

C. Persch

---

Messung von Dielektrizitätskonstanten im Bereich  
von 0,2 bis 6 GHz und deren Bedeutung für die  
Mikrowellenerwärmung von Lebensmitteln



# Messung von Dielektrizitätskonstanten im Bereich von 0,2 bis 6 GHz und deren Bedeutung für die Mikrowellenerwärmung von Lebensmitteln

Zur Erlangung des akademischen Grades eines  
**Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)**  
von der Fakultät für Chemieingenieurwesen  
der Universität Fridericiana Karlsruhe  
(Technische Hochschule)

genehmigte

**Dissertation**

von  
Dipl.-Ing. Christine Persch  
aus Darmstadt

Tag des Kolloquiums:	2. Juni 1997
Referent:	Prof. Dr.-Ing. habil. Helmar Schubert
Korreferent:	Prof. Dr.-Ing. habil. Holger Martin

mit 167 Abbildungen, 19 Tabellen und 87 Gleichungen

Copyright © C. Persch 1997

Alle Rechte, einschließlich derjenigen des auszugsweisen Abdrucks sowie der  
fotomechanischen und elektronischen Wiedergabe, vorbehalten

Grafische Gestaltung, Satz und Druck: C. Persch, Karlsruhe

Bindung: C. Persch und S. Hogeckamp, Karlsruhe

Printed in Germany

*What we call the beginning  
is often the end and to  
make an end is to make  
a beginning. The end is  
where we start from.*  
„Little Gidding“  
T. S. ELLIOT

# Vorwort

In „*Persuasion*“ schrieb JANE AUSTEN: „*A woman especially, if she has the misfortune of knowing anything, should conceal it as well as she can.*“ Diesem Rat bin ich nicht gefolgt, denn in dieser Dissertation sind die Ergebnisse meiner Arbeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Lebensmittelverfahrenstechnik der Universität Fridericiana Karlsruhe in den Jahren 1992 bis 1996 zusammengefaßt. Während einer vorangegangenen annähernd zweieinhalbjährigen Tätigkeit in der chemischen Industrie hatte sich bei mir der Wunsch entwickelt, zumindest eine gewisse Zeit meines Lebens als Wissenschaftlerin an einem Universitätsinstitut zu arbeiten.

Mein erster Dank gilt deshalb meinem Doktorvater Herrn Professor Helmar Schubert, der es mir ermöglicht hat, diesem Wunsch in großer Freiheit nachzukommen, und der diese Arbeit durch viele Anregungen und Ideen wesentlich bereichert hat. Herr Professor Holger Martin vom Institut für Thermische Verfahrenstechnik der Universität Karlsruhe hat freundlicherweise das Korreferat übernommen.

An dieser Arbeit sind eine Reihe Personen beteiligt gewesen. Sie wäre nicht möglich gewesen ohne

- die Mitarbeit der technischen Angestellten des Instituts (besonders der von Kerstin Lakus-Wollny, die stets zuverlässig alle anfallenden großen und kleinen Aufgaben gemeistert hat) und der mechanischen Werkstatt und
- die zahlreichen Studierenden der Fakultät für Chemieingenieurwesen, die als Hilfsassistent/inn/en, Seminar-, Studien- oder Diplomarbeiter/innen dieses Projekt mitgestaltet haben und
- die ganze LVT-Truppe, durch die das Institut nicht nur Arbeitsplatz, sondern frei nach dem Motto „*Hier bin ich Mensch, hier darf ich's sein.*“ von J. W. v. GOETHE auch „die verrückteste Barracke im ganzen Lager“ ist.

Auch die besten Ideen lassen sich bei einer Dissertation in einem ingenieurwissenschaftlichen Fach, wo meist ein erheblicher konstruktiver und experimenteller Aufwand nötig ist – und diese Arbeit ist da keine Ausnahme –, nicht

verwirklichen, wenn es an dem fehlt, was ORSON WELLES als „... *jenen sechsten Sinn, der den Genuß der anderen fünf erst möglich macht.*“ bezeichnet hat. Mein Dank gilt deshalb der Deutschen Forschungsgemeinschaft und allen anderen Firmen und Institutionen, die diesen unverzichtbaren sechsten Sinn eingebracht haben, so daß diese Arbeit jetzt mit den anderen fünf Sinnen genossen werden kann.

Fast am Schluß möchte ich noch bemerken, daß ohne Stefan und unser gemeinsames Zusammenwirken und -werken (Es lebe die Vorrichtung!), unsere beiden Arbeiten ihre grafische Gestaltung und äußere Form nicht erhalten hätten. Mein Dank geht hierfür auch an Herrn Edgar Konz, Buchbindermeister, der Stefan und mich in die Kunst seines Handwerks eingeführt hat.

Und Jochen danke ich, der in diesen Jahren 300 Stunden seines Lebens mit dem Fahren von 30.000 km zwischen Karlsruhe und Wiesbaden verbracht hat.

*K arlsruhe, im Juni 1997*

*Christine Persch*

*Eine vollkommene Ordnung  
wäre der Ruin allen  
Fortschritts und  
Vergnügens.*  
ROBERT MUSIL

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung und Problemstellung</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Stand des Wissens</b> .....	<b>5</b>
<b>2.1</b>	<b>Hochfrequenztechnische Grundlagen</b> .....	<b>5</b>
2.1.1	Allgemeine Grundgleichungen .....	5
2.1.2	Theoretische Eindringtiefe .....	7
2.1.3	Absorptionsmechanismen .....	9
<b>2.2</b>	<b>Relative Dielektrizitätskonstante</b> .....	<b>10</b>
2.2.1	Allgemeines .....	10
2.2.2	Relative Dielektrizitätskonstante von Mischungen .....	14
2.2.3	Verfahren zur Messung der relativen Dielektrizitätskonstante .....	21
<b>2.3</b>	<b>Modellhafte Beschreibung der Mikrowellenerwärmung</b> .....	<b>32</b>
2.3.1	Voraussetzungen .....	32
2.3.2	Das <i>Grüneberg-Modell</i> .....	33
2.3.3	Modelle anderer Autoren .....	35
<b>3</b>	<b>Bestimmung der relativen Dielektrizitätskonstante</b> .....	<b>39</b>
<b>3.1</b>	<b>Verwendete Meßmethoden</b> .....	<b>39</b>
3.1.1	Offene Koaxialleitung .....	39
3.1.2	Resonatoren .....	44
3.1.3	Kalibrierung des $H_{011}$ -Resonators .....	46

---

3.1.4	Kalibrierung des $E_{012}$ -Resonators .....	50
3.1.5	Anwendungsbereiche der Meßverfahren .....	55
3.1.6	Wahl einer geeigneten Methode zur Bestimmung der relativen Dielektrizitätskonstante .....	59
3.1.7	Experimentelle Bestimmung der theoretischen Eindringtiefe .....	60
<b>3.2</b>	<b>Ergebnisse</b> .....	<b>62</b>
3.2.1	Vorbemerkung .....	62
3.2.2	Meßergebnisse .....	62
3.2.3	Berechnung der relativen Dielektrizitätskonstante von Mischungen .....	86
3.2.4	Anpassung der <i>Fricke-Mudgett-Gleichung</i> für Suspensionen und Emulsionen .....	94
3.2.5	Berechnung der relativen Dielektrizitätskonstante von Mischungen permanenter Dipole .....	97
<b>3.3</b>	<b>Überprüfung der gemessenen relativen Dielektrizitätskonstante mit der theoretischen Eindringtiefe</b> .....	<b>104</b>
<b>4</b>	<b>Mikrowellenerwärmung</b> .....	<b>109</b>
4.1	Bedeutung der relativen Dielektrizitätskonstante für die Mikrowellenerwärmung .....	109
4.2	Meßmethoden .....	110
4.2.1	Temperaturmessung im Mikrowellenfeld .....	110
4.2.2	Bestimmung der vom Produkt aufgenommenen Leistung .....	111
4.3	Erwärmung im Haushaltsmikrowellengerät .....	112
4.3.1	Verwendete Mikrowellengeräte .....	112
4.3.2	Einfluß des Garraumvolumens auf die vom Produkt aufgenommene Leistung .....	113
4.3.3	Verbesserung der Temperaturverteilung im Produkt .....	117
4.4	Erwärmung in einer Mikrowellen-Technikumsanlage .....	134
4.4.1	Quasikontinuierliche Mikrowellen-Technikumsanlage .....	134
4.4.2	Übertragung des <i>Grüneberg-Modells</i> .....	135
4.4.3	Verbesserung der Temperaturverteilung im Produkt .....	140
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>147</b>
<b>6</b>	<b>Literatur</b> .....	<b>153</b>

---

<b>Anhang</b> .....	163
<b>A 1 Nullstellen der Besselfunktionen</b> .....	163
<b>A 2 Bestimmung der relativen Dielektrizitätskonstante</b> .....	164
A 2.1 Abmessungen der Resonatoren und Probenröhrchen .....	164
A 2.2 Kalibriersubstanzen .....	165
A 2.3 Kalibrierkurven für den $H_{011}$ -Resonator .....	166
A 2.4 Gemessene und berechnete Werte der relativen Dielektrizitätskonstante .....	170
A 2.5 Verwendete Emulsionen und Suspensionen .....	178
A 2.6 Berechnung der relativen Dielektrizitätskonstante von Suspensionen und Emulsionen mit der <i>Raghavan-Martin-Gleichung</i> .....	179
<b>A 3 Mikrowellenerwärmung</b> .....	183
A 3.1 Erwärmung in Haushaltsmikrowellengeräten .....	183
A 3.2 Kraftregelung .....	185
A 3.3 Ergebnisse der Kraftregelung .....	186
A 3.4 Erwärmung in der Technikumsanlage .....	187
<b>A 4 Einfluß der Wärmeleitung bei der Bestimmung der theoretischen Eindringtiefe</b> .....	191



Jede mathematische Formel  
in einem Buch halbiert die  
Verkaufszahl dieses Buches.  
STEPHEN W. HAWKING

# Formelzeichen und Abkürzungen

## Lateinische Buchstaben

$A$	Fläche	$\text{m}^2$
$A$	Parameter der <i>Margules-Gleichung</i> 3-13	J/mol
$A_k$	Parameter der <i>Redlich-Kister-Gleichung</i> 3-14	$(\text{J/mol})^{k+1}$
$A_k$	Parameter in Gleichung 3-15 und 3-16	–
$A_0$	Parameter der <i>Raghavan-Martin-Gleichung A</i> 2-1	–
$A_1$	Parameter der <i>Raghavan-Martin-Gleichung A</i> 2-1	–
$a$	Formfaktor	–
$a_W$	Wasseraktivität	–
$a_n$	<i>Mie</i> -Koeffizient	–
$B$	magnetische Flußdichte	$\text{V}\cdot\text{s}/\text{m}^2$
$B$	Breite	m
$b$	Korrekturfaktor	–
$b_n$	<i>Mie</i> -Koeffizient	–
$C$	Geräteparameter des <i>Grüneberg-Modells</i>	–
$C$	Kapazität	$\text{A}\cdot\text{s}/\text{V}$
$C_f$	Kapazität bewirkt durch Tastkopfisolierung	$\text{A}\cdot\text{s}/\text{V}$
$c$	Konzentration (Massenanteil)	$\text{kg}/\text{kg}$ , Gew. %
$c$	Lichtgeschwindigkeit	m/s
$c_p$	spezifische Wärmekapazität	$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
$c_V$	Konzentration (Volumenanteil)	$\text{m}^3/\text{m}^3$ , Vol. %
$\tilde{c}$	Konzentration (Molanteil)	mol/mol, Mol %
$D$	elektrische Flußdichte	$\text{A}/\text{m}^2$

---

Formelzeichen und Abkürzungen	$d$	Durchmesser	m
	$E$	elektrische Feldstärke	V/m
	$F$	Kraft	N
	$F$	Parameter der <i>Raghavan-Martin-Gleichung</i> A 2-1	-
	$f$	Frequenz	Hz
	$g^E$	molare freie Exzeßenthalpie	J/mol
	$H$	magnetische Feldstärke	A/m
	$H$	Höhe	m
	$h$	Höhe	m
	$h_{\text{Maxwell}}$	Parameter der <i>Raghavan-Martin-Gleichung</i> A 2-1	-
	$I$	Intensität, Leistungspegel	dB
	$K$	dimensionslose Wärmeleitfähigkeit bzw. Dielektrizitätskonstante oder Verlustzahl (Gleichungen A 2-1 und A 2-7)	-
	$k$	Exponent in Gleichung 2-40	-
	$k$	Laufvariable in Summen	-
	$m$	Masse	kg
	$m$	Dipolmoment	A·s·m
	$m$	Anzahl der Halbwellen in Umfangsrichtung (Resonator)	-
	$N$	Molekülanzahl	-
	$N$	komplexer Brechungsindex	-
	$n$	Brechungsindex	-
	$n$	Laufvariable in Summen	-
	$n$	Anzahl der Halbwellen in radialer Richtung (Resonator)	-
	$P$	Leistung	W
	$p$	Anzahl der Halbwellen in axialer Richtung (Resonator)	-
	$Q$	Güte	-
	$Q$	Ladung	A·s
	$R$	Radius	m
	$s$	Eindringtiefe	m
	$T$	Temperatur	°C
	$T$	Tiefe	m
	$t$	Zeit	s
	$u$	Formkoeffizient	-
	$V$	Volumen	m <sup>3</sup>
	$v$	Geschwindigkeit	m/s
	$x$	Gutstiefe	m
	$Y$	Leitwert	A/V
	$Z$	Impedanz	V/A
	$z$	komplexe Variable	-

## Griechische Buchstaben

Formelzeichen und  
Abkürzungen

$\alpha$	Abschwächung	dB
$\alpha$	<i>Mie</i> -Faktor	–
$\alpha$	Parameter der <i>Raghavan-Martin-Gleichung</i> A 2-1	–
$\beta$	Dämpfungskonstante	m <sup>-1</sup>
$\beta$	Parameter der <i>Raghavan-Martin-Gleichung</i> A 2-1	–
$\beta_f$	Abschwächungsfaktor	–
$\Gamma$	komplexer Reflexionskoeffizient	–
$\gamma$	Winkel	Rad
$\delta$	Verlustwinkel	Rad
$\epsilon$	absolute Dielektrizitätskonstante	A·s/(V·m)
$\epsilon_r$	komplexe relative Dielektrizitätskonstante	–
$\epsilon_s$	statische Dielektrizitätskonstante	–
$\epsilon_\infty$	optische Dielektrizitätskonstante	–
$\epsilon'$	Dielektrizitätskonstante (Realteil von $\epsilon_r$ )	–
$\epsilon''$	Verlustzahl (Imaginärteil von $\epsilon_r$ )	–
$\eta$	Wirkungsgrad	–
$\vartheta$	Temperatur	°C
$\lambda$	Wellenlänge	m
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit	W/(m·K)
$\mu$	Permeabilität	V·s/(A·m)
$\mu_r$	komplexe relative Permeabilitätszahl	–
$\rho$	Dichte	kg/m <sup>3</sup>
$\sigma$	Leitfähigkeit	S/m
$\tau$	Relaxationszeit	s
$\tau$	Zeit	s
$\varphi$	Phasenwinkel	Rad
$\omega$	Kreisfrequenz	Hz

## Indizes

0	Bezugszustand, Anfangszustand
0	Vakuum, Luft
1	Komponente 1
1	Ort 1
2	Komponente 2
2	Ort 2
1/2	einhalb des Maximalwerts
1,3	volumengleich
a	außen
c	kontinuierliche Phase
d	disperse Phase

Formelzeichen und  
Abkürzungen

$E$	die elektrische Feldstärke betreffend
$e$	Endzustand
$el$	elektrisch
$i$	innen
$i$	Komponente $i$
$Koax$	offene Koaxialleitung
$krit$	kritisch
$l$	ungefüllter Resonator
$m$	Mischung
$max$	maximal
$Mie$	nach $M_{IE}$
$min$	minimal
$MW$	Mikrowellen(gerät)
$mnp$	Modenbezeichnung
$nenn$	Nennwert, Herstellerangabe
$P$	die Leistung betreffend
$Pr$	Probe
$R$	Resonanz, Relaxation
$r$	relativ
$refl$	reflektiert
$Res$	Resonator
$theo$	theoretisch
$V$	pro Volumeneinheit
$v$	gefüllter Resonator
$\sigma$	die Leitfähigkeit betreffend

### Konstanten

$c_0$	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum	$3 \cdot 10^8$ m/s
$e$	<i>Euler-Zahl</i>	2,71828
$\epsilon_0$	elektrische Konstante	$8,8542 \cdot 10^{-12}$ A·s/(V·m)
$\mu_0$	Permeabilität im Vakuum	$1,2566 \cdot 10^{-6}$ V·s/(A·m)
$\pi$	Kreiszahl	3,14159

### Funktionen

$\vec{\quad}$	vektorielle Größe
$\bar{\quad}$	Mittelwert
$\prime$	erste Ableitung
$\prime$	Realteil
$\prime\prime$	Imaginärteil

---

$ z $	Betrag der Größe $z$	Formelzeichen und Abkürzungen
$d$	Differentiation	
$\Delta$	Differenz	
$\Delta$	Breite der Resonanzkurve	
$\Delta$	Exzeßgröße	
$\text{Re}(z)$	Realteil der komplexen Größe $z$	
$x_{m,n}$	$n$ -te Nullstelle der <i>Bessel</i> -funktion $m$ -ter Ordnung	
$h_n^{(2)}, j_n, \varphi_n, \sigma_n$	modifizierte <i>Bessel</i> - und <i>Hankel</i> -funktionen	
$j = \sqrt{-1}$	imaginäre Einheit	

## Abkürzungen

PTFE	Polytetrafluorethylen (Handelsname Teflon®)
TE	transversal elektrisch
TM	transversal magnetisch



# 1 Einleitung und Problemstellung

Im Haushalt und in der Industrie werden Lebensmittel zunehmend mit Mikrowellen erwärmt. So waren bereits 1991 80 % der US-Haushalte mit einem Mikrowellengerät ausgestattet (ENGELDER und BUFFLER, 1991); in Europa sind mittlerweile ähnliche Zahlen erreicht worden. Die Mikrowellenerwärmung konkurriert mit oder ergänzt die konventionellen Erhitzungsverfahren, bei denen die Wärme immer über die Guts Oberfläche ins Innere eindringen muß. Bei der Mikrowellenerwärmung wird dagegen die Wärme direkt im Produktinneren durch dielektrische Verluste „erzeugt“, da die elektromagnetische in innere Energie umgewandelt wird. Damit gehört die Mikrowellenerwärmung neben der ohmschen Erhitzung und der Hochfrequenzerhitzung zu den durchdringenden Erhitzungsverfahren. Die durchdringenden Erhitzungsverfahren unterscheiden sich in der Frequenz des elektromagnetischen Feldes, was zur Folge hat, daß verschiedene Absorptionsmechanismen für die Umwandlung der elektromagnetischen Energie verantwortlich sind. Bei der Mikrowellenerwärmung sind 2,45 GHz (bei Haushaltsgeräten ausschließlich) und in der Industrie auch 915 MHz die gebräuchlichen Frequenzen (s. BUFFLER, 1993).

Die Mikrowellenerwärmung, damit ist auch das Auftauen, Pasteurisieren und Sterilisieren mit Mikrowellen gemeint, hat Vor- und Nachteile gegenüber den konventionellen Verfahren. Vorteilhaft ist, daß meist die Umgebung des Produkts nicht oder nur über den Wärmeübergang vom Gut selbst mit aufgeheizt wird, d. h. das Verfahren ist besonders bei kleinen Produktmengen energetisch günstig. Bei den konventionellen Verfahren herrscht die höchste Temperatur immer an der Guts Oberfläche, während bei der Mikrowellenerwärmung die höchste Temperatur auch im Gutsinneren auftreten kann. Dies hängt zum einen vom Produkt selbst, d. h. seinen dielektrischen Eigenschaften, seinem Volumen und der Geometrie seiner Oberfläche (z. B. Krümmungen) ab, zum anderen aber auch von der verwendeten Mikrowellenanlage. Hier ist die räumliche Verteilung des elektri-

schen Feldes, und wie dieses Feld vom Produkt beeinflusst wird, entscheidend. Insgesamt hängt das Verhalten eines Lebensmittels beim Erwärmen mit Mikrowellen von folgenden drei Faktoren ab (SCHIFFMANN, 1990):

- **Dem zu erwärmenden Lebensmittel:** Die o.g. dielektrischen Eigenschaften beschreiben, wie ein Gut mit dem Mikrowellenfeld in Wechselwirkung tritt, d. h. wie stark sich das Gut erwärmt. Problematisch ist z. B., wenn ein Lebensmittel aus Komponenten zusammengesetzt ist, die sich beim Erhitzen mit Mikrowellen sehr unterschiedlich verhalten.
- **Der Mikrowellenanlage bzw. dem Haushaltsmikrowellengerät:** Die Verteilung des elektromagnetischen Feldes (und damit die Verteilung der Leistung) beeinflusst das Erwärmungsverhalten. Die Vielfalt der Mikrowellenanlagen und Haushaltsgeräte bzgl. Gesamtleistung und deren Verteilung in Gerät und Produkt erschwert dabei generelle Voraussagen (SCHIFFMANN, 1990).
- **Der Verpackung des zu erwärmenden Produkts:** Die Varianten reichen von einfachen, für die Mikrowellen „durchsichtigen“ Verpackungen bis zu hochkomplexen Verpackungen, die z. B. leistungsabsorbierende oder feldmodifizierende Eigenschaften haben (LORENSON, 1990).

Um die Erwärmung einer Substanz mit Mikrowellen zu beschreiben, ist die Kenntnis der dielektrischen Eigenschaften dieser Substanz notwendig. Für Lebensmittel sind nur wenige Daten in der Literatur zu finden (z. B. BENGTSOON und RISMAN, 1971, TRAN u. a., 1984, NELSON und KRASZEWSKI, 1990, PFEIFFER, 1994, NELSON u. a., 1994, BUFFLER und STANFORD, 1995). Übersichten über veröffentlichte Daten finden sich bei KENT (1987) sowie bei TINGA und NELSON (1973). VON HIPPEL hat bereits 1954 für eine Vielzahl von Substanzen die dielektrischen Eigenschaften zusammengestellt, jedoch sind nur wenige Daten von Lebensmitteln enthalten. Die dielektrischen Eigenschaften von Wasser und wäßrigen Salzlösungen hat HASTED (1973) beschrieben. Gemeinsam ist allen diesen Literaturdaten, daß nur ein kleiner Teil der Werte bei der für die Mikrowellenerwärmung gebräuchlichsten Frequenz von 2,45 GHz bestimmt wurde. Je nach Stoff sind die dielektrischen Eigenschaften aber stark frequenzabhängig. Weiterhin wurde fast ausschließlich bei Temperaturen größer 0 °C, meist bei Raumtemperatur, gemessen. Ebenso sind für den Bereich größer 100 °C kaum Daten zu finden. Einzelne Meßwerte werden lediglich von OHLSSON und BENGTSOON (1975) angegeben. Problematisch ist auch, daß nicht nur in den Übersichten, sondern auch in den Fortschrittsarbeiten kaum Angaben zur Probenvorbereitung und Probenzusammensetzung gemacht werden. Oft werden die Meßmethoden nicht genannt und keine Angaben zur Genauigkeit der Werte veröffentlicht.

Die Ursache für diese geringe Verfügbarkeit von Daten ist in der Problematik der Meßmethoden zu suchen. Die verschiedenen Methoden erlauben die Messung jeweils nur in einem bestimmten Wertebereich. Die dielektrischen Eigenschaften schwanken aber gerade bei Lebensmitteln stark. Sie sind zum einen von der Substanz selbst, d. h. von Zusammensetzung und Aggregatzustand, abhängig. Zum anderen hängen sie von der Temperatur, die bei Lebensmitteln in einem

großen Bereich variiert wird, ab. Aufgrund dieser Schwankungen und einer erforderlichen Mindestprobengröße, besonders bei dispersen Systemen, sind nach heutigem Wissensstand verschiedene Meßmethoden erforderlich, um den Gesamtbereich der Werte für möglichst viele verschiedene Stoffe erfassen zu können.

In dieser Arbeit werden deshalb verschiedene Verfahren zur Bestimmung der dielektrischen Eigenschaften (weiter-)entwickelt, um diese Eigenschaften sowie ihre Frequenz- und Temperaturabhängigkeit zu bestimmen. Es soll möglich sein, größere Probenmengen einzusetzen, um disperse Systeme, wie es Lebensmittel häufig sind, untersuchen zu können. Es werden Stoffsysteme untersucht, die wichtige Lebensmittelbestandteile wie Wasser, Salz und Öl enthalten. Die Meßwerte werden mit Literaturdaten – soweit vorhanden – verglichen. Außerdem soll ein weiteres Verfahren entwickelt werden, mit dem es möglich ist, ohne direkte Messung der dielektrischen Eigenschaften die eigenen Meßdaten zu überprüfen.

In der Literatur sind zahlreiche Gleichungen dokumentiert, mit denen die dielektrischen Eigenschaften von Gemischen berechnet werden können. Diese Gleichungen werden auf ihre Eignung für Lebensmittel geprüft. Geeignete Gleichungen werden entsprechend weiterentwickelt, so daß in möglichst einfacher Weise die dielektrischen Eigenschaften von Gemischen aus den Daten der reinen Komponenten berechnet werden können, ohne zeitaufwendige und teure Messungen am Gemisch durchführen zu müssen.

Im zweiten Teil der Arbeit wird dann die Anwendung der dielektrischen Eigenschaften bei der Mikrowellenerwärmung behandelt. Wie oben beschrieben, beeinflußt auch die Leistungsverteilung das Erwärmungsverhalten. Nach dem Modell von GR NEBERG (1994) kann für jedes Produkt, sofern seine dielektrischen Eigenschaften bekannt sind, vorausberechnet werden, welche Erwärmungsdauer in einem Haushaltsmikrowellengerät zum Erreichen einer mittleren Endtemperatur notwendig ist. Für dieses Modell ist der Einfluß eines veränderten Garraumvolumens zu prüfen. Daneben soll das Modell auch auf eine kontinuierliche Technikumsanlage übertragen werden.

Bei der Erhitzung von Lebensmitteln ist besonders wichtig, welche minimale und maximale Temperatur im erwärmten Produkt auftritt. Zu hohe Temperaturen können zu Produktschädigungen führen, während bei zu niedrigen Temperaturen unerwünschte Lebensmittelbestandteile (z. B. Mikroorganismen und Enzyme) unzureichend inaktiviert werden. Da aber nicht nur die dielektrischen Eigenschaften die meist ungleichmäßige Temperaturverteilung nach einer Mikrowellenerwärmung im Gut bestimmen, sondern dies entscheidend vom eingesetzten Gerät selbst abhängig ist, soll der Leistungseintrag bei einem Haushaltsmikrowellengerät so geregelt werden, daß die Temperaturverteilung möglichst gleichmäßig ist. Bei der Technikumsanlage, in der das Gut auf einem Transportwagen durch den Mikrowellentunnel bewegt wird, soll eine gleichmäßige Temperaturverteilung im Gut durch einfache konstruktive Maßnahmen erzielt werden.

Der o. g. dritte Einflußfaktor, die Verpackung, wird in dieser Arbeit nicht untersucht. Es werden nur Verpackungen bzw. Behältnisse verwendet, die für Mikrowellen „durchsichtig“ sind, d. h. die im Vergleich zu den erwärmten Materialien keine Mikrowellenergie aufnehmen und dissipieren.



*In research the horizon  
recedes as we advance ...  
And research is always  
incomplete.  
„Isaac Casaubon“  
MARK PATTISON*

## 2 Stand des Wissens

### 2.1 Hochfrequenztechnische Grundlagen

#### 2.1.1 Allgemeine Grundgleichungen

Elektromagnetische Wellen im Frequenzbereich zwischen 300 MHz und 300 GHz werden als Mikrowellen bezeichnet. Sie liegen damit zwischen den Radiowellen und dem Infrarotbereich. Da ein Großteil der Frequenzen im Mikrowellenbereich bereits durch Anwendungen aus dem Kommunikationsbereich, wie Mobiltelefone, „belegt“ ist, sind nur wenige Frequenzen für die Mikrowellenerwärmung zugelassen (s. BUFFLER, 1993). Weltweit zugelassen ist eine Frequenz von 2,45 GHz für die Haushaltsgeräte. In der Bundesrepublik Deutschland kann außerdem mit besonderer Genehmigung mit einer Frequenz von 915 MHz in industriellen Anlagen gearbeitet werden.

Nach Gleichung 2-1 beträgt die Wellenlänge im Vakuum  $\lambda_0 = 12,2$  cm bei der Frequenz  $f$  von 2,45 GHz (Vakuumlichtgeschwindigkeit  $c_0 \approx 3 \cdot 10^8$  m/s).

$$\lambda_0 = \frac{c_0}{f} \quad (2-1)$$

Für den o. g. Mikrowellenbereich ergeben sich damit Freiraumwellenlängen zwischen 1 mm und 1 m. Beim Eintritt der Wellen in eine Substanz ändern sich die Wellenlänge  $\lambda$  und die Lichtgeschwindigkeit  $c$  in Abhängigkeit vom Brechungsindex  $n$  der Substanz (vgl. KUMMER, 1986):

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n} = \frac{c_0}{n \cdot f} = \frac{c}{f} \quad (2-2)$$

Allen hier betrachteten elektromagnetischen Wellen sind die folgenden Charakteristika gemeinsam:

- Das physikalische Verhalten läßt sich mit den *Maxwellschen* Gleichungen beschreiben (vgl. KUMMER, 1986).
- Das elektrische und das magnetische Feld sind senkrecht zueinander ausgerichtet; die Wellen schwingen sinusförmig.
- Beim Durchtritt durch Medien ändert sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Brechungsindex der Medien (vgl. Gleichung 2-2).
- Reflexion, Absorption, Brechung und Transmission sind typische Erscheinungen bei Wechselwirkungen zwischen Substanzen und elektromagnetischen Wellen.

Befindet sich ein Stoff in einem Mikrowellenfeld, so wird ein Teil der auftreffenden Leistung  $P$  an der Oberfläche des Stoffes reflektiert. Wie groß dieser reflektierte Anteil ist, hängt von der komplexen relativen Dielektrizitätskonstante des Materials ab (zur relativen Dielektrizitätskonstante s. Kapitel 2.2). Für den einfachen Fall einer ebenen Welle, die auf einen physikalischen Halbraum trifft, gilt näherungsweise für ein verlustloses Medium mit der Dielektrizitätskonstante  $\epsilon'$  für den reflektierten Leistungsanteil  $P_{refl}$  (vgl. BUFLER, 1993):

$$\frac{P_{refl}}{P} \approx \left( \frac{\sqrt{\epsilon' - 1}}{\sqrt{\epsilon' + 1}} \right)^2 \quad (2-3)$$

Der Anteil der Leistung, der in die Substanz eintritt, ist damit die Differenz zwischen der auftreffenden Leistung  $P$  und der reflektierten Leistung  $P_{refl}$ . Handelt es sich um ein verlustbehaftetes Material, wird die Leistung mit zunehmender Weglänge im Material absorbiert, d. h. abgeschwächt. Ein Maß für diese Abschwächung ist der Verlustanteil  $\epsilon''$  der relativen Dielektrizitätskonstante. Falls  $\epsilon''$  und die effektive elektrische Feldstärke  $E$  im betrachteten Volumenelement  $V$  des zu erwärmenden Materials konstant sind, läßt sich die Verlustleistungsdichte  $P_V$  für dieses Volumenelement wie folgt berechnen:

$$P_V = \frac{P}{V} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon'' \cdot E^2 \quad (2-4)$$

$\epsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12} \text{ As/(Vm)}$ : elektrische Konstante

Je größer die Verlustzahl  $\epsilon''$  ist, desto höher ist die Verlustleistungsdichte und desto weniger weit dringen die Mikrowellen in die Substanz ein. Da sich jedoch die effektive elektrische Feldstärke und die dielektrischen Eigenschaften beim Erwärmen örtlich und zeitlich ändern, ist Gleichung 2-4 nur bedingt brauchbar, um die Verlustleistungsdichte beispielsweise für Lebensmittel zu berechnen.

Beim Eintreten der Wellen in die Substanz ändert sich die Richtung der Wellen. Der Brechungswinkel läßt sich mit dem Brechungsindex  $n$  berechnen. Dabei sind  $\gamma_1$  und  $\gamma_2$  der Einfallswinkel auf die bzw. der Eintrittswinkel in die Substanz.

$$n = \frac{\sin \gamma_1}{\sin \gamma_2} \approx \sqrt{\frac{\epsilon'}{2} \cdot \left( \sqrt{1 + \left( \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \right)^2} + 1 \right)} \approx \sqrt{\epsilon'} \quad (2-5)$$

Gleichung 2-5 stammt aus der geometrischen Optik (s. VON HIPPEL, 1954). Die zweite Näherung trifft wieder nur zu, wenn die Verlustzahl  $\epsilon''$  vernachlässigbar klein ist (s. BUFFLER, 1993).

Wie bereits beschrieben, wird die Leistung mit zunehmender Weglänge oder Eindringtiefe im Material absorbiert. Darauf wird genauer im folgenden Kapitel 2.1.2 eingegangen. Bisher wurde ein physikalischer Halbraum betrachtet. Tatsächlich werden Materialien mit endlichen Abmessungen erwärmt. Bei der Erwärmung von Lebensmitteln kann jedoch meist in guter Näherung mit der Annahme des physikalischen Halbraums gerechnet werden, da die Verlustanteile  $\epsilon''$  der relativen Dielektrizitätskonstante und die Abmessungen von Lebensmitteln so groß sind, daß die Leistung schon bei geringen Eindringtiefen, die kleiner als die Abmessungen des Lebensmittels sind, fast vollständig abgeschwächt wird.

Sind die Abmessungen eines zu erwärmenden Materials jedoch klein (z. B. dünne Platte) und/oder sind die Verluste nicht zu groß, erreichen die Wellen aufgrund der geringen Abschwächung die andere Plattenoberfläche. Auch hier wird wieder entsprechend Gleichung 2-3 ein Teil der noch vorhandenen Leistung reflektiert, der andere Teil verläßt das Material. Dieser Reflexionsprozeß wiederholt sich solange, bis aufgrund der Absorption keine Mikrowellenleistung mehr an der Oberfläche ankommt (zur Berechnung vgl. z. B. BARRINGER u. a., 1995).

### 2.1.2 Theoretische Eindringtiefe

Wie bereits oben beschrieben, wird beim Eindringen der Mikrowellen in ein Gut mit zunehmender Weglänge oder Eindringtiefe  $x$  die elektrische Feldstärke  $E$  und damit die Leistung durch Dissipation abgeschwächt. Die Abschwächung der elektrischen Feldstärke  $E$  kann näherungsweise mit dem Gesetz von *Lambert* beschrieben werden. Ausgegangen wird dabei von einer ebenen Transversalwelle, die auf einen physikalischen Halbraum trifft (vgl. KUMMER, 1986).

$$E(x) = E_0 \cdot e^{-\beta \cdot x} \quad (2-6)$$

In Gleichung 2-6 ist  $E_0$  die Feldstärke an der Oberfläche  $x = 0$ ,  $E(x)$  die Feldstärke an der Stelle  $x$  im Gut und  $\beta$  die Dämpfungskonstante.

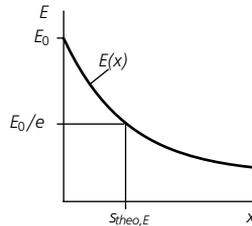
$$\beta = \frac{\pi}{\lambda_0} \cdot \sqrt{2 \cdot \epsilon' \cdot \left( \sqrt{1 + \left( \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \right)^2} - 1 \right)} \quad (2-7)$$

Ist  $\epsilon'' \ll \epsilon'$ , kann mit folgender Näherung für die Dämpfungskonstante  $\beta$  gerechnet werden (vgl. KUMMER, 1986):

$$\beta \approx \frac{\pi}{\lambda_0} \cdot \frac{\epsilon''}{\sqrt{\epsilon'}} \quad (2-8)$$

Die Gleichungen 2-6 bis 2-8 können für Lebensmittel in guter Näherung verwendet werden, solange die Wellenlänge im Gut sehr viel kleiner ist als die Abmessungen des Guts (s. RAO und RIZVI, 1995). Aus diesen Gleichungen wird nun eine charakteristische Eindringtiefe  $s_{theo,E}$  der elektrischen Feldstärke definiert. Es ist  $s_{theo,E}$  die Stelle  $x$  im Gut, an der die elektrische Feldstärke den Wert  $E_0/e$  annimmt (s. Abbildung 2-1).

Abb. 2-1: Definition der Eindringtiefe der elektrischen Feldstärke.



$$E(x = s_{theo,E}) = \frac{E_0}{e} \quad (2-9)$$

$$s_{theo,E} = \frac{1}{\beta} = \frac{\lambda_0}{\pi} \cdot \left( 2 \cdot \epsilon' \cdot \left( \sqrt{1 + \left( \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \right)^2} - 1 \right) \right)^{-0,5} \quad (2-10)$$

Analog kann auch für die Verlustleistungsdichte  $P_V$  eine theoretische Eindringtiefe  $s_{theo,P}$  definiert werden, bei der  $P_V$  auf den Wert  $P_{V,0}/e$  abgeklungen ist. Aus Gleichung 2-4 geht hervor, daß  $P_V$  vom Quadrat der elektrischen Feldstärke  $E$  abhängt. Aus einem Koeffizientenvergleich ergibt sich dann:

$$P_V(x) = P_{V,0} \cdot e^{-2\beta \cdot x} \quad (2-11)$$

$$s_{theo,P} = \frac{1}{2 \cdot \beta} = \frac{1}{2} \cdot s_{theo,E} = \frac{\lambda_0}{2 \cdot \pi} \cdot \left( 2 \cdot \epsilon' \cdot \left( \sqrt{1 + \left( \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \right)^2} - 1 \right) \right)^{-0,5} \quad (2-12)$$

Die theoretische Eindringtiefe  $s_{theo,P}$  der Verlustleistungsdichte ist also genau halb so groß wie die theoretische Eindringtiefe  $s_{theo,E}$  der elektrischen Feldstärke. Je größer die Werte von  $s_{theo,P}$  einer Substanz werden, desto weniger Energie pro Volumen wird von dieser Substanz absorbiert. So können z. B. typische Verpackungsmaterialien wie Kunststoffe oder Glas theoretische Eindringtiefen im Meterbereich haben. Bei Lebensmitteln, die Mikrowellen gut absorbieren, sind diese Werte etwa um einen Faktor 1.000 kleiner. Hier liegen die Werte von  $s_{theo,P}$  im Bereich von wenigen Zentimetern bis Millimetern (Beispiele sind u. a. bei BUFFLER (1993) zu finden).

Aus den beiden vorhergehenden Kapiteln wird deutlich, daß die Mikrowellen beim Eindringen in einen Stoff von diesem absorbiert werden und sich der Stoff deshalb erwärmt. Für diese Absorption sind verschiedene Mechanismen verantwortlich. Welche Absorptionsmechanismen (auch Verlustmechanismen genannt) für die Energiedissipation verantwortlich sind, ist von der Frequenz des elektromagnetischen Feldes abhängig. Bei 2,45 GHz sind die wichtigsten Absorptionsmechanismen die Relaxation von Dipolmolekülen (z. B. Wasser), die Relaxation von gebundenem Wasser und polaren Molekülbereichen sowie die Ionenleitfähigkeit. Von sehr geringem Einfluß sind die *Maxwell-Wagner*-Relaxation und die Eis-Relaxation. Die drei wichtigsten Mechanismen werden im folgenden kurz beschrieben. Diese und die anderen Absorptionsmechanismen sind ausführlich bei folgenden Autoren beschrieben: GR NEBERG, 1994 , GR NEBERG u. a., 1992, SCHUBERT u. a., 1991, HASTED, 1973, METAXAS UND MEREDITH, 1983, ENGELDER und BUFFLER, 1991, FOSTER UND SCHWAN, 1989, P SCHNER, 1964 .

### Dipolrelaxation

Die Dipolrelaxation (*Debye*-Relaxation, Dipolrotation) ist für Lebensmittel der wichtigste Absorptionsmechanismus. Permanente Dipolmoleküle, wie freies Wasser oder Ethanol, versuchen sich entsprechend der Feldrichtung des angelegten elektromagnetischen Feldes auszurichten (vgl. Abbildung 2-2). Bei niedrigen Frequenzen können die Moleküle den Feldwechseln folgen. Je höher die Frequenz ist, desto mehr „hinken“ die Moleküle aufgrund der Trägheit den Feldwechseln hinterher; es kommt zu einer Phasenverschiebung. Bei sehr hohen Frequenzen können die Moleküle den Wechseln des Feldes schließlich nicht mehr folgen. Der Frequenzbereich, in dem die Moleküle den Wechseln mit einer Phasenverschiebung folgen, wird Dispersionsgebiet genannt. Als Relaxationsfrequenz  $f_R$  wird diejenige Frequenz bezeichnet, bei der die Phasenverschiebung maximal ist. Bei dieser Frequenz treten die höchsten dielektrischen Verluste auf. Die Relaxationsfrequenz eines Moleküls hängt neben der Temperatur von seiner Größe ab. Kleine Moleküle wie Wasser können den Feldwechseln auch noch bei hohen Frequenzen folgen, während größere Moleküle wie Ethanol aufgrund größerer Trägheit schon bei niedrigeren Frequenzen ihre Relaxationsfrequenz erreichen (s. HASTED, 1973).

### Relaxation von gebundenem Wasser und polaren Molekülbereichen

Gebundenes Wasser und auch polare Molekülbereiche (z. B. in Fetten und Ölen) tragen durch Relaxation zur Energiedissipation bei (vgl. GR NEBERG u. a., 1992 und GUO u. a., 1993). Die Relaxationsfrequenzen sind jedoch viel niedriger als die von freiem Wasser, da die Beweglichkeit dieser Moleküle bzw. Molekülbereiche eingeschränkt ist. Die Relaxationsfrequenz hängt hier deshalb auch von der Art

der Bindung ab. FOSTER und SCHWAN (1989) berichten, daß die Relaxationsfrequenz von an Protein gebundenem Wasser ungefähr 1 GHz beträgt. Bei Raumtemperatur ist die Relaxationsfrequenz von freiem Wasser dagegen ca. 20 GHz. Da das Dispersionsgebiet breit ist, können aber auch bei der Mikrowellenfrequenz von 2,45 GHz noch dielektrische Verluste aufgrund der Relaxation von gebundenem Wasser und polaren Molekülbereichen auftreten.

### Ionenleitfähigkeit

Die in einer Substanz enthaltenen Ionen versuchen ebenfalls, sich zu bewegen, wenn ein Mikrowellenfeld angelegt ist (vgl. HASTED, 1973). Die Ionen wandern dabei in Richtung des entgegengesetzt geladenen Pols des elektrischen Feldes (vgl. Abbildung 2-2). Bei niedrigen Frequenzen ist die Ionenleitfähigkeit der wichtigste Verlustmechanismus. Dies hängt jedoch auch von der Konzentration der Ionen ab und wie groß beispielsweise Hydrathüllen um die Ionen sind.

Abb. 2-2: Schematische Darstellung der Absorptionsmechanismen a) Dipolrelaxation und b) Ionenleitfähigkeit.



## 2.2 Relative Dielektrizitätskonstante

### 2.2.1 Allgemeines

In der Literatur finden sich oft widersprüchliche Bezeichnungen für die dielektrischen Größen. In dieser Arbeit werden deshalb die Bezeichnungen verwendet, die in der Norm DIN IEC 49(Sec)230 festgelegt sind.

Die von elektromagnetischen Wechselfeldern ausgeübte Kraft  $\vec{F}$  läßt sich folgendermaßen ausdrücken (s. COLLIN, 1992):

$$\vec{F} = Q \cdot (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (2-13)$$

$\vec{F}$ : Kraftvektor

$Q$ : Ladung

$\vec{E}$ : elektrische Feldstärke

$\vec{v}$ : Geschwindigkeitsvektor

$\vec{B}$ : magnetische Flußdichte

Gleichung 2-13 wurde von einem Kondensatormodell abgeleitet. Wird dieses verallgemeinert, so bietet sich an, die Ladung  $Q$  auf die Fläche  $A$  der Kondensatorplatten zu beziehen und dies als elektrische Flußdichte  $\vec{D}$  zu definieren. Die elektrische Flußdichte  $\vec{D}$  ist proportional zur elektrischen Feldstärke  $\vec{E}$ . Die absolute Dielektrizitätskonstante  $\epsilon$  ist der Proportionalitätsfaktor.

Relative  
Dielektrizitätskonstante

$$\vec{D} = \frac{Q}{A} = \epsilon \cdot \vec{E} \quad (2-14)$$

Analog gilt für die magnetische Flußdichte  $\vec{B}$ :

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \quad (2-15)$$

$\mu$ : Permeabilität  
 $\vec{H}$ : magnetische Feldstärke

Die Permeabilität  $\mu$  läßt sich in zwei Anteile, die magnetische Feldkonstante  $\mu_0$  und die relative Permeabilitätszahl  $\mu_r$  unterteilen.

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r \quad (2-16)$$

Im Vakuum ist der Wert der Permeabilität  $\mu = 1,2566 \cdot 10^{-6} \text{ Vs/(Am)}$  und damit gleich der magnetischen Feldkonstante  $\mu_0$ . Die relative Permeabilitätszahl  $\mu_r$  ist eine komplexe Größe und berücksichtigt die magnetischen Stoffeigenschaften des Dielektrikums.

$$\mu_r = \mu' - j \cdot \mu'' \quad (2-17)$$

$j = \sqrt{-1}$   
 $\mu'$ : Realteil der relativen Permeabilitätszahl  
 $\mu''$ : Imaginärteil der relativen Permeabilitätszahl

Der Realteil  $\mu'$  ist der Speicheranteil und der Imaginärteil  $\mu''$  der Verlustanteil der relativen Permeabilitätszahl  $\mu_r$ . Da die hier betrachteten Stoffe, insbesondere die Lebensmittel, quasi nicht magnetisch sind, ist der Verlustanteil  $\mu''$  der Permeabilitätszahl vernachlässigbar klein. Anhand der *Maxwellschen* Gleichungen läßt sich zeigen, daß die aufgrund magnetischer Verluste dissipierte Energie vernachlässigbar ist (vgl. STAMMER, 1991).

Die absolute Dielektrizitätskonstante  $\epsilon$  ist das Produkt der elektrischen Konstante  $\epsilon_0$  und der relativen Dielektrizitätskonstante  $\epsilon_r$ .

$$\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \quad (2-18)$$

Im Vakuum hat die absolute Dielektrizitätskonstante  $\epsilon$  den Wert der elektrischen Konstante  $\epsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12} \text{ As/(Vm)}$ .

Die stoffspezifische relative Dielektrizitätskonstante  $\epsilon_r$  ist eine komplexe Größe.

$$\epsilon_r = \epsilon' - j \cdot \epsilon'' \quad (2-19)$$

$\epsilon'$ : Dielektrizitätskonstante

$\epsilon''$ : Verlustzahl

Der Realteil  $\epsilon'$ , nach der Norm DIN IEC 49(Sec)230 nur Dielektrizitätskonstante genannt, ist ein Maß für das Speichervermögen eines Dielektrikums, während der Imaginärteil  $\epsilon''$  (die Verlustzahl) den „Energieverlust“ beschreibt. Die mechanische Entsprechung des Speicher-Verlust-Modells ist ein Feder-Dämpfer-System. Die Dielektrizitätskonstante entspricht der Federkonstante. Der Dämpfer, in dem die Mikrowellenenergie dissipiert wird, ist durch die Verlustzahl charakterisiert.

Der Quotient aus Verlustzahl und Dielektrizitätskonstante ist als Verlustfaktor  $\tan \delta$  definiert:

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (2-20)$$

Der Verlustwinkel  $\delta$  ist die Phasenverschiebung zwischen der elektrischen Flußdichte und der elektrischen Feldstärke. Im Fall der Mikrowellenerwärmung ist ein möglichst großer Verlustfaktor erwünscht. Der Verlustfaktor ist im Dispersionsgebiet am größten. Das Dispersionsgebiet ist der Frequenzbereich zwischen dem elektromagnetischen Gleichfeld (Frequenz  $f = 0$ ) und dem elektromagnetischen Wechselfeld sehr hoher Frequenz (im Grenzfall  $f \rightarrow \infty$ ).

Wird ein Stoff in ein rein elektromagnetisches Gleichfeld gebracht (Frequenz  $f = 0$ ), richten sich die polaren Moleküle und Molekülteile einmal aus. Danach wird keine Energie mehr dissipiert, d. h. die Verlustzahl ist Null. Die relative Dielektrizitätskonstante besteht in diesem Fall nur aus dem Realteil und wird statische Dielektrizitätskonstante  $\epsilon_s$  genannt.

Der zweite Grenzfall tritt ein, wenn ein Wechselfeld so hoher Frequenz anliegt ( $f \rightarrow \infty$ ), daß eine Bewegung der Moleküle aufgrund hoher Viskosität der Substanz bzw. großer Trägheit nicht mehr möglich ist. Auch in diesem Fall wird keine Energie dissipiert; die Verlustzahl ist Null. Die relative Dielektrizitätskonstante für diesen Grenzfall ist die optische Dielektrizitätskonstante  $\epsilon_\infty$ .

Zwischen den beiden Extremwerten ist die relative Dielektrizitätskonstante frequenzabhängig. DEBYE (1929) entwickelte folgende Gleichung für polare Moleküle (speziell für Wasser), um diese Frequenzabhängigkeit zu beschreiben (das *Debye-Modell*):

$$\epsilon_r = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + j \cdot \omega \cdot \tau} = \epsilon' - j \cdot \epsilon'' \quad (2-21)$$

$$\tau = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_R} \quad (2-22)$$

---

$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ : Kreisfrequenz  
 $\tau$ : Relaxationszeit  
 $f_R$ : Relaxationsfrequenz

Relative  
Dielektrizitätskonstante

Ist die Frequenz  $f$  gleich der Relaxationsfrequenz  $f_R$  der Substanz, ist die Verlustzahl maximal, und die Dielektrizitätskonstante durchläuft einen Wendepunkt. Je kleiner ein Dipolmolekül ist, desto höher ist seine Relaxationsfrequenz. Für Wasser ist  $f_R = 20$  GHz und für Ethanol ungefähr 1 GHz bei Raumtemperatur. Mit steigender Temperatur nehmen die Molekülbewegungen zu. Deshalb wird die relative Dielektrizitätskonstante kleiner, und die Relaxationsfrequenz verschiebt sich zu höheren Frequenzen. Da dieses Modell nur für reine, polare Substanzen gilt (DEBYE, 1929) und die Parameter – besonders die optische Dielektrizitätskonstante – meßtechnisch nur schwer zugänglich sind, ist die Bestimmung der relativen Dielektrizitätskonstante nach Gleichung 2-21 nur eingeschränkt möglich.

Weitere wichtige Einflußgrößen auf die relative Dielektrizitätskonstante sind neben der Temperatur Aggregatzustand, Dichte und Zusammensetzung des Dielektrikums. Bei der Zusammensetzung spielt insbesondere der Wasser- und Ionengehalt eine entscheidende Rolle.

HASTED u. a. (1948) zeigten, daß die in wäßrigen Salzlösungen vorhandenen Ionen zwei Effekte auf die dielektrischen Eigenschaften von reinem Wasser haben. Zum einen sind Wassermoleküle als Hydrathüllen an die Ionen gebunden, was eine Verringerung der Dielektrizitätskonstante auf Werte kleiner der des reinen Wassers bewirkt. Zum anderen steigt die Verlustzahl auf Werte größer der des reinen Wassers aufgrund des in Kapitel 2.1.3 beschriebenen Absorptionsmechanismus der Ionenleitfähigkeit. Der Anteil der Verlustzahl  $\epsilon''_{\sigma}$  einer wäßrigen Ionenlösung, der durch die Ionen bewirkt wird, hängt mit der Leitfähigkeit  $\sigma$  der Lösung, die konzentrations- und temperaturabhängig ist, folgendermaßen zusammen (vgl. DECAREAU, 1985):

$$\epsilon''_{\sigma} = \frac{\sigma}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \epsilon_0} \quad (2-23)$$

Aus Gleichung 2-23 geht auch hervor, daß der Verlustanteil aufgrund der Ionen mit steigender Frequenz sinkt. Ab einer Frequenz von etwa 10 GHz können für Lebensmittel deshalb die Effekte durch die Ionenleitfähigkeit vernachlässigt werden (vgl. ROEBUCK u. a., 1972, DECAREAU, 1985). Mit steigender Temperatur werden die Ionenverlustanteile im Gegensatz zu den polaren Verlusten größer. Deshalb kann es je nach Ionenkonzentration und Temperatur bei wäßrigen Ionenlösungen zu unterschiedlichen Temperaturabhängigkeiten kommen.

In der Literatur wird eine große Anzahl von Gleichungen zur Berechnung der relativen Dielektrizitätskonstante von Mehrkomponentensystemen, und zwar meist von binären Systemen, beschrieben. Ein Großteil der im folgenden vorgestellten Gleichungen wird von GREFFE und GROSSE (1992) ausführlich mit den grundlegenden Theorien in Kapitel 2 des Buches von PRIOU (1992) behandelt. Thema dieses Kapitels ist die statische Dielektrizitätskonstante von Emulsionen. Aus den Verallgemeinerungen in Kapitel 1 (TINGA, 1992) sowie aus den Originalveröffentlichungen geht hervor, daß die hier ausgewählten Gleichungen jedoch darüber hinaus auch für andere Stoffgemische und andere Frequenzbereiche Gültigkeit haben. Weitere Gleichungen sind auch bei HASTED (1973) zu finden. Die Gleichungen lassen sich in drei Gruppen einteilen:

- empirische Gleichungen,
- Gleichungen, die auf weitere Stoffwerte der Mischung zurückgreifen (Grundlage ist das von DEBYE (1929) entwickelte Modell),
- Gleichungen, die auf Reinstoffwerten aufbauen.

Besonders interessant ist die letzte Gruppe von Gleichungen, mit denen aus den relativen Dielektrizitätskonstanten der reinen Stoffe die relative Dielektrizitätskonstante der Mischung berechnet werden kann. Ist dies möglich, kann auf zeitaufwendige und teure Messungen am Gemisch verzichtet werden. Im folgenden werden deshalb in dieser dritten Gruppe nur Gleichungen vorgestellt, mit denen laut Literaturhinweisen auch die Dielektrizitätskonstanten von Lebensmitteln und Lebensmittelinhaltsstoffen vorausberechnet werden können.

#### Empirische Modelle

Empirische Gleichungen rühren aus der Anpassung von Meßdaten her und gelten deshalb auch nur für bestimmte Substanzen bei bestimmten Bedingungen (s. SUN u. a., 1995). Wassergehalt, Aschegehalt und Temperatur der Mischung sind häufig Parameter der Gleichungen.

Beispielhaft ist hier eine Berechnungsformel für die Dielektrizitätskonstante  $\epsilon'$  und die Verlustzahl  $\epsilon''$  von Trauben bei 2,45 GHz, einer Temperatur  $T$  zwischen 25 und 80 °C und einem Wassergehalt  $c$  zwischen 15 und 80 % angegeben (TULASIDAS u. a., 1995):

$$\epsilon' = 44,32 + 25,63 \cdot c - 0,5 \cdot T - 6,18 \cdot c^2 + 6,67 \cdot c \cdot T - 2,07 \cdot T^2 \quad (2-24)$$

$$\epsilon'' = 14,36 + 4,13 \cdot c - 1,69 \cdot T - 5,4 \cdot c^2 + 3,13 \cdot c \cdot T - 0,017 \cdot T^2 \quad (2-25)$$

Die Werte von  $T$  und  $c$  sind in °C bzw. % (Masseprozent) einzusetzen.

Diese Art von Gleichungen sind im Lebensmittelbereich recht häufig zu finden, da es sich meist um komplizierte Vielstoffsysteme z. T. unbekannter und veränderlicher Zusammensetzung handelt.

Für das spezielle System und unter den Bedingungen, unter denen sie erstellt wurden, liefern Berechnungsformeln wie die Gleichungen 2-24 und 2-25 sehr gute Resultate. Eine Verallgemeinerung auf andere Bedingungen und Stoffe ist i. a. jedoch nicht möglich. Aus diesem Grund sind sie für die Modellierung ganzer Substanzklassen ungeeignet. Weitere Beispiele dieser Art von Gleichungen sind bei RAO und RIZVI (1995) und NELSON (1984) finden.

### Modelle auf Grundlage des *Debye-Modells*

Der zweite Gleichungstyp greift zur Berechnung der Dielektrizitätskonstante  $\epsilon'_m$  und der Verlustzahl  $\epsilon''_m$  einer Mischung auf andere Stoffdaten der Mischung zurück. Meistens sind dies die optische und statische Dielektrizitätskonstante  $\epsilon_{\infty,m}$  und  $\epsilon_{s,m}$  und die kritische Wellenlänge  $\lambda_{krit,m}$  bei der Relaxationsfrequenz  $f_{R,m}$  der Mischung (MUDGETT u. a., 1974, MASHIMO u. a., 1989).

Als Beispiel sei hier das *interaktive Modell* (MUDGETT u. a., 1974) für Lösungen polarer Substanzen (beispielsweise Wasser und Ethanol) als Weiterentwicklung des *Debye-Modells* (DEBYE, 1929, Gleichung 2-21) genannt:

$$\epsilon'_m = \frac{\epsilon_{s,m} - \epsilon_{\infty,m}}{1 + \left(\frac{\lambda_{krit,m}}{\lambda_0}\right)^2} + \epsilon_{\infty,m} \quad (2-26)$$

$$\epsilon''_m = \frac{(\epsilon_{s,m} - \epsilon_{\infty,m}) \cdot \frac{\lambda_{krit,m}}{\lambda_0}}{1 + \left(\frac{\lambda_{krit,m}}{\lambda_0}\right)^2} \quad (2-27)$$

In den Gleichungen 2-26 und 2-27 ist  $\lambda_0$  die Freiraumwellenlänge bei der Arbeitsfrequenz  $f$ .

Bei diesem Berechnungsmodell besteht das Problem, daß die optische Dielektrizitätskonstante  $\epsilon_{\infty,m}$  der Mischung meßtechnisch schlecht zugänglich ist, da sie der Grenzwert bei unendlich hoher Frequenz ist. Weiterhin sind für viele Mischungen weder die optische und statische Dielektrizitätskonstante  $\epsilon_{\infty,m}$  und  $\epsilon_{s,m}$ , noch die kritische Wellenlänge  $\lambda_{krit,m}$  bekannt. Um die Messungen am Gemisch zu vermeiden, berechneten MUDGETT u. a. (1974) diese Gemischdaten mit der ebenfalls von ihnen entwickelten *Fricke-Mudgett-Gleichung* (Gleichung 2-32 im folgenden Abschnitt) aus den Daten ( $\epsilon_{\infty}$ ,  $\epsilon_s$  und  $\lambda_{krit}$ ) der reinen Komponenten.

Schließlich existieren noch Gleichungen, vorwiegend für binäre Gemische, in die nur die Reinstoffwerte und die dazugehörigen Volumenanteile sowie z. T. noch ein Formfaktor oder -koeffizient eingehen. Die Reinstoffwerte und die Volumenanteile sind i. a. bekannt oder meßtechnisch leicht zugänglich. Die Temperatur- und Frequenzabhängigkeit werden über die Reinstoffdaten berücksichtigt.

Bei näherer Betrachtung der verschiedenen Modelle wird deutlich, daß sie aufgrund ihrer jeweiligen Herleitung in drei verschiedene Kategorien eingeteilt werden können.

a) Phänomenologische Modelle

Es gibt die phänomenologischen Modelle, bei denen davon ausgegangen wird, daß zwei Phasen mit den Volumenanteilen  $c_{V1}$  und  $c_{V2}$  existieren (WIENER, 1913, RAYLEIGH, 1892, WAGNER, 1914). In den meisten Fällen liegt eine disperse Phase in einer kontinuierlichen Phase vor. Der Volumenanteil der dispersen Phase wird dann mit  $c_{V\sigma}$  bezeichnet.

Ein sehr einfaches Modell ergibt sich aus der Anordnung zweier Dielektrika parallel zu den Platten eines Kondensators, d. h. aus einer Reihenschaltung von Kondensatoren (vgl. Abbildung 2–3). WIENER (1913) stellte die dazugehörige Gleichung für die relative Dielektrizitätskonstante auf. Diese Gleichung wird im folgenden als *serielle Wiener-Gleichung* bezeichnet.

$$\frac{1}{\epsilon_m} = \frac{c_{V2}}{\epsilon_2} + \frac{1-c_{V2}}{\epsilon_1} \tag{2-28}$$

$\epsilon_m$ : relative Dielektrizitätskonstante der binären Mischung

$\epsilon_1$ : relative Dielektrizitätskonstante von Stoff 1

$\epsilon_2$ : relative Dielektrizitätskonstante von Stoff 2

$c_{V2}$ : Volumenanteil von Stoff 2

Ist die Anordnung der Dielektrika senkrecht zu den Kondensatorplatten, d. h. die Kondensatoren sind parallel geschaltet (vgl. Abbildung 2–3), so ergibt sich folgende Gleichung (WIENER, 1913), die *parallele Wiener-Gleichung*:

$$\epsilon_m = c_{V2} \cdot \epsilon_2 + (1-c_{V2}) \cdot \epsilon_1 \tag{2-29}$$

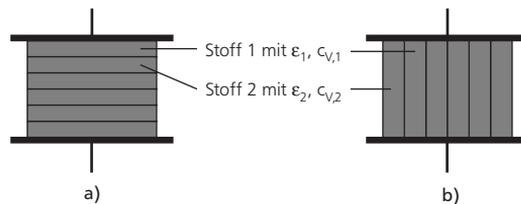


Abb. 2–3: Anordnung zweier Dielektrika a) parallel und b) senkrecht zu den Platten eines Kondensators.

Führt man einen Formkoeffizienten  $u$  ein, lassen sich die Gleichungen 2-28 und 2-29 zu einer Gleichung zusammenfassen (WIENER, 1913), der *allgemeinen Wiener-Gleichung*:

$$\frac{\varepsilon_m - \varepsilon_1}{\varepsilon_m + u \cdot \varepsilon_1} = c_{V,2} \cdot \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{\varepsilon_2 + u \cdot \varepsilon_1} \quad (2-30)$$

Es ergibt sich für  $u = 0$  Gleichung 2-28 und für  $u \rightarrow \infty$  Gleichung 2-29. Der Formkoeffizient  $u$  ist ein Maß für den Winkel zwischen den Schichten der Dielektrika und der Richtung des elektrischen Feldes. WIENER (1913) gibt weiterhin an, auch abweichende Geometrien, wie etwa kugelförmige Körper, über den Formkoeffizienten  $u$  zu berücksichtigen.

RAYLEIGH (1892) betrachtete die elektrische Leitfähigkeit eines Mediums, das von regelmäßig angeordneten „Hindernissen“ durchsetzt ist. Seine Ausführungen dienten als Grundlage für ein weiteres Modell zur Ermittlung von Dielektrizitätskonstanten disperser Gemische (s. GREFFE und GROSSE, 1992), der *Rayleigh-Gleichung* (für eine kugelförmige disperse Phase):

$$\varepsilon_m = \varepsilon_c \cdot \left[ \frac{\varepsilon_d + 2 \cdot \varepsilon_c + 2 \cdot c_{V,d} \cdot (\varepsilon_d - \varepsilon_c) - c_{V,d}^{10/3} \cdot \frac{\pi^2 \cdot (\varepsilon_d - \varepsilon_c)^2}{6 \cdot \left( \varepsilon_d + 4 \cdot \frac{\varepsilon_c}{3} \right)} + \dots}{\varepsilon_d + 2 \cdot \varepsilon_c - c_{V,d} \cdot (\varepsilon_d - \varepsilon_c) - c_{V,d}^{10/3} \cdot \frac{\pi^2 \cdot (\varepsilon_d - \varepsilon_c)^2}{6 \cdot \left( \varepsilon_d + 4 \cdot \frac{\varepsilon_c}{3} \right)} + \dots} \right] \quad (2-31)$$

$\varepsilon_c$ : relative Dielektrizitätskonstante der kontinuierlichen Phase

$\varepsilon_d$ : relative Dielektrizitätskonstante der dispersen Phase

$c_{V,d}$ : Volumenanteil der dispersen Phase

Diese Gleichung geht aus einer *Laplace*-Transformation hervor und stellt eine unendliche Reihe dar. Voraussetzung ist eine matrixartige Anordnung der zylinder- oder kugelförmigen dispersen Phase. Über Art und Aussehen höherwertiger Glieder sind in der Literatur (s. GREFFE und GROSSE, 1992) keine Angaben zu finden, sie werden vernachlässigt.

Der Term  $c_{V,d}^{10/3} \cdot \dots$  berücksichtigt nicht näher spezifizierte Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Bereichen der dispersen Phase (z. B. zwischen einzelnen Tropfen bei Emulsionen).

Für ein Modell zur Berechnung der elektrischen Leitfähigkeit kombinierte FRICKE (1955) einen Ansatz von MAXWELL für Kugeln (vgl. TINGA, 1992) mit der Theorie von RAYLEIGH für Zylinder. MUDGETT u. a. (1974) übertrugen dies auf die relative Dielektrizitätskonstante. Dabei kann die komplexe relative Dielektrizitätskonstante  $\varepsilon_m$  einer dispersen, binären Mischung direkt berechnet werden

(Gleichung 2-32). Die Geometrie der dispersen Phase wird mit einem Formfaktor  $a$  berücksichtigt. Dies ist die *Fricke-Mudgett-Gleichung*.

$$\varepsilon_m = \varepsilon_c \cdot \frac{\varepsilon_d \cdot (1 + a \cdot c_{V,d}) + \varepsilon_c \cdot a \cdot (1 - c_{V,d})}{\varepsilon_c \cdot (a + c_{V,d}) + \varepsilon_d \cdot (1 - c_{V,d})} \quad (2-32)$$

Für eine kugelförmige innere Phase ist der Formfaktor  $a = 2$ , für Nadeln bzw. Zylinder ist  $a = 1$ .

Einschränkend ist festzuhalten, daß als Voraussetzung eine sehr viel größere relative Dielektrizitätskonstante  $\varepsilon_c$  der kontinuierlichen Phase im Vergleich zur relativen Dielektrizitätskonstante  $\varepsilon_d$  der dispersen Phase gefordert wird. Dieses Modell sollte daher eigentlich nicht auf Wasser-in-Öl-Emulsionen angewendet werden, da Wasser eine höhere relative Dielektrizitätskonstante als Öl hat.

MUDGETT u. a. (1974) verwendeten Gleichung 2-32 auch, um anstelle der relativen Dielektrizitätskonstante  $\varepsilon_m$  der Mischung die optische und statische Dielektrizitätskonstante  $\varepsilon_{\infty,m}$  und  $\varepsilon_{s,m}$  sowie die kritische Wellenlänge  $\lambda_{krit,m}$  der Mischung zu berechnen. Es werden dafür entsprechend die Werte  $\varepsilon_{\infty}$ ,  $\varepsilon_s$  und  $\lambda_{krit}$  der reinen Komponenten in Gleichung 2-32 eingesetzt. Die so berechneten Daten der Mischung dienen MUDGETT als Grundlage für die Berechnung der Dielektrizitätskonstante und Verlustzahl einer Mischung nach dem interaktiven Modell (s. Gleichungen 2-26 und 2-27 im vorherigen Abschnitt).

Betrachtet man den Grenzwert der Gleichung 2-32 für  $a \rightarrow \infty$ , ergibt sich die *parallele Wiener-Gleichung* 2-29:

$$\varepsilon_m = \lim_{a \rightarrow \infty} \left( \varepsilon_c \cdot \frac{\varepsilon_d \cdot (1 + a \cdot c_{V,d}) + \varepsilon_c \cdot a \cdot (1 - c_{V,d})}{\varepsilon_c \cdot (a + c_{V,d}) + \varepsilon_d \cdot (1 - c_{V,d})} \right) = \varepsilon_d \cdot c_{V,d} + \varepsilon_c \cdot (1 - c_{V,d}) \quad (2-33)$$

Der Grenzwert  $a \rightarrow 0$  führt zur *seriellen Wiener-Gleichung* 2-28:

$$\varepsilon_m = \lim_{a \rightarrow 0} \left( \varepsilon_c \cdot \frac{\varepsilon_d \cdot (1 + a \cdot c_{V,d}) + \varepsilon_c \cdot a \cdot (1 - c_{V,d})}{\varepsilon_c \cdot (a + c_{V,d}) + \varepsilon_d \cdot (1 - c_{V,d})} \right) = \frac{\varepsilon_c \cdot \varepsilon_d}{\varepsilon_c \cdot c_{V,d} + \varepsilon_d \cdot (1 - c_{V,d})} \quad (2-34)$$

Wird in der *Fricke-Mudgett-Gleichung* 2-32 der Formfaktor  $a = 1$  (Zylinder, Nadeln) gesetzt, ist diese auch gleich der *allgemeinen Wiener-Gleichung* 2-30 mit einem Formkoeffizienten  $u = 1$ .

$$\varepsilon_m (a = 1) = \varepsilon_c \cdot \frac{\varepsilon_c + \varepsilon_d + c_{V,d} \cdot (\varepsilon_d - \varepsilon_c)}{\varepsilon_d + \varepsilon_c - c_{V,d} \cdot (\varepsilon_d - \varepsilon_c)} \quad (2-35)$$

Mit dem Formfaktor  $a = 2$  für Kugeln ergibt sich Gleichung 2-36. Diese ist gleich der *Rayleigh-Gleichung* 2-31 ohne die Wechselwirkungsterme.

$$\epsilon_m (a=2) = \epsilon_c \cdot \frac{2 \cdot \epsilon_c + \epsilon_d + 2 \cdot c_{V,d} \cdot (\epsilon_d - \epsilon_c)}{\epsilon_d + 2 \cdot \epsilon_c - c_{V,d} \cdot (\epsilon_d - \epsilon_c)} \quad (2-36)$$

Gleichung 2-36 entspricht genau der Gleichung, die von MAXWELL bereits 1873 für die elektrische Leitfähigkeit eines dispersen Systems, bei dem Kugeln in einer kontinuierlichen Phase gleichmäßig verteilt sind, aufgestellt wurde (vgl. TINGA, 1992).

## b) Molekulare Modelle

Die molekularen Modelle leiten sich aus einer Betrachtung der mittleren Dipolmomente der einzelnen Komponenten  $i$  ab. Dafür wird die Definition der Polarisation eingesetzt (vgl. GREFFE und GROSSE, 1992):

$$\epsilon_0 \cdot (\epsilon_m - 1) \cdot \vec{E} = \sum_i N_{V,i} \cdot \vec{m}_i \quad (2-37)$$

$\epsilon_0$ : elektrische Konstante

$\vec{E}$ : elektrische Feldstärke

$N_{V,i}$ : Molekülanzahl der Komponente  $i$  pro Volumeneinheit

$\vec{m}_i$ : mittleres Dipolmoment der Komponente  $i$

WAGNER (1914) erhielt auf diesem Weg für Kugeln in einer kontinuierlichen Phase eine Gleichung, die gleich der *Rayleigh-Gleichung* ohne die Wechselwirkungsterme und gleich der *Fricke-Mudgett-Gleichung* 2-36 mit dem Formfaktor  $a = 2$  für Kugeln und damit gleich der von MAXWELL entwickelten Gleichung ist.

Laut Literatur ist eine Vernachlässigung der Wechselwirkungen innerhalb der dispersen Phase dann gerechtfertigt, wenn diese in geringer Konzentration vorliegt (s. GREFFE und GROSSE, 1992). Genaue Konzentrationen oder zumindest Größenordnungen werden nicht angegeben.

MOSOTTI (s. GREFFE und GROSSE, 1992) und CLAUSIUS (1879) betrachteten das lokale elektrische Feld um ein einzelnes Molekül und übertrugen diesen molekularen Ansatz auf ein disperses System mit der Annahme, daß sich eine kugelförmige disperse Phase in elektrostatischer Hinsicht entsprechend einem einzelnen Molekül verhält. Sie gelangten durch diese Betrachtung ebenfalls zur oben gezeigten Gleichung 2-36.

MOSOTTI und CLAUSIUS entwickelten ihre Gleichung für Mischungen, in denen beide Stoffe apolar sind, was im Lebensmittelbereich nur selten zutrifft, da z. B. in den meisten Lebensmitteln Wasser enthalten ist.

Ausgehend von kristallinem Pulver und unter Einbeziehung der Theorie von ONSAGER (1936) leitete BÜTTCHER (1944) eine Formel für disperse Zweiphasensysteme her (*Böttcher-Gleichung*):

$$\frac{\varepsilon_m - \varepsilon_c}{3 \cdot \varepsilon_m} = c_{V,d} \cdot \frac{\varepsilon_d - \varepsilon_c}{2 \cdot \varepsilon_m + \varepsilon_d} \quad (2-38)$$

Gleichung 2-38 ist laut Literatur für fest-flüssige und fest-gasförmige Systeme sowie für Emulsionen gültig (s. GREFFE und GROSSE, 1992 und STAMMER, 1991).

### c) Allgemeine Modelle

Charakteristisch für diese Art von Gleichungen ist, daß mit ihnen für alle Arten von Gemischen (z. B. Lösungen, Emulsionen und multiple Emulsionen) die relativen Dielektrizitätskonstanten berechenbar sein sollen. Sie stellen somit den allgemeinsten Fall dar.

Die Theorie von LICHTENECKER und ROTHER (1931) basiert auf einigen mathematischen Überlegungen zu den Einflußparametern auf die relative Dielektrizitätskonstante  $\varepsilon_m$  eines binären Systems. Diese drei Parameter sind die beiden Reinstoffwerte  $\varepsilon_1$  und  $\varepsilon_2$  sowie der Volumenanteil  $c_{V,2}$  des Reinstoffes 2. Eine solche Funktion soll stetig, monoton und nach allen drei Variablen  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  und  $c_{V,2}$  ableitbar sein. Des weiteren wird Homogenität und Linearität gefordert. Schließlich soll die Gleichung auch für Mischungen von Mischungen anwendbar sein. Die mathematischen Beziehungen, die diese Forderungen erfüllen, sind die Potenzfunktion mit dem Exponenten  $k \neq 0$ :

$$\varepsilon_m^k = c_{V,2} \cdot \varepsilon_2^k + (1 - c_{V,2}) \cdot \varepsilon_1^k \quad (2-39)$$

und die folgende Gleichung 2-40, die *Lichtenecker-Rother-Gleichung*:

$$\ln \varepsilon_m = c_{V,2} \cdot \ln \varepsilon_2 + (1 - c_{V,2}) \cdot \ln \varepsilon_1 \quad (2-40)$$

Gleichung 2-39 läßt sich mit  $k = -1$  in die *serielle* bzw. mit  $k = 1$  in die *parallele Wiener-Gleichung* überführen.

LANDAU und LIFSCHITZ (1967) gingen von der Voraussetzung aus, daß die relativen Dielektrizitätskonstanten der beiden Phasen etwa gleich groß sind. Unter Berücksichtigung der *Maxwell'schen* Gleichungen gelangten sie zu einem Ausdruck für Mischungen mit geringen Konzentrationen der Phase 2:

$$\varepsilon_m = \varepsilon_1 + 3 \cdot \frac{\varepsilon_1 \cdot (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) \cdot c_{V,2}}{2 \cdot \varepsilon_1 + \varepsilon_2} \quad (2-41)$$

Auch hier wird der Konzentrationsbereich der Phase 2 nicht näher eingegrenzt. Die Bedingung fast identischer Dielektrizitätskonstanten der beiden Phasen, sowie die Voraussetzung geringer Konzentrationen der Phase 2, schränken die Anwendbarkeit dieser Gleichung im Lebensmittelbereich stark ein.

Strenggenommen gilt ein Teil der Gleichungen nur für Systeme, die aus einer dispersen in einer kontinuierlichen Phase bestehen. Solche Systeme sind beispielsweise Suspensionen oder Emulsionen. Trotzdem werden in der Literatur diese Gleichungen auch zur Beschreibung von Gemischen, die aus ineinander löslichen Substanzen bestehen (z. B. Methanol-Wasser), eingesetzt. Es wird dann angenommen, daß der Stoff mit der kleineren relativen Dielektrizitätskonstante der dispersen Phase und der Stoff mit der höheren relativen Dielektrizitätskonstante der kontinuierlichen Phase entspricht. Auch in diesen Fällen werden stets die Volumenanteile der Komponenten zur Konzentrationsangabe verwendet, obwohl hier die Angabe in molaren Anteilen sinnvoller wäre.

Mit Ausnahme der *Fricke-Mudgett-Gleichung*<sup>2–32</sup> ist aus der Literatur nicht ersichtlich, ob mit den Gleichungen die komplexe relative Dielektrizitätskonstante der Mischung berechnet wird und deshalb die Gleichungen in Real- und Imaginärteil zerlegt werden müssen oder ob in die Gleichungen einmal die Dielektrizitätskonstante und einmal die Verlustzahl einzeln einzusetzen sind. Nur MUDGETT u. a. (1974) erweiterten die ursprünglich von FRICKE (1955) entwickelte Gleichung auf den komplexen Bereich. Sie gilt aus diesem Grund für beide Bereiche. Eine Überprüfung ergab, daß die relativen Abweichungen zwischen den nach den beiden möglichen Berechnungsmethoden bestimmten Werten für die vorgestellten Gleichungen kleiner als 5 % sind.<sup>8</sup> Aus diesem Grund wurde bei der Bezeichnung der vorgestellten Gleichungen auch nicht durch Indizes unterschieden, ob es sich um die relative Dielektrizitätskonstante  $\epsilon_r$ , die Dielektrizitätskonstante  $\epsilon'$  (Realteil) oder die Verlustzahl  $\epsilon''$  handelt.

### 2.2.3 Verfahren zur Messung der relativen Dielektrizitätskonstante

In der Literatur werden zahlreiche Verfahren zur Messung der relativen Dielektrizitätskonstante beschrieben. Übersichten über Meßprinzipien und Meßverfahren sind bei ROST (1978), NIMTZ (1990), ALTSCHULER (1963) und CHAMBERLAIN und CHANTRY (1973) zu finden. Die Meßverfahren wurden in der Regel für die Untersuchungen von Materialien aus der Hochfrequenz- und Nachrichtentechnik entwickelt. Bei diesen Stoffen sind hohe dielektrische Verluste, im Gegensatz zur

---

<sup>8</sup> Zur Überprüfung wurden die vorgestellten Gleichungen auf einem *Apple Macintosh*<sup>TM</sup>-Rechner mit dem Mathematikprogramm *Maple V*<sup>TM</sup> (Version 5.3.0) der Firma *Waterloo Maple Software* in Real- und Imaginärteil zerlegt. Anschließend wurden Werte für die Dielektrizitätskonstante und Verlustzahl, d. h. komplexe relative Dielektrizitätskonstanten, eingesetzt und diese Werte mit den Werten verglichen, die berechnet werden, wenn in die Gleichungen nur die Dielektrizitätskonstante oder nur die Verlustzahl eingesetzt wird. Mit relativer Abweichung ist dabei die Differenz der auf die zwei Arten bestimmten Werte bezogen auf den Wert, der mit komplexer Rechnung erhalten wurde, gemeint.

Anwendung der Mikrowellenerwärmung, unerwünscht. Die Meßverfahren sind deshalb so entwickelt worden, daß meist nur sehr kleine Werte der relativen Dielektrizitätskonstante bestimmt werden können. Aus diesem Grund ist die direkte Anwendung der Verfahren für die Messung der Dielektrizitätskonstante und der Verlustzahl von Lebensmitteln schwierig, da hier hohe Werte dieser Größen angestrebt werden.

Prinzipiell wird zwischen zwei Hauptmeßprinzipien unterschieden. Bei Messungen im Zeitbereich (*Time Domain Spectroscopy*) wird der zu untersuchende Stoff durch einen Spannungssprung angeregt und die Relaxation des Stoffes gemessen. Diese Messungen sind sehr aufwendig, ungenau und aus diesem Grund nicht für Messungen an Lebensmitteln und Lebensmittelinhaltsstoffen geeignet (vgl. MEYER, 1978, BOSE u. a., 1984). Sie werden deswegen hier nicht weiter beschrieben. Die meisten Meßverfahren arbeiten in einem Frequenzbereich (*Frequency Domain Spectroscopy*), d. h. das zu untersuchende Material wird in ein breitbandiges elektromagnetisches Feld eingebracht (das Feld wird dadurch gestört), und die sich einstellende (für jedes System charakteristische) Resonanzfrequenz wird gemessen. Aus der Änderung der Resonanz gegenüber dem ungestörten Zustand wird auf die dielektrischen Eigenschaften geschlossen. Der Frequenzbereich erstreckt sich dabei typischerweise über einige Megahertz. Die Meßverfahren im Frequenzbereich werden in Leitungs- und in Resonatormethoden eingeteilt.

### Leitungsmeßverfahren

Bei den Leitungsmeßverfahren ist der zu untersuchende Stoff Teil einer Hochfrequenzleitung, deren Leitungseigenschaften gemessen werden. Je nach Anwendung sind dies die Reflexions- und/oder die Transmissions-eigenschaften. Als Hochfrequenzleitungen werden Hohlleiter und Koaxialleitungen eingesetzt.

