zwischen den Zuständen Aufladen und Entladen des Kondensators umschalten. Die Zeitdauer der Lade- und Entladevorgänge dient als Maß für die Kapazität.

In einer sehr einfachen Version wird ein Schmitt-Trigger-NAND-Gatter über einen Widerstand und einen Kondensator zurückgekoppelt. Die Eingänge des NAND-Gatters liegen zu Beginn auf Low-Potenzial, wodurch der Ausgang auf High-Potenzial schaltet. Dieses lädt über den Rückkoppelwiderstand den Kondensator auf, bis die obere Triggerschwelle des Schmitt-Triggers erreicht und der Ausgang auf Low-Potenzial geschaltet wird. Entladevorgang dauert daraufhin an, bis die untere Triggerschwellen erreicht wird. Auf diese Weise wird die Kapazität in eine Frequenz des Aufladens und Entladens umgesetzt, die am Ausgang des Gatters abgegriffen werden kann.

Um die Drift eines einzelnen Oszillators zu verbessern, kann sie mit der Drift eines zweiten Oszillators, an den ein Referenzkondensator angeschlossen ist, kompensiert werden. Ein solcher doppelter Relaxationsoszillator besteht aus zwei einfachen Relaxationsoszillatoren, die so miteinander verknüpft sind, dass nach einem Auflade- und einem Entladevorgang eines der Oszillatoren der andere aufgeladen und entladen wird [Lau93]. Daraufhin wiederholt sich der Zyklus für beide Zweige. Der Wechsel zwischen den einzelnen Oszillatoren ist mit einem Flip-Flop realisiert, das aus zwei NAND-Gattern besteht. Jeweils ein Eingang der NAND-Gatter, der als Aktivierungseingang für die einzelnen Oszillatoren dient, ist mit Q beziehungsweise \bar{Q} verbunden. Nach dem Aufladen der Kondensatoren entsteht durch den Umschaltvorgang zum Entladen am Ausgang

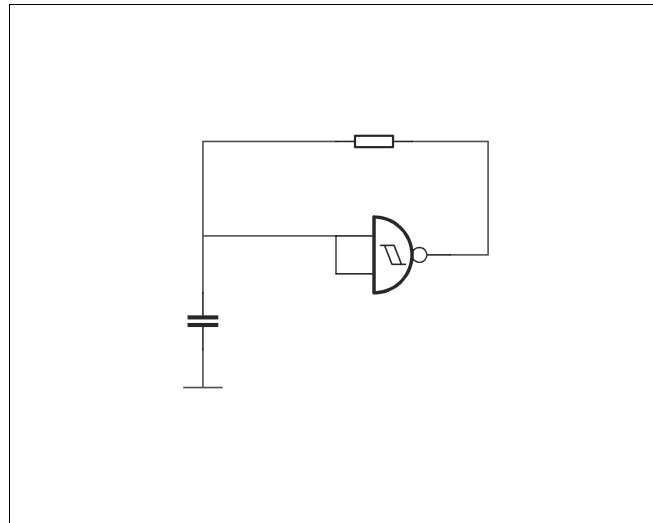


Abbildung 7.1: Einfacher Relaxationsoszillator

des einfachen Oszillators eine fallende Flanke. Diese führt dazu, dass das Flip-Flop umschaltet und den anderen einfachen Oszillator im anderen Zweig aktiviert. Das Ausgangssignal ergibt sich an Q oder \bar{Q} als Rechtecksignal. Dabei entspricht das Tastverhältnis einem Zyklus des Oszillators, der bei High aktiviert ist, geteilt durch die Summe beider Zyklen.

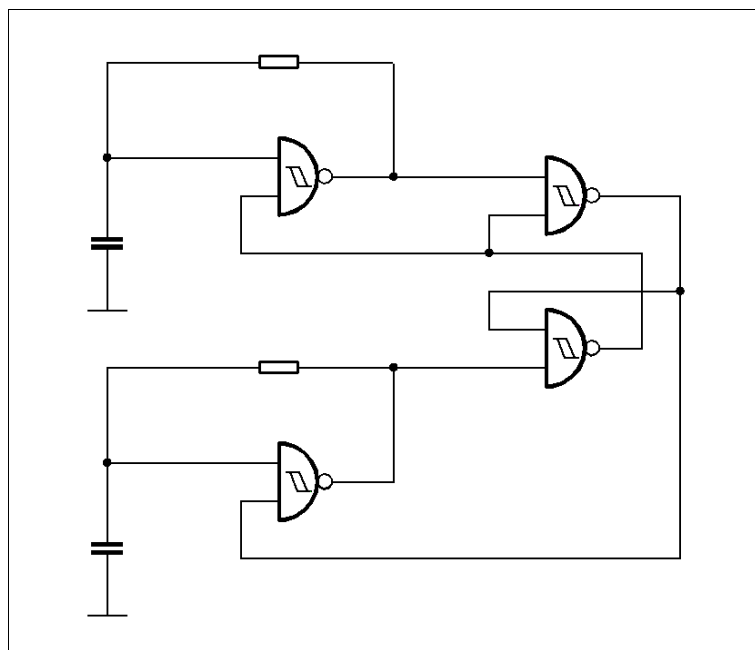


Abbildung 7.2: Doppelter Relaxationsoszillator

Vorteil dieser Schaltung ist, dass bei anschließender Tiefpassfilterung eine Gleichspannung entsteht, bei der sich gleiche Driftanteile aufheben, die multiplikativ auf die von den Einzeloszillatoren erzeugte Zeitdauern wirken. Nachteilig ist jedoch, dass während der Aktivierung eines Oszillators an dem jeweils anderen Oszillator das Entladen des Kondensator weiterläuft. Dadurch entsteht eine Kreuz-

kopplung zwischen den beiden Oszillatoren und gleichzeitig eine Nichtlinearität, wenn einer Kondensatoren als fester Referenzkondensator realisiert ist [Lau93].

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde der doppelte Relaxationsoszillator dahingehend verbessert, dass die Kreuzkopplung der Schaltung beseitigt wird, indem die Kondensatorspannung während der Deaktivierung auf diesem Potenzial gehalten wird. Dazu wird die Schaltung mit weiteren vier NAND-Gattern versehen, wobei der Messkondensator und der Referenzkondensator jeweils von dem Teilerpunkt eines Spannungsteilers, der jeweils zwischen zwei Ladegatterausgänge gelegt ist, nach Masse geschaltet wird. Sind die Ausgangssignale der beiden Ladegatterausgänge gleich (Gleichlauf), so bewirken sie über die parallel geschalteten Widerstände das Aufladen und Entladen wie zuvor. Bei ungleichen Ausgangssignalen (Gegenlauf) läuft die Kondensatorspannung asymptotisch auf die Spannung am Teilerpunkt des Spannungsteilers zu. Die Spannung am Teilerpunkt ist auf die untere Triggerschwelle des Triggerrgatters eingestellt, sodass diese im Gegenlauf die Haltespannung nach dem Entladen auf die untere Triggerschwelle darstellt. Die Kondensatorspannung ist außerdem an einen Eingang eines der Ladegatter, das auch Triggerrgatter genannt wird, angeschlossen, was beim Laden und Entladen ein Überschreiten der Triggerschwellen ein Umschalten dieses Gatters bewirkt, wenn der andere Eingang 1 ist. Dadurch wird zwischen Auf- und Entladen umgeschaltet.

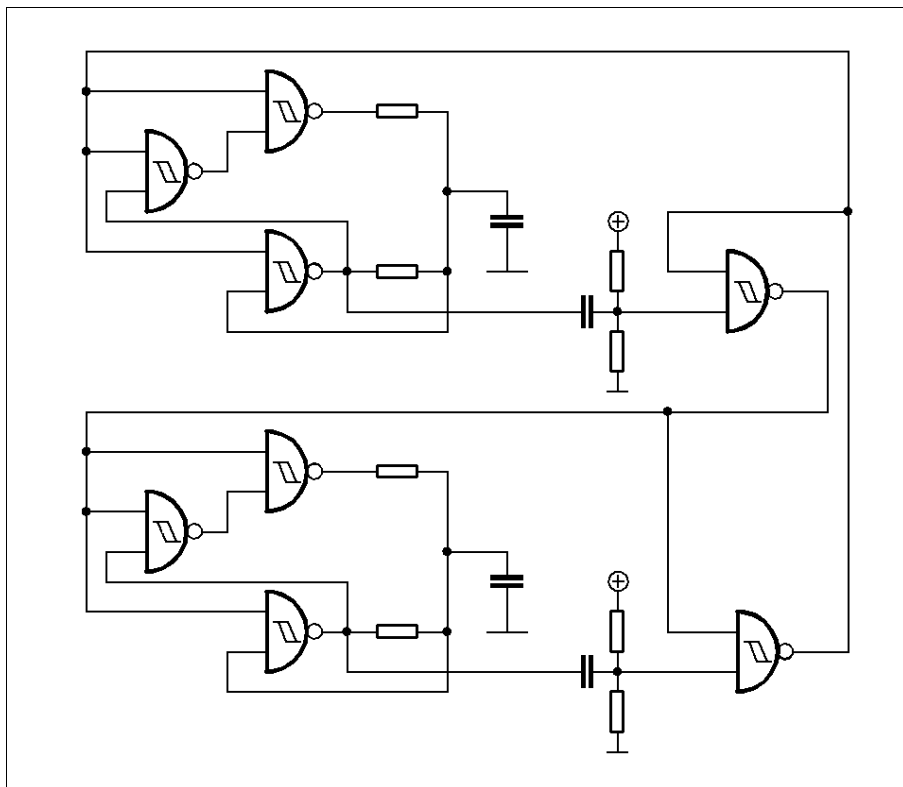


Abbildung 7.3: Doppelter Relaxationsoszillator mit Haltespannung

Der Ausgang des Triggerrgatters ist auch an den Eingang von jeweils einem dritten NAND-Gatter,

das Steuergatter, angeschlossen, das dazu dient, Gleichlauf oder Gegenlauf der beiden Ladegatter zu bewirken. Das Gatter bewirkt Gleichlauf, wenn sein anderer Eingang 1 ist, bzw. Gegenlauf, wenn sein anderer Eingang 0 ist. Das Ausgangssignal des Triggerrgatters ist außerdem jeweils das Ausgangssignal eines Oszillators. Die jeweils oberen Eingänge der drei Gatter sind zusammengeschlossen und stellen gemeinsam ein Steuerpotenzial zum Aktivieren des Oszillators dar.

Das Ausgangssignal eines Oszillators ist an einen Spike-Erzeuger angeschlossen, der aus einem Kondensator und einem Spannungsteiler besteht. Dieser ist erforderlich, weil das Ausgangssignal pegelgesteuert ist, während das Flip-Flop flankengesteuert ist. Der Spannungsteiler des Spike-Erzeugers ist so eingestellt, dass die Teilerspannung zwischen den Triggerschwellen des Flip-Flop-NAND-Gatters liegt. Ein Übergang vom Potenzial 1 zum Potenzial 0 führt deshalb zu einer Spannungsspitze, die die untere Triggerschwelle durchbricht, wodurch das Flip-Flop umschaltet. Das Umschalten des Flip-Flops bewirkt wiederum die Deaktivierung des aktuell aktivierten und die Aktivierung des anderen Oszillators über das Steuerpotenzial, wodurch der Oszillator daraufhin einmal auf- und entladen wird. Danach schaltet wiederum das Flip-Flop. Die Länge der Zeit mit hohem Potential des Ausgangssignals des Flip-Flops entspricht daher einem Aufladen und einem Entladen zwischen den Triggerschwellen des ersten Oszillators, und die Zeit mit niedrigem Potential den entsprechenden Vorgängen am zweiten Oszillator. Das Ausgangssignal der Gesamtschaltung entspricht damit der Version ohne Haltefunktion mit dem Unterschied, dass keine Kreuzkopplung auftritt.

Diese Variante bietet durch eine geringfügige Modifikation außerdem die Möglichkeit, durch Tiefpassfilterung eine Spannung zu erzeugen, die dem Verhältnis der beiden angeschlossenen Kapazitäten entspricht. Dazu wird an einem der Oszillatoren die Rückkopplung des Flip-Flops zu dem Steuerpotenzials unterbrochen und dieses dauerhaft auf High-Potenzial gelegt, wodurch dieser Oszillator unabhängig von dem anderen ohne Unterbrechung oder Haltezeit schwingt. Nach einem Zyklus aus Aufladen und Entladen wird dennoch das Flip-Flop von dem Oszillator umgeschaltet. Dadurch startet der andere Oszillator zeitgleich mit einem Zyklus des ersten Oszillators. Das Ende dieses Zyklus schaltet das Flip-Flop wieder zurück. Der Kondensator an dem freilaufenden Oszillator muss deshalb größer sein, als der an dem anderen. Als Ausgangssignal ergibt sich ein Rechtecksignal, dessen Grundfrequenz der des freilaufenden Oszillators und dessen Zeit mit hohem Potential einem Zyklus des andere Oszillators entspricht. Wenn ein solches Signal Tiefpassfilterung unterworfen wird, ergibt sich eine Spannung, die dem Quotienten aus der Kapazität des rückgekoppelten geteilt durch die Kapazität des freilaufenden Oszillators proportional ist.

7.2 Schutzschirmtechnik

Um ein Schutzschirmpotential zu erzeugen, das zur Unterdrückung von parasitären Kapazitäten benötigt wird, kann ein Operationsverstärker mit Verstärkung 1 verwendet werden. Der nichtinvertierende Eingang wird dabei mit dem Massepotenzial verbunden. Die Kapazität des Schutzschirms

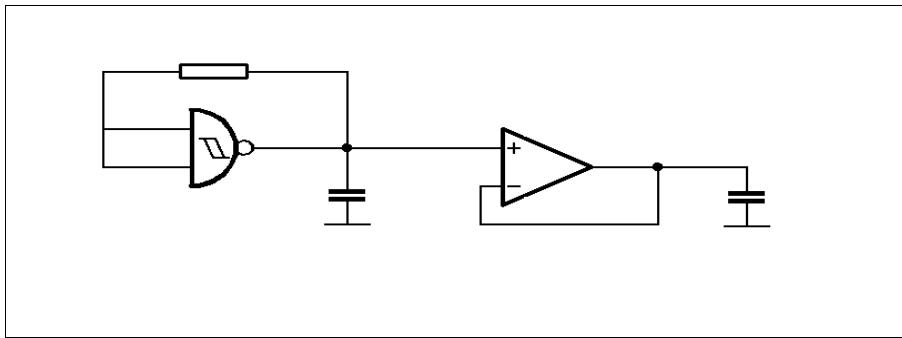


Abbildung 7.4: Einfacher Relaxationsoszillator mit Schutzschirmtreiber

nach Masse ist als Kondensator in der Abbildung 7.4 rechts dargestellt.

Hier stellt sich folglich die Aufgabe, einen Kondensator aus einem Operationsverstärker zu treiben. Der Kondensator dreht die Phase des Ausgangssignals an der Gegenkopplung in Abhängigkeit des Ausgangswiderstands des Operationsverstärkers um bis zu 90° . Da der Operationsverstärker selbst eine zusätzliche Phasendrehung verursacht, kann die Gegenkopplung zu einer Mitkopplung werden und den Operationsverstärker zum Schwingen bringen. Bei der Auslegung muss daher der Phasengang des Operationsverstärkers berücksichtigt werden. Es kann daher vorteilhaft sein, einen Operationsverstärker zu verwenden, der schon bei niedrigen Frequenzen eine Verstärkung kleiner 1 hat. Um die Wirkung des getriebenen Kondensators zu verringern, kann alternativ oder zusätzlich zwischen den Kondensator und die Gegenkopplung ein Widerstand geschaltet werden.

Die gezeigte Schaltung kann mit beliebigen Relaxationsoszillatoren verwendet werden, bei denen die Messkapazität nach Masse geschaltet ist.

7.3 Invertierschaltung

Um die parasitären Kapazitäten zu verkleinern, kann der Ansatz gewählt werden, die Messkapazität nicht direkt an Eingänge in integrierte Bausteine anzuschließen, die meist relativ hohe Eingangskapazitäten in der Größenordnung von einigen Picofarad haben, wogegen die parasitären Kapazitäten von Widerständen, insbesondere von Hochfrequenzwiderständen, wesentlich kleiner sind. Sie liegen in der Größenordnung von wenigen zehn Femtofarad, was eine erhebliche Reduzierung bedeutet.

Um einen Messeffekt zu bekommen, obwohl kein Halbleiter direkt an dem Kondensator angeschlossen ist, kann der Strom genutzt werden, der durch die Widerstände fließt. Eine Möglichkeit ist, einen invertierenden Operationsverstärker nachzuschalten. Dies hat den Vorteil, dass an dessen negativem Eingang ein virtueller Nullpunkt liegt, an dem jedoch der Strom gemessen werden kann. An dessen Ausgang erscheint die invertierte Spannung des Kondensators. Um das Umschalten zu bewirken, werden an den Ausgang zwei Komparatoren geschaltet. Dies hat wiederum den Vorteil, dass externe, insbesondere driftarme Widerstände zur Erzeugung der Triggerschwellen verwendet werden

können. Damit ein Schaltzustand während den Auf- und Entladephasen beibehalten wird, ist den Komparatoren ein Flip-Flop nachgeschaltet. Dieses betätigt wechselweise zwei elektronische Schalter, die den Kondensator aus einer positiven bzw. negativen Spannungsquelle über einen Ladewiderstand aufladen bzw. entladen. Ein Schutzschirmpotential kann erzeugt werden, indem dem Ausgang des Operationsverstärkers ein weiterer invertierender Operationsverstärker nachgeschaltet wird, der ein nichtinvertiertes Signal erzeugt, das der Spannung an dem Messkondensator entspricht.

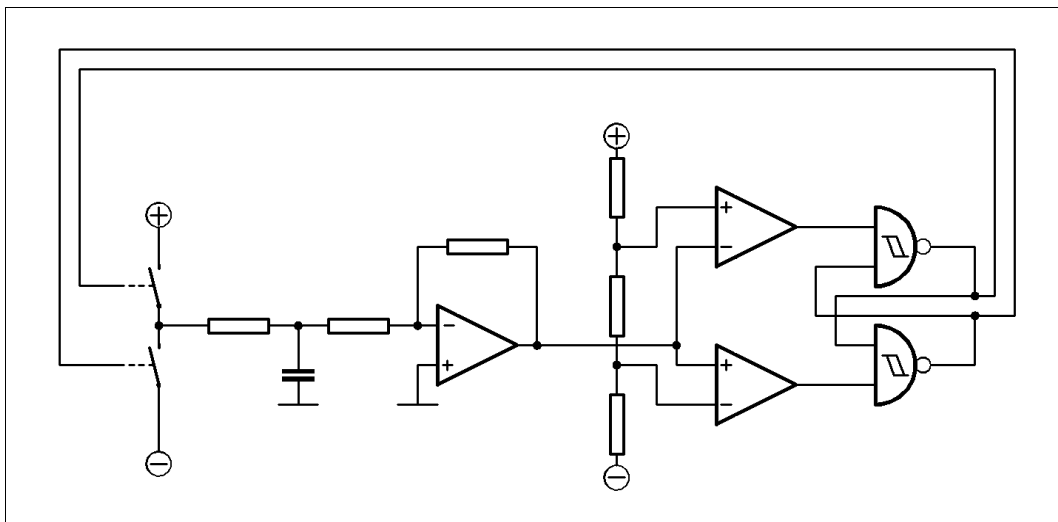


Abbildung 7.5: Relaxationsoszillator in Invertierschaltung

Nachteilig an dieser Schaltung ist jedoch, dass der Spannungshub am Kondensator auf die Spannung am Teilerpunkt zwischen den beiden Widerständen begrenzt ist. Außerdem wird für den Invertierer eine bipolare Spannungsversorgung benötigt. Der schwerwiegendste Nachteil ist jedoch, dass durch die Vielzahl von aktiven Bauteilen eine erhebliche Schalt- beziehungsweise Phasenverzögerung entsteht, die eine erheblich störende zeitäquivalente parasitäre Kapazität zur Folge hat.

7.4 Messbereichsanpassung

Durch Änderung der Ladewiderstände in den Schaltungen kann der Messbereich beeinflusst werden. Grundsätzlich wird der Messbereich so festgelegt, dass darauf der Bereich der benötigten Kapazitäten abgebildet wird. Größere Ladewiderstände bringen dabei mit dem Faktor \sqrt{R} mehr Rauschen in die Exponentialfunktionen des Aufladens und des Entladens ein. Große Ladewiderstände sind insbesondere bei kleinen Kapazitäten erforderlich, um brauchbare Auf- und Entladezeiten zu generieren, und erreichen im Rahmen dieser Arbeit Größenordnungen von etwa 100M Ω .

Der nutzbare Messbereich hängt mit der Weiterverarbeitung des Rechteck-Ausgangssignals zusammen. Nach Gleichrichtung des Rechtecksignals liegt eine Spannung vor, die sich in der Praxis nur innerhalb bestimmter Grenzen bewegen kann. Wird dagegen die Frequenz oder eine Ladezeit mit

einem Zähler ausgezählt, ist der Messbereich in Richtung längerer Zeiten prinzipiell unbegrenzt. In der Praxis wird jedoch eine gewisse Dynamik benötigt, die den Messbereich begrenzt. Bei Verwendung eines Zählers ist der Messbereich zu kürzeren Zeiten hin zunächst durch den Takt des Zählers und damit durch dessen Quantisierung begrenzt. Es kann daher vorteilhaft sein, die Frequenz des Ausgangssignals höher zu wählen, dadurch mehr Messwerte zu erhalten und durch Mittelwertbildung über die zusätzlichen Werte die Quantisierung durch den Zählertakt unwirksam zu machen. Dies geschieht, wenn durch Rauschen eine möglichst symmetrische Verteilung der Messwerte, die deutlich breiter als die Quantisierung durch den Zähler ist, vorhanden ist und die Summe der Werte durch die Anzahl der Messwerte geteilt wird. Mit einer Mittelwertbildung über beispielsweise 100 Werte kann so eine Messauflösung von einem Hunderstel des Zählertakts realisiert werden. Insgesamt erhält man so eine höhere relative Auflösung als bei der Wahl von längeren Ladezeiten. Zusätzlich verringert sich das Rauschen des Ergebnisses durch die kleineren Ladewiderstände.

7.5 Rauschen

Diesem Rauschen entspricht der Jitter im Rechteck-Ausgangssignal, der aus dem Abtastvorgang der Exponentialfunktionen durch die Triggerschwellen entsteht. Dabei wirken sowohl das Rauschen auf den Exponentialfunktionen der Lade- und Entladespannung, als auch das der Triggerschwellen. Das Spektrum des entstehenden Jitters hängt dabei mit den Spektren der beiden Rauschkomponenten zusammen (Hil96). Das Spektrum der Exponentialfunktionen wird durch die Wahl der Widerstände und damit durch die Wahl des Messbereichs beeinflusst.

Für die vorliegende Anwendung, die keine hohen Anforderungen an die Dynamik der Messung stellt, können die höheren Anteile des Jitterspektrums durch Tiefpassfilterung oder bei Vorliegen von diskretisierten Messwerten durch Summation von vielen dieser Messwerte unterdrückt werden, was ähnlich wie eine Tiefpassfilterung wirkt. Relevant für die Beeinflussung des Jitters durch die Messbereichswahl ist folglich die Wirkung dieser Auswahl auf die niedrigen Frequenzbereiche. Da es sich beim Widerstandsrauschen um weißes Rauschen handelt [Tie71], steigt das Rauschniveau auf allen Frequenzen gleichmäßig mit der Wurzel des Widerstandswerts an. Deshalb ist auch für die unteren Frequenzbereiche vor allem ein kleiner Widerstand vorteilhaft.

Rauschen aus aktiven Bauelementen kann eine andere spektrale Verteilung haben; dieses Rauschen kann jedoch nur durch die Bauteilwahl beeinflusst werden, die wiederum durch die Anforderungen durch die Schaltung an sich begrenzt ist. Eine allgemeingültige Formel für das Rauschen kann folglich nicht angegeben werden. Es ist jedoch möglich, eine Schaltung zu berechnen oder zu simulieren, um die Rauschursachen zu isolieren und zu minimieren. Das insgesamt auftretende Rauschen der Messung kann am einfachsten durch statistische Auswertung von Messwerten im Betrieb ermittelt werden.

7.6 Parasitäre Kapazitäten

Parasitäre Kapazitäten sind hier unerwünschte Kapazitäten, die nicht vom gewünschten Messeffekt abhängen, die aber denselben Effekt auf die Messschaltung wie eine Messkapazität haben. Bei der Messung der Kapazität werden sie mitgemessen und können im allgemeinen durch Rechnung nach der Messung nicht mehr von der Kapazität getrennt werden, die vom Messeffekt abhängt.

Eine Kompensation der parasitären Kapazitäten mit Hilfe eines negativen Impedanzkonverters, der eine entsprechende Gegenkapazität erzeugt, scheiterte im Rahmen dieser Arbeit an der Stabilität des Impedanzkonverters.

Die folgende Rechnung zeigt, dass bei Relaxationsoszillatoren die Schaltzeiten genauso wie parasitäre Kapazitäten wirken.

Die Zeit, um von der oberen Triggerschwelle zur unteren zu entladen, beträgt:

$$U_u = U_o \cdot e^{\frac{-t_E}{RC}} \Leftrightarrow t_E = R \cdot C \cdot \ln\left(\frac{U_o}{U_u}\right)$$

Die Zeit, um von der unteren Triggerschwelle zur oberen aufzuladen, beträgt:

$$U_C = U_u + (U_L - U_u) \cdot (1 - e^{\frac{-t_A}{RC}}) \Leftrightarrow t_A = R \cdot C \cdot \ln\left(\frac{U_L - U_u}{U_L - U_o}\right)$$

Die Zyklusdauer beträgt damit:

$$\begin{aligned} t_Z &= t_L + t_A + t_S = R \cdot C \cdot \ln\left(\frac{U_L - U_u}{U_L - U_o}\right) + R \cdot C \cdot \ln\left(\frac{U_o}{U_u}\right) + t_S \\ &= R \cdot C \cdot \left(\ln\left(\frac{U_L - U_u}{U_L - U_o}\right) + \ln\left(\frac{U_o}{U_u}\right)\right) + t_S = R \cdot C \cdot \ln\left(\frac{U_L - U_u}{U_L - U_o} \cdot \frac{U_o}{U_u}\right) + t_S \end{aligned}$$

wobei U_o obere Triggerschwelle, U_u untere Triggerschwelle,

R Ladewiderstand, C Messkapazität

t_E Entladezeit, t_A Aufladezeit, t_S Schaltzeiten, t_Z Zyklusdauer sind.

Die Formel zeigt, dass die Zyklusdauer linear von der Messkapazität abhängt. Da die Spannungen und der Ladewiderstand konstant sind, bilden parasitäre Kapazitäten C_p daher ebenso einen additiven Term in der Zyklusdauer, wie die Schaltzeiten:

$$t_Z = R \cdot (C + C_p) \cdot \ln\left(\frac{U_L - U_u}{U_L - U_o} \cdot \frac{U_o}{U_u}\right) + t_S$$

Die Schaltzeiten und die parasitären Kapazitäten wirken deshalb identisch auf das Ausgangssignal (t_Z).

In der Praxis bestehen die parasitären Kapazitäten vor allem aus Kapazitäten, die innerhalb von Bauteilen parallel zur Messkapazität liegen. Insbesondere sind die Eingangskapazitäten der verwendeten Triggerschaltung und des Schutzschirm-Operationsverstärkers, die internen Kapazitäten der Ladewiderstände sowie durch unvollkommene Potenzialnachführung nicht unterdrückte Restkapazitäten zwischen dem Schutzschirm und der Messstelle die Ursachen. Die parasitären Kapazitäten liegen im allgemeinen in einer Größenordnung von einigen bis wenigen -zig pF.

Die Schaltzeiten der elektronischen Bauteile liegen je nach Typ im allgemeinen zwischen 1 μ s und 1 ns. Mit Hilfe des Ladewiderstands R und den Triggerspannungen U_i lassen sich diese Zeiten in Kapazitäten umrechnen. Es gilt für die Umwandlung von Kapazität in Zeit:

$$t = R \cdot C \cdot \ln\left(\frac{U_L - U_u}{U_L - U_o} \cdot \frac{U_o}{U_u}\right) \Leftrightarrow C = \frac{t}{R \cdot \ln\left(\frac{U_L - U_u}{U_L - U_o} \cdot \frac{U_o}{U_u}\right)}$$

Der Faktor $\ln\left(\frac{U_L - U_u}{U_L - U_o} \cdot \frac{U_o}{U_u}\right)$ beträgt in der Praxis etwa zwischen 0,8 und 1. Für hohe Widerstände, etwa von 10M Ω , beträgt damit das Kapazitätsäquivalent zu einer Schaltzeit von 1ns etwa 0,1fF. Da die Schaltzeiten dieselbe Wirkung wie die parasitären Kapazitäten haben, können Sie bei der Auswertung mit demselben Mechanismus eliminiert werden.

Die Signale breiten sich auf den Leiterbahnen mit einer Geschwindigkeit in der Größenordnung von einigen zehn ps pro Millimeter aus. Dabei ist gegenüber der Ausbreitung im freien Raum vor allem die Dielektrizitätskonstante der Platine wirksam. Die Laufzeit für einen Zentimeter liegt daher in der Größenordnung einiger hundert ps, was einer halben Schaltzeit entsprechen kann. Die Laufzeiten sind daher bei kompaktem Schaltungslayout normalerweise vernachlässigbar. Außerdem handelt es sich um einen systematischen, wiederkehrenden Messfehler, der mit demselben Mechanismus wie parasitären Kapazitäten beseitigt werden kann.

Bei einer vorgegebenen relativen Auflösung innerhalb eines vorgegebenen Messbereichs schränken parasitäre Kapazitäten den Messbereich ein, der für die Messung tatsächlich nutzbar ist. Eine auf diesen tatsächlich nutzbaren Messbereich bezogene nutzbare relative Auflösung ist daher schlechter, als wenn keine oder kleinere parasitäre Kapazitäten vorhanden wären. Kann der Messbereich beispielsweise in 10000 Inkremente unterteilt werden, und werden davon 5000 konstant durch die parasitären Kapazitäten belegt, so sinkt die tatsächlich nutzbare Anzahl von Inkrementen um den Faktor 2. Der Kehrwert der Anzahl der nutzbaren Inkremente ist die relative Auflösung, die sich mathematisch folgendermaßen darstellt:

$$\frac{\Delta C}{C_M} < \frac{\Delta C}{C_M - C_p}$$

wobei ΔC Absolute Auflösung der Schaltung,
 C_M Kapazitätsmessbereich, und
 C_p parasitäre Kapazitäten bedeutet.

Auf diese Weise verschlechtern parasitäre Kapazitäten beziehungsweise analog Zeitverzögerungen die Genauigkeit des gesamten Messsystems, insbesondere wenn diese in der Größenordnung der Messkapazität beziehungsweise der Ladezeiten auftreten. Darüber hinaus macht sich dann auch die Stabilität der parasitären Kapazitäten beziehungsweise der Zeitverzögerungen im Messergebnis störend bemerkbar.

7.7 Drift

Die Drift verursacht den größten Fehler in den Relaxationsoszillatoren. Sie entsteht durch Drift einzelner Eigenschaften von Bauteilen, die besonders starken Einfluss auf das Messergebnis haben.

Dies betrifft insbesondere die Triggerschwellen. Wenn diese in aktive Bauteile, wie etwa NAND-Gatter mit Schmitt-Trigger-Eingängen, integriert sind, kann deren Drift nur durch Temperaturstabilisierung verbessert werden. Messungen der Drift der Triggerschwellen ergaben Werte von $5 \cdot 10^{-4}$ bis $2 \cdot 10^{-5}/^\circ\text{C}$ (Philips 74F132N, NAND-Gatter mit Schmitt-Trigger-Eingängen). Diese schwanken auch über die Gatter auf einem einzelnen Baustein, insbesondere zwischen oberer und unterer Triggerschwelle um typischerweise Faktor 10, und um bis Faktor 3 zwischen den gleichen Triggerschwellentypen. Bei externen Triggerschwellen können driftarme Widerstände verwendet werden, die bis etwa $10^{-6}/^\circ\text{C}$ erhältlich sind.

