

Alexander H. W. Baaden

**Mechanische Beanspruchung
pflanzlicher organischer Materialien**



Cuvillier Verlag Göttingen

Mechanische Beanspruchung pflanzlicher organischer Materialien

Von der Gemeinsamen Fakultät für Maschinenbau und Elektrotechnik
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde

eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von

Alexander Heinrich Wilhelm Baaden
aus Bingen am Rhein

Eingereicht am:	25.11.2002
Mündliche Prüfung am:	12.06.2003
Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. J. Schwedes
Mitberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. M. Bohnet Dr.-Ing. J. Müller
Prüfungsvorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. D. Hempel

2003

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.

1. Aufl. - Göttingen : Cuvillier, 2003
Zugl.: Braunschweig, Univ., Diss., 2003
ISBN 3-89873-781-0

⊕ CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2003
Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen
Telefon: 0551-54724-0
Telefax: 0551-54724-21
www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2003
Gedruckt auf säurefreiem Papier

ISBN 3-89873-781-0

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Mechanische Verfahrenstechnik der Technischen Universität Braunschweig.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. J. Schwedes; zum einen, daß er mir die Möglichkeit gegeben hat, diese Arbeit am Institut für Mechanische Verfahrenstechnik anzufertigen, und zum anderen für sein Vertrauen bei der eigenverantwortlichen Durchführung des Forschungsprojektes.

Für die Übernahme des zweiten Referates danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. M. Bohnet, sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. D. Hempel für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Herrn Dr.-Ing. J. Müller danke ich für sein Engagement als Koreferent und die Zusammenarbeit während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter.

Bei den Mitarbeitern des Institutes und in besonderem Maße bei den Mitgliedern der Arbeitsgruppe im Biozentrum der TU Braunschweig bedanke ich mich für die wertvollen Diskussionen, für die Bereitstellung und Reparatur von Analysengeräten und Versuchsapparaturen. Dabei gilt meiner besonderer Dank Frau S. Michel für die gewissenhafte Durchführung zahlreicher Analysen sowie Frau Dr.-Ing. R. Mundhenke für die konstruktive Zusammenarbeit bei der Bearbeitung des interdisziplinären Forschungsprojektes. Herrn Dipl.-Biotechnol. I. Kampen danke ich für die tatkräftige Unterstützung gerade in der Endphase meiner Arbeit.

Ebenfalls bedanken möchte ich mich bei den Studenten, die durch Studien- oder Diplomarbeiten oder auch als wissenschaftliche Hilfskräfte an dieser Arbeit mitgewirkt haben.

Die finanziellen Mittel zur Durchführung dieser Arbeit wurden von der Deutschen Forschungsgemeinschaft zur Verfügung gestellt.

Ein ganz besonderer Dank neben Freunden und Verwandten gebührt meinen Eltern, die durch ihre Unterstützung und ihr Verständnis einen entscheidenden Anteil am Gelingen dieser Arbeit hatten.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Stand des Wissens	3
2.1	Organische Materialien	3
2.2	Mechanische Beanspruchung	6
2.2.1	Ziele der mechanischen Beanspruchung	7
2.2.2	Physikalische Aspekte der mechanischen Beanspruchung	7
2.2.3	Mechanische Beanspruchung von Einzelpartikeln	9
2.2.3.1	Beanspruchungsarten	10
2.2.3.2	Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften nicht-spröder Materialien	10
2.2.3.3	Beanspruchung von organischen Einzelpartikeln	11
2.2.4	Beanspruchung von Partikelkollektiven in Zerkleinerungsmaschinen	12
2.2.4.1	Agglomeration als Folge einer mechanischen Beanspruchung	12
2.2.4.2	Mechanische Beanspruchung von organischen Materialien	13
2.3	Anaerober Abbau	15
2.3.1	Grundlagen des mikrobiellen Abbaus organischer Materialien	15
2.3.2	Die vier Stufen des anaeroben Abbaus	16
2.3.3	Einfluß einer mechanischen Beanspruchung auf den anaeroben Abbau	17
3	Versuchsprogramm, Versuchsaapparaturen, Methoden und Materialien	19
3.1	Versuchsprogramm	19
3.1.1	Zielsetzungen	19
3.1.2	Versuchsprogramm	19
3.2.	Versuchsaapparaturen	21
3.2.1	Universalprüfmaschine zur Durchführung von Einzelbeanspruchungen	21
3.2.1.1	Beschreibung der Universalprüfmaschine	21
3.2.1.2	Durchgeführte Beanspruchungen	22
3.2.1.2.1	Uniaxiale Druckbeanspruchung	22
3.2.1.2.2	Schneidbeanspruchung	22
3.2.1.2.3	Scherbeanspruchung	22
3.2.2	Schneidmühle zur Durchführung der mechanischen Beanspruchung von Partikelkollektiven	23
3.2.2.1	Beschreibung der Schneidmühle SM2000	23
3.2.2.2	Mahlraum der Schneidmühle SM2000	24
3.2.2.3	Parameter bei der mechanischen Beanspruchung von Partikelkollektiven	25
3.2.3	Anaerobanlage	26
3.2.3.1	Beschreibung der Anaerobanlage	26
3.2.3.2	Durchführung der diskontinuierlichen Abbaueversuche	26

3.3	Methoden	27
3.3.1	Analytische Bestimmungsmethoden	27
3.3.1.1	Trockenrückstand (TR), organischer Trockenrückstand (oTR) und Glühverlust (GV)	27
3.3.1.2	Chemischer Sauerstoffbedarf	28
3.3.1.2.1	Messung des Chemischen Sauerstoffbedarfs	28
3.3.1.2.2	Berechnung des spezifischen Chemischen Sauerstoffbedarfs	29
3.3.1.3	Rohfasergehalt	29
3.3.2	Parameter zur Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften	30
3.3.2.1	Uniaxiale Druckbeanspruchung	30
3.3.2.2	Schneidbeanspruchung	32
3.3.2.3	Scherbeanspruchung	33
3.3.2.4	Materialkenngrößen	34
3.3.2.5	Spezifische Energie	34
3.3.3	Parameter zur Charakterisierung der mechanischen Beanspruchung in der Schneidmühle	35
3.3.3.1	Spezifische Energie	35
3.3.3.2	Partikelgrößenanalyse	35
3.3.3.3	Spezifische Oberfläche	38
3.3.3.3.1	Spezifische Oberfläche nach dem BET-Verfahren	38
3.3.3.3.2	Spezifische Oberfläche aus der Partikelgrößenanalyse $S_{m,PGV}$	39
3.3.3.3.3	Vergleich der beiden spezifischen Oberflächen	41
3.3.3.4	Freisetungsgrad organischer Komponenten F_{CSB}	41
3.3.4	Parameter zur Charakterisierung des anaeroben Abbaus	42
3.3.4.1	Faulgasausbeute	42
3.3.4.2	Abbaugrad ξ_G	43
3.3.4.3	Beladungsrate BL	43
3.4	Materialien	44
3.4.1	Charakterisierung der Versuchsmaterialien	44
3.4.2	Beschreibung der organischen Zweistoffgemische	45
3.4.3	Vorbehandlungen der Versuchsmaterialien	46
3.4.4	Untersuchungen zum Wassergehalt	46
3.4.4.1	Absenkung des Wassergehaltes durch Trocknung	46
3.4.4.2	Erhöhung des Wassergehaltes durch Befeuchtung	47
4	Versuchsergebnisse	48
4.1	Trocknungs- und Befeuchtungsversuche	48
4.1.1	Trocknungsversuche	48
4.1.2	Befeuchtungsversuche	50
4.2	Mechanische Eigenschaften organischer Materialien	52
4.2.1	Kraft-Weg-Verläufe	52
4.2.2	Abgeleitete Kenngrößen organischer Materialien	55
4.2.2.1	Maximale Druckfestigkeit organischer Materialien	55
4.2.2.1.1	Feuchte Materialien	55
4.2.2.1.2	Trockene Materialien	63
4.2.2.2	Maximale Schneidfestigkeit organischer Materialien	68
4.2.2.2.1	Feuchte Materialien	68
4.2.2.2.2	Trockene Materialien	75
4.2.2.3	Maximale Scherfestigkeit organischer Materialien	80

4.2.2.3.1	Feuchte Materialien	80
4.2.2.3.2	Trockene Materialien	84
4.2.2.4	Vergleich der verschiedenen Beanspruchungsarten	87
4.3	Mechanische Beanspruchung in einer Schneidmühle	88
4.3.1	Mechanische Beanspruchung der Materialien als Einzelsubstrate	89
4.3.1.1	Feuchte organische Materialien als Einzelsubstrate	89
4.3.1.2	Trockene organische Materialien als Einzelsubstrate	94
4.3.1.3	Vergleich der Ergebnisse der feuchten und trockenen organischen Materialien als Einzelsubstrate	100
4.3.2	Mechanische Beanspruchung der Materialien als Zweikomponentengemische	100
4.3.3	Vergleich der Ergebnisse der mechanischen Beanspruchung der Materialien als Einzelsubstrate und als Zweikomponentengemische	112
4.3.4	Einfluß der mechanischen Beanspruchung auf das anaerobe Abbauverhalten organischer Zweikomponentengemische	114
4.3.4.1	Trockene organische Zweikomponentengemische	114
4.3.4.2	Feuchte organische Zweikomponentengemische	116
4.4	Zusammenhang zwischen den mechanischen Eigenschaften und dem Zerkleinerungsverhalten organischer Materialien	117
4.4.1	Feuchte organische Materialien	118
4.4.2	Trockene organische Materialien	120
5	Zusammenfassung	122
6	Literaturverzeichnis	125
7	Anhang	A
7.1	Bestimmung des Vertrauensbereiches der Meßwerte	A
7.2	Tabellarische Auflistung der Meßergebnisse von Kap. 4 (exemplarisch für die uniaxialen Druckversuche)	A
7.3	Anaerober Abbau	M
7.4	Bestimmung der Formfaktoren	O
7.4.1	Formfaktor für zylindrische Partikel (Höhe:Durchmesser = 2:1)	O
7.4.2	Formfaktor für zylindrische Partikel (Höhe:Durchmesser = 3:1)	O
7.4.3	Formfaktor für pyramidale Partikel (Höhe:Breite = 1:1)	O
7.4.4	Formfaktor für oktaedrische Partikel	P
7.4.5	Formfaktoren für die Zweikomponentengemische	P
7.5	Ergänzende Angaben zur Bestimmung der spezifischen Energie bei der Einzelpartikelbeanspruchung	P

Abkürzungen und Formelzeichen

A		Integrationsfläche
A_0	$[m^2]$	Ausgangsquerschnittsfläche der Proben
Abb.		Abbildung
a_M	$[m^2]$	Platzbedarf eines Gasmoleküles
aqua dest.		deionisiertes Wasser
B	$[mm]$	Breite
BET		Gasadsorptionsverfahren nach Brunnauer, Emmett und Teller
BL	$[g/g]$	Beladungsrate
CSB	$[mg\ O_2/l]$	chemischer Sauerstoffbedarf
CSB_{max}	$[mg\ O_2/l]$	maximaler chemischer Sauerstoffbedarf (berechnet)
CSB_{spez}	$[g\ O_2/g_{oTM}]$	chemischer Sauerstoffbedarf der gelösten organischen Komponenten
d	$[mm]$	Durchmesser
DIN		Deutsches Institut für Normung
E_{spez}	$[kJ/kg]$	spezifische Beanspruchungsenergie
F_{CSB}	$[\%]$	CSB-Freisetzungsgrad
F	$[N]$	Kraft
GV	$[\%]$	Glühverlust
H	$[mm]$	Höhe
L	$[mm]$	Länge
l	$[mm]$	Weg
m	$[kg]$	Probenmasse
n	$[-]$	Molekülanzahl
N	$[-]$	Anzahl der Messungen
N_A	$[mol^{-1}]$	Avogadro-Konstante
oTM	$[g]$	organische Trockenmasse
oTR	$[g/kg]$	organischer Trockenrückstand
P	$[W]$	elektrische Leistung
P_0	$[W]$	elektrische Leerlaufleistung
p	$[Pa]$	Druck
p_0	$[Pa]$	Sättigungsdampfdruck
PGV		Partikelgrößenverteilung
$q_3(x)$	$[\mu m^{-1}]$	massenbezogene Verteilungsdichtefunktion
$Q_3(x)$	$[-]$	massenbezogene Verteilungssummenfunktion
S		Standardabweichung

S	[m ²]	Oberfläche
S _m	[m ² /g]	massenspezifische Oberfläche
SBK		Sonnenblumenkerne
T	[K] bzw. [°C]	Temperatur
t	[s]	Zeit
Tab.		Tabelle
TM	[g]	Trockenmasse
TR	[g/kg]	Trockenrückstand
U	[m/s]	Umfangsgeschwindigkeit
v	[m/s]	Umfangsgeschwindigkeit des Mühlenrotors
v	[mm/min]	Beanspruchungsgeschwindigkeit
V	[m ³]	Volumen
VB		Vertrauensbereich
V _{g,oTM}	[l/kg]	gemessene Faulgasausbeute
V _{g,oTM,max}	[l/kg]	berechnete maximale Faulgasausbeute
w/w-%	[%]	Gewichtsprozent
WG	[%]	Wassergehalt
x	[µm]	Partikeldurchmesser
x _{50,3}	[µm]	Medianwert der massenbezogenen Verteilungsummenfunktion
x _t	[µm]	Trennmaschenweite eines Siebes
z		Bewegungsrichtung
Z	[-]	Verhältnis von Höhe zu Durchmesser

Griechische Buchstaben

ζ	Ψ β	Wahrscheinlichkeit für Vertrauensbereich
÷	[-]	Differenz
κ	[-]	Dehnung; entdimensionierter Weg
ξ _G	[%]	Abbaugrad ermittelt aus der Faulgasausbeute
π	[-]	Formfaktor
ψ	[kg/m ³]	Feststoffdichte
ω	[N/mm ²]	Spannung
Ο		Summe
... ² _{v,s}		Waddel'scher Formfaktor

Indizes

0	auf die Ausgangsform bezogen
BET	aus der Gasadsorption ermittelt
Druck	auf uniaxiale Druckversuche bezogen
Ges	auf eine Gesamtheit bezogen
IS	auf den Impfschlamm bezogen
l	auf eine Länge bezogen
m	auf die Masse bezogen
max	maximal
n	auf Normalbedingungen bezogen
oTM	auf Trockenmasse bezogen
PGV	aus der Partikelgrößenanalyse ermittelt
rel	relativ
Scher	auf Scherversuche bezogen
Schneid	auf Schneidversuche bezogen
Spez	spezifisch
Sub	auf das Substrat bezogen
t	Trenn-
V	auf das Volumen bezogen
zerkleinert	auf eine mechanisch beanspruchte Probe bezogen

1 Einleitung

Die Auslegung von Zerkleinerungsmaschinen ist oftmals mit großem experimentellem Aufwand verbunden. Dies ist u.a. darauf zurückzuführen, daß die Materialfunktionen wie Fließgrenze und Festigkeit verschiedener Materialien nicht bekannt sind (Müller & Polke, 1999). Für spröde Materialien (Rumpf, 1961) und metallische Werkstoffe (Domke, 1986) sind die zur Beschreibung der mechanischen Eigenschaften notwendigen Kriterien mittlerweile gut standardisiert. Im Gegensatz zu diesen Materialien existieren diese Grundlagen und Kriterien für organische Materialien (Kang et al., 1995) noch nicht in diesem Umfang. Da jedoch Materialien biologischen Ursprungs zunehmend in Form von Reststoffen aus beispielsweise der Landwirtschaft, der Lebensmittelindustrie und besonders den privaten Haushalten in immer größeren Mengen anfallen, müssen für deren sachgerechte Entsorgung bzw. Aufarbeitung verfahrenstechnische Schritte entwickelt werden, die eine nachhaltige Entsorgung dieser Reststoffe gewährleisten. Beispielsweise gewinnt die anaerobe Vergärung zunehmend an Bedeutung bei der Entsorgung nasser biologischer Abfälle, die gegenüber der Kompostierung Vorteile wie die Behandlungsmöglichkeit, die Produktion von nutzbarem Biogas und eine Verringerung der Geruchsemission bietet. Außerdem wird die Keimbelastung der Luft bei diesem anaeroben Prozeß vermindert.

Eine mechanische Beanspruchung als verfahrenstechnischer Schritt vor der biologischen Behandlung von organischen Materialien erwies sich als positiv, da infolge einer solchen Beanspruchung Materialeigenschaften wie Struktur, Oberfläche bzw. Partikelgröße verändert und Zellinhaltsstoffe freigesetzt werden. Diese positiven Aspekte einer mechanischen Vorbehandlung organischer Stoffe bestehen schon in der Natur, wo organische Materialien vor der anschließenden, eigentlichen biologischen Verwertung – beispielsweise bei Lebewesen in Form von Zerkleinern zwischen den Zähnen im Mund – mechanisch beansprucht werden (Schönert & Bernotat, 2002).

Für eine mechanische Vorbehandlung ist die Auswahl der Zerkleinerungsmaschine und die Kenntnis der mechanischen Eigenschaften organischer Materialien sinnvoll. Eine Literaturrecherche von Palmowski (2000) hat jedoch gezeigt, daß gerade Kenntnisse bezüglich des Zerkleinerungsverhaltens organischer und nicht-spröder Stoffe nur spärlich vorhanden sind.

Auch deshalb wird die mechanische Beanspruchung organischer Materialien seit mehreren Jahren am Institut für Mechanische Verfahrenstechnik der TU Braunschweig grundlegend untersucht. Aufbauend auf Ergebnissen von Müller (1996), der zeigte, daß eine mechanische Klärschlammdeintegration zu ei-

nem vermehrten und beschleunigten biologischen Abbau des Organikanteils führt, untersuchte Palmowski (2000), inwieweit eine mechanische Beanspruchung auch bei anderen organischen Materialien ähnliche Auswirkungen auf den anaeroben Abbauprozess bewirkt. Mundhenke (2002) schließlich untersuchte „den Einfluß der Zerkleinerung auf die Bioverfügbarkeit von organischen Substraten“ und stellte dabei unter anderem fest, daß bei vorhergehender Zerkleinerung – in Abhängigkeit der abzubauenen Materialien – auf die richtige Einstellung der Prozeßbeladungsrate zu achten ist.

Aufbauend auf diesen Untersuchungen und Erkenntnissen soll diese Arbeit einen Beitrag zur genaueren Charakterisierung der mechanischen Beanspruchung organischer Materialien leisten, indem die mechanischen Eigenschaften und das Verhalten organischer Materialien bei mechanischer Beanspruchung von Partikelkollektiven beschrieben, miteinander verglichen und geklärt werden. Dabei wird der Einfluß des Wassergehaltes besonders berücksichtigt.

2 Stand des Wissens

2.1 Organische Materialien

Organische Materialien können pflanzlicher oder tierischer Herkunft sein. Sie entstehen durch natürliche biochemische Prozesse und können durch solche wieder mineralisiert werden.

Die Untersuchungen in dieser Arbeit beschränken sich auf organische Materialien pflanzlicher Herkunft, deren Aufbau und Struktur hinreichend beispielsweise in Nultsch (1991) dargestellt sind.

In der Natur treten diese Stoffe in unterschiedlichsten Formen und Zusammensetzungen auf, die teilweise sehr komplex sind. Dennoch erscheinen in der Literatur (u.a. Cowling, 1975; Fan et al., 1981) immer wieder zwei Komponenten der pflanzlichen Zellwand, deren Gehalt maßgebend für die mechanischen Eigenschaften, das Zerkleinerungs- und Abbauverhalten ist: die Faserstoffe Cellulose und Lignin. Der genauere Zusammenhang zwischen dem Aufbau der pflanzlichen Zellwand und diesen Faserstoffen wird im folgenden dargestellt.

Die pflanzliche Zellwand

Der Aufbau der pflanzlichen Zelle und deren Einfluß auf die mechanischen Eigenschaften und das Abbauverhalten sind hinreichend von Palmowski (2000) beschrieben worden. Deshalb wird hier nur der Aufbau der pflanzlichen Zellwand unter besonderer Berücksichtigung der Faserstoffe Cellulose und Lignin vorgestellt. In den Abbildungen 2.1 bis 2.3 ist der mikroskopische Aufbau der pflanzlichen Zellwand dargestellt.

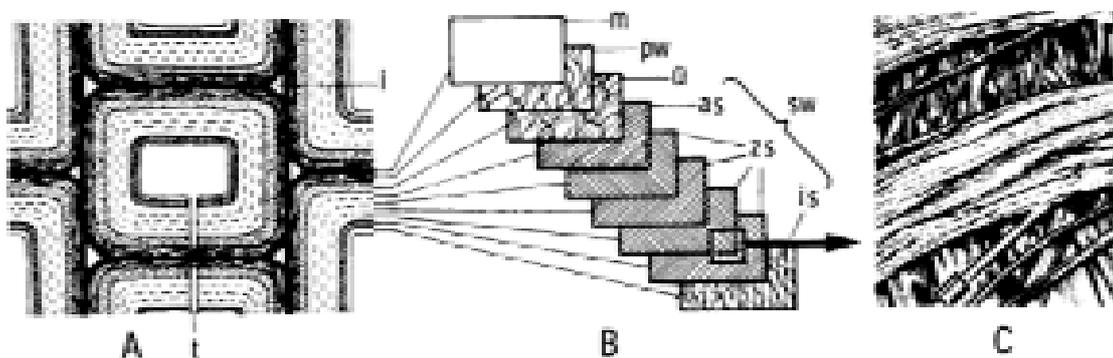


Abb. 2.1: Mikroskopischer Aufbau der pflanzlichen Zellwand (Teil 1) aus Nultsch (1991).

Abkürzungen: A: schematische Zellwandschichtung im Querschnitt
B: Textur der einzelnen Schichten, schematisch
C: Sekundärwandschichtung nach einer EM-Aufnahme
m: Mittellamelle; pw: Primärwand; ü: Übergangslamelle;
as: Außenschicht; zs: Zentralschicht; is: Innenschicht;
sw: Sekundärwand; i: Intrazellularen; t: Tüpfel.

Abbildung 2.1 [A, B] zeigt, daß die Grenze zwischen zwei benachbarten Zellen durch die Mittellamelle gebildet wird (Jacob et al., 1987; Nultsch, 1991). Sie verbindet die Wände benachbarter Zellen strukturlos als Interzellulärschicht. „Ihrer Ausdehnung nach ist sie unscheinbar“ (Nultsch, 1991). Die Mittellamelle verbindet die Primärwände der benachbarten Zellen. Die Primärwände enthalten ca. 10 % bis 15 % Cellulose. Die Mikrofibrillen der Primärwand sind in einem lockeren Gerüst verknüpft, dessen Anordnung als Streuungstextur (Abbildung 2.1. B) bezeichnet wird (Nultsch, 1991; Jacob et al., 1987). Die Primärwand ist sehr elastisch, kann aber auch plastisch gedehnt und verformt werden. Dadurch kann sie der Größenzunahme der Zelle beim Wachstum folgen (Nultsch, 1991).

Die Sekundärwand beinhaltet deutlich mehr Cellulose (in Extremfällen bis zu 94 %) und ist häufig vielschichtig (Nultsch, 1991). Diese Schichten (Abbildung 2.1 A, B) können lichtmikroskopisch unterschieden werden. Die Fibrillen der Sekundärwand besitzen eine Paralleltextrur (Abbildung 2.1 C). Dies ist ein kennzeichnendes Merkmal für die Sekundärwand (Jacob et al. 1987). Sie gibt der Zelle somit ihre mechanische Festigkeit (Nultsch, 1991).

Die Bündelung mehrerer Mikrofibrillen, die aus Elementarfibrillen aufgebaut werden, und der Aufbau dieser Elementarfibrillen sind in Abbildung 2.2 schematisch dargestellt.

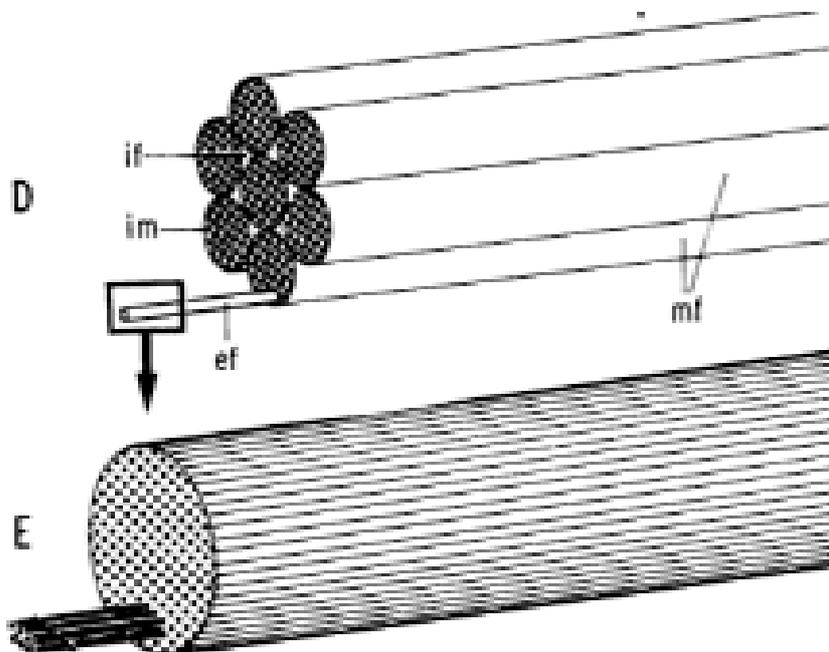


Abb. 2.2: Mikroskopischer Aufbau der pflanzlichen Zellwand (Teil 2) aus Nultsch (1991).
 Abkürzungen: if: interfibrillärer Raum; im: intermicellärer Raum;
 mf: Mikrofibrille; ef: Elementarfibrille.

Man erkennt, daß die Mikrofibrillen aus Elementarfibrillen aufgebaut sind (Abbildung 2.2 D). In diesen Elementarfibrillen sind die Cellulosemoleküle parallel

angeordnet. Zur Veranschaulichung sind in Abbildung 2.2 E im Anschnitt sechs dieser Celluloseketten herausgezogen. In Abbildung 2.3 ist schließlich die kristalline Struktur am Beispiel von sechs Celluloseketten in der Elementarfibrille dargestellt. Dabei sind kovalente Bindungen durchgezogen, Wasserstoffbrückenbindungen in der Ebene gestrichelt und senkrecht zur Ebene gepunktet wiedergegeben.

Cellulose ist der Hauptbestandteil in pflanzlichen Zellwänden. Sie besteht aus η -Glucopyranoseresten, die über 1,4-Bindungen glykosidisch verknüpft sind. Aufgrund der Kettenstruktur bilden sich die kristallinen Strukturen aus. Die Ketten sind etwas gefaltet, so daß sich inter- und intramolekulare Wasserstoffbrückenbindungen bilden können (Abbildung 2.3 F), die die geordneten Strukturen weiter erhöhen.

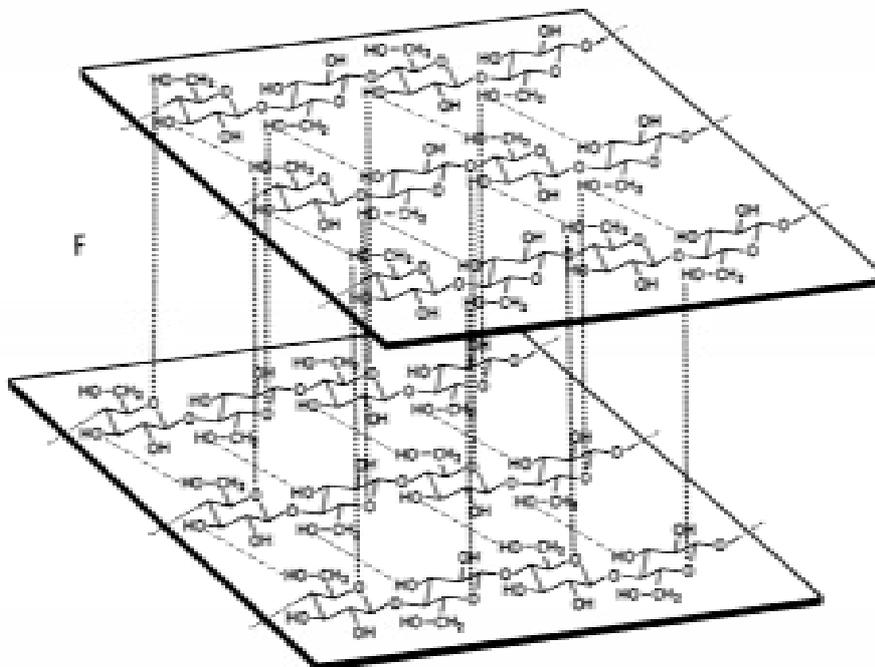


Abb. 2.3: Mikroskopischer Aufbau der pflanzlichen Zellwand (Teil 3) aus Nultsch (1991).

Der Polymerisationsgrad kann zwischen 1000 und 15000 (Nultsch, 1991) liegen. Die Moleküllänge kann demnach bis zu 7,5 μm betragen. Wegen der hochgeordneten Struktur und dem hohen Molekulargewicht ist Cellulose in Wasser fast unlöslich und ihr Quellvermögen ist – abhängig von der Herkunft – eher gering (Belitz & Grosch, 1995). Die Einlagerung von Quellwasser im Cellulosegerüst ist nach Jacob et al. (1987) nämlich nur in den sehr kleinen Hohlräumen zwischen den Elementarfibrillen (vergleiche Abbildung 2.2 D) [Intermicellarräumen] möglich. In den größeren interfibrillären Räumen (vergleiche Abbildung 2.2 D) der Primär- und Sekundärwand kann die Grundsubstanz durch eingelagerte Inkrustierungen verdrängt werden (Jacob et al.,

1987). Bei dem Prozeß der Verholzung wird Lignin inkrustiert. Lignin ist ein hochmolekularer Stoff mit aromatischer Struktur. Es ist ein komplexes Mischpolymer aus Phenylpropanen (Nultsch, 1991). Diese für die mechanischen Eigenschaften, das Zerkleinerungs- und das Abbauverhalten, wichtige Inkrustierung ist in Abbildung 2.4 schematisch dargestellt.

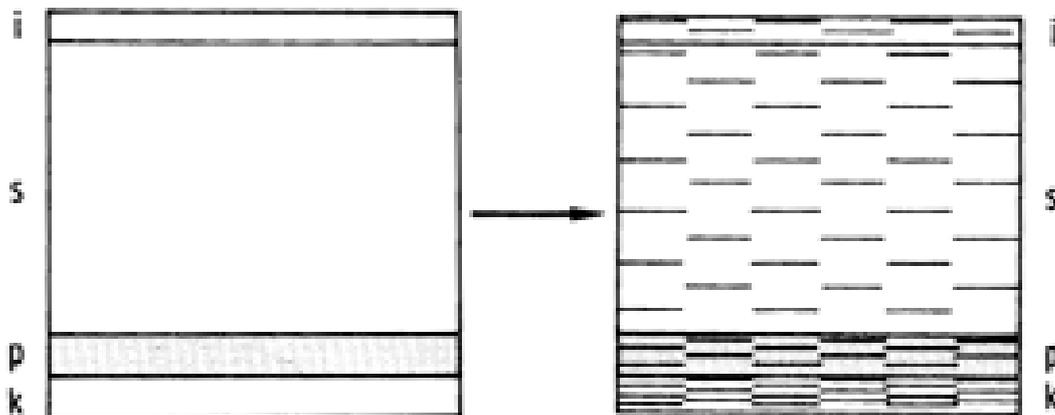


Abb. 2.4: Schematische Darstellung der sekundären Veränderungen der Zellwand (Inkrustierung) aus Nultsch (1991).

Abkürzungen: i: Innenschicht der Sekundärwand; s: Sekundärwand;
p: Primärwand; k: Kittschicht.

Diese Inkrustierungen bewirken eine Verringerung der Elastizität der Zellwände bei gleichzeitiger Erhöhung der Festigkeit (Jacob et al., 1987). Nach Radatz (1993) steigt diese Lignininkrustierung mit dem Alter der Pflanze an und ist substratspezifisch.

In den folgenden Kapiteln wird noch auf die Bedeutung dieser beiden Komponenten (Cellulose und Lignin) für die mechanischen Eigenschaften und das Zerkleinerungs- und Abbauverhalten organischer Materialien eingegangen. Zunächst soll noch der Aufbau eines weiteren Biopolymers, das das Materialverhalten der Kartoffeln maßgeblich beeinflusst, erläutert werden: der Aufbau der Stärke. Stärke ist – wie Cellulose – aus Glucosemolekülen aufgebaut. Diese sind hier jedoch ζ -glykosidisch verbunden, so daß der Grundbaustein die Maltose ist (Nultsch, 1991). Deshalb ist Stärke kein langgestrecktes, sondern ein gleichmäßig schraubenförmiges Makromolekül, wobei sich in jeder Windung ca. sechs Glucosemoleküle befinden (Nultsch, 1991). Diese unterschiedliche räumliche Ausrichtung der Stärke – verglichen mit Cellulose – ist für das Materialverhalten der Kartoffeln entscheidend.

2.2 Mechanische Beanspruchung

In diesem Kapitel werden die Grundlagen der mechanischen Beanspruchung von Einzelpartikeln in Prüfmaschinen sowie von Partikelkollektiven in Zerkleinerungsmaschinen erläutert, auf denen die Untersuchungen dieser Arbeit ba-

sieren. Im Normalfall bewirkt eine mechanische Beanspruchung ein Zerteilen von Partikelkollektiven oder Festkörpern – meist bis zu einem definierten Zerkleinerungsgrad – ohne Änderung des Aggregatzustandes des beanspruchten Aufgabegutes (Tscheuschner, 1996). Diesen Vorgang nennt man Zerkleinerung. Sie stellt eine Grundoperation der Mechanischen Verfahrenstechnik dar. Ihre technische Bedeutung ist daran zu erkennen, daß ca. 4 % der weltweit genutzten Energie für die Zerkleinerung eingesetzt werden (Vauk & Müller, 1994). Im folgenden werden zunächst die grundlegenden Ziele und anschließend die physikalischen Grundlagen der mechanischen Beanspruchung erläutert.

2.2.1 Ziele der mechanischen Beanspruchung

Um einen für eine weitere Verarbeitung günstigen Disperititätszustand zu erzielen, müssen nahezu alle festen Stoffe im Laufe ihres Verarbeitungsprozesses mechanisch beansprucht werden (Löffler & Raasch, 1991). Dabei sind die Ziele dieser energieaufwendigen Beanspruchungen das Erzeugen bestimmter Partikelgrößenverteilungen, das Erzeugen bestimmter Partikelformen und das Erzielen bestimmter spezifischer Oberflächen. Mit der Oberflächenvergrößerung kann eine zunehmende Agglomerationsneigung einhergehen, und es können Hafterscheinungen zwischen den zerkleinerten Partikeln auftreten, da die Oberflächenkräfte im Verhältnis zu den Volumenkräften zunehmen. Die Adhäsion der Partikel läßt sich dabei primär auf intermolekulare van-der-Waals-Kräfte, elektrostatische Anziehung sowie Flüssigkeitsbrücken zurückführen (Stieß, 1994) [vergleiche Kapitel 2.2.4.1].

Die Auswahl der geeigneten Zerkleinerungsmaschine ist entsprechend der Vielzahl an zu beanspruchenden Produkten schwierig, und die Auslegung solcher Maschinen erfolgt meist auf empirischem Weg (Löffler & Raasch, 1991). Eine ausführliche Beschreibung der vorhandenen Zerkleinerungsmaschinen ist u.a. in Stieß (1994) und Bernotat & Schönert (1988) dargestellt.

2.2.2 Physikalische Aspekte der mechanischen Beanspruchung

Um bei einer mechanischen Beanspruchung ein Zerteilen der beanspruchten Feststoffpartikel zu bewirken, müssen zwei Bedingungen erfüllt werden, damit sich zunächst ein Bruch bilden und anschließend fortpflanzen kann (siehe u.a. Bernotat & Schönert (1988), Schwedes & Bunge (1990) und Schwedes (2001)). Die örtlich angreifende Zugspannung muß größer als die molekulare Zerreißspannung des beanspruchten Partikels sein (Spannungsbedingung). Dies bewirkt die Möglichkeit des Entstehens eines Bruches. Damit der Bruch dann auch tatsächlich entsteht, muß die Summe der bereitgestellten Energien

mindestens gleich groß der Summe der zum Entstehen des Bruches notwendigen Energien sein. Dabei kann noch zwischen einer differentiellen Energiebedingung (Anrißphase und statische Bruchausdehnung) und einer integralen Energiebedingung (Durchlaufen des Bruches durch das beanspruchte Partikel) unterschieden werden. Diese theoretische Beschreibung des Beanspruchungsverhaltens kann kaum auf reale Partikel übertragen werden. Aus diesem Grund wird die mechanische Beanspruchung zusätzlich phänomenologisch untersucht, und es werden praktische Versuche mit realen Einzelpartikeln durchgeführt, um Erkenntnisse über die relevanten Informationen, die für das Verständnis der mechanischen Beanspruchung notwendig sind, zu erhalten.

Nach Rumpf (1965) werden für die Zerkleinerung vier Beanspruchungsarten unterschieden (Abbildung 2.5):

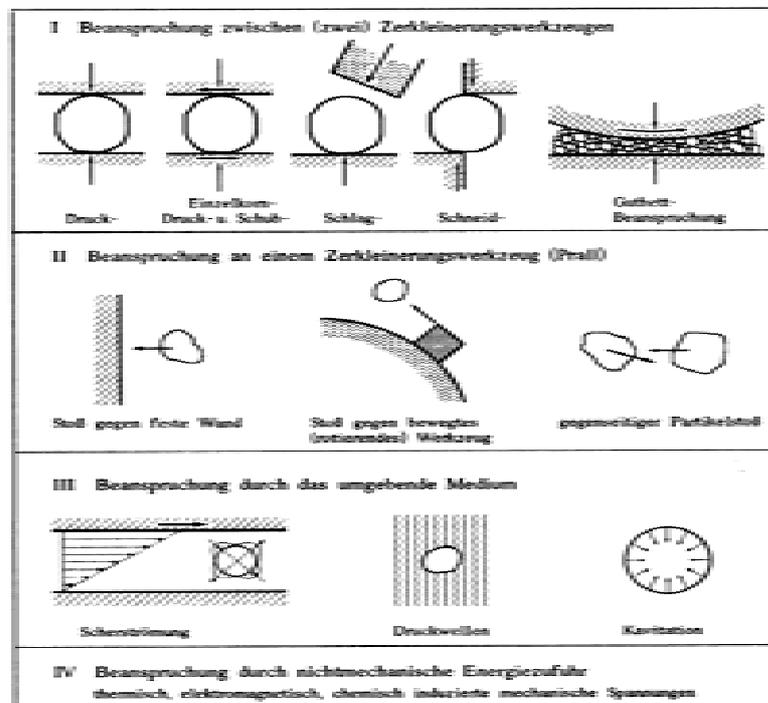


Abb. 2.5: Beanspruchungsarten nach Rumpf (1965); aus Stieß (1994).

1. Beanspruchung zwischen mindestens zwei Zerkleinerungswerkzeugen:

Hierbei werden die Partikel entweder einer reinen Druckbelastung oder einer kombinierten Druck-Scher-Beanspruchung ausgesetzt. Zusätzlich kann es zu einer gegenseitigen Beanspruchung aneinander grenzender Partikel kommen. Die erzwungene Verformung durch die Festkörperfläche und die relativ geringe Beanspruchungsgeschwindigkeit sind kennzeichnend für diese Art der Beanspruchung.

2. Beanspruchung an einem Zerkleinerungswerkzeug (Prallbeanspruchung):

Die Partikel werden entweder gegen eine feststehende oder sich in die re-

lative Gegenrichtung zu den Partikeln bewegend Prallfläche beschleunigt. Ein zusätzlicher Zerkleinerungseffekt resultiert aus dem potentiellen Stoß zwischen zwei Partikeln und dem damit einhergehenden Energieaustausch. Kennzeichnend für diese Art der Beanspruchung sind hohe Beanspruchungsgeschwindigkeiten, die bei den Stößen der Partikel mit der Wand bzw. zwischen den Partikeln untereinander für einen zum Zerkleinern der Partikel ausreichenden Energieaustausch bei der Impulsübertragung sorgen.

3. Beanspruchung durch das umgebende Medium:

Wechselnde Zug- und Druckbeanspruchungen auf die Partikel, die sich aus der Scherströmung bzw. den Stoßwellen (Druckstöße, Kavitation) des umgebenden Mediums ergeben, charakterisieren diese Art der Beanspruchung.

4. Beanspruchung durch nichtmechanische Energiezufuhr:

Die zur Zerkleinerung notwendigen hohen inneren Spannungen werden hierbei durch Verformungen erzeugt, die u.a. durch Ausnutzung der Wärmeausdehnung infolge der Zufuhr oder Induktion thermischer Energie (Strahlung, Mikrowelle, Konvektionsströmungen) hervorgerufen werden.

Wie schon erwähnt, gestaltet sich die Wahl und Auslegung von Zerkleinerungsmaschinen als schwierig und ist meist mit großem experimentellen Aufwand verbunden. Dies ist u.a. darauf zurückzuführen, daß die Materialfunktionen wie E-Modul, Fließgrenze und Festigkeit verschiedener Materialien nicht bekannt sind (Müller & Polke, 1999). Eine Möglichkeit zur Bestimmung des Zerkleinerungsverhaltens von Stoffen und damit die Bestimmung der Materialkenngrößen ist die Einzelkornzerkleinerung nach Schönert & Marktscheffel (1986).

Im folgenden wird dementsprechend die mechanische Beanspruchung von Einzelpartikeln, gefolgt von der Beanspruchung von Partikelkollektiven, beschrieben.

2.2.3 Mechanische Beanspruchung von Einzelpartikeln

Die mechanische Beanspruchung von Einzelpartikeln erfolgt in Universalprüfmaschinen. Dabei werden die Materialien beispielsweise bezüglich ihres Widerstandes bei Zug-, Druck-, Scher- und Schneidbeanspruchung untersucht. Für spröde Materialien (Rumpf, 1961) und metallische Werkstoffe (Domke, 1986) sind die zur Beschreibung der mechanischen Eigenschaften notwendigen Kriterien im Gegensatz zu organischen Materialien (Kang et al., 1995) gut standardisiert. Die Beanspruchungsarten, die zur Charakterisierung zäher

Materialien verwendet werden, werden im folgenden vorgestellt, und es wird ein Überblick über bereits durchgeführte Einzelkornbeanspruchungsuntersuchungen gegeben.

2.2.3.1 Beanspruchungsarten

Für die Beanspruchungsmechanismen bei zähen Materialien, die für eine mechanische Beanspruchung relevant sind, schlägt Schubert (1997) eine eigene Klassifizierung vor. Hier werden nur die drei Mechanismen beschrieben, die bei den Untersuchungen dieser Arbeit als Grundlage dienen:

1. Druckbeanspruchung:

Bei der uniaxialen Druckbeanspruchung werden mittels zweier paralleler Platten Kräfte auf die Probe übertragen, die im Inneren der Probe Zugspannungen hervorrufen, die zu einem Materialversagen führen.

2. Schneidbeanspruchung:

Bei der Schneidbeanspruchung erfolgt die Trennung der Probe entlang eines Messers, wobei an der Messerschneide durch die Druckkraft hohe lokale Zugspannungen erzeugt werden, die zur Probenteilung führen.

3. Scherbeanspruchung:

Bei der Scherbeanspruchung wirken in unmittelbarer Nähe der Scherebene zwei entgegengesetzt gerichtete Kräfte. Diese bewirken die notwendige Scherspannung, um die Probe in der Scherebene zu zerteilen.

2.2.3.2 Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften nicht-spröder Materialien

Im folgenden werden allgemeine Begriffe vorgestellt, die zur Beschreibung mechanischer Eigenschaften von Feststoffen dienen, wobei nur diejenigen Begriffe nach Domke, 1986; Mohsenin, 1986 und Weipert et al., 1993; erläutert werden, die für diese Arbeit relevant sind.

1. Elastizität:

Eigenschaft eines Materials, die gespeicherte Energie nach der Verformung wieder abzugeben und in seine Ursprungsform zurückzukehren (reversibel). Die Deformation ist auf eine Änderung des Molekülabstandes zurückzuführen, ohne daß Platzwechsel stattfinden.

2. Plastizität:

Eigenschaft eines Materials, eine von außen aufgeprägte Verformung zu behalten (irreversibel). Molekülplatzwechsel finden statt, die Verformungsenergie dissipiert meist in Form von Wärme.

3. Visko-Elastizität:

Überlagerung von viskosem und elastischem Materialverhalten (zeitabhängiges Materialverhalten).

4. Anisotropie:

Richtungsabhängigkeit der mechanischen Eigenschaften von organischen Materialien, resultierend aus dem Aufbau der Zellen bzw. Zellverbände oder der Richtung der Faserung.

2.2.3.3 Beanspruchung von organischen Einzelpartikeln

Im Gegensatz zum Bereich der Kunststofftechnik, in dem eine Vielzahl an Untersuchungen zur Beschreibung und Bestimmung der mechanischen Eigenschaften stattgefunden hat (Goncharuk et al., 1999; Bauer & Wüstenberg, 2001; Peuckert & Vogel, 2001), fanden im Bereich der organischen Materialien bisher nur wenige Untersuchungen zur Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften statt. Die Ergebnisse zu den Untersuchungen von Kunststoffen sind jedoch nicht auf organische Materialien übertragbar.

