

**Ultraschall- und mikrowellenbasierte
sensorische Erfassung geringer
Stoffunterschiede in wässrigen Lösungen für
die medizinische Diagnostik**

Der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
zur Erlangung des Grades

Doktor-Ingenieur

vorgelegt von

Udo Schwerthöffer

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	I
Abstract	III
Inhaltsverzeichnis	V
Abkürzungen und Symbole	VII
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Zielsetzung dieser Arbeit	4
1.3 Aufbau der Arbeit	5
2 Allgemeine Grundlagen	7
2.1 Aggregatzustände: fest, flüssig, gasförmig	7
2.2 Besondere Eigenschaften von Flüssigkeiten	10
2.3 Löslichkeit und Mischbarkeit in Flüssigkeiten	13
2.4 Stoffmengenangaben in Lösungen	18
2.5 Aufbau und Eigenschaften des Wassermoleküls	20
2.6 Aufbau und Eigenschaften des Glucosemoleküls	22
3 Flüssigkeitscharakterisierung mittels Ultraschallwellen	31
3.1 Messprinzip und Messmethode	31
3.2 Grundlagen der Schallausbreitung	33
3.2.1 Grundgrößen einer Schallwelle	34
3.2.2 Ausbreitung einer Schallwelle in Flüssigkeiten	36
3.3 Messaufbau und Messergebnisse	45
3.3.1 Aufbau der Messanordnung	45
3.3.2 Ergebnisse der Konzentrationmessungen	48
3.4 Zusammenfassung	57
4 Flüssigkeitscharakterisierung mittels Mikrowellen	59
4.1 Grundlegende Idee und Konzept	60
4.2 Beschreibung dielektrischer Materialeigenschaften	61
4.2.1 Klassische Elektrodynamik: Maxwellsche- und Materialgleichungen	62
4.2.2 Dielektrische Materie im elektrostatischen Feld	65

4.2.3	Frequenzabhängigkeit der relativen Permittivität	71
4.3	Genauere Betrachtung der Orientierungspolarisation	74
4.3.1	Frequenzabhängigkeit der Orientierungspolarisation	74
4.3.2	Temperaturabhängigkeit der Orientierungspolarisation	78
4.3.3	Verschiedene empirische Relaxationsmodelle	79
4.4	HF-Messtechnik und verwendete Messmethoden	82
4.4.1	Grundlagen der HF-Messtechnik	82
4.4.2	Grundlagen resonanter HF-Messmethoden	86
4.4.3	Realisierungsmöglichkeiten resonanter HF-Messmethoden	88
4.5	Praktische Sensorumsetzungen und Messergebnisse	90
4.5.1	Aufbau der Messanordnungen	90
4.5.2	Grundlegende Messungen	91
4.5.3	Konzentrationsmessungen mit einem Lambda-Halbe-Sensor bei 2 GHz	96
4.5.4	Konzentrationsmessungen mit einem Lambda-Halbe-Sensor bei 4 GHz	105
4.5.5	Konzentrationsmessungen mit einem Ring-Sensor bei 2 GHz	109
4.5.6	Konzentrationsmessungen mit einem Ring-Sensor bei 4 GHz	113
4.6	Zusammenfassung	116
5	Zusammenfassung und Ausblick	119
5.1	Zusammenfassung	119
5.2	Ausblick	123
	Literaturverzeichnis	125
	Abbildungsverzeichnis	133
	Tabellenverzeichnis	139
	Danksagung	141