#### a) Transmissionsmethoden

Frühe Untersuchungen zur Bestimmung von dielektrischen Eigenschaften mit der Transmissionsmethode wurden von ROBERTS und VON HIPPEL (1946) und VON VON HIPPEL (1954) beschrieben. Die Leitung wird kurzgeschlossen und Phase und Amplitude des reflektierten Signals gemessen. Die Probe befindet sich dabei am kurzgeschlossenen Ende in der Leitung (geschlossene Meßleitung). Um Störungen zu vermeiden, muß die Probe genau in die Leitung eingepaßt werden, und die Abmessungen der Probe sollten etwa ein Viertel der Wellenlänge in der Probe betragen. Daher muß die relative Dielektrizitätskonstante zumindest näherungsweise bekannt sein. Bei einer anderen Variante wird die Leitung nicht kurzgeschlossen, und es werden sowohl die transmittierte als auch die reflektierte Leistung gemessen und daraus auf die relative Dielektrizitätskonstante geschlossen. Die Transmissionsmethoden sind sehr genau, sofern die Probenabmessungen exakt eingehalten werden können. So verursachen Luftspalte zwischen Probe und

Leitung sehr große und oft nicht einzuschätzende Fehler. Diese Methoden sind daher zur Bestimmung der relativen Dielektrizitätskonstante von Lebensmitteln weniger gut geeignet (s. ENGELDER und BUFFLER, 1991).

Zu den Transmissionsmethoden gehören auch die Freiraum-Transmissionsverfahren. Hierbei wird die zu untersuchende Probe zwischen eine Sender- und eine Empfängerantenne plaziert und die Abschwächung und Phasenverschiebung des Empfängersignals gegenüber dem ausgesendeten Signal aufgenommen. Mehrfache Reflexionen und Beugungseffekte an den Kanten der Probe können große Störungen verursachen und die Genauigkeit der Messungen stark einschränken. Diesen Nachteilen stehen jedoch einige Vorteile gegenüber. Freiraummessungen sind berührungslos und erfordern keine komplizierten Probenvorbereitungen, so daß sie auch zur kontinuierlichen Überwachung von z. B. Feuchte oder Dichte von Schüttgütern in der Industrie eingesetzt werden können. Trotz Verbesserungen der Methode ist sie für die Bestimmung der relativen Dielektrizitätskonstante für die Mikrowellenerwärmung bei 2,45 GHz nicht geeignet, da nur in einem Frequenzbereich größer 10 GHz gemessen wird (s. KRASZEWSKI u. a., 1996).

#### b) Reflexionsmethoden – Methode der offenen Koaxialleitung

Bei den Reflexionsmethoden wird die von der Substanz reflektierte Leistung der elektromagnetischen Wellen gemessen. Dabei kann das Stehwellenverhältnis zur Bestimmung der dielektrischen Eigenschaften herangezogen werden. Das Stehwellenverhältnis ist das Verhältnis der Abstände zwischen der Probe und dem ersten Maximum bzw. dem ersten Minimum des elektrischen Feldes (vgl. ROBERTS und VON HIPPEL, 1946).

Die Methode der offenen Koaxialleitung ist ein spezielles Reflexionsverfahren (s. STUCHLY und STUCHLY, 1980). Diese Methode basiert auf einer Koaxialleitung, deren eines „offenes“ Ende, der Tastkopf, direkt in Kontakt mit der zu untersuchenden Substanz gebracht wird. Das andere Ende ist an einen Hochfrequenzgenerator und -analysator angeschlossen. Aus dem von der Probe reflektierten Signal werden die Dielektrizitätskonstante und die Verlustzahl bestimmt. Vorteil dieser Methode ist, daß lediglich eine ebene Probenoberfläche, auf die der Tastkopf aufgesetzt oder in die er bei Flüssigkeiten eingetaucht wird, erforderlich ist. Weiterhin kann mit dieser Methode ein großer Frequenzbereich erfaßt werden, so auch die Mikrowellenfrequenz von 2,45 GHz. Im Bereich hoher Frequenzen über 20 GHz und kleiner Frequenzen unter ungefähr 100 MHz werden die Messungen ungenau. Dies gilt besonders bei der Bestimmung von Verlustzahlen  $\epsilon'' < 1$  (s. ENGELDER und BUFFLER, 1991, HEWLETT PACKARD, 1993d). Im Bereich kleiner relativer Dielektrizitätskonstanten ist dieses Verfahren ungenauer als die anderen genannten Methoden. Insgesamt wird aber ein großer Wertebereich erfaßt. Aufgrund der einfachen Handhabbarkeit und Probenvorbereitung und des großen Frequenzbereichs ist dieses System für Lebensmittel, sofern die Substanzen nicht zu grobdispers sind, gut geeignet.

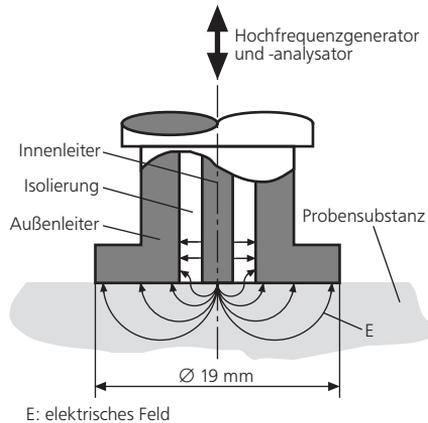


Abb. 2-4: Tastkopf einer offenen Koaxialleitung (nach HEWLETT PACKARD, 1993a).

Da mit dieser Methode für diese Arbeit ein Großteil der Dielektrizitätskonstanten und der Verlustzahlen gemessen wurde und die im folgenden beschriebenen Resonanzmethoden mit diesem System kalibriert wurden, wird das Meßprinzip hier etwas ausführlicher beschrieben. In Abbildung 2-4 ist der Tastkopf des Systems der Firma Hewlett Packard, das in dieser Arbeit eingesetzt wurde, dargestellt. Die eigentliche Meßgröße ist nicht die relative Dielektrizitätskonstante selbst, sondern der frequenzabhängige, komplexe Reflexionskoeffizient  $\Gamma$  (vgl. JIANG u. a., 1993). Der Reflexionskoeffizient  $\Gamma$  läßt sich in Amplitude und Phase  $\varphi$  wie folgt zerlegen:

$$\Gamma = |\Gamma| \cdot e^{j\varphi} \quad (2-42)$$

Zur Auswertung werden der Tastkopf und die Probensubstanz als Stromkreis mit zwei parallel geschalteten Kondensatoren betrachtet. Das Ersatzschaltbild ist in Abbildung 2-5 zu sehen. Ein Kondensator mit der Kapazität  $C_f$  erfaßt den Anteil des elektrischen Feldes, der über die Isolierung wirkt (engl. *fringing field capacitance*), während der zweite Kondensator den Einfluß der untersuchten Probe berücksichtigt. Vor der eigentlichen Messung wird das System kalibriert. In diesem Fall ist Luft die Probe, deren Kapazität  $C_0$  bestimmt wird. Wird nun anstelle der Luft eine andere Substanz untersucht, so ändert sich die Kapazität des zweiten Kondensators. Die Kapazität ist dann das Produkt der relativen Dielektrizitätskonstante  $\epsilon_r$  der Probe und der Kapazität  $C_0$  der Luft.

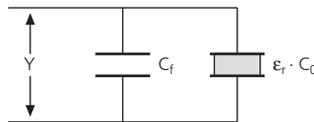


Abb. 2-5: Ersatzschaltbild des Tastkopfs einer offenen Koaxialleitung.

Aus der Messung des komplexen Reflexionskoeffizientens  $\Gamma$  läßt sich mit Hilfe des Leitwerts  $Y_0$  bzw. der Impedanz  $Z_0$  des Meßsystems ein komplexer Leitwert  $Y$  bzw. eine komplexe Impedanz  $Z$  berechnen, wenn eine Substanzprobe am Tastkopf anliegt.

$$Y = Y_0 \frac{1-\Gamma}{1+\Gamma} \quad (2-43)$$

mit  $Z = Y^{-1}$  folgt:

$$Z = Z_0 \frac{1+\Gamma}{1-\Gamma} \quad (2-44)$$

Der Leitwert  $Y$  eines Kondensators berechnet sich aus der Kapazität  $C$  und der Kreisfrequenz  $\omega$ :

$$Y = j \cdot \omega \cdot C \quad (2-45)$$

Bei der Parallelschaltung der beiden Kondensatoren mit den Kapazitäten  $C_f$  und  $\epsilon_r \cdot C_0$  werden die einzelnen Leitwerte addiert:

$$Y = j \cdot \omega \cdot C_f + j \cdot \omega \cdot \epsilon_r \cdot C_0 \quad (2-46)$$

Hieraus lassen sich unter Berücksichtigung der Gleichungen 2-42 und 2-44 die Dielektrizitätskonstante  $\epsilon'$  und die Verlustzahl  $\epsilon''$  mit den Gleichungen 2-47 und 2-48 berechnen (GRANT u. a., 1989):

$$\epsilon' = \frac{-2 \cdot |\Gamma| \cdot \sin \varphi}{\omega \cdot C_0 \cdot Z_0 \cdot \left(1 + 2 \cdot |\Gamma| \cdot \cos \varphi + |\Gamma|^2\right)} - \frac{C_f}{C_0} \quad (2-47)$$

$$\epsilon'' = \frac{1 - |\Gamma|^2}{\omega \cdot C_0 \cdot Z_0 \cdot \left(1 + 2 \cdot |\Gamma| \cdot \cos \varphi + |\Gamma|^2\right)} \quad (2-48)$$

Ob die relativen Dielektrizitätskonstanten bei dem in der vorliegenden Arbeit verwendeten Meßsystem von *Hewlett Packard* nach den oben vorgestellten Gleichungen 2-47 und 2-48 bestimmt werden, konnte nicht geklärt werden, da die Auswerte-Software Betriebsgeheimnis ist. Die Meßgröße ist allerdings auch bei dem Meßsystem von *Hewlett Packard* der komplexe Reflexionskoeffizient.

Für das Modell mit dem gezeigten Ersatzschaltbild (vgl. Abbildung 2-5) werden einige Annahmen getroffen. Zum einen muß die Meßanordnung, d. h. der Tastkopf, achsymmetrisch sein. Außerdem wird vorausgesetzt, daß der Durchmesser des Außenleiters des Tastkopfs (s. Abbildung 2-4) unendlich ist, zumindest jedoch sehr viel größer als der Durchmesser des Innenleiters. Die Probe unter dem Tastkopf wird als homogener physikalischer Halbraum betrachtet (HEWLETT PACKARD, 1993a).

## Resonatormeißverfahren

Zur Bestimmung der dielektrischen Eigenschaften sind die am weitesten verbreiteten Meßmethoden die Resonatormeißverfahren, da mit Resonatoren auch sehr kleine Verlustzahlen gemessen werden können. Deshalb werden Resonatoren bevorzugt in der Hochfrequenz- und Nachrichtentechnik eingesetzt. Häufig sind sie sogar die einzige Methode, mit der kleine Werte der relativen Dielektrizitätskonstante genau bestimmt werden können (s. ENGELDER und BUFLER, 1991). Im Gegensatz zu den Leitungsmeßverfahren können mit Resonatoren die Dielektri-

zitätskonstante und Verlustzahl nur bei einer bestimmten Frequenz, der Resonanzfrequenz des Meßsystems, bestimmt werden. Soll bei einer anderen Frequenz gemessen werden, ist ein weiterer Resonator mit anderen Abmessungen einzusetzen. Ein Vorteil gegenüber den Leitungsmeßmethoden – bis auf die offene Koaxialleitung – ist die meist unkomplizierte Probenhandhabung, da die Proben in einen Resonator einfacher einzubringen sind als in eine geschlossene Meßleitung.

Ein Resonator ist ein von metallischen Wänden abgeschlossener Hohlraum, der deshalb auch als Hohlraumresonator bezeichnet wird, in dem sich aufgrund stehender Wellen eine elektromagnetische Resonanz ausbildet (vgl. ROST, 1978). Die Resonanzfrequenz eines Resonators wird von seinen Abmessungen bestimmt. Übliche Resonatoren sind in der Regel zylinderförmig und in Anlehnung an Rechteckhohlleiter teilweise auch quaderförmig. Zylindrische Hohlraumresonatoren sind jedoch einfacher zu fertigen als quaderförmige. Da in dieser Arbeit nur zylindrische Resonatoren eingesetzt wurden, werden hier nur die Gleichungen für diese Resonatoren angegeben.

In Abhängigkeit von Größe und Form des Resonanzraums sowie der Art der Einkopplung der elektromagnetischen Wellen bilden sich verschiedene Feldkonfigurationen aus. Für die beiden einfachen Fälle einer transversal elektrischen Welle (TE- oder H-Welle) und einer transversal magnetischen Welle (TM- oder E-Welle) tritt in der jeweiligen Ausbreitungsrichtung keine elektrische oder magnetische Feldkomponente auf. Die Feldkonfiguration, Mode genannt, wird durch Indizes beschrieben, die die Anzahl der Halbwellen der elektrischen oder magnetischen Feldstärke  $E$  oder  $H$  in der jeweiligen Raumrichtung angeben. So bedeutet für einen zylindrischen Resonator z. B.  $E_{012}$ -Mode, daß keine Komponente in Umfangsrichtung, eine Halbwelle (Halbperiode) in radialer Richtung und zwei Halbwellen in axialer Richtung auftreten (vgl. KUMMER, 1986).

Die Resonanzwellenlänge  $\lambda_{R,l}$  und damit die Resonanzfrequenz  $f_{R,l}$  eines leeren, zylindrischen Resonators lassen sich aus den Abmessungen mit folgender Gleichung 2-49 für einen  $E_{mnp}$ -Mode berechnen (s. KUMMER, 1986, CHAMBERLAIN und CHANTRY, 1973):

$$\lambda_{R,l} = \frac{c_0}{f_{R,l}} = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{2 \cdot x_{m,n}}{\pi \cdot d}\right)^2 + \left(\frac{\rho}{h}\right)^2}} \quad (2-49)$$

Entsprechend gilt Gleichung 2-50 für einen  $H_{mnp}$ -Mode:

$$\lambda_{R,l} = \frac{c_0}{f_{R,l}} = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{2 \cdot x'_{m,n}}{\pi \cdot d}\right)^2 + \left(\frac{\rho}{h}\right)^2}} \quad (2-50)$$

In den Gleichungen 2-49 und 2-50 sind  $d$  der Innenraumdurchmesser und  $h$  die Innenhöhe des Resonators,  $x_{m,n}$  die  $n$ -te Nullstelle und  $x'_{m,n}$  die  $n$ -te Nullstelle der

ersten Ableitung der *Besse*-funktion  $m$ -ter Ordnung,  $p$  die Zahl der Halbwellen in axialer Richtung sowie  $c_0$  die Vakuumlichtgeschwindigkeit. Die Werte der Nullstellen der *Besse*-funktion und ihrer Ableitung sind für einige häufig verwendete Moden im Anhang A 1 tabelliert.

Bei der Wahl eines geeigneten Moden und geeigneter Resonatorabmessungen muß bedacht werden, wie groß die zu untersuchenden Proben sind oder sein sollen. Die Proben müssen für die Messungen einfach in den Resonator einbringen und zu entnehmen sein, und außerdem dürfen durch das Einbringen der Substanz die Veränderungen der Resonanz nicht zu groß sein, um sinnvolle Meßergebnisse zu erhalten. Ist ein geeigneter Mode ausgewählt worden, bedeutet dies aber nicht, daß nicht noch weitere Moden mit anderen Resonanzfrequenzen bzw. Resonanzwellenlängen auftreten können. Dies ist im Modendiagramm zu erkennen (vgl. Abbildung 2-6), in dem für einige  $E$ - und  $H$ -Moden  $(d/\lambda_{R_1})^2$  über  $(d/h)^2$  aufgetragen ist (s. KUMMER, 1986, MEINKE und GUNDLACH, 1992).

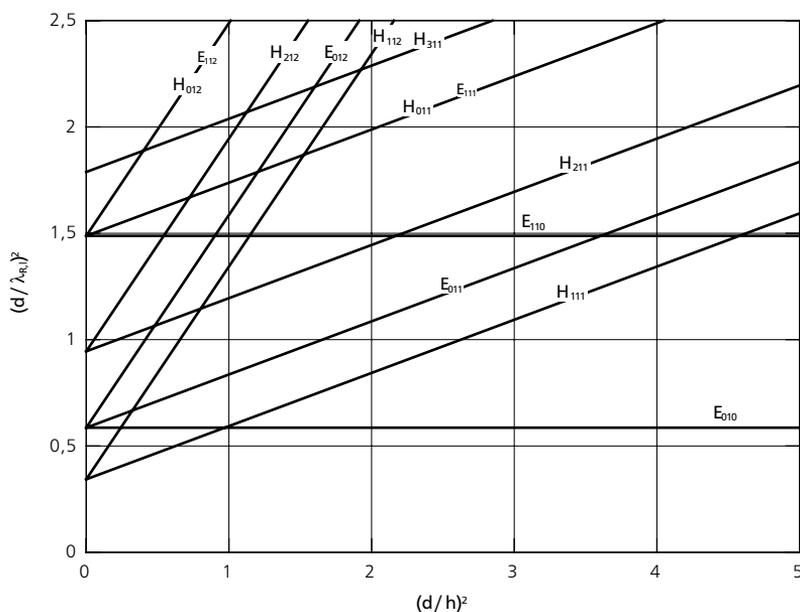


Abb. 2-6: Modendiagramm für zylindrische Resonatoren (nach KUMMER, 1986).

Für ein gewähltes Verhältnis von  $d/h$  läßt sich aus Abbildung 2-6 bestimmen, welche Resonanzwellenlängen und damit welche Resonanzfrequenzen die verschiedenen Moden haben. Es ist so leicht zu überprüfen, ob möglicherweise Moden mit gleicher oder ähnlicher wie die gewünschte Resonanzfrequenz auftreten, die eine Messung stören können. Unerwünschte Moden lassen sich durch geeignete Wahl der Einkopplung der elektromagnetischen Wellen unterdrücken. Hinweise zur Wahl eines geeigneten Verhältnisses von  $d/h$  und zur Auswertung der Resonanzkurve (im folgenden Abschnitt beschrieben) sind auch in der Norm DIN IEC 49(Sec)250 zu finden.

Wird nun eine Substanz in einen Resonator eingebracht, ändert sich die Resonanz gegenüber dem Leerzustand in Abhängigkeit von den dielektrischen Eigenschaften des eingebrachten Stoffes. In Abbildung 2-7 sind die Resonanzkurven für einen ungefüllten und einen gefüllten Resonator schematisch dargestellt. Die Resonanzfrequenz verschiebt sich zu kleineren Frequenzen, und die Kurve wird abgeschwächt und breiter, wenn der Resonator mit dem zu untersuchenden Material gefüllt ist. Gemessen werden

- die Resonanzfrequenzen des leeren und gefüllten Resonators  $f_{R,I}$  bzw.  $f_{R,V}$  (Resonanzfrequenzverschiebung  $\Delta f_R = f_{R,I} - f_{R,V}$ ),
- die Abschwächung  $\alpha$  der Resonanzkurve:  $\alpha = I_{\max}(f_{R,I}) - I_{\max}(f_{R,V})$ ,
- die Güten des leeren und gefüllten Resonators  $Q_I$  bzw.  $Q_V$  als Maß für die Breite der Resonanzkurve.

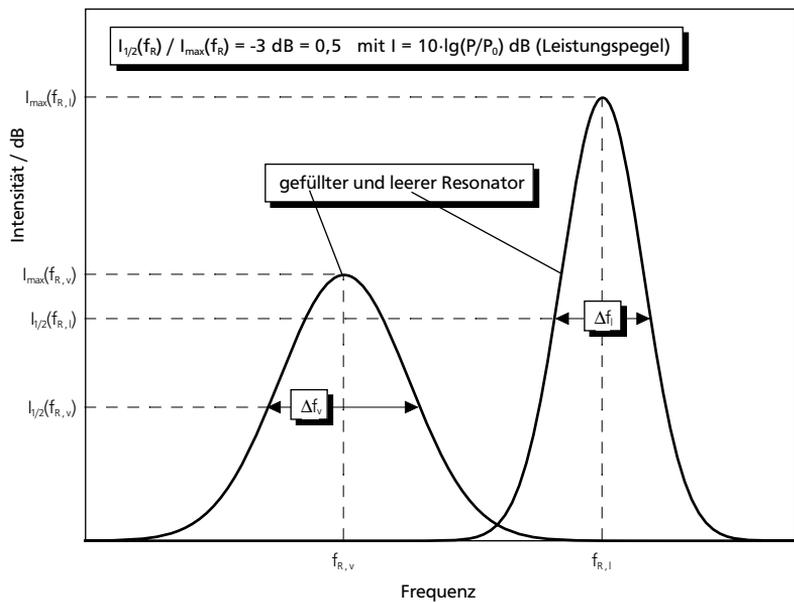


Abb. 2-7: Schematische Darstellung der Resonanzkurven eines ungefüllten und eines gefüllten Resonators.

Die Güte  $Q$ , auch Resonanzgüte genannt, berechnet sich wie folgt:

$$Q = \frac{f_R}{\Delta f} \tag{2-51}$$

Darin sind  $f_R$  die Resonanzfrequenz und  $\Delta f$  die Breite der Resonanzkurve bei halber Intensität  $I_{1/2}$  bezogen auf die maximale Intensität  $I_{\max}$  bei  $f_R$  (Abschwächung um 3 dB). Für die Güten des leeren und gefüllten Resonators  $Q_I$  bzw.  $Q_V$  gelten damit entsprechend die Gleichungen 2-52 und 2-53.

$$Q_I = \frac{f_{R,I}}{\Delta f_I} \tag{2-52}$$

$$Q_v = \frac{f_{R,v}}{\Delta f_v} \quad (2-53)$$

Zur Bestimmung der relativen Dielektrizitätskonstante aus diesen Meßgrößen werden in der Literatur drei verschiedene Möglichkeiten genannt (vgl. HEWLETT PACKARD, 1993d).

Bei der *Störungsmethode (Cavity Perturbation Method)* wird angenommen, daß durch das Einbringen der zu untersuchenden Substanz das Feld im Resonator nur wenig gestört wird und die Änderungen der Resonanzeigenschaften – Resonanzfrequenz, Güte und Abschwächung – in einfacher Weise von der relativen Dielektrizitätskonstante der Substanz abhängen (s. ALTSCHULER, 1963, RISMAN und BENGTTSSON, 1971, GALLONE u. a., 1996). Dies bedeutet, daß nur kleine Stoffmengen oder Stoffe, die eine kleine relative Dielektrizitätskonstante haben, also wenig Energie absorbieren, eingesetzt werden können. Andernfalls wird das elektromagnetische Feld so stark verzerrt, daß die Annahmen nicht mehr zutreffen. Mit diesen Annahmen sind für den  $E_{010}$ -Mode einfache Gleichungen zur Berechnung der relativen Dielektrizitätskonstante aus den *Maxwellschen* Gleichungen entwickelt worden (s. ROST, 1978).

Von *Absolutmethode* wird gesprochen, wenn das elektromagnetische Feld im Resonator berechnet wird. Dazu müssen die *Maxwellschen* Gleichungen gelöst werden, was jedoch aufgrund der komplexen *Besselfunktionen* und deren Ableitungen einen sehr großen Rechenaufwand bedeutet und auch nicht unbedingt eindeutige Lösungen liefert (s. COLLIE u. a., 1948, KAATZE, 1973).

Die dritte Möglichkeit ist die *Kalibrierung*. Für Stoffe mit bekannten relativen Dielektrizitätskonstanten werden die Änderungen der Resonanzkurve gemessen und Kalibrierkurven für die Dielektrizitätskonstante und die Verlustzahl aufgestellt. Ein Problem bei der Kalibrierung ist die Auswahl geeigneter Kalibrier-substanzen, da ein möglichst großer Wertebereich der Dielektrizitätskonstante und Verlustzahl abgedeckt werden soll. Literaturdaten sind in der Regel nicht geeignet, da oft keine Angaben zu Probenvorbereitung und Probenzusammensetzung gemacht werden. Vielfach wird auch die Meßmethode, mit der die relativen Dielektrizitätskonstanten bestimmt wurden, nicht genannt und die Genauigkeit der Meßergebnisse nicht angegeben. Trotz der genannten Nachteile ist die Kalibrierung die am häufigsten eingesetzte Methode zur Ermittlung der relativen Dielektrizitätskonstante, besonders wenn teilgefüllte Resonatoren eingesetzt werden (vgl. RISMAN und BENGTTSSON, 1971).

Welche der drei beschriebenen Möglichkeiten gewählt wird, hängt hauptsächlich vom gewählten Mode ab. Die am häufigsten verwendeten Moden sind der  $E_{010}$ -Mode und der  $H_{011}$ -Mode (s. KUMMER, 1986, ROST, 1978, CHAMBERLAIN und CHANTRY, 1973). Für die Bestimmung der dielektrischen Eigenschaften von Lebensmitteln setzten RISMAN und BENGTTSSON (1971) auch einen  $E_{012}$ -Resonator ein. Da für diese Arbeit drei Resonatoren mit diesen Moden eingesetzt wurden, werden im folgenden diese drei Resonatortypen und ihre Feldkonfigurationen beschrieben.

a)  $E_{010}$ -Resonator

Beim zylindrischen  $E_{010}$ -Resonator liegt das Maximum der elektrischen Feldstärke im Zentrum des Resonators. Der schematische Aufbau und die Feldverteilung im Inneren des Resonators sind in Abbildung 2–8 dargestellt.  $E_{010}$ -Resonatoren werden sowohl als vollständig gefüllte als auch als teilgefüllte Meßsysteme eingesetzt. Vollständig gefüllt bedeutet, daß der gesamte Innenraum mit der zu untersuchenden Substanz gefüllt wird. Teilgefüllt heißt bei zylindrischen Resonatoren, daß eine ebenfalls zylindrische Probe, aber mit einem Durchmesser deutlich kleiner als der Durchmesser des Resonators, entlang der Mittelachse des Resonators eingebracht wird. Proben werden dafür z. B. in Glasröhrchen eingefüllt. Für den vollgefüllten  $E_{010}$ -Resonator wurden Gleichungen aus der Störungsmethode entwickelt, mit denen die Dielektrizitätskonstante und die Verlustzahl aus den gemessenen Änderungen der Resonanzfrequenz  $f_R$  und der Güte  $Q$  bestimmt werden können (s. ROST, 1978):

$$\epsilon' = \left( \frac{c_0}{1,31 \cdot d \cdot f_{R,V}} \right)^2 \tag{2-54}$$

$$\epsilon'' = \epsilon' \cdot \left( \frac{1}{Q_V} - \frac{1}{Q_I} \right) = \epsilon' \cdot \left( \frac{\Delta f_V}{f_{R,V}} - \frac{\Delta f_I}{f_{R,I}} \right) \tag{2-55}$$

In Gleichung 2–54 sind  $c_0$  die Vakuumlichtgeschwindigkeit und  $d$  der Durchmesser des Resonators. Da bei diesem Resonator das Maximum der elektrischen Feldstärke im Zentrum liegt, bewirken Stoffe mit niedrigen Dielektrizitätskonstanten und Verlustzahlen bereits starke Veränderungen der Resonanzkurve. Deshalb ist dieser Resonator, besonders wenn er als vollgefülltes System eingesetzt wird, für die Bestimmung niedriger Werte der relativen Dielektrizitätskonstante gut geeignet.

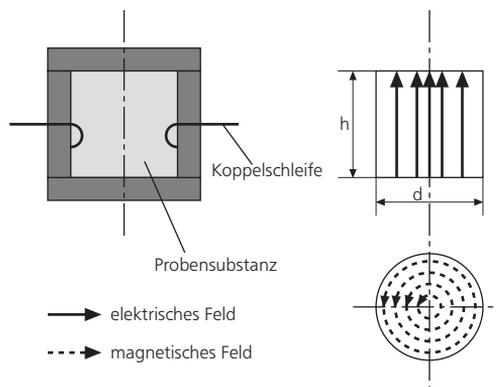


Abb. 2–8: Schemazeichnung (links) und Feldverteilung (rechts oben: Querschnitt, rechts unten: Draufsicht) eines zylindrischen  $E_{010}$ -Resonators (nach NIMTZ, 1990).

## b) $H_{011}$ -Resonator

Beim  $H_{011}$ -Resonator liegt im Zentrum das Minimum der elektrischen Feldstärke (vgl. Abbildung 2-9). Wird in diesen Bereich eine Probe eingebracht, sind die Änderungen der Resonanzkurve gering. Dies bedeutet, daß auch noch recht große Probenvolumina von Stoffen mit höheren relativen Dielektrizitätskonstanten untersucht werden können. Da dieser Resonator als teilgefülltes System verwendet wird, ist eine Auswertung nach der Absolutmethode nicht sinnvoll. Die Dielektrizitätskonstante und Verlustzahl werden durch Kalibrierung bestimmt (s. RISMAN und BENGTSOON, 1971). Es sind jedoch in der Literatur keine Kalibrierkurven zu finden, und es werden auch keine Angaben über geeignete Probendurchmesser und Meßbereiche gemacht. GR NEBERG (1994) verwendete einen  $H_{011}$ -Resonator. Es gelang nur für die Dielektrizitätskonstante, jedoch nicht für die Verlustzahl, eine Kalibrierkurve aufzustellen. Mit dem verwendeten Probendurchmesser von 20 mm konnte für wäßrige Kochsalzlösungen die Resonanzkurve aufgrund zu starker Abschwächung nicht mehr ausgewertet werden.

Relative  
Dielektrizitätskonstante

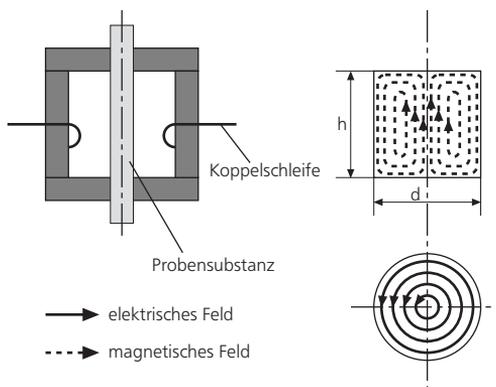


Abb. 2-9: Schemazeichnung (links) und Feldverteilung (rechts oben: Querschnitt, rechts unten: Draufsicht) eines zylindrischen  $H_{011}$ -Resonators (nach NIMTZ, 1990).

## c) $E_{012}$ -Resonator

RISMAN und BENGTSOON (1971 sowie BENGTSOON und RISMAN, 1971) verwendeten einen teilgefüllten  $E_{012}$ -Resonator zur Bestimmung der relativen Dielektrizitätskonstanten von Lebensmitteln und Lebensmittelinhaltsstoffen. Wie beim  $E_{010}$ -Resonator liegt auch hier das Maximum der elektrischen Feldstärke im Zentrum des Resonators (Feldkonfiguration s. Abbildung 2-10). Wird bei diesem Resonator eine Probe, die genau halb so lang wie der Resonator hoch ist, also nicht über die gesamte Höhe des Resonators, sondern nur im mittleren Bereich eingebracht, so ist die elektrische Feldstärke an den Probenenden gleich null. Dadurch werden Störungen des Feldes minimiert. Dünne Plexiglas- oder PTFE-Scheiben, mit denen die Probe in der Mitte des Resonators fixiert wird, beeinflussen wegen ihrer sehr

niedrigen relativen Dielektrizitätskonstanten die Messungen nicht. Nach RISMAN und BENGTTSSON (1971) ist ein Probendurchmesser von 5 mm gut geeignet. Sie stellten Kalibrierkurven mit Hilfe von Literaturwerten der gewählten Kalibrier-substanzen auf. Es wurden allerdings keine Salzlösungen miteinbezogen, so daß nicht klar ist, ob mit diesem Resonator auch hohe Verlustzahlen, wie die von Salzlösungen, bestimmt werden können.

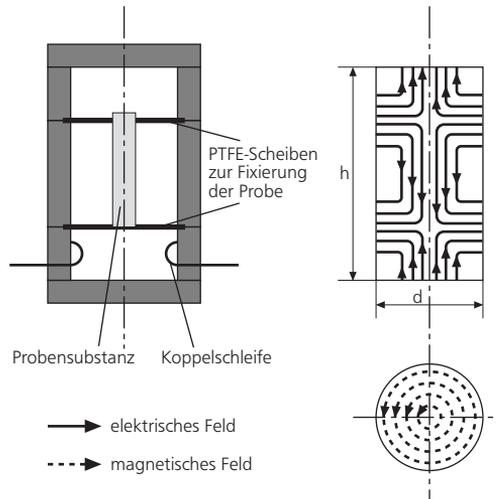


Abb. 2-10: Schemazeichnung (links) und Feldverteilung (rechts oben: Querschnitt, rechts unten: Draufsicht) eines zylindrischen  $E_{012}$ -Resonators (nach NIMTZ, 1990).

## 2.3 Modellhafte Beschreibung der Mikrowellenerwärmung

### 2.3.1 Voraussetzungen

Für die Vorausberechnung der Erwärmung von Lebensmitteln und anderen Produkten mittels Mikrowellen sind folgende Fragen zu beantworten:

- Wieviel der insgesamt angebotenen Mikrowellenleistung wird tatsächlich vom zu erwärmenden Produkt absorbiert?
- Wie ist die absorbierte Leistung im Produkt verteilt, d. h. wie ist die Temperaturverteilung im Produkt?
- Welchen Einfluß haben die Wärmeleitung im Produkt und der Wärmeübergang zwischen Produkt und Umgebung auf die Temperaturverteilung im Produkt?

Wieviel der von einem Mikrowellengerät angebotenen Mikrowellenleistung von einem Gut absorbiert wird, kann nur vorausberechnet werden, wenn die relative Dielektrizitätskonstante des Produkts bekannt ist. Die relative Dielektrizitätskonstante muß in Abhängigkeit von der Temperatur bekannt sein, denn je nachdem ob die Dielektrizitätskonstante und die Verlustzahl einer Substanz mit zunehmender Temperatur größer oder kleiner werden, kann die Mikrowellenabsorption mit zunehmender Produkttemperatur während der Erwärmung besser oder schlechter werden.

Außerdem müssen weitere stoffspezifische Größen wie die Wärmekapazität des Produkts bekannt sein, um die Temperaturerhöhung während der Erwärmung zu berechnen. Wird der Temperaturausgleich durch Wärmeleitung und Wärmeübertragung mitberücksichtigt, ist beispielsweise auch die Wärmeleitfähigkeit der Substanz von Einfluß.

### 2.3.2 Das Grüneberg-Modell

GR NEBERG (1994) entwickelte ein Modell auf Basis der Theorie von MIE (1908), mit dem vorausberechnet werden kann, welcher Anteil der von einem Haushaltsmikrowellengerät angebotenen Leistung  $P_{MW}$  tatsächlich von einer Substanz während der Erwärmung absorbiert wird. Für die Berechnung müssen folgende Größen bekannt sein:

- die relative Dielektrizitätskonstante der Substanz in Abhängigkeit von der Temperatur,
- das Volumen der Substanz bzw. ihre Masse und Dichte,
- das Garraumvolumen des Mikrowellengeräts,
- die vom Mikrowellengerät angebotene Leistung.

Messungen haben gezeigt, daß die aufgenommene Leistung  $P$  mit zunehmendem Produktvolumen steigt und für große Volumina (größer ungefähr 1 l) ein Maximalwert erreicht wird. Dieser Wert entspricht der angebotenen Geräteleistung  $P_{MW}$ . GR NEBERG (1994) berechnete den Anteil der absorbierten Leistung  $P$  deshalb mit folgender Exponentialgleichung, die diesen typischen Sättigungsverlauf wiedergibt:

$$\frac{P}{P_{MW}} = 1 - \exp\left(-C \cdot A_{Mie} \cdot \frac{A_{1,3}}{A_{MW}}\right) \quad (2-56)$$

In Gleichung 2-56 sind  $A_{Mie}$  der Absorptionsquerschnitt der Substanz,  $A_{1,3}$  die Projektionsfläche einer Kugel, die das gleiche Volumen wie die zu erwärmende Substanz hat, und  $A_{MW}$  die Projektionsfläche einer Kugel, die das gleiche Volumen wie der Garraum des Mikrowellengeräts hat. Die Größe  $C$  ist ein gerätespezifischer Parameter, der für jedes Mikrowellengerät bestimmt werden muß. Für die aufge-

normene Leistung kann in guter Näherung die zu erwärmende Substanz als Kugel angesehen werden. GR NEBERG zeigte in seinen Experimenten, daß die Form des erhitzten Volumens keinen Einfluß auf die insgesamt von diesem Volumen absorbierte Leistung hat.

MIE (1908) löste die *Maxwellschen* Gleichungen für den Fall einer ebenen elektromagnetischen Welle, die an einer homogenen Kugel gestreut wird. Der dimensionslose Absorptionsquerschnitt  $A_{Mie}$  der Kugel gibt in Abhängigkeit von der relativen Dielektrizitätskonstante und dem Radius der Kugel das Verhältnis der von dieser Kugel absorbierten Leistung zu der Leistung an, die insgesamt auf die Projektionsfläche der Kugel einfällt. Der Absorptionsquerschnitt  $A_{Mie}$  kann mit der folgenden Gleichung in Abhängigkeit von der Freiraumwellenlänge  $\lambda_0$  berechnet werden (s. GR NEBERG, 1994):

$$A_{Mie} = -\frac{2}{\alpha^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2 \cdot n + 1) \left\{ \operatorname{Re}(a_n + b_n) + (|a_n|^2 + |b_n|^2) \right\} \quad (2-57)$$

mit dem *Mie*-Faktor  $\alpha$

$$\alpha = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda_0} \cdot R \quad (2-58)$$

In den Gleichungen 2-57 und 2-58 sind  $\operatorname{Re}(z)$  der Realteil der komplexen Größe  $z$  und  $R$  der Radius der Kugel. Die *Mie*-Koeffizienten  $a_n$  und  $b_n$  werden wie folgt berechnet:

$$a_n = -\frac{j_n(\alpha)}{h_n^{(2)}(\alpha)} \cdot \frac{\sigma_n(\alpha) - N\sigma_n(N\alpha)}{\varphi_n(\alpha) - N\sigma_n(N\alpha)} \quad (2-59)$$

$$b_n = -\frac{j_n(\alpha)}{h_n^{(2)}(\alpha)} \cdot \frac{\sigma_n(N\alpha) - N\sigma_n(\alpha)}{\sigma_n(N\alpha) - N\varphi_n(\alpha)} \quad (2-60)$$

Der komplexe Brechungsindex  $N$  wird aus der Wurzel der relativen Dielektrizitätskonstante  $\epsilon_r$  der Kugel ermittelt:

$$N = \sqrt{\epsilon_r} \quad (2-61)$$

Die Funktionen  $j_n$  und  $\sigma_n$  sowie  $h_n^{(2)}$  und  $\varphi_n$  sind Modifikationen der *Bessel*- und *Hankel*-Funktionen. Die entsprechenden Gleichungen sind bei GR NEBERG zu finden. Ähnliche Gleichungen wie für die Kugel wurden auch für einen Zylinder entwickelt (s. VAN DE HULST, 1981).

Obwohl der Absorptionsquerschnitt für den Fall einer ebenen Wellenfront definiert wurde, die im Haushaltsmikrowellengerät sicher nicht vorkommt, ist die Übereinstimmung bei GR NEBERG zwischen Meßwerten und berechneten

Werten der aufgenommenen Leistung  $P$  gut. Die Geräteinflüsse bzgl. Einkopplung der elektromagnetischen Wellen sind im gerätespezifischen Parameter  $C$  zusammengefaßt. Dieser Parameter muß einmal für jedes Haushaltsmikrowellengerät experimentell ermittelt werden. Ist er bekannt, kann für jedes Produkt, sofern die relative Dielektrizitätskonstante und ihre Temperaturabhängigkeit bekannt sind, die absorbierte Leistung bestimmt werden. Für den Parameter  $C$  ist allerdings noch nicht geklärt, ob  $C$  auch eine Funktion des Garraumvolumens, d. h. abhängig von  $A_{MW}$ , ist oder ob  $C$  tatsächlich nur von der Art der Einkopplung der Wellen abhängt.

In einem zweiten Berechnungsschritt modellierte GR NEBERG (1994) mit einem Finite-Differenzen-Verfahren die Leistungsverteilung und damit die Temperaturverteilung im erhitzten Produkt für einfache geometrische Körper wie Kugeln und Zylinder. Darauf wird hier nicht näher eingegangen, da dieser Teil des Modells in der vorliegenden Arbeit nicht verwendet wurde. Für die Temperaturverteilung, wie beispielsweise Zentral- oder Randerwärmung, ist die Produktform neben den dielektrischen Eigenschaften mitentscheidend. Insgesamt ist in diesem Modell  $C$  der einzige, einmal experimentell zu bestimmende Anpassungsparameter. Andere Autoren (s. folgendes Kapitel 2.3.3) müssen zumindest eine mittlere Temperaturerhöhung ihres Produkts messen, um so über die gemessene aufgenommene Leistung die Temperaturverteilung im Produkt zu bestimmen. Ein weiterer Vorteil des *Grüneberg-Modells* zur Bestimmung der insgesamt aufgenommenen Leistung nach Gleichung 2-56 ist, daß keine Verteilungen der elektrischen Feldstärke im Garraum des Mikrowellengeräts und im Gut berechnet werden müssen.

Näherungsweise rechnet GR NEBERG, wie auch viele andere Autoren, mit den Gesetzen der geometrischen Optik. Dies ist für gut Mikrowellen absorbierende Stoffe, wie Lebensmittel es meist sind, eine zulässige Annahme, solange die Produktabmessungen nicht zu klein sind, d. h. solange der *Mie*-Faktor  $\alpha$  größer als eins ist. Dann sind die Produktabmessungen viel größer als die Wellenlänge  $\lambda$  (vgl. Gleichung 2-2 in Kapitel 2.1.1) im Produkt. Ist dies nicht der Fall, müssen die *Maxwellschen* Gleichungen vollständig gelöst werden.

### 2.3.3 Modelle anderer Autoren

Mit den Gleichungen 2-4 und 2-6 wurden von verschiedenen Autoren die Abschwächung der elektromagnetischen Wellen und die Verlustleistungsdichte berechnet. In den ersten Arbeiten wurde das zu erwärmende Produkt als ebene Platte betrachtet (z. B. OHLSSON und BENGTTSSON, 1971, STUCHLY und HAMID, 1972, MA und PELTRE, 1973, KIRK und HOLMES, 1975). Die Modelle wurden in weiteren Arbeiten auf kugel- und zylinderförmige Geometrien übertragen (KRITIKOS u. a., 1981, SCHUBERT und GR NEWALD, 1983, MUDGETT, 1986, BOWS und CLARK, 1990, PADUA, 1993). In allen diesen Arbeiten wurden die Gesetze der geometrischen Optik angewendet und Stoffgrößen, wie die relative Dielektrizi-

tätskonstante, als temperaturunabhängig angenommen. Erstmals wurde von AYAPPA u. a. (1991) die Mikrowellenerwärmung eines ebenen Spalts mit temperaturabhängigen dielektrischen Eigenschaften berechnet. Die Berechnung mit den Gesetzen der geometrischen Optik ist zulässig, da die Autoren die Erwärmung von Lebensmitteln, d. h. Stoffen, die meist Mikrowellen gut absorbieren, untersuchten. Den bisher in diesem Kapitel erwähnten Modellen ist gemeinsam, daß die Berechnung ohne die Messung der mittleren Temperatur nicht möglich ist. Aus der gemessenen mittleren Temperatur wird die Leistungs- und Temperaturverteilung im Produkt nach Gleichung 2-4 bestimmt. Die insgesamt absorbierte Leistung wird nicht wie bei GR NEBERG (1994) berechnet, sondern gemessen oder als Anpassungsparameter verwendet.

Mit dem Modell von STAMMER (1992) kann ohne eine Temperaturmessung die Feldverteilung in einem Gut berechnet werden. STAMMER (1992) stellte dieses Modell jedoch für die Mikrowellentrocknung von porösen Stoffen auf. Diese Stoffe absorbieren Mikrowellen deutlich schlechter als Lebensmittel. Die Gesetze der geometrischen Optik waren deshalb nicht mehr anwendbar, d. h. der Brechungsindex konnte nicht mit Gleichung 2-5 ermittelt werden. STAMMER (1992) verwendete die Lösung der *Maxwellschen* Gleichungen nach MIE (1908). Dafür traf er allerdings die Annahme, daß der Hohlleiter, in dem das Gut behandelt wird, verlustfrei ist. Diese Annahme ist für die gut absorbierenden Lebensmittel nicht zulässig.

Die exakte Berechnung der Feldverteilung in einem Haushaltsmikrowellengerät wird dadurch erschwert, daß sich viele Moden im Garraum ausbilden und daß das Feld durch den üblicherweise in Mikrowellengeräten eingebauten Wellenrührer zeitlich verändert wird. Ein Wellenrührer ist ein rotierender, unregelmäßig geformter Reflektor an der Stelle, an der die Mikrowellen in den Garraum des Geräts eingekoppelt werden. Zudem wird das Feld durch das zu erwärmende Gut verzerrt. Diese Verzerrungen des Feldes sind stark davon abhängig, wo ein zu erwärmendes Gut im Mikrowellengerät positioniert wird. Schon kleine Verschiebungen können zu einer anderen Feldverteilung im Mikrowellengerät und damit auch zu einer anderen Feld- und Temperaturverteilung im Gut führen, obwohl die insgesamt von diesem Gut absorbierte Leistung gleich bleibt.

In neueren Untersuchungen wurden für bestimmte, einfache Wellentypen wie E- oder H-Wellen die Gleichungen für das elektrische Feld gelöst und die Temperaturverteilung in zylindrischen oder quaderförmigen Stäben unter Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit der relativen Dielektrizitätskonstanten berechnet (z. B. AYAPPA u. a., 1992). Die Berechnungen werden zunehmend dadurch erleichtert und beschleunigt, daß verstärkt Personalcomputer eingesetzt werden können, da diese Rechner in den letzten Jahren um ein vielfaches leistungsfähiger geworden sind. Mit dieser besseren Rechnerleistung sind auch die üblichen Berechnungsverfahren – Methode der finiten Elemente, Methode der finiten Differenzen – weiterentwickelt worden (s. JIA und JOLLY, 1992, MEREDITH, 1994, FU und METAXAS, 1994, DIBBEN und METAXAS, 1995). Es sind somit auch Berechnungen zur Auslegung von Mikrowellengeräten und -anlagen in relativ kurzer Zeit möglich. HARMS u. a. (1996) berichten, daß die Feldverteilung in

---

einem quaderförmigen Resonanzraum, in dem ein Produkt erwärmt wird, mit der Methode der finiten Differenzen für 12.000 Zeitschritte in wenigen Stunden berechnet werden kann. Aufgrund der verkürzten Rechenzeiten ist es möglich, vielfältige Varianten bei der Entwicklung und Konstruktion von Mikrowellenapplikatoren für die verschiedensten Anwendungen und Produkte zu prüfen. Es sind somit zukünftig aufwendige und teure Testanlagen und Untersuchungen nicht mehr im bisherigen Umfang nötig, um geeignete Anlagen zu entwickeln (vgl. SUNDBERG u. a., 1995, SUNDBERG, 1996, SUNDBERG u. a., 1996).

Modellhafte  
Beschreibung der  
Mikrowellenerwärmung



# 3 Bestimmung der relativen Dielektrizitätskonstante

## 3.1 Verwendete Meßmethoden

### 3.1.1 Offene Koaxialleitung

#### Aufbau des Meßplatzes

Es wurde ein Meßplatz der Firma *Hewlett Packard* verwendet. Die Hauptkomponenten dieses Systems sind der Netzwerkanalysator und der Tastkopf, der das *offene* Ende der Koaxialleitung ist und als Meßkopf auf die zu untersuchende Substanz aufgesetzt wird. Der Meßplatz ist in Abbildung 3-1 schematisch dargestellt.

Für den Großteil der Experimente stand ein Tastkopf (*HP 85070 A*) zur Verfügung, mit dem nur in einem Temperaturbereich zwischen 5 und 50 °C gemessen werden kann. Ein kleinerer Teil der Experimente konnte mit einem neuen Tastkopf (*HP 85070 B*), der für Temperaturen zwischen -40 und 200 °C geeignet ist, durchgeführt werden.

Der Netzwerkanalysator (*HP 8753 C*) hat einen Frequenzbereich von 300 kHz bis 3 GHz. Die Dielektrizitätskonstanten und Verlustzahlen können mit der Auswertesoftware von *Hewlett Packard* jedoch nur ab einer Frequenz von 0,2 GHz bestimmt werden. Dies bedeutet, daß mit diesem Meßplatz die relative Dielektri-

Bestimmung  
der relativen  
Dielektrizitätskonstante

zitätskonstante in einem Frequenzbereich von 0,2 bis 3 GHz gemessen werden kann. Die Grenzfrequenz bei hohen Frequenzen für die Auswertesoftware ist laut HEWLETT PACKARD (1993c) 20 GHz. Da am Ende dieser Arbeit ein weiterer Netzwerkanalysator (HP 8753 D) mit einem Frequenzbereich bis 6 GHz zur Verfügung stand, konnten einige Experimente zur Frequenzabhängigkeit der relativen Dielektrizitätskonstante in diesem erweiterten Frequenzbereich durchgeführt werden.

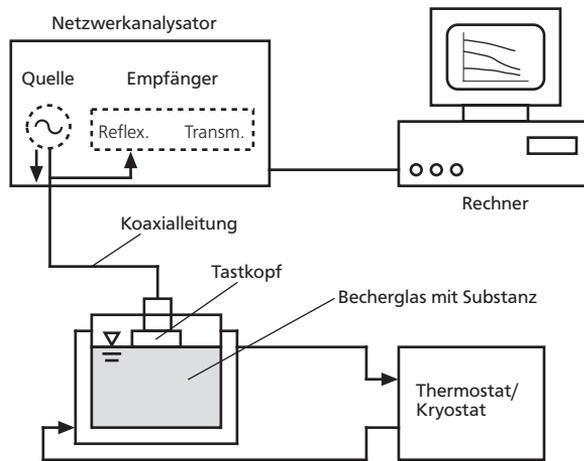


Abb. 3-1: Methode der offenen Koaxialleitung: schematische Darstellung des Messplatzaufbaus.

Die Messungen sind einfach durchzuführen, da der Tastkopf auf die temperierte Probe aufgesetzt bzw. in sie eingetaucht wird. Voraussetzung ist eine ebene Oberfläche der Probe, die bei Flüssigkeiten gegeben ist. Bei Feststoffen sind nach Herstellerangaben Rauigkeiten bis 25  $\mu\text{m}$  (HEWLETT PACKARD, 1993b) zulässig, nach einer anderen Angabe jedoch nur 2,54  $\mu\text{m}$  (HEWLETT PACKARD, 1993a). Vor den Messungen muß das System kalibriert werden. Eine Kalibrierung besteht aus drei Messungen. Zuerst wird ohne Probe, d. h. an Umgebungsluft gemessen. Dann wird das offene Ende der Meßleitung mit einem Metallblock kurzgeschlossen, um die Impedanz der Meßleitung zu ermitteln. Die dritte Messung wird mit Wasser bei der gewünschten Meßtemperatur durchgeführt.

Die Dielektrizitätskonstanten und Verlustzahlen können mit diesem System für folgende Wertebereiche bestimmt werden (HEWLETT PACKARD, 1993a):

$$\epsilon' < 100,$$

$$\tan \delta > 0,05.$$

Dabei wird der Fehler umso größer, je kleiner die Dielektrizitätskonstanten und Verlustzahlen sind. Die Auswertesoftware ermittelt aber auch Meßwerte außerhalb dieser Bereiche. Es werden allerdings keine Angaben gemacht, wie zuverlässig diese Werte dann sind. Fehler werden zum einen durch das Grundrauschen des Netzwerkanalysators und zum anderen durch das dielektrische Meßprinzip verursacht. Beim dielektrischen Meßprinzip liegen die Fehler in der Kalibrierung,

die sich verstellen kann, sowie in der unvollkommenen Übereinstimmung mit dem theoretischen Modell. Diese Fehler überwiegen die Fehler durch das Grundrauschen des Netzwerkanalysators deutlich. HEWLETT PACKARD (1993a) gibt die Fehler in Abhängigkeit vom Betrag der relativen Dielektrizitätskonstante an (vgl. Tabelle 3-1).

Verwendete  
Meßmethoden

$ \epsilon_r $	2	5	20	> 50
$\pm \tan \delta$	0,20	0,11	0,06	0,05
$\epsilon' / \%$	20	10	6	5,5

Tab. 3-1: Methode der offenen Koaxialleitung: Meßungenauigkeit bei 25 °C und 2,45 GHz (aus HEWLETT PACKARD, 1993a).

Zu beachten ist in Tabelle 3-1, daß absolute Abweichungen vom Verlustfaktor und prozentuale Abweichungen von der Dielektrizitätskonstante angegeben sind.

### Einfluß der Probengeometrie

Da bei der Bestimmung der relativen Dielektrizitätskonstante von der Annahme ausgegangen wird, daß die Probe ein halbumendlicher Raum ist, müssen Mindestabmessungen der Probe eingehalten werden. Der Durchmesser der Probe sollte mindestens gleich dem Tastkopfdurchmesser von 19 mm sein. Die Mindestprobenhöhe  $h_{pr}$  in mm errechnet sich laut Hersteller nach Gleichung 3-1 aus der Dielektrizitätskonstante und der Verlustzahl der zu untersuchenden Substanz (HEWLETT PACKARD, 1993a und 1993c):

$$h_{pr} = \frac{20 \text{ mm}}{\sqrt{|\epsilon_r|}} = \frac{20 \text{ mm}}{\sqrt[4]{\epsilon'^2 + \epsilon''^2}} \quad (3-1)$$

Es werden keine Angaben zur Herleitung dieser Gleichung gemacht. Für sehr kleine Werte der relativen Dielektrizitätskonstante sind damit die größten Probenhöhen erforderlich. So ergibt sich für  $\epsilon_r = 1 - j \cdot 0$  eine Mindesthöhe von 20 mm und ein Probenvolumen von ca. 5,7 ml. Für Wasser bei 20 °C und 2,45 GHz beträgt  $\epsilon_r \approx 80 - j \cdot 10$ . Die Mindestprobenhöhe von Wasser beträgt bei diesen Bedingungen etwa 2,2 mm und das Mindestprobenvolumen etwa 0,6 ml.

Da mit der offenen Koaxialleitung auch die Dielektrizitätskonstanten und Verlustzahlen disperser Systeme bestimmt werden sollten, wurden Experimente zum Einfluß der Probengeometrie durchgeführt. Ist der Durchmesser der Probe gleich dem oder größer als der Durchmesser des Tastkopfs, ist kein Einfluß auf das Meßergebnis festzustellen. Wird die Höhe der Probe unter dem Tastkopf variiert, ist bei den untersuchten Höhen und Substanzen ebenfalls kein Einfluß auf die gemessenen Dielektrizitätskonstanten und Verlustzahlen zu erkennen (vgl. Abbildungen 3-2 und 3-3), obwohl die Mindesthöhen nach Gleichung 3-1 auch unterschritten wurden. Für die verwendeten Substanzen gelang es nicht, Höhen

Bestimmung  
der relativen  
Dielektrizitätskonstante

unter 1 mm einzustellen und den Tastkopf dabei ohne Bildung von Luftblasen aufzusetzen.

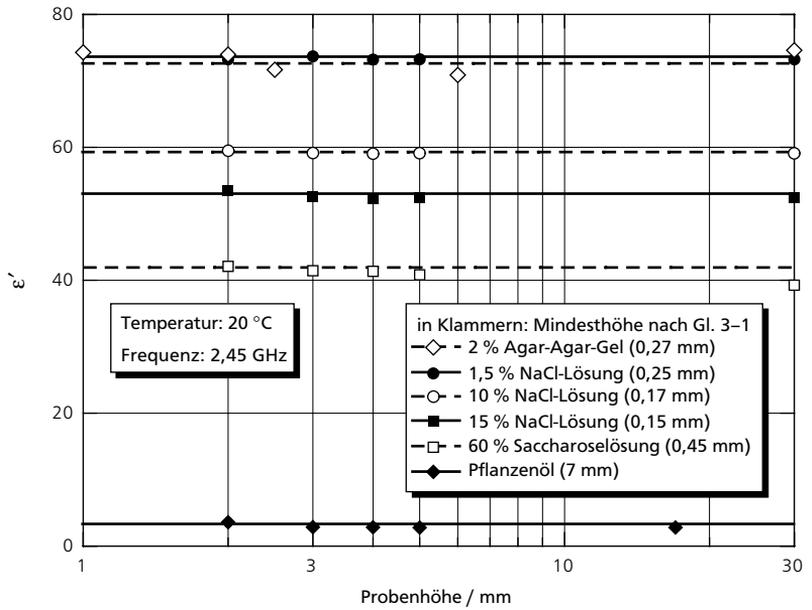


Abb. 3-2: Methode der offenen Koaxialleitung: Einfluß der Probenhöhe auf die Dielektrizitätskonstante bei 20 °C und 2,45 GHz.

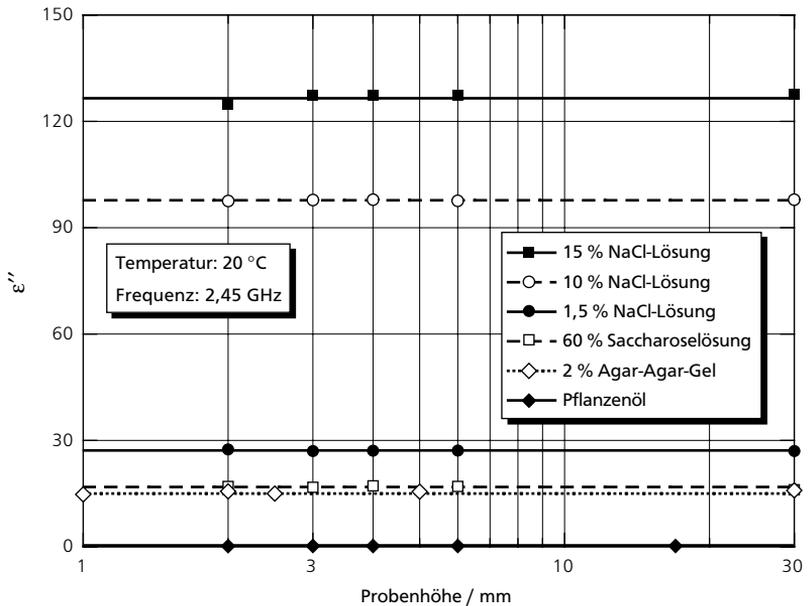


Abb. 3-3: Methode der offenen Koaxialleitung: Einfluß der Probenhöhe auf die Verlustzahl bei 20 °C und 2,45 GHz.

Für disperse Systeme ist daneben interessant, wie sich das Übereinanderlagern von Stoffen mit sehr unterschiedlichen relativen Dielektrizitätskonstanten auswirkt. Es wurde dazu demineralisiertes Wasser mit einem sehr gut spreitenden Mineralöl (*Velocit*) überschichtet und die Höhe dieser Schicht variiert. In einem

zylindrischen Probengefäß mit 55 mm Durchmesser wurden 100 ml Wasser vorgelegt und mit definierten Ölvolumina überschichtet. Die Höhe der Ölschicht wurde aus dem Volumen des Öls und dem Durchmesser des Probengefäßes berechnet. Weder die Dielektrizitätskonstante noch die Verlustzahl ( $\epsilon'' = 0,01 \pm 0,01$ ) dieses Systems ändern sich signifikant im untersuchten Bereich mit der Höhe der Ölschicht auf dem Wasser oder gegenüber den Werten des reinen Öls, wenn kein Wasser unterschichtet ist (Abbildung 3–4). Es ist jedoch anzumerken, daß diese sehr kleinen Meßwerte in dem Bereich des Meßsystems der offenen Koaxialleitung liegen, in dem die Fehler am größten sind, da der Verlustfaktor mit  $\tan \delta = 0,004$  etwa um einen Faktor 10 kleiner ist als der von HEWLETT PACKARD (1993a) angegebene Grenzwert des System  $\tan \delta = 0,05$ . Problematisch ist auch, daß für die Verlustzahl bei einzelnen Messungen auch physikalisch unsinnige, negative Werte erhalten wurden.

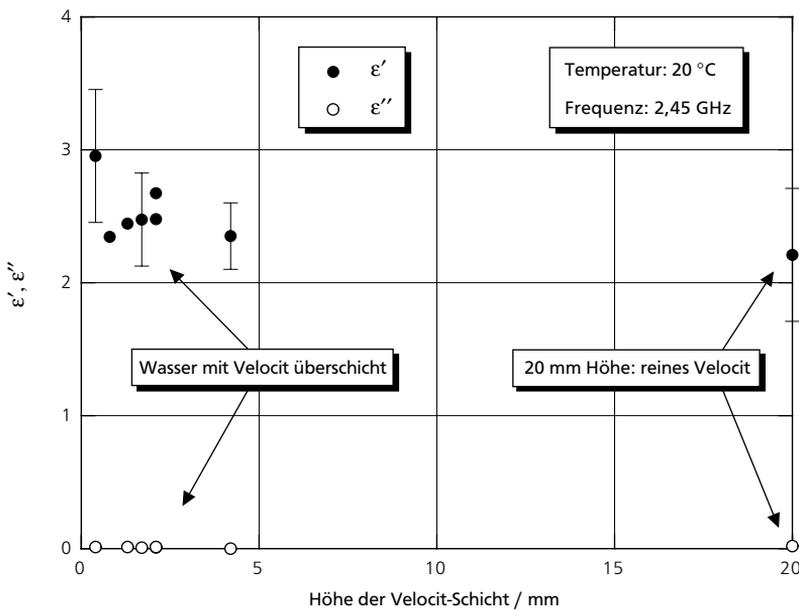


Abb. 3–4: Dielektrizitätskonstanten und Verlustzahlen des Mineralöls Velocit, das mit demineralisiertem Wasser unterschichtet wurde. Variiert wurde die Höhe der Ölschicht über dem Wasser. Bei 20 mm Höhe war kein Wasser unterschichtet.

Trotz der Meßgenauigkeit bei so kleinen Werten der relativen Dielektrizitätskonstante läßt sich vermuten, daß bei dispersen oder wie hier geschichteten Systemen bis zu einer Schichtdicke von ungefähr 0,5 mm nur die Phase des Stoffsystems bei der Messung erfaßt wird, die sich direkt im Kontakt mit dem Tastkopf befindet. Für Systeme wie Emulsionen, bei denen die Tröpfchendurchmesser der inneren Phase im  $\mu\text{m}$ -Bereich liegen, muß eine Vergleich mit Resonatormessungen zeigen, ob dann mit der offenen Koaxialleitung das Stoffsystem gesamt erfaßt wird.

### Aufbau der Meßplätze

Es wurden drei verschiedene zylindrische Hohlraumresonatoren zur Bestimmung der relativen Dielektrizitätskonstante eingesetzt. Diese Resonatoren unterscheiden sich in ihrer Geometrie und damit in ihrer Feldkonfiguration (vgl. Kapitel 2.2.3). Sie werden in den folgenden Abschnitten näher beschrieben. Unabhängig von der Art des Resonators ist der Meßplatzaufbau, der in Abbildung 3-5 schematisch dargestellt ist.

Der bereits in Kapitel 3.1.1 erwähnte Netzwerkanalysator *HP 8753 C* diente als Frequenzquelle und -empfänger. Abhängig vom verwendeten Resonator wurde nur ein Teilbereich des Frequenzspektrums von 300 kHz bis 3 GHz ausgewählt, um eine bessere Auflösung im Bereich des gewünschten Maximums der Resonanzkurve zu erzielen.

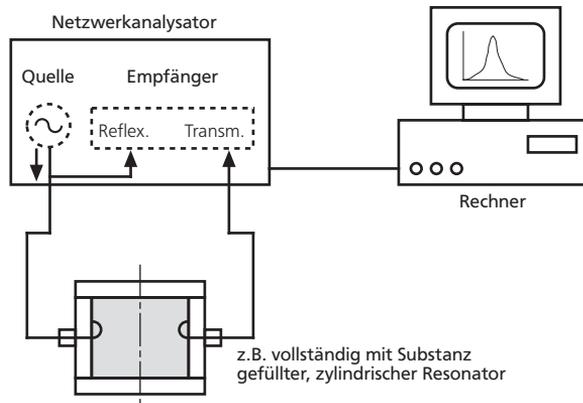


Abb. 3-5: Resonatormethode:  
schematische Darstellung des  
Meßplatzaufbaus.

Die Resonatoren werden mit Koaxialkabeln an den Netzwerkanalysator angeschlossen und die elektromagnetischen Wellen mittels Koppelschleifen (versilberte Kupferdrähte) in die Resonatoren eingekoppelt.

### $E_{010}$ -Resonator

Der  $E_{010}$ -Resonator wird als vollständig mit Substanz gefüllter Resonator verwendet. Die Abmessungen des Resonators sind im Anhang A 2.1 angegeben. Sie wurden so gewählt, daß sich im ungefüllten Resonator eine Resonanzfrequenz von 2,45 GHz einstellt (vgl. Kapitel 2.2.3).

Die Dielektrizitätskonstanten und Verlustzahlen wurden mit den Gleichungen 2-53 und 2-54 aus der Verschiebung der Resonanzfrequenz und der Änderung der Güte des Resonators berechnet. Da dieser Resonator als vollgefülltes System ein-

gesetzt wird, können nur Substanzen mit niedrigen relativen Dielektrizitätskonstanten wie Trockensubstanzen untersucht werden. Bei Substanzen mit hohen relativen Dielektrizitätskonstanten ist die Abschwächung der Resonanzkurve so stark, daß keine Resonanz mehr beobachtet wird.

Ein Ziel der Untersuchungen mit dem  $E_{010}$ -Resonator war daher zu prüfen, welcher Wertebereich der Dielektrizitätskonstanten und Verlustzahlen mit diesem Resonator erfaßt werden kann.

### $H_{011}$ -Resonator

Der  $H_{011}$ -Resonator wird als teilgefüllter Resonator verwendet. Die Abmessungen sind ebenfalls im Anhang A 2.1 dokumentiert. Sie berechnen sich für diesen Resonator nach Gleichung 2-51. Aus fertigungstechnischen Gründen mußten die Abmessungen so gewählt werden, daß sich eine Resonanzfrequenz von 2,44 GHz im leeren Resonator einstellt.

Wie in Kapitel 2.2.3 beschrieben, existieren keine einfachen Gleichungen zur Bestimmung der Dielektrizitätskonstanten und Verlustzahlen für diesen teilgefüllten Resonator. Es wurden deshalb Kalibrierkurven für beide Teile der relativen Dielektrizitätskonstanten aufgestellt.

Bei der Kalibrierung wurde auch untersucht, inwieweit der Probendurchmesser, d. h. das Probenvolumen, einen Einfluß auf den meßbaren Wertebereich der relativen Dielektrizitätskonstante hat. Hierzu werden in der Literatur keine Angaben gemacht.

### $E_{012}$ -Resonator

Der  $E_{012}$ -Resonator wird ebenfalls als teilgefüllter Resonator eingesetzt. Die Abmessungen dieses Resonators (s. Anhang A 2.1) wurden so gewählt, daß sich eine Resonanzfrequenz von 2,9 GHz im Leerzustand einstellt. Diese Frequenz – und nicht 2,45 GHz – wurde zum besseren Vergleich mit den Ergebnissen von RISMANN und BENGTTSSON (1971) gewählt, die für ihre Untersuchungen einen  $E_{012}$ -Resonator mit dieser Resonanzfrequenz verwendeten. Die Probe füllt bei diesem teilgefüllten Resonator die halbe Höhe des Innenraumes im Zentrum des Resonators (vgl. Kapitel 2.2.3).

Auch für den  $E_{012}$ -Resonator wurden Kalibrierkurven aufgestellt, da bisher keine Berechnungsgleichungen zur Bestimmung der Dielektrizitätskonstanten und Verlustzahlen existieren. Wichtig war hier besonders, ob auch von salzhaltigen Substanzen (z. B. wäßrige Kochsalzlösungen) die Dielektrizitätskonstante und die Verlustzahl bestimmt werden können. Nach RISMANN und BENGTTSSON (1971) ist dieser Resonator für die Untersuchung von Lebensmitteln gut geeignet, jedoch verwendeten sie bei ihrer Kalibrierung keine salzhaltigen Stoffe.

### 3.1.3 Kalibrierung des $H_{011}$ -Resonators

Die verwendeten Kalibriersubstanzen und ihre Werte der relativen Dielektrizitätskonstanten sind im Anhang A 2.2 aufgelistet. Diese Werte wurden mit der offenen Koaxialleitung bestimmt. Teilweise sind auch Literaturwerte der relativen Dielektrizitätskonstanten dieser Stoffe bekannt, doch diesen Daten liegt keine einheitliche Meßmethode zugrunde, und oft fehlen Angaben zur Probenvorbereitung und -zusammensetzung. Es entstehen so Fehler, die nicht abgeschätzt werden können. Zur Kalibrierung werden keine dispersen Stoffsysteme verwendet, da aufgrund des nur sehr geringen erfaßten Meßvolumens bei der Methode der offenen Koaxialleitung leicht Verfälschungen entstehen könnten. Geeignet als Kalibriersubstanzen sind homogene Flüssigkeiten wie Wasser, Alkohole verschiedener Kohlenstoffkettenlänge, Öle und wäßrige Salzlösungen unterschiedlicher Konzentrationen, da die erforderliche ebene Oberfläche so gegeben ist. Mit den genannten Substanzen wird der für Lebensmittel interessante Bereich der relativen Dielektrizitätskonstante erfaßt. Die beiden wichtigsten Verlustmechanismen Dipolpolarisation und Ionenwanderung werden so ebenfalls berücksichtigt.

Die Substanzen wurden in Glasröhrchen eingefüllt, diese verschlossen und im Wasserbad auf 20 °C temperiert. Nach dem Einbringen eines Probenröhrchens in den Resonator wurden die Veränderungen der Resonanzkurve (Resonanzfrequenzverschiebung, Abschwächung) gegenüber dem Leerzustand gemessen. Es wurden Röhrchen mit 5, 7, 8 und 10 mm Außendurchmesser und einer Länge von 122 mm verwendet. Die Proben haben damit die gleiche Höhe wie der Innenraum des Resonators. Die Innendurchmesser und Füllvolumina der Röhrchen sind im Anhang A 2.1 zusammengestellt. Werden größere Durchmesser gewählt, ist die Abschwächung der Resonanzkurve bei einem Großteil der Substanzen zu groß. Bei Durchmessern kleiner als 5 mm sind dagegen keine Änderungen mehr meßbar. Bei allen Durchmessern konnte die Resonanzkurve bei Kochsalzlösungen mit Konzentrationen größer 1 Gew.% aufgrund der starken Dämpfung nicht mehr sinnvoll ausgewertet werden. Bei 10 mm Durchmesser konnten gar keine Salzlösungen erfaßt werden. Bei 5 mm Röhrchendurchmesser waren für Substanzen mit sehr kleinen Dielektrizitätskonstanten (Öl, Alkohole ab einer Kohlenstoffzahl von vier) keine Veränderungen der Resonanzkurve meßbar.

Für einen Röhrchendurchmesser von 10 mm wurde zusätzlich die Füllmenge und damit die Füllhöhe variiert und Kalibrierkurven aufgestellt. Die eingesetzten Volumina und Höhen sowie die Ergebnisse sind im Anhang in den Abschnitten A 2.1 und A 3.3 zusammengestellt. Es wurden auf diese Weise allerdings keine genaueren Kalibrierkurven erhalten als die nachfolgend vorgestellten.

#### Kalibrierkurve für die Dielektrizitätskonstante

Es wurde versucht, den Resonator nach der *Cavity Perturbation Method* (s. Kapitel 2.2.3) zu kalibrieren (Abbildungen 3-6 und 3-7). Dabei ergab sich jedoch für den Röhrchendurchmesser von 10 mm kein linearer Zusammenhang zwischen der

Resonanzfrequenzverschiebung  $\Delta f_R$  und der Dielektrizitätskonstanten, wie er z. B. auch von GR NEBERG (1994) beobachtet wurde (vgl. Abbildung 3-6). Zwar ist die Resonanzfrequenzverschiebung umso größer, je höher die Dielektrizitätskonstante ist, aber für hohe Werte der Dielektrizitätskonstante wird die Kurve (Anpassungsfunktion s. Tabelle 3-2) flacher. Das recht große Probevolumen stört das Feld im Resonator vermutlich so stark, daß die für die *Cavity Perturbation Method* getroffene Annahme einer nur sehr geringen Störung nicht mehr gültig ist.

Verwendete  
Meßmethoden

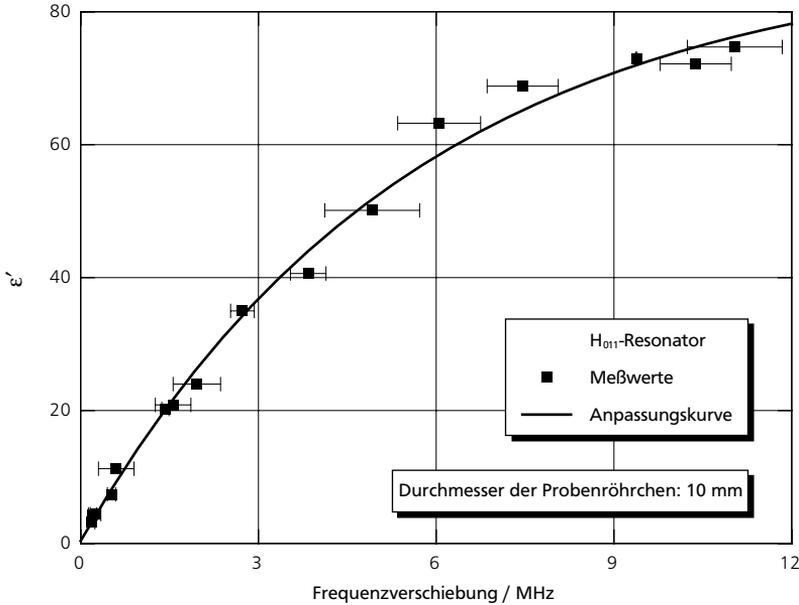


Abb. 3-6:  $H_{011}$ -Resonator: Kalibrierkurve für die Dielektrizitätskonstante bei 10 mm Probendurchmesser (Anpassungsfunktion s. Tabelle 3-2; Meßwerte mit Standardabweichungen).

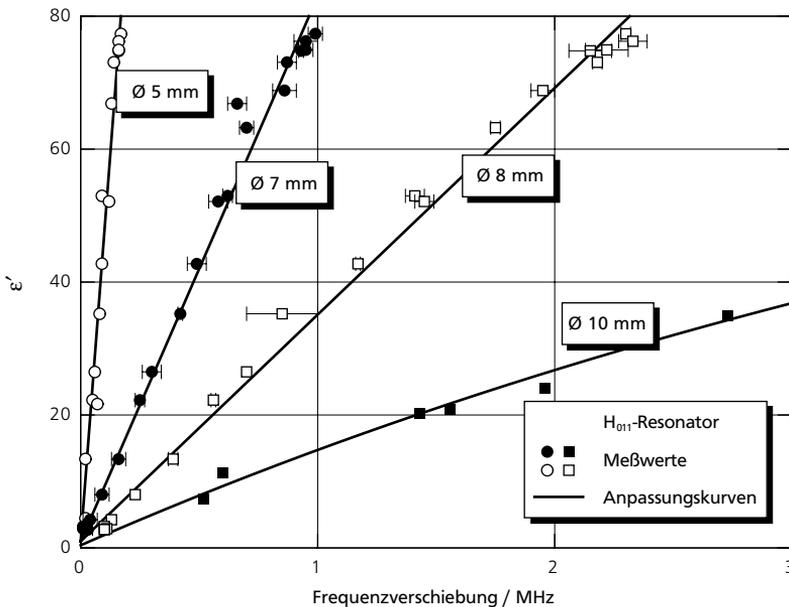


Abb. 3-7:  $H_{011}$ -Resonator: Kalibrierkurven für die Dielektrizitätskonstante bei verschiedenen Probendurchmessern (Anpassungsfunktionen s. Tabelle 3-2; Meßwerte teilweise mit Standardabweichungen).

Bestimmung  
der relativen  
Dielektrizitätskonstante

Die Frequenzverschiebung ist mit maximal 12 MHz gering. Wird der Röhrendurchmesser verringert, sind die Verschiebungen noch kleiner (Abbildung 3-7) und die Kalibrierkurven können mit Geraden (s. Tabelle 3-2) beschrieben werden.

### Kalibrierkurve für die Verlustzahl

Hier wurde versucht, einen Zusammenhang zwischen der Verlustzahl und der Änderung der Güte, in Anlehnung an die Gleichungen für den  $E_{010}$ -Resonator, zu finden. Dies war nicht möglich. Problematisch ist hier, daß Substanzen mit höheren relativen Dielektrizitätskonstanten die Resonanzkurve so stark dämpfen, daß zwar die Resonanzfrequenzverschiebung und die Abschwächung der Resonanzkurve, aber nicht mehr die Güte gemessen werden können. Deshalb wurde versucht, nach dem Vorschlag von RISMANN und BENGTTSSON (1971) für den  $E_{012}$ -Resonator, auch für den  $H_{011}$ -Resonator für die Verlustzahl eine Abhängigkeit von der Abschwächung der Resonanzkurve zu finden. Jedoch wurde nicht wie bei RISMANN und BENGTTSSON (1971) die Verlustzahl direkt über der Abschwächung mit der Dielektrizitätskonstanten als Parameter aufgetragen, sondern die in Abbildung 3-8 (Beispiel mit 10 mm Röhrendurchmesser) dargestellte Auftragung gewählt.

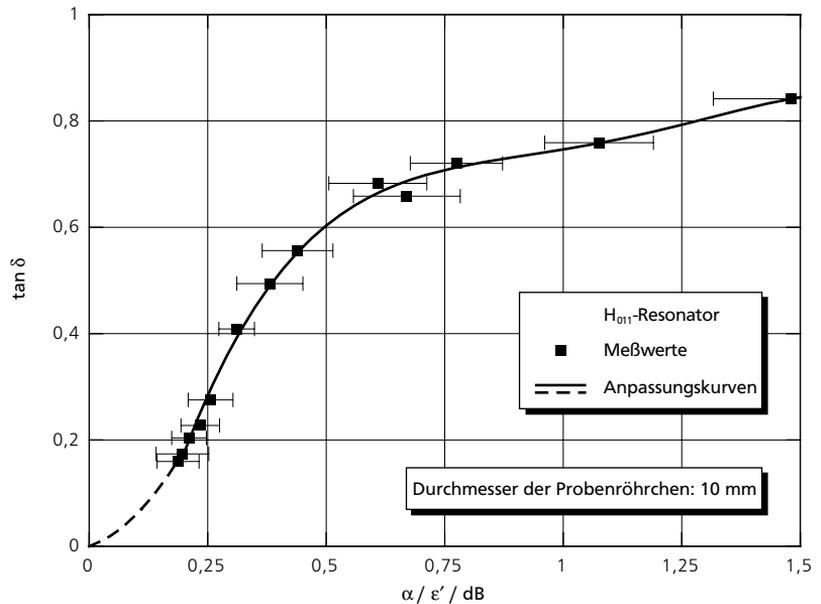


Abb. 3-8:  $H_{011}$ -Resonator: Kalibrierkurve für die Verlustzahl bei 10 mm Probendurchmesser (Anpassungsfunktionen s. Tabelle 3-2; Meßwerte mit Standardabweichungen).

Vorteil dieser Darstellung ist, daß der Verlustfaktor  $\tan \delta$  mit einer Kurve beschrieben werden kann, während RISMANN und BENGTTSSON (1971) zusätzlich eine Gerade für jede Dielektrizitätskonstante auftragen mußten. Einen ähnlichen Verlauf zeigen auch die Kalibrierkurven für die anderen Röhrendurchmesser. Die Ergebnisse werden nicht in einem Diagramm verglichen, da die Abschwächung im Gegensatz zur Resonanzfrequenzverschiebung eine relative Änderung ist. Die

Bezugsgröße ändert sich für jeden Röhrendurchmesser. Die Ergebnisse für 5, 7 und 8 mm Durchmesser sind im Anhang A 2.3 zusammengestellt.

Bei allen Probendurchmessern wurden etwa im Bereich  $\tan \delta < 0,15$  keine sinnvollen Werte des Verlustfaktors  $\tan \delta$  gemessen, so daß für diesen Bereich die Verlustzahl  $\epsilon''$  nicht bestimmt werden kann. Deshalb sind die Kurven dort (Kurvenverlauf in diesem Bereich nach einem Vorschlag von SCHUBERT (1997)) gestrichelt gezeichnet (s. Abbildung 3-8 und Anhang A 2.3). Für so kleine Verlustzahlen ist es empfehlenswert, mit dem  $E_{010}$ -Resonator zu arbeiten.

Die für die Kalibrierkurven des  $H_{011}$ -Resonators gewählten Anpassungsfunktionen (mit nichtlinearer Regression ermittelt) und ihre Geltungsbereiche, sind für sämtliche Röhrendurchmesser in Tabelle 3-2 zusammengefaßt.

