

# DIPLOMARBEIT

## Vergleich verschiedener Rotorstrukturen eines kapazitiven Drehmomentsensors

ausgeführt am Institut für  
Angewandte Elektronik und Quantenelektronik  
der Technischen Universität Wien

unter Anleitung von

**Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Georg Brasseur**  
**Dipl.-Ing. Tibor Fabian**

durch

**Wolfgang Zdiarsky**  
Matrikelnummer: 9426085  
Steigenteschgasse 13/3/16, 1220 Wien

Wien, im Dezember 1999

.....

# Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen bedanken, die mir meine Ausbildung und die Erstellung dieser Diplomarbeit ermöglicht haben.

Vielen Dank an meinen betreuenden Professor Dr. Georg Brasseur für die Gelegenheit unter seiner Leitung im Bereich der Automobilelektronik an einem Projekt mitzuarbeiten. Für unzählige anregende Gespräche und Ratschläge geht mein Dank an die Arbeitsgemeinschaft Automobilelektronik (Edmund Bartl, DI Tibor Fabian, Dr. Paul Fulmek, DI Dimitri Lawroff).

Ganz besonderer Dank gebührt meinen Eltern und Großeltern, die mir während meiner gesamten Ausbildung viel Liebe und Rückhalt geschenkt und mir etliche Lasten abgenommen haben.

Den Lehrern und Kollegen der Abteilung für Regelungstechnik an der HTL Wien 22 möchte ich für ihre wertvolle Unterstützung danken, besonders den Abteilungsvorständen DI Leopold Drmota, DI Karl Reischer und DI Norbert Resch, die mir durch unzählige Zugeständnisse bei der Arbeitseinteilung ein rasches Studieren ermöglichten.

Meinen Studienkollegen Stefan Cermak und Florian Wandling kann ich für ihre treue Freundschaft und verlässliche Unterstützung nicht genug danken.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Vorwort</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Sensoren zur Momentenmessung</b>	<b>2</b>
2.1	Anforderungen an einen Momentensensor . . . . .	2
2.2	Verschiedene Konzepte zur Messung von Drehmomenten . . . . .	3
2.2.1	Momentenmessung durch Rückführung auf einfache Kraftmes- sung an einem Hebel . . . . .	3
2.2.2	Momentensensor mit Dehnungsmeßstreifen . . . . .	3
2.2.3	Magnetoelastischer Momentensensor . . . . .	4
2.2.4	Piezoelektrischer Momentensensor . . . . .	4
2.2.5	Messung des Moments mit Hilfe eines Schwingsaiten- frequenzumsetzers . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Prinzip des kapazitiven Momentensensors</b>	<b>6</b>
3.1	Einleitung in die kapazitive Meßtechnik . . . . .	6
3.1.1	Idee des kapazitiven Sensors . . . . .	6
3.1.2	Ratiometrisches Prinzip . . . . .	7
3.1.3	Erklärung des Sensorprinzipes anhand des Platten- modelles . . . . .	9
3.1.4	Anwendung auf den Winkelsensor . . . . .	11
3.2	Konzept der Momentenmessung . . . . .	12
3.2.1	Torsion einer mechanischen Welle . . . . .	12
3.2.2	Mechanischer Aufbau . . . . .	13
3.2.3	Elektrodenstruktur und Auswertung . . . . .	14
<b>4</b>	<b>Projektübersicht</b>	<b>20</b>
<b>5</b>	<b>Rotorstrukturen</b>	<b>24</b>
5.1	Zweiflügelstruktur . . . . .	25
5.2	Vierflügelstruktur . . . . .	26
5.3	Inverse Vierflügelstruktur . . . . .	27
<b>6</b>	<b>Simulation - Einfluß der Streufelder</b>	<b>28</b>
6.1	Abhängigkeit der Kapazitätsverläufe von Geometrieparametern - Simu- lation . . . . .	28
6.1.1	Spannungsberechnung - U_Platte.m . . . . .	31
6.1.2	Kapazitätsberechnung - Berechncese.m . . . . .	31

6.1.3	Variation der Rotorposition - Rotordrehen.m . . . . .	31
6.2	Simulation - Einfluß einer Rotorverkipfung . . . . .	33
<b>7</b>	<b>Hilfsmittel zur Auswertung der Sensordaten</b>	<b>37</b>
7.1	DDE-Schnittstelle in Matlab . . . . .	37
7.2	MatLab-Funktion zur Sensormessung . . . . .	38
7.2.1	Meßroutine - mess_ms.m . . . . .	38
7.2.2	Auswertung der Segmentwerte - seg_ms.m . . . . .	40
7.2.3	Darstellung der Sensordaten - plot_ms.m . . . . .	42
<b>8</b>	<b>Meßergebnisse und Interpretation</b>	<b>44</b>
8.1	Zweiflügelstruktur . . . . .	45
8.1.1	Abweichungen durch radialen Rotorversatz . . . . .	45
8.2	Vierflügelstruktur . . . . .	51
8.3	Inverse Vierflügelstruktur . . . . .	56
8.4	Einflüsse auf die Meßgenauigkeit - Zusammenfassung . . . . .	61
8.4.1	Einfluß einer Rotorverkipfung . . . . .	61
<b>9</b>	<b>Spezifikation des Prototypes</b>	<b>64</b>
<b>10</b>	<b>Ausblick</b>	<b>66</b>
<b>ANHANG</b>		
<b>A</b>	<b>Rotorflügel - Konstruktionszeichnungen</b>	<b>69</b>
A.1	Zweiflügelstuktur . . . . .	70
A.2	Vierflügelstruktur . . . . .	71
A.3	Inverse Vierflügelestruktur . . . . .	72
<b>B</b>	<b>Sende- und Empfangselektrode</b>	<b>73</b>
B.1	Layout Sendeelektrode 16 Segmente . . . . .	74
B.2	Layout Sendeelektrode 32 Segmente . . . . .	75
B.3	Layout Empfangselektrode . . . . .	76
<b>C</b>	<b>MatLab-Programme</b>	<b>77</b>
C.1	DDE-Befehle in MatLab . . . . .	77
C.2	Meßroutine - mess_ms.m . . . . .	79
C.2.1	Aufruf- und Parameterbeschreibung . . . . .	79
C.2.2	Programmlisting . . . . .	79
C.3	Segmentauswertung - seg_ms.m . . . . .	82
C.3.1	Aufruf- und Parameterbeschreibung . . . . .	82
C.3.2	Programmlisting - seg_ms.m . . . . .	82
C.3.3	Programmlisting - evaloffset.m . . . . .	84
C.3.4	Programmlisting - rough.m . . . . .	84
C.3.5	Programmlisting - evalphi.m . . . . .	84
C.3.6	Programmlisting - fine.m . . . . .	85
C.3.7	Programmlisting - recal.m . . . . .	86

C.4	Grafische Auswertung - plot_ms.m . . . . .	87
C.4.1	Aufruf- und Parameterbeschreibung . . . . .	87
C.4.2	Programmlisting . . . . .	87
C.5	Simulation . . . . .	90
C.5.1	Programmlisting - U_Platte.m (lt. [CER99]) . . . . .	90
C.5.2	Programmlisting - BerechneCSE.m (lt. [CER99]) . . . . .	90
C.5.3	Programmlisting - Rotordrehen.m (lt. [CER99]) . . . . .	93
C.5.4	Programmlisting - Cse_Verkippung.m . . . . .	95
C.5.5	Programmlisting - Csemax.m . . . . .	96
C.5.6	Programmlisting - VarRotorhoch.m . . . . .	97

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Positionierung von DMS bei Momentenmessung . . . . .	3
2.2	Prinzip des magnetoelastischen Sensors (Darstellung lt. Firma Magna- lastic Devices, Inc.) . . . . .	4
2.3	Anordnung von Schwingssaiten zur Momentenmessung . . . . .	5
3.1	Beispiel für eine Elektrodenanordnung (Abb. lt. [FAB97]) . . . . .	7
3.2	Blockschaltbild eines kapazitiven Sensors (Meßkette und Auswerteeinheit)	7
3.3	Prinzipielle Plattenanordnung bestehend aus Sendekondesatorplatten $S_n$ , Empfangskondesatorplatte $E$ und in x-Richtung verschiebbarem Rotor $R$	10
3.4	Kapazitätsverlauf von $C_{S1E}(x_H)$ ideal: durchgezogene Linie, Einfluß der Streifelder: strichlierte Linie . . . . .	11
3.5	Formänderung bei Torsionsspannung lt. [BOEG85] . . . . .	13
3.6	Mechanische "Rückführung" des Verdrehwinkels $\varphi_{rel}$ . . . . .	14
3.7	Elektrodenstruktur des Relativwinkelsensors (oben: 3D-Ansicht, unten von links nach rechts: Senderelektrode, Rotor 1, Rotor 2, Empfänger- elektrode) . . . . .	15
3.8	"Abwicklungsdarstellung" der Elektrodenstruktur aus Abbildung 3.7 in Nulllage ( $x_{rel} = 0$ bzw. $\varphi_{rel} = 0$ ) . . . . .	15
4.1	Blockschaltbild zur Projektübersicht - Die fettumrandeten Blöcke sind Gegenstand des Gesamtprojektes "Kapazitiver Momentensensor" . . .	22
4.2	Photo der Meßaufbauten - links-mitte: Prüfstand mit von links nach rechts: Momentensensor in Positioniereinheit, Schrittmotor, Referenzwin- kelsensor (BALDWIN), darüber: Verstärker für Schrittmotoransteue- rung, rechts: Auswertemonitor . . . . .	23
5.1	Rotor zur Zweiflügelstruktur . . . . .	25
5.2	Resultierender Rotor zur Zweiflügelstruktur für $\varphi_{rel} = 0$ . . . . .	25
5.3	Rotor zur Vierflügelstruktur . . . . .	26
5.4	Resultierender Rotor zur Vierflügelstruktur für für $\varphi_{rel} = 0$ . . . . .	26
5.5	Rotor zur inversen Vierflügelstruktur . . . . .	27
5.6	Resultierender Rotor zur inversen Vierflügelstruktur für $\varphi_{rel} = 0$ . . .	27
6.1	Felderzeugende Platte mit gleichverteilter Ladung $Q_i$ . . . . .	29
6.2	Plattenmodell der Sender-/Rotorstruktur für die Simulation des Ein- flusses von diversen Geometrieparametern auf die Abweichungen bei der Relativwinkel- und Absolutwinkelbestimmung . . . . .	30

6.3	Simulierter Kapazitätsverlauf der Sender/Empfängerkapazität $C_{S1E}$ einer Vierflügelstruktur ( $180^\circ$ Absolutwinkelmeßbereich, Kapazität $C_{S1E}$ über Rotorposition von 0 bis $360^\circ$ , Sender-Empfängerdistanz 6 mm, Rotor 1mm Abstand vom Sender), Minimaverlauf abgeflacht im Vergleich zu Maximaverlauf . . . . .	33
6.4	Plattenmodell für Verkippsimulation . . . . .	34
6.5	Sender-Empfängerkapazität $C_{SE}(h_R)$ in Abhängigkeit von der Rotorhöhe $h_R$ . . . . .	35
7.1	<b>Project1</b> -Eingabefenster (lt. [CER99]) . . . . .	39
7.2	Struktogramm zur MatLab-Funktion <b>mess_ms</b> . . . . .	40
7.3	Struktogramm zur MatLab-Funktion <b>seg_ms</b> . . . . .	43
8.1	Änderung der Flächenverhältnisse durch radialen Rotorversatz $\Delta x$ bei einem Zweiflügelrotor mit einem Flügelzentrwinkel von $90^\circ$ . . . . .	46
8.2	Gemessene Relativwinkelabweichung über Referenzrelativwinkel und Referenzabsolutwinkel - Zweiflügelstruktur . . . . .	47
8.3	Gemessene Winkelabweichung über Referenzrelativwinkel und Referenzabsolutwinkel - Zweiflügelstruktur . . . . .	47
8.4	Mittlere Relativwinkelabweichung über Referenzabsolutwinkel - Zweiflügelstruktur . . . . .	48
8.5	Mittlere Relativwinkelabweichung über Referenzrelativwinkel - Zweiflügelstruktur . . . . .	48
8.6	Mittlere Absolutwinkelabweichung über Referenzabsolutwinkel - Zweiflügelstruktur . . . . .	49
8.7	Mittlere Absolutwinkelabweichung über Referenzrelativwinkel - Zweiflügelstruktur . . . . .	49
8.8	Segmentverlauf über den vermessenen Winkelbereich - Zweiflügelstruktur. Wegen größerer Segmentteilung auch ausgeprägtere Abflachung als bei der Vierflügelstruktur bei den Maximalbereichen, die Übergänge zu diesen Maximas sind aber wieder verschliffener als die Übergänge zu den Minimas . . . . .	50
8.9	Gemessene Relativwinkelabweichung über Referenzrelativwinkel und Referenzabsolutwinkel - Vierflügelstruktur . . . . .	52
8.10	Gemessene Absolutwinkelabweichung über Referenzrelativwinkel und Referenzabsolutwinkel - Vierflügelstruktur . . . . .	52
8.11	Mittlere Relativwinkelabweichung über Referenzabsolutwinkel - Vierflügelstruktur. Die mittlere Abweichung geht ab einem Absolutwinkel von $180^\circ$ von $\pm 0.15^\circ$ auf $\pm 0.1^\circ$ zurück, weil dann alle Segmentwerte bereits einmal kalibriert werden konnten. . . . .	53
8.12	Mittlere Relativwinkelabweichung über Referenzrelativwinkel - Vierflügelstruktur . . . . .	53
8.13	Mittlere Absolutwinkelabweichung über Referenzabsolutwinkel - Vierflügelstruktur. Die mittlere Abweichung geht ab einem Absolutwinkel von $180^\circ$ von $\pm 0.08^\circ$ auf $\pm 0.05^\circ$ zurück, weil dann alle Segmentwerte bereits einmal kalibriert werden konnten. . . . .	54

8.14	Mittlere Absolutwinkelabweichung über Referenzrelativwinkel - Vierflügelstruktur . . . . .	54
8.15	Segmentverlauf über den vermessenen Winkelbereich - Vierflügelstruktur. Minimabereich unterschiedliche Breite, Maximabereich konstante Breite . . . . .	55
8.16	Gemessene Relativwinkelabweichung über Referenzrelativwinkel und Referenzabsolutwinkel - Inverse Vierflügelstruktur . . . . .	57
8.17	Gemessene Absolutwinkelabweichung über Referenzrelativwinkel und Referenzabsolutwinkel - Inverse Vierflügelstruktur . . . . .	57
8.18	Mittlere Relativwinkelabweichung über Referenzabsolutwinkel - Inverse Vierflügelstruktur. Die Mittlere Abweichung geht ab einem Absolutwinkel von $180^\circ$ von $\pm 0.2^\circ$ auf $\pm 0.08^\circ$ zurück, weil dann alle Segmentwerte bereits einmal kalibriert werden konnten. . . . .	58
8.19	Mittlere Relativwinkelabweichung über Referenzrelativwinkel - Inverse Vierflügelstruktur . . . . .	58
8.20	Mittlere Absolutwinkelabweichung über Referenzabsolutwinkel - Inverse Vierflügelstruktur. Die Mittlere Abweichung geht ab einem Absolutwinkel von $180^\circ$ von $\pm 0.12^\circ$ auf $\pm 0.08^\circ$ zurück, weil dann alle Segmentwerte bereits einmal kalibriert werden konnten. . . . .	59
8.21	Mittlere Absolutwinkelabweichung über Referenzrelativwinkel - Inverse Vierflügelstruktur . . . . .	59
8.22	"Gespiegelter" Segmentverlauf über den vermessenen Winkelbereich - Inverse Vierflügelstruktur. Maximabereiche (entspricht Abschattung) konstante Breite, Minimabereich (entspricht Freigabe) unterschiedliche Breite . . . . .	60
8.23	Geometrische Verhältnisse bei Rotorverkipfung durch Verstellung der Mikrometerschraube 2 (Prüfstand lt. [WAN99]) . . . . .	62
8.24	Einfluß einer Rotorverkipfung auf die Relativwinkelabweichung (Vergleich Simulation und Messung) . . . . .	63
A.1	Konstruktionszeichnung - Rotor zur Zweiflügelstruktur (Material: Messing, 1 mm dick) . . . . .	70
A.2	Konstruktionszeichnung - Rotor zur Vierflügelstruktur (Material: Messing, 1 mm dick) . . . . .	71
A.3	Konstruktionszeichnung - Rotor zur inversen Vierflügelstruktur (Material: Messing, 1 mm dick) . . . . .	72
B.1	Layout Sendeelektrode mit 16-Segmenten Vorderseite . . . . .	74
B.2	Layout Sendeelektrode mit 16-Segmenten Hinterseite . . . . .	74
B.3	Layout Sendeelektrode mit 32-Segmenten Vorderseite . . . . .	75
B.4	Layout Sendeelektrode mit 32-Segmenten Hinterseite . . . . .	75
B.5	Layout Empfangselektrode Vorderseite . . . . .	76
B.6	Layout Empfangselektrode Hinterseite . . . . .	76



# Abkürzungsverzeichnis

IAEQ	Institut für Angewandte Elektronik und Quantenelektronik
IAEE	Institut für Allgemeine Elektrotechnik und Elektronik
TU	Technische Universität
DDE	Dynamic Data Exchange
DMS	DehnungsMeßStreifen
EMV	ElektroMagnetische Verträglichkeit
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IMTC	Conference on Instrumentation and Measurement Technology
PC	Personal Computer
PWM	Puls Width Mudulation
ADC	Analog Digital Converter
$\mu C$	Microcomputer
HC12	Microcomputer MC68HC912D60 von Motorola
CNC	Computer Numeric Controlled
ACAD	Automatic Computer Aided Design
M-Files	MatLab Programmdateien

# Verwendete Zeichen und Symbole

## für mechanische Größen:

$f_0$	mechanische Eigenfrequenz einer gespannten Saite
$\varepsilon_{mech}$	Dehnung
$E_{mech}$	Elastizitätsmodul
$\varrho$	Dichte
$l_S$	Länge der gespannten Saite
$l$	Länge der Welle
$M$	Drehmoment
$\tau_t$	Torsionsspannung
$v$	Formänderung durch Verdrehung
$\varphi$	Verdrehwinkel
$G$	Schubmodul
$W_P$	polares Widerstandsmoment
$r$	Radius der Welle

## für elektrische Größen:

$\tau_{el}$	elektrische Zeitkonstante
$C_{piezo}$	elektrische Ersatzkapazität eines Piezoelementes
$R_{piezo}$	elektrischer Ersatzwiderstand eines Piezoelementes
$\varepsilon$	Permittivität
$\varepsilon_0$	elektrische Feldkonstante ( $\varepsilon_0 = 8.8541878 \cdot 10^{-12} F/m$ )
$\varepsilon_R$	relative Permittivität
$C$	elektrische Kapazität
$A$	wirksame Elektrodenfläche
$a$	Tiefe der Elektrode
$x_S$	Breite der Elektrode
$d$	Elektrodenabstand
$C'$	längenbezogene Kapazität, Kapazitätsbelag
$C_{S1E}$	Kapazität zwischen Sendesegment S1 und Empfangselektrode E
$C_{S1Emax}$	maximale Kapazität von $C_{SE}$
$E_y$	Feldstärke in y-Richtung
$\vec{E}(P)$	Feldstärke im Aufpunkt P
$\vec{B}$	magnetische Flußdichte
$U(c)$	elektrische Spannung, der Kurve $c$ zugeordnet

$Q_{SK}$	Güte des Empfangsschwingkreises
$Q$	elektrische Ladung
$C_S$	Kapazität der Sendeplatte gegen Empfangsfläche
$C_R$	Kapazität des Rotors gegen Empfangsfläche

**für Messsignale:**

$k$	Verstärkung
$y_{offset}$	Signaloffset
$y_{isti}$	Istwert der zu messenden Größe ( $i = 1, 2, \dots$ )
$y_{messi}$	Messwert ( $i = 1, 2, \dots$ )
$y_{istmax}$	Maximalwert der zu messenden Größe
$y_{istmin}$	Minimalwert der zu messenden Größe
$y_{messmax}$	gemessener Maximalwert der zu messenden Größe
$y_{messmin}$	gemessener Minimalwert der zu messenden Größe
$y_{plus}$	Meßwert bei positiver Steigung
$y_{minus}$	Meßwert bei negativer Steigung
$\xi_{interpol}$	Positionsinterpolationswert (auf Intervall $[1,1]$ beschränkt)
$y_{relmax}$	Maximalwert bei Relativwinkelmessung
$y_{relmin}$	Minimalwert bei Relativwinkelmessung
$y_{relplus}$	Meßwert bei positiver Steigung bei Relativwinkelmessung
$y_{relminus}$	Meßwert bei negativer Steigung bei Relativwinkelmessung
$\xi_{rel}$	Relativwinkelinterpolationswert (auf Intervall $[1,1]$ beschränkt)
$y_{absmax}$	Maximalwert bei Absolutwinkelmessung
$y_{absmin}$	Minimalwert bei Absolutwinkelmessung
$y_{absplus}$	Meßwert bei positiver Steigung bei Absolutwinkelmessung
$y_{absminus}$	Meßwert bei negativer Steigung bei Absolutwinkelmessung
$\xi_{abs}$	Absolutwinkelinterpolationswert (auf Intervall $[1,1]$ beschränkt)
$SW_i$	i-ter Segmentwert
$H(i)$	Liste der Segmentwerte in Nullage (auf ganzzahlige Werte skaliert)
$R_{xy}(\tau)$	Korrelation zweier um $\tau$ verschobener Messsignale $x(t)$ , $y(t)$
$x(t)$	Messsignal
$y(t)$	Messsignal
$t$	Zeit
$\tau$	zeitliche Verschiebung
$T$	Periodendauer
$R_{SW,H}(j)$	Korrelation der um $j$ verschobener diskreter Signale $SW(i)$ , $H(i)$
$j$	Segementoffset
$n$	Anzahl der Segemente

**für Elektrodenstrukturen:**

$S_1, E_1$	Elektroden des einfachen Plattenkondensators
$S_i$	i-tes Sendesegment ( $i = 1 \dots$ Anzahl der Segmente)
$E$	Empfangselektrode

$RS$	Breite des Rotorschattens (lt. Abbildung 3.8)
$K_i$	relevante Rotorkante ( $i = 1.. 4$ )(lt. Abbildung 3.8)
$x_S$	Segmentbreite
$x_{PER}$	räumliche Periodizität der Segmente
$x_H$	Rotorposition (lt. Abbildung 3.3)
$x_{abs}$	Absolute Rotorposition (lt. Abbildung 3.8)
$x_{rel}$	Relative Rotorverschiebung (lt. Abbildung 3.8)
$x_{Ki}$	Lage der Rotorkanten ( $i = 1 .. 4$ ) (lt. Abbildung 3.8)
$\varphi_{abs}$	Absolutwinkel des resultierenden Rotors
$\varphi_{rel}$	Relativwinkel zwischen den beiden Rotoren
$h$	Abstand der Einzelplatte von der x-Achse
$h_R$	Abstand des Rotors von der x-Achse
$m$	Anzahl der Einzelplatten pro Segmentbreite $x_S$

# Kapitel 1

## Vorwort

Im Rahmen der Arbeiten am Institut für Angewandte Elektrotechnik und Quantenelektronik (IAEQ) in der Arbeitsgruppe Automobilelektronik wurde die Frage nach einem Momentensensor zur Lenkkraftbestimmung gestellt. Die Lenkkraft ist neben Lenkwinkel- und Lenkwinkelgeschwindigkeit eine weitere Größe für die optimale Auslegung von Servolenksystemen.

Ausgehend von den am IAEQ bereits entwickelten und erfolgreich getesteten kapazitiven Winkel- und Winkelgeschwindigkeitssensoren sollte das Meßprinzip dieser Sensoren auf eine mögliche Verwendbarkeit bei der Momentenmessung untersucht werden. Ziel war es, aufbauend auf bereits vorhandenem Know How und bestehenden Soft- und Hardwarekomponenten einen Prototypen zu entwickeln.

Die mit dem Projekt Momentenmessung beschäftigten Diplomanden Stefan Cermak, Florian Wandling und Wolfgang Zdiarsky hatten folgende Teilaufgaben zu realisieren:

- [i] Entwicklung eines Meßkonzeptes
- [ii] Mechanische Anpassung der vorhandenen Meßaufbauten
- [iii] Anpassung der Hard- und Softwarekomponenten
- [iv] Testen verschiedener Strukturen
- [v] Auswertung der Meßergebnisse
- [vi] Prüfung der Einsatzbarkeit

Ziel der vorliegenden Arbeit ist der Vergleich verschiedener Elektrodenstrukturen ([iv] abgehandelt in Kapitel 5) und Auswertung der Meßergebnisse ([v] abgehandelt in Kapitel 8). Die dazu notwendigen Programme sind ebenfalls Gegenstand dieser Arbeit und werden in Kapitel 7 vorgestellt. In Kapitel 6 wird eine Simulation des Einflusses der Streufelder auf die Meßgenauigkeit in Abhängigkeit verschiedener Geometrieparameter vorgestellt und speziell der Einfluß einer Rotorverkipfung untersucht.

In den folgenden Kapiteln werden beispielhaft verschiedene Methoden der Momentenmessung kurz vorgestellt und die Funktion des kapazitiven Momentensensors erläutert.

# Kapitel 2

## Sensoren zur Momentenmessung

Zur Messung von Momenten gibt es verschiedenste Ansätze, beginnend von der einfachen Kraftmessung an einem Hebel bestimmter Länge, bis hin zu magnetoelastischen Sensoren. Einige bisher gebräuchliche Methoden sollen hier beispielhaft erwähnt werden. Zuvor sollen aber noch die wesentlichsten Anforderungen an einen Sensor zur Momentenmessung aufgezeigt werden, wobei diese natürlich vom Einsatzgebiet abhängen. So stehen bei Sensoren für die Automobilindustrie mehr Robustheit, Zuverlässigkeit, Temperaturstabilität usw. im Vordergrund, während die Meßgenauigkeit nicht besonders hoch sein muß, sondern nur die geforderten Spezifikationen erfüllen soll.

### 2.1 Anforderungen an einen Momentensensor

Will man verschiedene Sensoren auf ihre Verwendbarkeit untersuchen, muß man zuerst eine Reihe von Merkmalen und Eigenschaften definieren, die zur objektiven Bewertung herangezogen werden können. Im Hinblick auf die gestellte Aufgabe werden folgende Anforderungen an einen Momentensensor gestellt:

- Neben der Messung von statischen Momenten, muß die Messung dynamischer Lastwechsel an einer sich drehenden Welle möglich sein.
- Arbeitsbereich, Auflösung und Linearität sind abhängig von der Aufgabenstellung
- Temperaturbereich (Beispiel Automobilindustrie  $-40^{\circ}\text{C}$  bis  $120^{\circ}\text{C}$ )
- Lange Lebensdauer
- Robustheit gegen Umwelteinflüsse wie Feuchtigkeit und Verschmutzung, sowie mechanischer Beanspruchung
- Vorgaben bezüglich der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV)
- Geringe aufgenommene Leistung der gesamten Sensoreinheit

## 2.2 Verschiedene Konzepte zur Messung von Drehmomenten

### 2.2.1 Momentenmessung durch Rückführung auf einfache Kraftmessung an einem Hebel

Das Moment wird durch einen Hebel mit bestimmter Länge in eine zu messende Kraft gewandelt. Zur Kraftmessung können einfache Kraftmeßsensoren (z.B.: Dehnmeßstreifen (DMS)) verwendet werden. Über Längenvariation des Hebelarmes ist eine zusätzliche Meßbereichseinstellung leicht möglich. Da mit dieser Methode aber keine zu übertragenden Momente an rotierenden Wellen gemessen werden können, liegt ihr Einsatzgebiet vor allem in der Werkstoffprüfung, zum Beispiel für die Aufnahme von Spannungs/Dehnungsdiagrammen zur Materialbeurteilung bis hin zu Bruchtests.

### 2.2.2 Momentensensor mit Dehnungsmeßstreifen

Die zur Kraftübertragung benutzte Welle erfährt durch das angreifende Moment eine Verdrehung, die sich durch eine Verlängerung bzw. Verkürzung der mit der Oberfläche fest verbundenen Dehnungsmeßstreifen DMS erfassen läßt. Da die Dehnung unter einem Winkel von  $45^\circ$  zu Wellenachse maximal ist, werden die DMS unter diesem Winkel aufgebracht, siehe Abbildung 2.1. Durch Verwendung von vier DMS in Brückenschaltung ergibt sich eine temperaturkompensierte Brückendiagonalspannung proportional zum angreifenden Moment (siehe [SRUF92]).

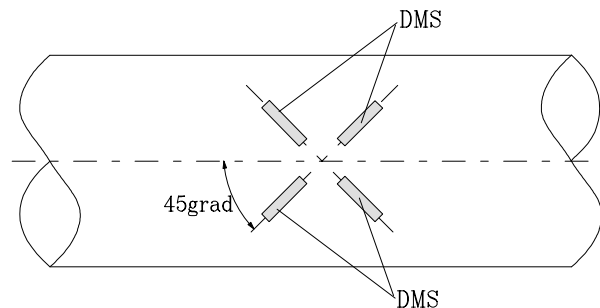


Abbildung 2.1: Positionierung von DMS bei Momentenmessung

Ein Nachteil dieser Methode besteht darin, daß es sich hier nicht um eine berührungslose Messung handelt, da die Anschlüsse des DMS-Sensors zur Auswerteschaltung geführt werden müssen. Bei Messung an rotierenden Wellen kann die Meßwertübertragung mittels Schleifkontakten realisiert werden, was wiederum eine Einschränkung in Lebensdauer (Verschleiß) und Robustheit gegen Umwelteinflüsse bedeutet. Eine andere Möglichkeit ist es, das Meßsignal über eine transformatorische Kopplung mit einem Trägerfrequenzverfahren zu übertragen. Nachteile dieser Methode sind der größere Aufwand für Schaltungsentwurf und ein erhöhter Platzbedarf.

### 2.2.3 Magnetoelastischer Momentensensor

Analog zur Messung mit Dehnungsmeßstreifen wird auch hier das Moment indirekt - durch Torsion einer Welle - gemessen.

Die Welle wird mit einem, in radialer Richtung vormagnetisierten, magnetoelastischen Ring starr verbunden. Eine Torsion der Welle bewirkt nun auch eine Formänderung im magnetoelastischen Material, welche einen axialen Magnetfeldanteil hervorruft. Die axiale Feldkomponente ist direkt proportional zum anliegenden Moment und kann berührungslos von einer Auswerteeinheit erfaßt werden (vgl. Abbildung 2.2). Die Firma Magna-lastic Devices, Inc.<sup>1</sup> hat unter Verwendung dieses Prinzipes einen Sensor mit einem breiten industriellen Anwendungsspektrum entwickelt. Dieses System ist, da berührungslos, verschleißfrei. Diese Sensoren werden bereits für Lenkkraftmessungen eingesetzt.

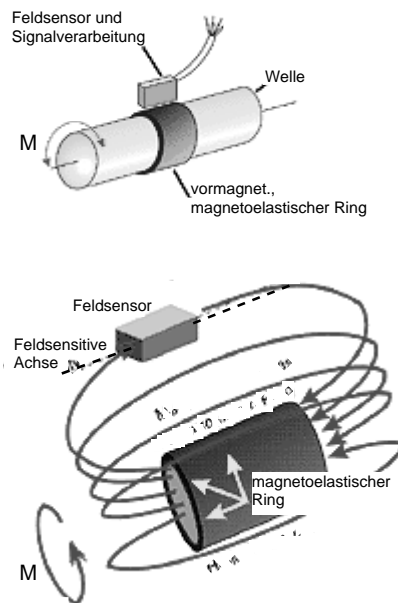


Abbildung 2.2: Prinzip des magnetoelastischen Sensors (Darstellung lt. Firma Magna-lastic Devices, Inc.)

### 2.2.4 Piezoelektrischer Momentensensor

Eine weitere Möglichkeit zur Momentenmessung ist die Erfassung der Verdrehkräfte mit Hilfe von Piezo-Elementen, vergleichbar mit der Messung der Verdrehung in Abschnitt 2.2.2. Durch die Deformation des Piezo-Elementes ändert sich seine Polarisierung, und an der Oberfläche werden Ladungen frei. Das Piezoelement läßt sich als Kondensator auffassen, der sich unter dem Einfluß der Schubspannung infolge der freigesetzten Ladung auf eine Spannung auflädt. Die Entladung erfolgt über eine Zeitkonstante  $\tau_{el}$ , die sich aus dem Produkt der Kapazität  $C_{piezo}$  und des Widerstandes

<sup>1</sup>Magna-lastic Devices, Inc. A subsidiary of Methode Electronics, Inc. 111 W. Buchanan Street Carthage, IL 62321, Internet: [www.mdi-sensor.com](http://www.mdi-sensor.com)



$R_{piezo}$  ergibt. Die Kapazität  $C_{piezo}$  und der Widerstand  $R_{piezo}$  hängen von der Elementgeometrie ab. Da das Piezoelement nur Änderungen im Moment erfassen kann, ist also eine statische Momentenmessung mit dieser Methode nicht möglich. Eine genauere Beschreibung des Piezoeffektes ist in [FAS94], Anwendungen sind beispielsweise in [SRUF92] zu finden.

### 2.2.5 Messung des Moments mit Hilfe eines Schwingssaiten-frequenzumsetzers

Die Eigenfrequenz  $f_0$  einer gespannten Saite ist laut Gleichung 2.1 (siehe [SRUF92]) abhängig von der Dehnung  $\varepsilon_{mech}$ .

$$f_0 = \frac{1}{2l_s} \sqrt{\frac{\varepsilon_{mech} E_{mech}}{\rho}} \quad (2.1)$$

Außerdem gehen in diese Gleichung das Elastizitätsmodul  $E_{mech}$ , die Dichte  $\rho$  und die Länge  $l_s$  der Saite ein. Mit Hilfe einer in Abbildung 2.3 gezeigten Anordnung ist es möglich, die Dehnung der beiden Meßsaiten proportional zum angreifenden Moment zu verändern, wodurch sich die Eigenfrequenzen der Meßsaiten ändern. Für die Messung der veränderten Eigenfrequenzen können die in [SRUF92] beschriebenen Aufnehmer verwendet werden. Die vormagnetisierten Saiten werden mit einem Elektromagneten durch einen Stromimpuls angeregt. Die ungedämpft ausschwingende Saite induziert eine Spannung in einer Meßspule. Die Frequenz der induzierten Spannung ist ein Maß für die Dehnungsbeanspruchung der Saiten und somit für das angreifende Moment. Nachteil dieser Methode ist der relativ hohe Aufwand bei der mechanischen Ausführung und bei der Auswertung.

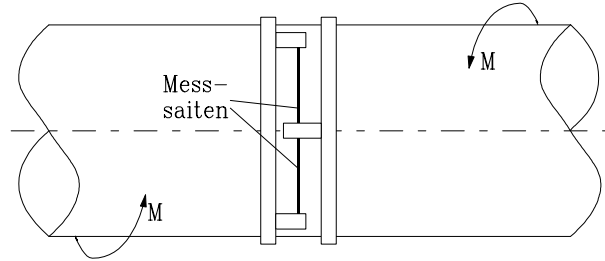


Abbildung 2.3: Anordnung von Schwingssaiten zur Momentenmessung

# Kapitel 3

## Prinzip des kapazitiven Momentensensors

### 3.1 Einleitung in die kapazitive Meßtechnik

Die Entwicklung des hier behandelten Momentensensors baut auf den bereits am IAEQ entwickelten Winkelsensor [BRA92], [BRA93], [BRA96], [BRA97] sowie [FAB97] auf. In [KOEL97] und [FAB98] finden sich die zugrundeliegenden Prinzipien zusammengefaßt. Eine ausführliche theoretische Abhandlung über kapazitive Winkelsensoren ist in [JNG94] zu finden.

