

L. O. Figura

Lebensmittelphysik

L. O. Figura

Lebensmittelphysik

Physikalische Kenngrößen – Messung und Anwendung

Mit 193 Abbildungen und 195 Tabellen

 Springer

Prof. Dr. FIGURA
Hochschule Bremerhaven
An der Karlstadt 8
D-27568 Bremerhaven
lfigura@hs-bremerhaven.de
www.figura.de

ISBN 3-540-20337-0 Springer Berlin Heidelberg New York

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek
Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen
Nationalbibliografie;
detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <<http://dnb.ddb.de>> abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funk- sendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Springer ist ein Unternehmen von Springer Science+Business Media GmbH
springer.de

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1993, 1996, 1999, 2002 und 2004
Printed in Germany

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z. B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

Umschlag-Entwurf: medio Technologies AG, Berlin
Satz: Fotosatz-Service Köhler GmbH, Würzburg

Gedruckt auf säurefreiem Papier 7/3020kk 5 4 3 2 1 0

Vorwort

Häufig werde ich gefragt, was Lebensmittelphysik ist. Die Kurzantwort ist, dass man sich in der Lebensmittelchemie und der Lebensmittelmikrobiologie mit der Bestimmung von Lebensmittelinhaltsstoffen und Mikroorganismen befasst, während die Lebensmittelphysik diejenige Disziplin ist, welche die physikalischen Eigenschaften der Lebensmittel und die zugehörigen Messverfahren im Blick hat. Die ausführliche Antwort ist schon etwas komplizierter: Die Forderungen nach Schnellmethoden und On-line-Verfahren für die Bestimmung und die Einhaltung der Qualität von Lebensmitteln bedingt die Suche nach schnell messbaren – d.h. in der Regel physikalischen – Größen, welche zuverlässig mit der Qualität korrelieren. Beispiele sind die optische Bestimmung des Zuckergehaltes, die Bestimmung des Wassergehaltes durch Kernresonanz oder die akustische Ermittlung von Partikelgrößen. Außer in der Qualitätskontrolle und der Prozess-Automatisierung spielt die Lebensmittelphysik eine Rolle für die Lebensmittelverfahrenstechnik, wo Stoffdaten wie z.B. Viskositäten oder Wärmekapazitäten benötigt werden. Die zunehmende Bedeutung physikalischer Verfahren in der Lebensmittelverarbeitung verstärkt diese Rolle.

Physikalische Messverfahren können sehr schnell sein, dafür sind sie in der Regel wenig spezifisch. Die sorgfältige Validierung von physikalischen Messverfahren mit geeigneten chemischen und biologischen Methoden gehört daher ebenso zur Lebensmittelphysik wie die Bestimmung von fundamentalen Größen wie z.B. der Fließgrenze und deren Korrelation mit organoleptisch ermittelten Texturmerkmalen.

Einige physikalische Themenbereiche wie die Mikroskopie von Lebensmitteln, Bildverarbeitung und statistische Verfahren werden in diesem Buch nicht behandelt. Der Stoff jedes Kapitels endet bewusst dort, wo die Verfahrenstechnik beginnt, so sind z.B. die elektrischen Eigenschaften von Lebensmitteln behandelt, nicht aber die Verfahren der ohmschen Erhitzung und der Mikrowellenerhitzung.

Ich danke dem Team, das mich bei der Erstellung dieses Lehrbuches unterstützt hat und freue mich auch zukünftig über Anregungen, Beispiele und Vorschläge, die dem Lernenden das Verstehen von naturwissenschaftlich-technischen Zusammenhängen erleichtern.

Der Lehrstoff des Buches ist nach den physikalischen Eigenschaften der Lebensmittel sortiert, am Ende jedes Kapitels findet sich eine Liste von Anwendungen zum jeweiligen Gebiet. Das Studium der dort angegebenen Originallite-

ratur soll zusammen mit diesem Lehrbuch Anregung und Training für alle diejenigen sein, deren Aufgabe es ist, technische Probleme zu lösen und die Qualität unserer Lebensmittel zu sichern und zukünftig weiter zu verbessern.