Verwendete  
Meßmethoden

Geltungsbereich	Funktion
<b>10 mm Probendurchmesser:</b>	
	$\epsilon' = 88,74 - 89,66 \cdot \exp\left(-\frac{\Delta f_R / \text{MHz} + 0,08}{5,64}\right)$
$\frac{\alpha / \epsilon'}{\text{dB}} < 0,2$	$\tan \delta = 0,31 \cdot \frac{\alpha / \epsilon'}{\text{dB}} + 2,97 \cdot \left(\frac{\alpha / \epsilon'}{\text{dB}}\right)^2$
$\frac{\alpha / \epsilon'}{\text{dB}} \geq 0,2$	$\tan \delta = -0,47 + 4,29 \cdot \frac{\alpha / \epsilon'}{\text{dB}} - 5,86 \cdot \left(\frac{\alpha / \epsilon'}{\text{dB}}\right)^2 + 3,6 \cdot \left(\frac{\alpha / \epsilon'}{\text{dB}}\right)^3 - 0,8 \cdot \left(\frac{\alpha / \epsilon'}{\text{dB}}\right)^4$
<b>8 mm Probendurchmesser:</b>	
	$\epsilon' = 1 + 34,1 \cdot \Delta f_R / \text{MHz}$
$\frac{\alpha / \epsilon'}{\text{dB}} < 0,28$	$\tan \delta = 0,02 \cdot \frac{\alpha / \epsilon'}{\text{dB}} + 1,72 \cdot \left(\frac{\alpha / \epsilon'}{\text{dB}}\right)^2$
$\frac{\alpha / \epsilon'}{\text{dB}} \geq 0,28$	$\tan \delta = -0,31 + 1,95 \cdot \frac{\alpha / \epsilon'}{\text{dB}} - 1,23 \cdot \left(\frac{\alpha / \epsilon'}{\text{dB}}\right)^2 + 0,3 \cdot \left(\frac{\alpha / \epsilon'}{\text{dB}}\right)^3$
<b>7 mm Probendurchmesser:</b>	
	$\epsilon' = 1 + 81,97 \cdot \Delta f_R / \text{MHz}$
$\frac{\alpha / \epsilon'}{\text{dB}} < 0,28$	$\tan \delta = 0,02 \cdot \frac{\alpha / \epsilon'}{\text{dB}} + 1,72 \cdot \left(\frac{\alpha / \epsilon'}{\text{dB}}\right)^2$
$\frac{\alpha / \epsilon'}{\text{dB}} \geq 0,28$	$\tan \delta = -0,31 + 1,95 \cdot \frac{\alpha / \epsilon'}{\text{dB}} - 1,23 \cdot \left(\frac{\alpha / \epsilon'}{\text{dB}}\right)^2 + 0,3 \cdot \left(\frac{\alpha / \epsilon'}{\text{dB}}\right)^3$
<b>5 mm Probendurchmesser:</b>	
	$\epsilon' = 1 + 465,77 \cdot \Delta f_R / \text{MHz}$
$\frac{\alpha / \epsilon'}{\text{dB}} < 0,28$	$\tan \delta = 0,02 \cdot \frac{\alpha / \epsilon'}{\text{dB}} + 1,72 \cdot \left(\frac{\alpha / \epsilon'}{\text{dB}}\right)^2$
$\frac{\alpha / \epsilon'}{\text{dB}} \geq 0,28$	$\tan \delta = -0,31 + 1,95 \cdot \frac{\alpha / \epsilon'}{\text{dB}} - 1,23 \cdot \left(\frac{\alpha / \epsilon'}{\text{dB}}\right)^2 + 0,3 \cdot \left(\frac{\alpha / \epsilon'}{\text{dB}}\right)^3$

Tab. 3-2:  $H_{011}$ -Resonator: Anpassungsfunktionen und Geltungsbereiche dieser Funktionen für die Kalibrierkurven der Dielektrizitätskonstante und der Verlustzahl.

### 3.1.4 Kalibrierung des $E_{012}$ -Resonators

Für diesen Resonator wurde die Zahl der Kalibriersubstanzen im Vergleich zum  $H_{011}$ -Resonator und zur Literatur (RISMAN und BENGTTSSON, 1971) erweitert. Die Liste dieser Substanzen und ihrer Dielektrizitätskonstanten und Verlustzahlen, die mit der offenen Koaxialleitung gemessen wurden, ist in Anhang A 2.2 zu finden. Es wurden 89 mm lange Glasprobenröhrchen (halbe Resonatorhöhe) mit einem Außendurchmesser von 7 mm und einem Innendurchmesser von 5 mm verwendet. Dies entspricht einem Füllvolumen von 1,7 ml. Die gefüllten und mit einem Septum verschlossenen Proben wurden in einem Wasserbad auf die gewünschte Temperatur gebracht, anschließend in den Resonator eingesetzt und die Änderungen der Resonanzkurve gemessen.

#### Kalibrierkurve für die Dielektrizitätskonstante

In Abbildung 3-9 ist der ermittelte Zusammenhang zwischen Dielektrizitätskonstante und Frequenzverschiebung aufgetragen. Die Frequenzverschiebungen sind mit ca. 250 MHz etwa um den Faktor zwanzig größer als beim  $H_{011}$ -Resonator. Damit wird eine Problematik der Resonatormethoden deutlich. Eine eigentliche Meßfrequenz, bei der die frequenzabhängigen relativen Dielektrizitätskonstanten bestimmt werden, ist nicht zuzuordnen, da sowohl die Resonanzfrequenz des leeren wie des gefüllten Resonators in die Auswertung eingehen. Sind jedoch die Resonanzfrequenzverschiebungen klein und/oder ist die Frequenzabhängigkeit der relativen Dielektrizitätskonstanten in diesem Bereich klein, entspricht die Meßfrequenz in guter Näherung der Resonanzfrequenz des ungefüllten Resonators.

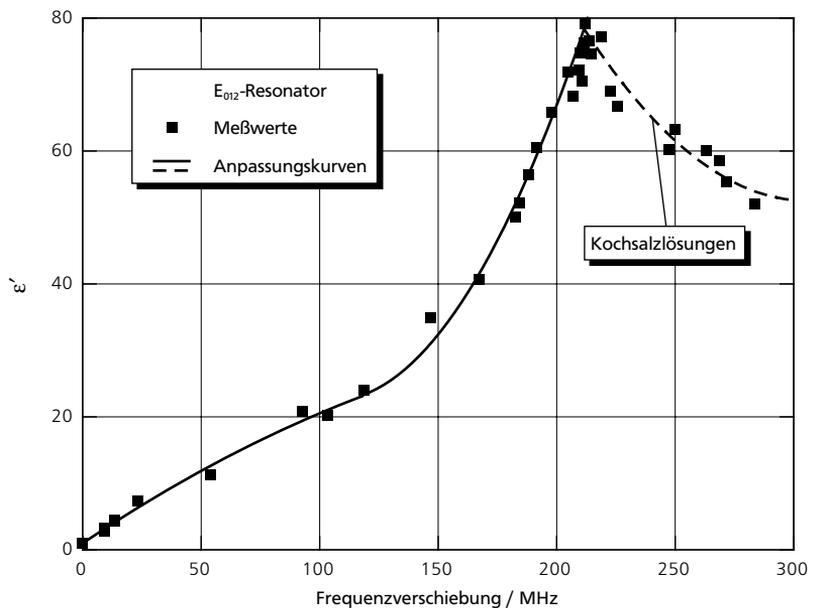


Abb. 3-9:  $E_{012}$ -Resonator: Kalibrierkurve für die Dielektrizitätskonstante (Anpassungsfunktionen s. Tabelle 3-3).

Die mit einer durchgezogenen Linie gezeichnete Kurve (Anpassungsfunktionen s. Tabelle 3-3) entspricht dem von RISMAN und BENGTTSSON (1971) gefundenen Verlauf. Wie beim  $H_{011}$ -Resonator mit einem Probendurchmesser von 10 mm wird hier ebenfalls keine Gerade ermittelt, wie es die *Cavity Perturbation Method* vermuten läßt. Grund für diese Abweichung ist auch hier das „große“ Probenvolumen, das das Feld im Resonatorinneren so verändert, daß nicht mehr von einer geringen Störung ausgegangen werden kann. Es ist zu erwarten, daß beim Einsatz von Probenröhrchen mit einem kleineren Innendurchmesser als 5 mm (ähnlich wie beim  $H_{011}$ -Resonator) aufgrund der geringeren Störung des Feldes der Zusammenhang zwischen Resonanzfrequenzverschiebung und Dielektrizitätskonstante dann mit einer Geraden beschrieben werden kann.

RISMAN und BENGTTSSON (1971) verwendeten zur Kalibrierung keine Salzlösungen. In der vorliegenden Arbeit wurden auch wäßrige Kochsalzlösungen mit Konzentrationen von 1, 5 und 10 Gew.% bei Temperaturen zwischen 3,5 und 50 °C eingesetzt. Für 1Gew.%ige Kochsalzlösungen liegen die Meßwerte auf der durchgezogenen Kurve. Für die 5- und 10Gew.%igen Lösungen ergibt sich die gestrichelte Kurve in Abbildung 3-9 (s. Tabelle 3-3). Im Bereich von Frequenzverschiebungen von etwa 210 bis 220 MHz ergibt sich ein Bereich, in dem die Dielektrizitätskonstante einen Maximalwert durchläuft. Zu diesem Bereich hoher Werte der Dielektrizitätskonstanten zwischen 70 und 80 gehören Substanzen wie Wasser und verdünnte, wäßrige Salzlösungen. Andere Substanzgemische mit (auch höherem) Salzanteil fallen nicht in diesen Bereich. So bewirkt beispielsweise ein Gemisch aus 5 Gew.% Kochsalz, 45 Gew.% Wasser und 50 Gew.% Ethanol eine Frequenzverschiebung von 137 MHz, was nach Abbildung 3-9 einer Dielektrizitätskonstante von 27 entspricht. Mit der Methode der offenen Koaxialleitung wurde ein Wert von  $\epsilon' = 27,8$  für dieses Gemisch ermittelt.

In der Literatur findet sich bisher keine Beobachtung eines solchen Maximums einer Kalibrierkurve. Auch RISMAN und BENGTTSSON (1971) arbeiteten nur mit einer Kalibrierkurve, die dem durchgezogenen, linken Kurvenast in Abbildung 3-9 entspricht, obwohl sie die Dielektrizitätskonstante von Substanzen wie gekochtem Schinken mit bis zu 5 % Salzanteil bestimmten. Die Dielektrizitätskonstanten der von ihnen untersuchten Lebensmittel konnten jedoch alle mit der von ihnen verwendeten Kalibrierkurve bestimmt werden (BENGTTSSON und RISMAN, 1971).

### Kalibrierkurve für die Verlustzahl

In Abbildung 3-10 ist wie bei RISMAN und BENGTTSSON (1971) die Verlustzahl  $\epsilon''$  über der Abschwächung  $\alpha$  aufgetragen. RISMAN und BENGTTSSON (1971) geben jedoch keine einzelnen Meßpunkte an, sondern in ihrem Diagramm sind Geraden konstanter Dielektrizitätskonstante für Werte der Dielektrizitätskonstante von  $\epsilon' = 5, 10, 25, 50$  und  $75$  eingezeichnet. Die hier gemessenen Werte bestätigen diesen Zusammenhang nicht, insbesondere nicht wenn die Werte für die 5- und 10Gew.%igen Kochsalzlösungen betrachtet werden.

Bestimmung  
der relativen  
Dielektrizitätskonstante

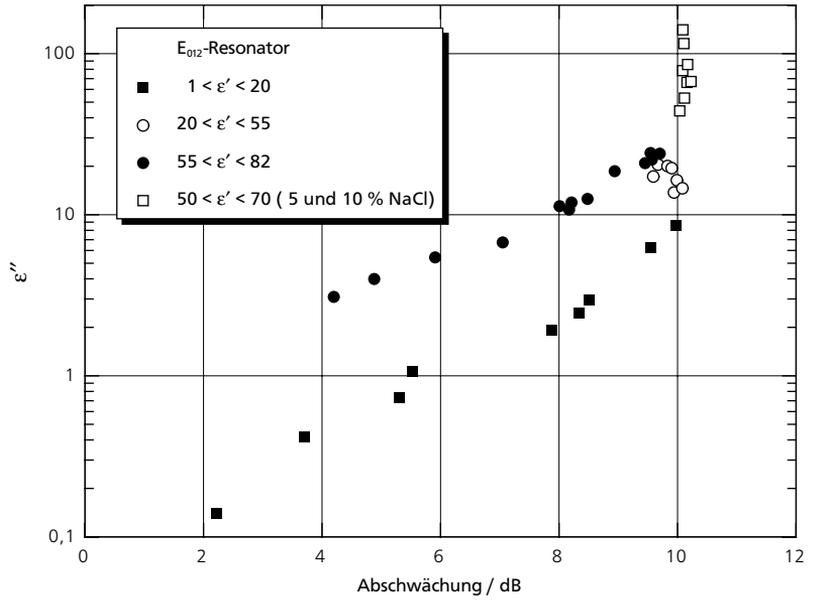


Abb. 3-10: E<sub>012</sub>-Resonator: Zusammenhang zwischen Verlustzahl ε'' und Abschwächung α (Auftragung nach RISMAN und BENGSSON, 1971).

Es wurde deshalb ähnlich wie beim H<sub>011</sub>-Resonator die in Abbildung 3-II gezeigte Auftragung versucht. Es ergibt sich kein eindeutiger Zusammenhang zwischen Verlustfaktor tan δ und der Abschwächung α. Die Meßwerte für Alkohole bis auf Methanol liegen oberhalb der übrigen Punkte, und für eine Abschwächung um 10 dB ist keine Zuordnung zu einem bestimmten Wert des Verlustfaktors möglich.

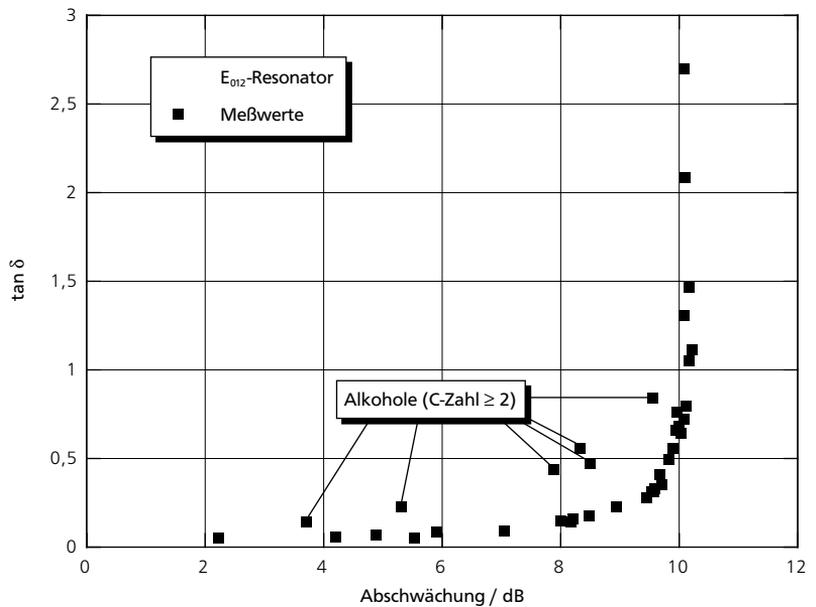


Abb. 3-11: E<sub>012</sub>-Resonator: Zusammenhang zwischen Verlustfaktor tan δ und Abschwächung α.

In Kapitel 2.1.2 wurde die Abschwächung einer elektromagnetischen Welle beim Eintritt in eine Substanz beschrieben (Gleichung 2-6). Maßgeblich für die Abschwächung ist die Dämpfungskonstante  $\beta$  (Gleichung 2-7), die eine Funktion der Dielektrizitätskonstante  $\epsilon'$  und der Verlustzahl  $\epsilon''$  ist. Auch in einem Resonator werden die Wellen durch das Einbringen des zu untersuchenden Stoffes abgeschwächt. Es wurde deshalb ein Zusammenhang zwischen der Abschwächung der Resonanzkurve und der Dämpfungskonstanten erwartet. Für die Darstellung wurde ein dimensionsloser Abschwächungsfaktor  $\beta_f$  definiert, aus dem sich bei Kenntnis der Dielektrizitätskonstante  $\epsilon'$  die Verlustzahl  $\epsilon''$  berechnen läßt:

$$\beta_f \equiv \beta \cdot \frac{\lambda_0}{\sqrt{2} \cdot \pi} \quad (3-2)$$

$$\beta_f = \sqrt{\epsilon' \cdot \left( \sqrt{1 + \left( \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \right)^2} - 1 \right)} \quad (3-3)$$

$$\epsilon'' = \epsilon' \cdot \sqrt{\left( 1 + \frac{\beta_f^2}{\epsilon'} \right)^2 - 1} \quad (3-4)$$

Dieser Abschwächungsfaktor  $\beta_f$  ist in Abbildung 3-12 über der Abschwächung  $\alpha$  der Resonanzkurve aufgetragen. Die Werte für die Alkohole liegen jetzt mit den übrigen Werten zusammen. Es ist aber weiterhin keine Bestimmung der Verlustzahl für Abschwächungen um 10 dB möglich.

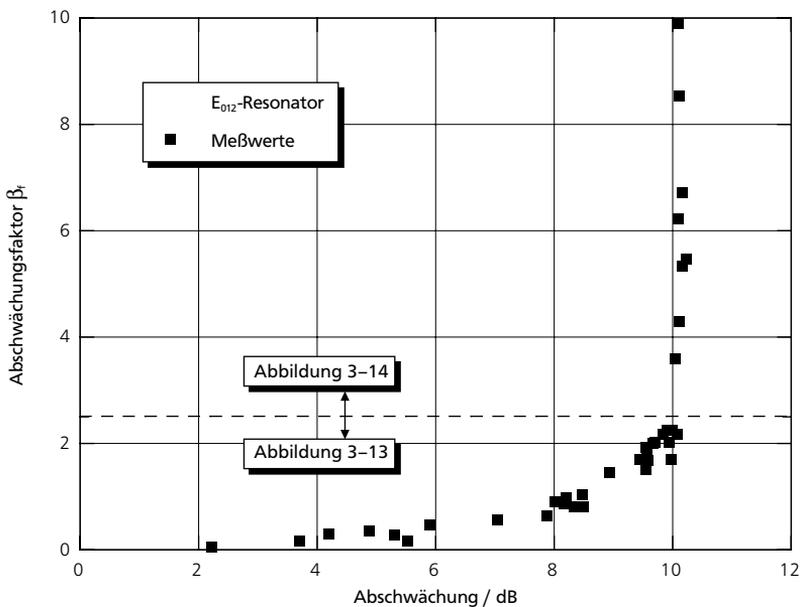


Abb. 3-12:  $E_{012}$ -Resonator: Zusammenhang zwischen Abschwächungsfaktor  $\beta_f$  und Abschwächung  $\alpha$ .

Bestimmung  
der relativen  
Dielektrizitätskonstante

Deshalb wurde die Kalibrierung in zwei Diagramme aufgeteilt. In Abbildung 3-13 sind für Abschwächungen bis  $\alpha = 10$  dB die Abschwächungsfaktoren bis  $\beta_f = 2,5$  nochmals vergrößert dargestellt. In Abbildung 3-14 wurden Abschwächungsfaktoren  $\beta_f > 2,5$  über der Abschwächung dividiert durch die Dielektrizitätskonstante  $\alpha/\epsilon'$  aufgetragen. Mit diesen Darstellungen ist es jetzt möglich, die Verlustzahl zu bestimmen, und zwar auch für Salzlösungen höherer Konzentration.

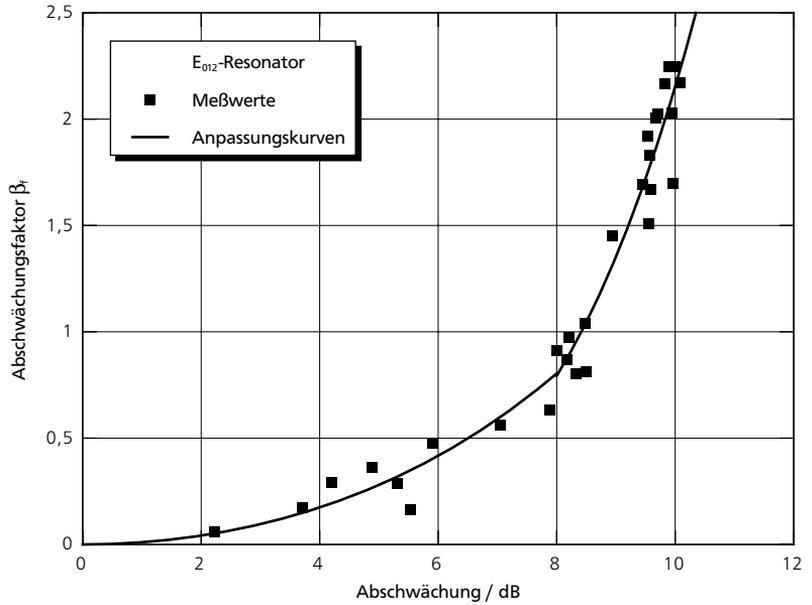


Abb. 3-13:  $E_{012}$ -Resonator: Kalibrierkurve für die Verlustzahl bei Abschwächungsfaktoren  $\beta_f \leq 2,5$  (Anpassungsfunktionen s. Tabelle 3-3).

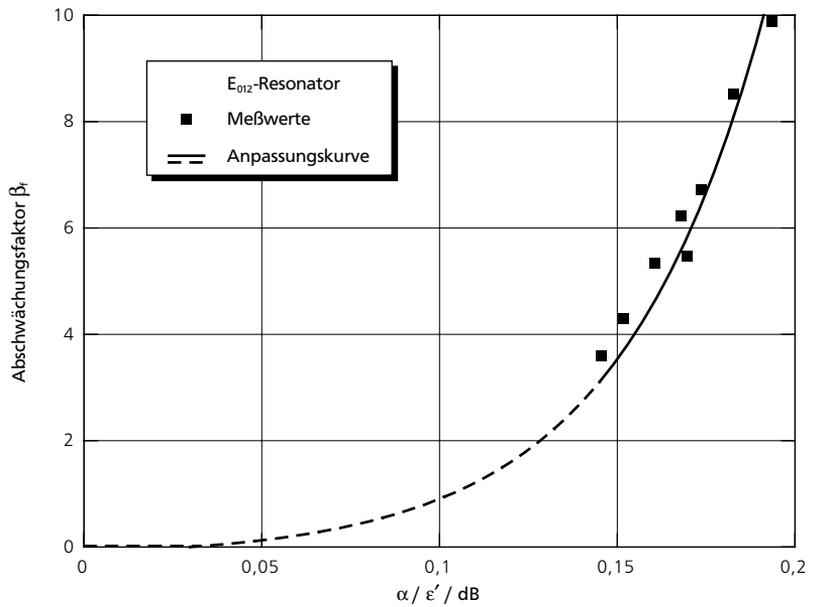


Abb. 3-14:  $E_{012}$ -Resonator: Kalibrierkurve für die Verlustzahl bei Abschwächungsfaktoren  $\beta_f > 2,5$  (Anpassungsfunktion s. Tabelle 3-3).

Die in den Abbildungen 3-9, 3-13 und 3-14 verwendeten Anpassungsfunktionen zur Beschreibung der verschiedenen Kalibrierkurven sind mit ihren Geltungsbereichen in Tabelle 3-3 zusammengestellt. Diese Funktionen wurden mit nichtlinearer Regression an die Meßwerte angepaßt.

Verwendete  
Meßmethoden

Geltungsbereich	Funktion
Kalibrierung der Dielektrizitätskonstante (Abbildung 3-10):	
$\frac{\Delta f_R}{\text{MHz}} \leq 103$	$\epsilon' = 1 + 0,24 \cdot \frac{\Delta f_R}{\text{MHz}} - 4,4 \cdot 10^{-4} \cdot \left(\frac{\Delta f_R}{\text{MHz}}\right)^2$
$103 < \frac{\Delta f_R}{\text{MHz}} < 212$	$\epsilon' = 76,8 - 1,04 \cdot \frac{\Delta f_R}{\text{MHz}} + 4,9 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{\Delta f_R}{\text{MHz}}\right)^2$
$\frac{\Delta f_R}{\text{MHz}} \geq 212$	$\epsilon' = 326,04 - 1,79 \cdot \frac{\Delta f_R}{\text{MHz}} + 2,9 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{\Delta f_R}{\text{MHz}}\right)^2$
Kalibrierung der Verlustzahl (Abbildung 3-13):	
$\frac{\alpha}{\text{dB}} \leq 8$	$\beta_f = 10^{-2} \cdot \left(\frac{\alpha}{\text{dB}}\right)^2 + 4 \cdot 10^{-5} \cdot \left(\frac{\alpha}{\text{dB}}\right)^4$
$\frac{\alpha}{\text{dB}} > 8$	$\beta_f = -3,9 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{\alpha}{\text{dB}}\right)^2 + 2,5 \cdot 10^{-4} \cdot \left(\frac{\alpha}{\text{dB}}\right)^4$
Kalibrierung der Verlustzahl (Abbildung 3-14):	
	$\beta_f = -0,2 + 3,46 \cdot 10^{11} \cdot \exp\left(\frac{\alpha / \epsilon' / \text{dB} - 1,19}{4,1 \cdot 10^{-2}}\right)$

Tab. 3-3:  $E_{012}$ -Resonator: Anpassungsfunktionen und Geltungsbereiche dieser Funktionen für die Kalibrierkurven der Dielektrizitätskonstante und der Verlustzahl.

### 3.1.5 Anwendungsbereiche der Meßverfahren

Die in den folgenden Abschnitten ausführlich diskutierten Anwendungsbereiche der verschiedenen Meßverfahren hinsichtlich Frequenz, Temperatur, Probenabmessungen und -volumen sowie den meßbaren Wertebereichen der Dielektrizitätskonstante und der Verlustzahl sind am Ende dieses Kapitels in Tabelle 3-4 nochmals in Kurzform zusammengefaßt.

#### Frequenz(-bereich)

Mit der offenen Koaxialleitung können mit den beiden Netzwerkanalysatoren die relativen Dielektrizitätskonstanten zwischen 200 MHz und 3 GHz (bzw. 6 GHz) gemessen werden (vgl. Kapitel 3.1.1). Die größten Schwankungen der Meßwerte wurden, wie auch von HEWLETT PACKARD (1993a) angegeben, für die sehr kleinen Frequenzen beobachtet.

---

Bestimmung  
der relativen  
Dielektrizitätskonstante

Mit den Resonatoren können die Dielektrizitätskonstante und die Verlustzahl immer nur bei einer bestimmten Frequenz, der Resonanzfrequenz des Resonators, bestimmt werden. Da die relative Dielektrizitätskonstante aus den Veränderungen der Resonanzkurve zwischen ungefülltem und gefülltem Zustand ermittelt wird, ist es wichtig, daß sich die Resonanzfrequenz im gefüllten Zustand wenig gegenüber der Resonanzfrequenz des leeren Resonators verschiebt bzw. daß die dielektrischen Eigenschaften der untersuchten Substanzen in diesem Bereich nur sehr gering von der Frequenz abhängen.

Beim  $H_{011}$ -Resonator wurden die kleinsten Frequenzverschiebungen mit maximal 12 MHz beobachtet; beim  $E_{012}$ -Resonator waren es bis nahezu 300 MHz. Die Frequenzabhängigkeit der relativen Dielektrizitätskonstante ist in diesem Bereich bei den meisten Substanzen gering, so daß die dadurch entstehenden Fehler zu vernachlässigen sind. Beim  $E_{010}$ -Resonator sind die Frequenzverschiebungen mit Werten auch über 1 GHz sehr groß. Trotzdem kann in guter Näherung als Meßfrequenz 2,45 GHz angegeben werden, da mit dem  $E_{010}$ -Resonator nur sehr kleine Werte der relativen Dielektrizitätskonstante bestimmt werden können und die Werte der untersuchten Stoffe in diesem Frequenzbereich quasi keine Abhängigkeit von der Frequenz zeigen.

### Temperaturbereich

Mit dem neuen Tastkopf der offenen Koaxialleitung kann bei Temperaturen zwischen  $-40$  und  $200$  °C gearbeitet werden. Damit ist der gesamte für Lebensmittel wichtige Bereich abgedeckt.

Der  $E_{010}$ -Resonator kann mit der eingefüllten Probe im für Lebensmittel interessanten Bereich temperiert werden, solange Materialien, besonders bei den Koaxialverbindungskabeln, eingesetzt werden, die für diesen Temperaturbereich geeignet sind. Bei den beiden teilgefüllten Resonatoren können die Proben außerhalb des Resonators auf die gewünschten Temperaturen gebracht werden, dann in die Resonatoren eingesetzt und die Messungen durchgeführt werden. Die Wärmeverluste sind meist zu vernachlässigen. Es kann aber auch wie beim  $E_{010}$ -Resonator der Resonator samt der eingesetzten Probe temperiert werden.

### Probenabmessungen und Probenvolumen

Das erfaßte Probenvolumen ist bei der offenen Koaxialleitung sehr klein. Mit den eigenen Messungen konnten die nach Gleichung 3-1 erforderlichen Mindestprobenhöhen unterschritten werden. Es war jedoch kein Einfluß auf die relative Dielektrizitätskonstante zu erkennen. Wurde Wasser mit dem gut spreitenden Mineralöl *Velocit* überschichtet, wurden für die Dielektrizitätskonstante und die Verlustzahl für Höhen der Ölschicht größer als 0,5 mm stets die Werte des reinen Mineralöls gemessen. Erst Vergleichsmessungen mit einem Resonator können zeigen, ob auch bei kleineren Schichthöhen oder bei einem dispersen System mit

einer fein verteilten dispersen Phase, wie beispielsweise Emulsionen, nur die Phase erfaßt wird, die direkt am Tastkopf anliegt oder ob dann eine mittlere relative Dielektrizitätskonstante des Gesamtstoffsystems bestimmt wird.

Bei den Resonatoren sind die Probenabmessungen bzw. -volumina ganz oder teilweise durch die Resonatorgeometrie festgelegt. Beim vollgefüllten  $E_{010}$ -Resonator ist das Substanzvolumen mit etwa 500 ml entsprechend dem Innenraum des Resonators am größten, d. h. Inhomogenitäten der Probe haben hier den geringsten Einfluß. Beim teilgefüllten  $H_{011}$ -Resonator ist die Höhe der Probe gleich der Innenhöhe des Resonators. Es erwiesen sich Volumina zwischen 1 und 6 ml (Außendurchmesser der Probenröhrchen zwischen 5 und 10 mm) als günstig. Bei kleineren Proben waren die Änderungen der Resonanzkurve zu gering und bei größeren zu groß für die Auswertung. Die Probenröhrchen für den  $E_{012}$ -Resonator hatten 5 mm Innendurchmesser und 89 mm Höhe, was einem Volumen von 1,7 ml entspricht. Diese Abmessungen wurden gewählt, da auch RISMANN und BENGTSSON (1971) bei ihrem Resonator damit arbeiteten. Ein Vorteil der Resonatoren ist, daß das untersuchte Probenvolumen durch die Resonator- bzw. die Probenröhrchenabmessungen definiert ist. Auch bei gröber dispersen Stoffsystemen wird die gesamte Probe erfaßt, was bei der Methode der offenen Koaxialleitung nicht sicher ist. Hier wird u. U. nur ein Teil einer Probe erfaßt, der in seiner Zusammensetzung nicht der Gesamtprobe entspricht.

#### Meßbarer Wertebereich der Dielektrizitätskonstante und Verlustzahl

Die Werte, die mit der Methode der offenen Koaxialleitung gemessen wurden, waren sehr gut reproduzierbar. Wichtig ist hier eine sorgfältige Kalibrierung des Meßsystems, die immer wieder überprüft werden muß. Mißt man die Dielektrizitätskonstanten und Verlustzahlen im vom Hersteller angegebenen Bereich (s. Kapitel 3.1.1 und HEWLETT PACKARD, 1993a und 1993c), sind die Standardabweichungen von den Mittelwerten oft so klein, daß sie bei der Darstellung in den Diagrammen innerhalb der Symbole liegen.

Mit dem  $E_{010}$ -Resonator können Dielektrizitätskonstanten bis  $\epsilon' = 2$  und Verlustzahlen bis  $\epsilon'' = 0,7$  gut reproduzierbar bestimmt werden. Die Standardabweichungen der eigenen Messungen liegen etwa bei 10 % vom Mittelwert.

Mit dem  $H_{011}$ -Resonator können mit allen verwendeten Probenröhrchen Dielektrizitätskonstanten bis  $\epsilon' = 80$  bestimmt werden. Je kleiner der Probendurchmesser ist, desto höher ist die kleinste meßbare Dielektrizitätskonstante. Für 5 mm Probendurchmesser ist die kleinste noch meßbare Dielektrizitätskonstante  $\epsilon' = 10$ . Der Verlustfaktor kann bis etwa  $\tan \delta = 0,9$  (bei 10 mm Probendurchmesser bis  $\tan \delta = 0,85$ ) bestimmt werden. Die Standardabweichungen liegen auch hier um 10 % vom Mittelwert, sind aber in Einzelfällen größer.

Mit dem  $E_{012}$ -Resonator kann von allen drei Resonatoren der größte Wertebereich erfaßt werden. Die Dielektrizitätskonstante kann ohne Einschränkung bis  $\epsilon' = 80$  und der Verlustfaktor bis  $\tan \delta = 3$  gemessen werden. Die Reproduzier-

Bestimmung  
der relativen  
Dielektrizitätskonstante

barkeit ist sehr gut, da die Standardabweichungen bei 5 bis maximal 10 % vom Mittelwert liegen.

Die Anwendungsbereiche der einzelnen Meßverfahren sind nochmals in Tabelle 3-4 in gekürzter Form zusammengefaßt. Wie nun eine geeignete Methode zur Bestimmung der relativen Dielektrizitätskonstante eines Stoffes auszuwählen ist, wird im folgenden Kapitel 3.1.6 erläutert.

Tab. 3-4: Anwendungsbereiche der verschiedenen Methoden zur Bestimmung der relativen Dielektrizitätskonstante.

Methode	Frequenz (-bereich)	Temperatur- bereich	Proben- abmessungen $h_{pr}, d_{pr}$	Proben- volumen $V_{pr}$	meßbarer Wertebereich Dielektrizitäts- konstante $\epsilon'$ Verlustfaktor $\tan \delta$ bzw. Verlustzahl $\epsilon''$
offene Koaxialleitung	0,2-3 (6) GHz	5-50 °C bzw. -40-200 °C	$h_{pr} = \frac{20 \text{ mm}}{\sqrt{ \epsilon_r }}$ $d_{pr} \geq 19 \text{ mm}$	$0,5 \text{ ml} \leq V_{pr} \leq 5,7 \text{ ml}^\epsilon$	$\epsilon' < 100^\delta$  $\tan \delta > 0,05^\delta$
vollgefüllter $E_{010}$ -Resonator	2-45 GHz <sup>8</sup>	beliebig <sup>9</sup>	$h_{pr} = h_{res} = 70 \text{ mm}$ $d_{pr} = d_{res} = 93,5 \text{ mm}$	$V_{pr} = 480 \text{ ml}$	$\epsilon' < 2$  $\epsilon'' < 0,7$
teilgefüllter $H_{011}$ -Resonator	2,44 GHz <sup>8</sup>	beliebig <sup>9</sup>	$h_{pr} = h_{res} = 122 \text{ mm}$ $d_{pr} = 8 \text{ mm}$ $d_{pr} = 6 \text{ mm}$ $d_{pr} = 5 \text{ mm}$ $d_{pr} = 3,4 \text{ mm}$	$V_{pr} = 6,1 \text{ ml}$ $V_{pr} = 3,5 \text{ ml}$ $V_{pr} = 2,4 \text{ ml}$ $V_{pr} = 1,1 \text{ ml}$	$5 < \epsilon' < 80$ $5 < \epsilon' < 80$ $5 < \epsilon' < 80$ $10 < \epsilon' < 80$  $0,15 < \tan \delta < 0,85$ $0,15 < \tan \delta < 0,9$ $0,15 < \tan \delta < 0,9$ $0,15 < \tan \delta < 0,9$
teilgefüllter $E_{012}$ -Resonator	2,9 GHz <sup>8</sup>	beliebig <sup>9</sup>	$h_{pr} = h_{res} = 89 \text{ mm}$ $d_{pr} = 5 \text{ mm}$	$V_{pr} = 1,7 \text{ ml}$	$\epsilon' < 80$  $\tan \delta < 3$

<sup>8</sup> Durch Wahl anderer Resonatorabmessungen sind auch andere Frequenzen realisierbar.

<sup>9</sup> Beliebige Temperatur bedeutet, daß im gesamten für Lebensmittel wichtigen Bereich gearbeitet werden kann.

<sup>ε</sup> Das minimale und maximale Probenvolumen wurde aus den relativen Dielektrizitätskonstanten von Wasser bei 20 °C ( $\epsilon_r = 80 - i \cdot 10$ ) und Luft ( $\epsilon_r = 1 - i \cdot 0$ ) berechnet.

<sup>δ</sup> Herstellerangabe; das Meßsystem liefert aber auch Werte außerhalb dieses Bereichs.

### 3.1.6 Wahl einer geeigneten Methode zur Bestimmung der relativen Dielektrizitätskonstante

Verwendete Meßmethoden

In den vorherigen Abschnitten wurden die verschiedenen Anwendungsbereiche der in dieser Arbeit verwendeten Meßverfahren beschrieben. Sollen nun die Dielektrizitätskonstante und die Verlustzahl eines Stoffes bestimmt werden, empfiehlt sich die in Abbildung 3-15 gezeigte Vorgehensweise. Aufgrund der Ergebnisse einer ersten Messung mit der offenen Koaxialleitung wird anhand weiterer Kriterien entschieden, ob zusätzlich mit einem der Resonatorverfahren gearbeitet werden muß.

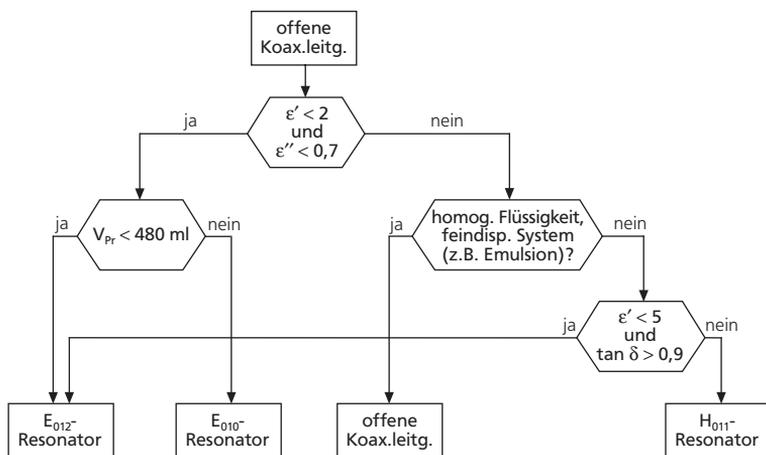


Abb. 3-15: Entscheidungskriterien bei der Wahl einer geeigneten Methode zur Bestimmung der relativen Dielektrizitätskonstante.

Ist die relative Dielektrizitätskonstante, die mit der offenen Koaxialleitung gemessen wird, sehr klein, muß für eine genaue Bestimmung mit einem Resonatorverfahren gemessen werden. Am besten ist dafür der  $E_{010}$ -Resonator geeignet. Jedoch ist bei diesem Resonator ein Probenvolumen von 480 ml notwendig. Ist die Probenmenge nicht ausreichend, ist der  $E_{012}$ -Resonator einzusetzen.

Ist die relative Dielektrizitätskonstante, die mit der offenen Koaxialleitung gemessen wird, größer als der in Abbildung 3-15 angegebene Wert, hängt die weitere Entscheidung davon ab, wie die zu untersuchende Substanz beschaffen ist. Handelt es sich um eine homogene Flüssigkeit oder ein sehr feindisperses Stoffsystem (z. B. Emulsionen mit Tröpfchengrößen im  $\mu\text{m}$ -Bereich), ist die Methode der offenen Koaxialleitung am besten geeignet. Ist der zu untersuchende Stoff jedoch ein gröber disperses System, ist die offene Koaxialleitung weniger gut geeignet, da das erfaßte Probenvolumen nicht genau definiert ist. In diesem Fall ist dann entweder der  $E_{012}$ -Resonator oder der  $H_{011}$ -Resonator zu verwenden.

### Grundlagen

Die Gleichungen zum Berechnen der theoretischen Eindringtiefe wurden bereits in Kapitel 2.1.2 beschrieben. Im folgenden wird die theoretische Eindringtiefe der Verlustleistungsdichte  $s_{theo,P}$  betrachtet. Folgende Beziehung gilt neben Gleichung 2-3 für die Verlustleistungsdichte  $P_V$  an jeder Stelle  $x$  in einem Gut, das mit Mikrowellen erwärmt wird:

$$P_V(x) = \rho \cdot c_p \cdot \frac{d\vartheta}{d\tau} \quad (3-5)$$

bzw. bei Integration von 0 bis zur Erwärmungszeit  $t$  und von Anfangstemperatur  $T_0$  zur Endtemperatur  $T_e$ :

$$\int_0^t P_V(x) \cdot d\tau = \int_{T_0(x)}^{T_e(x)} \rho \cdot c_p \cdot d\vartheta \quad (3-6)$$

Es sind  $\rho$  die Dichte,  $c_p$  die Wärmekapazität sowie  $\tau$  und  $\vartheta$  die Integrationsvariablen für die Erwärmungszeit und die Temperatur.

Setzt man voraus, daß die Verlustleistungsdichte  $P_V$ , die Dichte  $\rho$  und die Wärmekapazität  $c_p$  konstant sind, ergibt sich nach der Integration:

$$P_V(x) = \rho \cdot c_p \cdot \frac{T_e(x) - T_0(x)}{t} = \rho \cdot c_p \cdot \frac{\Delta T(x)}{t} \quad (3-7)$$

Für gleiche Erwärmungszeiten  $t$  ergibt sich nach Umformen und Einsetzen der Verlustleistungsdichte  $P_V$  in Gleichung 2-II:

$$\frac{P_V(x_1)}{P_V(x_2)} = \frac{\Delta T(x_1)}{\Delta T(x_2)} = \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} = e^{-2\beta(x_1-x_2)} \quad (3-8)$$

Sind die Temperaturerhöhungen  $\Delta T = T_e - T_0$  in zwei Tiefen  $x_1$  und  $x_2$  im Gut bekannt und wird angenommen, daß die Temperaturabhängigkeiten der Dielektrizitätskonstante und Verlustzahl in diesem Temperaturbereich vernachlässigbar klein sind, kann die theoretische Eindringtiefe  $s_{theo,P}$  ohne Kenntnis der Dielektrizitätskonstante und Verlustzahl ermittelt werden, sofern der Temperaturausgleich durch Wärmeleitung vernachlässigt werden darf (dazu s. Anhang A 4).

$$s_{theo,P} = \frac{x_1 - x_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} \quad (3-9)$$

Die Proben wurden in Kunststoffbechern in einem Haushaltsmikrowellengerät der Firma *Moulinex (Micro-Chef FM 3735 Electronic)* bei ausgeschaltetem Drehteller erwärmt. Zwar wird die Voraussetzung, daß eine ebene Wellenfront auf einen physikalischen Halbraum trifft, im Haushaltsgerät nicht erfüllt, jedoch können diese Bedingungen näherungsweise eingestellt werden. In Vorversuchen wurden ausreichend große Probenvolumina (250 bis 600 ml) und zur Ausprägung eines Temperaturprofils günstige Erwärmungszeiten (60 bis 120 s) bestimmt. Außerdem wurden die Becher mit Aluminiumfolie abgeschirmt, so daß die Mikrowellen nur von der Oberfläche in die Proben eindringen konnten.

Um Konvektion in den Proben (Wasser, wäßrige Zucker- und Salzlösungen) zu verhindern, wurde diesen Stoffen 2 % Agar-Agar zugesetzt. Diese Gele bleiben beim Erwärmen bis zu Temperaturen von ca. 50 °C fest. Die dielektrischen Eigenschaften dieser Gele unterscheiden sich gering von denen der Substanzen ohne Agar-Agar-Zusatz. Für den Vergleich mit der theoretischen Eindringtiefe, die aus relativen Dielektrizitätskonstanten berechnet wurde, wurden die relativen Dielektrizitätskonstanten der Gele gemessen und diese Werte eingesetzt.

Nach der Erwärmung wurden Temperaturprofile wie folgt aufgenommen. Vier faseroptische Sensoren, die bereits vor der Erwärmung in die Probe eingesteckt worden waren, wurden in Schritten von jeweils 5 mm aus der Probe herausgezogen und dabei jeweils die Temperaturen gemessen (Anordnung der Temperatursensoren in den Bechern s. Abbildung 3-16). Das faseroptische, mikrowelleneignete Temperaturmeßsystem wird in Kapitel 4.2.1 beschrieben. Die Temperaturen einer Ebene wurden anschließend gemittelt und nach Gleichung 3-9 die theoretische Eindringtiefe aus den Temperaturdifferenzen in verschiedenen Tiefen ermittelt. Insgesamt wurden so für jede Probe fünf Werte der theoretischen Eindringtiefe berechnet und aus diesen Einzelwerten wiederum ein Mittelwert gebildet. Zusätzlich wurde jeder Erwärmungsversuch zweimal wiederholt und ebenfalls Mittelwerte gebildet, so daß in den Ergebnisdiagrammen in Kapitel 3.3 jede aus Temperaturdifferenzen berechnete Eindringtiefe ein Mittelwert aus 15 Werten ist. Die zugehörigen Standardabweichungen wurden mit *Gaußscher Fehlerfortpflanzung* errechnet.

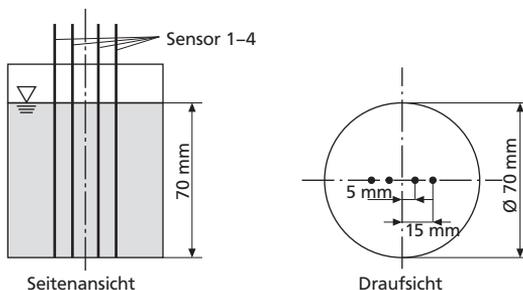


Abb. 3-16: Anordnung der Temperatursensoren in den Kunststoffbechern zur Bestimmung der theoretischen Eindringtiefe (250-ml-Becher).

## 3.2 Ergebnisse

### 3.2.1 Vorbemerkung

In den Ergebnisdiagrammen der folgenden Kapitel sind für die Messungen, soweit nicht anders vermerkt, stets der Mittelwert und die Standardabweichung von diesem Mittelwert angegeben. Jede Messung wurde mindestens dreimal durchgeführt. Die Standardabweichungen – besonders bei Messungen mit der offenen Koaxialleitung – sind oft so klein, daß sie mit dem Symbol in der Darstellung zusammenfallen.

Die relativen Dielektrizitätskonstanten wurden mit den verschiedenen in Kapitel 3.1 beschriebenen Methoden bestimmt. Wenn nicht anders angegeben, wurde mit der offenen Koaxialleitung gemessen. In den Überschneidungsbereichen der beiden Tastköpfe (Temperatur) und Netzwerkanalysatoren (Frequenz) stimmen die Meßwerte sehr gut überein (maximal 1–2 % Abweichung).

Die in die Diagramme im folgenden Kapitel 3.2.2 eingezeichneten Kurven sind entweder Ausgleichskurven durch die Meßwerte, um Trends besser veranschaulichen zu können, oder die einzelnen Meßpunkte wurden mit Linien verbunden, wenn sehr viele, einzelne Meßwerte die Übersichtlichkeit beeinträchtigt hätten (meist bei der Darstellung der Frequenzabhängigkeit der relativen Dielektrizitätskonstante, da hier in Frequenzschritten von jeweils 50 MHz gemessen wurde).

### 3.2.2 Meßergebnisse

#### Permanente Dipole

Zu den permanenten Dipolen gehören neben Wasser als einem Hauptbestandteil von Lebensmitteln z. B. auch Alkohole. Werden diese Stoffe in ein Mikrowellenfeld gebracht, kommt es aufgrund des Absorptionsmechanismus der Dipolrelaxation zu Verlusten, d. h. zur Erwärmung. In den Abbildungen 3–17 und 3–18 sind die Dielektrizitätskonstanten und Verlustzahlen von Alkoholen mit zunehmender C-Atom-Zahl im Frequenzbereich von 0,2 bis 3 GHz dargestellt. Die charakteristische Relaxationsfrequenz  $f_R$  dieser Moleküle steigt, je kleiner das Molekül ist. Bei der Relaxationsfrequenz  $f_R$  durchläuft die Dielektrizitätskonstante von Dipolen einen Wendepunkt zwischen der statischen Dielektrizitätskonstante  $\epsilon_s$  und der optischen Dielektrizitätskonstante  $\epsilon_\infty$ , und die Verlustzahl zeigt ein Maximum. Bei der Temperatur von 25 °C hat Ethanol z. B. eine Relaxationsfrequenz von  $f_R \approx 1$  GHz, und bei 2-Propanol ist  $f_R \approx 0,5$  GHz. Die eigenen Meßwerte stimmen gut mit denen anderer Autoren überein (z. B. BARTHEL u. a., 1990).

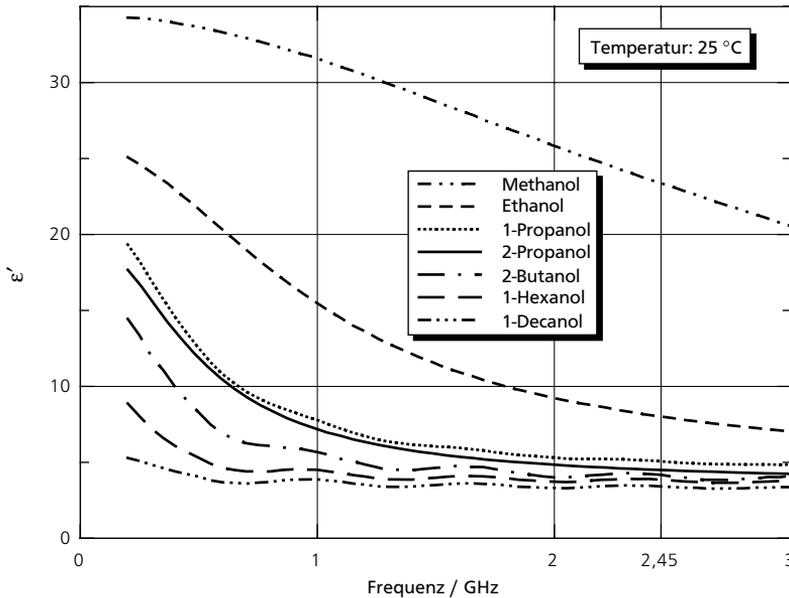


Abb. 3-17: Frequenzabhängigkeit der Dielektrizitätskonstante von Alkoholen bei 25 °C (Mittelwerte mit Linien verbunden, Standardabweichungen haben etwa dreifache Höhe der Linienstärke).

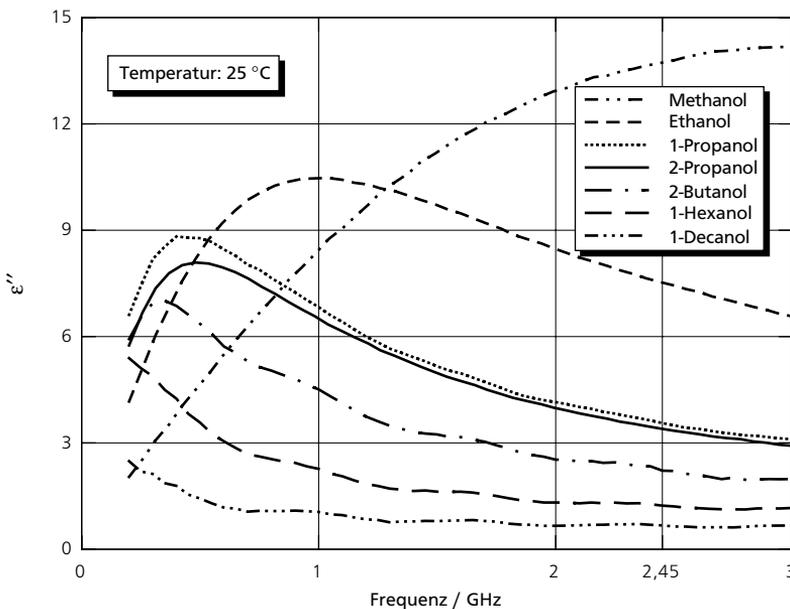


Abb. 3-18: Frequenzabhängigkeit der Verlustzahl von Alkoholen bei 25 °C (Mittelwerte mit Linien verbunden, Standardabweichungen haben etwa dreifache Höhe der Linienstärke).

Bei der Mikrowellenfrequenz von 2,45 GHz ergibt sich die in Abbildung 3-19 gezeigte Abhängigkeit der dielektrischen Eigenschaften von der Zahl der Kohlenstoffatome bei 25 °C. Mit steigender C-Atom-Zahl sinken sowohl die Dielektrizitätskonstante als auch die Verlustzahl. Bei anderen Frequenzen und auch bei anderen Temperaturen kann dieser Zusammenhang ganz anders aussehen (vgl. Abbildungen 3-17 und 3-18 z. B. bei 0,5 GHz).

Bestimmung  
der relativen  
Dielektrizitätskonstante

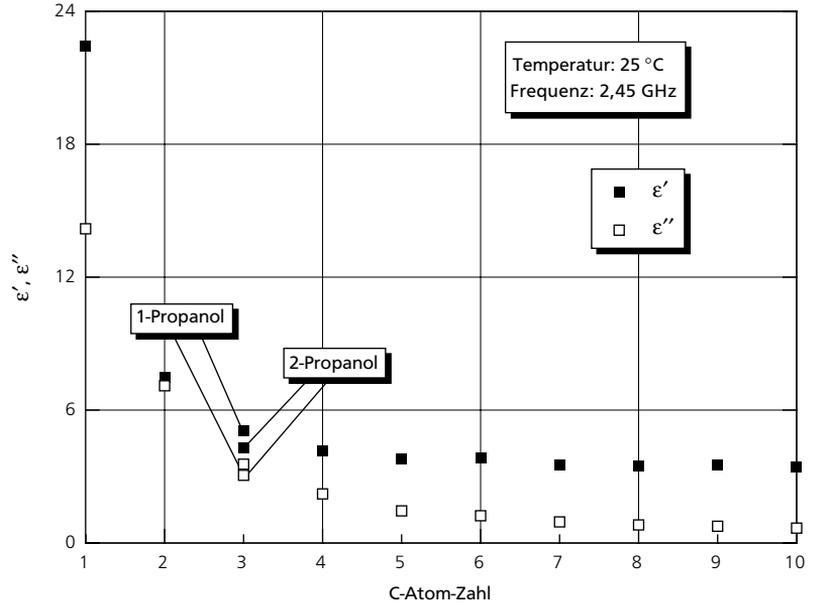


Abb. 3-19: Relative Dielektrizitätskonstante von Alkoholen bei 25 °C und 2,45 GHz (Standardabweichungen liegen innerhalb der Symbole).

Betrachtet man die Temperaturabhängigkeit der dielektrischen Eigenschaften von Dipolen, so erkennt man (Abbildung 3-20), daß sich die Relaxationsfrequenz mit steigender Temperatur zu höheren Frequenzen hin verschiebt, und zwar aufgrund der stärkeren Eigenbewegung durch die Temperaturerhöhung. Im hier gezeigten Beispiel Ethanol steigt  $f_R$  zwischen 10 und 50 °C von 0,8 auf 2,5 GHz an. Als weiteres Beispiel sind die dielektrischen Eigenschaften von Isopropanol (2-Propanol) ebenfalls für den Frequenzbereich von 0,2 bis 6 GHz im Anhang A 2.4 zu finden.

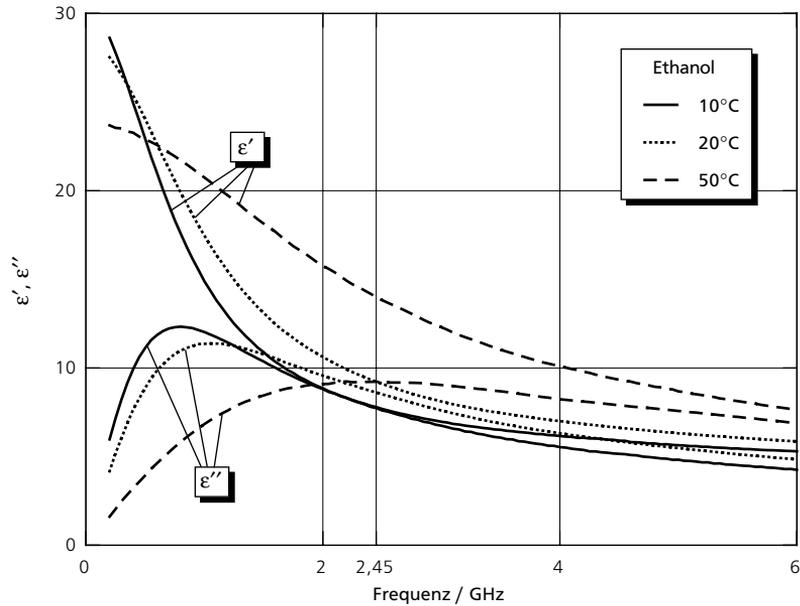


Abb. 3-20: Frequenzabhängigkeit der relativen Dielektrizitätskonstante von Ethanol bei verschiedenen Temperaturen (Mittelwerte mit Linien verbunden, Standardabweichungen haben etwa dreifache Höhe der Linienstärke).

Die Temperaturabhängigkeit der relativen Dielektrizitätskonstante von Dipolen ist also verschieden, je nachdem wo die Arbeitsfrequenz  $f$  im Vergleich zur Relaxationsfrequenz  $f_R$  liegt. Ist die Arbeitsfrequenz kleiner als die Relaxationsfrequenz, sinken die Dielektrizitätskonstante sowie die Verlustzahl mit steigender Temperatur. Dies ist für kleine Frequenzen in Abbildung 3-20 gerade noch zu erkennen. Ist  $f$  deutlich höher als  $f_R$ , ist das Temperaturverhalten genau umgekehrt, und die Dielektrizitätskonstante und die Verlustzahl steigen mit steigender Temperatur. Erst im Bereich sehr hoher Frequenzen, d. h. nahe der optischen Dielektrizitätskonstante, ändert sich dies wieder. Je höher die Temperatur ist, desto niedriger ist die optische Dielektrizitätskonstante (s. BUCKLEY und MARYOTT, 1958), da sich die Moleküle mit steigender Temperatur schneller bewegen und deshalb weniger Energie speichern können.

Liegen Arbeits- und Relaxationsfrequenz nahe beieinander, kann das Temperaturverhalten unterschiedlich sein. So ist im in Abbildung 3-20 gezeigten Beispiel die Dielektrizitätskonstante bei einer Frequenz von ungefähr 0,8 GHz bei 20 °C höher als die Werte für 10 und 50 °C. Dies wird ebenfalls für die Verlustzahl im Bereich um 1,5 GHz beobachtet.

### Wasser und wäßrige Salzlösungen

Wassermoleküle sind ebenfalls permanente Dipole und zeigen damit prinzipiell das gleiche Verhalten wie Alkoholmoleküle. Das Wassermolekül ist aber sehr klein, und die Relaxationsfrequenz ist aus diesem Grund viel höher als bei Alkoholen. Bei 20 °C beträgt  $f_R$  etwa 20 GHz (s. HASTED, 1973), d. h. die Frequenz von 2,45 GHz ist weit vom Bereich der maximalen Dispersion entfernt. Deshalb sinkt die Dielektrizitätskonstante und steigt die Verlustzahl mit steigender Frequenz.

Liegt kein reines Wasser mehr vor, sondern sind Ionen im Wasser gelöst, kommt zur Dipolrelaxation die Ionenleitfähigkeit als weiterer Absorptionsmechanismus hinzu. Für Wasser mit verschiedenem Ionengehalt, d. h. mit unterschiedlicher Leitfähigkeit, sind die gemessenen Dielektrizitätskonstanten und Verlustzahlen in den Abbildungen 3-21 und 3-22 aufgetragen. Der Ioneneinfluß ist hier bei den niedrigen Ionenanteilen nur für die Verlustzahl von Leitungswasser im Bereich kleiner Frequenzen zu sehen. Bei höheren Frequenzen ist der Einfluß vernachlässigbar, und die Dipolrelaxation ist der entscheidende Verlustmechanismus.

Wird die Ionenkonzentration erhöht, ändert sich die Frequenz- und Temperaturabhängigkeit. Dies ist bereits ab einer Salzkonzentration von 1 Gew.% zu erkennen (s. Abbildungen 3-23 und 3-24). Im gezeigten Frequenzbereich sinken Dielektrizitätskonstante und Verlustzahl mit steigender Frequenz, da die Ionen den schnelleren Wechsell des elektromagnetischen Feldes nicht mehr so gut folgen können. Erst im Bereich höherer Frequenzen um 10 GHz überwiegt der Einfluß der Dipolrelaxation, und die Verlustzahl steigt wieder an (vgl. ROEBUCK u. a., 1972, DECAREAU, 1985). So durchläuft die Verlustzahl je nach Konzentration in Abhängigkeit von der Temperatur ein Minimum bei 2,45 GHz (s. GR NEBERG, 1994).

Bestimmung  
der relativen  
Dielektrizitätskonstante

Abb. 3-21: Frequenzabhängigkeit der Dielektrizitätskonstante von Wasser mit unterschiedlicher elektrischer Leitfähigkeit bei 20 °C (Mittelwerte mit Linien verbunden, Standardabweichungen haben etwa dreifache Höhe der Linienstärke).

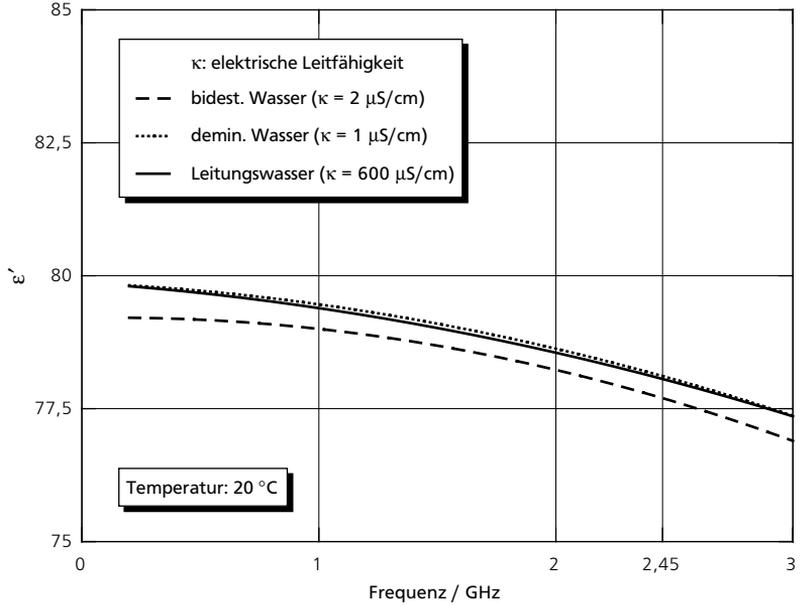
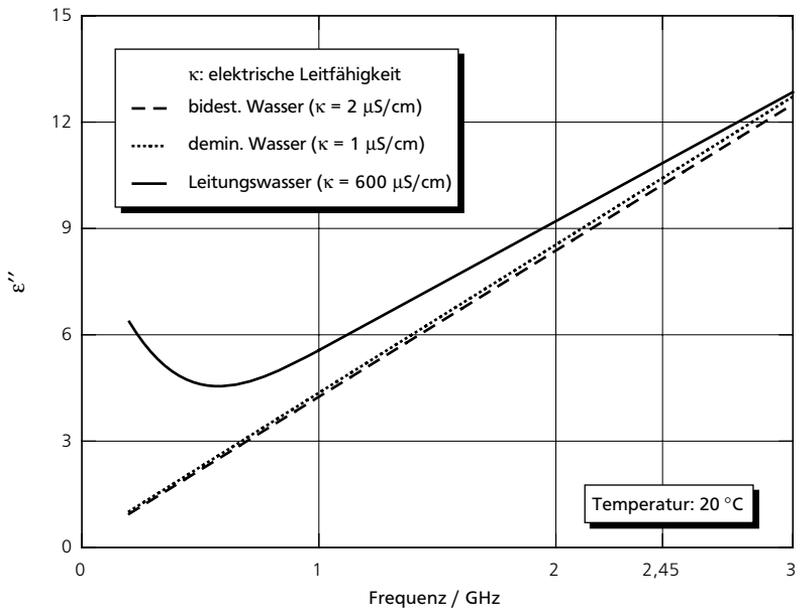


Abb. 3-22: Frequenzabhängigkeit der Verlustzahl von Wasser mit unterschiedlicher elektrischer Leitfähigkeit bei 20 °C (Mittelwerte mit Linien verbunden, Standardabweichungen haben etwa dreifache Höhe der Linienstärke).



Wie in den Abbildungen 3-23 und 3-24 zu sehen ist, nimmt die Dielektrizitätskonstante bei konstanter Temperatur und konstanter Frequenz von 2,45 GHz mit zunehmender Konzentration ab. Wassermoleküle sind als Hydrathüllen an die Ionen gebunden und liefern nur noch einen geringen Beitrag zum Speichervermögen (s. HASTED u. a., 1948). Bei kleineren Frequenzen ist dieses Verhalten um-

gekehrt. Hier überwiegt der Ioneneinfluß. Die Verlustzahl dagegen ist für höhere Konzentrationen bei konstanter Temperatur größer, da insgesamt bei höheren Konzentrationen mehr Ionen für die Ionenleitfähigkeit vorhanden sind.

In den Abbildungen 3-23 und 3-24 ist ebenfalls zu erkennen, daß mit der Methode der offenen Koaxialleitung entgegen der Angabe von HEWLETT PACKARD (1993a) auch Werte der Dielektrizitätskonstante  $\epsilon' > 100$  ermittelt werden.

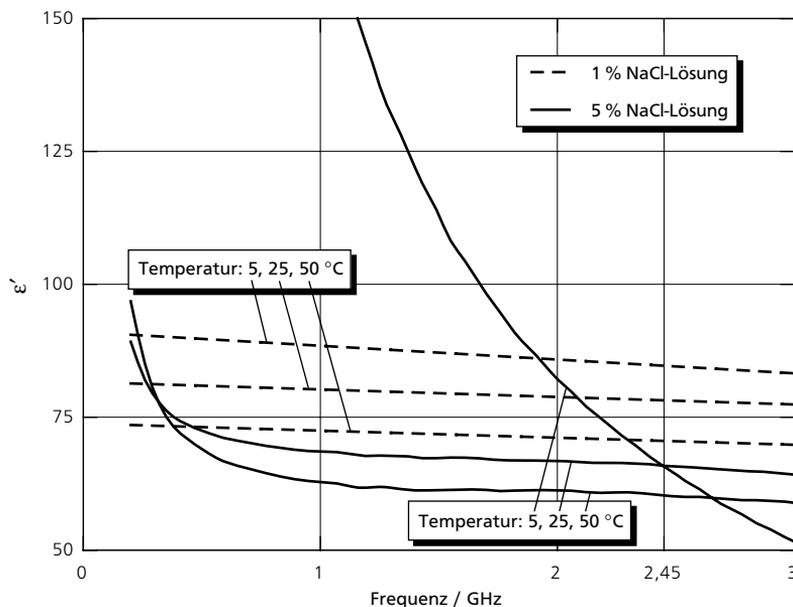


Abb. 3-23: Frequenzabhängigkeit der Dielektrizitätskonstante von Kochsalzlösungen unterschiedlicher Konzentration (Mittelwerte mit Linien verbunden, Standardabweichungen haben etwa dreifache Höhe der Linienstärke).

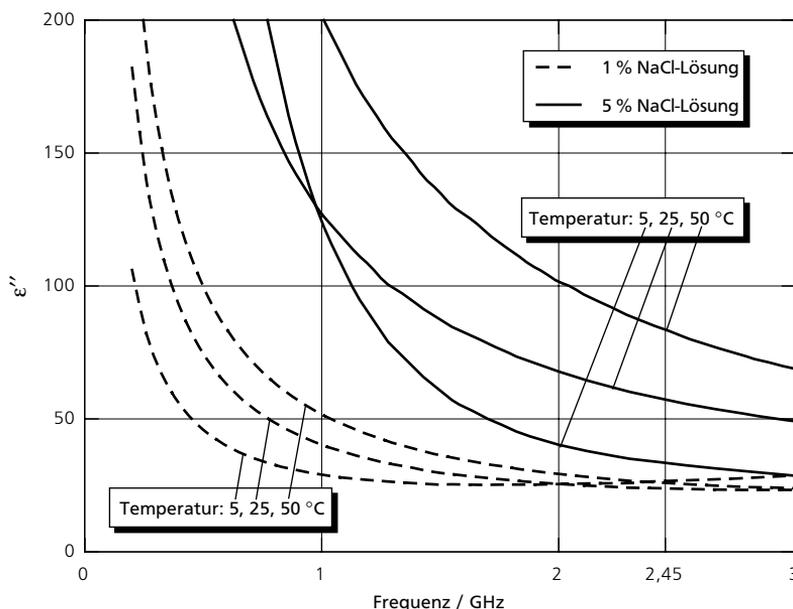


Abb. 3-24: Frequenzabhängigkeit der Verlustzahl von Kochsalzlösungen unterschiedlicher Konzentration (Mittelwerte mit Linien verbunden, Standardabweichungen haben etwa dreifache Höhe der Linienstärke).

Mischungen permanenter Dipole

Neben reinen Dipolen und Ionenlösungen sind auch die Mischungen verschiedener Dipole interessant. Hier existieren Untersuchungen einer Autorengruppe zur Frequenzabhängigkeit von Alkohol-Wasser-Gemischen bei Raumtemperatur (s. MASHIMO u. a., 1989 und 1991). Werden Alkohol-Wasser-Mischungen verschiedener Konzentration betrachtet, erkennt man, daß sich diese Gemische prinzipiell wie reine Dipole verhalten (Voraussetzung: keine Mischungslücke im gesamten Konzentrationsbereich). In den Abbildungen 3-25 und 3-26 sind die Ergebnisse eigener Messungen für die Frequenzabhängigkeit der Dielektrizitätskonstante  $\epsilon'$  und Verlustzahl  $\epsilon''$  bei 25 °C für Ethanol-Wasser-Gemische dargestellt. Mit zunehmendem Ethanolanteil in der Mischung sinkt die Relaxationsfrequenz  $f_R$  von der des reinen Wassers auf die des reinen Ethanols. Die Dielektrizitätskonstante zeigt im untersuchten Frequenzbereich von 0,2 bis 6 GHz das gleiche Verhalten. Im Frequenzbereich unterhalb der Relaxationsfrequenz von Ethanol steigt die Verlustzahl mit steigendem Ethanolanteil; im Bereich der Relaxationsfrequenz von Wasser ist dies genau umgekehrt. Hier sinkt die Verlustzahl mit steigendem Ethanolgehalt in der Mischung (s. MASHIMO u. a., 1991). Im Bereich zwischen den Relaxationsfrequenzen des reinen Ethanols und des reinen Wassers ist keine einheitliche Abhängigkeit der Verlustzahl von der Konzentration festzustellen. Je nach Arbeitsfrequenz ist diese Abhängigkeit völlig unterschiedlich (s. Abbildung 3-26).

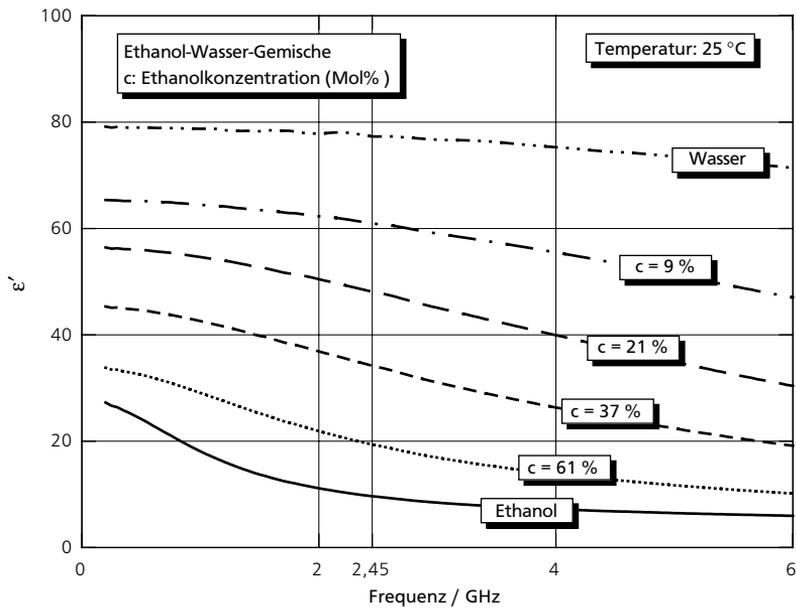


Abb. 3-25: Frequenzabhängigkeit der Dielektrizitätskonstante von Ethanol-Wasser-Gemischen bei 25 °C (Mittelwerte mit Linien verbunden, Standardabweichungen haben etwa dreifache Höhe der Linienstärke).

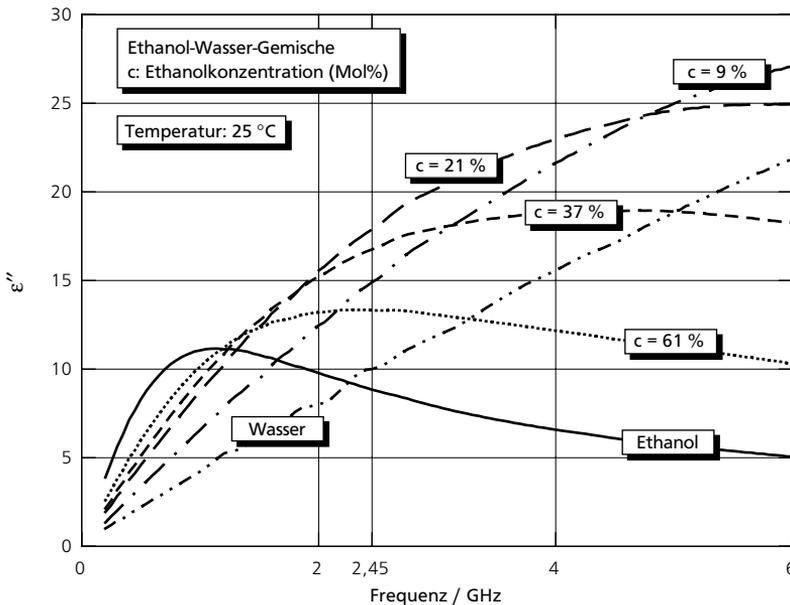


Abb. 3-26: Frequenzabhängigkeit der Verlustzahl von Ethanol-Wasser-Gemischen bei 25 °C (Mittelwerte mit Linien verbunden, Standardabweichungen haben etwa dreifache Höhe der Linienstärke).

Interessant für die Mikrowellenerwärmung ist das Verhalten der Gemische bei 2,45 GHz. In den Abbildungen 3-27 und 3-28 wird der Zusammenhang zwischen der Dielektrizitätskonstante und der Verlustzahl der Ethanol-Wasser-Mischungen in Abhängigkeit von der molaren Ethanolkonzentration für verschiedene Temperaturen bei 2,45 GHz gezeigt. Da sich mit der Temperatur jeweils die Relaxationsfrequenz  $f_R$  einer Mischung bestimmter Konzentration ändert, ergeben sich keine einheitlichen Verläufe der Dielektrizitätskonstante und der Verlustzahl für die verschiedenen Temperaturen. Die Dielektrizitätskonstante sinkt erwartungsgemäß mit sinkendem Wasseranteil. Bei 0 °C ist die Abnahme bei hohen Wasseranteilen am stärksten, dagegen bei hohen Ethanolkonzentrationen sehr gering. Bei höheren Temperaturen nimmt die Dielektrizitätskonstante fast linear über den gesamten Konzentrationsbereich ab. Die Arbeitsfrequenz von 2,45 GHz ist bei 70 °C kleiner als die Relaxationsfrequenz  $f_R$  sämtlicher Mischungen, deshalb steigt die Verlustzahl stetig von der des reinen Wassers auf die des reinen Ethanols an. Für 0 und 35 °C liegt die Arbeitsfrequenz zwischen der Relaxationsfrequenz des Ethanols und der des Wassers, und die Verlustzahl durchläuft bei einer bestimmten Konzentration ein Maximum. Wird eine andere Arbeitsfrequenz als die Mikrowellenfrequenz von 2,45 GHz gewählt, die aber weiterhin zwischen den Relaxationsfrequenzen der beiden reinen Stoffe liegt, tritt das Maximum der Verlustzahl bei einer anderen Konzentration auf. Ein entsprechendes Verhalten ist auch für Methanol-Wasser- und Isopropanol-Wasser-Gemische zu beobachten. Die relativen Dielektrizitätskonstanten dieser Mischungen sind im Anhang A 2.4 zusammengestellt. Diese Effekte wurden auch von MUDGETT u. a. (1974) beobachtet, die Untersuchungen bei 3 GHz und 25 °C durchführten.

Bestimmung  
der relativen  
Dielektrizitätskonstante

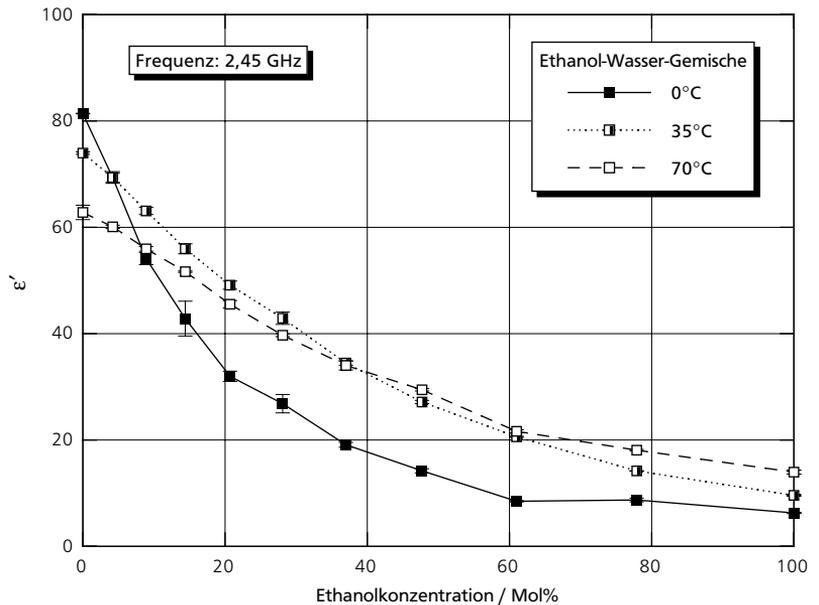


Abb. 3-27: Dielektrizitätskonstante von Ethanol-Wasser-Gemischen bei 2,45 GHz und verschiedenen Temperaturen (Mittelwerte mit Standardabweichungen).

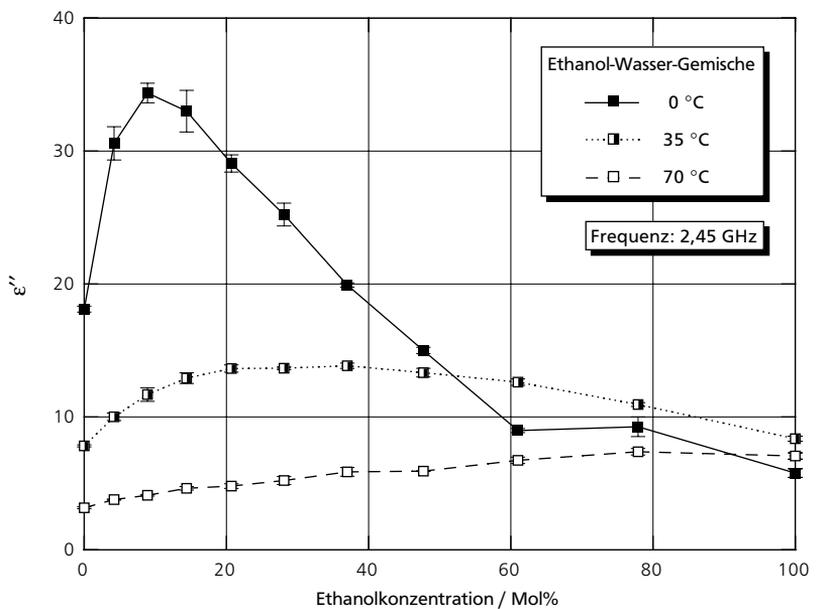


Abb. 3-28: Verlustzahl von Ethanol-Wasser-Gemischen bei 2,45 GHz und verschiedenen Temperaturen (Mittelwerte mit Standardabweichungen).

In weiteren Experimenten wurden Mischungen aus Ethanol und Isopropanol untersucht, da die Relaxationsfrequenzen beider Stoffe im Bereich von 2,45 GHz liegen. Zu solchen Gemischen waren in der Literatur keine Angaben zu finden. Auch bei diesen Gemischen ist der typische Verlauf beider Anteile der relativen Dielektrizitätskonstante in Abhängigkeit von der Frequenz von Dipolen zu er-

kennen (vgl. Abbildungen 3-29 und 3-30). Auffällig ist jedoch, daß z. B. bei 50 °C die Relaxationsfrequenzen der beiden Mischungen mit 75 bzw. 16 Mol% Isopropanolanteil etwa gleich der des reinen Ethanols sind, und die Werte der Dielektrizitätskonstante und Verlustzahl der Mischung mit 16 Mol% Isopropanol deutlich über denen der übrigen Mischungen und der reinen Alkohole liegen. Bei 10 und 20 °C wurden ähnliche Ergebnisse erhalten.