Für das bessere Verständnis und die Lesbarkeit dieser Arbeit werden nochmals die wesentlichsten Grundbegriffe und Konzepte vorgestellt.

#### 3.1.1 Idee des kapazitiven Sensors

Aufgabe eines jeden elektronischen Sensors ist es, die Meßgröße, beispielsweise eine mechanische Größe, in eine entsprechende elektrisch meßbare Größe umzuwandeln. In welcher Form die elektrisch meßbare Größe dann in ein weiterverarbeitbares Signal umgewandelt wird, hängt von der jeweiligen Anwendung ab, und muß an dieser Stelle nicht weiter behandelt werden.

Bei den hier besprochenen kapazitiven Sensoren erfolgt die Umwandlung der mechanischen Größe, beispielsweise des Winkels, in eine elektrisch meßbare Größe durch Veränderung der kapazitiven Kopplung zwischen einer Sender- und einer Empfangselektrode. Dabei wird zwischen Sende- und Empfangselektrode eine Mittelelektrode in Abhängigkeit von der mechanischen Größe verändert. In Abbildung 3.1 ist ein Beispiel für eine mögliche Anordnung der Elektroden, wie sie auch beim Winkelsensor laut [FAB98] verwendet wurde, dargestellt, wobei die Rotorstellung vom zu messenden Winkel abhängig ist. Die Erfassung der kapazitiven Kopplung in Abhängigkeit von der Rotorstellung ist eine meßtechnisch anspruchsvolle Aufgabe, da die relevanten Kapazitäten in der Größenordnung der vorhandenen parasitären Kapazitäten mit weit weniger als 1 pF liegen. Zur Bewältigung dieser Aufgabe kann die folgende Meßkette (Abbildung 3.2) verwendet werden. Die Einzelsegmente der Sendeelektrode werden über die Senderansteuerung mit einer Impulsfolge angesteuert, je nach Koppelkapazität wird ein unterschiedlich großes Signal an die Empfängerelektrode übertragen und

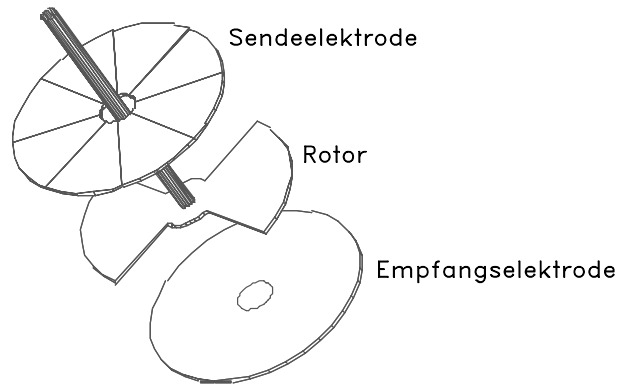


Abbildung 3.1: Beispiel für eine Elektrodenanordnung (Abb. lt. [FAB97])

über einen Empfangsschwingkreis abgenommen. Das so empfangene Signal wird dann im Analogteil verstärkt, gefiltert, gleichgerichtet und anschließend AD-gewandelt. Im Digitalteil wird mit Hilfe eines Algorithmus nach dem ratiometrischen Prinzip aus den Empfangssignalen und den dazugehörigen Segmentwerten auf die zu messende Größe, in diesem Beispiel der Winkel, zurückgeschlossen.

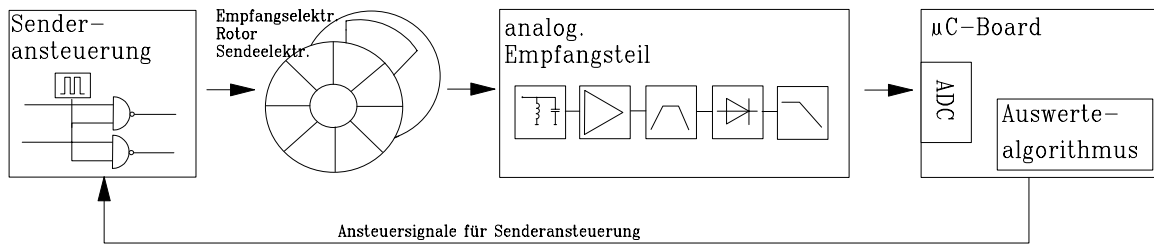


Abbildung 3.2: Blockschaftbild eines kapazitiven Sensors (Meßkette und Auswerteeinheit)

### 3.1.2 Ratiometrisches Prinzip

Die Kapazität der Elektrodenstruktur sowie etwaig vorhandene parasitäre Stromwege werden stark von den äußeren Bedingungen beeinflusst, da die wirksame relative Permittivität  $\epsilon_R$  lt. Gleichung 3.6 von z. B. der Luftfeuchtigkeit ( $\frac{\epsilon_{R-Wasser}}{\epsilon_{R-Luftideal}} = 81$ ) und der Temperatur abhängig ist. Bedingt durch diese Effekte stellt sich keine definierte rein kapazitive Kopplung ein und man erhält somit keinen definierten Signalpegel am Empfänger. Durch äußere Einflüsse, vor allem durch die Temperaturabhängigkeit, ist auch die Spannungsüberhöhung am Schwingkreis nicht konstant. Diese Effekte sind aber im Vergleich zum Meßzyklus so langsam, daß ihr Einfluß innerhalb eines Meßzyklus, d. h. während der Messung der 16 bzw. 32 Segmentwerte, als konstant angenommen werden kann. Da sich die für die Messung entscheidenden Parameter (Signalpegel und Verstärkung) aber von Meßreihe zu Meßreihe ändern können, ist ein Auswertalgorithmus notwendig, der gegenüber diesen Fehlern unempfindlich ist. Das verwendete ratiometrische Prinzip ist dafür sehr gut geeignet, weil es ein vergleichendes, nicht von den absoluten Werten abhängiges Prinzip ist.

Wird davon ausgegangen, daß aus den oben genannten Gründen Signalloffset  $y_{offset}$  und Verstärkung  $k$  nicht bekannt sind, so bildet sich die zu messende Größe  $y_{ist1}$  auf die gemessene Größe  $y_{mess1}$  wie folgt ab:

$$y_{mess1} = y_{ist1} \cdot k + y_{offset}$$

Werden zwei weitere Meßpunkte  $y_{mess2}$  und  $y_{mess3}$  aufgenommen, so ergibt sich das folgende Gleichungssystem mit den zugehörigen Istwerten  $y_{ist2}$  und  $y_{ist3}$ :

$$\begin{aligned} y_{mess1} &= y_{ist1} \cdot k + y_{offset} \\ y_{mess2} &= y_{ist2} \cdot k + y_{offset} \\ y_{mess3} &= y_{ist3} \cdot k + y_{offset} \end{aligned} \quad (3.1)$$

Da nur die Meßwerte  $y_{mess1}$ ,  $y_{mess2}$  und  $y_{mess3}$  bekannt sind, besteht das Gleichungssystem 3.1 aus drei Gleichungen mit fünf Unbekannten. Um das Gleichungssystem trotzdem eindeutig lösen zu können, ist es notwendig, zwei der fünf Unbekannten zu ermitteln. Beim hier verwendeten ratiometrischen Prinzip wird dieses Problem dadurch gelöst, daß in den Messungen 2 und 3 bekannte Referenzgrößen erfaßt werden. In der hier betrachteten Aufgabe, Erfassen eines Kapazitätsverlaufes (vgl. Kapitel 3.1.3), sind die Referenzgrößen Maximalwert und Minimalwert der Kapazität besonders leicht zugänglich, da sie in gewissen Bereichen (vgl. Bereich  $S_6$  und  $S_7$  bzw. Bereich  $S_2$  und  $S_3$  in Abbildung 3.3) in erster Näherung unabhängig von der Rotorstellung sind.

Werden nun Maximalwert  $y_{istmax} = y_{ist2}$  und Minimalwert  $y_{istmin} = y_{ist3}$  gemessen, so erhält man  $y_{messmax} = y_{mess2}$  und  $y_{messmin} = y_{mess3}$ . Aus Gleichungssystem 3.1 wird nun:

$$\begin{aligned} y_{mess1} &= y_{ist1} \cdot k + y_{offset} \\ y_{messmax} &= y_{istmax} \cdot k + y_{offset} \\ y_{messmin} &= y_{istmin} \cdot k + y_{offset} \end{aligned} \quad (3.2)$$

Durch Umformung des Gleichungssystems 3.2 ergibt sich:

$$\begin{aligned} \frac{y_{ist1} - y_{istmin}}{y_{istmax} - y_{istmin}} &= \frac{y_{mess1} - y_{messmin}}{y_{messmax} - y_{messmin}} \text{ bzw.} \\ y_{ist1} &= \frac{y_{mess1} - y_{messmin}}{y_{messmax} - y_{messmin}} \cdot (y_{istmax} - y_{istmin}) + y_{istmin} \end{aligned} \quad (3.3)$$

Wie aus den Gleichungen 3.1, 3.2 und 3.3 hervorgeht, ist es mit Hilfe von drei Meßpunkten möglich, additive und multiplikative Fehler zu eliminieren. Werden vier Meßpunkte aufgenommen, kann diese Redundanz für eine weitere Fehlerverminderung verwendet werden. Dazu ist es notwendig, neben den ersten drei Meßpunkten noch einen weiteren zu finden, der in Hinblick auf die spätere Anwendung mit negativer Steigung, d. h. sinkender Meßwert bei steigendem Istwert, gewählt wird (vgl. sinkender Kapazitätswert  $C_{S1E}$  in Abbildung 3.4). Dieser Meßpunkt wird zum besseren Verständnis  $y_{minus}$  genannt, der Meßpunkt  $y_{mess1}$  in  $y_{plus}$  umbenannt. Für die Meßpunkte  $y_{plus}$  und  $y_{minus}$  gilt:

$$\begin{aligned} y_{plus} &= +y_{ist1} \cdot k + y_{offset} \\ y_{minus} &= -y_{ist1} \cdot k + y_{offset} \end{aligned}$$

Nach Anschreiben und Umformung des neu entstandenen Gleichungssystems 3.4, läßt sich eine Meßformel 3.5 finden, die als Ergebnis eine auf das Intervall  $[-1, 1]$  beschränkte Interpolationsgröße  $\xi_{interpol}$  liefert.

$$\begin{aligned} y_{messplus} &= +y_{ist1} \cdot k + y_{offset} \\ y_{messminus} &= -y_{ist1} \cdot k + y_{offset} \\ y_{messmax} &= y_{istmax} \cdot k + y_{offset} \\ y_{messmin} &= y_{istmin} \cdot k + y_{offset} \end{aligned} \quad (3.4)$$

$$\xi_{interpol} = \frac{y_{messplus} - y_{messminus}}{y_{messmax} - y_{messmin}} \quad (3.5)$$

Die Anwendung dieser formalen Überlegungen und die Vorteile, die sich aus der Anwendung der 4-Punkt-Meßmethode ergeben, werden in Kapitel 3.2.3 gezeigt.

### 3.1.3 Erklärung des Sensorprinzipes anhand des Plattenmodelles

Bei den folgenden Betrachtungen wird von einem idealen Plattenkondensatormodell unter Vernachlässigung der Streufelder ausgegangen. Dieses Plattenkondensatormodell kann auch als Abwicklungsdarstellung der in Abbildung 3.1 gezeigten Elektrodenstruktur betrachtet werden. Die Kapazität  $C$  des Plattenkondensators ist dann (vgl. [PRE94]):

$$C = \varepsilon \cdot \frac{A}{d} \quad (3.6)$$

Wobei  $A$  die Elektrodenfläche,  $d$  der Elektrodenabstand und  $\varepsilon$  die Permittivität bezeichnen. Üblicherweise wird die Permittivität  $\varepsilon$  als Produkt zwischen der relativen Permittivität  $\varepsilon_R$  und der elektrischen Feldkonstante  $\varepsilon_0$  dargestellt ( $\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_R$ ).

Für weitere Beschreibungen ist es sinnvoll, den Begriff der längenbezogenen Kapazität oder auch Kapazitätsbelag  $C'$  zu verwenden. Hierbei wird davon ausgegangen, daß sich die wirksame Elektrodenfläche  $A$  aus dem Produkt der Tiefe  $a$  und Breite  $x_S$  der Elektroden ergibt. Wird die Tiefe  $a$  als konstant angenommen, ergibt sich:

$$\begin{aligned} C' &= \varepsilon \cdot \frac{a}{d} \\ C &= C' \cdot x_S \end{aligned} \quad (3.7)$$

Durch Einbringung einer geerdeten Mittelelektrode - im folgenden Rotor ( $R$ ) genannt - wird die wirksame Elektrodenbreite  $x_S$  und somit die Kapazität  $C$  geändert. Für die weiteren Betrachtungen wird von einer in Abbildung 3.3 schwarz dargestellten Plattenstruktur ( $S_1, E_1, R$ ) ausgegangen. Der Rotor besteht aus zwei Platten der Breite  $4 \cdot x_S$  in einem Abstand von ebenfalls  $4 \cdot x_S$ . Eine räumliche Periode von  $x_{PER} = 8 \cdot x_S$  wird für noch folgende Betrachtungen eingeführt. Zur Lagebeschreibung des Plattenkondensators in Bezug auf den Rotor wird  $x_H$  als horizontale Verschiebung der Freistellung zwischen den beiden Rotorplatten und dem Nullpunkt definiert. Der Nullpunkt

ist in die Mitte der Kondensatorplatten ( $S_1, E_1$ ) gelegt. Die Kapazität  $C_{S1E}(x_H)$  zwischen diesen beiden Kondensatorplatten  $S_1$  und  $E_1$  läßt sich in Abhängigkeit von der Rotorstellung durch folgende Gleichung ausdrücken:

$$C_{S1E}(x_H) = C' \int_{\frac{-x_S}{2}}^{\frac{+x_S}{2}} \text{rect}\left(\frac{x - x_H}{4 \cdot x_S}\right) dx \quad (3.8)$$

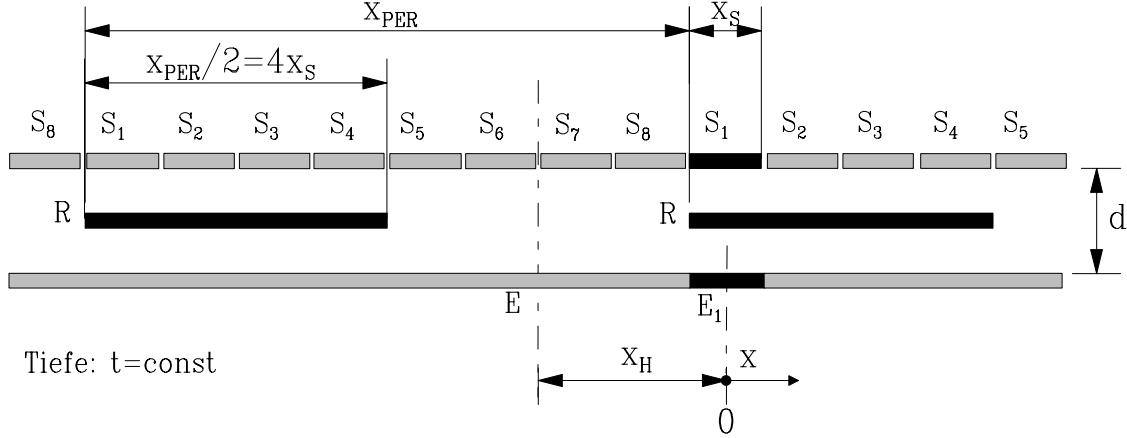


Abbildung 3.3: Prinzipielle Plattenanordnung bestehend aus Sendekondensatorplatten  $S_n$ , Empfängerkondensatorplatte  $E$  und in  $x$ -Richtung verschiebbarem Rotor  $R$

Der durch Gleichung 3.8 ausgedrückte Kapazitätsverlauf  $C_{S1E}(x_H)$  ist in Abbildung 3.4 dargestellt und läßt vier charakteristische Bereiche erkennen:

1. Bereich: keine Kapazität  
 $|x_H| > 2.5x_S$  :  
 $C_{S1E}(x_H) = 0$
2. Bereich: konstante Kapazitätszunahme  
 $-2.5x_S \leq x_H \leq -1.5x_S$  :  
 $C_{S1E}(x_H) = C' \cdot (+2.5x_S + x_H)$
3. Bereich: maximale Kapazität  
 $|x_H| < 1.5x_S$  :  
 $C_{S1E}(x_H) = C_{SEmax} = C' \cdot x_S$  (vgl. Gleichung 3.7)
4. Bereich: konstante Kapazitätsabnahme  
 $+1.5x_S \leq x_H \leq +2.5x_S$  :  
 $C_{S1E}(x_H) = C' \cdot (-2.5x_S + x_H)$

Erweitert man die hier beschriebene Anordnung derart, daß mehrere Sendekondensatorplatten  $S_n$  aneinandergereiht werden und eine gemeinsame Empfängerplatte  $E$  gebildet wird (vgl. Abbildung 3.3 hellgrau eingezeichnet), so führt diese räumliche Fortsetzung dazu, daß sich zu jeder Rotorposition  $x_H$  ein Satz von Segmenten  $S_i$  finden läßt, welcher die zuvor beschriebenen vier Bereiche abdeckt. Der erhaltene Satz

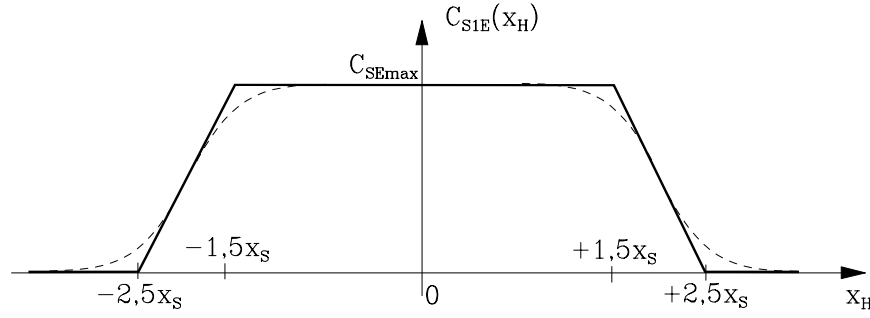


Abbildung 3.4: Kapazitätsverlauf von  $C_{S1E}(x_H)$  ideal: durchgezogene Linie, Einfluß der Streufelder: strichlierte Linie

von Segmenten erfüllt die in Kapitel 3.1.2 beschriebenen Anforderung für die Anwendung des ratiometrischen Prinzips, wodurch es möglich wird, die Rotorposition durch Anwendung der Gleichung 3.5 wie folgt zu ermitteln.

Die bisher vernachlässigten Streufelder verringern den linearen Bereich, wie in Abbildung 3.4 strichliert angedeutet ist. Werden die Streufelder zweier benachbarter Segmente überlagert, so ergibt sich wieder ein homogenes Feld, der lineare Bereich wird dadurch vergrößert. Um die Rotorposition möglichst genau bestimmen zu können, werden daher zu jedem der vier charakteristischen Bereiche möglichst viele passende Segmente zu Segmentgruppen zusammengefaßt. Für die in Abbildung 3.3 gezeigte Rotorposition ergibt sich damit:

$$\begin{aligned}
 y_{messplus} &= C_{S7E} + C_{S8E} + C_{S1E} + C_{S2E} \\
 y_{messminus} &= C_{S3E} + C_{S4E} + C_{S5E} + C_{S6E} \\
 y_{messmax} &= 2 \cdot (C_{S6E} + C_{S7E}) \\
 y_{messmin} &= 2 \cdot (C_{S2E} + C_{S3E})
 \end{aligned}$$

Für die Bestimmung von  $y_{messmax}$  und  $y_{messmin}$  können aufgrund der Streufeldverläufe nur zwei Segmente gewählt werden. Zur betragsmäßigen Anpassung ist daher eine Multiplikation mit dem Faktor 2 nötig. Durch Anwendung der Gleichung 3.5 wird nun das Intervall der Rotorposition  $[-2 \cdot x_s, +2 \cdot x_s]$  auf das Intervall  $[-1, 1]$  abgebildet.

Um die gewonnen Erkenntnisse und den beschriebenen Algorithmus zur Bestimmung der Rotorposition in einem autonom arbeitenden Meßprogramm absetzen zu können, ist es notwendig, die in diesem Fall durch Überlegungen gewählten Segmente, ebenfalls automatisch bestimmen zu können. Hierzu dient ein in Kapitel 3.2.3.3 beschriebener Algorithmus zur Bestimmung der ungefähren Rotorlage.

### 3.1.4 Anwendung auf den Winkelsensor

Der am IAEQ bereits entwickelte Winkelsensor laut [BRA92] baut auf das in Kapitel 3.1.3 beschriebene Sensorgrundprinzip auf. Für den Winkelsensor wurden die Elektroden rotationsymmetrisch angeordnet (vgl. Abbildung 3.1), wodurch es möglich ist, anstelle der Position  $x_H$  den Winkel zu messen. In [BRA92] und [FAB98] ist die Anwendung auf Winkel- und Winkelgeschwindigkeitssensoren eingehend behandelt. Eine praktische Realisierung ist in [KOEL97] dokumentiert.

## 3.2 Konzept der Momentenmessung

Wird mit Hilfe einer Welle ein Moment übertragen, so erfährt die Welle eine Verdrehung, die entsprechend der Materialeigenschaften in direktem Zusammenhang mit dem Betrag des angreifenden Moments liegt. Gelingt es, die Verdrehung unter Berücksichtigung verschiedener Einflußgrößen, wie z. B. Temperatur und Alterung zu messen und ein entsprechendes Kennfeld der Torsionswelle aufzunehmen, so ist eine Momentenbestimmung möglich. Ausgehend von dem Konzept des Winkel- und Winkelgeschwindigkeitssensors (vgl. Kapitel 3.1.4) wurde ein Relativwinkelsensor gebaut, der die beschriebene Verdrehung messen kann.

### 3.2.1 Torsion einer mechanischen Welle

Geht man davon aus, daß bei Verdrehung einer Welle durch das angreifende Moment der Gültigkeitsbereich des Hook'schen Gesetzes nicht verlassen wird, d. h. ein linearer Zusammenhang zwischen Torsionsspannung  $\tau_t$  und Formänderung  $v$  besteht, so gilt laut [BOEG85]:

Zwei benachbarte Querschnitte einer Welle (vgl. Abbildung 3.5) werden durch Torsionsbeanspruchung gegeneinander verdreht. Wird vor der Verformung der Welle der Länge  $l$  eine Markierungslinie zwischen den Punkten A und B angenommen, dann wird daraus nach der Verformung die Schraubenlinie  $\overline{AC}$ . Zugleich dreht sich der Radius  $\overline{OB}$  um den Kreismittelpunkt 0 in die Stellung  $\overline{OC}$ , das heißt, die beiden Stirnflächen der Welle haben sich um den Verdrehwinkel  $\varphi_{rel}$  gegeneinander verdreht. Die stärkste Verformung zeigt die Randfaser - Formänderung  $v$  (Bogen  $BC$ ). Das Hooke'sche Gesetz für Torsion lautet:

$$\tau_t = \frac{v}{l} \cdot G \quad \text{bzw.} \quad (3.9)$$

$$\varphi_{rel} = \frac{\tau_t l}{Gr} \cdot \frac{180^\circ}{\pi} \quad (3.10)$$

Wobei für die Torsionsspannung  $\tau_t$  der Quotient aus angreifenden Moment  $M$  zu polarem Widerstandsmoment  $W_P$  eingesetzt wird (vgl. Gleichung 3.11) und  $G$  das Schubmodul ist. Das polare Widerstandsmoment  $W_P$  ist eine geometrieabhängige Größe und läßt sich für eine massive Welle mit Radius  $r$  nach Gleichung 3.12 berechnen.

$$\tau_t = \frac{M}{W_P} \quad (3.11)$$

$$W_P = \frac{\pi}{16} \cdot (2r)^3 \quad (3.12)$$

**Beispiel für eine Torsionswelle:** Eine Torsionswelle aus Stahl mit einem Schubmodul  $G = 80.000 \text{ N/mm}^2$ , mit einer Wellenlänge  $l = 20 \text{ cm}$  und einem Radius  $r = 2.5 \text{ mm}$  ergibt sich bei einem Moment  $M = 2 \text{ Nm}$  ein Verdrehwinkel  $\varphi_{rel} = 4.66^\circ$ . Das Moment entspricht einer Lenkkraft von  $10 \text{ N}$  auf einem Lenkraddurchmesser von  $40 \text{ cm}$ .



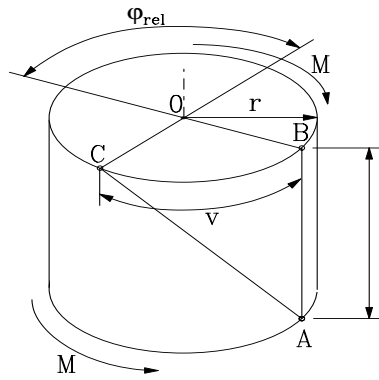


Abbildung 3.5: Formänderung bei Torsionsspannung lt. [BOEG85]

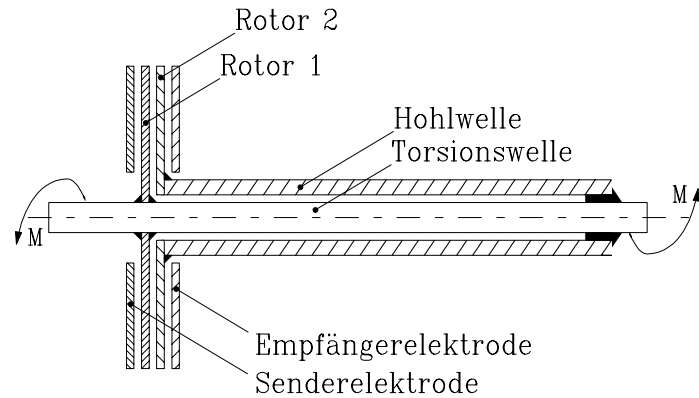
### 3.2.2 Mechanischer Aufbau

Die Idee des kapazitiven Momentensensors ist es, anstelle eines Rotors beim Winkelsensor zwei Rotoren zwischen Sende- und Empfangselektrode einzubringen. Diese Rotoren werden nun mit dem Verdrehwinkel  $\varphi_{rel}$  (vgl. Kapitel 3.2.1) relativ zueinander verdreht. Wie in Kapitel 3.2.3 dargestellt wird, läßt sich unter Verwendung des ratiometrischen Prinzips ein Algorithmus finden, der sowohl den Relativwinkel  $\varphi_{rel}$  zwischen den beiden Rotoren als auch den Absolutwinkel  $\varphi_{abs}$  erfassen kann.

Aus den bisherigen Überlegung ergeben sich für die Realisierung eines Momentensensors folgende mechanische Bedingungen:

Der durch das angreifende Moment entstehende Verdrehwinkel  $\varphi_{rel}$  der Torsionswelle, muß als Relativverdrehung zwischen den zwei Rotoren wirken. Der Abstand zwischen den Elektroden (Senderelektrode, Rotor 1, Rotor 2, Empfängerelektrode) muß aber so gering wie möglich gehalten werden, da sonst die Kopplung zu klein und der Einfluß der Streufelder zu groß wird (vgl. nichtlinearer Verlauf der Kapazität  $C_{S1E}(x_H)$  in Abbildung 3.4). Dieser Forderung steht die Tatsache entgegen, daß der Verdrehwinkel  $\varphi_{rel}$  der Länge  $l$  der Welle direkt proportional ist (vgl. Gleichung 3.10). Um einen messbaren Verdrehwinkel  $\varphi_{rel}$  zu bekommen, wird bei der Messung mit Torsionswellen die Verdrehung zwischen Wellenanfang und -ende gemessen. Damit die geringe Distanz der beiden Rotoren trotzdem eingehalten werden kann, werden zwei konzentrische Wellen verwendet, bei der die innere Welle die Torsionswelle ist. Die äußere Welle (Hohlwelle) ist nur am Wellenende mit der Torsionswelle fix verbunden und bleibt so unbelastet. Erfährt die Torsionswelle nun eine Verdrehung, so ist die Relativverdrehung der äußeren Welle zur Torsionswelle gleich dem Verdrehwinkel  $\varphi_{rel}$ . Wird nun ein Rotor mit der Torsionswelle und der zweite Rotor mit der äußeren Welle fix verbunden, so dient diese äußere Welle als mechan. "Rückführung" des Verdrehwinkels  $\varphi_{rel}$  (siehe Abbildung 3.6).

Das Prinzip zweier konzentrischer Wellen findet sich auch bei Lenksäulen im Automobilbau wieder. Das Lenkrad ist über eine Torsionswelle mit der Lenkmechanik verbunden. Um einen Totalausfall der Lenkung bei Bruch der Torsionswelle zu verhindern, wird die Welle in einer Hohlwelle geführt. Diese ist beim Lenkrad fest mit der Lenkwelle verbunden und am Wellenende über einen mechanischen Totgang mit der Lenkwelle verkoppelt. Bei Bruch der Torsionswelle kann die Hohlwelle die Lenkkraftübertragung

Abbildung 3.6: Mechanische "Rückführung" des Verdrehwinkels  $\varphi_{rel}$ 

gewährleisten, wobei sich ein zusätzliches Lenkspiel von ca.  $5^\circ$  bemerkbar macht.

Unter Rücksichtnahme auf eine eventuelle Anwendung des Sensors im Automobilbau, wurde ein Prüfstand entwickelt, der auf diese Struktur aufbaut, der in [WAN99] eingehend beschrieben ist.

### 3.2.3 Elektrodenstruktur und Auswertung

Da der maximale Verdrehwinkel  $\varphi_{rel}$  von Torsionswellen je nach Länge und Durchmesser nur wenige Grad beträgt, vgl. Kapitel 3.2.1, ist eine Relativwinkelmessung auf  $\pm 5^\circ$  ausreichend.

Am Beispiel der in Abbildung 3.7 gezeigten Elektrodenstruktur, bestehend aus Sender- und Empfangsfläche, sowie den beiden Rotoren, wird die Relativwinkelmessung erklärt. Die Elektrodenstruktur zeigt eine Senderelektrode mit 16 Segmenten (Segmentteilung  $22.5^\circ$ ) und zwei asymmetrische, zueinander gespiegelte Rotorflügel (Öffnungswinkel  $90^\circ$  und  $150^\circ$ , Flügel je  $60^\circ$ ). In 5 sind noch andere, weiterentwickelte Rotorstrukturen gezeigt, die mit einer 32-segmentigen Senderelektrode bessere Ergebnisse erzielen. Zum besseren Verständnis wird an dieser Stelle die einfachere 16 Segmentstruktur behandelt, welche aber auf den gleichen Prinzipien beruht.

Wird die in Abbildung 3.7 gezeigte Elektrodenstruktur, in einer "Abwicklungs-darstellung", vergleichbar mit der Darstellung von Wicklungsschemata bei Motoren, zweidiimensional dargestellt, so ergibt sich die in Abbildung 3.8 gezeigte Anordnung, vergleichbar mit der Plattenanordnung in Abbildung 3.3.

Um die Beschreibung des Algorithmus zu vereinfachen, wird das folgende Gedankenmodell verwendet. In diesem idealisierten Modell wird von einer homogenen Feldverteilung ausgegangen. Unter der Voraussetzung, daß die Feldlinien nur in axialer Richtung (vgl. z-Richtung in Abbildung 3.8) verlaufen, erhält man eine Projektion der Rotorflächen auf die Empfängerfläche E, vergleichbar mit dem Schattenbild bei planparallelem Lichteinfall. Durch Ansteuerung der 16 Segmente  $S_i$  wird das Schattenbild des Rotors auf die Empfängerelektrode abgebildet, wobei jeder der 16 Meßwerte die mittlere Helligkeit erfasst (entspricht der wirksamen Kondensatorfläche). In Abbildung 3.8 sind die Schattenbilder RS1, RS2 der Rotoren R1, R2 eingezeichnet. Ändert sich der Absolutwinkel  $\varphi_{abs}$ , werden die Rotorschatten in ihrer Lage verändert, eine

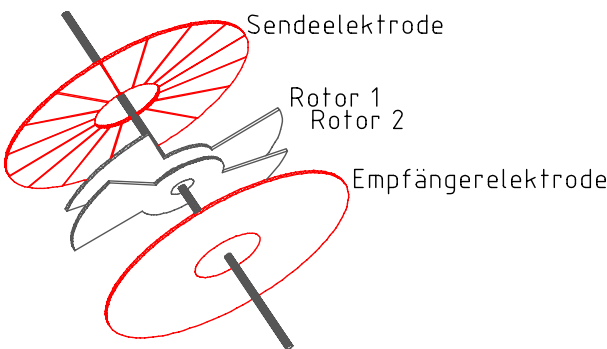
[illegible]

Abbildung 3.8: "Abwicklungsdarstellung" der Elektrodenstruktur aus Abbildung 3.7 in Nulllage ( $x_{rel} = 0$  bzw.  $\varphi_{rel} = 0$ )

Relativwinkeländerung bewirkt eine Änderung der Breite der Rotorschatten. Wird das verwendete Gedankenmodell nun auf die Zusammenhänge beim Momentensensor angewendet, so bedeutet das:

Abhängig von der Rotorstellung ergeben sich, durch die Ansteuerung der Segmente, 16 Meßwerte - im folgenden Segmentwerte SW genannt. In der verwendeten Sensorelektronik sind diese Meßwerte Spannungen, die proportional der Einkoppelkapazität (vgl. Helligkeitswert) der einzelnen Sendeselemente in den Empfängerschwingkreis sind (vgl. Sensorelektronik, Empfängerschaltung lt. [WAN99]).

### 3.2.3.1 Relativwinkelbestimmung

Für die Schattenbildung sind nur die Rotorkanten K1, K2, K3 und K4 maßgebend, da die übrigen Rotorkanten vom jeweils anderen Rotor überdeckt werden (vgl. Abbildung 3.8). Werden nun die Rotoren R1 und R2 um je  $x_{rel}/2$  gegeneinander verschoben, so vergrößert sich die Distanz  $\overline{K1K2}$  um  $x_{rel}$  (Verbreiterung des Rotorschattens RS1), während sich  $\overline{K3K4}$  um  $x_{rel}$  (Verschmälerung des Rotorschattens RS2) verringert. Die Mittenlagen der Rotorschatten RS1 und RS2 bleiben von dieser Relativverschiebung unbeeinflusst.