Quakenbrück, im Juni 2004

Ludger Figura

Inhalt

1	Wasseraktivität	1
1.1.1	Festkörper-Fluid-Grenzflächen	1
1.2	Adsorptionsgleichgewicht	1
1.2.1	Oberflächen-Belegung	4
1.2.2	Adsorptions-Isothermen	7
1.2.3	BET-Modell	9
1.2.4	GAB-Modell	18
1.2.5	Andere Modelle	22
1.3	Haltbarkeit von Lebensmitteln	23
1.4	Messung von Sorptions-Isothermen	26
1.5	Applikationen	29
1.6	Literatur	29
2	Masse und Dichte	31
2.1	Masse	31
2.2	Wiegen und Luftauftrieb	32
2.3	Dichte	35
2.3.1	Temperaturabhängigkeit der Dichte	35
2.3.2	Ideale Gase	35
2.3.3	Festkörper und Flüssigkeiten	36
2.3.4	Druckabhängigkeit der Dichte	37
2.3.5	Ideale Gase	37
2.3.6	Flüssigkeiten und Festkörper	37
2.3.7	Relative Dichte	40
2.3.8	Verfahren zur Bestimmung der Dichte	40
2.4	Applikationen	58
2.5	Literatur	58
3	Disperse Systeme: Geometrische Eigenschaften	59
3.1	Partikelgröße	60
3.1.1	Längen aus Bildauswerteverfahren	60
3.1.2	Äquivalentdurchmesser	60
3.1.3	Geometrische Äquivalentdurchmesser	61
3.1.4	Physikalische Äquivalentdurchmesser	62

3.1.5	Spezifische Oberfläche	62
3.1.6	Partikelform	63
3.2	Partikelgrößenverteilungen	65
3.2.1	Masseverteilung	66
3.2.2	Medianwert	71
3.2.3	Modalwert	72
3.2.4	Mittlere Partikelgröße – integrale Mittelwerte	72
3.2.5	Spezifische Oberfläche	76
3.2.6	SAUTER-Durchmesser	78
3.2.7	Weitere Verteilungs-Parameter	79
3.3	Messung von Partikelgrößen	79
3.3.1	Gravimetrische Verfahren	80
3.3.2	Optische Verfahren	81
3.3.3	Elektrische Verfahren	82
3.3.4	Weitere Messverfahren	83
3.4	Applikationen	85
3.5	Literatur	86
4	Rheologische Eigenschaften	87
4.1	Elastische Eigenschaften	87
4.1.1	Zugbeanspruchung	87
4.1.2	Dehnung	89
4.1.3	Kompression, Kompressibilität, Kompressionsmodul	91
4.1.4	Scherung	92
4.1.5	Querdehnung	93
4.2	Rheologische Modell-Körper	94
4.3	Viskose Eigenschaften – Fließen	97
4.3.1	Scherrate	98
4.3.2	NEWTON'sches Fließverhalten	103
4.3.3	Nicht-NEWTON'sches Fließverhalten	105
4.3.4	Vergleich: NEWTON'sche Fluide – nicht-NEWTON'sche Fluide	106
4.3.5	Strukturviskoses Fließverhalten	107
4.3.6	Thixotropes Fließverhalten	107
4.3.7	Dilatantes Fließverhalten	108
4.3.8	Plastisches Fließverhalten	108
4.3.9	Übersicht: Nicht-NEWTON'sches Fließverhalten	110
4.3.10	Modellfunktionen	112
4.3.11	OSTWALD-DE-WAELE-Fließgesetz	114
4.3.12	Modellfunktionen für plastische Fluide	116
4.4	Viskoelastizität	118
4.5	Temperaturabhängigkeit der Viskosität	122
4.6	Rheologische Messsysteme	123
4.6.1	Rotations-Rheometer	123
4.6.2	Oszillationstest	137
4.6.3	Weitere Messsysteme	141
4.7	Textur-Untersuchung	144

4.7.1	Messverfahren	146
4.7.2	Stress-Test	151
4.7.3	Fließtest	152
4.7.4	Relaxations-Test	152
4.7.5	Kriech-Tests	155
4.7.6	Bruch-Tests	156
4.8	Applikationen	162
4.9	Literatur	163
5	Grenzflächen	167
5.1	Zwei-Phasen-Systeme	168
5.1.1	Grenzflächenspannung	168
5.1.2	Gekrümmte Grenzflächen	169
5.1.3	Temperaturabhängigkeit der Grenzflächenspannung	172
5.1.4	Konzentrationsabhängigkeit der Grenzflächenspannung	176
5.1.5	Messung der Grenzflächenspannung	178
5.1.6	Adsorption von Polymeren aus der flüssigen Phase	182
5.2	Drei-Phasen-Systeme	183
5.2.1	Phasengrenze Flüssigkeit-Flüssigkeit-Gas	183
5.2.2	Phasengrenze Festkörper-Flüssigkeit-Gas	184
5.3	Applikationen	186
5.4	Literatur	186
6	Transport von Stoff, Masse, Wärme, Ladung	187
6.1	Stationäre Diffusion in Festkörpern	187
6.2	Leitfähigkeit, Leitwert, Widerstand	192
6.3	Stationäre Transportprozesse in mehrschichtigen Festkörpern	194
6.4	Permeation durch Verpackungen	196
6.4.1	Temperaturabhängigkeit	200
6.4.2	Messung der Permeabilität	200
6.5	Applikationen	204
6.6	Literatur	205
7	Thermische Größen	207
7.1	Temperatur	207
7.2	Thermische Ausdehnung	209
7.2.1	Längenausdehnung	209
7.2.2	Volumenausdehnung	210
7.3	Temperatur-Messung	212
7.3.1	Ausdehnungs-Thermometer	212
7.3.2	Elektrische Temperaturmessung	213
7.4	Enthalpie und Wärme	215
7.5	Thermodynamische Grundlagen	217
7.5.1	Hauptsätze der Thermodynamik	218
7.5.2	Klassifikation von Phasenumwandlungen	219

