

Dipl.-Ing. Aleksandar Knezevic, München

**Dickenschersensoren  
zur Bestimmung von  
Konzentrationsverhältnissen  
in Flüssigkeitsgemischen**

Reihe **8**: Meß-, Steuerungs-  
und Regelungstechnik

Nr. **666**

# Inhaltsverzeichnis

<b>Formelzeichen</b>	<b>IX</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Piezoelektrische Materialien in der Sensorik</b>	<b>5</b>
2.1 Piezoelektrizität	5
2.1.1 Piezoelektrischer Effekt	5
2.1.2 Elektromechanische Kopplung	6
2.1.3 Geschichte piezoelektrischer Materialien	6
2.2 Piezoelektrische Einkristalle	7
2.2.1 Quarz	8
2.2.2 Turmalin	10
2.2.3 Weitere Piezoelektrische Einkristalle	11
2.3 Piezoelektrische Keramiken	11
2.4 Polymerfilme	13
2.5 Vergleich der Materialien	14
<b>3 Wechselwirkung des Dickenschersresonators mit dem ihn benetzenden Medium</b>	<b>16</b>
3.1 Schwingquarz ohne äußere Dämpfung	16
3.2 Massenlagerung an der Quarzelektrode	17
3.3 Wechselwirkung des Quarzes mit der die Elektroden benetzenden Flüssigkeit	19
3.3.1 Polierte (glatte) Quarzelektrode	21
3.3.1.1 Unbedämpfter Quarz	21
3.3.1.2 Einseitige Benetzung des Quarzes mit Flüssigkeit	23
3.3.2 Parallel zur Bewegungsrichtung strukturierte Elektrode	28
3.3.3 Senkrecht zur Bewegungsrichtung strukturierte Elektrode	31
3.3.4 Rauhe Oberfläche	34
3.4 Viskoelastische Kopplung	37

<b>4</b>	<b>Quarzmikrowaage</b>	<b>38</b>
4.1	Betriebsarten der Quarzmikrowaage	38
4.1.1	Impedanzanalyse des Quarz-Zweipols	38
4.1.1.1	Ersatzschaltbild des unbedämpften Quarzes	38
4.1.1.2	Ersatzschaltbild bei viskoser Kopplung	41
4.1.1.3	Ersatzschaltbild bei gleichzeitiger viskoser Kopplung und Massenlagerung	41
4.1.2	Oszillatorbetrieb	42
4.1.2.1	Schwingbedingung	42
4.2	Oszillatorschaltung	44
4.2.1	Anforderung an die Oszillatorschaltungen	44
4.2.2	Oszillatorschaltungstypen	47
4.2.3	Vergleich mehrerer Oszillatorschaltungen	48
4.2.4	Verwendete Oszillatorschaltung	50
4.3	Vergleich zwischen Impedanzanalyse und Oszillatorbetrieb des Quarzes	53
<b>5</b>	<b>Bestimmung von Konzentrationsverhältnissen in Flüssigkeiten auf der Basis der Quarzmikrowaage mit glatten Elektroden</b>	<b>54</b>
5.1	Sensor	55
5.1.1	Meßkopf	56
5.1.2	Sensoranordnung	58
5.1.2.1	Frequenzmischer	58
5.1.2.2	Frequenz/Spannungs-Wandler	59
5.1.2.3	Temperaturkompensation	59
5.2	Meßplatz	60
5.2.1	Meßaufbau	60
5.2.2	Meßwerterfassung	61
5.3	Meßmedium	62
5.4	Messungen	63
5.4.1	Erwartetes Ansprechverhalten des Sensors	63
5.4.2	Gemessenes Ansprechverhalten des Sensors	65
5.4.2.1	Temperaturkennlinien	65
5.4.2.2	Stabilität des Sensorsignals	67

5.4.2.3	Genauigkeit	68
5.4.2.4	Reproduzierbarkeit	68
5.5	Weitere Einflußfaktoren auf das Sensorsignal	70
5.5.1	Kabelkapazitäten	70
5.5.2	Rauhigkeit	71
5.5.3	Leitfähigkeit der Flüssigkeit	72
5.5.3.1	Randkapazität	72
5.5.3.2	Doppelschichtkapazität	74
5.5.3.3	Nebenschluß	74
5.5.4	Temperatur	77
5.5.5	Resonanzen	77
<b>6</b>	<b>Herstellung strukturierter Quarzelektroden</b>	<b>80</b>
6.1	Geätzte Goldstruktur	81
6.1.1	Photolithographische Prozeßschritte	81
6.1.2	Messung des Strukturprofils	83
6.1.3	Bestimmung der Ätzrate	84
6.2	Elektrochemisch gewachsene Goldstruktur	84
6.2.1	Photolithographische Prozeßschritte	84
6.2.2	Galvanische Abscheidung der Goldstruktur	85
6.2.3	Ermittlung der Strukturhöhe	89
<b>7</b>	<b>Bestimmung von Konzentrationsverhältnissen in Flüssigkeiten auf der Basis der Quarzmikrowaage mit strukturierten Elektroden</b>	<b>91</b>
7.1	Messungen mit strukturierten Quarzelektroden	91
7.1.1	Elektrodenstrukturierung senkrecht zur Auslenkungsrichtung	91
7.1.1.1	Strukturtiefe $h$	94
7.1.1.2	Erhöhung der Dichteempfindlichkeit	96
7.1.2	Elektrodenstrukturierung in Auslenkungsrichtung	100
7.1.2.1	Einfluß der Elektrodenfläche bei in Bewegungsrichtung strukturierten Elektroden	100
7.1.2.2	In Bewegungsrichtung geätzte Struktur	101
7.1.3	Oberflächenspannung	102

## VIII

7.2	Anwendung	104
7.2.1	Realisierung eines Sensors zur Bestimmung von Konzentrationsverhältnissen in Flüssigkeitsgemischen	104
7.2.2	Temperaturverhalten	108
7.2.3	Kompensation des viskosen Terms der Schwingfrequenzverschiebung	109
7.2.4	Trennung der Flüssigkeitsparameter Dichte und Viskosität	112
7.2.5	Linearisierung der Konzentrationskennlinie	114
7.3	Vergleich des Sensors mit glatten und mit strukturierten Elektroden	115
8	<b>Zusammenfassung</b>	116
9	<b>Ausblick</b>	119
	<b>Anhang A, B, C</b>	121
	<b>Literaturverzeichnis</b>	127