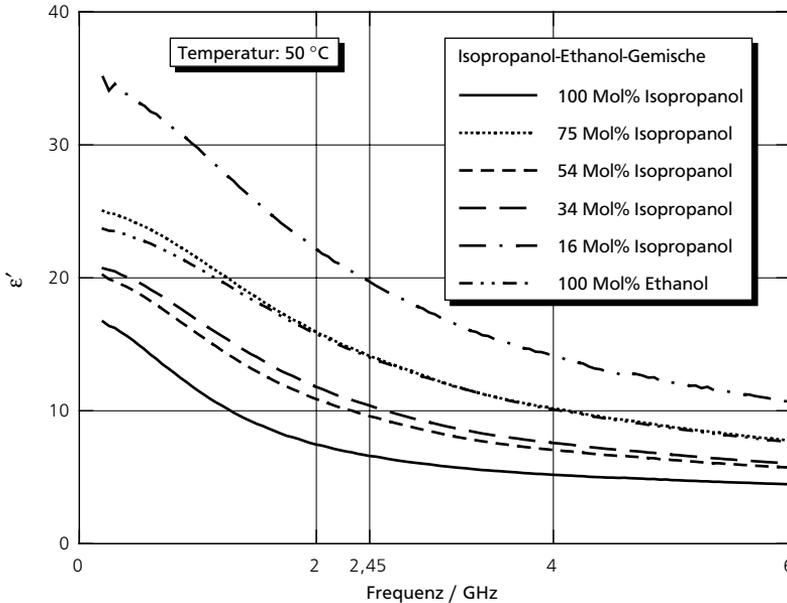


Abb. 3-29: Frequenzabhängigkeit der Dielektrizitätskonstante von Isopropanol-Ethanol-Gemischen bei 50 °C (Mittelwerte mit Linien verbunden, Standardabweichungen haben etwa dreifache Höhe der Linienstärke).

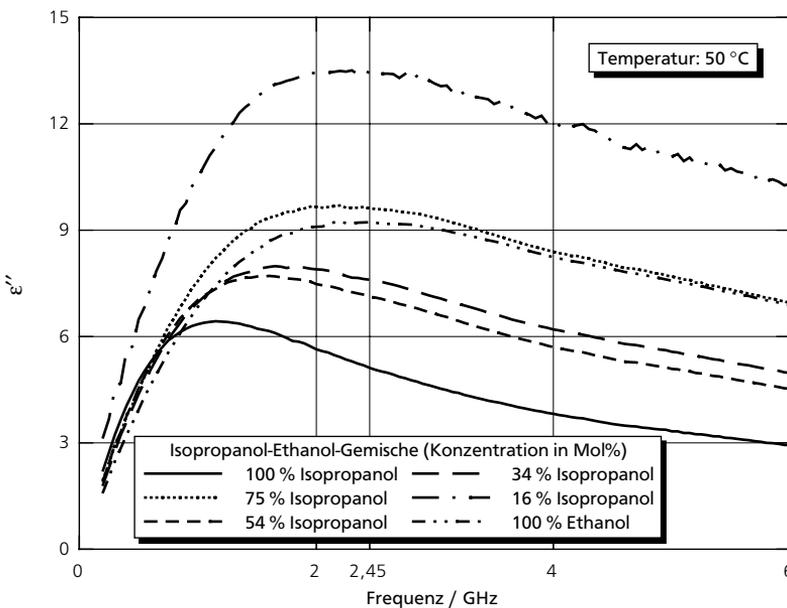


Abb. 3-30: Frequenzabhängigkeit der Verlustzahl von Isopropanol-Ethanol-Gemischen bei 50 °C (Mittelwerte mit Linien verbunden, Standardabweichungen haben etwa dreifache Höhe der Linienstärke).

Bestimmung  
der relativen  
Dielektrizitätskonstante

Bei 2,45 GHz ergeben sich die in den Abbildungen 3-31 und 3-32 aufgetragenen Zusammenhänge. Je nach Temperatur werden ein oder zwei Maxima für bestimmte Konzentrationen durchlaufen.

Abb. 3-31: Dielektrizitätskonstante von Isopropanol-Ethanol-Gemischen bei 2,45 GHz und verschiedenen Temperaturen (Mittelwerte mit Standardabweichungen).

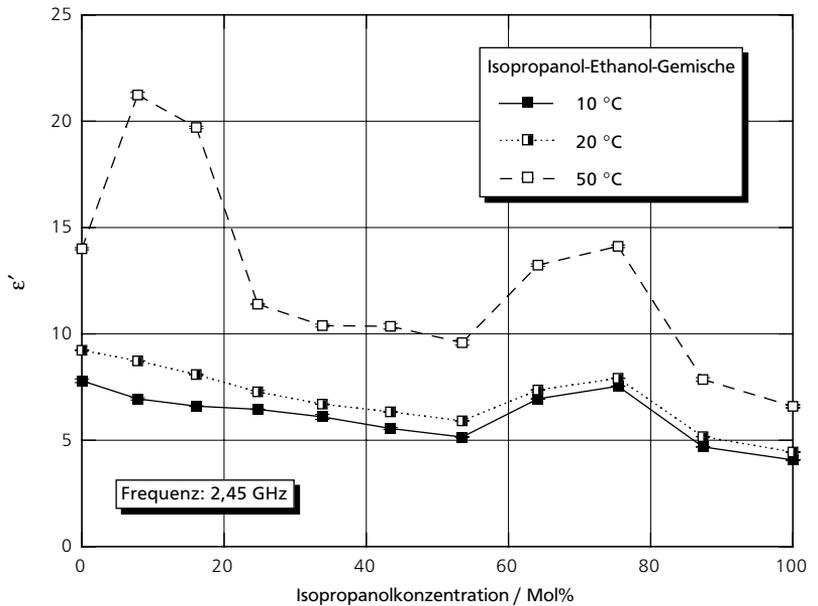
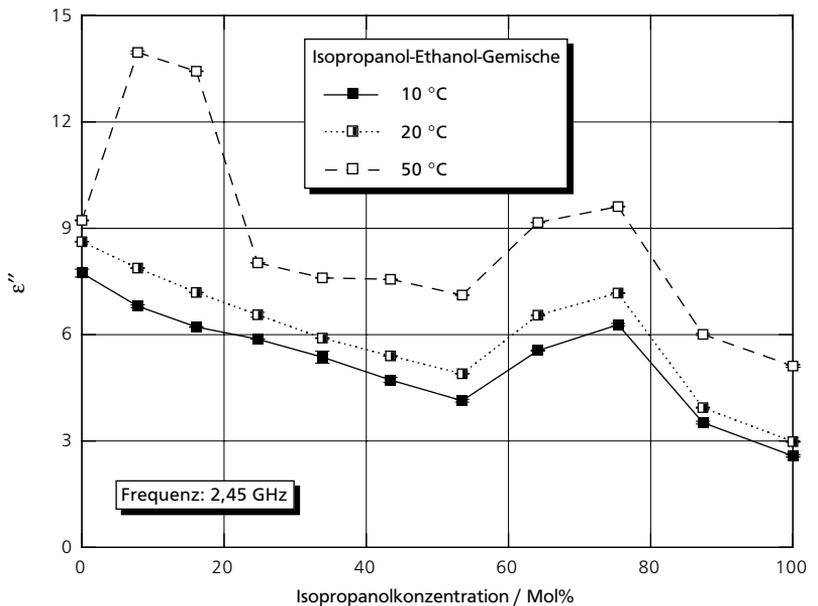


Abb. 3-32: Verlustzahl von Isopropanol-Ethanol-Gemischen bei 2,45 GHz und verschiedenen Temperaturen (Mittelwerte mit Standardabweichungen).



Bei Mischungen, so auch bei den hier beispielhaft ausgewählten binären Mischungen permanenter Dipole, ändern sich die thermodynamischen Eigenschaften (z. B. die Entropie), das Volumen, der Brechungsindex und auch die dielektri-

schen Eigenschaften, wie an den Meßwerten zu erkennen ist, nicht zwangsweise linear zwischen den Werten der reinen Stoffe. Diese Abweichungen beruhen auf dem Realverhalten der Mischung. Üblicherweise werden in der Thermodynamik diese Abweichungen vom Idealverhalten durch die Angabe von Exzeßgrößen beschrieben.

Die Exzeß-Dielektrizitätskonstante  $\Delta\epsilon'$  und Exzeß-Verlustzahl  $\Delta\epsilon''$  einer binären Mischung lassen sich nach SUBRAMANIAN u. a. (1993) wie folgt aus Real- und Imaginärteil der relativen Dielektrizitätskonstante  $\epsilon_m$  der Mischung sowie der relativen Dielektrizitätskonstanten  $\epsilon_1$  und  $\epsilon_2$  der beiden reinen Komponenten bestimmen:

$$\Delta\epsilon' = \epsilon'_m - (\bar{c}_1 \cdot \epsilon'_1 + (1 - \bar{c}_1) \cdot \epsilon'_2) \quad (3-10)$$

$$\Delta\epsilon'' = \epsilon''_m - (\bar{c}_1 \cdot \epsilon''_1 + (1 - \bar{c}_1) \cdot \epsilon''_2) \quad (3-11)$$

Dabei ist  $\bar{c}_1$  der Molenbruch von Komponente 1.

Für die Ethanol-Isopropanol-Gemische wurden nach den Gleichungen 3-10 und 3-11 die Exzeß-Dielektrizitätskonstante und die Exzeß-Verlustzahl bei 2,45 GHz aus den Meßwerten berechnet. Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 3-33 und 3-34 dargestellt. Beide Teile der relativen Exzeß-Dielektrizitätskonstante zeigen einen ähnlichen Verlauf. Bis zu einem Wert von etwa 55 Mol% Isopropanol sind diese Größen für 10 und 20 °C negativ, während bei 50 °C zwischen 0 und 25 Mol% Isopropanol ein ausgeprägtes, positives Maximum durchlaufen wird. Im Bereich oberhalb 55 Mol% Isopropanol wird für alle drei Kurven ein Maximum im positiven Bereich erreicht.

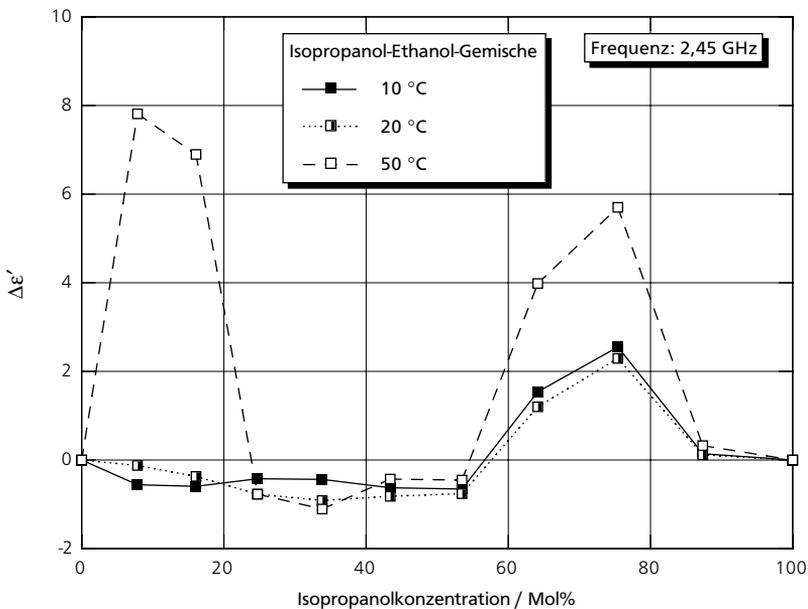


Abb. 3-33: Exzeß-Dielektrizitätskonstante von Isopropanol-Ethanol-Gemischen bei 2,45 GHz und verschiedenen Temperaturen (berechnet mit Gleichung 3-10).

Bestimmung  
der relativen  
Dielektrizitätskonstante

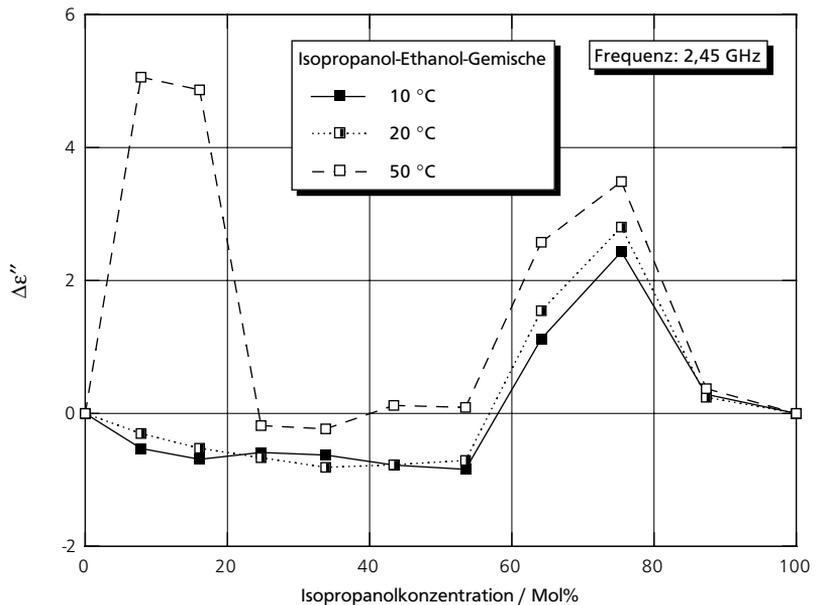


Abb. 3-34: Exzeß-Verlustzahl von Isopropanol-Ethanol-Gemischen bei 2,45 GHz und verschiedenen Temperaturen (berechnet mit Gleichung 3-11).

Die relative Exzeß-Dielektrizitätskonstante wird von den Molekülbewegungen aufgrund der Wechselwirkungen, die wiederum neben der Temperatur durch das angelegte elektromagnetische Feld beeinflusst werden, bestimmt. SUBRAMANIAN u. a. (1993) sehen die Exzeß-Verlustzahl deshalb als einen Parameter, der die Entropieänderungen in einem binären System widerspiegelt.

### Wäßrige Zuckerlösungen

Es wurden die relativen Dielektrizitätskonstanten von wäßrigen Saccharose-, Fruktose- und Glukoselösungen für Zuckerkonzentrationen bis 60 Gew.% (entspricht 7,3 Mol% bei Saccharose- und 13 Mol% bei Fruktose- und Glukoselösungen) und Temperaturen zwischen -10 und 90 °C bestimmt. Die dielektrischen Eigenschaften dieser Lösungen zeigen prinzipiell das gleiche Verhalten wie die von Wasser, d. h. auch hier ist der vorherrschende Absorptionsmechanismus die Dipolrelaxation (vgl. Abbildung 3-35). Je höher der Zuckeranteil ist, desto niedriger sind die Werte der Dielektrizitätskonstante, da die Zahl der Wassermoleküle, die im Vergleich mit den ebenfalls polaren, aber weniger beweglichen OH-Gruppen der Zuckermoleküle den Hauptbeitrag liefern, abnimmt.

Mit zunehmendem Zuckeranteil in der Lösung verschiebt sich zudem die Relaxationsfrequenz dieser Lösung zu niedrigeren Frequenzen als der Relaxationsfrequenz von Wasser. Deshalb sind im hier gezeigten Beispiel (s. Abbildung 3-35) auch die Werte der Verlustzahlen der Saccharoselösungen höher als die Verlustzahlen von Wasser, da die Verlustzahlen der Lösungen schon näher am Wert ihres Maximums bei der Relaxationsfrequenz sind.

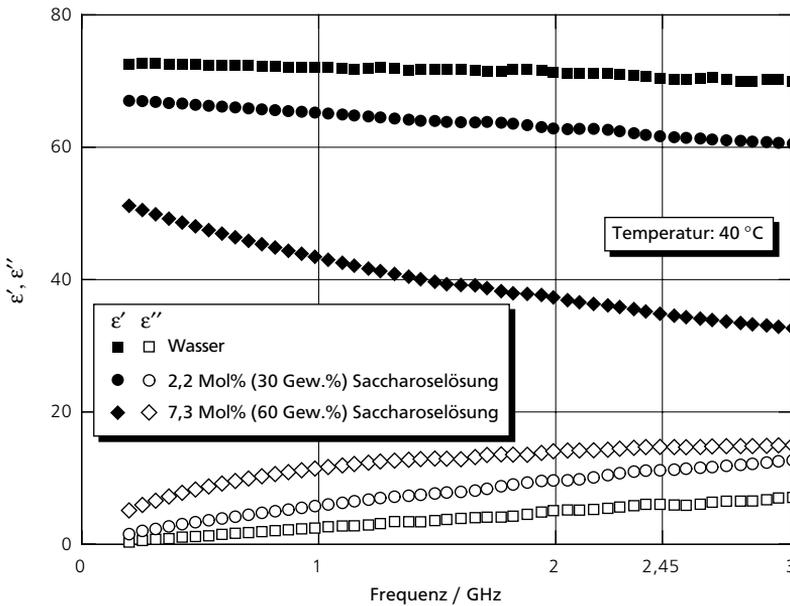


Abb. 3-35: Frequenzabhängigkeit der relativen Dielektrizitätskonstante von Wasser und wäßrigen Saccharoselösungen bei 40 °C (Mittelwerte, Standardabweichungen sind kleiner als Symbole).

Wird die Temperatur einer Lösung bestimmter Konzentration erhöht, verschiebt sich die Relaxationsfrequenz dieser Mischung erwartungsgemäß zu höheren Frequenzen, wie anhand der Meßergebnisse in den Abbildungen 3-36 und 3-37 zu sehen ist.

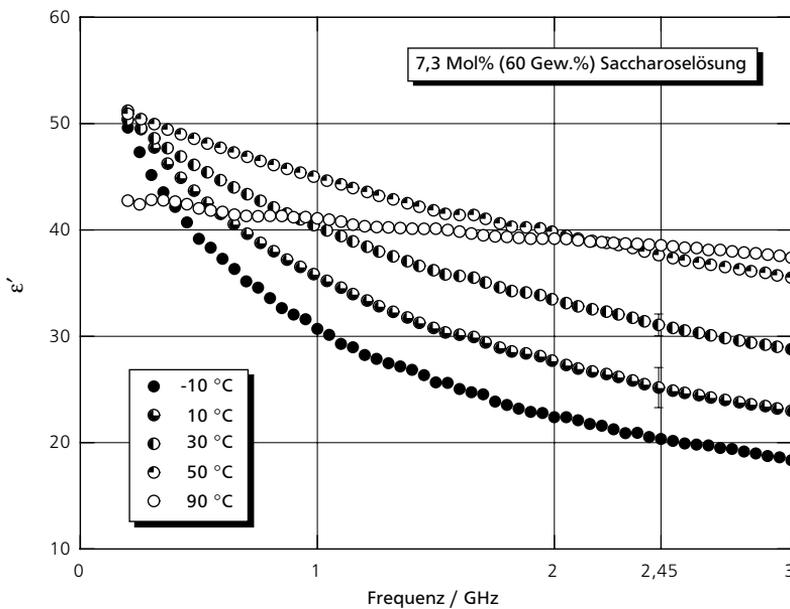


Abb. 3-36: Frequenzabhängigkeit der Dielektrizitätskonstante von wäßriger Saccharoselösung (7,3 Mol%) bei verschiedenen Temperaturen (Mittelwerte, Standardabweichungen beispielhaft für 2,45 GHz).

Bestimmung  
der relativen  
Dielektrizitätskonstante

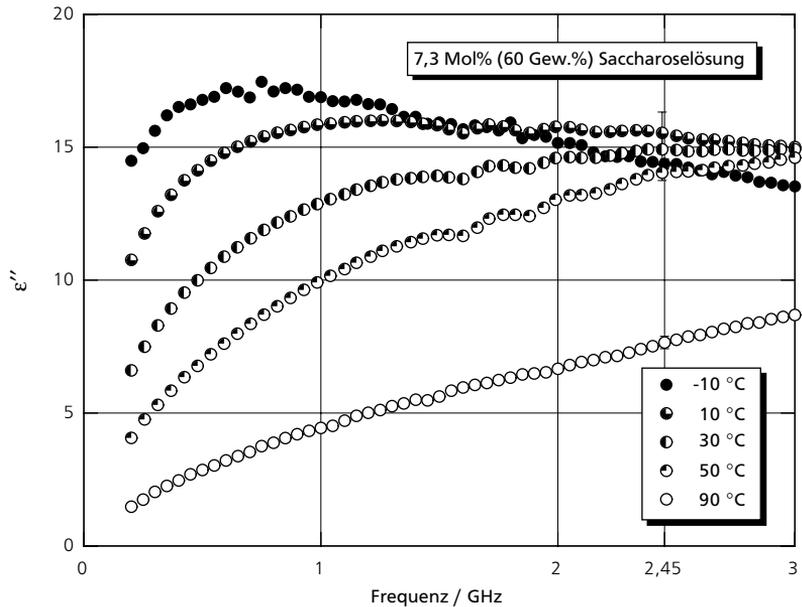


Abb. 3-37: Frequenzabhängigkeit der Verlustzahl von wässriger Saccharoselösung (7,3 Mol%) bei verschiedenen Temperaturen (Mittelwerte, Standardabweichungen beispielhaft für 2,45 GHz).

Bei 2,45 GHz ist deshalb auch für die verschiedenen Konzentrationen keine einheitliche Temperaturabhängigkeit zu beobachten, da sich die Relaxationsfrequenz mit der Temperatur ändert. Entscheidend ist hier wieder, wo die Meßfrequenz im Vergleich zur Relaxationsfrequenz liegt (s. Abbildungen 3-38 und 3-39).

Für eine Lösung mit einem Saccharoseanteil von 7,3 Mol% wurden auch vergleichende Messungen mit dem  $E_{012}$ -Resonator durchgeführt. Die Werte liegen etwas unter denen, die mit der offenen Koaxialleitung bestimmt wurden. Für die Dielektrizitätskonstante erklärt sich dies aus der Tatsache, daß mit dem  $E_{012}$ -Resonator nicht bei 2,45 GHz, sondern bei etwa 2,9 GHz gemessen wird, und die Dielektrizitätskonstante in diesem Bereich mit steigender Frequenz sinkt. Dies gilt allerdings für die Verlustzahl nicht für alle Temperaturen. Die Verlustzahl nimmt für Temperaturen ab etwa 50 °C mit steigender Frequenz zu. Für diesen Bereich sollten dann die Meßwerte mit dem  $E_{012}$ -Resonator eigentlich über denen der offenen Koaxialleitung liegen. Daß dies nicht der Fall ist, läßt sich auf Fehler bei der Kalibrierung des  $E_{012}$ -Resonators zurückführen. Bei der Bestimmung der Verlustzahl wird die zuvor ebenfalls per Kalibrierung ermittelte Dielektrizitätskonstante benötigt. Ungenauigkeiten bei der Kalibrierung der Dielektrizitätskonstante wirken sich damit auch auf die Verlustzahl aus. Im hier betrachteten Bereich der relativen Dielektrizitätskonstante bedeutet dies, daß bei einem um etwa 10 % zu niedrig bestimmten Wert der Dielektrizitätskonstante allein dadurch auch für die Verlustzahl ein ebenfalls um etwa 10 % zu niedriger Wert ermittelt wird. Dazu kommen bei der Verlustzahl dann noch zusätzlich die Fehler bei der Kalibrierung selbst.

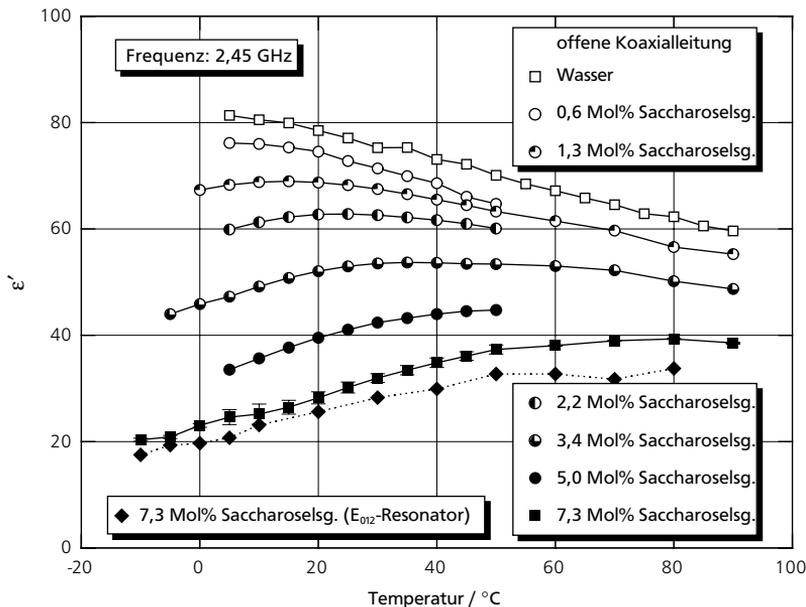


Abb. 3-38: Temperaturabhängigkeit der Dielektrizitätskonstante von Wasser und wässrigen Saccharoselösungen bei 2,45 GHz (Mittelwerte teilweise mit Standardabweichungen).

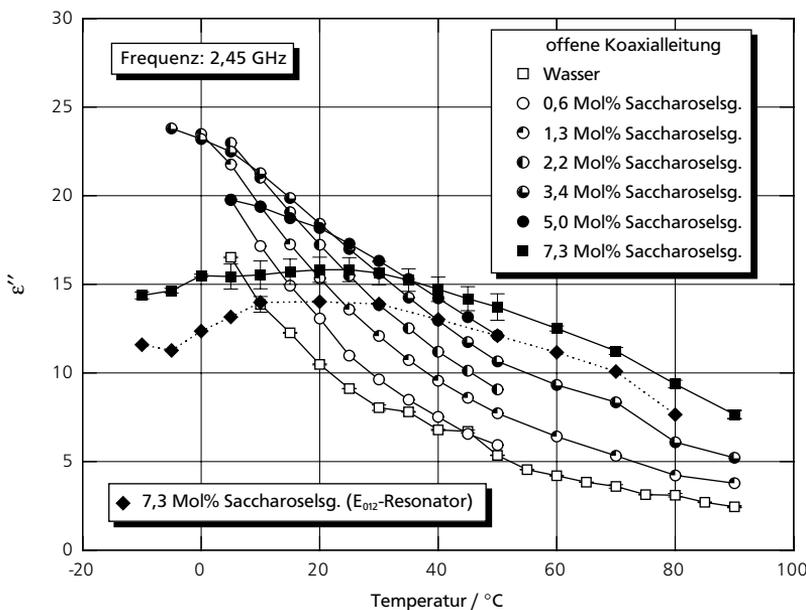


Abb. 3-39: Temperaturabhängigkeit der Verlustzahl von Wasser und wässrigen Saccharoselösungen bei 2,45 GHz (Mittelwerte teilweise mit Standardabweichungen).

Ähnlich wie bei den Alkohol-Wasser-Mischungen tritt auch bei den Zuckerlösungen für die Dielektrizitätskonstante und Verlustzahl je nach Temperatur ein Maximalwert bei einer bestimmten Konzentration auf. Bei 20 °C wird für die Dielektrizitätskonstante kein, jedoch für die Verlustzahl ein Maximum bei einer Saccharosekonzentration von etwa 3,5 Mol% beobachtet (s. Abbildung 3-40).

Bestimmung  
der relativen  
Dielektrizitätskonstante

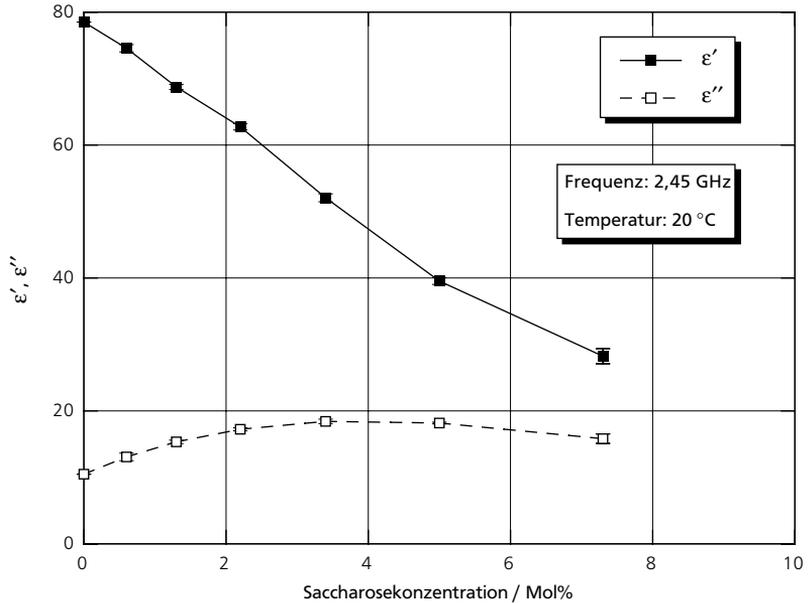


Abb. 3-40: Relative Dielektrizitätskonstante von wäßrigen Saccharoselösungen bei 20 °C und 2,45 GHz (Mittelwerte mit Standardabweichungen).

In diesem Abschnitt wurden die Ergebnisse beispielhaft für Saccharoselösungen gezeigt. Die Ergebnisse für Glukose- und Fruktoselösungen sind im Anhang A 2.4 zu finden. Auf einen Vergleich wurde an dieser Stelle verzichtet, da die relativen Dielektrizitätskonstanten für diese drei verschiedenen Zucker bei gleichen Konzentrationen, wenn jeweils die Konzentrationen an Monosacchariden verglichen werden, fast gleich sind.

### Emulsionen

Emulsionen sind disperse Systeme aus nicht oder nur sehr wenig ineinander löslichen Flüssigkeiten. In dieser Arbeit wurden sowohl Öl-in-Wasser- als auch Wasser-in-Öl-Emulsionen (O/W- bzw. W/O-Emulsionen) untersucht, die jeweils durch Zugabe von Emulgator stabilisiert wurden (nähere Angaben dazu sind in Anhang A 2.5 zu finden). Ölige Phasen waren Pflanzen- und Paraffinöl. Pflanzenöl erwärmt sich recht gut im Mikrowellenfeld aufgrund polarer Molekülbereiche; Paraffinöl (ein reiner Kohlenwasserstoff) erwärmt sich nicht. Die Tropfengröße der dispersen Phase hat im für Emulsionen typischen Bereich bis etwa 100 µm keinen Einfluß auf die relative Dielektrizitätskonstante der Emulsion (GR NEBERG, 1994).

In den Abbildungen 3-41 und 3-42 ist für 2,45 GHz der Einfluß der Temperatur auf die dielektrischen Eigenschaften von O/W-Emulsionen in Abhängigkeit vom Ölanteil aufgetragen. Für die dispersen Systeme, wie beispielsweise Emulsionen, wird der Volumenanteil als Konzentrationsmaß verwendet. Mit steigendem Ölanteil sinken die Dielektrizitätskonstante und die Verlustzahl von der des rei-

nen Wassers auf die des Öls, da immer weniger Wassermoleküle in der Mischung vorliegen. Auch hier, wie bei den bereits in den vorangegangenen Abschnitten vorgestellten Ergebnissen, existiert kein linearer Zusammenhang. Die höchsten Werte der Dielektrizitätskonstante und Verlustzahl werden bei 20 °C erreicht.

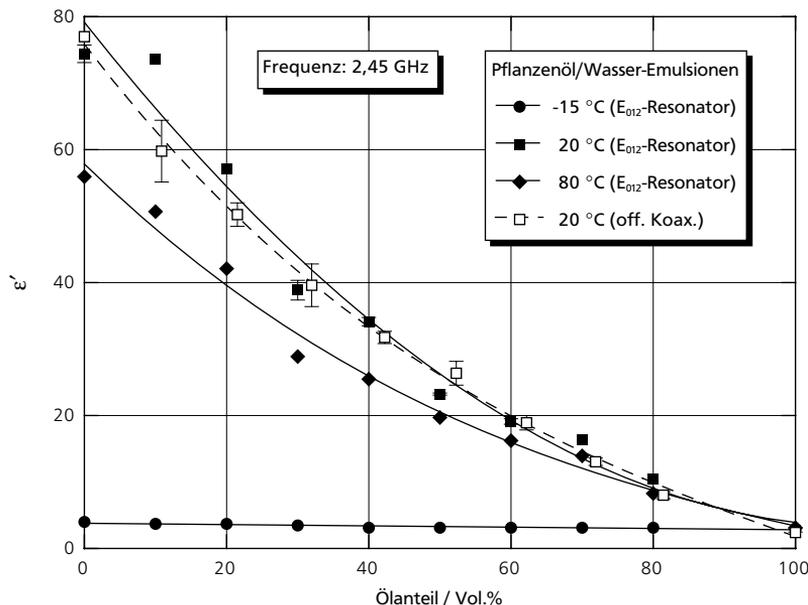


Abb. 3-41: Dielektrizitätskonstante von Pflanzenöl-in-Wasser-Emulsionen bei 2,45 GHz und verschiedenen Temperaturen (Mittelwerte mit Standardabweichungen).

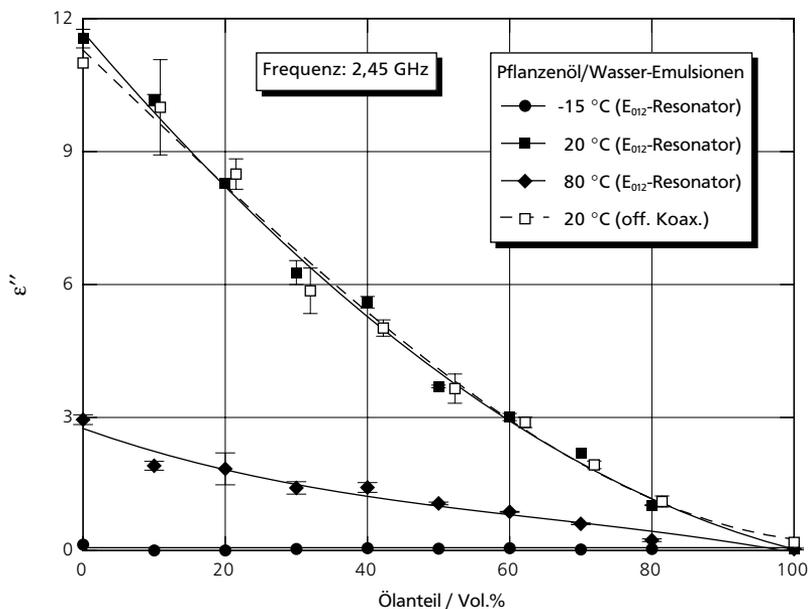


Abb. 3-42: Verlustzahl von Pflanzenöl-in-Wasser-Emulsionen bei 2,45 GHz und verschiedenen Temperaturen (Mittelwerte mit Standardabweichungen).

Mit steigender Temperatur sind die Werte niedriger, da die Moleküle sich dann schneller bewegen (*Brownsche* Molekularbewegung) und weniger Energie speichern. Die Werte für  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  sind so niedrig, da hier die Gefrieretemperatur des Wassers bereits unterschritten wurde. Am Gefrierpunkt ändert sich die relative Dielektrizitätskonstante von Wasser schlagartig auf den sehr kleinen Wert von Eis. Die Erklärung ist hier, daß Wassermoleküle im Eis den Wechseln des elektromagnetischen Feldes nur wenig folgen können. Bei  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  trägt hauptsächlich das Öl der Emulsion zur relativen Dielektrizitätskonstante bei.

Wird anstelle von Wasser eine 1Gew.%ige Kochsalzlösung als kontinuierliche Phase eingesetzt, so ist die Dielektrizitätskonstante nur wenig niedriger als die einer Emulsion mit Wasser als äußerer Phase. Der Verlustanteil ist aufgrund des zusätzlichen Verlustmechanismus der Ionenleitfähigkeit allerdings unabhängig vom Ölanteil ungefähr doppelt so groß (vgl. Abbildung 3-43). Wird anstelle von Pflanzenöl Paraffinöl als disperse Phase eingesetzt, so ist im Rahmen der z. T. recht hohen Standardabweichungen kein Einfluß auf die dielektrischen Eigenschaften festzustellen. Eine Ursache für die hohen Standardabweichungen ist, daß die Emulsionen teilweise während der Messungen aufrauhnten und deshalb die Meßwerte eigentlich einer höheren Ölkonzentration entsprechen.

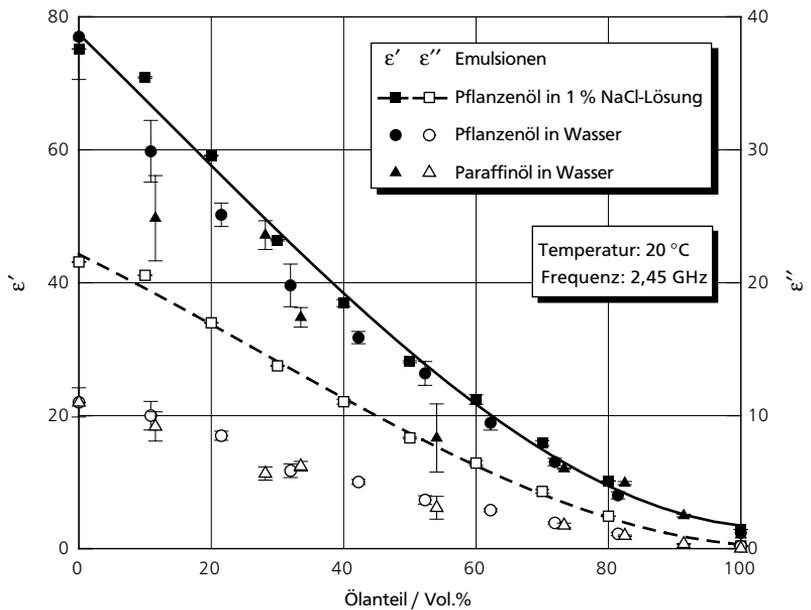


Abb. 3-43: Relative Dielektrizitätskonstante verschiedener O/W-Emulsionen bei  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  und  $2,45\text{ GHz}$  (Mittelwerte mit Standardabweichungen).

Ist Wasser die innere, d. h. die disperse und Pflanzenöl die kontinuierliche Phase, nehmen auch hier beide Teile der relativen Dielektrizitätskonstante mit steigendem Ölanteil ab (s. Abbildungen 3-44 und 3-45). Die Werte für die Wasser-in-Pflanzenöl-Emulsionen sind in beiden Fällen geringer als bei den Pflanzenöl-in-Wasser-Emulsionen. Die kontinuierliche Phase bestimmt demzufolge maßgeblich die relative Dielektrizitätskonstante. Dieses Ergebnis ist nicht auf einen Fehler des Meßsystems der offenen Koaxialleitung zurückzuführen, da bei Messungen mit

dem  $E_{012}$ -Resonator eine gute Übereinstimmung der Werte mit denen der offenen Koaxialleitung erhalten wurde (vgl. Abbildungen 3-44 und 3-45) und zur Kalibrierung des Resonators gerade keine dispersen Stoffsysteme eingesetzt wurden. Die Ergebnisse bestätigen auch Ergebnisse von GR NEBERG (1994), der bei Mikrowellenerwärmungsversuchen feststellte, daß die kontinuierliche Phase einer Emulsion entscheidend für die vom Produkt aufgenommene Leistung ist.

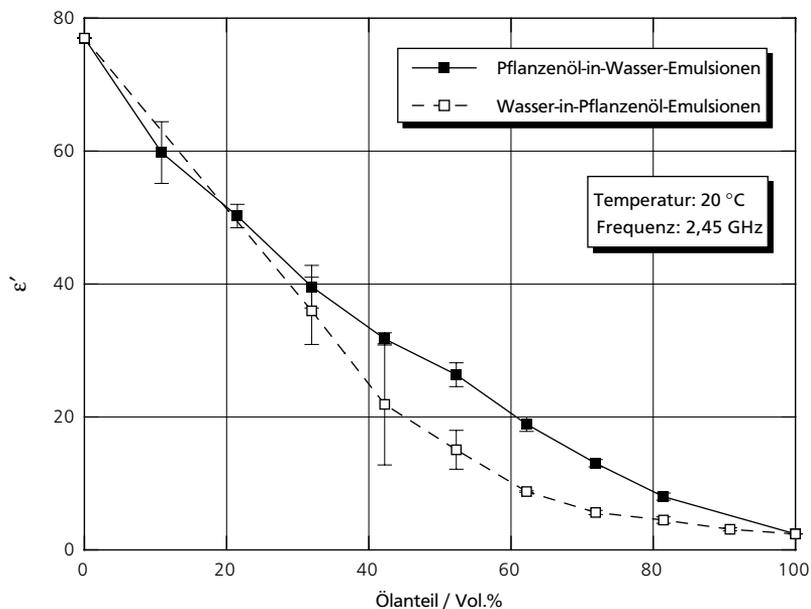


Abb. 3-44: Dielektrizitätskonstante von Emulsionen aus Pflanzenöl und Wasser bei 20 °C und 2,45 GHz (Mittelwerte mit Standardabweichungen).

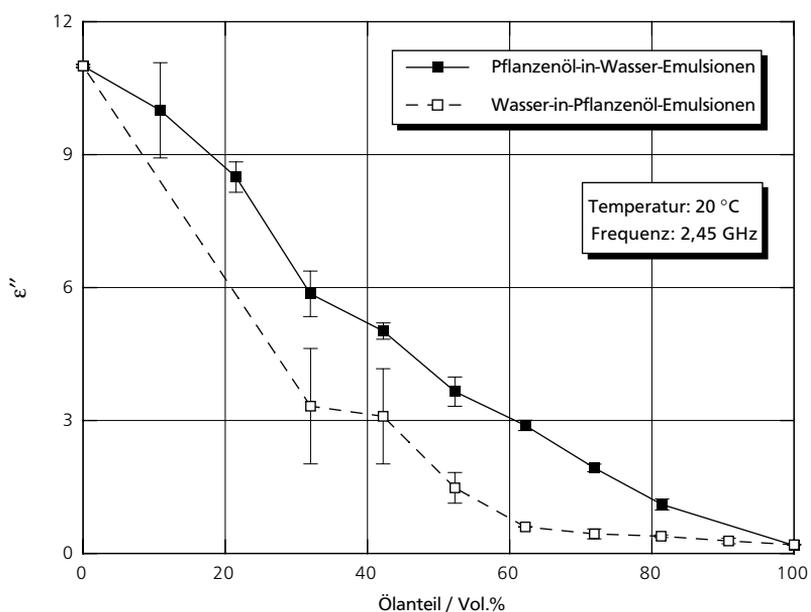


Abb. 3-45: Verlustzahl von Emulsionen aus Pflanzenöl und Wasser bei 20 °C und 2,45 GHz (Mittelwerte mit Standardabweichungen).

Die relativen Dielektrizitätskonstanten von Trockensubstanzen werden hauptsächlich von ihrem Wassergehalt beeinflusst. Je geringer der Restwassergehalt solcher Stoffe ist, desto niedriger werden die Dielektrizitätskonstanten und Verlustzahlen sein. Zudem liegen mehr oder weniger große Anteile dieses Wassers in der Form von gebundenem Wasser vor. Gebundenes Wasser ist nicht so beweglich wie freies Wasser und hat deshalb eine geringere Relaxationsfrequenz als freies Wasser. Die Relaxationsfrequenz liegt demnach näher an der Meßfrequenz von 2,45 GHz als bei freiem Wasser. In Abbildung 3–46 sind für die eigenen Meßwerte von Mikrokristalliner Zellulose und Agar-Agar beide Teile der relativen Dielektrizitätskonstante aufgetragen. Die Dielektrizitätskonstante und die Verlustzahl nehmen mit steigendem Wassergehalt leicht zu. Erst bei Wassergehalten ab etwa 40 Gew.% steigen die Werte steiler an und erreichen für sehr hohe Wassergehalte nahe 100 Gew.% die Werte für reines Wasser (GR NEBERG, 1994). GR NEBERG (1994) zeigte auch, daß die relative Dielektrizitätskonstante von PTFE (Teflon®), einer Substanz, die kein gebundenes Wasser enthält, fast linear mit zunehmendem Wasseranteil steigt.

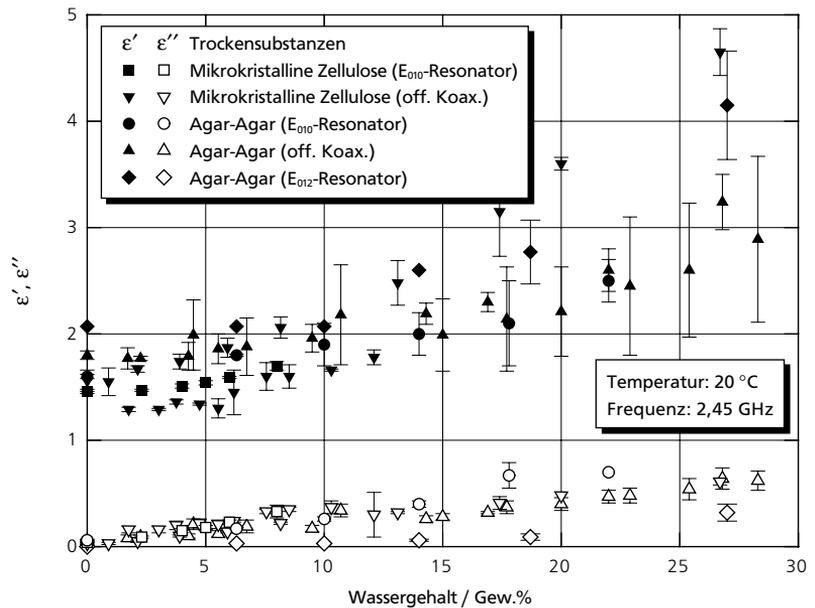


Abb. 3–46: Relative Dielektrizitätskonstante von Trockensubstanzen in Abhängigkeit vom Wassergehalt bei 2,45 GHz und 20 °C (Mittelwerte mit Standardabweichungen).

Für die Versuche zur Temperaturbestimmung nach einer Mikrowellenerwärmung wurden meist 2Gew.%ige wäßrige Agar-Agar-Lösungen verwendet. Diese Gele werden häufig als Modellsubstanzen in der Forschung auf dem Gebiet der Lebensmittelverfahrenstechnik eingesetzt. Die Stoffkonstanten unterscheiden sich fast nicht von denen des reinen Wassers, es wird jedoch so ein „schnittfestes“ Wasser erzeugt. Damit läßt sich beispielsweise die Konvektion bei der Erwärmung verhindern.

Für Agar-Agar- und Gelatine-Lösungen wurden die dielektrischen Eigenschaften gemessen, um zu prüfen, ob die Annahme konstanter Eigenschaften im Vergleich zu reinem Wasser oder einer Salzlösung gerechtfertigt ist. Die Frequenzabhängigkeit dieser Lösungen ist in Abbildung 3-47 aufgetragen.

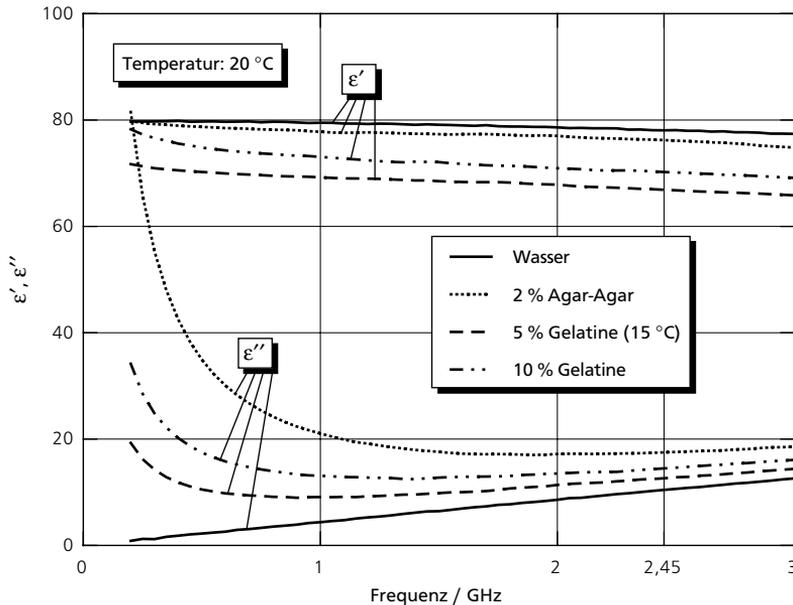


Abb. 3-47: Frequenzabhängigkeit der relativen Dielektrizitätskonstante von Wasser und Gelen bei 20 °C bzw. 15 °C (Mittelwerte mit Linien verbunden, Standardabweichungen haben maximal dreifache Höhe der Linienstärke).

Die Dielektrizitätskonstanten von Wasser und 2Gew.%igem Agar-Agar-Gel unterscheiden sich bei 2,45 GHz nur geringfügig. Die Verlustzahl des Agar-Agar-Gels ist mit einem Wert von  $\epsilon'' = 18$  aber deutlich höher als die von reinem Wasser ( $\epsilon'' = 11$ ). Für kleine Frequenzen ist in Abbildung 3-47 gut zu erkennen, daß sowohl bei Agar-Agar- als auch bei Gelatine-Zugabe neben der Dipolrelaxation ein weiterer Verlustmechanismus eine Rolle spielen muß. Dies kann nicht die Ionenleitfähigkeit sein, da in Agar-Agar und Gelatine keine Ionen enthalten sind. Ein Teil des Wassers der Gele liegt jedoch in gebundener Form vor, so daß die Relaxation von gebundenem Wasser die steil ansteigenden Verlustzahlen der Gele bei niedrigen Frequenzen bewirkt. Bei etwa 0,1 GHz erreicht die Verlustzahl, die durch gebundenes Wasser „verursacht“ wird, einen Maximalwert, der deutlich höher als die Verlustzahl aufgrund freien Wassers ist (vgl. GR NEBERG, 1994). Beide Verlustmechanismen überlagern sich, so daß im hier untersuchten Frequenzbereich die Verlustzahl des Agar-Agar-Gels insgesamt über der des reinen Wasser liegt.

Die Dielektrizitätskonstanten und Verlustzahlen sinken mit steigender Temperatur bei 2,45 GHz (vgl. Abbildung 3-48). Je höher die Temperatur ist, desto mehr unterscheiden sich die Verlustzahlen von Wasser und Agar-Agar-Gel. Wird anstelle von Wasser eine 1Gew.%ige Kochsalzlösung eingesetzt, sind die Ergebnisse ähnlich. Die entsprechenden Abbildungen sind in Anhang A 2.4 zusammengestellt.

Bestimmung  
der relativen  
Dielektrizitätskonstante

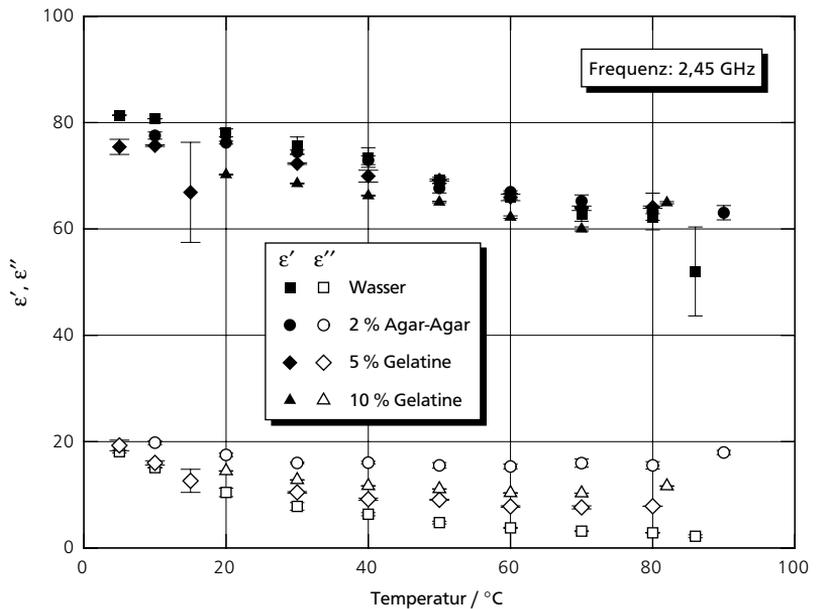


Abb. 3-48: Relative Dielektrizitätskonstante von Wasser und Gelen in Abhängigkeit von der Temperatur bei 2,45 GHz (Mittelwerte mit Standardabweichungen).

Aufgrund dieser Meßergebnisse wurden deshalb für die Berechnungen in Kapitel 3.3 und Kapitel 4 immer die dielektrischen Eigenschaften der Gele und nicht die des reinen Wassers oder der reinen Salzlösungen verwendet.

### Lebensmittel

In dieser Arbeit wurden die dielektrischen Eigenschaften von verschiedenen Lebensmitteln bestimmt. Beispielhaft werden hier die Ergebnisse für Ei, Eigelb und Eiklar (Abbildung 3-49) sowie für ein Fertiggericht (Abbildung 3-50) vorgestellt. Weitere Ergebnisse für Milch mit verschiedenen Fettgehalten, saure und süße Sahne (jeweils in Abhängigkeit von der Temperatur) und verschiedene Gemüse sind in Anhang A 2.4 aufgeführt.

In Abbildung 3-49 sind für Ei anhand der relativen Dielektrizitätskonstanten die unterschiedlichen Wassergehalte zu erkennen. Eiklar hat den höchsten Wassergehalt und damit auch die höchste Dielektrizitätskonstante und Verlustzahl. Für Eigelb sind diese Werte deutlich niedriger, da hier der Wassergehalt kleiner ist. Die relative Dielektrizitätskonstante der mit Ei bezeichneten Mischung aus Eigelb und Eiklar (in den Anteilen, wie sie im Ei vorkommen) liegt wie erwartet zwischen den Werten der Einzelkomponenten. Für alle drei Substanzen ist beim Phasenübergang vom gefrorenen, d. h. festen, in den flüssigen Zustand der steile Anstieg der relativen Dielektrizitätskonstante zu erkennen. Die Beweglichkeit der Wassermoleküle nimmt beim Auftauen stark zu. Mit steigender Temperatur ab dem Gefrierpunkt sinken die Werte langsam, da die zunehmende Eigenbewegung aufgrund der Temperaturerhöhung das Energiespeichervermögen verschlechtert.

Die relative Dielektrizitätskonstante eines handelsüblichen, mikrowelleneigneten Nudelfertiggerichts ist in Abbildung 3-50 dargestellt. Das Fertiggericht wurde für die Messungen in einem Mixer zerkleinert und im Ultraschallbad entgast. Die Dielektrizitätskonstante ist aufgrund des niedrigeren Wassergehalts kleiner und die Verlustzahl aufgrund des Salzanteils höher als die von Wasser. Die Temperaturabhängigkeit ist in beiden Fällen nicht stark ausgeprägt.

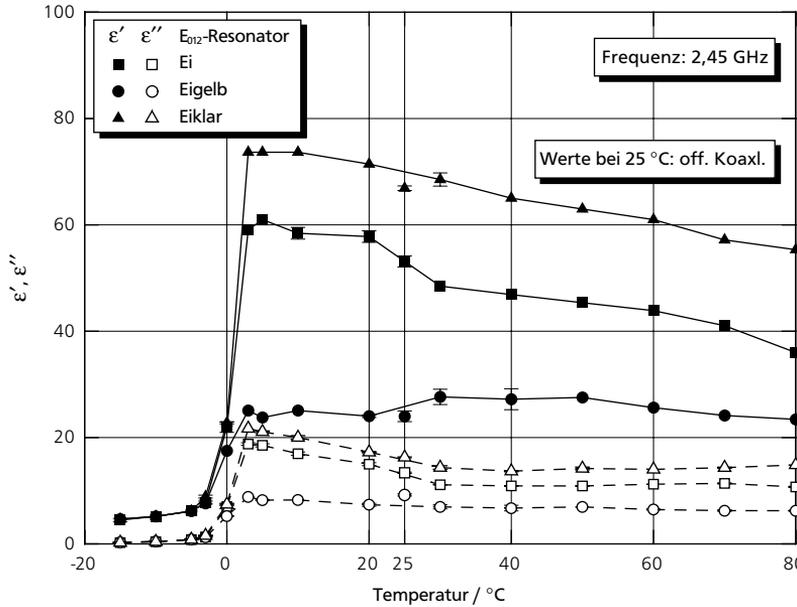


Abb. 3-49: Relative Dielektrizitätskonstante von Ei, Eigelb und Eiklar in Abhängigkeit von der Temperatur bei 2,45 GHz (Mittelwerte mit Standardabweichungen).

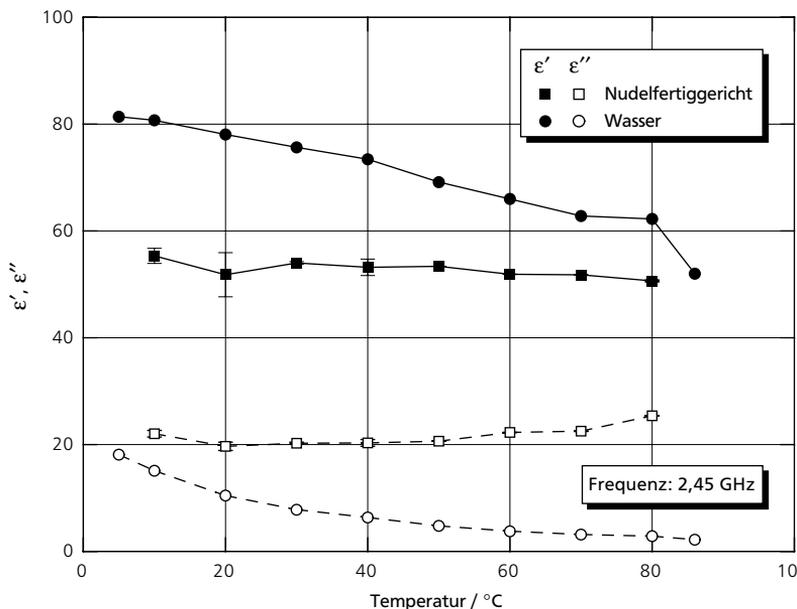


Abb. 3-50: Relative Dielektrizitätskonstante von Wasser und einem Nudelfertiggericht in Abhängigkeit von der Temperatur bei 2,45 GHz (Mittelwerte mit Standardabweichungen).

### 3.2.3 Berechnung der relativen Dielektrizitätskonstante von Mischungen

In Kapitel 2.2.2 wurden Gleichungen vorgestellt, mit denen die relative Dielektrizitätskonstante von Mischungen, und zwar von binären Mischungen, berechnet werden kann. Für die Vergleiche zwischen Berechnung und Messung wurden nur die Gleichungen ausgewählt, mit denen die dielektrischen Eigenschaften einer Mischung aus den relativen Dielektrizitätskonstanten der reinen Komponenten berechnet werden können. Die Reinstoffdaten werden in allen diesen Gleichungen mit den Volumenanteilen der Einzelkomponenten gewichtet. In der Literatur wird meistens nicht zwischen dispersen Systemen (z. B. Emulsionen) und Lösungen (z. B. Ethanol-Wasser-Mischungen) unterschieden. Bei manchen Autoren geht zur Charakterisierung der dispersen Phase zusätzlich ein Formfaktor oder Formkoeffizient in die Gleichungen ein.

Die Gleichungen wurden für die Mikrowellenfrequenz von 2,45 GHz an verschiedenen Gemischen, deren Dielektrizitätskonstanten und Verlustzahlen dazu gemessen wurden, überprüft. Im einzelnen wurden folgende Mischungen untersucht:

- Suspensionen aus Kalkstein in Wasser, wäßriger Kochsalzlösung (2 Gew.% Salz), Pflanzenöl und Paraffinöl, Glaskugeln in Agar-Agar-Gel, Eis, Glycerin und Paraffinöl
- Alkohol-Wasser-Gemische mit Methanol, Ethanol, 1-Propanol, 2-Propanol (Isopropanol), 2-Butanol und Ethanol-Isopropanol-Mischungen
- Emulsionen aus Pflanzenöl oder Paraffinöl und Wasser und zwar O/W- und W/O-Emulsionen

Angaben zur Partikelgröße der Feststoffe in den Suspensionen sind im Anhang A 2.5 zu finden.

#### Suspensionen

Die Ergebnisse für die Suspensionen werden am Beispiel der Kalkstein-Wasser-Mischungen vorgestellt. Es wurden nur Mischungen bis zu einem Kalksteinanteil von etwa 45 Vol.% (entspricht ungefähr 70 Gew.%) untersucht, da bei höherem Kalksteinanteil das Wasser nicht mehr gleichmäßig in der Mischung verteilt war. In der Mischung sollten zudem keine mit Luft gefüllten Hohlräume sein, um den Einfluß einer dritten Komponente auf die relative Dielektrizitätskonstante auszuschließen.

Die gemessenen und berechneten Dielektrizitätskonstanten und Verlustzahlen dieser Suspensionen sind in den Abbildungen 3-51 und 3-52 dargestellt. In die Diagramme wurden hier nur die berechneten Werte von Gleichungen eingetragen, die die Meßwerte am ehesten wiedergeben.

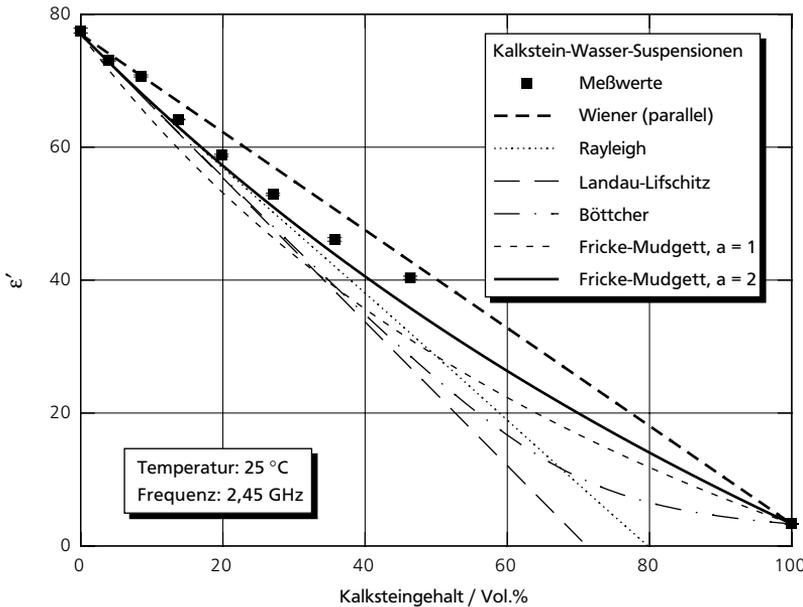


Abb. 3-51: Gemessene (Mittelwerte mit Standardabweichungen) und berechnete Dielektrizitätskonstante von Kalkstein-Wasser-Suspensionen bei 25 °C und 2,45 GHz.

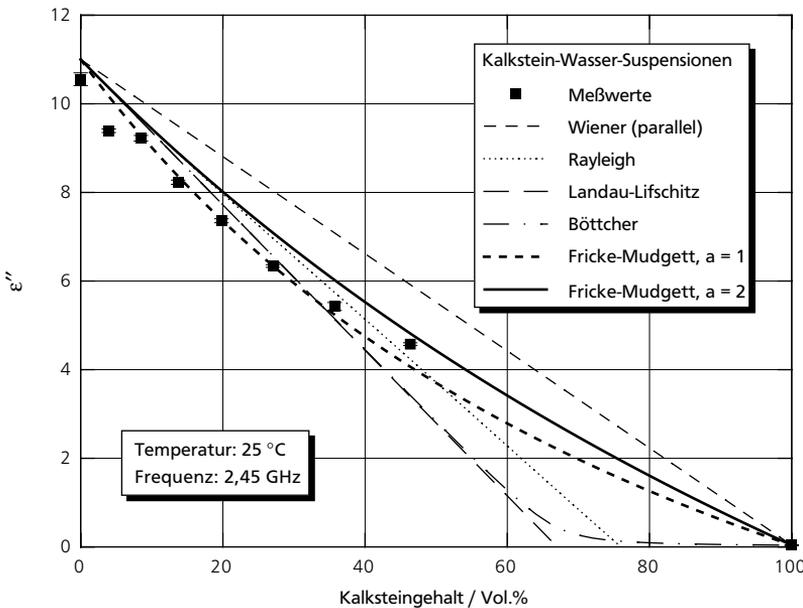


Abb. 3-52: Gemessene (Mittelwerte mit Standardabweichungen) und berechnete Verlustzahl von Kalkstein-Wasser-Suspensionen bei 25 °C und 2,45 GHz.

Die gemessenen Werte nehmen wie erwartet mit zunehmendem Feststoffanteil ab, da weniger Wassermoleküle vorhanden sind und Kalkstein im Vergleich zu Wasser kaum zur Energiespeicherung beiträgt. Die Dielektrizitätskonstante wird von der *parallelen Wiener-Gleichung* 2-29 und der *Fricke-Mudgett-Gleichung* 2-32 mit einem Formfaktor  $a = 2$  am besten wiedergegeben, während die Verlustzahl am besten mit der *Fricke-Mudgett-Gleichung* mit dem Formfaktor von  $a = 1$  be-

Bestimmung  
der relativen  
Dielektrizitätskonstante

schrieben wird. Bei  $a = 2$  sind die Abweichungen jedoch auch klein. Mit steigendem Kalksteingehalt weichen die mit den übrigen Gleichungen berechneten Daten stärker von den gemessenen Dielektrizitätskonstanten und Verlustzahlen ab.

Wurde eine 2Gew.%ige Kochsalzlösung als kontinuierliche Phase verwendet, sind die Ergebnisse analog zu den hier gezeigten mit Wasser. Aufgrund der Ionenleitfähigkeit ist die Dielektrizitätskonstante etwas niedriger und die Verlustzahl höher als die bei den Suspensionen mit Wasser. Mit Öl als kontinuierlicher Phase ändern sich die Meßwerte kaum mit zunehmender Kalksteinkonzentration, da sowohl Kalkstein mit  $\epsilon_r = 3,3 - j \cdot 0,01$  als auch Pflanzenöl ( $\epsilon_r = 2,4 - j \cdot 0,2$ ) oder Paraffinöl ( $\epsilon_r = 2,1 - j \cdot 0,04$ ) eine sehr kleine relative Dielektrizitätskonstante besitzen.

Mit der *Fricke-Mudgett-Gleichung* mit einem Formfaktor  $a = 2$  lassen sich auch die Meßwerte der anderen untersuchten Suspensionen am besten beschreiben, so daß hier auf die weiteren Einzelergebnisse nicht näher eingegangen wird.

Mischungen permanenter Dipole

Für Ethanol-Wasser-Gemische sind die Ergebnisse von Messung und Berechnung in den Abbildungen 3-53 und 3-54 dargestellt. Als Konzentrationsmaß wurden molare Anteile gewählt, da sich wegen der Mischungseffekte die Volumina der Komponenten in der Mischung von den vorgelegten Volumina unterscheiden.

Die Abnahme der Dielektrizitätskonstante mit steigendem Ethanolgehalt läßt sich am ehesten mit der *parallelen Wiener-Gleichung* 2-29 und der *Fricke-Mudgett-Gleichung* 2-32 mit  $a = 2$  beschreiben. Die Verlustzahl wird dagegen von keiner der Gleichungen wiedergegeben.

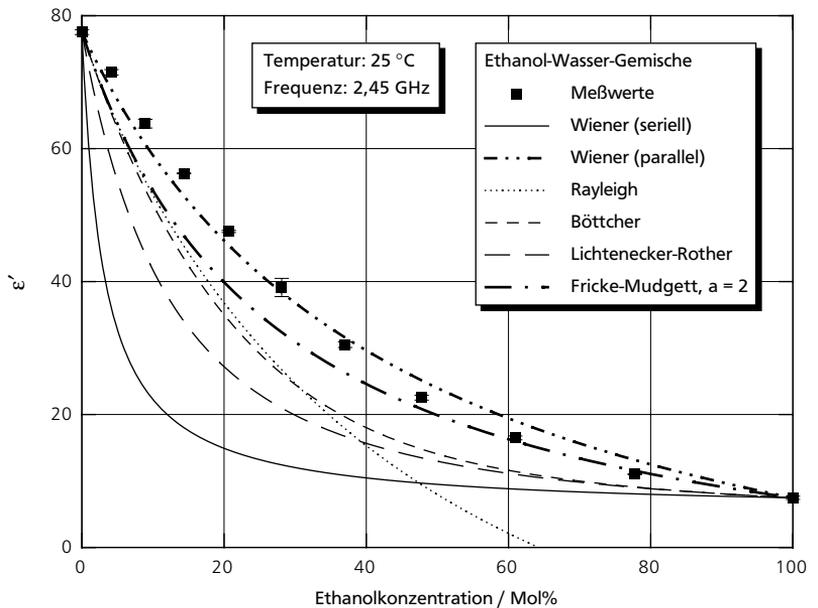


Abb. 3-53: Gemessene (Mittelwerte mit Standardabweichungen) und berechnete Dielektrizitätskonstante von Ethanol-Wasser-Gemischen bei 25 °C und 2,45 GHz.

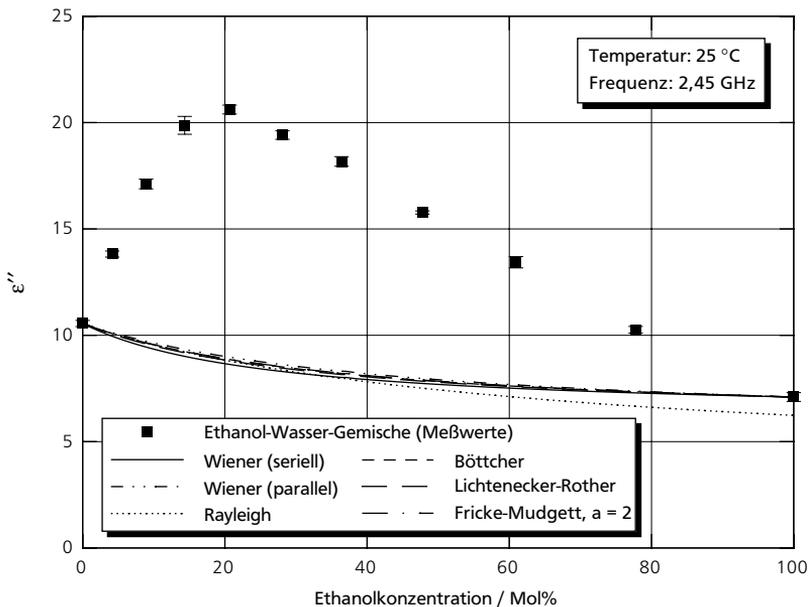


Abb. 3-54: Gemessene (Mittelwerte mit Standardabweichungen) und berechnete Verlustzahl von Ethanol-Wasser-Gemischen bei 25 °C und 2,45 GHz.

Der mathematische Aufbau dieser Gleichungen ist so, daß solche ausgeprägten Maxima nicht beschrieben werden können. Die berechneten Werte verlaufen fast linear, wenn die Reinstoffdaten so dicht beieinanderliegen, wie es bei den Verlustzahlen von Wasser und Ethanol der Fall ist.

Das Gleiche gilt auch für die übrigen Alkohol-Wasser-Gemische. Als weiteres Beispiel sind die Ergebnisse für die Ethanol-Isopropanol-Mischungen im Anhang A 2.4 dargestellt.

Starke Wechselwirkungen der Moleküle, wie sie bei Mischungen permanenter Dipole auftreten, werden in den Mischungsgleichungen nicht berücksichtigt, bzw. es wird angenommen, daß keine oder allenfalls sehr geringe Wechselwirkungen vorkommen. Problematisch ist auch, daß beim Entwickeln der Gleichungen von Mischungen aus einer dispersen und einer kontinuierlichen Phase ausgegangen wurde und oft mit der zusätzlichen Voraussetzung, daß die relative Dielektrizitätskonstante der dispersen Phase kleiner als die der kontinuierlichen ist (z. B. die *Fricke-Mudgett-Gleichung* 2-32). MUDGETT u. a. (1974) erkannten diese Problematik und entwickelten eine weitere Beziehung, das *interaktive Modell* (s. Gleichungen 2-26 und 2-27), um die Dielektrizitätskonstante und Verlustzahl von Alkohol-Wasser-Gemischen zu beschreiben. Dieses Modell beruht allerdings nicht mehr auf den Reinstoffwerten der Dielektrizitätskonstante und Verlustzahl. MUDGETT u. a. untersuchten zudem nur Methanol- und Ethanol-Wasser-Gemische bei 3 GHz und 25 °C.

Mit der einfachen *Fricke-Mudgett-Gleichung* ( $a = 2$ ) wurden im ersten Schritt die optische Dielektrizitätskonstante  $\epsilon_{\infty,m}$ , die statische Dielektrizitätskonstante  $\epsilon_{s,m}$  sowie die kritische Wellenlänge  $\lambda_{krit,m}$  der Mischungen aus diesen Werten der reinen Komponenten (Alkohol und Wasser) für die gewünschte Temperatur be-

rechnet. Die kritische Wellenlänge  $\lambda_{krit}$  ist die Wellenlänge bei der Relaxationsfrequenz  $f_R$ . Mit den so für jede Konzentration bestimmten Werten von  $\epsilon_{s,m}$ ,  $\epsilon_{\infty,m}$  und  $\lambda_{krit,m}$  wurden dann im zweiten Schritt mit den Gleichungen 2-26 und 2-27 die Dielektrizitätskonstante und Verlustzahl für jede Konzentration berechnet. Die Übereinstimmung zwischen den so berechneten Werten und den Meßwerten scheint bei MUDGETT u. a. (1974) gut. Die geringen Unterschiede der Berechnung zwischen der *Fricke-Mudgett-Gleichung* und dem *interaktiven Modell* für die Dielektrizitätskonstante konnten mit den eigenen Messungen für Methanol- und Ethanol-Wasser-Gemische bei 2,45 GHz bestätigt werden, für die Verlustzahl jedoch nicht. Die Konzentration, bei der die Verlustzahl maximal wird, und die Werte der Verlustzahl selbst weichen bis zu 30 % voneinander ab (vgl. Kapitel 3.2.5, Abbildung 3-66, Meßwerte und Kurve „Ethanol-Wasser,  $a = 2$ “). MUDGETT u. a. (1974) konnten dies u. U. gar nicht erkennen, da nur für drei verschiedene Gemischzusammensetzungen gemessen wurde, bei denen Messung und Rechnung übereinstimmten.

Da für das *interaktive Modell* die kritischen Wellenlängen, d. h. die Relaxationsfrequenzen der Mischungen mit der *Fricke-Mudgett-Gleichung* 2-32 berechnet wurden, wurden anhand der aus den eigenen Messungen ermittelten Relaxationsfrequenzen die berechneten Werte überprüft. In Abbildung 3-55 ist zu erkennen, daß die berechnete Kurve die Meßwerte gut beschreibt. Für den Bereich oberhalb 6 GHz konnten allerdings selbst keine Werte gemessen werden.

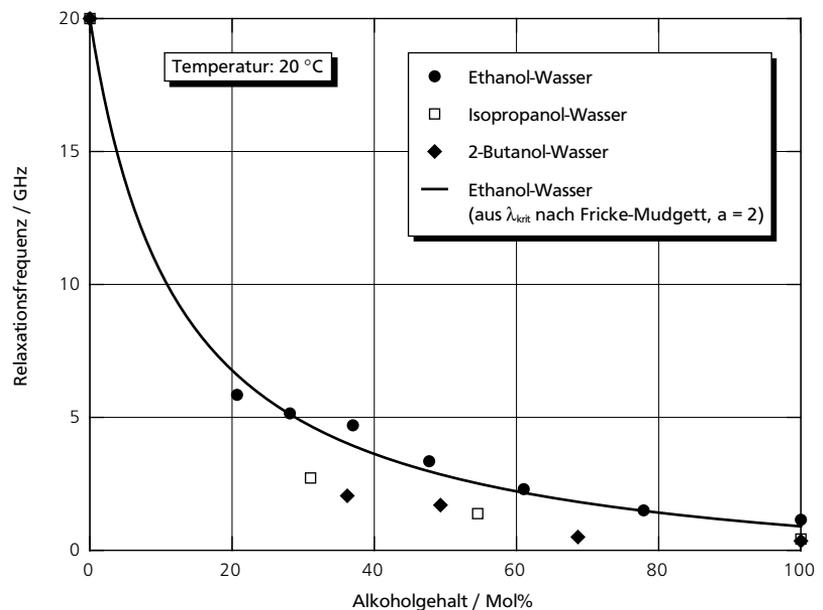


Abb. 3-55: Aus eigenen Meßwerten ermittelte und berechnete Relaxationsfrequenzen von Alkohol-Wasser-Gemischen in Abhängigkeit von der Konzentration bei 20 °C.

Für den gesamten Frequenzbereich bis 20 GHz – der Relaxationsfrequenz von Wasser – haben MASHIMO u. a. (1989 und 1991) Messungen zum Relaxationsverhalten von Alkohol-Wasser-Mischungen durchgeführt. Sie bestimmten die Rela-

xationszeit  $\tau$ . Zwischen der Relaxationszeit  $\tau$ , der Resonanzfrequenz  $f_R$  und der kritischen Wellenlänge  $\lambda_{krit}$  besteht folgender Zusammenhang:

$$\tau = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_R} = \frac{\lambda_{krit}}{2 \cdot \pi \cdot c_0} \quad (3-12)$$

In Gleichung 3-12 ist  $c_0 \approx 3 \cdot 10^8$  m/s die Vakuumlichtgeschwindigkeit. MASHIMO u. a. (1991) wählten zur Darstellung die in Abbildung 3-56 gezeigte Auftragung. Im Bereich kleiner Ethanolkonzentrationen unter 20 Mol% knicken die Werte steil nach unten ab, so daß MASHIMO u. a. (1991) zur Beschreibung zwei Konzentrationsbereiche unterschieden. Die nach *Fricke-Mudgett* berechnete Kurve aus den Daten des reinen Ethanols und Wassers gibt dieses scharfe Abknicken der Werte nicht wieder. MASHIMO u. a. (1991) führen dieses Phänomen auf die Bildung verschiedener Molekül-Cluster in der Mischung zurück. Sie vermuteten, daß im Bereich niedriger Alkoholkonzentrationen Cluster vorhanden sind, die nur aus Wassermolekülen bestehen, und daß deshalb in diesem Bereich der Einfluß des Ethanols auf die Relaxationszeit geringer ist als bei gleichmäßiger Verteilung von Ethanol- und Wassermolekülen in der Mischung. Die Relaxationszeiten nehmen darum in diesem Bereich stärker zum Wert des reinen Wassers hin ab als im übrigen Konzentrationsbereich.

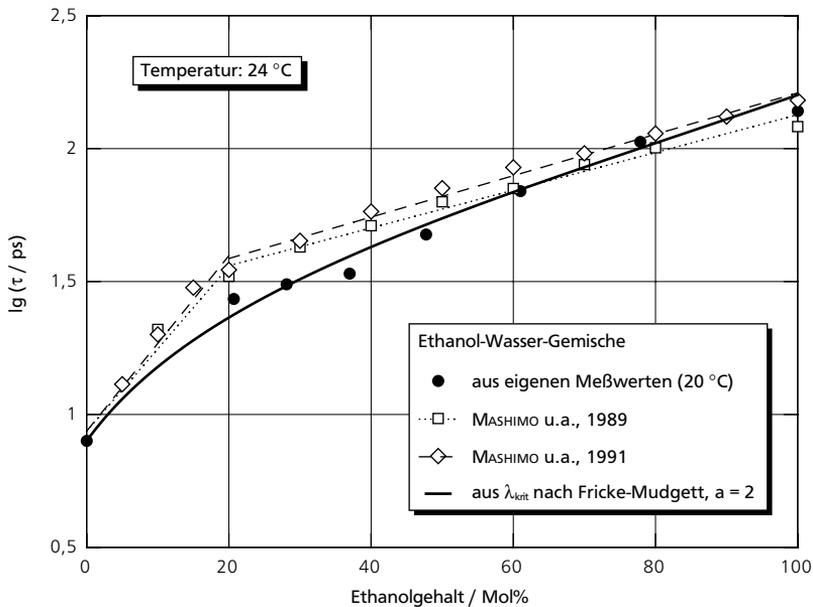


Abb. 3-56: Relaxationszeiten von Ethanol-Wasser-Gemischen (aus eigenen Meßwerten ermittelt und Literaturwerte).

Am Beispiel der dielektrischen Eigenschaften der Pflanzenöl-in-Wasser-Emulsionen ist zu sehen, inwieweit die verschiedenen Berechnungsgleichungen es erlauben, die Meßwerte zu beschreiben. In den Abbildungen 3-57 und 3-58 wurden die berechneten Kurven für sämtliche ausgewählte Gleichungen eingetragen. Alle Gleichungen, die die Grenzfälle der Reinstoffdaten korrekt wiedergeben, liefern Werte, die zwischen denen der *seriellen* 2-28 und der *parallelen Wiener-Gleichung* 2-29 liegen. Im Fall der O/W-Emulsionen werden die Dielektrizitätskonstante und die Verlustzahl entgegen der Erwartung am besten von der *Fricke-Mudgett-Gleichung* 2-32 mit einem Formfaktor  $a = 1$  (nadelförmige Partikel) und nicht mit  $a = 2$  (kugelförmige Partikel) beschrieben, obwohl die Öltröpfchen einer Emulsion eher kugel- als nadelförmig sind.

Bei Paraffinöl-in-Wasser-Emulsionen wurde die beste Anpassung ebenfalls mit der *Fricke-Mudgett-Gleichung* 2-32 mit  $a = 1$  erhalten. Die gemessenen und berechneten relativen Dielektrizitätskonstanten dieser Emulsionen sind im Anhang A 2.4 aufgeführt.

Ebenfalls untersucht wurden Wasser-in-Öl-Emulsionen, obwohl in diesem Fall z. B. für die *Fricke-Mudgett-Gleichung* die Voraussetzung, daß die relative Dielektrizitätskonstante der kontinuierlichen Phase größer als die der dispersen Phase ist, nicht erfüllt wird. Die Meßwerte können hier für Wasseranteile bis 60 Vol.% am ehesten mit der *Lichtenecker-Rother-Gleichung* 2-40 wiedergegeben werden (s. Abbildungen 3-59 und 3-60). Es konnten keine stabilen Emulsionen mit Wasseranteilen über 70 Vol.% hergestellt werden, so daß für diesen Konzentrationsbereich hoher Wassergehalte keine Aussage möglich ist. In der Literatur wurden hierzu keine Angaben gefunden.