Eine weitere Driftquelle ist der Ladewiderstand. Die genaue Größe und Richtung der Drift ist bei herkömmlichen Metallfilmwiderständen nicht klar definiert. Sie liegt typischerweise in der Größenordnung von $10^{-5}/^\circ\text{C}$.

Eine weitere große Driftquelle ist die Ausgangsspannung von Gattern. Sie wird über Halbleiterschalter erzeugt, wobei die Halbleiterstrecke insbesondere bei bipolaren Transistoren erhebliche Drift erfährt.

Nicht zuletzt schlägt auch eine Drift der Versorgungsspannung mit etwa identischer relativer Größe auf das Ausgangssignal durch. Eine sehr sorgfältige Stabilisierung ist daher für hochgenaue Messungen unbedingt erforderlich. Der Haupteffekt ist, dass durch die driftende Versorgungsspannung auch die Ladespannung driftet. Er wird offensichtlich durch das Mitdriften der (internen) Triggerschwellen nicht ausreichend kompensiert.

Eine wirksame Methode, die Drift weitestgehend zu beseitigen, ist die thermische Stabilisierung der

gesamten Schaltung. Diese kann dazu kompakt aufgebaut und in ein thermisch stabilisiertes Gehäuse eingebaut werden. Typischerweise wird die Schaltung geregelt auf eine Temperatur oberhalb der maximal zu erwartenden Außentemperatur geheizt, Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Schaltung auf $40 \pm 0,2^\circ\text{C}$ stabilisiert, wodurch die Drift nicht mehr messbar war ($<10^{-5}$). Dies bedeutet eine Verbesserung um mindestens Faktor 8 im Vergleich zu unstabilierten Versionen.

Eine weitere Methode, die Drift vom Hardwareaufwand her unaufwendiger zu verringern, ist es, die Temperatur der Schaltung zu messen und eine rechnerische Kompensation im Rahmen der Nachverarbeitung der Messwerte durchzuführen. Dazu muss eine Driftkennlinie der Schaltung aufgenommen werden. Versuche zeigen, dass eine relative Driftkennlinie von der Aussteuerung der Schaltung weitgehend unabhängig ist. Die Kennlinie hatte in der realisierten Version jedoch erhebliche nichtlineare Anteile, sodass eine lineare Kompensation eine Verbesserung von nur etwa Faktor 3 liefert. Eine verbesserte Kompensation, die die Nichtlinearität berücksichtigt, könnte die Drift weiter verbessern.

7.8 Linearität

Die Linearität der Relaxationsoszillatoren mit Haltespannung ist im Normalfall sehr gut und liegt bei 10^{-4} oder besser. Entsprechende Werte wurde an mehreren Exemplaren einer Schaltung experimentell ermittelt. Die gute Linearität ist durch den linearen Zusammenhang zwischen Zeit und Kapazität über die zeitlich stabilen Größen Ladespannung und Ladewiderstand begründet. Bei einer gut konstruierten Schaltung sind außerdem die parasitären Anteile des Messergebnisses nicht vom Messeffekt abhängig und tragen daher nicht zur Nichtlinearität der Kennlinie bei. Die Ursache für die verbleibende Nichtlinearität konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht ermittelt werden; es ist denkbar, dass sie deutlich kleiner ist, als sie gemessen wurde, da sie in der Größenordnung der Fehler durch Drift liegt.

7.9 Wahl des Auswertungsprinzips

Als Auswertungsprinzipien stehen wie schon erwähnt Tiefpassfilterung und die anschließende Verwendung des gefilterten Signals als Analogspannung sowie das Auszählen von Zyklen, Ladezeiten oder Frequenzen des Ausgangssignals zur Wahl.

Nachteil der Version mit Analogspannung ist, dass sie, um digitale Daten zu erhalten, die für die vorliegende Arbeit erforderlichen sind, mit einem A/D-Wandler digitalisiert werden muss. Dazu ist eine hochpräzise Spannungsreferenz erforderlich, mit der die erforderliche Wandlungsgenauigkeit von mindestens 10^{-5} , besser 10^{-6} , also mindestens etwa 16,5 Bit, besser 20 Bit, erreicht werden kann. Die Realisierung solcher Genauigkeiten von Spannungen ist aufwendig. Auch die Tiefpassfilterung muss diese Qualität erreichen.

Einfacher und kostengünstiger ist die Verwendung eines Wandlers mit einem Quarzoszillator als Referenz, der schon ungestabilisiert eine Genauigkeit von 10^{-6} erreicht. Der Messbereich ist in Richtung zu längeren Zeiten hin nicht prinzipiell begrenzt. Darüber hinaus entfällt der Tiefpass, der stattdessen digital realisiert werden kann. Diese Variante wird daher bevorzugt.

Es wurde folglich eine Auswertungsplatine entwickelt, die einen Zähler auf Basis eines 100MHz-Quarzoszillators, einen 8-Bit-Mikrocontroller (Siemens SAB80C537), zwei Schrittmotorsteuerungen mit Mikroschrittbetrieb (in dem Chipsatz NRC3910 und NRC3960 realisiert) und eine RS232-Schnittstelle enthält. Der Mikrocontroller kann den Zähler auslesen, zwei Motoren ansteuern und extern mit z.B. einem PC kommunizieren.

8 Zentrierer

8.1 Einleitung

Zur Nutzung der Vorteile von ringförmigen Messelektroden ist es erforderlich, den Messkopf in der Bohrung zu zentrieren (siehe Kapitel 4). Einer der Kernpunkte dieser Arbeit ist die Erkenntnis, dass es möglich ist, den Messkopf ausschließlich auf Grundlage der Messergebnisse in der Bohrung zu zentrieren, und dadurch den größten Fehler der Messung, die Dezentrierung, weitestgehend zu eliminieren (siehe Kapitel 9). Der Messkopf wird dazu an dem Zentrierer befestigt, welcher selbst mechanisch mit der Bohrung verbunden ist. Dadurch wird eine Relativbewegung zwischen Messkopf und Bohrung ermöglicht. Im Rahmen dieser Arbeit wurden mehrere Zentrierer, die auf verschiedenen Prinzipien basieren, aufgebaut und erprobt.

8.2 Anforderungen

Für die Messung wird als Zentrierer ein zweiachsiges Positioniersystem benötigt, das kleine Schritte in Inkrementen realisieren kann. Informationen über die absolute Position des Messkopfes in Bezug auf die Bohrungswand sind nicht erforderlich. Dies bedeutet auch, dass in dem Zentrierer kein Messsystem erforderlich ist, sondern die Information über die Anzahl verfahrenere Inkremente ausreicht.

Die Genauigkeitsanforderungen an die Zentriereinheit ergeben sich aus der geforderten Gesamtgenauigkeit für das Messsystem. Mit Hilfe der in Kapitel 4 angegebenen Zusammenhänge zwischen der Kapazität der Messanordnung und der Exzentrizität kann eine Anforderung an die kleinste erforderliche Schrittweite der Zentriereinheit definiert werden. Die Anforderungen an die Zentriergenauigkeit steigen, je kleiner die Differenz zwischen Bohrungs- und Messkopfdurchmesser ist und je höher die geforderte Gesamtmessgenauigkeit ist. Die mögliche Gesamtmessgenauigkeit wird jedoch vor allem durch die Genauigkeit der Kapazitätsmessschaltung und durch die Qualität des Positionieralgorithmus begrenzt. Letztere hängt mit der Genauigkeit der Kapazitätsmessschaltung zusammen. Folglich muss nur die Genauigkeit der verwendeten Messschaltung multipliziert mit einem Faktor für die Auswirkungen des Zentrieralgorithmus (siehe Kapitel 11) zur Berechnung der erforderlichen Zentriergenauigkeit herangezogen werden. Erster Ansatz ist dabei die Forderung, dass die Auflösung des Zentrierers mindestens so klein sein soll, wie die Exzentrizität des Messkopfes, die dem Fehler des gemessenen Durchmessers durch die Messschaltung entspricht. Diese Restexzentrizität lässt sich mit Hilfe von statistischen Methoden weiter verringern (siehe Kapitel 9 und 11), was die Anforderungen an den Zentrierer erhöht. Sie stellt deshalb ein sinnvolles Maß für die Auslegung der Schrittweite dar.

Die Restexzentrizität lässt sich wie folgt berechnen. Ausgangspunkt ist die Genauigkeit der Messelektronik. Damit kann eine Gleichung aufgestellt werden, in der diese Genauigkeit der Kapazitäts-

differenz zwischen der exakten Mittenposition und einer dezentrierten Position mit der Restexzentrizität gleichgesetzt wird:

$$\Delta C_{\text{Messschaltung}} = \frac{2\pi \epsilon l}{\operatorname{arcosh}\left(\frac{R_a^2 + R_i^2 - ex_{\text{Rest}}^2}{2R_a R_i}\right)} - \frac{2\pi \epsilon l}{\ln\left(\frac{R_a}{R_i}\right)}$$

Diese Gleichung lässt sich nach der Restexzentrizität auflösen:

$$ex_{\text{Rest}} = \sqrt{(R_a^2 + R_i^2 - 2 \cosh\left(\frac{2\pi \epsilon l}{\Delta C_{\text{Messschaltung}} + \frac{2\pi \epsilon l}{\ln\left(\frac{R_a}{R_i}\right)}}\right) R_a R_i)}$$

Die berechneten Werte müssen zur Bestimmung der Schrittweite des Zentrierers durch die Anzahl der Werte, über die die Statistik im Rahmen der Verringerung der Restexzentrizität ermittelt wird, geteilt werden. Bei dem im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Algorithmus wurde die Restexzentrizität in zehn Schritte unterteilt.

Die Restexzentrizität hängt außerdem vom angemessenen Bohrungsdurchmesser ab. Deshalb sinkt die erforderliche Schrittweite mit diesem. Im Bereich von Bohrungen, die nur unwesentlich größer als der Messkopf sind, dominiert daher der Fehler der Zentrierers. Eine Grenze für die Steigerung der Genauigkeit durch Ausdehnung des Messbereichs nach unten mittels Verwendung von zunehmend genaueren Zentrierern findet sich in den Abweichungen der Geometrie des Messkopfes von einem idealen Zylinder.

Außerdem werden an die Zentriereinheit folgende zusätzliche Anforderungen gestellt:

- Verschiebung des Messkopfes um 200µm in in zwei zueinander senkrechten Richtungen. Diese Anforderung resultiert aus einer erwarteten Qualität der Vorpositionierung des Messkopfes in der Bohrung von ±100µm. Diese Annahme ist für die Vorpositionierung mit einem Reitstock, der Spindel einer Fräsmaschine, einem Industrieroboter oder einer speziellen Vorrichtung realistisch.
- Sehr geringe Hysterese bzw. Umkehrspiel
- Eigenfrequenz deutlich größer als die für die Positionierschritte verwendete Frequenz
- Ausreichende Dämpfung
- Ausreichende Nutzlast. Diese wird dadurch definiert, dass der Zentrierer die Masse des Messkopfes und des beweglichen Teils des Zentrierers in waagrechter Lage gegen die Schwerkraft halten und zusätzlich eine Beschleunigung realisieren können muss.

- Ausreichende Verfahrensgeschwindigkeit für eine gute Messdynamik. Der Algorithmus erfordert vielfach, dass ein Schritt ausgeführt wird und anschließend eine Messung durchgeführt wird. Die Positionergeschwindigkeit hat daher einen merklichen Einfluss auf die Gesamtdauer einer Messung.
- Für vollautomatische Messung elektrisch ansteuerbar; Handverstellung für Handmessgeräte

8.3 Ausführungen

8.3.1 Fräsmaschine

Für erste Versuche wurden die Achsen einer Fräsmaschine verwendet. Der Messkopf wurde dabei an der stillstehenden Spindel und die Bohrung im Bearbeitungsvolumen befestigt. Mit diesem Aufbau wurde die Abhängigkeit der der Kapazität von Ringsegmenten in der Bohrung in Abhängigkeit von ihrer Position gemessen.

8.3.2 Fünf-Achsen-Positionierer

Für weitere Versuche wurde ein 5-Achsen-Positionierer konstruiert und aufgebaut. Dieser verfügt über drei Linearachsen und zwei Schwenkachsen. Die Bohrung kann auf einen xy-Tisch aufgenommen werden, der mit Mikrometerschrauben verstellbar ist. Dieser dient dazu, eine Dezentrierung einzustellen. Der Messkopf ist an einer z-Achse befestigt, die zum einführen des Messkopfes in die Bohrung dient. Sie kann um zwei Achsen geschwenkt werden. Die Schwenkachsen sind mit Schneckengetrieben realisiert und die Hebel sehr steif ausgeführt. Die Schwenkachsen dienen der Simulation von Verkippung des Messkopfes in der Bohrung.

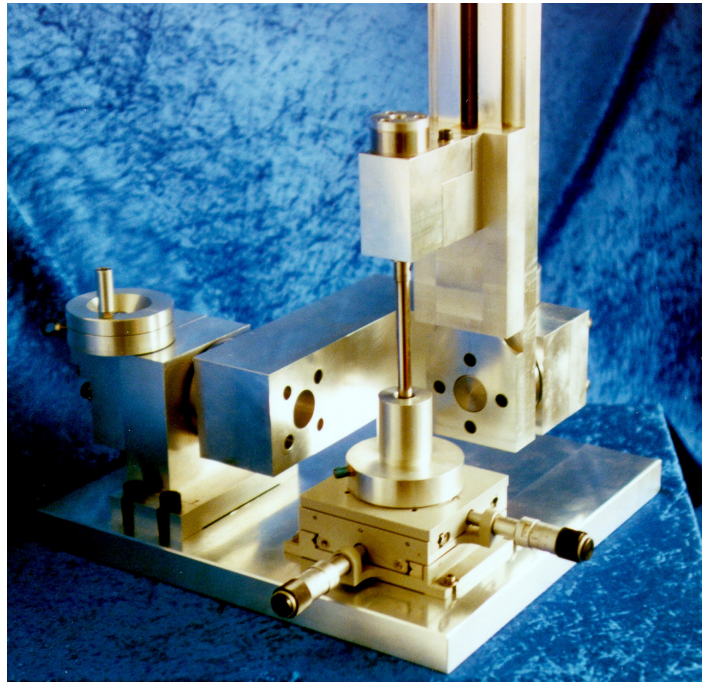
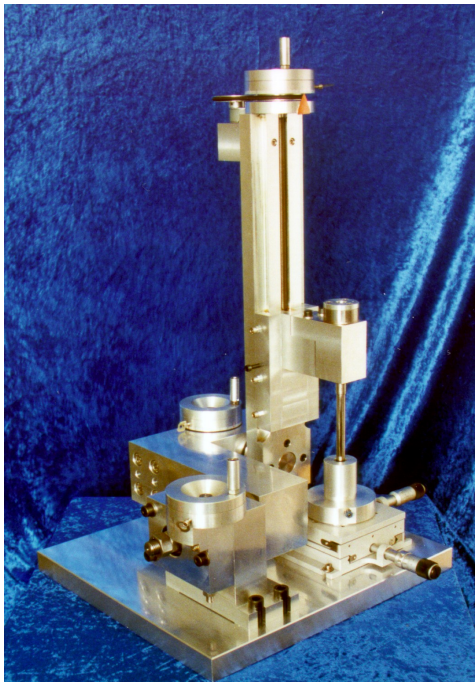


Abbildung 8.1: Fünf-Achsen-Positionierer, Messkopf in Bohrung auf Kreuztisch, 2 Kippachsen, Z-Achse. Diese Vorrichtung wurde auch für die Versuche verwendet.

8.3.3 Handbetätigter elastischer Zentrierer

Für ein Handmessgerät für den Einsatz auf Drehmaschinen wurde ein von Hand verstellbarer Zentrierer entwickelt. Dieser besteht aus einem Aluminiumstab mit quadratischem Profil, in dem durch zwei quer zueinander eingebrachte Bohrungen Dünnstellen geschaffen wurden, die als Parallelfedergelenke wirken. An einem Ende wurde ein Morsekegel für die Aufnahme in einem Reitstock angebracht und anschließend eloxiert, um die Oberflächenhärte zu erreichen, die für mehrfache Aufnahme in einem Innenkonus erforderlich ist. An diesem Ende sind an zwei unter 90° zueinander stehenden Seiten zwei Ausleger angeschraubt, an deren Enden zwei Stellschrauben angebracht sind. Diese wirken über polierte Stahlkugeln auf weiche Federn, die jeweils auf eine der Federführungen drücken. Dadurch wird eine Kraftübersetzung zwischen der Stellbewegung der Stellschrauben und dem beweglichen Ende des Aluminiumstabs bewirkt. Auf diese Weise wird eine sehr feine, ruckfreie Verstellbarkeit im Submikrometerbereich erreicht. Durch die Befestigung der Ausleger an der Aufnahmeseite des Zentrierers beeinflussen die Handkräfte die Position des beweglichen Endes nicht. An dem beweglichen Ende ist der Messkopf mit einem Dauermagnetsystem (im rechten Bild in Abbildung 8.2 in der Bohrung rechts unten im Bild erkennbar) befestigt, der mit dem Zentrierer an Hand des Messergebnisses manuell in der Bohrung zentriert werden kann. Die Stege neben den großen Bohrungen erwiesen sich als zu steif, um einen ausreichenden Verstellweg zu realisieren und wurden durch Federbleche ersetzt, wie im rechten Bild in Abbildung 8.2 zu sehen ist. Der Verstellweg beträgt mit Federblechen für beide Richtungen jeweils 200µm.

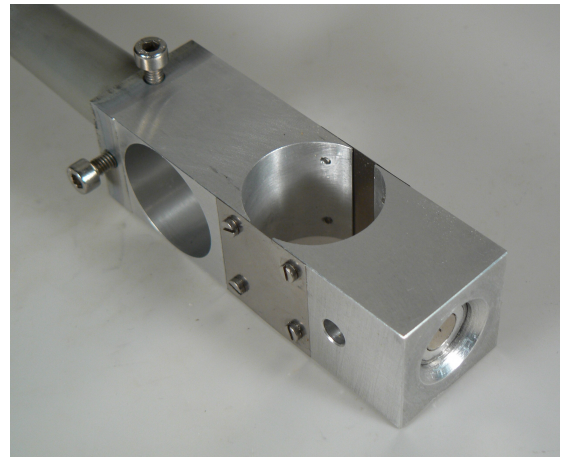


Abbildung 8.2: Handverstellbarer Zentrierer für Drehmaschine. Links Version mit Federsteg, rechts Version mit Federblechen.

8.3.4 Elektromagnetischer elastischer Zentrierer I

In einer weiteren Stufe wurde ein Zentrierer für die Aufnahme auf einer Drehmaschine mit Magnetantrieb konstruiert und aufgebaut. Dieser wurde für die Verwendung bei einer vollautomatischen Messung vorgesehen. Um einen kompakteren Aufbau mit Magnetantrieb zu realisieren, wurde die verbesserte Version mit vier Stabfedern ausgeführt. Diese bestehen aus hochfestem Aluminium (AlZnMgCu 1,5) und sind nahe der beiden Enden zur Ausformung als Federgelenk mit zwei Dünnstellen versehen. Diese Konstruktion ermöglicht aufgrund der langen Hebel zwischen den Dünnstel-

len eine größere Auslenkung und eine geringere Steifigkeit, die hier auf Grund der begrenzten Magnetkräfte vorteilhaft ist.

Die Magnetkräfte zur Verstellung werden an dem beweglichen Teil des Positionierers erzeugt, der an den Stabfedern aufgehängt ist. Die Kräfte werden in je einem Spalt für jede Richtung zwischen dem beweglichen und einem feststehenden Teil erzeugt, wobei die Spalte in je in einem Magnetkreis mit elektrisch veränderbarer Durchflutung liegen. Die Durchflutung wird mit je einer Spule je Magnetkreis erzeugt. Grundsätzlich können mit einem solchen Magnetsystem nur Zugkräfte erzeugt werden. Wegen des begrenzten Bauraums konnten nur zwei Magnetsysteme untergebracht werden, so dass die Mittellage des Zentrierers bei halber Auslenkung der Federn erreicht wird. Die Grund-Dezentrierung in Größe des halben Verstellbereichs ist durch eine Vormagnetisierung durch Dauermagneten realisiert, die einen Teil des Kreises bilden. Eine Umkehr der Stromrichtung in den Spulen verringert die Vormagnetisierung bis auf Null, was theoretisch Kraftfreiheit der Stabfedern bedeutet. Als Alternative ohne die Vormagnetisierung kann die Messkopfaufnahme dezentriert vorgesehen werden, wobei dann jedoch der halbe Maximalstrom fließen muss, um die Mittenposition zu erreichen. Der Aufbau ist in Abbildung 8.3 gezeigt.



Abbildung 8.3: Magnetisch antriebener Zentrierer I mit Stabfedern und zwei Spulen

In der Praxis zeigte der Magnetkreis starke Hysterese aufgrund des nicht ausreichenden weichmagnetischen Magnetmaterials, das für den Magnetkreis verwendet wurde. Da in der Praxis beim Zentrieren das Umkehren der Bewegungsrichtung erforderlich ist, ist der Zentrierer in der Praxis auf Grund sei-

ner Hysterese nicht brauchbar. Dadurch, dass beide Magnetkreise auf dasselbe Zugstück im beweglichen Teil des Zentrierers wirken, zeigen die beiden Magnetkreise eine unerwünschten Kreuzkopplung. Mit einem besseren Magnetmaterial wie etwa der Legierung Mu-Metall (NiFe19) könnten die Eigenschaften jedoch drastisch verbessert werden.

8.3.5 Elektromagnetischer elastischer Zentrierer II

In einer weiteren Ausführung wurde ein Zentrierer für ein Tischgerät konstruiert und aufgebaut. Dieser hat ein ähnliches Konzept wie der in Abschnitt 8.3.4 beschriebene magnetgetriebene Zentrierer zur Aufnahme in einer Drehmaschine, mit dem Unterschied, dass hier vier Magnetsysteme vorhanden sind. Von diesen sind maximal zwei gleichzeitig aktiv und ziehen den Messkopfträger jeweils in ihrer Richtung aus der Mitte. Daher ist die Nulllage die Position ohne Stromfluss in den Spulen. Die Kreuzkopplung ist durch die weitgehend voneinander unabhängigen Magnetsysteme gegenüber der Version mit zwei Spulen deutlich reduziert.

Der Zentrierer ist in Abbildung 8.4 gezeigt. Die vier Spulen sind unter des horizontalen Jochen angeordnet und bilden mit ihrem weichmagnetischen Kern den Rückschluss. Durch die Magnetkräfte wird der Spalt zwischen den Jochen und dem federgelagerten Zentraltisch verringert. Am Zentraltisch sind eine der vier Stabfedern, die nach unten führt, und oben der Messkopf zu sehen.

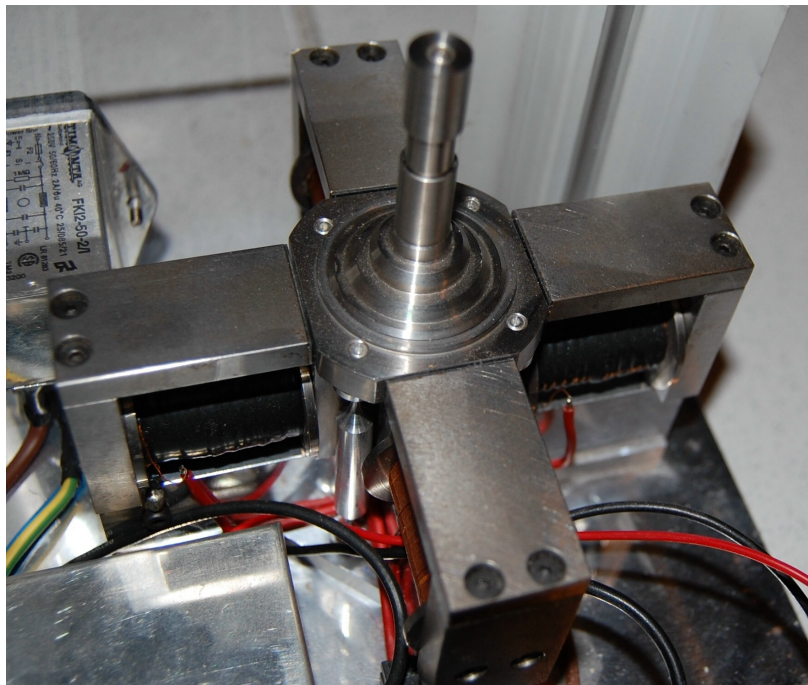


Abbildung 8.4: Magnetisch angetriebener Zentrierer II mit vier Elektromagneten

Da die Teile des Magnetsystems aus Kostengründen aus Baustahl gefertigt werden mussten, arbeitete auch dieses System auf Grund der großen Hysterese beim Umkehren der Bewegungsrichtung nicht reproduzierbar. Die Größe der Hysterese ist von der Vorgeschichte der ausgeführten Bewe-

gungen abhängig, sodass sie nicht ohne weiteres per Software kompensiert werden kann. Diese nur sehr aufwendig zu lösende Problematik führte dazu, dass im Weiteren keine direkt magnetischen Zentrierer mehr verwendet wurden.

8.3.6 Kreuztisch mit Schrittmotoren

Um das Messsystem im Labor betreiben und verschiedene Positionieralgorithmen prüfen zu können, wurde der Kreuztisch des oben beschriebenen 5-Achsen-Positionierers mit Schrittmotoren ausgerüstet. Der Kreuztisch ist so über seine Mikrometerschrauben mit einer Steigung von 0,5 mm und den daran angekuppelten Schrittmotoren mit 200 Vollschritten pro Umdrehung verstellbar. Daraus ergibt sich ein Weg von 2,5 μm pro Vollschrift. Die Ansteuerung ist mikroschrittfähig bis zu 128 Mikroschritten pro Vollschrift. Theoretisch ergibt sich damit eine Auflösung von ca. 20nm pro Mikroschritt.

Diese wird jedoch vor allem auf Grund der relativ hohen Reibung der Mikrometerschrauben nicht erreicht. Außerdem führt die Reibung zu einer geringen Hysterese bei Richtungsumkehr der Bewegung. Wegen der Ungleichmäßigkeit der Schrittweiten der Motoren entlang einer Umdrehung und vor allem wegen der schlechten Eignung von Standard-Hybridschrittmotoren für den Mikroschrittbetrieb gibt es außerdem Abweichungen der Istposition von der theoretischen Sollposition. Dies ist jedoch für die vorliegende Anwendung von untergeordneter Bedeutung.

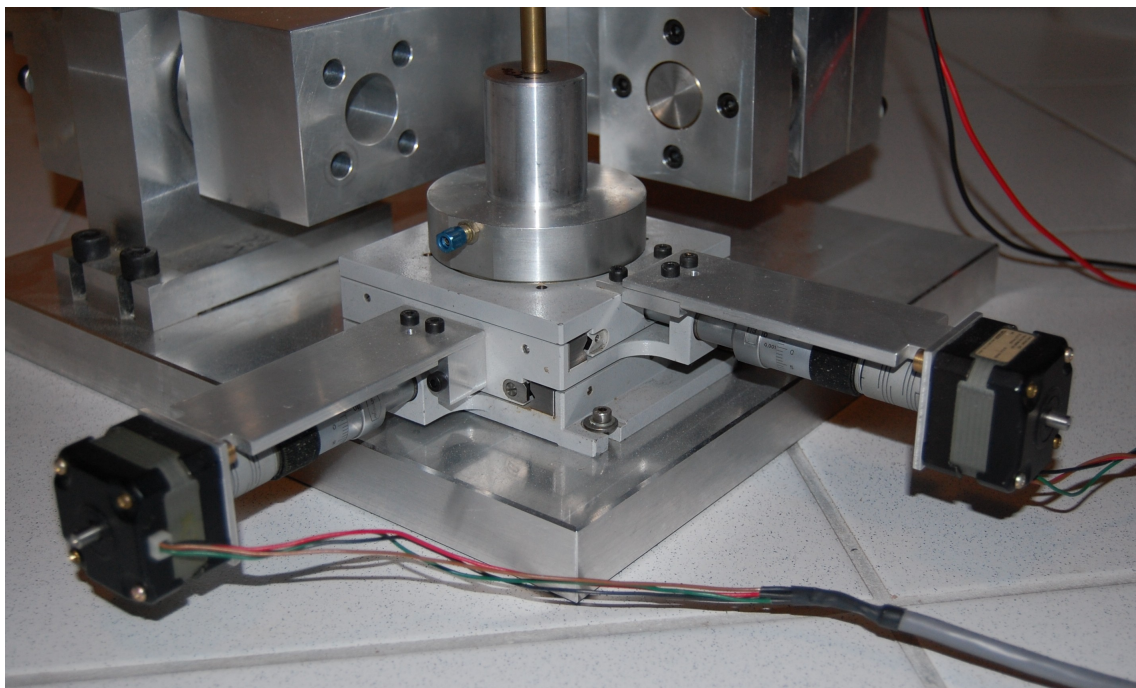


Abbildung 8.5: Kreuztisch des 5-Achsen-Positionierers mit angekuppelten Schrittmotoren

Der Kreuztisch verfügt über zwei über Kreuz angeordnete, vorgespannte Führungen, bei denen Kugeln in zwei V-Nuten laufen. Durch die Vorspannung ist er in Querrichtung hysteresefrei. In Längsrichtung sind beide Achsen mit Schraubenfedern gegen die Mikrometerschrauben vorgespannt. Dadurch ist die Führung auch in Antriebsrichtung hysteresefrei.

Eine Vermessung der Bewegung des Kreuztisches im Vergleich zur Sollposition ergab den Verlauf, der in Abbildung 8.6 dargestellt ist. Die Werte wurden mit einem induktiven Wegmesssystem vom Typ MAHR Millitron und einem induktivem Taster P 2004 M ermittelt.

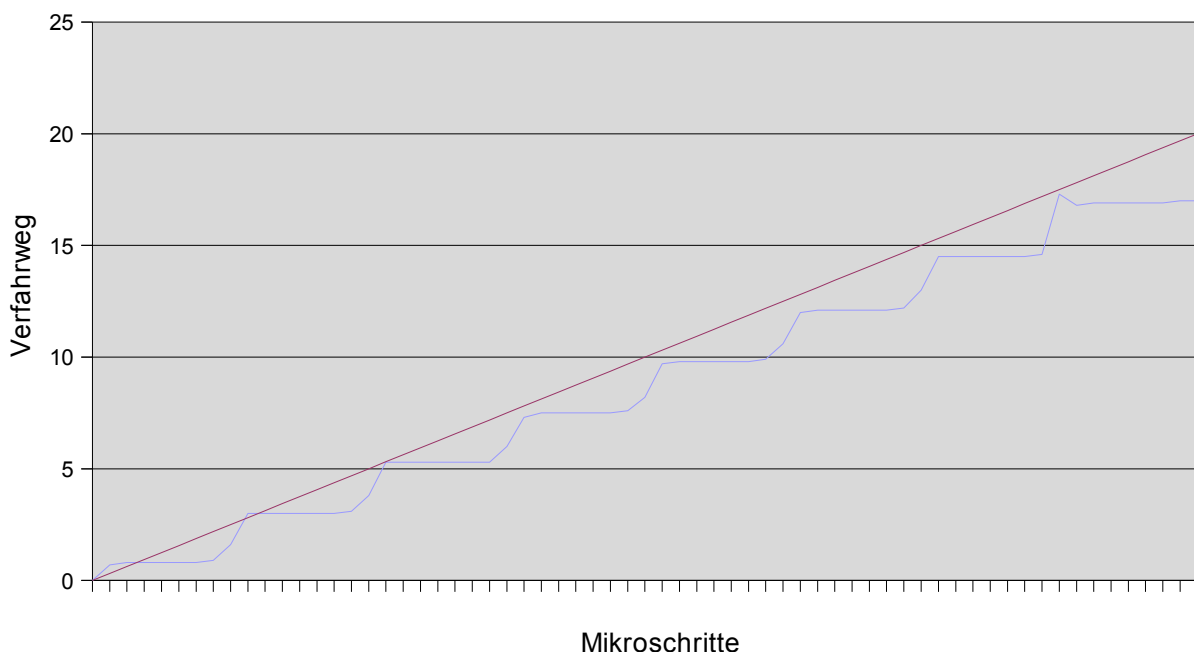


Abbildung 8.6: Verlauf der Bewegung des schrittmotorgetriebenen Kreuztisches im Mikroschrittbetrieb in μm ; die Nennschrittweite der Mikroschritte beträgt $0,5\mu\text{m}$ ($1/8$ Vollschritt)

Der Anstieg des Mittelwertes der Positionsabweichung zeigt, dass ein weitere Effekt, beispielsweise das Eindrücken von Elementen, die vorgespannt werden oder eine fehlerhafte Spindelsteigung vorhanden sind. Für die Anwendung im vorliegenden Messsystem ist dies jedoch nicht schädlich.