Werden nun die Segmentwerte  $SW_1$  bis  $SW_8$  zum Meßwert  $y_{relminus}$  und die Segmentwerte  $SW_9$  bis  $SW_{16}$  zum Meßwert  $y_{relplus}$  zusammengezählt, sind schon zwei der vier Größen für die Anwendung der ratiometrischen Gleichung (siehe Gleichung 3.5) gefunden. Um den Maximalwert  $y_{relmax}$  zu erhalten, werden die Segmentwerte der unbedeckten Segmente ( $SW_1, SW_8, SW_9, SW_{16}$ ) verwendet und mit dem Faktor 2 zur betragsmäßigen Anpassung multipliziert. Analoges gilt für den Minimalwert  $y_{relmin}$ , angewandt auf die voll bedeckten Segmente ( $SW_4, SW_5, SW_{12}, SW_{13}$ ). Es ergibt sich der folgende Gleichungssatz:

$$\begin{aligned} y_{relminus} &= SW_1 + SW_2 + SW_3 + SW_4 + SW_5 + SW_6 + SW_7 + SW_8 \\ y_{relplus} &= SW_9 + SW_{10} + SW_{11} + SW_{12} + SW_{13} + SW_{14} + SW_{15} + SW_{16} \\ y_{relmax} &= 2 \cdot (SW_1 + SW_8 + SW_9 + SW_{16}) \\ y_{relmin} &= 2 \cdot (SW_4 + SW_5 + SW_{12} + SW_{13}) \end{aligned}$$

Dieser Formelsatz läßt sich nun in Gleichung 3.5 einsetzen, um den Relativwinkelinterpolationswert zu erfassen (vgl. Rotorpositionserfassung Kapitel 3.1.3):

$$\xi_{rel} = \frac{y_{relplus} - y_{relminus}}{y_{relmax} - y_{relmin}} \quad (3.13)$$

Mit Hilfe der Gleichung 3.13 wird der Relativverschiebungsbereich  $[-4 \cdot x_S, +4 \cdot x_S]$  auf den Bereich  $[-1, +1]$  abgebildet. Hierbei sind allerdings noch Nebenbedingungen für die maximale bzw. minimale Ausdehnung der Rotorschatten RS1 und RS2 zu beachten, welche die Gültigkeit des angegebenen Bereiches auf das Intervall  $[-4/3 \cdot x_S, +4/3 \cdot x_S]$  einschränken. Die Nebenbedingungen ergeben sich aus den folgenden Überlegungen (vgl. Abbildung 3.8): Der Rotorschatten RS1 kann eine maximale Breite  $\overline{K1K2}_{max} = 4 \cdot 4/3 \cdot x_S$  annehmen, da sonst der Rotorschatten RS1 in zwei Teile zerfallen würde. Der Rotorschatten RS2 kann eine minimale Breite  $\overline{K3K4}_{min} = 2 \cdot 4/3 \cdot x_S$  annehmen, da sonst der Rotorschatten RS2 sich wieder verbreitern würde.

Da in der Abwicklungsdarstellung die Segmentbreite  $x_S$  einem Winkel von  $22.5^\circ$  in der rotatorischen Elektrodenstruktur entspricht, liegt der tatsächliche Meßbereich im Intervall  $[-30^\circ, +30^\circ]$ .

In den bisherigen Betrachtungen wurde auf das Vorzeichen der Relativverschiebung ( $\pm x_{rel}$  bzw.  $\pm \varphi_{rel}$  bzw. positives/negatives Moment) noch nicht näher eingegangen. Ausgehend von der Abbildung 3.8 mit der angenommenen Nulllage ( $x_{rel} = 0$  bzw.  $\varphi_{rel} = 0$ ) läßt sich nun das Vorzeichen definieren: Positive Relativverschiebung  $+x_{rel}$  bedeutet Vergrößerung des Rotorschattens RS1, und Verkleinerung des Rotorschattens RS2, negative Relativverschiebung  $-x_{rel}$  bedeutet Verkleinerung des Rotorschattens RS1 und Vergrößerung des Rotorschattens RS2.

Um das Vorzeichen der Verschieberichtung bestimmen zu können, ist also eine eindeutige Unterscheidung zwischen den Rotorschatten RS1 und RS2 notwendig. Dazu werden die Rotoren R1 und R2 gegeneinander vorverdreh, sodaß in der neuen Nulllage der Rotorschatten RS1  $4 \cdot x_S + 2/3 \cdot x_S$  ( $105^\circ$ ) und Rotorschatten RS2  $4 \cdot x_S - 2/3 \cdot x_S$  ( $75^\circ$ ) breit sind.

Durch die unterschiedliche Breite der Rotorschatten in der neu angenommenen Nulllage ist somit eine eindeutige Unterscheidung von Rotorschatten RS1 und Rotorschatten RS2 möglich, wobei der verbleibende Meßbereich von  $\pm 15^\circ$  nun schmaler ist. Der Meßbereich liegt aber immer noch über dem geforderten von  $\pm 5^\circ$ .

### 3.2.3.2 Absolutwinkelbestimmung

Wie schon erwähnt, bleibt die absolute Position  $x_{abs}$  der Mittelpunkte der Rotorschatten RS1 und RS2 von einer Relativverschiebung unbeeinflusst. Der Abstand zwischen den Mittelpunkten der Rotorschatten RS1 und RS2 kann als  $8 \cdot x_S = konst.$  angegeben werden (vgl. Abbildung 3.8).

Aufgrund dieser Tatsache ist es nun möglich, den von den Segmenten  $S_9$  bis  $S_{16}$  überdeckten Bereich gedanklich über den der Segmente  $S_1$  bis  $S_8$  zu legen. Die in Abbildung 3.8 gezeigte Anordnung erscheint dann nur noch acht Segmente breit, wobei die Mittelpunkte der Rotorschatten immer übereinanderliegen. Bei einer Absolutverschiebung von  $x_{abs}$  liegen die Rotorkanten K1, K2, K3 und K4 bei:

$$\begin{aligned} x_{K1} &= x_{abs} - 2 \cdot x_S - \frac{x_{rel}}{2} \\ x_{K2} &= x_{abs} + 2 \cdot x_S + \frac{x_{rel}}{2} \\ x_{K3} &= x_{abs} - 2 \cdot x_S + \frac{x_{rel}}{2} \\ x_{K4} &= x_{abs} + 2 \cdot x_S - \frac{x_{rel}}{2} \end{aligned}$$

Betrachtet man nun die Mittenposition von  $x_{K1}$  und  $x_{K3}$  sowie  $x_{K2}$  und  $x_{K4}$  so ergibt sich:

$$\begin{aligned} \frac{x_{K1} + x_{K3}}{2} &= x_{abs} - 2 \cdot x_S \\ \frac{x_{K2} + x_{K4}}{2} &= x_{abs} + 2 \cdot x_S \end{aligned}$$

Diese beiden Mittenpositionen beschreiben die Kanten eines fiktiven Rotor der Breite  $4 \cdot x_S$ , womit sich eine Anordnung wie in Abbildung 3.3 aus Kapitel 3.1.3, über das allgemeine Plattenmodell erkennen läßt.

Um die absolute Lage der Rotoren  $x_{abs}$  in bezug auf die Sendesegmente und damit den Absolutwinkelinterpolationswert  $\xi_{abs}$  zu bestimmen, können nun wieder die für die Anwendung des ratiometrischen Prinzipes notwendigen Größen gebildet werden. Für die in Abbildung 3.8 gezeigte Rotorposition sind das:

$$\begin{aligned} y_{absplus} &= (SW_1 + SW_9) + (SW_2 + SW_{10}) + (SW_3 + SW_{11}) + (SW_4 + SW_{12}) \\ y_{absminus} &= (SW_5 + SW_{13}) + (SW_6 + SW_{14}) + (SW_7 + SW_{15}) + (SW_8 + SW_{16}) \\ y_{absmax} &= 2 \cdot ((SW_1 + SW_9) + (SW_8 + SW_{16})) \\ y_{absmin} &= 2 \cdot ((SW_4 + SW_{12}) + (SW_5 + SW_{13})) \end{aligned}$$

Dieser Formelsatz läßt sich nun in Gleichung 3.5 einsetzen, um den Absolutwinkelin-  
terpolationswert  $\xi_{abs}$  zu erfassen (vgl. Rotorpositionserfassung Kapitel 3.1.3):

$$\xi_{abs} = \frac{y_{absplus} - y_{absminus}}{y_{absmax} - y_{absmin}} \quad (3.14)$$

Mit Hilfe der Gleichung 3.14 wird der Absolutverschiebungsbereich  $[0, 8x_s]$  auf den  
Bereich  $[-1, +1]$  abgebildet.

Für die Absolutwinkelmessung ergibt sich somit ein Meßbereich von  $180^\circ$ . Die für  
die Vorzeichenbestimmung bei der Relativwinkelmessung (vgl. Kaptiel 3.2.3.1) not-  
wendige Vorverdrehung der Rotoren (R1 gegenüber R2) und die dadurch bedingte  
Einschränkung des Relativwinkelmeßbereiches, kann hier zur Erweiterung des Abso-  
lutwinkelmeßbereiches verwendet werden. Durch die unterschiedliche Breite der beiden  
Rotorschatten RS1 und RS2, sind diese eindeutig zu unterscheiden, wodurch sich für  
die Absolutwinkelmessung eine Verdopplung des Meßbereiches auf  $360^\circ$  ergibt.

### 3.2.3.3 Bestimmung der ungefähren Rotorlage

Die in den Kapiteln 3.2.3.1 und 3.2.3.2 beschriebenen Verfahren zur Bestimmung des  
Relativ- und Absolutwinkels setzten die Kenntnis der ungefähren Rotorlage auf ein  
Segment genau voraus, um die richtigen Segmente auswählen zu können. Für die Vor-  
zeichenbestimmung bei der Relativwinkelmessung und die Verbreiterung des Absolut-  
winkelmeßbereiches auf  $360^\circ$  muß der im Folgenden beschriebene Algorithmus auch die  
beiden Rotorschatten RS1 und RS2 eindeutig unterscheiden können.

Für den Algorithmus ist es notwendig, eine Nulllage (Absolutwinkel  $\varphi_{abs} = 0$ , Re-  
lativwinkel  $\varphi_{rel} = 0$ ) zu definieren. Die Segmentwerte bei dieser Nulllage werden in  
einer Liste  $H(i)$  mit  $i = 1..16$  festgehalten.  $i$  steht als Index für die Segmente lt.  
Abbildung 3.8. Die tatsächliche Meßreihe  $SW(i)$  mit  $i = 1..16$  wird nun mit den Null-  
lagenwerten  $H(i)$  verglichen, wobei die Indizes der Nulllagenwerte  $H(i)$  solange zyklisch  
vertauscht werden, bis sich eine maximale Übereinstimmung der Nulllagenwerte  $H(i)$   
mit den Meßwerten  $SW(i)$  ergibt. Mathematisch wird dies durch die Korrelationsfunk-  
tion beschrieben. Es gilt allgemein für die Korrelation  $R_{xy}(\tau)$ :

$$R_{xy}(\tau) = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{+\frac{T}{2}} x(t)y(t+\tau) dt, \quad (3.15)$$

wobei  $\tau$  die Verschiebung zwischen den Signalen  $x(t)$  und  $y(t)$  und  $T$  die Periodendauer  
ist. Durch eine periodische Fortsetzung von  $H(i)$  durch  $H(i) = H(i + 16)$  läßt sich die  
auf diskrete Werte übertragene Korrelation  $R_{SW,H}$  nach Gleichung 3.15 anschreiben  
als:

$$R_{SW,H}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n SW(i)H(i+j) \quad (3.16)$$

Dabei ist  $n$  die Anzahl der Segmente und  $j$  die diskrete Verschiebung der Indizes.

Um die Verdrehung des Rotors gegenüber seiner durch die Nulllagenwerte  $H(i)$  de-  
finierten Nulllage angeben zu können, muß jener Verschiebungswert  $j$  gesucht werden,  
bei dem die Korrelation  $R_{SW,H}$  sein Maximum aufweist. Dieser Verschiebungswert  $j$   
wird im weiteren als Segmentoffset bezeichnet und gibt die Rotorlage in Bezug auf die  
Nulllage auf  $\pm 1/2$ -Segment genau an.

Da für die Auswertung durch den Algorithmus nicht der Betrag der Korrelation  $R_{SW,H}(j)$  wichtig ist, sondern nur der Segmentoffset  $j$  bei dem die Korrelation  $R_{SW,H}$  maximal wird, kann die Division mit  $1/n$  entfallen. Außerdem dürfen die Nulllagewerte  $H(i)$  auf ganzzahlige Werte skaliert werden. Für die in Abbildung 3.8 gezeigte Struktur, läßt sich laut Kapitel 7.2.2.2 bzw. [CER99] eine Liste der Nulllagenwerte  $H(i) = [-3 \quad -1 \quad +3 \quad +3 \quad +3 \quad +1 \quad -3 \quad -3 \quad -3 \quad -3 \quad +1 \quad +3 \quad +3 \quad +3 \quad -1 \quad -3]$  angeben, wobei die zu den Indizes  $i = 1 \dots 16$  korrespondierenden Werte von links nach rechts angeführt sind.

Die Absetzung der hier skizzierten Algorithmen in die verwendete Sensorsoftware ist in [CER99] dokumentiert. Eine Umsetzung der Algorithmen in MatLab findet sich in Kapitel 7.2.2.

# Kapitel 4

## Projektübersicht

Wie im Vorwort beschrieben, wurde das Gesamtprojekt "Kapazitiver Momentensensor" von drei Diplomanden durchgeführt. Es ergaben sich drei Teilprojekte, die in dazugehörigen Diplomarbeiten dokumentiert sind. Zur besseren Orientierung soll dieses Kapitel eine kurze Projektübersicht geben und zeigen, in welchem Zusammenhang die Teilgebiete stehen, die in dieser Diplomarbeit, in [CER99] und [WAN99] detailliert beschrieben sind.

Abbildung 4.1 zeigt neben den Sensorkomponenten, bestehend aus Sendansteuerung, Sendeelektrode, Rotoren, Empfangselektrode, Empfängerschaltung und Microprozessorboard, auch die einzelnen Komponenten, der für den Momentensensor entwickelten Meß- und Prüfumgebung. Diese besteht aus dem Prüfstand mit Schrittmotor und Referenzwinkelsensor, sowie die Schnittstellen zum PC, mit welcher eine Steuerung und Auswertung realisiert wurden. Zur Illustration des Projektes dient Abbildung 4.2, eine Photographie des Prüfstandes mit zu messendem Sensor und Benutzerumgebung.

Die Anpassung des bereits vorhandenen Prüfstandes, um eine definierte Relativverdrehung zwischen den Rotorflügeln einstellen zu können, ist in [WAN99] dargestellt. Dort finden sich auch die Schaltungsentwicklungen für die Senderansteuerung, den analogen Empfangsteil und das Mikroprozessorboard, wobei analoger Empfangsteil und Mikroprozessorboard auf einer Platine ausgeführt sind. Außerdem zeigt [WAN99] ein mögliches Kapazitätsmodell der verwendeten Elektrodenstruktur.

In [CER99] ist die Sensorsoftware (Segmentansteuerung, Meßalgorithmen, Adaptionsalgorithmen) für den Mikroprozessor (Motorola HC12) dokumentiert. Für die Schnittstelle zwischen PC und Prüfstand wurde ein Dynamic Data Exchange-Server (DDE-Server) entwickelt, welcher zusätzlich eine Benutzerschnittstelle anbietet, durch die ein unproblematischer Zugriff auf den Meßplatz ermöglicht wird. Diese Software ist ebenfalls in [CER99] beschrieben.

Ein Vergleich von verschiedenen Rotorstrukturen und die zugehörigen Meßergebnisse sind in Kapitel 5 und Kapitel 8 zu finden. Die Auswertungen der Messungen wurden in MatLab <sup>1</sup> realisiert (vgl. Kapitel 7.2). Dies hat den Vorteil, daß bei Messung der einzelnen Segmentwerte, die verschiedenen Algorithmen auch unter MatLab unabhängig vom Sensor getestet werden können. Die Arbeit mit DDE unter MatLab ist in Kapitel 7.1 sowie im Anhang beschrieben.

---

<sup>1</sup>MATLAB 5.1 copyright 1984-1997 by The Math Works, Inc.



Zur Optimierung und Verbesserung der Sensorstrukturen ist die Kenntnis der elektrischen Feldverläufe, abhängig vom jeweiligen Sensordesign, notwendig. [CER99] zeigt eine Feldsimulation und deren Anwendung auf die optimale Wahl verschiedener geometrischer Parameter. Kapitel 6 zeigt unter Verwendung dieser Simulation die Auswirkung einer Rotorverkipfung.

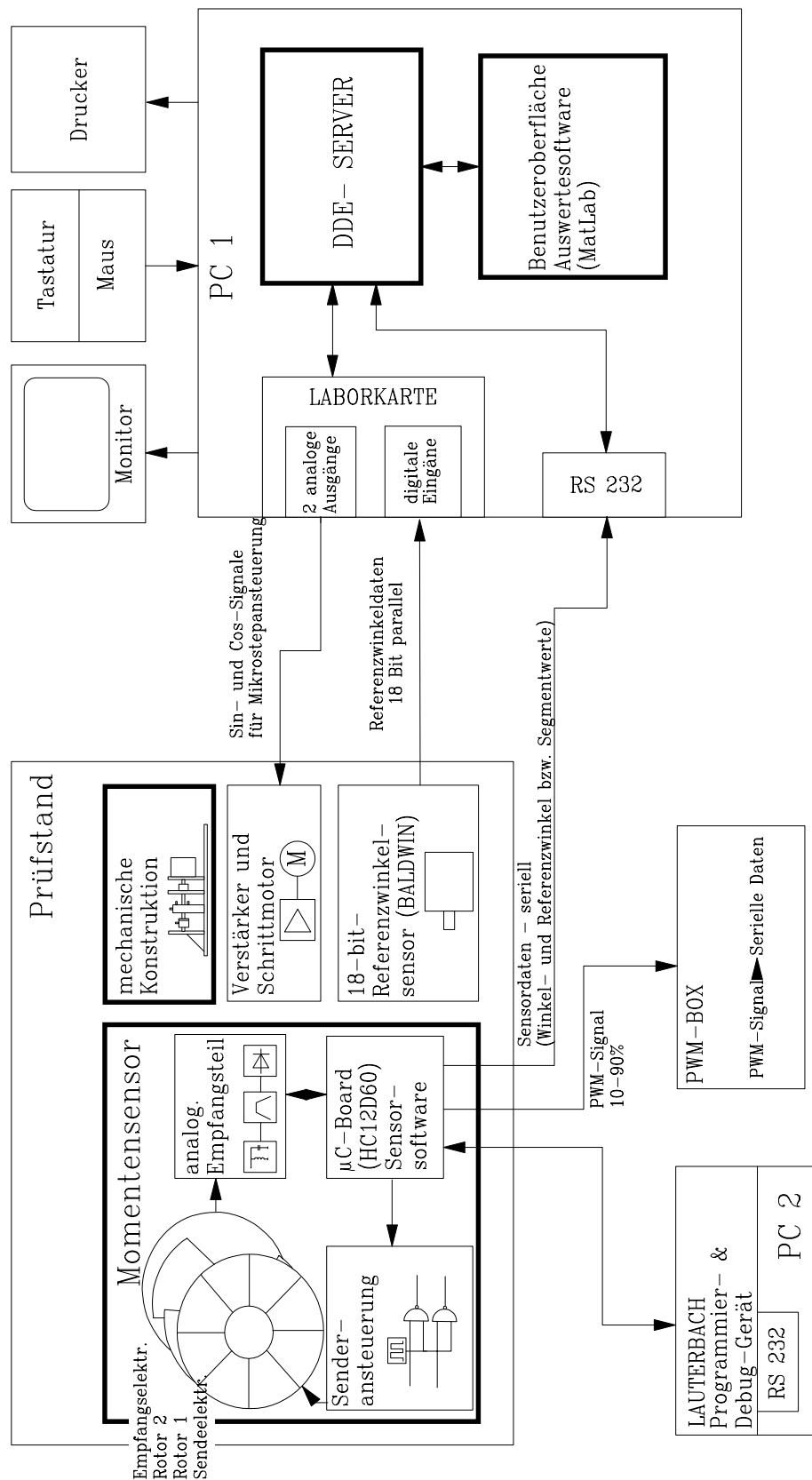


Abbildung 4.1: Blockschaltbild zur Projektübersicht - Die fettumrandeten Blöcke sind Gegenstand des Gesamtprojektes "Kapazitiver Momentensensor"

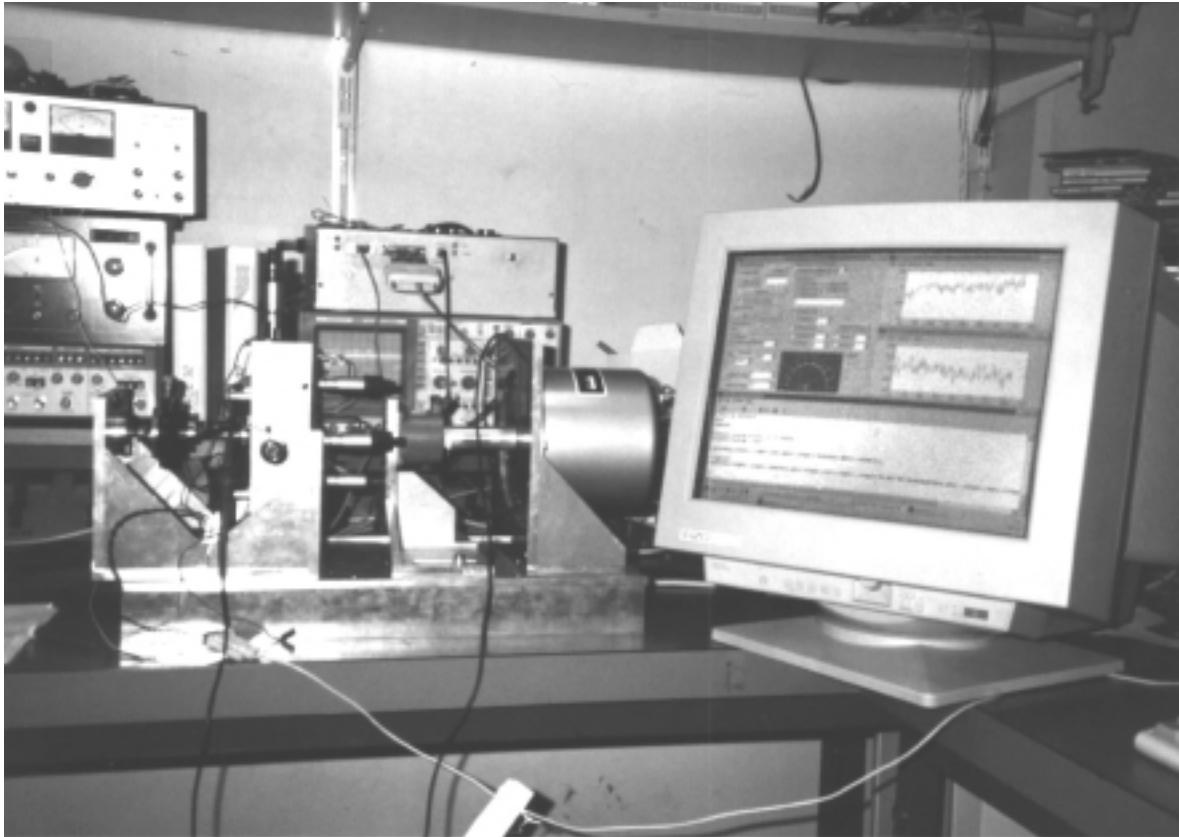


Abbildung 4.2: Photo der Meßaufbauten - links-mitte: Prüfstand mit von links nach rechts: Momentensensor in Positioniereinheit, Schrittmotor, Referenzwinkelsensor (BALDWIN), darüber: Verstärker für Schrittmotoransteuerung, rechts: Auswertemonitor

# Kapitel 5

## Rotorstrukturen

Bei der Entwicklung des Momentensensors nach den in Kapitel 3 beschriebenen Prinzipien konnten eine Reihe von möglichen Rotorstrukturen gefunden werden, die ein von der Relativverdrehung zwischen den beiden Rotoren abhängiges Schattenbild erzeugen. Drei realisierte Strukturen sind in den folgenden Abschnitten dargestellt. Konstruktive Details der Elektrodenstruktur sind in [WAN99] dargestellt und werden hier nur der Vollständigkeit wegen angegeben:

- Sende- und Empfangselektroden aus doppelseitigen Leiterplatten aus kupferbeschichtetem FR4 (Layout siehe Anhang bzw. [WAN99])
- Distanzring zwischen Sende- und Empfangselektrode, Aluminium, Distanz Sender/Empfänger 5 mm (vgl. [WAN99])
- Rotoren, Messing, 1mm dick, CNC gefräst nach ACAD-Vorlage (Konstruktionszeichnungen siehe Anhang)

## 5.1 Zweiflügelstruktur

Die Zweiflügelstruktur ist eine direkte Umsetzung des in Kapitel 3.2.3 angegebenen Konzeptes, was bei Betrachtung einer Abwicklungsdarstellung (vgl. Abb. 3.8) leicht nachvollziehbar ist. Die beiden Rotoren haben zwei  $60^\circ$  breite Flügel, die mit Öffnungswinkeln von  $90^\circ$  bzw.  $150^\circ$  asymmetrisch am Umfang verteilt sind (vgl. Abb. 5.1). Der resultierende Rotor mit relativwinkelproportionalen Flügelbreite wird aus den

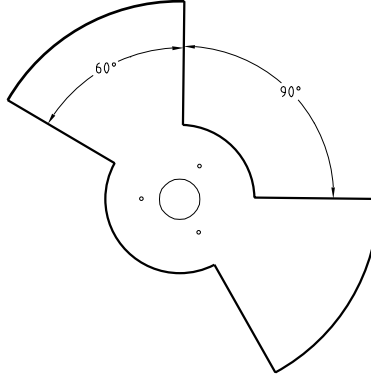


Abbildung 5.1: Rotor zur Zweiflügelstruktur

zwei asymmetrischen Einzelrotoren gebildet, die gespiegelt übereinander gelegt werden. In der Nulllage ( $\varphi_{rel} = 0$ ) ergeben sich Flügelbreiten von  $75^\circ$  und  $105^\circ$  (vgl. Abbildung 5.2). Die zugehörige Sendefläche hat 16 Sendesegmente mit je  $22.5^\circ$

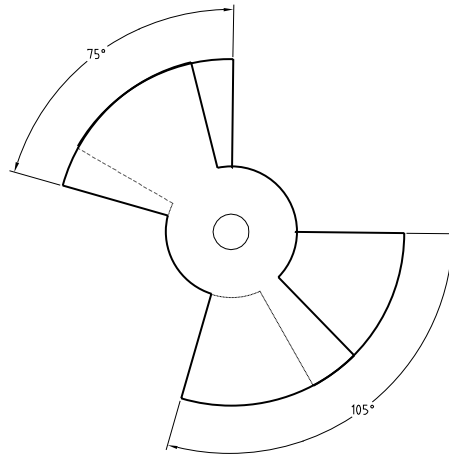


Abbildung 5.2: Resultierender Rotor zur Zweiflügelstruktur für  $\varphi_{rel} = 0$

breiten Segment (vgl. Abbildung B.1 im Anhang). Die erhaltene Elektrodenstruktur ist für eine Absolutwinkelmessung über  $360^\circ$  und einer Relativwinkelmessung für  $\pm 15^\circ$  geeignet.

## 5.2 Vierflügelstruktur

Die Vierflügelstruktur ist die exakte Verdopplung der Zweiflügelstruktur (Kapitel 5.1). Jeder Rotor hat vier  $30^\circ$  breite Flügel, die asymmetrisch am Umfang verteilt sind und Öffnungswinkeln von  $45^\circ$  bzw.  $75^\circ$  (vgl. Abbildung 5.3) aufweisen. Der resultierende

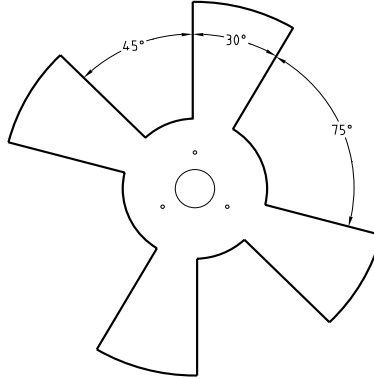


Abbildung 5.3: Rotor zur Vierflügelstruktur

Rotor mit relativwinkelproportionalen Flügelbreite wird aus den zwei asymmetrischen Einzelrotoren gebildet, die übereinander gelegt werden. In der Nulllage ( $\varphi_{rel} = 0$ ) ergeben sich Flügelbreiten von  $32.5^\circ$  und  $52.5^\circ$  (vgl. Abbildung 5.4). Die zugehörige

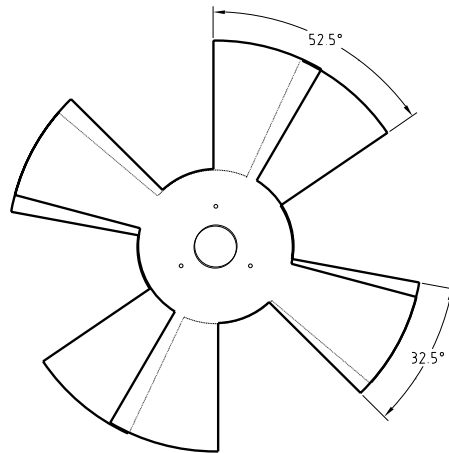


Abbildung 5.4: Resultierender Rotor zur Vierflügelstruktur für  $\varphi_{rel} = 0$

Sendefläche hat 32 Sendersegmente mit je  $11.25^\circ$  breiten Segmenten, wobei zwei gegenüberliegende Segmente elektrisch zu einem zusammengefaßt werden, wodurch sich wieder nur 16 Segmentwerte ergeben. Durch die Verdopplung der Segmente halbiert sich der Absolutwinkelmeßbereich auf  $180^\circ$  und der Relativwinkelmeßbereich auf  $\pm 7.5^\circ$  bei einer Erhöhung der Messgenauigkeit. Neben der Meßgenauigkeitserhöhung hat die Struktur auch den Vorteil, daß sie gegenüber einem radialen Rotorversatz unempfindlicher ist (vgl. Kapitel 8.1.1). Bei den Meßergebnissen die in Kapitel 8 dargestellt sind, macht sich dies im Wegfall des sinusförmigen Verlaufes der Meßabweichung bemerkbar.

### 5.3 Inverse Vierflügelstruktur

Diese Struktur ist invers zur Vierflügelstruktur (Kapitel 5.2). Invers bedeutet in diesem Zusammenhang, daß im Gegensatz zur Vierflügelstruktur die Flügelbreiten der resultierenden Rotorflügel konstant bleiben, während bei der Vierflügelstruktur immer die Öffnungswinkel zwischen den Flügeln konstant bleiben. Die beiden Rotoren haben zwei exakt gegenüberliegende  $45^\circ$  Flügel (vgl. Abbildung 5.5). Der resultierende Rotor

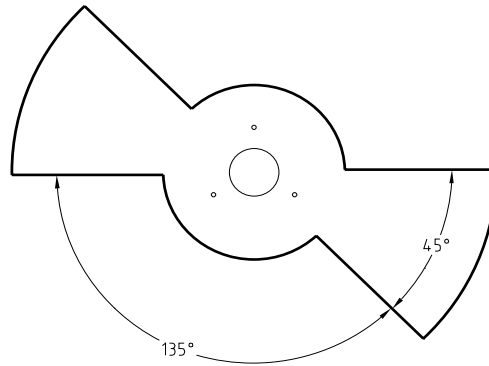


Abbildung 5.5: Rotor zur inversen Vierflügelstruktur

hat wieder vier Flügel, wobei hier die Flügel der Einzelrotoren keine Überlagerung erfahren. In der Nulllage ( $\varphi_{rel} = 0$ ) ergeben sich Zentriwinkel zwischen den Flügeln von  $32.5^\circ$  und  $52.5^\circ$ , vergleichbar mit den Flügelzentriwinkel bei der Vierflügelstruktur aus Kapitel 5.2 (vgl. Abbildung 5.6). Sendeelektrode und Meßbereich sind äquivalent zur

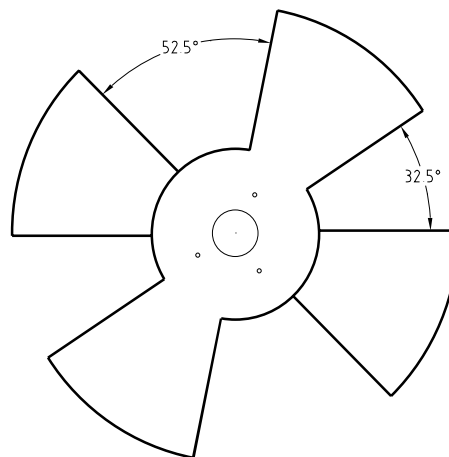


Abbildung 5.6: Resultierender Rotor zur inversen Vierflügelstruktur für  $\varphi_{rel} = 0$

Vierflügelstruktur. Diese Flügelstruktur hat aber den Vorteil einer besseren mechanischen Robustheit einfacheren Fertigung, da jeder Rotor im Gegensatz zur Vierflügelstruktur nur zwei, dafür breitere Flügel hat. Bezüglich der Meßgenauigkeit läßt sich nur eine geringfügiger Unterschied erwarten, was, wie in Kapitel 8 beschrieben, mit der unterschiedlichen Bildung der maximalen und minimalen Segmentwerte je nach konstanter Abschattung oder Freigabe von Segmenten in Zusammenhang steht.

# Kapitel 6

## Simulation - Einfluß der Streufelder

### 6.1 Abhängigkeit der Kapazitätsverläufe von Geometrieparametern - Simulation

In den bisherigen Kapiteln wurde die Streufeldproblematik nur insoweit erwähnt, als daß sie eine Verkleinerung des linearen Bereiches bewirkt. Bei den hier gegebenen Geometrieverhältnissen ist der Einfluß der Streufelder keinesfalls zu vernachlässigen.

In [JNG94] ist der Einfluß der Streufelder eines Segmentes auf den Nachbarbereich dargestellt. Dabei wird angegeben, daß der Kapazitätsbelag  $C'$  exponentiell mit dem Faktor  $\exp(-\frac{\pi\Delta x}{d})$  abnimmt, wobei  $\Delta x$  der Abstand von der Segmentkante und  $d$  der Abstand zwischen Sender- und Empfangsfläche sind. Für ein Längenverhältnis von  $\frac{\Delta x}{d} \geq 5$  wird dieser Faktor kleiner gleich 0.15 ppm und der Einfluß kann als vernachlässigbar betrachtet werden. Umgelegt auf die hier zugrundegelegte Geometrie würde das einen nicht realisierten Abstand zum Nachbarsegment von  $5d = 30$  mm bedeuten.

Bei Versuchsmessungen zeigte sich, daß die Genauigkeit der Messungen deutlich von diversen Geometrieparametern, wie zum Beispiel Rotorverkipfung, radialem Rotorversatz und dem Abstand zwischen Sender- und Empfangsfläche, abhängen. Um diese Abhängigkeit der Kapazitätsverläufe von diversen Geometrieparametern unter Berücksichtigung der Streufelder abschätzen zu können, wird in [CER99] eine Feldsimulation vorgestellt. Das Konzept dieser Simulation und deren Anwendung soll an dieser Stelle kurz erläutert werden, um die im Kapitel 6.2 beschriebenen Simulation - Einfluß einer Rotorverkipfung - verständlich zu machen.