Für organische Materialien stellte beispielsweise Palmowski (2000) in ihren Studien fest, daß eine Abnahme der Festigkeit mit zunehmendem Wassergehalt einhergeht, wobei sie bei ihren Untersuchungen die Materialien lediglich befeuchtet und nicht getrocknet hat, um den Einfluß des Wassergehaltes auf die mechanischen Eigenschaften zu untersuchen. Eine definierte Einstellung eines bestimmten Wassergehaltes erfolgte nicht. Desweiteren stellte Palmowski fest, daß ein niedriger Wasser- und Fettgehalt ein sprödes Bruchverhalten implizieren. Desweiteren nimmt mit Zunahme des Fettgehaltes der Materialien deren Festigkeit ab. Schneider et al. (2001) haben in ihren Untersuchungen zum ultraschallunterstützten Schneiden von Lebensmitteln charakteristische Schneidkurven verschiedener organischer Materialien aufgenommen und zu verschiedenen, charakteristischen Gruppen zusammengefaßt. Dabei wurde der Schneidvorgang in verschiedene physikalische Phasen eingeteilt. Sie stellten weiterhin fest, daß der Verlauf der charakteristischen Schneidkurven (Kraft-Weg-Verläufe) durch den Einsatz der Ultraschallwellen kaum beeinträchtigt wird.

Weitere grundlagenorientierte Untersuchungen zu den mechanischen Eigenschaften organischer Stoffe fanden nicht statt. Lediglich in der Lebensmittel- und Landwirtschaftstechnik wurden solche Materialien empirisch untersucht, um produktspezifische Prozeßprobleme zu lösen. Beispielsweise wurden die mechanischen Eigenschaften von Halmgütern (Voß, 1969; Mohsenin, 1986) untersucht und uniaxiale Druckversuche durchgeführt, um Erntemaschinen zu optimieren (Fridley & Adrian, 1966). Scherer und Kutzbach (1978) untersuch-

ten das Festigkeitsverhalten von Maiskörnern, indem sie diese in einer Prüfmaschine auf Druck beanspruchten und Miyake et al. (1999), beziehungsweise Hatakeyama (1999), führten Zugversuche mit Cellulose durch. Bei diesen Untersuchungen wurde ebenfalls festgestellt, daß mit Zunahme des Wassergehaltes eine Abnahme der Festigkeit verbunden ist.

2.2.4 Beanspruchung von Partikelkollektiven in Zerkleinerungsmaschinen

Die Zerkleinerung ist eine Grundoperation der mechanischen Verfahrenstechnik. Die Zerkleinerung ist definiert als das Zerteilen von Partikelkollektiven oder Festkörpern bis zu einem definierten Zerkleinerungsgrad. Ohne Änderung des Aggregatzustandes ändern sich dabei die Schüttgutdichte und die spezifische Oberfläche; bei organischen Materialien wird zudem eine Freisetzung von Zellinhaltsstoffen bewirkt. Unter bestimmten Bedingungen kann eine Erhöhung der spezifischen Oberfläche bei gleichzeitiger Freisetzung bestimmter Zellinhaltsstoffe zur Agglomeration von Partikeln führen (beispielsweise bei fetthaltigen organischen Materialien oder gleichzeitiger Beanspruchung von feuchten und trockenen organischen Materialien als Gemisch). Deshalb werden im folgenden kurz die physikalischen Mechanismen bzw. Grundlagen der Agglomeration erläutert. Anschließend werden bislang schon gewonnene Erkenntnisse im Bereich der mechanischen Beanspruchung organischer Materialien als Partikelkollektive vorgestellt.

2.2.4.1 Agglomeration als Folge einer mechanischen Beanspruchung

Unter Agglomeration versteht man das Gegenteil der Zerkleinerung. Durch das Zusammenführen von Einzelpartikeln und durch die Wirkung von Haftkräften können Agglomerate entstehen (Bohnet et al., Grundlagen der Verfahrenstechnik, aus Dubbel, 1994). Das Verhalten disperser Systeme wird maßgeblich durch Haftkräfte der Einzelpartikel untereinander oder zu umgebenden Kontaktflächen bestimmt. Eine Agglomeration führt im unerwünschten Fall zu einer Verminderung der Homogenität. Demgegenüber kann durch den Einsatz von Aufbau- und Preßagglomeraten eine Verbesserung des Dosier-, Riesel- und Staubverhaltens erreicht werden. Bei den Haftmechanismen wird nach Rumpf (1962) zwischen stofflicher Übertragung fester oder flüssiger Brücken und der immateriellen Kraftübertragung aufgrund von Feldern oder sterischer Kompatibilität unterschieden. Feststoffbrücken übertragen große Kräfte und entstehen bei ausreichender Kontaktzeit bereits bei 60 % der absoluten Schmelztemperatur oder durch auskristallisierende Stoffe des verdampfenden Lösungsmittels (Stieß, 1994). Flüssigkeitsbrücken bilden sich aufgrund des

kapillaren Unterdruckes und der Oberflächenspannung niedrig viskoser Flüssigkeiten in Abhängigkeit von den stofflichen und geometrischen Einflußgrößen zwischen den Partikeln. Anziehungskräfte haben eine geringe räumliche Reichweite, sind jedoch bei trockenen Partikeln, die in engem Kontakt zueinander stehen, von großer Bedeutung. Die gegenseitigen Wechselwirkungen zwischen Partikeln beruhen auf van-der-Waals- und elektrostatischen Haftkräften. Formschlüssige Verbindungen schließlich führen zu einem Verhaken, Falten, Verknäulen usw. der Einzelpartikel mit faserigen und sehr flachen Partikelformen.

Die Festigkeit von Agglomeraten nimmt im allgemeinen mit abnehmender Partikelgröße zu (Rumpf, 1962).

2.2.4.2 Mechanische Beanspruchung von organischen Materialien

Im Gegensatz zu vielen anderen Bereichen, in denen beispielsweise Untersuchungen zum Zerkleinerungsprodukt und den Prozeßbedingungen auf die Mühlenauswahl (Müller & Polke, 1999), Zerkleinerungsmaschinen hinsichtlich ihrer Einsatzmöglichkeiten (Schicht, 2000) oder Feinzerkleinerungen in Rührwerkskugelmühlen bzgl. der Mühlenparameter (Shinohara et al., 1999) durchgeführt wurden, sind die Literaturangaben bzgl. der Zerkleinerung organischer Materialien recht spärlich. Die wichtigsten Erfahrungen auf diesem Gebiet wurden bisher in den Bereichen der Abfallwirtschaft, der Lebensmittelindustrie und der Landwirtschaft gesammelt. Dabei war zumeist die Hauptmotivation der Untersuchungen, vorliegende Probleme aus der Praxis zu lösen. In der Abfallwirtschaft finden überwiegend Grobzerkleinerungsverfahren Anwendung. Unterschiedliche Zerkleinerungsmaschinen wie Schneidmühlen, Rotorreißer und Walzenmühlen kommen hierbei zum Einsatz. Erkenntnisse des für die Grundlagenforschung interessanten Zerkleinerungsverhaltens dieser organischen Reststoffe werden dabei aber nicht beschrieben. Lediglich am Institut für Landmaschinen und Fluidtechnik e.V. der TU Braunschweig wurden Untersuchungen bezüglich der Zerkleinerung von Grünfutter, Zuckerrüben und sonstigen landwirtschaftlichen Gütern durchgeführt (siehe beispielsweise Ligocki, 2002).

In der Landwirtschaft dient die Zerkleinerung überwiegend als technisches Hilfsmittel zur Halmfuttermittelproduktion. Die Zerkleinerung des Halmgutes erfolgt hierbei auf Partikelgrößen von ca. 5 mm, wodurch eine Oberflächenvergrößerung und Veränderungen in den mechanischen Eigenschaften erzielt werden (Baader, 1970). Nach Wienecke (1972) werden somit die Handhabbarkeit, Lagerung und das Silieren verbessert. Weitere Grobzerkleinerungen im Bereich der Landwirtschaft erfolgten in Häckslern, die sich aufgrund des

Schneidens als Beanspruchungsmechanismus gegenüber der Prallbeanspruchung als vorteilhaft erwiesen (Bernhardt & Firus, 1997). Diese Häcksler wurden produktspezifisch bezüglich ihrer Zerkleinerungsleistung und Energieausbeute (Dernedde, 1970; Regge & Meinel, 1994) weiterentwickelt und kontinuierlich verbessert.

Zur Gewinnung von Ölen und Fetten pflanzlicher Natur, von Stärke zur Herstellung von Mehl und zum Entsaften von Obst und Gemüse wird die Zerkleinerung als verfahrenstechnischer Schritt in der Lebensmittelindustrie genutzt. Der Wassergehalt und die Festigkeit der Rohstoffe legen hierbei fest, welche Zerkleinerungsmaschinen zur Grobzerkleinerung ($> 5 \text{ mm}$) und einer sich anschließenden Feinstzerkleinerung ($< 5 \mu\text{m}$) zur Freisetzung der erwünschten Zellinhaltsstoffe zum Einsatz kommen (Pahl, 1993).

Zur Freisetzung der pflanzlichen Öle und Fette müssen vor dem eigentlichen Pressen der Samen von Sonnenblumen, Raps usw. die Fettzellen freigesetzt und die Öl-Eiweißbindungen aufgelockert werden. Dies geschieht bei der Gewinnung von pflanzlichen Ölen mittels Walzenstühlen, bei Kakaobutter beispielsweise mittels Prall-, Hammer- oder Rührwerkskugelmühlen. Anschließend erfolgt das Auspressen des Öles bzw. der Kakaobutter aus der Feststoffmatrix (Schliephake et al., 1995; Tscheuschner, 1996).

Bei der Gewinnung von Stärke aus beispielsweise Gerste oder Kartoffeln muß zunächst ebenfalls die Zellstruktur gelockert werden, um die im Zellinneren eingelagerten Stärkekörner aus der Matrix lösen zu können. Für die Grobzerkleinerung kommen hierbei Schneid- bzw. Walzenmühlen, für die Feinstzerkleinerung Hochdruckhomogenisatoren zum Einsatz (Meuser et al., 1986).

Vor der Entsaftung von Früchten zur Herstellung von Obst- und Gemüsesäften, bei der die in den Zellen gelagerte Flüssigkeit aus der Feststoffmatrix gepreßt wird, müssen die Wände der flüssigkeitsbeinhaltenden Zellen durch eine Zerkleinerung zerstört werden. In Abhängigkeit der mechanischen Eigenschaften der jeweiligen Frucht kommen hierbei Walzen- und Schneidmühlen bzw. Hammer- und Stiftmühlen zum Einsatz (Palmowski, 2000). Die Saftausbeute bei der darauffolgenden Pressung der vorzerkleinerten Früchte ist hierbei dem Prozentsatz der durch die Zerkleinerung aufgeschlossenen Zellen direkt proportional (Körmendy, 1965).

Die Kaltzerkleinerung findet bei weichen Materialien ihre Anwendung, da bei diesen Materialien infolge von Agglomeration (siehe auch Kapitel 2.2.4.1) und Schmierer Mahlräume und Öffnungen von Zerkleinerungsmaschinen verstopfen können (Wolf & Pahl, 1990). Durch die Verwendung der Kältetechnik (Tiefrieren) verspröden die weichen Materialien, wodurch eine mechanische Zerkleinerung mittels Schneid- und Prallbeanspruchung erleichtert wird. Das

Aufbrechen der während des Friervorganges entstandenen Eiskristalle setzt weitere Scherkräfte während der mechanischen Beanspruchung frei (Heinrichs et al., 1991; Schubert, 1997).

Durch die hier dargestellten Beispiele wird klar, daß eine Grundlagenforschung zum Zerkleinerungsverhalten und bezüglich der mechanischen Eigenschaften organischer Materialien noch nicht umfassend stattgefunden hat. Der Kenntnisstand ist sehr produktspezifisch. Eine grundlagenorientierte Erforschung des Zerkleinerungsverhaltens und der mechanischen Eigenschaften könnte die Zusammenhänge zwischen den Materialeigenschaften, den Materialzusammensetzungen und den Beanspruchungsarten näher charakterisieren und somit Ansätze zur Optimierung von Zerkleinerungsmaschinen liefern. Eine solche grundlagenorientierte Untersuchung wurde beispielsweise von Müller (1996) im Bereich der Klärschlamm-Desintegration begonnen und von Lehne (2001) weitergeführt. Palmowski (2000) hat begonnen, diese Zusammenhänge für organische Materialien zu untersuchen.

2.3 Anaerober Abbau

Ein wichtiges Beurteilungskriterium der mechanischen Beanspruchung organischer Materialien ist der anaerobe Abbau als verfahrenstechnischer Schritt im Anschluß an eine mechanische Beanspruchung biologischer Systeme. So konnten beispielsweise Müller (1996) und Lehne (2001) bei ihren Untersuchungen zur Klärschlamm-Desintegration feststellen, daß durch einen mechanischen Zellaufschluß des Klärschlammes der anaerobe Abbau beschleunigt und gesteigert wird. Es handelt sich hierbei um den durch Mikroorganismen gesteuerten Abbau organischer Stoffe zu Faulgas unter Ausschluß von Sauerstoff. Faulgas besteht aus den beiden Hauptkomponenten Methan und Kohlendioxid. Methan kann in exothermen thermischen Prozessen wiederum zu Kohlendioxid und Wasser umgesetzt werden. Die dabei freiwerdende Energie kann anschließend beispielsweise zur Gewinnung von elektrischem Strom eingesetzt werden. Die geschichtliche Entwicklung des anaeroben Prozesses ist ausführlich in Mundhenke (2002) dargestellt. Es sei hier lediglich erwähnt, daß die Kapazitäten der Vergärungsanlagen weltweit in nur 3 Jahren von 30.000 t/a (1993) auf 350.000 t/a (1996) zugenommen haben (Wiemer et al., 1996), was die zunehmende Bedeutung dieses Prozesses verdeutlicht.

2.3.1 Grundlagen des mikrobiellen Abbaus organischer Materialien

Organische Stoffe, die überwiegend aus den drei Makromolekülen Proteine, Fette und Kohlenhydrate bestehen (Christ, 1999), können mikrobiell sowohl mit Sauerstoff (aerob) als auch ohne Sauerstoff (anaerob) umgesetzt werden.

Die Zusammensetzung gemäß der o.a. Makromoleküle beeinflusst die Zusammensetzung des entstehenden Gases. Die biologischen Abbauprozesse sind häufig sehr komplex und eine Vielzahl an Mikroorganismen ist bei der mehrstufigen Umsetzung beteiligt (Fritsche, 1998). Beim aeroben Abbauprozess dient immer der Sauerstoff in molekularer Form als terminaler Wasserstoffakzeptor, und somit sind hauptsächlich Wasser und Kohlendioxid die Endprodukte dieser mikrobiellen Umsetzung. Dabei werden die verschiedenen Stufen der komplexen Umsetzung meist parallel von einer Mikroorganismenart durchgeführt.

Im Gegensatz dazu sind am anaeroben Abbauprozess von organischen Materialien viele, verschiedene Mikroorganismenarten beteiligt, deren Lebensoptima voneinander abweichen. Die terminalen Wasserstoffakzeptoren sind Sulfat, Nitrat und Kohlendioxid.

Der Vorteil des anaeroben Stoffabbaus, verglichen mit dem aeroben Abbau organischer Materialien, besteht zum einen in der geringeren Menge an zu entsorgendem Schlamm (Sahm, 1981) und zum anderen in der Möglichkeit der weiteren Verwertung des Methans als preiswerter Energieträger (Matsumoto & Noike, 1991), wenngleich der Energiegewinn für die Mikroorganismen beim aeroben Abbauprozess höher ist (Mundhenke, 2002). Für den Abbau von feuchten organischen Materialien ist aber die anaerobe Prozessführung besser geeignet (Hubert, 1988). Der anaerobe Abbau erfolgt, schematisch gesehen, in vier Stufen.

2.3.2 Die 4 Stufen des anaeroben Abbaus

Nach Böhnke et al. (1993) kann der anaerobe Abbau schematisch in einem Vier-Stufen-Modell nach Abbildung 2.6 in die Abschnitte Hydrolyse, Acidogenese, Acetogenese und Methanogenese unterteilt werden. In der ersten Stufe, der Hydrolyse, werden die makromolekularen Verbindungen Fette, Kohlenhydrate und Proteine mit Hilfe von mikrobiellen Exoenzymen zu niedermolekularen Verbindungen wie Glycerin, Fettsäuren, Aminosäuren und Mono- und Disaccharide von fakultativen Anaerobiern hydrolysiert. Diese niedermolekularen Verbindungen werden in der zweiten Stufe, der acidogenen Phase, durch anaerobe Bakterien weiter zu kurzkettigen Alkoholen und kurzkettigen organischen Säuren sowie Wasserstoff und Kohlendioxid abgebaut. In der dritten Stufe, der acetogenen Phase, werden diese kurzkettigen Alkohole und kurzkettigen Säuren durch reduktive bzw. durch dehydrierende Essigsäurebildung zu Acetat umgesetzt. Diese Umsetzung ist endergon und kann nur durch Kopplung mit einer exergonen Reaktion, die in der 4. Stufe stattfindet, ablaufen (Interspecies hydrogen transfer, Schlegel, 1992). Die in der zweiten und

dritten Stufe entstandenen Substrate Acetat, Kohlendioxid und Wasserstoff werden in der vierten Stufe, der Methanogenese, zu den Endprodukten Methan und Kohlendioxid umgewandelt.

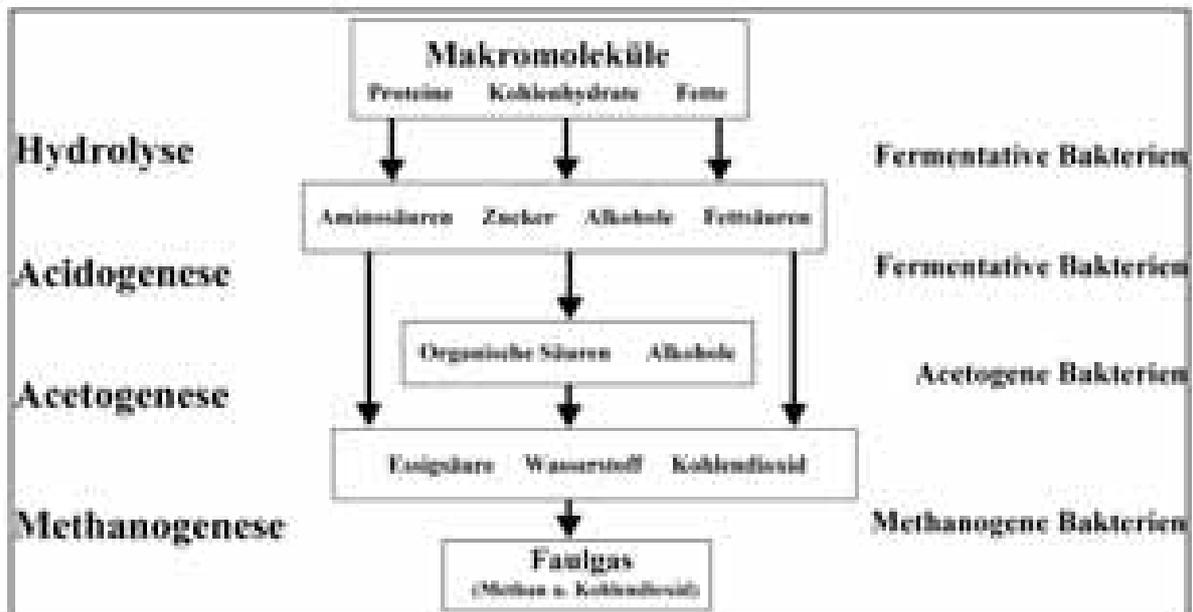


Abb. 2.6: Schematische Darstellung des vierstufigen anaeroben Abbaus.

Der geschwindigkeitslimitierende Schritt dieser aufeinander aufbauenden Stufen des anaeroben Abbaus ist substratabhängig. Für Substrate, die in gelöster Form vorliegen, ist die vierte Stufe, die Methanogenese, die geschwindigkeitslimitierende Stufe; bei Feststoffen die erste Stufe, die Hydrolyse (Seyfried, 1994).

Im Vergleich zu den an den ersten drei Stufen beteiligten Mikroorganismen reagieren die methanogenen Mikroorganismen der vierten Stufe sehr empfindlich auf Schwankungen bei der Prozeßführung (Temperatur, pH-Wert). Deshalb müssen die Prozeßbedingungen des anaeroben Abbaus hinsichtlich dieser Mikroorganismen optimal ausgelegt werden.

2.3.3 Einfluß einer mechanischen Beanspruchung auf den anaeroben Abbau

Pflanzliche organische Materialien liegen – hinsichtlich dieser Arbeit - in Form von Feststoffen vor. Eine mechanische Beanspruchung eines organischen Partikelkollektives führt zu kleineren Medianwerten der massenbezogenen Summenverteilungsfunktion, zu größeren spezifischen Oberflächen und zu einer Auflockerung der Substratstruktur, wodurch die mikrobielle Angriffsfläche vergrößert wird (Mundhenke et al., 2001). Dies führt zu einer Verlagerung des geschwindigkeitsbestimmenden Schrittes im Gesamtprozeß des anaeroben Abbaus, da durch die mechanische Beanspruchung die hydrolytischen Reaktionen begünstigt werden und entsprechend die vierte Stufe, die Methanoge-

nese, geschwindigkeitslimitierender Schritt wird. Es wird demnach die anaerobe Bioverfügbarkeit von organischen Stoffen beeinflusst, wenn die mechanische Beanspruchung deren mikrobielle Hydrolyse unterstützt. Mundhenke (2002) konnte zeigen, daß die mechanische Beanspruchung von pflanzlichen organischen Materialien zu einer Beschleunigung des anaeroben Abbaus aller von ihr untersuchten Stoffe führte. Sie variierte dabei die Beladungsrate im Bereich von 0,3 [g/g] bis 2,8 [g/g]. Die anaerobe Bioverfügbarkeit wurde für schwerabbaubare Stoffe wie beispielsweise Heu, Mandeln, Spinat und Avocados durch eine mechanische Beanspruchung als Verfahrensschritt vor dem anaeroben Abbau bis zu Beladungsraten von 1,4 [g/g] erhöht. Die anaerobe Bioverfügbarkeit für leicht abbaubare pflanzliche organische Stoffe wie beispielsweise Reis, Äpfel und Möhren konnte nur für Beladungsraten bis 0,7 [g/g] erhöht werden.

Alternativen zu einer mechanischen Beanspruchung als Vorbehandlung organischer Materialien zur Erhöhung der anaeroben Bioverfügbarkeit werden in physikalisch-thermische, chemische und biologische Verfahren unterschieden. Bei den physikalisch-thermischen Verfahren findet meist eine thermische Substrathydrolyse bei Temperaturen zwischen 160 °C und 200 °C statt (Schieder et al., 1999). Säuren- bzw. Laugenzugabe erhöhen die Bioverfügbarkeit bei chemischen Methoden (Mundhenke, 2002; Parisi, 1989; Penaud et al., 1999), und als biologische Methode ist beispielhaft die Kompostierung zu nennen (Capela et al., 1999). Diese Methoden haben im allgemeinen eine hohe Effizienz sind jedoch im allgemeinen sehr kostenintensiv. Bei den chemischen Vorbehandlungsmethoden kommen noch die Probleme mit den für Mensch und Umwelt toxischen Chemikalien hinzu. Somit existiert mit der mechanischen Beanspruchung als Vorbehandlungsmethode eine kostengünstige Alternative, die aber noch weiterer Untersuchungen bzgl. ihrer Wirkungen bedarf (Mata-Alvarez et al., 2000).

3 Versuchsprogramm, Versuchsaapparaturen, Methoden und Materialien

3.1 Versuchsprogramm

In diesem Kapitel werden die Ziele dieser Arbeit und das entsprechende Versuchsprogramm dargestellt. Eingrenzungen des Versuchsprogrammes werden an entsprechender Stelle vorgenommen.

3.1.1 Zielsetzungen

Ziele dieser Arbeit sind zum einen Untersuchungen zur Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften pflanzlicher organischer Materialien und zum anderen die Charakterisierung des Zerkleinerungsverhaltens dieser Materialien und des Einflusses der mechanischen Beanspruchung auf die anaerobe Bioverfügbarkeit. Aus diesen Ergebnissen sollen Zusammenhänge zwischen den mechanischen Eigenschaften und dem Verhalten von Partikelkollektiven pflanzlicher organischer Materialien bei mechanischer Beanspruchung erfaßt und dargestellt werden. Die Durchführung der Versuche erfolgt nach folgenden Gesichtspunkten:

- ↓ Mechanische Eigenschaften pflanzlicher organischer Materialien unter besonderer Berücksichtigung und Variation des Wassergehaltes der Materialien
- ↓ Mechanische Beanspruchung organischer Einzelsubstrate in einer Schneidmühle
- ↓ Mechanische Beanspruchung organischer Zweistoffgemische in einer Schneidmühle
- ↓ Anaerobes Abbauverhalten von mechanisch beanspruchten organischen Zweistoffgemischen mit verschiedenen Partikelgrößen.

3.1.2 Versuchsprogramm

Die Untersuchungen dieser Arbeit beschränken sich auf organische Materialien pflanzlicher Herkunft. Die Auswahl dieser Materialien erfolgte in der Art, daß ein weites Spektrum der in der Natur vorkommenden Materialeigenschaften und –zusammensetzungen abgedeckt werden konnte. Demnach unterscheiden sich die ausgewählten Materialien besonders hinsichtlich ihres Wasser-, Fett- und Fasergehaltes. Die Zusammenstellung der untersuchten Zweistoffgemische erfolgte unter Berücksichtigung der in der Praxis vorkommenden Zusammensetzungen, wobei die durchschnittliche Zusammensetzung

von kommunalem Biomüll als Bezugspunkt (Fischer, 2001) gewählt wurde. Die Auswahl beschränkte sich dabei auf 7 Zweistoffgemische, die die o.a. Voraussetzungen erfüllen. Von der Möglichkeit der Bildung von Mehrstoffgemischen wurde abgesehen.

Zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften der Materialien wurden uniaxiale Druck-, Schneid- und Scherversuche an Einzelproben in einer Universalprüfmaschine durchgeführt. Die Einstellung des gewünschten Wassergehaltes erfolgte mittels eines Trocknungsgerätes. Die Charakterisierung dieser Versuche erfolgte mittels folgender Kenngrößen: Maximale Druckfestigkeit ($\omega_{\text{Druck,max}}$), maximale Scherfestigkeit ($\omega_{\text{Scher,max}}$), maximale längenbezogene Schneidkraft ($F_{\text{Lschneid,max}}$), zu den maximalen Festigkeitswerten korrespondierende Dehnungen (κ), spezifische Energie zum Erreichen der jeweiligen maximalen Festigkeitswerte ($E_{\text{Spez,max}}$), spezifische Energie bis Versuchsende ($E_{\text{Spez,Ges}}$). Desweiteren wurden die Versuche mit einer CCD-Kamera optisch verfolgt und auf einem Rechner elektronisch gespeichert.

Die mechanische Beanspruchung von Partikelkollektiven der Materialien als Einzelsubstrate und Zweistoffgemische erfolgte ausschließlich in einer Schneidmühle unter Variation der Rotorumfangsgeschwindigkeit und der Beanspruchungszeit. Die Masse des Aufgabegutes für die jeweiligen Materialien wurde nicht variiert. Der Erfolg der mechanischen Beanspruchung wurde mit den folgenden Parametern charakterisiert: dem Medianwert der massenbezogenen Summenverteilungsfunktion ($x_{50,3}$), der massenbezogenen spezifischen Oberfläche, berechnet aus der Partikelgrößenverteilung ($S_{m,PGV}$), der Oberfläche gemäß dem BET-Verfahren ($S_{m,BET}$), der Freisetzung an Organik (F_{CSB}), der spezifischen Zerkleinerungsenergie (E_{Spez}), mit mikroskopischen Aufnahmen der mechanisch beanspruchten Partikelkollektive sowie der optischen Verfolgung der mechanischen Beanspruchung in der Schneidmühle.

Der Einfluß der mechanischen Beanspruchung auf den anaeroben Abbau organischer Stoffgemische wurde analog zu Mundhenke (2002) untersucht, wobei in der vorliegenden Arbeit nur die Faulgasausbeute ($V_{g,oTM}$), der Substratabbaugrad (ξ_G) und die Beladungsrate (BL) als Charakterisierungsparameter verwendet wurden.

3.2 Versuchsapparaturen

3.2.1 Universalprüfmaschine zur Durchführung von Einzelbeanspruchungen

3.2.1.1 Beschreibung der Universalprüfmaschine

Die Einzelbeanspruchungsversuche zur Ermittlung der mechanischen Eigenschaften der untersuchten Materialien erfolgten in einer Universalprüfmaschine, Modell Z010/TND der Firma Zwick, deren schematischer Aufbau in Abbildung 3.1 dargestellt ist.

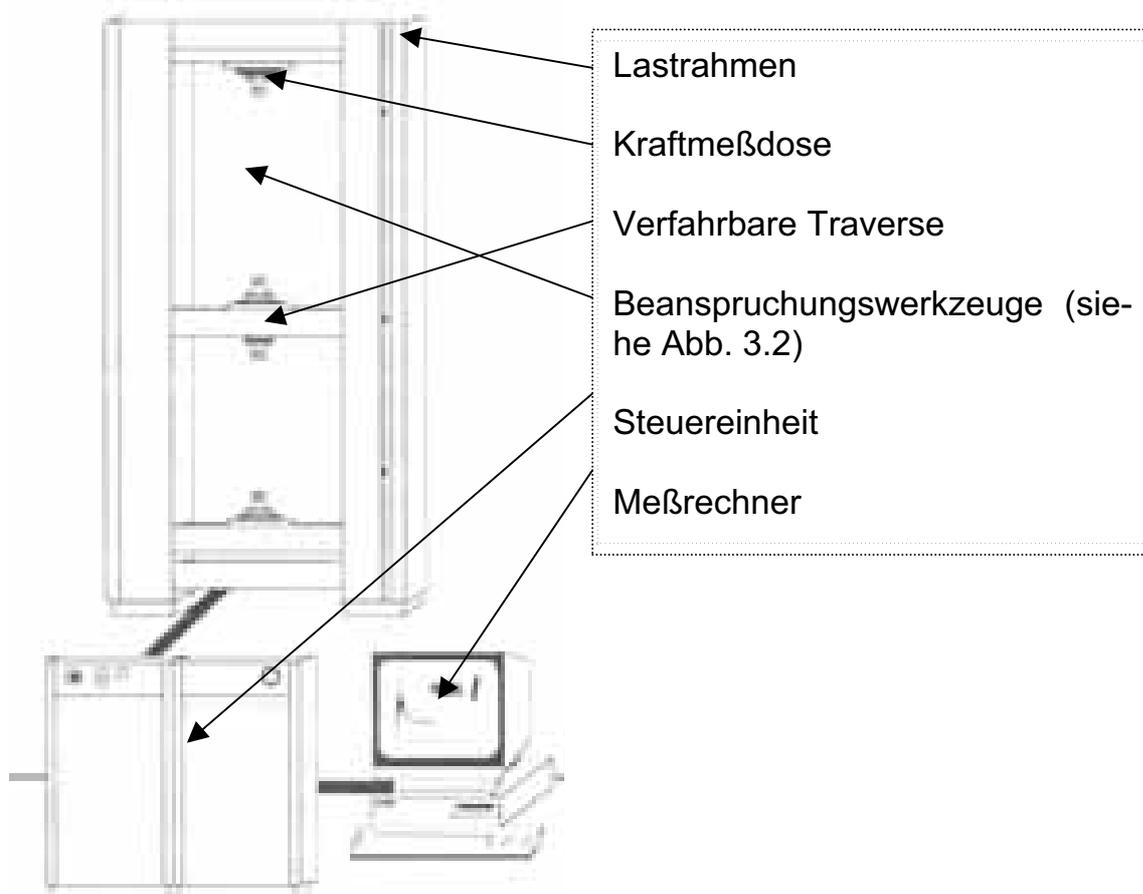


Abb. 3.1: Schematische Darstellung der Hauptkomponenten der verwendeten Universalprüfmaschine, Modell Z010/TND der Firma Zwick (Fa. Zwick, 2001).

Die Maschine besteht aus einem Lastrahmen mit einer festen oberen und unteren Traverse und einer sich zwischen den festen Traversen befindlichen, horizontal verfahrbaren Traverse, die mit einem elektrischen Motor durch zwei Kugelgewindespindeln vertikal geführt wird. Mittels eines angeschlossenen Meßrechners erfolgt die Steuerung des Antriebs und die Registrierung der Kraft-Weg-Verläufe online während der Versuchsdurchführung. Die Messung der zur jeweiligen Beanspruchung korrespondierenden Kraft erfolgt mittels einer Kraftmeßdose (Krafterfassung mittels Dehnungsmeßstreifen) im Bereich

von 0 N bis 1000 N bei einer Meßgenauigkeit von 1 N bei der maximal meßbaren Kraft. Die Beanspruchungsgeschwindigkeit kann im Bereich von 0,001 mm/min bis 1800 mm/min variiert werden. Bei allen Versuchen wurde eine Beanspruchungsgeschwindigkeit von 5 mm/min gewählt.

3.2.1.2 Durchgeführte Beanspruchungen

Sämtliche Materialien, außer Heu, das sich nicht zur Durchführung von Einzelbeanspruchungen in der o.a. Maschine eignet, wurden bezüglich ihres Druck-, Schneid- und Scherwiderstandes untersucht (vergleiche Abb. 3.2).

3.2.1.2.1 Uniaxiale Druckbeanspruchung

Bei der uniaxialen Druckbeanspruchung werden die Proben zwischen zwei kreiszylindrischen Stempeln ($d = 35 \text{ mm}$) beansprucht, wobei der untere Stempel mit der eingestellten Geschwindigkeit gegen den oberen Stempel verfahren wird.

3.2.1.2.2 Schneidbeanspruchung

Bei der Schneidbeanspruchung entspricht der experimentelle Aufbau dem der unter Kap. 3.2.1.2.1 beschriebenen Druckbeanspruchung, außer daß der obere Stempel durch ein handelsübliches Cuttermesser ersetzt wird. Das Cuttermesser wird senkrecht zur Beanspruchungsrichtung angebracht. Die zu beanspruchende Probe befindet sich auf dem unteren Stempel in ihrer mechanisch stabilen Lage und wird mit der eingestellten Geschwindigkeit gegen das Cuttermesser verfahren. Der Austausch des Cuttermessers erfolgte in regelmäßigen Abständen (nach 20 Schneidbeanspruchungen; außerdem für jedes Material ein eigenes Cuttermesser), so daß Abstumpfungerscheinungen an der Klinge nicht berücksichtigt werden mußten.

3.2.1.2.3 Scherbeanspruchung

Die Proben werden bei dieser Beanspruchungsart in verschiedenen, am unteren Beanspruchungswerkzeug vorgesehenen Aussparungen in der Form platziert, daß sie genau zur Hälfte aus dieser Aussparung herausragen. Die Scherung erfolgt durch eine am oberen Werkzeug angebrachte Scherkante, wobei versucht wird, den Scherspalt so klein wie möglich zu halten, um die Scherzone minimal zu gestalten (Palmowski, 2000).

Abbildung 3.2 zeigt zur Verdeutlichung den Aufbau der verschiedenen Beanspruchungswerkzeuge.



Abb. 3.2: Darstellung der Werkzeuge für die Durchführung der Einzelbeanspruchungen mit der Universalprüfmaschine. Druck-, Schneid- und Scherbeanspruchung (von links nach rechts).

3.2.2 Schneidmühle zur Durchführung der mechanischen Beanspruchung von Partikelkollektiven

Die mechanische Beanspruchung der organischen Materialien wurde mit einer Schneidmühle (Fa. Retsch, Typ SM2000) durchgeführt. Laut Herstellerangaben (Fa. Retsch, 2000) eignet sich diese Mühle zur Zerkleinerung zäher, mittelharter, weicher, elastischer und fasriger Materialien, wie beispielsweise Kunststoffe, Abfallproben und organische Materialien.

3.2.2.1 Beschreibung der Schneidmühle SM2000

Der Querschnitt des Einfüllschachtes beträgt $60 \times 80 \text{ mm}^2$. Demzufolge mußten die Materialien per Hand vorzerkleinert werden. Dies war jedoch nicht von Nachteil, da die Einzelpartikel der zu zerkleinernden Partikelkollektive die gleichen geometrischen Abmessungen haben sollten wie die in der Universalprüfmaschine beanspruchten Materialproben. Die geometrischen Abmessungen und die jeweilige Aufgabemenge der untersuchten Materialien sind in Kap. 3.2.2.3, Tabelle 3.1 aufgeführt. Die zu zerkleinernden Proben werden durch einen selbstgebauten Trichter in den Einfüllschacht gegeben. Von dort gelangen sie in den Mahlraum ($V = 0,75 \text{ l}$), in dem sie zwischen einem Rotor ($d = 126 \text{ mm}$) und vier feststehenden Messern mechanisch beansprucht werden. Der Mechanismus der Beanspruchung wird im folgenden Kapitel erläutert.

Da die Umfangsgeschwindigkeit des Rotors der Schneidmühle, wie vom Hersteller angefertigt, nicht variiert werden konnte, erfolgte die Regelung der Umfangsgeschwindigkeit durch Variation der Netzspannung unter Anwendung eines Frequenzumrichters (Fa. Lenze, Typ Global Drive Reihe 8200). Die

elektrische Leistung der Schneidmühle wurde über ein Meßgerät (Fa. Unipower, Typ PWM 325) mit angeschlossenem Schreiber bei den Beanspruchungen über der Zeit aufgezeichnet. Mit Hilfe dieser Meßschriebe konnte anschließend die spezifische Arbeit (vergleiche Kap. 3.3.3.1) bestimmt werden. Die Mahlräumtür der Schneidmühle wurde gemäß Abbildung 3.3 modifiziert. Dadurch konnte der Beanspruchungsvorgang beobachtet und mit einer Hochgeschwindigkeits-CCD-Kamera (Fa. Kodak, Typ Motioncorder Analyzer) optisch verfolgt werden. Eine genauere Beurteilung des Beanspruchungsvorganges und die Ermittlung der tatsächlichen Rotorumfangsgeschwindigkeit wurden somit möglich.

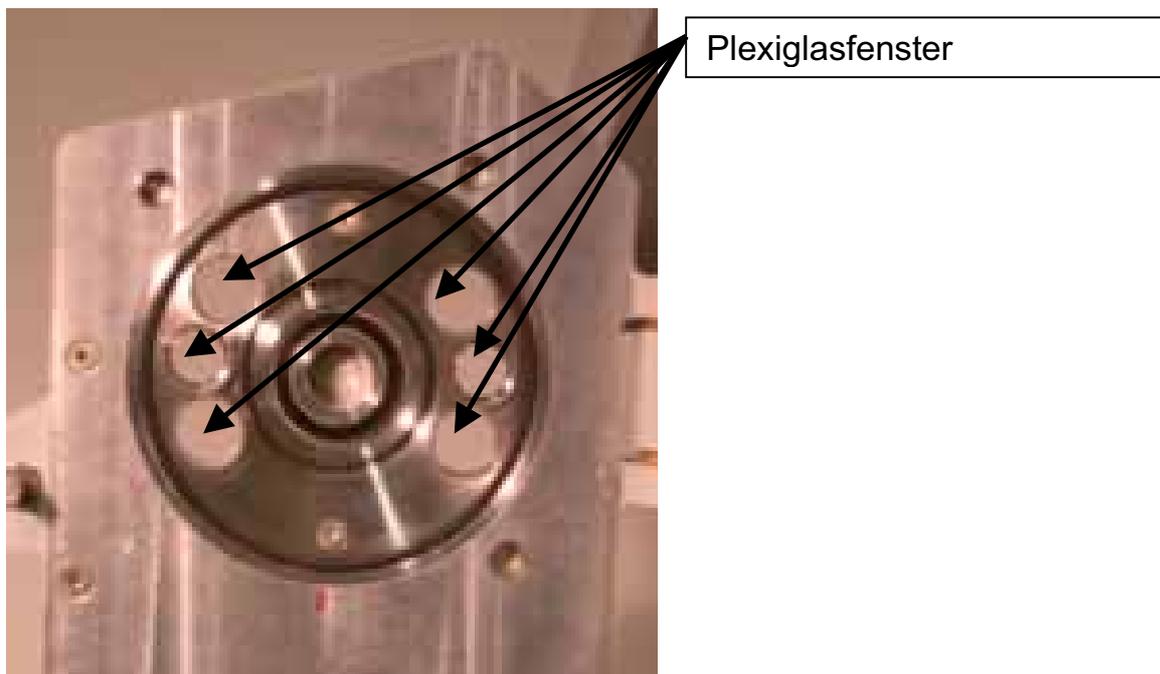


Abb. 3.3: Ansicht der modifizierten Mahlräumtür zur optischen Verfolgung der mechanischen Beanspruchungen in der Schneidmühle.

3.2.2.2 Mahlraum der Schneidmühle SM2000

In der vorliegenden Arbeit wurde ausschließlich ein Schneidscheibenrotor verwendet. Auf diesem Rotor sind drei Messereinheiten gleichmäßig auf dem Rotorumfang verteilt, wobei eine Messereinheit aus sechs Einzelmessern besteht, die achsparallel gegeneinander angeordnet sind, so daß man von einer gleichmäßigen Beanspruchung der Proben ausgehen kann. Die eigentliche Beanspruchung zwischen den vier Festmessern und dem Rotor ist eine Kombination aus Druck-, Schneid- und Scherbeanspruchung. Eine nähere Kenntnis über die Verteilung dieser Beanspruchungsarten existiert nicht.

Abbildung 3.4 zeigt den Mahlraum der Schneidmühle SM2000.

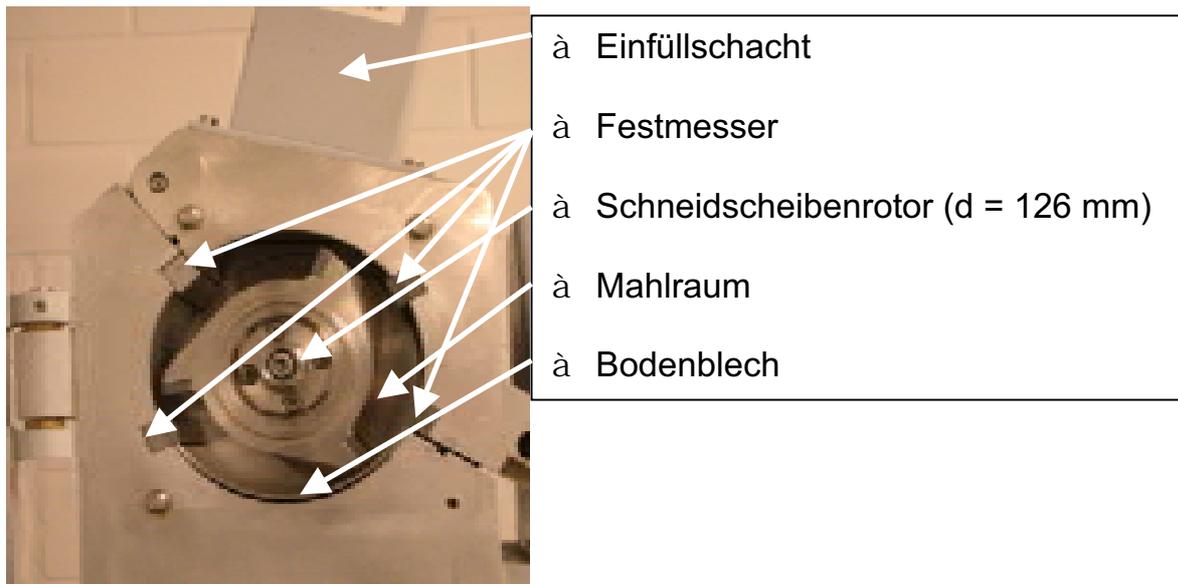


Abb. 3.4: Mahlraum der Schneidmühle SM2000 (Fa. Retsch). Die Mahlraumtiefe beträgt 200 mm.

Im Gegensatz zum industriellen Einsatz dieses Mühlentypes wird der Mahlraum nach unten hin nicht durch Bodensiebe einer bestimmten Maschenweite abgeschlossen, sondern durch ein selbstkonstruiertes Bodenblech vollkommen abgeschlossen, so daß das Aufgabegut komplett bis zum Ende der mechanischen Beanspruchung im Mahlraum verbleibt (batchweise Versuchsführung) [Baaden et al., 2002] und nach Öffnen der Mahlraumtür aus dem Mahlraum entnommen wird.

3.2.2.3 Parameter bei der mechanischen Beanspruchung von Partikelkollektiven

Die Masse des Aufgabegutes wurde gemäß Tabelle 3.1 pro Einzelsubstrat bzw. Gemisch konstant gehalten.

Tabelle 3.1: Substratspezifische Aufgabemassen in [g] für die Einzelsubstrate und Zweistoffgemische.

Einzelsubstrate	Äpfel	Möhren	Avocados	Kartoffeln	Heu	Reis	Linsen	Sonnenblumenkerne	Mandeln
Aufgabemasse [g]	300	300	300	300	30	30	30	40	30
Gemische	Möhren & Avocados	Heu & Sonnenblumenkerne	Heu & Linsen	Möhren & Äpfel	Äpfel & Sonnenblumenkerne	Linsen & Sonnenblumenkerne	Avocados & Mandeln		
Aufgabemasse [g]	150/150	30/30	30/30	150/150	40/40	40/40	40/40		

Bei der mechanischen Beanspruchung von Partikelkollektiven wurden folgende Parameter variiert:

1. Rotorumfangsgeschwindigkeit: Die Rotorumfangsgeschwindigkeit wurde im Bereich von 1,8 m/s bis 8,6 m/s variiert. Dabei wurden sämtliche Einzelsubstrate und Gemische bei den Umfangsgeschwindigkeiten 1,8 m/s, 4,6 m/s und 8,6 m/s beansprucht.
2. Beanspruchungszeit: Die Beanspruchungszeit wurde im Bereich von 30 s bis 300 s variiert. Dabei wurden sämtliche Einzelsubstrate und Gemische für 30 s, 60 s, 120 s und 300 s beansprucht.