In der Abbildung 8.7 ist die Abweichung zwischen Sollposition und Istposition dargestellt. Dies stellt die Positioniergenauigkeit des Zentrierers dar.

Die Positioniergenauigkeit kann durch Verwendung von Schrittmotoren, die für Mikroschrittbetrieb geeignet sind, verbessert werden; z.B. können Scheibenläufer-Schrittmotoren eingesetzt werden.

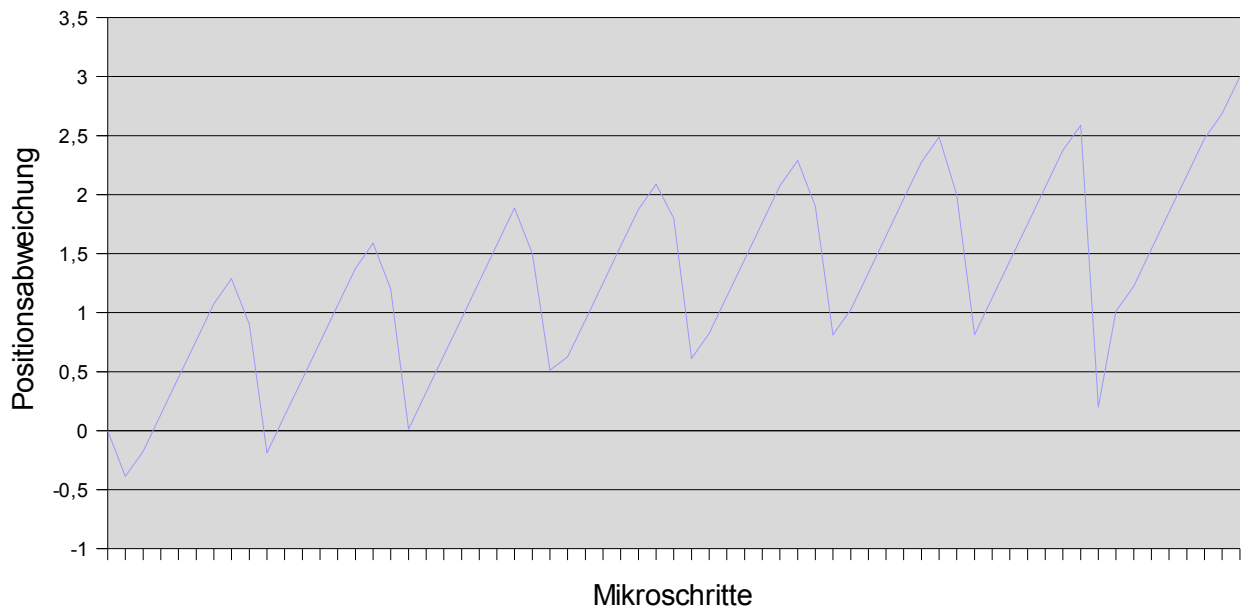


Abbildung 8.7: Positioniergenauigkeit in μm des schrittmotorgetriebenen Kreuztischs im Mikroschrittbetrieb; die Nennschrittweite der Mikroschritte beträgt $0,5\mu\text{m}$ ($1/8$ Vollschritt)

9 Positionregelung

9.1 Grundlegende Betrachtungen

Eine mathematische Betrachtung der vorliegenden Aufgabe, den Bohrungsdurchmesser mit einem Messkopf mit einer achsparallelen ringförmigen Fläche zu bestimmen, zeigt, dass es in der Formel zur Berechnung des Durchmessers drei Unbekannte gibt. Dies sind der Bohrungsdurchmesser und die Messkopfposition in der Bohrung, die aus zwei Unbekannten in zwei Richtungen besteht.

Grundsätzlich kann der Bohrungsdurchmesser mit zwei prinzipiell verschiedenen Methoden bestimmt werden, durch die die drei Unbekannten bestimmt werden. Die erste Möglichkeit ist, drei Messungen an verschiedenen Positionen aufzunehmen und mit den gewonnenen Messergebnissen ein Gleichungssystem zu lösen (dreidimensionale Fixpunkt-Aufgabe). Die zweite Möglichkeit ist, den Messkopf von der anfänglichen Position aus in die Mitte der Bohrung zu positionieren, was der Bestimmung von zwei der Unbekannten entspricht, und aus dem dort gemessenen Messwert die letzte Unbekannte, den Bohrungsdurchmesser, zu berechnen (Verfahren zur Minimumsuche).

Achsparallelität wird im folgenden vorausgesetzt und ist in der Praxis durch geeignete Aufnahmen von Messobjekt und Messkopf relativ leicht realisierbar.

9.2 Dreidimensionale Fixpunkt-Aufgabe

Die vorliegende Situation kann in eine dreidimensionale nichtlineare Fixpunkt-Aufgabe überführt werden, indem der Messkopf in x- und y-Richtung um bekannte Wege Δx und Δy verfahren wird. Dann gilt für die gemessene Kapazität an den drei Positionen:

$$\begin{aligned}
 1. \quad C_1 &= \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot l}{\operatorname{arcosh}\left(\frac{Ra^2 + Ri^2 - x^2 - y^2}{Ra \cdot Ri}\right)} \\
 2. \quad C_2 &= \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot l}{\operatorname{arcosh}\left(\frac{Ra^2 + Ri^2 - (x + \Delta x)^2 - y^2}{Ra \cdot Ri}\right)} \\
 3. \quad C_3 &= \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot l}{\operatorname{arcosh}\left(\frac{Ra^2 + Ri^2 - (x + \Delta x)^2 - (y + \Delta y)^2}{Ra \cdot Ri}\right)}
 \end{aligned}$$

Dabei bedeuten C_1 , C_2 und C_3 die gemessenen Kapazitäten, R_a den Bohrungsdurchmesser, R_i den Messkopfdurchmesser, l die Messkopflänge, ϵ die Dielektrizitätskonstante von Luft und x und y die Exzentrizitäten in die jeweiligen Richtungen. Die Gesamtexzentrizität berechnet sich aus

$$e x^2 = x^2 + y^2, \text{ solange die die x- und y-Richtung zueinander senkrecht sind.}$$

Bekannt sind C_1 , C_2 und C_3 , R_i , l und ϵ sowie Δx und Δy . Um die drei Unbekannten R_a , x und y zu bestimmen, sind die nach dem Prinzip „Anzahl der Unbekannten = Anzahl der Gleichungen“ drei Messungen an drei verschiedenen Positionen erforderlich. Wichtig ist dabei, dass nicht nur in eine Richtung verfahren wird, weil sonst bezüglich dieser Richtung eine implizite Abhängigkeit der Gleichungen voneinander entsteht, was bedeutet, dass sie die Information über die Position in die andere Richtung nicht enthalten und sie für sie Position nicht lösbar sind. Bei geeigneten Voraussetzungen können die Anfangsposition in beide Richtungen und der Bohrungsdurchmesser durch numerische Lösung des Gleichungssystems bestimmt werden.

Dieses Vorgehen ist mit mehreren prinzipiellen Schwierigkeiten behaftet. Weil die Änderungen der Kapazität durch Positionsveränderung des Messkopfes klein sein können, wenn dieser in der Nähe der Bohrungsmitte steht, wird die Berechnung gegen kleine Abweichungen in der gemessenen Kapazität anfällig. Die erforderliche Messgenauigkeit bei der Kapazitätsmessung ist deshalb größer als bei anderen Verfahren, die einen einzelnen Messwert, der in der Bohrungsmitte genommen wird, zur Durchmesserbestimmung heranziehen. Die Messwertänderungen durch Positionsveränderung können auch sehr groß sein, wenn der Messkopf nahe an der Bohrungswand steht. Dann ist das Messergebnis jedoch empfindlich von den Verfahrensgrößen Δx und Δy abhängig, weshalb diese sehr genau bestimmt werden müssen. Dies erfordert unter Umständen ein hochgenaues Wegmessgerät an jeder Bewegungsachse. Im Vergleich hierzu ist bei den anderen hier vorgestellten anderen Verfahren die Genauigkeit der Positionsbestimmung nicht so kritisch, weil der Gradient der Kapazität über die Position in der Bohrungsmitte eine Nullstelle hat, und geringe Positionsabweichungen kaum Wirkung haben.

Bei Anwendung dieses Verfahrens muss daher Aufwand für das Auffinden geeigneter Positionen getrieben werden, bei denen die Kapazität gemessen wird. Die Messgenauigkeit der Positionsbestimmung und der Kapazitätsmessung muss hoch sein. Außerdem muss das recht komplizierte Gleichungssystem numerisch gelöst werden, was einen nicht unerheblichen Rechenaufwand verursacht.

9.3 Verfahren zur Minimumsuche

Die besonderen Eigenschaften der vorliegenden Situation ermöglichen jedoch weitere Lösungsansätze. Eine Klasse von Algorithmen lässt sich auf der Tatsache aufbauen, dass die Kapazität in der Bohrungsmitte ein Minimum aufweist, d.h. der Gradient der Funktion ist an dieser Stelle Null.

$$\nabla C(R_a, x_0, y_0) = 0$$

Nach Auffinden dieses Punktes, bei kreisrunden Bohrungen ist dies der Mittelpunkt, ist die Position des Messkopfes in der Bohrung bekannt. Die Positionsregelung muss sich dazu an dem Gradienten der Kapazität über der Position orientieren. Es ist dabei von Vorteil, dass der Bohrungsdurchmesser an diesem Punkt durch eine analytische Funktion explizit berechnet werden kann. Es gilt dann die

sehr viel einfachere Formel für den zentrischen Zylinderkondensator, die sich nach dem Bohrungsdurchmesser auflösen lässt:

$$R_a = \exp\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot l}{C}\right) \cdot R_i$$

Das ursprünglich dreidimensionale Problem zerlegt sich dadurch in ein zweidimensionales Problem des Auffindens der Bohrungsmitte und die anschließende eindimensionale Bestimmung des Bohrungsdurchmessers. Die Schwierigkeiten liegen dabei im Auffinden des exakten Mittelpunktes.

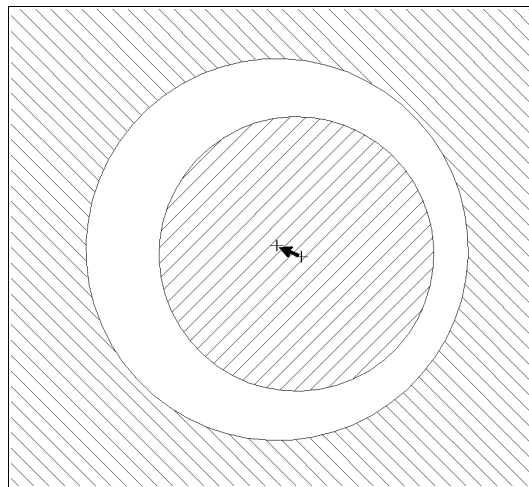


Abbildung 9.1: Dezentrierter Messkopf in einer Bohrung (Querschnitt). Der Pfeil gibt den Weg zur zentrierten Stellung an.

Mathematisch gesehen stellt sich die Frage nach der Errechnung einer Bahn von einer beliebigen Startposition zum Kapazitätsminimum. Als Hilfsmittel hierfür stehen die Auswertung der Kapazität als Funktion der Position des Messkopfes in der Bohrung in Form einer Messung und die inkrementelle Veränderung der Position mit Hilfe des Zentrierers zur Verfügung, wodurch näherungsweise auch die Ableitung der Kapazitätsfunktion bestimmt werden kann. Zur Bestimmung des Bohrungsdurchmessers sind mit diesen Hilfsmitteln verschiedene Vorgehensweisen möglich.

Es sind Algorithmen denkbar, die eine mathematische Auswertung der Funktion des exzentrischen Zylinderkondensators benötigen. Der Bohrungsdurchmesser ist zu Beginn der Messung jedoch noch nicht bekannt. Dieser ist jedoch zur mathematischen Auswertung der Funktion erforderlich. Der Algorithmus kann folglich nur eine Näherung verwenden oder muss ohne die mathematische Auswertung der Funktion auskommen. Eine weitere Schwierigkeit ist, dass die Position des Messkopfes nicht absolut bekannt ist. Der Algorithmus muss daher mit den Verschiebungen vom Anfangspunkt aus funktionieren.

9.3.1 Zweidimensionale Fixpunktaufgabe

Diese Aufgabenstellung ähnelt der mathematischen, iterativen Lösung einer nichtlinearen zweidimensionalen Fixpunktaufgabe für die mechanische Zentrierung. Die Schritte werden im Gegensatz zu einer reinen Rechnung jedoch real als Verschiebungen des Messkopfes durchgeführt und die Funktionswerte der Kapazitätsfunktion durch Messung ermittelt. Ein Unterschied besteht jedoch darin, dass die Iteration nicht mit absoluten Positionswerten, sondern nur mit relativen Verschiebungen bezüglich der vorangehenden Position durchgeführt werden kann.

Mit $ex^2 = x^2 + y^2$ gilt explizit für das zu lösende Gleichungssystem (Minimumsuche):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot l}{\operatorname{arcosh} \left(\frac{Ra^2 + Ri^2 - x^2 - y^2}{Ra \cdot Ri} \right)} \right) = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot l}{\operatorname{arcosh} \left(\frac{Ra^2 + Ri^2 - x^2 - y^2}{Ra \cdot Ri} \right)} \right) = 0$$

Auf die explizite Angabe der partiellen Ableitungen wird verzichtet, da sich diese sehr kompliziert darstellen und konkret nicht weiter verwendet werden. Für die zu lösende Iterationsaufgabe kann die Ableitung durch Messungen bestimmt werden. Die Messung der Ableitungen ist jedoch nicht direkt möglich, sondern muss aus zwei Messungen an Positionen mit bekanntem Abstand voneinander als Näherungswert errechnet werden.

Die vorliegende zweidimensionale Kapazitätsfunktion ist rotationssymmetrisch zum Bohrungsmittelpunkt. Dies lässt sich dadurch zeigen, dass sich die Koordinaten x und y durch Einführen der Exzentrizität $ex^2 = x^2 + y^2$ vollständig eliminieren lassen. Der Einfluss der Position kann dann mit nur einer radialen Koordinate, der Exzentrizität ex , dargestellt werden, was einer rotationsymmetrischen Funktion entspricht. Es gilt dann wieder:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot l}{\operatorname{arcosh} \left(\frac{Ra^2 + Ri^2 - ex^2}{Ra \cdot Ri} \right)} \right) = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot l}{\operatorname{arcosh} \left(\frac{Ra^2 + Ri^2 - ex^2}{Ra \cdot Ri} \right)} \right) = 0$$

Es lässt sich außerdem zeigen, dass sich die Zentrierung einer Richtung unabhängig von der Position in der anderen Richtung durchführen lässt, wenn die Bewegungsrichtungen senkrecht aufeinander stehen. Dazu wird eine Höhenliniendarstellung der Kapazitätsfunktion über der x - y -Ebene betrachtet. Die Linien gleicher Kapazität stellen sich dabei als konzentrische Kreise dar.

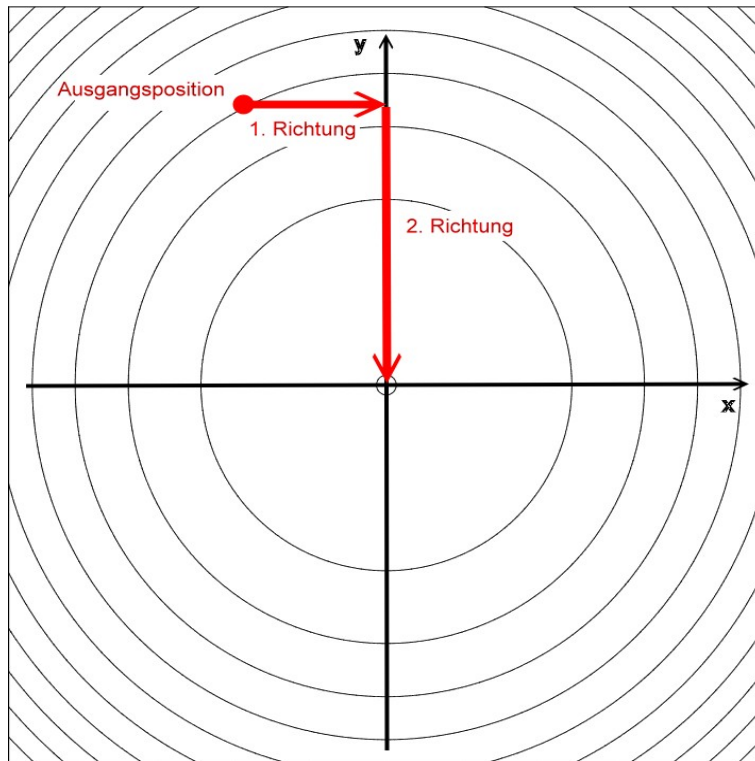


Abbildung 9.2: Linien gleicher Kapazität eines exzentrischen Zylinderkondensators über den Bewegungsrichtungen des Positionierers x und y , die senkrecht aufeinander stehen. Der Ursprung des Koordinatensystems liegt in der Bohrungsmitte. Die Pfeile zeigen den Zentriervorgang in zwei senkrecht aufeinanderstehenden Richtungen.

Die Mitte des Messkopfes hat eine Position in der Ebene in Abbildung 9.2. Es wird nun eine Bewegung des Messkopfes durch Verfahren in einer der Bewegungsachsen betrachtet. Wie aus der Anschauung klar wird, streift die Bewegung den Kreis des in einer beliebigen eingeschlagenen Richtung erreichbaren Kapazitätsminimums immer tangential. Steht nun die zweite Bewegungsachse senkrecht auf der ersten, so ist vom Punkt des Kapazitätsminimums der ersten Richtung aus mit einer Bewegung in die zweite Richtung das absolute Minimum immer erreichbar. Dies bedeutet, dass die Lösung der Differenzialgleichungen oben in die beiden Richtungen voneinander unabhängig und damit nacheinander durchgeführt werden kann.

Stehen die Bewegungsachsen nicht senkrecht aufeinander, so kann der Bohrungsmittelpunkt nach dem Auffinden des Kapazitätsminimums der ersten Richtung nicht getroffen werden. Es muss dann mit weiteren Schritten in beide Richtungen weiter iteriert werden, d.h. die Zentrierung ist nicht in den einzelnen Richtungen unabhängig durchführbar.

Als Regelstrategien kommen grundsätzlich die gängigen Lösungsverfahren für nichtlineare Fixpunktaufgaben in Frage. Dies sind das Sekantenverfahren, das Newton-Verfahren, die Fixpunktiteration und das Bisektionsverfahren [Bro90]. Weitere Verfahren, die die Vorteile der genannten Ver-

fahren kombinieren, und weitere neue Verfahren kommen ebenfalls in Betracht. Das vorliegende Problem kann auf Grund der möglichen Separierung in die beiden Richtungen durch die eindimensionalen Varianten der Verfahren nacheinander gelöst werden. Es müssen jedoch Strategien gefunden werden, die mit relativen Bewegungen und ohne den exakten Bohrungsdurchmesser auskommen. Ein Optimierungskriterium ist auch die insgesamt mit dem Zentrierer zurückzulegende Wegstrecke, um Funktionsauswertungen in Form von Messungen an bestimmten Positionen durchzuführen. Dies hat auf die Messzeit des Gerätes erheblichen Einfluss. Ein Rechenergebnis nach jedem Schrittes kann Richtung und die Schrittweite des nächsten Schrittes sein.

9.3.2 Sekantenverfahren

Das eindimensionale Sekantenverfahren kann alle vorgenannten Forderungen erfüllen. Es bezieht sich auf ein Nullpunktproblem. Voraussetzungen für das Funktionieren des Verfahrens sind zweimal stetige Differenzierbarkeit sowie folgende Kriterien:

$$\left| \frac{\partial f}{\partial x} \right| \geq m > 0$$

$$\left| \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \right| \leq M$$

Dies bedeutet, dass die erste Ableitung nicht Null sein darf und die zweite Ableitung endlich bleiben muss.

Das Sekantenverfahren hat die Iterationsvorschrift [Bro90]:

$$x_{m+1} = x_m + \frac{f(x_m) \cdot (x_m - x_{m-1})}{f(x_m) - f(x_{m-1})}$$

Anschaulich bedeutet dies, dass durch die Punkte x_m und x_{m-1} eine Sekante gelegt wird. Der Schnittpunkt dieser Sekante mit der Abszisse wird als neuer Iterationspunkt x_{m+1} herangezogen.

Die Funktion f ist im vorliegenden Fall die Ableitung der Kapazitätsfunktion. Deren Funktionswerte können durch Messung an zwei nahe beieinanderliegenden Punkten näherungsweise bestimmt werden. Die Iterationsvorschrift kann nach der neuen Schrittweite $x_{m+1} - x_m$ umgeformt werden. $x_m - x_{m-1}$ ist die letzte Schrittweite. Damit sind alle Terme in der Iterationsvorschrift bestimmbar.

Außer im Mittelpunkt erfüllt die Ableitung der Kapazitätsfunktion die Kriterien zweimaliger weiterer Differenzierbarkeit, der strengen Monotonie ihrer ersten Ableitung sowie die Beschränktheit ihrer zweiten Ableitung nach oben und unten. Das Verfahren ist also von den Voraussetzungen her für die Aufgabenstellung prinzipiell geeignet, wobei im und um den Mittelpunkt mit einer Singularität und schlechter Konvergenz zu rechnen ist.

Als Iterationsvorschrift gilt für die Verwendung der mit Berechnung aus zwei Messpunkten angenäherten Ableitung:

$$x_{m+1} = x_m + \frac{\frac{C_m - C_{m-1}}{\Delta x_m} \cdot \Delta x_m}{\frac{C_m - C_{m-1}}{\Delta x_m} \cdot \frac{C_{m-1} - C_{m-2}}{\Delta x_{m-1}}} = x_m + \frac{C_m - C_{m-1}}{\frac{C_m - C_{m-1}}{\Delta x_m} \cdot \frac{C_{m-1} - C_{m-2}}{\Delta x_{m-1}}}$$

Wenn die Weite der Schritte zur Ermittlung der Ableitung konstant gewählt wird, so gilt:

$$\begin{aligned} \Delta x_{m-1} &= \Delta x_m \\ \Rightarrow \Delta x_{m+1} &= \frac{(C_m - C_{m-1}) \cdot \Delta x_m}{C_m - 2 \cdot C_{m-1} + C_{m-2}} \end{aligned}$$

Nachteilig ist in beiden Fällen, dass im Nenner eine Differenz vorkommt. Dies kann zu großen numerischen Fehlern führen, wenn die Terme im Nenner ähnlich werden. Dies ist der Fall, wenn sich der Messkopf auf einer der Achsen nahe der Mittelposition befindet. Noch kritischer ist die Nähe der Bohrungsmitte. Messfehler und numerische Fehler führen dazu, dass nach Erreichen einer Position in der Nähe der Bohrungsmitte große, fehlerbehaftete Schritte auftreten, die den Messkopf zurück oder über die Bohrungsmitte hinweg bewegen und die Zentrierung insgesamt verschlechtern. An andere Sichtweise, die dasselbe aussagt, betrachtet die Tatsache, dass es sich bei der Iterationsformel des Sekantenverfahrens um die näherungsweise Berechnung einer zweiten Ableitung der ursprünglichen Kapazitätsfunktion handelt. Durch die Verwendung einer zweiten Ableitung werden die hohen Frequenzanteile der Messfehler erheblich verstärkt. Es ist deshalb schwierig, die Zentriergenauigkeit zu erreichen, die mit der Verfahrensgenauigkeit des Zentrieres möglich ist, und den Messkopf an dieser Position zu halten. Dies ist eine Folge des Verhaltens des Sekantenverfahrens an der Singularität in der Bohrungsmitte. Ein weiterer Nachteil ist, dass die Steigung integriert werden muss, und diese erstmalig nach der Messung von zwei Punkten mit einem Abstand zueinander zur Verfügung steht. Dies erhöht den Messaufwand insgesamt.

Ein prinzipieller Vorteil des Verfahrens ist jedoch, dass selbst bei Überschreiten des Mittelpunktes, während die Schritte zur Ermittlung der Steigung ausgeführt werden, die Schrittweite zum Nullpunkt in guter Näherung errechnet wird, wenn man die Messgenauigkeit um den Mittelpunkt idealisiert als beliebig hoch ansieht. Dies ist dadurch begründet, dass zur Ermittlung der nächste Schrittweite insgesamt drei Messwerte herangezogen werden, so dass immer eine der ermittelten Ableitungen außerhalb des Mittelpunktes bestimmt wird. Der Fehler der zweiten Ableitung fällt dadurch weniger ins Gewicht als bei anderen Verfahren.

Dennoch zeigt sich mit Hilfe eines Simulationsprogramms als auch in der Praxis, dass das Sekan-

tenverfahren höchstens als Vorstufe für ein weiteres Verfahren tauglich ist, das die abschließende Zentrierung in den exakten Mittelpunkt durchführt. Die liegt zum Teil an dem prinzipiellen Nachteil, dass für Funktionen mit relativ starker Krümmung, wie sie hier vorliegt, prinzipiell mehrere Iterationsschritte bis zum Nullpunkt erforderlich sind, weil die berechnete Sekante auf Grund der Krümmung deutlich neben dem Mittelpunkt zu liegen kommt. Ein weiterer Grund ist, dass das Sekantenverfahren durch die starke Auswirkung der Messfehler um den Nullpunkt herum stark schwingungsgefährdet ist, wobei unklar bleibt, ob der Nullpunkt wirklich getroffen wurde. Es ist dadurch relativ ungenau und folglich zumindest als abschließender Zentrierschritt für die vorliegende Problemstellung untauglich.

9.3.3 Newton-Verfahren

Das Newton-Verfahren ist dem Sekantenverfahren ähnlich. Der Unterschied besteht darin, dass beim Newton-Verfahren keine Sekante verwendet wird, sondern mit Hilfe der Ableitung der Funktion eine Tangente an die Funktion angelegt wird. Der Schnittpunkt mit der Abszisse liefert den nächsten Iterationspunkt. Ist die Ableitung bekannt, so spart man auf diese Weise eine Funktionsauswertung pro Schritt. Im vorliegenden Fall muss die Ableitung mit Hilfe der Messung der Funktion an zwei nahe beieinander liegenden Positionen angenähert werden. Diese Näherung verändert das Newton-Verfahren so, dass es mit dem oben beschriebenen Sekantenverfahren identisch wird.

9.3.4 Bisektionsverfahren

Beim Bisektionsverfahren besteht die zu lösende Aufgabe im Auffinden eines Arguments x , das einem bestimmten Wert der Funktion y zugeordnet ist. Dazu muss vor Beginn des eigentlichen Verfahrens ein Intervall auf der Argumentenachse festgelegt werden, innerhalb dessen das Argument x liegt. Im Verlauf des Verfahrens wird dieses Intervall als Teilintervall des vorangehenden Intervalls iterativ neu festgelegt, bis es das gesuchte Argument ausreichend genau eingrenzt.

Für die vorliegende Aufgabe entsprechen die Argumente der Exzentrizität. Es muss folglich zu Beginn ein Intervall ausgewählt werden, in dem die Bohrungsmitte liegt, da sich dort das gesuchte Argument x befindet. Für die nachfolgende Iteration werden Funktionsauswertungen an beiden Endpunkten des Intervalls benötigt. Die Problematik dabei ist, dass zu Beginn der Messung unbekannt ist, in welche Richtung die Bohrungsmitte liegt. Es ist daher nicht möglich, das Anfangsintervall ohne weiteres festzulegen. Als weiterer Nachteil kommt hinzu, dass die Endpunkte des Intervalls entstehen Zentrierer angefahren werden müssen, um dort eine Funktionsauswertung in Form einer Messung vorzunehmen. Der Zentrierer muss daher die Bohrungsmitte immer wieder überschreiten, was im Vergleich zu anderen Verfahren eine erhebliche Verlängerung des insgesamt zu fahrenden Weges bedeutet.

Insgesamt erscheint das Bisektionsverfahren damit für die vorliegende Aufgabe ungeeignet.

9.3.5 Methode der schrittweisen Mittenannäherung

Die vorliegende Situation ermöglicht eine weitere Vorgehensweise, durch die in der Kapazitätsfunktion ein absolutes Minimum gefunden werden soll. Die Iterationsvorschrift lautet:

Wenn $C_{m-1} - C_m > 0$

dann $Dx_{m+1} = Dx_m$

sonst (bei erster Richtungsumkehr) $Dx_{m+1} = -Dx_m$

sonst (bei weiterer Richtungsumkehr) $Dx_{m+1} = -Dx_m / k$

Dies bedeutet anschaulich, dass der Algorithmus den vorherigen Schritt so lange in dieselbe Richtung wiederholt, wie der Messwert dadurch kleiner wird. Wird der Messwert größer, so wird angenommen, dass die Bohrungsmitte überschritten wurde, die Richtung umgekehrt und die Schrittweite um den Faktor k verkleinert.

Ein Vorteil des Verfahrens ist, dass kein Einschluss des Ergebnisses durch ein betrachtetes Intervall erforderlich ist. Dadurch kann das Verfahren nach einem Rechenfehler immer noch konvergieren. Ein Nachteil ist die insgesamt langsamere Konvergenz als z.B. beim Sekantenverfahren.

Varianten sind möglich, indem z.B. der Faktor k von der Anzahl der Richtungswechsel abhängig gemacht wird oder die Schrittweite schon während der Bewegung in eine Richtung variiert wird.

Das Verfahren wird in den zwei Richtungen nacheinander durchgeführt statt mit einer Gradientenberechnung und gleichzeitiger Bewegung beider Achsen, was ebenfalls möglich wäre. Dies hat zwar die Nachteile einer insgesamt größeren zu fahrenden Strecke und der Notwendigkeit von mehr Messpunkten, jedoch auch den Vorteil, dass nach der ersten Positionierung in der ersten Richtung der Gradient in der zweiten Richtung noch größer ist, weil sich der Messkopf in dieser Richtung noch weiter außerhalb der Mitte befindet. Die Zentrierung ist dadurch in der ersten Richtung besser, als bei einer Gradientenzentrierung. Außerdem ist der Rechenaufwand für die Regeleinheit geringer. Im Rahmen der durchgeführten Versuche wurde ausschließlich diese Variante verwendet.

In der Praxis zeigen sich zwei Schwierigkeiten. Die erste ist, die Anfangsschrittweite so festzulegen, dass sie für alle vorkommenden Situationen geeignet ist. Die Anfangsschrittweite muss groß genug sein, um einen Unterschied der Messwerte vor und nach dem Anfangsschritt zu erzeugen, der die Messgenauigkeit überschreitet, andererseits aber klein genug sein, dass mit Sicherheit nicht die Bohrungsmitte überschritten wird. Die geeigneten Anfangsschrittweiten können um mehr als eine Zehnerpotenz verschieden sein. Dies ergibt sich daraus, dass bei einer Bohrung, die nur unwesentlich größer ist als der Messkopf, eine viel kleinere Schrittweite erforderlich ist, als bei einer Bohrung mit einem deutlich größeren Durchmesser. Es ist daher nur bei einem sehr eingeschränkten Mess-

bereich möglich, eine konstante Anfangsschrittweite zu verwenden.