Die Simulation basiert auf der Linearität elektrischer Felder (Superpositionsprinzip) vgl. [PRE94]:

Eine Ladungsverteilung im leeren Raum erzeugt an einem Punkt  $\mathcal{P}$  im Raum ein elektrisches Feld der elektrischen Feldstärke  $\vec{E}_a(\mathcal{P})$  und eine andere Ladungsverteilung bewirkt für sich alleine im selben Punkt  $\mathcal{P}$  eine elektrische Feldstärke  $\vec{E}_b(\mathcal{P})$ . Dann bewirken die Ladungsverteilungen gemeinsam im Punkt  $\mathcal{P}$  die elektrische Feldstärke  $\vec{E}_{ges}(\mathcal{P}) = \vec{E}_a(\mathcal{P}) + \vec{E}_b(\mathcal{P})$ , vorausgesetzt die Ladungsverteilungen werden durch die



Überlagerung nicht verändert (z. B. durch Influenz).

Die Elektrodenstruktur des Sensors wird für die Simulation wieder auf eine Plattenstruktur (Abwicklungsdarstellung, mit über der Tiefe  $a$  konstanter Breite  $x_S$ ) umgelegt (vgl. Abwicklungsdarstellung Abbildung 3.8 Kapitel 3.2.3). Die Sendefläche jedes Sendesegementes und der resultierende Rotor werden in schmale streifenförmige Einzelplatten der Breite  $x_S/m$  zerlegt, wobei  $m$  die Anzahl der Einzelplatten, im folgenden Streifen genannt, pro Segmentbreite  $x_S$  ist.

Das elektrische Feld mit der elektrischen Feldstärke  $E_y$  in y-Richtung im Aufpunkt  $\mathcal{P}$ , das von einem mit der gleichverteilten Ladung beaufschlagten Streifen herrührt, kann durch folgende Gleichung

$$E_y = \frac{Q_i}{4\pi\epsilon_0 \frac{x_S}{m} a} \left[ \arctan \left( \frac{\frac{x_S}{2m} - x - x_M}{y - h} \right) - \arctan \left( \frac{-\frac{x_S}{2m} - x - x_M}{y - h} \right) \right] = Q_i f(x, y, x_M, x_S, h) \quad (6.1)$$

beschrieben werden, wobei der Streifen  $x_S/m$  breit,  $a$  tief und mit der gleichverteilten Ladung  $Q_i$  beaufschlagt ist. Die Gleichung 6.1 geht vereinfachend von einer unendlich langen Linienladung aus (Herleitung siehe [CER99]). Der Streifen befindet sich in einem Abstand  $h$  über der x-Achse und hat einen Mittelabstand  $x_M$  von der y-Achse, vgl. Abbildung 6.1. Die einer Raumkurve  $\mathcal{C}$  zugeordnete Spannung  $U(\mathcal{C})$  wird als Integral

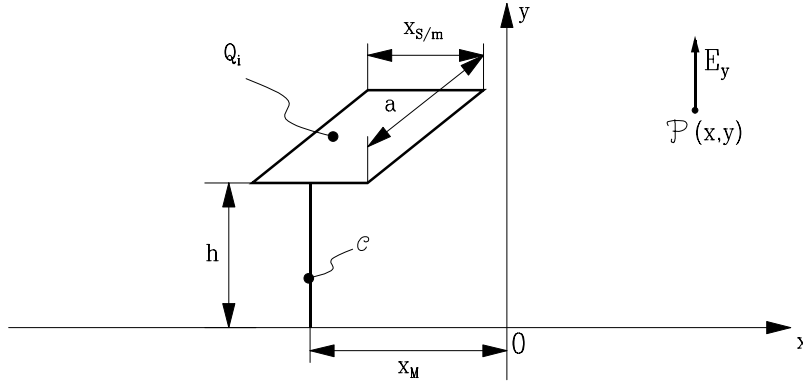


Abbildung 6.1: Felderzeugende Platte mit gleichverteilter Ladung  $Q_i$

der elektrischen Feldstärke dargestellt (vgl. Gleichung 6.2), wobei diese Raumkurve  $\mathcal{C}$  zwei im Raum liegende Punkte verbindet und im hier vorausgesetzten elektrostatischen Fall beliebig gewählt werden kann, ohne daß sich die ihr zugeordnete Spannung  $U(\mathcal{C})$  ändert. Vom elektrostatischen Fall spricht man, wenn sich im betrachteten Raum die Verteilung der elektrischen Ladung mit der Zeit nicht ändert und keine zeitlich veränderlichen Magnetfelder vorkommen (vgl. [PRE94]). Es gilt  $\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0$ , wobei  $\vec{B}$  die magnetische Flußdichte ist. Treffen diese Voraussetzungen nur näherungsweise zu, so spricht man vom quasielektrostatischen Fall.

$$U(\mathcal{C}) = \int_{\mathcal{C}} \vec{E} \cdot d\vec{s} \quad (6.2)$$

Für die in Abbildung 6.1 angenommenen Anordnung und dem dort gewählten Integrationsweg  $\mathcal{C}$ , läßt sich die Spannung  $U(\mathcal{C})$  durch

$$U(\mathcal{C}) = \int_0^h E_y dy = Q_i \int_0^h f(x, y, x_M, x_S, h) dy = Q_i g_i \quad (6.3)$$

berechnen, wobei die elektrische Feldstärke  $E_y$  durch Gleichung 6.1 zu berechnen ist. Die Spannung ist also von der Ladung  $Q_i$  und einem geometrieabhängigen Faktor  $g_i$  abhängig.

Die resultierende Plattenstruktur (vgl. Abbildung 6.2) besteht aus 8 Streifen (Breite  $x_S/m = x_S/8$ ) für ein Sendersegment und je 32 Streifen für einen Rotorflügel. Die geerdete Empfangsfläche (0V-Fläche in der xz-Ebene) wird nicht als Anordnung von Streifen auf dem Potential 0V gebildet, sondern wird durch Anwendung der Spiegelungsmethode (vgl. [PRE94]) modelliert. Das heißt, die Plattenstruktur wird durch eine Spiegelung an der x-Achse erweitert, wobei die gespiegelten Platten die gleiche Ladungsverteilung aber mit entgegengesetztem Vorzeichen haben. Für die Senderplatten wird ein Potential von 1V und für die Rotorplatten ein Potential von 0V angenommen. Der Integrationsweg  $\mathcal{C}$  zur Spannungsermittlung wird vom Ursprung 0 in y-Richtung in der Mitte zwischen den 8 Streifen des Sendesegementes gewählt (vgl. Abbildung 6.2).

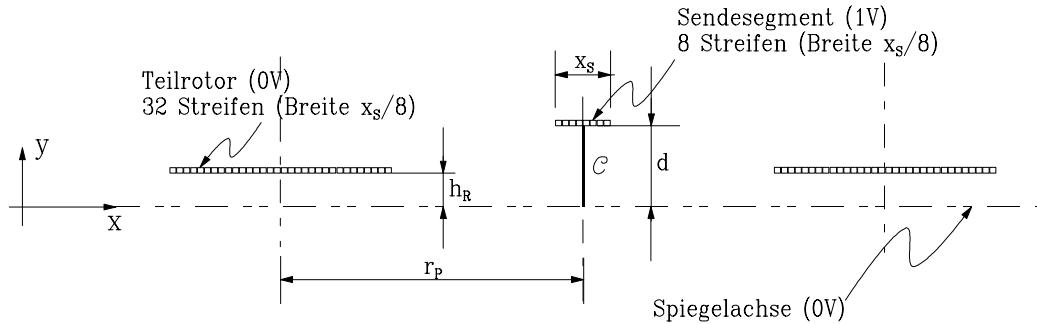


Abbildung 6.2: Plattenmodell der Sender-/Rotorstruktur für die Simulation des Einflusses von diversen Geometrieparametern auf die Abweichungen bei der Relativwinkel- und Absolutwinkelbestimmung

Das beschriebene, elektrostatische Feldproblem mit bekannten Geometrie- und Potentialverhältnissen ist vergleichbar mit dem Problem des Mehrleitersystems in [HOF82]. Die Potentiale der einzelnen Streifen (Leiterelemente) sind bekannt und es sind die unbekannten Ladungen  $Q_i$  zu bestimmen, die den bekannt gedachten Potentialen bzw. Potentialdifferenzen genügen. Durch konsequente Anwendung des Überlagerungsprinzips läßt sich ein lineares Gleichungssystem aufstellen, daß den Zusammenhang zwischen den unbekannten Ladungen  $Q_i$  und den bekannten Potentialen ausdrückt. Die geometrieabhängigen Koeffizienten des Gleichungssystems, laut [HOF82] Kapazitätskoeffizienten genannt, werden durch Auswertung des Integrals in 6.3 numerisch bestimmt. Sind die Ladungen  $Q_i$  bestimmt, können dann die Kapazitäten  $C_S$  bzw.  $C_R$  zwischen Senderfläche bzw. Rotorfläche und der Empfangsfläche berechnet werden. Zur numerischen Lösung wurden in MatLab die folgenden Funktionen und Prozeduren entwickelt (Software von Stefan Cermak vgl. [CER99]<sup>1</sup>).

<sup>1</sup>Die Beschreibung der Funktionen `U_Platte`, `BerechneCse` und der Prozedur `Rotordrehen` sind in [CER99] dokumentiert. Die zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit aktuellen Quelltexte der einzelnen Funktionen sind im Anhang zu finden.

### 6.1.1 Spannungsberechnung - U\_Platte.m

U\_Platte ist eine für MatLab geschriebene Funktion, die für eine Anordnung, wie sie in Abbildung 6.1 dargestellt ist, die Spannung  $U(c)$  entlang der Kurve  $c$  berechnet. Der Aufruf dieser Funktion in MatLab erfolgt durch:

```
[U] = U_Platte(breit, hoch, tief, mitte, Q, x, y)
```

Als Parameter werden die Streifenbreite  $x_S/m = \text{breit}$ , der Abstand von der x-Achse  $h = \text{hoch}$ , die Plattentiefe  $a = \text{tief}$ , der Abstand von der y-Achse  $x_M = \text{mitte}$ , die Ladung  $Q = Q$  und die Punktkoordinaten  $x = x$ ,  $y = y$  angegeben.

### 6.1.2 Kapazitätsberechnung - Berechnecse.m

In Berechnecse ist das in Kapitel 6.1 beschriebene Plattenmodell (vgl. Abbildung 6.2) abgesetzt. Die Funktionsaufruf lautet: `[Cs, Cr] = Berechnecse(rp, rotorhoch)`

Die Funktion berechnet die Kapazität  $C_S$  der Sendeplatte, bestehend aus den 8 Streifen, und die Kapazität  $C_R$  des Rotors, bestehend aus den 2x32 Streifen, gegen die in der x-Achse gedachte Empfangsfläche und gibt sie als Liste `[Cs, Cr]` zurück. Die Rotorposition `rp` bezogen auf die Sendefläche und der Rotorabstand von der x-Achse  $h_{\text{Rotor}} = \text{rotorhoch}$  werden der Funktion als Parameter übergeben.

Durch Adaption der Funktion **Berechnecse** können die Kapazitäten unter Variation verschiedenster Geometrieparameter (Rotorabstände, Segmentbreiten, Rotorbreiten usw.) bzw. auch Kapazitäten für andere Sender/Rotoranordnungen berechnet werden (vgl. Kapitel 6.2). Erhöht man die Anzahl der Streifen kann die Simulationsgenauigkeit erhöht werden, was allerdings eine erhebliche Verlängerung der Simulationszeit zur Folge hat. Die Unterteilung auf Streifen der Breite  $x_S/8$  stellt einen Kompromiß zwischen Genauigkeit und Zeitaufwand dar.

### 6.1.3 Variation der Rotorposition - Rotordrehen.m

Wird der Rotor unter der Sendeplatte, durch Variation der Rotorposition `rp`, hindurchbewegt und für hinreichend viele Rotorpositionen (80 Simulationspunkte gewählt) die Kapazitäten berechnet, so erhält man den gesuchten Kapazitätsverlauf. Die MatLab-Prozedur **Rotordrehen** führt durch Aufruf der Funktion **Berechnecse** mit sich variierender Rotorposition die Berechnung des Kapazitätsverlaufes durch und gibt diesen grafisch aus. Ergebnisse der mit der Funktion **Rotordrehen** durchgeführten Simulation sind in [CER99] ausführlich dargestellt. Als Beispiel zeigt Abbildung 6.3 das Ergebnis einer Simulation mit folgenden Parametern:

- Vierflügelstruktur ( $180^\circ$  Absolutmeßbereich), Segmentteilung  $11.25^\circ$
- Simulationsmodell lt. Abbildung 6.2
- Abstand zwischen Sender- und Empfangsfläche  $d = 6mm$
- Abstand zwischen Rotor und Empfangsfläche  $h_R = 5mm$

Der Bereich der Segmentabschattung (Minima bei  $45^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $225^\circ$  und  $315^\circ$ ) erscheint abgeflachter als der Bereich der Segmentfreigabe (Maxima bei  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $270^\circ$ ). Bei den gemessenen Segmentverläufen (Abbildungen 8.15, 8.22 und 8.8) zeigt sich dieser Effekt ebenfalls. Die Breite der Minimal- und Maximalbereiche ist beim simulierten Segmentverlauf im Vergleich zu den gemessenen nicht unterschiedlich, da von einem symmetrischen, resultierenden Rotor ausgegangen wird.

Die unterschiedlichen Abschattungs- bzw. Freigabefeldverläufe sind darin begründet, daß der als Feldsenke wirkende Rotor, wenn dieser sich direkt unter dem Sendesegment (Quelle) befindet beinahe alle Feldlinien auf sich ziehen kann und nur einige Streufeldlinien zum Empfänger gelangen. Wird der Rotor vom Sendesegment wegbewegt, so wird seine Senkenwirkung nicht aufgehoben und er zieht weiterhin einen Teil der Feldlinien an sich, da die Distanz zwischen Sendersegment und Rotorkante kleiner ist als die Distanz zwischen Sendersegment und Empfänger ist. Das heißt, der Rotor hat einen weiteren Wirkungsbereich als in der linearen Theorie angenommen.

Für die Bildung der Maximalwerte  $y_{messmax}$  bedeuten die das, daß diese im Vergleich zu den Minimalwerten  $y_{messmin}$  größeren Meßabweichungen unterliegen. Bei der Messung wird innerhalb einer Segmentteilung ( $11.25^\circ$ ) der Maximalwert bzw. Minimalwert bestimmt, da dieser Bereich aber nicht immer exakt mit den Maximal- bzw. Minimalbereichen zusammenfällt, ergibt sich aufgrund der stärkeren Krümmung im Maximalbereich dort eine größere Unsicherheit bei der Maximalwertbestimmung. Beim Vergleich der Vierflügelstruktur mit der inversen Vierflügelstruktur im Kapitel 8 wird auf diesen Unterschied noch einmal eingegangen.

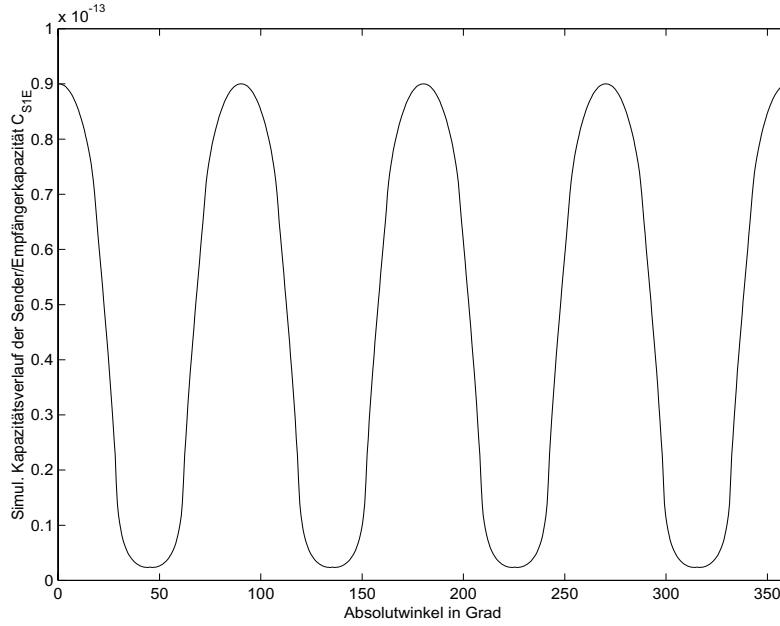


Abbildung 6.3: Simulierter Kapazitätsverlauf der Sender/Empfängerkapazität  $C_{S1E}$  einer Vierflügelstruktur ( $180^\circ$  Absolutwinkelmeßbereich, Kapazität  $C_{S1E}$  über Rotorposition von  $0$  bis  $360^\circ$ , Sender-Empfängerdistanz  $6$  mm, Rotor  $1$ mm Abstand vom Sender), Minimaverlauf abgeflacht im Vergleich zu Maximaverlauf

## 6.2 Simulation - Einfluß einer Rotorverkipfung

Aufbauend auf der in Kapitel 6.1 vorgestellten Simulation, soll hier der Einfluß einer Rotorverkipfung des Zweiflügelrotors (vgl. Kapitel 5.1) auf die Messung des Relativwinkels  $\varphi_{rel}$  untersucht werden, wobei von den folgenden Modellvorstellungen ausgegangen wird:

Steht der Rotor schräg zwischen Sender- und Empfangsfläche, so hat dies zur Folge, daß ein Rotorflügel näher bei der Sendefläche und der andere näher bei der Empfangsfläche ist. Aufgrund der Streufelder wird der Rotor elektrisch unterschiedlich breit erscheinen. Da aber bei der Relativwinkelbestimmung die Rotorbreite die entscheidende Meßgröße ist, erfährt diese durch die Rotorverkipfung eine Meßabweichung. Für die Absolutwinkelbestimmung bewirkt die verkipfungsbedingte Veränderung der Rotorbreite keine zusätzliche Meßabweichung, da diese Veränderung symmetrischen bezogen auf den Flächenschwerpunkt des Rotorflügels ist und bei der Absolutwinkelbestimmung dieser Flächenschwerpunkt gesucht wird.

Um diese Abweichung simulieren zu können, wurde die folgende Plattenstruktur angenommen:

Die Senderelektrode  $S$  befindet sich in der Höhe  $d$  über der Empfangselektrode  $E$  und hat eine Breite von  $8x_S$  (entspricht einem Winkel von  $180^\circ$ ). Die Rotorplatte, die einen

Rotorflügel mit einer Flügelbreite von  $4x_S$  (entspricht einem Winkel von  $90^\circ$ ) hat, befindet sich in der Höhe  $h_R$  zwischen Sender- und Empfangselektrode (vgl. Abbildung 6.4). Sowohl Rotorflügel als auch Senderelektrode  $S$  werden wieder in  $x_S/8$  breite Streifen unterteilt (vgl. Modell in Kapitel 6.1). In der MatLab Funktion `Cse_Verkippung` ist

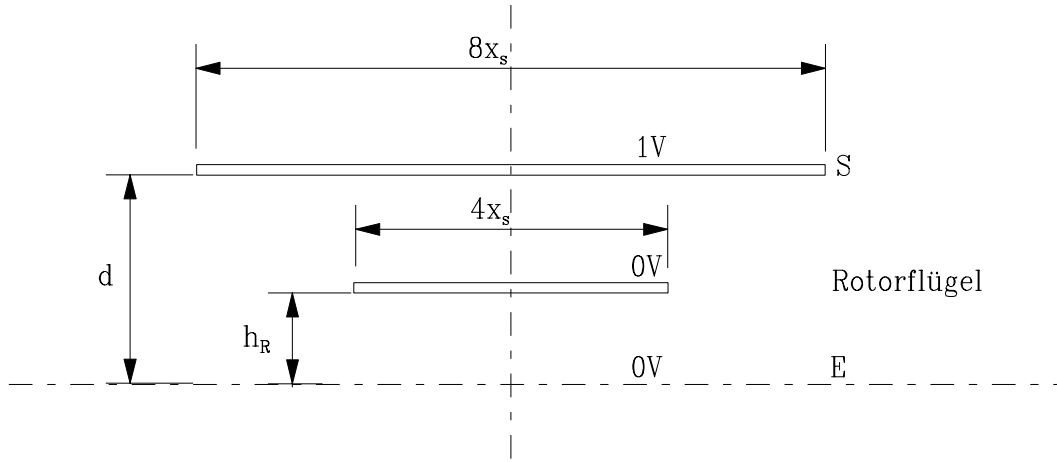


Abbildung 6.4: Plattenmodell für Verkippsimulation

dieses Modell abgesetzt und kann durch

```
[Cse]=Cse_Verkippung(Segmentbreite,Senderhoch,Sendertief,
    Senderfinitanzahl,Rotorhoch,Rotorfinitanzahl,Intpunkte)
```

aufgerufen werden. Wobei die Angabe der folgenden Parameter nötig ist:

- **Segmentbreite** ... Breite  $x_S$  eines Segmentes
- **Senderhoch** ... Abstand  $d$  zwischen Sender- und Empfängerlektrode
- **Sendertief** ... Tiefe  $a$  eines Sendersegmentes
- **Senderfinitzahl** ... Zahl der Streifen, die die Senderelektrode repräsentieren
- **Rotorhoch** ... Abstand  $h_R$  zwischen Rotorflügel und Empfangselektrode
- **Rotorfinitzahl** ... Zahl der Streifen, die den Rotorflügel repräsentieren
- **intpunkte** ... Zahl der Integrationspunkte für die numerische Integration in der Funktion `U_Platte`.

Als Ausgabe liefert die Funktion die Kapazität  $C_{SE}$  zwischen Sende- und Empfangsfläche.

Die Funktion `Csemax` wird durch

```
[Cse]=Csemax(Segmentbreite,Senderhoch,Sendertief,Senderfinitanzahl,Intpunkte);
```

aufgerufen und berechnet die Kapazität  $C_{SEmax}$  bei fehlen des Rotors. Die Übergabeparameter entsprechen denen der Funktion `Cse_Verkippung` nur ohne Rotordaten.

Mithilfe der Funktion `VarRotorhoch` wird die Kapazität  $C_{SE}$  zwischen Sender und Empfänger für alle möglichen Rotorhöhen  $h_R$  berechnet, der Rotor wird dabei in 200 Schritten von der Empfangs- zur Senderplatte bewegt. Der Aufruf der Funktion erfolgt durch `VarRotorhoch`. Als Ergebnis erhält man die in Abbildung 6.5 dargestellte, Abhängigkeit der Kapazität  $C_{SE}(h_R)$  von der Rotorhöhe  $h_R$ . Als Simulationsparameter

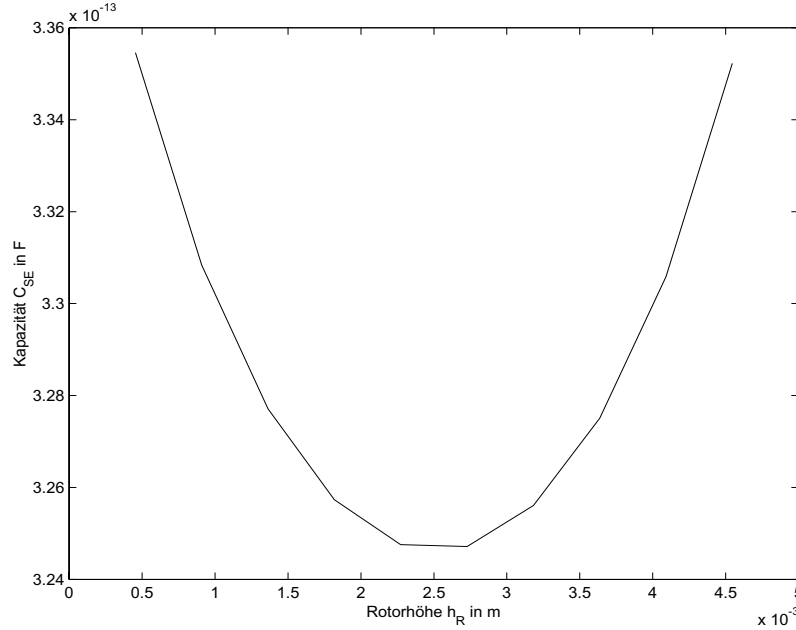


Abbildung 6.5: Sender-Empfängerkapazität  $C_{SE}(h_R)$  in Abhängigkeit von der Rotorhöhe  $h_R$

wurden die folgenden Werte verwendet:

- Segmentbreite  $x_S = 6$  mm
- Segmenttiefe  $a = 10$  mm
- Abstand zwischen Sender und Empfänger  $d = 5$  mm
- Integrationspunkte bei Spannungsberechnung `Intpunkt` = 100
- Zahl der Streifen des Senders `Senderfinitanzahl` = 64
- Zahl der Streifen des Rotors `Rotorfinitanzahl` = 32
- Höhenvariationschritte: 200

Um nun den durch diese Abhängigkeit bedingte Abweichung bei der Relativwinkelbestimmung zu errechnen, geht man von folgender Überlegung aus: Wird der Rotor in der Höhe  $h_{R0}$  über der Empfangselektrode platziert und dann an den Flügelrändern um  $\Delta h$  verschoben, so ergibt sich für den einen Rotorflügel eine Höhe  $h_{R1} = h_{R0} + \Delta h_R$

und für den zweiten Rotorflügel die Höhe  $h_{R2} = h_{R0} - \Delta h_R$ . Wendet man die ratiometrische Auswerteformel 3.5 an und setzt den Maximalwert  $y_{messmax} = C_{SEmax}$ , den Minimalwert  $y_{messmin} = 0$ , den Messwert  $y_{messplus} = C_{SE}(h_{R1})$  und den Messwert  $y_{messminus} = C_{SE}(h_{R2})$ , so ergibt sich die Abweichung im Relativwinkel  $\Delta\varphi_{rel}$  aus

$$\Delta\varphi_{rel} = \frac{C_{SE}(h_{R1}) - C_{SE}(h_{R2})}{C_{SEmax}} \cdot 90^\circ$$

Aufgrund der annähernd quadratischen Abhängigkeit der Kapazität  $C_{SE}$  von  $h_R$  wird die Relativwinkelabweichung für  $h_{R0} \rightarrow d/2$  ein Minimum.

Der Vergleich zwischen simuliertem und gemessenen Relativwinkelabweichungen  $\Delta\varphi_{rel}$  wird in Kapitel 8.4.1 gezeigt.



# Kapitel 7

## Hilfsmittel zur Auswertung der Sensordaten

Zur Vermessung der Sensoren wurde der in [WAN99] beschriebene Prüfstand verwendet. Der Prüfstand ist über eine serielle Schnittstelle (RS232) mit einem Auswerte-PC (PC1 aus Abbildung 4.1) verbunden. Mit Hilfe des in [CER99] beschriebenen Programmes **Project1** ist eine teilautomatisierte Vermessung der Sensoren möglich. Das Programm besteht aus einer Benutzerschnittstelle, einer seriellen Ein- und Ausgabe und einem DynamicDataExchange-Server (DDE-Server). Die Einstellung der Relativverdrehung oder eines anderen mechanischen Parameters erfolgt manuell, während die Absolutwinkelvariation automatisch abläuft. Der DDE-Server stellt dabei die Schnittstelle zwischen PC und Prüfstand dar, und kann von jedem Programm, das DDE unterstützt, verwendet werden. Bei diesem Projekt wurde die umfangreiche Mathematik- und Simulationssoftware MatLab<sup>1</sup> verwendet, da es neben der DDE-Unterstützung, wegen seiner integrierten Matrixoperationen auch eine einfache Nachbildung der Meßalgorithmen gestattet. Beispielsweise ist zur Absetzung des Grobalgorithmus (Vergleich Segmentwerte mit Nulllagenwerten  $H(i)$ ) bereits eine Vergleichsoperation vorhanden (vgl. Quelltext der MatLab-Funktion **rough** im Anhang C.3.4).

Die Absetzung der Algorithmen im Programm MatLab soll dazu dienen, daß die im Sensor implementierten Algorithmen und Kalibrierungsroutinen auch unabhängig vom Sensor getestet werden können. Dazu werden bei der Vermessung der Sensoren nicht nur die berechneten Absolutwinkel- und Relativwinkelwerte ausgelesen, sondern auch die zugehörigen Segmentwerte erfaßt. Mit diesem Satz von Segmentwerten ist es dann möglich, verschiedene Algorithmen zu testen, ohne die Sensorsoftware (vgl. [CER99]) ändern zu müssen.

### 7.1 DDE-Schnittstelle in Matlab

DDE ist eine für Microsoft Windows <sup>2</sup> (NT, 95, 98) definierte Schnittstelle zum Austausch von Daten bzw. zur Steuerung von Anwendungen über Macros. DDE baut auf eine Server/Client-Struktur auf, bei der der Server dem Client Daten zur Verfügung

---

<sup>1</sup>MatLab Version 5.2 by The Math Works, Inc.

<sup>2</sup>Windows NT, Windows 95, Windows98, EXCEL sind Produkte der Microsoft Cooperation

stellt. Je nach Anwendung kann diese als Server, Client oder beides dienen. Für DDE sind drei wesentliche Komponenten notwendig:

1. Anwendung - Windows Programm mit dem kommuniziert wird, beispielsweise Microsoft EXCEL. In dem hier betrachteten Fall ist die Anwendung das Programm **projekt1** (vgl. [CER99]).
2. Thema - Das Thema ist der Gegenstand der DDE-Kommunikation, beispielsweise ein Microsoft EXCEL-File: **tabelle1.xls**. Beim Programm **projekt1** ist das Thema ein Objekt mit Namen **Messplatz**.
3. Elemente - Das Thema enthält Elemente mit den zur Verfügung stehenden Daten, beispielsweise eine Zelle in einer Microsoft EXCEL-Tabelle. Im Objekt **Messplatz** sind diese Elemente der Referenzwinkelsensor, der Schrittmotor und der zu messende Sensor.

Um unter Matlab eine DDE-Kommunikation aufbauen und damit arbeiten zu können, stellt MatLab verschiedene DDE-Befehle zur Verfügung. Im Anhang findet sich eine Kurzbeschreibung der wichtigsten DDE-Befehle.

## 7.2 MatLab-Funktion zur Sensormessung

Für die halbautomatische Vermessung der Sensoren wurden im Rahmen dieser Arbeit drei MatLab-Funktionen entwickelt.

1. Die Meßroutine **mess\_ms** (vgl. Kapitel 7.2.1) wird nach jeder Änderung eines Sensorparameters (hier die manuelle Verstellung des Relativwinkels) mit einem neuen Indexwert (**stepnr**) aufgerufen und speichert die Meßdaten (Offset, Absolutwinkel, Relativwinkel, Segmentwert) in eine vordefinierte Datenstruktur.
2. Die Funktion **seg\_ms** (vgl. Kapitel 7.2.2) berechnet mit den in MatLab abgesetzten Algorithmen aus den gemessenen Segmentwerten Offset, Absolutwinkel und Relativwinkel und übergibt sie in eine neue Datenstruktur.
3. Mit der Funktion **plot\_ms** können die in der Datenstruktur gespeicherten Sensordaten grafisch ausgewertet werden (vgl. Kapitel 7.2.3).

### 7.2.1 Meßroutine - **mess\_ms.m**

Mit der Meßroutine **mess\_ms** wird zur Windows-Anwendung **Projekt1** eine Verbindung via DDE aufgebaut, um über diese den Meßplatz für die halbautomatische Sensormessung anzusprechen (vgl. Kapitel 7.1). Bevor die Meßroutine **mess\_ms** in MatLab ablaufen kann, muß das Programm **Project1** (vgl. [CER99]) gestartet und die folgenden Einstellungen über das Eingabefenster (siehe Abbildung 7.1) vorgenommen werden:

- Öffnen der Seriellen Schnittstelle
- Einstellen der Übertragungsrate: 19600 Baud

- Wahl des Startbefehles: (Einzelmessung, Startbefehl: 2)
- Wahl des Datenformates: Festlegung, wie der vom Sensor seriell gelieferte Datenstrom interpretiert wird. Für die kombinierte Messung von Sensordaten und 16 Segmentwerten, muß folgendes Datenformat eingegeben werden:
  1. Grobwinkel=Segmentoffset (1 unsigned byte = u1)
  2. Absolutwinkel (3 signed byte = s3)
  3. Relativwinkel (3 signed byte = s3)
  4. 16 Segmentwerte (16 unsigned byte = u2)
- Angabe der Position des Absolutwinkelwertes innerhalb des seriellen Datenstromes: Phi ist Meßwert Nummer 2
- Angabe des Umrechnungsfaktors zwischen dem eingelesenen Integerwerte und dem Winkel in Grad:  $Phi = \frac{Meßwert}{1000} + 0$
- Einstellen des Absolutwinkelvoransichtsbereiches: Minimumwinkel 0°, Maximumwinkel 180°
- Aufrufen der Kalibrierung (Referenzwinkel 0° = Sensorwinkel 0°)

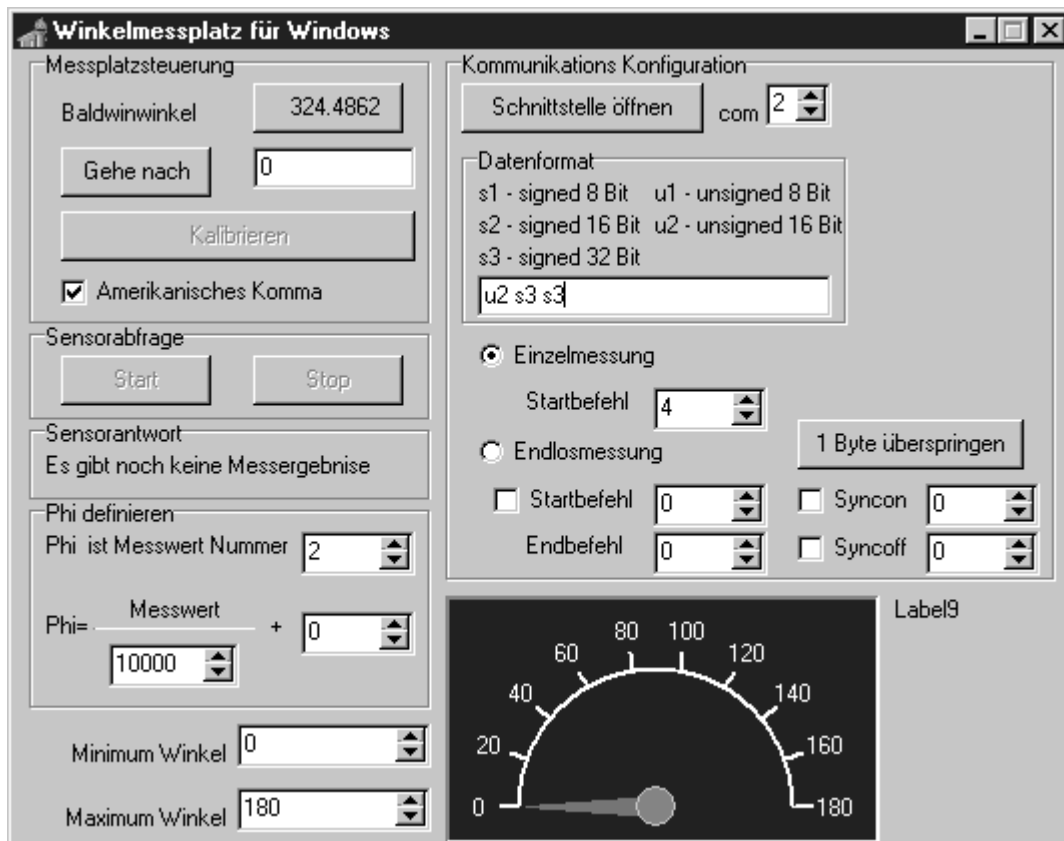
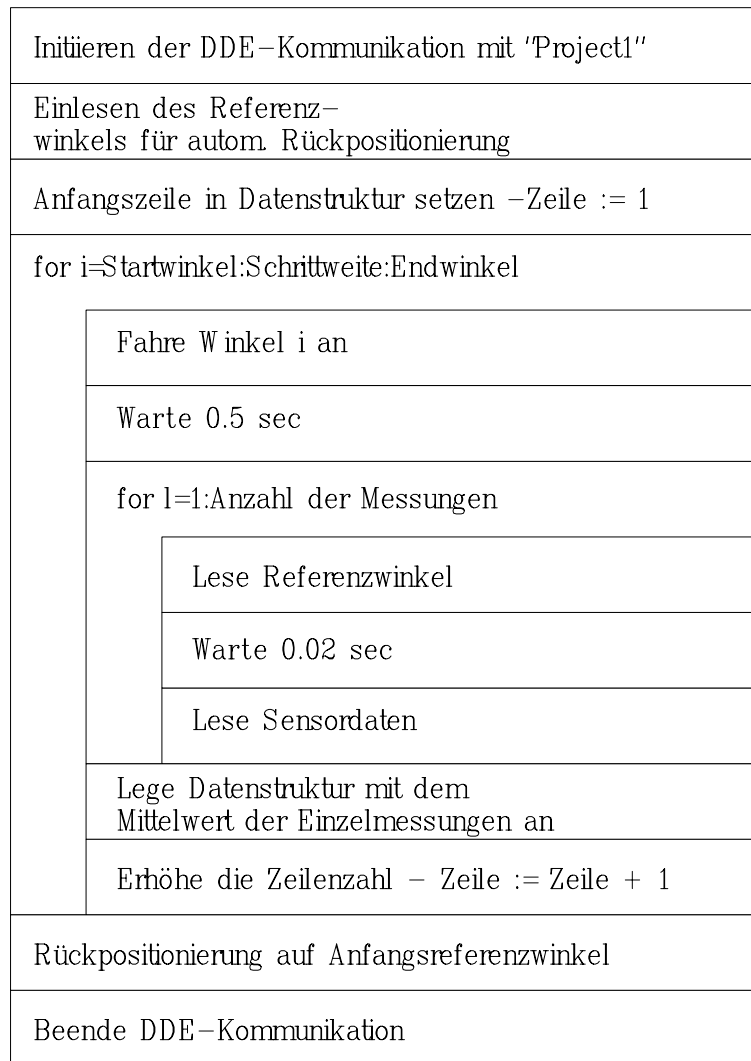


Abbildung 7.1: Project1-Eingabefenster (lt. [CER99])

Der Aufbau der Funktion `mess_ms` kann dem zugehörigen Struktogramm (vgl. Abbildung 7.2) entnommen werden. Aufruf-, Parameterbeschreibung und das Programmlisting befinden sich im Anhang.