3.2.3 Anaerobanlage

3.2.3.1 Beschreibung der Anaerobanlage

Die anaeroben Abbauprobversuche wurden in einer Versuchsanlage durchgeführt, die aus 54 identischen Versuchseinheiten bestand. Eine Versuchseinheit setzte sich dabei aus einem Reaktor (0,5 l Glasflasche, Fa. Schott) und einer Gassäule zusammen. Der schematische Aufbau dieser Versuchseinrichtung ist in Abbildung 3.5 dargestellt.

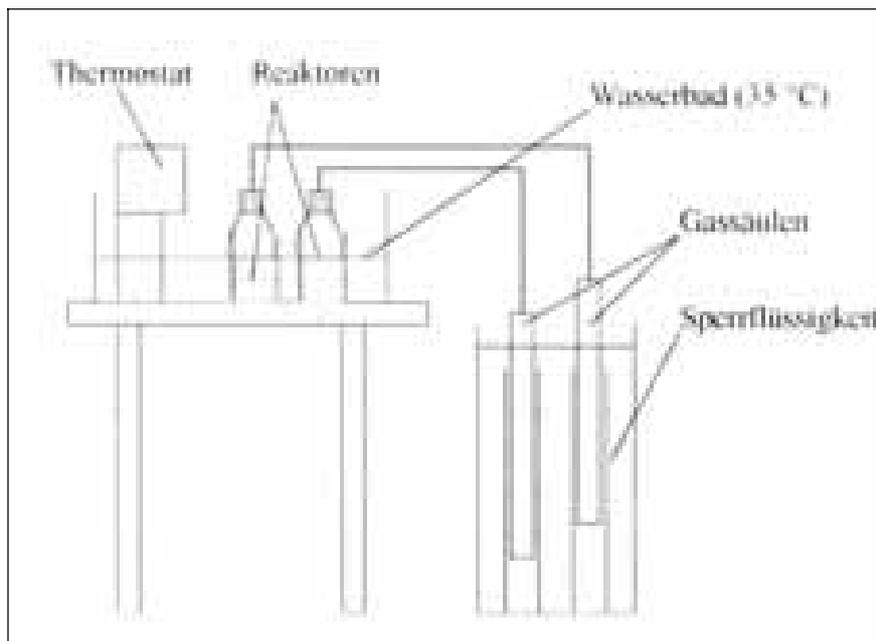


Abb. 3.5: Schematische Darstellung der Anaerobanlage für die diskontinuierlichen Abbauprobversuche.

Jeder Reaktor wurde mit 300 ml Faulschlamm der kommunalen Kläranlage Hildesheim befüllt und in einem Wasserbad auf 35 °C temperiert.

3.2.3.2 Durchführung der diskontinuierlichen Abbauprobversuche

Die Versuchsdurchführung erfolgte analog zu Mundhenke (2002). Jedem Reaktor wurde eine definierte Masse an zerkleinertem bzw. unzerkleinertem

Substrat zugeführt. Die Versuchsdauer betrug jeweils 21 Tage. Das Volumen an gebildetem Faulgas wurde über den gesamten Versuchszeitraum gemessen und auf Normalbedingungen umgerechnet ($T_n = 0 \text{ °C}$; $p_n = 101325 \text{ Pa}$).

3.3 Methoden

Im folgenden werden zunächst die allgemeinen analytischen Bestimmungsmethoden für die Meßgrößen dargestellt, die für die Charakterisierung der untersuchten organischen Materialien in dieser Arbeit verwendet werden. Im Anschluß werden die Beurteilungskriterien für die Untersuchungen mit der Universalprüfmaschine und für die mechanischen Beanspruchungen mit der Schneidmühle beschrieben.

3.3.1 Analytische Bestimmungsmethoden

3.3.1.1 Trockenrückstand (TR), organischer Trockenrückstand (oTR) und Glühverlust (GV)

Der Trockenrückstand organischer Materialien wird zum einen zur Charakterisierung der untersuchten Materialien verwendet und zum anderen für die Berechnung der spezifischen Energien sowohl bei den Untersuchungen der mechanischen Eigenschaften als auch bei den mechanischen Beanspruchungen in der Schneidmühle benötigt. Die Messung wurde nach DIN 38141 S2 in drei parallelen Ansätzen durchgeführt. Dabei wurden die Proben in wasserfreien Porzellantiegeln mit Hilfe einer Analysewaage (Fa. Sartorius) eingewogen und 48 Stunden in einem Trockenschrank (Fa. Heraeus) bei einer Temperatur von 105 °C getrocknet. Nach einer anschließenden Abkühlung für mindestens 30 Minuten im Exsikkator wurden die getrockneten Proben erneut gewogen, und der Trockenrückstand wird nach der folgenden Gleichung 3.1 berechnet.

$$TR = \frac{m_{\text{Tiegel2getrockneteProbe}} - 4 m_{\text{Tiegel}}}{m_{\text{Tiegel2Probe}} - 4 m_{\text{Tiegel}}} \cdot 11000 \quad [\text{g/kg}] \quad \text{Glg. 3.1}$$

Der organische Trockenrückstand ist ein Summenparameter für den Gehalt an organischen Bestandteilen einer Probe, die für den anaeroben Abbau zur Verfügung stehen. Er ist somit zum einen zur Beschreibung des anaeroben Abbaus von Bedeutung, und zum anderen wird er zur Berechnung des maximalen theoretischen CSB (vergleiche Kap. 3.3.1.2.2.) benötigt. Die Bestimmung erfolgte gemäß DIN 38414 S3 in drei parallelen Ansätzen. Die getrockneten Proben der TR-Bestimmung wurden für 2 Stunden in einem Glühofen (Fa. Carbolite, Typ CWF 1100) bei einer Temperatur von 550 °C geglüht. Substrate mit einem hohen Organikanteil wurden vorher mit einem Gasbrenner

langsam auf diese Temperatur vorgeglüht, um ein Entflammen im Glühofen zu vermeiden. Nach erneutem Abkühlen im Exsikkator wurden die Tiegel gewogen und der organische Trockenrückstand gemäß folgender Gleichung 3.2. berechnet.

$$oTR = \frac{m_{\text{Tiegel2getrockneteProbe}} - 4 m_{\text{Tiegel2Asche}}}{m_{\text{Tiegel2Probe}} - 4 m_{\text{Tiegel}}} \cdot 11000 \quad [\text{g/kg}] \quad \text{Glg. 3.2}$$

Die Asche ist hierbei der anorganische Anteil, der nach dem Glühen in den Tiegeln zurückbleibt.

Der Glühverlust ist der Quotient aus oTR und TR und wird als weiterer Parameter zur Charakterisierung organischer Substrate verwendet.

3.3.1.2 Chemischer Sauerstoffbedarf

Der Chemische Sauerstoffbedarf (CSB) ist ein Maß für die Konzentration an chemisch oxidierbarer Substanz in einer Suspension bzw. Feststoffprobe. Er gibt an, wie groß der Sauerstoffbedarf für die totale Oxidation von anorganischer und organischer Substanz mit Kaliumdichromat in einer schwefelsauren Lösung bei einer Temperatur von 148 °C in zwei Stunden ist.

3.3.1.2.1 Messung des Chemischen Sauerstoffbedarfs

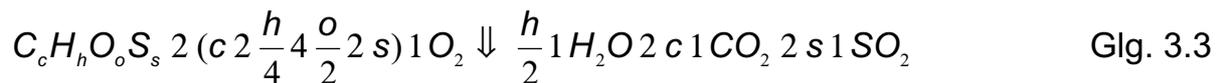
Bei der Bestimmung des CSB werden 0,5 g der zu untersuchenden Probe mit 20 ml aqua dest. versetzt und für eine Dauer von 10 min bei einer Beschleunigung von 10.000 g zentrifugiert (Fa. Beckman, Typ J2-21). Der Überstand wird anschließend mit einem Membranfilter der Porenweite 0,45 µm druckfiltriert. Der CSB des Filtrates wird anschließend mittels eines Küvettentestes (Fa. Aqualytic) gemessen [Meßbereich: 100 – 1000 mg O₂/l]. Dafür werden 2 ml des Filtrates in Anlehnung an DIN 38409 H41 bei einer Temperatur von 148 °C für die Dauer von 2 Stunden mit Kaliumdichromat in einer schwefelsauren Lösung erhitzt. Die infolge der Oxidation auftretende Farbveränderung der Probe wird letztendlich bei 610 nm photometrisch (Fa. Aqualytic, Typ AL 282) detektiert und als CSB der Probe in [mg/l] umgerechnet.

Durch die Bestimmung des CSB ist die Freisetzung von Organik durch eine vorhergehende mechanische Beanspruchung charakterisierbar (vergleiche Kap. 3.3.3.4). Dazu wird aber der spezifische Chemische Sauerstoffbedarf (=CSB_{spez}) benötigt.

Seine Berechnung aus der Elementarzusammensetzung der organischen Materialien wird im folgenden Abschnitt beschrieben.

3.3.1.2.2 Berechnung des spezifischen Chemischen Sauerstoffbedarfs

Der CSB beschreibt den Oxidationsprozeß, bei dem Kohlenstoff zu Kohlendioxid, Wasserstoff zu Wasser und Schwefel zu Schwefeldioxid oxidiert werden (siehe Glg. 3.3). Der in organischen Materialien vorkommende Stickstoff wird bei dieser Oxidation nicht erfaßt, da dieser in Form von Ammoniak bzw. Ammonium freigesetzt wird. Stickstoff erscheint somit auch nur in der Gesamtmasse von $C_cH_hO_oN_nS_s$ (Glg. 3.4) und nicht in der folgenden Reaktionsgleichung Glg. 3.3.



Der CSB_{spez} wird nun nach Glg. 3.4 berechnet:

$$CSB_{spez} = \frac{32\left(c + \frac{h}{4} + \frac{o}{2}\right)}{12c + 2h + 16o + 2n + 32s} \quad [\text{g O}_2/\text{g oTM}] \quad \text{Glg. 3.4}$$

Dabei ist oTM die organische Trockenmasse. Sie ist definiert als das Produkt aus Trockenrückstand (TR) und Probenmasse.

Da für einige organische Materialien die Elementarzusammensetzung nicht exakt bekannt ist, kann aus dem Gehalt der drei Makromoleküle Kohlenhydrat, Fett und Protein unter Annahme einer mittleren Zusammensetzung die Elementarzusammensetzung hinreichend gut angenähert werden. Die durchschnittliche Elementarzusammensetzung von Kohlenhydraten, Fetten und Proteinen ist in der Literatur beschrieben (Helfferich & Gütte, 1972; BLS, 1999) und die Angaben in den verschiedenen Quellen weichen nur vernachlässigbar voneinander ab. Tabelle 3.2 gibt die mittleren Elementarzusammensetzungen der Makromoleküle an, die in dieser Arbeit als Grundlage zur Berechnung des spezifischen Chemischen Sauerstoffbedarfs verwendet wurden.

Tabelle 3.2: Mittlere Elementarzusammensetzungen der drei Makromoleküle (Kohlenhydrat, Fett und Protein); Angaben nach Helfferich & Gütte (1972) in w/w-%

	Kohlenstoff [w/w-%]	Sauerstoff [w/w-%]	Wasserstoff [w/w-%]	Stickstoff [w/w-%]	Schwefel [w/w-%]
Fett	76	12	12	0	0
Protein	53	23	7	16	1
Kohlenhydrat	42	52	6	0	0

3.3.1.3 Rohfasergehalt

Der Rohfasergehalt (Cellulose und Lignin) ist eine wichtige Einflußgröße für das Zerkleinerungsverhalten und die mechanischen Eigenschaften organischer Materialien. Auch für das anaerobe Abbauverhalten organischer Materialien ist er von entscheidender Bedeutung. Der Rohfasergehalt wurde in die-

ser Arbeit extern an der BTU Cottbus nach einem von Jung & Busch (2000) modifizierten Verfahren nach van Soest bestimmt. Dieses Verfahren besteht aus zwei Teilschritten, einer Extraktion (Heißextraktionseinheit) und einer Hydrolyse (Kaltextraktionseinheit). Als Solvens bei der Extraktion wird eine Detergenzienlösung aus Cetyltrimethylammoniumbromid (CTAB) und 0,5-molarer Schwefelsäure eingesetzt.

Die sich nach den Teilabschnitten ergebenden Extraktions- und Hydrolyserückstände werden im ursprünglichen Verfahren gravimetrisch als NDF (neutral-detergent fiber), ADF (acid-detergent fiber) und ADL (acid-detergent lignin) erfaßt. Diese Kennwerte geben den Glühverlust der zurückbleibenden, ggf. biologisch inerten, organischen Substanz als prozentualen Anteil des Glühverlustes der unbehandelten Probe an. Der NDF-Wert entspricht dabei dem Gehalt an Hemicellulose, Cellulose, Lignin, Kunststoffen und Asche. Der ADF-Wert spiegelt den Gehalt an Cellulose, Lignin, Kunststoffe und Asche wider, und der ADL-Wert erfaßt die als biologisch inert zu betrachtende Menge an Lignin, Kunststoff und Asche.

Die in dieser Arbeit untersuchten organischen Materialien bestehen weder aus Kunststoffen noch beinhalten sie einen zu berücksichtigenden Anteil an Anorganik (BLS, 1999); deshalb entspricht der gesamte ADL-Wert dem prozentualen Anteil an Lignin vom Glühverlust der Probe. Aus der Differenz ADF-Wert und ADL-Wert bzw. NDF-Wert und ADL-Wert kann der prozentuale Anteil an Cellulose ermittelt werden.

3.3.2 Parameter zur Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften

Für alle Beanspruchungsversuche mit der Universalprüfmaschine wurden vom Meßrechner die Kraft-Weg-Verläufe online registriert. Um diese Verläufe interpretieren und vergleichen zu können, wurden diese in Spannungs-Dehnungs-Diagramme umgerechnet. Diese Umrechnung wird im folgenden genauer erläutert. Dabei werden nacheinander die drei durchgeführten Beanspruchungsarten abgehandelt.

3.3.2.1 Uniaxiale Druckbeanspruchung

Bei den uniaxialen Druckbeanspruchungen werden die von außen aufgebrachte Kraft F_{Druck} auf den Ausgangsquerschnitt A_0 der Probe ($L_0 \times B_0$) und der vom Druckstempel zurückgelegte Weg auf die Ausgangshöhe der Probe (H_0) bezogen (siehe Abb. 3.6).

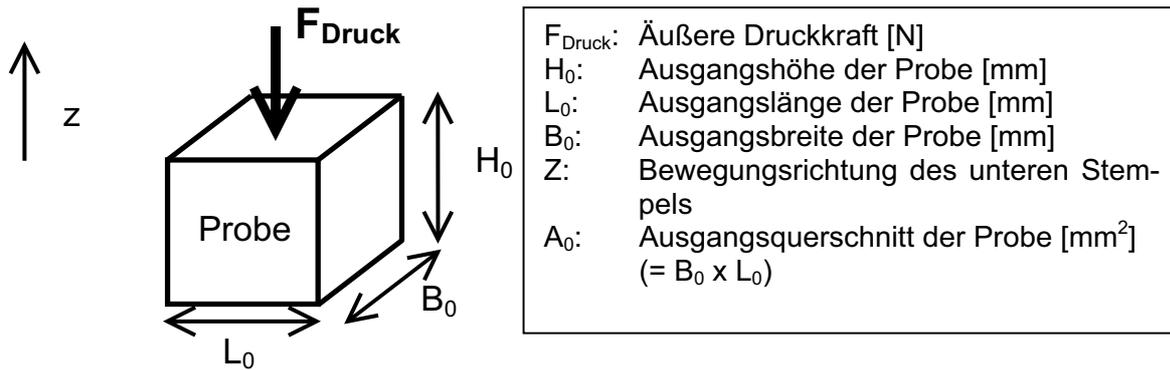


Abb. 3.6: Schematische Darstellung eines Probenkörpers unter der Wirkung der äußeren Druckkraft F_{Druck} .

Die äußere Kraft wird somit in eine Spannung umgerechnet und der zurückgelegte Weg wird entdimensioniert. Daraus ergeben sich folgende Kenngrößen:

1. Druckfestigkeit:

$$\omega_{\text{Druck}} \mid \frac{F_{\text{Druck}}}{A_0} \quad [\text{N/mm}^2] \quad \text{Glg. 3.5}$$

ω_{Druck} : Druckfestigkeit [N/mm²]
 F_{Druck} : Von außen auf die Probe aufgebraachte Druckkraft [N]
 A_0 : Ausgangsquerschnitt der Probe [mm²]

Dabei ist der Ausgangsquerschnitt abhängig vom jeweils beanspruchten Material. Er wird in Tabelle 3.3 für die untersuchten Materialien aufgeführt.

2. Dehnung:

$$\kappa_{\text{Druck}} \mid \frac{l}{H_0} \quad [-] \quad \text{Glg. 3.6}$$

κ_{Druck} : Dehnung bei der Druckbeanspruchung [-]
 l : Zurückgelegter Weg des Druckstempels [mm]
 H_0 : Ausgangshöhe der Probe [mm]

Die Ausgangshöhe der Probe ist vom jeweils beanspruchten Material abhängig. Sie wird in der folgenden Tabelle 3.3 für die verschiedenen Materialien aufgeführt. Die Formänderung der Proben infolge der Druckbeanspruchung und die damit einhergehenden Querschnittsänderungen der Proben wurden bei der Berechnung der Druckfestigkeiten nicht berücksichtigt und lediglich durch optische Verfolgung der Versuche mittels einer CCD-Kamera qualitativ erfaßt.

Tabelle 3.3: Ausgangsquerschnitte A_0 und Ausgangshöhen H_0 für die untersuchten Materialien bei der uniaxialen Druckbeanspruchung.

Material	Ausgangsquerschnitt [mm ²]	Ausgangshöhe [mm]
Äpfel/Möhren/Kartoffeln/Avocados	100	10
Mandeln	80-120	6,0-7,5
Sonnenblumenkerne	30-45	2,0-3,0
Reis	7,5-10,5	1,5-2,0
Linsen	30-40	1,5-2,5

Durch Inhomogenitäten in den Materialien können die tatsächlichen Spannungen unter Umständen größer sein als die gemessenen Nennspannungen; die Erfassung dieser lokalen Spannungsüberhöhungen war jedoch aus apparate-technischen Gründen nicht möglich. Durch die Mittelung der Spannungen über den Probenausgangsquerschnitt ist der dadurch auftretende Fehler jedoch für jedes Material gleich groß und somit bei der Beurteilung der Versuchsergebnisse vernachlässigbar.

3.3.2.2 Schneidbeanspruchung

Der prinzipielle Versuchsabbau ähnelt sehr dem der Druckversuche; lediglich der obere kreiszylindrische Stempel wird für die Durchführung der Schneidversuche durch ein handelsübliches Cuttermesser ersetzt. Die von außen aufgebrachte Schneidkraft F_{Schneid} wird nicht auf eine Fläche bezogen und somit nicht als Spannung ausgedrückt (siehe Abb. 3.7). Bei dieser Art der Versuchsdurchführung eignet sich keine Probenfläche als Bezugsparameter für die von außen eingeleitete Kraft.

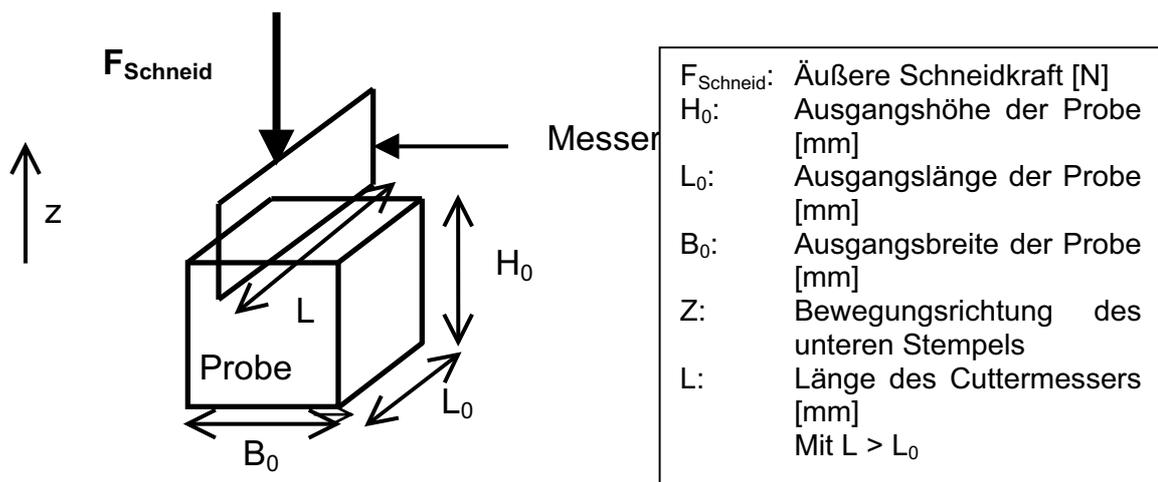


Abb. 3.7: Schematische Darstellung eines Probenkörpers unter der Wirkung der äußeren Schneidkraft F_{Schneid} .

Deshalb wird zur Charakterisierung und zur Vergleichbarkeit der Materialien untereinander die Schneidkraft auf die Abmessung der Probe (L_0) bezogen, mit der das Cuttermesser in Berührung kommt. Damit ergibt sich als charakte-

ristische Größe die längenbezogene Schneidkraft F_L , die gemäß Gleichung 3.7 definiert ist:

$$F_L = \frac{F_{\text{Schneid}}}{L_0} \quad [\text{N/mm}] \quad \text{Glg. 3.7}$$

F_L : längenbezogene Schneidkraft [N/mm]
 F_{Schneid} : von außen aufgebrachte momentane Schneidkraft [N]
 L_0 : charakteristische Länge, mit der das Cuttermesser in Kontakt kommt [mm]

Tabelle 3.4 gibt einen Überblick über die charakteristischen Längen der untersuchten Materialien, die in dieser Arbeit zur Berechnung der längenbezogenen Schneidkraft benutzt wurden.

Tabelle 3.4: Charakteristische Längen der untersuchten Materialien zur Berechnung der längenbezogenen Schneidkraft.

Material	Äpfel / Möhren / Kartoffeln / Avocados	Mandeln	Sonnenblumenkerne	Linzen	Reis
l_0 [mm]	10	9,5-12,5	4,5-5,5	4,0-5,5	1,5-2,0

Der zurückgelegte Weg des Beanspruchungswerkzeuges wird analog Gleichung 3.6, Kapitel 3.3.2.1 entdimensioniert.

3.3.2.3 Scherbeanspruchung

Bei der Scherbeanspruchung wird die von außen aufgebrachte Kraft F_{Scher} [N] gemäß Abbildung 3.8 auf den Ausgangsquerschnitt (A_0) der Probe in der Scherzone bezogen ($A_0 = H_0 \times L_0$).

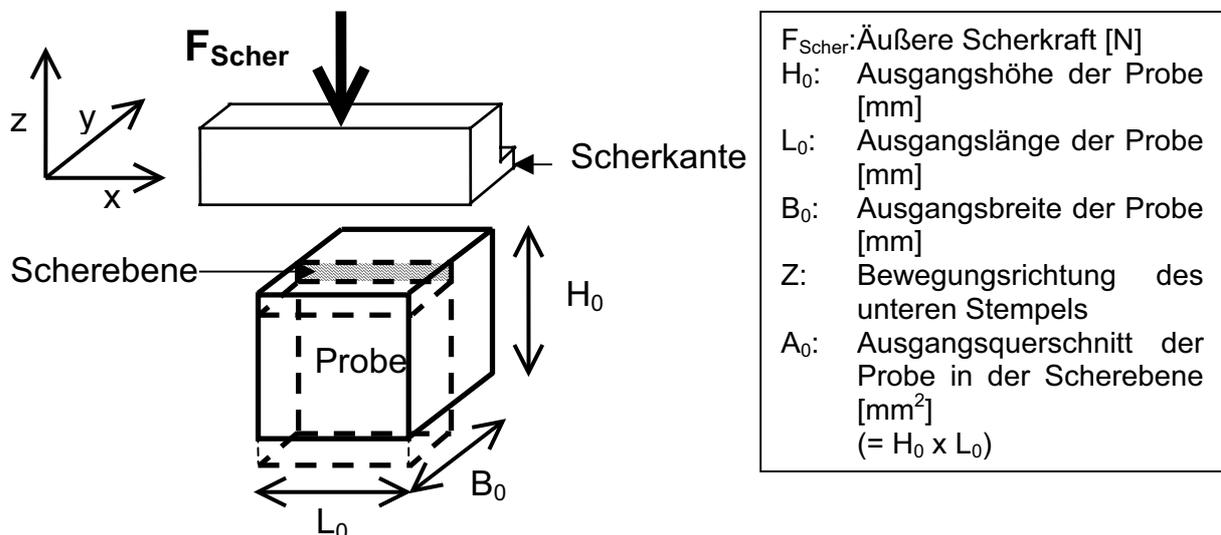


Abb. 3.8: Schematische Darstellung eines Probenkörpers unter der Wirkung der äußeren Scherkraft F_{Scher} .

Dabei werden die Veränderungen dieser Fläche während der Beanspruchungsversuche – analog zu den uniaxialen Druckversuchen – nicht berücksichtigt. Deshalb kann bei der hier definierten Spannung nicht von einer reinen Schubspannung ausgegangen werden, da gerade bei großen Deformationen

nach Kaiser (1966) die Bedeutung von Zugkräften innerhalb der Probe stark zunimmt. Die Definition dieser Spannung nach Gleichung 3.8 erfolgte außerdem in Anlehnung an Palmowski (2000), um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten.

$$\omega_{\text{Scher}} = \frac{F_{\text{Scher}}}{A_0} \quad [\text{N/mm}^2] \quad \text{Glg. 3.8}$$

ω_{Scher} : Scherfestigkeit [N/mm²]
 F_{Scher} : Von außen auf die Probe aufgebrachte Kraft während der Scherbeanspruchung [N]
 A_0 : Ausgangsquerschnitt der Probe in der Scherzone [mm²]

Tabelle 3.5 gibt einen Überblick über die Ausgangsquerschnitte der untersuchten Materialien, die zur Berechnung der Scherfestigkeiten herangezogen wurden.

Tabelle 3.5: Ausgangsquerschnitte A_0 und Ausgangshöhen l_0 für die untersuchten Materialien bei der Scherbeanspruchung.

Material	Ausgangsquerschnitt [mm ²]	Ausgangshöhe [mm]
Äpfel/Möhren/Kartoffeln/Avocados	100	10
Mandeln	80-120	6,0-7,5
Sonnenblumenkerne	30-45	2,0-3,0
Reis	7,5-10,5	1,5-2,0
Linsen	30-40	1,5-2,5

Der zurückgelegte Weg des Beanspruchungswerkzeuges wird analog Gleichung 3.6, Kapitel 3.3.2.1 entdimensioniert.

3.3.2.4 Materialkenngrößen

Zur Charakterisierung der untersuchten Materialien wurden die unter 3.3.2.1 bis 3.3.2.3 beschriebenen Parameter für die maximalen äußeren Kräfte bestimmt. Diese maximalen Kräfte entsprechen denjenigen Kräften, die die Probe während der Beanspruchung ohne makroskopische Bruchausbildung ertragen können (vergleiche Kap. 2.2.2).

Zur endgültigen Charakterisierung der Materialien werden also die maximale Druckfestigkeit $\omega_{\text{Druck,max}}$, die maximale längenbezogene Schneidkraft $F_{\text{L,Schneid,max}}$ und die maximale Scherfestigkeit $\omega_{\text{Scher,max}}$ verwendet und die zu diesen Maximalwerten korrespondierenden Dehnungen.

3.3.2.5 Spezifische Energie

Neben den oben beschriebenen Kenngrößen wurde noch die spezifische Energie als wichtiger Materialparameter verwendet. Durch Integration der Fläche unter den Kraft-Weg-Verläufen kann die spezifische Energie nach Gleichung 3.9 bestimmt werden.

$$E_{\text{Spez}} \mid \frac{A \cdot 11000}{m \cdot 1 TR} \quad [\text{kJ/kg}] \quad \text{Glg. 3.9}$$

E_{Spez} :	Spezifische Energie	[kJ/kg]
A:	Integrationsfläche unter dem Kraft-Weg-Verlauf	[kJ]
m:	Probenmasse	[kg]
TR:	Trockenrückstand	[g/kg]

Die spezifische Energie wurde zum einen bis zum Erreichen der maximalen Materialkenngrößen und zum anderen bis zum jeweiligen Versuchsende bestimmt. Der Quotient aus den beiden Energien kann als weiterer Parameter zur Beschreibung der Materialien verwendet werden (Baaden et al., 2002). Exemplarische Zahlenwerte für die verwendeten Massen und Integrationsflächen sind im Anhang (Kap. 7.5) tabellarisch angegeben.

3.3.3 Parameter zur Charakterisierung der mechanischen Beanspruchung in der Schneidmühle

3.3.3.1 Spezifische Energie

Der wichtigste Parameter zur Charakterisierung des Zerkleinerungserfolges einer mechanischen Beanspruchung ist die dabei eingetragene Energie. In dieser Arbeit wird diese Energie auf die Masse der beanspruchten Proben bezogen und wird somit als spezifische Energie mit der Einheit [kJ/kg] bezeichnet. Sie ist abhängig von der Leistung der Zerkleinerungsmaschine, dem Trockenrückstand des beanspruchten Materials und der Beanspruchungszeit. Um die Energieeinträge bei der mechanischen Beanspruchung verschiedener Materialien miteinander vergleichen zu können, werden diese auf den jeweiligen Trockenrückstand des beanspruchten Materials bezogen. Die spezifische Energie wird demnach nach Gleichung 3.10 berechnet:

$$E_{\text{Spez}} \mid \frac{(P_{\text{Gesamt,Mühle}} - 4 P_{\text{Leerlauf,Mühle}}) \cdot 1 t_{\text{Beanspruchung}}}{m_{\text{Probe}} \cdot 1 TR_{\text{Probe}}} \quad [\text{kJ/kg}] \quad \text{Glg. 3.10}$$

$P_{\text{Gesamt,Mühle}}$:	Leistung der Mühle im Betrieb	[W]
$P_{\text{Leerlauf,Mühle}}$:	Leerlaufleistung der Mühle	[W]
$t_{\text{Beanspruchung}}$:	Beanspruchungszeit	[s]
m_{Probe} :	Masse der beanspruchten Probe	[kg]
TR_{Probe} :	Trockenrückstand der Probe	[g/kg]

3.3.3.2 Partikelgrößenanalyse

Neben der spezifischen Energie sind die Verteilung der Partikelgrößen eines beanspruchten Kollektives und die sich daraus ableitenden Größen, wie der Medianwert der Verteilung, wichtige Parameter zur Beschreibung eines Erfolges einer mechanischen Beanspruchung. Die Bestimmung dieser Partikelgrößenverteilungen (PGV) ist demnach notwendig zur Charakterisierung einer

mechanischen Beanspruchung in einer Zerkleinerungsmaschine. Sämtliche Partikelgrößenanalysen erfolgten durch Siebung, was eine Erfassung von Partikelgrößen über mehrere Zehnerpotenzen ermöglichte. Der Wassergehalt der Materialien legte fest, ob die beanspruchten Proben einer Trockensiebung nach DIN 66165 oder einer Naßsiebung nach DIN 66165 unterzogen wurden. Mit folgende Materialien konnte eine Trockensiebung durchgeführt werden: Reis, Linsen, Mandeln, Sonnenblumenkerne und Heu.

Dazu wurde ein Siebturm, bestehend aus neun Standard-Prüfsieben (Fa. Retsch) mit quadratischen Öffnungen der Maschenweite von 63 µm bis 2500 µm, in aufsteigender Reihenfolge auf einer Schwingsiebmaschine (Fa. Retsch) aufgebaut und nach Aufgabe der zuvor in der Schneidmühle beanspruchten Proben auf das oberste Sieb für eine Dauer von 10 min geschüttelt. Durch Differenzwägung der Siebe, also vor (leer) und nach der Siebung (voll), konnte die Masse der Partikel im jeweiligen Intervall bestimmt werden. Die Proben der fetthaltigen Materialien Mandeln und Sonnenblumenkerne, die schon während der Beanspruchung in der Schneidmühle zur Agglomeration neigten, wurden – wie die anderen Materialien – ohne Zugabe von beispielsweise Siebhilfen nach DIN 66165 analysiert, um für alle Materialien die gleichen Siebbedingungen zu gewährleisten. Bei den Materialien mit hohem natürlichen Wassergehalt (Äpfel, Möhren, Kartoffeln und Avocados) mußten Naßsiebungen durchgeführt werden, um die Haftkräfte zwischen den Partikeln infolge von Flüssigkeitsbrücken (Löffler & Raasch; 1992) zu überwinden. Der Aufbau des Siebturmes für die Naßsiebung erfolgte analog zu dem der Trockensiebung mit den folgenden zwei Abweichungen: Zum ersten wurde ein Boden mit Ablauf verwendet, um das von oben aufgegebene Wasser ablaufen lassen und aufsammeln zu können. Zum zweiten wurde der Siebturm nach oben hin nicht fest geschlossen, sondern mit einem Aufsatz zum Besprühen des Siebturms mit Wasser versehen. Die Dauer der Besprühung richtete sich nach der Probenbeschaffenheit und lag nie unter 15 min. Die ersten 500 ml des durchgelaufenen Wassers (nach ca. 5 min) wurden in einem PE-Gefäß gesammelt und mittels eines Laserbeugungsspektrometers (Fa. Sympatec, Typ Helos 12 KA) auf die Partikelgrößenverteilung des im Wasser befindlichen Feingutes hin untersucht.

Analog zur DIN-Vorschrift für Naßsiebungen sind die Rückstände der einzelnen Siebe nach der Spülung durch Trocknung zu analysieren. Dafür wurden die Rückstände der einzelnen Siebe zunächst mit Wasser in Faltenfilter (Fa. Schleicher & Schuell; No 595^{1/2}) überführt, anschließend für eine Dauer von 24 h bei einer Temperatur von 105 °C getrocknet und schließlich mit einer Analysenwaage ausgewogen.

3.3.3.3 Spezifische Oberfläche

Die spezifische Oberfläche von Partikeln dient zur Charakterisierung des Zerkleinerungserfolges einer Partikelkollektivbeanspruchung mit einer einzigen Kenngröße. In dieser Arbeit wird die auf die Feststoffmasse bezogene Oberfläche nach Gleichung 3.14 verwendet.

$$S_m \mid \frac{S}{m} \quad [\text{m}^2/\text{g}] \quad \text{Glg. 3.14}$$

S: Oberfläche [m²]
m: Masse der Probe [g]

Mit Hilfe der spezifischen Oberfläche als charakteristische Größe sind Aussagen über die infolge einer mechanischen Beanspruchung neu geschaffenen oder freigesetzten Oberflächen möglich, die zu einer Freisetzung organischer Inhaltsstoffe mit beitragen. Im Rahmen dieser Arbeit wurden zwei Verfahren zur Bestimmung der massenbezogenen spezifischen Oberfläche verwendet, die im folgenden beschrieben werden.

3.3.3.3.1 Spezifische Oberfläche nach dem BET-Verfahren $S_{m,BET}$

Die Bestimmungen der spezifischen Oberfläche $S_{m,BET}$ nach Brunauer, Emmet und Teller (BET) beruht auf der Adsorption von Gasmolekülen, in diesem Fall Stickstoff, durch van der Waals-Kräfte an die Oberfläche von Feststoffpartikeln. Die spezifische Oberfläche läßt sich bei bekanntem Platzbedarf der Gasmoleküle unter der Berücksichtigung der Bedingungen nach DIN 66131, wie beispielsweise der Ausbildung einer monomolekularen Adsorbatschicht, nach Gleichung 3.15 berechnen:

$$S_{m,BET} \mid m^{-1} a^{-1} N_A^{-1} \frac{V}{V_0} \left(14 \frac{p}{p_0}\right) \quad [\text{m}^2/\text{g}] \quad \text{Glg. 3.15}$$

m: Probenmasse [g]
a: Platzbedarf eines Gasmoleküls ($a = 16 \cdot 10^{-20}$ [m²] für Stickstoff) [m²]
 N_A : Avogadro-Konstante ($6,023 \cdot 10^{23}$) [mol⁻¹]
V: Adsorbiertes Gasvolumen [m³]
 V_0 : Molvolumen des Gases [m³mol⁻¹]
p: Gleichgewichtsdruck des Gases [Pa]
 p_0 : Sättigungsdampfdruck des Gases [Pa]

Die Messung der spezifischen Oberfläche $S_{m,BET}$ erfolgte mit einem Meßgerät (Fa. Micromeritics, Typ Flowsorb II 2300) gemäß DIN 66131 und DIN 66132. Prinzip dieses Gerätes ist die dynamische Durchflußmethode, bei der die Zahl der an die Probenoberfläche adsorbierten Stickstoffmoleküle über die Änderung der Wärmeleitfähigkeit des Meßgases (Helium) detektiert wird. Eine digitale Anzeige am Gerät zeigte die Oberflächen der vermessenen Proben direkt

an, und diese mußten im Anschluß lediglich auf die Masse der Probe bezogen werden.

Da diese Methode nur für Materialien mit einem Feuchtigkeitsgehalt kleiner 150 g/kg geeignet ist, wurde auf eine Vermessung der feuchten Materialien Äpfel, Möhren, Kartoffeln und Avocados verzichtet, da eine vorhergehende Trocknung die Oberflächenbeschaffenheit dieser Materialien zu sehr beeinträchtigt. Es wurden nur die trockenen Materialien Heu, Reis, Linsen, Mandeln und Sonnenblumenkerne vermessen.

Für die Messung wurde ein U-förmiges, gläsernes Probenröhrchen zur Hälfte mit der zuvor in der Schneidmühle beanspruchten Probe gefüllt; die Probenmasse variierte gemäß der Dichte und Feinheit der beanspruchten Materialien. Ein Durchströmen dieser Probe für 20 min bei einer Temperatur von 100 °C (Vortrocknung) mit einem Helium-Stickstoff-Gemisch (im Verhältnis 30/70) entfernte schon adsorbierte Fremdmoleküle. Nach dieser Reinigung wurde die Probe dem eigentlichen Meßgasstrom ausgesetzt und währenddessen von außen mit flüssigem Stickstoff gekühlt. Ein Detektor gab die Menge an adsorbierten Stickstoffmolekülen als Adsorptionssignal aus. Im Anschluß an die Adsorptionsmessung wurde nach Abkühlen des Probengefäßes auf Raumtemperatur die Menge an desorbierten Stickstoffmolekülen aufgenommen und als Desorptionssignal erfaßt. Idealerweise entsprechen Adsorptions- und Desorptionssignal einander; bei den in dieser Arbeit auftretenden kleinen Abweichungen wurde der Mittelwert aus beiden Signalen gebildet.

Aufgrund der geometrischen Größe der Versuchsmaterialien war eine Messung der spezifischen Oberfläche nach dem BET-Verfahren der unbeanspruchten Materialien nicht möglich.

3.3.3.3.2 Spezifische Oberfläche aus der Partikelgrößenverteilung $S_{m,PGV}$

Die spezifische Oberfläche einer unter 3.3.3.2 beschriebenen Verteilungssummenfunktion $Q_3(x)$ kann in jedem Intervall $[x_i, x_{i+1}]$ nach Gleichung 3.16 bestimmt werden:

$$S_m(x_i; x_{i21}) \mid \frac{\text{Oberfläche der Partikel mit } x \in [x_i, x_{i21}]}{\text{Masse der Partikel mit } x \in [x_i, x_{i21}]} \quad [\text{m}^2/\text{g}] \quad \text{Glg. 3.16}$$

Durch Aufsummierung der Oberflächen für alle Intervalle der Partikelgrößenverteilung mit $x \in [x_{\min}, x_{\max}]$ kann die gesamte spezifische Oberfläche $S_{m,PGV}$ gemäß Gleichung 3.17 definiert werden:

$$S_{m,PGV} \mid \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} [S_m(x_i, x_{i21}) \cdot (Q_3(x_{i21}) - Q_3(x_i))] \quad [\text{m}^2/\text{g}] \quad \text{Glg. 3.17}$$

Die Einführung des Wadell'schen Formfaktors Φ bzw. $\Phi_{V,S}^2$ ist notwendig, da die Partikel eines realen Partikelkollektives keine ideale Kugelgestalt haben.

$$\Phi \mid \Phi_{V,S} \mid \left(\frac{x_V}{x_S}\right)^2 \mid \pi^{41} \quad [-] \quad \text{Glg. 3.18}$$

x_V : Durchmesser der Kugel gleichen Volumens [m]
 x_S : Durchmesser der Kugel gleicher Oberfläche [m]

Gemäß DIN 66141 entspricht der Formfaktor π , der im weiteren Verlauf dieser Arbeit verwendet wird, dem Kehrwert des Wadell'schen Formfaktors.

Der Formfaktor π beträgt für kugelförmige Partikel 1 und für quaderförmige Partikel 1,24. Bei zylinderförmigen Partikeln des Verhältnisses $z = h/x$ (Höhe / Durchmesser) ergibt sich der Formfaktor zu:

$$\pi \mid \frac{12 \cdot 2z}{\sqrt[3]{181 z^2}} \quad [-] \quad \text{Glg. 3.19}$$

Die realen Partikel der beanspruchten Partikelkollektive besaßen aber in den seltensten Fällen Zylinder- bzw. Quaderform. Die realen Formen wurden mittels eines Lichtmikroskopes (Fa. Olympus, Typ BH 2) und angeschlossener Digitalkamera auf Digitalfotos ermittelt und abgeschätzt. Die Berechnung der Formfaktoren befindet sich im Anhang (Kap. 7.4) dieser Arbeit. Tabelle 3.6 gibt einen Überblick über die verwendeten Formfaktoren dieser Arbeit.

Tabelle 3.6: Partikelformen und die daraus nach Kap. 7.4 (Anhang) berechneten Formfaktoren der untersuchten Materialien.

Partikelform	Formfaktor π	Material
Zylinder (h:x = 2:1)	1,202	Mandeln, SBK, Heu
Zylinder (h:x = 3:1)	1,2841	Äpfel
Pyramide (h:b = 1:1)	1,647	Reis, Linsen
Oktaeder	1,1826	Möhren

Mit Kenntnis dieses Formfaktors kann Gleichung 3.17 umgeformt werden:

$$S_{m,PGV} \mid 61\pi \mid \psi^{41} \mid \frac{x_{\max}}{x_{\min}} \mid x^{41} \mid q_3(x_i, x_{i21}) \mid 1 \div x \quad [m^2/g] \quad \text{Glg. 3.20}$$

ψ : Dichte der Probe [kg/m³]

Die Bestimmung der jeweiligen Probedichte erfolgte pyknometrisch. Dazu wurde die Probe in einen 50 ml-Glaspyknometer (Fa. Heico) eingewogen, bis ungefähr ein Drittel des Pyknometers gefüllt war, und dann mit aqua dest. auf 50 ml aufgefüllt. Aus der Gewichts Differenz und der bekannten Dichte des Wasser bei der entsprechenden Temperatur läßt sich somit die Dichte der Materialien bestimmen. Sie sind für die untersuchten Materialien in Tabelle 3.7 aufgeführt:

Tabelle 3.7: Dichten der untersuchten Materialien [kg/m³] zur Berechnung der spezifischen Oberfläche S_{m,PGV}.

Substrat	Heu	Linzen	Mandeln	Reis	SBK
Dichte [kg/m ³]	1005	1280	1010	1495	1095

Die Verteilungsdichtefunktion wird gemäß Glg. 3.12 umgeformt, dann in Gleichung 3.20 eingesetzt und anschließend aufsummiert. Damit ergibt sich die spezifische Oberfläche S_{m,PGV} zu:

$$S_{m,PGV} = 6 \pi \psi^4 \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \frac{Q_3(x_{i21})^4 Q_3(x_i)}{\sqrt{x_{i41}} x_i} dx_i \quad [\text{m}^2/\text{g}] \quad \text{Glg. 3.21}$$

Mit Gleichung 3.21 ist die Berechnung der spezifischen Oberfläche S_{m,PGV} möglich bei Kenntnis der Partikelgrößenverteilung, der Substratdichte und den entsprechenden Formfaktoren.

3.3.3.3.3 Vergleich der beiden verschiedenen spezifischen Oberflächen

Die Bestimmung der spezifischen Oberfläche aus der Partikelgrößenverteilung S_{m,PGV} und der spezifischen Oberfläche nach dem BET-Verfahren S_{m,BET} unterscheiden sich grundlegend. Während die erste Methode eine mathematische Berechnung einer Oberfläche ohne Berücksichtigung von Rauigkeiten der Partikeloberfläche darstellt, erfasst die spezifische Oberfläche, bestimmt nach dem BET-Verfahren, die gesamte Oberfläche inklusive aller Poren, die für Stickstoffmoleküle zugänglich ist. Besonders im Hinblick auf die Bioverfügbarkeit ist jedoch die Oberfläche entscheidend, die für mikrobielle Enzyme zugänglich ist. Die mittlere geometrische Abmessung von solchen Enzymen beträgt ungefähr 10⁻⁸ m (Brock et al., 1997).