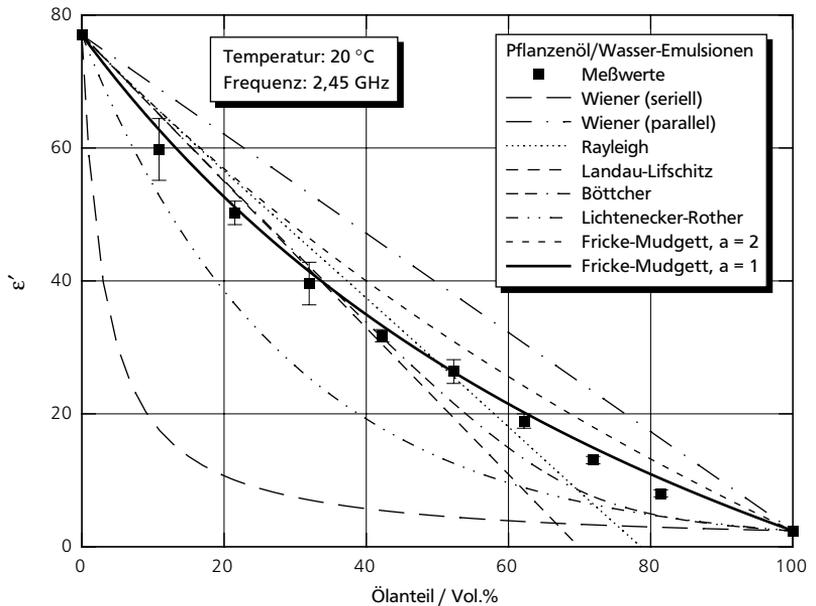


Abb. 3-57: Gemessene (Mittelwerte mit Standardabweichungen) und berechnete Dielektrizitätskonstante von Pflanzenöl-in-Wasser-Emulsionen bei 20 °C und 2,45 GHz.

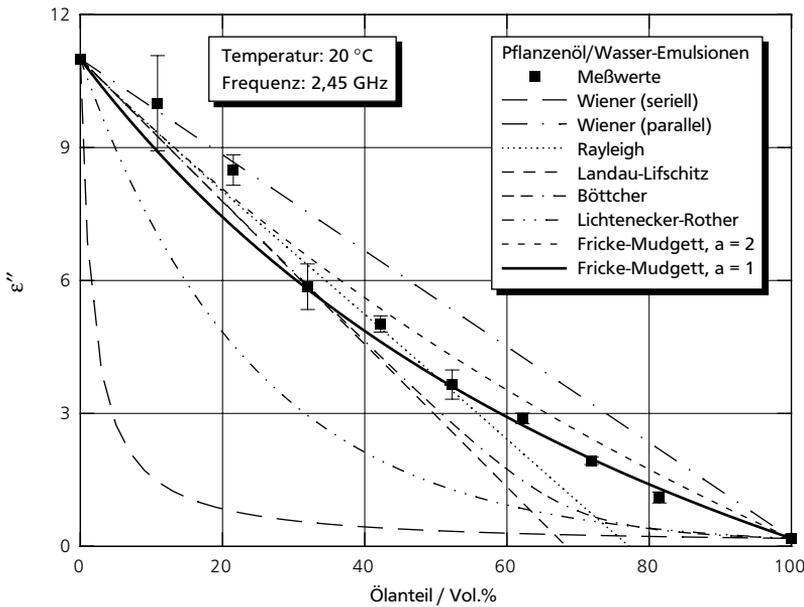


Abb. 3-58: Gemessene (Mittelwerte mit Standardabweichungen) und berechnete Verlustzahl von Pflanzenöl-in-Wasser-Emulsionen bei 20 °C und 2,45 GHz.

Auffällig ist bei diesen Berechnungen, daß mit einem Teil der Gleichungen nur einer der Reinstoffwerte korrekt wiedergegeben wird. Mit der *Rayleigh*- und der *Landau-Lifschitz-Gleichung* (Gleichungen 2-31 und 2-41) wird nur der Wert für die kontinuierliche Phase, d.h. für den Grenzfall der idealen Verdünnung, richtig berechnet.

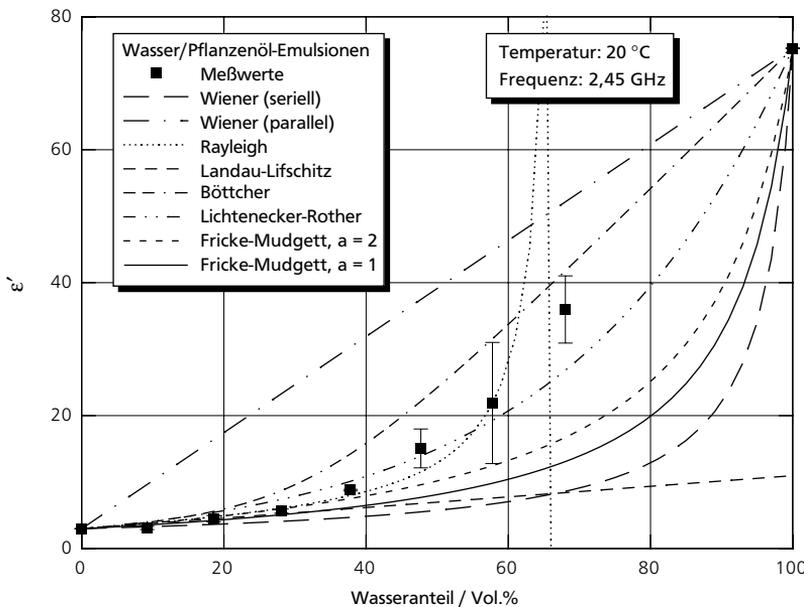


Abb. 3-59: Gemessene (Mittelwerte mit Standardabweichungen) und berechnete Dielektrizitätskonstante von Wasser-in-Pflanzenöl-Emulsionen bei 20 °C und 2,45 GHz.

Bestimmung  
der relativen  
Dielektrizitätskonstante

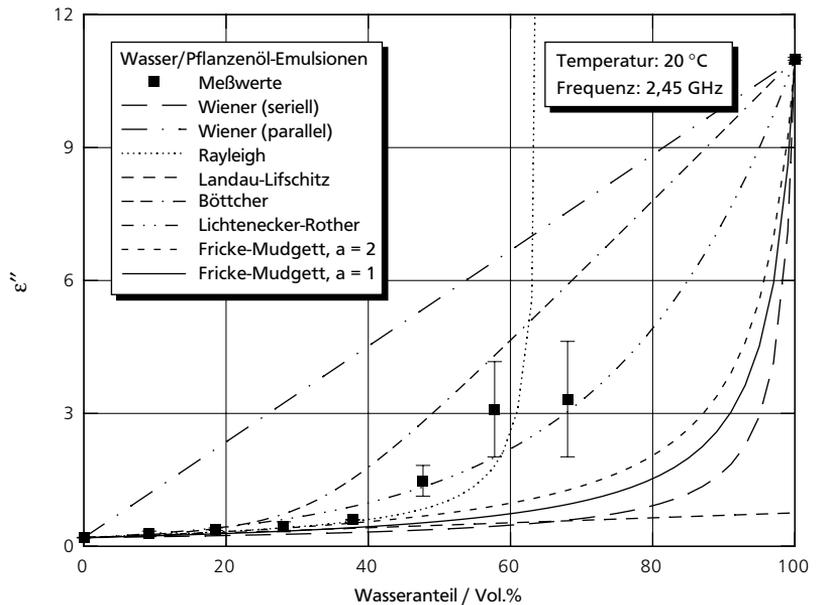


Abb. 3-60: Gemessene (Mittelwerte mit Standardabweichungen) und berechnete Verlustzahl von Wasser-in-Pflanzenöl-Emulsionen bei 20 °C und 2,45 GHz.

### 3.2.4 Anpassung der Fricke-Mudgett-Gleichung für Suspensionen und Emulsionen

Aus den im vorhergehenden Kapitel 3.2.3 vorgestellten Ergebnissen läßt sich erkennen, daß mit der *Fricke-Mudgett-Gleichung* 2-32 ein Großteil der relativen Dielektrizitätskonstanten der Gemische besser als mit den übrigen Gleichungen beschrieben werden kann. Trotzdem sind die Ergebnisse nicht in allen Fällen zufriedenstellend. Mit dem Formfaktor  $a$  der *Fricke-Mudgett-Gleichung* ist aber ein Parameter vorhanden, der unabhängig von den anderen Parametern (Dielektrizitätskonstante und Verlustzahl der reinen Stoffe sowie Volumenanteil) ist. Der Formfaktor  $a$  wurde deshalb als Anpassungsparameter verwendet, um die relativen Dielektrizitätskonstanten der Gemische genauer zu beschreiben. Die Gemische wurden in Klassen eingeteilt und jeweils für eine solche Gemischklasse der Formfaktor  $a$  – soweit erforderlich – durch nichtlineare Regression angepaßt. Es wurden Suspensionen, O/W-Emulsionen und W/O-Emulsionen unterschieden.

Eine weitere Gleichung für disperse Gemische wird in Anhang A 2.6 vorgestellt. Diese Gleichung, die von RAGHAVAN und MARTIN (1995) entwickelt wurde, ist ebenfalls auf die relative Dielektrizitätskonstante anwendbar. Die Ergebnisse sind denen mit der angepaßten *Fricke-Mudgett-Gleichung* ähnlich.

Aus den Ergebnissen im vorhergehenden Kapitel wurde auch deutlich, daß sich die relativen Dielektrizitätskonstanten der Gemische permanenter Dipole mit keiner der vorgestellten Gleichungen zufriedenstellend wiedergeben lassen, da sowohl die Dielektrizitätskonstante als auch die Verlustzahl je nach Gemisch für eine bestimmte Konzentration ein Maximum zeigt. Bei den Isopropanol-

Ethanol-Gemischen werden sogar zwei Maxima durchlaufen. Im folgenden Kapitel 3.2.5 wird deshalb auf diese Gemische nochmals gesondert eingegangen.

### Suspensionen

Für die Suspensionen wurde keine Verbesserung des Ergebnisses mit der Variation des Formfaktors der *Fricke-Mudgett-Gleichung* erzielt. Mit dem Formfaktor  $a = 2$  für kugelförmige Partikel werden die Dielektrizitätskonstante und die Verlustzahl sehr gut beschrieben (vgl. Abbildung 3-61 für Kalkstein-Wasser-Suspensionen).

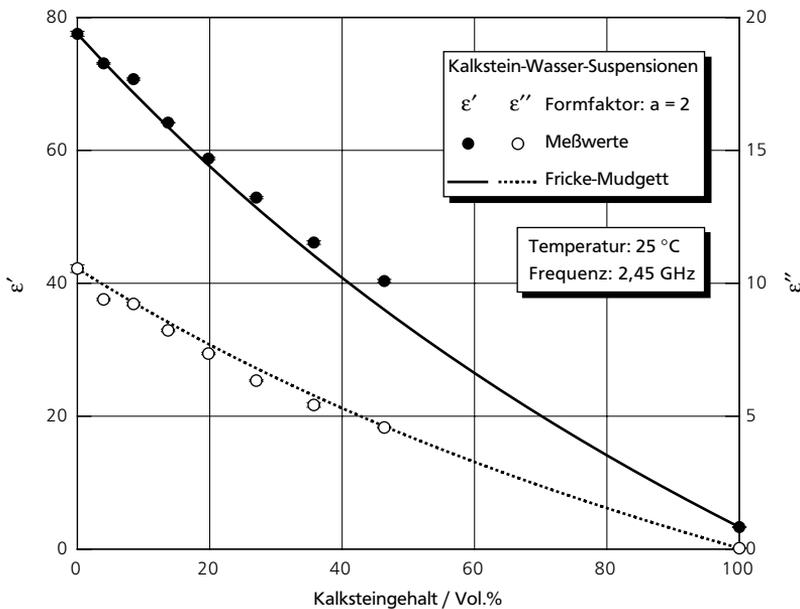


Abb. 3-61: Gemessene und nach Fricke-Mudgett (Formfaktor  $a = 2$ ) berechnete relative Dielektrizitätskonstante von Kalkstein-Wasser-Suspensionen bei 25 °C und 2,45 GHz.

### O/W-Emulsionen

Sowohl die relative Dielektrizitätskonstante der Pflanzenöl-in-Wasser-Emulsionen als auch die der Paraffinöl-in-Wasser-Emulsionen konnte entgegen der Erwartung mit dem Formfaktor  $a = 2$  für kugelförmige Partikel nicht gut wiedergegeben werden.

Für die Dielektrizitätskonstanten und die Verlustzahlen wurde für diese Emulsionen ein Faktor von  $a = 0,7$  bestimmt. Für die Dielektrizitätskonstante ist die Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung in beiden Fällen gut. Lediglich bei den Pflanzenöl-in-Wasser-Emulsionen wird eine etwas zu niedrige Verlustzahl berechnet (vgl. Abbildung 3-62). Die Werte der Verlustzahlen der Paraffinöl-in-Wasser-Emulsionen werden gut wiedergegeben (s. Anhang A 2.4). Da der Formfaktor für beide Anteile der relativen Dielektrizitätskonstanten gleich sein sollte, wurde keine weitere Anpassung des Formfaktors für eine bessere Beschreibung der Verlustzahl durchgeführt.

Bestimmung  
der relativen  
Dielektrizitätskonstante

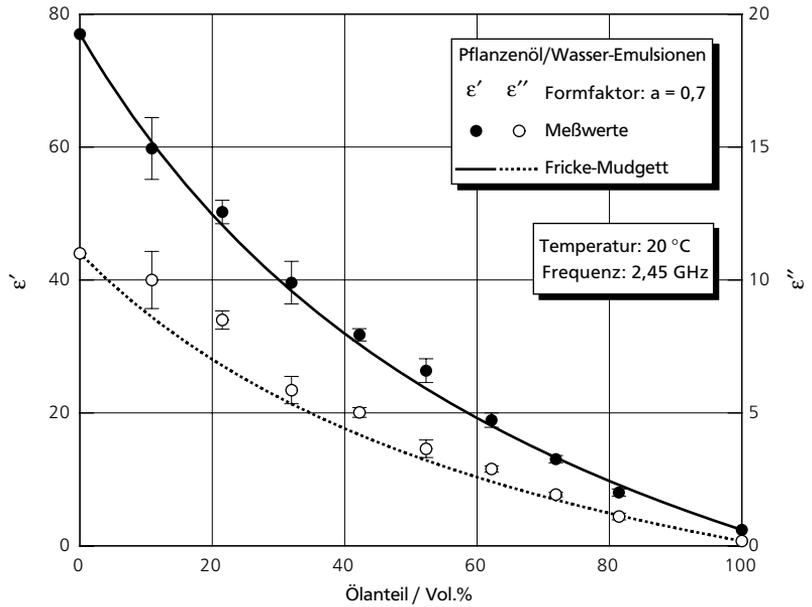


Abb. 3-62: Gemessene und nach Fricke-Mudgett (Formfaktor  $a = 0,7$ ) berechnete relative Dielektrizitätskonstante von Pflanzenöl-in-Wasser-Emulsionen bei 20 °C und 2,45 GHz.

W/O-Emulsionen

Mit einem Faktor von  $a = 3,5$  kann die relative Dielektrizitätskonstante von Wasser-in-Öl-Emulsionen bis zu einem Wasseranteil von 50 Vol.% in guter Übereinstimmung mit den Meßwerten vorausberechnet werden (s. Abbildung 3-63).

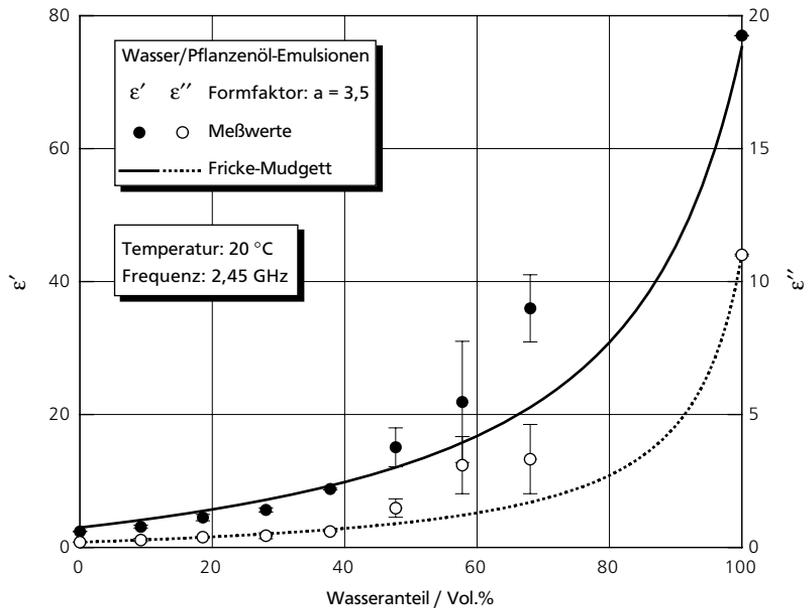


Abb. 3-63: Gemessene und nach Fricke-Mudgett (Formfaktor  $a = 3,5$ ) berechnete relative Dielektrizitätskonstante von Wasser-in-Pflanzenöl-Emulsionen bei 20 °C und 2,45 GHz.

Für Wasseranteile  $> 70$  Vol.% war es, wie bereits im vorhergehenden Kapitel erwähnt, nicht möglich, stabile Emulsionen herzustellen, so daß für diesen Konzentrationsbereich kein Vergleich der berechneten Werte mit Meßwerten möglich ist.

### 3.2.5 Berechnung der relativen Dielektrizitätskonstante von Mischungen permanenter Dipole

Für die Alkohol-Wasser-Gemische wurde ebenfalls eine Anpassung mit Hilfe des Formfaktors der *Fricke-Mudgett-Gleichung* versucht. Die Dielektrizitätskonstanten dieser Gemische lassen sich mit  $a = 3$  am besten wiedergeben (Abbildung 3-64). Wie bereits in Kapitel 3.2.3 beschrieben, kann mit der *Fricke-Mudgett-Gleichung* das Maximum der Verlustzahl für eine bestimmte Alkoholkonzentration jedoch nicht berechnet werden. Auch für den Formfaktor  $a = 3$  verlaufen die berechneten Kurven fast linear zwischen den Reinstoffwerten (s. Abbildung 3-65).

Es wurde daher geprüft, ob mit dem *interaktiven Modell* (Gleichungen 2-26 und 2-27) eine bessere Berechnung möglich ist, wenn bereits beim ersten Schritt (Berechnung der Gemischwerte der statischen und optischen Dielektrizitätskonstante und der kritischen Wellenlänge mit der *Fricke-Mudgett-Gleichung*)  $a$  variiert wird. Für die Verlustzahl  $\epsilon''$  wird mit  $a = 3$  eine bessere Anpassung erreicht, aber die Lage des Maximums und die Werte von  $\epsilon''$  werden nicht richtig wiedergegeben. Zum Vergleich ist in Abbildung 3-66 für die Ethanol-Wasser-Mischungen neben der Kurve mit  $a = 3$  auch die Kurve mit  $a = 2$  eingezeichnet. Die Lage des Maximums verschiebt sich zu kleineren Ethanolanteilen, ist aber noch weit vom Meßwert entfernt. Auch für andere Werte von  $a$  wurde keine bessere Anpassung erzielt.

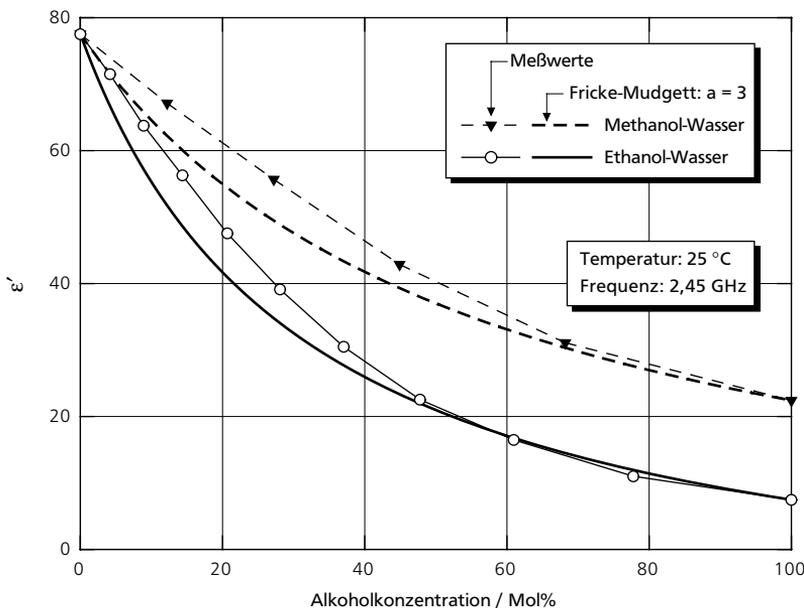


Abb. 3-64: Gemessene und nach Fricke-Mudgett (Formfaktor  $a = 3$ ) berechnete Dielektrizitätskonstante von Alkohol-Wasser-Mischungen bei  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  und  $2,45\text{ GHz}$ .

Bestimmung  
der relativen  
Dielektrizitätskonstante

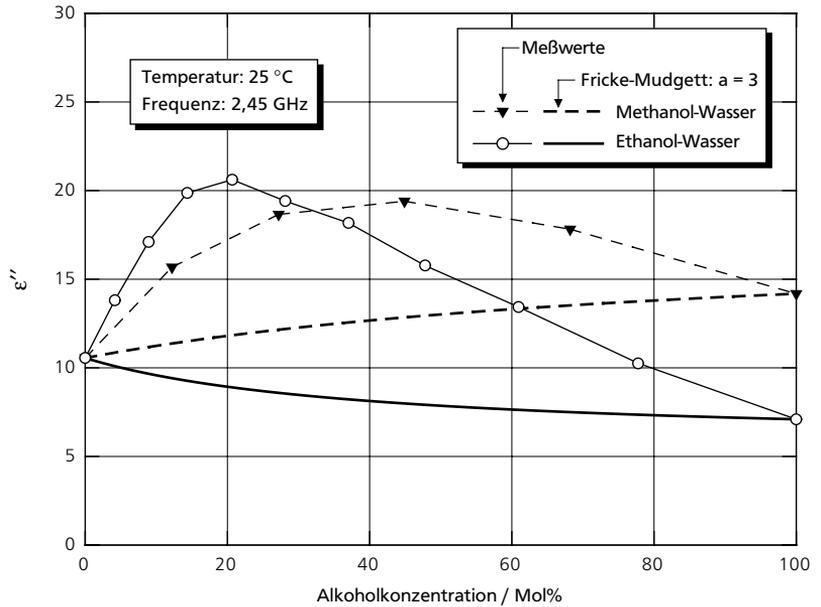


Abb. 3-65: Gemessene und nach Fricke-Mudgett (Formfaktor  $a = 3$ ) berechnete Verlustzahl von Alkohol-Wasser-Mischungen bei 25 °C und 2,45 GHz.

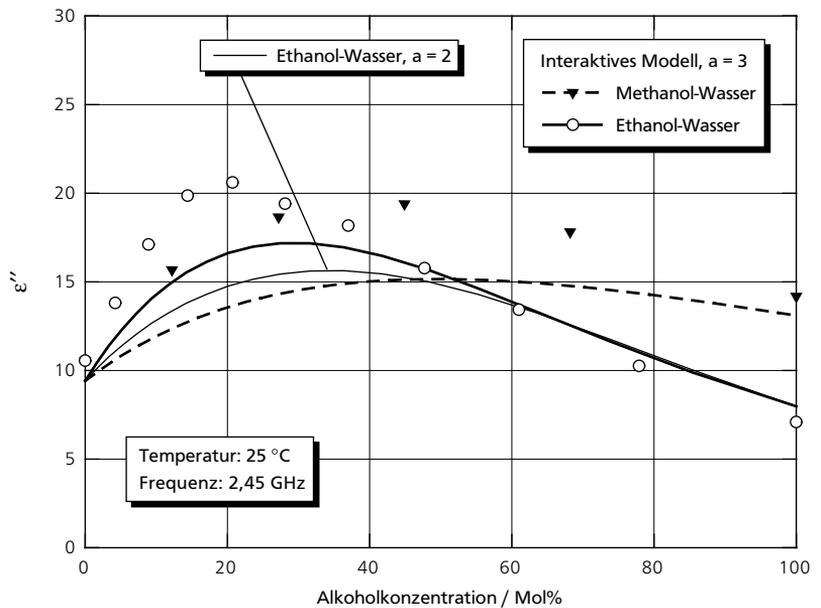


Abb. 3-66: Gemessene und mit dem interaktiven Modell (Formfaktor  $a = 3$  und  $a = 2$ ) berechnete Verlustzahl von Alkohol-Wasser-Mischungen bei 25 °C und 2,45 GHz.

Aus Abbildung 3<sup>866</sup> wird auch ein weiterer Nachteil des *interaktiven Modells* ersichtlich. Sämtliche Werte – auch die der reinen Stoffe – werden bei diesem Modell berechnet. Die Werte für die reinen Stoffe stimmen deshalb nicht mit den Meßdaten überein.

Mit keiner der in Kapitel 2.2.2 vorgestellten Gleichungen können die Dielektrizitätskonstante und die Verlustzahl von Mischungen permanenter Dipole zu-

friedenstellend vorausberechnet werden, wenn diese Werte sich nicht monoton mit der Konzentration ändern, sondern beispielsweise ein Maximum durchlaufen. Es wurde daher geprüft, inwieweit Gleichungen zur Beschreibung anderer Stoffgrößen, bei denen ähnliche Effekte bei Gemischen beobachtet werden, auf die Dielektrizitätskonstante und die Verlustzahl übertragen werden können.

Wie bereits in Kapitel 3.2.2 erwähnt, werden in der Thermodynamik diese Effekte, die auf dem Realverhalten einer Mischung beruhen, durch die Angabe von Exzeßgrößen charakterisiert. Eine wichtige solche Größe ist die molare freie Exzeßenthalpie  $g^E$  einer Mischung (engl. *molar excess Gibbs energy*), die zur Bestimmung von Aktivitätskoeffizienten herangezogen wird. Bei der Beschreibung von  $g^E$  – und von Exzeßgrößen allgemein – muß als Randbedingung eingehalten werden, daß für die reinen Stoffe  $g^E = 0$  ist. Für eine binäre Mischung ist die einfachste Gleichung, die diese Randbedingung erfüllt, die *Margules-Gleichung* (vgl. PRAUSNITZ u. a., 1986).

$$g^E = A \cdot \bar{c}_1 \cdot \bar{c}_2 = A \cdot \bar{c}_1 \cdot (1 - \bar{c}_1) \quad (3-13)$$

Es sind  $\bar{c}_1$  und  $\bar{c}_2$  die Molenbrüche der Komponenten 1 und 2. Der empirische Parameter  $A$ , der charakteristisch für die beiden Komponenten 1 und 2 ist, hängt von der Temperatur, aber nicht von der Zusammensetzung des Gemischs ab. Gleichung 3-13 ist jedoch aufgrund der Symmetrie nur für Gemische geeignet, deren Moleküle in Größe, Form und Verhalten sehr ähnlich sind (vgl. PRAUSNITZ u. a., 1986). Im allgemeinen ist dies jedoch nicht der Fall. Für komplexere binäre Mischungen entwickelten REDLICH und KISTER (1948) folgenden Reihenansatz, mit dem weiterhin die o. g. Randbedingung eingehalten wird.

$$g^E = \bar{c}_1 \cdot \bar{c}_2 \cdot \sum_{k=0}^n A_k \cdot (\bar{c}_1 - \bar{c}_2)^k = \bar{c}_1 \cdot (1 - \bar{c}_1) \cdot \sum_{k=0}^n A_k \cdot (2 \cdot \bar{c}_1 - 1)^k \quad (3-14)$$

Die temperaturabhängigen Parameter  $A_k$  müssen wie der Parameter  $A$  in Gleichung 3-13 durch Anpassung an Meßdaten ermittelt werden. Die Zahl der Parameter  $A_k$  hängt zum einen von der Komplexität der Mischung, aber auch von der Zahl und Zuverlässigkeit der Meßdaten selbst ab. Meist wird die Reihe nach dem zweiten oder dritten Summanden abgebrochen (s. PRAUSNITZ u. a., 1986).

Die *Redlich-Kister-Gleichung* 3-14 eignet sich auch zur Beschreibung anderer Exzeßgrößen, wie das Exzeßvolumen (z. B. ARCE u. a., 1995), so daß für die in der vorliegenden Arbeit gemessenen Dielektrizitätskonstanten und Verlustzahlen der Alkohol-Wasser-Gemische eine Anpassung der Daten mit diesem Reihenansatz durchgeführt wurde. Anstelle der molaren freien Exzeßenthalpie  $g^E$  wird nun jeweils die Exzeß-Dielektrizitätskonstante  $\Delta\epsilon'$  oder die Exzeß-Verlustzahl  $\Delta\epsilon''$  in Gleichung 3-14 eingesetzt.

$$\Delta\epsilon' = \bar{c}_1 \cdot (1 - \bar{c}_1) \cdot \sum_{k=0}^n A_k \cdot (2 \cdot \bar{c}_1 - 1)^k \quad (3-15)$$

Bestimmung  
der relativen  
Dielektrizitätskonstante

$$\Delta \epsilon'' = \tilde{c}_1 \cdot (1 - \tilde{c}_1) \cdot \sum_{k=0}^n A_k \cdot (2 \cdot \tilde{c}_1 - 1)^k \quad (3-16)$$

In Abbildung 3-67 sind für Methanol-, Ethanol- und 1-Propanol-Wasser-Gemische die aus Meßwerten und nach den Gleichungen 3-15 und 3-16 berechneten Exzeß-Dielektrizitätskonstanten und Exzeß-Verlustzahlen dargestellt. Mit den Gleichungen 3-10 und 3-11 wurden  $\Delta \epsilon'$  und  $\Delta \epsilon''$  aus den Meßwerten bestimmt.

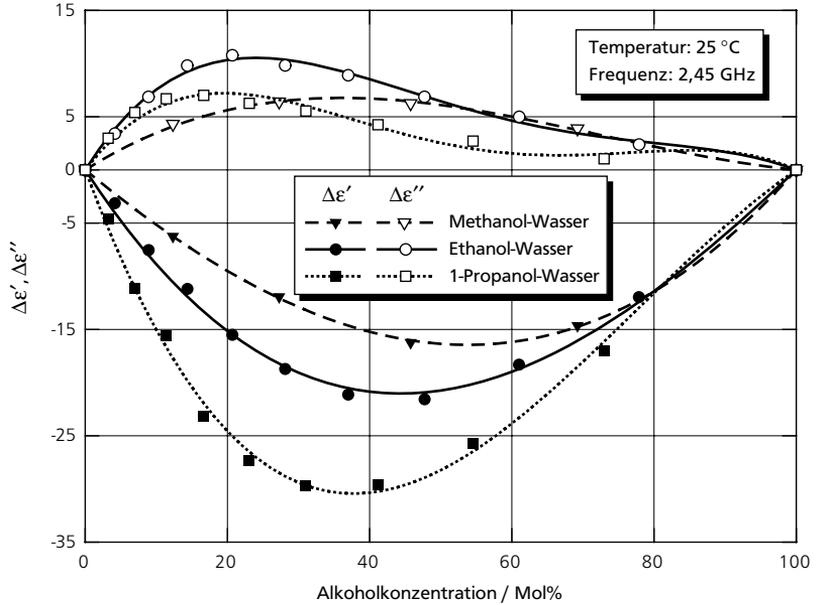


Abb. 3-67: Aus Meßwerten und nach Redlich-Kister (Gleichungen 3-15 und 3-16) bestimmte Exzeß-Dielektrizitätskonstante und Exzeß-Verlustzahl von Alkohol-Wasser-Gemischen bei 25 °C und 2,45 GHz.

In den Tabellen 3-5 und 3-6 sind die Werte der Parameter  $A_k$ , die mittels nichtlinearer Regression angepaßt wurden, für die drei verschiedenen Alkohol-Wasser-Gemische zusammengestellt.

Tab. 3-5: Parameter zur Berechnung der Exzeß-Dielektrizitätskonstante von Alkohol-Wasser-Gemischen nach Redlich-Kister bei 25 °C und 2,45 GHz.

Gemisch	$A_0$ / -	$A_1$ / -	$A_2$ / -
Methanol-Wasser	-65,4	-10,0	-
Ethanol-Wasser	-83,0	19,5	-
1-Propanol-Wasser	-112,9	67,6	-

Tab. 3-6: Parameter zur Berechnung der Exzeß-Verlustzahl von Alkohol-Wasser-Gemischen nach Redlich-Kister bei 25 °C und 2,45 GHz.

Gemisch	$A_0$ / -	$A_1$ / -	$A_2$ / -
Methanol-Wasser	24,4	-17,8	-
Ethanol-Wasser	25,8	-40,6	40,0
1-Propanol-Wasser	10,1	-28,5	49,7

Im in Abbildung 3-67 gezeigten Beispiel können die Werte mit  $n = 1$  oder  $n = 2$  beschrieben werden. Solche Mischungen werden als Mischungen mittlerer Komplexität bezeichnet. Ist  $n = 0$  wird von einfacher und ist  $n \geq 3$  von komplexer Mischung gesprochen (s. PRAUSNITZ u. a., 1986). Eine komplexe Mischung ist das System aus Isopropanol/Ethanol. Hier mußte  $n = 4$  gewählt werden, um die Daten zu beschreiben (s. Abbildungen 3-68 und 3-69 sowie Tabellen 3-7 und 3-8).

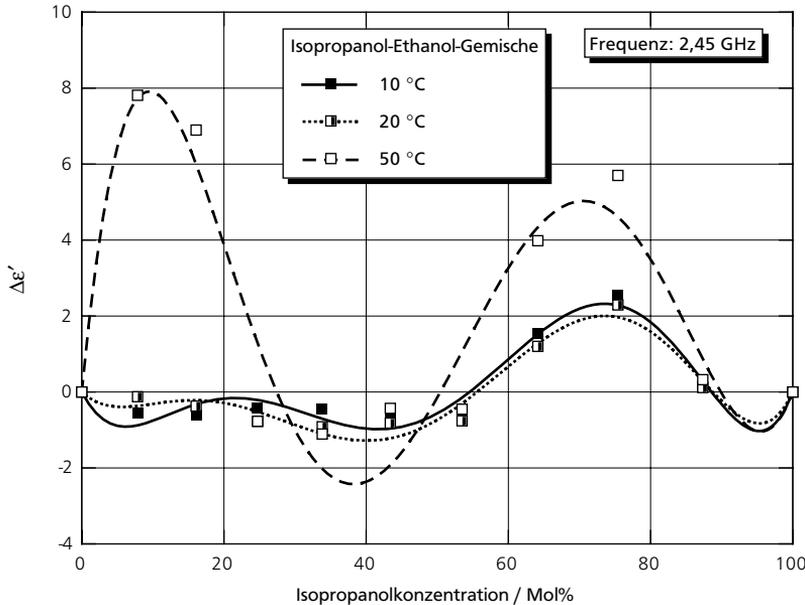


Abb. 3-68: Aus Meßwerten und nach Redlich-Kister (Gleichung 3-15) bestimmte Exzeß-Dielektrizitätskonstante von Isopropanol-Ethanol-Gemischen bei 2,45 GHz.

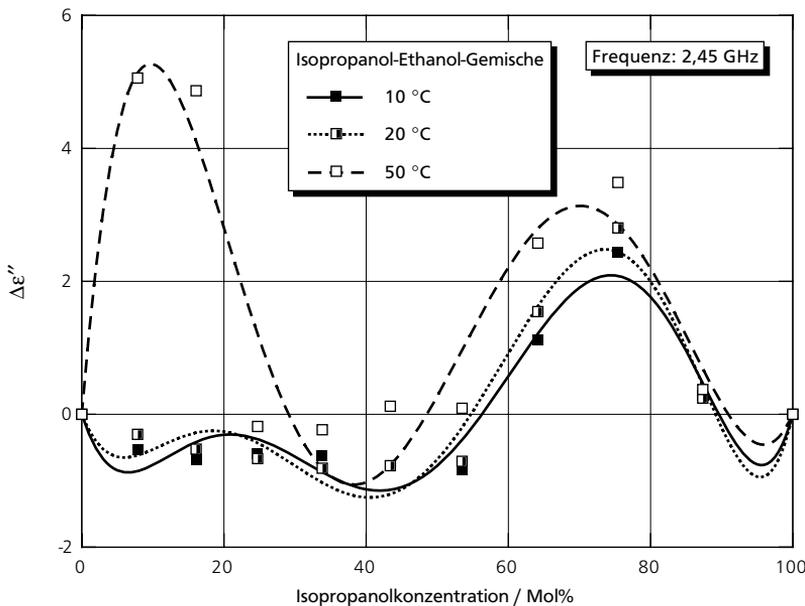


Abb. 3-69: Aus Meßwerten und nach Redlich-Kister (Gleichung 3-16) bestimmte Exzeß-Verlustzahl von Isopropanol-Ethanol-Gemischen bei 2,45 GHz.

Bestimmung  
der relativen  
Dielektrizitätskonstante

Die Anpassung ist im Fall der Isopropanol-Ethanol-Gemische deutlich schlechter als bei den Alkohol-Wasser-Gemischen. Es macht allerdings keinen Sinn, die Zahl der Parameter  $A_k$  weiter zu erhöhen. Dafür müßte dann auch die Zahl der Meßpunkte erhöht werden.

Tab. 3-7: Parameter zur Berechnung der Exzeß-Dielektrizitätskonstante von Isopropanol-Ethanol-Gemischen nach Redlich-Kister bei 2,45 GHz.

Temperatur	$A_0 / -$	$A_1 / -$	$A_2 / -$	$A_3 / -$	$A_4 / -$
10 °C	-2,3	20,1	55,1	-26,8	-95,3
20 °C	-3,0	21,7	44,9	-33,1	-70,5
50 °C	-0,6	66,3	61,5	-198,8	11,9

Tab. 3-8: Parameter zur Berechnung der Exzeß-Verlustzahl von Isopropanol-Ethanol-Gemischen nach Redlich-Kister bei 2,45 GHz.

Temperatur	$A_0 / -$	$A_1 / -$	$A_2 / -$	$A_3 / -$	$A_4 / -$
10 °C	-3,1	18,6	51,8	-21,7	-84,8
20 °C	-2,7	24,0	54,5	-33,9	-88,5
50 °C	1,1	38,3	34,1	-115,3	17,6

Die Beschreibung der relativen Dielektrizitätskonstante der Mischungen permanenter Dipole mit der *Redlich-Kister-Gleichung* hat den Nachteil, daß immer ausreichend Meßdaten zur Verfügung stehen müssen, um die Parameter anpassen zu können, da diese Gleichung nicht direkt eine physikalische Gesetzmäßigkeit beschreibt. Außer der Aussage, daß die Komplexität einer Mischung mit steigender Zahl der Parameter  $A_k$  zunimmt, kann keine weitergehende Aussage, wie beispielsweise über die Art der Wasserstoffbrückenbindungen in einem solchen System, gemacht werden. Auch andere Gleichungen sind nicht besser geeignet. So wurden für die Berechnung der Viskosität von ineinander löslichen Flüssigkeiten eine Vielzahl von Gleichungen entwickelt, jedoch müssen auch hier jeweils eine unterschiedliche Anzahl Parameter an Meßdaten des Gemischs angepaßt werden (z. B. PAHL u. a., 1991). Für diese empirischen Gleichungen gilt allgemein, daß allein Informationen über die reinen Stoffe nicht ausreichend sind, um das Verhalten eines Gemischs zu beschreiben. Aus diesem Grund werden hier keine weiteren Gleichungen dieser Art vorgestellt.

Bisher wurden in diesem Kapitel nur Gemische betrachtet, die im gesamten Konzentrationsbereich ineinander löslich sind. Hat allerdings ein Gemisch eine Mischungslücke, wie z.B. Gemische aus 2-Butanol und Wasser (Mischungslücke bei 25 °C zwischen 5,3 Mol% (22 Vol.%) und 26,8 Mol% (65 Vol.%) 2-Butanol), liegt im Konzentrationsbereich der Mischungslücke ein disperses System vor (relative Dielektrizitätskonstante dieses Gemischs s. Abbildung 3-70). Zur Berechnung der relativen Dielektrizitätskonstante müßte dann je nach Konzentrationsbereich mit verschiedenen Gleichungen gearbeitet werden. Im Bereich der Mischungslücke z. B. mit der *Fricke-Mudgett-Gleichung* und in den Bereichen vollständiger

Löslichkeit mit der *Redlich-Kister-Gleichung*. Die Gleichungen sind nicht direkt anwendbar, da bei den Grenzkonzentrationen (Übergänge vollständige Löslichkeit–Mischungslücke) keine reinen Stoffe vorliegen. Davon wird aber bei allen Gleichungen ausgegangen. Umgehen läßt sich dies, indem die Systeme mit Grenzkonzentration als neue „reine“ Stoffe angesehen und die Konzentrationen entsprechend umgerechnet werden (s. Abbildung 3–71).

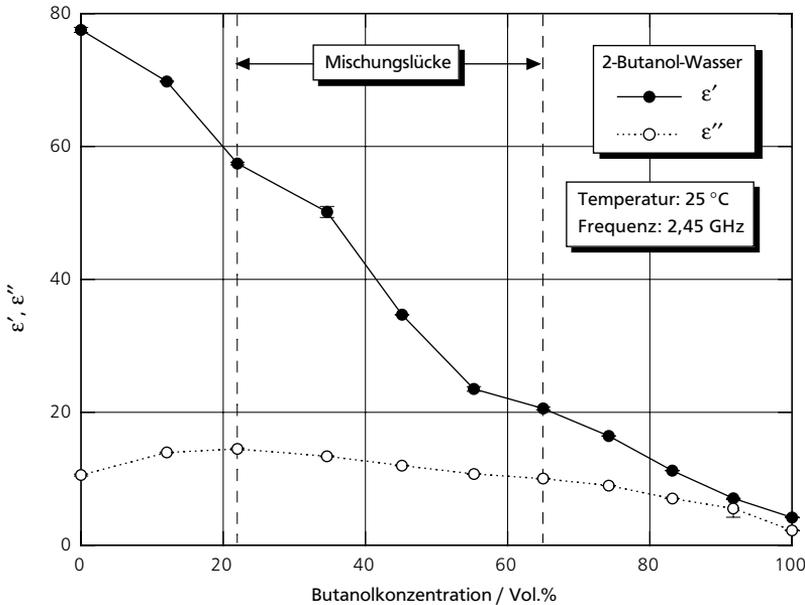


Abb. 3–70: Relative Dielektrizitätskonstante von 2-Butanol-Wasser-Gemischen bei 25 °C und 2,45 GHz (Mittelwerte mit Standardabweichungen).

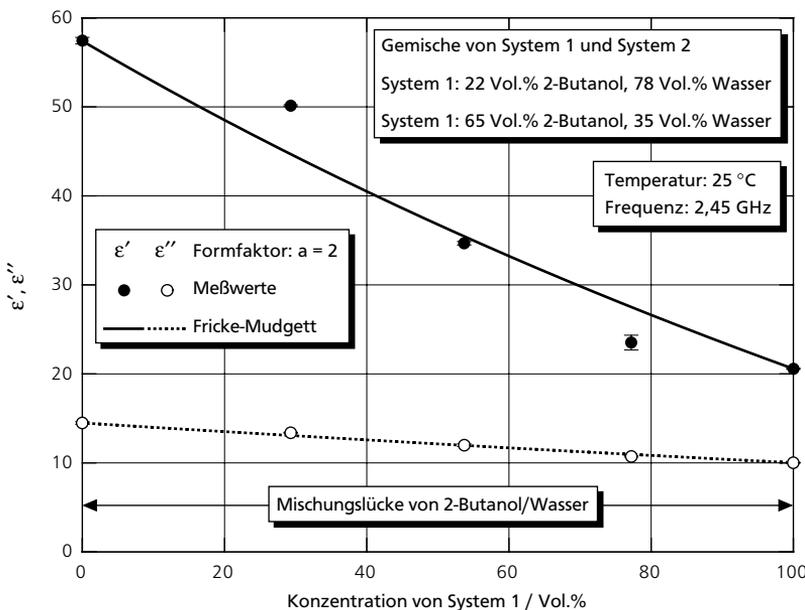


Abb. 3–71: Gemessene und nach Fricke-Mudgett (Formfaktor  $a = 2$ ) berechnete relative Dielektrizitätskonstante von 2-Butanol-Wasser-Gemischen bei 25 °C und 2,45 GHz im Bereich der Mischungslücke (die Konzentration wurde zur Berechnung auf Werte zwischen 0 und 100 Vol.% umgerechnet).

---

Bestimmung  
der relativen  
Dielektrizitätskonstante

Für die zwei Konzentrationsbereiche, in denen 2-Butanol und Wasser vollständig ineinander löslich sind, wurden keine Berechnungen durchgeführt, da die Zahl der Meßwerte für eine sinnvolle Anpassung der Parameter der *Redlich-Kister-Gleichung* hier nicht ausreicht.

### 3.3 Überprüfung der gemessenen relativen Dielektrizitätskonstante mit der theoretischen Eindringtiefe

Eine Überprüfung der Meßwerte der relativen Dielektrizitätskonstante ist wichtig, da entweder direkt mit der offenen Koaxialleitung gemessen wurde, oder es wurden die Resonatoren eingesetzt, die wiederum mit Meßwerten der offenen Koaxialleitung kalibriert wurden. Zwar lieferten die Vergleiche der eigenen Meßwerte mit Meßwerten aus der Literatur meist eine gute Übereinstimmung, jedoch verwendeten andere Autoren auch die Methode der offenen Koaxialleitung.

Nur mit dem  $E_{010}$ -Resonator werden die Dielektrizitätskonstante und Verlustzahl direkt aus den Meßwerten ohne den Einsatz eines weiteren Meßsystems berechnet. Im Bereich niedriger Werte ist die Übereinstimmung zwischen den Werten, die mit dem  $E_{010}$ -Resonator und der offenen Koaxialleitung ermittelt wurden, gut (vgl. Abbildung 3-46). Für höhere Werte der relativen Dielektrizitätskonstante ist allerdings kein Vergleich möglich, da mit dem  $E_{010}$ -Resonator nur im Bereich kleiner Werte gearbeitet werden kann (s. Kapitel 3.1.5).

Die theoretische Eindringtiefe  $s_{theo,p}$  ist zur Überprüfung gut geeignet, da sie aus der Änderung einer völlig anderen Größe – der Temperatur – bestimmt werden kann.

Nachteilig ist allerdings, daß die Dielektrizitätskonstante und die Verlustzahl nicht einzeln bestimmt werden können, sondern nur der über die theoretische Eindringtiefe  $s_{theo,p}$  gegebene Zusammenhang. Die theoretische Eindringtiefe konnte mittels Temperaturverteilungen auch nur für 2,45 GHz bestimmt werden, da dies die Arbeitsfrequenz der Mikrowellengeräte ist.

Mit dem in Kapitel 3.1.7 beschriebenen Versuchsaufbau wurden Wasser, wäßrige Zuckerlösungen sowie wäßrige Kochsalzlösungen untersucht. Es wurden Saccharose-, Fruktose- und Glukoselösungen bis 60 Gew.% eingesetzt. Die Salzlösungen hatten Kochsalzgehalte von 0,5, 1 und 2 Gew.%. Allen Stoffen wurde 2 Gew.% Agar-Agar zur Gelbildung zugesetzt. Da diese Gele nur bis etwa 50 °C fest bleiben, wurde bei der Bestimmung der theoretischen Eindringtiefe aus Temperaturverteilungen nicht mit höheren Temperaturen gearbeitet. Die Dielektrizitätskonstanten und Verlustzahlen wurden mit der Methode der offenen Koaxialleitung bestimmt.

Da es sich bei allen hier untersuchten Stoffen um Agar-Agar-Gele handelt, ist dies in den Ergebnisdiagrammen nicht nochmals vermerkt.

In Abbildung 3-72 ist ein typisches Temperaturprofil zu sehen, wie es in einer 40 Gew.%igen Saccharoselösung nach einer Mikrowellenerwärmung von 60 s ge-

messen wurde. Die Lösung hat sich nur bis zu einer Gutstiefe von 3 cm erwärmt. Im Kern herrscht noch die Anfangstemperatur von  $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Der Temperaturengleich durch Wärmeleitung ist bei so kurzen Erwärmungszeiten vernachlässigbar (s. Anhang A 4). Die leichte Erwärmung des Bodenbereichs (6–7 cm Gutstiefe) wird durch Wärmeleitung über die Standfläche verursacht.

Überprüfung der gemessenen relativen Dielektrizitätskonstante mit der theoretischen Eindringtiefe

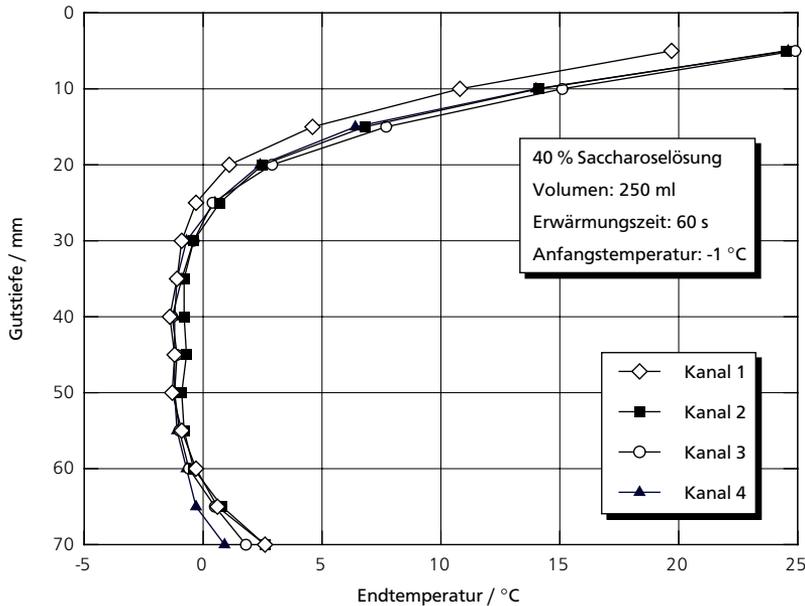


Abb. 3–72: Zur Bestimmung der theoretischen Eindringtiefe gemessenes Temperaturprofil.

Aus diesen Temperaturprofilen wurde dann, wie in Kapitel 3.1.7 erläutert, die theoretische Eindringtiefe  $s_{theo,p}$  ermittelt. Für Wasser und Saccharoselösungen ist der Vergleich der nach den beiden Methoden bestimmten Werte von  $s_{theo,p}$  in Abbildung 3–73 gezeigt. Die Mittelwerte stimmen sehr gut überein. Die Standardabweichungen werden schon bei geringen Temperaturschwankungen groß, da in Gleichung 3–9 der Logarithmus der Temperaturdifferenzen eingeht. Mit steigender Temperatur steigt  $s_{theo,p}$  an, d. h. die Mikrowellen werden bei höheren Temperaturen weniger stark abgeschwächt bzw. dringen tiefer in die Substanz ein, bis gleiche Abschwächung im Vergleich zu niedrigeren Temperaturen erreicht wird. Dies ist auch bei der Betrachtung der dielektrischen Eigenschaften zu erkennen. Im Fall der Saccharoselösungen sinken die Dielektrizitätskonstanten und Verlustzahlen fast im gesamten hier betrachteten Temperaturbereich (vgl. Abbildungen 3–38 und 3–39 in Kapitel 3.2.2). Ist die relative Dielektrizitätskonstante eines Stoffes klein, so kann er weniger Energie speichern und dissipieren als ein Material mit großer relativer Dielektrizitätskonstante.

Die Ergebnisse sind für Glukose- und Fruktoselösungen fast gleich, wie in Abbildung 3–74 am Beispiel der 40Gew.-%igen Zuckerlösungen zu sehen ist. Die Art des gelösten Zuckers hat, wie auch bei den Dielektrizitätskonstanten und Verlustzahlen, keinen Einfluß auf das Ergebnis.

Bestimmung  
der relativen  
Dielektrizitätskonstante

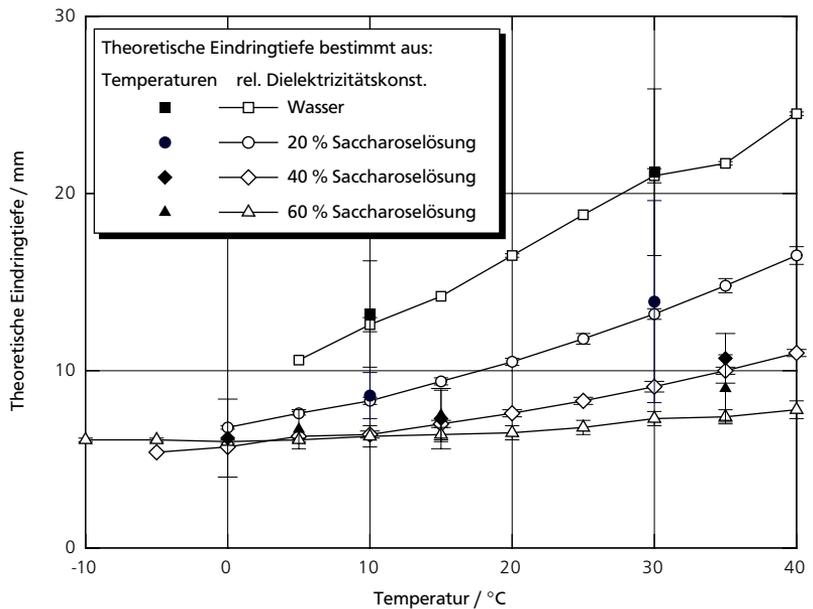


Abb. 3-73: Aus Temperaturverteilungen und aus relativen Dielektrizitätskonstanten bestimmte theoretische Eindringtiefe von Wasser und wäßrigen Saccharoselösungen.

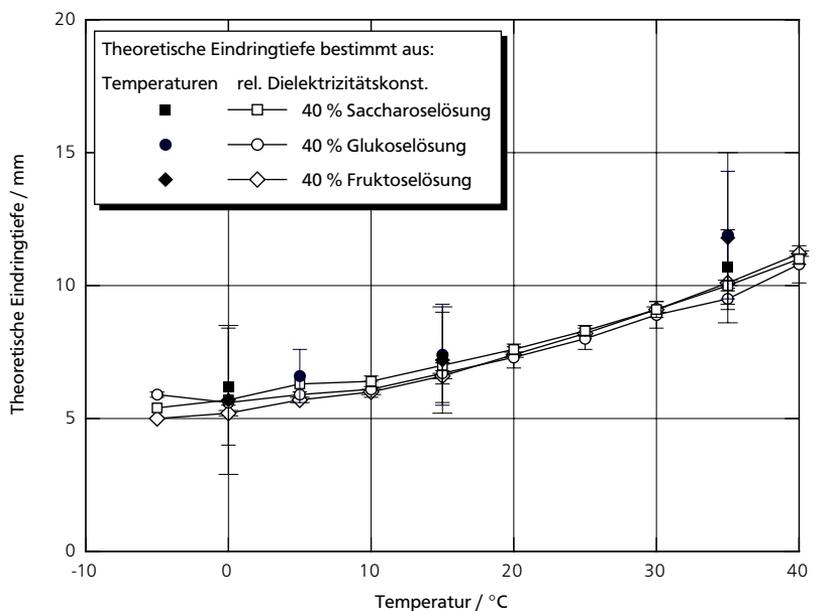
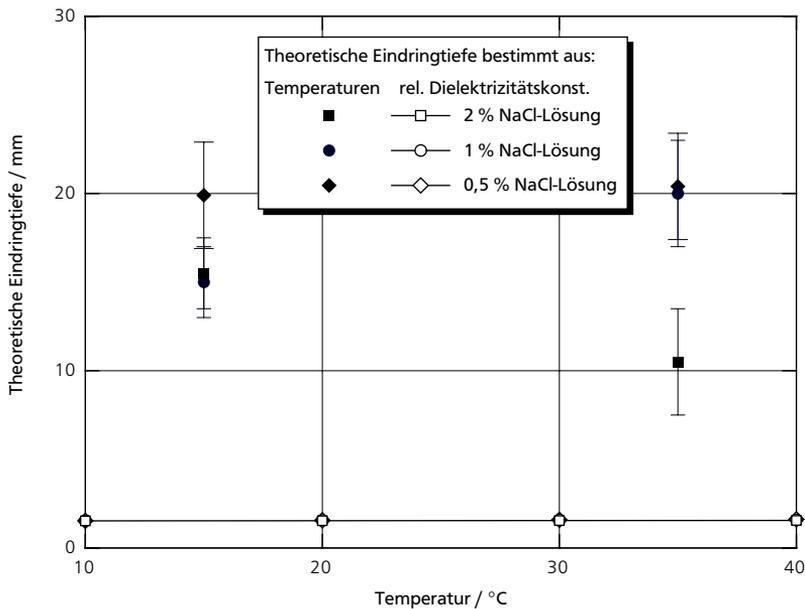


Abb. 3-74: Aus Temperaturverteilungen und aus relativen Dielektrizitätskonstanten bestimmte theoretische Eindringtiefe von verschiedenen wäßrigen Zuckerlösungen.

Die bisher vorgestellten theoretischen Eindringtiefen sind mit Werten bis 20 mm recht groß. Im Vergleich dazu sind die Werte für Salzlösungen sehr gering, da aufgrund der Ionenleitfähigkeit die Verlustzahlen stark ansteigen. Es werden nur noch Werte von  $s_{theo,P}$  von ungefähr 3 mm erreicht. Solch niedrige Werte sind aus Temperaturdifferenzen nicht mehr zu bestimmen (vgl. Abbildung 3-75).



Überprüfung der gemessenen relativen Dielektrizitätskonstante mit der theoretischen Eindringtiefe

Abb. 3-75: Aus Temperaturverteilungen und aus relativen Dielektrizitätskonstanten bestimmte theoretische Eindringtiefe von wäßrigen Kochsalzlösungen.

Daß dies mit dem einfachen Versuchsaufbau nicht zu realisieren ist, soll an folgendem Beispiel erläutert werden:

Werden in Gleichung 3-9 die theoretische Eindringtiefe  $s_{theo,P} = 3$  mm und die Differenz der Gutstiefen  $x_1 - x_2 = 5$  mm gesetzt, ergibt sich nach Umformen für die Differenz der Temperaturänderungen  $\Delta T_1 - \Delta T_2 = 5,29$ . Nimmt man weiterhin an, daß die Anfangstemperatur  $0$  °C und  $\Delta T_2 = 10$  °C sei, so müßte am nächsten Meßpunkt mit 5 mm Abstand eine Temperaturerhöhung  $\Delta T_1 > 50$  °C gemessen werden. Die Platzierung der Temperatursensoren ist allerdings dafür nicht mit der nötigen Genauigkeit möglich. Zudem ist dann der Einfluß der Wärmeleitung im Gut schon so groß, daß keine sinnvollen Ergebnisse mehr erzielt werden können.

Der vorgestellte Aufbau zur Bestimmung der theoretischen Eindringtiefe  $s_{theo,P}$  liefert sinnvolle Ergebnisse nur für Substanzen wie Zuckerlösungen mit nicht zu kleinen Werten von  $s_{theo,P}$ , d. h. mit nicht zu hohen Verlustzahlen. Für diese Substanzen wurden die gemessenen relativen Dielektrizitätskonstanten bestätigt, wie der Vergleich der nach den beiden Methoden bestimmten Werte von  $s_{theo,P}$  gezeigt hat. Für Stoffe mit hohen Verlustzahlen wie die Salzlösungen kann die theoretische Eindringtiefe so nicht ermittelt werden, da die Temperaturprofile nicht mehr ausreichend genau bestimmt werden können.



## 4 Mikrowellenerwärmung

### 4.1 Bedeutung der relativen Dielektrizitätskonstante für die Mikrowellenerwärmung

Ist die relative Dielektrizitätskonstante eines Stoffes bekannt, können zum einen generelle Aussagen zum Verhalten dieses Stoffes beim Erwärmen mit Mikrowellen gemacht werden. Wenn Real- und Imaginärteil der relativen Dielektrizitätskonstante klein sind, wird nur wenig Mikrowellenenergie absorbiert, und der Stoff erwärmt sich nur geringfügig. Sind beide Anteile der relativen Dielektrizitätskonstante groß, wie beispielsweise bei Wasser, läßt sich eine Substanz mit Mikrowellen gut erwärmen. Die theoretische Eindringtiefe ist zusätzlich zur relativen Dielektrizitätskonstante ein Maß dafür, ob eher Zentral- oder Randerwärmung zu erwarten ist. Ist die theoretische Eindringtiefe groß und ist daneben eine gekrümmte Oberfläche (z. B. beim Erwärmen einer Kugel) vorhanden, ist die höchste Temperatur aufgrund der Fokussierung im Gutsinneren zu erwarten. Bei sehr kleinen theoretischen Eindringtiefen dagegen wird ein großer Teil der Mikrowellenenergie bereits in den äußeren Substanzschichten absorbiert, und die höchsten Temperaturen treten in den Randbereichen auf (z. B. bei Salzlösungen).

Neben diesen allgemeinen Aussagen kann mit Kenntnis der Dielektrizitätskonstante und Verlustzahl einer Substanz und den jeweiligen Temperaturabhängigkeiten aber darüberhinaus auch die zur Erwärmung eines Guts notwendige Zeit berechnet werden. Mit dem Modell von GR NEBERG (1994) ist es möglich, die zum Erreichen einer gewünschten, mittleren Endtemperatur notwendige Erwärmungszeit in einem Haushaltsmikrowellengerät vorzuberechnen, sofern die relative Dielektrizitätskonstante des zu erhitzenden Stoffes bekannt ist. Für jedes Mikrowellengerät muß dazu der Geräteparameter  $C$  einmal experimentell bestimmt werden. Für dieses Modell wurde hier noch geprüft, inwieweit ein verändertes Garraumvolumen des Mikrowellengeräts von Einfluß ist (s. Kapitel 4.3.2).

Da mit diesem Modell Erwärmungszeiten vorausberechnet werden können und somit auf Experimente zur Erwärmung verzichtet werden kann, wurde weiterhin geprüft, ob dieses Modell auf eine kontinuierliche Technikumsanlage angewendet werden kann. Ist dies möglich, kann auch in diesem Fall mit Kenntnis der relativen Dielektrizitätskonstante die zum Erreichen einer geforderten Produktendtemperatur notwendige Erhitzungszeit bestimmt werden (s. Kapitel 4.4.2).

Nachteilig ist nur, daß beim Erwärmen mit Mikrowellen die Temperaturverteilungen im Gut sehr ungleichmäßig, d. h. die Abweichungen von der mittleren Endtemperatur sehr groß sein können. In den folgenden Kapiteln werden deshalb auch verschiedene Maßnahmen vorgestellt, wie bei der Erwärmung im Haushaltsmikrowellengerät und in der Technikumsanlage eine bessere Temperaturverteilung erzielt werden kann.

## 4.2 Meßmethoden

### 4.2.1 Temperaturmessung im Mikrowellenfeld

Zur Messung der Temperatur während einer Mikrowellenerwärmung müssen spezielle Temperaturmeßverfahren angewendet werden, da beispielsweise das Metall von Thermoelementen das Mikrowellenfeld stark stören kann. Geeignet sind faseroptische Temperatursensoren, da die Glasfaser des Sensors das elektrische Feld nicht stört und damit der Sensor auch nicht dadurch falsche Ergebnisse liefert, daß er selbst von den Mikrowellen erwärmt wird. Bei dieser Art der Temperaturbestimmung wird Licht einer definierten Wellenlänge durch die Glasfaser an die Glasfaserspitze, die Meßstelle, gesendet. Die Glasfaser wird in der Regel nicht selbst als Sensor genutzt, sondern an der Meßstelle befindet sich ein Sensorkristall, der je nach seiner Temperatur das Licht in charakteristischer Weise zurücksendet. Je nach Hersteller werden zwei verschiedene Prinzipien zur Temperaturbestimmung angewendet.

Zum einen werden Sensorkristalle eingesetzt, bei denen sich in Abhängigkeit von der Temperatur des Sensorkristalls die Wellenlänge des zurückgesendeten Lichts ändert, so daß aus der Änderung der Wellenlänge auf die Temperatur geschlossen werden kann.

Die andere Variante besteht darin, nicht kontinuierlich Licht durch die Glasfaser zu senden, sondern nur Lichtimpulse. Dadurch wird der Sensorkristall angeregt und sendet ein exponentiell abklingendes Lumineszenzsignal zurück. Die Zeit, während der das Lumineszenzsignal auf den  $1/e$ -ten Teil abnimmt, wird gemessen. Diese Zerfallszeit, die Lumineszenzabklingzeit, ist charakteristisch für jede Temperatur. Diese Zerfallszeiten liegen im Bereich von etwa 0,5 bis 5,5 ns (HOLBACH, 1989).

Der typische Aufbau eines solchen Sensors ist in Abbildung 4-1 dargestellt (nach LUXTRON, 1989). Die Glasfaser ist oft von einem Schutzmantel aus Kunststoff umgeben, so daß übliche Sensordurchmesser etwa 0,8 bis 2 mm betragen.

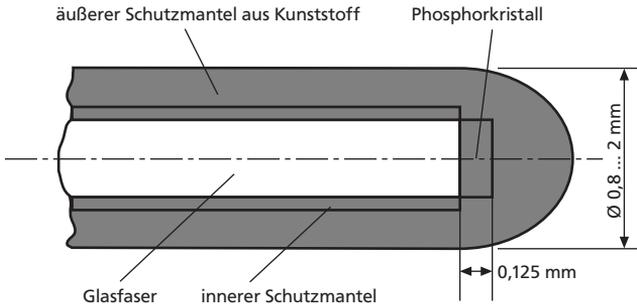


Abb. 4-1: Schematische Darstellung des Aufbaus eines faseroptischen Temperatursensors (nach LUXTRON, 1989).

Für die Experimente der vorliegenden Arbeit wurden zwei Geräte der Firma Luxtron (*Fluoroptic Thermometer Model 755*) eingesetzt, an die jeweils bis zu vier Sensoren angeschlossen werden können. Die Genauigkeit dieses Temperaturmeßsystems beträgt ohne Kalibrierung  $\pm 2$  K im gesamten Temperaturmeßbereich von  $-200$  bis  $450$  °C. Je nach verwendetem Sensor ist der Temperaturbereich auch geringer. Wird das System für eine bestimmte Temperatur kalibriert, so ist die Genauigkeit  $\pm 0,5$  K im Bereich von  $\pm 50$  K um die Kalibriertemperatur. Mit diesem System kann für jeden Sensor bis zu zehnmal pro Sekunde gemessen werden (HOHLBACH, 1989, LUXTRON, 1989).

Temperaturprofile wurden aufgenommen, indem mit mehreren Sensoren gleichzeitig an verschiedenen Stellen im Produkt während einer Mikrowellenerwärmung gemessen wurde. Schwierig ist dabei das exakte Platzieren der Sensoren, da diese sich leicht biegen. Je nachdem, wie tief die Sensoren in ein Produkt eingesteckt werden, beträgt die horizontale Ortsunsicherheit bis etwa 3 mm.

#### 4.2.2 Bestimmung der vom Produkt aufgenommenen Leistung

Die während einer Mikrowellenerwärmung der Dauer  $t$  vom erhitzten Produkt aufgenommene Leistung  $P$  wurde mit folgender Gleichung berechnet:

$$P = m \cdot c_p \cdot \frac{T_e - T_0}{t} = V \cdot \rho \cdot c_p \cdot \frac{T_e - T_0}{t} \quad (4-1)$$

Es sind  $m$  die Masse,  $V$  das Volumen,  $\rho$  die Dichte und  $c_p$  die spezifische Wärmekapazität des Produkts sowie  $T_0$  die Temperatur vor der Erwärmung und  $T_e$  die mittlere Temperatur nach der Erwärmung.

Die untersuchten Flüssigkeiten wurden nach der Erwärmung kurz gerührt, um Temperaturunterschiede auszugleichen. Danach wurde die mittlere Endtemperatur  $T_e$  mit einem Thermoelement gemessen. Die Versuche zur aufgenom-

menen Leistung wurden dreimal durchgeführt und der Mittelwert der Leistung  $P$  berechnet. Die Gefäße waren stets mit Polyurethanschaum isoliert, um Wärmeverluste zu vermeiden.

Ein Spezialfall bei der Bestimmung der aufgenommenen Leistung ist die Ermittlung der Mikrowellenausgangsleistung  $P_{MW}$  eines Haushaltsgeräts.  $P_{MW}$  ist die Leistung, die maximal von einem zu erwärmenden Gut aufgenommen wird.  $P_{MW}$  wird nach der Norm DIN 44 566 wie folgt bestimmt:

In einem zylindrischen Glasgefäß mit einem Durchmesser von 190 mm werden 1.000 g Trinkwasser (Anfangstemperatur  $T_0 = 10^\circ\text{C}$ ) auf höchster Leistungsstufe des Mikrowellengeräts erwärmt. Es wird die Zeit  $t$  gemessen, die erforderlich ist, das Wasser um 10 K auf  $20^\circ\text{C}$  zu erwärmen. Nach der Erwärmung ist das Wasser zu rühren und anschließend die Endtemperatur  $T_e$  zu messen. Die Mikrowellenausgangsleistung  $P_{MW}$  wird dann mit Gleichung 4-1 ermittelt. Es sind mindestens zwei Versuche durchzuführen und der Mittelwert von  $P_{MW}$  zu bilden.

## 4.3 Erwärmung im Haushaltsmikrowellengerät

### 4.3.1 Verwendete Mikrowellengeräte

Es wurden Haushaltsmikrowellengeräte mit verschiedenen Leistungen und Garraumvolumina für die Versuche der vorliegenden Arbeit verwendet. Die technischen Daten dieser Geräte sind in Tabelle 4-1 zusammengestellt. Alle Geräte sind mit einem Drehteller ausgerüstet, der immer während der Erwärmung das Gut dreht. Die Geräte wurden deshalb mit einem Schalter nachgerüstet, so daß Experimente auch ohne Drehteller möglich waren. Zusätzlich wurde eine Durchführung für die faseroptischen Sensoren in die Geräte eingebaut, um die Temperatur während der Mikrowellenerwärmung messen zu können. Auf den Aufbau eines Haushaltsmikrowellengeräts wird hier nicht eingegangen. Eine gute Darstellung findet sich beispielsweise bei BUFFLER (1993).

Tab. 4-1: Verwendete Haushaltsmikrowellengeräte.

Hersteller und Gerätetyp	Garraum-abmessungen $B / \text{mm} \times H / \text{mm} \times T / \text{mm}$	Garraum-volumen $V_{MW} / \text{l}$	angegebene Mikrowellen-leistung $P_{\text{nenn}} / \text{W}$	elektrische Leistungs-aufnahme $P_{\text{el}} / \text{W}$	Mikrowellen-leistung nach DIN 44 566 $P_{MW} / \text{W}$
<i>Moulinex FM 3735</i>	335 × 280 × 360	33	750	1.500	710
<i>Clatronic MW 704</i>	372 × 215 × 350	29	850	1.350	800
<i>Sharp R-2V11H</i>	285 × 185 × 313	17	600	960	600

Die Mikrowellenausgangsleistung  $P_{MW}$  der in dieser Arbeit eingesetzten Haushaltsmikrowellengeräte wurde entsprechend der vorgestellten Versuchsvorschrift aus der Norm DIN 44 566 ermittelt. Jedoch wurde anstelle von Trinkwasser demineralisiertes Wasser verwendet. Die Leistung  $P_{MW}$  wurde aus dem Ergebnis von mindestens fünf Einzelversuchen gemittelt. Etwa alle vier Monate wurde dieser Wert überprüft. Bei allen verwendeten Geräten blieb der Mittelwert konstant, d. h. Alterungsvorgänge wurden nicht beobachtet.

#### 4.3.2 Einfluß des Garraumvolumens auf die vom Produkt aufgenommene Leistung

Die Leistungsaufnahme des Produkts ist bei verschiedenen Mikrowellengeräten unterschiedlich. Ein Beispiel für reale Verhältnisse ist in Abbildung 4-2 für zwei unterschiedliche Haushaltsmikrowellengeräte gezeigt. Demineralisiertes Wasser wurde in zylindrischen Kunststoffbechern von 20 auf 40 °C erwärmt. Dabei wurde das zu erwärmende Volumen variiert. Das Verhältnis Füllhöhe  $h$  zu Durchmesser  $d$  in den Bechern war dabei stets  $h/d = 1$ .

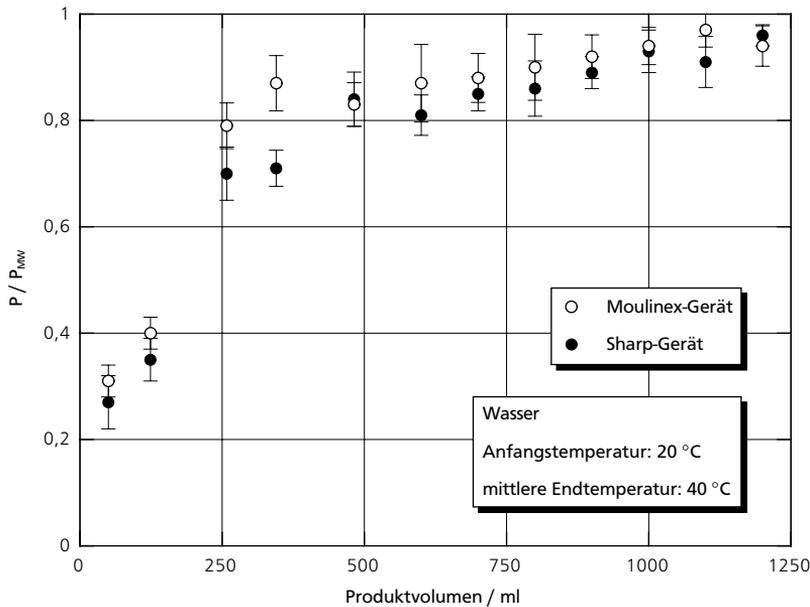


Abb. 4-2: Von demineralisiertem Wasser aufgenommene Leistung bei der Erwärmung in verschiedenen Haushaltsmikrowellengeräten.

Der typische Sättigungsverlauf der aufgenommenen Leistung ist deutlich zu erkennen. Kleine Volumina nehmen nur einen Teil der angebotenen Leistung auf. Erst im Bereich großer Volumina wird annähernd die Mikrowellenleistung  $P_{MW}$  aufgenommen. Die vom Produkt aufgenommene Leistung  $P$  bezogen auf die Mikrowellenleistung  $P_{MW}$  ist beim *Sharp*-Gerät niedriger als beim *Moulinex*-Gerät.

Mit dem von GR NEBERG entwickelten Modell (Gleichung 2-56 aus Kapitel 2.3.2) ist es nun möglich, verschiedene Haushaltsmikrowellengeräte bzgl. der Leistungsaufnahme der in ihnen erwärmten Stoffe miteinander zu vergleichen. Charakteristische Größe dafür ist der Geräteparameter  $C$  (GR NEBERG, 1994 ).

$$\frac{P}{P_{MW}} = 1 - \exp\left(-C \cdot A_{Mie} \cdot \frac{A_{1,3}}{A_{MW}}\right) \tag{2-56}$$

Je größer der Parameter  $C$  ist, desto größer ist die aufgenommene Leistung auch schon von kleinen Produktmengen.  $C$  ist daher ein Maß für die Güte der Einkopplung der elektromagnetischen Wellen. Im Idealfall  $C \rightarrow \infty$  wäre die aufgenommene Leistung unabhängig von der zu erwärmenden Produktmenge.

Um Vergleiche zu erleichtern, wurden die Oberflächen  $A_{1,3}$  und  $A_{MW}$  in Gleichung 2-56 durch die entsprechenden Volumina des Produkts  $V$  und des Garraums  $V_{MW}$  ausgedrückt.

$$\frac{P}{P_{MW}} = 1 - \exp\left(-C \cdot A_{Mie} \cdot \left(\frac{V}{V_{MW}}\right)^{2/3}\right) \tag{4-2}$$

Da die aufgenommene Leistung beim *Sharp*-Gerät niedriger als beim *Moulinex*-Gerät ist, ist auch der für das Gerät von *Sharp* bestimmte Parameter  $C$  niedriger als beim *Moulinex*-Gerät:  $C_{Sharp} = 24 < C_{Moulinex} = 42$ . Die nach Gleichung 4-2 berechneten Kurven und die Meßwerte sind in Abbildung 4-3 aufgetragen. Der temperaturabhängige Absorptionsquerschnitt  $A_{Mie}$  wurde nach Gleichung 2-57 berechnet. Die relative Dielektrizitätskonstante von Wasser wurde dafür in Abhängigkeit von der Temperatur gemessen.

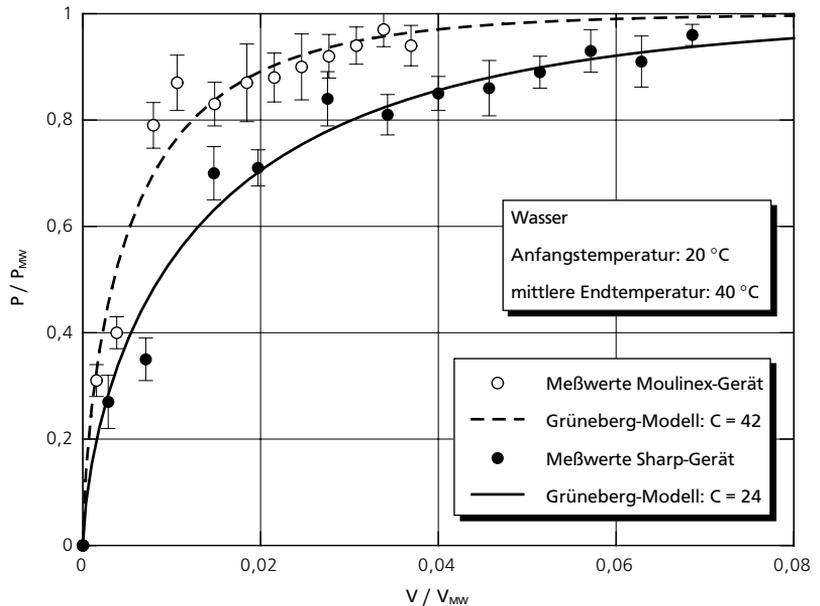


Abb. 4-3: Von demineralisiertem Wasser bei der Mikrowellenerwärmung aufgenommene Leistung (Meßwerte und Berechnung).

In die Gleichungen 2-56 bzw. 4-2 gehen zwei Parameter des verwendeten Mikrowellengeräts ein, die Projektionsfläche  $A_{MW}$  des Garraums bzw. das Garraumvolumen  $V_{MW}$  und der Parameter  $C$ . Sowohl den Untersuchungen von GR NEBERG (1994) als auch dem in Abbildung 4-3 gezeigten Vergleich ist nicht zu entnehmen, ob der Parameter  $C$  auch eine Funktion des Garraumvolumens  $V_{MW}$  ist. Bei allen bisherigen Vergleichen wurden jeweils verschiedene Geräte mit unterschiedlichen Garraumvolumina und Einkopplungen untersucht. Ziel der weiteren Untersuchungen war daher, Experimente zur Leistungsaufnahme mit einem Mikrowellengerät durchzuführen, bei dem das Garraumvolumen verändert wird, die Einkopplung jedoch nicht.

Dazu wurde das Mikrowellengerät der Firma *Moulinex* aufgrund seines großen Garraumvolumens von  $V_{MW} = 33$  l ausgewählt. Es wurden Einsätze aus Blech konstruiert und so das Garraumvolumen verkleinert (vgl. Abbildung 4-4). Die Abmessungen und Volumina dieser Einsätze sind in Tabelle 4-2 zusammengestellt.

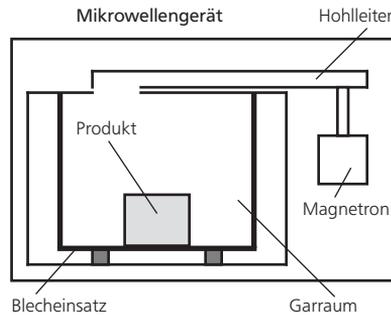


Abb. 4-4: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus eines Mikrowellengeräts mit verkleinertem Garraum.

Mikrowellengerät	Garraumabmessungen			Garraumvolumen $V_{MW}$ / l
	B / mm	H / mm	T / mm	
<i>Moulinex</i>	335	280	360	33 (Originalgerät)
„	310	250	330	25 (geometrisch ähnlich)
„	300	240	320	22,5 „
„	290	230	310	20 „
„	270	220	290	17,5 „
„	310	170	330	17,5 (geom. nicht ähnlich)
<i>Sharp</i>	285	185	313	17 (Originalgerät)

Tab. 4-2: Abmessungen der Garräume (geometrisch ähnlich bzw. geometrisch nicht ähnlich jeweils im Vergleich zum Originalgerät der Firma *Moulinex*).