Diese erste Schwierigkeit lässt sich dadurch lösen, dass der direkt nach dem Eintauchen in Bohrung gemessene Wert herangezogen wird, um daraus einen provisorischen Bohrungsdurchmesser zu bestimmen. Da die Position des Messkopfes noch unbekannt ist, kann diese nicht berücksichtigt werden. Es wird daher die Formel verwendet, die für eine Messung in der Bohrungsmitte gültig ist. Diese liefert eine ausreichend genau Näherung, weil die gemessene Kapazität deutlich stärker vom Bohrungsdurchmesser abhängig ist, als von der Exzentrizität, wenn der Messkopf nicht sehr nahe an der Bohrungswand steht. Dies lässt sich durch Auswertung der Formel für den exzentrischen Zylinderkondensator verifizieren. Es gilt:

$$C_{ex} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot l}{\operatorname{arcosh} \left(\frac{R_a^2 + R_i^2 - ex^2}{2 \cdot R_i \cdot R_a} \right)}$$

Die Änderung der Kapazität mit der Exzentrizität kann durch die Ableitung der angegebenen Formel nach der Exzentrizität und die Änderung mit dem Bohrungsdurchmesser durch die entsprechende Ableitung nach dem Bohrungsdurchmesser angegeben werden.

$$\frac{d C_{ex}}{d ex} = \frac{ex \cdot 4 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot l}{\operatorname{arcosh} \left(\frac{R_a^2 + R_i^2 - ex^2}{2 \cdot R_i \cdot R_a} \right)^2 \cdot \sqrt{R_a^4 + R_i^4 + ex^4 - 2 \cdot (R_a^2 \cdot R_i^2 + R_a^2 \cdot ex^2 + R_i^2 \cdot ex^2)}}$$

$$\frac{d C_{ex}}{d R_a} = \frac{(R_i^2 - R_a^2 - ex^2) \cdot 2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot l}{R_a \cdot \operatorname{arcosh} \left(\frac{R_a^2 + R_i^2 - ex^2}{2 \cdot R_i \cdot R_a} \right)^2 \cdot \sqrt{R_a^4 + R_i^4 + ex^4 - 2 \cdot (R_a^2 \cdot R_i^2 + R_a^2 \cdot ex^2 + R_i^2 \cdot ex^2)}}$$

Wenn die Ableitung nach dem Durchmesser größer ist, so gilt für den Quotienten aus beiden Ableitungen:

$$\frac{\frac{d C_{ex}}{d R_a}}{\frac{d C_{ex}}{d ex}} = \frac{R_a^2 + ex^2 - R_i^2}{2 \cdot R_a \cdot ex} \geq 1$$

Außerdem gilt aus geometrischen Gründen $R_a - R_i \geq ex$. Dies bedeutet eine Abschätzung nach unten, das heißt, ex kann nur kleiner sein. Setzt man ex ein, so wird zu dem linken Term weniger hinzuaddiert, was die Ungleichungsbedingung in jedem Fall erfüllt.

$$\begin{aligned} \Rightarrow \frac{Ra^2 + (Ra - Ri)^2 - Ri^2}{2 \cdot Ra \cdot ex} &= \frac{Ra^2 + (Ra - Ri)^2 - Ri^2}{2 \cdot Ra \cdot ex} = \frac{Ra^2 + Ra^2 - 2 \cdot Ra \cdot Ri + Ri^2 - Ri^2}{2 \cdot Ra \cdot ex} \\ &= \frac{2 \cdot Ra^2 + 2 \cdot Ra \cdot Ri}{2 \cdot Ra \cdot ex} = \frac{Ra - Ri}{ex} \geq 1 \\ \Rightarrow Ra - Ri &\geq ex \end{aligned}$$

Wie schon oben aus der Abschätzung hervorgeht, beträgt die maximal mögliche Exzentrizität $R_a - R_i$, sodass die Bedingung immer erfüllt ist. Die Abhängigkeit der Kapazität vom Durchmesser ist daher bei der Messung immer größer als die der Exzentrizität. Das Verhältnis der Ableitungen liegt für Bedingungen, die bei den Versuchen im Rahmen dieser Arbeit aufgetreten sind, für eine Exzentrizität, die der halben möglichen Exzentrizität entspricht, zwischen 108 (kleinste verwendete Bohrung) und 5,2 (größte verwendete Bohrung).

Wenn einer Forderung an eine Mindestgenauigkeit der Vorzentrierung genügt wird, wird folglich immer eine geeignete Anfangsschrittweite berechnet. Diese Forderung ist nicht sehr scharf, weil bei einer Position des Messkopfes nahe an der Bohrungswand zunächst nur eine zu große Kapazität gemessen wird, was simuliert, dass der provisorische Bohrungsdurchmesser kleiner ist als in der Realität. Die Folge ist, dass die Anfangsschrittweite zu klein gewählt wird, was nur die Messezeit verlängert, solange sie nicht so klein ist, dass der Unterschied zwischen den zwei Messungen die Messgenauigkeit unterschreitet. Wenn die Anfangsschrittweite so gewählt, dass im Normalfall nach z. B. sechs Schritten der Messkopf in der Nähe der Bohrungsmitte stehen muss, und dies nicht der Fall ist, kann der provisorische Bohrungsdurchmesser aus dem letzten Messwert erneut berechnet und damit nachkorrigiert werden.

Die zweite Schwierigkeit taucht auf, wenn der Messkopf in der Nähe der Bohrungsmitte steht. Ein Nachteil der Zentrierung einer ringförmigen Messfläche ausschließlich anhand der Messwerte besteht darin, dass der Unterschied der Messwerte durch eine geringe Exzentrizität um die Bohrungsmitte herum im Rauschen der Messung untergeht. Es lässt sich mit dieser Bedingung eine „Talbreite“ der Kapazitätsfunktion über der Exzentrizität definieren, innerhalb der dieses Kriterium erfüllt ist. Die Talbreite berechnet sich dabei folgendermaßen:

Kapazität unter Exzentrizität des Messkopfs:

$$C_{ex} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot l}{\operatorname{arcosh}\left(\frac{R_a^2 + R_i^2 - ex^2}{2 \cdot R_i \cdot R_a}\right)}$$

Nach der Exzentrizität aufgelöst:

$$ex = \sqrt{R_a^2 + R_i^2 - 2 \cdot R_a \cdot R_i \cdot \cosh\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot l}{C_{ex}}\right)}$$

Exzentrizität an einer Stelle mit anderer Exzentrizität $ex + \Delta ex$ und dadurch um ΔC_{ex} verschiedener Kapazität:

$$ex + \Delta ex = \sqrt{R_a^2 + R_i^2 - 2 \cdot R_a \cdot R_i \cdot \cosh\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot l}{C_{ex} + \Delta C_{ex}}\right)}$$

In der Bohrungsmitte ist die Exzentrizität Null. Dort gilt für die Kapazität:

$$C_{ex=0} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot l}{\ln\left(\frac{R_a}{R_i}\right)}$$

Mit $C_{ex} = C_{ex=0}$ gilt dann für die Änderung der Exzentrizität:

$$\Delta ex = \sqrt{R_a^2 + R_i^2 - 2 \cdot R_a \cdot R_i \cdot \cosh\left(\frac{1}{\frac{1}{\ln\left(\frac{R_a}{R_i}\right)} + \frac{\Delta C_{ex}}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot l}}\right)}$$

Diese Funktion entspricht der halben Talbreite, wenn für ΔC_{ex} die Genauigkeit der Kapazitätsmessung eingesetzt wird. Für den verwendeten Messaufbau ergibt sich der Funktionsverlauf in Abbildung 9.3.

Innerhalb der Talbreite arbeitet das Verfahren der schrittweisen Mittenannäherung nicht mehr zuverlässig, da auf Grund des Rauschens der Messung die Richtung zur Bohrungsmitte hin aus zwei aufeinanderfolgenden und nebeneinanderliegenden Messungen nicht mehr zuverlässig ermittelt werden kann. Folglich entsteht ein erratisches Verhalten des Messkopfs, wenn er am Rande der Talbreite ankommt.

Das Erreichen der Talbreite kann durch Vergleich der absoluten Differenz zwischen zwei aufeinanderfolgenden Messwerten festgestellt werden. Unterschreitet die Differenz die Genauigkeit der Messschaltung, die dem entsprechenden Steuerprogramm bekannt sein muss, so stellt das Programm fest, dass die Talbreite erreicht ist. An dieser Stelle sind verschiedene Vorgehensweisen denkbar.

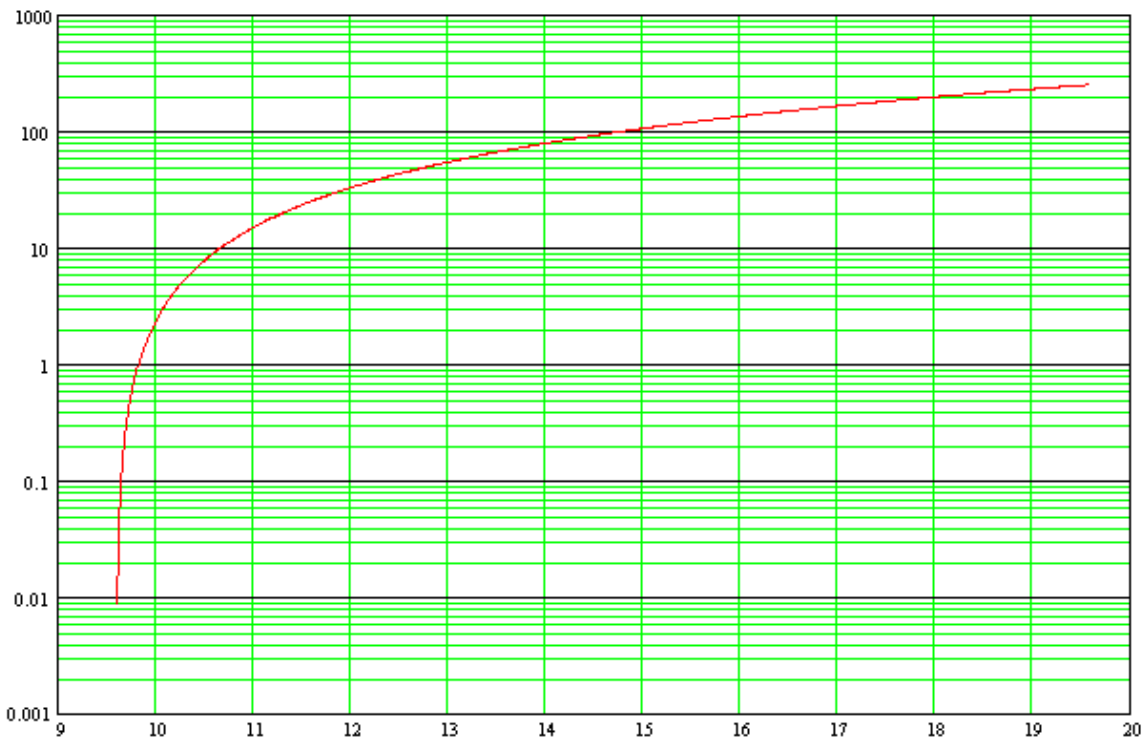


Abbildung 9.3: Talbreite in μm für Kapazitätsmessgenauigkeit = $0,44 \text{ fF}$, Sensordurchmesser = $9,62 \text{ mm}$ und $l = 5,6 \text{ mm}$; auf der Ordinate ist der Bohrungsdurchmesser in mm und auf der Abszisse die Talbreite in μm abgetragen.

Es besteht die Möglichkeit, das System auf den Rand der Talbreite zu kalibrieren. Dies hat jedoch den Nachteil, dass in die Kalibrierung eine leichte Nichtlinearität eingebracht wird, da die endgültigen Messwerte nicht exakt in der Bohrungsmitte genommen werden. Außerdem ist auch die Erkennung des Randes nicht fehlerfrei.

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, am Rande der Talbreite um die halbe Talbreite in Richtung der Bohrungsmitte zu verfahren und dort einen endgültigen Messwert aufzunehmen. Der Nachteil dabei ist jedoch, dass der Rand der Talbreite nicht sicher erkannt werden kann; dadurch kann die Bohrungsmitte verfehlt werden.

Noch eine weitere Möglichkeit ist es, nach Erreichen der Talbreite wieder aus dieser herauszufahren und dann die Talbreite in kleinen Schritten, z. B. mit einer Schrittweite von einem zwanzigstel der Talbreite, vollständig zu durchqueren. Bei diesen kleinen Schritten wird jeweils einen Messwert aufgenommen. Nach dem Durchqueren können die z. B. fünf kleinsten Messwerte zur Bestimmung des Durchmessers herangezogen werden. Nun bestehen wiederum drei Möglichkeiten. Eine erste Möglichkeit ist, die mittlere Position der kleinsten Werte zu bestimmen, den Messkopf dort zu positionieren, und an dieser Stelle den endgültigen Messwert aufzunehmen. Die zweite Möglichkeit ist, nur den kleinsten gemessenen Wert heranzuziehen. Dieser schwankt jedoch vergleichsweise stark, da er normalerweise Ergebnis einer maximal starken Störung ist. Die dritte Möglichkeit ist, den endgültigen Messwert als Mittelwert aus mehreren kleinsten Werten zu bestimmen. In der Praxis zeigt sich,

dass die dritte Möglichkeit bessere Werte liefert, als die erste Möglichkeit. Dies lässt darauf schließen, dass die Positionsbestimmung größeren Fehlern unterliegt, als die direkte Bestimmung eines Mittelwertes.

Der endgültige Messwert kann dann leicht nach der Formel

$$R_a = R_i \cdot \exp\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot l}{C_{ex=0}}\right)$$

in den Bohrungsdurchmesser umgerechnet werden. Die Messergebnisse im Rahmen dieser Arbeit wurden mit dem dritten Verfahren erzielt. Es wurden innerhalb der Talbreite an 20 Stellen Messungen aufgenommen und davon die drei kleinsten weiterverwendet.

9.4 Implementierung

Der Zentrieralgorithmus für die Versuche im Rahmen dieser Arbeit wurde in C programmiert.

Da der verwendete Compiler (das IDE Eclipse in Verbindung mit dem sdcc-Compiler) keine ausreichende Rechentiefe zur Verfügung stellte, mussten die Berechnungen, die eine hohe Genauigkeit erforderten, auf einen PC verlagert werden. Auf den Mikrocontroller (siehe Kapitel 7) stand daher maximal die Genauigkeit „float“ (23-Bit Fließkommazahl mit 8-Bit Exponent, was einer relativen Genauigkeit von $1,2 \cdot 10^{-7}$ entspricht) zur Verfügung. Diese Genauigkeit reicht jedoch nicht für die Berechnung des Durchmessers, die Berechnung der Talbreite, die explizite Berechnung von Exzentrizitäten und für die Berechnung der Kalibrierwerte aus, da hier teilweise Differenzen im Nenner vorkommen oder einzelne Funktionen, wie etwa \cosh , nicht ausreichend genau berechnet werden, jedoch eine Genauigkeit der Berechnungsstufe von mindestens 10^{-6} vorgesehen ist.

Daher wurden diese Berechnungen mit der grafischen Programmieroberfläche LABView mit sehr viel höherer Genauigkeit (Variablentyp „extended“, Fließkommazahlen mit insgesamt 128 Bit) durchgeführt. Vor der Rückübertragung zum Mikrocontroller wurden die extended-Variablen in float zurückgewandelt. LABView wurde auch zur Anzeige der Messergebnisse und zum Auslösen von Kalibrierung und Messung verwendet. Die Kommunikation zwischen dem Mikrocontroller und dem PC wurde über eine serielle Schnittstelle realisiert.

Die hardwarenahen Funktionen wurden ausschließlich auf dem Mikrocontroller realisiert. Dazu zählt die Berechnung der Strangströme für die Schrittmotoren im Rahmen einer Mikroschrittsteuerung und die Verwaltung der Koordinaten des Zentrierers. Ebenso wurde das Auslesen eines externen 100-MHz-Zählers und das Zählen von dessen Überlauf mit einem langsamerem Zähler, der in dem Mikrocontroller integriert ist, ausschließlich auf dem Mikrocontroller implementiert. Diese beiden Funktio-

nen stellen das Aufnehmen eines Messwerts dar. Bei den durchgeführten Versuchen wurden die weiterverwendeten Messwerte ausschließlich mithilfe von Mittelwertbildung aus vielen einzelnen Messwerten gewonnen. Die Mittelwertbildung wurde ebenfalls auf dem Mikrocontroller durchgeführt; für Messwerte mit Werten bis etwa 10.000 und Mittelwertbildung aus maximal 1200 Werten reichen 32-Bit-floats aus.

Der Zentrieralgorithmus greift auf die genannten Funktionen als Subroutinen zu, und stellt selbst den Kern der Messung dar. Er wird durch einen Befehl von LABView aufgerufen und steuert die Bewegungen, Messungen, Berechnungen und löst schließlich die Ausgabe des Messergebnisses aus. Er wird mit einer erhöhten Messgenauigkeit, die durch die Verwendung von mehr Messwerten pro Mittelwert realisiert ist, ansonsten identisch auch für die Kalibrierung benutzt.

10 Auswertung und Kalibrierung

10.1 Grundlegende Betrachtungen

Die Messkette vom Durchmesser bis zu einem verwertbaren Rohergebnis besteht aus der Wandlung der geometrischen Verhältnisse der Bohrung und des Messkopfes in eine Kapazität, der Wandlung der Kapazität in eine Zeit eines Rechtecksignals und dem Auszählen der Zeit mit Hilfe eines Zählers, wobei dessen Zählwert das digitale Rohergebnis für die Ermittlung des gemessenen Durchmessers darstellt. Zur Ermittlung eines Messergebnisses aus dem gemessenen Rohergebnis wird eine Auswertefunktion verwendet, die gemessene Kapazitätswerte in Durchmesser umwandelt. Um eine solche absolute Messung zu ermöglichen, ist eine Kalibrierung des Systems mit bekannten Bohrungen erforderlich. Dies ist die Hauptfunktion der Kalibrierung. Konkret bedeutet Kalibrierung dabei die Messung von Bohrungen mit bekannten Durchmessern und die Ableitung von Parametern für die Auswertungsfunktion aus den entsprechenden Messergebnissen. Wenn die Auswertungsfunktion an die Gegebenheiten des Messsystems angepasst wird, können als Nebenfunktion systematische Anteile des Messfehlers beseitigt werden, indem entsprechende Größen in die Kalibrierung einbezogen werden.

Die Auswertung schlägt die Brücke zwischen dem rohen Messergebnis, das als Zahl vom Zähler ermittelt wird, und dem angezeigten Bohrungsdurchmesser.

Grundsätzlich ist die Auswertung auf verschiedene Weise möglich. Eine gängige Lösung ist die Verwendung von Eichfeldern. Zwischen den Stützstellen wird z.B. mit Spline-Interpolation interpoliert. Dazu müssten beim vorliegenden Messgerät sehr viele Stützstellen aufgenommen werden, um eine ausreichende Messgenauigkeit sicherzustellen. Alternativ bietet sich eine Auswertung über eine analytische Auswertefunktion an. Dies ist im vorliegenden System möglich, da die Zusammenhänge theoretisch sehr genau berechnet werden können. Wie im folgenden gezeigt wird, ist es so möglich, eine entsprechende Auswertungsfunktion mit nur drei Kalibriermessungen für einen sehr großen Messbereich zu kalibrieren.

Grundsätzlich ist die Auswertungsfunktion die inverse Funktion der Abbildung der gesuchten Größe durch das Messsystem auf das rohe Messergebnis. Mathematisch kann die Auswertungsfunktion daher durch Auflösen der Gleichung für das rohe Messergebnis nach dem gesuchten Messergebnis bestimmt werden.

In jeder der Stufen der Messkette gibt es systematische Messfehler. Größen zur Beschreibung dieser systematischen Messfehler können in die Auswertefunktion aufgenommen werden, sodass das endgültige Messergebnis mathematisch auch von sogenannten parasitären Größen abhängig ist. Um den rechnerischen Aufwand in Grenzen zu halten, werden hierbei nur Messfehler berücksichtigt, die die Messgenauigkeit signifikant beeinträchtigen. Mit Hilfe der Kalibrierung können die zugehöri-

gen parasitären Größen explizit bestimmt werden, wodurch es möglich ist, sie bei der Berechnung des Messergebnisses zu berücksichtigen und damit zu rechnerisch zu eliminieren. Alle Abweichungen der mathematischen Beschreibung von der Wirklichkeit verbleiben als resultierender systematischer Messfehler der Messkette vom wahren Bohrungsdurchmesser bis zum Rohergebnis.

10.2 Festlegung der Auswertungsfunktion

Beim vorliegenden Messsystem wird zur Bestimmung der Auswertungsfunktion von folgendem Zusammenhang zwischen rohem Messergebnis und Durchmesser ausgegangen:

$$N \cdot t_Z = c_{MS} \cdot R \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot l}{\ln\left(\frac{R_a}{R_i}\right)} + C_{par} \right) + t_{par}$$

Hierbei sind

N der Wert im Zähler,

t_Z der Zählertakt, wobei der Takt des Oszillators virtuell um das Teilverhältnis des Zählers verkleinert ist,

c_{MS} eine Konstante der Messschaltung, die sich aus Triggerschwellen und Ladespannungen ergibt (hierin ist implizit enthalten, dass Messelektronik linear arbeitet),

R der Ladewiderstand,

ϵ die Dielektrizitätskonstante von Luft,

l die Länge der aktiven Fläche des Messkopfes,

R_a der Bohrungsradius,

R_i der Messkopfradius,

C_{par} parasitäre Kapazitäten der Messschaltung und der Zuleitungen und

t_{par} die parasitären Zeiten, die durch das Umschalten der Zustände in der Messschaltung und beim Zählen entstehen.

Die berücksichtigten parasitären Größen sind dabei C_{par} und t_{par} . Weitere unbekannte Größen, die in die Formel eingehen, sind der Ladewiderstand R und die Konstante c_{MS} der Messschaltung. Im Prinzip messbar, aber dennoch als unbekannt angesetzt sind der Messkopfradius R_i und die Länge der aktiven Fläche l. Unbekannt ist naturgemäß außerdem der Bohrungsdurchmesser. Bekannte Grö-

ßen sind dagegen der Wert im Zähler N , der Zählertakt t_z und die Dielektrizitätskonstante von Luft ϵ .

Mit der nach R_a aufgelösten Formel kann der Bohrungsdurchmesser für einen zentrierten Messkopf in einer Bohrung mit hinreichender Annäherung an die Zylinderform bestimmt werden.

$$R_a = R_i \cdot \exp\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot l}{N \cdot t_z - R \cdot c_{MS} \cdot C_{par}}\right)$$

Folglich stellt sich der Bohrungsdurchmesser als Vielfaches des Messkopfdurchmessers dar, wobei der Faktor zwischen den beiden Größen vom Messergebnis abhängt.

10.3 Kalibrierung

10.3.1 Ansatz

Um systematische Messfehler mit der Auswertungsfunktion zu eliminieren, ist in einem ersten Ansatz die genaue Bestimmung der parasitären Kapazität C_{par} , der Schaltzeiten t_{par} und der Konstanten der Messschaltung c_{MS} erforderlich. Dies ist nicht ohne größeren Aufwand möglich, da die Größen nicht auf einfache Weise gemessen werden können und sich außerdem diese Größen selbst jeweils aus mehreren anderen Größen zusammensetzen. Die Forderung an die systematischen Fehler ist, dass sie zusammen mit den statistischen Fehlern, die außerdem auftreten, kleiner als die im Rahmen des Fehlerhaushalts des Messsystems zugeteilten Fehler sein müssen. Da das Messsystem eine hohe Genauigkeit erreichen soll, müsste zur genauen Bestimmung erheblicher Aufwand getrieben werden. Deshalb ist es sinnvoll, einige der Größen, die auf gleiche Weise eingehen, zusammenzufassen und diese durch die Kalibrierung zu bestimmen. Dadurch werden bei einer Neukalibrierung auch Änderungen der Werte unwirksam. Dazu wird folgendermaßen angesetzt:

$$R_a = R_i \cdot \exp\left(\frac{\text{Faktor}}{N \cdot t_z - \text{Term}}\right)$$

Dadurch entstehen die Kalibrierwerte Faktor und Term. Der Vorteil dieses Vorgehens ist, dass in Faktor und Term zusammengesetzte unbekannte Größen enthalten sind, die durch die Kalibrierung optimal bestimmt werden, ohne dass sie einzeln explizit gemessen werden müssen. Sogar ein theoretischer Wechsel der Kapazitätsmesselektronik wird durch eine solche Kalibrierung berücksichtigt, da die Größen R und c_{MS} , C_{par} und t_{par} mitkalibriert werden. Voraussetzung ist nur ein lineares Arbeiten der Schaltung.

Das Verfahren kann dadurch noch weiter verbessert werden, dass außerdem der Messkopfradius R_i ebenfalls durch die Kalibrierung bestimmt wird, wodurch R_i ebenfalls zu den Kalibrierwerten zählt.

Dadurch ergibt sich eine Reihe erheblicher Vorteile. Ein großer Vorteil für die Praxis ist, dass außer Kalibrierbohrungen keine weiteren Hilfsmittel zur Kalibrierung des Systems erforderlich sind, zum Beispiel keine Eintragungen von Messkopfparametern in die Auswertung bei einem Wechsel des Messkopfes, sondern ausschließlich die Angabe der Durchmesser der Kalibrierbohrungen. Der Messkopfradius muss daher nach der Herstellung nicht explizit vermessen werden. Daraus ergibt sich auch, dass die Anforderungen an dessen Herstellungstoleranzen gering sind, solange eine ausreichende Rundheit garantiert ist. Durch Neukalibrierung können außerdem Veränderungen am Messkopf, wie beispielsweise geometrische Veränderungen durch Relaxation von Eigenspannungen auf Grund langsamer Rekristallisation, durch Kriechen von Klebstoff im Messkopf, der beim Aushärten geschrumpft ist, oder durch Temperaturschwankungen, für das Messergebnis eliminiert werden.

Schwankungen der Temperatur sind meist die größte Fehlerursache in Messgeräten. Im hier vorgestellten System wirkt sich der Einfluss der Temperatur vor allem auf den Ladewiderstand, die Konstanten der Messschaltung c_{MS} und den Radius des Messkopfes R_i aus. Diese Größen sind in der Auswertungsfunktion für den Bohrungsdurchmesser so verteilt, dass sie nicht analytisch isoliert werden können. Deshalb ist eine exakte Temperaturkalibrierung z.B. mit einer mitgemessenen Temperatur nur durch deren Berücksichtigung für die einzelnen beeinflussten Größen möglich. Dies ist mit erheblichem Aufwand verbunden. Eine einfache Möglichkeit zur Temperaturkompensation ist jedoch eine Neukalibrierung. Dabei müssen jedoch alle beeinflussten Größen mitkalibriert werden, was in dem unten im Detail vorgestellten Kalibrierungsvorgang für die relevanten Größen Größen Term , Faktor und R_i der Fall ist. Damit werden auch alle weiteren Drifteffekte, wie etwa Alterung, Formveränderungen des Messkopfs z.B. durch Rekristallisation oder durch Kriechen von Klebstoff oder veränderte äußere elektromagnetische Einflüsse auf das Messergebnis beseitigt.

10.3.2 Berechnung der Kalibrierwerte

Durch die Verwendung von drei Kalibrierwerten stellt sich die Kalibrierung als ein Gleichungssystem mit drei Unbekannten dar. Daher sind drei Kalibriermessungen zu seiner vollständigen Bestimmung erforderlich. Prinzipiell ist es auch möglich, auf die Kalibrierung des Messkopfdurchmessers zu verzichten. Dadurch reduziert sich die Anzahl der Unbekannten im Gleichungssystem und die Anzahl der erforderlichen Kalibriermessungen auf zwei. Dies kann sinnvoll sein, wenn Messkopf und Bohrung aus demselben Material bestehen und die gleiche Temperatur haben, weil Temperaturschwankungen dadurch weitgehend unwirksam sind (s. Kapitel 11). Im Weiteren wird jedoch ein Gleichungssystem mit drei Unbekannten untersucht. Dies hat den Vorteil, dass bei Verwenden eines anderen Messkopfes eine Neukalibrierung auch den Durchmesser des Messkopfes mitbestimmt. So können problemlos Messköpfe mit verschiedenem Durchmesser verwendet werden.

Zur Bestimmung der in der Auswertefunktion verwendeten Größen Größen Term und R_i wird das folgende Gleichungssystem gelöst:

$$N_k = \frac{c_{MS} \cdot R \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot l}{\ln\left(\frac{R_{a,k}}{R_i}\right)} + C_{par} \right) + t_{par}}{t_z} = \frac{\text{Faktor}}{\ln\left(\frac{R_{a,k}}{R_i}\right)} + \text{Term} \quad k = 1, 2, 3$$

Dabei bedeuten

k die Nummer der Kalibriermessung

N_k die für die einzelnen Bohrungen gemessenen Zählwerte

$R_{a,k}$ die Bohrungsdurchmesser für die Kalibriermessungen

Zur Lösung wurde das Mathematikprogramm Mathcad 8 verwendet, das auf Maple basiert. Die Gleichungen wurden ineinander eingesetzt und die entstehenden Formeln nach den gesuchten Größen aufgelöst. Diese Rechnung ist im Prinzip ohne Besonderheiten, jedoch sehr umfangreich und deshalb hier nicht detailliert dargestellt. Die Ergebnisse wurden durch Einsetzen der erhaltenen Gleichungen in die Ausgangsgleichungen verifiziert. Es ergibt sich:

$$R_i = R_{a,1} \cdot \exp\left(\frac{(N_1 - N_2) \cdot (\ln(R_{a,3}) - \ln(R_{a,1})) \cdot (\ln(R_{a,3}) - \ln(R_{a,2}))}{\ln(R_{a,1}) \cdot (N_3 - N_2) + \ln(R_{a,2}) \cdot (N_1 - N_3) + \ln(R_{a,3}) \cdot (N_2 - N_1)}\right)$$

$$\text{Faktor} = t_z \cdot \frac{(\ln(R_{a,1}) \cdot (N_3 - N_1) \cdot (N_2 - N_3) + \ln(R_{a,2}) \cdot (N_3 - N_1) \cdot (N_3 - N_2)) \cdot \dots}{(\ln(R_{a,1}) \cdot (N_2 - N_3) + \ln(R_{a,2}) \cdot (N_3 - N_1) + \ln(R_{a,3}) \cdot (N_1 - N_2))^2} \\ \dots \frac{(N_1 - N_2) \cdot (\ln(R_{a,1}) - \ln(R_{a,3})) \cdot (\ln(R_{a,1}) - \ln(R_{a,3}))}{\dots}$$

$$\text{Term} = t_z \cdot \frac{N_1 \cdot (N_2 - N_3) \cdot \ln(R_{a,1}) + N_2 \cdot (N_3 - N_1) \cdot \ln(R_{a,2}) + N_3 \cdot (N_1 - N_2) \cdot \ln(R_{a,3})}{\ln(R_{a,1}) \cdot (N_2 - N_3) + \ln(R_{a,2}) \cdot (N_3 - N_1) + \ln(R_{a,3}) \cdot (N_1 - N_2)}$$

Bei der expliziten Berechnung des Größen Term, Faktor und R_i kann auf verschiedene Weise vorgegangen werden. Eine Möglichkeit ist die Bestimmung der Größen aus den bekannten Größen N_i und $R_{a,k}$. Dies führt zu den Formeln, die oben dargestellt sind. Der Rechenaufwand lässt sich mit einem vereinfachten Satz von Formeln verringern, bei dem die Größen in vorgegebener Reihenfolge berechnet und die zuerst erhaltenen Ergebnisse in den weiteren Formeln verwendet werden. Die entsprechenden Formeln erhält man ebenfalls, indem die Ausgangsgleichungen ineinander eingesetzt werden und nach den interessierenden Größen aufgelöst werden. Es ergibt sich:

$$Term = t_z \cdot \frac{N_1 \cdot (N_2 - N_3) \cdot \ln(R_{a,1}) + N_2 \cdot (N_3 - N_1) \cdot \ln(R_{a,2}) + N_3 \cdot (N_1 - N_2) \cdot \ln(R_{a,3})}{\ln(R_{a,1}) \cdot (N_2 - N_3) + \ln(R_{a,2}) \cdot (N_3 - N_1) + \ln(R_{a,3}) \cdot (N_1 - N_2)}$$

$$Faktor = (t_z \cdot N_2 - Term) \cdot (\ln(R_{a,3}) - \ln(R_{a,2})) \cdot \frac{t_z \cdot N_3 - Term}{t_z \cdot (N_2 - N_3)}$$

$$R_i = R_{a,3} \cdot \exp\left(\frac{Faktor}{Term - N_3 \cdot t_z}\right)$$

Bei diesem Vorgehen ist jedoch zu beachten, dass sich die Rundungsfehler der ersten Rechnungen durch die mehrfache Verwendung der Ergebnisse stärker im Ergebnis niederschlagen. Eine ausreichende Rechengenauigkeit muss daher gewährleistet sein.