Demnach erfasst die spezifische Oberfläche, berechnet aus der Partikelgrößenverteilung, eine zu kleine Oberfläche. Sie wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit als „äußere Oberfläche“ bezeichnet. Die spezifische Oberfläche nach dem BET-Verfahren erfasst jedoch eine Oberfläche, die zu groß ist. Denn die geometrischen Abmessungen eines Stickstoffmoleküls sind kleiner als die der mikrobiell relevanten Enzyme. Sie wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit als „Gesamtoberfläche“ bezeichnet.

Die tatsächlich für mikrobielle Enzyme zugängliche Oberfläche liegt von ihrem Größenordnungsbereich zwischen den in dieser Arbeit bestimmten Oberflächen. Eine Bestimmungsmethode für diese Oberfläche fehlt aber bisher.

3.3.3.4 Freisetzungsgrad organischer Komponenten F_{CSB}

Der Freisetzungsgrad organischer Komponenten ist ein Parameter zur Beurteilung des Zerkleinerungserfolges hinsichtlich der Bioverfügbarkeit organi-

scher Inhaltsstoffe. Seine Bestimmungsmethode ist in Kapitel 3.3.1.2 beschrieben. Um nur den Einfluß der mechanischen Beanspruchung auf die Freisetzung organischer Inhaltsstoffe zu erfassen, wird der Freisetzungsgrad gemäß Gleichung 3.22 definiert:

$$F_{CSB} = \frac{CSB_{zerkleinert} - CSB_0}{CSB_{max} - CSB_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad \text{Glg. 3.22}$$

Vom gemessenen CSB der mechanisch beanspruchten Probe ($CSB_{zerkleinert}$) wird also der CSB des nicht beanspruchten Materials (CSB_0) abgezogen und mit einem maximalen CSB (CSB_{max}) ins Verhältnis gesetzt, von dem ebenfalls der CSB des nicht beanspruchten Materials (CSB_0) subtrahiert wird. Dieser maximale CSB beschreibt dabei den Chemischen Sauerstoffbedarf, der für eine totale Oxidation der in der Probe befindlichen organischen Inhaltsstoffe nach kompletter Diffusion in die wäßrige Phase nötig wäre. Der maximale CSB berechnet sich nach folgender Gleichung 3.23:

$$CSB_{max} = \frac{CSB_{spez} \cdot oTM_{Probe}}{V_{Suspension}} \quad [\text{mg O}_2/\text{l}] \quad \text{Glg. 3.23}$$

CSB_{max} :	maximaler Chemischer Sauerstoffbedarf	[mg O ₂ /l]
CSB_{spez} :	spezifischer Chemischer Sauerstoffbedarf	[mg O ₂ /g _{oTM}]
oTM_{Probe} :	organische Trockenmasse der Probe	[g _{oTM}]
	Einwaage der Probe [g] x oTR der Probe [g/kg]	
$V_{Suspension}$:	Volumen der Suspension	[l]

Der CSB_{spez} wird aus der Materialzusammensetzung gemäß Glg. 3.4 berechnet.

Ein F_{CSB} von 0 % bedeutet, daß keine organischen Inhaltsstoffe infolge der mechanischen Beanspruchung freigesetzt werden und, ein Wert von 100 % sagt aus, daß sämtliche organischen Inhaltsstoffe infolge der mechanischen Beanspruchung freigesetzt werden.

3.3.4 Parameter zur Charakterisierung des anaeroben Abbaus

In dieser Arbeit wurden lediglich die Faulgasausbeute $V_{g,oTM}$, der Abbaugrad ξ_G und die Beladungsrate BL als Charakterisierungsparameter für den Einfluß der mechanischen Beanspruchung auf den anaeroben Abbau verwendet. Die Bestimmung dieser Parameter erfolgte in Anlehnung an Mundhenke (2002) und werden deshalb im folgenden nur kurz beschrieben.

3.3.4.1 Faulgasausbeute

Die Faulgasausbeute wird zum einen zur Berechnung des Abbaugrades ξ_G benötigt, und zum anderen läßt seine Betrachtung über die Versuchsdauer

von 21 Tagen Rückschlüsse auf die Geschwindigkeit des anaeroben Materialabbaus zu.

Nach Umrechnung der produzierten Gasvolumina auf Normbedingungen ($T_n = 0 \text{ °C}$, $p_n = 101325 \text{ Pa}$) kann die Faulgasausbeute nach Gleichung 3.24 berechnet werden:

$$V_{g,oTM} \mid \frac{V_g - 4V_{g,0}}{oTM_{Substrat}} \cdot 11000 \quad [l/kg] \quad \text{Glg. 3.24}$$

V_g :	Produziertes Gasvolumen im Reaktor	[l]
$V_{g,0}$:	Produziertes Gasvolumen der Nullprobe	[l]
$oTM_{Substrat}$:	Zugeführte organische Trockenmasse des jeweiligen Materials	[g]

Mit der so bestimmten Faulgasausbeute kann der Abbaugrad von organischen Materialien ξ_G berechnet werden (siehe Kapitel 3.3.4.2).

3.3.4.2 Abbaugrad ξ_G

Der Abbaugrad ξ_G beschreibt die Effizienz eines Abbauprozesses. Er wird aus dem Verhältnis der tatsächlich gemessenen Faulgasausbeute $V_{g,oTM}$ (vergleiche Kapitel 3.2.4.1) und der theoretisch maximalen Faulgasausbeute $V_{g,oTM,max}$ berechnet:

$$\xi_G \mid \frac{V_{g,oTM}}{V_{g,oTM,max}} \quad [\%] \quad \text{Glg. 3.25}$$

Die theoretisch maximale Faulgasausbeute entspricht derjenigen Faulgasausbeute, die bei vollständigem Materialabbau zu Faulgas erreicht würde. Die theoretische maximale Faulgasausbeute wird aus der Materialzusammensetzung berechnet (Mundhenke, 2002).

3.3.4.3 Beladungsrate BL

Die Beladungsrate (BL) beim anaeroben Abbau organischer Materialien entspricht dem Verhältnis aus der zugeführten organischen Trockenmasse (oTM) des Materials und der organischen Trockenmasse des Impfschlammes (Mundhenke, 2002).

$$BL \mid \frac{oTM_{Sub}^{Zu}}{oTM_{IS}} \quad [g/g] \quad \text{Glg. 3.26}$$

oTM_{Sub}^{Zu} :	Zugeführte organische Trockenmasse	[g]
oTM_{IS} :	Organische Trockenmasse des Impfschlammes	[g]

3.4 Materialien

Die untersuchten organischen Materialien werden im folgenden bezüglich ihrer Zusammensetzung charakterisiert und die verschiedenen, verwendeten Zweistoffgemische werden beschrieben.

3.4.1 Charakterisierung der Versuchsmaterialien

In dieser Arbeit wurden ausschließlich organische Materialien pflanzlicher Herkunft verwendet. Die Auswahl der Materialien erfolgte so, daß die große, natürliche Vielfalt der Zusammensetzungsmöglichkeiten dieser Materialien berücksichtigt werden konnte. Die Materialien wurden demzufolge nach ihrem Wasser-, Fett-, Kohlenhydrat-, Protein- und Rohfasergehalt (Cellulose und Lignin) ausgewählt. Tabelle 3.8 gibt einen Überblick über die Materialzusammensetzung der untersuchten Materialien.

Tabelle 3.8: TR, oTR, GV; Fett-, Protein-, Kohlenhydrat- und Rohfasergehalt für die untersuchten Materialien. ⁽¹⁾: eigene Messung; ⁽²⁾ bzw. ⁽³⁾: Werte nach BLS (1999) bzw. Helferich und Gütte (1972) bezogen auf den oTR [g/kg] der unbehandelten Substrate.

Substrat	TR [g/kg]	oTR [g/kg]	GV [%]	Fett [g/kg oTR]	Protein [g/kg oTR]	Kohlenhydrat [g/kg oTR]	Cellulose [g/kg oTR]	Lignin [g/kg oTR]
Äpfel	126,8 (1)	121,5 ⁽¹⁾	95,4 (1)	32,9 (2)	28,0 (2)	940,7 ⁽²⁾	9,9 (1)	3,4 (1)
Möhren	90,5 ⁽¹⁾	82,7 (1)	91,4 (1)	24,2 (2)	118,5 ⁽²⁾	580,4 ⁽²⁾	15,6 (1)	7,3 (1)
Avocados	284,8 (1)	256,5 ⁽¹⁾	90,8 (1)	916,2 ⁽²⁾	74,1 (2)	15,6 (2)	81,0 (1)	32,2 (1)
Kartoffeln	179,5	161,7	92,7 (1)	6,5 (2)	96,3 (2)	748,1 (2)	5,35 (1)	2,7 (1)
Heu	889,7 (1)	828,3 (1)	93,1 (1)	23,5 (3)	123,1 (3)	679,3 (3)	314,0 (1)	46,6 (1)
Reis (poliert)	888,1 (1)	855,3 (1)	96,1 (1)	7,3 (2)	79,9 (2)	908,8 (2)	7,3 (1)	1,7 (1)
Linsen	881,8 (1)	855,9 (1)	97,1 (1)	16,4 (2)	274,6 (2)	576,0 (2)	38,4 (1)	4,9 (1)
Sonnenblumenkerne	946,9 (1)	905,9 (1)	95,7 (1)	540,9 (2)	248,0 (2)	136,1 (2)	167,9 (1)	14,8 (1)
Mandeln	960,2 (1)	931,6 (1)	97,0 (1)	580,7 (2)	200,9 (2)	39,7 (2)	27,1 (1)	21,1 (1)

Aus Tabelle 3.8 ist ersichtlich, daß man die Materialien ihren Zusammensetzungen entsprechend folgendermaßen unterteilen kann:

1. Materialien mit niedrigem TR: diese Materialien weisen einen Wassergehalt größer als 15 % auf und werden in dieser Arbeit als feuchte Materialien bezeichnet. Zu dieser Gruppe gehören die Äpfel, Möhren, Kartoffeln und Avocados.
2. Materialien mit hohem TR: diese Materialien weisen einen Wassergehalt kleiner als 15 % auf und werden in dieser Arbeit als trockene Materialien bezeichnet. Zu dieser Gruppe gehören Heu, Reis, Linsen, Sonnenblumenkerne und Mandeln.

Desweiteren besitzen Äpfel, Möhren, Kartoffeln, Reis und Linsen einen niedrigen und Heu, Mandeln, Sonnenblumenkerne und Avocados einen hohen Gehalt an Rohfasern. Dabei sind Linsen und Sonnenblumenkerne proteinreiche, Avocados, Sonnenblumenkerne und Mandeln fettreiche, und Äpfel, Kartoffeln und Reis kohlenhydratreiche Materialien.

3.4.2 Beschreibung der organischen Zweistoffgemische

Neben der Untersuchung der organischen Stoffe als Einzelsubstrate wurde auch das Verhalten von Zweistoffgemischen bei mechanischer Beanspruchung untersucht. Ziel bei der Zusammenstellung dieser Gemische war eine praxisnahe Zusammensetzung. Als Bezugspunkt wurde die Zusammensetzung von kommunalem Bioabfall bezüglich der drei Makromoleküle Kohlenhydrat, Protein und Fett gewählt (Fischer, 2001). Deshalb wurden die sieben Zweistoffgemische gemäß Tabelle 3.9 auf ihr Verhalten bei mechanischer Beanspruchung und bezüglich des Einflusses dieser Beanspruchung auf die Bioverfügbarkeit hin untersucht:

Tabelle 3.9: Beschreibung der Zweistoffgemische.

Substratgemisch	Beschreibung
Möhren & Avocados	Fettreich & feucht & faserreich
Heu & Sonnenblumenkerne	Fettreich & trocken & faserreich
Heu & Linsen	Fettarm & trocken & faserreich
Möhren & Äpfel	Fettarm & feucht & faserreich
Sonnenblumenkerne & Äpfel	Fettreich & feucht & faserarm
Sonnenblumenkerne & Linsen	Fettreich & trocken & faserarm
Avocados & Mandeln	Fettreich & feucht & faserreich

Die Einzelsubstrate wurden dabei für die Herstellung der Zweistoffgemische im Massenverhältnis 1:1 gemischt.

Die aus diesen Gemischen resultierenden Trockenrückstände (TR), organischen Trockenrückstände (oTR) und Glühverluste (GV) sind in Tabelle 3.10 darstellt.

Tabelle 3.10: Trockenrückstände (TR), organische Trockenrückstände (oTR) und Glühverluste (GV) für die untersuchten Zweistoffgemische.

Substratgemisch	TR [g/kg]	oTR [g/kg]	GV [%]
Möhren & Avocados	162,8	147,8	90,7
Heu & Sonnenblumenkerne	909,2	848,8	93,5
Heu & Linsen	879,0	834,7	95,0
Möhren & Äpfel	99,8	83,5	83,6
Sonnenblumenkerne & Äpfel	531,9	511,2	96,0
Sonnenblumenkerne & Linsen	920,1	887,1	96,3
Avocados & Mandeln	610,2	581,5	95,4

3.4.3 Vorbehandlungen der Versuchsmaterialien

Sämtliche Versuchsmaterialien wurden vor der eigentlichen Versuchsdurchführung vorbehandelt, um diese für die entsprechenden Untersuchungen verwenden zu können und die verschiedenen Untersuchungen untereinander vergleichbar zu machen.

Die feuchten Materialien Äpfel, Möhren, Kartoffeln und Avocados wurden dazu stets in Quader der Kantenlänge 10 mm und Heu in Stücke der Länge 20 mm vorzerkleinert. Die übrigen Materialien (Reis, Linsen, Mandeln und Sonnenblumenkerne) wurden in ihrer natürlichen Form belassen.

3.4.4 Untersuchungen zum Wassergehalt

Für sämtliche Materialien wurden Experimente bezüglich ihres Wassergehaltes durchgeführt. Da besonders der Einfluß des Wassergehaltes auf die mechanischen Eigenschaften und das Zerkleinerungsverhalten untersucht wurde, ist der Wassergehalt durch Trocknung bzw. Wässerung der Materialien künstlich variiert worden.

3.4.4.1 Absenkung des Wassergehaltes durch Trocknung

Die Trocknung der Proben erfolgte in einem elektronischen Feuchtigkeitsmeßgerät (Fa. Sartorius, Typ Moisture Analyzer MA 30). Dieses Gerät ist zur Trocknung organischer Materialien geeignet (Fa. Sartorius). Dabei wurden die Materialien unter Berücksichtigung ihres natürlichen Wassergehaltes folgendermaßen getrocknet:

1. Feuchte Materialien: Trocknung bei einer Trocknungstemperatur von 60 °C, 80 °C und 105 °C bis zu einem Massenverlust von 10 %, 20 % und 30%.
2. Trockene Materialien: Trocknung bei einer Trocknungstemperatur von 60 °C, 80 °C und 105 °C für eine Dauer von 5 min, 10 min, 15 min, 30 min, 45 min, 60 min und 120 min.

Somit konnten sowohl der Einfluß des Wassergehaltes als auch der Einfluß der Trocknungstemperatur bis zum Erreichen eines bestimmten Trocknungsergebnisses untersucht werden. Parallel zu den Trocknungen im elektronischen Feuchtigkeitsmeßgerät wurden Vergleichstrocknungen in einem handelsüblichen Trockenschrank (Fa. Heraeus) durchgeführt.

3.4.4.2 Erhöhung des Wassergehaltes durch Befeuchtung

Zur Erhöhung des Wassergehaltes wurden die Proben der untersuchten Materialien in Glasgefäßen (Fa. Schott) mit aqua dest. befeuchtet, bis sich die gewünschte Erhöhung des Wassergehaltes eingestellt hat.

4 Versuchsergebnisse

Dieses Kapitel ist in vier Abschnitte unterteilt. Zunächst werden die Ergebnisse der Trocknungs- und Befeuchtungsversuche mit den untersuchten Materialien dargestellt. Auf diese Ergebnisse wird im weiteren Verlauf dieses Kapitels zurückgegriffen, wenn der Einfluß des Wassergehaltes auf die mechanischen Eigenschaften und das Zerkleinerungsverhalten diskutiert wird. Anschließend werden die mechanischen Eigenschaften der Materialien als Einzelsubstrate, dann das Zerkleinerungsverhalten der Materialien als Einzelsubstrate dargestellt, und es wird der Einfluß einer mechanischen Beanspruchung auf - aus diesen Materialien zusammengestellte - Zweistoffgemische hinsichtlich des Zerkleinerungserfolges und des anaeroben Abbaus erläutert. Das Kapitel wird mit der Darstellung der Zusammenhänge zwischen den mechanischen Eigenschaften und dem Zerkleinerungsverhalten der neun untersuchten Materialien als Einzelsubstrate abgeschlossen. Eine ausführliche Charakterisierung des anaeroben Abbaus der untersuchten neun Einzelsubstrate unter Berücksichtigung der Zerkleinerung als verfahrenstechnischen Schritt vor dem anaeroben Abbau sind Publikationen von Mundhenke et al. (2001-2002) zu entnehmen.

4.1 Trocknungs- und Befeuchtungsversuche

Zur Beurteilung des Einflusses des Wassergehaltes auf die mechanischen Eigenschaften und das Zerkleinerungsverhalten mußten von den untersuchten Materialien Trocknungs- und Befeuchtungskurven aufgenommen werden.

4.1.1 Trocknungsversuche

Für die untersuchten feuchten organischen Materialien (Äpfel, Kartoffeln und Möhren) wurden Trocknungskurven aufgenommen. Mittels dieser Auftragung des relativen Massenverlustes in Abhängigkeit der Trocknungszeit konnten die Trocknungszeiten für bestimmte, festgelegte Wassergehalte ($WG_{rel} = 90 \%$, 80% und 70%) bestimmt werden. Dafür wurden die Materialien für eine Dauer von 0 h bis 48 h bei $105 \text{ }^\circ\text{C}$ in einem Trockenschrank (Fa. Heraeus) getrocknet, und der relative Massenverlust über die Trocknungszeit wurde für alle drei Materialien in Abbildung 4.1 aufgetragen. Der relative Massenverlust nimmt für alle drei Materialien mit zunehmender Trocknungsdauer zu. Es fällt auf, daß die drei Trocknungskurven für eine Trocknungsdauer von bis zu 6 Stunden gleich verlaufen. Erst eine weitere Trocknung bewirkt signifikante Unterschiede im Verlauf der Kurven. Eine Trocknungsdauer von mehr als 12 Stunden führt für keines der drei Materialien zu einem weiteren relativen Massenverlust. Festzuhalten ist weiterhin, daß der relative Massenverlust für Möh-

ren am höchsten (ca. 91 %), gefolgt von den Äpfeln (ca. 88 %) und am niedrigsten für Kartoffeln (ca. 78 %) ist. Dieses Trocknungsverhalten der Materialien korreliert mit den in Tabelle 3.8 angegebenen Trockenrückständen.

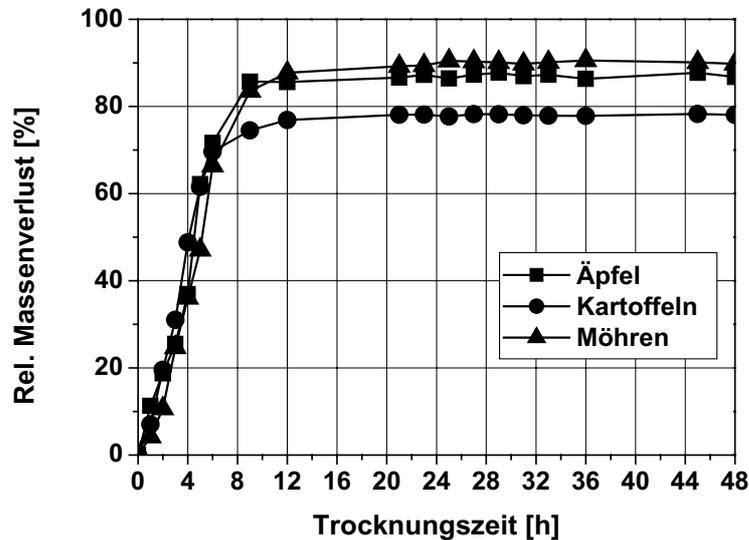


Abb. 4.1: Relativer Massenverlust [%] der feuchten organischen Substrate Äpfel, Möhren und Kartoffeln in Abhängigkeit der Trocknungszeit [h] für eine Trocknungstemperatur von 105 °C im Trockenschrank (Fa. Haereus).

Da nicht nur der Einfluß des Wassergehaltes, sondern auch der Einfluß der Trocknungstemperatur auf die Materialeigenschaften untersucht wurde, sind die Materialien gemäß Kapitel 3.4.4.1 in einem elektronischen Feuchtigkeitsmeßgerät (Fa. Sartorius) getrocknet worden. In Abbildung 4.2 ist das Ergebnis einer Vergleichsmessung für Äpfel, Kartoffeln und Möhren dargestellt. Die Trocknungen mit dem elektronischen Feuchtigkeitsmeßgerät sind denen im Trocknungsschrank äquivalent. Die mit dem Feuchtigkeitsmeßgerät ermittelten Werte sind für alle drei Materialien etwas größer als die, bestimmt mittels Trocknung im Trockenschrank. Diese Tendenz konnte jedoch für andere Materialien (trockene organische Materialien) nicht nachgewiesen werden. Der relative Fehler ist in allen Fällen kleiner als 5 % und somit kleiner als die natürlichen Unterschiede im Trockenrückstand der untersuchten Materialien (beispielsweise infolge einer Lagerung etc.). Zur Untersuchung des Wassergehaltes auf den Einfluß der mechanischen Eigenschaften (Trocknung im Feuchtigkeitsmeßgerät) und des Zerkleinerungsverhaltens (Trocknung im Trockenschrank) wurden die relativen Massenverluste 10 %, 20 % und 30 % gewählt. Die Auswirkungen von größeren relativen Massenverlusten auf das Zerkleinerungs- und Abbauverhalten dieser Materialien wurden bereits von Mundhenke (2002) untersucht. Desweiteren wurden gerade diese Wassergehaltseinstellungen gewählt, da durch diese Einstellungen praxisnahe

Trocknungseffekte, wie sie beispielsweise bei realem Biomüll vorkommen, untersucht werden konnten. Weiterführende Trocknungen führen zu Verkohlungen der Versuchsmaterialien und wurden deshalb im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter untersucht.

Die Trocknungen zur Bestimmung des Einflusses des Wassergehaltes auf die mechanischen Eigenschaften der übrigen, trockenen Materialien (Linsen, Reis, Mandeln und Sonnenblumenkerne) erfolgten ausschließlich mit dem elektronischen Feuchtigkeitsmeßgerät. Aufgrund der hohen Trockenrückstände dieser Materialien wurden die Trocknungen auch nicht auf einen definierten relativen Massenverlust hin durchgeführt, sondern es wurde als Bezugsparameter die Trocknungsdauer gewählt (vergleiche Kapitel 3.4.4.1), da die relativen Massenverluste sehr gering waren.

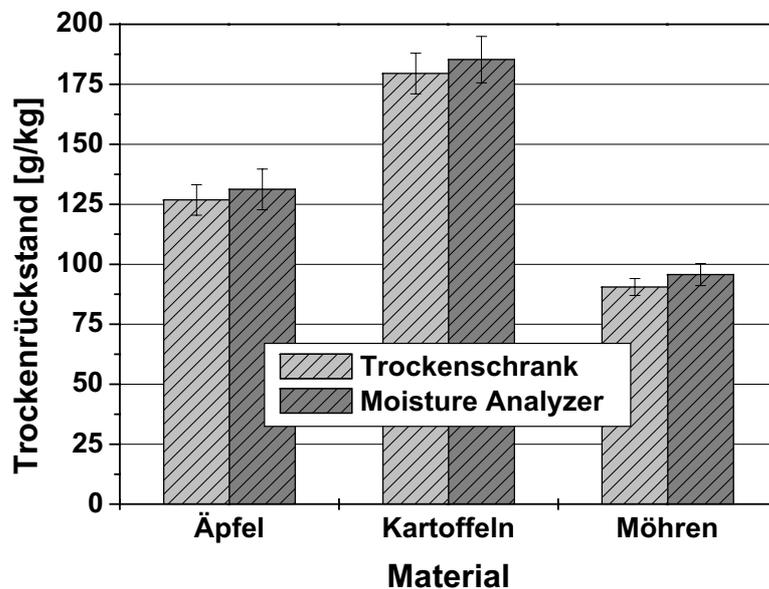


Abb. 4.2: Vergleich der Trockenrückstände der feuchten Materialien Äpfel, Kartoffeln und Möhren, bestimmt durch Trocknung mittels eines elektronischen Feuchtigkeitsmeßgerätes [Moisture Analyzer] (105 °C) und eines herkömmlichen Trockenschrankes (105 °C, Fa. Haereus).

Aufgrund des Ergebnisses der Vergleichsbestimmung des Trockenrückstandes für beide Trocknungsmethoden wird im folgenden nicht mehr zwischen der Trocknung im Trockenschrank und der Trocknung mittels des elektronischen Feuchtigkeitsmeßgerätes unterschieden.

4.1.2 Befeuchtungsversuche

Analog zu den Trocknungskurven für die feuchten organischen Materialien wurden Befeuchtungskurven für die trockenen organischen Materialien aufgenommen. Dafür wurden die Materialien Reis, Linsen, Sonnenblumenkerne,

und Mandeln für Befeuchtungszeiten zwischen 0 h und 4 h in deionisiertem Wasser eingeweicht. Die relative Massenzunahme in Abhängigkeit von der Befeuchtungszeit ist in Abbildung 4.3 dargestellt. Für alle Materialien steigt die relative Massenzunahme mit der Befeuchtungszeit. Nach einer Befeuchtungszeit von 2 Stunden sind sämtliche Materialien nahezu mit Wasser gesättigt, und eine weitere relative Massenzunahme bleibt nahezu aus.

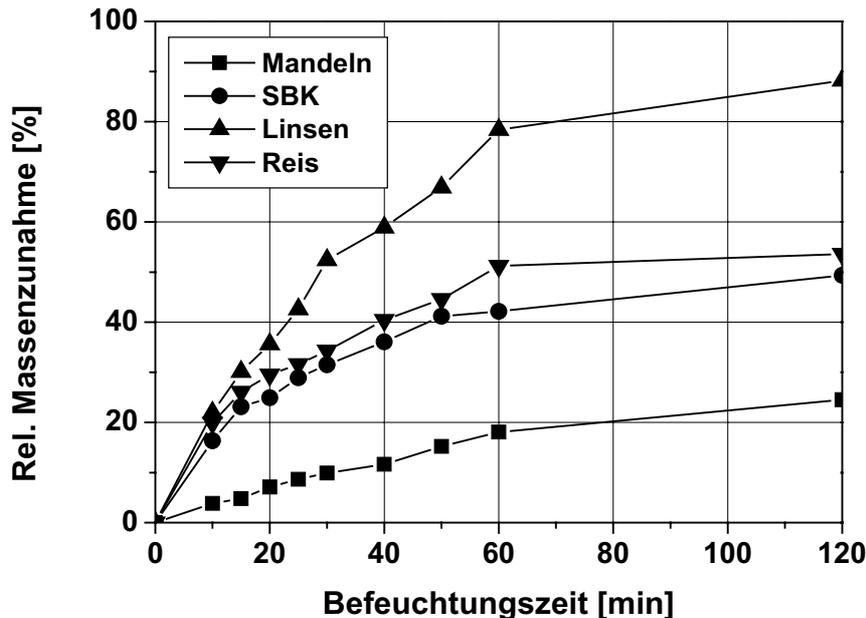


Abb. 4.3: Relative Massenzunahme [%] in Abhängigkeit der Befeuchtungszeit [min] der trockenen organischen Substrate Mandeln, SBK, Linsen und Reis.

Das Befeuchtungsverhalten der trockenen organischen Materialien ist uneinheitlich. Diese Materialien besitzen unterschiedliche Wasseraufnahmekapazitäten. Linsen, deren relative Massenzunahme bis zu 88 % beträgt, haben eine hohe Wasseraufnahmekapazität im Gegensatz zu Mandeln, deren relative Massenzunahme 24,5 % beträgt. Dennoch korrelieren diese Abhängigkeiten mit den in Tabelle 3.8, Seite 44, angegebenen Trockenrückständen der Materialien. Das heißt, daß Materialien mit einem geringen Trockenrückstandgehalt hohe Mengen an Wasser aufnehmen. Das unterschiedliche Wasseraufnahmeverhalten ist mit den jeweiligen Materialzusammensetzungen zu erklären. Mandeln und Sonnenblumenkerne haben einen hohen Fettgehalt, während Reis einen hohen Kohlenhydrat- und Linsen einen hohen Proteingehalt haben. Durch den hohen hydrophoben Fettanteil der Mandeln wird die Wasseraufnahme behindert. Dies ist für Mandeln stärker ausgeprägt als für Sonnenblumenkerne, da Mandeln einen höheren Fettgehalt besitzen. Analog ist aufgrund des hohen hydrophilen Proteingehaltes für Linsen die Wasseraufnahme sehr

hoch. Die gleiche Auftragung (Zahlenwerte siehe Anhang, Tab. 7.2.3) für die feuchten organischen Materialien Äpfel, Kartoffeln und Möhren verdeutlicht, daß deren Wasseraufnahmevermögen – verglichen mit den trockenen organischen Materialien – niedriger ist und daß aufgrund des schon hohen natürlichen Wassergehaltes die Befeuchtungszeiten zum Erreichen der maximalen Wasseraufnahmekapazitäten größer sind.

Mit diesen Trocknungs- und Befeuchtungskurven ist es zum einen möglich, die Trocknungs- und Befeuchtungszeiten zum Erreichen einer bestimmten definierten relativen Massenabnahme und relativen Massenzunahme zu bestimmen. Zum anderen vermitteln diese Ergebnisse einen ersten Eindruck zu dem unterschiedlichen Verhalten organischer Materialien.

4.2 Mechanische Eigenschaften organischer Materialien

Grundlage zur Beurteilung der mechanischen Materialeigenschaften sind die Kraft-Weg-Verläufe, die vom Meßrechner der Universalprüfmaschine während der Versuche online registriert werden (vergleiche Kapitel 3.2.1). Im folgenden werden unterschiedliche, charakteristische Kraft-Weg-Verläufe der untersuchten Materialien vorgestellt, und es wird dargelegt, wie die Festigkeitskennwerte aus diesen Verläufen abgeleitet werden.

4.2.1 Kraft-Weg-Verläufe

Jede Belastung führt zu einer Verformung der beanspruchten Probe. Diese Verformung kann reversibel (Probe nimmt nach Entlastung wieder ihre ursprüngliche Form an; elastische Verformung), irreversibel (Formänderung bleibt nach Entlastung der Probe erhalten; plastische Verformung) oder nur teilweise reversibel sein. Im Falle der elastischen Verformung besteht zwischen der Kraft und dem Weg ein linearer Zusammenhang, im Falle der plastischen oder teils plastischen Verformung besteht zwischen beiden Größen ein nicht proportionaler Zusammenhang (Bargel & Schulze, 2000). Abbildung 4.4 zeigt charakteristische Kraft-Weg-Verläufe der feuchten organischen Materialien Äpfel, Möhren und Kartoffeln bei uniaxialer Druckbeanspruchung. Für keines der drei Materialien besteht ein linearer Zusammenhang zwischen der von außen eingeleiteten Kraft und dem zurückgelegten Weg. Der Verlauf dieser Kurven ist materialspezifisch, der Widerstand gegen eine äußere Krafteinwirkung ist abhängig von der Zusammensetzung und Struktur der Materialien. Möhren leisten den größten Widerstand gegen die Beanspruchung, gefolgt von den Kartoffeln und schließlich den Äpfeln. Die zurückgelegten Wege l zum Erreichen der maximalen Kraft (l bis F_{\max}) sind für die Materialien unterschiedlich. Die maximale Widerstandskraft wird zuerst für Äpfel, gefolgt von den

Möhren und zuletzt für Kartoffeln erreicht. Die Koordinaten dieser maximalen Widerstandskräfte [entspricht dem jeweiligen Punkt mit der Beschriftung „ F_{\max} “ und mit den Koordinaten $F(F_{\max})$ und $l(F_{\max})$ der Kraft-Weg-Verläufe] werden zur Berechnung der Materialkenngrößen gemäß Gleichungen 3.5 und 3.6 herangezogen. Für die Schneid- und Scherversuche existieren vergleichbare Kraft-Weg-Verläufe zu den in Abbildung 4.4 dargestellten. Diese weisen ebenfalls die beschriebenen charakteristischen Merkmale auf, und die Bestimmung der Festigkeitswerte gemäß Gleichungen 3.7 und 3.8 erfolgte wie die hier beschriebene Bestimmung der maximalen Druckfestigkeit. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit werden in den entsprechenden Kapiteln Kraft-Weg-Verläufe bzw. die daraus abgeleiteten Spannungs-Dehnungs-Kurven vorgestellt und diskutiert.

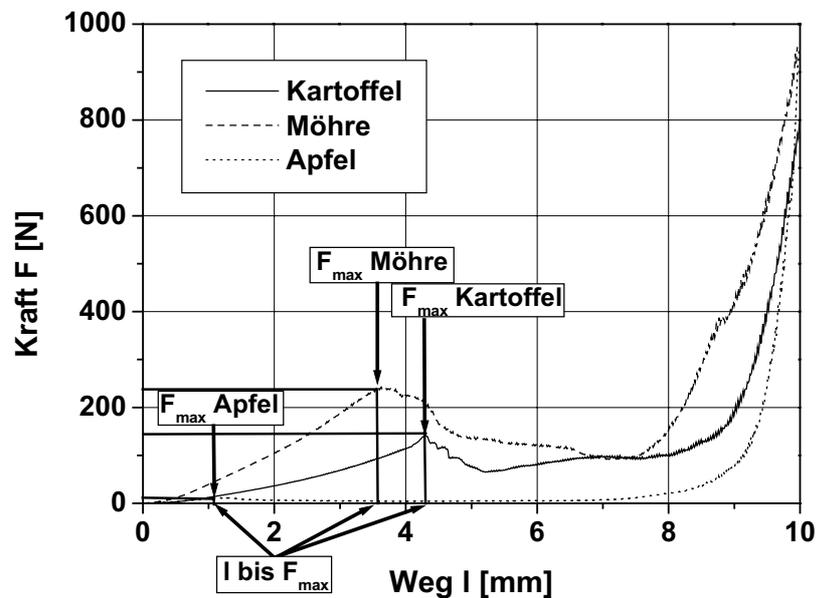


Abb. 4.4: Charakteristische Kraft-Weg-Verläufe der feuchten organischen Materialien Kartoffeln, Möhren (quer zur Materialfaserung) und Äpfeln am Beispiel der uniaxialen Druckbeanspruchung (Belastung bis zum maximal möglichen Weg von 10 mm). Die hier markierten maximalen Druckkräfte können infolge der Inhomogenitäten der Materialien von den Mittelwerten bei der Berechnung der maximalen Druckfestigkeiten abweichen.

Die Bestimmung der spezifischen Energie gemäß Gleichung 3.9 erfolgt durch Integration der Fläche zwischen dem Kraft-Weg-Verlauf und der Abszisse bis zu den Koordinaten der maximalen Widerstandskraft (entspricht der grauunterlegten Fläche in Abbildung 4.5). Den Energieeintrag bis zum Ende des gesamten Versuches erhält man gemäß Gleichung 3.9 durch Integration der gesamten Fläche von $l = 0$ mm bis $l = l_{\max}$ zwischen dem Kraft-Weg-Verlauf und der Abszisse. Diese Vorgehensweise verdeutlicht Abbildung 4.5.

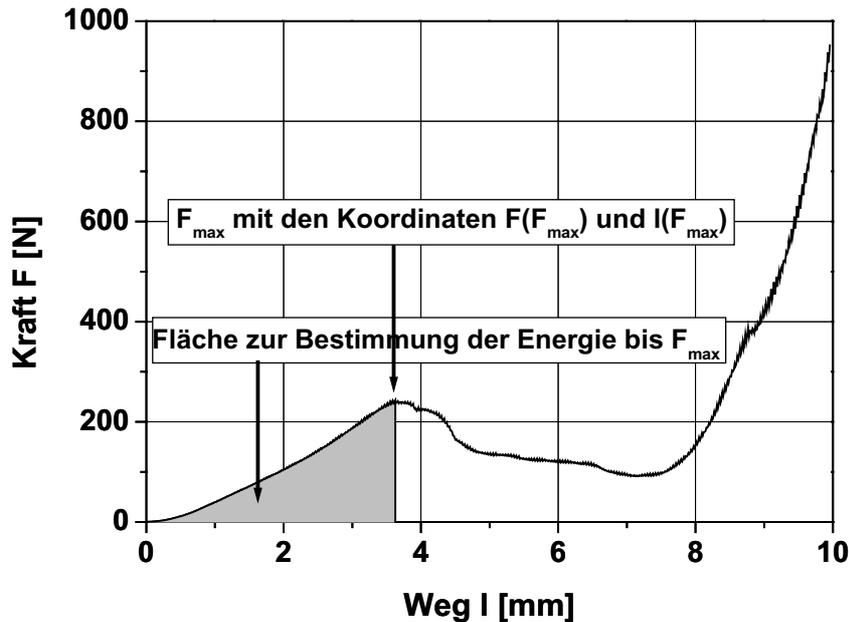


Abb. 4.5: Charakteristischer Kraft-Weg-Verlauf (einer Möhre, quer zur Materialfaserung) am Beispiel der uniaxialen Druckbeanspruchung (Belastung bis zum maximal möglichen Weg von 10 mm).

Die Kraft-Weg-Verläufe der trockenen organischen Materialien haben einen anderen Verlauf als die für feuchte organische Materialien. Charakteristische Verläufe der uniaxialen Druckversuche von Linsen, Reis, Mandeln und Sonnenblumenkernen sind in Abbildung 4.6 dargestellt. Die Kraft-Weg-Verläufe der beiden Materialien Reis und Linsen sowie die der beiden Materialien Mandeln und Sonnenblumenkerne ähneln sich in ihrem Aufbau. Bei Linsen und Reis steigt die Kraft mit dem zurückgelegten Weg schnell an, bis die maximale Widerstandskraft gegen die Druckbeanspruchung erreicht ist. Nach dem Bruch der Proben fällt die Kraft ab, um dann wieder anzusteigen, bis die Probe vollständig zusammengedrückt ist. Bei den fettreichen Materialien (Mandeln und Sonnenblumenkerne) steigt die Kraft – verglichen mit den Linsen und dem Reis – deutlich langsamer an. Bei den Mandeln nimmt die Kraft nach Erreichen der maximalen Widerstandskraft im Gegensatz zu den Sonnenblumenkernen wieder ab. Für letztere steigt die Kraft kontinuierlich bis zum Versuchsende an. Die Probe bricht nicht wie bei den anderen Materialien, sondern wird durch die Druckkraft eher gequetscht. Ein makroskopischer Bruch der Probe ist bei Sonnenblumenkernen nicht erkennbar. Verglichen mit den Verläufen in Abbildung 4.4 für feuchte organische Materialien ist das Maximum der Widerstandskraft bei trockenen organischen Materialien mit Ausnahme der Sonnenblumenkerne stärker ausgeprägt und wird bei kleineren zurückgelegten Wegen erreicht.

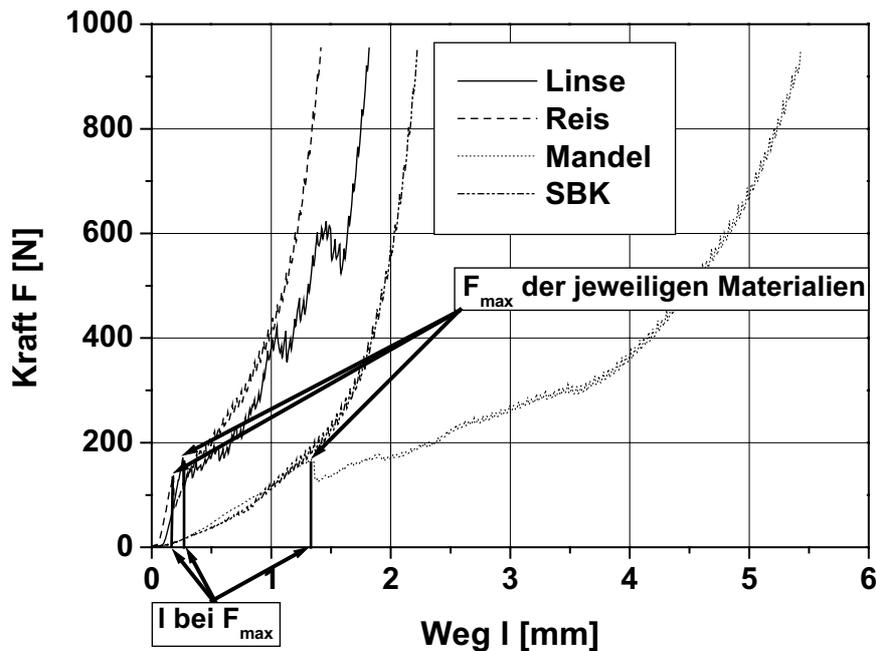


Abb. 4.6: Charakteristische Kraft-Weg-Verläufe der trockenen organischen Materialien Linsen, Reis, Mandeln und Sonnenblumenkerne am Beispiel der uniaxialen Druckversuche.

Aus diesen Ausführungen wird ersichtlich, daß die Kraft-Weg-Verläufe organischer Materialien materialabhängig sind und die charakteristischen Verläufe für die verschiedenen Materialien voneinander abweichen.

Aus den Kraft-Weg-Verläufen wurden die maximalen Materialkenngrößen gemäß Kapitel 3.3.2 berechnet. Diese Kenngrößen ermöglichen einen Vergleich der Materialien untereinander. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit werden die Materialien nur noch mit ihren gemäß Kapitel 3.3.2 bestimmten Kenngrößen beschrieben und verglichen.

4.2.2 Abgeleitete Kenngrößen organischer Materialien

In diesem Kapitel werden die Materialien bezüglich ihrer Festigkeitskennwerte beschrieben und verglichen. Wegen der in Kapitel 4.2.1 beschriebenen Unterschiede im Verhalten trockener und feuchter Materialien sind die folgenden Unterkapitel weiter unterteilt. Als weitere Einflußgröße wird dabei der Wassergehalt eingeführt, der gemäß Kapitel 2.2.3.3 einen maßgeblichen Einfluß auf die mechanischen Eigenschaften organischer Materialien hat.

4.2.2.1 Maximale Druckfestigkeit organischer Materialien

4.2.2.1.1 Feuchte Materialien

In Abbildung 4.7 sind die maximalen Druckfestigkeiten der feuchten organischen Materialien Äpfel, Kartoffeln und Möhren dargestellt, die gemäß Kapitel 4.2.1 (Abbildung 4.5) bestimmt wurden. Trotz ungefähr gleichen Trockenrück-

standes (vergleiche Tabelle 3.8) besitzen die drei feuchten organischen Materialien Äpfel, Kartoffeln und Möhren verschiedene maximale Druckfestigkeiten. Die größte Druckfestigkeit weisen die Möhren ($\omega_{\text{Druck,max}} = 2,06 \text{ N/mm}^2$), beansprucht quer zu ihrer Faserung, gefolgt von den Kartoffeln ($\omega_{\text{Druck,max}} = 1,48 \text{ N/mm}^2$), den Möhren, beansprucht längs zu ihrer Faserung ($\omega_{\text{Druck,max}} = 1,3 \text{ N/mm}^2$), und schließlich den Äpfeln ($\omega_{\text{Druck,max}} = 0,25 \text{ N/mm}^2$) auf. Der gro-

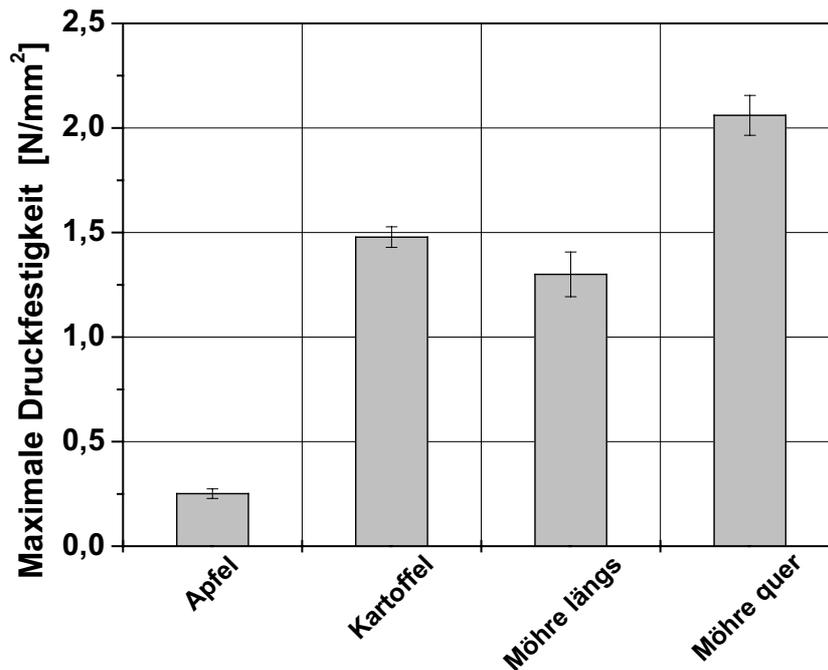


Abb. 4.7: Maximale Druckfestigkeiten $\omega_{\text{Druck,max}}$ [N/mm²] der feuchten organischen Materialien Äpfel, Kartoffeln und Möhren (beansprucht längs und quer zu ihrer Materialfaserung) (mit Vertrauensbereich für eine Wahrscheinlichkeit von $\zeta = 95 \%$ ^[1]).