Für jeden dieser Einsätze wurden Versuche zur aufgenommenen Leistung in Abhängigkeit vom Produktvolumen durchgeführt. In allen Fällen wurden die typischen Sättigungsverläufe der aufgenommenen Leistung beobachtet. Jedoch verringerte sich die Mikrowellenausgangsleistung  $P_{MW}$  für alle Einsätze gegenüber dem Originalgerät deutlich (Bestimmung nach der Norm DIN 44 566). Die elektrische Anschlußleistung  $P_{el}$  blieb allerdings unverändert, d. h. der Wirkungsgrad  $\eta = P_{MW} / P_{el}$  verschlechterte sich. Der Geräteparameter  $C$  wurde für jedes Garraumvolumen berechnet. Für alle neuen Geräteeinbauten ergab sich ein Wert von  $C = 30 \pm 1$  (s. Tabelle 4-3). Dieser Wert ist niedriger als der des *Moulinex*-Originalgeräts, aber höher als der des *Sharp*-Geräts mit dem kleinen Garraumvolumen

Mikrowellenerwärmung

von 17 l (vgl. Abbildung 4-5). Ein kleines Garraumvolumen bedeutet demnach nicht zwingend auch einen kleinen Wert von  $C$ . Aus diesen Ergebnissen ist zu erkennen, daß der Geräteparameter  $C$  nicht allein die Güte der Einkopplung der Mikrowellen beschreibt, sondern auch vom Garraumvolumen eines Mikrowellengeräts abhängig ist, denn die Einkopplung selbst wurde durch die Einbauten nicht verändert. Allerdings wird durch die verschiedenen Einbauten die Abstimmung der Einkopplung auf den Garraum verändert. Hierdurch wird die Leistungsaufnahme im Vergleich zum Originalgerät dann insgesamt schlechter, wie in Abbildung 4-5 zu sehen ist.

Tab. 4-3: Mikrowellenleistung, Wirkungsgrad und Geräteparameter der verschiedenen Garräume.

Mikrowellen- gerät	Garraumvolumen $V_{MW} / l$	Mikrowellen- leistung $P_{MW} / W$	Wirkungs- grad $\eta = P_{MW} / P_{el}$	Geräte- parameter $C$
Moulinex	33 (Originalgerät)	710	0,55	42
„	25 (geometrisch ähnlich)	500	0,38	31
„	22,5 „	530	0,41	29
„	20 „	600	0,46	30
„	17,5 „	640	0,49	30
„	17,5 (geom. nicht ähnlich)	510	0,39	30

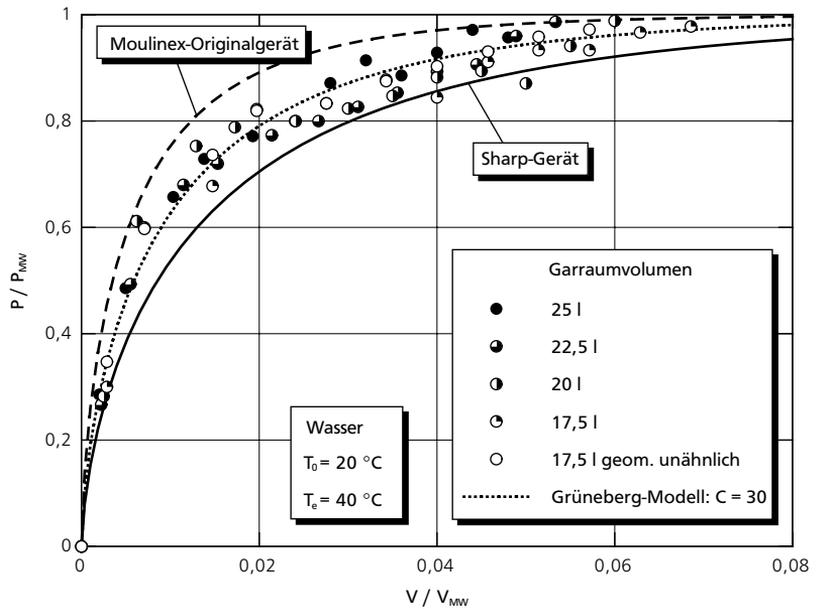


Abb. 4-5: Von demineralisiertem Wasser bei der Mikrowellenerwärmung in verschiedenen Garräumen aufgenommene Leistung (Meßwerte und Berechnung).

Obwohl bei der Mikrowellenerwärmung die Wärme im Inneren des erhitzten Materials „erzeugt“ wird, schwanken die Temperaturen im Material nach der Erwärmung oft stark. Gründe dafür sind, daß zum einen die örtliche und zeitliche Verteilung des elektrischen Feldes in einem Mikrowellengerät nicht konstant ist. Zusätzlich wird das Feld durch das zu erwärmende Gut (dielektrische Eigenschaften, Größe und Form) gestört. Zum anderen hängt auch die Energiedissipation selbst von den dielektrischen Eigenschaften des Guts ab. Wie in Kapitel 3 gezeigt wurde, ändert sich die relative Dielektrizitätskonstante mit steigender Temperatur, d. h. die Gutseigenschaften verändern sich während der Mikrowellenerwärmung. Mitentscheidend für die Temperaturverteilung, nicht jedoch für die insgesamt aufgenommene Leistung, ist auch die Geometrie des Guts. So kann je nach Größe und Geometrie Zentral- oder Randerwärmung auftreten. Für erste Abschätzungen ist die theoretische Eindringtiefe (vgl. Kapitel 2.1.2 und 4.1) gut geeignet. Ist die theoretische Eindringtiefe sehr klein (wenige Millimeter), tritt eher Randerwärmung auf. Ist sie dagegen größer, kann z. B. bei Materialien mit gekrümmter Oberfläche (Zylinder, Kugeln) aufgrund der Fokussierung der elektromagnetischen Wellen das Zentrum am stärksten erwärmt werden, sofern die Gutsabmessungen nicht zu groß sind.

Da diese Problematik bekannt ist, besteht bei Haushaltsmikrowellengeräten die Möglichkeit, mit reduzierter Leistung zu erwärmen. Die Leistung wird allerdings nicht kontinuierlich verringert, sondern eine mittlere, reduzierte Leistung wird durch den sog. Standardpulsbetrieb erreicht. Standardpulsbetrieb bedeutet, daß für vorgegebene Zeitintervalle mit maximaler Leistung erwärmt wird, danach wird für eine bestimmte Zeit ausgeschaltet, dann wieder eingeschaltet usw. Während der Ausschaltzeiten gleicht sich die Temperatur durch Wärmeleitung und Konvektion in einem gewissen Maß aus, was zu einer gleichmäßigeren Temperaturverteilung im Produkt führt. Die insgesamt benötigte Erwärmungszeit bis zum Erreichen einer gewünschten Endtemperatur verlängert sich dann entsprechend um die Summe der Ausschaltzeiten (ohne die Berücksichtigung von Wärmeverlusten).

Untersuchungen zur Temperaturverteilung bei maximaler Mikrowellenleistung wurden mit 2%igem, wäßrigem Agar-Agar-Gel als Modell-Lebensmittel durchgeführt. Das Gel wurde in zylindrischen Bechern oder rechteckigen Schalen bei maximaler Mikrowellenleistung erwärmt. Es wurden Gele verwendet, um Temperatenausgleich durch Konvektion bei der Erwärmung auszuschließen. Während der Erwärmung wurde mit den faseroptischen Sensoren die Temperatur an verschiedenen Stellen gemessen.

Weiterhin wurden typische mikrowellengeeignete Fertiggerichte erwärmt und ebenfalls die Temperaturverteilungen gemessen (verwendete Fertiggerichte s. Tabelle 4-4). Bei der Erwärmung der Fertiggerichte wurde außer mit maximaler Leistung auch mit verschiedenen Leistungsstufen im Standardpulsbetrieb gearbeitet. Daß auch das Erwärmen mit reduzierter Leistung im Standardpulsbetrieb nicht zum gewünschten Ziel führt, nämlich einer gleichmäßigen Temperaturver-

## Mikrowellenerwärmung

teilung, wird an diesen Ergebnissen deutlich. In den letzten Abschnitten dieses Kapitels werden deshalb zwei alternative Möglichkeiten der Regelung des Pulsbetriebs und die mit diesen neu entwickelten Regelungen gewonnenen Ergebnisse vorgestellt.

Tab. 4-4: Verwendete, mikro-welleneignete Fertiggerichte.

Hersteller	Fertig-gericht	Masse m / g	angegebene Er-wärmungsdauer bei max. MW-Leistung / min	Material und Form des Behälters	Material der Deckelfolie
<i>Erasco</i>	<i>Maccaroni</i>	290	3,5	Polypropylen zylindrisch	Kunststoff/ Aluminium
<i>Erasco</i>	<i>Rigatoni</i>	290	3	Polypropylen zylindrisch	Kunststoff/ Aluminium
<i>Iglo Tiefkühlkost</i>	<i>Makkaroni-Auflauf</i>	400	12-14	Karton quaderförmig	Karton
<i>Iglo Tiefkühlkost</i>	<i>Kartoffel-Auflauf</i>	400	12-14	Karton quaderförmig	Karton
<i>Dr. Oetker Tiefkühlkost</i>	<i>Lasagne al Forno</i>	400	11-12	Karton quaderförmig	Karton
<i>Unox</i>	<i>Risotto</i>	240	1,5	Polypropylen zylindrisch	Kunststoff
<i>Meica</i>	<i>Rindfleisch-suppe</i>	290	3	Kunststoff zylindrisch	Kunststoff

## Erwärmung mit maximaler Leistung

### a) Erwärmung von Agar-Agar-Gel in zylindrischen Bechern

Für ein Experiment wurden 250 ml des 2%igen Agar-Agar-Gels in einen zylindrischen Kunststoffbecher eingefüllt ( $d/h \approx 1$ ), die Temperatursensoren in einer Ebene bestimmter Tiefe plziert (Anordnung der Sensoren vgl. Abbildung 4-6) und der Becher in die Mitte des Drehtellers gestellt. Anschließend wurde das Gel im *Moulinex*-Gerät bei maximaler Leistung 35 s erwärmt (Drehteller ausgeschaltet) und dabei die Temperaturprofile gemessen. Längere Erwärmungszeiten sind nicht sinnvoll, da dann bereits an einigen Stellen Temperaturen größer als 55 °C im Gel erreicht werden und das Gel flüssig wird. Die Sensoren sind nicht mehr fixiert und außerdem tritt Konvektion ein, was gerade vermieden werden sollte. Alle Versuche wurden dreimal durchgeführt. Diese Versuche konnten nicht mit eingeschaltetem Drehteller durchgeführt werden, da dann die Temperatursensoren verdrillt und aus dem Gel gezogen werden.

In den Ergebnisdigrammen Abbildungen 4-7 bis 4-11 ist jeweils die Temperaturerhöhung über der Erwärmungszeit für eine Tiefe im Gut aufgetragen

(Anfangstemperatur  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Es wurde nur ein Teil der Standardabweichungen eingezeichnet, um die Übersichtlichkeit nicht zu beeinträchtigen.

Erwärmung im Haushaltsmikrowellengerät

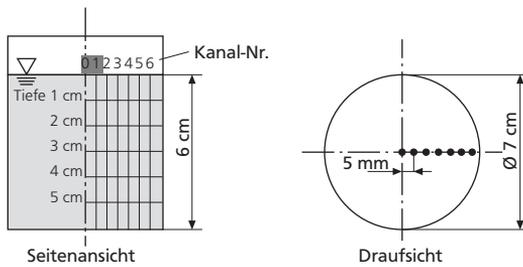


Abb. 4-6: Anordnung der Temperatursensoren in den zylindrischen Bechern.

Die Erwärmung ist sehr ungleichmäßig, denn die Temperaturerhöhungen liegen nach der Erwärmung zwischen 12 K (niedrigste gemessene Temperaturerhöhung am Becherrand in 3 cm Tiefe, Abbildung 4-9) und 49 K (größte Temperaturerhöhung in der Mitte in 2 cm Tiefe, Abbildung 4-8), d. h. die maximale Temperaturdifferenz beträgt 39 K. Es lässt sich in diesem Fall auch keine reine Rand- oder Zentralerwärmung erkennen. In der Nähe der Oberfläche in 1 cm Tiefe ist Rand-erwärmung zu beobachten (vgl. Abbildung 4-7), aber schon in 2 cm Tiefe ändern sich die Verhältnisse und in der Mitte treten die höchsten Temperaturen auf (Abbildung 4-8). Am gleichmäßigsten ist die Temperaturverteilung in 5 cm Tiefe, allerdings sind hier die Temperaturen insgesamt am höchsten (Abbildung 4-11). Dies ist vermutlich auf den geringen Abstand zwischen Substanz und Geräteboden zurückzuführen, wodurch in diesem Bereich sehr hohe elektrische Feldstärken vorkommen können (OHLSSON, 1989).

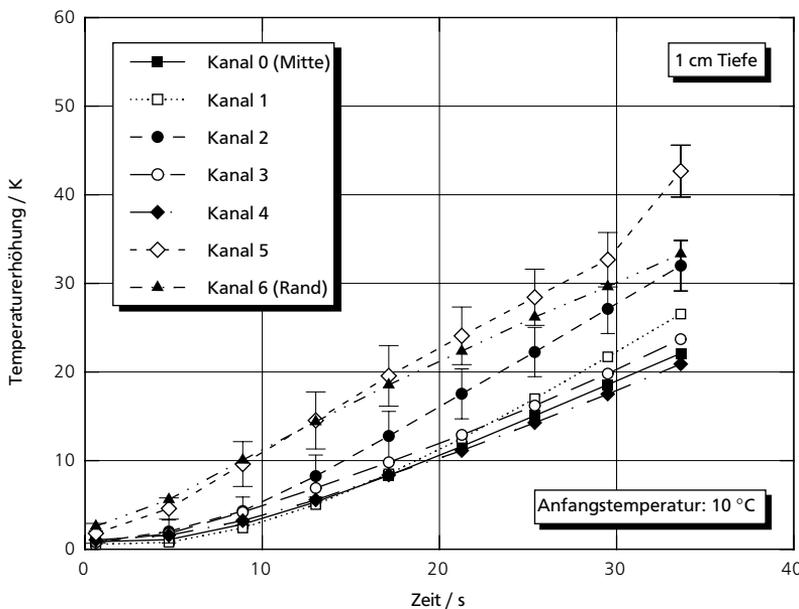


Abb. 4-7: Gemessene Temperaturerhöhungen in 1 cm Tiefe (Mittelwerte mit ausgewählten Standardabweichungen).

Da bei diesen Experimenten zur Temperaturverteilung immer zuerst das Mikrowellengerät eingeschaltet und danach die Temperaturmessung gestartet wurde, liegt der erste Temperaturmeßwert in den Abbildungen 4-7 bis 4-11 deshalb nicht bei 0 s, sondern bei etwa 1 s.

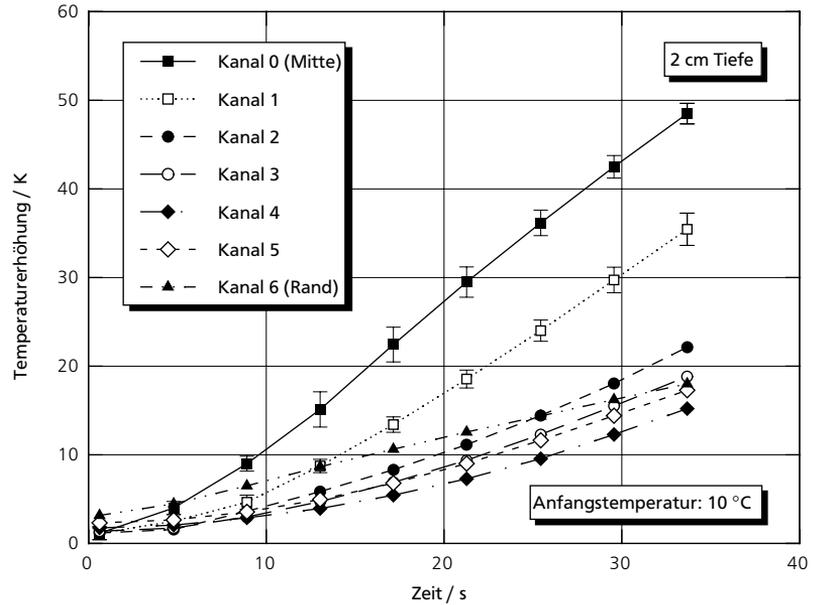


Abb. 4-8: Gemessene Temperaturerhöhungen in 2 cm Tiefe (Mittelwerte mit ausgewählten Standardabweichungen).

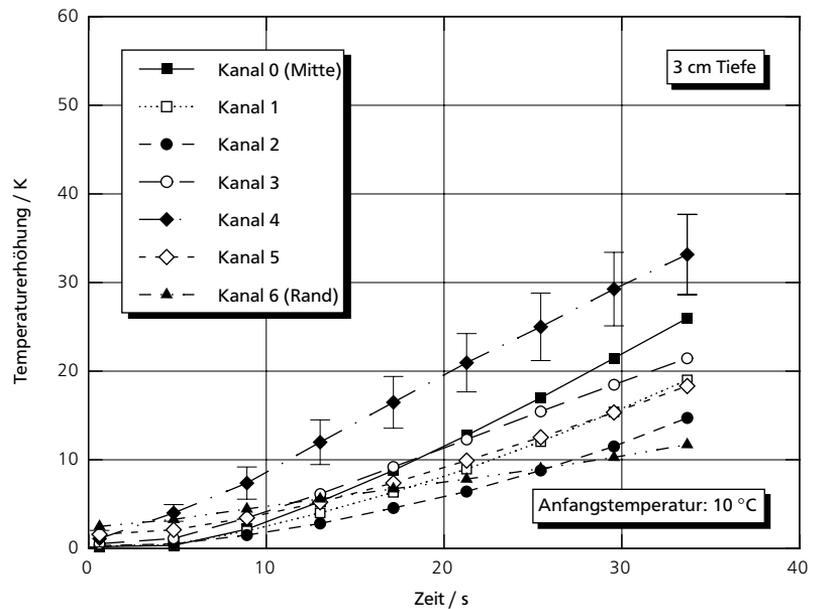


Abb. 4-9: Gemessene Temperaturerhöhungen in 3 cm Tiefe (Mittelwerte mit ausgewählten Standardabweichungen).

Erwärmung im  
Haushaltsmikrowellengerät

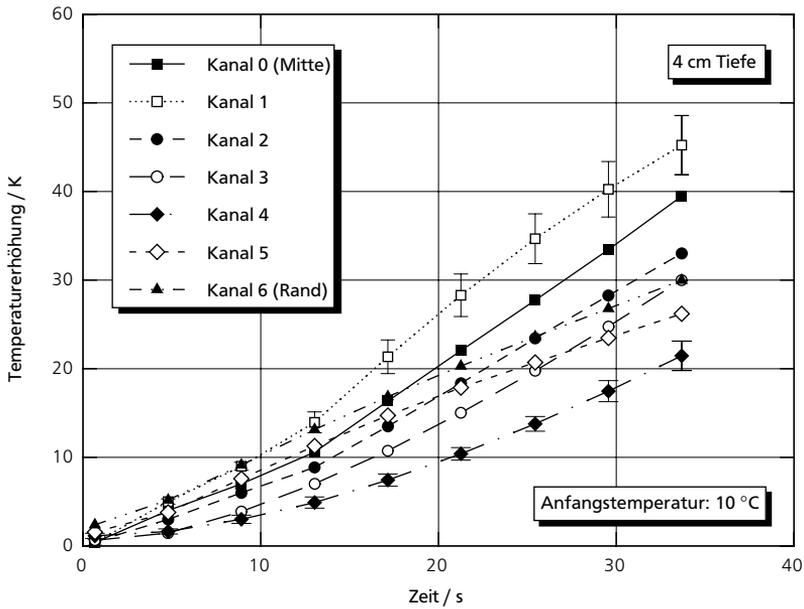


Abb. 4-10: Gemessene Temperaturerhöhungen in 4 cm Tiefe (Mittelwerte mit ausgewählten Standardabweichungen).

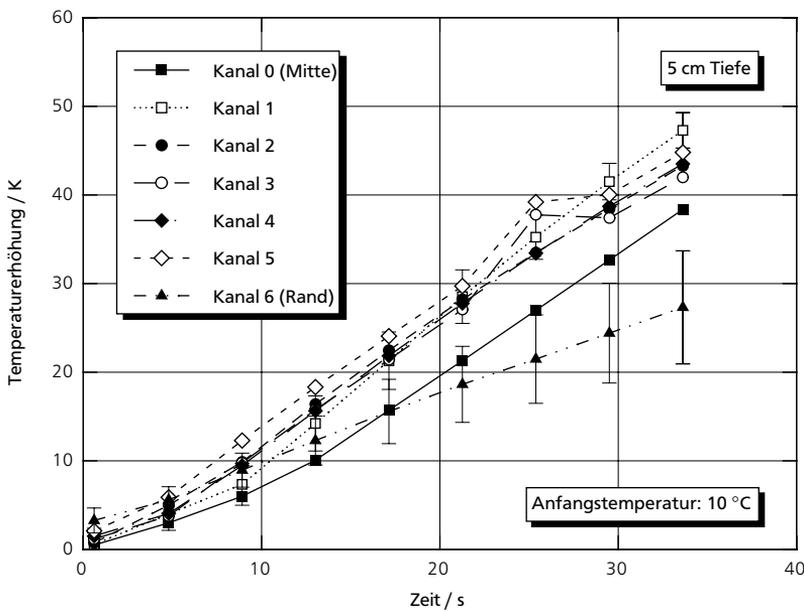


Abb. 4-11: Gemessene Temperaturerhöhungen in 5 cm Tiefe (Mittelwerte mit ausgewählten Standardabweichungen).

b) Erwärmung von Agar-Agar-Gel in rechteckigen Schalen

Häufig sind Fertiggerichte in rechteckigen Schalen verpackt. Aus diesem Grund wurden jeweils 750 g Agar-Agar-Gel in einer solchen Schale aus Polyethylen im *Clatron*-Gerät erwärmt und wiederum die Temperaturen an verschiedenen Stellen und Tiefen während der Erwärmung (Drehteller ausgeschaltet) gemessen (vgl. auch CRUZ u. a., 1995). Die Abmessungen der Schale und die Anordnung der Sensoren ist in Abbildung 4-12 zu sehen. Die Erwärmung ist sehr ungleichmäßig. Die Temperaturerhöhungen nach der Erhitzung sind in den Abbildungen 4-13 bis 4-15 für die drei Tiefen dargestellt (Anfangstemperatur 5 °C). Aufgrund der längeren Erwärmungszeiten von ungefähr 150 s wurden Temperaturerhöhungen bis zu 63 K gemessen. Die kleinste Temperaturerhöhung betrug 12 K. Die größten Temperaturerhöhungen traten in den Randbereichen auf, und zwar besonders in der Nähe der Ecken der Schale. Hier dringen die Mikrowellen von den benachbarten Seiten ein und überlagern sich in diesen Randbereichen (vgl. Abbildung 4-13 bis 4-15). Die Standardabweichungen der Temperaturen waren im Zentrum der Schale mit  $\pm 2$  K klein, in den Randbereichen dagegen sehr groß (bis zu  $\pm 8$  K). Eine Ursache ist möglicherweise die Platzierung der Schale im Mikrowellengerät. Kleine Abweichungen in der örtlichen Ausrichtung können sich bereits stark auf die Verteilung der elektrischen Feldstärke im Garraum auswirken, und dies beeinflusst wiederum die Erwärmung des Gels.

Abb. 4-12: Anordnung der Temperatursensoren in den rechteckigen Schalen.

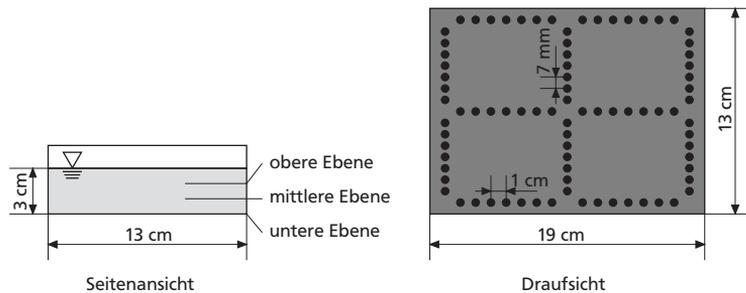


Abb. 4-13: Gemessene Temperaturerhöhung in K (Mittelwerte) in der oberen Ebene nach einer Erwärmungsdauer von 150 s (Anfangstemperatur: 5 °C).

	35,5	36,3	41,7	41,8	40,0	28,0	18,4		22,0	19,9	26,6	35,5	42,3	51,2	49,5	
31,3								18,7								41,7
33,5								21,2								39,5
34,6								21,3								36,0
36,2								19,4								38,7
32,8								19,0								29,2
30,1								18,3								21,3
29,8								17,7								19,2
	44,2	32,7	32,5	29,5	24,5	18,3	15,6		15,8	15,4	16,8	19,0	22,0	34,4	40,4	
31,6								15,7								19,0
34,4								16,8								21,4
36,5								17,6								25,2
39,0								17,1								31,0
37,2								21,9								34,5
37,7								22,6								37,5
35,8								23,4								39,2
	41,5	41,9	38,5	36,2	31,9	23,3	20,2		21,6	20,5	28,8	44,4	50,3	49,7	48,8	

	26,6 41,6 51,5 59,8 55,8 34,4 27,1		19,6 22,3 29,0 37,8 45,7 44,0 35,1	
36,6		24,4		63,0
38,4		22,1		53,6
40,2		19,5		51,1
36,1		11,8		44,9
31,2		12,7		33,1
30,5		12,9		21,2
30,2		14,1		23,4
	29,6 32,6 29,7 23,0 20,7 13,6 12,4		12,9 12,6 15,0 16,4 20,4 27,4 26,3	
32,2		12,8		22,1
35,5		14,4		25,5
38,6		13,6		28,7
43,5		10,5		35,9
43,0		18,8		39,8
51,8		31,4		45,7
49,2		29,0		45,7
	29,3 39,3 51,7 47,8 39,2 34,4 24,3		27,6 28,8 37,1 52,8 59,9 47,0 33,7	

### Erwärmung im Haushaltsmikrowellengerät

Abb. 4-14: Gemessene Temperaturerhöhung in K (Mittelwerte) in der mittleren Ebene nach einer Erwärmungsdauer von 150 s (Anfangstemperatur: 5 °C).

	43,4 42,7 40,7 39,7 58,6 25,5 33,8		21,4 21,6 24,9 30,9 30,9 32,5 32,4	
45,1		22,3		48,2
46,9		18,2		42,7
41,2		12,2		37,3
28,8		11,2		37,0
25,9		11,9		34,4
25,5		11,6		22,5
20,4		13,2		27,4
	35,0 23,4 20,5 13,0 14,6 12,8 13,5		14,1 15,0 13,5 12,3 12,8 30,6 28,6	
36,6		14,3		21,6
35,5		16,7		17,8
38,4		15,9		18,0
45,9		10,8		34,9
36,0		13,5		44,0
52,5		34,0		56,5
49,9		38,3		50,2
	41,5 40,7 43,8 51,1 27,2 42,4 25,5		44,4 36,4 37,9 46,0 40,6 46,9 41,6	

Abb. 4-15: Gemessene Temperaturerhöhung in K (Mittelwerte) in der unteren Ebene nach einer Erwärmungsdauer von 150 s (Anfangstemperatur: 5 °C).

### c) Erwärmung von Fertiggerichten

Die Temperaturverläufe bei der Erwärmung der Fertiggerichte werden beispielhaft für das Nudelgericht *Erasco Maccaroni* vorgestellt. Es wurden vier Temperatursensoren in etwa 2–3 cm Tiefe in die zylindrischen Behältnisse (Füllhöhe etwa 5 cm, Durchmesser 8,5 cm) eingebracht (Anordnung s. Abbildung 4-16). Es wurden vergleichende Experimente in den drei verschiedenen Mikrowellengeräten von *Clatronic*, *Moulinex* und *Sharp* durchgeführt.

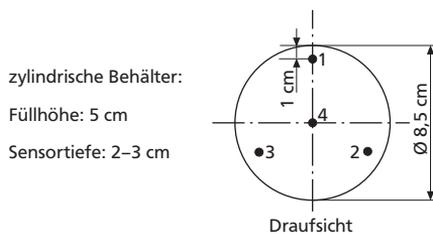


Abb. 4-16: Anordnung der Temperatursensoren in den zylindrischen Fertiggerichten.

In Abbildung 4-17 sind für *Erasco Macaroni* die Temperaturverläufe bei Erwärmung mit maximaler Mikrowellenleistung im *Clatronic*-Gerät dargestellt. Es wurde nach Verpackungsvorschrift 3,5 min erwärmt. Die Erhitzung ist extrem ungleichmäßig. Es treten Temperaturunterschiede von über 40 K zwischen den Mittelwerten der verschiedenen Sensoren auf und die Standardabweichungen erreichen Werte bis zu  $\pm 30$  K. Der Übersichtlichkeit wegen wurden nur für zwei Temperaturverläufe die Standardabweichungen in Abbildung 4-17 eingezeichnet.

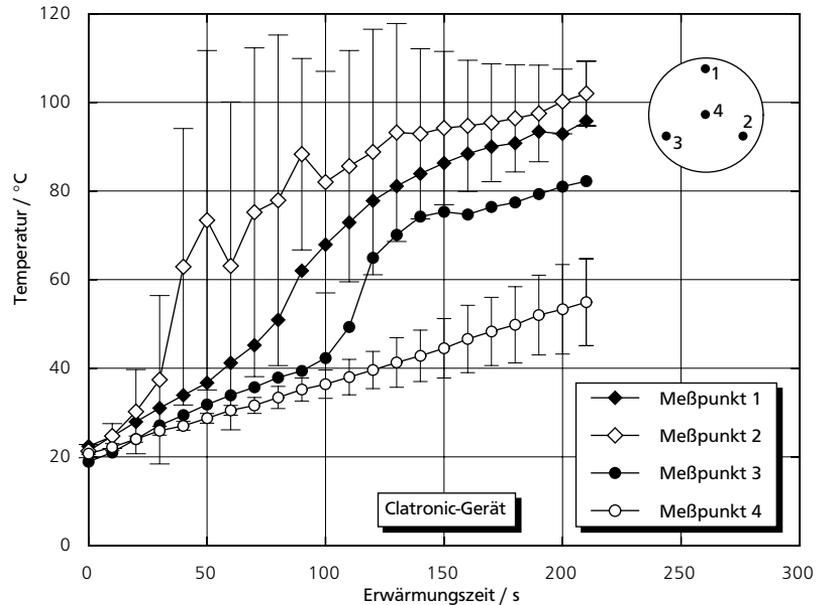


Abb. 4-17: Gemessene Temperaturverläufe im Fertiggericht *Erasco Macaroni* während der Erwärmung im *Clatronic*-Gerät mit maximaler Leistung.

Die sprunghaften Temperaturänderungen an einem Meßpunkt sind auf schlagartiges Verdampfen im Inneren der Fertiggerichte zurückzuführen. Ist der Dampf entwichen, sinkt die Temperatur wieder. Durch das schlagartige Verdampfen kochen die Gerichte oft über. Örtlich treten noch höhere Temperaturen als die gemessenen auf, denn teilweise trockneten und verkrusteten oder verbrannten die Fertiggerichte sogar an den Rändern. An den verkrusteten und verbrannten Stellen wurden auch Temperaturen über 100 °C gemessen. Die Temperaturverläufe der Erwärmung im *Moulinex*- und im *Sharp*-Gerät sind ähnlich ungleichmäßig wie die in Abbildung 4-17 gezeigten. Die Diagramme sind in Anhang A 3.1 zu finden.

Im Vergleich zur Mikrowellenerwärmung ist eine Erwärmung im Wasserbad, wie sie nach Herstellerangabe alternativ möglich ist, nicht vorteilhafter. Die Erwärmungszeit zum Erreichen einer mittleren Temperatur von etwa 70 °C ist mit über 20 min viel länger als bei der Mikrowellenerwärmung. Erwartungsgemäß erwärmt sich das Zentrum langsamer als die Außenbereiche, da die Wärme nur von außen zugeführt wird (vgl. Abbildung 4-18). Die Standardabweichungen sind deutlich niedriger als bei der Mikrowellenerhitzung. Sie ändern sich mit steigender Temperatur von  $\pm 1$  K auf  $\pm 7$  K. Die Temperaturen der äußeren Meß-

punkte 1–3 stimmen nicht überein, da die Temperatursensoren in dem Fertigericht nicht exakt genug plaziert werden konnten. Die Ortsunsicherheit ist hier deutlich größer als bei der Verwendung des festen Agar-Agar-Gels.

Erwärmung im  
Haushaltsmikrowellengerät

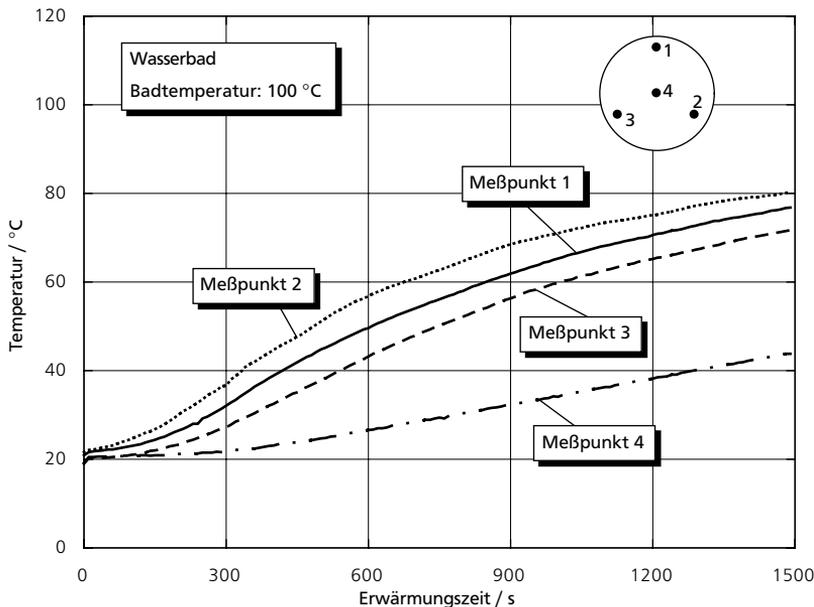


Abb. 4–18: Gemessene Temperaturverläufe im Fertigericht *Erasco Maccaroni* während der Erwärmung im Wasserbad.

Das bisher betrachtete Fertigericht *Erasco Maccaroni* wird bei Raumtemperatur gelagert. Ist 80 °C die gewünschte Endtemperatur, ist eine Temperaturerhöhung von etwa 60 °C notwendig. Bei tiefgefrorenen Fertigerichten ist eine größere Temperaturänderung von ungefähr 100 °C erforderlich. Dies ist ein Grund für längere Erwärmungszeiten (ca. 14 min). Die Hauptursache für die längeren Zeiten ist allerdings die niedrige relative Dielektrizitätskonstante des tiefgefrorenen Lebensmittels. Ein Großteil der Erhitzungszeit ist für die Temperaturerhöhung von der Gefriertemperatur (mindestens –18 °C) auf den Gefrierpunkt nötig. Da die Erwärmung nicht gleichmäßig ist, sind einzelne Bereiche bereits aufgetaut, während andere noch gefroren sind. Für tiefgefrorene Lebensmittel konnten keine Temperaturverläufe während der Erwärmung aufgenommen werden, da die Temperatursensoren nicht in das gefrorene Lebensmittel eingebracht werden konnten. Nach der Erwärmung der tiefgefrorenen Fertigerichte von *Iglo* wurden Temperaturen von über 100 °C in verbrannten Rand- und Innenbereichen, aber auch so niedrige Temperaturen wie 10 °C an anderen Stellen gemessen. Die Erhitzung von tiefgefrorenen Lebensmitteln bei maximaler Leistung ist also noch wesentlich ungleichmäßiger als die von Lebensmitteln, die von Raumtemperatur aus erwärmt werden.

In weiteren Experimenten wurde die Erwärmung im Haushaltsmikrowellengerät mit der Erwärmung in einer quasikontinuierlichen Mikrowellenanlage bei 1.200 W maximaler Mikrowellenleistung verglichen. Der Betrieb der Anlage ist

kontinuierlich, der Leistungseintrag entspricht jedoch aufgrund der Bewegung des Produkts einem mittleren Leistungseintrag von 600 W. Die Mikrowellenanlage wird in Kapitel 4.4.1 ausführlich beschrieben. Obwohl die Mikrowellen in dieser Anlage mittels Hornstrahlern direkt auf die Produktober- und Produktunterseite gerichtet werden, ist die Erwärmung sehr ungleichmäßig, wie in Abbildung 4-19 zu sehen ist.

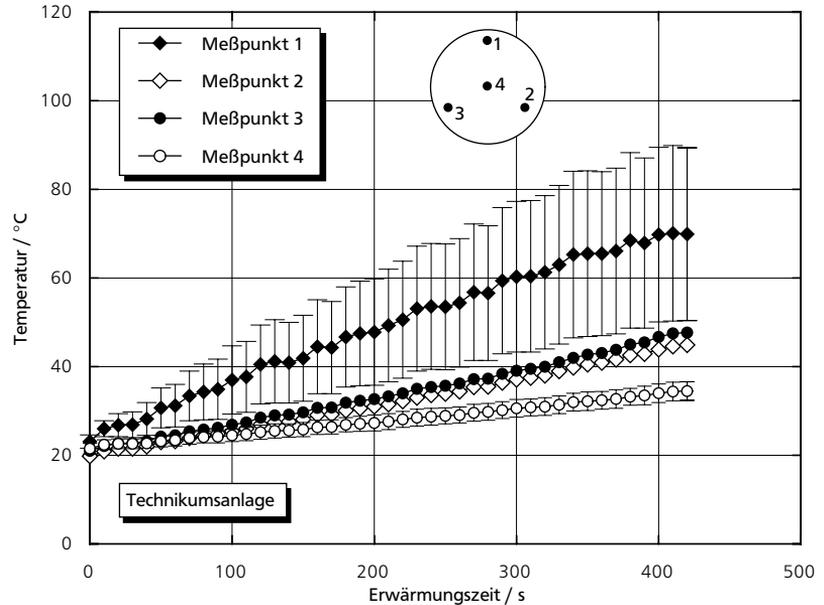


Abb. 4-19: Gemessene Temperaturverläufe im Fertiggericht Erasco Macaroni während der Erwärmung in der Technikumsanlage.

### Erwärmung im Standardpulsbetrieb

Die Temperaturverteilung im Lebensmittel ändert sich nicht wesentlich, wenn mit etwa halber mittlerer Leistung erwärmt wird. Bei dieser mittleren Leistungsstufe ist beispielsweise beim *Clatronic*-Gerät das Magnetron im Wechsel für 15 s eingeschaltet und dann 12 s ausgeschaltet. Wie in Abbildung 4-20 zu erkennen ist, werden nicht ganz so hohe Temperaturen erreicht wie im Fall der Erwärmung mit maximaler Leistung, da insgesamt die Einwirkungsdauer der Mikrowellen im Pulsbetrieb reduziert ist. Die Zahl der verbrannten Stellen war im Vergleich zur Erwärmung mit maximaler Leistung deutlich geringer. Die Temperaturschwankungen waren jedoch weiterhin an allen Meßstellen extrem groß. Die Ergebnisse der Erwärmung mit halber mittlerer Leistung im *Moulinex*- und im *Sharp*-Gerät sind ähnlich unbefriedigend (s. Anhang A 3.1).

Deutlich gleichmäßiger wird die Temperaturverteilung erst, wenn mit der kleinsten Leistungsstufe gearbeitet wird (vgl. Abbildung 4-21). Die mittlere Leistung ist etwa 15–20 % der Maximalleistung von etwa 850 W. Die Temperaturerhöhung ist allerdings sehr langsam, so daß eine Endtemperatur von 70–80 °C erst nach etwa zwölf Minuten erreicht wird (hier nicht gezeigt).

Erwärmung im  
Haushaltsmikrowellengerät

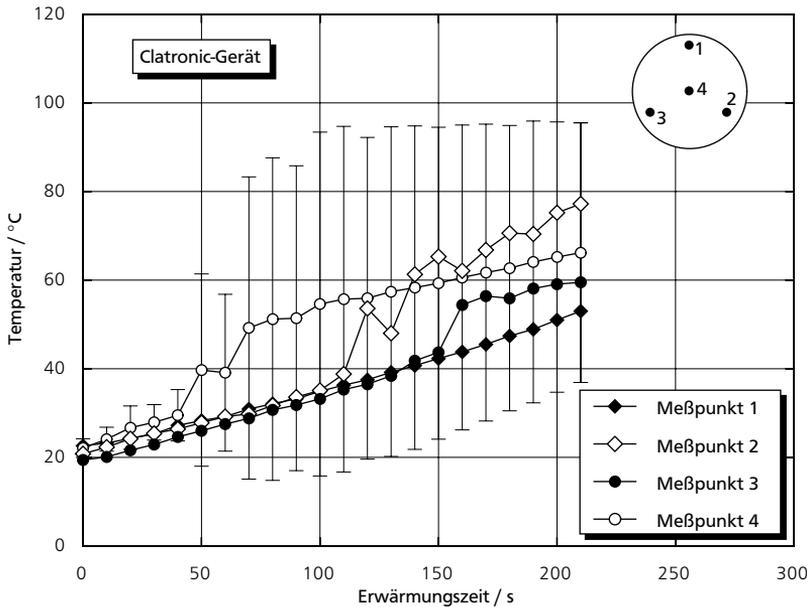


Abb. 4-20: Gemessene Temperaturverläufe im Fertiggericht Erasco Maccaroni während der Erwärmung im Clatronic-Gerät mit mittlerer Leistungsstufe.

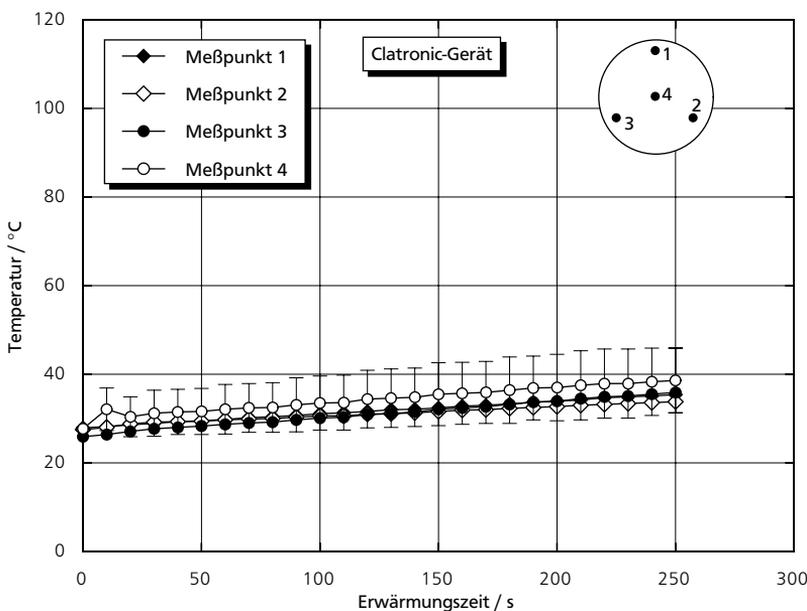


Abb. 4-21: Gemessene Temperaturverläufe im Fertiggericht Erasco Maccaroni während der Erwärmung im Clatronic-Gerät mit niedrigster Leistungsstufe.

Die Ergebnisse lassen erkennen, daß eine Erwärmung im Pulsbetrieb prinzipiell vorteilhaft für eine gleichmäßige Temperaturverteilung ist. Nachteilig ist jedoch, daß die Ein- und Ausschaltintervalle konstant sind und nicht an den Erwärmungszustand des Lebensmittel angepaßt werden, d. h. während der Erwärmung nicht verändert werden.

Verschiedene „Erwärmungs-Programme“ für bestimmte Lebensmittel (z. B. Braten, Gemüse, Kuchen), die von einigen Herstellern von Mikrowellengeräten angeboten werden, bringen hier kaum Verbesserungen, da die Zeitintervalle im Pulsbetrieb weiterhin konstant sind. Bei manchen Geräten kann der Garzustand mit einer Temperaturmessung an einer Stelle im Lebensmittel gesteuert werden. Wie aus den oben gezeigten Ergebnissen hervorgeht, ist dies jedoch keine geeignete Methode, um eine gleichmäßige Temperaturverteilung zu erreichen.

Ziel der eigenen Untersuchungen war deshalb, geeignete Meßgrößen zu finden, mit denen die Erwärmung so geregelt werden kann, daß mit dem Erreichen einer kritischen Temperatur an einer beliebigen Stelle im Gut, die Erwärmung unterbrochen wird. Erst nach einer gewissen Ausgleichszeit soll dann weiter Mikrowellenenergie zugeführt werden.

### Druck- bzw. Kraftregelung

Wird ein verschlossenes Fertiggericht erwärmt, baut sich während der Erwärmung im Behälter durch Verdampfen ein Überdruck auf. Je höher die Temperatur im Lebensmittel wird, desto mehr steigt der Druck an. Wird die Erwärmung, d. h. die Energiezufuhr, unterbrochen, sinkt der Druck in der Verpackung, und die Temperaturverteilung wird gleichmäßiger. Der Druck im Behälter ist damit ein Maß für die Temperatur des Lebensmittels.

Um den Druck im Behälter direkt zu messen, müßte ein Drucksensor durch die Verpackung geführt werden. Mittlerweile werden von der Firma *Photonetics* faseroptische Drucksensoren (ähnlich den faseroptischen Temperatursensoren) angeboten. Die Durchführung des Sensors in die Verpackung müßte so abgedichtet werden, daß kein Dampf entweichen kann. Dies gelang mit dem kurzzeitig zur Verfügung stehenden Drucksensor allerdings nicht. Die Abdichtung wird durch die verschiedenen Verpackungsmaterialien der Fertiggerichte (unterschiedliche Folien oder beschichteter Karton) zusätzlich erschwert. Andererseits ist eine komplizierte Einführung und Abdichtung der Sensoren bei Haushaltsmikrowellengeräten, bei denen eine möglichst kurze Zubereitungszeit und einfache Handhabung wichtig sind, auch nicht sinnvoll. Der Druck im Behälter muß deshalb indirekt über andere physikalische Größen, wie beispielsweise Kraft oder Weg, bestimmt werden.

Der Druck, der sich im Innern der Verpackung aufbaut, kann z. B. mit Hilfe eines Kraftaufnehmers von außen an der Oberfläche der Deckelfolie des Fertiggerichts erfaßt werden. Es wurde deshalb ein Stempel auf die Deckelfolie der Fertiggerichte aufgesetzt und die Kraft über einen Hebel auf einen außerhalb des Mikrowellengeräts befindlichen Kraftsensor geleitet. Der Aufbau, der mit dem *Clatronie*-Gerät realisiert wurde, ist in Abbildung 4-22 dargestellt.

Auf das im Mikrowellengerät stehende Fertiggericht wird ein scheibenförmiger Stempel aufgesetzt, so daß gerade keine Kraft am Einleitungspunkt der Kraftmeßdose zu messen ist. Der senkrechte Arm der Kraftübertragung ist durch ein

Schraubgewinde höhenverstellbar am waagrechten Hebelarm befestigt, um die Regelung an verschieden hohe Fertiggerichte anpassen zu können.

Erwärmung im Haushaltsmikrowellengerät

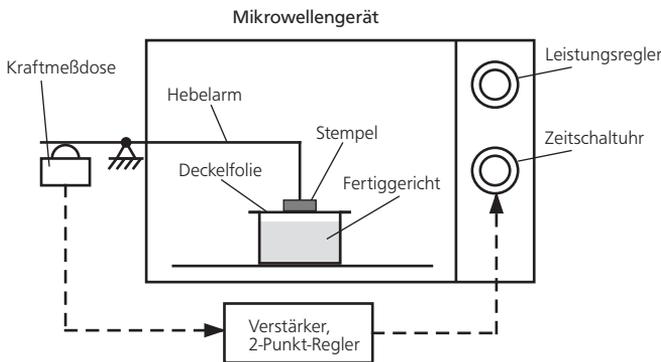


Abb. 4-22: Schematische Darstellung des Aufbaus der Kraftregelung.

Über den Hebelarm, der in einer Hülse in der Gerätewand drehbar gelagert ist, wird der im Fertiggericht entstehende Überdruck mittels einer Kraftmeßdose aufgenommen und in ein elektrisches Signal umgewandelt. Das Spannungssignal wird in einem nachgeschalteten Verstärker verstärkt. Hierfür wurde das digitale Kraftmeßgerät *Typ 8426 D* der Firma *Burster* verwendet. Dieses komplette System besteht aus dem *Low-Cost-Kraftsensor 8426* mit dem Meßbereich 0–100 N und der Versorgungs- und Verstärkereinheit vom *Typ 9154*.

Das vom Verstärker ausgegebene Signal wird in der Regelung so verarbeitet, daß das Mikrowellengerät bei Erreichen eines einstellbaren oberen Grenzwertes der Kraft abgeschaltet wird und nach Absinken auf einen einstellbaren unteren Grenzwert wieder gestartet wird. Über diese Regelung ist es möglich, die Funktion des Mikrowellengeräts der Temperatur des Lebensmittels anzupassen. Zur Regelung siehe auch Anhang A 3.2.

Mit dieser Regelung wurden Versuche zur Beurteilung des Erwärmungsergebnisses durchgeführt. Es wurden alle in Tabelle 4-4 beschriebenen Fertiggerichte eingesetzt. Zuerst wurden für jeden Verpackungstyp die optimalen oberen und unteren Grenzwerte bestimmt. Bei der Einstellung des oberen Grenzwertes (20–50 N) wurde während einer Erhitzung der Grenzwert langsam zu größeren Werten hin verschoben, bis die Verpackung aufplatzte. Der optimale Wert wurde geringfügig unterhalb (3–5 N) dieses Maximalwertes gewählt. Der untere Grenzwert ist ein Mittelwert zwischen einem zu großen Wert, bei dem das Mikrowellengerät zu häufig ein- und ausgeschaltet wird, wodurch dem Fertiggericht keine Zeit zum Temperatenausgleich bleibt, und einem zu kleinen Wert. Ist der Grenzwert zu klein, wird der Einschaltwert gegen Ende eines Versuches nur noch sehr langsam erreicht. Dadurch steigt die Gesamtzeit an. Die Grenzwerte hingen nur von der Art der Verpackung, nicht jedoch vom Fertiggericht selbst ab.

Die Gleichmäßigkeit der Erwärmung wurde anhand der Endtemperatur an den in Abbildung 4-16 beschriebenen Temperaturmeßpunkten beurteilt. Es wurde der Mittelwert dieser Temperaturen gebildet. Die Temperatur wurde sofort nach

der Erwärmung im Mikrowellengerät gemessen. Während der Erwärmung muß die Verpackung geschlossen bleiben, um Druckverluste zu vermeiden. Der Temperaturverlauf konnte während der Erwärmung mit der Regelung nicht gemessen werden, da es nicht möglich war, die Temperatursensoren durch die Fertigerichtverpackung druckdicht hindurchzuführen. Alle Versuche wurden dreimal durchgeführt. Es wurde die Mikrowelleneinwirkungsdauer, d. h. die Zeit in der das Mikrowellengerät eingeschaltet ist, variiert und die sich mit der Regelung daraufhin ergebende Gesamtzeit bestimmt.

In Abbildung 4-23 ist das Erwärmungsergebnis, das mit der Kraftregelung erzielt wurde, für das Fertigericht *Erasco Maccaroni* dargestellt. Die Gesamtzeit nimmt mit steigender Mikrowelleneinwirkungsdauer überproportional zu. Bei langen Mikrowelleneinwirkungszeiten wurde gegen Ende der Erwärmung der Einschaltwert (unterer Grenzwert) des Geräts nur sehr langsam erreicht, wodurch sich die lange Gesamtzeit von über 30 Minuten ergab. In den langen Pausen, in denen das Mikrowellengerät ausgeschaltet war, waren die Wärmeverluste so groß, daß die mittlere Endtemperatur etwas absank. Zwischen den Temperaturmeßpunkten traten Temperaturunterschiede bis zu 15 °C auf. Diese Temperaturdifferenzen sind deutlich geringer als bei der Erwärmung ohne Regelung.

Problematisch bei der Erwärmung mit der Regelung über die Kraft ist, daß etwa 3-5 % der Fertigerichtverpackungen aus Kunststoff bereits vor dem Versuch undicht waren oder während der Erhitzung undicht wurden. Die Undichtigkeiten traten an der Schweißnaht der Folie auf.

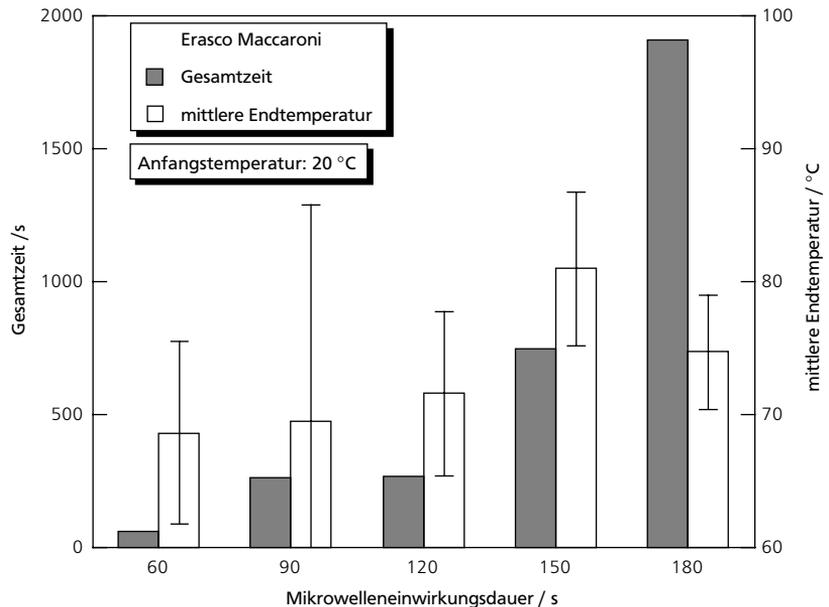


Abb. 4-23: Gesamtzeit und mittlere Endtemperatur in Abhängigkeit von der Mikrowelleneinwirkungsdauer bei der Erwärmung eines bei Raumtemperatur gelagerten Fertigerichts mit der Kraftregelung.

Abbildung 4-24 zeigt das Ergebnis der Regelung über die Kraft für den tiefgefrorenen *Makkaroni-Auflauf* der Firma *Igló*. Auch hier steigt mit zunehmender Mikrowelleneinwirkungsdauer sowohl die Gesamtzeit als auch die mittlere End-

temperatur an. Die Standardabweichung der mittleren Endtemperatur sank bei längeren Mikrowelleneinwirkungszeiten ab, weil dem Lebensmittel aufgrund der langen Ausschaltdauer des Geräts genug Zeit blieb, Temperaturunterschiede auszugleichen. Bei 420 s Mikrowelleneinwirkungszeit war die Gesamtzeit ebenfalls 420 s; d. h. das Gerät wurde nicht ausgeschaltet. Der Druck erreichte erst nach etwa acht Minuten den oberen Grenzwert das erste Mal. Die Temperaturunterschiede zwischen den verschiedenen Meßpunkten im Gericht sind mit weniger als 10 °C sehr niedrig.

Bei diesen Gerichten in Kartonverpackungen lag der Anteil der undichten Verpackungen bei ca. 40 %. Durch den heißen Wasserdampf wurde der Karton oft aufgeweicht.

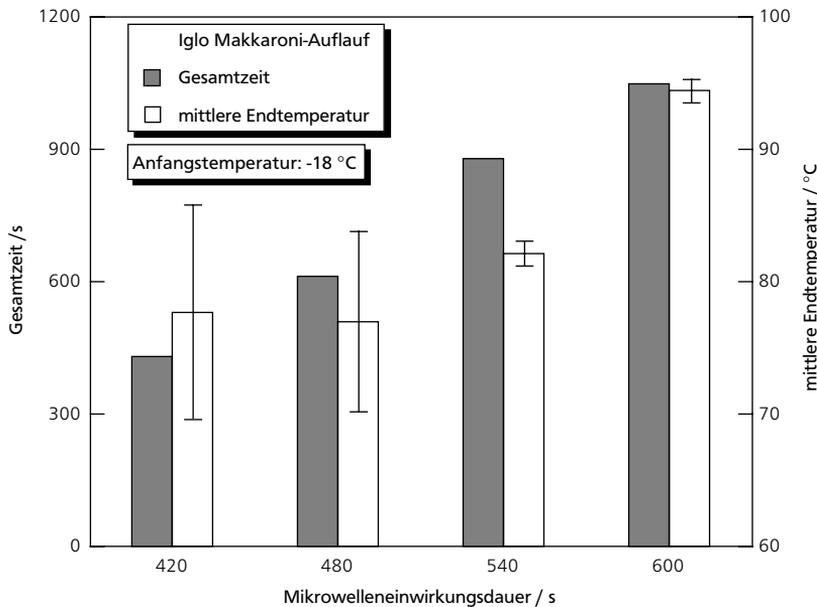


Abb. 4-24: Gesamtzeit und mittlere Endtemperatur in Abhängigkeit von der Mikrowelleneinwirkungszeit bei der Erwärmung eines tiefgefrorenen Fertiggerichts mit der Kraftregelung.

Die Ergebnisse für die übrigen Fertiggerichte sind in Anhang A 3.3 zu finden. Bei diesen Fertiggerichten wurde jeweils nur bei zwei ausgewählten Mikrowelleneinwirkungszeiten die Erwärmung mit der Kraftregelung durchgeführt. Die kürzeste Zeit, die bei *Erasco Macaroni* gewählt wurde, war nicht ausreichend, um den Ausschaltwert der Regelung zu erreichen, so daß keine Pulsung eintrat. Bei sehr langen Mikrowelleneinwirkungszeiten war die Erwärmung nicht sinnvoll, weil die Gesamtzeit zu lang wurde. Daher wurden diese Zeiten bei den weiteren Experimenten nicht eingestellt. Die Ergebnisse der in Anhang A 3.3 dargestellten Versuche sind den hier dargestellten Versuchsergebnissen ähnlich.

Ein typischer Kraftverlauf in Abhängigkeit von der Zeit ist für ein Fertiggericht, das von Raumtemperatur aus erwärmt wurde, ebenfalls im Anhang A 3.2 dargestellt.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß mit der Regelung über die Kraft gute Erwärmungsergebnisse erzielt werden. Besonders vorteilhaft ist die Regelung für

das Auftauen und Erwärmen tiefgefrorener Fertiggerichte, da bei diesen keine Verbrennungen mehr auftreten, wie es beim Erwärmen nach Herstellerangabe der Fall ist. Die Temperaturverteilung in den Lebensmitteln ist wesentlich gleichmäßiger als beim Erwärmen nach Verpackungsvorschrift. Die Druckregelung hat gegenüber dem Standardpulsbetrieb den Vorteil, daß zu Beginn der Erwärmung die Mikrowelleneinwirkungsdauer höher als gegen Ende der Erhitzung ist, wodurch zu hohe Temperaturen vermieden werden. Es muß mit Regelung etwa genauso lange erwärmt werden wie im Standardpulsbetrieb mit halber Leistung. Ein Vergleich der Ergebnisse mit den unterschiedlichen Erhitzungsmöglichkeiten am Beispiel des Fertiggerichts *Erasco Macaroni* ist in Abbildung 4-25 gezeigt. Neben den erforderlichen Gesamtzeiten für eine mittlere Endtemperatur von 80 °C ist auch jeweils der Endtemperaturbereich (nicht die Standardabweichung) angegeben.

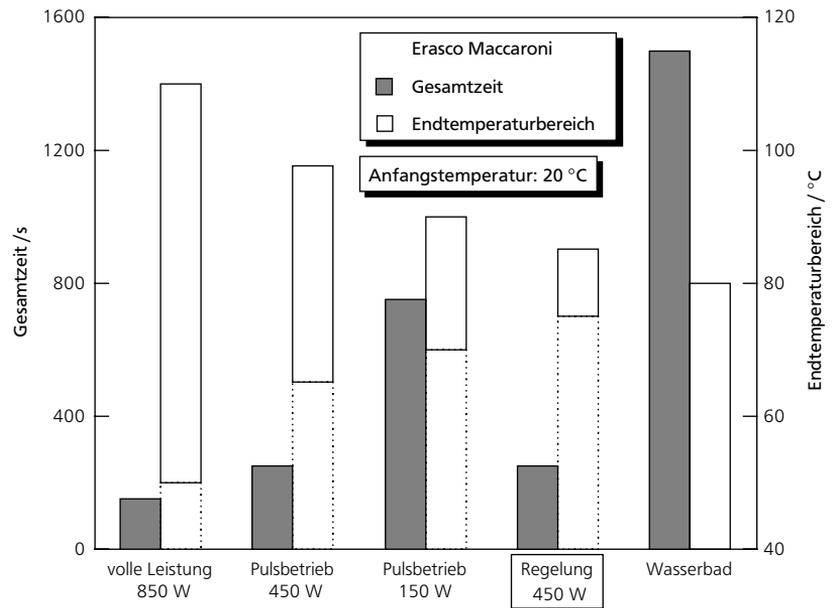


Abb. 4-25: Vergleich der Mikrowellenerwärmung im Clatronic-Gerät eines bei Raumtemperatur gelagerten Fertiggerichts mit voller Leistung, im Standardpulsbetrieb, mit Kraftregelung sowie der Erwärmung im Wasserbad.

Für den Einsatz im Haushalt ist der gezeigt Aufbau zur Regelung allerdings nicht so gut geeignet, da ein Fertiggericht nicht einfach im Garraum des Mikrowellengeräts plaziert werden kann, sondern der Stempel zur Druckaufnahme richtig auf die Deckelfolie aufgesetzt werden muß. Hier ist jedoch folgende Alternative vorstellbar. Der Hersteller eines Fertiggerichts ermittelt die für eine gleichmäßige Erwärmung sinnvollen Ein- und Ausschaltzeiten. Diese werden auf der Verpackung des Lebensmittels beispielsweise in Form einer Kennzahl oder eines *Bar Codes* angegeben. Der Verbraucher gibt nun an seinem Gerät diese Kennzahl ein, und es wird dadurch automatisch die richtige Regelung für dieses Fertiggericht vorgegeben.

Beim Sieden von Flüssigkeiten und Garen von Lebensmitteln sind typische Geräusche (Brutzeln, Blubbern) zu hören, die vom Grundgeräusch beim Betrieb eines Mikrowellengerätes unterscheidbar sein sollten (CABLE und SAASKI, 1990, FU u.a., 1994). Diese akustischen Signale sind ebenfalls ein Maß für das Erreichen einer bestimmten Temperatur im Lebensmittel.

Es wurde ein Kondensatormikrofon im Garraum der verschiedenen Geräte angebracht, um die Geräusche aufzunehmen. Kondensatormikrofone lieferten bessere Aufnahmeergebnisse als dynamische Mikrofone. Sie sind allerdings empfindlicher gegen Störungen, weshalb das Mikrofon auch direkt im Garraum und nicht zwischen Garraumwand und äußerem Gerätegehäuse angebracht werden mußte. Das Mikrofon wurde mit Metallfolie ummantelt, um Überhitzung und Zerstörung durch die Mikrowellen zu verhindern.

Bei der Analyse des Grundgeräuschs der Mikrowellengeräte und des Geräuschs von siedendem Wasser stellte sich heraus, daß beide Geräusche hauptsächlich aus Frequenzen unterhalb 500 Hz zusammengesetzt sind. Frequenzanteile bis zu 2.000 Hz sind noch deutlich zu erkennen; noch höhere Frequenzen treten quasi nicht auf. Es besteht damit keine Möglichkeit die Geräusche durch Filter voneinander zu trennen.

In weiteren Experimenten wurde die unterschiedliche Lautstärke von Grundgeräusch und Kochgeräuschen als Unterscheidungsmerkmal genutzt. Es wurde eine 2-Punkt-Regelung, ähnlich der oben vorgestellten Druckregelung, aufgebaut. Die Regelung wird jedoch dadurch erschwert, daß die Lautstärke der Kochgeräusche verschiedener Lebensmittel sehr stark schwankt, was die Vorgabe von sinnvollen Grenzwerten für die praktische Anwendung unmöglich macht. Schwierig ist auch die Vorgabe der Dauer der Ausschaltzeiten, da sofort nach dem Abschalten die Geräuschentwicklung schlagartig nachläßt, so daß keine Werte zum Wiedereinschalten vorgegeben werden können. Für die Versuche wurden deshalb Werte der Dauer der Ausschaltzeiten gewählt, die etwa Werten bei der Druckregelung entsprachen.

Prinzipiell ist eine Regelung des Erwärmungsvorgangs aber möglich. Die mit dieser akustischen Regelung erzielten Temperaturverteilungen in einem Fertigericht sind deutlich gleichmäßiger als ohne Regelung. Die Endtemperaturbereiche nach der Erwärmung mit und ohne akustische Regelung eines bei Raumtemperatur gelagerten Fertigerichts mit den drei Komponenten Gulasch, Nudeln und Möhren sind in Tabelle 4-5 zusammengestellt.

Bestandteil	Endtemperaturbereich / °C ohne Regelung	Endtemperaturbereich / °C mit akustischer Regelung
Gulasch	43-56	51-56
Nudeln	75-91	75-82
Möhren	65-86	65-70

Tab. 4-5: Endtemperaturbereiche in einem Fertigericht, das im Mikrowellengerät mit und ohne akustische Regelung erwärmt wurde.

Wie oben gezeigt, kann die oft ungleichmäßige Temperaturverteilung in Lebensmitteln nach einer Mikrowellenerwärmung durch eine an den Garzustand des Lebensmittels angepaßte Regelung des Pulsbetriebs entscheidend verbessert werden. Produktschädigungen, wie Verbrennungen, oder auch die Gefahr durch zu niedrige Temperaturen (nicht ausreichende Abtötung von Mikroorganismen) werden so verhindert. In Kombination mit dem *Grüneberg-Modell* kann nun, sofern die dielektrischen Eigenschaften des Lebensmittels bekannt sind, die zum Erreichen einer gewünschten mittleren Endtemperatur insgesamt benötigte Mikrowelleneinwirkungsdauer vorausgerechnet werden. Mit einer Regelung wird diese Mikrowelleneinwirkungsdauer dann sinnvoll auf die Einschaltzeiten des Mikrowellengeräts verteilt und die Ausschaltzeiten entsprechend lang gewählt, so daß tatsächlich die gewünschte Endtemperatur ohne große Abweichungen nach der Erwärmung erreicht wird.

## 4.4 Erwärmung in einer Mikrowellen-Technikumsanlage

### 4.4.1 Quasikontinuierliche Mikrowellen-Technikumsanlage

Die eingesetzte Mikrowellen-Technikumsanlage der Firma *Berstorf* ist ein Prototyp, mit der ein kontinuierlicher Prozeßbetrieb, wie er beispielsweise in der Industrie Anwendung findet, simuliert werden kann. Der Hauptteil der Anlage ist ein zylindrischer Tunnel (Durchmesser 40 cm) aus Edelstahl 1.4301 mit drei durch pneumatische Schieber abgetrennten Kammern (s. Abbildung 4-26). An der Aufgabestelle wird das Produkt durch eine Klappe auf dem Transportwagen plziert. Der Wagen fährt auf Schienen durch die Schleusenkammer in die eigentliche Behandlungskammer (Länge 1 m). In der Behandlungskammer wird ein quasikontinuierlicher Betrieb durch Hin- und Herfahren des Wagens erreicht. Der Wagen passiert dabei die beiden Hornstrahler, mit denen die Mikrowellen von den zwei Magnetrons über Rechteckhohlleiter in die Kammer geleitet werden.

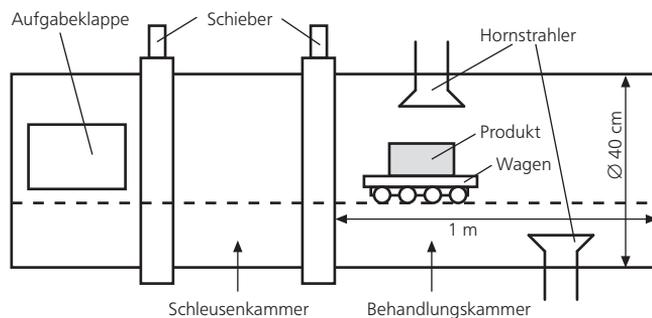


Abb. 4-26: Schematische Darstellung der Mikrowellen-Technikumsanlage.

Die Anlage ist mit einer speicherprogrammierbaren Steuerung ausgerüstet, von der die einzelnen Prozessschritte abgearbeitet werden. Die vom Benutzer wählbaren Einstellungen werden über einen Personalcomputer an die Steuerung übergeben. Die beiden Magnetrons haben jeweils eine Nennleistung von  $P_{nenn} = 1.200 \text{ W}$ . Diese Leistung kann, im Gegensatz zu den Haushaltsmikrowellengeräten, kontinuierlich zwischen 10 und 100 % der Nennleistung geregelt werden. Die Wagen-  
geschwindigkeit kann zwischen 0,1 und 5 m/min eingestellt werden. Die Zahl der Hin- und Herfahrten in der Behandlungskammer wird ebenfalls vom Benutzer vorgegeben. Weiterhin kann in der Behandlungskammer bei Normaldruck, im Vakuum (bis zu 1 mbar) und mit Überdruck (Druckluft oder Dampf bis 5 bar) gefahren werden. Es ist so z. B. eine kombinierte Mikrowellen-Vakuumtrocknung möglich.

Die Magnetrons werden immer nur eingeschaltet, wenn sich der Wagen in einem bestimmten Bereich unter bzw. über den Hornstrahlern befindet. Dieser Bereich kann durch Variation der Mikrowellenleistung in Abhängigkeit vom Ort des Wagens unter bzw. über den Hornstrahlern variiert werden, da die Mikrowellenleistung auch gleich null gesetzt werden kann. Die Behandlungslänge ist dann die Strecke, die der Wagen während der Mikrowelleneinwirkung zurücklegt. Die maximale Behandlungslänge beträgt 25 cm.

Der Originaltransportwagen besteht aus einem rechteckigen Edelstahlrahmen, in den eine eigenkonstruierte, höhenverstellbare PTFE-Platte eingehängt wird. Auf diese Platte wird das zu erwärmende Produkt gestellt. Es kann so der Abstand der Produktober- bzw. -unterseite zu den Hornstrahlern variiert werden. Für die Trägerplatte wurde PTFE gewählt, da PTFE selbst kaum Mikrowellenenergie absorbiert.

#### 4.4.2 Übertragung des *Grüneberg-Modells*

In Anlehnung an die Experimente mit den Haushaltsmikrowellengeräten zur Bestimmung der vom Produkt aufgenommenen Leistung wurden entsprechende Experimente auch mit der Technikumsanlage durchgeführt. Verschiedene Volumina demineralisierten Wassers wurden in zylindrischen Kunststoffbechern mit maximaler Leistung  $P_{nenn}$  erwärmt und aus den gemessenen Anfangs- und Endtemperaturen die aufgenommene Leistung  $P$  mit Gleichung 4-1 bestimmt. In ersten Experimenten wurde die Anlage diskontinuierlich betrieben, d. h. der Wagen mit dem gefüllten Becher stand über oder unter einem der beiden Hornstrahler. Es wurde für jedes Magnetron der horizontale Abstand der Bechermitte von der Hornstrahlermitte variiert. Ist der horizontale Abstand gleich null, steht der Becher genau über bzw. unter dem Hornstrahler. Die jeweils vom Produkt aufgenommene Leistung  $P$  bezogen auf die Nennleistung  $P_{nenn}$  ist für einige ausgewählte Volumina für das untere Magnetron in Abbildung 4-27 und für das obere Magnetron in Abbildung 4-28 dargestellt.

Mikrowellenerwärmung

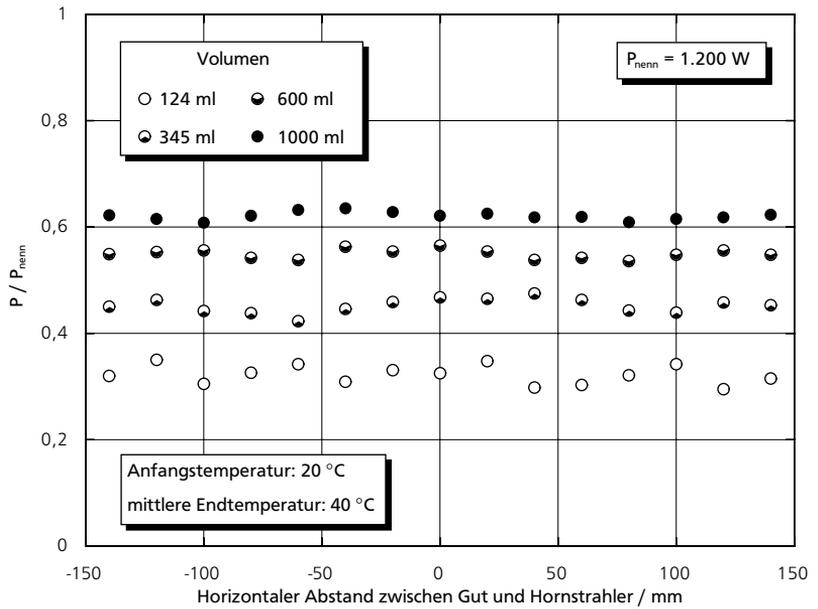


Abb. 4-27: Von demineralisiertem Wasser aufgenommene Leistung im diskontinuierlichen Betrieb der Mikrowellenanlage (unteres Magnetron).

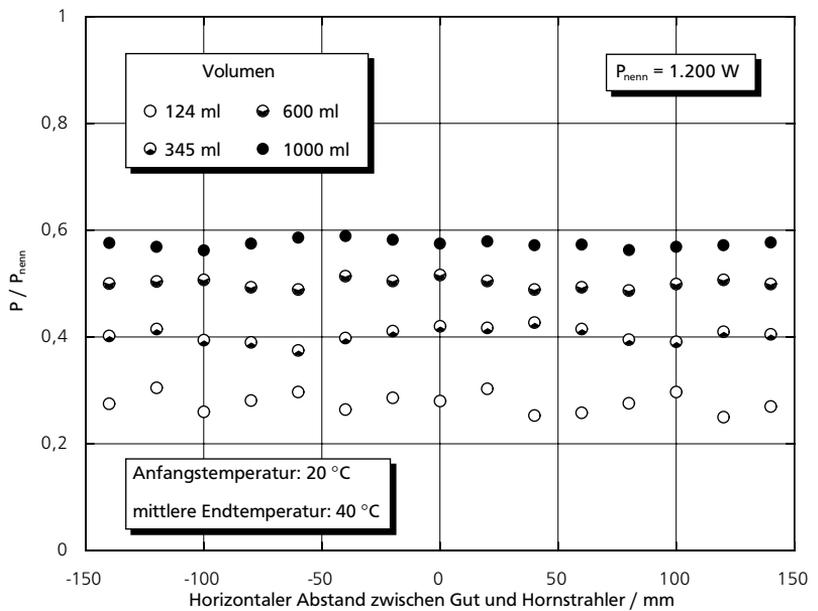


Abb. 4-28: Von demineralisiertem Wasser aufgenommene Leistung im diskontinuierlichen Betrieb der Mikrowellenanlage (oberes Magnetron).

Die Standardabweichungen wurden der Übersichtlichkeit wegen nicht eingezeichnet. Sie liegen für alle Meßwerte unter 7 % vom Mittelwert. Die aufgenommene Leistung ist in beiden Fällen unabhängig vom horizontalen Abstand zwischen Becher und Magnetron. Die Mikrowellen werden, wenn die zu erwärmende Substanz nicht direkt unter oder über dem Hornstrahler plaziert ist, an

den metallenen Wänden der Behandlungskammer reflektiert und treffen so auch auf die Substanz. Die Leistungsaufnahme ist beim unteren Magnetron bei allen Volumina etwas größer als beim oberen Magnetron. Wie beim Haushaltsgerät nehmen auch hier größere Volumina mehr Leistung auf. Auffällig ist jedoch, daß selbst von einem großen Volumen (1 l) nur etwa 60 % der Nennleistung aufgenommen werden. Beim Haushaltsgerät entspricht die von Volumina dieser Größe aufgenommene Leistung ungefähr der Mikrowellenausgangsleistung, d. h. der Nennleistung des Geräts.

Zum Vergleich wurden die Experimente zur aufgenommenen Leistung auch im kontinuierlichen Betrieb durchgeführt. In Abbildung 4-29 sind diese Ergebnisse und die Mittelwerte für das obere und untere Magnetron aller Versuche im diskontinuierlichen Betrieb dargestellt. Erwartungsgemäß stimmen die Mittelwerte des diskontinuierlichen Betriebs mit den Werten der aufgenommenen Leistung im kontinuierlichen Betrieb überein. Wie beim Haushaltsgerät ergibt sich eine Sättigungskurve der aufgenommenen Leistung in Abhängigkeit vom erhitzten Volumen. Wie bereits oben angemerkt, wird die Nennleistung jedoch nicht erreicht, sondern nur etwa 60 % dieses Wertes.

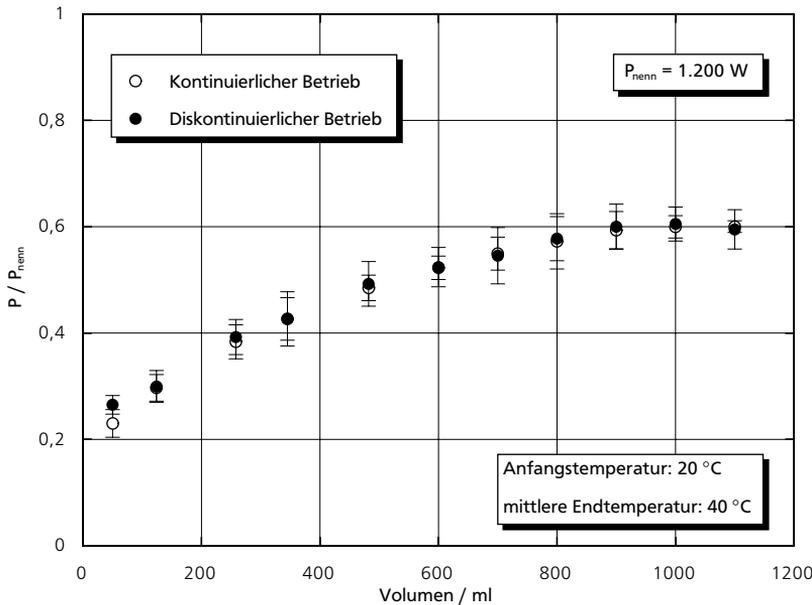


Abb. 4-29: Von demineralisiertem Wasser aufgenommene Leistung im kontinuierlichen und diskontinuierlichen Betrieb der Mikrowellenanlage (für den diskontinuierlichen Betrieb wurden die Werte für das obere und untere Magnetron gemittelt).

Die beobachtete Sättigungskurve der aufgenommenen Leistung läßt vermuten, daß sich, trotz der anderen Art der Einkopplung mittels Hornstrahlern und der anderen Geometrie der Behandlungskammer im Vergleich zum Haushaltsmikrowellengerät, in der Behandlungskammer ähnliche Verhältnisse wie im Garraum eines Haushaltsgeräts einstellen. Aus diesem Grund wurde auch für die Technikumsanlage das *Grüneberg-Modell* zur Berechnung der vom Produkt aufgenommenen Leistung herangezogen (GR NEBERG, 1994). Die niedrigere, maximal

aufgenommene Leistung wird mit einem Korrekturfaktor  $b$  berücksichtigt. Die Gleichung für die Mikrowellenanlage ist dann wie folgt:

$$\frac{P}{P_{\text{nenn}}} = b \cdot \left( 1 - \exp \left( -C \cdot A_{\text{Mie}} \cdot \frac{A_{1,3}}{A_{\text{MW}}} \right) \right) \quad (4-3)$$

Der Korrekturfaktor hat hier einen Wert von  $b = 0,6$ , da maximal 60 % der Nennleistung vom Produkt aufgenommen werden, wie in Abbildung 4-29 zu sehen ist. Für den Geräteparameter wurde ein Wert von  $C = 100$  bestimmt. Die Meßwerte und die mit dem angepassten *Grüneberg-Modell* nach Gleichung 4-3 berechnete Kurve für Wasser sind in Abbildung 4-30 dargestellt. Zur Berechnung von  $A_{\text{MW}}$  wurde vereinfachend der Innenraum der Behandlungskammer als leerer Zylinder angesehen. Die Volumina der Einbauten, wie Schienen und Zahnräder vom Wagenantrieb, wurden nicht vom Gesamtvolumen subtrahiert.

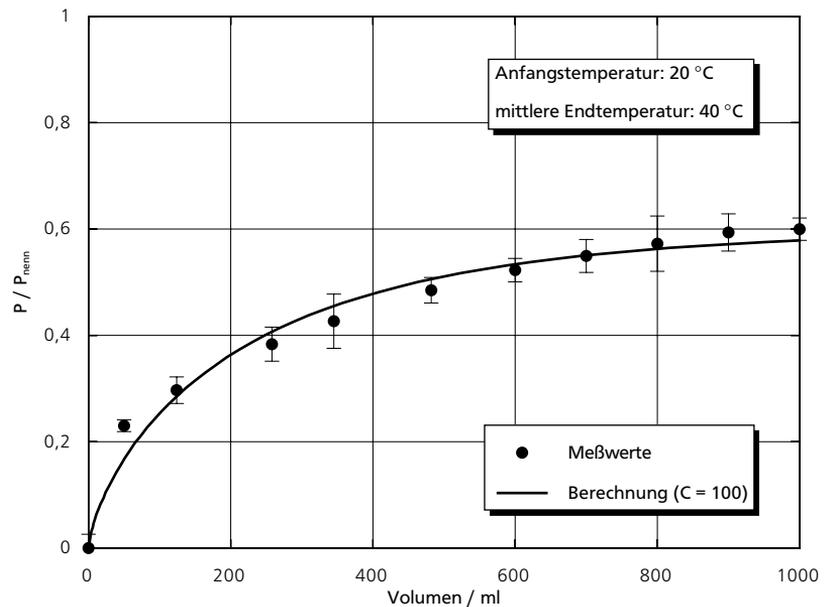


Abb. 4-30: Von demineralisiertem Wasser aufgenommene Leistung bei der Mikrowellenerwärmung in der Technikumsanlage (Meßwerte und Berechnung).