Abbildung 7.2: Struktogramm zur MatLab-Funktion `mess_ms`

## 7.2.2 Auswertung der Segmentwerte - `seg_ms.m`

Die durch Kapitel 3 beschriebenen Algorithmen, zur Grobbestimmung der Rotorlage und der anschließenden ratiometrischen Bestimmung des Absolut- und Relativwinkels, sind in MatLab abgesetzt. Zur besseren Übersichtlichkeit und Strukturierung ist die Segmentauswertesoftware in Anlehnung an die Erklärungen in Kapitel 3.2.3 in folgende Teilprogramme aufgespalten, die dann vom Hauptprogramm `seg_ms` aufgerufen werden.

### 7.2.2.1 `evaloffset.m`

Die durch `data=evaloffset(data,matched,typ)` aufgerufene Funktion bestimmt aus den in der Datenstruktur gespeicherten Segmentwerten den Segmentoffset unter Verwendung der Funktion `rough`. Der Name der zu übergebenen Datenstruktur wird im Parameter `data`, die Liste mit den Nulllagensegmentwerte  $H(i)$  wird im Vektor `matched` (vgl. Kapitel 3.2.3.3) und die Anzahl der Segmentwerte (16 bzw. 32) mit der Variablen `typ` übergeben. Als Ergebnis liefert die Funktion die übergebene Datenstruktur `data`

zurück und fügt einen Datensatz `data.offset` mit den entsprechenden Offsetwerten hinzu. Das Programmlisting befindet sich im Anhang.

#### 7.2.2.2 `rough.m`

Um aus einem Satz von 16 Segmentwerten die ungefähre Rotorlage bestimmen zu können, werden die 16 Segmentwerte mithilfe der Korrelationsfunktion mit den Nulllagensegmentwerten  $H(i)$  (vgl. Kapitel 3.2.3.3) verglichen und der Segmentindex, bei dem diese Funktion ein Maximum wird, als Segmentoffset  $j$  zurückgegeben.

`offset=rough(c,matched,typ)` ruft die Funktion auf, die diesen Vergleich durchführt. Der Vektor `c` ist dabei eine Liste mit den 16 Segmentwerten. Die Nulllagensegmentwerten  $H(i)$  werden im Vektor `matched` und die Anzahl der Segmentwerte (16 bzw. 32) in der Variable `typ` übergeben.

Die Liste mit den Nulllagenwerten  $H(i)$  ist für die in dieser Arbeit verglichenen Elektrodenstrukturen immer gleich. Das Programmlisting befindet sich im Anhang.

Wie die Liste  $H(i)$  mit den normierten Nulllagensegmentwerten zustandekommt und warum diese Liste prinzipiell für alle drei vorgestellten Rotorstrukturen verwendet werden kann, soll hier noch kurz erklärt werden:

Legt man die in Kapitel 5.1 beschriebene Struktur für die Nulllage Relativwinkel  $\varphi_{rel} = 0$  (vgl. Abbildung 5.2) über die Senderelektrode mit 16 Segmenten, sodaß eine Rotorkante mit einer Segmentkante genau abschließt, dann lassen sich verdeckte und freie Segmente erkennen. Die Segmente werden im Uhrzeigersinn bewertet und es wird jedem verdeckten Segment ein negativer Wert und jedem unverdeckten Segment ein positiver Wert zugeordnet. Ein freies Segment, das von einem freien Segment gefolgt ist, bekommt den Wert +3. Folgt auf das freie Segment ein verdecktes Segment bekommt es den Gewichtungsfaktor +1. Ein verdecktes Segment, auf das ein verdecktes folgt, bekommt den Wert -3 bzw. bei einem freien Nachfolgesegment den Wert -1. Wird diese Bewertung auf alle 16 Segmente angewandt, so erhält man die Liste  $H(i) = [-3 \ -1 \ +3 \ +3 \ +3 \ +1 \ -3 \ -3 \ -3 \ -3 \ +1 \ +3 \ +3 \ +3 \ -1 \ -3]$ .

Da die Vierflügelstruktur nur eine Verdopplung der Zweiflügelstruktur bei Halbierung der Zentriwinkel (vgl. Kapitel 5.2) ist und je zwei gegenüberliegende der 32 Sendesegmente elektrisch zusammengefaßt sind, gilt diese Liste der Nulllagensegmentwerte  $H(i)$  natürlich auch für die Vierflügelstruktur. Auch für die inverse Vierflügelstruktur (vgl. Kapitel 5.3) kann bis auf das Vorzeichen diese Liste der Nulllagensegmentwerte  $H(i)$  direkt übernommen werden, weil ja nur freie und verdeckte Segment ihren Platz tauschen.

#### 7.2.2.3 `evalphi.m`

Die durch `data=evalphi(data,typ)` aufgerufenen Funktion bestimmt aus den in der Datenstruktur gespeicherten Segmentwerten und dem durch `evaloffset` bestimmten Segmentoffsetwerten die Absolutwinkel- und Relativwinkel. Dabei wird für jeden

Satz von Segmentwerten und Segmentoffset die Funktion `fine` aufgerufen. Der Name der zu übergebenden Datenstruktur wird in der Variable `data`, die Anzahl der Segmentwerte (16 bzw. 32) in der Variablen `typ` übergeben. Als Ergebnis liefert die Funktion die übergebene Datenstruktur zurück und fügt je einen Datensatz für die berechneten Absolutwinkelwerte `data.phi` bzw. Relativwinkelwerte `data.dphi` hinzu. Das Programmlisting befindet sich im Anhang.

#### 7.2.2.4 `fine.m`

Die durch `[phi,dphi]=fine(c,offset,typ)` aufgerufenen Funktion berechnet aus den im Vektor `c` übergebenen Segmentwerten den dazugehörigen Absolutwinkel und Relativwinkel. In der Variable `offset` ist dabei der mit `evaloffset` bestimmte Segmentoffset, und in der Variable `typ` ist die Anzahl der Segmentwerte (16 bzw. 32) angegeben. In der Funktion `fine` sind die in den Kapiteln 3.2.3.2 und 3.2.3.1 beschriebenen Algorithmen zur Absolutwinkelbestimmung und Relativwinkelbestimmung abgesetzt. Das Programmlisting befindet sich im Anhang.

#### 7.2.2.5 `recal.m`

Da bei der Messung der Segmentwerte die Minimalwerte und Maximalwerte nicht immer konstant bleiben, kann das bei der Berechnung von Absolutwinkel und Relativwinkel zu Abweichungen führen. Die Funktion `recal` paßt die in der Datenstruktur `data` enthaltenen Segmentwerte auf gleiche Min/Max-Werte an, sodaß diese Abweichungen minimiert werden. Da diese Anpassung adaptiv verläuft, liefert die Rekalisierung erst nach einer 180°-Drehung des Sensors optimale Werte. Die Funktion wird mit `data=recal(data)` aufgerufen und ersetzt die Segmentwerte `data.seg` durch die neu berechneten. Das Programmlisting befindet sich im Anhang. Eine genauere Beschreibung der Kalibration findet sich in [CER99].

#### 7.2.2.6 Hauptprogramm - `seg_ms.m`

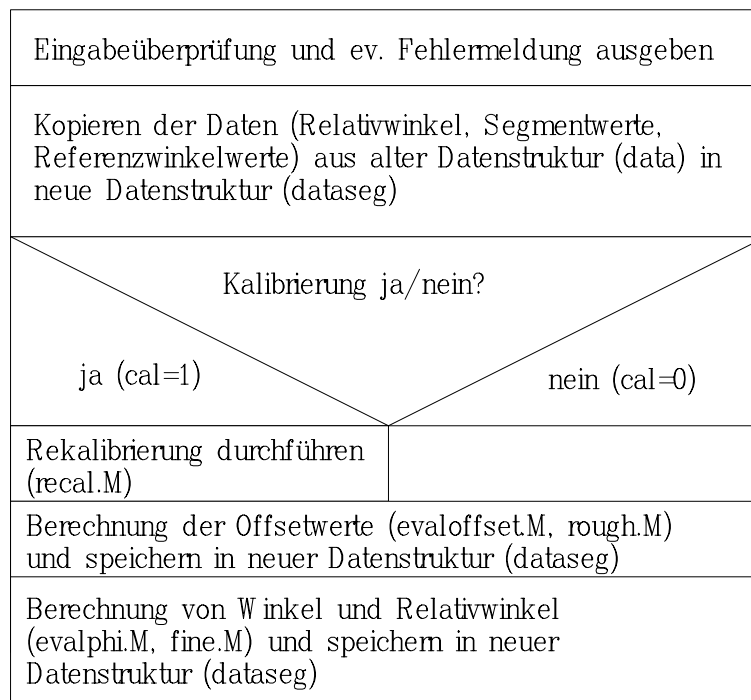
Ruft die zuvor beschriebenen Funktionen auf, um aus den gemessenen Segmentwerten eine Datenstruktur zu erstellen, die mit `plot_ms` ausgewertet werden kann.

Der Aufbau der Funktion `seg_ms` kann dem zugehörigen Struktogramm (vgl. Abbildung 7.3) entnommen werden. Aufruf-, Parameterbeschreibung und das Programmlisting befinden sich im Anhang.

### 7.2.3 Darstellung der Sensordaten - `plot_ms.m`

Um eine einheitliche Darstellung der Meßergebnisse zu gewährleisten, wurde eine Auswertefunktion `plot_ms` geschrieben. Die durch die Meßfunktion `mess_ms` (vgl. Kapitel 7.2.1) bzw. durch die Segmentauswerteprozedur `seg_ms` (vgl. Kapitel 7.2.2) gebildete Datenstruktur, wird mithilfe dieser Auswertefunktion einheitlich dargestellt. Die folgenden Meßergebnisse werden grafisch ausgegeben:

- Relativwinkelabweichung über Referenzrelativwinkel und Referenzabsolutwinkel

Abbildung 7.3: Struktogramm zur MatLab-Funktion `seg_ms`

- Absolutwinkelabweichung über Referenzrelativwinkel und Referenzabsolutwinkel
- Mittlere Relativwinkelabweichung über Referenzabsolutwinkel
- Mittlere Relativwinkelabweichung über Referenzrelativwinkel
- Mittlere Absolutwinkelabweichung über Referenzabsolutwinkel
- Mittlere Absolutwinkelabweichung über Referenzrelativwinkel
- Segmentverlauf über den vermessenen Absolutwinkelbereich

Aufruf-, Parameterbeschreibung und das Programmlisting zur Funktion `plot_ms` befinden sich im Anhang.

# Kapitel 8

## Meßergebnisse und Interpretation

Bei der Vermessung der einzelnen Sensoren, die sich durch die unterschiedlichen Elektrodenstrukturen unterscheiden (siehe Kapitel 5), wurden der Relativwinkel im Bereich  $[-5^\circ, +5^\circ]$  mit einer Schrittweite von 10 Winkelminuten (bzw. 30 Winkelminuten bei der Zweiflügelstruktur) und der Absolutwinkel von  $0^\circ$  bis  $360^\circ$  bei einer Schrittweite von  $3^\circ$  vermessen. Für die Vierflügelstruktur und die inverse Vierflügelstruktur wird so der Absolutmeßbereich von  $0^\circ$  bis  $180^\circ$  zweimal voll durchlaufen. An jedem Meßpunkt wurde 5 mal gemessen, um durch anschließende Mittelwertbildung die Meßgenauigkeit zu erhöhen (vgl. `mess_ms` Kapitel 7.2.1):

- Segmentoffset
- Mittelwert des Absolutwinkels aus den 5 Messungen
- Standarabweichung des Absolutwinkel bei 5 Messungen
- Mittelwert des Relativwinkels aus den 5 Messungen
- Standarabweichung des Relativwinkels bei 5 Messungen
- Mittelwert des Referenzabsolutwinkels aus den 5 Messungen
- Standarabweichung des Referenzabsolutwinkels bei 5 Messungen
- Mittelwerte der 16 Segmentwerte aus den 5 Messungen
- Standarabweichungen der 16 Segmentwerte bei 5 Messungen

Die Meßergebnisse wurden mithilfe der Funktion `plot_ms` ausgewertet und sind in den folgenden Abschnitten dargestellt und interpretiert.



## 8.1 Zweiflügelstruktur

Die Zweiflügelstruktur lt. Kapitel 5.1 wurde im Abstand von 1 mm über der Senderelektrode montiert (vgl. Prüfstand [WAN99]) und vermessen. Die Abbildungen 8.2 bis 8.8 zeigen die Meßergebnisse. Die absolute Meßunsicherheit über den gesamten Absolutmeßbereich  $[0, 360^\circ]$  und Relativwinkelmeßbereich  $[-5^\circ, +5^\circ]$  liegt für den Relativwinkel im Intervall  $[-2^\circ, +2^\circ]$  (vgl. Abbildung 8.2) und für den Absolutwinkel im Intervall  $[-1.2^\circ, +1.2^\circ]$  (vgl. Abbildung 8.3).

Es läßt sich eine  $360^\circ$  periodische Abweichung von ca.  $\pm 1.5^\circ$  beim Relativwinkel in Abhängigkeit des Referenzabsolutwinkels erkennen (vgl. Abbildung 8.4). Diese Abweichung ist durch die starke Empfindlichkeit der Struktur auf radialen Rotorversatz (vgl. Kapitel 8.1.1) und Rotorverkipfung (vgl. Kapitel 8.4.1) zurückzuführen. Eine genauere Justierung des Rotors innerhalb der Elektrodenstruktur war mit dem vorhandenen Prüfstand nicht, oder nur mit ungleich hohem Aufwand im Vergleich zu den anderen Strukturen möglich. Vor allem das Problem der mit Schlag behafteten Hauptwelle konnte nicht gelöst werden. Der Schlag der Hauptwelle (vgl. [WAN99]) ist für die periodische Abweichung bei der Absolutwinkelmessung von  $\pm 1^\circ$  (vgl. Abbildung 8.6) verantwortlich. Diese Struktur ist aufgrund dieser Empfindlichkeit für eine weitere Einsetzbarkeit nicht mehr von Interesse.

### 8.1.1 Abweichungen durch radialen Rotorversatz

Durch einen radialen Versatz des Rotors verändern sich die wirksamen Flächen, die zur Bestimmung des Relativwinkels herangezogen werden. Zur Abschätzung der daraus resultierenden Abweichung geht man von einer ähnlichen Anordnung wie bei der Simulation der Rotorverkipfung (Kapitel 6.2) aus. Angenommen wird ein symmetrischer Zweiflügelrotor mit einem Flügelöffnungswinkel von je  $90^\circ$  der über die Empfangsfläche gelegt wird (vgl. Abbildung 8.1). Die Bestimmungsgrößen Maximalwert  $y_{messmax}$ , Minimalwert  $y_{messmin}$ , Messwert  $y_{messplus}$  und Messwert  $y_{messminus}$  für die ratiometrische Auswerteformel (Glg. 3.5) können unter Vernachlässigung der Streufelder aus den Flächenverhältnissen in Abbildung 8.1, die proportional zu den Segmentkapazitäten  $C_{SE}$  und damit zu den Segmentwerten  $SW$  sind, wie folgt bestimmt werden:

- Maximalwert:  $y_{messmax} = \frac{1}{2} \frac{\pi}{4} (d_a^2 - d_i^2)$
- Minimalwert:  $y_{messmin} = 0$  (ideale Abschirmung vorausgesetzt!)
- Messsignal:  $y_{messplus} = \frac{y_{messmax}}{2} + 2(d_a - d_i) \frac{\Delta x}{\sqrt{2}}$
- Messsignal:  $y_{messminus} = \frac{y_{messmax}}{2} - 2(d_a - d_i) \frac{\Delta x}{\sqrt{2}}$

Dabei sind  $d_a$  der Außendurchmesser und  $d_i$  der Innendurchmesser der Empfangsfläche. Durch Einsetzen in Gleichung 3.5 ergibt sich für die Abweichung des Relativwinkels  $\Delta\varphi_{rel}(\Delta x)$  in Abhängigkeit des radialen Rotorversatzes  $\Delta x$  zu:

$$\Delta\varphi_{rel}(\Delta x) = \frac{32}{\sqrt{2}\pi} \frac{\Delta x}{d_a + d_i} \cdot 90^\circ$$

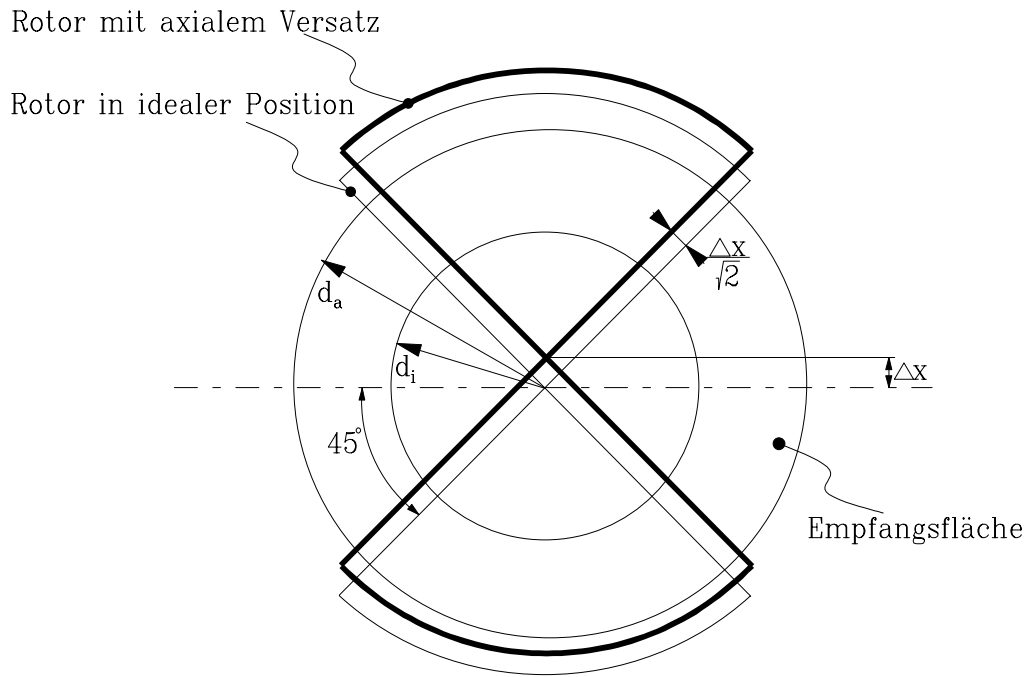


Abbildung 8.1: Änderung der Flächenverhältnisse durch radialen Rotorversatz  $\Delta x$  bei einem Zweiflügelrotor mit einem Flügelzentrwinkel von  $90^\circ$

Die Abweichung ist proportional zum Rotorversatz  $\Delta x$  und verkehrt proportional zur Summe der Empfangsflächendurchmesser  $d_a + d_i$ . Nimmt man einen Rotorversatz  $\Delta x = 0.5 \text{ mm}$  an und setzt den Außendurchmesser  $d_a = 81 \text{ mm}$  und den Innendurchmesser  $d_i = 61 \text{ mm}$  (vgl. Konstruktionszeichnung der Empfangselektrode Abbildung B.5) so ergibt sich eine Relativwinkelabweichung  $\Delta\varphi_{rel} = 2.28^\circ$ . Dreht man den Rotor um  $360^\circ$  so ergibt sich daraus eine periodische Abweichung von  $\pm 2.28^\circ$ . Um bei dieser Struktur den Einfluß eines radialen Rotoversatzes möglichst gering zu halten, müßte man den Durchmesser der Elektrodenstruktur deutlich vergrößern, allerdings würde dann der Einfluß einer Rotorverkipfung stärker.

Vergleicht man die hier erhaltenen Ergebnisse mit den Meßergebnissen in Abbildung 8.4, so läßt sich eine periodische Meßabweichung von  $\pm 1.5^\circ$  erkennen, woraus auf einen radialen Rotorversatz von  $0.35 \text{ mm}$  rückgerechnet und auch meßtechnisch verifiziert werden konnte.

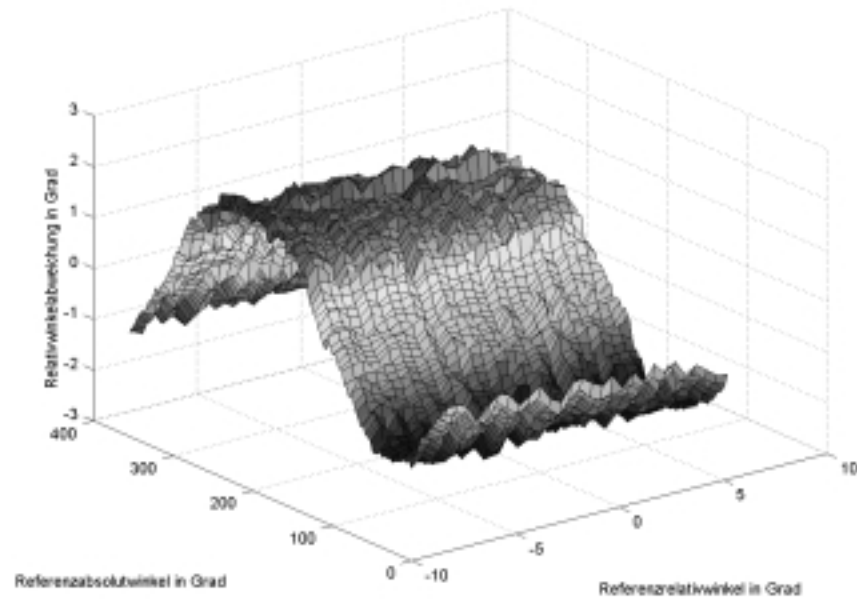


Abbildung 8.2: Gemessene Relativwinkelabweichung über Referenzrelativwinkel und Referenzabsolutwinkel - Zweiflügelstruktur

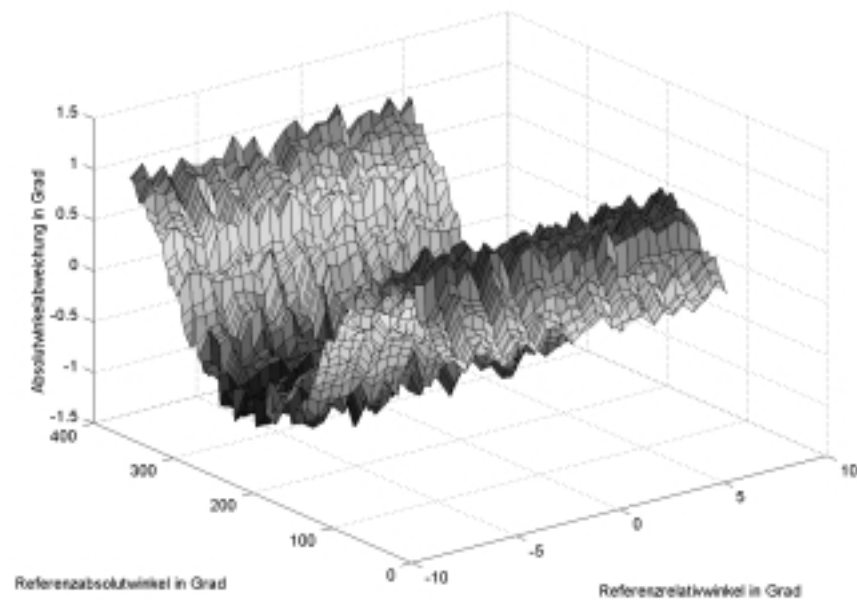


Abbildung 8.3: Gemessene Winkelabweichung über Referenzrelativwinkel und Referenzabsolutwinkel - Zweiflügelstruktur

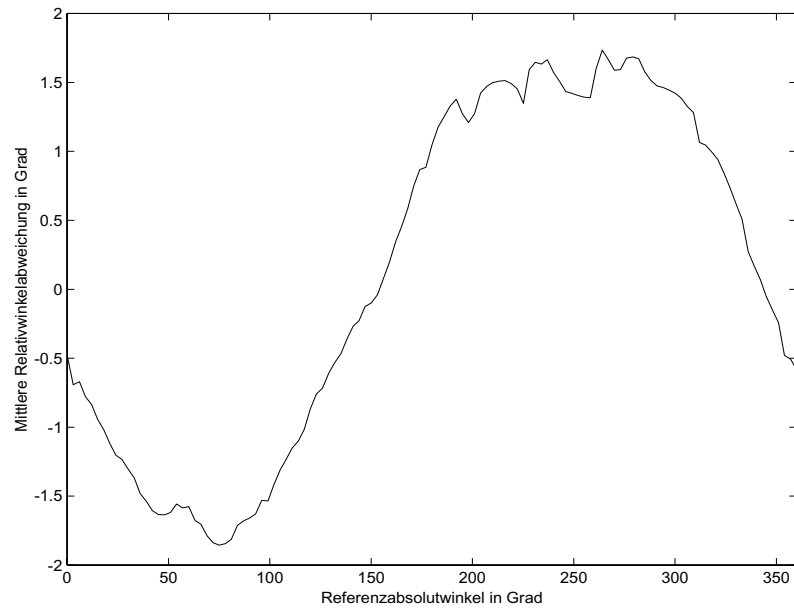


Abbildung 8.4: Mittlere Relativwinkelabweichung über Referenzabsolutwinkel - Zweiflügelstruktur

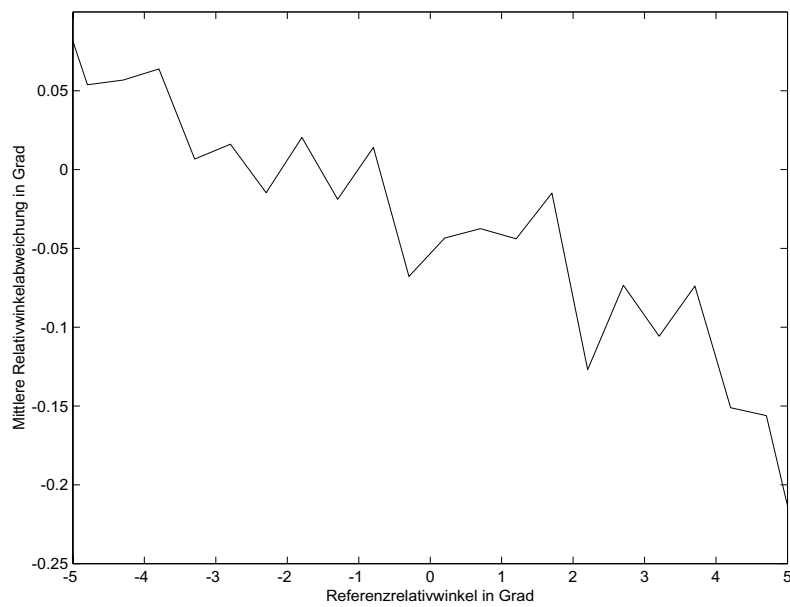


Abbildung 8.5: Mittlere Relativwinkelabweichung über Referenzrelativwinkel - Zweiflügelstruktur

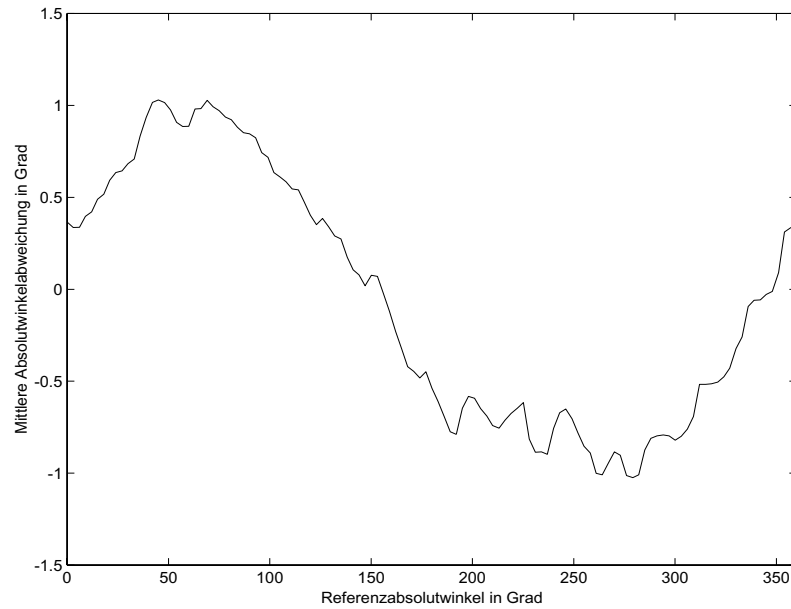


Abbildung 8.6: Mittlere Absolutwinkelabweichung über Referenzabsolutwinkel - Zweiflügelstruktur

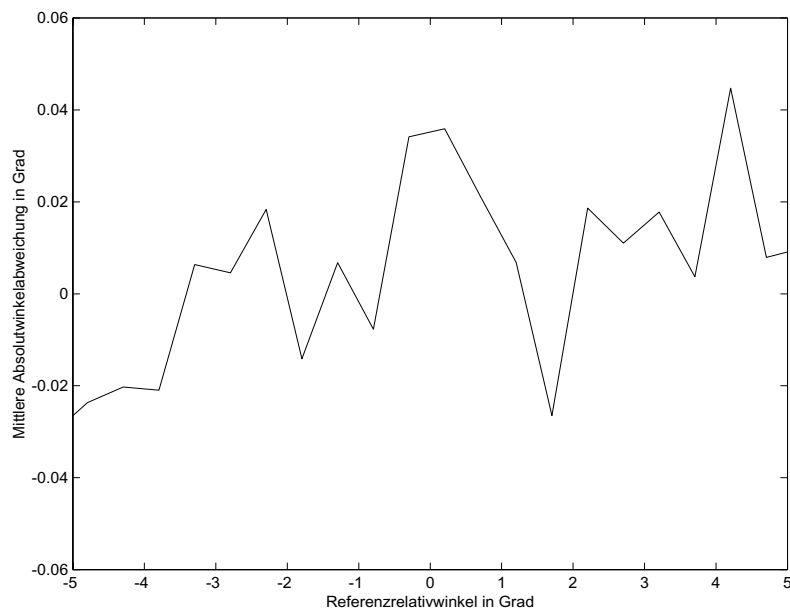


Abbildung 8.7: Mittlere Absolutwinkelabweichung über Referenzrelativwinkel - Zweiflügelstruktur

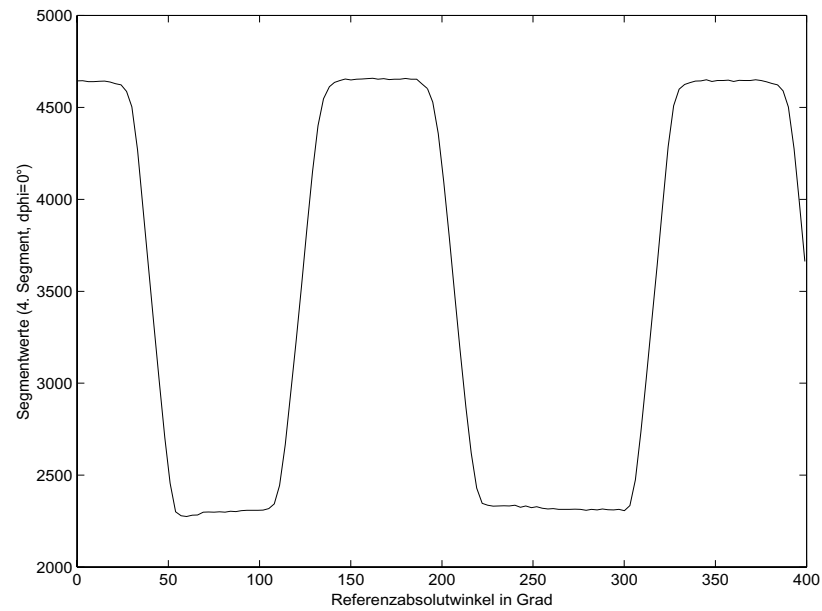


Abbildung 8.8: Segmentverlauf über den vermessenen Winkelbereich - Zweiflügelstruktur. Wegen größerer Segmentteilung auch ausgeprägtere Abflachung als bei der Vierflügelstruktur bei den Maximalbereichen, die Übergänge zu diesen Maximas sind aber wieder verschliffener als die Übergänge zu den Minimas

## 8.2 Vierflügelstruktur

Die Vierflügelstruktur lt. Kapitel 5.2 wurde im Abstand von 1 mm über der Sendelektrode montiert (vgl. Prüfstand [WAN99]) und vermessen. Die Abbildungen 8.9 bis 8.15 zeigen die Meßergebnisse.