ße Widerstand der Möhren ist auf den Cellulose- und Ligningehalt zurückzuführen. Möhren besitzen eine faserige Struktur mit den höchsten Cellulose- und Ligninanteilen der drei feuchten Materialien. Besonders der hohe Ligninanteil ist für den Widerstand gegen die Druckbeanspruchung verantwortlich, da sich das Lignin um die Cellulosefibrillen lagert (vergleiche Kapitel 2.1). Es verleiht den Möhren somit strukturelle Steifheit und mechanische Festigkeit. Somit haben die Möhren die größte Festigkeit der untersuchten feuchten organischen Materialien. Desweiteren besitzen Möhren eine anisotrope Struktur, so daß die mechanische Festigkeit von der Beanspruchungsrichtung abhängt. Die maximale Druckfestigkeit ist für die Beanspruchung quer

¹ Detaillierte Angaben zur Anzahl der Meßdaten, die zur Ermittlung des Vertrauensbereiches für diese sowie alle folgenden Abbildungen als Grundlage dienten, sind im Anhang angeführt.

zur Faserung höher als für die Beanspruchung längs zur Faserung. Die hohe Druckfestigkeit der Kartoffeln ist auf den hohen Stärkegehalt zurückzuführen. Stärke als Makromolekül ist in Verbindung mit Wasser (Wasserstoffbrückenbindungen, Clusterbildungen (Sontheimer et al., 1980)) in der Lage, das Materialgefüge zu vernetzen. Somit wird eine hohe mechanische Steifigkeit erreicht. Bei Äpfeln setzt sich der hohe Kohlenhydratgehalt überwiegend aus Mono- und Dimeren (wasserlösliche Zucker) zusammen (Fridley, Adrian, 1966). Diese sind aufgrund ihrer geometrischen Größe nicht in der Lage, die Materialstruktur zu vernetzen. Der niedrige Widerstand gegen die Druckbeanspruchung ist somit eine logische Konsequenz dieser Materialzusammensetzung.

Im Folgenden wird der Einfluß des Wassergehaltes auf die maximale Druckfestigkeit dieser Materialien diskutiert. Zunächst werden in Abbildung 4.8 beispielhaft für Möhren Spannungs-Dehnungs-Verläufe vorgestellt, die den Einfluß des Wassergehaltes auf diese charakteristischen Verläufe zeigen. Entsprechende Darstellungen für Äpfel sind dem Anhang (Abb. 7.2.1) zu entnehmen. Abbildung 4.8 zeigt, daß die Spannungs-Dehnungs-Verläufe vom einge-

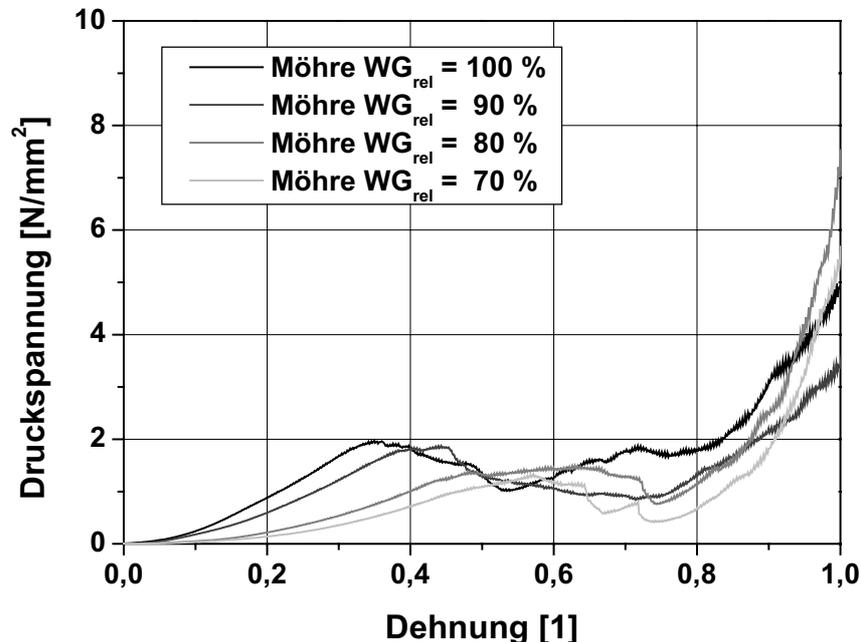


Abb. 4.8: Spannungs-Dehnungs-Verläufe für uniaxiale Druckversuche mit Möhren, beansprucht quer zur Faserung, für das unbehandelte Material ($WG_{rel} = 100\%$) und die verschiedenen Trocknungsstufen ($WG_{rel} < 100\%$) für eine Trocknungstemperatur von $T = 105\text{ °C}$.

stellten Wassergehalt der Möhren abhängen. Mit abnehmendem Wassergehalt verschiebt sich das Maximum (maximale Druckfestigkeit) zu größeren Dehnungen und wird betragsmäßig kleiner. Auch die Fläche unter der Spannungs-Dehnungs-Kurve wird ab einer Trocknung von mehr als 10 % kleiner, sowohl diejenige bis zur maximalen Druckfestigkeit als auch die Gesamtfläche bis Versuchsende ($\kappa = 1$).

Abbildung 4.9 zeigt die Abhängigkeit der maximalen Druckfestigkeit für Möhren und Äpfel vom Wassergehalt und der Trocknungstemperatur. Die Möhren wurden hier quer zu ihrer Faserung beansprucht. Die entsprechenden Zahlenwerte für die Möhren, beansprucht längs zur Materialfaserung, sind dem Anhang (Tab. 7.2.7) zu entnehmen. Unabhängig von der Trocknungstemperatur nimmt die maximale Druckfestigkeit mit abnehmendem Wassergehalt

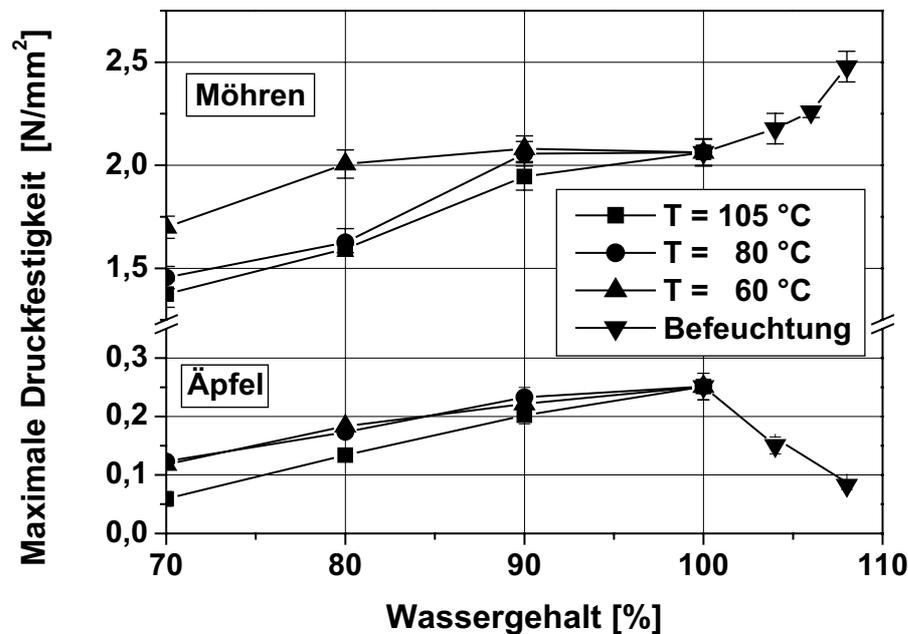


Abb. 4.9: Abhängigkeit der maximalen Druckfestigkeit $\omega_{\text{Druck,max}}$ [N/mm²] vom Wassergehalt [%] der organischen Materialien Möhren und Äpfel bei verschiedenen Trocknungstemperaturen (mit Vertrauensbereich für eine Wahrscheinlichkeit von $\zeta = 95\%$); Wassergehalt von 100% entspricht dem unbehandelten Ausgangsmaterial, Wassergehalt > 100 % entspricht der Befeuchtung und Wassergehalt < 100% entspricht der Trocknung.

durch die Auflockerung der Zellstruktur infolge des Wasserentzuges für beide Materialien ab. Bei Möhren nehmen die intermolekularen Wasserstoffbrückenbindungen zwischen der Cellulose und dem Wasser ab (vergleiche Kapitel 2.1). Die geordnete Struktur des Materials wird gestört. Die Folge ist eine Abnahme der maximalen Druckfestigkeit mit abnehmendem Wassergehalt. Bei den Äpfeln wird die Struktur infolge des Wasserentzuges noch deutlicher ge-

stört, da aufgrund des niedrigeren Cellulose- und Ligningehaltes die weniger vorhandenen intermolekularen Wasserstoffbrückenbindungen zwischen den Cellulosemolekülen nicht mehr ausreichen, um die Materialstruktur aufrechtzuerhalten. Der Widerstand gegen die Druckbeanspruchung wird für die Äpfel bei maximalem Wasserentzug (30 %) minimal.

Weiterhin zeigt Abbildung 4.9 den Einfluß der Trocknungstemperatur auf die maximale Druckfestigkeit von Möhren und Äpfeln. Für beide Materialien führt die Trocknung mit der niedrigsten Trocknungstemperatur ($T = 60\text{ °C}$) zur geringsten Abnahme des Materialwiderstandes gegen die Druckbeanspruchung. Der homogene Wasserentzug durch die niedrige Trocknungstemperatur führt zu einer gleichmäßigen Auflockerung der Materialstruktur über den gesamten Probenquerschnitt. Bei der höchsten Trocknungstemperatur ($T = 105\text{ °C}$) trocknet die Oberfläche der Proben dagegen stärker aus als das Probeninnere. Die Bildung einer Trocknungshaut an der Probenoberfläche und die damit verbundene ungleichmäßige Trocknung über den Probenquerschnitt bewirken eine größere Abnahme des Widerstandes gegen die äußere Druckkraft, da das Materialgefüge stärker und inhomogen gestört wird. Der Einfluß der Trocknung und der Trocknungstemperatur ist für beide Materialien gleich. Im Gegensatz hierzu ist das Materialverhalten von Möhren und Äpfeln bei einer Erhöhung des Wassergehaltes verschieden. Bei Möhren steigt die maximale Druckfestigkeit mit zunehmendem Wassergehalt, für Äpfel nimmt sie ab. Der unterschiedlich große Rohfasergehalt beider Materialien begründet dieses Materialverhalten. Der höhere Rohfasergehalt für Möhren bewirkt bei einer Erhöhung des Wassergehaltes eine Zunahme der mechanischen Steifigkeit infolge der wachsenden Anzahl an inter- und intramolekularen Wasserstoffbrückenbindungen. Zusätzlich wird die faserige Struktur durch die Clusterbildungen der polaren Wassermoleküle untereinander (Sontheimer et al., 1980) verstärkt. Bei den Äpfeln hingegen wird wahrscheinlich die Struktur durch die erhöhte Anzahl an Wassermolekülen geschwächt, da aufgrund des hohen Gehaltes an wasserlöslichen Zuckern die Struktur „aufgeweicht“ wird.

Die Abhängigkeit der maximalen Druckfestigkeit vom Wassergehalt für Kartoffeln ist in Abbildung 4.10 dargestellt. Die entsprechenden Spannungs-Dehnungs-Verläufe sind im Anhang (Abb. 7.2.2) aufgeführt. Bei Kartoffeln ist weder ein Einfluß des Wassergehaltes noch der Trocknungstemperatur auf die maximale Druckfestigkeit festzustellen. Dies ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, daß das Stärkegerüst der Kartoffeln in dem hier untersuchten Bereich des Wassergehaltes seine Struktur unabhängig vom Wassergehalt aufrechterhält. Stärke als Makromolekül ist durch ihre geometrische Ausdehnung

in der Lage, die Struktur zu vernetzen (vergleiche Kapitel 2.1). Auch durch einen Wasserentzug bis zu 30 % wird diese Struktur nicht beeinträchtigt.

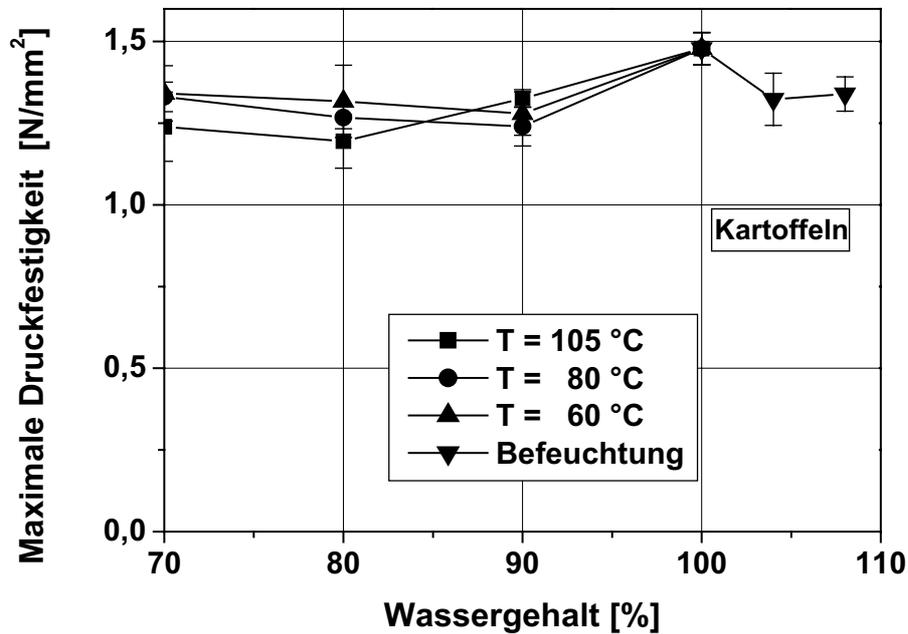


Abb. 4.10: Abhängigkeit der maximalen Druckfestigkeit $\omega_{\text{Druck,max}}$ [N/mm²] vom Wassergehalt [%] des organischen Materials Kartoffeln bei verschiedenen Trocknungstemperaturen (mit Vertrauensbereich für eine Wahrscheinlichkeit von $\zeta = 95\%$); Wassergehalt von 100 % entspricht dem unbehandelten Ausgangsmaterial, Wassergehalt > 100 % entspricht der Befeuchtung und Wassergehalt < 100% entspricht der Trocknung.

Den Einfluß des Wassergehaltes auf die Dehnung zum Erreichen der maximalen Druckfestigkeit für Möhren, Äpfel und Kartoffeln zeigt Abbildung 4.11 exemplarisch für eine Trocknungstemperatur von $T = 80\text{ °C}$. Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen dem Wassergehalt und der Dehnung zum Erreichen der maximalen Druckfestigkeit existiert nicht. Im Rahmen des 95-prozentigen Vertrauensbereiches streuen die Werte so, daß keine Abhängigkeit der Dehnung vom Wassergehalt festzustellen ist. Durch das Befeuchten und Trocknen der Proben wird nur die maximale Druckfestigkeit der Materialien beeinflusst, nicht jedoch die Dehnung zum Erreichen dieses Festigkeitskennwertes.

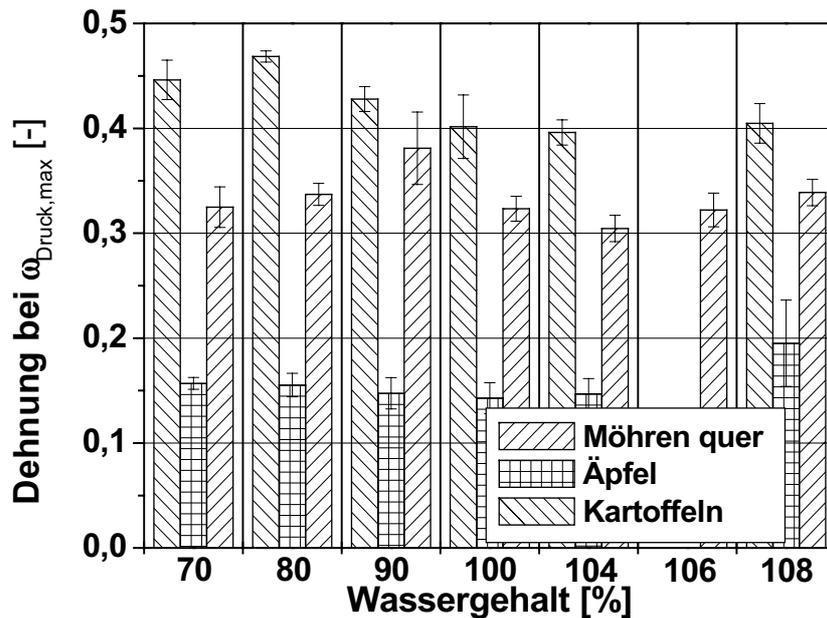


Abb. 4.11: Abhängigkeit der Dehnung [-] zum Erreichen der maximalen Druckfestigkeit $\omega_{\text{Druck,max}}$ [N/mm²] vom Wassergehalt [%] der organischen Materialien Möhren, Äpfel und Kartoffeln (mit Vertrauensbereich für eine Wahrscheinlichkeit von $\zeta = 95\%$); Wassergehalt von 100% entspricht dem unbehandelten Ausgangsmaterial, Wassergehalt >100 % entspricht der Befeuchtung und Wassergehalt < 100% entspricht der Trocknung (T-Temperatur T = 80 °C).

In Abbildung 4.12 ist der Einfluß des Wassergehaltes auf die spezifische Energie – zum Erreichen der maximalen Druckfestigkeit – dargestellt. Die Trocknungsenergie zum Erreichen der jeweiligen Wassergehalte ist nicht berücksichtigt. Bei beiden Materialien nimmt der spezifische Energieeintrag zum Erreichen der maximalen Druckfestigkeit mit abnehmendem Wassergehalt ab (bei Möhren erst ab $WG_{\text{rel}} < 90\%$). Dies korreliert mit dem in Abbildung 4.9 dargestellten Zusammenhang zwischen der maximalen Druckfestigkeit und dem Wassergehalt für Trocknungen von mehr als 10 %. Auch die Zunahme für Möhren und die Abnahme des Energieeintrages für Äpfel bei der Befeuchtung korrelieren mit den in Abbildung 4.9 dargestellten Zusammenhängen. Infolge der Abnahme der maximalen Druckfestigkeit beider Materialien mit abnehmendem Wassergehalt ist ein niedriger Energieaufwand ausreichend, um diese charakteristische Materialkenngröße zu erreichen. Demnach nimmt der spezifische Energieeintrag für beide Materialien mit abnehmendem Wassergehalt ab und steigt für Möhren mit steigendem Wassergehalt, während er für Äpfel auch mit steigendem Wassergehalt abnimmt. Die Zunahme für Möhren bei einer 10-prozentigen Trocknung ist nicht erklärbar und kann nur auf Schwankungen der Kraft-Weg-Verläufe infolge der Inhomogenität pflanzlicher

organischer Materialien zurückgeführt werden. Auch der 95-prozentige Vertrauensbereich weist für Möhren, getrocknet um 10 %, die größten Schwankungen auf. Ein signifikanter Einfluß der Trocknungstemperatur ist nicht festzustellen.

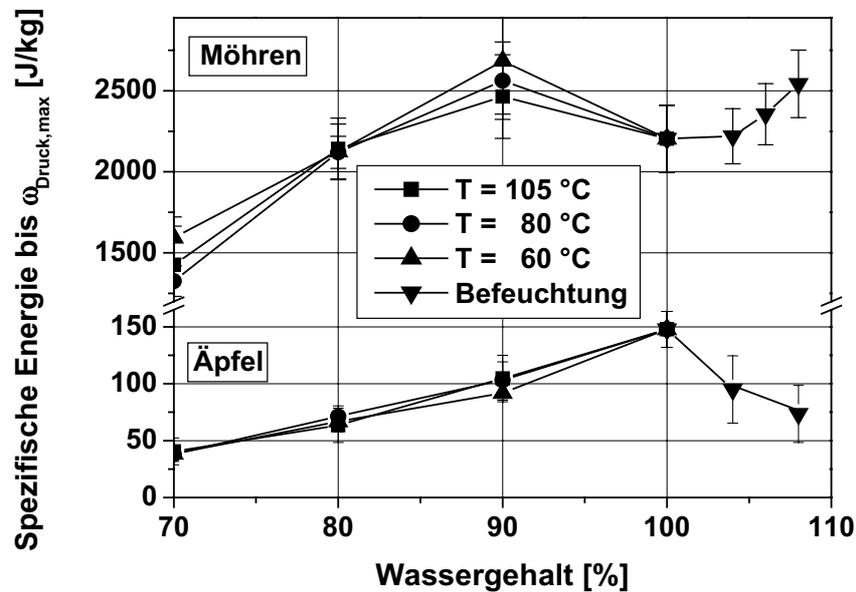


Abb. 4.12: Abhängigkeit der spezifischen Energie E_{Spez} [J/kg] zum Erreichen der maximalen Druckfestigkeit vom Wassergehalt [%] der organischen Materialien Möhren und Äpfel bei verschiedenen Trocknungstemperaturen (mit Vertrauensbereich für eine Wahrscheinlichkeit von $\zeta = 95$ %); Wassergehalt von 100% entspricht dem unbehandelten Ausgangsmaterial, Wassergehalt > 100 % entspricht der Befeuchtung und Wassergehalt < 100% entspricht der Trocknung.

Für Kartoffeln (Zahlenwerte siehe Anhang, Tab. 7.2.11) bleibt der spezifische Energieeintrag zum Erreichen der maximalen Druckfestigkeit mit abnehmendem Wassergehalt nahezu konstant. Lediglich der spezifische Energieeintrag bis Versuchsende ($\kappa = 1$) nimmt durch den Wasserentzug ab: die getrockneten Proben leisten nämlich mit zunehmender Trocknung nach Erreichen der maximalen Druckfestigkeit immer weniger Widerstand gegen die weitere Druckbeanspruchung infolge der abnehmenden Wechselwirkungen zwischen den Stärke- und Wassermolekülen nach dem Bruch der Probe (vergleiche Spannungs-Dehnungs-Verläufe im Anhang, Abb. 7.2.2).

Abbildung 4.13 zeigt optische Aufnahmen eines uniaxialen Druckversuches mit einer Apfelprobe für das unbehandelte Ausgangsmaterial (Bilderreihe oben) und für das 30 prozentig getrocknete Material (Bilderreihe unten). Entsprechende Aufnahmen wurden auch für uniaxiale Druckversuche mit Möhren und Kartoffeln angefertigt. Der prinzipielle Verlauf entspricht den hier vorgestellten Aufnahmen für Äpfel. Die obere Bilderreihe zeigt 4 Fotos eines unia-

xialen Druckversuches mit Äpfeln in zeitlicher Abfolge von links nach rechts. Auf dem zweiten Foto ist der Beginn der Zellsaftfreisetzung infolge der äußeren Druckkraft zu sehen. In Bild 3 hat sich gerade der makroskopische Bruch ausgebildet. Die Probe bricht in einem 45° Winkel zur Beanspruchungsrichtung. Foto 4 zeigt, wie sich die geteilten Bruchstücke unter der stetig zunehmenden Druckkraft auseinanderschieben. Die untere Bilderreihe zeigt, daß

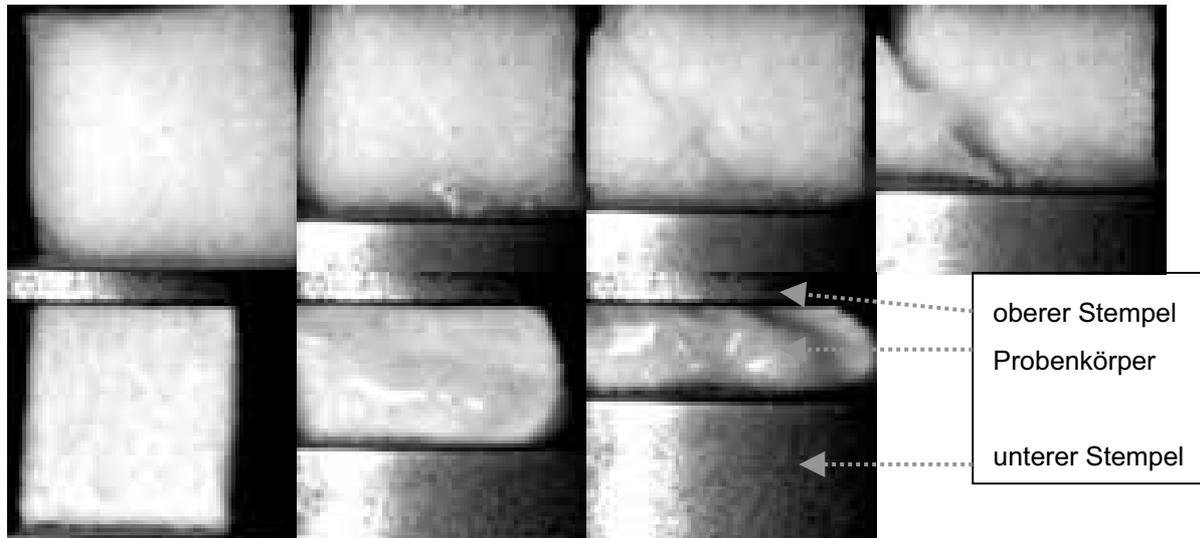


Abb. 4.13: Optische Aufnahmen eines uniaxialen Druckversuches mit Äpfeln. Obere Bilderreihe: unbehandeltes Ausgangsmaterial ($WG_{rel} = 100\%$), Ausgangsprobenhöhe: 10 mm; untere Bilderreihe: 30 prozentig getrocknetes Material ($WG_{rel} = 70\%$), Ausgangsprobenhöhe: ca. 8,5 mm.

das Materialverhalten auf die uniaxiale Druckbeanspruchung mit abnehmendem Wassergehalt verändert ist. Infolge der äußeren Druckkraft beult die Probe nach außen aus; verglichen mit den Aufnahmen für das unbehandelte Material erkennt man, daß die Zellsaftfreisetzung erst für größere Dehnungen eintritt und daß die Probe für große Dehnungen eher zusammengequetscht wird ohne sichtbaren makroskopischen Bruch.

4.2.2.1.2 Trockene Materialien

Abbildung 4.14 zeigt die die Spannungs-Dehnungs-Verläufe der trockenen organischen Materialien (unbehandelt). Die entsprechenden Kraft-Weg-Verläufe sind im Anhang (Abb. 7.2.3) dargestellt. Es ist ersichtlich, daß für Reis die maximale Druckfestigkeit bei der niedrigsten Dehnung erreicht wird, gefolgt von den Linsen und schließlich den Mandeln. Da für Sonnenblumenkerne kein ausgeprägtes Maximum im Spannungs-Dehnungs-Verlauf existiert, wurde die maximale Druckfestigkeit in Anlehnung an Palmowski (2000) bei einer Dehnung von 0,5 festgelegt. Man kann Abbildung 4.14 weiterhin entnehmen, daß die Verläufe der beiden trockenen spröden Materialien Reis und Linsen einen sehr ähnlichen Verlauf haben, nur daß das Spannungsniveau bei Reis höher verläuft. Der Verlauf der fettreichen Mandeln hingegen verläuft ganz anders.

Das maximale Spannungsniveau ist wesentlich niedriger und wird erst für größere Dehnungen erreicht; außerdem ist der Spannungsanstieg nach Erreichen der maximalen Druckfestigkeit wesentlich schwächer ausgeprägt. Die maximalen Druckfestigkeiten der trockenen organischen Materialien (unbehandelt)

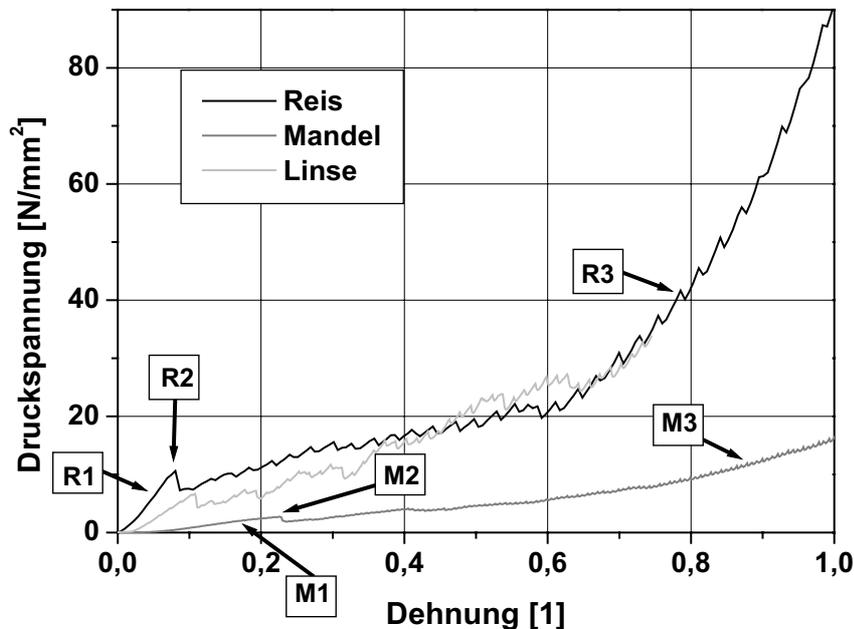


Abb. 4.14: Spannungs-Dehnungs-Verläufe für uniaxiale Druckversuche mit Reis, Linsen und Mandeln. Die Markierungen R1, R2, R3, M1, M2 und M3 kennzeichnen den jeweiligen Beanspruchungszustand, zu dem die optischen Aufnahmen der Abbildung 4.18 gehören.

Linsen, Reis, Mandeln und Sonnenblumenkerne sind in Abbildung 4.15 dargestellt. Reis weist von den trockenen Materialien die höchste maximale Druckfestigkeit auf ($\omega_{\text{Druck,max}} = 12,05 \text{ N/mm}^2$), gefolgt von den Linsen ($\omega_{\text{Druck,max}} = 6,23 \text{ N/mm}^2$), den Sonnenblumenkernen ($\omega_{\text{Druck,max}} = 3,56 \text{ N/mm}^2$) und schließlich den Mandeln ($\omega_{\text{Druck,max}} = 2,85 \text{ N/mm}^2$). Reis hat einen sehr hohen Kohlenhydratgehalt, der sich überwiegend aus Stärke zusammensetzt. Dies führt zu einer geringen Verformbarkeit dieses Materials. Das Material bricht unter der Druckbeanspruchung in Form eines Mischbruches parallel zur Beanspruchungsrichtung. Durch den niedrigeren Kohlenhydratgehalt in Verbindung mit einem höheren Proteingehalt ist die Druckfestigkeit der Linsen geringer. Die niedrigeren Werte für Mandeln und Sonnenblumenkerne sind mit dem hohen Fettgehalt erklärbar. Die höhere Druckfestigkeit der Sonnenblumenkerne ist auf den wesentlich höheren Rohfasergehalt dieser zurückzuführen bei ungefähr gleichem Fettgehalt.

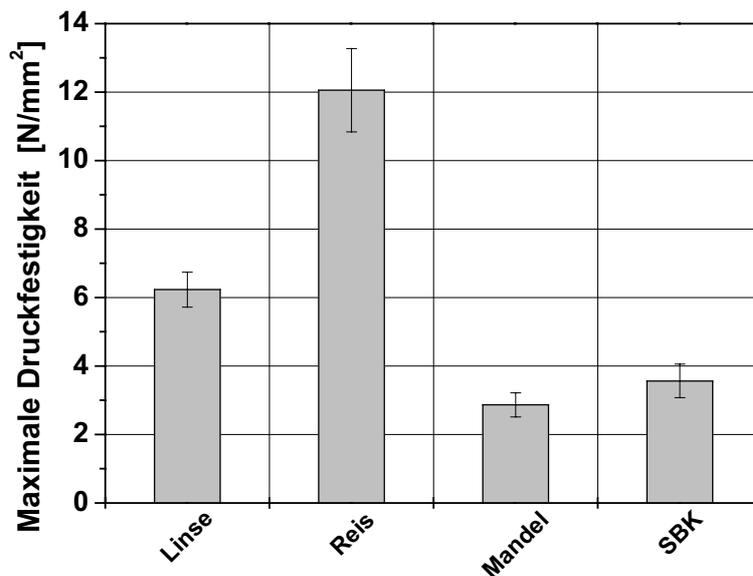


Abb. 4.15: Maximale Druckfestigkeiten $\sigma_{\text{Druck,max}}$ [N/mm²] der trockenen organischen Materialien Linsen, Reis, Mandeln und Sonnenblumenkerne (mit Vertrauensbereich für eine Wahrscheinlichkeit von $\zeta = 95\%$).

Die Abhängigkeit vom Wassergehalt und der Trocknungstemperatur dieser Materialien wird im folgenden dargestellt. Wegen des ähnlichen Materialverhaltens der Linsen und des Reises (vergleiche Abb. 4.14) bzw. der Mandeln und Sonnenblumenkerne wird in den folgenden Abbildungen nur jeweils eines der beiden Materialien dargestellt. Die Zahlenwerte der fehlenden Materialien sind im Anhang aufgeführt. Abbildung 4.16 zeigt die Abhängigkeit der maximalen Druckfestigkeit vom Wassergehalt für trockene organische Materialien. Die korrespondierenden Kraft-Weg-Verläufe sind im Anhang für Reis und Mandeln (Abb. 7.2.4) dargestellt. Für beide Materialien hat die Variation des Wassergehaltes einen großen Einfluß auf die maximale Druckfestigkeit. Mit abnehmendem Wassergehalt, also mit Zunahme der Trocknungszeit, wird der Widerstand beider Materialien gegen die Druckbeanspruchung kleiner. Mit zunehmender Trocknungsdauer reagieren beide Materialien spröder auf die äußere Druckkraft. Der Bruch der Proben erfolgt schon bei Aufprägung niedriger äußerer Druckkräfte. Das zunehmend sprödere Materialverhalten mit zunehmender Trocknung wird durch Abbildung 4.16 ebenfalls bestätigt.

Auch mit zunehmendem Wassergehalt, also mit Zunahme der Befeuchtungszeit, nimmt die maximale Druckfestigkeit der trockenen organischen Materialien ab. Dieser Sachverhalt ist mit dem Aufweichen der Materialien durch die Wässerung zu erklären. Desweiteren verlieren die Rohfaseranteile der Materialien durch das Aufquellen an struktureller Stabilität. Im Gegensatz zur Trocknung, bei der die Abnahme der maximalen Druckfestigkeit mit einer Ab-

nahme der Dehnung zu deren Erreichen einhergeht, wird die maximale Druckfestigkeit bei der Befeuchtung trockener organischer Materialien bei größeren Dehnungen erzielt.

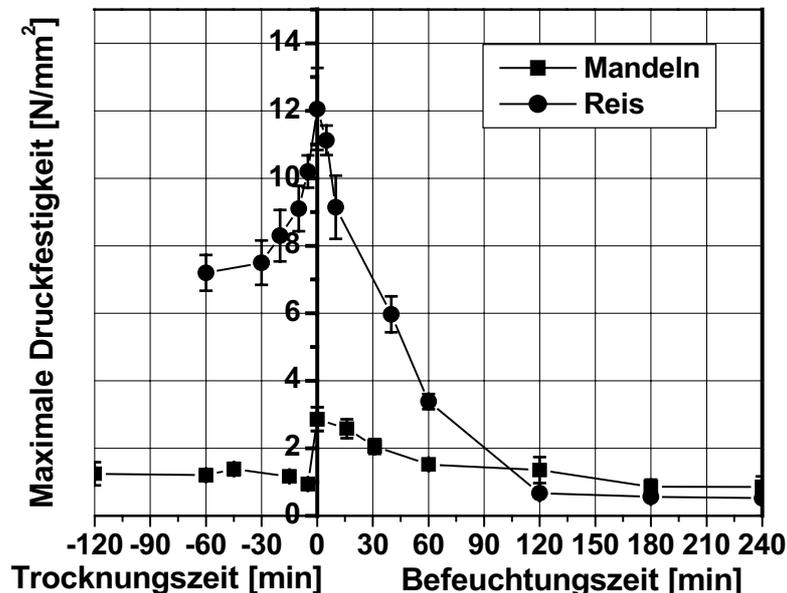


Abb. 4.16: Maximale Druckfestigkeiten $\omega_{\text{Druck,max}}$ [N/mm²] der trockenen organischen Materialien Reis und Mandeln (mit Vertrauensbereich für eine Wahrscheinlichkeit von $\zeta = 95\%$) als Funktion des Wassergehaltes (hier als Parameter die Trocknungs- bzw. Befeuchtungszeit [min]).

Die Abhängigkeit der Dehnung – zum Erreichen der maximalen Druckfestigkeit – für trockene organische Materialien vom Wassergehalt ist in Abbildung 4.17 am Beispiel der Mandeln dargestellt. Die Abweichungen der Vertrauensbereiche vom Mittelwert sind auf die natürlichen Inhomogenitäten der Materialien zurückzuführen. Aber trotz dieser Abweichungen zeigt Abbildung 4.17 tendenziell das Ansteigen der Dehnung zum Erreichen der maximalen Druckfestigkeiten für die Befeuchtung und die Abnahme bei der Trocknung. Dieses Verhalten wurde bei allen trockenen organischen Materialien gefunden. Demnach verhalten sich trockene organische Materialien bei einer uniaxialen Druckbeanspruchung mit abnehmendem Wassergehalt zunehmend spröder. Die Zunahme der Dehnung bei der Befeuchtung ist darauf zurückzuführen, daß zunächst das zusätzlich aufgenommene Wasser durch die äußere Druckkraft aus der beanspruchten Probe gepreßt wird und erst anschließend die Spannungen in der Probe ausreichen, um einen Bruch der Probe zu bewirken.

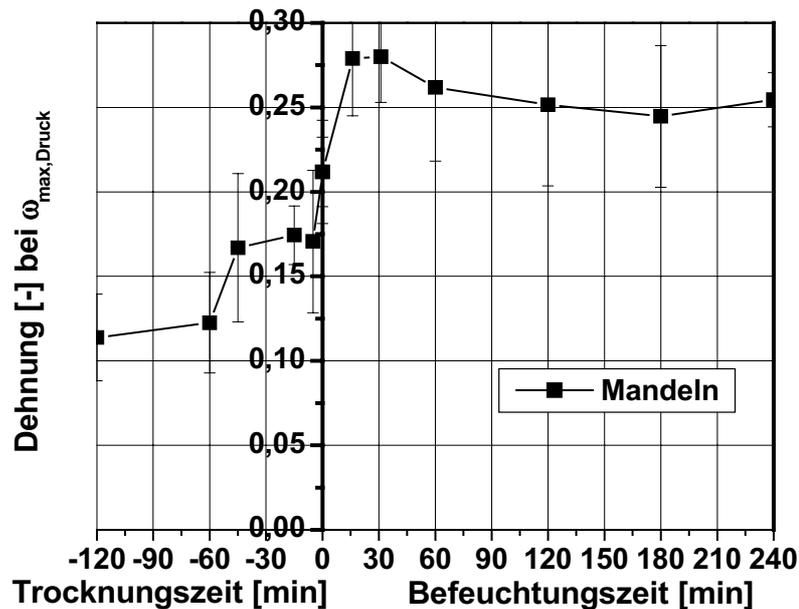


Abb. 4.17: Dehnung [-] bei $\omega_{\text{Druck,max}}$ [N/mm²] des trockenen organischen Materials Mandeln (mit Vertrauensbereich für eine Wahrscheinlichkeit von $\zeta = 95\%$) als Funktion des Wassergehaltes (hier als Parameter die Trocknungs- bzw. Befeuchtungszeit [min]).

Abbildungen 4.18 und 4.19 zeigen Bilderreihen. Es werden nur optische Aufnahmen der uniaxialen Druckversuche mit Mandeln und Reis (unbehandelt) dargestellt. Auf eine Darstellung der getrockneten Proben wird im Rahmen dieses Kapitels verzichtet, da keine grundlegenden Unterschiede für diese Versuche vorhanden sind.



Abb. 4.18: Optische Aufnahmen eines uniaxialen Druckversuches mit Reis (unbehandelt).

Abbildung 4.18 zeigt in zeitlicher Reihenfolge von links nach rechts drei typische Bereiche eines uniaxialen Druckversuches mit Reis. Die linke Aufnahme zeigt das Reiskorn kurz vor Erreichen der maximalen Druckfestigkeit (entspricht der Markierung R1 in Abbildung 4.14). Es sind noch keine makroskopischen Veränderungen an der Probe zu erkennen. Das mittlere Bild zeigt den Bruch des Reiskornes unter der Druckbelastung (entspricht der Markierung R2 in Abbildung 4.14). Wie schon erwähnt, pflanzt sich der Riß in Beanspruchungsrichtung durch die Probe fort. Das rechte Bild zeigt, daß die Probe – nach Überschreiten der maximalen Druckfestigkeit – unter weiterer, stetig zu-

nehmender Druckbelastung in mehrere kleinere Partikel bricht (entspricht der Markierung R3 in Abbildung 4.14).

Nach Abbildung 4.19 weisen Mandeln ein anderes Bruchverhalten bei der uniaxialen Druckbeanspruchung auf. Dies korreliert mit den in Abbildung 4.14 dargestellten Spannungs-Dehnungs-Verläufen. Die Aufnahme links zeigt die beanspruchte Mandel unmittelbar vor Erreichen der maximalen Druckfestigkeit (entspricht der Markierung M1 in Abbildung 4.14). Wie bei Reis können auch bei Mandeln bis zu diesem Zeitpunkt der Beanspruchung keine makroskopischen Veränderungen festgestellt werden. Die nächste Aufnahme zeigt die Mandel im Moment der maximalen Druckfestigkeit (entspricht der Markierung M2 in Abbildung 4.14). Parallel zur Beanspruchungsrichtung entsteht ein Riß, der sich mit hoher Geschwindigkeit durch die gesamte Mandel fortpflanzt. Eine weiterführende Druckbeanspruchung bewirkt ein Auseinandertriften der beiden

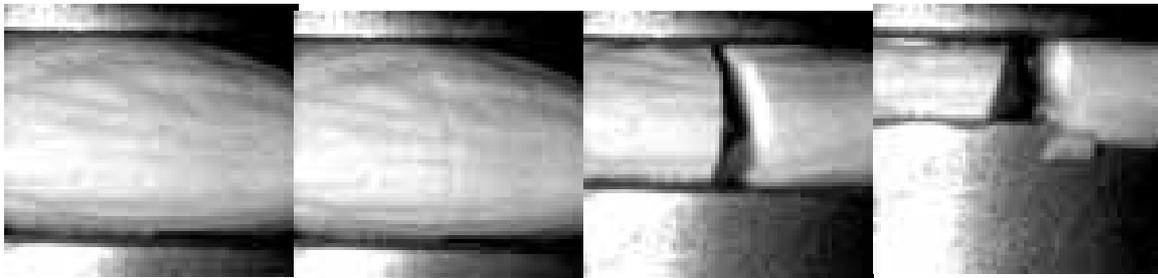


Abb. 4.19: Optische Aufnahmen eines uniaxialen Druckversuches mit Mandeln (unbehandelt).

Mandelteilstücke infolge der ersten Ölfreisetzung (3. Bild) [entspricht der Markierung M3 in Abbildung 4.14]. Erst gegen Ende der Druckbeanspruchung wird schließlich vermehrt Mandelöl freigesetzt und die Mandel wird komplett zusammengedrückt.

4.2.2.2 Maximale Schneidfestigkeit organischer Materialien

4.2.2.2.1 Feuchte Materialien

Abbildung 4.20 zeigt die Spannungs-Dehnungs-Verläufe der feuchten organischen Materialien (unbehandelt). Die entsprechenden Kraft-Weg-Verläufe sind im Anhang (Abb. 7.2.5) dargestellt. Demnach haben die Spannungs-Dehnungs-Verläufe für Möhren und Kartoffeln einen ähnlichen Verlauf, lediglich das Spannungsniveau ist unterschiedlich. Die Anisotropie der Möhren ist deutlich zu erkennen. Lediglich der Verlauf der Äpfel unterscheidet sich grundlegend. Die maximale längenbezogene Schneidkraft wird erst für höhere Dehnungen erreicht, und das maximale Spannungsniveau ist wesentlich weniger deutlich ausgeprägt als für die übrigen untersuchten feuchten organischen Materialien.

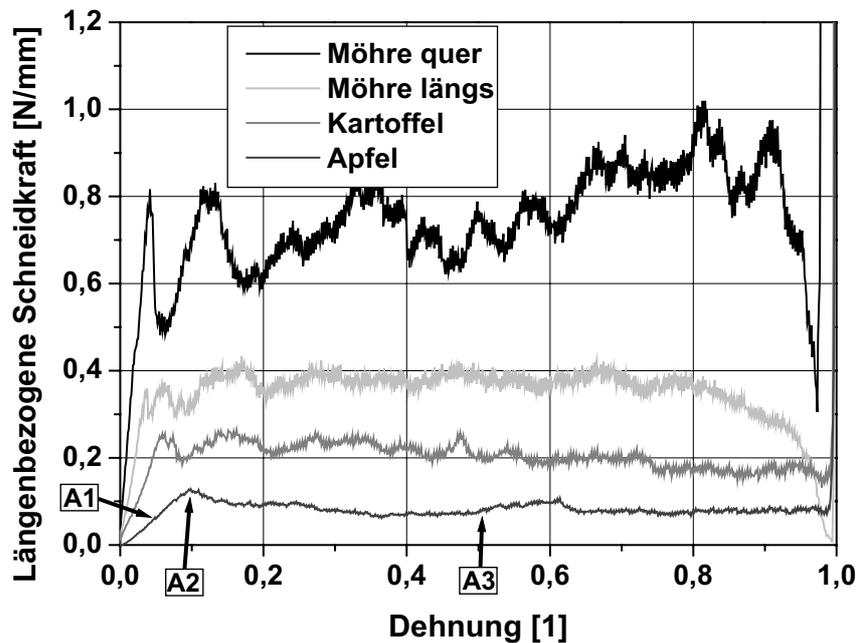


Abb. 4.20: Spannungs-Dehnungs-Verläufe für Schneidversuche mit Möhren, Kartoffeln und Äpfeln (unbehandelt). Die Markierungen A1 bis A3 kennzeichnen den jeweiligen Beanspruchungszustand, zu dem die optischen Aufnahmen der Abbildung 4.22 gehören.