Durch das Vorhandensein drei prinzipiell gleichwertiger Kalibrierbohrungen können Term, Faktor und R_i auf dreifache Weise berechnet werden, indem jede der Bohrungen als Bohrung 1, 2 oder 3 angesehen werden kann. In dem zuletzt dargestellten Satz von Formeln gehen die Kalibrierbohrungen jedoch nicht gleichwertig in die Kalibrierwerte ein. Die Berechnung liefert dann aufgrund der mit den einzelnen Kalibrierbohrungen verbundenen verschiedenen Messfehler möglicherweise unterschiedliche

Ergebnisse. Die Durchführung aller möglichen Rechnungen und anschließende Mittelwertbildung oder anderweitige Weiterverarbeitung kann die Genauigkeit der Kalibrierung möglicherweise noch erhöhen. Dies wurde im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht weiter untersucht.

10.4 Berechnung des Messergebnisses

Das Messergebnis kann mit Hilfe der Definitionsformel für die Kalibriergrößen Term, Faktor und R_i berechnet werden, die oben angegeben wurden:

$$R_a = R_i \cdot \exp\left(\frac{Faktor}{N \cdot t_z - Term}\right)$$

Auch für diese Rechnung muss eine ausreichend hohe Rechengenauigkeit vorhanden sein, da eine Differenz im Nenner vorkommt, wobei der Bruch selbst exponentiell in das Messergebnis eingeht, was die Fehlerverstärkung nochmals erhöht.

11 Genauigkeit

11.1 Begriffsdefinitionen und allgemeine Zusammenhänge

11.1.1 Rauschen und Jitter

Das Rauschen ist der unbekannte Anteil des Messergebnisses. Es wird in der vorliegenden Messkette (siehe Kapitel 11 oder unten) im Rohergebnis, der ausgezählten Zeit, als Jitter sichtbar. Das Rauschen wird in der Messschaltung durch das Rauschen der Bauteile erzeugt und wird dadurch direkt in die Messschaltung eingebracht oder aber über die Versorgungsspannung in die Messschaltung übertragen. Außerdem können Störungen von außen über Antennenwirkung von Leitungen oder Leiterbahnen oder durch wechselnde Magnetfelder in die Schaltung gelangen. Während des Vorgangs des Schaltens an der Triggerschwelle wird Spannungsrauschen, das als Folge der beschriebenen Vorgänge an der Triggerschwelle und der Spannung am Kondensator selbst vorhanden ist, in Jitter transformiert (siehe dazu die hervorragende Arbeit von Hildebrandt [Hil95]).

Eine weitere Rauschart, die von den physikalischen Verhältnissen prinzipiell unabhängig ist, ist das Digitalisierungsrauschen. Es entsteht dadurch, dass die zunächst infinitesimal aufgelöste, analoge Messgröße auf die Intervalle eines digitalen Messbereichs abgebildet wird. Dadurch entsteht eine Abweichung des digitalisierten Messergebnisses vom zu Grunde liegenden analogen Messergebnis. Diese Tatsache kann ebenfalls als Rauschen verstanden werden. Dieses Rauschen ist vorhanden, obwohl das Digitalsignal selbst kein Rauschen zeigt.

11.1.2 Drift

Als Drift werden langsame Änderungen am Messergebnis bezeichnet, die nicht von der gemessenen Größe, sondern von Änderungen am Messsystem verursacht sind. Teilweise wirken solche Änderungen am Messsystem auf das Messergebnis vergrößernd und verkleinernd und sind reversibel, wie etwa Temperatureinflüsse, teilweise sind sie irreversibel, wie etwa Alterungseffekte, die meist nur in eine Richtung auf das Messergebnis wirken, und teilweise sind sie nicht vorhersagbar, beispielsweise durch Änderungen externer elektrischer oder elektromagnetischer Einflüsse auf das Messsystem. Die Temperaturdrift ist ebenfalls nicht vorhersagbar, wenn die Temperatur nicht gemessen wird, ebenso sind die Auswirkungen von Alterungseffekten ohne weiteres Zutun zunächst nicht bekannt. Drift kann als ein sehr niederfrequentes Rauschen verstanden werden, dessen Frequenzbereich unterhalb der erforderlichen Dynamik der Messung liegt. Schwankungen der Temperatur und die resultierende Temperaturdrift sind oft die größte Fehlerursache in Messgeräten.

11.1.3 Auflösung und Messbereich

Die absolute Auflösung eines Messsystems ist ebenfalls der Anteil am Messergebnis, dessen Größe nicht bekannt ist, und wird deshalb im allgemeinen mit dem Rauschen gleichgesetzt. Bei analogen

Messergebnissen, die durch Variation physikalischer Größen wie z.B. Spannung, Strom oder Intensität realisiert werden können, liegt der Übergang zur Quantenphysik, bei der die Quantelung eine natürliche Digitalisierung darstellt, meist sehr weit weg von den in der Praxis vorkommenden absoluten Auflösungen. Dies ist beispielsweise bei einem Strom so, der erst bei extrem kleinen Strömen durch den Übergang einzelner Ladungsträger von $1,9 \cdot 10^{-19}$ C gequantelt wird. Deshalb ist die theoretische Quanten-Auflösung bei analogen Signalen im ideal störungsfreien Messsystem sehr klein. Die im Rahmen dieser Arbeit mit wenigen Volt Ladespannung und Ladezeiten von einigen zehn Mikrosekunden erreichte Auflösung im Femtofaradbereich entspricht einer Stromdifferenz von einigen hundert Nanoampère, und damit einem Unterschied von einigen zehntausend Elektronen, die während eines Messzyklus auf den Kondensator übergehen.

Der Messbereich eines Messsystems ist durch Grenzen der möglichen Veränderung der Größen im Messsystem begrenzt oder er wird willkürlich als ein bestimmter Teil des möglichen Wertebereichs definiert. Ein Messsystem umfasst im Allgemeinen mehrere physikalische Größen als Zwischenergebnisse der Messung, die von Stufen einer Messkette des Messsystems ineinander umgewandelt werden, bis schließlich ein Ergebnis angezeigt wird. Für das vorliegende Messsystem sind die Größen der Durchmesser, die Kapazität, die Zeitdauer eines Pulses, der Zählwert der Zeitdauer als Binärzahl und das angezeigte Ergebnis. Für jede Stufe existiert ein möglicher Eingangs- und Ausgangswertebereich sowie eine absolute Auflösung an Eingang und Ausgang. Mit einer Übertragungsfunktion der jeweiligen Stufe kann die Transformation eines Messwertes vom Eingang zum Ausgang und umgekehrt berechnet werden. Darin können auch die Auswirkungen von Störungen oder Abweichungen von der idealen Funktion, so genannte parasitäre Größen sowie Störgrößen, rechnerisch berücksichtigt sein.

Von Interesse sind im Rahmen dieser Arbeit die absolute Auflösung und der Messbereich des Messsystems. Bezüglich der Auflösung stellt sich die Frage, welchen Intervallen des gemessenen Durchmessers die Inkremente der Anzeige entsprechen. Dazu können die im Rahmen der Diskretisierung möglichen Anzeigewerte mit den Übertragungsfunktionen auf den Durchmesser zurückgerechnet werden. Durch Differenzenbildung zwischen Durchmessern, die nebeneinanderliegenden Anzeigewerten entsprechen, kann dann die zu einem Anzeigewert gehörige Durchmesserauflösung ermittelt werden. Die bestmögliche absolute Auflösung ist so hoch, wie die auf diese Weise berechnete Durchmesserauflösung. Die Auflösung kann jedoch schlechter sein, wenn in den dazwischenliegenden Stufen die Auflösung verschlechtert wird, indem Rauschen und damit ein unbekannter Teil zu dem Messergebnis hinzugefügt wird. Dieser unbekannt Teil im Messergebnis macht die Übereinstimmung des Durchmessers mit dem Anzeigewert im Maße des Rauschens unsicher. Ist das Rauschen, mit Hilfe der Übertragungsfunktionen als Durchmesser ausgedrückt, größer als die Durchmesserauflösung, so ist die Zuordnung zwischen Anzeigewert und im Rahmen der Diskretisierung möglichem Durchmesserwert nicht mehr eindeutig. Die detaillierte Berechnung der Größen ist im Kapitel 11.3 beschrieben. Dabei zeigt sich, dass die Durchmesserauflösung im vorliegenden Fall

nicht konstant ist, sondern erheblich vom angemessenen Durchmesser abhängt.

Bezüglich des Messbereichs stellt sich die Frage, welche Begrenzungen der Wertebereiche an den Eingängen und Ausgängen der einzelnen Stufen vorhanden sind und wie diese auf den Messbereich des Gesamtsystems wirken. Im Idealfall wird der gewünschte Durchmesserbereich von der Messkette ohne Einschränkungen in den Wertebereich der Anzeige übertragen. Dazu muss die Messkette jedoch bestimmte Anforderungen bezüglich der Wertebereiche in den einzelnen Stufen erfüllen. Um die Begrenzungen eines Wertebereichs an einem Eingang über die jeweilige Stufe hinweg für deren Ausgang transformieren, ist wiederum die zugehörige Übertragungsfunktion wirksam. Für einen nicht eingeschränkten angezeigten Messbereich muss sichergestellt werden, dass ein transformierter Wertebereich des Eingangs am Ausgang realisierbar ist, beispielsweise muss ein Ausgangsverstärker entsprechende Spannungen liefern können. Ebenso muss sichergestellt werden, dass der Wertebereich an einem Ausgang eine Untermenge des Wertebereichs des darauf folgenden Eingangs ist. Sind diese Bedingungen nicht erfüllt, so bewirkt ein entsprechend eingeschränkter Wertebereich, dass Durchmesser, die in dem eingeschränkten Bereichen liegt, nicht angezeigt werden können. Statt eines gemessenen Durchmessers wird dann der maximal beziehungsweise minimal mögliche Durchmesser angezeigt. Im Detail ist die Gestaltung der Wertebereiche in Kapitel 11.2 beschrieben.

Die relative Auflösung hängt mit der absoluten Auflösung zusammen, die über den Messbereich erzielt wird. Es gilt:

$$\text{Relative Auflösung} = \frac{\text{Absolute Auflösung}}{\text{Messbereich}}$$

Mit der relativen Auflösung kann die Qualität eines Messsystems oder eines Teils davon charakterisiert werden. Sie ist um so kleiner, je feiner der Messbereich aufgelöst werden kann, also je hochwertiger ein Messsystem ist.

Für die relative Auflösung und damit für die Qualität des Messsystems ist relevant, dass additive parasitäre Größen den Messbereich am Ausgang einer Stufe im Vergleich zu dem an ihrem Eingang erheblich einschränken können. Eine solche parasitäre Größe wird immer mitgemessen und schränkt daher den nutzbaren Messbereich ein. Eine solche Einschränkung verschlechtert die relative Auflösung, wenn der übrig bleibende Messbereich zur Übertragung der Messgröße mit der geforderten relativen Genauigkeit nicht mehr ausreicht. Durch verstärktes Rauschen wird dagegen die absolute Auflösung vergrößert, was die relative Auflösung in jedem Fall verschlechtert. Durch jede Verschlechterung der relativen Auflösung geht Information verloren.

11.1.4 Statistische Messfehler

Statistische Messfehler betreffen unterschiedliche Messergebnisse, die man bei Wiederholung der Messung bei gleichen Bedingungen erhält. Die Unterschiede sind durch Rauschen verursacht. Aus einer Menge von Messergebnissen, die unter gleichen Bedingungen erhalten wurden, kann mit statistischen Methoden ein einzelnes Messergebnis gewonnen werden, dessen Messfehler kleiner als der der zu Grunde liegenden Messungen ist.

Der zentrale Grenzwertsatz der Wahrscheinlichkeitsrechnung besagt, dass eine normalverteilte Größe entsteht, wenn viele voneinander unabhängige stochastisch verteilte Summanden mit nur kleinem Beitrag zur Gesamtsumme addiert werden [Bro89].

Der Satz von Tschebyscheff besagt, dass eine Folge paarweise unabhängiger Zufallsgrößen, deren Varianzen gleichmäßig beschränkt sind, dem schwachen Gesetz der großen Zahl unterworfen sind [Bro89]:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P \left(\left| \sum_{k=1}^n X_k - \sum_{k=1}^n EX_k \right| < \epsilon \right) = 1$$

Dabei ist X_k eine Zufallsgröße und EX_k der dazugehörige Erwartungswert, $\epsilon > 0$. Bei der Messung einer als konstant angenommenen Größe wie einem Bohrungsdurchmesser ist der Erwartungswert EX_k konstant. In diesem Fall wird die Abweichung des arithmetischen Mittelwerts der gemessenen Zufallsgrößen X_k vom Erwartungswert, d.h. vom zu messenden Wert, für unendlich viele Messungen beliebig klein. [Bro89]

Durch eine ausreichend große Anzahl voneinander unabhängiger Messungen werden die Voraussetzungen für den zentralen Grenzwertsatz erfüllt. Die Messung darf dabei nur in vernachlässigbarem Maße driften. Dann sind die Messwerte normalverteilt, und das schwache Gesetz der großen Zahl darf angewendet werden, d.h. der Mittelwert der Messwerte nähert den wahren Wert an.

Mit der Bildung der Mittelwerte und der Standardabweichung der gemessenen Werte kann der Fehler des Gesamtsystems durch die Standardabweichung σ beschrieben werden. Diese ist durch das zweite Moment der Messwerte [Lit96] definiert, daher gilt

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}}$$

Es kann gezeigt werden, dass in einem Intervall mit der Breite der doppelten Standardabweichung um den Mittelwert herum die Wahrscheinlichkeit, dass in einer einzelnen, unabhängigen Messung in

diesem Intervall ein Messwert gemessen wird, 68,3% beträgt. Für zwei- bzw. dreifache Intervallbreite gelten entsprechend 95,4% und 99,73%. Dies gilt unabhängig von der Anzahl der Messwerte [Her88].

Mit der Anzahl der Messwerte erhöht sich jedoch die Genauigkeit, mit der der Mittelwert der Messungen den wahren Wert annähert. Der Vertrauensbereich u_z um den arithmetischen Mittelwert hängt von der Standardabweichung ab und kann mit Hilfe der Theorie der t-Verteilung von Student bestimmt werden zu:

$$u_z = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \cdot t_p$$

Dabei ist t_p ein Faktor, der von der Anzahl der Messwerte und der geforderten Wahrscheinlichkeit P abhängig ist. Er geht für 68,3% und große Zahlen n gegen 1, für 95,4% gegen 2 und für 99,73% gegen 3. Er ist z.B. in der DIN 1319 „Grundbegriffe der Messtechnik“ in Tabellenform angegeben. In der Praxis führen mehr als 20 Messwerte zu einer merklichen Verkleinerung des Vertrauensbereichs. In der Physik und Vermessungstechnik werden üblicherweise 68,3% und in der Industrie 95,5% gefordert [Her88].

Angewendet auf das hier untersuchte kapazitive Messgerät für Bohrungsdurchmesser bedeutet dies, dass die Messunsicherheit durch statistische Fehler beispielsweise um ca. den Faktor 35 verkleinert werden kann, indem Messreihen von 1200 Werten aufgenommen werden. Derartige Maßnahmen können in der Endphase der Zentrierung und für die Messwertaufnahme für die Weiterverarbeitung zum Bohrungsdurchmesser sinnvoll sein.

11.1.5 Systematische Messfehler

Neben statistischen Fehlern können auch systematische Fehler auftreten. Dies ist der Fall, wenn Fehler stets auf gleiche Weise und daher vorhersagbar auftreten. Wenn Art und Größe der Beeinflussung bei systematischen Fehlern bekannt sind, kann mit Hilfe dieser Informationen der Fehlerinfluss durch Signalkorrektur oder bei der Auswertung rechnerisch rückgängig gemacht werden. Dennoch bleibt ein Restfehler, da im Allgemeinen auch der Mechanismus der systematischen Fehlerkorrektur nicht ideal frei von systematischen Fehlern und Störungen arbeitet.

11.1.6 Genauigkeit

Die Genauigkeit ergibt sich aus der Summe aller verbleibender Fehler. Diese sind Rauschen, das nie vollständig beseitigt werden kann, und verbleibende systematische Fehler, deren Kompensation nie vollständig gelingt. Die Genauigkeit stellt folglich den Vertrauensbereich des gesamten Messsystems dar. Die Genauigkeit eines bestehenden Messsystems kann ermittelt werden, indem damit

eine Bohrung mit bekanntem Durchmesser vermessen wird und das Messergebnis mit dem bekannten Durchmesser in Beziehung gesetzt wird.

11.2 Messkette und deren Fehler

11.2.1 Stufen der Messkette

Ein Messsystem besteht meist aus einer Kette von Wandlern oder Stufen, die die Messgröße wandeln, bis sie schließlich angezeigt oder auf andere Weise ausgegeben wird. Dabei ändert sich im Allgemeinen die Form des Informationsträgers von Stufe zu Stufe. Im hier vorliegenden Messsystem wird der zu messende Durchmesser über die Geometrie des Messkopfes und der Bohrung in eine Kapazität, dann durch die Kapazitätsmessschaltung in eine Zeitdauer und diese dann von einem Zähler in eine Binärzahl gewandelt. Mit einem Rechenalgorithmus, der die Verarbeitung von Kalibrierdaten in Form einer Auswertungsfunktion einschließt, wird schließlich aus der Binärzahl der gemessene Durchmesser berechnet.

Das Ziel dieses Abschnitts ist es, aus der Fehlerrechnung für das Messsystem Anhaltspunkte für eine optimale Gestaltung und Auslegung des Systems zu gewinnen. Die Komponenten des Systems, die hierbei berücksichtigt werden müssen, sind der Messkondensator, die Kapazitätsmessschaltung, der Zähler, die Auswertungsfunktion einschließlich ihrer Implementierung und der Hardware, auf der diese läuft.

Dazu wird zunächst die Messkette vom Bohrungsdurchmesser bis zum Zählergebnis bezüglich der bekannten Fehler berechnet. Diese sind statistische und systematische Fehler, die auf bestimmte Weise in das Messergebnis eingehen. Im nächsten Schritt wird die Fehlerübertragung über eine Auswertungsfunktion (s. Kapitel 10) betrachtet, die systematische Fehler durch ihre Struktur und durch Kalibrierung kompensiert. Der Fehler, den die Kalibrierung verursacht, wird mit in die Fehlerrechnung für die Berechnung des Messergebnisses einbezogen. Dies ist der Restfehler, der von den bekannten systematischen Fehlern der Messkette vom Messkondensator bis zur ausgezählten Zahl zurückbleibt. Durch die Berechnung wird klar, welche Anteile aus den einzelnen Komponenten stammen, für die dann im Rahmen eines Fehlerhaushalts Vorgaben gemacht werden können. Diese dürfen in der Ausführung nicht überschritten werden, um die Gesamtgenauigkeit des Systems zu garantieren. In einem nächsten Schritt wird sichergestellt, dass die Rechengenauigkeit bei der Auswertung nur vernachlässigbar wenig Fehler zum Fehlerhaushalt beiträgt. Schließlich wird auf das Rauschen bzw. die statistischen Messfehler eingegangen. Diese können durch Methoden wie Mittelwertbildung in gewissem Rahmen verringert werden. Deren Einfluss auf das Messsystem wird berechnet.

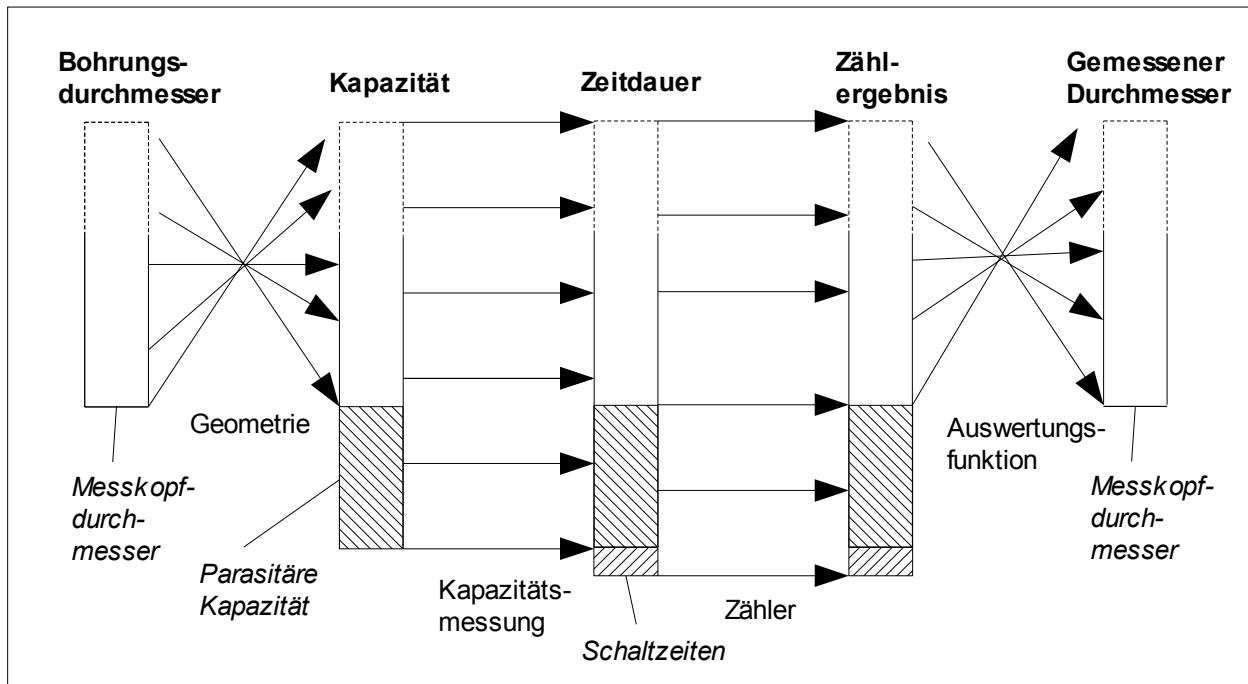


Abbildung 11.1: Veränderung des Messbereichs über die Stufen der Messkette. Die senkrechten Balken stehen für Wertebereiche. Die gepunkteten Bereiche stehen für eine unbeschränkte Menge. Die Werte nehmen nach oben hin zu.

11.2.2 Kondensator

Systematische Fehler des Messkopfes

Der Zylinderkondensator aus Messkopf und Bohrung kann als Wandler zwischen Durchmesser und Kapazität angesehen werden. Bei dieser Wandlung entstehen Fehler aus Geometrie der beiden Zylinder und der Zentrierung. Dezentrierung entsteht aus Regelabweichungen der Zentriereinheit und zusätzlich dynamisch aus Schwingungen, die zu temporärer Veränderung der Dezentrierung führen.

Da die Form der Bohrung immer in gewissem Maße von der idealen Zylinderform abweicht, stellt sich die Frage, welche Eigenschaften einer Bohrung über den Durchmesser hinaus für die Messung relevant sind. Der Bohrungsdurchmesser allein ist nur eine einzelne Größe, und kann als solche der Darstellung einer Geometrie, die mit hoher Genauigkeit betrachtet komplex ist, nicht gerecht werden. Ein Bohrungsdurchmesser kann als einzige gemessene Größe nur ein mittlerer Durchmesser sein. Folglich ist von Bedeutung, ob zusätzlich zum Durchmesser auch weitere Parameter der Bohrung gemessen werden sollen. Bezogen auf die Praxis reicht für viele Fälle ein mittlerer Durchmesser aus; in manchen Fällen ist jedoch eine genauere Kenntnis der Geometrie der Bohrung erforderlich.

Der Messkopf hat ebenfalls Formabweichungen. Bei der Kalibrierung des Systems wird dem Messkopf ein idealisierter mittlerer Durchmesser zugewiesen, in dem bei der Kalibrierung vorhandene Formabweichungen ausgemittelt sind. Dadurch können systematische Fehler und Nichtlinearität in das System eingebracht werden. Im folgenden wird von einem Messkopf ausgegangen, der durch

sorgfältige Bearbeitung seiner Außenfläche so geringe Formabweichungen hat, dass die Konsequenzen davon vernachlässigt werden können. Der für die Versuche verwendete Messkopf wurde an seiner Außenfläche auf einer sehr guten Außenrundsleifmaschine (Hersteller Studer) sorgfältig geschliffen und erfüllt dieses Kriterium ausreichend.

Konkret können als Abweichungen von der Rundheit der Bohrung Abweichungen in Umfangsrichtung und Abweichungen axialer Richtung auftreten. Abweichungen in Umfangsrichtung können als Abweichung des Radius von einem mittleren Radius oder durch eine Fourier-Transformation mittels Vielzähligkeiten beschrieben werden. Dies gilt zunächst für die ganze Länge der Bohrung. Abweichungen in Längsrichtung können als Radiusabweichungen über die Bohrungslänge dargestellt werden, falls erforderlich, zusätzlich nach dem polaren Winkel aufgelöst.

Falls zunächst eine Messung zur Bestimmung eines mittleren Durchmessers durchgeführt worden ist, können mit weiteren Messungen Abweichungen von der idealen Zylinderform bestimmt werden. Um mit nur einer messbaren Größe, der Kapazität, Informationen über weitere Geometrieparameter zu gewinnen, besteht die Möglichkeit, den Messkopf definiert in der Bohrung zu verschieben und aus den abweichenden Kapazitäten auf Formabweichungen zurückzurechnen. Nachteilig ist dabei die Filterwirkung des Messkopfs, die dadurch entsteht, dass für die gemessene Kapazität das gesamte Messfeld wirksam ist. Abweichungen der Bohrungsgeometrie wirken sich deshalb nur insoweit aus, als sie eine signifikante, zumindest aber messbare Veränderung im Feld und damit der Kapazität bewirken.

Für Abweichungen in Umfangsrichtung kommt eine solche signifikante Änderung zu Stande, wenn der Messkopf sehr nahe an der Bohrungswand positioniert wird. Dann hat der Bereich mit geringem Abstand zwischen Bohrungswand und Messkopf auf Grund der Wirkung kleiner Abstände auf die Kapazität einen wesentlich erhöhten Einfluss. Bei einer Positionierung des Messkopfs nahe einer Position, die die Bohrungswand bei idealen Verhältnissen bei dem gemessenen Durchmesser theoretisch haben müsste, wirken sich Abweichungen von der ideal runden Geometrie der Bohrung an dieser Stelle stärker aus als bei einer Positionierung des Messkopfes in der Mitte der Bohrung. Sind Abweichungen von der Rundheit relevant, so kann der Messkopf in der Bohrung auf einem Kreis um die Bohrungsmitte verfahren werden, und aus Schwankungen der Kapazität auf Abweichungen von der Zylinderform zurückgerechnet werden (s. Kap. 4). Ein denkbare Vorgehen für die Berechnung ist eine Fourier-Transformation der gemessenen Daten mit einer Grundfrequenz, die einer Umdrehung entspricht. Dabei ergeben sich verschiedene Amplituden für die einzelnen Vielzähligkeiten. Die Vielzähligkeit erster Ordnung entspricht dabei der Dezentrierung, die zweite näherungsweise einer Elliptizität, die dritte einer Dreizähligkeit usw.. Die Umrechnung der Amplituden in geometrische Verhältnisse hängt von dem mittleren Bohrungsdurchmesser und dem Abstand von der Bohrungswand ab. Die Entwicklung eines Algorithmus hierfür hätte jedoch den Rahmen dieser Arbeit gesprengt.

Bei diesem Vorgehen kommt eine geometrische Filterwirkung des Messkopfes zum Tragen, die umso stärker ist, je geringer der Unterschied zwischen Bohrungsdurchmesser und Messkopfdurchmesser ist. Der Abschnitt des Bohrungsumfanges, der einen geringen Abstand zum Messkopf hat, ist in diesem Fall größer, wodurch eine Auflösung von Vielzähigkeiten hoher Ordnung erschwert wird. Dem kann entgegengewirkt werden, indem der Messkopf mit erhöhter Positioniergenauigkeit in kleinerem Abstand vor der Bohrungswand positioniert wird. Diesem Vorgehen ist jedoch in der Praxis durch die Positioniergenauigkeit des Bewegers und auch durch die Durchschlagfestigkeit, die bei sehr geringem Abstand nur wenige Volt betragen kann und die bei sehr kleinen Abständen in den Tunneleffekt übergeht, Grenzen gesetzt.

Im weiteren wird davon ausgegangen, dass die Bohrung im Rahmen der Messgenauigkeit als ideal rund angesehen werden kann. Diese Arbeit beschränkt sich daher im weiteren sich auf die Bestimmung eines mittleren Bohrungsdurchmessers, wie sie auch von typischen handelsüblichen Messgeräten (Dreipunkt-Messung, pneumatische Verfahren) nach dem Stand der Technik im Normalfall geleistet wird. Für universelle Messgeräte für den Bohrungsdurchmesser, die ein Messverfahren nach dieser Arbeit verwenden, ist es sinnvoll, eine zulässige Formtoleranz für die zu vermessende Bohrung in Abhängigkeit der Messgenauigkeit zu definieren. Diese sollte so gewählt werden, dass auftretende Formabweichungen den trotz der Formabweichungen gemessenen mittleren Durchmesser gegenüber einem idealen mittleren Durchmesser nicht verfälschen. Die zulässigen Formtoleranzen können mit den Ergebnissen für die Abweichungen von der idealen Geometrie aus Kapitel 4 für berechnet werden.

Wenn Variationen in Längsrichtung der Bohrung relevant sind, kann der Messkopf längs durch die Bohrung geführt und der Durchmesser an mehreren Stellen oder quasi-kontinuierlich gemessen werden. Auf diese Weise können beispielsweise Konizität oder Bauchigkeit unabhängig von radialen Geometrieabweichungen gemessen werden. Auch hier besteht eine geometrische Filterwirkung durch die Länge des Messkopfes,

Dezentrierung des Messkopfes in der Bohrung

Die Dezentrierung des Messkopfes in der Bohrung wird durch die Positionsregelung weitgehend beseitigt. Das Messsystem nimmt endgültige Messwerte nur in der Nähe des Mittelpunktes auf. Dadurch werden die systematischen Abweichungen durch Dezentrierung minimiert. Die Größe des verbleibenden Zentrierfehlers ergibt sich entweder aus der Zentriergenauigkeit, die von der Genauigkeit des Regelsystems abhängt, die ihrerseits wiederum vom Regelalgorithmus und der Messgenauigkeit der Kapazität abhängt, oder aus der Positioniergenauigkeit des Zentrierers, falls die Regelung besser arbeitet, als der Zentrierer zentrieren kann.

Die Regelgenauigkeit ist mit einem statistischen Fehler behaftet, der durch die statistischen Fehler der Messungen entsteht, von denen die Positionsregelung abhängt. Die Größe des Exzentrizitäts-

fehlers hängt vom verwendeten Zentrierverfahren sowie der Messgenauigkeit der Messkette ab. Da der Gesamtfehler der Durchmesser messung direkt von der Messgenauigkeit der Messkette, als auch von der Dezentrierung abhängt, die ihrerseits ebenfalls von der Messgenauigkeit der Messkette abhängt, kommt letzterer durch ihre doppelte Wirkung, direkt und über die Dezentrierung, eine besondere Bedeutung für die Genauigkeit zu. Im Zentrieralgorithmus können die Auswahl der mutmaßlichen Mittenposition und der endgültige Messwert durch statistische Methoden optimiert werden, um die Auswirkungen der Messgenauigkeit der Messkette auf die Dezentrierung zu verringern.

Das Rauschen der Messkette führt zu einer fehlerhaften Mittenbestimmung. Das Ausmaß dieses Fehlers lässt sich zunächst durch die Berechnung der sogenannten „Talbreite“ (s. Kapitel 9) bestimmen. Es ist folglich mit einer Dezentrierung mit der Standardabweichung der Talbreite zu rechnen, wenn ein Algorithmus eingesetzt wird, der die verrauschten Messwerte zur Mittensuche verwendet.