7.6	Wärmekapazität	222
7.6.1	Ideale Gase und ideale Festkörper	223
7.6.2	Wärmekapazität zusammengesetzter, realer Festkörper	226
7.7	Wärmetransport in Lebensmitteln	227
7.7.1	Wärmestrahlung	227
7.7.2	Wärmeleitung	229
7.7.3	Wärmeleitfähigkeit	239
7.7.4	Temperaturleitfähigkeit	244
7.7.5	Messung von Wärmeleitfähigkeit und Temperaturleitfähigkeit	245
7.8	Brennwert und Energieinhalt von Lebensmitteln	248
7.8.1	Energieinhalt und -umsatz	248
7.8.2	Berechnung des Energieinhaltes von Lebensmitteln	250
7.8.3	Messung des Brennwertes	251
7.9	Thermische Analyse	252
7.9.1	Thermogravimetrie (TG)	253
7.9.2	Wärmestrom-Kalorimetrie	257
7.10	Applikationen	273
7.11	Literatur	275
8	Elektrische Eigenschaften	279
8.1	Konduktivität	279
8.1.1	Temperaturabhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit	281
8.1.2	Feste pflanzliche Lebensmittel	282
8.1.3	Feste tierische Lebensmittel	282
8.1.4	Elektrolyt-Lösungen	283
8.2	Messung der elektrischen Leitfähigkeit	288
8.3	Kapazität und Induktivität	290
8.4	Applikationen	294
8.5	Literatur	294
9	Magnetische Eigenschaften	295
9.1	Paramagnetismus	295
9.2	Ferromagnetismus	296
9.3	Diamagnetismus	296
9.4	Magnetisierung	298
9.4.1	Applikationen	301
9.5	Magnetische Resonanz	303
9.5.1	NMR-Varianten	306
9.5.2	Applikationen	310
9.5.3	Literatur	312
10	Elektromagnetische Eigenschaften	315
10.1	Elektrische Polarisierung	315
10.1.1	Temperaturabhängigkeit	319
10.1.2	Frequenzabhängigkeit	321

10.1.3	Applikationen	322
10.2	Mikrowellen	322
10.2.1	Umwandlung von Mikrowellen in Wärme	324
10.2.2	Eindringtiefe von Mikrowellen	326
10.2.3	Mikrowellenerwärmung von Lebensmitteln	327
10.2.4	Applikationen	328
10.2.5	Literatur	329
11	Optische Eigenschaften	331
11.1	Refraktometrie	331
11.1.1	Grundlagen	331
11.1.2	Messung der Brechzahl	333
11.1.3	Applikationen	336
11.2	Kolorimetrie	336
11.2.1	Entstehen von Farbe und Färbung	337
11.2.2	Physiologie des Farbsehens	339
11.2.3	Terminologie	340
11.2.4	Farbmessverfahren	344
11.2.5	Applikationen	345
11.2.6	Literatur	346
11.3	NIR – nahes Infrarot	347
11.3.1	Grundlagen	347
11.3.2	Messtechnik	350
11.3.3	Applikationen	353
11.3.4	Literatur	354
12	Akustische Eigenschaften	355
12.1	Schall	355
12.1.1	Schallgeschwindigkeit	355
12.1.2	Lautstärke	358
12.1.3	Geräusch	359
12.1.4	Lärm	360
12.2	Ultraschall	360
12.3	Anwendungsbeispiele	362
12.4	Literatur	362
13	Radioaktivität	365
13.1	Strahlenarten	365
13.2	Radioaktives Zerfallsgesetz	366
13.3	Messung ionisierender Strahlung	368
13.4	Natürliche Radioaktivität	371
13.5	Applikationen	377
13.6	Literatur	377

14	Anhänge	379
14.1	Das Internationale Einheitensystem (SI)	379
14.2	Gestaltung von Manuskripten	386
14.3	Verteilungsfunktionen	392
14.4	Komplexe Zahlen	399
14.5	Griechische Schriftbuchstaben	405
14.6	Umrechnung von Temperaturangaben	406
14.7	Umrechnung von Zuckergehalt und Dichte	407
14.8	Einige Stoffdaten	408
14.9	Farbvergleichslösungen	416
14.10	Abbildungs-Verzeichnis	420
14.11	Tabellen-Verzeichnis	427
15	Allgemeine Literatur	433