In Abbildung 4.21 sind die maximalen längenbezogenen Schneidfestigkeiten dieser feuchten organischen Materialien dargestellt. Wie bei den maximalen Druckfestigkeiten weisen die Möhren, beansprucht quer zu ihrer Materialfaserung, auch bei der Schneidbeanspruchung den größten Materialwiderstand gegen die Beanspruchung auf ($F_{L,Schneid,max} = 0,731 \text{ N/mm}$), gefolgt von den Möhren, beansprucht längs zu ihrer Materialfaserung ($F_{L,Schneid,max} = 0,406 \text{ N/mm}$), den Kartoffeln ($F_{L,Schneid,max} = 0,2122 \text{ N/mm}$) und schließlich den Äpfeln ($F_{L,Schneid,max} = 0,1018 \text{ N/mm}$). Die Rangfolge zeigt auch deutlich die Anisotropie der Möhren. Zum Durchschneiden der Möhrenproben in Querrichtung sind höhere Kräfte erforderlich als in Längsrichtung, bei der das Messer parallel zur Längsrichtung der Zellverbände geführt wird. Eine Spaltwirkung des Messers kann daraus aber nicht abgeleitet werden, obwohl das Material bevorzugt entlang der Grenze zwischen den Zellen aufgetrennt wird.

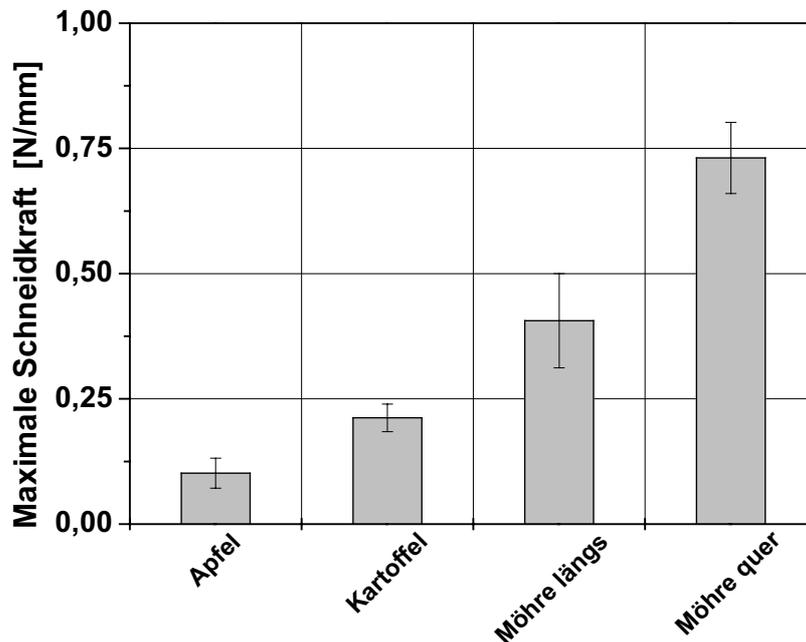


Abb. 4.21: Maximale längenbezogene Schneidkraft $F_{L,Schneid,max}$ [N/mm] der feuchten organischen Materialien Äpfel, Kartoffeln und Möhren (beansprucht längs und quer zu ihrer Materialfaserung) (mit Vertrauensbereich für eine Wahrscheinlichkeit von $\zeta = 95\%$).

Die optischen Aufnahmen der Schneidversuche am Beispiel der Äpfel in Abbildung 4.22 zeigen keine Rißfortpflanzung vor der Klinge des Messers. Auch bei den Kartoffeln, den Möhren, beansprucht quer sowie längs zur Faserung, konnten keine Rißfortpflanzungen beobachtet werden. Folglich kann von einer

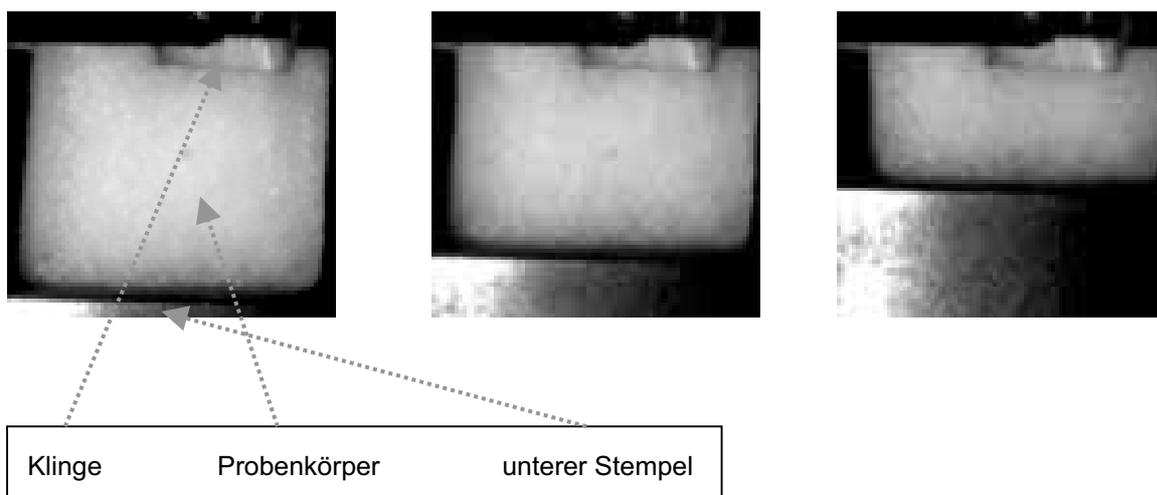


Abb. 4.22: Optische Aufnahmen eines Schneidversuches mit Äpfeln (unbehandelt) (Ausgangshöhe des Materials: 10 mm). Die zu den Bildern gehörigen Bereiche des Spannungs-Dehnungs-Verlaufes sind in Abbildung 4.20 mit A1, A2 und A3 markiert. Die Aufnahme erfolgte von schräg vorne. Der schon von der Klinge zerteilte Bereich des Probenkörpers wird durch die Einspannvorrichtung des Cuttermessers verdeckt.

reinen Schneidbeanspruchung ausgegangen werden. Die Flanken des Cuttermessers bleiben bis zur Trennung der Probe am Versuchsende in Kontakt mit dem Material. Die maximalen Schneidkräfte der unbehandelten feuchten organischen Materialien hängen nicht davon ab, ob das Cuttermesser vor Versuchsbeginn mit Öl benetzt wurde. Daraus folgt, daß Reibungseinflüsse zwischen dem Material und den Flanken des Cuttermessers bei unbehandelten feuchten organischen Materialien vernachlässigt werden können.

Abbildung 4.23 zeigt den Einfluß des Wassergehaltes auf den Verlauf der Spannungs-Dehnungs-Diagramme am Beispiel der Möhren, beansprucht quer

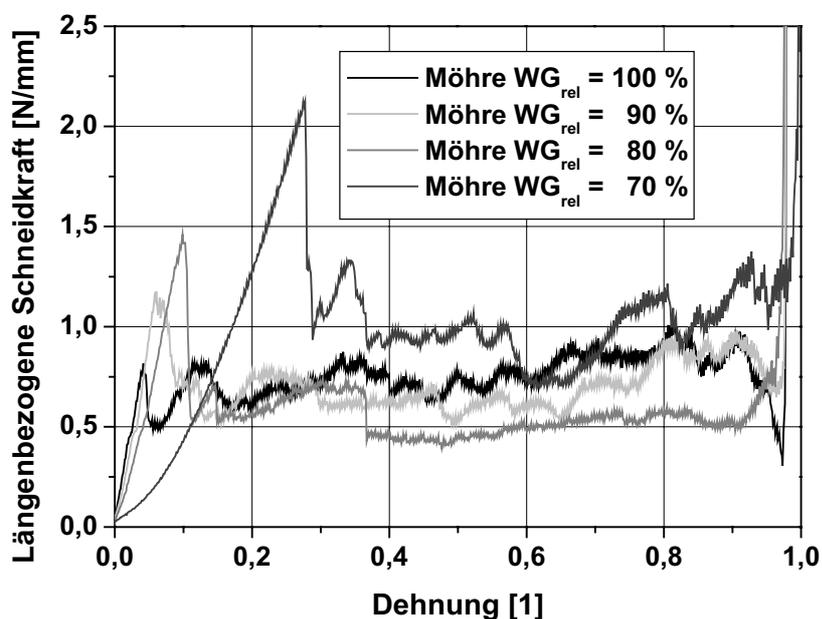


Abb. 4.23: Spannungs-Dehnungs-Verläufe für Schneidversuche mit Möhren, beansprucht quer zur Faserung, für das unbehandelte Material ($WG_{rel} = 100\%$) und die verschiedenen Trocknungsstufen ($WG_{rel} < 100\%$) für eine Trocknungstemperatur von $T = 105\text{ °C}$.

zur Faserung. Es ist ersichtlich, daß mit abnehmendem Wassergehalt das Spannungsniveau bis zum Erreichen der maximalen längenbezogenen Schneidkraft steigt und die maximale Schneidkraft zu größeren Dehnungen hin verschoben wird. Die korrespondierenden Kraft-Weg-Verläufe für Äpfel befinden sich im Anhang (Abb. 7.2.6). Den Einfluß des Wassergehaltes und der Trocknungstemperatur auf die maximale längenbezogene Schneidkraft zeigt Abbildung 4.24 exemplarisch für Äpfel und Möhren, beansprucht quer zu ihrer Materialfaserung. Die entsprechenden Zahlenwerte für Kartoffeln und Möhren, beansprucht längs zu ihrer Materialfaserung, sind im Anhang aufgelistet (Tabelle 7.2.14). Nach Abbildung 4.24 beeinflussen die Abnahme des Wassergehaltes und die dabei eingestellte Trocknungstemperatur die maximale

Schneidfestigkeit der feuchten, organischen Materialien gleichermaßen. Mit abnehmendem Wassergehalt nimmt die maximale Schneidfestigkeit der feuchten Materialien zu. Desweiteren führt die höchste Trocknungstemperatur ($T = 105 \text{ }^\circ\text{C}$) bei allen drei Materialien zum größten Materialwiderstand gegen die Schneidbeanspruchung. Das Verhalten der Äpfel und Möhren bei der Schneidbeanspruchung ist umgekehrt proportional zum Verhalten bei der Druckbeanspruchung. Bei diesen Versuchen führte eine Abnahme des Wassergehaltes zu einer Reduktion der maximalen Druckfestigkeiten und die niedrigste Trocknungstemperatur zum größten Materialwiderstand (vergleiche Kapitel 4.2.2.1.1). Dies stellt keinen Widerspruch dar. Die Zunahme des Widerstandes gegen die Schneidbeanspruchung ist damit zu erklären, daß die

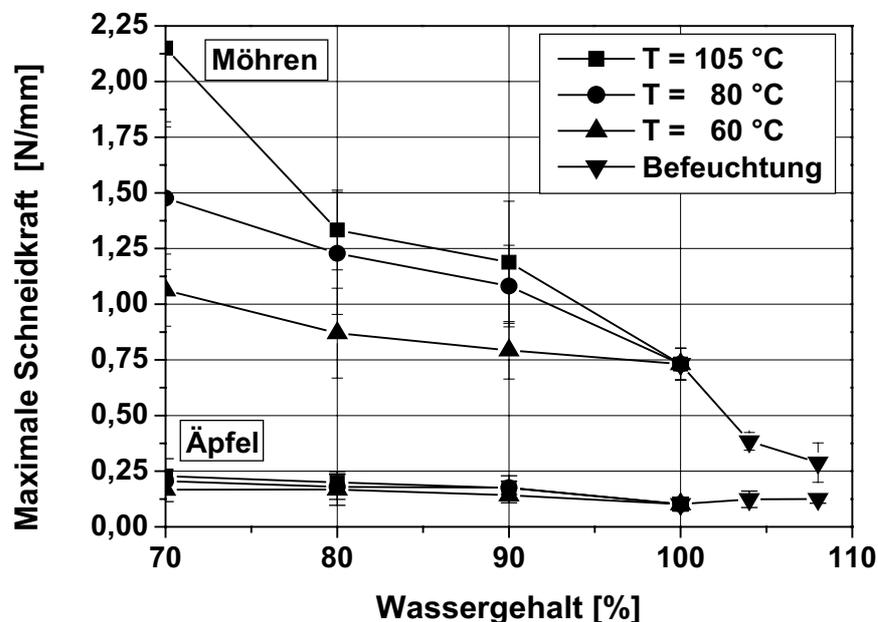


Abb. 4.24: Abhängigkeit der maximalen längenbezogenen Schneidkraft $F_{L, \text{Schneid}, \text{max}}$ [N/mm] vom Wassergehalt [%] der organischen Materialien Möhren, beansprucht quer zur Materialfaserung, und Äpfeln bei verschiedenen Trocknungstemperaturen (mit Vertrauensbereich für eine Wahrscheinlichkeit von $\zeta = 95 \%$); Wassergehalt von 100% entspricht dem unbehandelten Ausgangsmaterial, Wassergehalt $> 100 \%$ entspricht der Befeuchtung und Wassergehalt $< 100\%$ entspricht der Trocknung.

Abnahme des Wassergehaltes eine zunehmende Verkrustung der Materialstrukturen bewirkt und der schmale Bereich, in den das Messer eindringt, dadurch zunehmend verfestigt wird. Die maximale Schneidfestigkeit nimmt dementsprechend zu. Ein weiterer Effekt könnte darauf beruhen, daß durch die Abnahme des Wassergehaltes die Gleiteigenschaften des Materials an den Flanken des Cuttermessers abnehmen und der Widerstand zwischen Versuchsmaterial und Messerflanke abnimmt, wenngleich Vergleichsmessungen

mit einer vor Versuchsbeginn mit Öl benetzten Klinge keine signifikanten Einflüsse auf die maximale längenbezogene Schneidkraft ergaben. Diesbezüglich wären weitere systematische Untersuchungen sinnvoll.

Der zunehmende Materialwiderstand mit steigender Trocknungstemperatur ist auf die zunehmend inhomogenere Trocknung der Materialien und die damit verbundene verstärkte Bildung einer „gummiartigen“ Trocknungshaut an der Oberfläche der Probenkörper als Erklärung dieses Phänomens zurückzuführen.

Auch das Materialverhalten bei der Befeuchtung verläuft für beide Materialien umgekehrt proportional zu den Ergebnissen der uniaxialen Druckversuche. Für Möhren nimmt die maximale Schneidfestigkeit mit zunehmendem Wassergehalt ab und für Äpfel, unter Berücksichtigung des 95-prozentigen Vertrauensbereiches, tendentiell geringfügig zu. Beide Materialien quellen aufgrund der Erhöhung des Wassergehaltes auf. Die Struktur der fasrigen Möhren wird dadurch wahrscheinlich gestört und somit wird der Schneidwiderstand herabgesetzt. Bei den Äpfeln, die ohnehin keine feste Struktur aufweisen, ist fast kein Einfluß auf die maximale längenbezogene Schneidkraft festzustellen. Abbildung 4.25, die Auftragung der Dehnung – zum Erreichen der maximalen

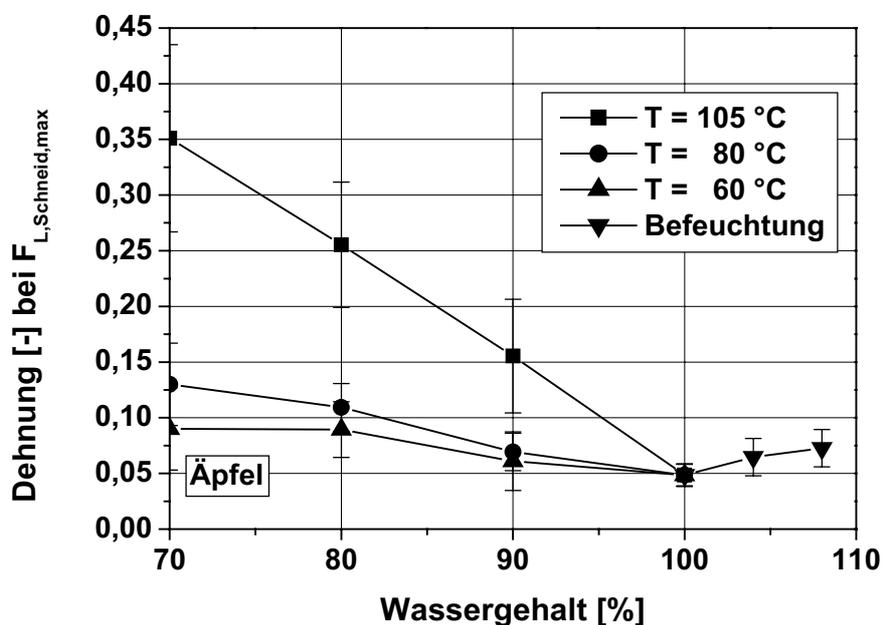


Abb. 4.25: Abhängigkeit der Dehnung [-] zum Erreichen der maximalen längenbezogenen Schneidkraft $F_{L,Schneid,max}$ [N/mm] vom Wassergehalt [%] des organischen Materials Äpfel (mit Vertrauensbereich für eine Wahrscheinlichkeit von $\zeta = 95\%$), stellvertretend für alle untersuchten feuchten Materialien; Wassergehalt von 100% entspricht dem unbehandelten Ausgangsmaterial, Wassergehalt > 100% entspricht der Befeuchtung und Wassergehalt < 100% entspricht der Trocknung.

Schneidfestigkeit –, bestätigt die oben angeführten Erklärungen zum Einfluß des Wassergehaltes und der Trocknungstemperatur. Die überproportionale Austrocknung der Probenoberfläche bei der höchsten Trocknungstemperatur bewirkt, daß die maximalen Schneidfestigkeiten erst bei höheren Dehnungen erreicht werden, da infolge dieser „gummiartigen“ Trocknungshaut ein Eindringen des Cuttermessers in die Probe erschwert wird (vergleiche Abbildung 4.23). Dieses Phänomen ist um so deutlicher, je weiter der Wassergehalt reduziert wird. Aus Gründen der Übersichtlichkeit ist in Abbildung 4.25 nur die Abhängigkeit der Dehnung – zum Erreichen der maximalen längenbezogenen Schneidkraft – vom Wassergehalt der Äpfel dargestellt. Die entsprechenden Abhängigkeiten der übrigen feuchten Materialien sind vergleichbar mit den hier dargestellten Abhängigkeiten für Äpfel (Baaden et al., 2002)

Das unterschiedliche Materialverhalten spiegelt sich auch in Abbildung 4.26, der Abhängigkeit der spezifischen Energie – zum Erreichen der maximalen längenbezogenen Schneidkraft – vom Wassergehalt wider. Bei Äpfeln führt die Zunahme der maximalen längenbezogenen Schneidfestigkeit zu einer Abnahme der eingetragenen spezifischen Energien mit abnehmendem Wassergehalt. Für Möhren nimmt der spezifische Energieeintrag mit zunehmender maximaler längenbezogener Schneidfestigkeit zu. Die anisotrope, faserige Struktur und der hohe Rohfasergehalt sind bei Möhren dafür verantwortlich, daß größere Kräfte zum Erreichen der maximalen längenbezogenen Schneidkraft notwendig sind als bei Äpfeln. Für diese nimmt der Trockenrückstand, der nach Gleichung 3.9 in die Berechnung der spezifischen Energie eingeht, im hier untersuchten Bereich nicht so stark zu. Deshalb nimmt der spezifische Energieeintrag trotz höherer Kräfte und steigenden Dehnungen ab. Der scheinbare Widerspruch zwischen der zunehmenden Schneidfestigkeit in Verbindung mit zunehmenden Dehnungen und abnehmendem spezifischen Energieeintrag ist auf die Definition der spezifischen Arbeit gemäß Gleichung 3.9, Seite 35, dieser Arbeit zurückzuführen. Der niedrigere Rohfasergehalt und die Zusammensetzung der Kohlenhydrate (wasserlösliche Zucker) verleihen diesen Materialien eine niedrigere Stabilität. Nur bei den rohfaserreicheren Möhren bewirkt die parallelartige Struktur der Cellulose mit der durch die Abnahme der Anzahl an Wassermolekülen verbundenen, zunehmenden Inkrustierung des Lignins die Stabilität der Probenkörper. Die Schwankungsbreiten des 95-prozentigen Vertrauensbereiches für beide Materialien verdeutlichen nochmals die Inhomogenitäten der organischen Stoffe, die im Rahmen dieser Arbeit untersucht wurden. Aufgrund dieser natürlichen Inhomogenitäten der Materialien sind die Kraft-Weg-Verläufe bei den Schneidversuchen für die feuchten Mate-

rialien ungleichmäßig. Deshalb besitzen die energiebezogenen Aussagen und Erklärungen nur tendentiellen Charakter.

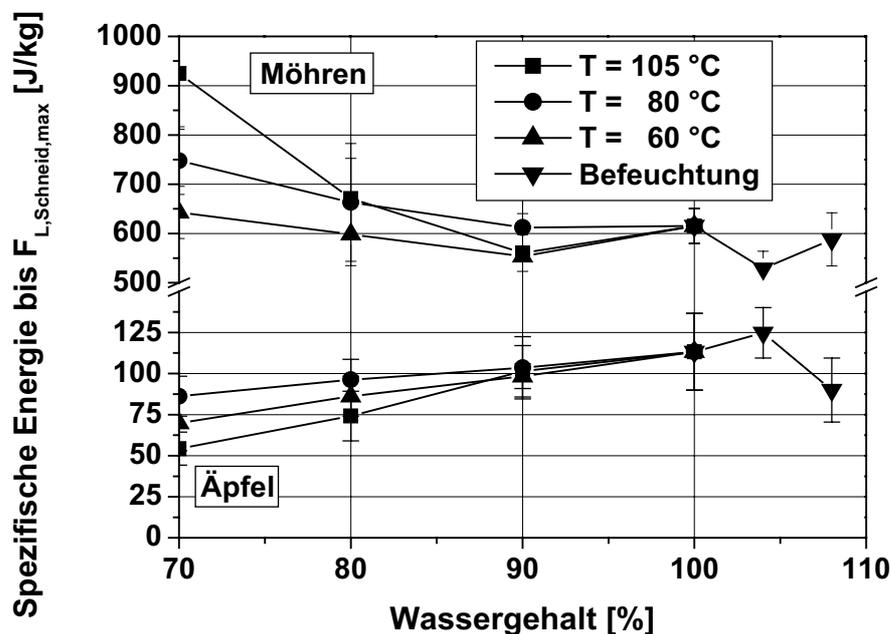


Abb. 4.26: Abhängigkeit der spezifischen Energie E_{Spez} [J/kg] zum Erreichen der maximalen längenbezogenen Schneidkraft vom Wassergehalt [%] der organischen Materialien Möhren und Äpfel bei verschiedenen Trocknungstemperaturen (mit Vertrauensbereich für eine Wahrscheinlichkeit von $\zeta = 95\%$); Wassergehalt von 100 % entspricht dem unbehandelten Ausgangsmaterial, Wassergehalt > 100 % entspricht der Befeuchtung und Wassergehalt < 100 % entspricht der Trocknung.

4.2.2.2 Trockene Materialien

Abbildung 4.27 zeigt die Spannungs-Dehnungs-Verläufe der trockenen organischen Materialien (unbehandelt). Die entsprechenden Kraft-Weg-Verläufe sind im Anhang (Abb. 7.2.7) dargestellt. Man erkennt den typischen, unterschiedlichen Verlauf für die harten, spröden Materialien Reis und Linsen und für die fettreichen Materialien Mandeln und Sonnenblumenkerne. Für Reis und Linsen steigt die längenbezogene Schneidkraft stark mit der Dehnung an und nimmt ebenso stark nach Überschreitung eines Maximums wieder mit der Dehnung ab. Die rasche Abnahme der längenbezogenen Schneidkraft für Reis sowie der Verlauf für die fettreichen Materialien Mandeln und Sonnenblumenkerne werden im Weiteren dieses Kapitels anhand von optischen Aufnahmen solcher Schneidversuche erklärt werden.

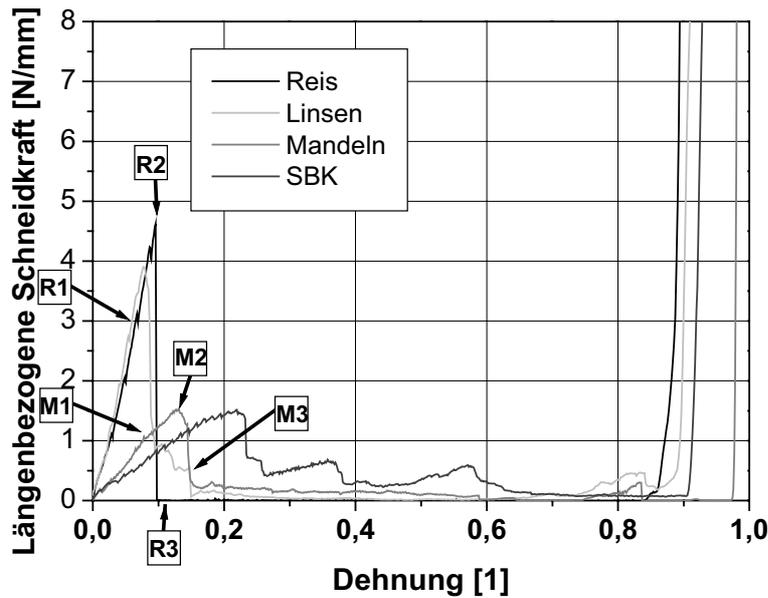


Abb. 4.27: Spannungs-Dehnungs-Verläufe für Schneidversuche mit Reis, Linsen, Mandeln und Sonnenblumenkernen (SBK). Die Markierungen R1 bis R3 und M1 bis M3 Die Markierungen A1 bis A3 kennzeichnen den jeweiligen Beanspruchungszustand, zu dem die optischen Aufnahmen der Abbildungen 4.29 und 4.30 gehören.

Abbildung 4.28 stellt die aus den Spannungs-Dehnungs-Verläufen (Abbildung 4.27) maximalen längenbezogenen Schneidfestigkeiten der trockenen organi-

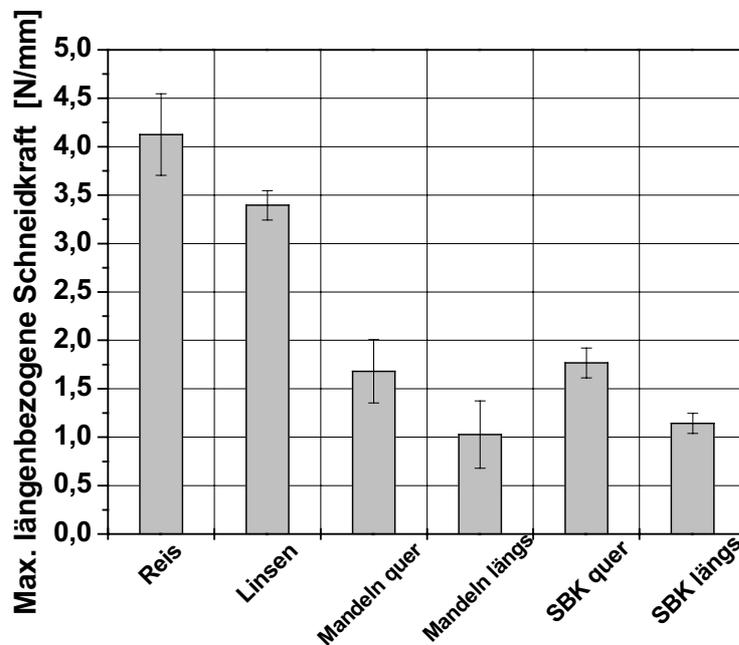


Abb. 4.28: Maximale längenbezogene Schneidkräfte $F_{\text{Schneid,max}}$ [N/mm] der trockenen organischen Materialien Reis, Linsen, Mandeln (beansprucht längs und quer zu ihrer Materialfaserung) und Sonnenblumenkerne (beansprucht längs und quer zu ihrer Materialfaserung) (mit Vertrauensbereich für eine Wahrscheinlichkeit von $\zeta = 95\%$).

schen Materialien dar. Zur Untersuchung der Anisotropie der Mandeln und Sonnenblumenkerne wurden diese Materialien sowohl längs als auch quer zu ihrer Faserrichtung beansprucht. Nach Abbildung 4.28 besitzt Reis die größte maximale Schneidfestigkeit der trockenen organischen Materialien ($F_{L,Schneid,max} = 4,13 \text{ N/mm}$), gefolgt von den Linsen ($F_{L,Schneid,max} = 3,39 \text{ N/mm}$). Der große Vertrauensbereich bei Reis ist typisch für dieses Material. Infolge des hohen Stärkegehaltes und des niedrigen natürlichen Wassergehaltes weist Reis ein sprödes Materialverhalten auf. Er ist kaum elastisch verformbar (vergleiche Kapitel 4.2.2.1.2), und die Probe bricht infolge der hohen lokalen Spannungen an der Messerschneide in zwei Teile, bevor die Probe von der Klinge in zwei Teile zertrennt werden konnte. Dies verdeutlichen die optischen Aufnahmen in Abbildung 4.29. Die Bilder entsprechen den Markierungen R1 bis R3 in Abbildung 4.27.



Abb. 4.29: Optische Aufnahmen eines Schneidversuches mit Reis (unbehandelt).

Es findet eine Ablösung des Materials vom Messer statt, bevor der Schneidvorgang beendet ist. Dieses spröde Verhalten führt zu großen Streuungen bei der Auswertung der Versuche. Die zerteilten, beanspruchten Reiskörner werden durch das Auseinanderbrechen der Probe infolge der äußeren Kraft in zwei Teilstücken von ihrer Auflagefläche entfernt. Linsen, die im Gegensatz zu Reis mit Schale beansprucht wurden, weisen ein dem Reis ähnliches Materialverhalten auf. Das spröde Brechen der Linsen infolge der lokalen Spannungen durch die äußere Schneidkraft war jedoch nicht so deutlich wie bei Reis. Aber auch bei den Linsen war die Probe bei den Schneidversuchen in vielen Fällen schon geteilt, bevor der Schneidvorgang beendet war (vergleiche Abbildung 4.27).

Die fettreichen Materialien Mandeln und Sonnenblumenkerne weisen niedrigere maximale Schneidfestigkeiten als die spröderen Materialien Linsen und Reis auf. Für beide fettreichen Materialien ist die maximale Schneidfestigkeit für die Beanspruchung in Längsrichtung zur Faser kleiner als für die Beanspruchung in Querrichtung zur Faser (für Mandeln: $F_{L,Schneid,max} [\text{quer}] = 1,68 \text{ N/mm}$ und $F_{L,Schneid,max} [\text{längs}] = 1,03 \text{ N/mm}$; für Sonnenblumenkerne: $F_{L,Schneid,max} [\text{quer}] = 1,77 \text{ N/mm}$ und $F_{L,Schneid,max} [\text{längs}] = 1,14 \text{ N/mm}$). Diese Ergebnisse korrelieren mit den Aussagen in Kapitel 4.2.1. Die Kraft-Weg-Verläufe bei den Schneidversuchen sind für die spröden Materialien Reis und Linsen, sowie die der fettreichen Materialien Mandeln und Sonnenblumenker-

ne sehr ähnlich. Für Reis und Linsen findet die Trennung der Probe nicht direkt am Cuttermesser statt. Das Eindringen des Cuttermessers in das Material bewirkt so hohe lokale Spannungen an der Messerschneide, daß sich dort lokale Risse bilden, die sich schneller durch das Material fortpflanzen, als das Messer das Material durchdringt. Die Folge ist ein sprunghafter Kräfteabfall an der Messerschneide nach Bruch der beanspruchten Probe in zwei Teile (vergleiche Abbildungen 4.27 und 4.29). Bei den fettreichen Mandeln und Sonnenblumenkernen bilden sich ebenfalls Risse infolge der hohen lokalen Spannungen im Bereich der Messerschneide aus, jedoch nicht so stark wie bei den spröderen Materialien Reis und Linsen. Dies verdeutlicht Abbildung 4.30 am Beispiel der Mandeln.

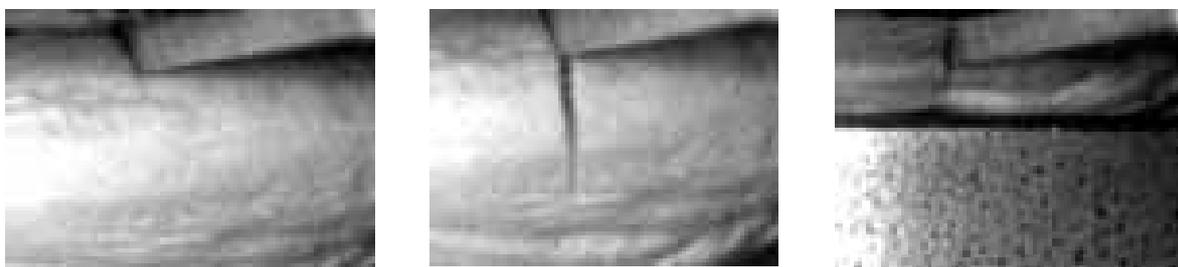


Abb. 4.30: Optische Aufnahmen eines Schneidversuches mit Mandeln (unbehandelt), beansprucht quer zur Materialfaserung. Die Bilder entsprechen den Markierungen M1 bis M3 in Abbildung 4.27. Die Aufnahme erfolgte von schräg vorne.

Zudem steigt die Schneidkraft während des Versuches für die fettreichen Materialien deutlich langsamer an. Der hohe Fettgehalt, der niedrigere Trockenrückstand und der höhere Rohfasergehalt dieser Materialien sind dafür verantwortlich, daß die Rifortpflanzung während der Schneidbeanspruchung deutlich langsamer ist als bei Reis und Linsen. Die maximale Schneidfestigkeit wird für Mandeln und Sonnenblumenkerne erst bei größeren Dehnungen erreicht als für Linsen und Reis. Zum Durchschneiden der Reis- und Linsenproben ist ein niedrigerer spezifischer Energieeintrag ausreichend als für die fettreichen Materialien (Zahlenwerte siehe Anhang, Tabelle 7.2.15), da nach Abbildung 4.30 das Cuttermesser für diese Materialien im Gegensatz zu den Versuchen mit Reis (vergleiche Abbildung 4.29) und Linsen bis zum Versuchsende in Kontakt mit der Probe ist.

Die Abhängigkeit der maximalen Schneidfestigkeit beider Materialtypen (spröde und fettreich) vom Wassergehalt zeigt Abbildung 4.31 am Beispiel für Reis (spröde) und Mandeln (fettreich). Eine Abnahme des Wassergehaltes bewirkt für die fettreichen Materialien eine Reduktion der maximalen Schneidfestigkeit.

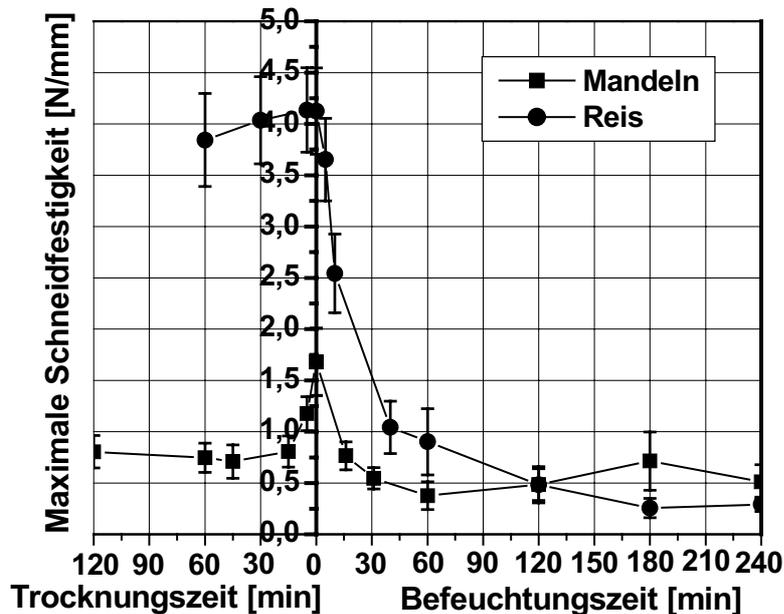


Abb. 4.31: Maximale Schneidfestigkeiten $F_{L,Schneid,max}$ [N/mm] der trockenen organischen Materialien Reis und Mandeln (mit Vertrauensbereich für eine Wahrscheinlichkeit von $\zeta = 95\%$) als Funktion des Wassergehaltes (hier als Parameter die Trocknungs- bzw. Befeuchtungszeit [min] $T = 105\text{ °C}$).

Mandeln und Sonnenblumenkerne reagieren bei Trocknung zunehmend spröde auf die Beanspruchung. Die Rißfortpflanzungsgeschwindigkeit nimmt mit der Trocknung zu. Die Proben werden dadurch schneller getrennt, und der Kräfteabfall – nach Erreichen der maximalen Schneidfestigkeit – ist größer als für die unbehandelten Materialien. Bei den spröden Materialien (Reis und Linsen) bewirkt eine Trocknung keine Änderung des Materialwiderstandes auf die Schneidbeanspruchung (im Vertrauensbereich der Meßwerte). Die mit der Trocknung verbundene Austrocknung der Probenoberflächen besitzt keinen Einfluß auf das Materialverhalten. Diese Materialien verfügen naturgemäß über einen hohen Trockenrückstand und können demzufolge nicht weiter getrocknet werden.

Eine Erhöhung des Wassergehaltes verändert den Materialwiderstand trockener organischer Materialien maßgeblich. Sowohl für spröde als auch für fettreiche Materialien nimmt die maximale Schneidfestigkeit mit zunehmendem Wassergehalt ab. Dies ist für die spröden Materialien stärker ausgeprägt als für die fettreichen Materialien. Die Einlagerung des Wassers in die Materialstruktur bewirkt ein Aufweichen der Materialien. Desweiteren wird durch das Aufquellen die Rißausbildung und Fortpflanzung gestört. Die Materialien verhalten sich mit zunehmendem Wassergehalt wie die unter 4.2.2.2.1 beschriebenen feuchten Materialien hinsichtlich der physikalischen Vorgänge beim

Schneidvorgang. Die Trennung findet wie bei diesen Materialien nun entlang des Messers statt, und die Reißausbreitungen in Beanspruchungsrichtung vor der Messerschneide nehmen mit zunehmendem Wassergehalt ab.

Das Aufquellen bewirkt allerdings, abhängig von der Materialstruktur und Zusammensetzung, verschiedene Einflüsse. Bei Reis, der einen hohen Stärkeanteil aufweist, führt die Einlagerung von Wasser zu einer Herabsetzung der mechanischen Steifigkeit, da Stärke in Wasser nahezu unlöslich ist und die Anwesenheit der Wassermoleküle die geordnete Struktur stört. Durch den sehr niedrigen natürlichen Wassergehalt von Reis ist dessen Struktur störanfällig auf Wasser. Die unpolare Struktur von Reis und dessen Hauptbestandteil Stärke verhindern die Ausbildung von Clustern und Wasserstoffbrückenbindungen der polaren Wassermoleküle in der Reisstruktur. Bei den Linsen wird die Struktur durch die gute Wasserlöslichkeit von Proteinen aufgelöst. Die Struktur der fettreichen Materialien, die zudem einen hohen Rohfasergehalt – verglichen mit Reis und Linsen – besitzen, wird weniger stark beeinflusst. Die Zunahme des Wassergehaltes führt zunächst auch bei diesen Materialien zu einer Abnahme der maximalen Schneidfestigkeit, aber tendenziell bewirkt eine weitere Zunahme des Wassergehaltes wieder höhere Schneidfestigkeiten. Die Abnahme der maximalen Schneidfestigkeit bei den fettreichen Materialien ist demnach eher auf die Gleitwirkungen des Wassers zwischen den Flanken des Cuttermessers und dem zu schneidenden Material zurückzuführen als auf Störungen in der Materialstruktur. Zur Bestätigung dieser Aussagen wären systematische Untersuchungen zum Einfluß der Reibung zwischen Material und Flanken des Cuttermessers notwendig.

Mit Zunahme des Wassergehaltes werden die Reißbildung und Reißfortpflanzung vor der Messerschneide in Beanspruchungsrichtung vermindert, und der Schneidvorgang findet zunehmend entlang des Messers statt. Dies bewirkt einen schwächeren Kräfteabfall – nach Erreichen der maximalen Schneidfestigkeit – bei sämtlichen durchgeführten Versuchen. Demnach ist ein höherer spezifischer Energieeintrag zum Teilen der Proben notwendig.

4.2.2.3 Maximale Scherfestigkeit organischer Materialien

4.2.2.3.1 Feuchte Materialien

Abbildung 4.32 zeigt die Spannungs-Dehnungs-Verläufe der drei feuchten organische Materialien Möhren, Äpfel und Kartoffeln. Demnach haben diese Auftragungen einen ähnlichen Verlauf, lediglich das Spannungsniveau ist unterschiedlich. Die Anisotropie der Möhren ist deutlich zu erkennen. Lediglich der Verlauf der Äpfel weist kleinere Abweichungen auf. Die maximale Scherspannung wird schon für niedrigere Dehnungen erreicht und das maximale

Spannungsniveau ist wesentlich weniger deutlich ausgeprägt als für die übrigen untersuchten feuchten organischen Materialien.

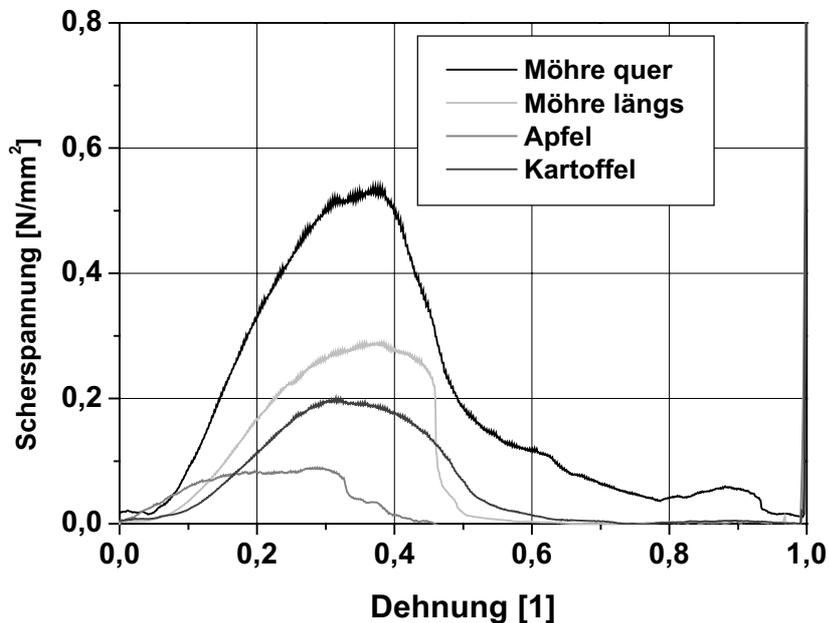


Abb. 4.32: Spannungs-Dehnungs-Verläufe für Scherversuche mit Möhren (quer und längs zur Faserung), Äpfel und Kartoffeln.

Abbildung 4.33 zeigt die maximalen Scherfestigkeiten feuchter organischer Materialien, die aus den Spannungs-Dehnungs-Verläufen (Abbildung 4.32) bestimmt wurden. Demnach besitzen Möhren, beansprucht quer zu ihrer Materialfaserung, die größte maximale Scherfestigkeit der feuchten organischen Materialien ($\sigma_{\text{Scher,max}} = 0,509 \text{ N/mm}^2$), gefolgt von den Möhren, beansprucht längs zu ihrer Materialfaserung ($\sigma_{\text{Scher,max}} = 0,290 \text{ N/mm}^2$), den Kartoffeln ($\sigma_{\text{Scher,max}} = 0,196 \text{ N/mm}^2$) und schließlich den Äpfeln ($\sigma_{\text{Scher,max}} = 0,09 \text{ N/mm}^2$). Die Anisotropie der Möhren wird auch bei den Scherversuchen wiedergespiegelt. Das Scheren der Möhren erfordert in Querrichtung der Faserung höhere Kräfte als in Längsrichtung der Faserung. Gleitebenen und Risse entstehen hauptsächlich entlang der Längsachse der Zellen und Zellverbände. Die maximalen Scherfestigkeiten aller untersuchten, feuchten organischen Materialien sind kleiner als die maximalen Druckfestigkeiten und maximalen Schneidfestigkeiten. Denn die Materialien verhalten sich bei äußerer Krafteinwirkung bis zum Erreichen der inneren lokalen Spannungen, die für das Versagen der Materialstruktur verantwortlich sind, bei den unterschiedlichen Beanspruchungsformen (Drücken, Schneiden und Scheren) ihrer Zusammensetzungen und Strukturen entsprechend.