Durch die Optimierung des Zentrieralgorithmus dahingehend, dass innerhalb der Talbreite gezielt mehrere Messungen durchgeführt und nur die kleinsten gemessenen Werte weiterverwendet werden (siehe Kapitel 9), kann der Zentrierfehler verringert werden. In dem verwendeten Algorithmus werden 20 Messungen innerhalb der Talbreite durchgeführt, von denen die drei kleinsten für eine Mittelwertbildung verwendet werden. Dieser Mittelwert ist die Eingabe für die Auswertungsfunktion und damit die Basis für den berechneten Durchmesser.

Der Vorteil dieses Vorgehens ist, dass schon zuvor bekannt ist, dass die Messungen innerhalb der Talbreite aufgenommen werden. Die Grenzen der Talbreite können mit Verfahren, die verrauschte Messwerte verwenden, etwa in der Größenordnung der doppelten Talbreite erkannt und mit dem Zentrierer erreicht werden. Der verwendete Zentrieralgorithmus hat diese Fähigkeit. Durch fest vorgegebene Schritte mit der Schrittweite Talbreite/20, die Positionen innerhalb der doppelten Talbreite vorgeben, ist die Suche nicht mehr von dem Rauschen der Messergebnisse abhängig und es werden Messwerte an Positionen aufgenommen, von denen eine der tatsächlichen Mittenposition sehr nahe kommt, nämlich näher oder gleich Talbreite/20. Da jedoch nicht mit Sicherheit gesagt werden kann, welche Position diese optimale Position ist, verbleibt nach wie vor ein statistischer Fehler, der jedoch geringer ist.

Seine Größe kann ermittelt werden, indem die Funktion der Kapazität über der Exzentrizität innerhalb der Talbreite mit dem Rauschen der Messkette überlagert betrachtet wird. Dabei zeigt sich, dass man durch die Messung an den 20 Positionen 20 gleich stark verrauschte Kapazitätswerte mit unterschiedlichen Erwartungswerten erhält, wobei die Erwartungswerte wie die Kapazitätsfunktion verteilt sind.

$$C_{\text{gemessen}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot l}{\cosh\left(\frac{R_i^2 + R_a^2 - ex(\text{Schrittnummer})^2}{2 \cdot R_i \cdot R_a}\right)} + C_{\text{Rausch}}$$

Das Rauschen der Kapazität ist innerhalb der doppelten Talbreite etwa so halb groß, wie der Unterschied zwischen den Extremwerten der Kapazitätsfunktion in diesem Intervall. Dies ist vom Bohrungsdurchmesser unabhängig. Graphisch stellt sich die Situation wie in Abbildung 11.2 abgebildet dar.

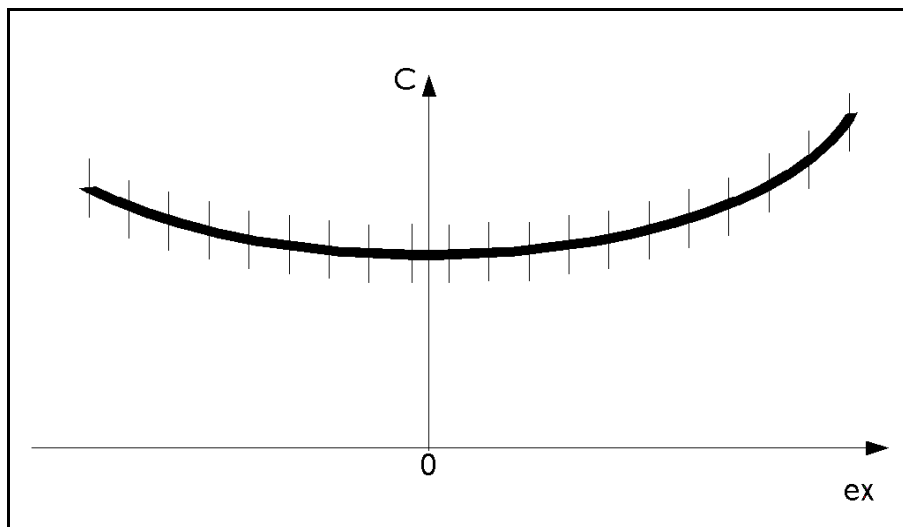


Abbildung 11.2: Kapazitätsfunktion innerhalb der doppelten Talbreite, wobei der betrachtete Bereich aufgrund der ungenauen Startposition des Algorithmus nicht symmetrisch zum Minimum liegt. Die senkrechten Linien stellen das Rauschen der Kapazitätsmessung dar.

Die Messung von 20 Werten an diesen 20 Positionen entspricht stochastisch gesehen dem Ziehen von 20 Karten mit verschiedenen Werten mit Gaußverteilung mit unterschiedlichen Mittelwerten aus 20 Urnen. Die Standardabweichung der drei kleinsten gezogenen Werte wird durch deren Mittelwertbildung verringert. Die Ermittlung der Standardabweichung des Mittelwertes aus diesen drei Werten ist stochastisch sehr anspruchsvoll und wird im Rahmen dieser Arbeit nicht im Detail untersucht. Messungen in der Praxis zeigen jedoch, dass das Messen mit festen Schritten und die Mittelwertbildung aus den drei kleinsten Werten eine gute Optimierung für den vorliegenden Fall darstellt, die das Kapazitätsminimum gut annähert und den Zentrierungsfehler durch die für messwertorientierte Verfahren unbekannt Position innerhalb des Intervalls „Talbreite“ auf etwa ein Viertel dieses Wertes verringert. Als verbleibende Dezentrierung ex wird daher für die Fehlerabschätzung im Weiteren mit einem Viertel der Talbreite (siehe Kapitel 9) gerechnet:

$$ex = \frac{\text{Talbreite}}{4} = \frac{2}{4} \cdot \sqrt{R_a^2 + R_i^2 - 2 \cdot R_a \cdot R_i \cdot \operatorname{arcosh} \left(\frac{1}{\frac{1}{\ln\left(\frac{R_a}{R_i}\right)} + \frac{\Delta C_{ex}}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot l}} \right)}$$

Für die unten durchgeführte Fehlerfortpflanzungsrechnung ist es von Interesse, wie groß die Kapazitätsabweichung ist, die aus der verbleibenden Dezentrierung resultiert. Setzt man die Formel für die halbe Talbreite (s. oben) als maximal mögliche Dezentrierung in die Formel für die Kapazität des Zylinderkondensators mit Exzentrizität (siehe Kapitel 4) ein, so hebt sich die gesamte Formel auf, und es verbleibt als Kapazitätsabweichung gegenüber der zentrierten Situation genau der Messfehler der Kapazitätsmessung ΔC_{ex} . Insgesamt ergibt sich also als Ergebnis dieser Dezentrierung ein zusätzlicher Kapazitätsfehler von ΔC_{ex} . Da die Dezentrierung und die Kapazitätsmessung unabhängige Größen sind, ergibt sich daraus als wirkender Gesamtfehler $\sqrt{2} \cdot \Delta C_{ex}$.

Von Interesse ist nun die Situation für Bruchteile der halben Talbreite statt der halben Talbreite selbst als verbleibende Dezentrierung. Der daraus resultierende zusätzliche Kapazitätsfehler lässt sich berechnen, indem man diesen Bruchteil der Talbreite, der als die Formel für die halbe Talbreite (s. Kapitel 10) geteilt durch n angesetzt wird, als Exzentrizität in die Formel für den Zylinderkondensator mit Exzentrizität (siehe Kapitel 4) einsetzt. Zur Berechnung des zusätzlichen Kapazitätsfehlers im Vergleich zur zentrierten Situation, d.h. mit Subtraktion der Kapazität im zentrierten Fall, ergibt sich mit n als Divisor für die Talbreite folgende Formel:

$$\Delta C_{ex} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot l}{\operatorname{arcosh} \left(\frac{\frac{n^2-1}{n^2} \cdot R_a^2 + \frac{n^2-1}{n^2} \cdot R_i^2 + \frac{2}{n^2} \cdot R_a \cdot R_i \cdot \cosh \left(\frac{1}{\frac{1}{\ln\left(\frac{R_a}{R_i}\right)} + \Delta \frac{C}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot l}} \right)}{2 \cdot R_a \cdot R_i} \right)} - \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot l}{\ln\left(\frac{R_a}{R_i}\right)}$$

Es zeigt sich, dass eine Verringerung der Dezentrierung eine weit überproportionale Verringerung des Kapazitätsfehlers zur Folge hat.

Der Graph dieser Funktion hat für die Bedingungen, die für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche vorlagen (Durchmesser der Bohrung ca. 12mm, Messkopfdurchmesser 9,602mm, Messkopflänge 5,6mm), den Verlauf, der in der Abbildung 11.3 dargestellt ist. Die Messgenauigkeit der Kapazität wurde mit 0,44fF angesetzt.

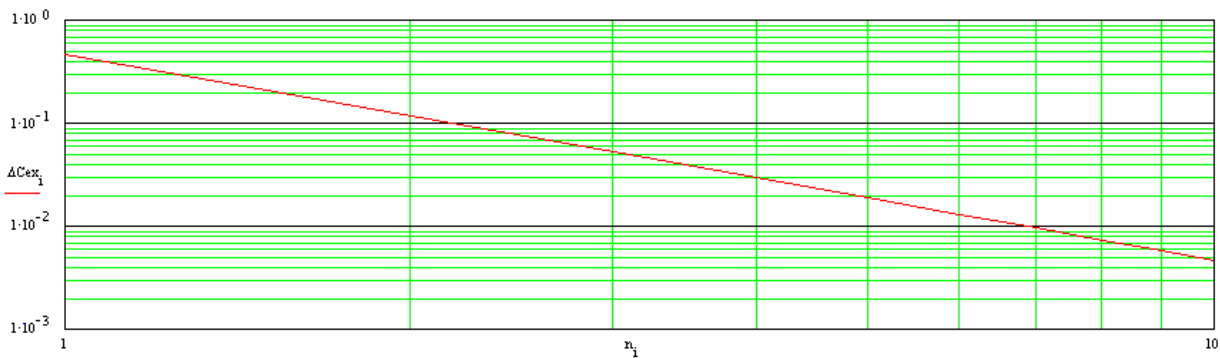


Abbildung 11.3: Doppelt logarithmisch aufgetragene Kapazitätsabweichung in fF über der Restexzentrizität. Diese ist in der Abbildung durch den Divisor n , durch den die halbe Talbreite geteilt wird, dargestellt, aus dem sich die Restexzentrizität ergibt ($eX_{Rest} = \text{Talbreite}/(2 \cdot n)$)

Eine Halbierung der Restexzentrizität hat etwa ein Viertel der Kapazitätsabweichung zur Folge, eine Drittelung etwa ein Neuntel, eine Viertelung etwa ein Sechzehntel und eine Fünftelung etwa ein Fünfundzwanzigstel der Kapazitätsabweichung zur Folge; der Zusammenhang ist also für die durchgeführten Versuche im wesentlichen quadratisch. Rechnungen zeigen, dass dies vom Bohrungsdurchmesser und auch von einer Skalierung der gesamten Geometrie um den Faktor 100 nach oben und nach unten fast unabhängig ist, lediglich bei der Skalierung um den Faktor 100 nach unten wird geht der Zusammenhang im Prozentbereich über den quadratischen hinaus. Wie weitere Rechnungen zeigen, hat auch die Größe des Messfehlers der Kapazitätsmessung keinen Einfluss auf den Zusammenhang. Der zusätzliche Kapazitätsfehler durch die verbleibende Dezentrierung ist mit dem verwendeten Zentrieralgorithmus folglich für alle relevanten Bedingungen im Wesentlichen ein konstanter Bruchteil des Messfehlers der Kapazitätsmessung.

Dieser beträgt für die vorliegende Situation, in der ein Viertel der Talbreite als Restexzentrizität erreicht wird, 1/16 des Messfehlers der Kapazitätsmessung. Die geometrische Addition zum Messfehler der Kapazitätsmessung ergibt einen Faktor 1,0307, um den sich der Messfehler der Kapazitätsmessung erhöht. Diese Erhöhung um ca. 3% vernachlässigbar klein. Der Fehler wird dennoch berücksichtigt, indem das Rauschen der Kapazitätsmessung, das in die Durchmesserberechnung eingeht, um 3,07% erhöht wird. Es beträgt damit 0,454fF statt 0,44fF.

Oben wurde zunächst nur der Fehler durch den Zentrieralgorithmus bestimmt. Zu diesem kommt ein weiterer Fehler aus der Positioniergenauigkeit des Zentrierers hinzu. Die Auswirkungen der beiden Fehlerarten hängt mit der Talbreite zusammen, die für die Bedingungen für die Versuche im Rahmen dieser Arbeit in Abbildung 9.3 in Kapitel 9 dargestellt ist. Die Talbreite ist stark von dem angemessenen Bohrungsdurchmesser abhängig. Für Bohrungen, die unwesentlich größer als der Messkopfdurchmesser sind, ist auf Grund der geringen Talbreite die Positioniergenauigkeit des Zentrierers kritischer. Bei nicht ausreichender Positioniergenauigkeit dadurch, dass nur diskrete Schritte möglich sind, die für eine ausreichend genaue Zentrierung zu groß sind, wie bei schrittmotorgesteuerten Positionierern, tritt ein Zentrierungsfehler von maximal der halben Schrittweite auf. Dies ergibt sich dadurch, dass im ungünstigsten Fall die Bohrungsmitte genau zwischen zwei Schritten liegt. In allen

anderen Fällen ist eine Position näher an der Bohrungsmitte möglich und wird auch erreicht. Auch bei zu großer Schrittweite muss der Fehler nicht immer auftreten, denn es kann zufällig eine Position nahe der Mitte getroffen werden.

Die beschriebene Situation liegt bei dem für die Versuche verwendeten Zentrierer vor. Er hat eine Schrittweite von $2,5\mu\text{m}$. Für die Fälle, in denen ein Viertel der Talbreite größer als $1,25\mu\text{m}$ ist, dominiert der Fehler aus dem Zentrieralgorithmus. Dies ist für die Bedingungen bei den durchgeführten Versuchen bei einem Sensordurchmesser von $9,602\text{mm}$ für Bohrungen ab $10,308\text{mm}$ Durchmesser der Fall. Der Wert wurde durch numerisches Lösen der Formel für die Talbreite nach dem Durchmesser gefunden, wobei die Messgenauigkeit der Kapazitätsmessschaltung mit $0,44\text{fF}$ angenommen wurde. Der Positionierungsfehler und der Restfehler der Zentrierung treten alternativ auf, da eine Verschlechterung der Zentrierung nur entsteht, wenn der Positionierer nicht in jedem Fall innerhalb des Fehlerintervalls der verbleibenden Dezentrierung positionieren kann. Dies ist jedoch oberhalb von $10,308\text{mm}$ immer der Fall. Unterhalb dieses Wertes kann die Dezentrierung maximal die Größe des halben Positionierungsfehlers haben.

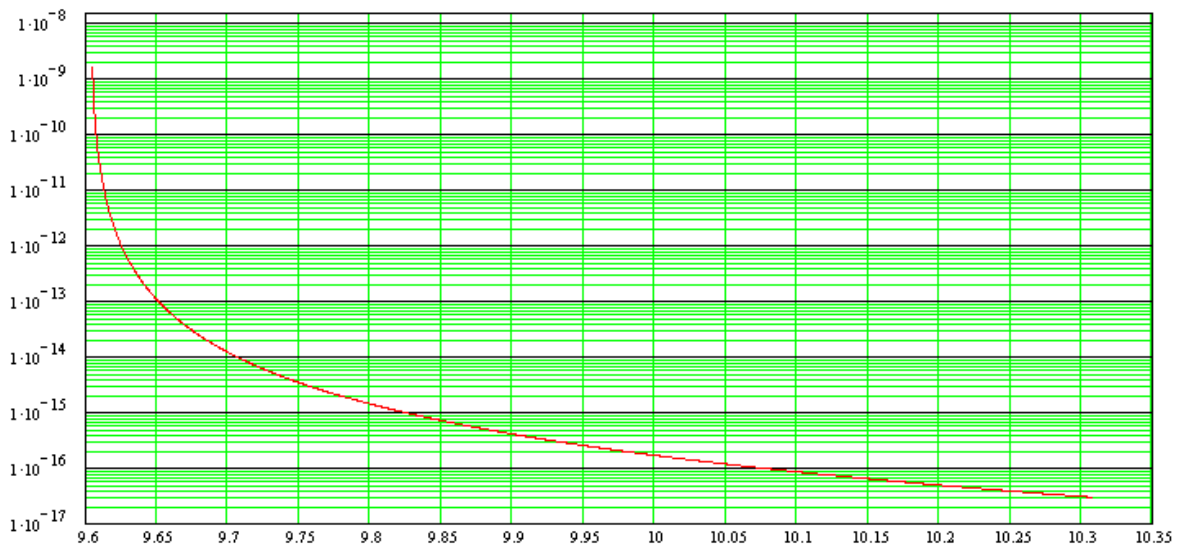


Abbildung 11.4: Kapazitätsfehler in F durch einen Zentrierer mit nicht ausreichender Zentrierengenauigkeit über dem Bohrungsdurchmesser in mm für die Situation bei den Messungen: Messkopfdurchmesser $9,602\text{mm}$, Messflächenhöhe $5,6\text{mm}$, Fehler der Kapazitätsmessung $0,44\text{fF}$.

Der resultierende Kapazitätsfehler ergibt sich folglich für Bohrungsdurchmesser über $10,308\text{mm}$ aus der oben angegebenen Formel für ΔC_{ex} . Für einen festen Dezentrierungsfehler durch die mangelnde Positionierengenauigkeit des Zentrierers ergibt sich für Bohrungsdurchmesser unterhalb von $10,308\text{mm}$ ein Kapazitätsfehler in Abhängigkeit des angemessenen Bohrungsdurchmessers. Dieser kann folgendermaßen berechnet werden:

$$\Delta C = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot l}{\cosh\left(\frac{R_i^2 + R_a^2 - ex^2}{2 \cdot R_i \cdot R_a}\right)} - \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot l}{\ln\left(\frac{R_a}{R_i}\right)}$$

Der Kapazitätsfehler ist in Abbildung 10.4 dargestellt.

Für eine optimale Auslegung sollte folglich der Zentrierer eine so große Positioniergenauigkeit haben, dass sie für den geplanten Messbereich ausreicht und keinen erhöhten Messfehler verursacht. Der Fehler wird für die Fehlerrechnung nicht weiter berücksichtigt, und damit angenommen, dass das untere Ende des Messbereichs bei 10.308mm liegt. Bei der Diskussion der Messergebnisse wird noch einmal kurz auf diesen Sachverhalt eingegangen.

Der Fehler der Durchmessermessung kann aus dem Kapazitätsfehler berechnet werden, indem die Formel für den zentrierten Zylinderkondensator folgendermaßen erweitert wird:

$$C_{\text{zentriert}} - \Delta C = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot l}{\ln\left(\frac{R_a + \Delta R_a}{R_i}\right)}$$

Diese Formel lässt sich nach ΔR_a auflösen und liefert den gesuchten Fehler der Durchmessermessung durch die nicht ausreichende Zentriergenauigkeit:

$$\Delta R_a = \exp\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot l}{C_{\text{zentriert}} - \Delta C}\right) \cdot R_i - R_a$$

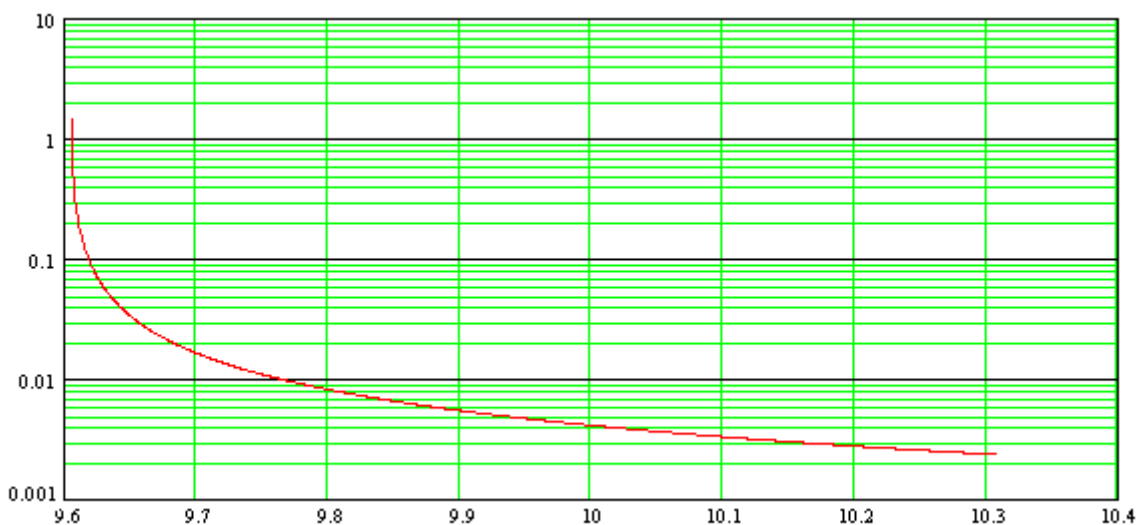


Abbildung 11.5: Theoretischer Messfehler der Durchmessermessung in μm durch einen Zentrierer mit nicht ausreichender Zentriergenauigkeit über dem Bohrungsdurchmesser in mm für die Situation bei den Messungen: Messkopfdurchmesser 9,602mm, Messflächenhöhe 5,6mm, Fehler der Kapazitätsmessung 0,44fF.

Dieser Fehler der Durchmessermessung ist in Abbildung 11.4 dargestellt. Er ist im Rahmen der Gesamfehlerermittlung auf gleiche Weise wie der Fehler durch den Zentrieralgorithmus anzusehen, das heißt, er erhöht virtuell die Größe des Rauschens der Kapazitätsmessung.

Verkipfung des Messkopfes in der Bohrung

Ein weiterer Fehler in der Kondensatorgeometrie entsteht durch Verkipfung des Messkopfes zur Bohrung. Ebenso wie bei der Exzentrizität lässt sich der Verkipfungsfehler nicht ohne weitere Maßnahmen von einem anderen angemessenen Durchmesser unterscheiden. In Kapitel 4 wurde für die resultierende Kapazitätsabweichung eine Näherung berechnet und die Kapazitätsabweichung ΔC in Abbildung 4.6 dargestellt. Zur Ermittlung des für die Messung resultierenden Fehlers kann die Kapazitätsabweichung in eine Durchmesserabweichung zurückgerechnet werden. Dazu wird die Kapazitätsabweichung aus Kapitel 4 mit dem Einflussfaktor der Kapazität auf den Durchmesser multipliziert. Dieser Faktor wird durch Ableitung der Formel für den Durchmesser nach der Kapazität bestimmt. Dazu kann zunächst von der Formel für den zentrischen Zylinderkondensator ausgegangen werden:

$$C = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot l}{\ln\left(\frac{R_a}{R_i}\right)}$$

Aufgelöst nach dem Bohrungsdurchmesser R_a :

$$R_a = R_i \cdot \exp\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot l}{C}\right)$$

Nach C abgeleitet:

$$\frac{dR_a}{dC} = -\frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot l}{C^2} \cdot R_i \cdot \exp\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot l}{C}\right)$$

C eingesetzt:

$$\frac{dR_a}{dC} = -\frac{R_a}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot l} \cdot \ln^2\left(\frac{R_a}{R_i}\right)$$

Für den Durchmesserfehler gilt:

$$\Delta D = 2 \cdot \frac{dR_a}{dC} \cdot \Delta C = -\frac{D_a}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot l} \cdot \ln^2\left(\frac{R_a}{R_i}\right) \cdot \Delta C$$

Mit dem Mathematikprogramm MathCad 8 wurden für mehrere verschiedene angemessene Bohrungsdurchmesser Lösungen für den äquivalenten Durchmesserfehler berechnet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 11.6 dargestellt.

Es zeigt sich, dass die Empfindlichkeit der Messung gegenüber Verkippung relativ gering ist. Anforderungen, die an die zulässige Verkippung gestellt werden müssen, damit die Verkippung keine signifikante Fehlerquelle darstellt, können in der Praxis relativ leicht erfüllt werden. Die Anforderungen steigen nur bei der Aufgabe, eine sehr genaue Messung durchzuführen, merklich an. Typischerweise wird dazu der Sensordurchmesser unwesentlich kleiner als die zu vermessende Bohrung gewählt, was eine erhöhte Empfindlichkeit gegen Verkippung nach sich zieht.

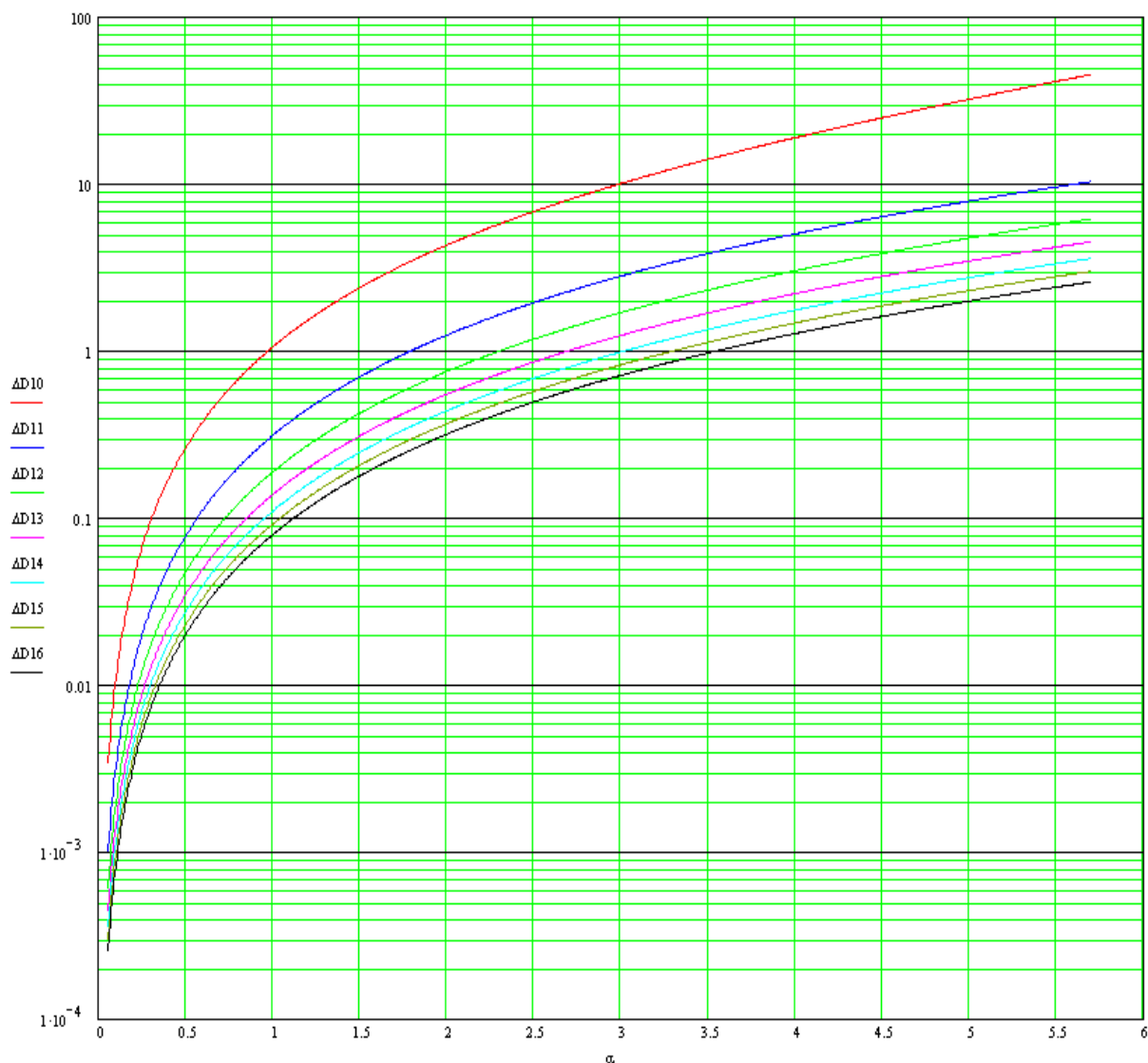


Abbildung 11.6: Äquivalenter Durchmesserfehler in μm durch Verkippung des Messkopfes in der Bohrung in $^\circ$ für die Situation bei den Messungen: Messkopfdurchmesser 9,602mm, Messflächenhöhe 5,6mm, zentrierte Position. Die Kurven geben den Durchmesserfehler für einen Durchmesser x in der Bezeichnung ΔD_x an.

11.2.3 Primärwandler

Bei der Pulsweitenmodulation mit einem Relaxationsoszillator wird die Kapazität durch den Primärwandler in eine Zeitdauer umgewandelt. Hierbei entstehen durch parasitäre Effekte, durch das Wandlerprinzip bedingte Effekte sowie durch Rauschen Abweichungen von der idealen Wandlung. Die ideale Wandlung liegt vor, wenn die Zeitdauer vollständig proportional zur angeschlossenen Kapazität C und rauschfrei ist.

Als parasitärer Effekt tritt am pulsweitenmodulierten Ausgang die Addition einer parasitären Zeit auf, die sich aus parasitären Kapazitäten und Auswirkungen der Schaltzeiten zusammensetzt (s. Kapitel 7). Die Linearität der verwendeten Schaltung ist sehr gut, da Kapazitäten leicht linear in Zeiten gewandelt werden können, und ist vermutlich nur durch die Drift begrenzt.

Messungen mit konstanter angemessener Kapazität zur Ermittlung der Genauigkeit der Messschaltung ergaben eine Reproduzierbarkeit von etwa 0,3 Werten in etwa 7000 Werten (Definition der Einheit „Werte“ siehe nächster Abschnitt), also eine relative Auflösung von etwa $4,3 \cdot 10^{-5}$. Der Fehler wird im folgenden als Fehlerintervall herangezogen. Dabei wurden 1200 Messwerte ausgezählt und gemittelt. Die Temperatur wurde dabei konstant gehalten, sodass thermische Drift in diesem Wert nicht berücksichtigt ist. Ein Ladewiderstand R von $10\text{M}\Omega$ und eine Messzeit von etwa 10ms ergeben mit

$$U_{\text{Rausch}} = \sqrt{4 \cdot k_B \cdot T \cdot R \cdot \Delta f} ,$$

der Boltzmannkonstanten $k_B = 1,038065 \cdot 10^{-23}$, einer absoluten Temperatur $T = 300\text{K}$ und einem Frequenzbereich $\Delta f = 1/10\text{ms}$ ein thermisches Spannungsrauschen U_{Rausch} von etwa $4\mu\text{V}$. Im Verhältnis zu einem Ladehub von etwa 1V bedeutet dies ein Spannungsverhältnis von etwa $4 \cdot 10^{-6}$. Für den Unterschied zu der gemessenen relativen Genauigkeit sind folglich weitere Rauschquellen verantwortlich, vermutlich vor allem die aktiven Bauelemente der Messschaltung und Rauschen auf der Versorgungsspannung, das in die Triggerschwellen und die Ladespannung durchschlägt.

Mit weiteren Messungen mit verschiedenen Festkondensatoren mit bekannter Größe wurde eine Empfindlichkeit von $1,48\text{fF/Wert}$ ermittelt. Die Genauigkeit beträgt damit $0,44\text{fF}$. Die Kondensatoren wurden mit einer 6-stelligen LCR-Messbrücke (HP 4275 A) ausgemessen.

11.2.4 Genauigkeit des Zählers

Die von der Kapazitätsmessschaltung erzeugte Zeitdauer wird mit einem Zähler ausgewertet. Dadurch erfolgt eine Wandlung der Zeitdauer in eine Zahl, die die Anzahl der Zeitimpulse beschreibt. Durch die Diskretisierung entsteht Rauschen. Vereinzelt kann das letzte Bit den falschen Wert annehmen, wenn die Flanken des Messsignals und des Zählertakts zusammenfallen. Die Häufigkeit des Ereignisses als statistischer Fehler hängt mit dem Rauschen auf den beiden Signalen zusammen. Das Messsystem arbeitet digital mit 5V und zeigt typischerweise ein Rauschen von wenigen

mV auf den Signalen. Folglich ist mit dem Auftreten von statistischen Fehlern mit einer Häufigkeit in der Größenordnung von einigen Promille zu rechnen.