Der Einfluß des radialen Versatz bzw. der Rotorverkipfung und damit der 360° periodische Fehler fällt weg, wie sich aus Symmetrieüberlegungen leicht erklären läßt. In der Zweiflügelstruktur bildeten die zwei gegenüberliegende Flügel des resultierenden Rotors die Meßwerte  $y_{messplus}$  und  $y_{messminus}$ . Bei der Vierflügelstruktur werden diese Messwerte  $y_{messplus}$  und  $y_{messminus}$  von je zwei Flügeln im gleichen Halbkreis gebildet, wodurch sich ein Versatz auf beide Meßwerte gleichermaßen als additive Abweichung auswirkt und sich in der ratiometrischen Auswerteformel (vgl. Gleichung 3.5) weghebt.

Für die verbleibende Meßunsicherheit läßt sich folgendes festhalten:

- Der Relativwinkel zeigt über den gesamten Absolutmeßbereich (2x180° gemessen) eine Meßunsicherheit von  $\pm 0.15^\circ$  (vgl. Abbildung 8.11). Ab einem Referenzabsolutwinkel von 180° wird die Meßunsicherheit deutlich geringer, da erst nach einmaligem Durchlauf des Meßbereiches für jedes Segment die richtigen Maximal- und Minimalwerte gespeichert werden können. Die Kalibrierung (vgl. [CER99] bzw. Kapitel 7.2.2 Funktion `recal`) kann also erst nach dem ersten Durchlauf wirksam werden.
- Der Relativwinkel zeigt eine über Relativverdrehung proportionale Abweichung von  $-0.03^\circ$  pro Grad Relativwinkelverdrehung (vgl. Abbildung 8.12) überlagert von einem Rauschen von  $\pm 0.025^\circ$ .
- Der Absolutwinkel zeigt über den gesamten Absolutmeßbereich eine rauschende Abweichung von  $\pm 0.08^\circ$  (vgl. Abbildung 8.13) und über den Relativwinkelmeßbereich ein Rauschen von  $\pm 0.03^\circ$  (vgl. Abbildung 8.14). Auch beim Absolutwinkel läßt sich eine Verbesserung der Meßunsicherheit nach den ersten 180° feststellen, ab denen die Kalibration wirksam wird.
- Die absolute Meßunsicherheit über den gesamten Absolutmeßbereich  $[0, 180^\circ]$  und Relativwinkelmeßbereich  $[-5^\circ, +5^\circ]$  liegt für den Relativwinkel im Intervall  $[+0.2^\circ, -0.4^\circ]$  (vgl. Abbildung 8.9) und für den Absolutwinkel im Intervall  $[+0.2^\circ, -0.2^\circ]$  (vgl. Abbildung 8.10).

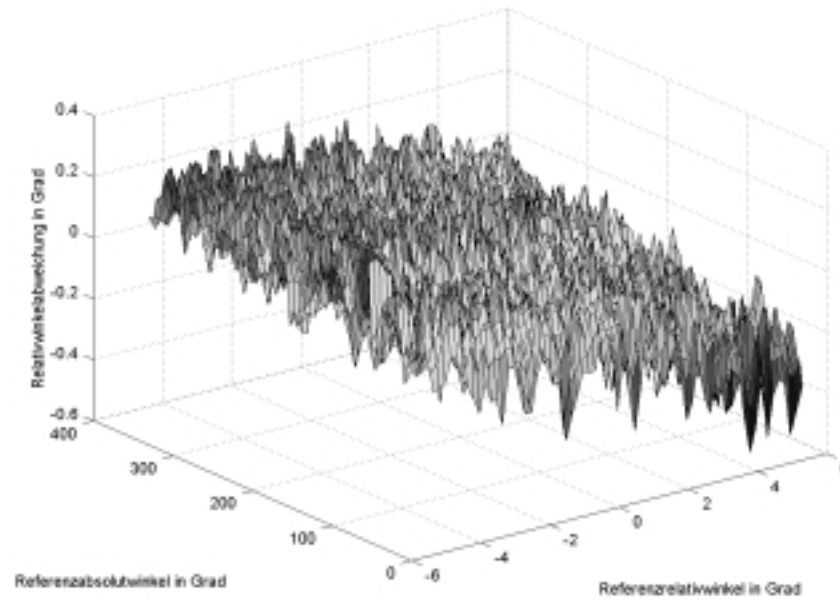


Abbildung 8.9: Gemessene Relativwinkelabweichung über Referenzrelativwinkel und Referenzabsolutwinkel - Vierflügelstruktur

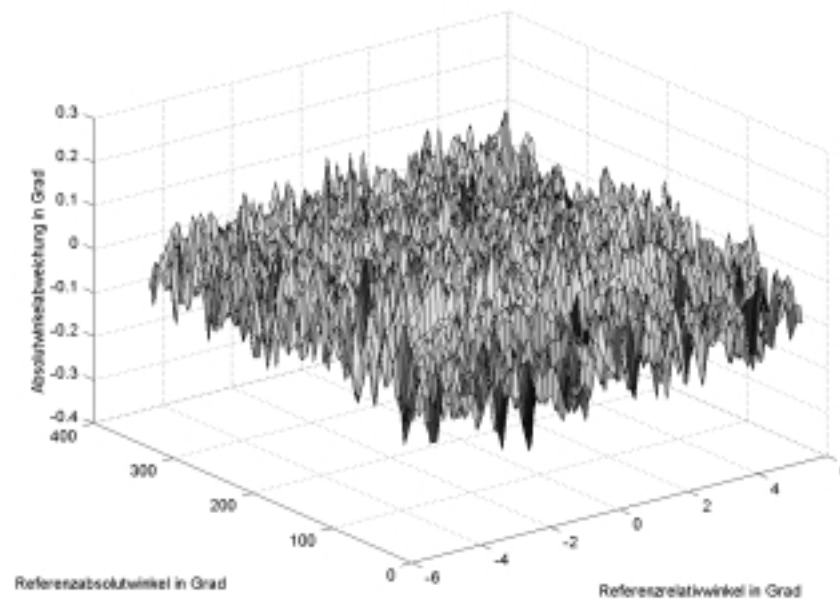


Abbildung 8.10: Gemessene Absolutwinkelabweichung über Referenzrelativwinkel und Referenzabsolutwinkel - Vierflügelstruktur



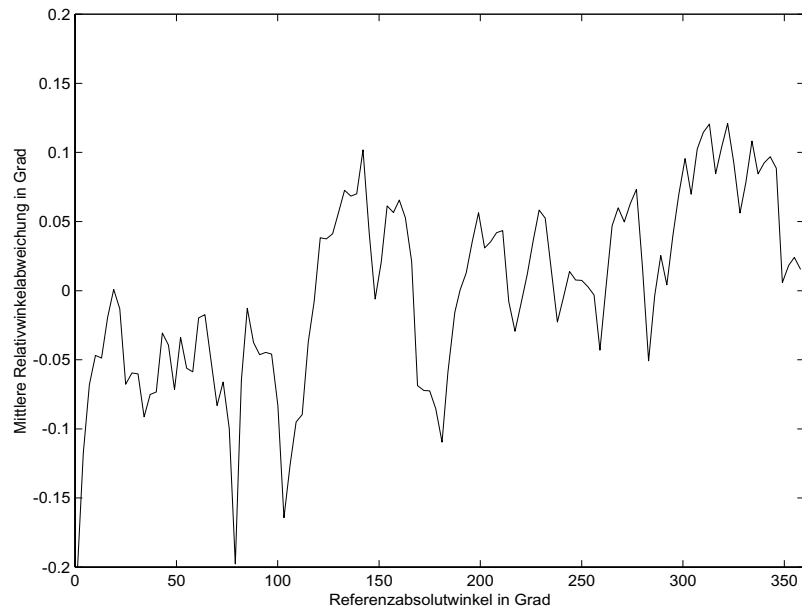


Abbildung 8.11: Mittlere Relativwinkelabweichung über Referenzabsolutwinkel - Vierflügelstruktur. Die mittlere Abweichung geht ab einem Absolutwinkel von  $180^\circ$  von  $\pm 0.15^\circ$  auf  $\pm 0.1^\circ$  zurück, weil dann alle Segmentwerte bereits einmal kalibriert werden konnten.

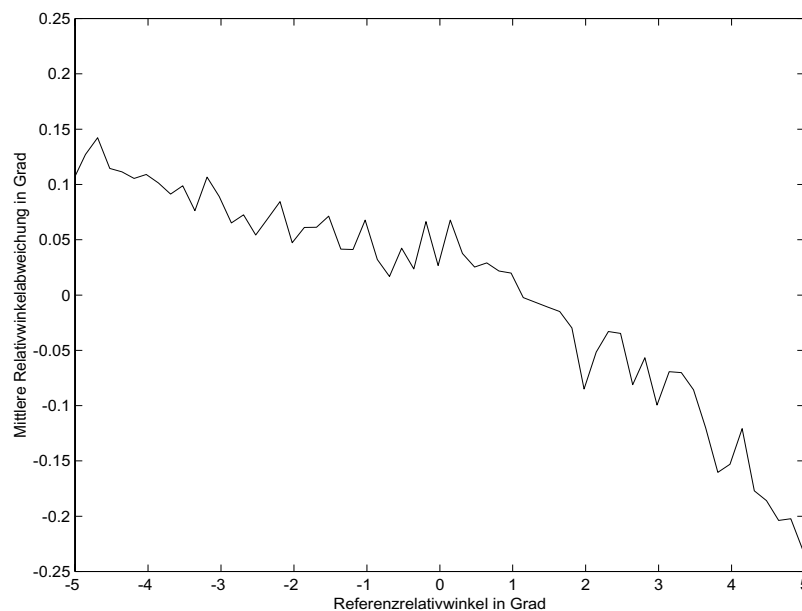


Abbildung 8.12: Mittlere Relativwinkelabweichung über Referenzrelativwinkel - Vierflügelstruktur

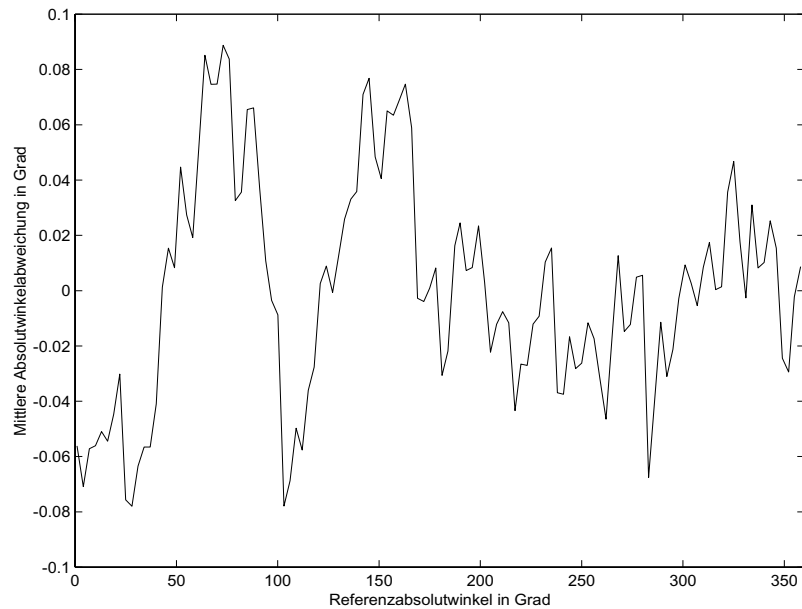


Abbildung 8.13: Mittlere Absolutwinkelabweichung über Referenzabsolutwinkel - Vierflügelstruktur. Die mittlere Abweichung geht ab einem Absolutwinkel von  $180^\circ$  von  $\pm 0.08^\circ$  auf  $\pm 0.05^\circ$  zurück, weil dann alle Segmentwerte bereits einmal kalibriert werden konnten.

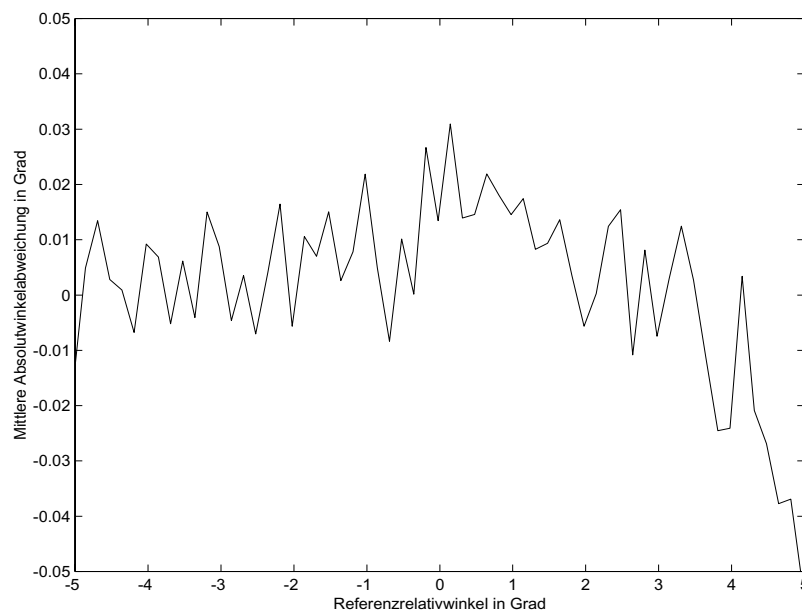


Abbildung 8.14: Mittlere Absolutwinkelabweichung über Referenzrelativwinkel - Vierflügelstruktur

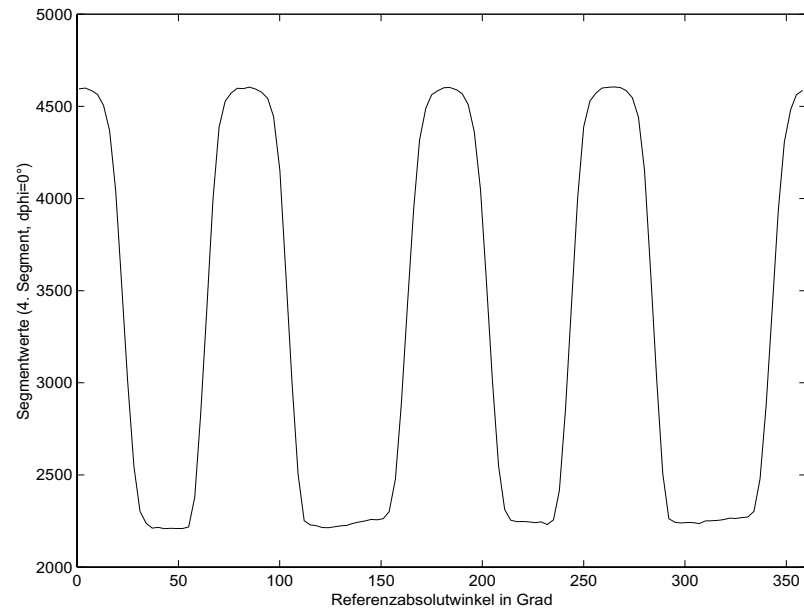


Abbildung 8.15: Segmentverlauf über den vermessenen Winkelbereich - Vierflügelstruktur. Minimabereich unterschiedliche Breite, Maximabereich konstante Breite

### 8.3 Inverse Vierflügelstruktur

Die inverse Vierflügelstruktur lt. Kapitel 5.3 wurde im Abstand von 2 mm über der Senderelektrode montiert (vgl. Prüfstand [WAN99]) und vermessen. Die Abbildungen 8.16 bis 8.22 zeigen die Meßergebnisse.

Für die Meßunsicherheiten läßt sich folgendes festhalten:

- Der Relativwinkel zeigt wie auch bei der Vierflügelstruktur über den gesamten Absolutmeßbereich ( $2 \times 180^\circ$  gemessen) eine Meßunsicherheit von  $\pm 0.2^\circ$  (vgl. Abbildung 8.18). Auch bei der inversen Vierflügelstruktur wird ab einem Referenzabsolutwinkel von  $180^\circ$  die Meßunsicherheit deutlich geringer, weil die Kalibrierung wirksam wird.
- Der Relativwinkel zeigt eine über die Relativverdrehung proportionale Abweichung von  $-0.01^\circ$  pro Grad Relativwinkelverdrehung (vgl. Abbildung 8.19).
- Der Absolutwinkel zeigt über den gesamten Absolutmeßbereich eine rauschende Abweichung von  $\pm 0.08^\circ$  (vgl. Abbildung 8.20) und über den Relativwinkelmeßbereich ein Rauschen von  $\pm 0.03^\circ$  (vgl. Abbildung 8.21). Auch beim Absolutwinkel läßt sich eine Verbesserung der Meßunsicherheit nach den ersten  $180^\circ$  feststellen, ab denen die Kalibration wirksam wird.
- Die absolute Meßunsicherheit über den gesamten Absolutmeßbereich  $[0, 180^\circ]$  und Relativwinkelmeßbereich  $[-5^\circ, +5^\circ]$  liegt für den Relativwinkel im Intervall  $[+0.25^\circ, -0.25^\circ]$  (vgl. Abbildung 8.16) und für den Absolutwinkel im Intervall  $[+0.12^\circ, -0.12^\circ]$  (vgl. Abbildung 8.17).

Im wesentlichen sind die mit der inversen Vierflügelstruktur erreichten Ergebnisse nur geringfügig besser als mit der Vierflügelstruktur. Die Verbesserung ist darin begründet, daß bei der inversen Vierflügelstruktur die Rotorflächen konstant bleiben und die Zwischenräume in ihrer Breite verändert werden. Für die Ermittlung des Relativwinkels werden Segmente von einem konstanten Bereich zum anderen zusammengefaßt (vgl. Relativwinkelbestimmung in Kapitel 3.2.3.1), da die Abschirmung exaktere Segmentwerte liefert als ein freigegebener Segmentbereich (vgl. Simulierter Segmentverlauf Abbildung 6.3 in Kapitel 6), erhält man bei der inversen Vierflügelstruktur genauere Meßwerte. Vergleicht man den Segmentverlauf der Vierflügelstruktur mit dem der inversen Vierflügelstruktur so kann läßt sich folgendes erkennen: Bei der Vierflügelstruktur sind die Bereiche der Abschattung (Minima) unterschiedlich breit, während die Maxima konstante Breite aufweisen (vgl. Abbildung 8.15). Bei der inversen Struktur haben die Bereiche der Abschattung konstante Breite während die, die Bereiche der Freigabe unterschiedlich breit sind. Bei der Betrachtung der Abbildung 8.22 ist zu berücksichtigen, daß hier ein "gespiegelter" Segmentverlauf dargestellt ist, das bedeutet Abschattungsbereiche werden zu Maxima und Freigabebereiche zu Minima. Diese Spiegelung ist notwendig, um auch bei der inversen Vierflügelstruktur mit den gleichen Algorithmen arbeiten zu können.

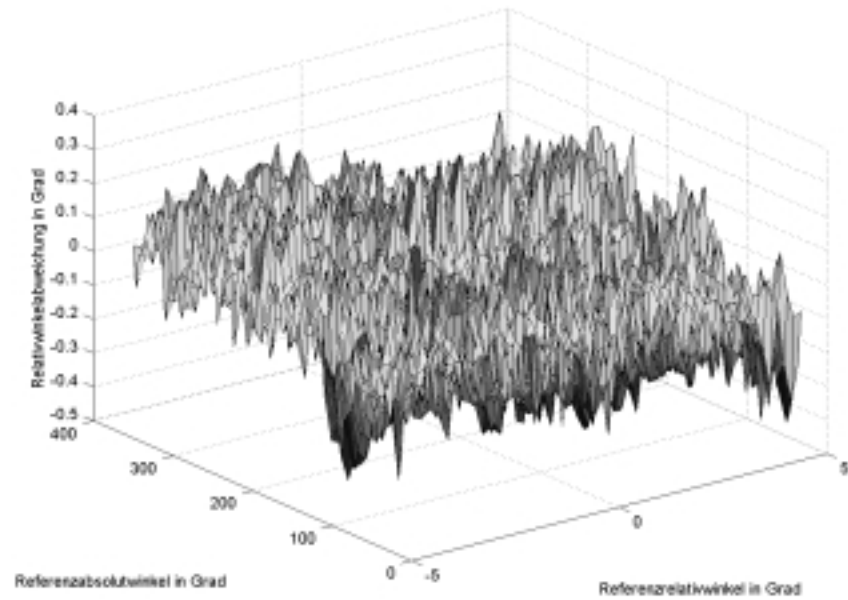


Abbildung 8.16: Gemessene Relativwinkelabweichung über Referenzrelativwinkel und Referenzabsolutwinkel - Inverse Vierflügelstruktur

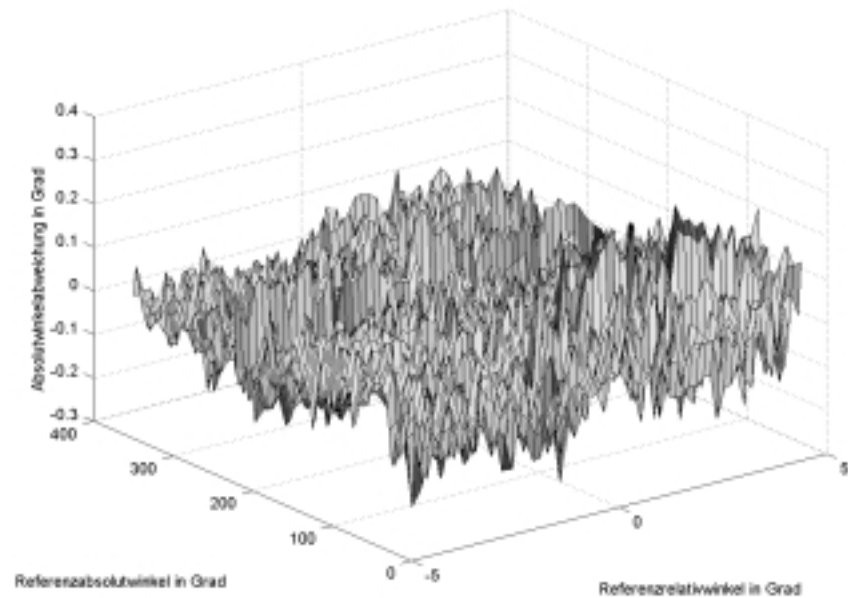


Abbildung 8.17: Gemessene Absolutwinkelabweichung über Referenzrelativwinkel und Referenzabsolutwinkel - Inverse Vierflügelstruktur

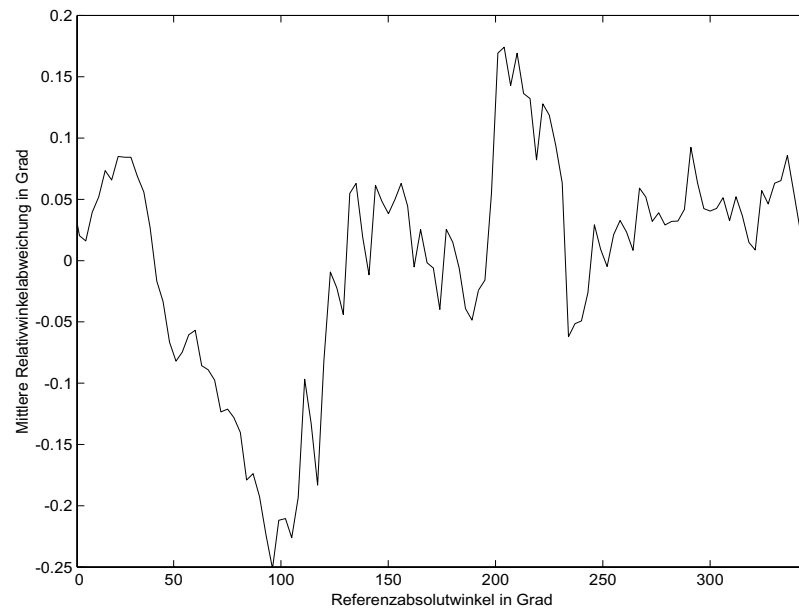


Abbildung 8.18: Mittlere Relativwinkelabweichung über Referenzabsolutwinkel - Inverse Vierflügelstruktur. Die Mittlere Abweichung geht ab einem Absolutwinkel von  $180^\circ$  von  $\pm 0.2^\circ$  auf  $\pm 0.08^\circ$  zurück, weil dann alle Segmentwerte bereits einmal kalibriert werden konnten.

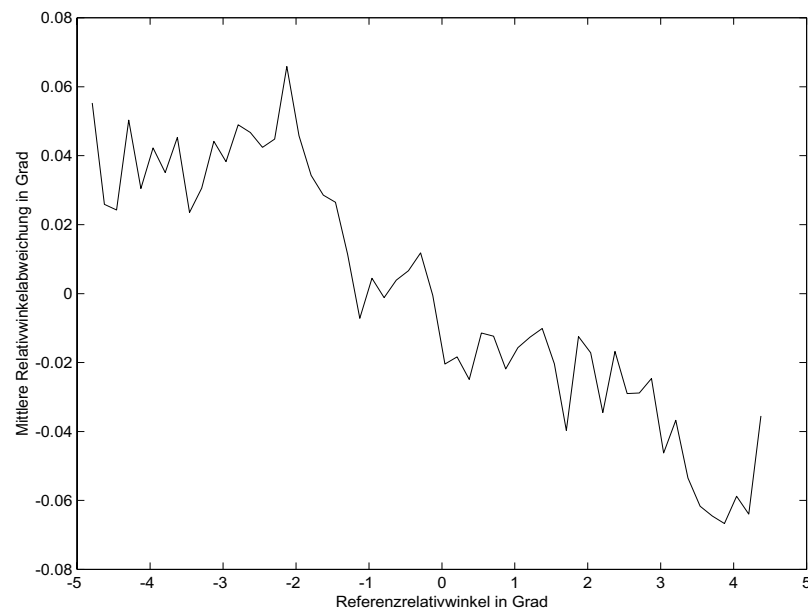


Abbildung 8.19: Mittlere Relativwinkelabweichung über Referenzrelativwinkel - Inverse Vierflügelstruktur

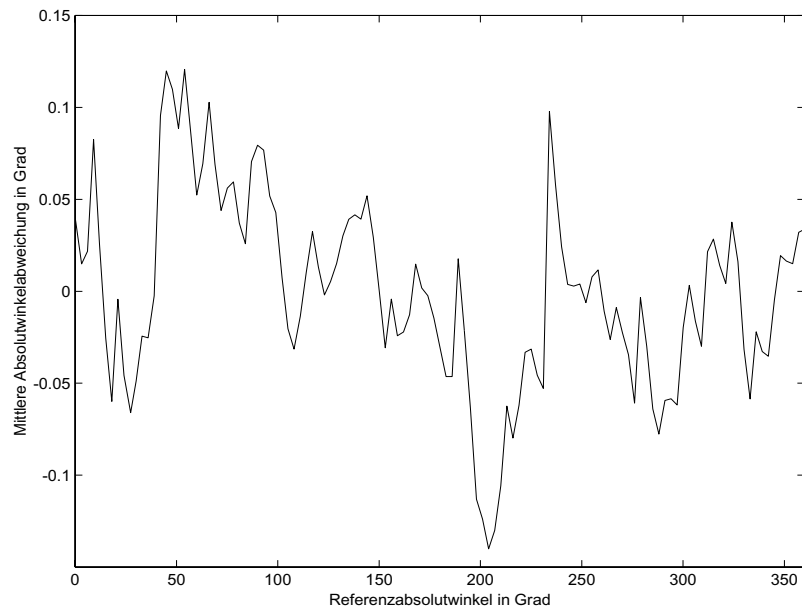


Abbildung 8.20: Mittlere Absolutwinkelabweichung über Referenzabsolutwinkel - Inverse Vierflügelstruktur. Die Mittlere Abweichung geht ab einem Absolutwinkel von  $180^\circ$  von  $\pm 0.12^\circ$  auf  $\pm 0.08^\circ$  zurück, weil dann alle Segmentwerte bereits einmal kalibriert werden konnten.

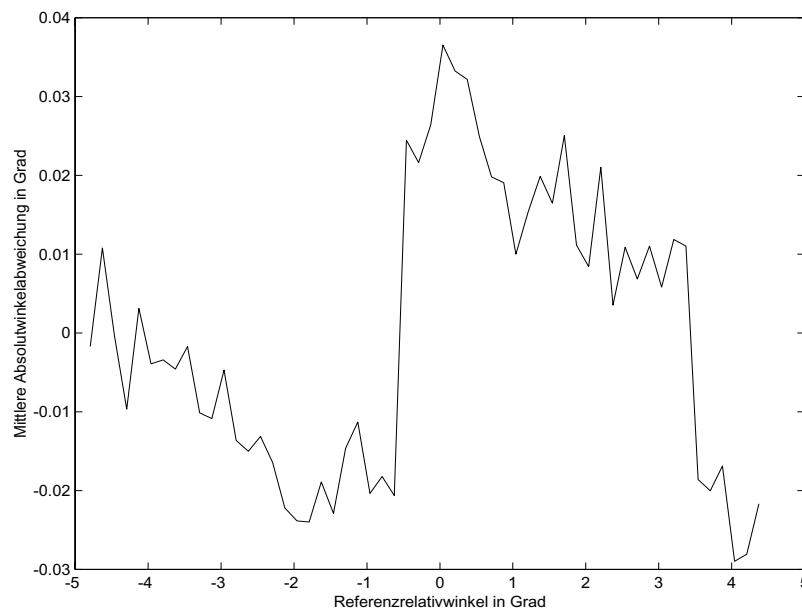


Abbildung 8.21: Mittlere Absolutwinkelabweichung über Referenzrelativwinkel - Inverse Vierflügelstruktur

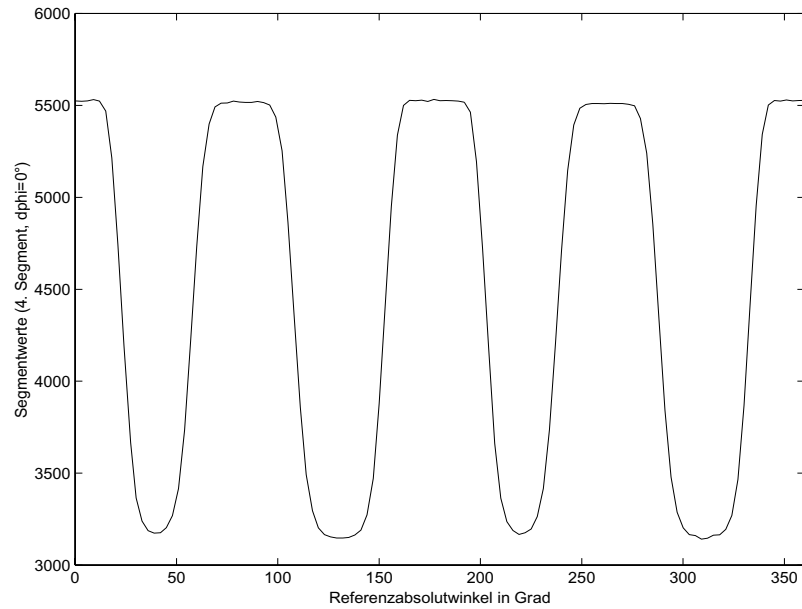


Abbildung 8.22: "Gespiegelter" Segmentverlauf über den vermessenen Winkelbereich - Inverse Vierflügelstruktur. Maximabereiche (entspricht Abschattung) konstante Breite, Minimabereich (entspricht Freigabe) unterschiedliche Breite



## 8.4 Einflüsse auf die Meßgenauigkeit - Zusammenfassung

- Der Unterschied der Meßunsicherheit zwischen Relativwinkel  $\varphi_{rel}$  und Absolutwinkel  $\varphi_{abs}$  läßt sich wie folgt begründen:  
Die auf das Intervall  $[+1, -1]$  normierten Interpolationswerte  $\xi_{rel}$  und  $\xi_{abs}$  unterliegen durch die Segmentwahl dem gleichen Fehler.  
Um den Absolutwinkel  $\varphi_{abs}$  zu errechnen, wird bei der Umrechnung des Interpolationswertes  $\xi_{rel}$  auf den zugehörigen Relativwinkel  $\varphi_{rel}$  der Interpolationswert  $\xi_{rel}$  mit  $90^\circ$  multipliziert, während der Interpolationswert  $\xi_{abs}$  mit  $45^\circ$  multipliziert wird. Dieser unterschiedliche Multiplikationsfaktor bewirkt eine Verdopplung der Meßunsicherheit im Relativwinkel  $\varphi_{rel}$ , verglichen mit dem Absolutwinkel  $\varphi_{abs}$ .
- Durch Einbautoleranzen (Verkipfung, Wellenschlag) ergeben sich unterschiedliche Maximal- und Minimalwerte. Mögliche Abhilfe: Die Kalibrierung der Segmentwerte auf gleiche Maximal- und Minimalwerte.
- Rauschen der analogen Empfangsschaltung, mögliche Abhilfe rauschärmere Bauteile.
- Der Empfangsschwingkreis stellt einen schmalbandigen und rauscharmen "Spannungsverstärker" dar, mit einem der Güte  $Q_{SK}$  entsprechendem Verstärkungsfaktor. In der verwendeten Empfangsschaltung (vgl. [WAN99]) weist der Schwingkreis eine Güte  $Q_{SK} = 10$  auf, durch Verkleinerung der Empfangskapazität, könnte dieser Wert vergrößert und damit der Rauscheinfluß vermindert werden.
- Die verwendeten Rotoren haben eine Dicke von je 1 mm, werden diese dünner ausgeführt und ein schmalerer Distanzring (derzeitige Distanz 5mm) verwendet, so könnte der Einfluß der Streufelder weiter vermindert werden (vgl. Simulation [CER99]).
- Wellenschlupf: Durch die vom Schrittmotor erzeugten Rüttelmomente bei der schrittweisen Ansteuerung kann es zwischen Motorwelle und Hauptwelle (vgl. [WAN99]) zu einem Schlupf kommen, da die Spannzange keine hinreichend starre Verbindung erzeugen kann. Ähnliches gilt auch für die Feststellschraube bei der Relativwinkelverdrehrichtung (vgl. ebenfalls [WAN99]).
- Um Abweichungen durch radialen Rotorversatz zu vermeiden, müssen Strukturen ähnlich wie die Zweiflügelstruktur aus Kapitel 5.1 vermieden werden.

### 8.4.1 Einfluß einer Rotorverkipfung

Für die Zweiflügelstruktur wurde die Auswirkung einer Rotorverkipfung gemessen und mit dem Simulationsergebnis aus Kapitel 6.2 verglichen.

Um die simulierte Relativwinkelabweichung  $\Delta\varphi_{rel}$  mit den Meßergebnissen der Verkipfungsmessung vergleichen zu können, müssen die geometrischen Verhältnisse am Prüfstand berücksichtigt werden, wobei der resultierende Rotor in der Simulation

als unendlich dünn angenommen wird. Wird die ideale Rotorlage in 1 mm Abstand parallel vom Sender angenommen, so ergibt sich ein Rotorabstand vom Empfänger  $h_{R0} = 4$  mm. Die Verkipfung erfolgt durch Verstellung der Positioniereinheit des Prüfstandes, wodurch die parallelen Sender- und Empfangsflächen einseitig gegen den Rotor verkippt werden. Eingestellt wurde die Verkipfung durch die Mikrometerschraube 2 (vgl. Prüfstand [WAN99]) von  $\Delta h_{RMikrometer}$  von 0 mm bis 2.5 mm.