Zur Überprüfung, ob mit Gleichung 4-3 und dem, aus den Werten für Wasser bestimmten, Geräteparameter  $C$  auch die von anderen Stoffen aufgenommene Leistung vorausberechnet werden kann, wurden Kochsalzlösungen verschiedener Konzentration und Pflanzenöl in der Mikrowellenanlage erwärmt und die aufgenommene Leistung zum einen aus Anfangs- und Endtemperaturen nach Gleichung 4-1 bestimmt. Zum anderen wurde die relative Dielektrizitätskonstante dieser Stoffe in Abhängigkeit von der Temperatur gemessen und die aufgenommene Leistung mit Gleichung 4-3 berechnet. Gemessene und berechnete Werte stimmen gut überein (s. Abbildung 4-31), d. h die von einem Gut aufgenommene Leistung kann auch für die Mikrowellen-Technikumsanlage vorausberechnet werden.

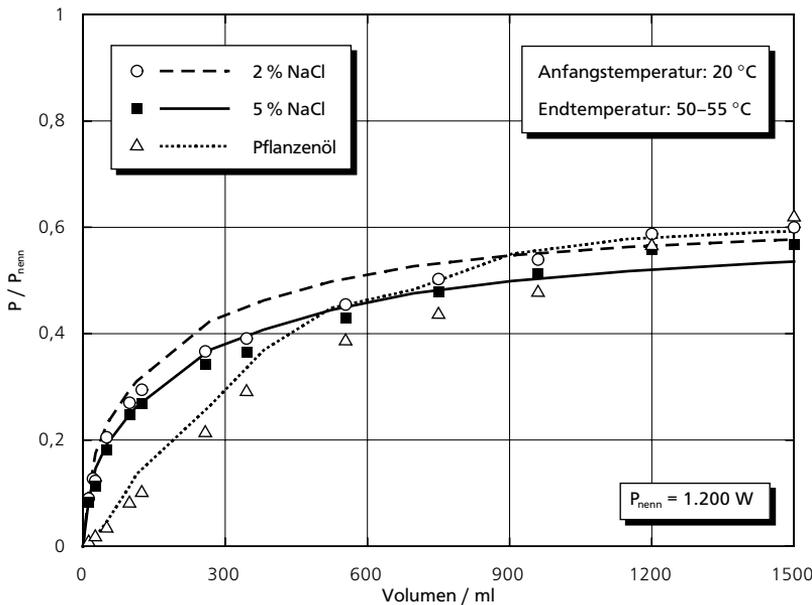


Abb. 4-31: Von Kochsalzlösungen und Pflanzenöl aufgenommene Leistung bei der Mikrowellenerwärmung in der Technikumsanlage (Meßwerte und Berechnung).

Unbefriedigend ist allerdings, daß die maximal aufgenommene Leistung nur 60 % der Nennleistung beträgt. Es wurden daher Experimente im kontinuierlichen Betrieb durchgeführt, bei denen der Abstand zwischen Produktoberfläche bzw. Produktunterseite und Hornstrahler variiert wurde. Dazu wurde jeweils nur mit dem unteren oder nur mit dem oberen Magnetron erwärmt. Weiterhin wurde der Einfluß der Behandlungslänge auf die vom Produkt aufgenommene Leistung untersucht. In Anlehnung an die Norm DIN 44 566 wurden jeweils 1.000 g Wasser in einem Glasgefäß mit 190 mm Durchmesser von 10 auf ungefähr 20 °C erhitzt und die aufgenommene Leistung bestimmt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4-32 dargestellt.

Mit dem unteren Magnetron wurden höhere Leistungseinträge als mit dem oberen Magnetron erzielt. Eine mögliche Ursache könnte eine unterschiedliche Ausgangsleistung der Magnetrons sein. In Abhängigkeit vom Abstand zwischen Hornstrahler und Produktoberfläche durchläuft die aufgenommene Leistung ein Minimum. Dieses Minimum liegt im Bereich von 60 mm Abstand. Dieser Abstand entspricht gerade der halben Freiraumwellenlänge  $\lambda_0$  bei einer Frequenz von 2,45 GHz, so daß in diesem Bereich ein Minimum der Feldstärke vermutet wird (dies trifft exakt nur für eine ebene Wellenfront zu). Bei 150 mm Behandlungslänge ist die aufgenommene Leistung größer als bei 250 mm. Das Glasgefäß ist mit 190 mm Durchmesser größer als die kleinere Behandlungslänge, so daß die Mikrowellen direkt auf das zu erhitzende Wasser treffen. Bei 250 mm Behandlungslänge wird vermutlich ein Teil der Mikrowellen an dem Metallrahmen des Transportwagens reflektiert und trifft nicht auf das Wasser, wodurch die aufgenommene Leistung geringer ist. Für eine hohe Leistungsaufnahme ist es demnach wichtig, die Behandlungslänge an die Größe des zu erwärmenden Produkts anzu-

passen und einen optimalen Abstand zwischen Hornstrahler und Produktoberfläche zu wählen.

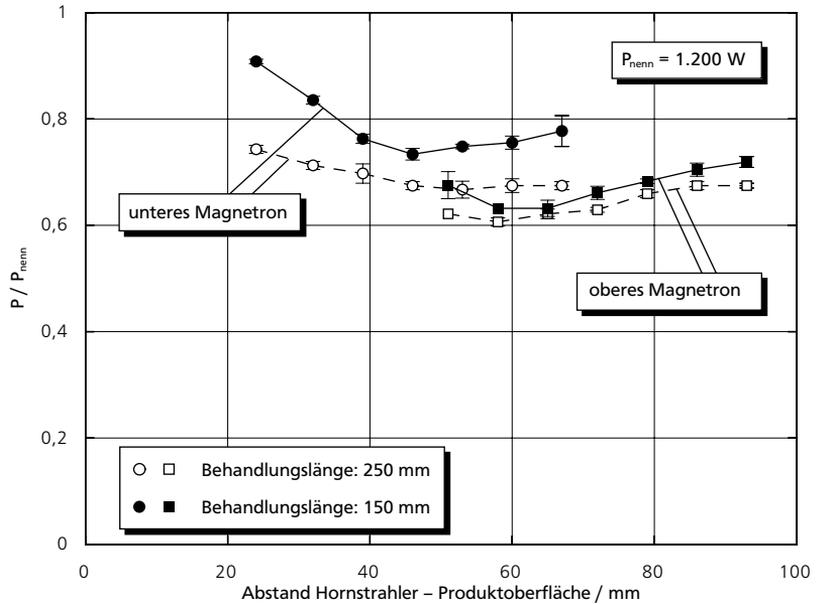


Abb. 4-32: Von demineralisiertem Wasser aufgenommene Leistung bei der Mikrowellenerwärmung in der Technikumsanlage in Abhängigkeit vom Abstand zwischen Hornstrahler und Produktoberfläche und von der Behandlungslänge.

Aus diesen Ergebnissen wird auch deutlich, daß die Berechnung der Leistungsaufnahme mit dem *Grüneberg-Modell* nur dann sinnvoll möglich ist, wenn die Versuchsbedingungen, wie z. B. der Abstand zwischen Hornstrahler und Produktoberfläche, nicht geändert werden, da sich je nach Versuchsbedingungen ein anderer Wert der maximal aufgenommenen Leistung ergibt. Der Korrekturfaktor  $b$  in Gleichung 4-3 ist nicht konstant, sondern hängt von den eingestellten Versuchsparametern ab.

#### 4.4.3 Verbesserung der Temperaturverteilung im Produkt

Neben der insgesamt von einem Produkt in der Technikumsanlage aufgenommenen Leistung ist wie beim Haushaltsmikrowellengerät eine möglichst gleichmäßige Temperaturverteilung im erwärmten Gut erwünscht. Um das Erwärmungsergebnis von einem Haushaltsmikrowellengerät und der Mikrowellen-Technikumsanlage vergleichen zu können, wurden die Temperaturverteilungen in 2%igem, wäßrigem Agar-Agar-Gel während der Erwärmung in der Technikumsanlage mit den faser-optischen Temperatursensoren gemessen. Das Gel wurde in zylindrischen Kunststoffbechern und rechteckigen Kunststoffschalen, analog zu den Experimenten im Haushaltsgerät, erwärmt.

## Erwärmung von Agar-Agar-Gel in zylindrischen Bechern

Erwärmung in einer  
Mikrowellen-  
Technikumsanlage

In den zylindrischen Bechern wurden die faseroptischen Temperatursensoren sowohl in Fahrtrichtung als auch quer zur Fahrtrichtung angeordnet (vgl. Abbildung 4-33). Die Temperaturverteilungen wurden jeweils längs und quer zur Fahrtrichtung in fünf verschiedenen Tiefen im Gel aufgenommen. Jeder Versuch wurde dreimal durchgeführt und Mittelwerte und Standardabweichungen berechnet.

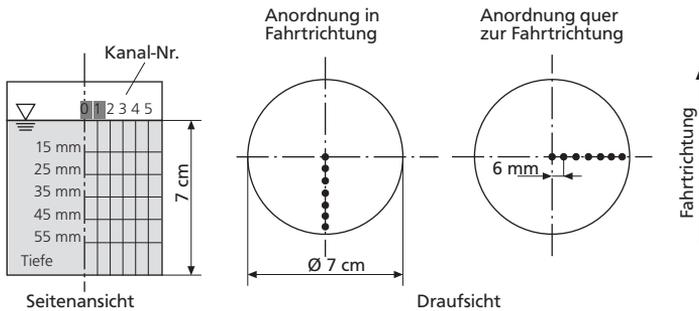


Abb. 4-33: Anordnung der Temperatursensoren in den zylindrischen Bechern.

Beispielhaft für die Ergebnisse sind in den Abbildungen 4-34 und 4-35 die Temperaturverteilungen für 55 mm Tiefe quer und längs zur Fahrtrichtung dargestellt. Es wurde jeweils eine Fahrt in der Behandlungskammer gemacht, d. h. der Wagen passierte jedes Magnetron zweimal. An den treppenförmigen Temperaturprofilen ist gut zu erkennen, wann Mikrowellenenergie beim Passieren der Hornstrahler zugeführt wird und wann sich der Wagen zwischen den Hornstrahlern befindet.

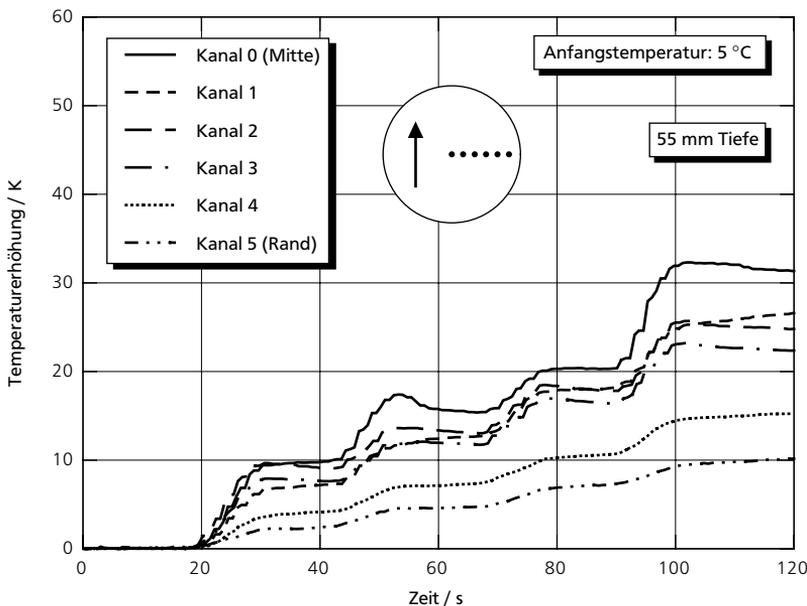


Abb. 4-34: Gemessene Temperaturerhöhungen in 55 mm Tiefe bei Sensoranordnung quer zur Fahrtrichtung (Mittelwerte).

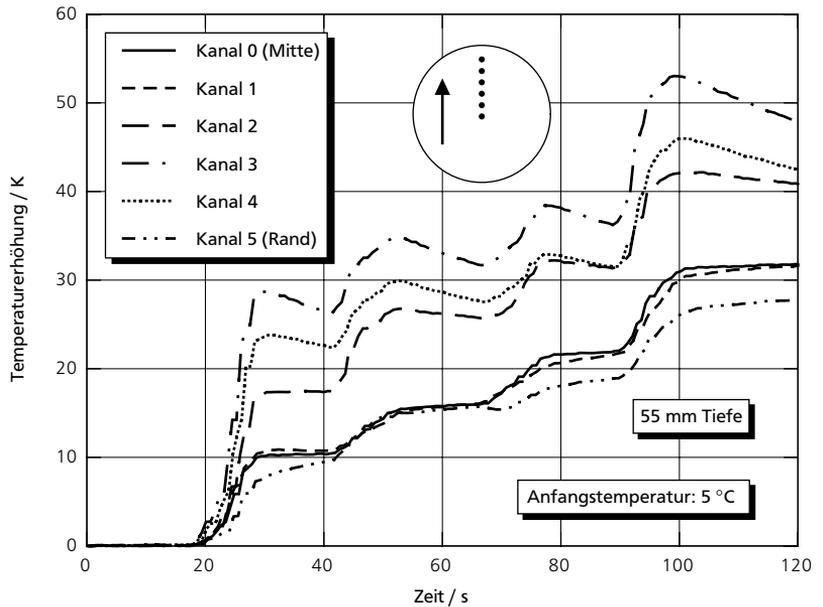


Abb. 4-35: Gemessene Temperaturerhöhungen in 55 mm Tiefe bei Sensoranordnung längs zur Fahrtrichtung (Mittelwerte).

Die Temperaturverteilung ist nicht nur in den hier gezeigten Beispielen, sondern ebenfalls in den anderen Tiefen sehr ungleichmäßig. Die Standardabweichungen waren bei diesen Experimenten in der Technikumsanlage mit maximal  $\pm 4$  K im Vergleich zu den Haushaltsgeräten recht klein. Die Temperaturverläufe für die übrigen Gutstiefen sind im Anhang A 3.4 zusammengestellt.

### Erwärmung von Agar-Agar-Gel in rechteckigen Schalen

Die Temperaturverteilungen beim Erwärmen von jeweils 750 g Gel in den rechteckigen Schalen sind ebenfalls sehr ungleichmäßig (Anordnung der Temperatursensoren s. Abbildung 4-36). Zwei Beispiele gemessener Temperaturerhöhungen für verschiedene Sensorpositionen werden in den Abbildungen 4-37 und 4-38 gezeigt (Anfangstemperatur 5 °C).

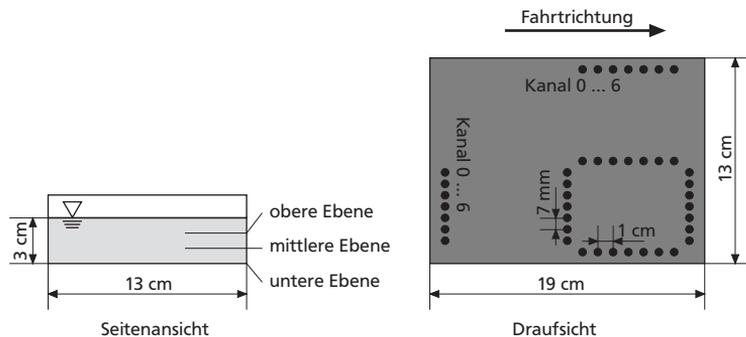


Abb. 4-36: Anordnung der Temperatursensoren in den rechteckigen Schalen.

Erwärmung in einer  
Mikrowellen-  
Technikumsanlage

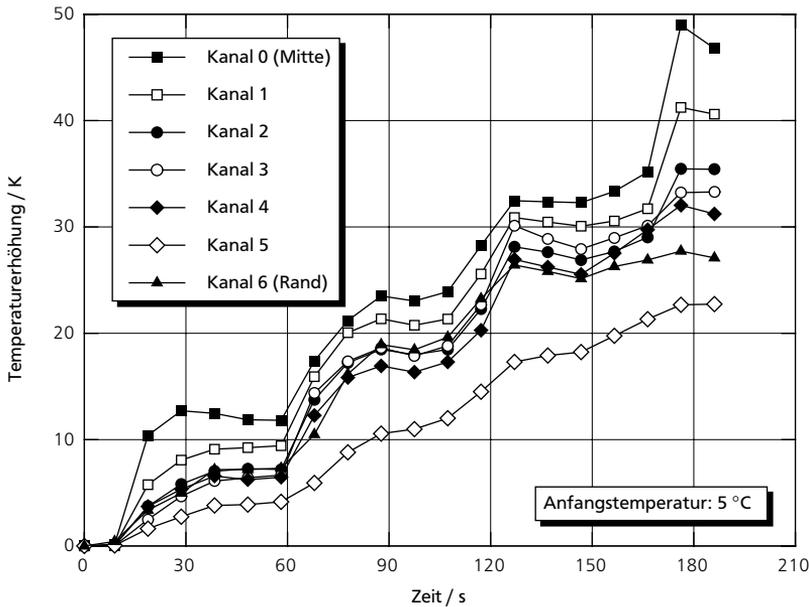


Abb. 4-37: Gemessene Temperaturerhöhungen in der oberen Ebene an der vorderen Kante des Metallwagens.

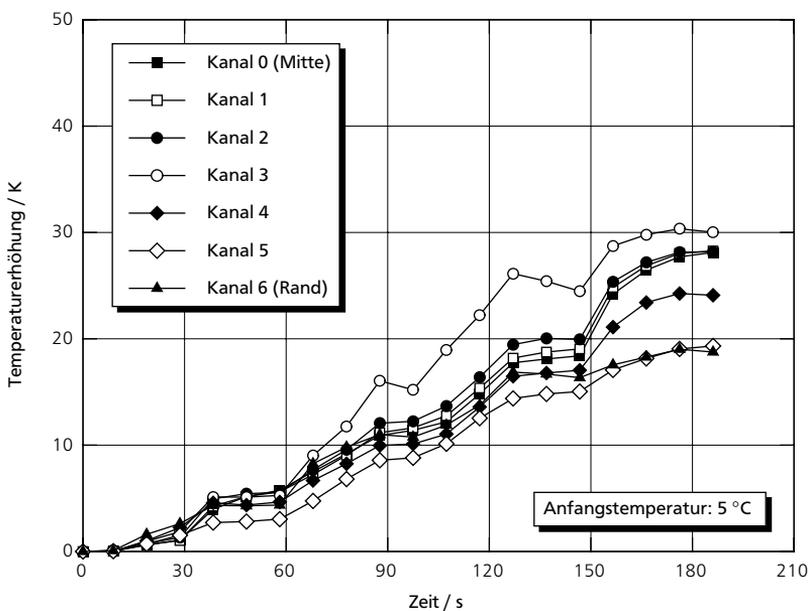


Abb. 4-38: Gemessene Temperaturerhöhungen in der oberen Ebene an der hinteren Kante des Metallwagens.

Besonders an den Rändern der Schale treten sehr hohe Temperaturen auf, so daß die Temperaturerhöhungen zwischen allen Meßpunkten am Ende der Erwärmung zwischen 17 und 47 K liegen, d.h. die Endtemperaturen betragen zwischen 22 und 52 °C. Die Standardabweichungen waren mit  $\pm 6$  K etwas größer als bei der Erhitzung in den zylindrischen Bechern. Die Ursache für die besonders in den

Randbereichen teilweise sehr hohen Temperaturen können Reflexionen der Mikrowellen am Metallrahmen des Transportwagens sein.

Aus diesem Grund wurde eine neuer, vollständig aus Kunststoff bestehender Wagen gefertigt und die Versuche zur Temperaturverteilung in den rechteckigen Schalen mit sonst gleichen Versuchsparametern wiederholt (s. Abbildungen 4-39 und 4-40).

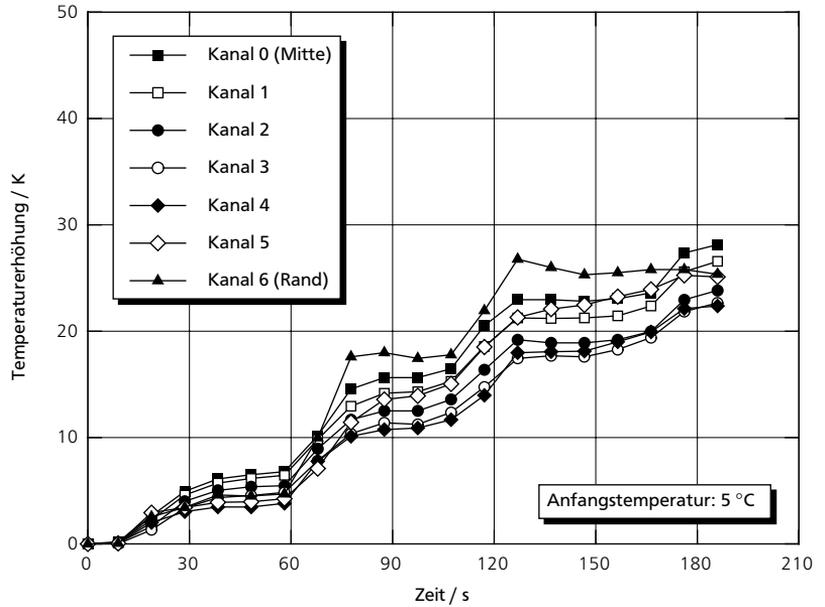


Abb. 4-39: Gemessene Temperaturerhöhungen in der oberen Ebene an der vorderen Kante des Kunststoffwagens.

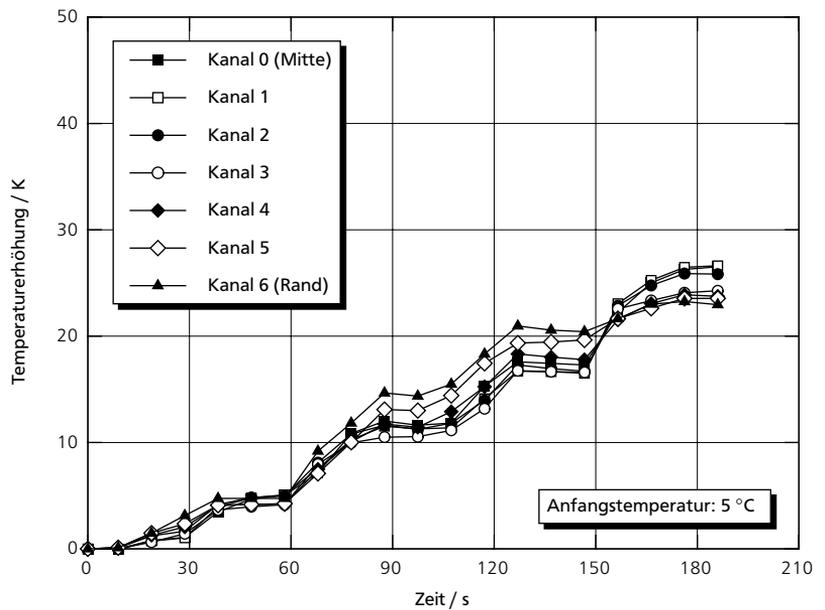


Abb. 4-40: Gemessene Temperaturerhöhungen in der oberen Ebene an der hinteren Kante des Kunststoffwagens.

---

Die Temperaturverteilung im Gel ist mit dem neuen Wagen deutlich gleichmäßiger als vorher. Die Endtemperaturen liegen jetzt in einem Bereich zwischen 27 und 33 °C. Es ist damit gelungen, mit einer einfachen Maßnahme eine entscheidende Verbesserung der Temperaturverteilung zu erzielen. Auf weitere Beispiele für Temperaturverteilungen mit dem Metall- und dem Kunststoffwagen wird hier verzichtet, da die Ergebnisse in allen Fällen sehr ähnlich sind.

Erwärmung in einer  
Mikrowellen-  
Technikumsanlage



*We shall not cease from  
exploration and the end of  
all our exploring will be to  
arrive where we started  
and know the place for  
the first time.*  
„Gerontion“  
T. S. ELLIOT

## 5 Zusammenfassung

Da sowohl im Haushalt als auch in der Industrie verstärkt Lebensmittel mit Mikrowellen erwärmt werden, ist auch das Interesse gestiegen, die Vorgänge bei der Mikrowellenerwärmung vorzuberechnen. So kann mit dem von GR NEBERG (1994) entwickelten Modell die insgesamt von einem Gut während der Erhitzung im Haushaltsmikrowellengerät aufgenommene Leistung bzw. die zum Erreichen einer mittleren Endtemperatur notwendige Erwärmungszeit berechnet werden. Voraussetzung für dieses Modell und auch für allgemeine Aussagen, wie sich ein bestimmtes Produkt im Mikrowellenfeld verhält, ist die Kenntnis der dielektrischen Eigenschaften des Produkts. Die relative Dielektrizitätskonstante ist eine komplexe Größe, deren Realteil, die Dielektrizitätskonstante, und Imaginärteil, die Verlustzahl, das Stoffverhalten beschreiben. Die relative Dielektrizitätskonstante ist nun aber zum einen von der Frequenz des elektromagnetischen Feldes (bei der Mikrowellenerwärmung meist 2,45 GHz) und zum anderen von der Temperatur und der Zusammensetzung einer Substanz abhängig. Besonders bei Lebensmitteln schwankt die relative Dielektrizitätskonstante in einem weiten Bereich. Da dieser Bereich nicht mit einem einzigen Meßverfahren erfaßt werden kann, sind verschiedene Meßmethoden nötig. Dies ist auch der Grund, daß gerade für Lebensmittel nur wenige Daten veröffentlicht wurden.

In dieser Arbeit wurden deshalb die relativen Dielektrizitätskonstanten von Modellstoffen und Lebensmitteln gemessen. Neben einem kommerziellen Meßplatz, der nach dem Prinzip der offenen Koaxialleitung arbeitet, wurden drei verschiedene Resonatormeißplätze aufgebaut. Zwar können mit der offenen Koaxialleitung die dielektrischen Eigenschaften in einem weiten Wertebereich auch in Abhängigkeit von der Frequenz und Temperatur bestimmt werden, jedoch ist das erfaßte Probenvolumen sehr klein und zudem nicht genau definiert, so daß diese Methode für gröber disperse Systeme nicht geeignet ist. Für solche Systeme sind zylindrische Hohlraumresonatoren besser geeignet. In Abhängigkeit von der Geometrie stellt sich in einem solchen Resonator eine bestimmte Resonanzfrequenz ein, d. h. mit einem Resonator kann immer nur bei einer bestimmten

Frequenz gearbeitet werden. Wird eine Probe in den Resonator eingebracht, ändern sich die Resonanzeigenschaften. Aus diesen Änderungen kann dann auf die relative Dielektrizitätskonstante geschlossen werden. Die Änderungen sind die Verschiebung der Resonanzfrequenz und die Abschwächung der Resonanzkurve; außerdem wird die Resonanzkurve breiter. Es wurden zwei teilgefüllte und ein vollgefüllter Resonator mit unterschiedlichen Feldkonfigurationen eingesetzt. Beim vollgefüllten  $E_{010}$ -Resonator wird der gesamte Innenraum mit der zu untersuchenden Substanz gefüllt, so daß ein großes Probenvolumen von ca. 500 ml erfaßt wird. Nachteilig bei so großen Probenvolumina ist allerdings, daß die Resonanzkurve stark abgeschwächt wird, so daß die relative Dielektrizitätskonstante nur von Stoffen mit geringen dielektrischen Verlusten bestimmt werden kann. Zur Auswertung der Resonanzkurve existieren für diesen Resonator einfache Gleichungen. Bei den teilgefüllten  $H_{011}$ - und  $E_{012}$ -Resonatoren wird die Probe in Glasröhrchen gefüllt, auf die gewünschte Temperatur gebracht und entlang der Mittelachse in den Resonator eingebracht. Die Probenvolumina betragen je nach Durchmesser der Röhrchen bis 6 ml, so daß auch große Werte der Dielektrizitätskonstante und Verlustzahl bestimmt werden können. Da zur Auswertung keine Gleichungen existieren, wurden für diese Resonatoren Kalibrierkurven aufgestellt. Erstmals gelang es beim  $H_{011}$ -Resonator auch für die Verlustzahl Kalibrierkurven für die verschiedenen eingesetzten Probendurchmesser aufzustellen und mit dem  $E_{012}$ -Resonator können jetzt auch die relativen Dielektrizitätskonstanten von salzhaltigen Lösungen bestimmt werden, so daß mit diesen Meßverfahren die dielektrischen Eigenschaften von Lebensmitteln im gesamten interessierenden Bereich gemessen werden können.

Zur Überprüfung der eigenen Meßwerte wurde die theoretische Eindringtiefe herangezogen. Die theoretische Eindringtiefe kann einerseits aus der relativen Dielektrizitätskonstante berechnet werden und andererseits aus Temperaturprofilen nach einer Mikrowellenerwärmung bestimmt werden. Die theoretischen Eindringtiefen, die mit einem einfachen Versuchsaufbau aus Temperaturverteilungen ermittelt wurden, zeigen eine gute Übereinstimmung mit den theoretischen Eindringtiefen, die aus gemessenen relativen Dielektrizitätskonstanten berechnet wurden, sofern die Eindringtiefen nicht zu klein sind (ca. 10 mm).

Die wichtigsten Verlust- oder Relaxationsmechanismen bei der Mikrowellenerwärmung sind die Relaxation von Dipolen, die Ionenleitfähigkeit und die Relaxation von gebundenem Wasser und polaren Molekülteilen. Je nach Zusammensetzung einer Substanz überlagern sich diese Mechanismen auch und beeinflussen die Temperaturabhängigkeit der Dielektrizitätskonstante und Verlustzahl. Bei reinen Dipolen und Gemischen aus Dipolen ist entscheidend, ob die Meßfrequenz, bei der die relative Dielektrizitätskonstante bestimmt wird, größer oder kleiner als die Relaxationsfrequenz (die selbst temperaturabhängig ist) des untersuchten Stoffes bei der Temperatur ist. Bei Wasser beispielsweise ist die Mikrowellenfrequenz von 2,45 GHz viel kleiner als die Relaxationsfrequenz (etwa 20 GHz), bei Ethanol dagegen ist bei 20 °C die Relaxationsfrequenz von 1 GHz kleiner als die Mikrowellenfrequenz. Es ergeben sich so je nach Substanz unterschiedliche Temperaturabhängigkeiten. Eine Abschätzung des Verhaltens wird besonders bei

Mischungen aus Dipolen schwierig, da sich für jede Konzentration eine bestimmte Relaxationsfrequenz des Gemischs ergibt, die sich wiederum mit der Temperatur ändert.

Insgesamt steigt die relative Dielektrizitätskonstante an, je mehr Wasser in einer Substanz enthalten ist, da die Zahl der beitragenden Moleküle zunimmt. Je höher der Ölanteil einer Emulsion ist, desto niedriger sind Dielektrizitätskonstante und Verlustzahl. Bei Emulsionen ist auch zu beobachten, daß die kontinuierliche, d. h. die äußere Phase die relative Dielektrizitätskonstante entscheidend beeinflusst. So ist bei gleicher Konzentration die relative Dielektrizitätskonstante einer Öl-in-Wasser-Emulsion größer als die einer Wasser-in-Öl-Emulsion.

Da die Zusammensetzung bei Lebensmitteln sehr vielfältig ist, ist es interessant, ob durch Berechnung der dielektrischen Eigenschaften zumindest teilweise auf Messungen verzichtet werden kann. Es wurden deshalb Gleichungen aus der Literatur zur Berechnung der relativen Dielektrizitätskonstante von binären Mischungen auf ihre Anwendbarkeit hin geprüft. Es wurden Gleichungen ausgewählt, mit denen die relative Dielektrizitätskonstante einer Mischung aus den relativen Dielektrizitätskonstanten der beiden reinen Stoffe bestimmt werden kann. Zur Charakterisierung des Gemischs dient die Konzentration. Untersucht wurden Suspensionen und Emulsionen als Beispiele für disperse Systeme sowie Mischungen permanenter Dipole. Ein Teil der Gleichungen ist prinzipiell nicht geeignet, da die Werte der reinen Stoffe nicht richtig wiedergegeben werden. Teilweise werden sogar unsinnige, negative Werte berechnet. Die dispersen Systeme ließen sich alle recht gut mit der *Fricke-Mudgett-Gleichung* beschreiben. In diese Gleichung geht ein Formfaktor zur Charakterisierung der dispersen Phase ein. Wird dieser Formfaktor zusätzlich als Anpassungsparameter verwendet, ist die Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten relativen Dielektrizitätskonstanten sehr gut. Dieser Formfaktor wurde jeweils für Suspensionen, für Öl-in-Wasser- und für Wasser-in-Öl-Emulsionen angepaßt. Mit der *Raghavan-Martin-Gleichung*, die ursprünglich zur Berechnung der Wärmeleitfähigkeit von Schüttungen entwickelt wurde, läßt sich die relative Dielektrizitätskonstante von dispersen Systemen ebenfalls recht gut beschreiben. Vorteil dieser Gleichung ist, daß nicht zwischen den verschiedenen Systemen, wie Emulsionen oder Suspensionen, unterschieden werden muß.

Die Gemische aus permanenten Dipolen ließen sich dagegen mit keiner der in der Literatur dokumentierten Gleichungen zufriedenstellend beschreiben. Je nach Mischung und Temperatur durchlaufen die Dielektrizitätskonstante und die Verlustzahl bei bestimmten Konzentrationen ein oder zwei Maxima. Dieser Verlauf kann von keiner der untersuchten Gleichungen wiedergegeben werden. Es wurde deshalb geprüft, inwieweit Gleichungen zur Beschreibung anderer Stoffgrößen, bei denen bei Gemischen ähnliche Effekte beobachtet werden, auf die relative Dielektrizitätskonstante übertragen werden können. In der Thermodynamik werden solche Effekte, die auf dem Realverhalten einer Mischung beruhen, durch die Angabe von Exzeßgrößen charakterisiert. Eine vielfach eingesetzte Gleichung ist dort der Reihenansatz von REDLICH und KISTER (1948). Es wurden jetzt jeweils eine Exzeßdielektrizitätskonstante und Exzeßverlustzahl der unter-

suchten Alkohol-Wasser- und Ethanol-Isopropanol-Gemische gebildet und die Parameter der *Redlich-Kister-Gleichung* angepaßt. Für die verschiedenen Alkohol-Wasser-Gemische sind maximal drei Summanden der Reihe notwendig, was dann Gemischen sog. mittlerer Komplexität entspricht. Zur Beschreibung der Ethanol-Isopropanol-Gemische waren fünf Summanden erforderlich, was einem sog. komplexen Gemisch entspricht. Nachteilig ist, daß für diesen Ansatz immer genügend Meßdaten zur Verfügung stehen müssen, um die Parameter, die charakteristisch für das jeweilige Gemisch sind, anpassen zu können.

Im zweiten Teil der Arbeit wurde auf die Mikrowellenerwärmung eingegangen. Da die dielektrischen Eigenschaften einer Substanz nun bestimmt werden können, ist es möglich, die zum Erreichen einer gewünschten mittleren Endtemperatur im Produkt notwendige Erwärmungszeit in einem Haushaltsmikrowellengerät mit dem Modell von GR NEBERG (1994) vorzuberechnen. Für dieses Modell wurde in dieser Arbeit noch geprüft, wie sich ein verändertes Garraumvolumen auf den charakteristischen Geräteparameter auswirkt. Dieser Geräteparameter ist ein Maß dafür, wie gut die Mikrowellen eingekoppelt werden. Dazu wurde der Garraum eines Mikrowellengeräts durch Einsätze aus Blech verkleinert. Dadurch wurde zum einen die Leistung, die maximal von einem Produkt beim Erwärmen aufgenommen wird, kleiner, und zum anderen war auch der Geräteparameter dann niedriger. Der Geräteparameter ist demnach sowohl von der Einkopplung als auch vom Garraum selbst abhängig.

Neben der vom Produkt aufgenommenen Leistung und einer mittleren Endtemperatur ist die Temperaturverteilung im Produkt von entscheidender Bedeutung. Zu hohe Temperaturen können z. B. Verbrennungen verursachen und bei zu niedrigen Temperaturen ist u. U. eine Inaktivierung von schädlichen Inhaltsstoffen (Enzyme, Mikroorganismen) unzureichend. Experimente mit Modell-Lebensmitteln und handelsüblichen Fertiggerichten haben gezeigt, daß die Temperaturverteilung – besonders beim Auftauen – extrem ungleichmäßig ist. Dies gilt auch für das Erhitzen mit reduzierter Leistung im Standardpulsbetrieb, in dem das Gerät immer für konstante Zeiten ein- und ausgeschaltet ist. Ursachen sind die ungleichmäßige Verteilung des elektrischen Feldes im Gerät sowie die Geometrie und die dielektrischen Eigenschaften des Lebensmittels. Abhilfe ist hier nur durch ausreichende Ausgleichzeiten während der Erwärmung zu erreichen. Ein Mikrowellengerät sollte deshalb so geregelt werden, daß mit dem Erreichen einer kritischen Temperatur an einer beliebigen Stelle im Gut die Erwärmung unterbrochen wird. Erst nach einer gewissen Ausgleichszeit soll weiter Mikrowellenenergie zugeführt werden, solange bis wieder die kritische Temperatur erreicht wird, usw.

Zur Erwärmung von dicht verschlossenen Fertiggerichten wurde deshalb eine Regelung entwickelt und in ein Mikrowellengerät eingebaut, mit der es möglich ist, den im Gericht entstehenden Überdruck über eine Kraftmessung aufzunehmen. Beim Überschreiten eines maximalen oberen Wertes wird das Gerät ausgeschaltet und erst nach dem Unterschreiten eines unteren Grenzwertes wieder eingeschaltet. Die Erwärmung wird so an die Temperatur im Lebensmittel angepaßt. Die Erwärmungsergebnisse mit dieser Kraftregelung sind deutlicher besser als die Erwärmung z. B. mit mittlerer Leistung im Standardpulsbetrieb bei insge-

samt gleichen Gesamtzeiten. Besonders günstig ist diese Kraftregelung für das Auftauen. Hier traten ohne Regelung Temperaturunterschiede im Produkt von über 90 K auf. Teilweise war das Produkt auch verbrannt. Mit der Kraftregelung betragen die maximalen Temperaturunterschiede weniger als 10 K.

Da die Mikrowellenerwärmung zunehmend auch in der Industrie eingesetzt wird, wurden auch Untersuchungen mit einer quasikontinuierlichen Technikumsanlage durchgeführt. Das Modell zur Bestimmung der insgesamt von einem Gut aufgenommenen Leistung ist auch auf die Verhältnisse in der Technikumsanlage übertragbar. Hier war allerdings festzustellen, daß die Leistungsaufnahme vom Abstand zwischen Produktoberfläche und Hornstrahler, mit dem die Mikrowellen in die Anlage eingekoppelt werden, abhängig ist. Wird dies mit einem Faktor im Modell berücksichtigt, kann auch für die Technikumsanlage die vom Produkt aufgenommene Leistung berechnet werden, sofern die dielektrischen Eigenschaften des Produkts bekannt sind.

Die Temperaturverteilung im Gut, die ähnlich ungleichmäßig wie im Haushaltsgerät war, konnte bei der Mikrowellenanlage durch den Austausch des Transportwagens verbessert werden. Am Originaltransportwagen aus Edelstahl wurden die Mikrowellen teilweise ungünstig ins Produkt reflektiert. Mit einem neuen Wagen aus Kunststoff wurde die Temperaturverteilung dann deutlich gleichmäßiger.

Mit den in dieser Arbeit vorgestellten Meßmethoden können die dielektrischen Eigenschaften von Lebensmitteln jetzt im gesamten interessierenden Bereich bestimmt werden. Zusätzlich ist für Suspensionen und Emulsionen eine Berechnung der relativen Dielektrizitätskonstante aus den relativen Dielektrizitätskonstanten der reinen Phasen mit der angepaßten *Fricke-Mudgett-Gleichung* oder der *Raghavan-Martin-Gleichung* möglich. Das Realverhalten der Dielektrizitätskonstante und Verlustzahl von Mischungen permanenter Dipole kann mit der *Redlich-Kister-Gleichung* beschrieben werden. Sind die dielektrischen Eigenschaften bekannt, kann mit dem Modell zur Leistungsaufnahme für Haushaltsgeräte und für die Technikumsanlage ermittelt werden, welche Erwärmungszeit zum Erreichen einer gewünschten mittleren Endtemperatur notwendig ist. Diese Erwärmungszeit kann im Haushaltsgerät durch eine Regelung, wie die vorgestellte Kraftregelung, sinnvoll durch Ausgleichszeiten aufgeteilt werden, so daß eine gleichmäßige Temperaturverteilung erzielt wird.



## 6 Literatur

ALTSCHULER, H. M.: *Dielectric Constant*. In: SUCHER, M. (Hrsg.): *Handbook of Microwave Measurements*. 3. Aufl. New York : Wiley, 1963, S. 495–548

ARCE, A. ; BLANCO, A. ; MENDOZA, J. ; SOTO, A.: *Densities, Refractive Indices, and Excess Molar Volumes of Water + Ethanol + 2-Methoxy-2-methylpropane at 298.15 K*. In: *J. Chem. Eng. Data* 40 (1995), S. 1285–1287

AYAPPA, K. G. ; DAVIS, H. T. ; DAVIS, E. A. ; GORDON, J.: *Analysis of Microwave Heating of Materials with Temperature-Dependent Properties*. In: *AIChE Journal* 37 (1991), Nr. 3, S. 313–322

AYAPPA, K. G. ; DAVIS, H. T. ; DAVIS, E. A. ; GORDON, J.: *Two-Dimensional Finite Element Analysis of Microwave Heating*. In: *AIChE Journal* 38 (1992), Nr. 10, S. 1577–1592

BARRINGER, S. A. ; DAVIS, E. A. ; GORDON, J. ; AYAPPA, K. G. ; DAVIS, H. T.: *Microwave-Heating Temperature Profiles for Thin Slabs Compared to Maxwell and Lambert Law Predictions*. In: *J. Food Science* 60 (1995), Nr. 5, S. 1137–1142

BARTHEL, J. ; BACHHUBER, K. ; BUCHNER, R. ; HETZENAUER, H.: *Dielectric Spectra of some common Solvents in the Microwave Region. Water and Lower Alcohols*. In: *Chemical Physics Letters* 165 (1990), Nr. 4, S. 369–374

BENGTSSON, N. E. ; RISMAN, P. O.: *Dielectric Properties of Food at 3 GHz as Determined by a Cavity Perturbation Technique. II. Measurements on Food Materials*. In: *J. Microwave Power* 2 (1971), Nr. 6, S. 107–123

BOSE, T. K. ; CHAHINE, R. ; MERABET, M. ; THOEN, J.: *Dielectric Study of the Liquid Crystal Compound Octylcyanobiphenyl (8CB) Using Time Domain Spectroscopy*. In: *J. Physique* 45 (1984), Nr. 8, S. 1329–1336

- BUTCHER, C. J. F.: *The dielectric constant of crystalline powders*. In: Rec. Trav. Chim. 64 (1944), S. 47-51
- BOWS, J. R. ; CLARK, P.: *Computer Simulation of Microwave Heating of a Cylinder of Food*. Chipping : The Campden Food and Drink Research Association, 1990 (Technical Memorandum No. 574, MAFF Project No. 4612)
- BUCKLEY, F. ; MARYOTT, A. A.: *Tables of Dielectric Dispersion Data for Pure Liquids and Dilute Solutions*. Washington, D. C. : U. S. Dept. of Commerce, National Bureau of Standards, 1958
- BUFFLER, C. R.: *Microwave Cooking and Processing: Engineering Fundamentals for the Food Scientist*. New York : Van Nostrand Reinhold, 1993
- BUFFLER, C. R. ; STANFORD, M. A.: *Effects of Dielectric and Thermal Properties on the Microwave Heating of Foods*. In: Microwave World 16 (1995), Nr. 1, S. 5-10
- CABLE, D. W. ; SAASKI, E.: *Fiberoptic Pressure Measurement of Spontaneous Bumping/Splattering of Foods During Microwaving*. In: Food Technology 44 (1990), Nr. 6, S. 120
- CHAMBERLAIN, J. (Hrsg.) ; CHANTRY, G. W. (Hrsg.): *High Frequency Dielectric Measurement*. Guildford : IPC Science and Technology Press, 1973. - ISBN 0-902852-25-6
- CLAUSIUS, R.: *Mechanische Wärmetheorie*. 2., umgearbeitete und vervollständigte Aufl. Braunschweig : Vieweg, 1879
- COLLIE, C. H. ; HASTED, J. B. ; RITSON, D. M.: *The Cavity Resonator Method of Measuring the Dielectric Constants of Polar Liquids in the Centimetre Band*. In: Proc. Phys. Soc. 60 (1948), S. 71-82
- COLLIN, R. E.: *Foundations for Microwave Engineering*. 2. Aufl. New York : McGraw-Hill, 1992
- CRUZ, G. ; PERSCH, C. ; SCHUBERT, H.: *Untersuchungen zur Temperaturverteilung in Lebensmitteln beim Erwärmen in einer kontinuierlichen Mikrowellenanlage*. In: Internationales Seminar für Forschung und Lehre in Chemieingenieurwesen, Technischer und Physikalischer Chemie an der Universität Karlsruhe (T.H.) (Hrsg.): *Wissenschaftliche Abschlußberichte 30. Internationales Seminar*. Karlsruhe, 1995, S. 4-14
- DEBYE, P.: *Polar Molecules*. New York : Dover Publications, 1929

DECAREAU, R. V.: *Microwaves in the Food Processing Industry*. Orlando : Academic Press, 1985

DIBBEN, D. C. ; METAXAS, A. C.: *Time Domain Finite Element Analysis of Multimode Microwave Applicators Loaded with High and Low Loss Materials*. In: ELECTRICITY UTILISATION GROUP (Hrsg.): *Fifth International Conference on Microwave and High Frequency Heating*. Cambridge, 17.-21.09.1995 – Conference Proceedings (Paper No. A 3)

ENGELDER, D. S. ; BUFFLER, C. R.: *Measuring Dielectric Properties of Food Products at Microwave Frequencies*. In: *Microwave World* 12 (1991), Nr. 2, S. 2–11

FOSTER, K. R. ; SCHWAN, H. P.: *Dielectric Properties of Tissues and Biological Materials: A Critical Review*. In: *Critical Reviews in Biomedical Engineering* 17 (1989), Nr. 1, S. 25–104

FRICKE, H.: *The complex Conductivity of a Suspension of stratified Particles of spherical or cylindrical Form*. In: *J. Phys. Chem.* 59 (1955), Nr. 2, S. 168–170

FU, W. ; METAXAS, A.: *Numerical Prediction of Three-Dimensional Power Density Distribution in a Multi-Mode Cavity*. In: *J. Microwave Power and Electromagn. Energy* 29 (1994), Nr. 2, S. 67–75

FU, Y. C. ; TONG, C. H. ; LUND, D. B.: *Microwave Bumping: Quantifying Explosions in Foods During Microwave Heating*. In: *J. Food Science* 59 (1994), Nr. 4, S. 899–904

GALLONE, G. ; LUCARDESI, P. ; MARTINELLI, M. ; ROLLA, P. A.: *A Fast and Precise Method for the Measurement of Dielectric Permittivity at Microwave Frequencies*. In: *J. Microwave Power and Electromagn. Energy* 31 (1996), Nr. 3, S. 158–164

GRANT, J. P. ; CLARKE, R. N. ; SYMM, G. T. ; SPYROU, N. M.: *A critical study of the open-ended coaxial line sensor technique for RF and microwave complex permittivity measurements*. In: *J. Phys. E: Sci. Instrum.* 22 (1989), S. 757–770

GREFFE, J. L. ; GROSSE, C.: *Static Permittivity of Emulsions*. In: PRIOU, A. (Hrsg.): *Dielectric Properties of heterogeneous Materials*. In: KONG, J. A. (Hrsg.): *PIER Progress in Electromagnetic Research*. Bd. 6. New York : Elsevier, 1992, S. 41–100

GR NEBERG, M.: *Untersuchungen und Modellbildung zur Mikrowellenerwärmung von Lebensmitteln im Haushalt*. Karlsruhe, Universität Karlsruhe (T.H.), Fakultät für Chemieingenieurwesen, Diss., 1994

GR NEBERG, M. ; SCHUCHMANN, H. ; SCHUBERT, H.: *Mikrowellenerwärmung von Speisefetten und -ölen*. In: *ZFL* 43 (1992), Nr. 1/2, S. EFS 1–EFS 5

- GUO, X. ; GR NEBERG , M. ; SCHUBERT, H.: *Einfluß der Wasserbindungsart auf die Mikrowellen-Erwärmung von Lebensmitteln*. In: Internationales Seminar für Forschung und Lehre in Chemieingenieurwesen, Technischer und Physikalischer Chemie an der Universität Karlsruhe (T.H.) (Hrsg.): *Wissenschaftliche Abschlußberichte 28. Internationales Seminar*. Karlsruhe, 1993, S. 137–147
- HARMS, P. H. ; CHEN, Y. ; MITTRA, R. ; SHIMONY, Y.: *Numerical Modeling of Microwave Heating Systems*. In: J. Microwave Power and Electromagn. Energy 31 (1996), Nr. 2, S. 114–121
- HARVEY, A. F.: *Microwave Engineering*. London : Academic Press, 1963
- HASTED, J. B.: *Aqueous Dielectrics*. London : Chapman and Hall, 1973
- HASTED, J. B. ; RITSON, D. M. ; COLLIE, C. H.: *Dielectric Properties of Aqueous Ionic Solutions. Parts I and II*. In: J. Chem. Phys. 16 (1948), Nr. 1, S. 1–21
- HEWLETT PACKARD: User's Manual. HP 85070 B Dielectric Probe Kit. 1993a. – Firmenschrift
- HEWLETT PACKARD: HP 85070 B Quick reference. 1993b (85070-90012). – Firmenschrift
- HEWLETT PACKARD: HP 85070 M Dielectric Probe Measurement System, HP 85070 B High-Temperature Dielectric Probe Kit : Technical Data. 1993c (5091-6247E). – Firmenschrift
- HEWLETT PACKARD: Dielectric Materials Measurements : Solutions Catalog of Fixtures & Software. 1993d (5091-4291E). – Firmenschrift
- HOLBACH, H.: *Faseroptische Temperaturmessung*. In: Sensor Report (1989), Nr. 5. – Sonderdruck
- JIA, X. ; JOLLY, P.: *Simulation of Microwave Field and Power Distribution in a Cavity by a Three-Dimensional Finite Element Method*. In: J. Microwave Power and Electromagn. Energy 27 (1992), Nr. 1, S. 11–22
- JIANG, G. Q. ; WONG, W. H. ; RASKOVICH, E. Y. ; CLARK, W. G. ; HINES, W. A. ; SANNY, J.: *Open-ended coaxial-line technique for the measurement of the microwave dielectric constant for low-loss solids and liquids*. In: Rev. Sci. Instrum. 64 (1993), Nr. 6, S. 1614–1621
- KAATZE, U.: *Ein Verfahren zur Messung der komplexen Dielektrizitätszahl an kleinen Flüssigkeitsmengen im Frequenzbereich von 0,7–25 GHz*. In: Appl. Phys. 2 (1973), Nr. 8, S. 241–246

---

KENT, M.: *Electrical and Dielectric Properties of Food Materials*. Hornchurch : Science and Technology Publishers, 1987 (A COST90bis Production)

KIRK, D. ; HOLMES, A. W.: *The Heating of Foodstuffs in a Microwave Oven*. In: J. Food Technology 10 (1975), Nr. 4, S. 375-384

KRASZEWSKI, A. W.; TRABELSI, S.; NELSON, S. O.: *Wheat Permittivity Measurements in Free Space*. In: J. Microwave Power and Electromagn. Energy 31 (1996), Nr. 3, S. 135-141

KRITIKOS, H. N. ; FOSTER, K. R. ; SCHWAN, H. P.: *Temperature Profiles in Spheres Due to Electromagnetic Heating*. In: J. Microwave Power 16 (1981), Nr. 3/4, S. 327-344

KUMMER, M.: *Grundlagen der Mikrowellentechnik*. Berlin : VEB, 1986. – ISBN 3-341-00088-7

LANDAU, L. D. ; LIFSCHITZ, E. M.: *Lehrbuch der theoretischen Physik*. Bd. 8 : *Elektrodynamik der Kontinua*. Berlin : Akademie, 1967

LICHTENECKER, K. ; ROTHER, K.: *Die Herleitung des logarithmischen Mischungsgesetzes aus allgemeinen Prinzipien der stationären Strömung*. In: Physikalische Zeitschrift 32 (1931), S. 255-260

LORENSEN, C.: *The Why's and How's of Mathematical Modelling for Microwave Heating*. In: Microwave World 11 (1990), Nr. 1, S. 14-23

LUXTRON: The Operator's Guide : Model 755 Fluoroptic Thermometer. Circa 1989 (38-11250-01 Revision F). – Firmenschrift

MA, Y. H. ; PELTRE, P.: *Mathematical Simulation of a Freeze Drying Process Using Microwave Energy*. In: Food Preservation AIChE Symposium Series 69 (1973), Nr. 132, S. 47-54

MARTIN, H.: persönliche Mitteilung am 30.04.1997

MASHIMO, S. ; KUWABARA, S. ; YAGIHARA, S. ; HIGASI, K.: *The dielectric relaxation of mixtures of water and primary alcohol*. In: J. Chem. Phys. 90 (1989), Nr. 6, S. 3292-3294

MASHIMO, S. ; UMEHARA, T. ; REDLIN, H.: *Structures of water and primary alcohol studied by microwave dielectric analyses*. In: J. Chem. Phys. 95 (1991), Nr. 9, S. 6257-6260

- MEINKE ; GUNDLACH: *Taschenbuch der Hochfrequenztechnik* / LANGE, K. (Hrsg.) ; L. CHERER , K.-H. (Hrsg.). 5., überarb. Aufl. Berlin : Springer, 1992. – ISBN 3-540-54717-7
- MEREDITH, R. J.: *A Three Axis Model of the Mode Structure of Multimode Cavities*. In: J. Microwave Power and Electromagn. Energy 29 (1994), Nr. 1, S. 31–44
- METAXAS, A. C. ; MEREDITH, R. J.: *Industrial Microwave Heating*. London : Peter Peregrinus, 1983. – ISBN 0-906048-89-3
- MEYER, W.: *Dielektrische Messungen im Mikrowellenbereich*. In: Mikrowellen Magazin 4 (1978), Nr. 1, S. 26–32
- MIE, G.: *Beiträge zur Optik trüber Medien, speziell kolloidaler Metallösungen*. In: Annalen der Physik 25/4 (1908), Nr. 3, S. 377–445
- MUDGE, R. E.: *Microwave Properties and Heating Characteristics of Foods*. In: Food Technology 40 (1986), Nr. 6, S. 84–93
- MUDGE, R. E. ; WANG, D. I. C. ; GOLDBLITH, S. A.: *Prediction of dielectric properties in oil-water and alcohol-water mixtures at 3,000 MHz, 25 °C based on pure component properties*. In: J. Food Science 39 (1974), Nr. 4, S. 632–635
- NELSON, S. O.: *Moisture, Frequency and Density Dependence of the Dielectric Constant of shelled, yellow-dent Field Corn*. In: Transactions of the ASAE (1984), S. 1573–1585
- NELSON, S. O. ; FORBUS, W. ; LAWRENCE, K.: *Permittivities of fresh Fruit and Vegetables at 0.2 to 20 GHz*. In: J. Microwave Power 29 (1994), Nr. 2, S. 81–93
- NELSON, S. O. ; KRASZEWSKI, A. W.: *Dielectric Properties of Materials and Measurement Techniques*. In: Drying Technology 8 (1990), Nr. 5, S. 1123–1142
- NIMTZ, G.: *Mikrowellen : Einführung in Theorie und Anwendung*. Mannheim : BI-Wiss.-Verl., 1990. – ISBN 3-411-03203-0
- Norm DIN 44 566 Teil 1–3 November 1989. *Mikrowellengeräte für den Haushalt; Gebrauchseigenschaften, Begriffe, Prüfungen, Anforderungen*
- Norm DIN IEC 49(Sec)230 Juni 1992. *Begriffe für dielektrische Resonatoren wellenabhängigen Typs*. – Entwurf
- Norm DIN IEC 49(Sec)250 April 1993. *Meßverfahren für die relative Dielektrizitätskonstante von dielektrischen Resonatorwerkstoffen im Mikrowellen-Frequenzbereich*. – Entwurf

Norm DIN IEC 59H(Sec)<sub>49</sub> Mai 1995. *Mikrowellengeräte für den Haushalt: Gebrauchseigenschaften, Änderungen des Abschnittes 16 zu IEC 705 : 1988, (IEC 59H(Sec)<sub>49</sub> : 1994).* – Entwurf

OHLSSON, T.: *Dielectric Properties and Microwave Processing.* In: SINGH, R. P. (Hrsg.) ; MEDINA, A. G. (Hrsg.): *Food Properties and Computer-Aided Engineering of Food Processing Systems.* Kluwer Academic Publishers, 1989, S. 73–92

OHLSSON, T. ; BENGTTSSON, N. E.: *Microwave heating profiles in foods.* In: *Microwave Energy Application* 4 (1971), Nr. 6, S. 3–8

OHLSSON, T. ; BENGTTSSON, N. E.: *Dielectric Food Data for Microwave Sterilization Processing.* In: *J. Microwave Power* 10 (1975), Nr. 1, S. 93–108

ONSAGER, L.: *Electric moments of molecules in liquids.* In: *J. Amer. Chem. Soc.* 58 (1936), S. 1468–1493

PADUA, G. W.: *Microwave Heating of Agar Gels Containing Sucrose.* In: *J. Food Science* 58 (1993), Nr. 6, S. 1426–1428

PAHL, M. ; GLEISSLE, W. ; LAUN, H.-M.: *Praktische Rheologie der Kunststoffe und Elastomere/ VDI-GESELLSCHAFT KUNSTSTOFFTECHNIK* (Hrsg.). 4., überarb. Aufl. Düsseldorf : VDI, 1995. – ISBN 3-18-234192-8

PFEIFFER, T.: *Dielektrische Eigenschaften von Lebensmitteln.* In: *ZFL* 45 (1994), Nr. 7/8, S. 38–41

PRAUSNITZ, J. M. ; LICHTENTHALER, R. N. ; DE AZEVEDO, E. G.: *Molecular Thermodynamics of Fluid-Phase Equilibria.* 2. Aufl. Englewood Cliffs : Prentice-Hall, 1986. – ISBN 0-13-599564-7

PRIOU, A. (Hrsg.): *Dielectric Properties of heterogeneous Materials.* In: KONG, J. A. (Hrsg.): *PIER Progress in Electromagnetic Research.* Bd. 6. New York : Elsevier, 1992

P SCHNER, A.: *Wärme durch Mikrowellen.* Eindhoven : Philips Technische Bibliothek, 1964

RAGHAVAN, V. R. ; MARTIN, H.: *Modelling of two-phase thermal conductivity.* In: *Chem. Eng. Process.* 34 (1995), S. 439–446

RAO, M. A. (Hrsg.) ; RIZVI, S. S. H. (Hrsg.): *Engineering Properties of Foods.* 2. Aufl. New York : Marcel Dekker, 1995. – ISBN 0-8247--8943-1

- RAYLEIGH, R. S.: *On the Influence of Obstacles arranged in Rectangular Order upon the Properties of a Medium*. In: Philosophical Magazine and Journal of Science 34 (1892), Nr. 5, S. 481–502
- REDLICH, O. ; KISTER, A. T.: *Algebraic Representation of Thermodynamic Properties and The Classification of Solutions*. In: Ind. Eng. Chem. 40 (1948), S. 345–348
- RISMAN, P. O. ; BENGTTSSON, N. E.: *Dielectric Properties of Food at 3 GHz as Determined by a Cavity Perturbation Technique. I. Measuring Technique*. In: J. Microwave Power 2 (1971), Nr. 6, S. 101–106
- ROBERTS, S. ; VON HIPPEL, A.: *A new method for measuring dielectric constant and loss in the range of centimeter waves*. In: J. Appl. Phys. 17 (1946), Nr. 7, S. 610–616
- ROEBUCK, B. D. ; GOLDBLITH, S. A. ; WESTPHAL, W. B.: *Dielectric Properties of Carbohydrate-Water Mixtures at Microwave Frequencies*. In: J. Food Science 37 (1972), S. 199–204
- ROST, A.: *Messung dielektrischer Stoffeigenschaften*. Braunschweig : Vieweg, 1978. – ISBN 3-528-06839-6
- SCHIFFMANN, R. F.: *Microwave Foods: Basic Design Considerations*. In: Tappi Journal 3 (1990), Nr. 3, S. 209–212
- SCHUBERT, H.: persönliche Mitteilung am 07.01.1997
- SCHUBERT, H. ; GR NEBERG , M. ; WALZ, E.: *Erwärmung von Lebensmitteln durch Mikrowellen: Grundlagen, Meßtechnik, Besonderheiten*. In: ZFL 42 (1991), Nr. 4, S. EFS 14–EFS 21
- SCHUBERT, H. ; GR NEWALD , T.: *Wärmequellenverteilung in Modellkörpern bei der Mikrowellen-Erhitzung*. In: Chem.-Ing.-Tech. 55 (1983), Nr. 7, S. 553–555
- STAMMER, A.: *Über das Trocknungsverhalten von Einzelkörpern bei der Mikrowellen-Trocknung*. Düsseldorf : VDI, 1991 (Fortschr.-Ber. VDI-Reihe 3 Nr. 272)
- STUCHLY, S. S. ; HAMID, M. A. K.: *Physical Parameters in Microwave Heating Processes*. In: J. Microwave Power 7 (1972), Nr. 2, S. 117–137
- STUCHLY, M. A. ; STUCHLY, S. S.: *Coaxial Line Reflection Methods for Measuring Dielectric Properties of Biological Substances at Radio and Microwave Frequencies – A Review*. In: IEEE Trans on Instrum. and Meas. IM-29 (1980), Nr. 3, S. 176–183
- SUBRAMANIAN, V. ; BELLUBBI, B. S. ; SOBHANADRI, J.: *Dielectric studies of some binary liquid mixtures using microwave cavity techniques*. In: Pramana – J. Phys. 41 (1993), Nr. 1, S. 9–20

SUN, E. ; DATTA, A. ; LOBO, S.: *Composition-based Prediction of Dielectric Properties of Foods*. In: J. Microwave Power and Electromagn. Energy 30 (1995), Nr. 4, S. 205–212

SUNDBERG, M. ; RISMAN, P. O. ; KILDAL, P.-S.: *Quantification of Heating Uniformity in Multi-Applicator Tunnel Ovens*. In: ELECTRICITY UTILISATION GROUP (Hrsg.): *Fifth International Conference on Microwave and High Frequency Heating*, Cambridge, 17.–21.09.1995 – Conference Proceedings (Paper No. A 5)

SUNDBERG, M.: *Microwave Modeling – from Analysis to Synthesis*. In: Microwave World 17 (1996), Nr. 1, S. 19–22

SUNDBERG, M. ; RISMAN, P. O. ; KILDAL, P.-S. ; OHLSSON, T.: *Analysis and Design of Industrial Microwave Ovens Using the Finite Difference Time Domain Method*. In: J. Microwave Power and Electromagn. Energy 31 (1996), Nr. 3, S. 142–157

TINGA, W. R.: *Mixture Laws and Microwave–Material Interactions*. In: PRIOU, A. (Hrsg.): *Dielectric Properties of heterogeneous Materials*. In: KONG, J. A. (Hrsg.): *PIER Progress in Electromagnetic Research*. Bd. 6. New York : Elsevier, 1992, S. 1–40

TINGA, W. R. ; NELSON, S. O.: *Dielectric Properties of Materials for Microwave Processing – Tabulated*. In: J. Microwave Power 8 (1973), Nr. 1, S. 23–65

TRAN, V. N. ; STUCHLY, S. S. ; KRASZEWSKI, A.: *Dielectric Properties of selected Vegetables and Fruits. 0.1–10.0 GHz*. In: J. Microwave Power 19 (1984), Nr. 4, S. 251–258

TSOTSAS, E. ; MARTIN, H.: *Thermal Conductivity of Packed Beds. A Review*. In: Chem. Eng. Process. 22 (1987), S. 19–37

TULASIDAS, T. N. ; RAGHAVAN, G. S. V. ; VAN DE VOORT, F. ; GIRARD, R.: *Dielectric Properties of Grapes and Sugar Solutions at 2.45 GHz*. In: J. Microwave Power and Electromagn. Energy 30 (1995), Nr. 2, S. 117–123

VAN DE HULST, H. C.: *Light Scattering by Small Particles*. New York : Dover Publications, 1981

VON HIPPEL, A. R. (Hrsg.): *Dielectric Materials and Applications*. New York : MIT Press, 1954

WAGNER, K. W.: *Erklärung der dielektrischen Nachwirkungsvorgänge auf Grund Maxwell'scher Vorstellungen*. In: Archiv für Elektrotechnik 2 (1914), S. 371–387

WIENER, O.: *Die Theorie des Mischkörpers für das Feld der stationären Strömung*. In: Abhandlungen der mathematisch-physikalischen Klasse der königlich-sächsischen Gesellschaft der Wissenschaft 32 (1913), S. 507–604



# Anhang

## A 1 Nullstellen der Besselfunktionen

Die zur Berechnung der Resonanzwellenlänge bzw. der Resonanzfrequenz eines zylindrischen Hohlraumresonators nach Gleichung 2-50 oder 2-51 (je nachdem ob mit einem  $E_{mnp}$ - oder  $H_{mnp}$ -Mode gearbeitet werden soll) benötigten  $n$ -ten Nullstellen der Besselfunktion  $m$ -ter Ordnung  $x_{m,n}$  und ihrer Ableitung  $x'_{m,n}$  sind in Tabelle A 1-1 zusammengestellt (aus HARVEY, 1963).

Die jeweiligen Werte von  $m$  und  $n$  sind in der Tabelle mit aufgeführt. Der gewünschte Wert von  $p$ , der Zahl der Halbwellen in axialer Richtung im Resonator, wird direkt in Gleichung 2-50 oder 2-51 eingesetzt.

$E_{mnp}$ -Moden			$H_{mnp}$ -Moden		
$m$	$n$	$x_{m,n}$	$m$	$n$	$x'_{m,n}$
1	1	1,841	0	1	2,405
2	1	3,054	1	1	3,832
0	1	3,832	2	1	5,136
3	1	4,201	0	2	5,520
1	2	5,332	1	2	7,016
2	2	6,706	2	2	8,417

Tab. A 1-1: Nullstellen der Besselfunktion und ihrer Ableitung (aus HARVEY, 1963).

## A 2 Bestimmung der relativen Dielektrizitätskonstante

### A 2.1 Abmessungen der Resonatoren und Probenröhrchen

#### $E_{010}$ -Resonator

Innendurchmesser:  $d_{Res} = 93,5$  mm  
 Innenhöhe:  $h_{Res} = 70$  mm  
 Probenvolumen:  $V_{Pr} = 480$  ml (vollgefüllter Resonator)

#### $H_{011}$ -Resonator

Innendurchmesser:  $d_{Res} = 173$  mm  
 Innenhöhe:  $h_{Res} = 122$  mm

#### Probenröhrchen:

Füllhöhe:	$h_{Pr} = 122$ mm			
Außendurchmesser $d_a$ / mm:	10	8	7	5
Innendurchmesser $d_{Pr}$ / mm:	8	6	5	3,4
Probenvolumen $V_{Pr}$ / ml:	6,1	3,5	2,4	1,1

In weiteren Experimenten wurde geprüft, ob eine sinnvolle Kalibrierung möglich ist, wenn die Füllhöhe der Probe geändert wird. Dazu wurden Probenröhrchen mit einem Außendurchmesser von 10 mm eingesetzt und folgende Probenvolumina und Füllhöhen eingestellt:

Probenvolumen $V_{Pr}$ / ml:	2	3	4
Füllhöhe $h_{Pr}$ / mm:	40	60	80

#### $E_{012}$ -Resonator

Innendurchmesser:  $d_{Res} = 93,5$  mm  
 Innenhöhe:  $h_{Res} = 178$  mm

#### Probenröhrchen:

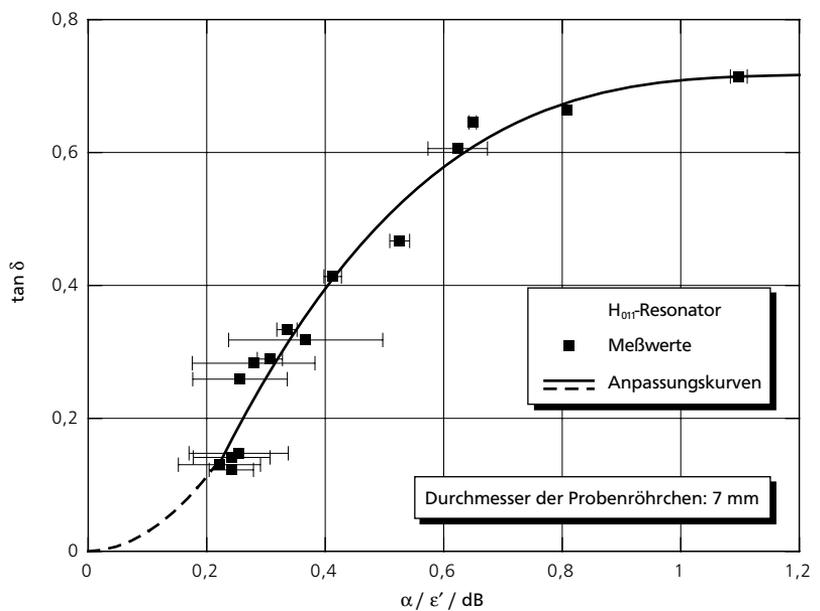
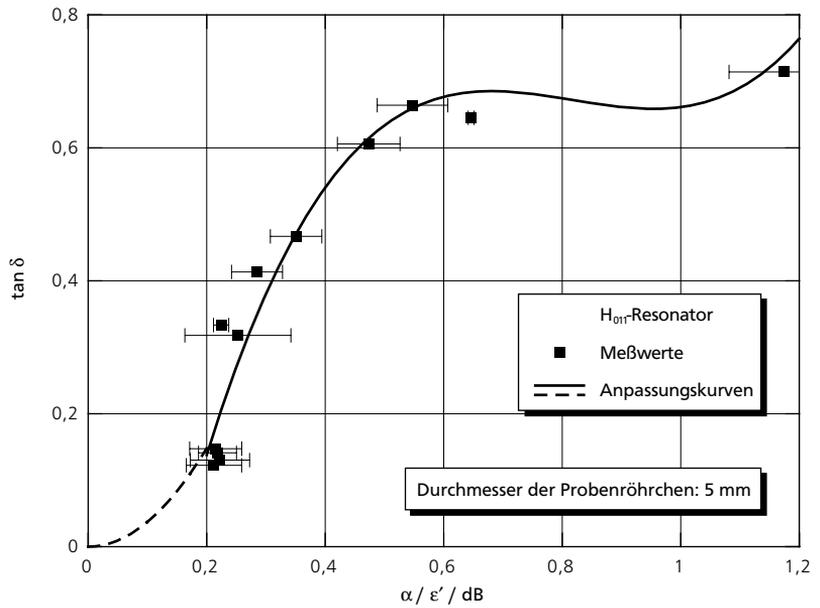
Füllhöhe:	$h_{Pr} = 89$ mm
Außendurchmesser:	$d_a = 7$ mm
Innendurchmesser:	$d_{Pr} = 5$ mm
Probenvolumen:	$V_{Pr} = 1,7$ ml

Die zur Kalibrierung des  $H_{011}$ - und  $E_{012}$ -Resonators verwendeten Substanzen sind in Tabelle A 2-1 aufgelistet. Die relativen Dielektrizitätskonstanten wurden mit der offenen Koaxialleitung gemessen.

Substanz	Temperatur/°C	$\epsilon'$	$\epsilon''$	$H_{011}$	$E_{012}$
Wasser	3,5	81,3	18,6		x
Wasser	20	76,6	10,8	x	x
Wasser	37	71,8	6,7		x
Wasser	59	65,8	5,4		x
Wasser	79	60,5	4		x
Wasser	89	56,5	3,1		x
Methanol	20	20,9	13,7	x	x
45 Gew.% Methanol, 55 Gew.% Wasser	20	50,1	20,5	x	x
60 Gew.% Methanol, 40 Gew.% Wasser	20	40,6	20,1	x	x
70 Gew.% Methanol, 30 Gew.% Wasser	20	35	19,5	x	x
90 Gew.% Methanol, 10 Gew.% Wasser	20	24	16,4	x	x
Ethanol	20	7,4	6,2	x	x
50 Mol% Ethanol, 50 Mol% Wasser	20	20,2	14,6	x	x
2-Propanol	20	4,4	2,5	x	x
50 Mol% 2-Propanol, 50 Mol% Wasser	20	11,3	8,5	x	x
1-Butanol	20	4,4	1,9	x	x
1-Heptanol	20	3,2	0,7	x	x
1-Decanol	20	2,9	0,4	x	x
1 Gew.% Kochsalzlösung	3,5	77,2	24,1		x
1 Gew.% Kochsalzlösung	20	74,2	21,2	x	x
1 Gew.% Kochsalzlösung	37	70,8	22,7		x
1 Gew.% Kochsalzlösung	50	67,4	24,9		x
5 Gew.% Kochsalzlösung	3,5	69	44,1		x
5 Gew.% Kochsalzlösung	20	66,2	56,3		x
5 Gew.% Kochsalzlösung	37	63,3	66,6		x
5 Gew.% Kochsalzlösung	50	60,0	78,5		x
10 Gew.% Kochsalzlösung	3,5	60,3	67,2		x
10 Gew.% Kochsalzlösung	20	57,2	93,5	x	x
10 Gew.% Kochsalzlösung	37	54,7	113,3		x
10 Gew.% Kochsalzlösung	50	51,6	135,5	x	x
1 Gew.% Saccharoselösung	20	76,3	11,3		x
5 Gew.% Saccharoselösung	20	74,7	11,9	x	x
10 Gew.% Saccharoselösung	20	72,2	12,5	x	x
20 Gew.% Saccharoselösung	20	68,8	15,6	x	
30 Gew.% Saccharoselösung	20	63,2	17,4	x	
40 Gew.% Saccharoselösung	20	52,1	17,3	x	x
Traubenkernöl	20	2,8	0,1	x	x

Tab. A 2-1: Kalibriersubstanzen für den  $H_{011}$  und den  $E_{012}$ -Resonator.

In den Abbildungen A 2-1 bis A 2-3 sind für den  $H_{011}$ -Resonator die Kalibrierkurven der Verlustzahl für Durchmesser der Probenröhrchen von 5, 7 und 8 mm dargestellt.



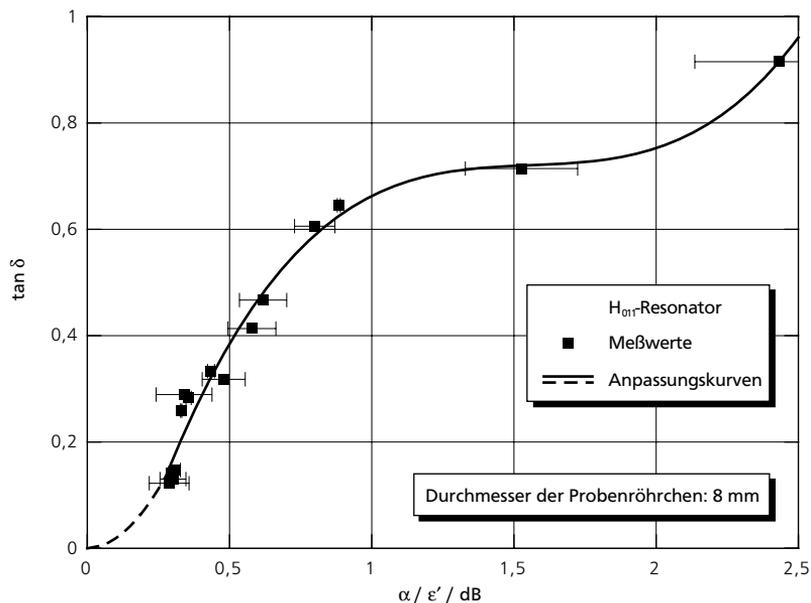


Abb. A 2-3:  $H_{011}$ -Resonator: Kalibrierkurve für die Verlustzahl bei 8 mm Probendurchmesser (Anpassungsfunktionen s. Tabelle 3-2; Meßwerte mit Standardabweichungen).

Zusätzlich wurde beim  $H_{011}$ -Resonator geprüft, ob eine Kalibrierung mit konstantem Probendurchmesser, jedoch verringertem Probenvolumen, d.h. verringerter Füllhöhe auch sinnvolle Ergebnisse liefert. Die entsprechenden Kalibrierkurven für die Dielektrizitätskonstante und Verlustzahl sind in den Abbildungen A 2-4 bis A 2-7 für die Probenvolumina von 2, 3 und 4 ml dargestellt. Insgesamt sind die Kalibrierkurven nicht besser als die mit variiertem Probendurchmesser.

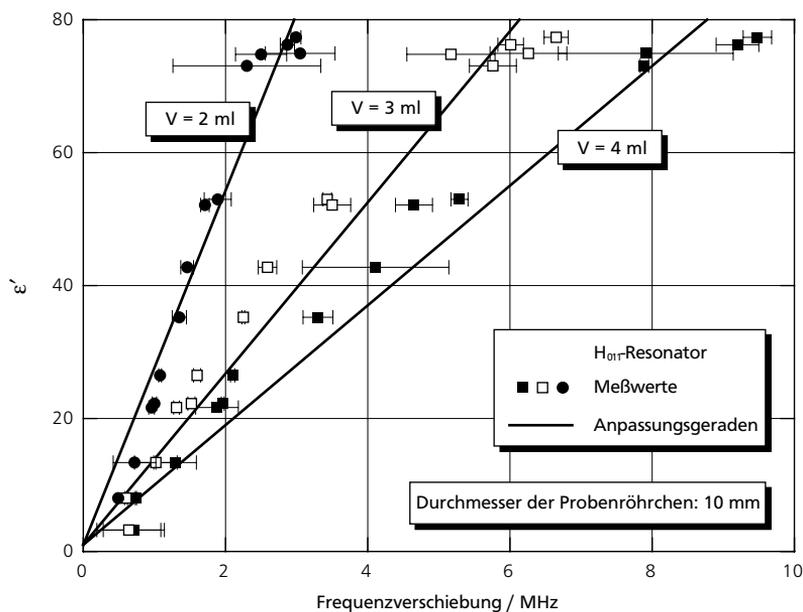


Abb. A 2-4:  $H_{011}$ -Resonator: Kalibrierkurve für die Dielektrizitätskonstante bei verschiedenen Probenvolumina (Anpassungsgeraden s. Tabelle A 2-2; Meßwerte mit Standardabweichungen).

Die Kalibrierkurve für die Dielektrizitätskonstante kann für die drei betrachteten Volumina entsprechend der *Cavity Perturbation Theory* jeweils mit einer Gerade beschrieben werden (s. Abbildung A 2-4). Diese Anpassungsgeraden sowie die für die Verlustzahlen angepaßten Funktionen sind in Tabelle A 2-2 zusammengestellt.

Abb. A 2-5:  $H_{011}$ -Resonator: Kalibrierkurve für die Verlustzahl bei 2 ml Probenvolumen (Anpassungsfunktionen s. Tabelle A 2-2; Meßwerte mit Standardabweichungen).

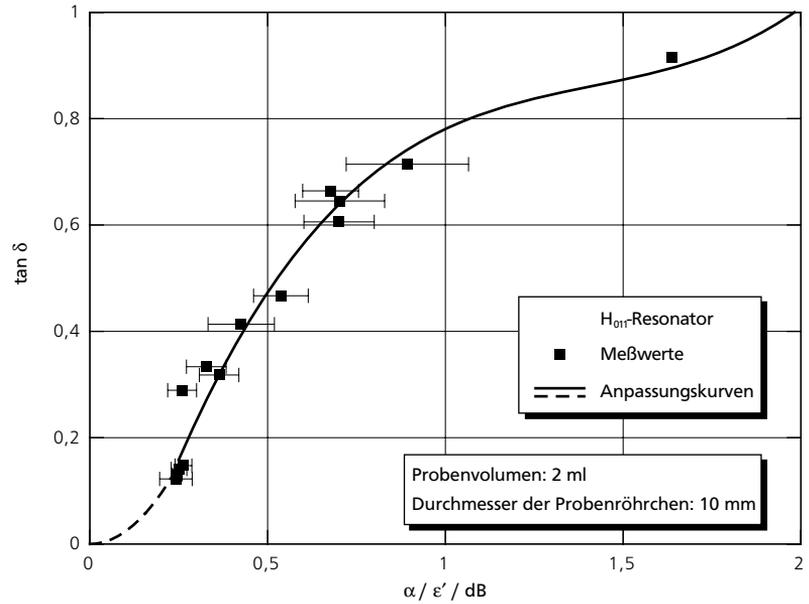
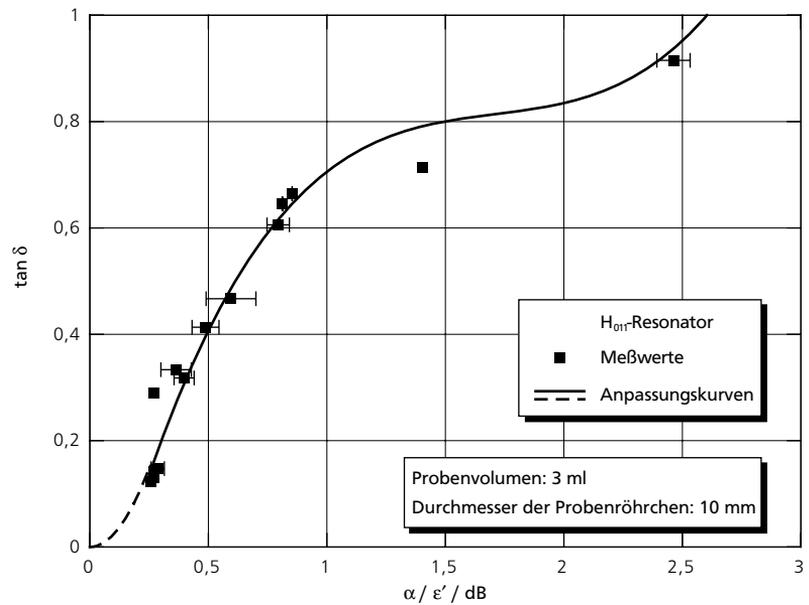


Abb. A 2-6:  $H_{011}$ -Resonator: Kalibrierkurve für die Verlustzahl bei 3 ml Probenvolumen (Anpassungsfunktionen s. Tabelle A 2-2; Meßwerte mit Standardabweichungen).