Systematische Fehler des Zählers vergrößern oder verkleinern das Messergebnis für alle gemessenen Werte. Dies erscheint als ein konstanter parasitärer additiver Fehler des rohen Messergebnisses. Solche Fehler werden durch die Kalibrierung eliminiert.

Bei einer Zählerfrequenz von 100MHz beträgt die maximale Größe des Fehlers pro Start- oder Stopvorgang durch eine Messsignalflanke 10ns. Maximal treten also bei der Messung einer Pulsdauer 20ns oder 2 Werte Fehler auf. Als Wert wird im Folgenden die dimensionslose Einheit des Zählergebnisses bezeichnet; 1 Wert ist folglich ein Zählereignis, also das Umspringen des Zählers an der letzten Stelle.

Da der Zähler mit 100MHz arbeitet und eine Auflösung von 10^{-6} gefordert wird, kann eine Messung bis zu 10ms dauern. Die Aufnahme von 100 Messwerten erfordert damit bis zu 1s.

Bei der Messung werden zur Bestimmung des Durchmessers 1200 der Messwerte aus dem Zähler gemittelt. Auftretende statistische Fehler des Zählers erscheinen dadurch um die Häufigkeit ihres Auftretens verringert. Es verbleibt folglich ein statistischer Fehler der Zählers in der Größenordnung von wenigen Promille eines Wertes. Als Abschätzung nach oben dürfte 10‰ ausreichend sein. Der statistische Fehler des Zählers beträgt damit 0,01 Werte.

Ein weiterer Vorteil der Mittelwertbildung aus vielen einzelnen Zählwerten ist, dass dadurch die Diskretisierung auf einzelne Werte überwunden wird. Durch das Teilen der Summe durch die Anzahl der Werte werden Zwischenwerte zwischen ganzen Werten ermöglicht.

11.2.5 Genauigkeit der Kalibrierung und der Durchmesserberechnung

Die Auswertungsfunktion stellt die Brücke zwischen dem rohen Messergebnis und dem gesuchten Messergebnis dar. Durch Berücksichtigung von systematischen Messfehlern in der Auswertungsfunktion lassen sich diese eliminieren. Dies ist so weit möglich, wie die systematischen Fehler bekannt sind und genau beschrieben werden können. Außerdem muss das System berechenbar bleiben. Eine Möglichkeit zur Eliminierung von systematischen Messfehler ist die Kalibrierung (siehe Kapitel 10). Die Auswertung verursacht trotz der Berücksichtigung und rechnerischen Eliminierung von systematischen Fehler einen verbleibenden Auswertungsfehler, der vor allem dadurch verursacht wird, dass eine absolut exakte Kalibrierung nicht möglich ist. Dies ergibt sich zum Teil aus der Genauigkeit, die beim Aufnehmen der Kalibrierpunkte erreicht werden kann. Zu den Fehlern aus der Kalibrierung addieren sich Rechenfehler, die jedoch durch sorgfältige Programmierung und geeignete Hardware vollständig eliminiert werden können. Letztlich bleiben alle Abweichungen der Beschreibung von den tatsächlichen Einflüssen als resultierender systematischer Messfehler der Messkette

vom wahren Bohrungsdurchmesser bis zum angezeigten Ergebnis zurück. Der systematische Restfehler unterscheidet sich von den statistischen Fehlern dadurch, dass er das Messergebnis stets auf die gleiche Weise beeinflusst.

Die Kalibrierung kann nur so gut sein, wie die Kalibriermessungen selbst. Diese können daher mit einer erhöhten Anzahl zu mittelnder Messwerte durchgeführt werden, und auch die „Talbreite“ kann mit mehr Schritten durchfahren werden, um den Zentrierungsfehler zu minimieren. Dies wurde jedoch im Rahmen der vorliegenden Arbeit aus Zeitgründen nicht durchgeführt, sondern zur Kalibrierung der normale Messalgorithmus verwendet, bei dem für die endgültigen Messwerte schon 1200 Werte je Messpunkt gemittelt wurden. Für die Genauigkeit der Kalibriermessungen ergibt sich daher dieselbe Genauigkeit die wie bei der Erfassung von Rohwerten mit Zentrierung im Messbetrieb.

Die Kalibrierung stellt die Linearität des Messsystems weitgehend sicher. Der verbleibende Fehler aus Nichtlinearität hängt auch damit zusammen, ob bei der Messung eine Interpolation oder eine Extrapolation bezüglich der Stützstellen vorliegt, und auch damit, wie weit der Messwert von einer Stützstelle entfernt ist. Wenn der benötigte Messbereich bekannt ist, kann die verbleibende Nichtlinearität dadurch optimiert werden, dass die Stützstellen so gewählt werden, dass zwei davon nahe dem Rand innerhalb des Messbereichs und die dritte etwa in der Mitte des Messbereichs liegt.

Messfehler bei der Kalibrierung schlagen sich in den Kalibrierwerten nieder und wirken auf alle mit diesen Werten durchgeführten Messungen als systematischer Messfehler. Da die Kalibrierung jedoch wiederholt wird, stellt sich die Menge aller Kalibrierwerte aus mehreren Kalibrierungen wieder als statistischer Fehler dar. Die Kalibrierungsfehler werden daher im folgenden als statistische Fehler eines dauerhaft verwendeten und wiederholt kalibrierten Messsystems betrachtet.

Beim vorliegenden Messsystem wird zur Bestimmung der Auswertefunktion von folgendem Zusammenhang zwischen rohem Messergebnis und Durchmesser D ausgegangen:

$$D = 2 \cdot R_i \cdot \exp\left(\frac{\text{Faktor}}{N \cdot t_z - \text{Term}}\right)$$

Hierbei sind

N der Wert im Zähler,

t_z der Zählertakt,

Faktor und Term Kalibrierwerte und

R_i ein aus der Kalibrierung gewonnener Messkopfradius.

Statistische Messfehler aus der Messkette schlagen sich über das Rohergebnis N , das bei den Versuchen aus der Mittelung von 1200 gezählten Werten entsteht, im Durchmesser nieder. Hier finden sich das Rauschen der Kapazitätsmessung einschließlich dem Kapazitätsfehler durch die verbleibende Dezentrierung, wie auch die Fehler des Zählers wieder. Der Fehler durch die Dezentrierung wird, wie im Kapitel 11.2.2 beschrieben wurde, auf das Rauschen der Kapazitätsmessung mit dem Faktor 3,07% aufgeschlagen. Das Rauschen der Kapazitätsmessung wird mit 0,3 Werten angesetzt, was 0,44 fF entspricht. Mit dem Fehler durch die Dezentrierung ergibt sich 0,309 Werte beziehungsweise 0,454 fF. Durch den Zähler entstehen weitere 0,01 Werte statistischer Fehler, was 0,015 fF entspricht. Dieser erhöht den Fehler des Rohergebnisses durch geometrische Addition um vernachlässigbare 3,2% auf 0,30916 Werte. Das Rohergebnis N geht in der Auswertungsfunktion in eine Differenz ähnlich großer Werte im Nenner eines Bruchs ein, wobei außerdem der Bruch Argument einer Exponentialfunktion ist. Dadurch schlagen sich statistische Messfehler aus der Messkette verstärkt im Durchmesser nieder.

Die Fehler, die bei der Kalibrierung entstehen, gehen in die Werte Faktor, Term und R_i ein. Dabei ist ein Fehler des Wertes Term ebenso gravierend wie die statistischen Messfehler der Messkette, da seine Position innerhalb der Formel gleich ist. Fehler in Faktor gehen nur exponentiell ein, und Fehler in R_i gehen proportional ein. Letztere sind somit am unkritischsten. Der Zählertakt t_z hat eine deutlich höhere Genauigkeit als die anderen Faktoren. Er wird deshalb als konstant angesehen und für die Fehlerrechnung vernachlässigt.

Das Rauschen des Messergebnisses D durch wiederholte Kalibrierung sowie durch das Rauschen der Messung ergibt sich nach Gaußscher Fehlerfortpflanzungsrechnung wie folgt:

$$\Delta D = \sqrt{\left(\frac{\partial D}{\partial R_i} \Delta R_i + \frac{\partial D}{\partial Faktor} \Delta Faktor + \frac{\partial D}{\partial Term} \Delta Term\right)^2 + \left(\frac{\partial D}{\partial N} \Delta N\right)^2}$$

Die partiellen Ableitungen des Durchmessers nach den Kalibrierwerten sind statistisch nicht voneinander unabhängig, da sie auf denselben Grundwerten basieren, weshalb sie arithmetisch und nicht geometrisch addiert werden müssen.

Die Fehler in den einzelnen Kalibrierwerten $\Delta Term$, $\Delta Faktor$ und ΔR_i ergeben sich bei deren Berechnung aus den statistischen Fehlern ΔN_i der zu Grunde liegenden Messungen N_1 , N_2 und N_3 sowie aus den Abweichungen der Durchmesser der Bohrungen, die zur Kalibrierung verwendet werden, zu einem absoluten Maßsystem. Der ermittelte Bohrungsdurchmesser soll in diesem absoluten Maßsystem richtig sein, weshalb sich alle absoluten Fehler hierauf beziehen müssen. Diesen Zusammenhang stellt die Genauigkeit der Messung der der Kalibrierbohrungsdurchmesser her. Diese Genauigkeit ist die Genauigkeit des Durchmessermeßsystems, mit dem die Kalibrierbohrungen unabhängig vom hier untersuchten Meßsystem vermessen wurden.

Der Fehlereinfluss kann durch Fehlerfortpflanzungsrechnung bestimmt werden.

Die Formeln zur Berechnung der Kalibrierwerte lauten (siehe Kapitel 10):

$$Term = t_z \cdot \frac{N_1 \cdot (N_2 - N_3) \cdot \ln(R_{a,1}) + N_2 \cdot (N_3 - N_1) \cdot \ln(R_{a,2}) + N_3 \cdot (N_1 - N_2) \cdot \ln(R_{a,3})}{\ln(R_{a,1}) \cdot (N_2 - N_3) + \ln(R_{a,2}) \cdot (N_3 - N_1) + \ln(R_{a,3}) \cdot (N_1 - N_2)}$$

$$Faktor = (t_z \cdot N_2 - Term) \cdot (\ln(R_{a,3}) - \ln(R_{a,2})) \cdot \frac{t_z \cdot N_3 - Term}{t_z \cdot (N_2 - N_3)}$$

$$R_i = R_{a,3} \cdot \exp\left(\frac{Faktor}{Term - N_3 \cdot t_z}\right)$$

Mit der Gaußschen Fehlerfortpflanzungsrechnung ergibt sich:

$$\Delta Term = \sqrt{\left(\frac{\partial Term}{\partial N_1} \Delta N_1\right)^2 + \left(\frac{\partial Term}{\partial N_2} \Delta N_2\right)^2 + \left(\frac{\partial Term}{\partial N_3} \Delta N_3\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial Term}{\partial R_{a,1}} \Delta R_{a,1}\right)^2 + \left(\frac{\partial Term}{\partial R_{a,2}} \Delta R_{a,2}\right)^2 + \left(\frac{\partial Term}{\partial R_{a,3}} \Delta R_{a,3}\right)^2}$$

$$\Delta Faktor = \sqrt{\left(\frac{\partial Faktor}{\partial N_2} \Delta N_2\right)^2 + \left(\frac{\partial Faktor}{\partial N_3} \Delta N_3\right)^2 + \left(\frac{\partial Faktor}{\partial Term} \Delta Term\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial Faktor}{\partial R_{a,2}} \Delta R_{a,2}\right)^2 + \left(\frac{\partial Faktor}{\partial R_{a,3}} \Delta R_{a,3}\right)^2}$$

$$\Delta R_i = \sqrt{\left(\frac{\partial R_i}{\partial N_3} \Delta N_3\right)^2 + \left(\frac{\partial R_i}{\partial Faktor} \Delta Faktor\right)^2 + \left(\frac{\partial R_i}{\partial Term} \Delta Term\right)^2 + \left(\frac{\partial R_i}{\partial R_{a,3}} \Delta R_{a,3}\right)^2}$$

Die Ableitungen der Kalibrierwerte sind sehr lange Formeln, auf deren explizite Darstellung an dieser Stelle verzichtet wird. Sie wurden mit Hilfe des Mathematikprogramms MathCad 8 berechnet und für die Werte $N_1 = 4979,68$; $N_2 = 5582,74$ und $N_3 = 6910,68$ für die Bohrungen mit den Durchmessern $R_{a,1} = 13,484\text{mm}$; $R_{a,2} = 11,398\text{mm}$ und $R_{a,3} = 10,409\text{mm}$ ausgewertet. Dies stellt die bei den Versuchen verwendete Kalibrierung dar.

Es ergeben sich für einen Messfehler von $\Delta N = \Delta N_1 = \Delta N_2 = \Delta N_3 = 0,309$ Werten und für eine Messgenauigkeit des Durchmessers der Kalibrierbohrungen von $1 \mu\text{m}$ in Tabelle 11.1.

$\partial \text{Term} / \partial N_1 \cdot \Delta N$	9,690E-8
$\partial \text{Term} / \partial N_2 \cdot \Delta N$	-8,752E-9
$\partial \text{Term} / \partial N_3 \cdot \Delta R$	2,152E-9
$\partial \text{Term} / \partial R_1 \cdot \Delta R$	7,336E-9
$\partial \text{Term} / \partial R_2 \cdot \Delta R$	-2,475E-8
$\partial \text{Term} / \partial R_3 \cdot \Delta R$	1,760 E-8
ΔTerm	3,294E-8
$\partial \text{Faktor} / \partial N_2 \cdot \Delta N$	1,235E-9
$\partial \text{Faktor} / \partial N_3 \cdot \Delta N$	-4,422E-10
$\partial \text{Faktor} / \partial R_2 \cdot \Delta R$	4,160E-9
$\partial \text{Faktor} / \partial R_3 \cdot \Delta R$	-4,555E-9
$\partial \text{Faktor} / \partial \text{Term} \cdot \Delta \text{Term}$	-3,394E-9
ΔFaktor	1,058E-8
$\partial R_i / \partial N_3 \cdot \Delta N$	6,106E-8
$\partial R_i / \partial R_3 \cdot \Delta R$	9,193E-7
$\partial R_i / \partial \text{Term} \cdot \Delta \text{Term}$	-2,615E-7
$\partial R_i / \partial \text{Faktor} \cdot \Delta \text{Faktor}$	-7,488E-7
ΔR_i	2,243E-6

Tabelle 11.1: Einflussgrößen für die Berechnung der Fehler der Kalibrierwerte

Die Ableitungen des gemessenen Durchmessers nach seinen Einflussgrößen lauten wie folgt:

$$\frac{\partial D}{\partial R_i} = 2 \cdot \exp\left(\frac{\text{Faktor}}{N \cdot t_z - \text{Term}}\right)$$

$$\frac{\partial D}{\partial \text{Faktor}} = \frac{2 \cdot R_i \cdot \exp\left(\frac{\text{Faktor}}{N \cdot t_z - \text{Term}}\right)}{N \cdot t_z - \text{Term}}$$

$$\frac{\partial D}{\partial \text{Term}} = 2 \cdot R_i \cdot \frac{\text{Faktor}}{(N \cdot t_z - \text{Term})^2} \cdot \exp\left(\frac{\text{Faktor}}{N \cdot t_z - \text{Term}}\right)$$

$$\frac{\partial D}{\partial N} = 2 \cdot R_i \cdot \frac{\text{Faktor} \cdot t_z}{(N \cdot t_z - \text{Term})^2} \cdot \exp\left(\frac{\text{Faktor}}{N \cdot t_z - \text{Term}}\right)$$

Die Ableitungen des gemessenen Durchmessers nach den Einflussgrößen Faktor, Term und R_i sind von N und damit von dem aktuell angemessenen Durchmesser abhängig. Die Einflussgrößen auf den Fehler der Durchmesserbestimmung aus der Kalibrierung hängen folglich ebenfalls vom angemessenen Durchmesser ab. Der Verlauf dieser Größen ist für die Bedingungen, die bei den Versuchen vorlagen, in Abbildung 11.7 dargestellt.

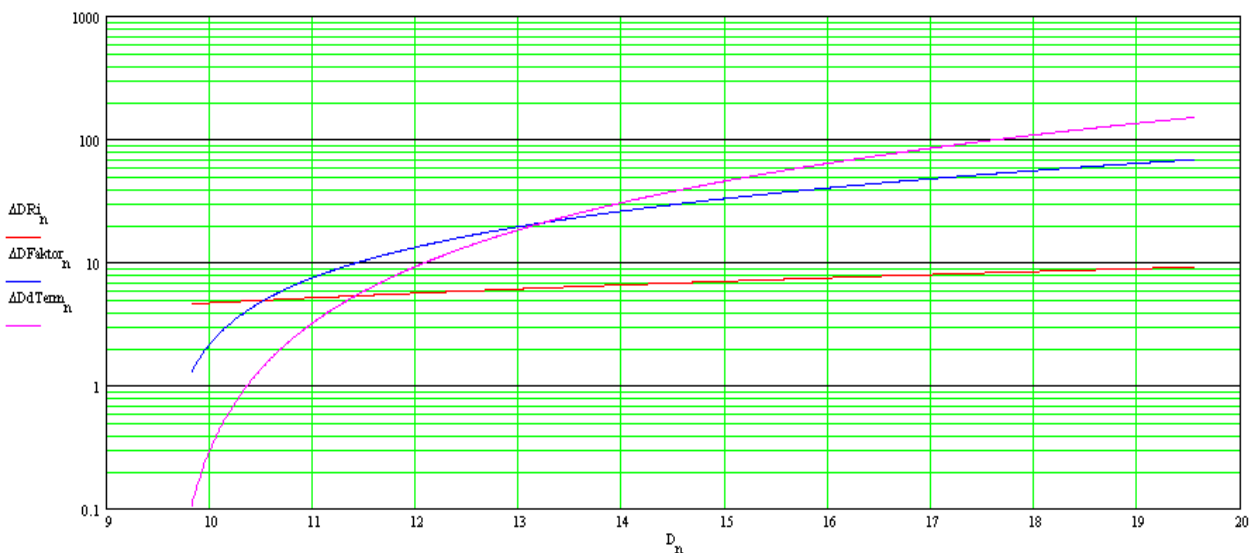


Abbildung 11.7: Verlauf der Einflussgrößen auf den Fehler der Durchmesserberechnung aus der Kalibrierung; Darstellung der Einflussgrößen in μm über dem Bohrungsdurchmesser in mm . ΔDR_i beschreibt den Einfluss aus aus Fehlern in R_i , $\Delta DFaktor_n$ den Einfluss aus Fehlern in Faktor und $\Delta DdTerm_n$ den Einfluss aus aus Fehlern in Term.

Aus diesen Größen lässt sich der Gesamtfehler der Messung theoretisch bestimmen. In Abbildung 11.8 ist der Verlauf des Fehlers aus der Messkette bis zum Rohergebnis, das heißt ohne den Kali-

brierungsfehler, sowie der Gesamtfehler einschließlich des Kalibrierungsfehlers über dem Durchmesser dargestellt. Zusätzlich ist der Gesamtfehler ohne den Einfluss der Messfehler bei der Messung der Durchmesser der Kalibrierbohrungen dargestellt.

Der statistische Fehler ohne Kalibrierungsfehler stellt den Fehler von Messung zu Messung ohne eine neue Kalibrierung dar. Dieser Fehler ist gegenüber den Fehlern aus der Kalibrierung vernachlässigbar gering. Die Fehler aus der Kalibrierung dominieren folglich den gesamten Messfehler des Systems.

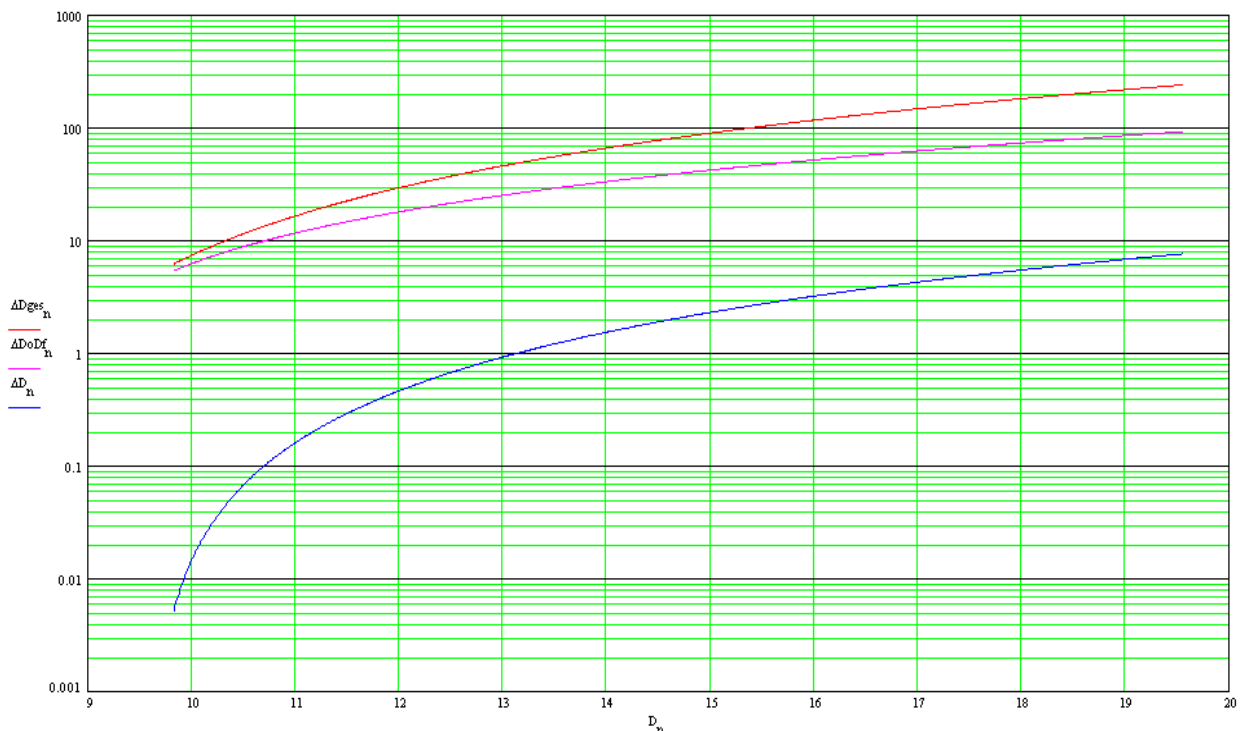


Abbildung 11.8: Fehler der Durchmessermessung in μm über dem Durchmesser in mm für die Bedingungen bei den Versuchen mit idealem Zentrierer. ΔD_{ges} ist der gesamte Fehler der Durchmessermessung einschließlich allen Kalibrierungsfehlern (rot, oben); ΔD_{oDf} ist der Fehler ohne den Einfluss der Messfehler bei der Bestimmung der Durchmesser der Kalibrierbohrungen (violett, Mitte), ΔD ist der statistische Fehler ohne Kalibrierungsfehler (blau, unten).

11.2.6 Rechengenauigkeit

Die Rechenfehler können – Hardwaredefekte seien hier ausgeschlossen – durch Rundungsfehler und insbesondere durch Auslöschung entstehen. Auslöschung bedeutet, dass das Ergebnis einer Subtraktion oder Addition keine ausreichende relative Genauigkeit mehr hat. Addiert man beispielsweise eine sechsstellige 32Bit float Zahl mit Exponent -5 zu einer anderen sechsstelligen 32Bit float Zahl mit Exponent -2, so geht im Ergebnis die Information aus den letzten zwei Stellen der Zahl mit dem Exponenten -5 verloren. In Abhängigkeit der weiteren Verarbeitung können diese Stellen unter Umständen von Bedeutung sein.

Sowohl Auslöschung als auch Rundungsfehler treten nur bei mangelhafter Auslegung des Systems

auf, das heißt, bei zu geringer Bitbreite der verwendeten Variablen. Bei geeigneter Auslegung, die der Normalfall sein sollte, fallen Rechenfehler nicht ins Gewicht.

Rechenfehler hängen mit dem verwendeten Prozessor und den Möglichkeiten der Programmierung zusammen. Im vorliegenden Messsystem wird ein Siemens SAB80C537 mit 8Bit-Architektur verwendet. Er beinhaltet einen mathematischen Co-Prozessor, der Division von 32Bit-Variablen (C-Variablentyp long), Multiplikation von 16Bit-Variablen (C-Variablentyp integer) sowie shift- und normalize-Operationen bietet. Zur Programmierung wurde die IDE Eclipse verwendet, in die der GNU sdcc (Small Device C-Compiler) integriert wurde. Dieser Compiler unterstützt in der verwendeten Version maximal 32-Bit-Festkomma- oder Gleitkommavariablen. Mit 32 Bit können als Festkommavariablen ganze Zahlen bis 4.294.967.296 dargestellt werden, d.h mit long-Variablen ist eine Genauigkeit von besser als 10^{-9} darstellbar. 32Bit-Gleitkommavariablen (C-Variablentyp float) erlauben in der Mantisse mit 24 Bit mit 16.777.216 Werten eine Darstellung von etwas über 10^{-7} und einen Exponenten bis E127.

Ob dies ausreichend ist, ist von der verwendeten Auswertefunktion abhängig. Dabei sind die verwendeten Rechenoperationen relevant.

Die Grundlage für die Auslegung des vorliegenden Messsystems bildet der Zähler im vorliegenden Messsystem; er ist ein 24Bit-Zähler, d.h. er kann Zahlen bis 16.777.216 darstellen. Davon wird jedoch nur der Teil tatsächlich genutzt, den die Messung als Auflösung liefert. Im folgenden wird von einer Auflösung von 10^6 ausgegangen, in der Praxis nicht ganz erreicht wird.

In der hier verwendeten Auswertefunktion treten als nichtlineare Funktionen die Exponential- und die natürliche Logarithmusfunktion auf. Bei nichtlinearen Funktionen werden bei Verwendung reeller Zahlen Intervalle im Definitionsbereich auf Intervalle mit anderer Größe im Wertebereich abgebildet. Für die Berechnung mit Computersystemen bedeutet dies, dass das Ergebnis auf die möglichen diskreten Werte im Wertebereich gerundet werden muss, auch wenn der Wert aus dem Definitionsbereich mit den diskreten Zahlen exakt darstellbar ist. Dadurch kann hier Information verloren gehen. Der Informationsverlust ist durch die Vergrößerung der relativen Auflösung durch größere Inkremente im Wertebereich beschreibbar. Soll hier keine Information verloren gehen, sollten die verwendeten Variablen eine ausreichend feine Diskretisierung bieten. Eine Möglichkeit ist die Verwendung von float-Variablen, die per definitionem eine Adaption der absoluten Diskretisierung über den Exponenten bieten. An der vorliegenden Auswertefunktion ist eine Exponentialfunktion beteiligt, und bei Kalibrierung müssen Logarithmusfunktionen berechnet werden.

Das Argument der Exponentialfunktion in der Auswertefunktion ist ein Quotient, dessen Wert in der Praxis um 1 liegt. Der Quotient setzt sich aus einem Dividenden b , der in der Praxis in der Größenordnung 10^{-5} liegt und einem Divisor, der wiederum eine Differenz aus c und d darstellt, zusammen. Minuend c und Subtrahend d unterscheiden sich in der Praxis etwa um Faktor 1 bis 100. Konkret

stellt sich die Differenz hier aus dem gezählten Ergebnis multipliziert mit dem Zählertakt (c) und der Kalibriergröße Term (d) dar.

$$D = a \cdot \exp\left(\frac{b}{c - d}\right)$$

Wie man aus ihrer Definition ersehen kann, repräsentiert diese Größe den Anteil der Zeit im Messergebnis, die den parasitären Effekten zugeschrieben werden kann. Die gezählte Zeit kann also niemals kleiner werden als Term. Da b größer als 0 ist, ist auch das Argument der Exponentialfunktion immer größer als 0.

Bei Vorgabe einer Genauigkeit der Auswertung von 10^{-6} ist bei Subtraktion mit 32Bit float Variablen Informationsverlust durch Auslöschung zu erwarten, da in die Bitbreite der Variablen durch den Faktor bis 100 mindestens 10^8 betragen müsste. Eine ähnliche Situation liegt auch bei der Berechnung der Kalibrierwerte vor. Es ist deshalb eine Berechnung mit mindestens double precision erforderlich. Da sowohl der verwendete Controller als auch die verwendete IDE nur Berechnung mit 32 Bit-Variablen bieten, wurde das System über RS232 mit einem PC gekoppelt und hier die Berechnungen mit dem Programm LABView mit extended precision (128 Bit) durchgeführt sowie auch die Messergebnisse angezeigt. Rechenfehler sind dadurch ausgeschlossen.

11.2.7 Temperaturbedingte Fehler

Der Zylinderkondensator bietet eine inhärente teilweise Temperaturkompensation, die zur Verringerung der Temperaturabhängigkeit genutzt werden kann. Diese besteht darin, dass die Kapazität eines idealen Zylinderkondensators trotz der Wärmedehnung in drei Dimensionen nur linear von der Temperatur abhängig ist, wenn das Material des Messkopfes und der Bohrung den gleichen Temperaturkoeffizienten haben, also zum Beispiel aus demselben Material bestehen. Dies lässt sich mit Hilfe der folgenden Gleichung, die auf der Gleichung für die Kapazität eines Zylinderkondensators (siehe Kapitel 4) basiert, mathematisch folgendermaßen darstellen:

$$C = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot l \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T)}{\ln\left(\frac{R_a \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T)}{R_i \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T)}\right)}$$

wobei

α der Temperaturdehnungskoeffizient und

ΔT die Temperaturdifferenz zu einer Ausgangstemperatur des Messkopfes bzw. der Bohrung ist.

Die Temperaturabhängigkeit in der Logarithmusfunktion kann gekürzt werden, was bedeutet, dass die effektive laterale Vergrößerung des Elektrodenabstands wirkungslos bleibt. Es verbleibt folglich

nur die Temperaturabhängigkeit der Länge des Messkopfes, die die Kapazität linear mit der Temperaturzunahme vergrößert.

Um die Temperaturabhängigkeit der Geometrie vollständig zu beseitigen, gibt es folglich die Möglichkeiten der rechnerischen Temperaturkompensation, des Konstanthaltens der Temperatur oder der Neukalibrierung. Bei der rechnerischen Temperaturkompensation muss die lineare Auswirkung der Temperatur auf die Kapazität in die Auswertungsfunktion aufgenommen und dort mit einer gemessenen Temperaturen korrigiert werden. Die detaillierte

Schwankungen der Temperatur sind oft die größte Fehlerursache in Messgeräten. Im hier vorgestellten System wirkt sich der Einfluss der Temperatur vor allem auf den Ladewiderstand R , der in den Kalibrierwert Faktor eingeht, und weitere Konstanten der Messschaltung sowie die Durchmesser des Messkopfes D_M und der Bohrung aus. Diese Größen sind in der Auswertungsfunktion, mit der der Bohrungsdurchmesser berechnet wird, so verteilt, dass sie analytisch nicht isoliert werden können. Deshalb ist eine Temperaturkompensation z.B. mit einer mitgemessenen Temperatur nur über Korrektur der einzelnen beeinflussten Größen möglich, d.h. die Temperaturabhängigkeit der bei der Berechnung verwendeten Größen D_M , Faktor und Term muss bestimmt werden. Mit der gemessenen Temperatur können dann vor der Berechnung des Durchmessers die Kalibrierwerte mit der Temperaturfunktion korrigiert werden. Grundsätzlich besteht bei der rechnerischen Temperaturkompensation eine weitere Problematik darin, dass Messkopf, Kalibrierbohrung und Elektronik unterschiedlichen Temperaturverlauf aufweisen können, zum Beispiel, weil sich die Elektronik durch Verlustwärme selbst heizt. Weitere Möglichkeiten sind die Stabilisierung der Temperatur und die Rekalibrierung.

Die Temperaturdrift des Zählers wird vernachlässigt, da es sich um einen Quarzoszillator handelt. Diese Oszillatoren haben eine relative Temperaturstabilität von besser als $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ [Neu97].