Die Mikrometerschraube 2 greift bei einem Abstand  $z_M = 95$  mm vom Drehpunkt  $\mathcal{D}$  an die Elektrodenstruktur an, während die für die Abwicklungsdarstellung relevanten Mittelpunkte der Empfangsfläche bei Abständen  $z_1 = 12.5$  mm und  $z_2 = 82.5$  mm vom Drehpunkt  $\mathcal{D}$  liegen (vgl. Abbildung 8.23). Ein Verkipfung durch die Mikrometerschraube um  $\Delta h_{RMikrometer}$  wirkt sich im Abstand  $z_1$  vom Drehpunkt um das Verhältnis  $\frac{12.5\text{mm}}{95\text{mm}}$  und im Abstand  $z_2$  vom Drehpunkt um das Verhältnis  $\frac{82.5\text{mm}}{95\text{mm}}$  verringert aus. Die Rotorflügelhöhen ergeben sich dann zu  $\Delta h_{R1} = \Delta h_{RMikrometer} \frac{12.5}{95}$  und  $\Delta h_{R2} = \Delta h_{RMikrometer} \frac{82.5}{95}$ . Setzt man diese Geometriebeziehungen, wie in Kapitel 6.2 beschrieben, in die ratiometrische Auswerteformel 3.5 ein, so erhält man die durch die Rotorverkipfung bedingte Relativwinkelabweichung  $\Delta\varphi_{rel}$ .

$$\Delta\varphi_{rel} = \frac{C_{SE}(h_{R1}) - C_{SE}(h_{R2})}{C_{SEmax}} \cdot 90^\circ$$

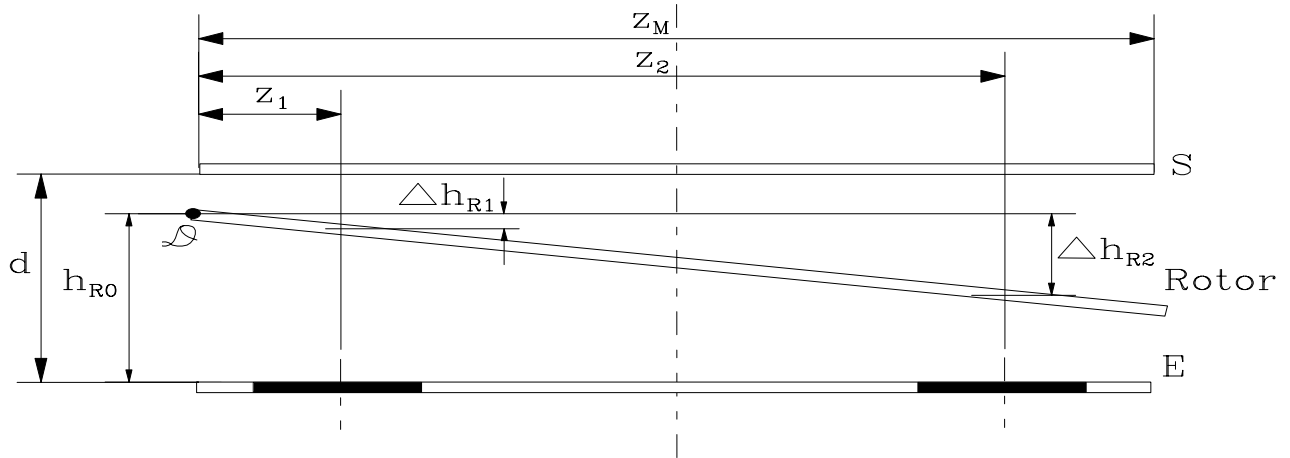


Abbildung 8.23: Geometrische Verhältnisse bei Rotorverkipfung durch Verstellung der Mikrometerschraube 2 (Prüfstand lt. [WAN99])

In Abbildung 8.24 sind die gemessene und simulierte Relativwinkelabweichung in Abhängigkeit der Rotorverkipfung  $\Delta h_{RMikrometer}$  dargestellt. Im Bereich der Rotorverkipfung  $\Delta h_{RMikrometer} = 0.3$  mm bis  $\Delta h_{RMikrometer} = 2$  mm zeigt sich eine gute Übereinstimmung der Simulations- und Messergebnisse. Außerhalb dieses Bereiches verliert die Simulation aufgrund zusätzlicher Abweichungen bedingt durch diverse Einbautoleranzen ihre Gültigkeit.

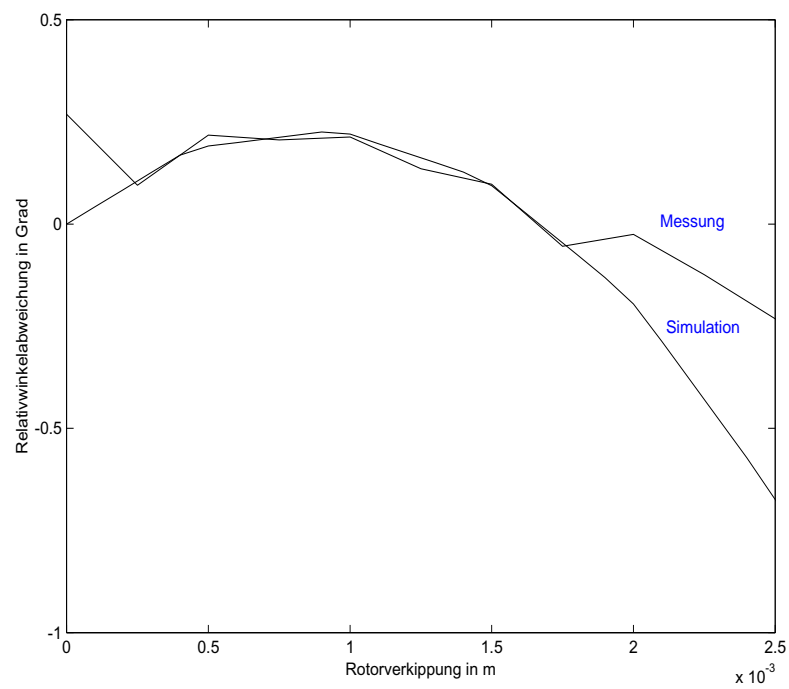


Abbildung 8.24: Einfluß einer Rotorverkipfung auf die Relativwinkelabweichung (Vergleich Simulation und Messung)

# Kapitel 9

## Spezifikation des Prototypes

Von den im Rahmen des Projektes getesteten Strukturen (vgl. Kapitel 5 und Kapitel 8) konnte die inverse Vierflügelstruktur als die mit den besten Ergebnissen erkannt werden.

Unter Verwendung der genannten Rotorstruktur ergibt sich mit der in [WAN99] beschriebenen Hardware unter Verwendung der in [CER99] dokumentierten Software die folgende Spezifikation des Prototypen:

### **Elektrodenstruktur lt. Anhang:**

- Sendeelektrode: 32 Segmente, Segmentteilung  $11.25^\circ$
- Rotorstruktur: Inverse Vierflügelstruktur (symmetrische Rotoren mit zwei je  $45^\circ$  breiten Flügeln)

### **Platzbedarf:**

- Elektrodenstruktur mit Distanzring - Zylinder: Durchmesser 110 mm, Distanz zwischen Sender- und Empfangselektrode  $d = 5mm$
- Senderansteuerung über Steckverbindung direkt an der Rückseite der Sendeelektrode, Höhe ca. 20 mm
- Empfängerschaltung und HC12 Board auf Leiterplatte Durchmesser: 110 mm, über 300 mm langes geschirmtes Kabel mit Empfängerfläche verbunden, Positionierung beliebig.

### **Relativwinkelmessung:**

- Meßbereich:  $\pm 5^\circ$
- Meßunsicherheit:  $\pm 0.25^\circ$
- Auflösung:  $0.001^\circ$

**Absolutwinkelmessung:**

- Meßbereich:  $180^\circ$
- Meßunsicherheit:  $\pm 0.12^\circ$
- Auflösung:  $0.001^\circ$

**Kennfeld des Sensors:** In Abbildung 8.16 ist der Relativwinkelmeßabweichung in Abhängigkeit vom Referenz- und Referenzrelativwinkel dargestellt. In Abbildung 8.18 und Abbildung 8.19 sind die mittlere Meßabweichung des Relativwinkels in Abhängigkeit vom Referenzabsolutwinkel bzw. vom Referenzrelativwinkel dargestellt. In Abbildung 8.17 ist der Winkelfehler in Abhängigkeit vom Referenz- und Referenzrelativwinkel dargestellt. In Abbildung 8.20 und Abbildung 8.21 sind die mittlere Meßabweichung des Absolutwinkels in Abhängigkeit vom Referenzabsolutwinkel bzw. vom Referenzrelativwinkel dargestellt.

**Hardwareausführung:** Stromlaufpläne, Fertigungsunterlagen und Konstruktionszeichnungen von der Senderansteuerung, der Empfängerschaltung, dem HC12-Board sowie der Sende-, Empfangs- und Rotorelektrode für diesen Momentensensor befinden sich in [WAN99].

# Kapitel 10

## Ausblick

Der Prototyp des kapazitiven Momentensensors ist in Hinblick auf eine spätere Einsetzbarkeit für die Lenkkraftmessung im Automobil zu verbessern, wofür in erster Linie eine Verbesserung der Meßgenauigkeit nötig ist.

Um den Sensor direkt in die Lenksäulenmechanik integrieren zu können, ist eine wesentliche Verkleinerung der gesamten Elektrodenanordnung notwendig. Hier könnte eine Strukturvereinfachung hilfreich sein. Eine Möglichkeit dazu wäre die Reduzierung von 32 auf 24 Segmente, was zu einem einfacheren Aufbau, d. h. größere Segmentteilung bei weniger Leitungen von der Senderansteuerung führt. Die Anzahl der zu messenden Segmentwerte würde von 16 auf 12 reduziert. Eine gröbere Segmentteilung bedeutet eine gröbere Auflösung der Segmentbereiche, weil die Bitanzahl des A/D-Umsetzers ja konstant bleibt, dafür würde die Streufeldproblematik geringer.

Die durch das Downscaling entstehenden Probleme mit den Streufeldern sind noch zu untersuchen. Bei der Reduzierung des Außendurchmessers muß folgendes beachtet werden:

Der innere Radius des Empfangsrings darf aufgrund des stärkeren Einflusses der Streufelder bei kleinen Radien nicht wesentlich reduziert werden. Der Außendurchmesser darf nur soweit verringert werden, daß genügend kapazitive Kopplung zwischen Sendersegment und Empfangsring bestehen bleibt, um einen ausreichenden Signalhub zu gewährleisten. Durch die Verwendung einer 24 Segmente-Struktur ist es möglich, auch den inneren Radius weiter zu verkleinern.

Neben Veränderung der Geometrieverhältnisse bei den bisher verwendeten Anordnungen, wäre es auch möglich die Elektrodenstruktur nicht in Scheibenform sondern als konzentrische Hohlzylinder zu realisieren. In dieser Struktur sind auf der Innenseite des Zylindermantel des äußersten Hohlzylinders die Sendesegmente aufgebracht. Die Rotoren sind die beiden inneren Hohlzylinder, aus deren Mantel die Rotorstruktur ausgeschnitten ist. Der innerste Zylinder (oder die Welle selbst) wirkt als Empfangselektrode.

Beim Bau des Prototypen wurde auf das EMV-Verhalten, d. h. Abstrahlverhalten und Empfindlichkeit gegen elektromagnetische Störungen von außen, noch nicht näher eingegangen. Auch die mechanische Robustheit des Sensors, sein Temperaturverhalten und der Einfluß von Verschmutzung und Feuchtigkeit wurden noch nicht verifiziert. Für die Weiterentwicklung in Richtung industrielle Einsetzbarkeit sind diese Einflüsse unbedingt zu beachten.

# Literaturverzeichnis

- [BAR90] Hans-Jochen Bartsch : *Taschenbuch mathematischer Formeln*, 1990
- [BOEG85] Alfred Böge: *Mechanik und Festigkeitslehre*, Vieweg Verlag, 1985
- [BRA92] Georg Brasseur, Thomas Eberharder : *Kapazitiver Drehwinkelsensor*, Österreichisches Patent AT 398245; 1994 und Europ. Pat. EP 0551 066, 1992 und US Pat. 5,598,153.
- [BRA93] Georg Brasseur, Thomas Eberharder : *Capacitive Angular Displacement Transducer*, US Patent Appl. S/N 08/087,261;1993
- [BRA96] Georg Brasseur : *Analysis of a Novel Noncontact Capacitive Angular Displacement Transducer*, eingereicht für IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement.
- [BRA97] Georg Brasseur : *Kapazitiver Drehwinkel- und Winkelgeschwindigkeitssensor und Meßeinrichtung für einen solchen*, Österreichische Patentanmeldung A505-97
- [CER99] Stefan Cermak : *Softwareentwicklung und Simulation für einen kapazitiven Drehmomentsensor*, Diplomarbeit, IAEQ TU-Wien, 1999
- [FAB97] Tibor Fabian, Georg Brasseur : *A Robust Capacitive Angular Speed Sensor*, in Proceedings of IEEE Conference on Instrumentation and Measurement Technology (IMTC/97), Ottawa, Canada, May 19-21, pp. 1267-1272, 1997.
- [FAB98] Tibor Fabian : *Vergleich und Optimierung der Ansteuerungsverfahren eines kapazitiven Winkel- und Winkelgeschwindigkeitssensors*, Diplomarbeit, IAEQ TU-Wien, 1998
- [FAS94] G. Fasching : *Werkstoffe für die Elektrotechnik*, 3. Auflage, Springer-Verlag, 1994
- [HOF82] H. Hofmann : *Das elektromagnetische Feld*, 2. verbesserte Auflage, Springer-Verlag, 1982
- [JNG94] Gerben de Jong : *Smart Capacitive Sensors, physical, geometrical and electronic aspects*, Dissertationsschrift, Delft University Press, 1994

- [KOEL97] Wolfgang Köllner : *Signalprozessorgestützte Auswertung von Meßsignalen eines automobiltauglichen Drehwinkelsensors*, Diplomarbeit, IAAE TU-Wien, 1997
- [PRE94] Adalbert Prechtel : *Grundlagen der Elektrotechnik*, Band 1, Springer-Verlag, 1994
- [SRUF92] E. Schröder : *Elektrische Messtechnik*, 5. Auflage, Carl Hanser Verlag, 1995
- [WAN99] Florian Wandling : *Hardwareentwicklung für einen kapazitiven Drehmomentsensor*, Diplomarbeit, IAEQ TU-Wien, 1999



# Anhang A

## Rotorflügel - Konstruktionszeichnungen<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup>erstellt mit ACAD 13C4

## A.1 Zweiflügelsturktur

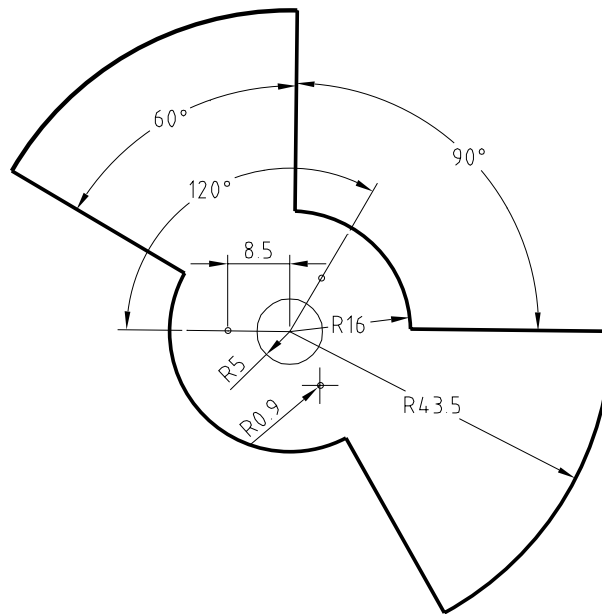


Abbildung A.1: Konstruktionszeichnung - Rotor zur Zweiflügelstruktur (Material: Messing, 1 mm dick)

## A.2 Vierflügelstruktur

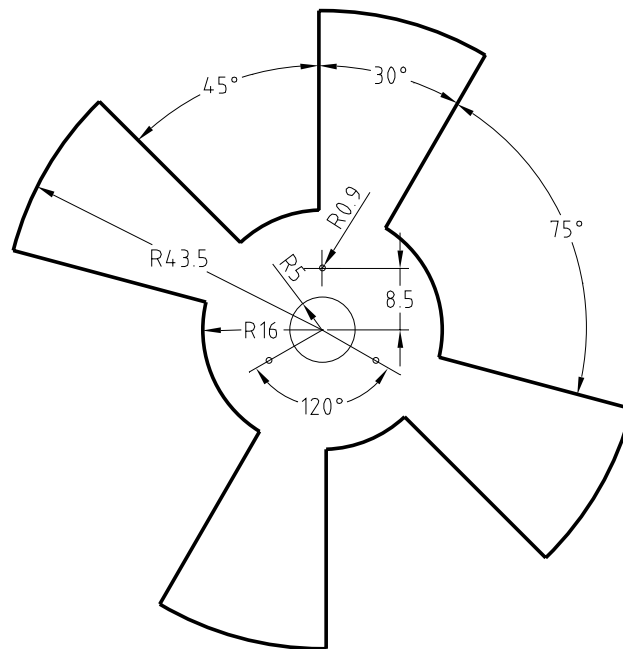


Abbildung A.2: Konstruktionszeichnung - Rotor zur Vierflügelstruktur (Material: Messing, 1 mm dick)

### A.3 Inverse Vierflüglestruktur

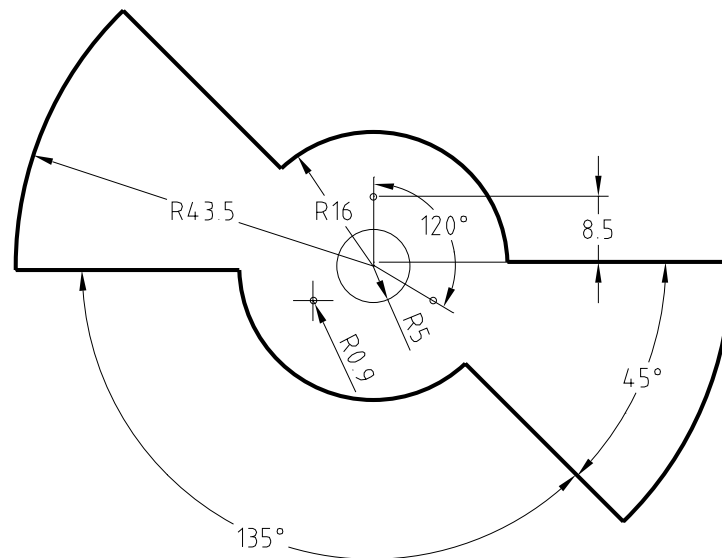


Abbildung A.3: Konstruktionszeichnung - Rotor zur inversen Vierflügelstruktur (Material: Messing, 1 mm dick)

## Anhang B

### Sende- und Empfangselektrode<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup>erstellt mit PADS Power PCB 3.0

## B.1 Layout Sendeelektrode 16 Segmente

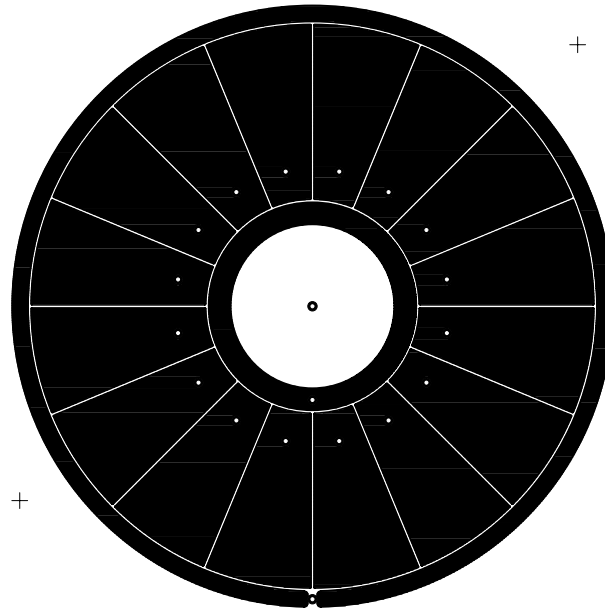


Abbildung B.1: Layout Sendeelektrode mit 16-Segmenten Vorderseite  
Radien in mm von außen nach innen: 48.35 - 44.5 - 44.3 - 17.0 - 16.8 - 13

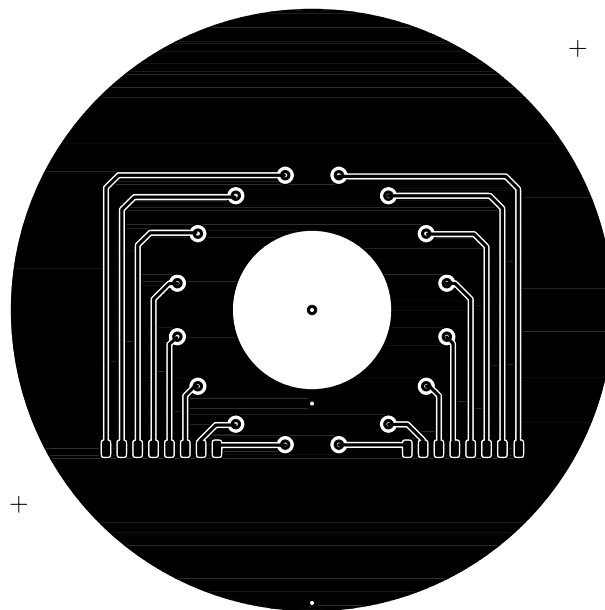


Abbildung B.2: Layout Sendeelektrode mit 16-Segmenten Hinterseite

## B.2 Layout Sendelektrode 32 Segmente

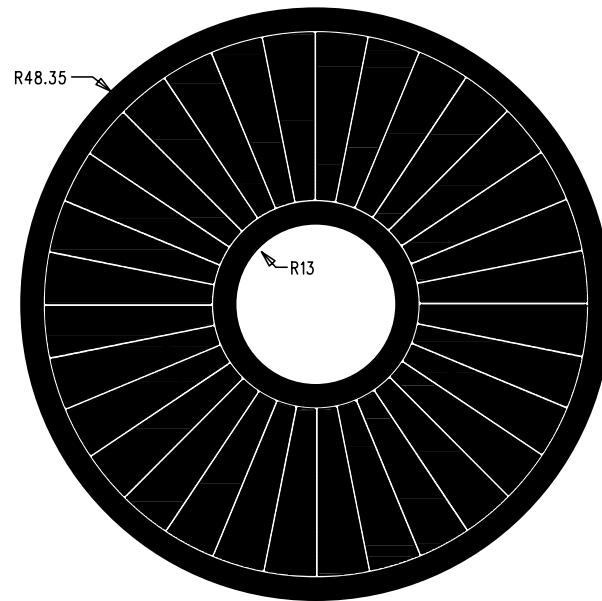


Abbildung B.3: Layout Sendelektrode mit 32-Segmenten Vorderseite  
Radien in mm von außen nach innen: 48.35 - 44.5 - 44.3 - 17.0 - 16.8 - 13

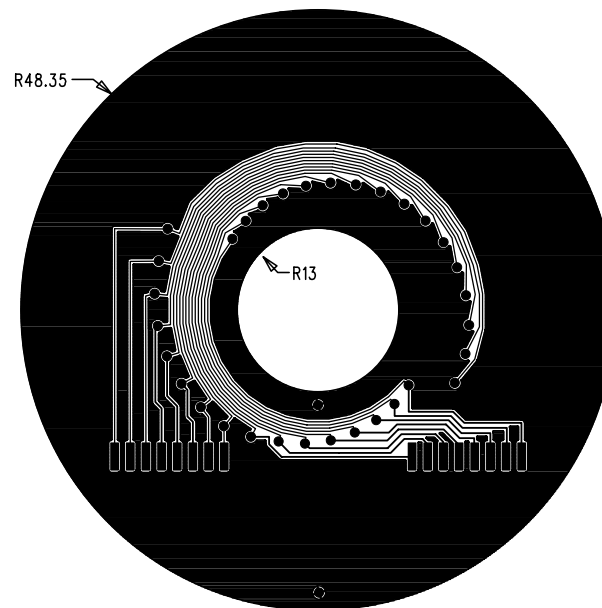


Abbildung B.4: Layout Sendelektrode mit 32-Segmenten Hinterseite

### B.3 Layout Empfangselektrode

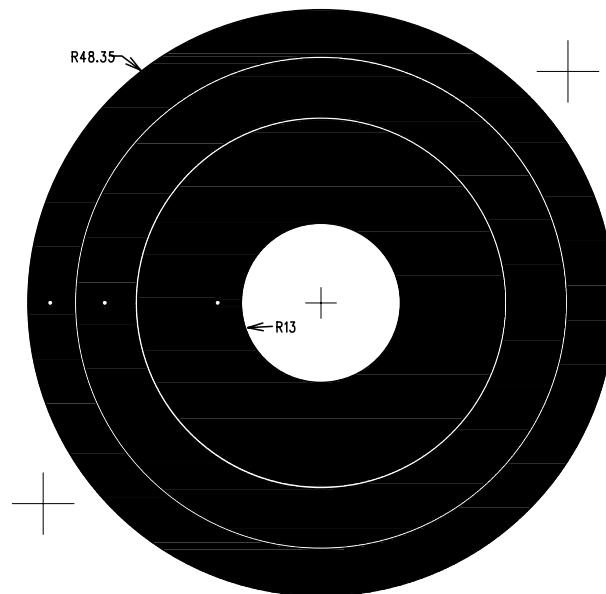


Abbildung B.5: Layout Empfangselektrode Vorderseite  
Radien in mm von außen nach innen: 48.35 - 40.5 - 40.3 - 30.5 - 30.3 - 13

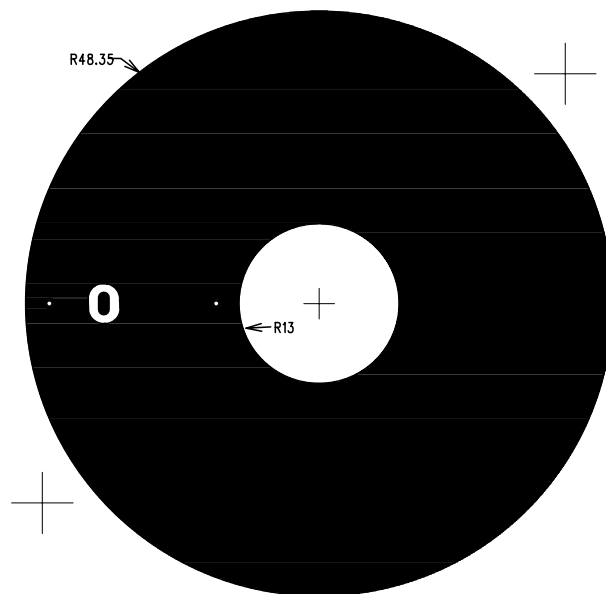


Abbildung B.6: Layout Empfangselektrode Hinterseite



# Anhang C

## MatLab-Programme

### C.1 DDE-Befehle in MatLab

Die fünf für die Funktion `mess_ms` (vgl. Kapitel 7.2.1) notwendigen DDE-Befehle sollen im Folgenden kurz beschrieben werden:

- **ddeinit** - Initiiert eine DDE-Kommunikation und wird durch  
`kanal = ddeinit('anwendung','thema')`  
aufgerufen. Wobei die Variable `kanal`, der dieser Kommunikation zugewiesene Handle ist. Der String `'anwendung'` enthält den Namen des Programmes mit dem kommuniziert wird und der String `'thema'` den Namen des Gegenstandes der Kommunikation innerhalb dieser Anwendung.
- **ddeterm** - Beendet eine DDE-Kommunikation und wird durch  
`rk = ddeterm(kanal)`  
aufgerufen. Die Variable `kanal` ist dabei, der durch den Befehl `ddeinit` erzeugte, Handle und die Variable `rk` der Rückgabewert, der im Falle einer erfolgreichen Befehlsausführung den logischen Wert `'1'` und im Fehlerfall den logischen Wert `'0'` annimmt.
- **ddereq** - Fordert Daten von der in die DDE-Kommunikation eingebundenen Anwendung. Der Befehlssyntax lautet:  
`data=ddereq(kanal,'element',format,timeout)`  
Die Argumente dieses Befehls sind:
  - `data`... Variable, welche die angeforderten Daten enthält, im Fehlerfall bleibt die Variable unbeschrieben.
  - `kanal`... ist der Handle der DDE-Kommunikation.
  - `'element'`... ist ein String, der die angeforderten Daten innerhalb der Anwendung spezifiziert.
  - `format`... ist ein optionales Argument bestehend aus einem zweielementigen Vektor der das Datenformat der zu übergebenden Daten bestimmt. Mit dem Vektor `[1 1]` wird die Variable `data` als String übergeben.

- **timeout**...ist ebenfalls ein optionales Argument und gibt das Zeitlimit für die Datenübertragung in Millisekunden an. Wird die Zeit überschritten, so wird die Anforderung abgebrochen und die Rückgabebvariable **data** bleibt unbeschrieben.
- **ddepoke** - Sendet Daten zur Anwendung. Der Befehlssyntax lautet:  
**rk=ddepoke(kanal,'element',data,format,timeout)**  
Die Argumente dieses Befehls sind:
  - **rk**...Rückgabewert, der im Falle einer erfolgreichen Befehlsausführung den logischen Wert `'1'` und im Fehlerfall den logischen Wert `'0'` annimmt.
  - **kanal**...ist der Handle der DDE-Kommunikation
  - **'element'**...ist ein String, der den Eintrag, an den die Daten innerhalb der Anwendung gerichtet sind, spezifiziert.
  - **data**...Variable, welche die zu sendenden Daten enthält.
  - **format**...ist ein optionales Argument, bestehend aus einem zweielementigen Vektor, der das Datenformat der zu übergebenden Daten bestimmt. Mit dem Vektor `[1 1]` wird die Variable **data** als String übergeben.
  - **timeout**...ist ebenfalls ein optionales Argument und gibt das Zeitlimit für die Datenübertragung in Millisekunden an. Wird die Zeit überschritten so wird die Übertragung abgebrochen und der Rückgabewert **rk** auf logisch `'0'` gesetzt.
- **ddeexec** - Sendet einen String für einen Befehlsaufruf innerhalb der Anwendung mit der kommuniziert wird. Der Befehlssyntax lautet:  
**rk=ddeexec(kanal,'command','element',timeout)**  
Die Argumente dieses Befehls sind:
  - **rk**...Rückgabewert, der im Falle einer erfolgreichen Befehlsausführung den logischen Wert `'1'` und im Fehlerfall den logischen Wert `'0'` annimmt.
  - **kanal**...ist der Handle der DDE-Kommunikation
  - **'command'**...ist ein String, der den Befehl innerhalb der Anwendung spezifiziert.
  - **'element'**...ist ein String, der den Eintrag, an den der Befehl innerhalb der Anwendung gerichtet ist, spezifiziert. Dieses Argument ist optional, hängt vom angesprochenen DDE-Server ab und wird hier nicht verwendet.
  - **timeout**...ist ebenfalls ein optionales Argument und gibt das Zeitlimit für die Befehlsausführung in Millisekunden an. Wird die Zeit überschritten, so wird die Übertragung abgebrochen und der Rückgabewert **rk** auf den logischen Wert `'0'` gesetzt.

## C.2 Meßroutine - `mess_ms.m`

### C.2.1 Aufruf- und Parameterbeschreibung

Der Aufruf der Meßroutine `mess_ms` erfolgt durch

```
[data]=mess_ms(data,start,fin,step,repeat,stepnr)
```

mit den Parametern:

- `data` ... Variable mit Datensatz bis `stepnr - 1` (Übergabevariable)
- `start` ... Anfangswinkel
- `fin` ... Endwinkel
- `step` ... Winkelschrittweite
- `repeat` ... Wiederholrate der Einzelmessung
- `stepnr` ... Index für Relativwinkleinstellung (bzw. eines beliebigen anderen Parameters der Sensoranordnung).

Als Ausgabe liefert die Funktion `messen_ms` ein mehrdimensionale Liste `[data]`, die die folgenden Werte enthält:

- `data.offset` ... Segmentoffset zum entsprechenden Absolutwinkel
- `data.phi` ... gemessener Absolutwinkel (Mittelwert aus `repeat` Messungen)
- `data.sdev` ... Standardabweichung zum gemessenen Absolutwinkel
- `data.dphi` ... gemessener Relativwinkel (Mittelwert aus `repeat` Messungen)
- `data.dsdev` ... Standardabweichung zum gemessenen Relativwinkel
- `data.refphi` ... gemessener Referenzwinkel (Mittelwert aus `repeat` Messungen)
- `data.refsdev` ... Standardabweichung zum gemessenen Referenzwinkel
- `data.seg` ... Segmentwert (Mittelwert aus `repeat` Messungen)
- `data.segdev` ... Standardabweichung zu den Segmentwerten

### C.2.2 Programmlisting

```
function [data]=mess_ms(data,start,fin,step,repeat,stepnr);
%[data]=mess_ms(data,start,fin,step,repeat,stepnr);
%start ... start angle
%fin..... final angle
%step..... step width
%repeat... repetition rate of single segment measurement
```

```

%stepnr... step-number geometric parameter variation
% This function is used to initialize a datastructure containing
% the angle, difference angle and the segmentvalues in dependence
% of a variable geometric parameter.
% Stepnr is the number of the measured line in the datastructure
% matrix (one stepnr for each different geomtric parameter
% for example: relative angle applied to rotors with the
% positioning unit).
% The function calls a Delphi program (Project1) via DDE to read
% out the sensor-datas, and initializes the datastructure.
% The datastructure contains:
%           Segementoffset
%           absolute angle: phi (mean, std)
%           relative angle: dphi (mean, std)
%           reference angle: refphi (mean, std)
%           the segmentvalues (mean, std).

c=ddeinit('Project1','Messplatz');
%Initiate DDE conversation and returns channel handle
%Project1: program with DDE-Server, Messplatz: unit in Project1
ddeexec(c,'GetBaldwin');
startangle=ddereq(c,'GetBaldwin',[1 1],10000);
%Get value for automatic repositioning
%GetBaldwin: execution command in Project1
line=1; for i=start:step:fin
    ddepoke(c,'SetAngle',i,[1 1],60000);
    pause(0.5)
    for l=1:repeat
        ddeexec(c,'GetBaldwin');
        dummy=ddereq(c,'GetBaldwin',[1 1],10000);
        d=sscanf(dummy,' %g');
        bald(l)=d;
        pause(0.02);
        ddeexec(c,'GetSensor');
        dummy=ddereq(c,'GetSensor',[1 1],1000);
        dummm=sscanf(dummy,' %g');
        aphi(l)=dummm(2)/1000;
        adphi(l)=dummm(3)/1000;
        for ii=1:16
            sw(l,ii)=dummm(3+ii);
        end;
    end;
% Segementoffset
data.offset(line,stepnr)=dummm(1);
% absolute angle (mean)
data.phi(line,stepnr)=mean(aphi);

```

```

% absolute angle (std)
data.sdev(line,stepnr)=std(aphi);
% relative angle (mean)
data.dphi(line,stepnr)=mean(adphi);
% relative angle (std)
data.dsdev(line,stepnr)=std(adphi);
% reference angle (mean)
data.refphi(line,stepnr)=mean(bald);
%reference angle (std)
data.refsdev(line,stepnr)=std(bald);
%Segmentvalue (mean)
data.seg(line,stepnr,1:16)=mean(sw(:,1:16));
%Segmentvalue (mean)
data.segdev(line,stepnr,1:16)=std(sw(:,1:16));
line=line+1;
end;
ddepoke(c,'SetAngle',startangle,[1 1],60000);
%Set axis back in startposition
ddeterm(c);
% Closes the DDE-Communication
% Ploting the angle- and relativangleerror:
figure(1);
plot(data.refphi(:,stepnr),data.dphi(:,stepnr)-mean(data.dphi(:,stepnr)));
title('Relativwinkelfehler');
xlabel('Referenzwinkel in Grad');
ylabel('Relativwinkelfehler in Grad');
figure(2);
plot(data.refphi(:,stepnr),
      ((mod(data.phi(:,stepnr)-data.refphi(:,stepnr)+9,18)-9)
       -mean(mod(data.phi(:,stepnr)-data.refphi(:,stepnr)+9,18)-9)));
title('Absolutwinkelfehler');
xlabel('Referenzwinkel in Grad');
ylabel('Absolutwinkelfehler in Grad');

```

## C.3 Segmentauswertung - `seg_ms.m`

### C.3.1 Aufruf- und Parameterbeschreibung

Der Aufruf der Funktion `seg_ms` erfolgt durch

```
[dataseg]=seg_ms(data,beginangle,endangle,firststep,laststep,cal)
```

mit den Parametern:

- `data` ... Variable mit Datensatz, der mit der Meßroutine `mess_ms` erstellt wurde und die Segmentwerte enthält.
- `beginangle` ... Anfangsreferenzwinkel von dem berechnet werden soll.
- `endangle` ... Endreferenzwinkel von dem berechnet werden soll.
- `firststep` ... Anfangsreferenzrelativwinkel (durch `stepnr` angegeben) von dem berechnet werden soll.
- `laststep` ... Endreferenzrelativwinkel (durch `stepnr` angegeben) von dem berechnet werden soll.
- `cal` ... Kalibrationsparameter (`cal=0` für Berechnung ohne Kalibrierung, `cal=1` für Berechnung mit Kalibrierung).