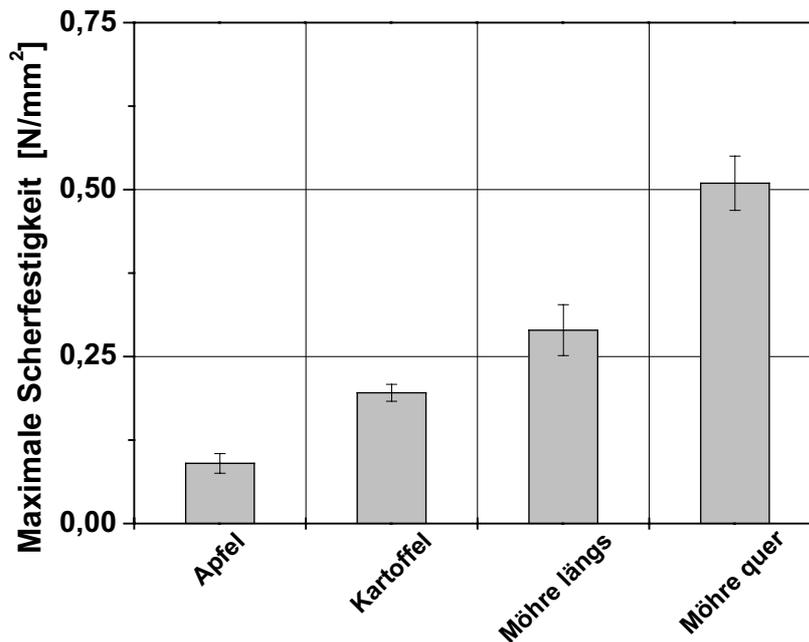


Abb. 4.33: Maximale Scherfestigkeiten $\omega_{\text{Scher,max}}$ [N/mm²] der feuchten organischen Materialien Apfel, Kartoffeln und Möhren (beansprucht längs und quer zu ihrer Materialfaserung) (mit Vertrauensbereich für eine Wahrscheinlichkeit von $\zeta = 95\%$).

Bei der uniaxialen Druckbeanspruchung erfolgt die Einleitung der äußeren Kraft in einer Richtung, aber gleichmäßig über den Probenquerschnitt. Erst nach einer materialabhängigen Verformung können sich bei höheren Krafterwirkungen Risse in der Struktur bilden und gegebenenfalls fortpflanzen. Bei den Schneidversuchen wird die äußere Kraft über eine wesentliche kleinere Fläche an der Messerschneide eingeleitet. Dadurch bilden sich höhere lokale Spannungen im Material – im Bereich der Messerschneide – aus, und die Reißbildung und Fortpflanzung erfolgen aufgrund des höheren Spannungsniveaus schneller. Die Folge sind niedrigere Materialwiderstände bei der Schneidbeanspruchung. Bei den Scherversuchen wird die Kraft im Gegensatz zu den uniaxialen Druckversuchen nicht gleichmäßig über die gesamte Fläche, die geschert wird, eingeleitet. Dadurch entstehen von Beginn an lokale Spannungserhöhungen im Material, die ein schnelleres Versagen verursachen. Desweiteren kommt für die Trennung der Materialien erleichternd hinzu, daß sich zusätzlich Gleitebenen entlang des Beanspruchungswerkzeuges ausbilden. Der Materialwiderstand wird demzufolge noch niedriger. Ein ausführlicher Vergleich der drei untersuchten Beanspruchungsarten erfolgt in Kapitel 4.2.2.4.

Der Einfluß des Wassergehaltes und bei der Abnahme des Wassergehaltes der Einfluß der Trocknungstemperatur für die Scherbeanspruchungen trocken-

ner organischer Materialien sind in Abbildung 4.34 – Auftragung der maximalen Scherfestigkeit von Möhren und Äpfel in Abhängigkeit des Wassergehaltes – dargestellt. Die maximalen Scherfestigkeiten der feuchten organischen Materialien nehmen nach Abbildung 4.34 mit abnehmendem Wassergehalt zu

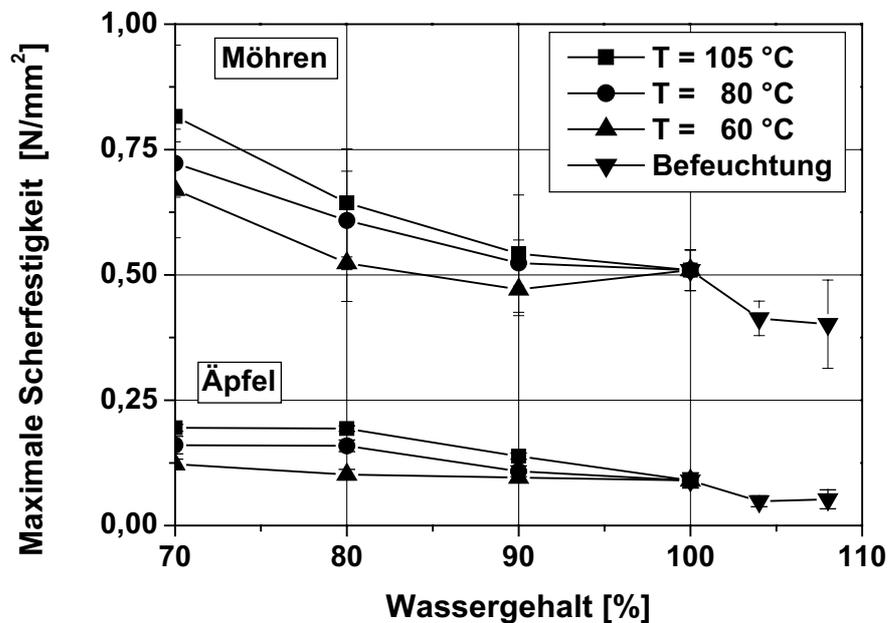


Abb. 4.34: Abhängigkeit der maximalen Scherfestigkeit $\omega_{\text{Scher,max}}$ [N/mm²] vom Wassergehalt [%] der organischen Materialien Möhren, beansprucht quer zur Materialfaserung, und Äpfeln bei verschiedenen Trocknungstemperaturen (mit Vertrauensbereich für eine Wahrscheinlichkeit von $\zeta = 95\%$); Wassergehalt von 100% entspricht dem unbehandelten Ausgangsmaterial, Wassergehalt > 100 % entspricht der Befeuchtung und Wassergehalt < 100% entspricht der Trocknung.

und mit zunehmendem Wassergehalt ab. Die höchste Trocknungstemperatur führt – wie bei den Schneidversuchen – zu den größten Materialwiderständen. Diese Abhängigkeiten sind aber nicht so deutlich zu sehen wie bei den Schneidversuchen. Die Scherung, wie im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt, entspricht einer Kombination aus Druck- und Schneidbeanspruchung. Zunächst – bis das Beanspruchungswerkzeug in den Probenkörper eingedrungen ist – überwiegen die Phänomene der Schneidbeanspruchung. Der Widerstand gegen die äußere Kraft nimmt mit abnehmendem Wassergehalt und mit der höheren Trocknungstemperatur zu. Entscheidend hierbei sind – wie bei den Schneidversuchen – die mit der höheren Trocknungstemperatur auftretenden überproportionalen Austrocknungen der Oberflächen der Probenkörper. Dies führt zu einem größeren Materialwiderstand gegen die Beanspruchung. Nach Eindringen des Beanspruchungswerkzeuges in die Probenkörper wird an der Scherkante das Material anschließend eher durch Druck abge-

schert, bis die Probenkörper zerteilt sind. Zusätzlich zu den Reißbildungen, die infolge der ungleichmäßig über die Scherfläche eingeleiteten Kraft noch ausgeprägter als bei den uniaxialen Druckbeanspruchungen im Probenkörper entstehen, wird bei der Scherung durch Gleitebenen entlang der Scherkante das Abscheren der Probe nach Erreichen der maximalen Scherfestigkeit erleichtert. Die Dehnungen – zum Erreichen der maximalen Scherfestigkeit – liegen für die verschiedenen Materialien zwischen den Werten zum Erreichen der maximalen Druck- und Schneidfestigkeit, was die o.a. Ausführungen bestätigt. Ein energetischer Vergleich der Scherversuche mit den uniaxialen Druck- und den Schneidversuchen führt ebenfalls zu den gleichen Erkenntnissen. Die eingetragenen Energien zum Erreichen der maximalen Scherfestigkeiten und zum Abscheren der Proben über den gesamten Querschnitt verhalten sich wie die Dehnungen. Die Kraft-Weg-Verläufe, die den Einfluß des Wassergehaltes demonstrieren, sind im Anhang (Abbildung 7.2.9a) aufgeführt. Hiermit konnten auch Ergebnisse der Untersuchungen von Palmowski (2000), die ähnliche Materialien – jedoch ohne Variation des Wassergehaltes – auf ihre mechanischen Eigenschaften hin untersuchte, bestätigt werden.

4.2.2.3.2 Trockene organische Materialien

Abbildung 4.35 zeigt die Spannungs-Dehnungs-Verläufe der trockenen organischen Materialien (unbehandelt) bei Scherbeanspruchung. Die entsprechen-

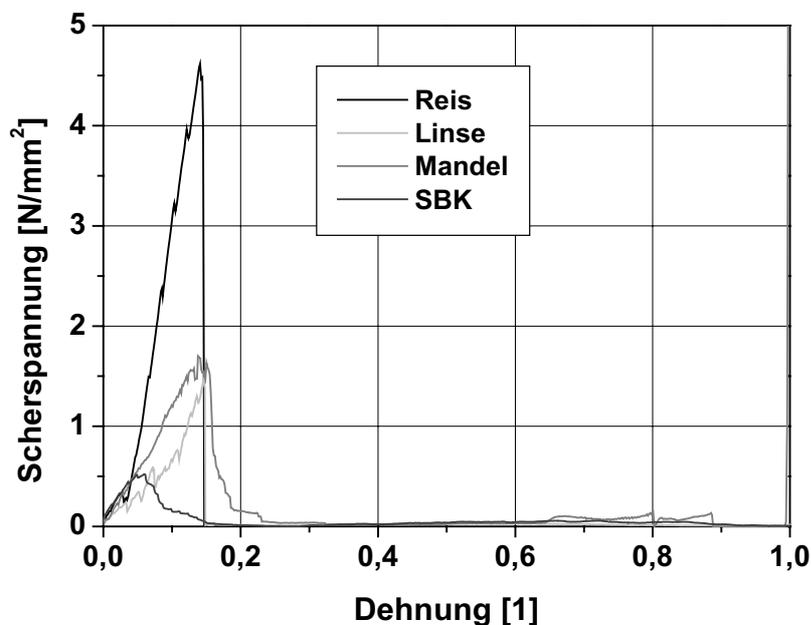


Abb. 4.35: Spannungs-Dehnungs-Verläufe für Scherversuche mit Reis, Linsen, Mandeln und Sonnenblumenkerne (SBK).

den Kraft-Weg-Verläufe sind im Anhang (Abbildung 7.2.8) dargestellt. Man erkennt, daß für sämtliche Materialien die Druckspannung nach Erreichen des Maximums schlagartig auf nahezu Null zurückgeht. Diese rasche Abnahme der Spannung nach Überschreitung des Maximums ist damit zu erklären, daß die jeweils beanspruchten Proben nach Überschreiten der maximalen Scherfestigkeit in zwei Teilstücke zerbrechen und die Scherung der Proben damit abgeschlossen ist.

Die eingetragene spezifische Energie zum Erreichen der maximalen Scherfestigkeiten (vergleiche die Abbildungen 4.35 und 4.36) entspricht bei der Scherung trockener organischer Materialien nahezu der spezifischen Gesamtenergie zum Abscheren der gesamten Probe.

Abbildung 4.36 zeigt die maximalen Scherfestigkeiten trockener organischer Materialien, die aus den Spannungs-Dehnungs-Verläufen (Abbildung 4.35) bestimmt wurden. Demnach weist Reis die größte maximale Scherfestigkeit der untersuchten Materialien ($\omega_{\text{Scher,max}} = 4,722 \text{ N/mm}^2$) auf, gefolgt von den Linsen ($\omega_{\text{Scher,max}} = 1,602 \text{ N/mm}^2$), den Mandeln ($\omega_{\text{Scher,max}} = 1,344 \text{ N/mm}^2$) und den Sonnenblumenkernen ($\omega_{\text{Scher,max}} = 0,647 \text{ N/mm}^2$). Im Gegensatz zu den

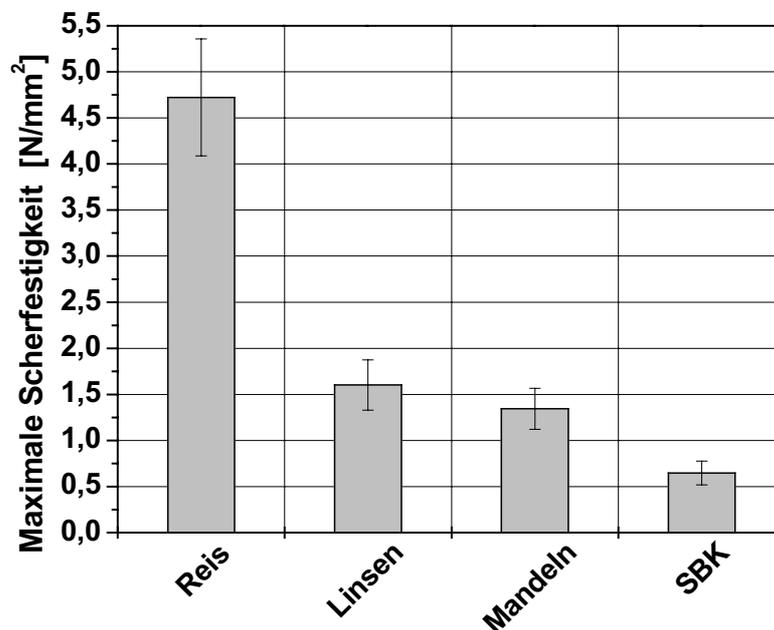


Abb. 4.36: Maximale Scherfestigkeiten $\omega_{\text{Scher,max}}$ [N/mm^2] der trockenen organischen Materialien Reis, Linsen, Mandeln und Sonnenblumenkerne (SBK) (mit Vertrauensbereich für eine Wahrscheinlichkeit von $\zeta = 95 \%$).

maximalen Druckfestigkeiten (Abbildung 4.15) und den maximalen Schneidfestigkeiten (Abbildung 4.28) verhalten sich die beiden fettreichen Materialien

bei der maximalen Scherfestigkeit nicht mehr gleich. Die maximale Scherfestigkeit der Sonnenblumenkerne ist nur halb so groß wie die der Mandeln.

Wie in Kapitel 4.1.1.1.2 schon beschrieben, war die Reißausbildung der Sonnenblumenkerne bei den uniaxialen Druckversuchen nicht parallel zur Beanspruchungsrichtung. Die Sonnenblumenkerne wurden gequetscht und die Reißausbildung erfolgte rechtwinklig zur Beanspruchungsrichtung, also parallel zur Faserrichtung und Zellenstruktur. Bei der Scherung ist das Material aufgrund des hohen Rohfasergehaltes, der dem Material in Faserrichtung seine mechanische Steifigkeit verleiht, durch die Einwirkung der Scherkräfte rechtwinklig zu dieser Struktur nicht mehr in der Lage, den Bruch zu verhindern. Bei Mandeln, deren Cellulosegehalt deutlich niedriger ist, sind höhere lokale Spannungen notwendig, um die maximale Scherfestigkeit zu erreichen. Reis als sprödes Material weist den höchsten Widerstand gegen die Scherbeanspruchung auf, was vermutlich auf seinen hohen Stärkegehalt zurückzuführen ist (siehe auch Kapitel 2).

Die Abhängigkeit der maximalen Scherfestigkeit vom Wassergehalt ist in Abbildung 4.37 dargestellt. Mandeln stehen stellvertretend für die fettreichen Materialien (Mandeln und Sonnenblumenkerne), Reis ist stellvertretend für die spröden, trockenen organischen Materialien (Reis und Linsen). Die maximale Scherfestigkeit trockener organischer Materialien nimmt – wie die maximale Druck- und Schneidfestigkeit – mit zunehmendem Wassergehalt ab und bleibt mit abnehmendem Wassergehalt im Vertrauensbereich nahezu unverändert. Zum einen verliert die Struktur dieser Materialien mit zunehmendem Wassergehalt infolge des Aufquellens an Stabilität. Die Materialien verhalten sich somit wie die unter Kapitel 4.2.2.3.1 beschriebenen feuchten organischen Materialien. Zum anderen verhalten sich die Materialien infolge der Wassergehaltsabsenkung zunehmend spröde. Durch das Austrocknen der Materialoberfläche tritt der Bruch früher ein, da die Reißausbildung und –fortpflanzung durch die ausgetrockneten Strukturen schneller erfolgen kann. Eine leichte Abnahme der maximalen Scherfestigkeit ist die Folge. Die großen Schwankungsbereiche der Meßwerte für Befeuchtungszeiten zwischen 5 Minuten und 30 Minuten spiegeln nochmals das inhomogene Verhalten organischer Materialien wider. Bei der Befeuchtung ist die Wasseraufnahmekapazität der Einzelproben aufgrund der verschiedenen geometrischen Abmessungen und der damit verbundenen Unterschiede in der Oberfläche nicht gleich groß. Für kleine Befeuchtungszeiten ist die Wasserverteilung längs des Materialquerschnittes nicht homogen, da die Befeuchtungszeit für eine Diffusion der Wassermoleküle in das Probeninnere zu kurz ist. Die Oberflächen und oberflächennahen Berei-

che weisen eine höhere Feuchtigkeit auf als das Innere der Proben. Dadurch sind große Abweichungen dieser Meßwerte bedingt.

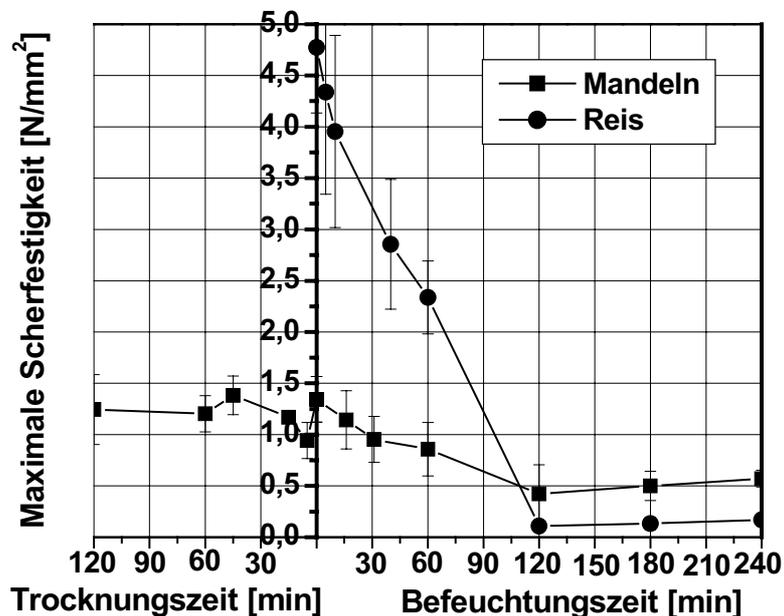


Abb. 4.37: Maximale Scherfestigkeiten $\omega_{\text{Scher,max}}$ [N/mm²] der trockenen organischen Materialien Reis und Mandeln (mit Vertrauensbereich für eine Wahrscheinlichkeit von $\zeta = 95\%$) als Funktion des Wassergehaltes (hier als Parameter die Trocknungs- bzw. Befeuchtungszeit [min]).

Eine energetische Betrachtung der Scherversuche zeigt die gleichen Ergebnisse wie bei den Druck- und Schneidversuchen und kann auch dementsprechend erklärt werden. Es existiert lediglich folgender Unterschied: der Energieeintrag zum Erreichen der maximalen Scherfestigkeit entspricht fast dem Energieeintrag zum Abscheren der gesamten Probe. Dies bedeutet, daß fast die gesamte Energie eingetragen werden muß, um die maximale Scherfestigkeit zu erreichen. Für das weitere Abscheren der Probe muß fast keine Energie mehr eingetragen werden. Die trockenen organischen Materialien brechen nach Erreichen der maximalen Scherfestigkeit in zwei Hälften auseinander und somit wird der weitere spezifische Energieeintrag zum Abscheren der Probenkörper minimal. Die entsprechenden Kraft-Weg-Verläufe sind im Anhang (Abbildung 7.2.10) aufgeführt.

4.2.2.4 Vergleich der verschiedenen Beanspruchungsarten

Ein Vergleich der drei Beanspruchungsarten (Druck-, Schneid- und Scherbeanspruchung) zeigt, daß für alle untersuchten organischen Materialien die maximale Druckfestigkeit am größten ist, gefolgt von der maximalen Schneidfestigkeit und der maximalen Scherfestigkeit. Auch muß bei den Druckversu-

chen für alle Materialien bis zum Versuchsende ($\kappa = 1$) die meiste Energie eingetragen werden, gefolgt von den Scher- und den Schneidversuchen.

Bezüglich des Einflusses des Wassergehaltes hat sich bei den drei durchgeführten Beanspruchungsarten gezeigt, daß die maximalen Schneid- und Scherfestigkeiten der feuchten organischen Materialien mit abnehmendem Wassergehalt zunehmen und die maximalen Druckfestigkeiten abnehmen (Ausnahme: $\omega_{\text{Druck,max}}[\text{Kartoffeln}] = \text{konstant}$). Für trockene organische Materialien nehmen die maximalen Kennwerte für alle drei Beanspruchungsarten sowohl mit abnehmendem als auch mit zunehmendem Wassergehalt ab. Mit abnehmendem Wassergehalt reagieren die trockenen Materialien zunehmend spröder und mit abnehmendem Wassergehalt verhalten sie sich ähnlich den feuchten organischen Materialien. Diese Erkenntnisse werden in Tabelle 4.1 nochmals zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 4.1: Zusammenfassung der Erkenntnisse bzgl. der mechanischen Eigenschaften und des Einfluß des Wassergehaltes für pflanzliche organische Materialien (WG = Wassergehalt).

	Druckfestigkeit	Schneidwiderstand	Scherfestigkeit
feuchte Materialien	WG \leftrightarrow Abnahme (außer Kartoffeln) WG \Rightarrow uneinheitlich	WG \leftrightarrow Zunahme WG \Rightarrow uneinheitlich	WG \leftrightarrow Zunahme WG \Rightarrow Abnahme
trockene Materialien	WG \leftrightarrow Abnahme WG \Rightarrow Abnahme	WG \leftrightarrow Abnahme WG \Rightarrow Abnahme	WG \leftrightarrow Abnahme WG \Rightarrow Abnahme

Inwieweit diese Ergebnisse Rückschlüsse auf eine mechanische Beanspruchung von Partikelkollektiven dieser Materialien – als Einzelsubstrate und Zweikomponentengemische – erlauben, wird in Kapitel 4.4 diskutiert werden. Die in dieser Arbeit erhaltenen Ergebnisse für die unbehandelten Materialien korrelieren mit den Untersuchungen von Palmowski (2000).

4.3 Mechanische Beanspruchung in einer Schneidmühle

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der mechanischen Beanspruchungen der Materialien in einer Schneidmühle als Einzelsubstrate und Zweikomponentengemische vorgestellt und diskutiert. Die mechanische Beanspruchung wird anhand der unter Kapitel 3.3.3 beschriebenen Parameter Medianwert ($x_{50,3}$), CSB-Freisetzungsgrad (F_{CSB}), spezifische Oberflächen (S_m) und spezifische Energie (E_{spez}) charakterisiert. Als weiterer Parameter zur Charakterisierung dieser Versuche wird der anaerobe Abbau der mechanisch beanspruchten Materialien gemäß Kapitel 3.3.4 verwendet.

Die physikalische Grundlage der mechanischen Beanspruchung in einer Schneidmühle beinhaltet einen komplexen Beanspruchungsmechanismus. Eine Kombination aus Druck-, Schneid- und Scherbeanspruchung wirkt in dieser Zerkleinerungsmaschine auf die Materialien. Eine Verteilung dieser drei Beanspruchungsarten, aus denen sich der Beanspruchungsmechanismus einer Schneidmühle zusammensetzt, ist bisher nicht bekannt. Deshalb werden im Rahmen dieser Arbeit die Ergebnisse der Einzelprobenbeanspruchung gemäß Kapitel 4.2 in einer Universalprüfmaschine mit den in diesem Kapitel diskutierten Beanspruchungen von Partikelkollektiven in einer Schneidmühle miteinander verglichen und es wird überprüft, inwieweit Aussagen über die Verteilung der Beanspruchungsarten in einer Schneidmühle bei Kenntnis der mechanischen Eigenschaften der untersuchten Materialien möglich sind.

Zunächst werden die Ergebnisse der mechanischen Beanspruchung der Materialien als Einzelsubstrate und dann als Zweikomponentengemische diskutiert. Abschließend erfolgt ein Vergleich dieser Ergebnisse.

4.3.1 Mechanische Beanspruchung der Materialien als Einzelsubstrate

Zunächst werden die Medianwerte der Partikelgrößenverteilungen ($x_{50,3}$) und die dazugehörigen Freisetzungsgrade der organischen Bestandteile (F_{CSB}) in Abhängigkeit von der spezifischen Energie für drei verschiedene Umfangsgeschwindigkeiten des Mühlenrotors aller untersuchten Materialien als Einzelsubstrate dargestellt und diskutiert. Im Anschluß daran wird die mechanische Beanspruchung derselben Materialien mittels der Oberflächenkennwerte ($S_{m,PGV}$ und $S_{m,Bet}$) und der mikroskopischen Aufnahmen erläutert. Der Einfluß der mechanischen Beanspruchung auf den anaeroben Abbau wird nur für die Zweikomponentengemische beschrieben. Eine Darstellung des Einflusses der mechanischen Beanspruchung auf den anaeroben Abbau der Materialien als Einzelsubstrate ist Mundhenke (2002) zu entnehmen (vergleiche Kapitel 2.3). Desweiteren wird der Einfluß des Wassergehaltes auf das Verhalten der feuchten Materialien bei mechanischer Beanspruchung anhand der oben erläuterten Parameter graphisch dargestellt und diskutiert.

4.3.1.1 Feuchte organische Materialien als Einzelsubstrate

Wegen des hohen Wassergehaltes der feuchten Materialien kam es zu Problemen bei der Analyse der mechanisch beanspruchten Partikelkollektive. Die Partikelkollektive mußten mittels Naßsiebung analysiert werden (siehe Kapitel 3.3.3.2). Dabei wurden feine Partikel und der durch die mechanische Beanspruchung freigesetzte Zellsaft als Durchgang des Siebes der kleinsten Ma-

schenweite ($x_t = 63 \mu\text{m}$) ausgespült. Die Wiederfindungsrate der jeweils eingesetzten Materialmassen bei der Naßsiebung betrug bei Äpfeln 30 % bis 40%, bei Möhren 45 % bis 55 % und bei Kartoffeln ca. 60 %. Die Differenzmassen zu 100 % wurden im Durchgang aufgefangen und mittels Laserbeugungsspektrometrie analysiert. Infolge der Lagerungsdauer der Materialien unterlag die Beschaffenheit der feuchten Materialien Schwankungen. Somit waren die Beanspruchungsversuche feuchter organischer Materialien im Rahmen dieser Arbeit teilweise schwer reproduzierbar. Prinzipiell konnte für feuchte Materialien festgestellt werden, daß die Medianwerte der Partikelgrößenverteilungen mit steigender eingetragener spezifischer Energie ab- und die CSB-Freisetzungsgrade zunehmen. Weiterhin zeigt Abbildung 4.38 den Einfluß der Rotorumfangsgeschwindigkeit der Schneidmühle auf das Beanspruchungsergebnis. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind hier stellvertretend nur die Ergebnisse der Äpfel und Möhren für zwei unterschiedliche Rotorumfangsgeschwindigkeiten dargestellt. Die übrigen Ergebnisse sind im Anhang aufgelistet. Abbildung 4.38 zeigt, daß bei den feuchten Materialien die niedrigere Umfangsgeschwindigkeit (1,8 m/s) zu kleineren Median- und höheren CSB-Freisetzungsgraden führt, bei ungefähr gleichem Eintrag an spezifischer Energie. Bei kleineren Umfangsgeschwindigkeiten wird die eingetragene spezifische Energie besser genutzt, was im größeren Zerkleinerungsfortschritt zu erkennen ist.

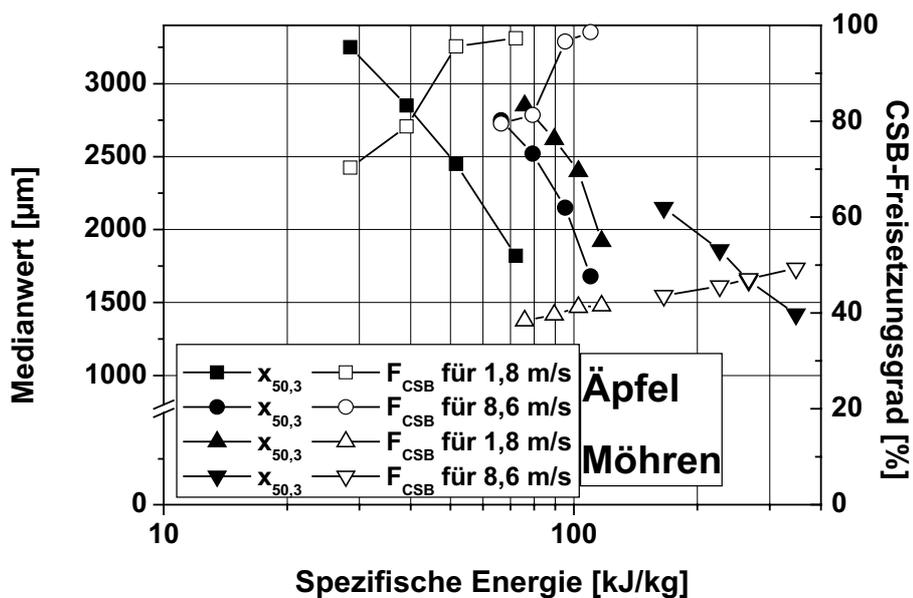


Abb. 4.38: Medianwerte ($x_{50,3}$) [μm] und CSB-Freisetzungsgrade (F_{CSB}) [%] der feuchten organischen Materialien Äpfel und Möhren in Abhängigkeit von der eingetragenen spezifischen Energie (E_{spez}) [kJ/kg] für zwei verschiedene Rotorumfangsgeschwindigkeiten ($u_1 = 1,8 \text{ m/s}$; $u_2 = 8,6 \text{ m/s}$).

Bei den faserarmen Äpfeln, die einen hohen Gehalt an wasserlöslichen Zuckern besitzen, führt ein Energieeintrag von ca. 30 kJ/kg zu Medianwerten von 3200 μm und zu CSB-Freisetzungsgraden von 73 % bei einer Umfangsgeschwindigkeit von 1,8 m/s. Eine längere Beanspruchungszeit, z.B. eine Erhöhung des Energieeintrags auf ca. 70 kJ/kg, führt bei der gleichen Rotorumfangsgeschwindigkeit zu Medianwerten von 1800 μm und CSB-Freisetzungsgraden von 96 %. Durch eine Erhöhung der Rotorumfangsgeschwindigkeit können kleinere Medianwerte und CSB-Freisetzungsgrade von nahezu 100 % erreicht werden, wobei aber ein deutlich höherer spezifischer Energieeintrag notwendig ist. Nach Abbildung 4.38 ist aber das gleiche Zerkleinerungsergebnis mit einem niedrigeren spezifischen Energieeintrag möglich, wobei dann aber eine deutlich höhere Beanspruchungszeit gewählt werden muß. Bei Möhren können mit einem Energieeintrag von ca. 100 kJ/kg Medianwerte von 2300 μm und CSB-Freisetzungsgrade von 40 % erreicht werden. Durch eine Erhöhung des Energieeintrages und der Rotorumfangsgeschwindigkeit können kleinere Medianwerte erzielt werden (bis 1500 μm). Der CSB-Freisetzungsgrad wird aber kaum beeinflusst (Zunahme um max. 10 %). Diese geringe Zunahme des CSB-Freisetzungsgrades und der größere Medianwert für Möhren – verglichen mit den Äpfeln – bei gleichem Energieeintrag sind auf den höheren Cellulosegehalt der Möhren zurückzuführen.

Die mechanische Beanspruchung von feuchten organischen Materialien wird, wie die mechanischen Eigenschaften (siehe Kapitel 4.2.2), vom Wassergehalt beeinflusst. Deshalb wurde der Wassergehalt der drei feuchten Materialien Äpfel, Möhren und Kartoffeln durch Trocknung variiert. Der Einfluß des Wassergehaltes auf die mechanische Beanspruchung von Partikelkollektiven feuchter Materialien konnte somit untersucht werden. Um die Ergebnisse der mechanischen Eigenschaften dieser Materialien (vergleiche Kapitel 4.2) mit den in diesem Kapitel dargestellten Ergebnissen vergleichen zu können, wurden die gleichen Wassergehaltseinstellungen wie in Kapitel 4.2 gewählt. Der natürliche Wassergehalt der Materialien wurde durch Trocknung um 10 %, 20 % und 30 % reduziert. Abbildung 4.39 zeigt die Abhängigkeit der Medianwerte für Äpfel und Möhren von der eingetragenen spezifischen Energie für die verschiedenen Wassergehalte. Es werden hier die Werte für eine Rotorumfangsgeschwindigkeit von $u = 1,8 \text{ m/s}$ dargestellt. Die im folgenden erläuterten Sachverhalte gelten auch für die höheren Umfangsgeschwindigkeiten ($u = 4,6 \text{ m/s}$ und $u = 8,6 \text{ m/s}$).

Für alle drei Materialien nimmt mit abnehmendem Wassergehalt die eingetragene spezifische Energie zum Erreichen des gleichen Ergebnisses der mechanischen Beanspruchung ab. So müssen beispielsweise für Äpfel zum Er-

reichen eines Medianwertes von ca. 1700 μm durch Abnahme des Wassergehaltes um 30 % nur 17 kJ/kg anstatt 50 kJ/kg eingetragen werden. Bei Äpfeln und Kartoffeln ist dieser Zusammenhang zwischen Wassergehalt und spezi-

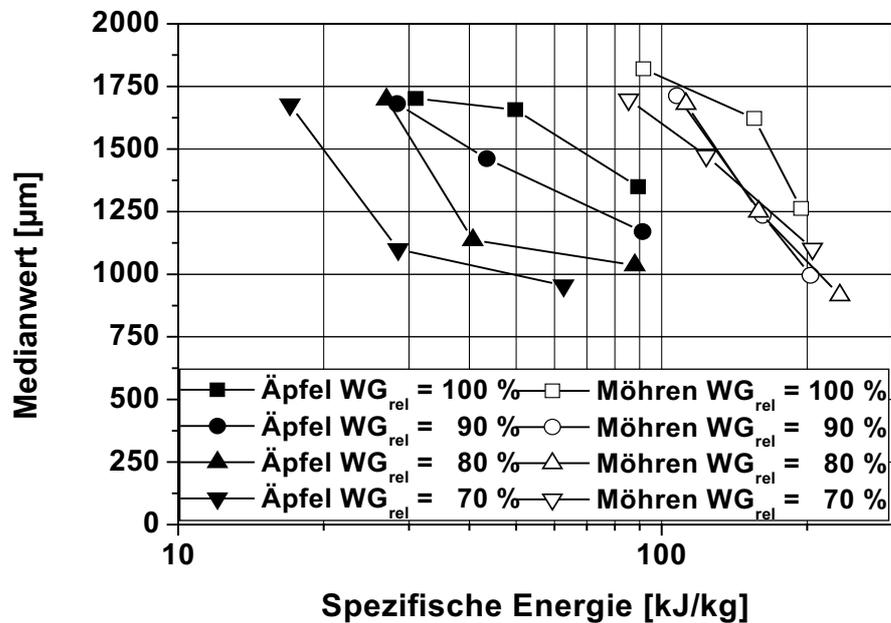


Abb. 4.39: Medianwerte ($x_{50,3}$) [μm] der feuchten organischen Materialien Äpfel und Möhren in Abhängigkeit von der eingetragenen spezifischen Energie (E_{spez}) [kJ/kg] für vier verschiedene Wassergehaltseinstellungen ($\text{WG}_{\text{rel}} = 100\%$ [= ungetrocknetes Ausgangsmaterial], 90 %, 80 %, 70 %) bei einer Rotorumfangsgeschwindigkeit von $u = 1,8\text{ m/s}$ und einer Trocknungstemperatur von $105\text{ }^\circ\text{C}$.

fischer Energie sehr ausgeprägt. Bei Möhren hingegen sind lediglich Unterschiede im Energieeintrag zum Erreichen des gleichen Medianwertes zwischen dem unbehandelten und dem getrockneten Material zu erkennen. Unterschiede in den Energieeinträgen für die auf verschiedene Wassergehalte eingestellten Möhren sind nicht vorhanden. Die Festigkeit der Apfelstruktur nimmt mit abnehmendem Wassergehalt stark ab (vergleiche z.B. Kapitel 4.2.2.1.1). Für Möhren, die eine faserige, anisotrope Struktur besitzen und die einen deutlich größeren Rohfasergehalt als die Äpfel besitzen, ist die natürliche Struktur – in dem hier variierten Bereich – weniger vom Wassergehalt abhängig (siehe Kapitel 2.1).

Im Vergleich zu den ungetrockneten Materialien werden mit abnehmendem Wassergehalt höhere CSB-Freisetzungsgrade erreicht (siehe Abbildung 4.40). Durch eine Reduktion des Wassergehaltes um 30 % kann der CSB-Freisetzungsgrad von Möhren bei ungefähr gleichem spezifischen Energieeintrag um über 30 % absolut gesteigert werden. Jedoch bestehen kaum Unterschiede in den Freisetzungsgraden der mit unterschiedlichen Energieeinträgen

beanspruchten Materialien bei konstantem Wassergehalt (siehe auch Abbildung 4.38). Bei Äpfeln ist der Einfluß des Wassergehaltes auf den CSB-Freisetzungsgrad erwartungsgemäß gering, da für die ungetrockneten Äpfel bereits Freisetzungsrade bis zu 95 % erreicht werden. Es muß lediglich mit abnehmendem Wassergehalt weniger spezifische Energie eingetragen werden, um den gleichen CSB-Freisetzungsgrad wie für die unbehandelten Äpfeln zu erreichen. Die niedrigeren Medianwerte und höheren CSB-Freisetzungs-

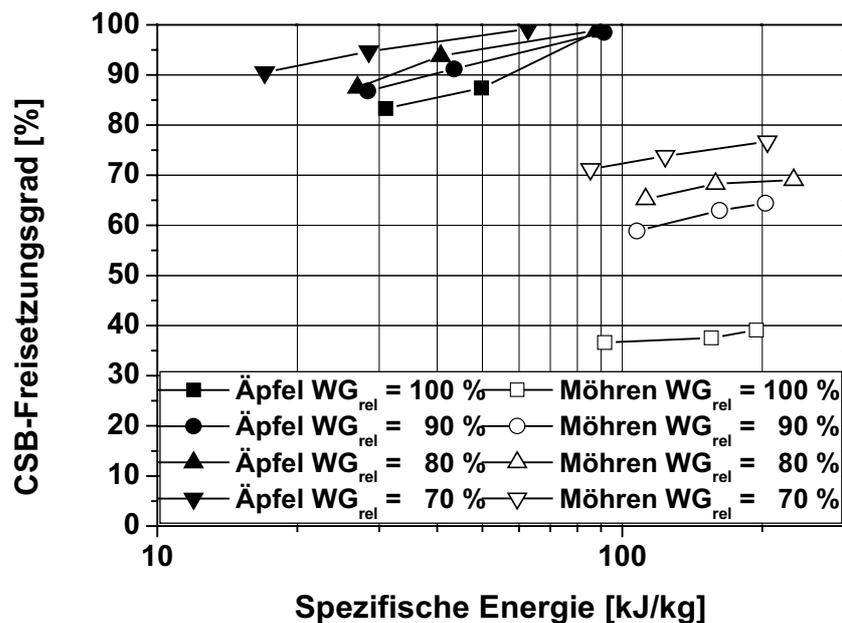


Abb. 4.40: CSB-Freisetzungsgrade [%] der feuchten organischen Materialien Äpfel und Möhren in Abhängigkeit von der eingetragenen spezifischen Energie (E_{spez}) [kJ/kg] für vier verschiedene Wassergehaltseinstellungen ($WG_{rel} = 100\%$ [= ungetrocknetes Ausgangsmaterial], 90 %, 80 %, 70 %) bei einer Rotorumfangsgeschwindigkeit von $u = 1,8$ m/s.

grade bei abnehmendem Wassergehalt sind mit der Auflockerung der Materialstruktur zu erklären.

Die Feinheit des Produktes wird von der spezifischen Energiezufuhr in den Mahlraum und der in der Mühle vorliegenden Verteilungen der Beanspruchungsenergie und der Beanspruchungshäufigkeit bestimmt (Kwade, 2002 und Kwade & Schwedes, 2002). Für die in dieser Arbeit verwendete Schneidmühle sind weder Informationen bezüglich der Verteilung der Beanspruchungsenergie noch bezüglich der Verteilung der Beanspruchungshäufigkeit vorhanden. Gemäß den Abbildungen 4.39 und 4.40 kann jedoch davon ausgegangen werden, daß mit abnehmendem Wassergehalt die Beanspruchungshäufigkeit zunimmt und sich die Verteilung der Beanspruchungsenergie dahingehend ändert, daß ein größerer Anteil der eingetragenen spezifischen

Energie zum Bruch von beanspruchten Partikeln führt. Somit wird die eingetragene spezifische Energie mit abnehmendem Wassergehalt besser genutzt. Außerdem werden durch den hohen natürlichen Wassergehalt bei der mechanischen Beanspruchung feuchter organischer Materialien der Mahlraum sowie die Oberflächen der Festmesser und des Rotors befeuchtet bzw. mit Fruchtsaft benetzt. Dadurch können die Partikel auf dem Rotor gleiten und entgegen dessen Drehrichtung zurücktransportiert werden. Durch die zunehmende Wandhaftung (mit Zunahme des Wassergehaltes) der sich im Mahlraum befindlichen Partikel werden diese dem Beanspruchungsprozeß teilweise entzogen, da sie nicht mehr vom Rotor erfaßt werden und somit nicht weiter zwischen Festmesser und Rotor beansprucht werden können.

Aufgrund der hohen Feuchtigkeit dieser Materialien und der in Kapitel 3.3.3.3.1 vorgestellten Bedingungen zur Oberflächenbestimmung nach dem BET-Verfahren wurde in dieser Arbeit auf eine Bestimmung der Oberfläche feuchter organischer Materialien verzichtet.

Zusammenfassend folgt aus den Abbildungen 4.38 bis 4.40, daß das Verhalten feuchter organischer Materialien bei einer mechanischen Beanspruchung von deren Zusammensetzung und Struktur beeinflußt wird. Dabei sind der Rohfaser- und vor allem der Wassergehalt wichtige Einflußgrößen auf das Materialverhalten.

4.3.1.2 Trockene organische Materialien als Einzelsubstrate

Abbildung 4.41 zeigt die Abhängigkeit der Medianwerte und CSB-Freisetzungsgrade der trocknen organischen Materialien Heu, Reis und Linsen von der spezifischen eingetragenen Energie. Demnach nehmen für die trocknen organischen Materialien Heu, Linsen und Reis mit steigendem spezifischen Energieeintrag der Medianwert ab und der CSB-Freisetzungsgrad zu. Für das faserreiche Heu wird bei gleichem spezifischen Energieeintrag der kleinste Medianwert dieser drei Materialien erreicht, gefolgt von den Linsen und schließlich dem Reis. Für eine weitergehende Zerkleinerung muß für Heu sehr viel spezifische Energie eingetragen werden (ca. 290 kJ/kg), um Medianwerte von ca. 200 µm zu erreichen. Der CSB-Freisetzungsgrad steigt für Heu dabei kontinuierlich von 10,5 % auf 12 % an. Reis und Linsen, die im Vergleich zu Heu einen geringeren Fasergehalt besitzen (Tabelle 3.8, S. 44), zeigen ein ähnliches Zerkleinerungsverhalten. Für den spröderen, härteren Reis (vergleiche auch Kapitel 4.2) ist aber ein höherer Energieeintrag zum Erreichen des gleichen Ergebnisses für die Grobzerkleinerung notwendig. So muß zum Erreichen eines Medianwertes von ca. 560 µm bei Reis ungefähr doppelt soviel Energie eingetragen werden als für Linsen (56 kJ/kg für Reis und 28 kJ/kg für

Linsen). Bei spezifischen Energieeinträgen größer als 100 kJ/kg sind die Unterschiede jedoch nur noch sehr gering.