12 Messergebnisse

12.1 Versuchsaufbau und Versuchsbedingungen

Zur Verifizierung der Theorie und zur Prüfung der Praktikabilität des entwickelten Messverfahrens wurde eine Versuchsreihe durchgeführt. Die Versuche wurden mit einem Messkopf von dem Typ, der in Kapitel 6 in Abbildung 6.6 gezeigt ist, mit Messkopfdurchmesser 9,602mm und einer Höhe der aktiven Fläche von 5,6 Millimetern in Bohrungen mit bekanntem Durchmesser durchgeführt. Die Bohrungen sind aus Aluminium auf einer hochwertigen Drehmaschine mit sehr guter Rundheit und gleichmäßigem Durchmesser gefertigt worden. Die Abweichungen des Durchmessers über den Umfang der Bohrung waren kleiner als $1\mu\text{m}$. Dies wurde mit einem elektronisch ausgelesenen Innenmikrometer (Typ Messwelk 36505 mit Taster Heidenhain, Ausleseinheit Typ Heidenhain VRZ 106) bei Raumtemperatur geprüft. Die temperaturbedingte Änderung des Bohrungsdurchmessers beträgt je nach Durchmesser 230 bis $380\text{ nm}/^\circ\text{C}$. Mit diesem Messsystem wurden auch die Durchmesserwerte für die Kalibrierung ermittelt.

Die Bohrung wurde von einem Zentrierer aufgenommen, der mit herkömmlichen Hybrid-Schrittmotoren mit 200 Schritten/Umdrehung und Mikrometerschrauben angetrieben ist. Der Zentrierer ist in einem Gestell integriert, das auch den Messkopf aufnehmen und mit einer Linearführung in die Bohrung bewegen kann. Das Gestell hat eine sehr hohe Steifigkeit, sodass Schwingungen des Tragarms vernachlässigbar klein sind. Darüber hinaus wurden die Versuche eines nicht unterkellerten Gebäudes durchgeführt, sodass auch keine Gebäudeschwingungen vorlagen. Mit einem kapazitiven Wegaufnehmer (Typ Eichhorn + Hausmann) konnten innerhalb des Messaufbaus keine Schwingungen gemessen werden.

Bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuchen wurde auf eine spezielle Temperaturstabilisierung verzichtet. Der Raum, indem die Messung durchgeführt wurde, wurde an einem bewölkten Tag auf eine möglichst konstante Temperatur geheizt, die mit einem Thermometer an der Messschaltung kontrolliert wurde. Die Temperaturabweichung betrug maximal 1°C , was eine Schwankungsbreite von ca. 5 Werten zur Folge hatte. Dem Messsystem wurde vor der Messung mehrere Stunden Zeit für die Temperaturangleichung gegeben. Zur Stabilisierung der Temperaturen der Bauteile auf der Platine wurden dabei Messungen einschließlich Betrieb der Motoren des Zentrierers durchgeführt, die jedoch nicht ausgewertet wurden. Die Messungen selbst wurden etwa innerhalb von etwa zwei Stunden durchgeführt.

Es wurden nacheinander je drei Messungen mit 29 unterschiedlichen, bekannten Durchmessern durchgeführt. Die Kalibrierung wurde zu Beginn der Messungen und nach der Hälfte der Messungen durchgeführt. Die Messungen wurden nicht in der Reihenfolge aufsteigender Durchmesser, sondern mit zufälligen Durchmessern durchgeführt. Als letzte Messung wurde die zuerst vermessene Bohrung noch einmal vermessen, um Auswirkungen der Neukalibrierung und der Drift festzuhalten. Die

Kalibrierungen wurden jeweils mit den Durchmessern 10,409mm, 11,398mm und 13,484mm durchgeführt.

Die Dauer der Vermessung einer Bohrung ist vom Bohrungsdurchmesser abhängig und betrug im Mittel 65 Sekunden. Den größten Anteil an der Messzeit hat das Aufnehmen von Messwerten, gefolgt von den Zeiten für die Bewegungen.

12.2 Ergebnisse

Eine Tabelle mit Messwerten ist im Anhang abgebildet. Sie sind außerdem in der Abbildung 12.1 dargestellt.

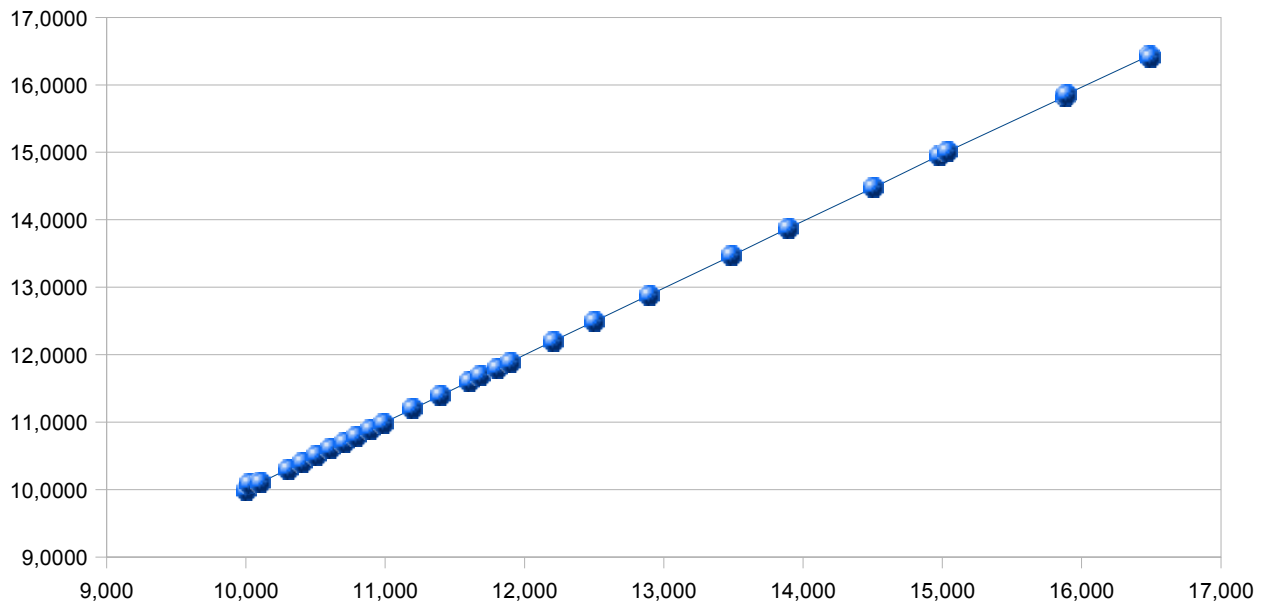


Abbildung 12.1: Mittelwert aus drei Messungen in mm aufgetragen über den tatsächlichen Bohrungsdurchmesser in mm.

Die Darstellung der Mittelwerte der gemessenen Durchmesser über den tatsächlichen Bohrungsdurchmessern zeigt im wesentlichen eine gerade Linie. Zur Beurteilung der Fehler wurde die Standardabweichung aus der Stichprobe mit

$$\sigma = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

berechnet. \bar{x} ist dabei entweder der Mittelwert der Messungen oder der echte Durchmesser. Der erste Fall beschreibt, wie stark einzelne Messungen an dem selben Bohrungsdurchmesser mit der selben Kalibrierung voneinander abweichen. Dies beschreibt die Fehler der Messkette bis zum Rohergebnis des Zählers, also des Teils der Messkette, der rauschen innerhalb von jeder Messung erzeugt. Außerdem ist die Drift von Messung zu Messung enthalten. Im zweiten Fall gehen in die Be-

rechnung außerdem die Fehler aus der Kalibrierung und ein Driftfehler ein, der sich vom Beginn der Messung an kumuliert. Die beiden Standardabweichungen sind in Abbildung 12.2 dargestellt.

Auf Grund der geringen Werteanzahl pro Bohrung von nur 3 ist die Standardabweichung nicht sehr aussagekräftig. Die Werte zeigen jedoch, in welcher Größenordnung die Abweichungen liegen. Dies ermöglicht trotz der sehr kleinen Stichprobe einen Vergleich mit den theoretisch berechneten Fehlern.

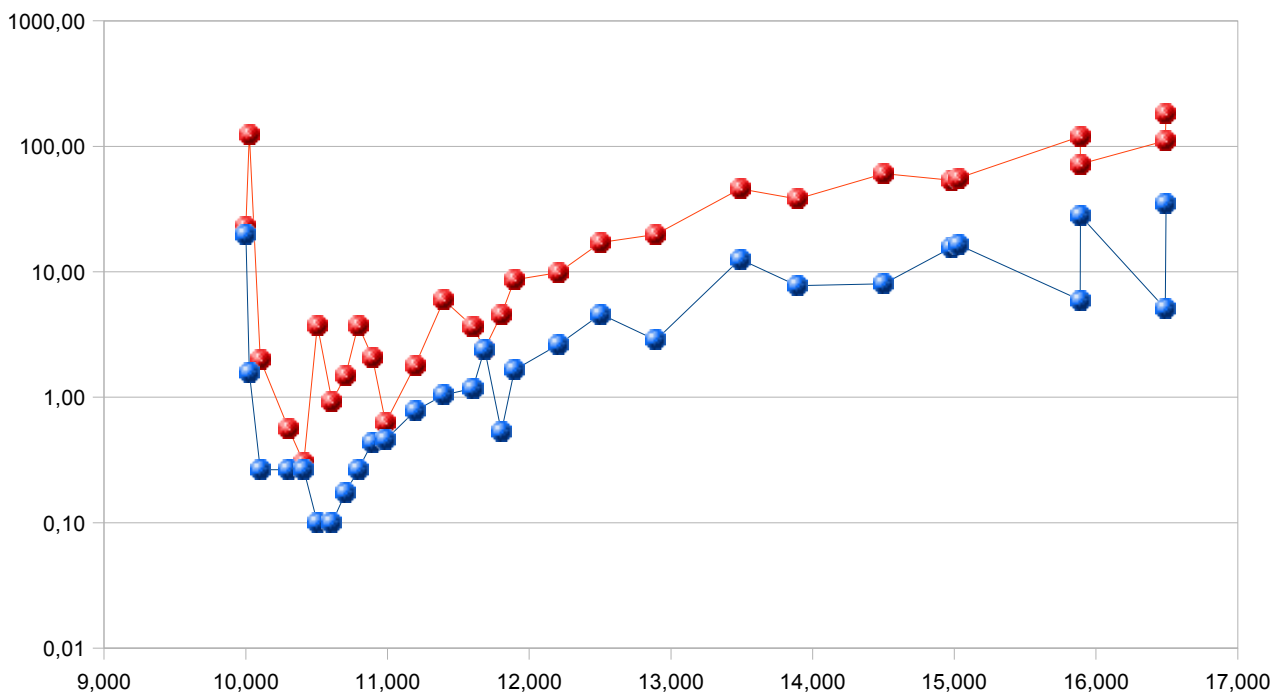


Abbildung 12.2: Blaue Kurve: Standardabweichung über drei Messungen zu ihrem Mittelwert. Rote Kurve: Standardabweichung über drei Messungen vom gegengemessenen Wert. Werte in μm aufgetragen über dem Bohrungsdurchmesser in mm.

Die Ergebnisse der ersten und der letzten Messung weichen bei einer Bohrung von 12,893mm im Mittel um $9,3\mu\text{m}$ voneinander ab.

12.3 Vergleich der Ergebnisse mit der Theorie

Eine Bewertung der Übereinstimmung der gemessenen Durchmesser mit den wahren Durchmessern durch lineare Regression ist hier nicht sinnvoll, da die Fehler nicht gleichmäßig verteilt sind. Es ist vielmehr eine abschnittsweise Betrachtung der Abweichungen erforderlich.

Die beiden Fehlerkurven in Abbildung 12.2 können mit den theoretischen Fehlerkurven in der Abbildung 11.8 verglichen werden. Die Fehlerkurve in Abbildung 11.8 beschreibt Fehler oberhalb eines Bohrungsdurchmessers von 10,308mm. Die jeweils roten und blauen Kurven können einander zugeordnet werden. Es zeigt sich, dass der Verlauf beider Kurven im Wesentlichen übereinstimmt. Auch die Größenordnung ist im Wesentlichen gleich. In beiden Kurven beginnen die Fehlerwerte oberhalb

von 10,308mm Durchmesser deutlich unterhalb von $1\mu\text{m}$. Für höhere Durchmesserwerte weichen die gemessenen Werte nach oben hin von den entsprechenden theoretischen Werten ab. Hier kommen vermutlich die Auswirkungen der Drift zum Tragen, die in der Theorie nicht berücksichtigt sind. Da die absoluten gemessenen Rohwerte bei größeren Durchmessern kleiner sind, hat die Drift in diesem Bereich stärkere Auswirkungen.

Im Bereich von Durchmessern unter 10,308mm kommt es zu zusätzlichen Fehlern durch die nicht ausreichende Positioniergenauigkeit des Zentrierers. Der theoretische Verlauf der Wirkung dieses Fehlers ist in Abbildung 11.5 dargestellt. Der gemessene Fehler nimmt damit übereinstimmend ebenfalls zu kleineren Durchmesser hin erheblich zu. Die Größe des Fehlers fällt in der theoretischen Berechnung erheblich kleiner aus als in der Praxis. Eine Ursache könnte sein, dass der Genauigkeit des Zentrierers über längere Strecken und bei Umkehr schlechter ist als, als in der Messung über wenige Vollschrte gemessen. Es ist auch nicht auszuschließen, dass Schrittverluste auftreten, die den Fehler erheblich erhöhen können.

Die recht stark schwankenden gemessenen Werte ergeben sich auf Grund der Tatsache, dass die Messwerte durch die zufällige Abfolge der Durchmesser bei der Messung ebenso unregelmäßig auf verschiedenen Kalibrierungen beruhen, und auf die gleiche Weise auch unterschiedlich stark mit kumulierter Drift behaftet sind. Dennoch stimmen die Größenordnungen gut überein.

Die aufgetretene Messabweichung für den Durchmesser von 12,893mm von $9,3\mu\text{m}$ bei Messungen als erstem und letztem gemessenen Durchmesser der Messreihe zeigt, dass die Kalibrierung und die Drift im Vergleich zur Standardabweichung mit einer Größe von $2,85\mu\text{m}$, die innerhalb von aufeinanderfolgenden Messungen an dem genannten Durchmesser einschließlich der Zentrierung auftreten, einen erheblichen Einfluss auf die Messungen haben. Die entsprechende Änderung der Messwerte des Zählers beträgt 1,75 Werte. Im Verlauf der Messung wurden jedoch noch größere Abweichungen bis zu 5 Werten beobachtet. Der maximal gemessene Rohwert beträgt 9.262,57, und der minimal gemessene Messwert 4.749,85, sodass die Drift einem relativen Fehler von $1,11 \cdot 10^{-3}$ bezüglich des Messbereichs von 10mm bis 16,5mm entspricht.

13 Ausblick

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über mögliche Verbesserungen des Systems, die im Rahmen von zukünftigen Arbeiten durchgeführt werden könnten. Außerdem werden Einsatzmöglichkeiten diskutiert.

Es kann für bestimmte Anwendungen wünschenswert sein, die Genauigkeit weiter zu verbessern. Wie sich in Kapitel 11 zeigt, ist die Kalibrierung der dominierende Fehler im Messsystem. Diese ist im Rahmen der vorliegenden Arbeit noch nicht optimiert worden. Eine mögliche Optimierung kann die optimierte Wahl der Kalibrierdurchmesser zum Gegenstand haben. Dies sollte im Zusammenhang mit der Auslegung auf einen bestimmten Messbereich geschehen. Weiter zeigt eine Analyse der Einflussursachen des Fehlers aus der Kalibrierung, dass für sehr hohe Genauigkeiten bei Bohrungsdurchmessern, die unwesentlich größer als der Messkopfdurchmesser sind, die Genauigkeit vor allem von der Genauigkeit des durch die Kalibrierung ermittelten Messkopfdurchmessers begrenzt ist. Ein Ansatz zur Umgehung dieser Tatsache könnte sein, den Sensordurchmesser durch eine sehr genaue Messung statt durch Kalibrierung zu ermitteln. Die Kalibrierung erfordert dann nur noch zwei Kalibrierungsmessungen. Die entsprechenden Berechnungsformeln für die verbleibenden Kalibrierwerte wären zu ermitteln.

Ein weiterer wesentlicher Einfluss auf die Messgenauigkeit ist die Drift. Eine thermische Stabilisierung insbesondere der Messschaltung oder einer rechnerischen Temperaturkompensation, die jedoch wesentlich aufwendiger ist, würde die Drift deutlich verbessern und damit eine genauere Messung ermöglichen.

Eine weitere mögliche Verbesserung des Systems wäre die zusätzliche Messung von Abweichungen der Geometrie von der zylindrischen Form. Dazu könnte der Messkopf mit einem präzisen Zentrierer sehr nahe an der Bohrungswand entlanggeführt werden. Beispielsweise könnte die Kapazität konstant geregelt werden und aus der sich ergebenden Bahn des Messkopfes auf Unrundheiten geschlossen werden. Ein weiterer denkbarer Ansatz ist, den Messkopf auf einem exakten Kreis innerhalb der Bohrung zu bewegen und aus den dabei gemessenen Kapazitätsunterschieden mit Hilfe einer Fourier-Analyse der über den Winkel gemessenen Ortsfrequenzen Abweichungen von der Rundheit zu ermitteln.

Als Einsatzbereich für das Messsystem eignet sich besonders die Massenfertigung. Der Messbereich ist hier zur Ermittlung der gefertigten Toleranzen im Allgemeinen relativ klein. Das Messsystem kann dann so ausgelegt werden, dass dieser Bereich in die optimale Messgenauigkeit fällt. Außerdem ist durch die im Allgemeinen im Wesentlichen gleichbleibenden Produktionsbedingungen nicht mit stark

schwankender Bohrungsgeometrie zu rechnen. Insbesondere, wenn der Bohrungsdurchmesser eine besonders kritische Funktion übernimmt, z.B. bei Luftlagern, Düsen, Einspritzpumpen und weiteren hochgenauen Passungen, kann eine 100%-Prüfung oder Stichprobenkontrolle des Durchmessers sinnvoll sein. Auch der Einsatz eines Zentrierers ist in einer Messstation unproblematisch.

Ein weiteres, sehr interessantes Anwendungsgebiet kann erschlossen werden, wenn es gelingt, den Messkopf so klein zu fertigen, dass Bohrungen unterhalb von 1mm Durchmesser oder noch deutlich darunter damit vermessen werden können. Auf Grund der Tatsache, dass die Verkleinerung nur in einer Dimension Wirkung zeigt, nämlich in Richtung der Längsachse des Messkopfes in Form der Länge der Messelektrode (siehe Kapitel 5), muss die Genauigkeit der Messschaltung nur linear mit der Verkleinerung gesteigert werden, um die gleiche relative Genauigkeit zu erhalten. Wenn auf Genauigkeit verzichtet werden kann, kann die auch die im Rahmen dieser Arbeit verwendete Messschaltung eingesetzt werden. Entsprechende Messköpfe können mit Hilfe von mikrotechnischen Verfahren gefertigt werden. Es denkbar, dass die Konstruktion im Vergleich zu der im Rahmen dieser Arbeit verwendeten verändert wird, zum Beispiel zu Gunsten eines Aufbaus der Mess- und Schutzschirmelektroden aus leitfähigem und isolierende Schichten, z. B. aus entsprechenden Lacken oder mit geeigneteren Beschichtungsverfahren, als im Rahmen dieser Arbeit zur Verfügung standen.

14 Zusammenfassung

Diese Arbeit untersucht Möglichkeiten der Vermessung von Durchmessern von Bohrungen in leitfähigen Materialien mit Hilfe des kapazitiven Messprinzips. Dazu wird ein Messkopf in die Bohrung eingeführt. Zwischen der Bohrungswand und Messelektroden auf dem Messkopf entstehen Kondensatoren, deren Kapazität mit einer Kapazitätsmessschaltung gemessen und daraus auf den Bohrungsdurchmesser zurückgerechnet wird.

Es wurden Ansätze mit Messköpfen mit einer oder mehreren Messelektroden verfolgt. Messköpfe mit mehreren Messelektroden stoßen in der Praxis insbesondere bei kleinen Bohrungsdurchmessern auf erhebliche Schwierigkeiten bei der Fertigung und bei der kapazitiven Auswertung der Elektroden. Messköpfe mit einer einzelnen ringförmigen Messelektrode sind einfacher herzustellen und auszuwerten, haben jedoch den Nachteil, dass eine Dezentrierung des Messkopfes in der Bohrung einen potenziell erheblichen Messfehler verursacht.

Um diesen Messfehler zu beseitigen, kann ausgenutzt werden, dass die Kapazität des Zylinderkondensators bei einer zentrierten Stellung des Messkopfes in der Bohrung ein Minimum aufweist. Dazu wurde ein Messkopf mit einer ringförmigen Messelektrode an einem mechanischen Zentrierer befestigt, der den Messkopf in der Bohrung fein positionieren kann. Es wurde ein Zentrieralgorithmus entwickelt, der ausschließlich auf Grundlage der gemessenen Kapazität und den Bewegungen des Zentrierers die Mitte der Bohrung findet. Nach erfolgter Zentrierung kann eine Messung des Bohrungsdurchmessers ohne Zentrierungsfehler durchgeführt werden.

Ausgehend von der Berechnung des elektrischen Feldes von Zylinderkondensatoren wurde eine Kalibrierung und eine dazugehörige Auswertung entwickelt. Die Kalibrierung ermöglicht es, das gesamte System mit Hilfe von drei Kalibrierungsmessungen in Bohrungen mit bekannter Größe vollständig zu kalibrieren. Durch diese Kalibrierung können außerdem an dem Messsystem ohne weitere Änderungen verschiedene Messköpfe mit verschiedenen Durchmessern betrieben werden. Auch aufgetretene Drift oder Alterung kann durch Neukalibrierung beseitigt werden.

Das so aufgebaute Messsystem und die damit durchgeführten Versuche zeigen, dass eine Messung von Bohrungsdurchmessern mit geschlossenen ringförmigen kapazitiven Messelektroden mit guter Genauigkeit möglich ist. Die eingesetzte Kalibrierung und Auswertung der Rohwerte in Verbindung mit einer Messkette aus einem Relaxationsoszillator und einem Zähler stellen eine geeignete Messkette für die Besonderheiten dieser Messung dar.

Die Messfehler des Messsystems wurden umfangreich theoretisch ermittelt. Dies lässt Rückschlüsse auf die dominierenden Fehlereinflussfaktoren zu und ermöglicht so eine optimale Auslegung des Systems.

15 Literaturverzeichnis

[Aut94]	Autronic Gesellschaft für Bildverarbeitung und Systeme mbH: Einrichtung zur Messung des Innendurchmessers zylindrischer Hohlkörper. Gebrauchsmuster DE 94 05 098 U 1, Anmeldungstag 25. 3. 94
[Ber73]	Bernard, A.; Gay, M.; Michel, J.: L'accéléromètre ONERA à très grande sensibilité. Version fusée sonde type Cactus. L'Onde Électrique, vol. 53, fasc. 2, Février 1973, pp 61-68.
[Bot93]	Botec Electronic GmbH: Verfahren zur berührungslosen Messung der Wandabstände von rotationssymmetrischen Werkstückprofilen, insbesondere Innendurchmessern von Bohrungen. Offenlegungsschrift DE 43 13 987 A 1, Anmeldungstag 28. 4. 93.
[Bro89]	Bronstein, I. N.; Semendjajew, K. A.: Taschenbuch der Mathematik. Verlag Harri Deutsch, Thun, Frankfurt/Main, 24. Aufl. 1989.
[Bro90]	Brombeer, R.: Unterlagen zur Vorlesung „Numerische Mathematik für Ingenieure“. Universität Kaiserslautern, 1990.
[Cic90]	Cichocki, A.; Unbehauen, R: Application of Switched-Capacitor Self-Oscillating Circuits to the Conversion of RLC Parameters into a Frequency or Digital Signal. Sensors and Actuators A, 24 (1990) 129-137.
[DIN95]	DIN-Norm 1319-1: Grundbegriffe der Messtechnik. Beuth-Verlag, Berlin, Wien, Zürich, 1995-01.
[Fol64]	Foldvari, T. L.; Lion, K. S.: Capacitive Transducers. Instruments & Control Systems, Nov. 1964, 77-85.
[Fuh88]	Fuhrmann, B. Meissner, H.: Längenänderungen mit kapazitiven Sensoren messen. Technica 20/1988, 40-42.
[Gay72]	Gay, M.: Technique de mesure 1dimensionelle á capteur capacitif. Application à la métrologie des sphères. Mesures, Novembre 1972.
[Har96]	Harb, S.M., Chetwynd, D.G., Smith, S.T.: Tilt Errors in Parallel Plate Capacitance Micrometry. International Progress in Precision Engineering, Proceedings of IPES

	Conference, Compiègne 1996.
[Hee86]	Heerens, W. C.: Application of capacitance techniques in sensor design. J. Phys. E: Sci. Instr. 19 (1986) 897-906.
[Hec98]	Hecht, E.: Optics. 3rd ed. Reading, Menlo Park, New York, Harlow, Don Mills, Sydney, Mexico City, Madrid, Amsterdam 1998.
[Her88]	Hering, Martin, Stohrer: Physik für Ingenieure. VDI-Verlag Düsseldorf, 1. Aufl. 1988.
[Hil96]	Hildebrandt, A.: Berechnung des Jitters in Schwellwert-Entscheidern am Beispiel einer monolithischen integrierten Auswerteschaltung. Dissertation, Universität Kaiserslautern, 1996.
[Hof99]	Hoffmann, J.: Handbuch der Meßtechnik. Carl Hanser Verlag, München, Wien, 1999.
[Hof08]	Hofmann, F.: Wie sich das Verfahrensteil von Extrudern optimal warten läßt. www.konstruktionspraxis.de.vogel.de/index.cfm?pid=4922&pk=117225 , 19.03.2008.
[Hön58/I]	Hönicke, H.: Untersuchungen an Pulsmodulationsverfahren Teil I. Nachrichtentechnik 8 (1958) H.10, 457-60.
[Hön58/II]	Hönicke, H.: Untersuchungen an Pulsmodulationsverfahren Teil II. Nachrichtentechnik 8 (1958) H.11, 501-10.
[Hön59]	Hönicke, H.: Untersuchungen an Pulsmodulationsverfahren Teil III. Nachrichtentechnik 9 (1959) H1, 29-35.
[Jon73]	Jones, R.V. , Richards, R.C.S.: The design and some applications of sensitive capacitance micrometers. J. Phys. E, Sci. Instr. 6 ,589-600, 1973.
[Kra89]	Krauß, M.; Herold, H.: Architekturen kapazitiver Sensoren mit Schutzschirmtechnik und zugehörige Sensorelektronik. MSR, Feb. 1989, Vol 32, No.2.
[Lau93]	Lauer, G.: Optimierung einer Auswerteelektronik für kapazitive Differenzmeßverfahren. Dissertation, Universität Kaiserslautern, 1993.
[Lee84]	Lee, K.-L.: Development of a fringing capacitive hole probe for hole geometry and surface finish measurement. Thesis, University of Washington, 1984.
[Lee85]	Lee, S. Y.: Variable capacitance signal transduction and the comparison with other transduction schemes. Setra Systems Inc., Natick/Mass. USA. Aus Doebelin, E. O.: Measurement Systems 3rd Ed. 1983, S.264 Nr.1.
[Lit96]	Litz, L.: Grundlagen und Anwendungen der Wahrscheinlichkeitstheorie. Skriptum zur Vorlesung. Universität Kaiserslautern 1996.
[Mau86]	Mauer, G. F.; Garbini, J. L.; Jorgensen, J. E.; Lee, K.-L.: A sensor for the on-line inspection of drilled hole dimensional parameters. Int. J. Prod. Res., 1986, Vol. 24, No. 4, 859-868.
[Neu97]	Neubig, B., Briese, W.: Das Große Quarkochbuch. Franzis-Verlag, Feldkirchen, 1997.
[Oll32]	Ollendorff, F.: Potentialfelder der Elektrotechnik. Julius Springer Verlag, Berlin, 1932.
[Pfe89]	Pfeifer, Werthschützky: Drucksensoren. VEB Verlag Technik, Berlin, 1. Aufl. 1989.
[Rei92]	Reisacher, R.: Prüfung und Überwachung auslaßgedrosselter Luftlager durch Einsatz computergestützter kapazitiver Sensorsysteme. Dissertation, Universität Kaiserslautern, 1992.
[Rho84]	Rhoades, L.J.; Risko, D.: In-process gaging with capacitance sensing technology. 2nd Biennial International Machine Tool Technical Conference Proceedings, McLean, VA, USA; Chicago Ill., 5-13/9/84, Vol 1 of 4 Vol (xxxviii + 518 + 502 + 552 + 502), p. 3/37-40.

[Rob89]	Robert Bosch GmbH: Sensor. Europäische Patentanmeldung EP 0 328 896.
[Röd96]	Röder, G., Haberland, R.: Capacitive Inner Diameter Sensor. Proceedings of 9 th IPES/UME4 Conference, Braunschweig, 1997.
[Röd97]	G. Röder, R. Haberland: Einrichtung zur kapazitiven Vermessung von Innendurchmessern in Werkstücken, insbesondere des Durchmessers von Bohrungen. Deutsche Patentanmeldung DE 197 42 016 A1.
[Rot81]	Roth, E. S.: Gaging, Practical Design and Application. Society of Manufacturing Engineers, Marketing Services Dept., Dearborn 1981.
[Sem94]	Semones, T. D.; Price, C. E.: Capacitive probe for bore measurement. Patentschrift US5293131.
[Spe88]	Spencer, R. R.; Fleischer, B. M.; Barth, P. W.; Angell, J. B.: A Theoretical Study of Transducer Noise in Piezoresistive and Capacitive Silicon Pressure Sensors. IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 35, No. 8, Aug. 1988, 1289-98.
[Tie99]	Tietze, U.; Schenk, Ch.: Halbleiter-Schaltungstechnik. 11. Aufl., Berlin, Heidelberg, New York 1999.
[Wol68]	Wolff, I.: Grundlagen und Anwendungen der maxwellschen Theorie 1. BI Wissenschaftsverlag Mannheim, Wien, Zürich, 1968.

16 Verzeichnis der Studien- und Diplomarbeiten

Die unten aufgelisteten Studien- und Diplomarbeiten, die am Lehrstuhl für Feinwerktechnik am Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik der Technischen Universität Kaiserslautern durchgeführt wurden, trugen zu der vorliegenden Arbeit bei.

[Dup99]	Dupont, R., Schmidt, K: Fünffachsiger Beweger für einen kapazitiven Innendurchmessersensor. Studienarbeit, Universität Kaiserslautern, 1999.
[Hof96]	Hofstetter, D., Grahn, J.: Beschichtung eines kapazitiven Durchmessersensors mit Mehrschichttechnik. Studienarbeit, Universität Kaiserslautern, 1996.
[Kob96]	Kobus, A: Konstruktion und Aufbau eines kapazitiven Abstandssensors. Studienarbeit, Universität Kaiserslautern, 1996.
[Sch98]	Schlick, J: Steuerung einer Zentriervorrichtung für einen kapazitiven Innendurchmessersensor. Diplomarbeit, Universität Kaiserslautern 1998.

Dipl.-Ing. Gunther Röder - Lebenslauf

geboren am 8.6.1968 in Tübingen als Sohn von Dr. Heinrich Röder und Astrid Ilse Röder

1987	Abitur am staatlichen Realgymnasium Völklingen/Saar
1987-1988	Bundeswehr
1988 – 1994	Studium des Maschinenbaus an der Universität Kaiserslautern Vertiefungsrichtung Allgemeiner Maschinenbau
1994 – 2000	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Feinwerktechnik der Technischen Universität Kaiserslautern
2000	1. Preis beim Wettbewerb für Unternehmensgründer „ExTra! 2000“
2000 – 2008	Aufbau und Führung eines Unternehmens in der Messtechnikbranche (Metrion Messtechnik)
2007	2. Innovationspreis 2007 der Industrievereinigung für faserverstärkte Kunststoffe (AVK)
2008	Verkauf des Unternehmens
2008	Ausbildung zum Patentanwalt bei der Kanzlei WSL Patentanwälte, Wiesbaden, beim Landgericht Mannheim sowie beim Deutschen Patent- und Markenamt, München