Als Ausgabe liefert die Funktion `seg_ms` ein mehrdimensionale Liste `[dataseg]`, die die folgenden Werte enthält:

- `dataseg.refphi` ... gemessener Referenzwinkel (Mittelwert aus `repeat` Messungen)
- `dataseg.seg` ... Segmentwerte (Mittelwert aus den `repeat` Einzelmessung)
- `dataseg.offset` ... berechneter Segmentoffset zum entsprechenden Absolutwinkel
- `dataseg.phi` ... berechneter Absolutwinkel
- `data.dphi` ... berechneter Relativwinkel

### C.3.2 Programmlisting - `seg_ms.m`

```
function[dataseg]=seg_ms(data,beginangle,endangle,firststep,laststep,relsw,cal)
%[dataseg]=seg_ms(data,beginangle,endangle,firststep,laststep,relsw)
%data...name of datastructure built with mess_ms.m
%beginangle...start angle
%endangle...final angle
%firststep...start index
%laststep...final index
%relsw...step width of relativ angle positioning (in 1/relsw degrees)
%cal...cal = 0 for calculating without recalibration of the segmentvalues
%      cal = 1 for calculating with recalibration of the segmentvalues
```

```

% This function is used to take the segment values of the old
% datastructure to calculate segmentoffset, absolute angle(phi)
% relative angle (dphi) and create a new datastructure containing
% this calculated values. The new datastructure also work
% with plot_ms.m.
% SEE ALSO: rough.m, fine.m, recal.m, evaloffset.m, evalphi.m
%           mess_ms.m, plot_ms.m

if (nargin<7)
    error(' ERROR in seg_ms(data... : Wrong number of input arguments');
end; if (cal == 0)
    a=1;
elseif (cal == 1)
    a=1;
else
    a=0;
end; if a == 0
    error(' ERROR in seg_ms(data... : Wrong cal argument (only 0 or 1)');
end;

%Building new datastructure [dataseg]
dataseg.dphi=data.dphi(beginangle:endangle,firststep:laststep);
dataseg.seg=data.seg(:,firststep:laststep,:);
dataseg.refphi=data.refphi(:,firststep:laststep);

%Calculating offset, phi and dphi:
if (cal == 1)
    dataseg=recal(dataseg);
end;
dataseg=evaloffset(dataseg,[-3 -1 3 3 3 1 -3 -3 -3 -3
    1 3 3 3 -1 -3],32); dataseg=evalphi(dataseg,32);

```

### C.3.3 Programmlisting - evaloffset.m

```
function data=evaloffset(data,matched,typ);
%data=evaloffset(data,matched,typ);
%data...structure containing the segmet-values
%matched...structure containing the 16 values of zero-position
%typ...number of sensor-segments
% This function computes the interpolation interval
% offset values for the data structure using the rough-algorithm.
% SEE ALSO: rough.m, fine.m, recal.m, evaloffset.m, evalphi.m
%           mess_ms.m, plot_ms.m, seg_ms.m

[a b c]=size(data.seg); for i1=1:a
    for i2=1:b
        for i3=1:16 segline(i3)=data.seg(i1,i2,i3);end;
        data.offset(i1,i2)=rough(segline,matched,typ);
    end;
end;
```

### C.3.4 Programmlisting - rough.m

```
function offset=rough(c,matched,typ);
%offset=rough(c,matched,typ);
%c...structure containing the 16 segmentvalues
%matched...structure containing the 16 values of zero-position
%typ...number of sensor-segments
% This function computes interpolation interval offset values.
% SEE ALSO: rough.m, fine.m, recal.m, evaloffset.m, evalphi.m
%           , mess_ms.m, plot_ms.m, seg_ms.m

[a,i]=max(filter(matched+4,1,[c c]));
offset=i-16;
```

### C.3.5 Programmlisting - evalphi.m

```
function data=evalphi(data,typ);
%data=evalphi(data,typ);
%data...structure containing the segmet-values
%typ...number of sensor-segments
% This function computes the angle from data structure
% using the fine-algorithm.
% SEE ALSO: rough.m, fine.m, recal.m, evaloffset.m, evalphi.m
%           mess_ms.m, plot_ms.m, seg_ms.m

[a b c]=size(data.seg); for i1=1:a
    for i2=1:b
        for i3=1:16
```



```

        segline(i3)=data.seg(i1,i2,i3);
    end;
    [phi,dphi]=fine(segline,data.offset(i1,12),typ);
    data.phi(i1,i2)=phi;
    data.dphi(i1,i2)=dphi;
end;
end;

```

### C.3.6 Programmlisting - fine.m

```

function [phi,dphi]=fine(c,offset,typ);
%[phi,dphi]=fine(c,offset,typ);
%c...vector containing the 16 segment samples
%offset...offset of the interpolation area
%typ...number of sensor-segments
% This function computes the absolute and relative angle
% of the rotorposition.
% SEE ALSO: rough.m, fine.m, recal.m, evaloffset.m, evalphi.m
%           mess_ms.m, plot_ms.m, seg_ms.m

% duplicates the segmentvalues
c=[c c];

% builds segment groups
q1=c(offset+ 0+1)+c(offset+ 1+1)
    +c(offset+ 2+1)+c(offset+3+1);
q2=c(offset+ 4+1)+c(offset+ 5+1)
    +c(offset+ 6+1)+c(offset+7+1);
q3=c(offset+8+1)+c(offset+9+1)
    +c(offset+10+1)+c(offset+11+1);
q4=c(offset+12+1)+c(offset+13+1)
    +c(offset+14+1)+c(offset+15+1);

phiplus=q2+q4;
phiminus=q1+q3;
dphiplus=q4+q1;
dphiminus=q2+q3;
%für inverse Vierflügelstruktur
mini=min([c(offset+15+1),c(offset+0+1),
    c(offset+7+1),c(offset+8+1)])*8;
%für Vierflügelstruktur
% mini=min(c(offset+15+1),c(offset+ 0+1))*4
%      +min(c(offset+7+1),c(offset+ 8+1))*4;
maxi=max(c(offset+3+1),c(offset+4+1))*4
    +max(c(offset+11+1),c(offset+12+1))*4;

```

```
% interpolates the absolute angular using the ratiometric-equation
phi= ( phiplus- phiminus)/(maxi-mini)*45;
if
(phi+offset*22.5>0)
    phi=phi+offset*22.5;
else
    phi=phi+offset*22.5+360;
end;
phi=phi*16/typ;

% interpolates the relative angular using the ratiometric-equation
dphi=(dphiplus-dphiminus)/(maxi-mini)*90-15;
dphi=dphi*16/typ;
```

### C.3.7 Programmlisting - recal.m

```
function data=recal(data);
%data=recal(data);
%data...structure containing the segmet-values
% This function recalibrates the data of data structure to improve
% the algorithm-results.
% SEE ALSO: rough.m, fine.m, recal.m, evaloffset.m, evalphi.m
%          mess_ms.m, plot_ms.m, seg_ms.m

[a b c]=size(data.seg); for i1=1:a
    for i2=1:b
        for i3=1:c
            data.seg(i1,i2,i3)=(data.seg(i1,i2,i3)-min(data.seg(:,i2,i3)))
                /(max(data.seg(:,i2,i3))-min(data.seg(:,i2,i3)))*2500+3000;
        end;
    end;
end;
```

## C.4 Grafische Auswertung - plot\_ms.m

### C.4.1 Aufruf- und Parameterbeschreibung

Der Aufruf der Auswertefunktion `plot_ms` erfolgt durch

```
plot_ms(data,beginangle,endangle,firststep,laststep,relsw,bem)
```

mit den Parametern:

- `data` ... Variable mit Datensatz, der mit der Meßroutine `mess_ms` bzw. mit der Funktion `seg_ms` erstellt wurde.
- `beginangle` ... Anfangswinkelsreferenzwinkel von dem dargestellt werden soll.
- `endangle` ... Endreferenzwinkel von dem dargestellt werden soll.
- `firststep` ... Anfangsreferenzrelativwinkel (durch `stepnr` angegeben) von dem dargestellt werden soll.
- `laststep` ... Endreferenzrelativwinkel (durch `stepnr` angegeben) von dem dargestellt werden soll.
- `relsw` ... Schrittweite des Referenzrelativwinkels mit der die Messung vorgenommen wurde.
- `bem` ... String zur Beschriftung der Diagramme

### C.4.2 Programmlisting

```
function
plot_ms(data,beginangle,endangle,firststep,laststep,relsw,bem)
%plot_ms4(data,beginangle,endangle,firststep,laststep,relsw,bem)
%data...name of datastructure built with mess_ms.m
%beginangle...start angle
%endangle...final angle
%firststep...start index
%laststep...final index
%relsw...step width of relativ angle positioning (in 1/relsw degrees)
%bem...is a string containing a note added to the plot-title
%This function plot_ms is used to show the measurement results
%stored in a datastructure built by mess_ms.m or seg_ms.m.
% SEE ALSO: mess_ms.m or seg_ms.m

%building new variable within the given boarders
wolf.offset=data.offset(beginangle:endangle,firststep:laststep);
wolf.phi=data.phi(beginangle:endangle,firststep:laststep);
wolf.dphi=data.dphi(beginangle:endangle,firststep:laststep);
wolf.refphi=data.refphi(beginangle:endangle,firststep:laststep);
wolf.seg=data.seg(beginangle:endangle,firststep:laststep,:);
```

```

%calculates refdphi out of the stepnr-index
wolf.refdphi=mean(wolf.dphi(:,1))+(1:laststep-firststep+1)/reldsw-1/reldsw;
%calculates the dphierror
[phipoints dhipoints]=size(wolf.dphi);
wolf.dphierror=(wolf.dphi-(ones(hipoints,1)*wolf.refdphi));
wolf.dphierror=wolf.dphierror-mean(mean(wolf.dphierror(:)));
%calculates the phierror
wolf.phiout=wolf.phi+(wolf.dphi/2)
wolf.phierror=(wolf.phiout-wolf.refphi);
wolf.phierror=(mod(wolf.phierror+9,18)-9);
wolf.phierror=wolf.phierror-mean(wolf.phierror(:));

%Plotting a 3D-Field of dphierror depending on the
%reference angle and reference relative angel
figure;
surf(wolf.refdphi,mean(wolf.refphi'),wolf.dphierror);
%refmax=mean(max(wolf.refphi));
%refmin=mean(min(wolf.refphi));
%title(['Relativwinkelfehlerfeld ' bem]);
xlabel('Referenzrelativwinkel in Grad');
ylabel('Referenzabsolutwinkel in Grad');
zlabel('Relativwinkelabweichung in Grad');
MaxPosRWFehler=max(max(wolf.dphierror))
MaxNegRWFehler=min(min(wolf.dphierror))
%Plotting a contour field of dphierror depending on the
%reference angle and reference relative angel
figure;
%subplot(2,2,4);
[c1,h1]=contour(wolf.refphi(:,1),wolf.refdphi,wolf.dphierror');
clabel(c1,h1); colorbar;
%title(['Relativwinkelfehlerfeld ' bem]);
xlabel('Referenzabsolutwinkel in Grad');
ylabel('Referenzrelativwinkel in Grad');

%Plotting the mean-dphierror depending on the reference angle
figure;
%subplot(2,2,2);
plot(wolf.refphi(:,1),mean(wolf.dphierror'));
ylabel('Mittlere Relativwinkelabweichung in Grad');
xlabel('Referenzabsolutwinkel in Grad');

%Plotting the mean-dphierror depending on the reference relative angle
figure;
%subplot(2,2,3);
plot(wolf.refdphi,mean(wolf.dphierror));
xlabel('Referenzrelativwinkel in Grad'); ylabel('Mittlere

```

```

Relativwinkelabweichung in Grad');

%Plotting a 3D-Field of phierror depending on the
%reference angle and reference relative angel
figure;
surf(wolf.refdphi,mean(wolf.refphi'),wolf.phierror);
%title(['Winkelfehlerfeld ' bem]);
xlabel('Referenzrelativwinkel in Grad');
ylabel('Referenzabsolutwinkel in Grad');
zlabel('Absolutwinkelabweichung in Grad');
MaxPosWFehler=max(max(wolf.phierror))
MaxNegWFehler=min(min(wolf.phierror))

%Plotting a contour field of phierror depending on the
%reference angle and reference relative angel
figure;
%subplot(2,2,4);
[c2,h2]=contour(wolf.refphi(:,1),wolf.refdphi,wolf.phierror');
clabel(c2,h2); colorbar;
%title(['Winkelfehlerfeld ' bem]);
xlabel('Referenzabsolutwinkel in Grad');
ylabel('Referenzrelativwinkel in Grad');

%Plotting the mean-phierror depending on the reference angle
figure;
%subplot(2,2,3);
plot(wolf.refdphi,mean(wolf.phierror));
xlabel('Referenzrelativwinkel in Grad'); ylabel('Mittlere
Absolutwinkelabweichung in Grad');

%Plotting the mean-phierror depending on the reference relative angle
figure;
%subplot(2,2,2);
plot(wolf.refphi(:,1),mean(wolf.phierror'));
xlabel('Referenzabsolutwinkel in Grad'); ylabel('Mittlere
Absolutwinkelabweichung in Grad');

%Plotting the Segmentvalues (of one segment,
%at one relative angle) over absolut angle
figure;
%subplot(2,2,2);
plot(wolf.refphi(:,1),wolf.seg(:,round((firststep+laststep)/2),4));
xlabel('Referenzabsolutwinkel in Grad');
ylabel('Segmentwerte (4. Segment, dphi=0°)');

```

## C.5 Simulation

### C.5.1 Programmlisting - U\_Platte.m (lt. [CER99])

```
function [U]=U_Platte(breit,hoch,tief,mitte,Q,x,y,points);
%[U]=U_Platte(breit,hoch,tief,mitte,Q,x,y,points);
%breit...Breite eines Plattenelements
%h...Abstand der Platte vom Empfänger
%tief...Tiefe der Platte
%mitte...Mittenposition der Platte
%Q...beaufschlagte Ladung
%x...x-Koordinate des Aufpunktes
%y...y-Koordinate des Aufpunktes
%points...Zahl der Integrationspunkte
%Vgl. Cse_Verkipfung, Csemax, VarRotorhoch

k=Q/(1.11265005605e-10*tief*(breit/4));
x1=x-mitte;
b2_x=(breit/2-x1);
b_2_x=(-breit/2-x1);
U=0;
%points=100;
y=y*(0:1/points:1);
y1=y-hoch;
for i=1:points
    if (y1(i)~=0)
        U=U+(atan(b2_x/(y1(i)))-atan((b_2_x)/(y1(i))));
    else
        U=U+pi/2*(sign(b2_x)-sign(b_2_x));
    end
end;
U=U*k*max(y)/points;
```

### C.5.2 Programmlisting - BerechneCSE.m (lt. [CER99])

```
function [Cs,Cr]=BerechneCse(rp,rotorhoch,hoch);

Senderbreit=6e-3;
%hoch=6e-3;
tief=10e-3;
Rotorbreit=4*Senderbreit;
Rotorteile=64;
Senderteile=16;
Rechenpunkte=2;
%function [U]=U_Platte(breit,hoch,tief,mitte,Q,x,y);
Q=1; IntWegSender=0:hoch/Rechenpunkte:hoch;
for
```

```

Senderteil=1:Senderteile
    Sendermitte= -Senderbreit/2-Senderbreit/Senderteile/2
                +Senderbreit/Senderteile*Senderteil;

    for Senderteil2=1:Senderteile
        Sendermitte2=-Senderbreit/2-Senderbreit/Senderteile/2
                    +Senderbreit/Senderteile*Senderteil2;
        [intpunkte]=U_Platte(Senderbreit/Senderteile,
            hoch,tief,Sendermitte2, Q,Sendermitte,IntWegSender);
        k(Senderteil,Senderteil2)=intpunkte;
        [intpunkte]=U_Platte(Senderbreit/Senderteile,
            -hoch,tief,Sendermitte2,-Q,Sendermitte,IntWegSender);
        k(Senderteil,Senderteil2)=k(Senderteil,Senderteil2)+intpunkte;
    end;

    for teilrotor=1:Rotorteile
        Rotx=rp-Rotorbreit/2-Rotorbreit/Rotorteile/2
            +teilrotor*Rotorbreit/Rotorteile;
        [intpunkte]=U_Platte(Rotorbreit/Rotorteile,
            rotorhoch,tief,Rotx, Q,Sendermitte,IntWegSender);
        k(Senderteil,teilrotor+Senderteile)=intpunkte;
        [intpunkte]=U_Platte(Rotorbreit/Rotorteile,
            -rotorhoch,tief,Rotx,-Q,Sendermitte,IntWegSender);
        k(Senderteil,teilrotor+Senderteile)=
            k(Senderteil,teilrotor+Senderteile)+intpunkte;
    end;

    for teilrotor=1:Rotorteile
        Rotx=rp-Rotorbreit/2-Rotorbreit/Rotorteile/2
            +teilrotor*Rotorbreit/Rotorteile+2*Rotorbreit;
        [intpunkte]=U_Platte(Rotorbreit/Rotorteile,
            rotorhoch,tief,Rotx, Q,Sendermitte,IntWegSender);
        k(Senderteil,teilrotor+Senderteile+Rotorteile)=(intpunkte);
        [intpunkte]=U_Platte(Rotorbreit/Rotorteile,
            -rotorhoch,tief,Rotx,-Q,Sendermitte,IntWegSender);
        k(Senderteil,teilrotor+Senderteile+Rotorteile)=
            k(Senderteil,teilrotor+Senderteile+Rotorteile)+(intpunkte);
    end;
end;
IntWegRotor=0:rotorhoch/Rechenpunkte:rotorhoch;
for
teilrotor=1:Rotorteile
    Rotx=rp-Rotorbreit/2-Rotorbreit/Rotorteile/2
        +teilrotor*Rotorbreit/Rotorteile;
    for Senderteil=1:Senderteile
        Sendermitte=-Senderbreit/2-Senderbreit/Senderteile/2

```

```

        +Senderbreit/Senderteile*Senderteil;
[intpunkte]=U_Platte(Senderbreit/Senderteile,
        hoch,tief,Sendermitte, Q,Rotx,IntWegRotor);
k(Senderteile+teilrotor,Senderteil)=(intpunkte);
[intpunkte]=U_Platte(Senderbreit/Senderteile,
        -hoch,tief,Sendermitte,-Q,Rotx,IntWegRotor);
k(Senderteile+teilrotor,Senderteil)=
        k(Senderteile+teilrotor,Senderteil)+(intpunkte);
end;
for teilrotor2=1:Rotorteile
    Rotx2=rp-Rotorbreit/2-Rotorbreit/Rotorteile/2
        +teilrotor2*Rotorbreit/Rotorteile;
[intpunkte]=U_Platte(Rotorbreit/Rotorteile,
        rotorhoch,tief,Rotx2, Q,Rotx,IntWegRotor);
k(Senderteile+teilrotor,Senderteile+teilrotor2)=(intpunkte);
[intpunkte]=U_Platte(Rotorbreit/Rotorteile,
        -rotorhoch,tief,Rotx2,-Q,Rotx,IntWegRotor);
k(Senderteile+teilrotor,Senderteile+teilrotor2)=
        k(Senderteile+teilrotor,Senderteile+teilrotor2)+(intpunkte);
end;
for teilrotor2=1:Rotorteile
    Rotx2=rp-Rotorbreit/2-Rotorbreit/Rotorteile/2
        +teilrotor2*Rotorbreit/Rotorteile+2*Rotorbreit;
[intpunkte]=U_Platte(Rotorbreit/Rotorteile,
        rotorhoch,tief,Rotx2, Q,Rotx,IntWegRotor);
k(Senderteile+teilrotor,Senderteile+teilrotor2+Rotorteile)
    =(intpunkte);
[intpunkte]=U_Platte(Rotorbreit/Rotorteile,
        -rotorhoch,tief,Rotx2,-Q,Rotx,IntWegRotor);
k(Senderteile+teilrotor,Senderteile+teilrotor2+Rotorteile)=
        k(Senderteile+teilrotor,Senderteile+teilrotor2+Rotorteile)
        +(intpunkte);
end;
end;
for teilrotor=1:Rotorteile
    Rotx=rp-Rotorbreit/2-Rotorbreit/Rotorteile/2
        +teilrotor*Rotorbreit/Rotorteile+2*Rotorbreit;
    for Senderteil=1:Senderteile
        Sendermitte=-Senderbreit/2-Senderbreit/Senderteile/2
            +Senderbreit/Senderteile*Senderteil;
        [intpunkte]=U_Platte(Senderbreit/Senderteile,
            hoch,tief,Sendermitte, Q,Rotx,IntWegRotor);
        k(Senderteile+teilrotor+Rotorteile,Senderteil)=(intpunkte);
        [intpunkte]=U_Platte(Senderbreit/Senderteile,
            -hoch,tief,Sendermitte,-Q,Rotx,IntWegRotor);
        k(Senderteile+teilrotor+Rotorteile,Senderteil)=

```



```

        k(Senderteile+teilrotor+Rotorteile,Senderteil)+(intpunkte);
    end;
    for teilrotor2=1:Rotorteile
        Rotx2=rp-Rotorbreit/2-Rotorbreit/Rotorteile/2
            +teilrotor2*Rotorbreit/Rotorteile;
        [intpunkte]=U_Platte(Rotorbreit/Rotorteile,
            rotorhoch,tief,Rotx2, Q,Rotx,IntWegRotor);
        k(Senderteile+teilrotor+Rotorteile,Senderteile+teilrotor2)
            =(intpunkte);
        [intpunkte]=U_Platte(Rotorbreit/Rotorteile,
            -rotorhoch,tief,Rotx2,-Q,Rotx,IntWegRotor);
        k(Senderteile+teilrotor+Rotorteile,Senderteile+teilrotor2)=
            k(Senderteile+teilrotor+Rotorteile,Senderteile+teilrotor2)
                +(intpunkte);
    end;
    for teilrotor2=1:Rotorteile
        Rotx2=rp-Rotorbreit/2-Rotorbreit/Rotorteile/2
            +teilrotor2*Rotorbreit/Rotorteile+2*Rotorbreit;
        [intpunkte]=U_Platte(Rotorbreit/Rotorteile,
            rotorhoch,tief,Rotx2, Q,Rotx,IntWegRotor);
        k(Senderteile+teilrotor+Rotorteile,Senderteile+teilrotor2+Rotorteile)
            =(intpunkte);
        [intpunkte]=U_Platte(Rotorbreit/Rotorteile,
            -rotorhoch,tief,Rotx2,-Q,Rotx,IntWegRotor);
        k(Senderteile+teilrotor+Rotorteile,Senderteile+teilrotor2+Rotorteile)=
            k(Senderteile+teilrotor+Rotorteile,Senderteile+teilrotor2+Rotorteile)
                +(intpunkte);
    end;
end;

U=(ones(1,Senderteile) zeros(1,Rotorteile*2));
C=(k^-1)*U';

Cs=-sum(C(1:Senderteile));
Cr=sum(C(Senderteile+1:Senderteile+2*Rotorteile));

```

### C.5.3 Programmlisting - Rotordrehen.m (lt. [CER99])

```

global tantab;
%disp('Lege Tangenstabelle an');
%for i=1:257
%    tantab(i)=atan((i-129)/2);
%end;
%disp('Tangenstabelle abgelegt')
start=cputime;
for i=-80:0;

```

```

    now=cputime;
    [c1,c2]=BerechneCse(i*0.3e-3,8.5e-3/2,8.5e-3);
    disp(['EinRotorrechenzeit ' num2str(cputime-now) 's Restzeit '
          num2str((cputime-start)/(i+81)*(-i)/60) 'Min'])
    Cse(i+81)=c1-c2;
    Cs(i+81)=c1;
    Cr(i+81)=c2;
end; x=(-80:80)/10;
figure;
plot(x,[Cse Cse(80:-1:1)]);

seg=[Cse Cse(79:-1:1)]; seg=[seg seg]; seg=[seg seg];
seg=[seg seg]; seg=[seg seg];

for i=1:8
    data.seg(i,1:320)=seg((1:320)+(i-1)*20);
end;
data.RefPhi=(((0:319)+0.5)/320*360)';
%data.max=max(data.seg);
%data.min=min(data.seg);
%data.span=data.max-data.min;
%data.realmax=max(data.max);
%data.realmin=min(data.min);
%data.realspan=data.realmax-data.realmin;
%data.prozentererror=data.realspan./data.span;
%data.phiererror=data.prozentererror.*((1:320)*360/320);

data.RefPhi=data.RefPhi+78.75;
data.RefPhi=mod(data.RefPhi,180);

data=EvalOffset(data); data=EvalPhi(data,'42.0');
data.Phiold=mod(data.Phiold,180);
data=EvalPhi(data,'42.1');
data.Phinew=mod(data.Phinew,180);

subplot(2,1,1);
plot(1:320,mod(data.Phiold-data.RefPhi'+90,180)-90);
subplot(2,1,2);
plot(1:320,mod(data.Phinew-data.RefPhi'+90,180)-90);

```

### C.5.4 Programmlisting - Cse\_Verkipfung.m

```
function
[Cse]=Cse_Verkipfung(Segmentbreite,Senderhoch,Sendertief,
Senderfinitanzahl,Rotorhoch,Rotorfinitanzahl,Intpunkte);
%[Cse]=Cse_Verkipfung(Segmentbreite,Senderhoch,Sendertief,
%Senderfinitanzahl,Rotorhoch,Rotorfinitanzahl,Intpunkte);
%Segmentbreite...Breite eines Segments
%Senderhoch...Abstand zwischen Sender und Empfänger
%Sendertief...Tiefe eines Segments
%Senderfinitzahl...Zahl der Einzelplatten des Senders
%Rotorhoch...Abstand zwischen Rotor und Empfänger
%Rotorfinitzahl...Zahl der Einzelplatten des Rotors
%Intpunkte...Zahl der Integrationspunkte bei der Spannungsberechnung
%Berechnet die Kapazität zwischen Sender- und Empfangselektrode,
%wobei die Breite der Senderelektrode 8*Segmentbreite angenommen
%wird und die Rotorbreite als 4*Segmentbreite.

Senderbreit=8*Segmentbreite;
Senderfinitbreit=Senderbreit/Senderfinitanzahl;
Rotorbreit=4*Segmentbreite;
Rotorfinitbreit=Rotorbreit/Rotorfinitanzahl;

Q=1;

for Senderteil=1:Senderfinitanzahl
    Sendermitte=-Senderbreit/2+(Senderteil-0.5)*Senderfinitbreit;
    for Senderteil2=1:Senderfinitanzahl
        Sendermitte2=-Senderbreit/2+(Senderteil2-0.5)*Senderfinitbreit;
        [U]=U_Platte(Senderfinitbreit, Senderhoch, Sendertief,
            Sendermitte2, Q,Sendermitte,Senderhoch,Intpunkte);
        k(Senderteil,Senderteil2)=U;
        [U]=U_Platte(Senderfinitbreit,-Senderhoch, Sendertief,
            Sendermitte2,-Q,Sendermitte,Senderhoch,Intpunkte);
        k(Senderteil,Senderteil2)=k(Senderteil,Senderteil2)+U;
    end;
    for Rotorteil2=1:Rotorfinitanzahl
        Rotormitte2=-Rotorbreit/2+(Rotorteil2-0.5)*Rotorfinitbreit;
        [U]=U_Platte(Rotorfinitbreit, Rotorhoch, Sendertief,
            Rotormitte2, Q,Sendermitte,Senderhoch,Intpunkte);
        k(Senderteil,Senderfinitanzahl+Rotorteil2)=U;
        [U]=U_Platte(Rotorfinitbreit,-Rotorhoch, Sendertief,
            Rotormitte2,-Q,Sendermitte,Senderhoch,Intpunkte);
        k(Senderteil,Senderfinitanzahl+Rotorteil2)=
            k(Senderteil,Senderfinitanzahl+Rotorteil2)+U;
    end;
end;
```

```

end;
for Rotorteil=1:Rotorfinitanzahl
    Rotormitte=-Rotorbreit/2+(Rotorteil-0.5)*Rotorfinitbreit;
    for Senderteil2=1:Senderfinitanzahl
        Sendermitte2=-Senderbreit/2+(Senderteil2-0.5)*Senderfinitbreit;
        [U]=U_Platte(Senderfinitbreit, Senderhoch, Sendertief,
            Sendermitte2, Q, Rotormitte, Rotorhoch, Intpunkte);
        k(Senderfinitanzahl+Rotorteil, Senderteil2)=U;
        [U]=U_Platte(Senderfinitbreit, -Senderhoch, Sendertief,
            Sendermitte2, -Q, Rotormitte, Rotorhoch, Intpunkte);
        k(Senderfinitanzahl+Rotorteil, Senderteil2)=
            k(Senderfinitanzahl+Rotorteil, Senderteil2)+U;
    end;
    for Rotorteil2=1:Rotorfinitanzahl
        Rotormitte2=-Rotorbreit/2+(Rotorteil2-0.5)*Rotorfinitbreit;
        [U]=U_Platte(Rotorfinitbreit, Rotorhoch, Sendertief,
            Rotormitte2, Q, Rotormitte, Rotorhoch, Intpunkte);
        k(Senderfinitanzahl+Rotorteil, Senderfinitanzahl+Rotorteil2)=U;
        [U]=U_Platte(Rotorfinitbreit, -Rotorhoch, Sendertief,
            Rotormitte2, -Q, Rotormitte, Rotorhoch, Intpunkte);
        k(Senderfinitanzahl+Rotorteil, Senderfinitanzahl+Rotorteil2)=
            k(Senderfinitanzahl+Rotorteil, Senderfinitanzahl+Rotorteil2)+U;
    end;
end;

U=([ones(1,Senderfinitanzahl) zeros(1,Rotorfinitanzahl)]);
C=(k^-1)*U';
Cse=-sum(C);

```

### C.5.5 Programmlisting - Csemax.m

```

function [Cse]=Csemax(Segmentbreite, Senderhoch,
    Sendertief, Senderfinitanzahl, Intpunkte);
%[Cse]=Csemax(Segmentbreite, Senderhoch, Sendertief,
%    Senderfinitanzahl, Intpunkte);
%Segmentbreite...Breite eines Segments
%Senderhoch...Abstand zwischen Sender und Empfänger
%Sendertief...Tiefe eines Segments
%Senderfinitzahl...Zahl der Einzelplatten des Senders
%Intpunkte...Zahl der Integrationspunkte bei der Spannungsberechnung
%Berechnet die Kapazität zwischen Sender- und Empfangselektrode,
%ohne Rotor, d. h. die maximale Kapazität.
%Die Breite der Senderelektrode wird 8*Segmentbreite angenommen.

Senderbreit=8*Segmentbreite;
Finitbreit=Senderbreit/Senderfinitanzahl;

```

```

Q=1;
for
Senderteil=1:Senderfinitanzahl
    Sendermitte=-Senderbreit/2+(Senderteil-0.5)*Finitbreit;
    for Senderteil2=1:Senderfinitanzahl
        Sendermitte2=-Senderbreit/2+(Senderteil2-0.5)*Finitbreit;
        [U]=U_Platte(Finitbreit, Senderhoch, Sendertief,
            Sendermitte2, Q, Sendermitte, Senderhoch, Intpunkte);
        k(Senderteil, Senderteil2)=U;
        [U]=U_Platte(Finitbreit, -Senderhoch, Sendertief,
            Sendermitte2, -Q, Sendermitte, Senderhoch, Intpunkte);
        k(Senderteil, Senderteil2)=k(Senderteil, Senderteil2)+U;
    end;
end;

U=(ones(1,Senderfinitanzahl));
C=(k^-1)*U';
Cse=-sum(C(1:Senderfinitanzahl));

```

### C.5.6 Programmlisting - VarRotorhoch.m

```

%Berechnet die Kapazität zwischen Sender- und
%Empfangselektrode bei verschiedenen Höhen des
%Rotorflügels.
%Segmentbreite...Breite eines Segments
%Senderhoch...Abstand zwischen Sender und Empfänger
%Sendertief...Tiefe eines Segments
%punkte...Anzahl der zu berechnenden Punkte

Segmentbreite=6e-3;
Senderhoch=5e-3;
Sendertief=10e-3;
punkte=200;

Senderfinitanzahl=64;
Rotorfinitanzahl=32;
Intpunkte=100;
disp('Berechne Csemax')
Capdata.Csemax=Csemax(Segmentbreite, Senderhoch,
    Sendertief, Senderfinitanzahl, Intpunkte);
disp('Starte Kapazitätsberechnung');
start=cputime;

Capdataindex=0;
for
Rotorhochrel=(1/(punkte+1)):(1/(punkte+1)):(1-1/(punkte+1));

```

```
Rotorhoch=Senderhoch*Rotorhochrel;  
Capdataindex=Capdataindex+1;  
Capdata.Rotorhoch(Capdataindex)=Rotorhoch;  
Capdata.Cse(Capdataindex)=Cse_Verkippung(Segmentbreite,Senderhoch,  
Sendertief,Senderfinitanzahl,Rotorhoch,Rotorfinitanzahl,Intpunkte);  
rechenzeit=start-cputime;  
restrechenzeit=rechenzeit/Capdataindex*(punkte-Capdataindex);  
disp([ 'Rechenzeit ' num2str(rechenzeit/60) 'Min,  
      Restzeit ' num2str(restrechenzeit/60) 'Min'])  
end;
```