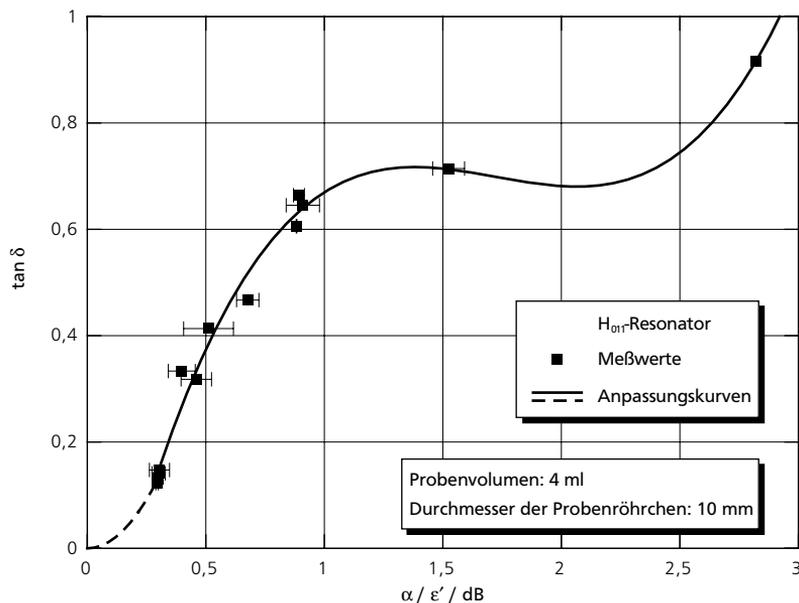


Abb. A 2-7:  $H_{011}$ -Resonator: Kalibrierkurve für die Verlustzahl bei 4 ml Probenvolumen (Anpassungsfunktionen s. Tabelle A 2-2; Meßwerte mit Standardabweichungen).

Geltungsbereich	Funktion
-----------------	----------

2 ml Probenvolumen:

$$\epsilon' = 1 + 26,64 \cdot \Delta f_R / \text{MHz}$$

$$\frac{\alpha / \epsilon'}{\text{dB}} < 0,25 \quad \tan \delta = 2,37 \cdot \left( \frac{\alpha / \epsilon'}{\text{dB}} \right)^2$$

$$\frac{\alpha / \epsilon'}{\text{dB}} \geq 0,25 \quad \tan \delta = -0,31 + 2,2 \cdot \frac{\alpha / \epsilon'}{\text{dB}} - 1,46 \cdot \left( \frac{\alpha / \epsilon'}{\text{dB}} \right)^2 + 0,3 \cdot \left( \frac{\alpha / \epsilon'}{\text{dB}} \right)^3$$

3 ml Probenvolumen:

$$\epsilon' = 1 + 12,88 \cdot \Delta f_R / \text{MHz}$$

$$\frac{\alpha / \epsilon'}{\text{dB}} < 0,25 \quad \tan \delta = 2,37 \cdot \left( \frac{\alpha / \epsilon'}{\text{dB}} \right)^2$$

$$\frac{\alpha / \epsilon'}{\text{dB}} \geq 0,25 \quad \tan \delta = -0,24 + 1,74 \cdot \frac{\alpha / \epsilon'}{\text{dB}} - 0,98 \cdot \left( \frac{\alpha / \epsilon'}{\text{dB}} \right)^2 + 0,2 \cdot \left( \frac{\alpha / \epsilon'}{\text{dB}} \right)^3$$

4 ml Probenvolumen:

$$\epsilon' = 1 + 9,16 \cdot \Delta f_R / \text{MHz}$$

$$\frac{\alpha / \epsilon'}{\text{dB}} < 0,3 \quad \tan \delta = 1,47 \cdot \left( \frac{\alpha / \epsilon'}{\text{dB}} \right)^2$$

$$\frac{\alpha / \epsilon'}{\text{dB}} \geq 0,3 \quad \tan \delta = -0,35 + 1,98 \cdot \frac{\alpha / \epsilon'}{\text{dB}} - 1,2 \cdot \left( \frac{\alpha / \epsilon'}{\text{dB}} \right)^2 + 0,2 \cdot \left( \frac{\alpha / \epsilon'}{\text{dB}} \right)^3$$

Tab. A 2-2:  $H_{011}$ -Resonator: Anpassungsfunktionen und Geltungsbereiche dieser Funktionen für die Kalibrierkurven der Dielektrizitätskonstante und der Verlustzahl.

## Meßwerte

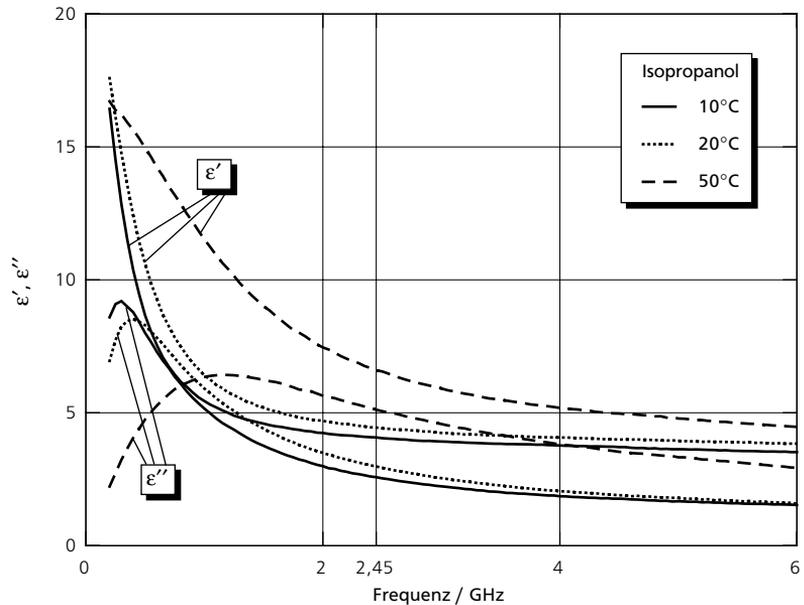
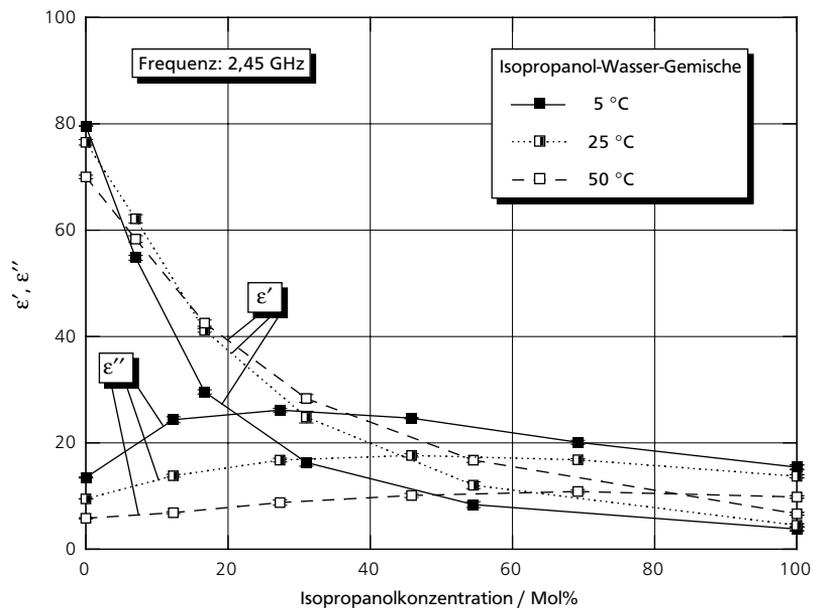
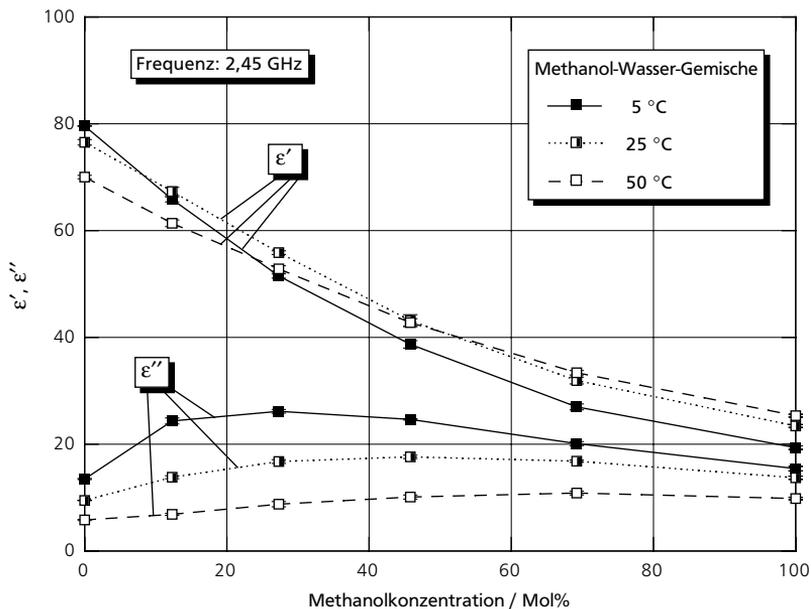
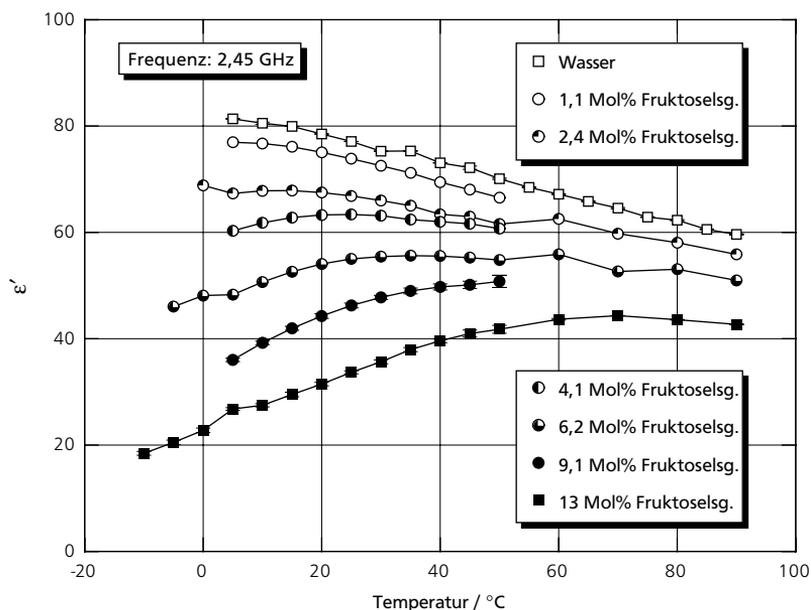


Abb. A 2-9: Relative Dielektrizitätskonstante von Isopropanol-Wasser-Gemischen bei 2,45 GHz und verschiedenen Temperaturen (Mittelwerte mit Standardabweichungen).





Neben den in Kapitel 3.2.2 und in den Abbildungen A 2-8 bis A 2-10 gezeigten relativen Dielektrizitätskonstanten von reinen Dipolen und Gemischen von reinen Dipolen wurden auch die dielektrischen Eigenschaften von Zuckerlösungen bestimmt. In den Abbildungen A 2-11 bis A 2-14 sind zusätzlich die Dielektrizitätskonstanten und Verlustzahlen von Fruktose- und Glukoselösungen verschiedener Konzentration aufgetragen.



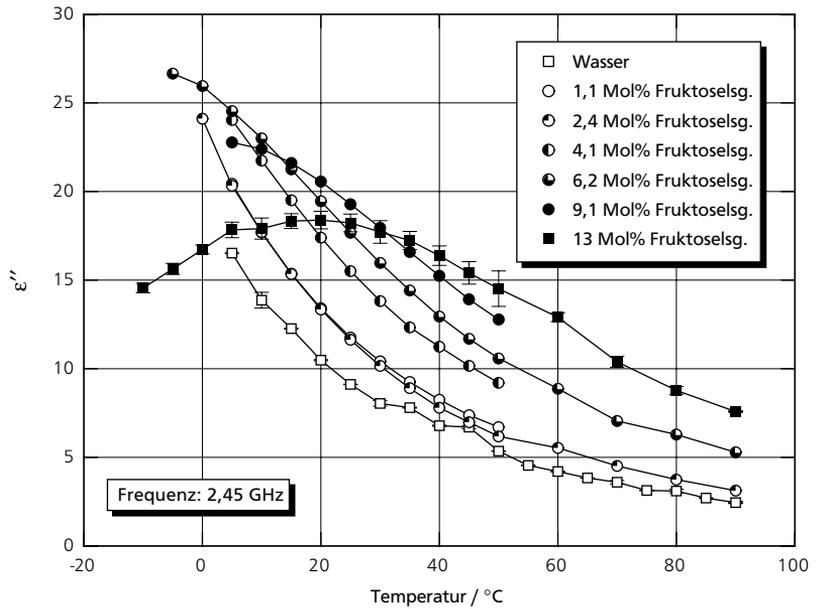


Abb. A 2-12: Temperaturabhängigkeit der Verlustzahl von Wasser und wäßrigen Fruktoselösungen bei 2,45 GHz (Mittelwerte teilweise mit Standardabweichungen).

Aus den Abbildungen A 2-11 bis A 2-14 wird deutlich, daß die Dielektrizitätskonstanten und die Verlustzahlen der Fruktose- und Glukoselösungen bei gleicher Konzentration etwa gleich groß sind. Dies ist auch zu erwarten, da die Anzahl der OH-Gruppen, die neben den Wassermolekülen in den Lösungen zur relativen Dielektrizitätskonstante beitragen, in den Molekülen dieser zwei Monosaccharide gleich ist.

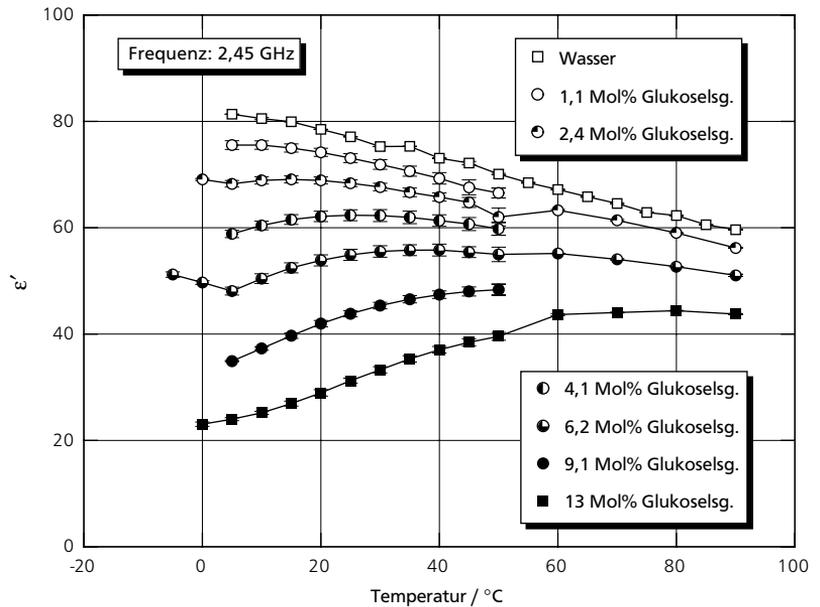


Abb. A 2-13: Temperaturabhängigkeit der Dielektrizitätskonstante von Wasser und wäßrigen Glukoselösungen bei 2,45 GHz (Mittelwerte teilweise mit Standardabweichungen).

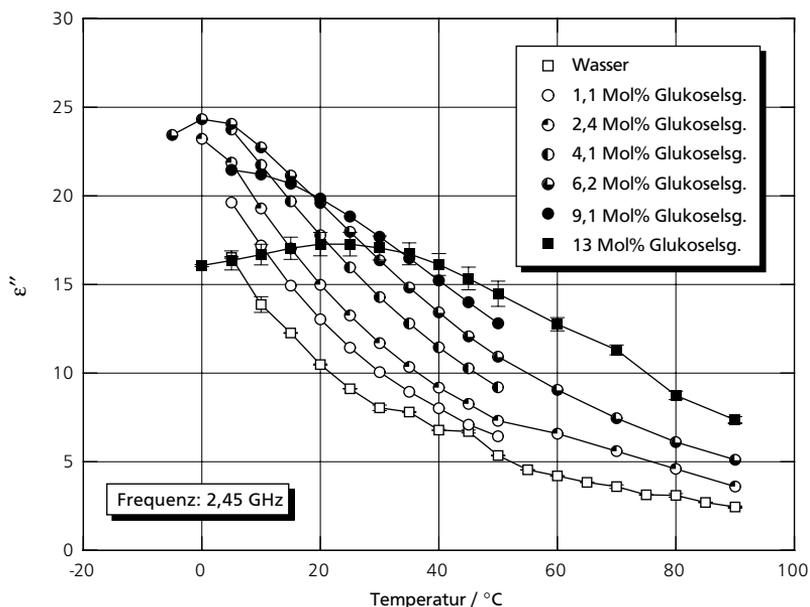


Abb. A 2-14: Temperaturabhängigkeit der Verlustzahl von Wasser und wässrigen Glukoselösungen bei 2,45 GHz (Mittelwerte teilweise mit Standardabweichungen).

Neben wässrigen Gelen wurden auch verschiedene Gele mit einem Kochsalzgehalt von 1 Gew.% als Modell-Lebensmittel bei Erwärmungsversuchen verwendet. Wie bei den wässrigen Gelen (s. Kapitel 3.2.2) kommt hier als zusätzlicher Verlustmechanismus die Relaxation von gebundenem Wasser hinzu. Die Verlustzahlen der Gele sind deshalb etwas größer als die der reinen Kochsalzlösung (s. Abbildungen A 2-15 und A 2-16).

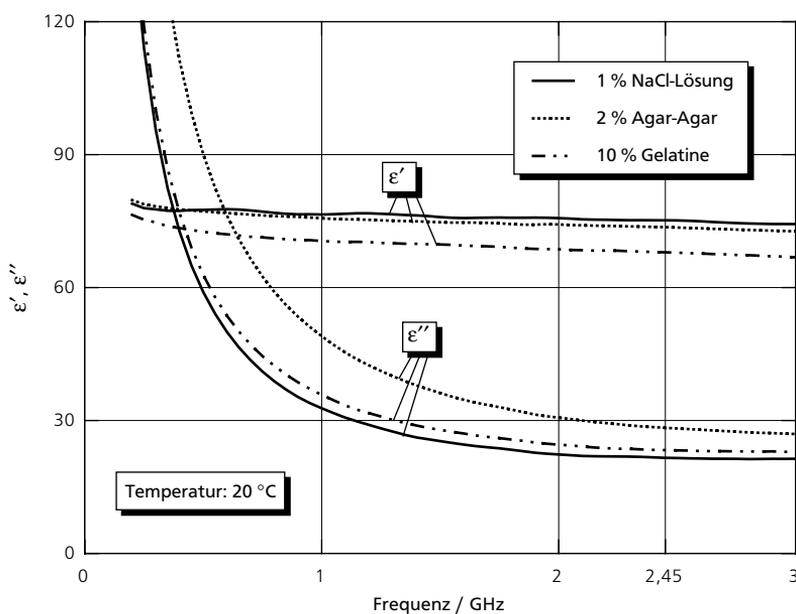


Abb. A 2-15: Frequenzabhängigkeit der relativen Dielektrizitätskonstante von 1Gew.%iger Kochsalzlösung und salzhaltigen Gelen (1 Gew.% Kochsalz) bei 20 °C (Mittelwerte mit Linien verbunden, Standardabweichungen haben maximal dreifache Höhe der Linienstärke).

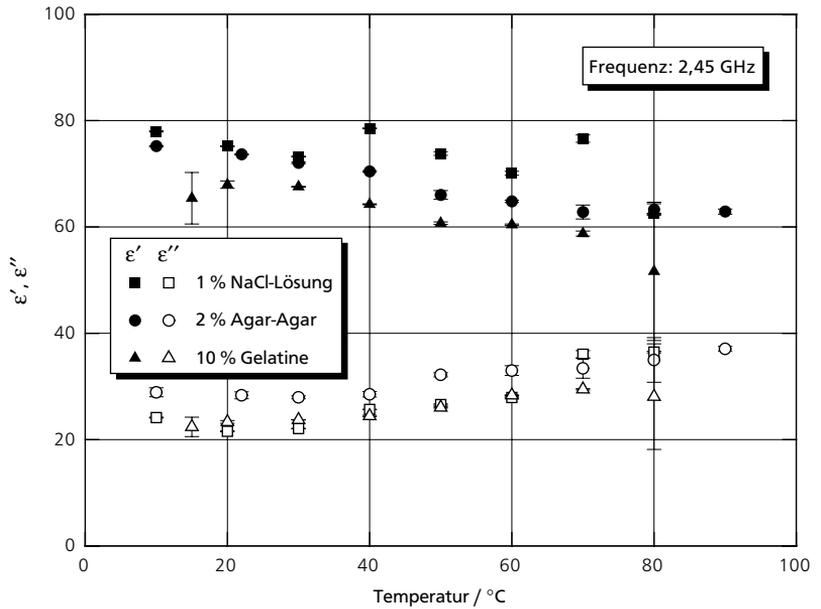


Abb. A 2-16: Temperaturabhängigkeit der relativen Dielektrizitätskonstante von 1Gew.%iger Kochsalzlösung und salzhaltigen Gelen (1 Gew.% Kochsalz) bei 20 °C (Mittelwerte mit Standardabweichungen).

Die Dielektrizitätskonstanten und Verlustzahlen von Milch mit verschiedenen Fettgehalten sowie von saurer und süßer Sahne (alles handelsübliche Produkte) sind in den Tabellen A 2-3 und A 2-4 aufgelistet. Diese Werte wurden mit dem  $E_{012}$ -Resonator bestimmt.

Weiterhin sind in Tabelle A 2-5 die dielektrischen Eigenschaften verschiedener, frischer Gemüse bei Raumtemperatur in Abhängigkeit vom Wassergehalt zusammengestellt.

Tab. A 2-3: Dielektrizitätskonstante von Milch mit verschiedenen Fettgehalten sowie saurer und süßer Sahne bei 2,45 GHz in Abhängigkeit von der Temperatur.

Temperatur / °C	Milch 0,3 % Fett	Milch 1,5 % Fett	Milch 3,5 % Fett	Saure Sahne	Süße Sahne
-15	4,2	4,3	4,2	4,8	4,0
-10	4,7	5,0	4,8	5,5	4,5
-5	6,5	6,7	6,8	7,5	6,0
-3	10,1	9,8	9,1	10,9	8,3
0	70,0	55,5	53,5	39,7	20,2
5	79,9	76,7	74,4	67,1	39,7
10	78,3	76,7	74,4	65,7	37,2
20	76,0	76,8	71,5	63,0	36,0
30	76,7	71,4	67,8	61,0	32,6
40	70,0	68,5	64,3	55,3	31,7
50	67,1	64,3	60,4	53,5	30,2
60	65,1	60,4	58,4	50,1	28,3
70	62,4	58,4	54,7	48,0	26,7
80	56,4	56,0	53,0	47,2	25,5

Sowohl für die Dielektrizitätskonstante als auch für die Verlustzahl ist in den Tabellen A 2-3 und A 2-4 der sprunghafte Anstieg der Werte am Gefrierpunkt beim Übergang in den flüssigen Zustand deutlich zu erkennen.

Temperatur / °C	Milch 0,3 % Fett	Milch 1,5 % Fett	Milch 3,5 % Fett	Saure Sahne	Süße Sahne
-15	0,2	0,5	0,2	0,3	0,2
-10	0,3	0,4	0,3	0,5	0,3
-5	0,8	0,8	0,7	1,1	0,6
-3	2,2	2,0	1,8	2,1	1,2
0	18,5	16,0	15,3	11,3	5,2
5	19,5	18,9	18,4	19,1	12,0
10	17,9	17,8	17,3	18,3	10,5
20	15,5	16,8	15,0	16,6	9,4
30	13,8	13,1	12,5	15,4	8,0
40	12,2	12,1	11,6	13,8	7,2
50	11,6	11,2	10,8	13,9	6,7
60	12,7	10,8	10,5	13,6	6,3
70	11,6	10,8	10,2	14,2	6,0
80	11,0	10,9	10,5	14,6	6,0

Tab. A 2-4: Verlustzahl von Milch mit verschiedenen Fettgehalten sowie saurer und süßer Sahne bei 2,45 GHz in Abhängigkeit von der Temperatur.

Gemüseart	Wassergehalt / %	$\epsilon'$	$\epsilon''$
Kartoffel	78,5	56,0	15,9
Schwarzwurzel	80,1	59,9	16,4
Lauch	83,1	56,3	13,4
rote Zwiebel	84,7	61,5	14,7
Karotte	89,6	67,8	13,2
rote Beete	90,4	58,5	16,5
Sellerie	90,6	58,9	15,3
Blumenkohl	91,9	65,7	18,4
Broccoli	92,1	68,7	19,9
Champignon	92,3	31,0	7,0
Kohlrabi	93,2	69,7	18,0
Fenchel	94,1	67,8	17,0
Aubergine	94,3	28,3	5,7
grüner Paprika	94,6	73,2	12,2
Staudensellerie	96,0	71,8	19,8
Zucchini	96,2	62,4	13,3

Tab. A 2-5: Relative Dielektrizitätskonstante verschiedener, frischer Gemüse bei 2,45 GHz und 20 °C in Abhängigkeit vom Wassergehalt (der Wassergehalt wurde durch Trocknung im Trockenschrank bei 80 °C bestimmt).

Vergleich gemessener und berechneter Werte der relativen Dielektrizitätskonstante

Wie bei den Alkohol-Wasser-Gemischen ist es auch für das Gemisch aus Ethanol und Isopropanol nicht möglich, die Meßwerte mit einer der in Kapitel 2.2.2 vorgestellten Gleichungen zu beschreiben (s. Abbildungen A 2-17 und A 2-18).

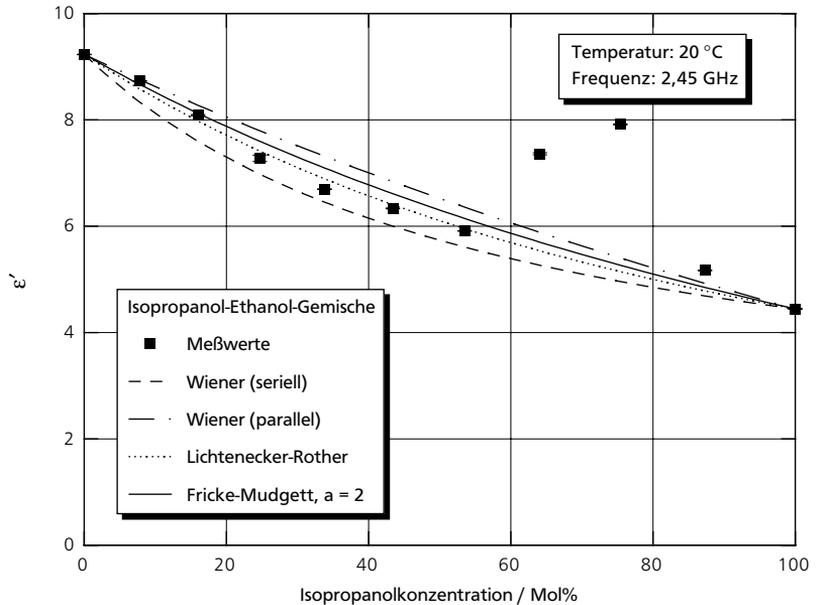


Abb. A 2-17: Gemessene (Mittelwerte mit Standardabweichungen) und berechnete Dielektrizitätskonstante von Ethanol-Isopropanol-Gemischen bei 20 °C und 2,45 GHz.

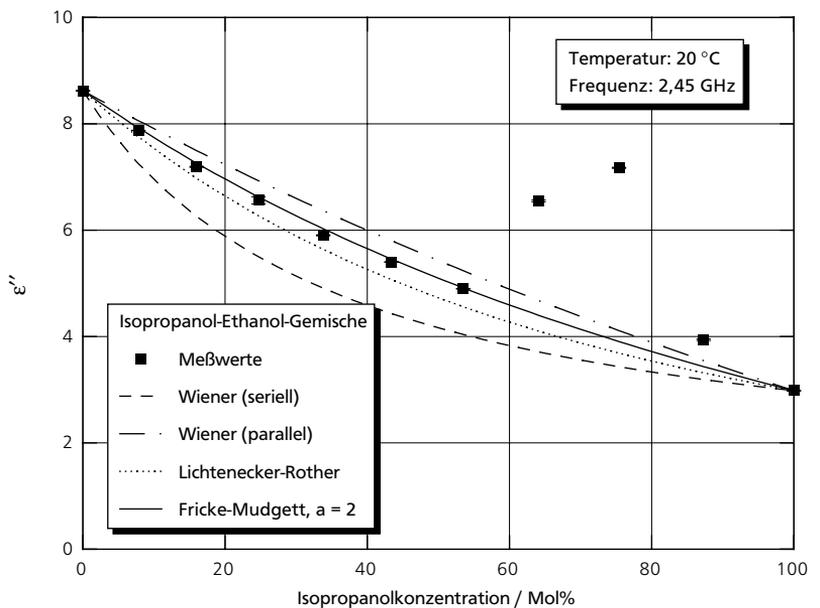


Abb. A 2-18: Gemessene (Mittelwerte mit Standardabweichungen) und berechnete Verlustzahl von Ethanol-Isopropanol-Gemischen bei 20 °C und 2,45 GHz.

Die Werte der Dielektrizitätskonstanten und Verlustzahlen der Paraffinöl-in-Wasser-Emulsionen werden – wie die der Pflanzenöl-in-Wasser-Emulsionen – am besten von der *Fricke-Mudgett-Gleichung* 2-32 mit einem Formfaktor von  $a = 1$ , der eigentlich für eine disperse Phase aus nadelförmigen Partikel gilt, wiedergegeben (s. Abbildungen A 2-19 und A 2-20).

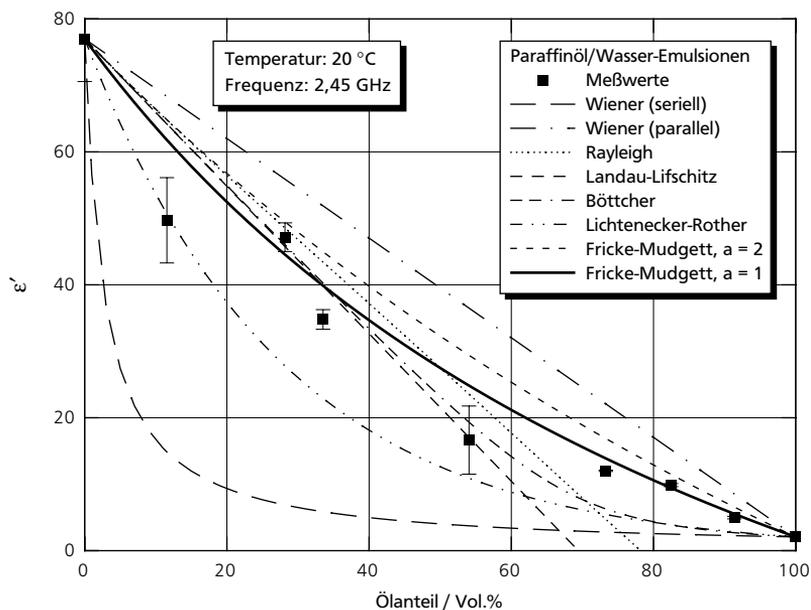


Abb. A 2-19: Gemessene (Mittelwerte mit Standardabweichungen) und berechnete Dielektrizitätskonstante von Paraffinöl-in-Wasser-Emulsionen bei 20 °C und 2,45 GHz.

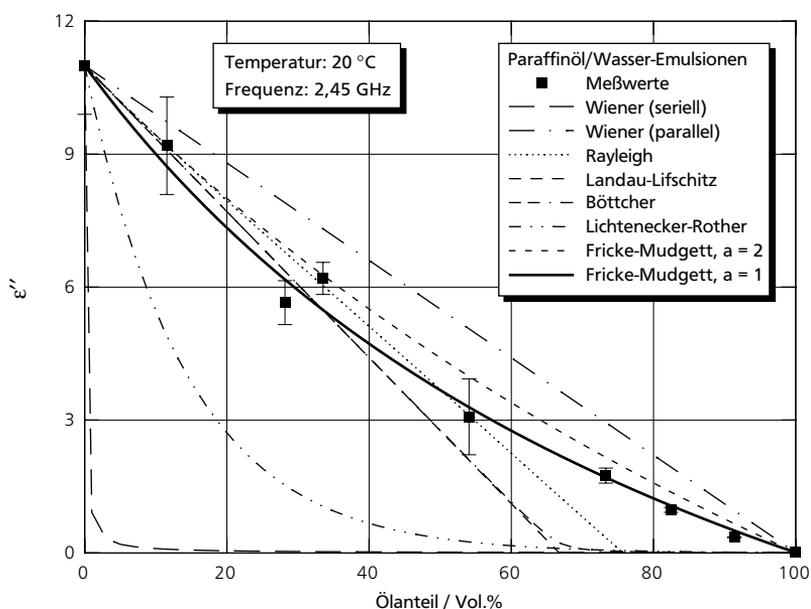


Abb. A 2-20: Gemessene (Mittelwerte mit Standardabweichungen) und berechnete Verlustzahl von Paraffinöl-in-Wasser-Emulsionen bei 20 °C und 2,45 GHz.

Wird der Formfaktor  $a$  der *Fricke-Mudgett-Gleichung* als Anpassungsparameter verwendet, so wird die beste Anpassung für alle Öl-in-Wasser-Emulsionen mit dem Wert  $a = 0,7$  erzielt (s. Abbildung A 2-21).

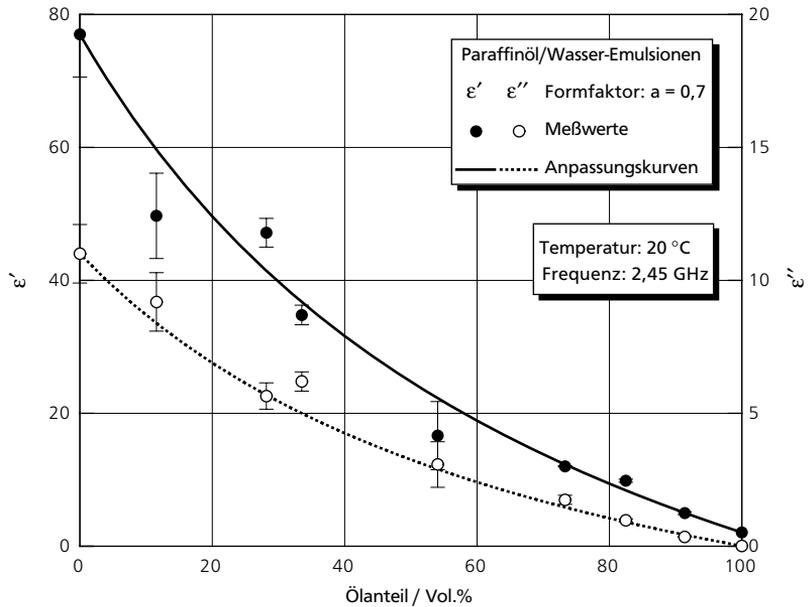


Abb. A 2-21: Gemessene und nach Fricke-Mudgett (Formfaktor  $a = 0,7$ ) berechnete relative Dielektrizitätskonstante von Paraffinöl-in-Wasser-Emulsionen bei 20 °C und 2,45 GHz.

## A 2.5 Verwendete Emulsionen und Suspensionen

### Emulsionen

Die Emulsionen wurden mit einem *Ultra-Turrax*, einer Zahnkranzdispergiermaschine (Umdrehungszahl 20.500 min<sup>-1</sup>) hergestellt. Die Tropfengrößenverteilung (Sauterdurchmesser zwischen 5 und 15 µm) wurde mit einem *Malvern MasterSizer* (Prinzip der Laserbeugung) gemessen. Zur Stabilisierung der Öl-in-Wasser-Emulsionen wurde *Laurylethylenoxid-10*, ein Emulgator mit „schneller“ Grenzflächenbesetzungskinetik, und für die Wasser-in-Öl-Emulsionen *Triodan R90* verwendet.

### Suspensionen

Der für die Suspensionen verwendete Kalkstein hat einen Sauterdurchmesser von 2,4 µm (mit *Malvern MasterSizer* bestimmt).

Die Glaskugeln haben Durchmesser von 0,5 und 1 mm. Für diese beiden Werte konnte kein Einfluß des Durchmessers auf die relative Dielektrizitätskonstante festgestellt werden.

A 2.6 Berechnung der relativen Dielektrizitätskonstante von Suspensionen und Emulsionen mit der *Raghavan-Martin-Gleichung*

RAGHAVAN und MARTIN (1995) entwickelten eine Gleichung zur Berechnung der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_m$  disperser, binärer Gemische. Diese Gleichung kann auch zur Berechnung anderer Stoffeigenschaften, wie der relativen Dielektrizitätskonstante, herangezogen werden (s. auch TSOTSAS und MARTIN, 1987).

Mit der *Raghavan-Martin-Gleichung* A 2-1 wird eine dimensionslose Wärmeleitfähigkeit bzw. Dielektrizitätskonstante oder Verlustzahl  $K$  in Abhängigkeit von der Volumenkonzentration  $c_{V,d}$  der dispersen Phase berechnet.

$$K = 1 + \frac{c_{V,d}}{\alpha / (\alpha - 1) - h_{\text{Maxwell}} \cdot F} \quad (\text{A 2-1})$$

In Gleichung A 2-1 bedeuten:

$$K = \frac{\lambda_m}{\lambda_c} = \frac{\epsilon'_m}{\epsilon'_c} = \frac{\epsilon''_m}{\epsilon''_c} \quad (\text{A 2-2})$$

$$\alpha = \frac{\lambda_d}{\lambda_c} = \frac{\epsilon'_d}{\epsilon'_c} = \frac{\epsilon''_d}{\epsilon''_c} \quad (\text{A 2-3})$$

$$F = 1 + \beta \cdot c_{V,d} \cdot (1 - c_{V,d}) \cdot \left[ 3 \cdot A_0 \cdot (1 - c_{V,d}) / 2 + A_1 \cdot c_{V,d} \right] \quad (\text{A 2-4})$$

$$h_{\text{Maxwell}} = \frac{2 + c_{V,d}}{3} \quad (\text{A 2-5})$$

$$\beta = \frac{\alpha - 1}{\alpha + 2} \quad (\text{A 2-6})$$

Die beiden Parameter  $A_0$  und  $A_1$  der Korrekturfunktion  $F$  (Gleichung A 2-4) müssen an Meßwerte angepaßt werden. RAGHAVAN und MARTIN schlagen nach Überprüfung an zahlreichen experimentellen Ergebnissen vor,  $A_0 = 0$  und  $A_1 = 1$  zu wählen.

Diese Werte wurden für die Berechnungen der relativen Dielektrizitätskonstante beibehalten, da eine Anpassung der Parameter an die Meßwerte kaum eine Verbesserung ergab. Es wäre dann, wie bei der Anwendung der *Fricke-Mudgett-Gleichung*, eine Unterscheidung nach Substanzklassen notwendig.

Die folgenden Ergebnisdiagramme A 2-22 bis A 2-26 zeigen jeweils den Vergleich der Meßwerte mit den Werten, die mit der *Fricke-Mudgett-Gleichung* und der *Raghavan-Martin-Gleichung* berechnet wurden.

Die Unterschiede in den berechneten Kurven sind gering. Meist lassen sich die Meßergebnisse mit der angepaßten *Fricke-Mudgett-Gleichung* etwas besser beschreiben.

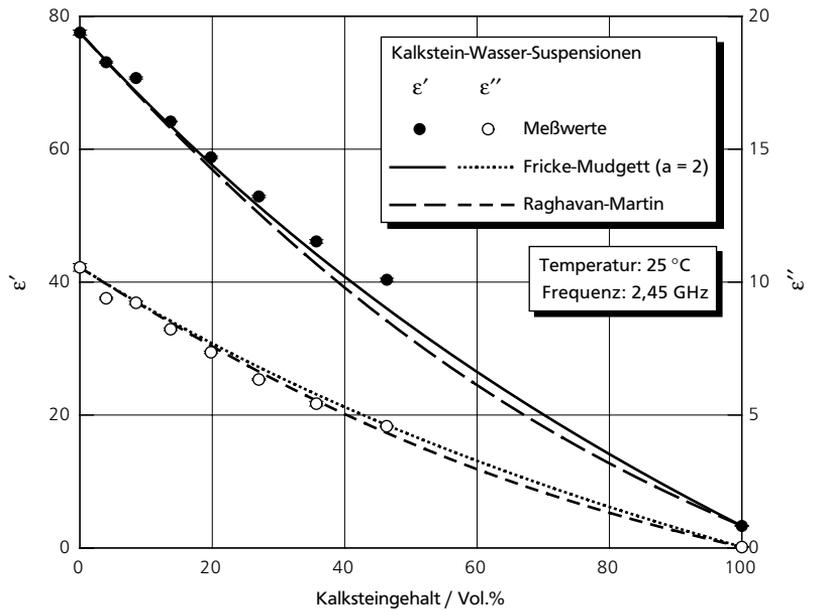


Abb. A 2-22: Gemessene und nach Fricke-Mudgett (Formfaktor a = 2) sowie nach Raghavan-Martin berechnete relative Dielektrizitätskonstante von Kalkstein-Wasser-Suspensionen bei 25 °C und 2,45 GHz.

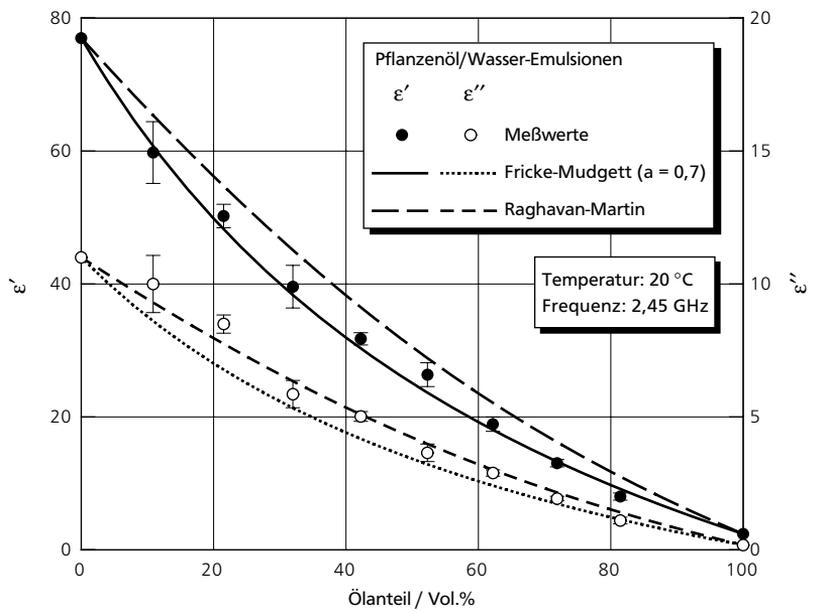


Abb. A 2-23: Gemessene und nach Fricke-Mudgett (Formfaktor a = 0,7) sowie nach Raghavan-Martin berechnete relative Dielektrizitätskonstante von Pflanzenöl-in-Wasser-Emulsionen bei 20 °C und 2,45 GHz.

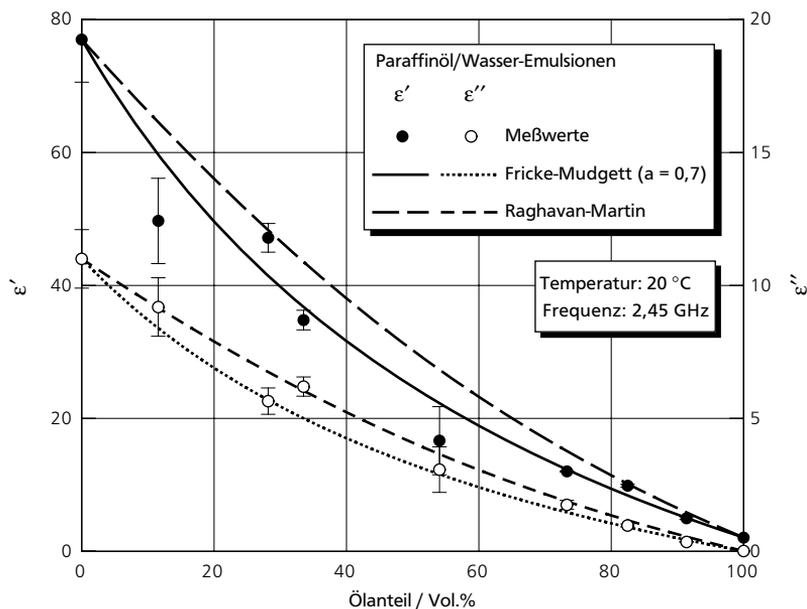


Abb. A 2-24: Gemessene und nach Fricke-Mudgett (Formfaktor a = 0,7) sowie nach Raghavan-Martin berechnete relative Dielektrizitätskonstante von Paraffinöl-in-Wasser-Emulsionen bei 20 °C und 2,45 GHz.

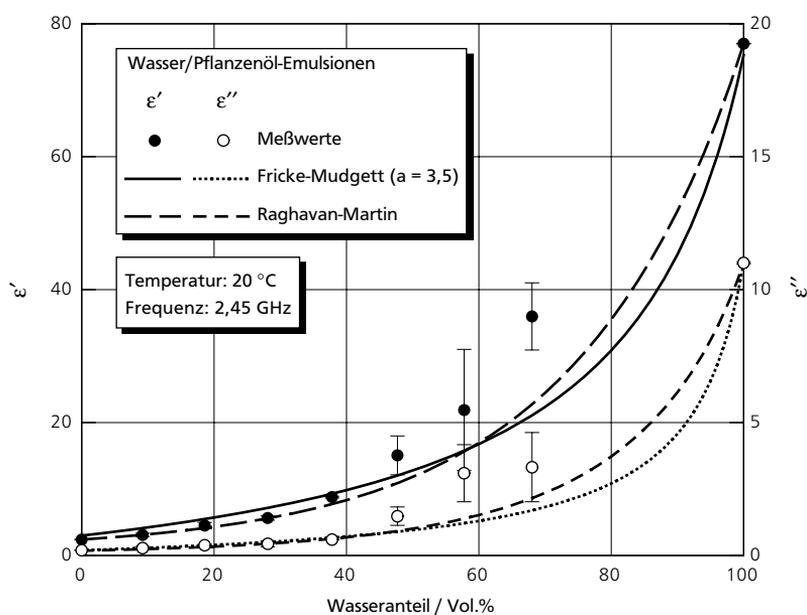


Abb. A 2-25: Gemessene und nach Fricke-Mudgett (Formfaktor a = 3,5) sowie nach Raghavan-Martin berechnete relative Dielektrizitätskonstante von Wasser-in-Pflanzenöl-Emulsionen bei 20 °C und 2,45 GHz.

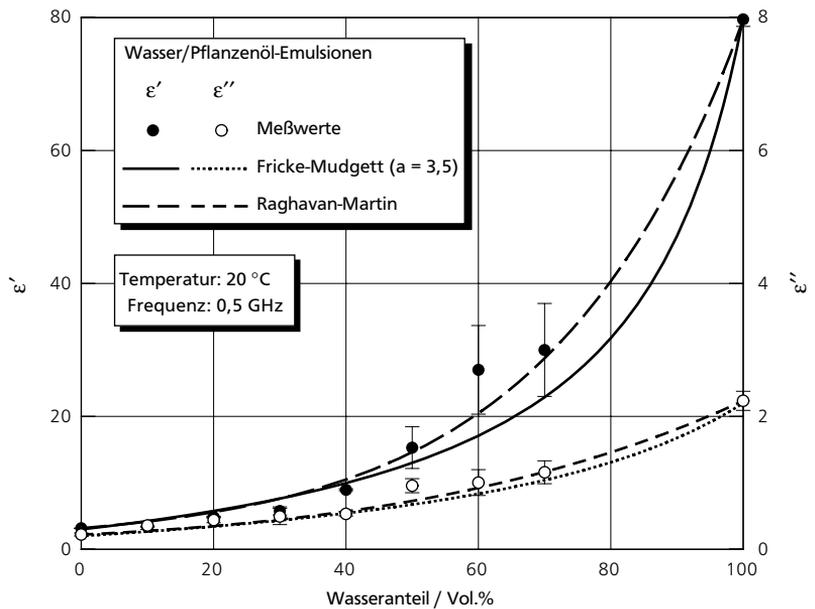


Abb. A 2-26: Gemessene und nach Fricke-Mudgett (Formfaktor  $a = 3,5$ ) sowie nach Raghavan-Martin berechnete relative Dielektrizitätskonstante von Wasser-in-Pflanzenöl-Emulsionen bei 20 °C und 0,5 GHz.

Eine Vereinfachung der *Raghavan-Martin-Gleichung* A 2-1 ist die folgende Gleichung A 2-7 (MARTIN, 1997).

$$K = 1 + \frac{c_{V,d}}{1/(\alpha - 1) + (1 - c_{V,d})/3 \cdot (1 + A_0 \cdot \beta \cdot c_{V,d})} \quad (\text{A } 2 - 7)$$

Die beste Anpassung wird erzielt, wenn der Parameter  $A_0 = -1$  gesetzt wird. Die verwendeten Symbole entsprechen denen in Gleichung A 2-1. Die mit dieser vereinfachten Gleichung berechneten Kurven weichen fast nicht von den Kurven ab, die mit der *Raghavan-Martin-Gleichung* berechnet wurden.

A 3.1 Erwärmung in Haushaltsmikrowellengeräten

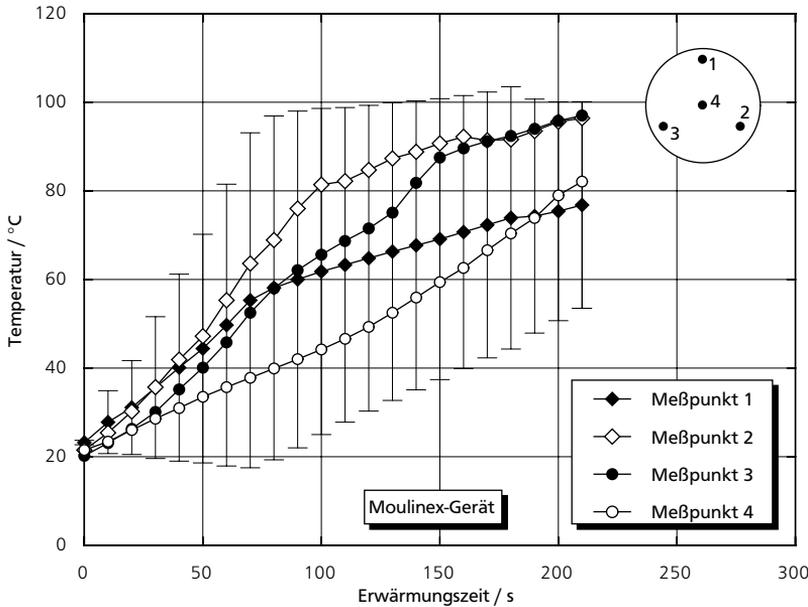


Abb. A 3-1: Gemessene Temperaturverläufe im Fertiggericht Erasco Maccaroni während der Erwärmung im Moulinex-Gerät mit maximaler Leistung.

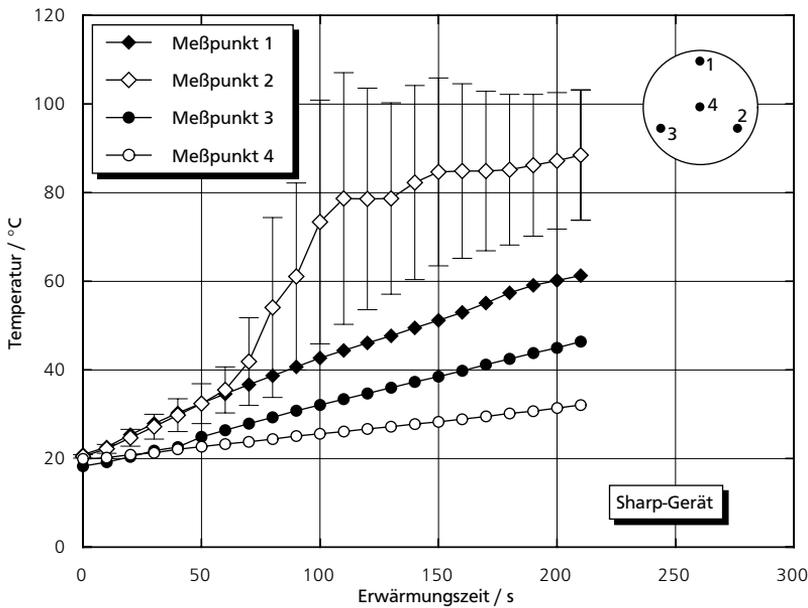


Abb. A 3-2: Gemessene Temperaturverläufe im Fertiggericht Erasco Maccaroni während der Erwärmung im Sharp-Gerät mit maximaler Leistung.

Anhang

Abb. A 3-3: Gemessene Temperaturverläufe im Fertiggericht Erasco Maccaroni während der Erwärmung im Moulinex-Gerät mit mittlerer Leistungsstufe.

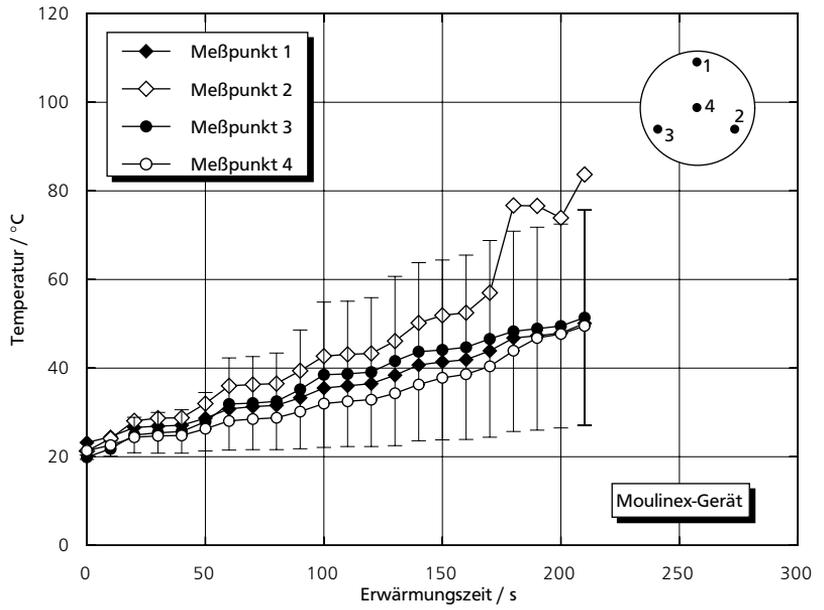
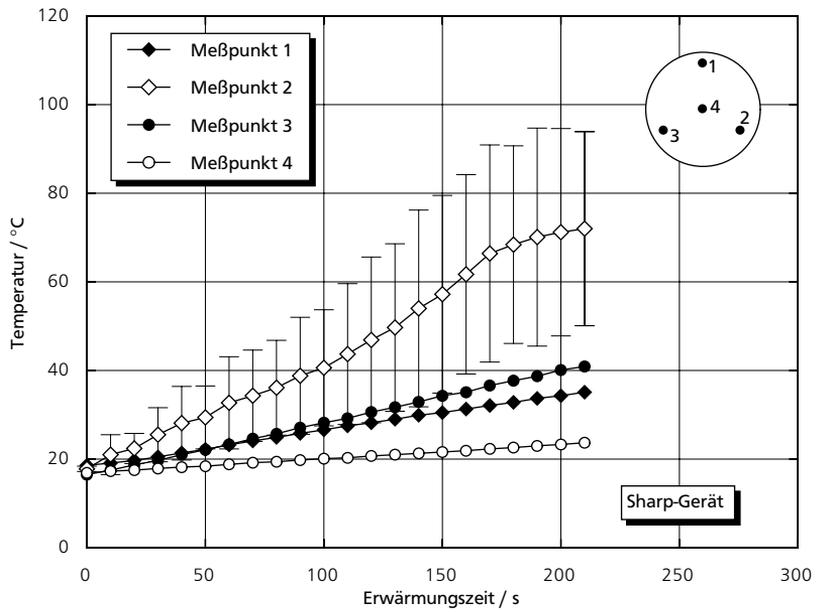


Abb. A 3-4: Gemessene Temperaturverläufe im Fertiggericht Erasco Maccaroni während der Erwärmung im Sharp-Gerät mit mittlerer Leistungsstufe.



In Abbildung A 3-5 ist ein typischer Verlauf der mit der Kraftmeßdose aufgenommenen Kraft während der Erwärmung eines Fertiggerichts von Raumtemperatur aus dargestellt. Ebenfalls eingezeichnet ist, wann jeweils das Mikrowellengerät ein- bzw. ausgeschaltet wurde. Es ist gut zu erkennen, daß mit zunehmender Gesamtzeit die Einschaltzeiten kürzer und die Pausen, in denen das Gerät ausgeschaltet ist, länger werden.

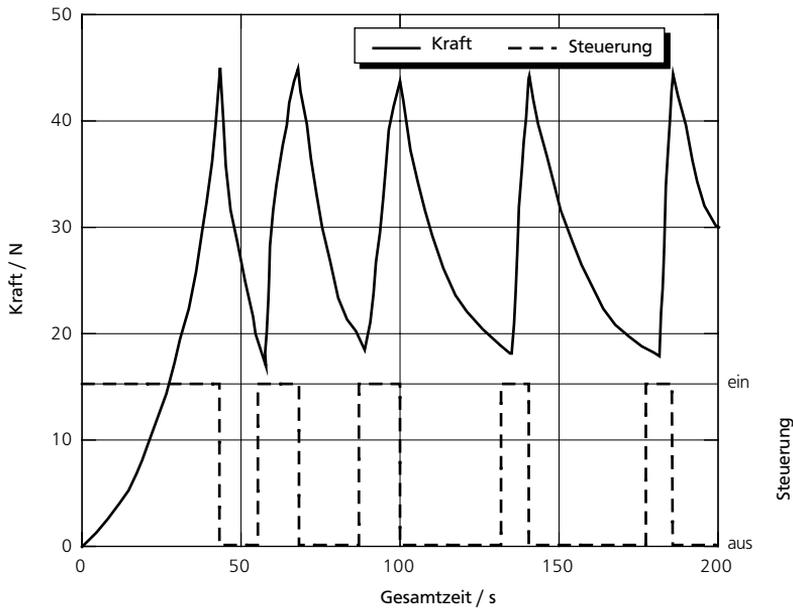


Abb. A 3-5: Typischer Verlauf der Kraft während der Erwärmung eines Fertiggerichts von Raumtemperatur aus und die zugehörigen Ein- und Ausschaltzeitpunkte des Mikrowellengeräts.

Aus der mit der Kraftmeßdose aufgenommenen Kraft läßt sich über eine Drehmomentenbilanz der Druck im Fertiggericht bestimmen. Aus der maximalen Kraft, bei der das Mikrowellengerät ausgeschaltet wird, ergibt sich damit ein maximaler Druck im Fertiggericht. Bei den Fertiggerichten betragen diese Drücke zwischen 1,06 und 1,17 bar. Von diesen Drücken kann jedoch nicht auf eine maximale Temperatur im Lebensmittel geschlossen werden, da die Deckelfolien der Fertiggerichte mit zunehmender Erwärmungszeit durch den Druck im Inneren der Verpackung bleibend gedehnt werden, d. h. das Gasvolumen im Inneren ändert sich während der Erhitzung.

In den Abbildungen A 3-6 bis A 3-8 sind die Ergebnisse der Erwärmung der übrigen Fertiggerichte mit der Kraftregelung dargestellt. Durch die Regelung wurde bei allen Gerichten eine deutlich gleichmäßigere Temperaturverteilung nach der Erhitzung erzielt als bei der Erwärmung ohne Regelung.

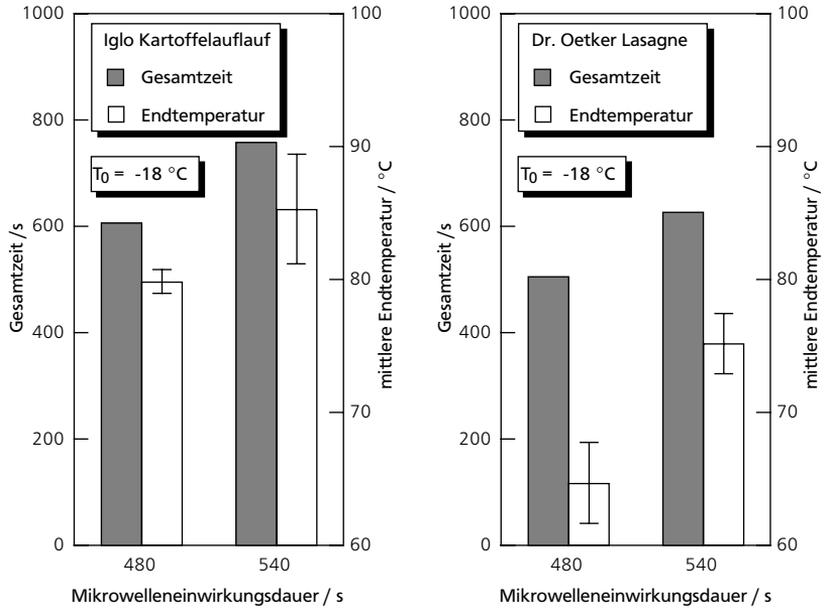


Abb. A 3-6: Gesamtzeit und mittlere Endtemperatur in Abhängigkeit von der Mikrowelleneinwirkungsdauer bei der Erwärmung von tiefgefrorenen Fertiggerichten mit der Kraftregelung.

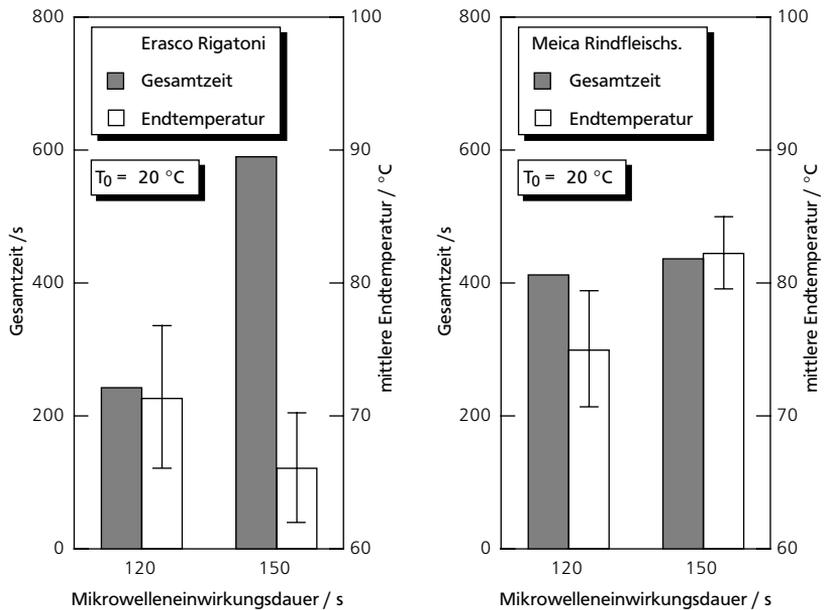


Abb. A 3-7: Gesamtzeit und mittlere Endtemperatur in Abhängigkeit von der Mikrowelleneinwirkungsdauer bei der Erwärmung von bei Raumtemperatur gelagerten Fertiggerichten mit der Kraftregelung.

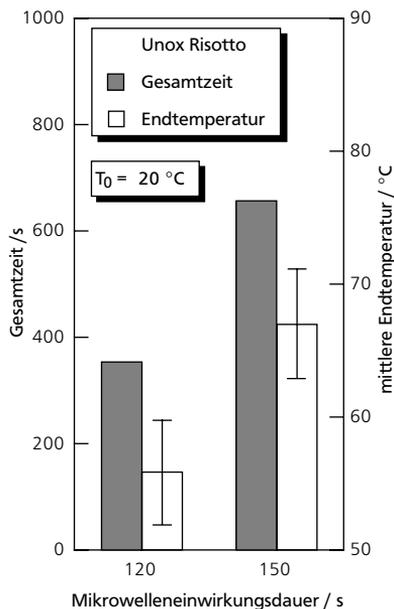


Abb. A 3-8: Gesamtzeit und mittlere Endtemperatur in Abhängigkeit von der Mikrowelleneinwirkungsdauer bei der Erwärmung eines bei Raumtemperatur gelagerten Fertiggerichts mit der Kraftregelung.

### A 3.4 Erwärmung in der Technikumsanlage

In den Abbildungen A 3-9 bis A 3-16 sind die Temperaturverteilungen bei der Erwärmung von Agar-Agar-Gel in der Technikumsanlage dargestellt.

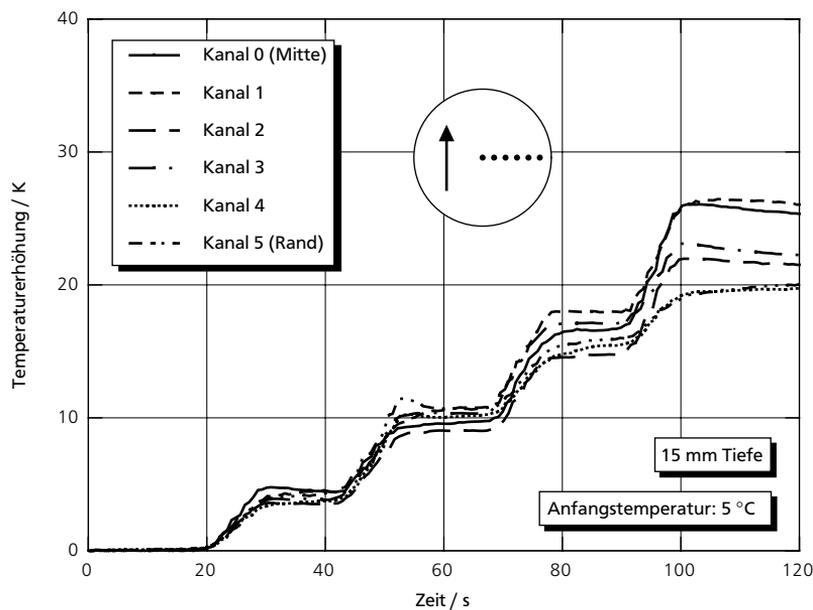


Abb. A 3-9: Gemessene Temperaturerhöhungen in 15 mm Tiefe bei Sensoranordnung quer zur Fahrtrichtung (Mittelwerte).

Anhang

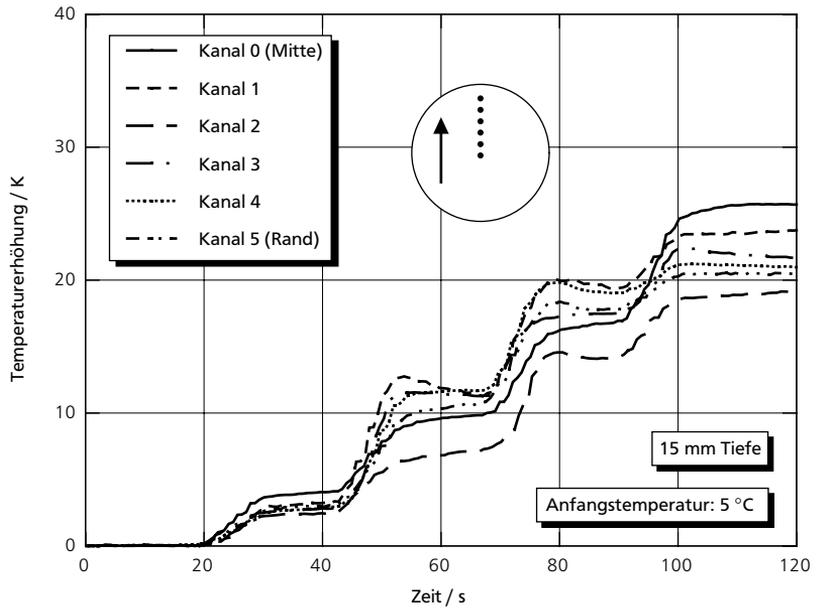


Abb. A 3-10: Gemessene Temperaturerhöhungen in 15 mm Tiefe bei Sensoranordnung längs zur Fahrtrichtung (Mittelwerte).

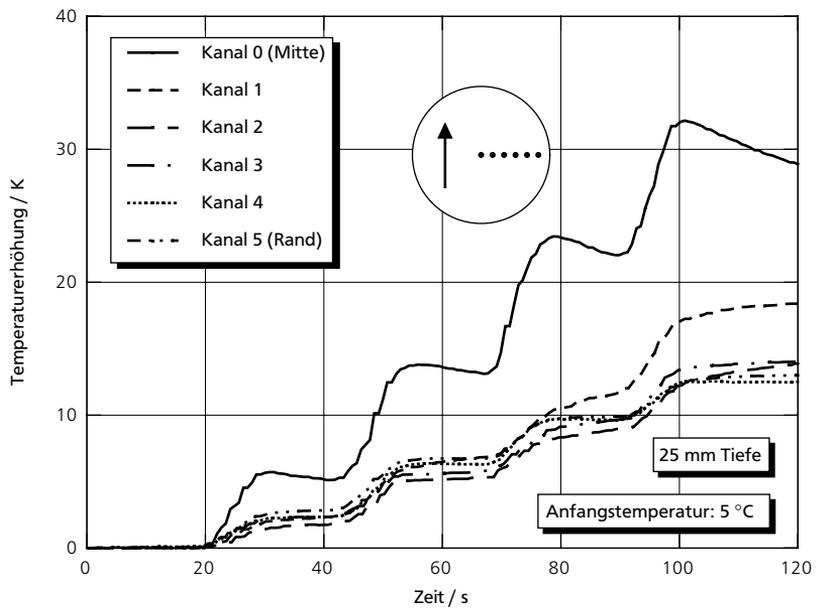


Abb. A 3-11: Gemessene Temperaturerhöhungen in 25 mm Tiefe bei Sensoranordnung quer zur Fahrtrichtung (Mittelwerte).

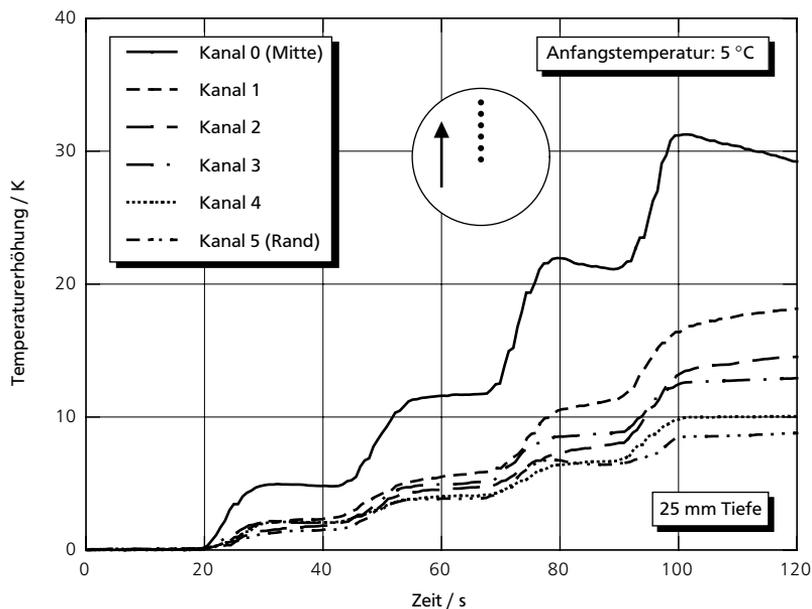


Abb. A 3-12: Gemessene Temperaturerhöhungen in 25 mm Tiefe bei Sensoranordnung längs zur Fahrtrichtung (Mittelwerte).

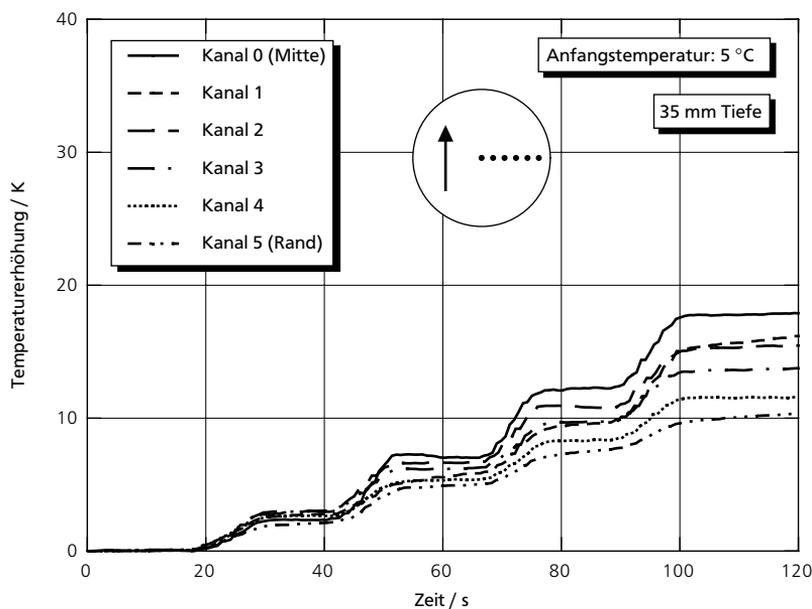


Abb. A 3-13: Gemessene Temperaturerhöhungen in 35 mm Tiefe bei Sensoranordnung quer zur Fahrtrichtung (Mittelwerte).

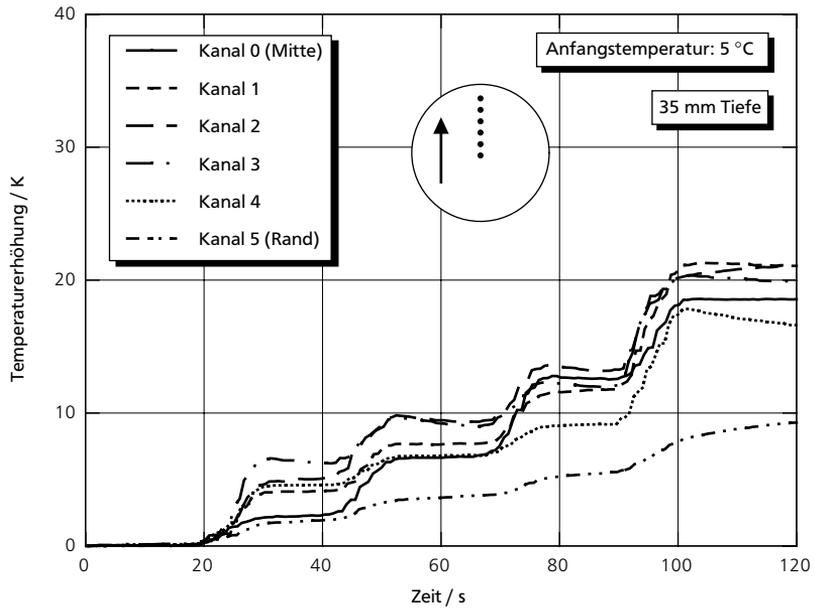


Abb. A 3-14: Gemessene Temperaturerhöhungen in 35 mm Tiefe bei Sensoranordnung längs zur Fahrtrichtung (Mittelwerte).

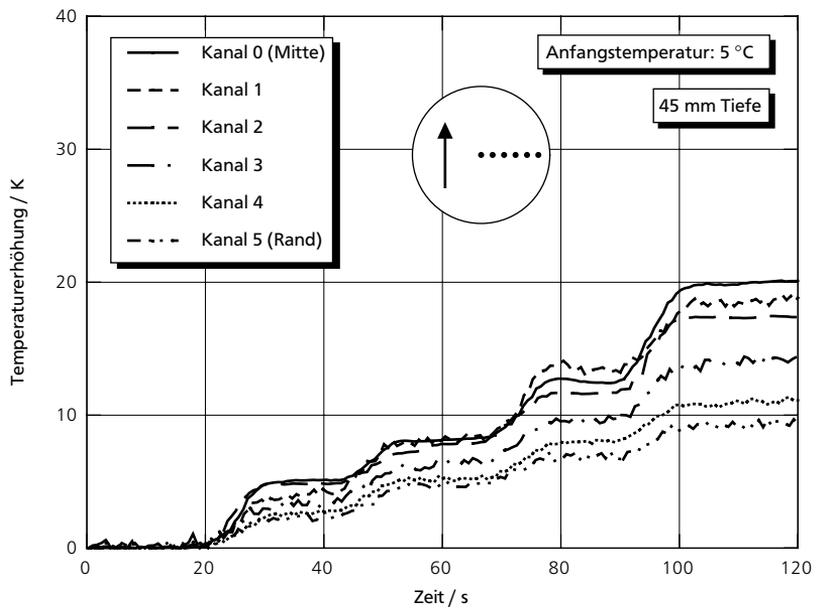


Abb. A 3-15: Gemessene Temperaturerhöhungen in 45 mm Tiefe bei Sensoranordnung quer zur Fahrtrichtung (Mittelwerte).

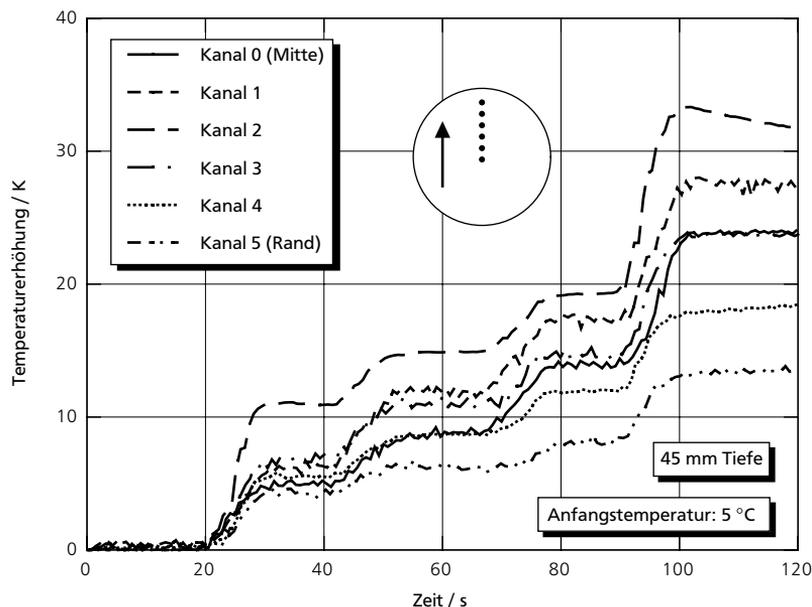


Abb. A 3-16: Gemessene Temperaturerhöhungen in 45 mm Tiefe bei Sensoranordnung längs zur Fahrtrichtung (Mittelwerte).

#### A 4 Einfluß der Wärmeleitung bei der Bestimmung der theoretischen Eindringtiefe

Bei der Bestimmung der theoretischen Eindringtiefe aus Temperaturprofilen werden nach einer Mikrowellenerwärmung die Temperaturen in verschiedenen Tiefen im Gut gemessen. Die Messung des gesamten Profils, d. h. in allen Ebenen dauerte 45 s. Dabei kühlt die Oberfläche am stärksten ab, so daß die Oberflächentemperatur nicht in die Auswertung miteinbezogen wurde, sondern erst Werte ab 5 mm Tiefe.

Bei den Gelen aus Wasser und wäßrigen Zuckerlösungen änderten sich die Temperaturen während der Meßzeit von 45 s in den verschiedenen Tiefen aufgrund der Wärmeleitung um maximal 0,5 K, wie Messungen ergaben.

Geht man nun davon aus, daß bei der Berechnung ein Temperaturfehler von 0,5 K eingeht, so wird bei der theoretischen Eindringtiefe ein Fehler von etwa 5 % gemacht. Bei einer theoretischen Eindringtiefe von 20 mm ist dies 1 mm.

Dieser Fehler ist zu vernachlässigen, wenn man die Standardabweichungen in den Abbildungen 3-73 und 3-74 in Kapitel 3.3 betrachtet.

Bei den Gelen aus Kochsalzlösungen wird der Fehler allein durch die ungenaue Plazierung der Temperatursensoren so groß, daß bei den kleinen theoretischen Eindringtiefen von etwa 3 mm die Bestimmung der Eindringtiefe aus Temperaturprofilen nicht möglich ist.