Die CSB-Freisetzungsgrade sind für Linsen deutlich höher als für Reis. Dies ist auf die unterschiedliche Materialzusammensetzung zurückzuführen. Linsen sind proteinreich, Reis ist stärkehaltig. Aufgrund der CSB-Analytik, die in wässriger Phase stattfindet (vergleiche Kapitel 3.3.1.2.1), spiegelt sich die wesentlich bessere Wasserlöslichkeit von Proteinen im Gegensatz zu Stärke in diesem Ergebnis wider (Mundhenke et al., 2002). Anhand Abbildung 4.41 wird ersichtlich, daß für das faserreiche Heu, die proteinreichen Linsen und den stärkehaltigen Reis mit steigendem Energieeintrag die CSB-Freisetzungsgra-

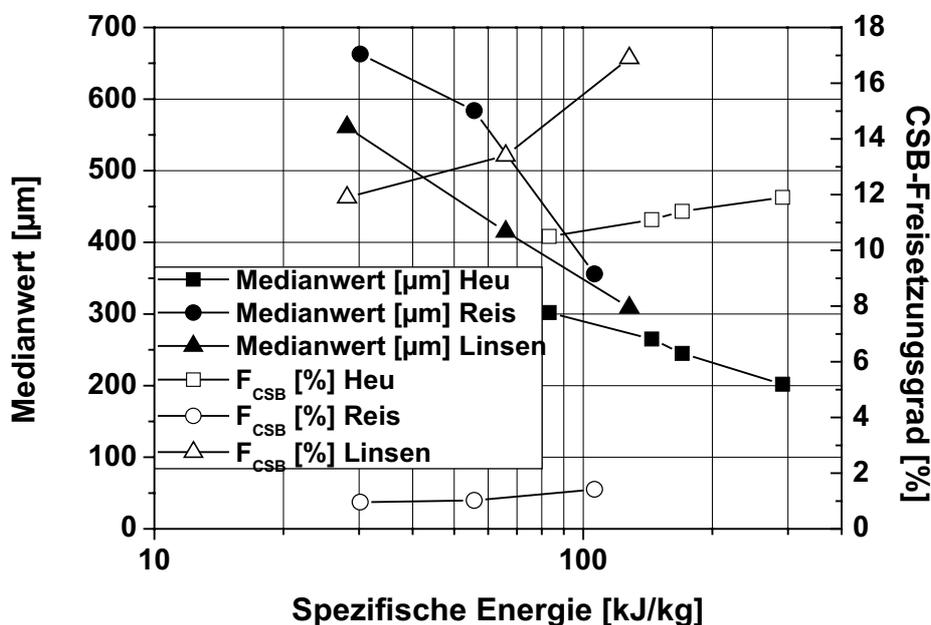


Abb. 4.41: Medianwerte ($x_{50,3}$) [μm] und CSB-Freisetzungsgrade (F_{CSB}) [%] der trockenen organischen Materialien Heu, Linsen und Reis in Abhängigkeit von der eingebrachten spezifischen Energie (E_{spez}) [kJ/kg] für eine Rotorumfangsgeschwindigkeit von $u = 4,6 \text{ m/s}$.

de zu- und die Medianwerte abnehmen. Diese Korrelation ist zunächst auch bei den beiden trockenen fettreichen Materialien Mandeln und Sonnenblumenkernen in Abbildung 4.42 ersichtlich. Das Beanspruchungsverhalten beider Materialien ist sehr ähnlich. Zum Erreichen eines bestimmten Medianwertes muß für beide Materialien ungefähr die gleiche spezifische Energie eingebracht werden. Dies ist auf die ähnliche Struktur beider Materialien zurückzuführen: Beide sind anisotrop und haben einen hohen Rohfasergehalt. Jedoch ist aufgrund des höheren Rohfasergehaltes der Sonnenblumenkerne der Energieeintrag für ähnliche Medianwerte stets geringfügig höher als für Mandeln. Ein Energieeintrag von mehr als 40 kJ/kg führt bei beiden Materialien zu

keinen kleineren Medianwerten mehr, da die Partikel aufgrund der Ölfreisetzung agglomerieren. Diese Agglomerationsneigung der feinen Partikel wird durch eine weiterführende mechanische Beanspruchung erhöht, da infolge des damit einhergehenden weiteren Energieeintrages mehr Öl freigesetzt wird und sich die Primärpartikel zu Agglomeraten zusammenlagern. Die Größe der Primärpartikel ist kleiner als der aus der Trockensiebung berechnete Medianwert der Partikelgrößenverteilung.

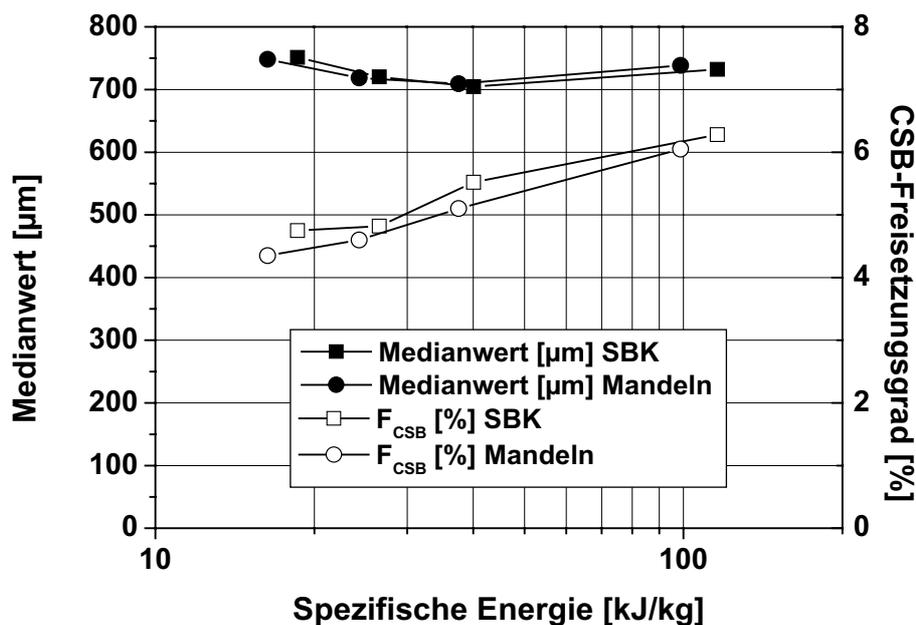


Abb. 4.42: Medianwerte ($x_{50,3}$) [μm] und CSB-Freisetzungsgrade (F_{CSB}) [%] der trockenen, fettreichen organischen Materialien Mandeln und Sonnenblumenkerne (SBK) in Abhängigkeit von der eingetragenen spezifischen Energie (E_{spez}) [kJ/kg] für eine Rotorumfangsgeschwindigkeit von $u = 4,6 \text{ m/s}$.

Dies wird durch die mikroskopischen Aufnahmen in Abbildung 4.43 nochmals verdeutlicht. Man erkennt für beide Materialien die Agglomerate, die sich aus zum Teil erheblich kleineren Primärpartikeln aufbauen. Die aus der Partikelgrößenverteilung berechneten Medianwerte weichen somit für die beiden trockenen fettreichen Materialien von der tatsächlichen, durchschnittlichen Größe der Einzelpartikel ab. Dennoch werden in dieser Arbeit die aus der Trockensiebung ermittelten Medianwerte zum Vergleich mit den übrigen Materialien herangezogen, da sich andere Möglichkeiten für die Bestimmung der Partikelgrößenverteilungen (z.B.: Dispergieren in Mandel- bzw. Sonnenblumenöl und anschließende Messung der Verteilung mittels Laserbeugungsspektrometrie) als nicht praktikabel erwiesen.

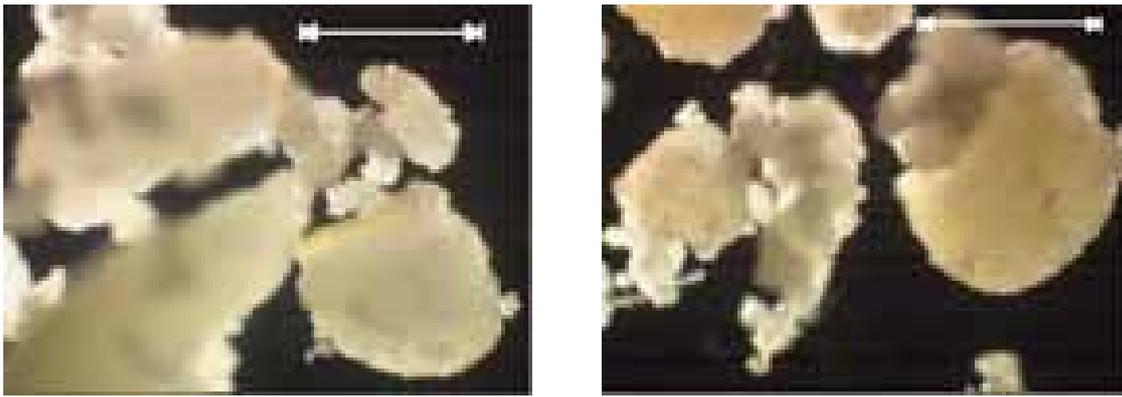


Abb. 4.43: Mikroskopische Aufnahmen der zerkleinerten Materialien Mandeln (links) und Sonnenblumenkerne (rechts); Maßstab: 500 μm .

Der Einfluß der Umfangsgeschwindigkeit auf das Ergebnis der mechanischen Beanspruchung ist in den Abbildungen 4.44 und 4.45 für Heu und Sonnenblumenkerne dargestellt. Abbildung 4.44 zeigt die Abhängigkeit des Medianwertes beider Materialien von der eingetragenen spezifischen Energie für drei verschiedene Umfangsgeschwindigkeiten. Das Heu steht in diesen beiden Abbildungen stellvertretend auch für Reis und Linsen, die Sonnenblumenkerne stellvertretend auch für Mandeln, da der Einfluß der Umfangsgeschwindigkeit für die jeweiligen Materialien gleich ist. Für die fetthaltigen Materialien nimmt die Agglomerationsneigung mit steigender Umfangsgeschwindigkeit zu. Lediglich bei einer Umfangsgeschwindigkeit von 1,8 m/s zeigen die beanspruchten Proben am Beispiel der Sonnenblumenkerne noch keine Agglomerationsneigung. Die Beanspruchung zwischen den vier Festmessern und dem Rotor führt bei dieser Umfangsgeschwindigkeit zu weniger Brüchen. Bei den höheren Umfangsgeschwindigkeiten wird infolge der größeren Beanspruchungshäufigkeit mehr Öl freigesetzt. Deshalb führen die höheren Umfangsgeschwindigkeiten (4,6 m/s und 8,6 m/s) bei höheren Energieeinträgen zu größeren Medianwerten, wenngleich die Anzahl an kleineren Primärpartikeln für die höhere Umfangsgeschwindigkeit größer ist. Abbildung 4.44 zeigt ebenfalls, daß die Unterschiede in den erzielten Medianwerten für die drei Umfangsgeschwindigkeiten bei gleichem spezifischem Energieeintrag sehr gering sind und somit im Rahmen der Meßgenauigkeit vorsichtig interpretiert werden sollten.

Für die fettarmen trockenen organischen Materialien, in Abbildung 4.44 am Beispiel von Heu, werden mit Zunahme der Umfangsgeschwindigkeit bei ungefähr gleichem Energieeintrag kleinere Medianwerte erzielt. Infolge der höheren Umfangsgeschwindigkeit werden diese Materialien besser und schneller vom Rotor erfaßt und zwischen diesem und den Festmessern beansprucht. Ein gewünschtes Beanspruchungsergebnis wird demnach mit Zunahme der Umfangsgeschwindigkeit für kürzere Beanspruchungszeiten erreicht. Eine Be-

sonderheit hinsichtlich des Beanspruchungsergebnisses stellt der Meßwert $x_{50,3} = 754 \mu\text{m}$; $E_{\text{spez}} = 21 \text{ kJ/kg}$ für Heu dar. Nur dieses Material zeigt aufgrund seiner faserreichen Struktur dieses Beanspruchungsverhalten: Für eine grobe Zerkleinerung muß – verglichen mit Reis und Linsen – verhältnismäßig wenig Energie eingetragen werden; für eine weiterführende Zerkleinerung ($x_{50,3} = 150 \mu\text{m}$) muß verhältnismäßig viel spezifische Energie (ca. 450 kJ/kg) eingetragen werden.

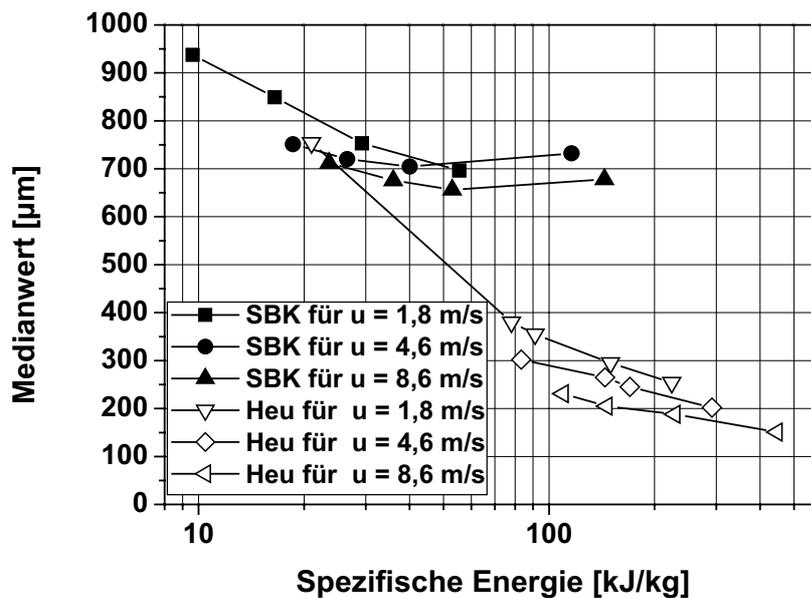


Abb. 4.44: Medianwerte ($x_{50,3}$) [μm] der trockenen organischen Materialien Heu und Sonnenblumenkerne (SBK) in Abhängigkeit der eingetragenen spezifischen Energie (E_{spez}) [kJ/kg] für drei verschiedene Rotorumfangsgeschwindigkeiten ($u_1 = 1,8 \text{ m/s}$; $u_2 = 4,6 \text{ m/s}$; $u_3 = 8,6 \text{ m/s}$).

Abbildung 4.45 stellt die Abhängigkeit des CSB-Freisetzungsgredientes beider Materialien in Abhängigkeit der spezifischen Energie dar. Für beide Materialien steigt demnach der CSB-Freisetzungsgredient mit steigendem Energieeintrag. Infolge der mechanischen Beanspruchung werden mehr Zellinhaltsstoffe freigesetzt und die Materialstruktur wird zunehmend aufgelockert. Für die fettreichen Materialien fällt die Zunahme des Freisetzungsgredientes aufgrund der schlechteren Fettlöslichkeit in Wasser bei der CSB-Analytik geringer aus als für die fettarmen Materialien.

Zusammenfassend ist aus den Abbildungen 4.41 bis 4.45 bei einem Vergleich der fünf untersuchten trockenen Materialien ersichtlich, daß das Verhalten dieser Materialien bei mechanischer Beanspruchung von deren Zusammensetzung und Struktur abhängig ist. Besonders der Fett- und Rohfasergehalt beeinflussen das Materialverhalten maßgeblich.

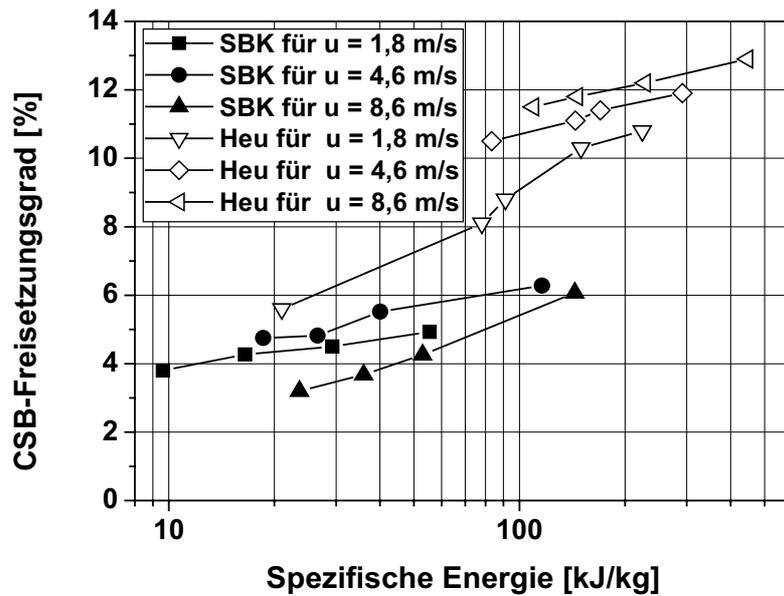


Abb. 4.45: CSB-Freisetzungsgänge (F_{CSB}) [%] der trockenen organischen Materialien Heu und Sonnenblumenkerne (SBK) in Abhängigkeit der eingetragenen spezifischen Energie (E_{spez}) [kJ/kg] für drei verschiedene Rotorumfangsgeschwindigkeiten ($u_1 = 1,8 \text{ m/s}$; $u_2 = 4,6 \text{ m/s}$; $u_3 = 8,6 \text{ m/s}$).

Die Auftragung des CSB-Freisetzungsganges, wie in Abbildung 4.46 am Beispiel Heu, über der spezifischen äußeren Oberfläche für die drei Rotorumfangsgeschwindigkeiten zeigt, daß die spezifische äußere Oberfläche zur Charakterisierung der mechanischen Beanspruchung organischer Materialien anwendbar ist. Zwischen dem CSB-Freisetzungsgang und der spezifischen äußeren

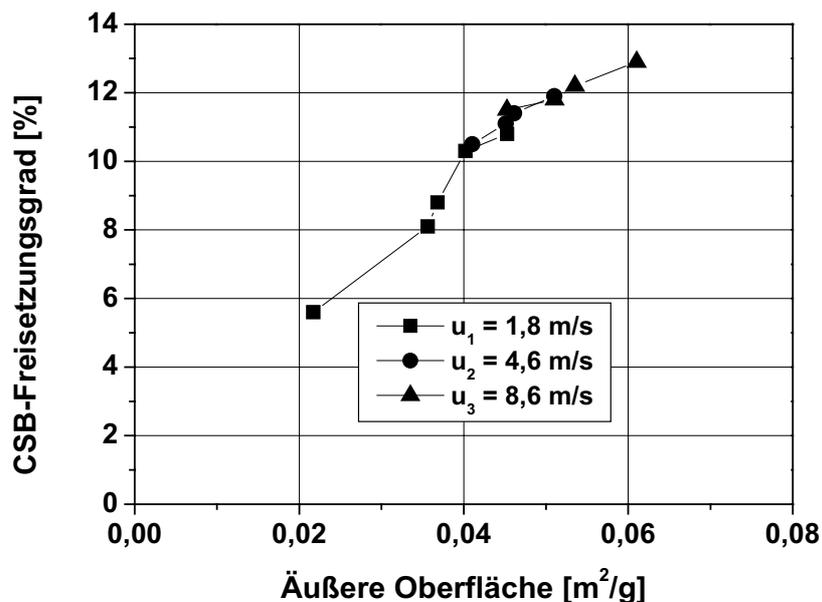


Abb. 4.46: CSB-Freisetzungsgänge (F_{CSB}) [%] des trockenen organischen Materials Heu in Abhängigkeit von der spezifischen äußeren Oberfläche [m^2/g] für drei verschiedene Rotorumfangsgeschwindigkeiten ($u_1 = 1,8 \text{ m/s}$; $u_2 = 4,6 \text{ m/s}$; $u_3 = 8,6 \text{ m/s}$).

ren Oberfläche besteht ein nahezu linearer Zusammenhang, der unabhängig von der Rotorumfangsgeschwindigkeit ist. Mit Zunahme der spezifischen äußeren Oberfläche nehmen die Angriffsflächen für das Wasser, das im Rahmen der CSB-Analytik verwendet wird, zu. Folglich können mehr freigesetzte Zellinhaltsstoffe in die wäßrige Phase diffundieren, und der CSB-Freisetzungsgrad steigt der spezifischen äußeren Oberfläche entsprechend. Demnach kann die spezifische äußere Oberfläche als Parameter zur Beschreibung der mechanischen Beanspruchung trockener organischer Materialien verwendet werden.

4.3.1.3 Vergleich der Ergebnisse der feuchten und trockenen organischen Materialien als Einzelsubstrate

Ein Vergleich der mechanischen Beanspruchung von trockenen und feuchten organischen Materialien als Einzelsubstrate zeigt, daß der Einfluß der Rotorumfangsgeschwindigkeit auf den Zerkleinerungserfolg bei den feuchten organischen Materialien genau umgekehrt dem der trockenen organischen Materialien ist. Während bei den feuchten organischen Materialien eine Erhöhung der Rotorumfangsgeschwindigkeit bei konstantem spezifischem Energieeintrag zu einem größeren Medianwert führt, bewirkt eine Erhöhung der Rotorumfangsgeschwindigkeit bei trockenen organischen Materialien bei konstantem spezifischem Energieeintrag eine Verringerung des Medianwertes. Lediglich für die fettreichen Mandeln und Sonnenblumenkerne ist bezüglich des Einflusses der Rotorumfangsgeschwindigkeit aufgrund der Ölfreisetzung und damit einhergehenden Agglomeration feiner Partikel keine eindeutige Aussage möglich. Wie schon in Kapitel 4.3.1.1 erläutert, hängt die Feinheit des Produktes bei mechanischer Beanspruchung von vielen Faktoren ab, wie den Verteilungen der Beanspruchungshäufigkeit und der Beanspruchungsenergie; diese Verteilungen sind jedoch für die in dieser Arbeit verwendeten Schneidmühle nicht gegeben, sie scheinen jedoch nach den in Kapitel 4.3.1.1 und 4.3.1.2 vorgestellten Ergebnissen stark vom Wassergehalt der beanspruchten Materialien abzuhängen.

4.3.2 Mechanische Beanspruchung der Materialien als Zweikomponentengemische

Zunächst werden die drei Gemische, die aus den trockenen organischen Materialien zusammengestellt wurden, vorgestellt. Es handelt sich um die Gemische Heu-Linsen (faserreich / fettarm), Heu-Sonnenblumenkerne (faserreich / fettreich) und Linsen-Sonnenblumenkerne (faserarm / fettreich). In Abbildung 4.47 sind die Medianwerte [μm] und CSB-Freisetzungsgrade [%] dieser drei

Gemische in Abhängigkeit der eingetragenen spezifischen Energie [kJ/kg] für eine Rotorumfangsgeschwindigkeit von 4,6 m/s dargestellt. Für die Gemische Heu-Linsen und Linsen-Sonnenblumenkerne nehmen nach Abbildung 4.47 der Medianwert mit steigendem spezifischen Energieeintrag ab und der CSB-Freisetzungsgrad zu. Die Agglomerationsneigung der mechanisch beanspruchten Sonnenblumenkerne als Einzelsubstrat ist in Verbindung mit Linsen als Zweikomponentengemisch bei dieser Rotorumfangsgeschwindigkeit (4,6 m/s) für niedrige Energieeinträge nicht vorhanden, denn das freigesetzte Sonnenblumenöl wird von den Linsen infolge ihrer porösen Struktur adsorbiert. Erst bei Energieeinträgen > 60 kJ/kg stagniert der Medianwert bei ca. $600 \mu\text{m}$. Durch die längere Beanspruchungszeit wird zunehmend Öl freigesetzt, das nicht mehr von den Linsen adsorbiert werden kann. Infolgedessen kommt es zur Agglomeration feiner Partikel, und eine weitere Abnahme des Medianwertes ist nicht mehr möglich. Der CSB-Freisetzungsgrad des Linsen-Sonnenblumenkern-Gemisches nimmt dagegen für Energieeinträge > 60 kJ/kg weiter kontinuierlich zu. Durch das Zentrifugieren der Analyseproben während der CSB-Bestimmung in wässriger Phase werden die Agglomerate wahrscheinlich wieder aufgelöst, und die freigesetzten organischen Komponenten können in die wässrige Phase diffundieren. Desweiteren spiegelt sich der hohe Proteingehalt der Linsen wieder.

Nach Abbildung 4.47 führt die mechanische Beanspruchung für das Gemisch Heu-Sonnenblumenkerne zu einem konstanten Medianwert – unabhängig von der eingetragenen spezifischen Energie – bei ca. $300 \mu\text{m}$ bis $350 \mu\text{m}$. Verglichen mit den Ergebnissen der mechanischen Beanspruchung dieser beiden Materialien als Einzelsubstrate (vergleiche Kapitel 4.3.1.2) sind die erzielten Medianwerte des Gemisches niedriger als die der Sonnenblumenkerne als Einzelsubstrat (ca. $700 \mu\text{m}$) und höher als die von Heu als Einzelsubstrat (ca. $250 \mu\text{m}$) bei vergleichbaren Energieeinträgen und gleicher Rotorumfangsgeschwindigkeit (4,6 m/s). Die CSB-Freisetzungsgrade liegen mit ca. 5 % im Bereich der Werte für Sonnenblumenkerne als Einzelsubstrat und niedriger als die von Heu als Einzelsubstrat (10% - 12 %). Heu ist ein faserreiches Material mit einer porösen Struktur, die eine große innere spezifische Oberfläche bedingt (Mundhenke et al., 2002). Das durch die mechanische Beanspruchung freigesetzte Sonnenblumenöl kann in dieser porösen Struktur eingelagert bzw. adsorbiert werden. Die Agglomeration der Sonnenblumenkernpartikel wird somit unterbunden, und die erzielten Medianwerte sind kleiner als die der Sonnenblumenkerne als Einzelsubstrat. Aber durch die Adsorption des Sonnenblumenöls an den porösen Heupartikeln ist eine Anlagerung feinsten Heupartikel ($< 100 \mu\text{m}$) möglich, weshalb die erzielten Medianwerte des Heu-

Sonnenblumenkern-Gemisches größer sind als die des Heus als Einzelsubstrat. Die innere Oberfläche des Heus wird durch das Sonnenblumenöl derart

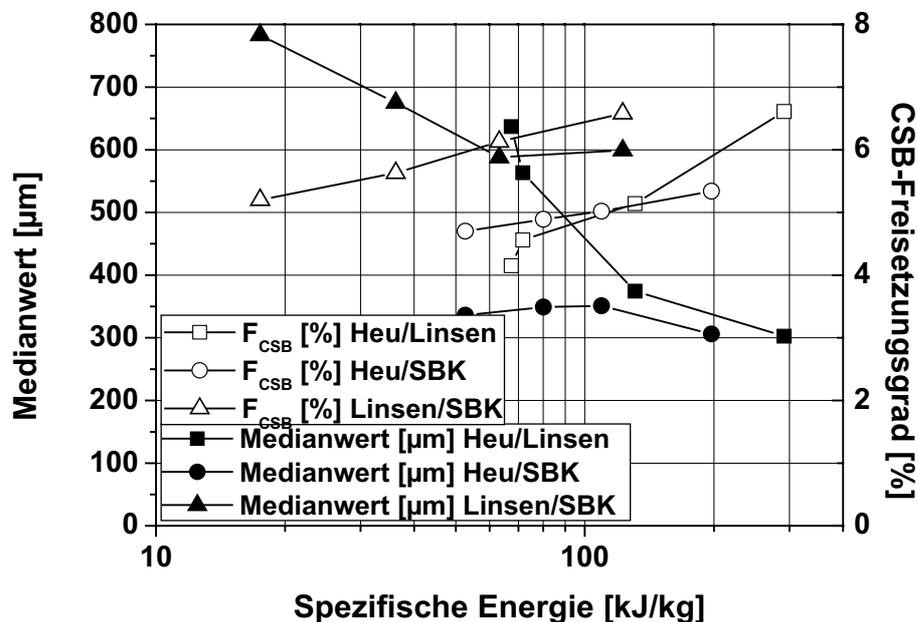


Abb. 4.47: Medianwerte ($x_{50,3}$) [µm] und CSB-Freisetzungsgrade (F_{CSB}) [%] der trockenen organischen Zweikomponentengemische Heu-Linsen, Heu-Sonnenblumenkerne (SBK) und Linsen-SBK in Abhängigkeit von der eingetragenen spezifischen Energie (E_{spez}) [kJ/kg] für eine Rotorumfangsgeschwindigkeit von $u = 4,6$ m/s.

benutzt, daß bei der anschließenden CSB-Analytik nur die von den Sonnenblumenkernen stammenden freigesetzten organischen Komponenten erfaßt werden. Die CSB-Freisetzungsgrade des Gemisches liegen deshalb im Größenordnungsbereich der Sonnenblumenkerne als Einzelsubstrat. Die Absolutwerte des CSB liegen bei diesem Gemisch im gleichen Größenordnungsbereich.

Die Medianwerte des Gemisches Heu-Linsen nehmen mit steigendem spezifischen Energieeintrag kontinuierlich von 650 µm auf 300 µm ab. Die Werte bewegen sich dabei im Bereich des Mittelwertes der beiden Materialien als Einzelsubstrate. Der CSB-Freisetzungsgrad steigt von 4,5 % auf 6,7 % an, liegt aber unter den entsprechenden Werten für Heu (10 % bis 12 %) und Linsen (12 % bis 17 %). Eine mögliche Behinderung der freigesetzten organischen Komponenten beider Materialien während der CSB-Analytik könnte hierfür eine Erklärung sein, aber ansonsten kann dieses Ergebnis physikalisch bzw. chemisch nicht begründet werden.

Abbildung 4.48 zeigt mikroskopische Aufnahmen der drei trockenen Zweikomponentengemische nach einer Beanspruchung mit einer Rotorumfangsge-

schwindigkeit von 4,6 m/s. In der Abbildung ist die Anlagerung kleiner Sonnenblumenkernpartikel an das Heu und an die Linsen zu sehen; die Aufnahme des Heu-Linsen-Gemisches zeigt, daß die beanspruchten Heu- und Linsenpartikel ohne jegliche Wechselwirkungen nebeneinander koexistieren. Die glatten Bruchkanten der Linsenpartikel sind in der Abbildung gut von den schroff zerfaserten Heupartikeln abgegrenzt.

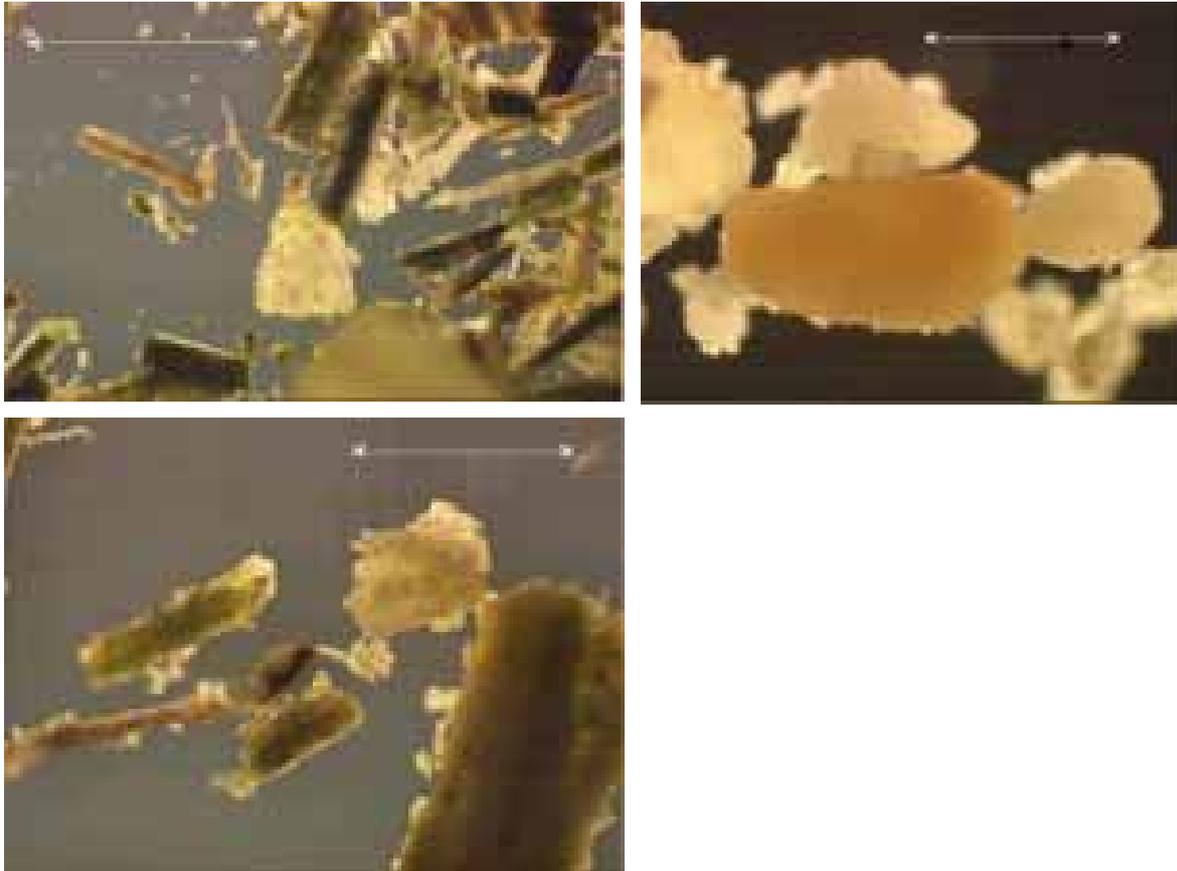


Abb. 4.48: Mikroskopische Aufnahmen der zerkleinerten Zweikomponentengemische Heu-Linsen (oben links), Linsen-Sonnenblumenkerne (oben rechts) und Heu-Sonnenblumenkerne (unten links); Maßstab: 500 μm .

Die Abhängigkeit des Medianwertes vom spezifischen Energieeintrag für verschiedene Umfangsgeschwindigkeiten dieser drei Gemische ist in Abbildung 4.49 dargestellt. Der Medianwert des Linsen-Sonnenblumenkern-Gemisches nimmt bei niedriger ($u_1 = 1,8$ m/s) und mittlerer ($u_2 = 4,6$ m/s) Umfangsgeschwindigkeit mit zunehmendem Energieeintrag ab. Erst bei Energieeinträgen größer 60 kJ/kg stagniert der Medianwert (vergleiche Abbildung 4.47). Für die hohe Umfangsgeschwindigkeit ($u_3 = 8,6$ m/s) werden unabhängig vom spezifischen Energieeintrag Medianwerte von ca. 700 μm erzielt. Infolge der hohen Umfangsgeschwindigkeit findet zwischen den vier Festmessern und dem Rotor eine intensive, gleichmäßige Beanspruchung statt. Dadurch wird schon für kurze Beanspruchungszeiten soviel Sonnenblumenöl freigesetzt, so daß sich feine Partikel an größere anlagern und keine kleineren Medianwerte erreicht

werden können. Bei dem Heu-Sonnenblumenkern-Gemisch führen Energieeinträge größer 50 kJ/kg für alle Umfangsgeschwindigkeiten zu konstanten Medianwerten von ca. 300 μm bis 350 μm . Die Freisetzung des Sonnenblumenöls bewirkt eine Agglomeration der feinen Partikel. Deshalb sind die erzielten Medianwerte des Gemisches größer als die des Heus als Einzelsubstrat (vergleiche Abbildung 4.41). Bei dem Heu-Linsen-Gemisch ist der Einfluß der Umfangsgeschwindigkeit auf den Medianwert gleich dem der Materialien als Einzelsubstrate (vergleiche Abbildung 4.41). Mit Zunahme der Umfangs-

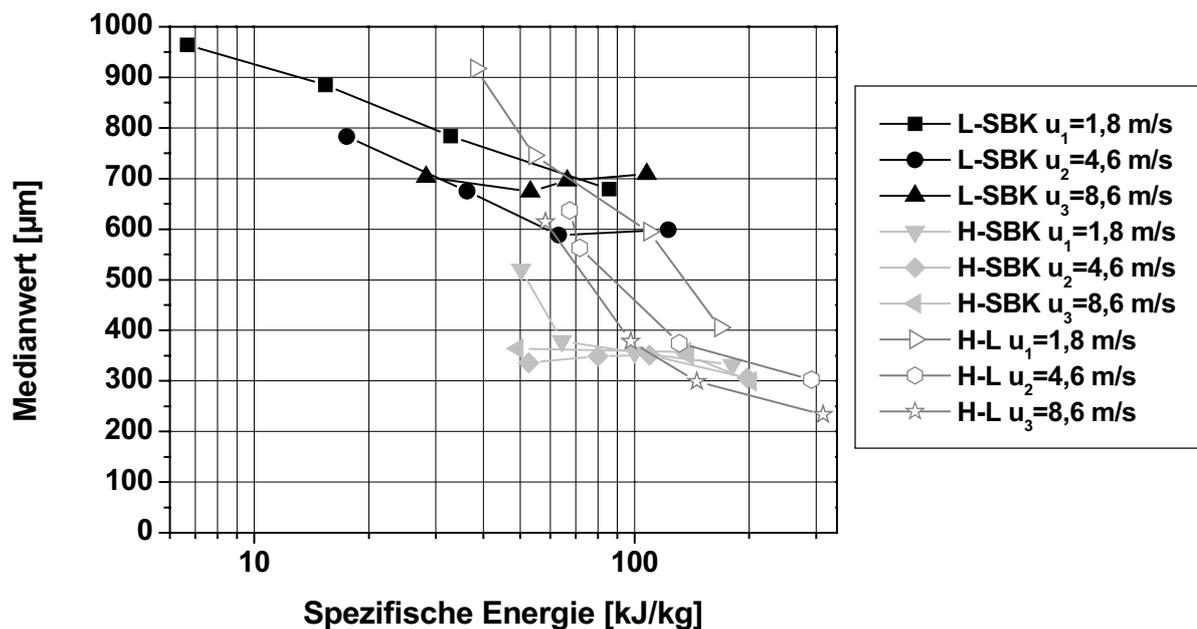


Abb. 4.49: Medianwerte ($x_{50,3}$) [μm] der trockenen organischen Zweikomponentengemische Linsen-Sonnenblumenkerne (L-SBK), Heu-Sonnenblumenkerne (H-SBK) und Heu-Linsen (H-L) in Abhängigkeit der eingetragenen spezifischen Energie (E_{spez}) [kJ/kg] für drei verschiedene Rotorumfangsgeschwindigkeiten ($u_1 = 1,8$ m/s; $u_2 = 4,6$ m/s; $u_3 = 8,6$ m/s).

geschwindigkeit werden bei vergleichbaren spezifischen Energieeinträgen kleinere Medianwerte erzielt. Für die längste Beanspruchungszeit in Verbindung mit der höchsten Umfangsgeschwindigkeit ergeben sich die kleinsten Medianwerte.

Für trockene Zweikomponentengemische folgt zusammenfassend, daß eine gegenseitige Beeinflussung der beiden zeitgleich beanspruchten Materialien vorhanden ist. Linsen und Heu führen in Kombination mit Sonnenblumenkernen zu kleineren Medianwerten als Sonnenblumenkerne als Einzelsubstrat. Ein Gemisch aus Heu und Linsen führt zu Ergebnissen wie bei beiden Materialien als Einzelsubstrate hinsichtlich der Partikelgrößenverteilung.

Im folgenden wird das Verhalten der drei feuchten Gemische Äpfel-Möhren (faserreich / fettarm), Mandeln-Avocados (faserreich / fettreich) und Äpfel-Sonnenblumenkerne (faserarm / fettreich) bei mechanischer Beanspruchung diskutiert. In Abbildung 4.50 sind die Abhängigkeiten der Medianwerte und der CSB-Freisetzungsgrade dieser drei Gemische von der eingetragenen spezifischen Energie für eine Rotorumfangsgeschwindigkeit von 4,6 m/s dargestellt. Für das Äpfel-Möhren-Gemisch nehmen der Medianwert mit steigendem spezifischen Energieeintrag ab und der CSB-Freisetzungsgrad zu. Auffällig bei diesen Ergebnissen ist, daß der erzielte Medianwert für hohe Energieeinträge (287,6 kJ/kg) deutlich niedriger ist (850 µm) als die erzielten Medianwerte der beiden Materialien, beansprucht als Einzelsubstrate bei vergleichbaren Energieeinträgen (siehe Abbildung 4.38: Möhren: 1400 µm; Äpfel: 1650 µm). Der CSB-Freisetzungsgrad des Gemisches liegt ungefähr im Bereich des arithmetischen Mittels der CSB-Freisetzungsgrade dieser Materialien als Einzelsubstrate. Demnach beeinflussen sich beide Materialien bei der mechanischen Beanspruchung als Gemisch. Die Apfelpartikel können sich nach Beginn der mechanischen Beanspruchung an der faserigen Struktur der Möhren anlagern. Durch die Haftung der Apfelstückchen an den Möhrenpartikeln führt die eingetragene spezifische Energie zu mehr Brüchen der beanspruchten Partikeln und somit zu kleineren Medianwerten als für die Materialien, beansprucht als Einzelsubstrate. Durch die mechanische Beanspruchung werden die Zellinhaltsstoffe beider Materialien freigesetzt und befinden sich – aufgrund des hohen natürlichen Wassergehaltes dieser Materialien – bereits in der wäßrigen Phase. Dies führt zu den hohen Freisetzungsraten.

Für das Äpfel-Sonnenblumenkern-Gemisch nehmen der Medianwert ebenfalls mit steigendem spezifischen Energieeintrag ab und der Freisetzungsgrad zu. Für einen Energieeintrag von 120 kJ/kg werden für das Äpfel-Sonnenblumenkern-Gemisch ein Medianwert von 890 µm und ein Freisetzungsgrad von 4,9 % erzielt. Verglichen mit den Ergebnissen der mechanischen Beanspruchung beider Materialien als Einzelsubstrate (vergleiche Abbildungen 4.38 und 4.42) folgt, daß sowohl der Medianwert des Gemisches als auch der Freisetzungsgrad kleiner sind. Die feuchten Apfelstücke können sich während der mechanischen Beanspruchung an die relativ trockenen Sonnenblumenkernpartikel anlagern und werden somit intensiver beansprucht als die Äpfel als Einzelsubstrat. Der niedrige CSB-Freisetzungsgrad kann nur auf dessen Bestimmungsmethode zurückgeführt werden. Durch die Anlagerung hydrophober Bestandteile der Äpfel an die Sonnenblumenkernpartikel können diese freigesetzten organischen Bestandteile wahrscheinlich während des Zentrifugierens nicht mehr in die wäßrige Phase überführt werden. Hohe

Energieeinträge (330 kJ/kg) führen für dieses Gemisch zu Medianwerten im Größenordnungsbereich der Sonnenblumenkerne als Einzelsubstrat (ca. 750 μm). Eine weitere Abnahme des Medianwertes bei weiterführender mechanischer Beanspruchung kann aufgrund der Agglomeration feiner Sonnenblumenkernpartikel nicht erreicht werden.

Für das Mandeln-Avocado-Gemisch wird der Medianwert bei einer Erhöhung des spezifischen Energieeintrages von 47 kJ/kg auf 135 kJ/kg von 1800 μm auf 910 μm fast halbiert. Der CSB-Freisetzungsgrad steigt kontinuierlich an.

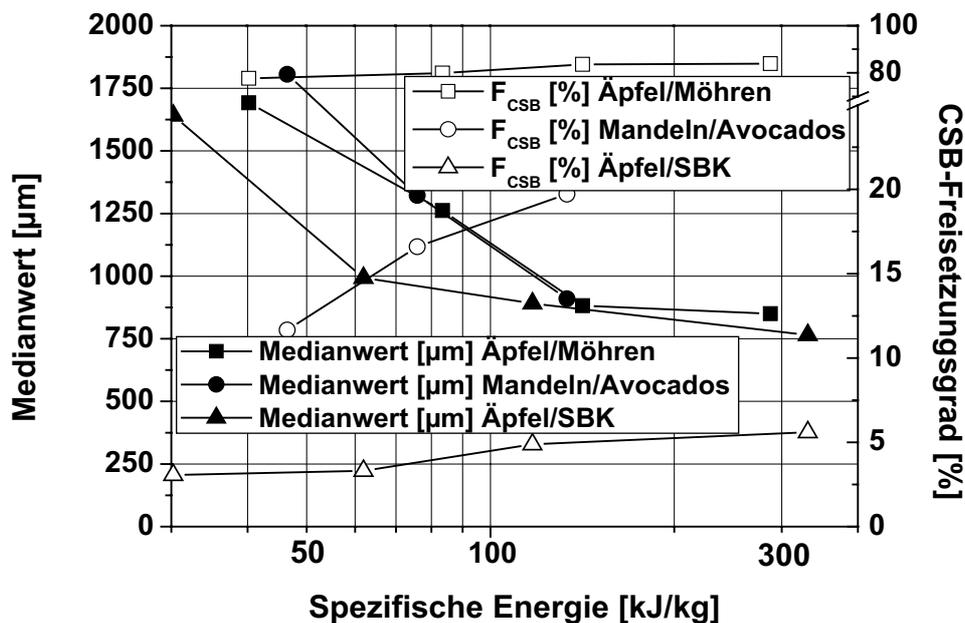


Abb. 4.50: Medianwerte ($x_{50,3}$) [μm] und CSB-Freisetzungsgrade (F_{CSB}) [%] der feuchten organischen Zweikomponentengemische Apfel-Möhren, Mandeln-Avocados und Apfel-Sonnenblumenkerne (SBK) in Abhängigkeit der eingetragenen spezifischen Energie (E_{spez}) [kJ/kg] für eine Rotorumfangsgeschwindigkeit von $u = 4,6$ m/s.

Ein Vergleich mit den beiden Materialien als Einzelsubstrate ist nicht möglich, da – infolge des hohen Fettanteils der Avocados – diese im Anschluß an die mechanische Beanspruchung nicht bezüglich ihrer Partikelgrößenverteilung analysiert werden konnten. Jedoch werden keine kleineren Medianwerte als die der Mandeln als Einzelsubstrate erzielt.

Abbildung 4.51 zeigt mikroskopische Aufnahmen von diesen drei mechanisch beanspruchten Gemischen. Für das Apfel-Möhren-Gemisch zeigt die mikroskopische Aufnahme (Abbildung 4.51 oben links), daß die beiden Materialien als solche nicht mehr unterschieden werden können. Es bilden sich Apfel-Möhren-Partikel, deren Strukturen die einzelnen Materialien nicht mehr erkennen läßt. Die mikroskopische Aufnahme des Apfel-Sonnenblumenkern-Ge-

misches (oben rechts) zeigt die Anlagerung des freigesetzten Zellsaftes und zerkleinerter Apfelstückchen an die größeren Sonnenblumenkernpartikel. Die Oberfläche der Sonnenblumenkernpartikel ist fast vollständig vom freigesetzten Apfelzellsaft und kleinen Apfelbruchstückchen überzogen. Dieses Phänomen ist beim Mandel-Avocado-Gemisch ebenfalls zu sehen (unten links); die breiartige Avocadomasse überzieht die Oberfläche der Mandelpartikel kom-

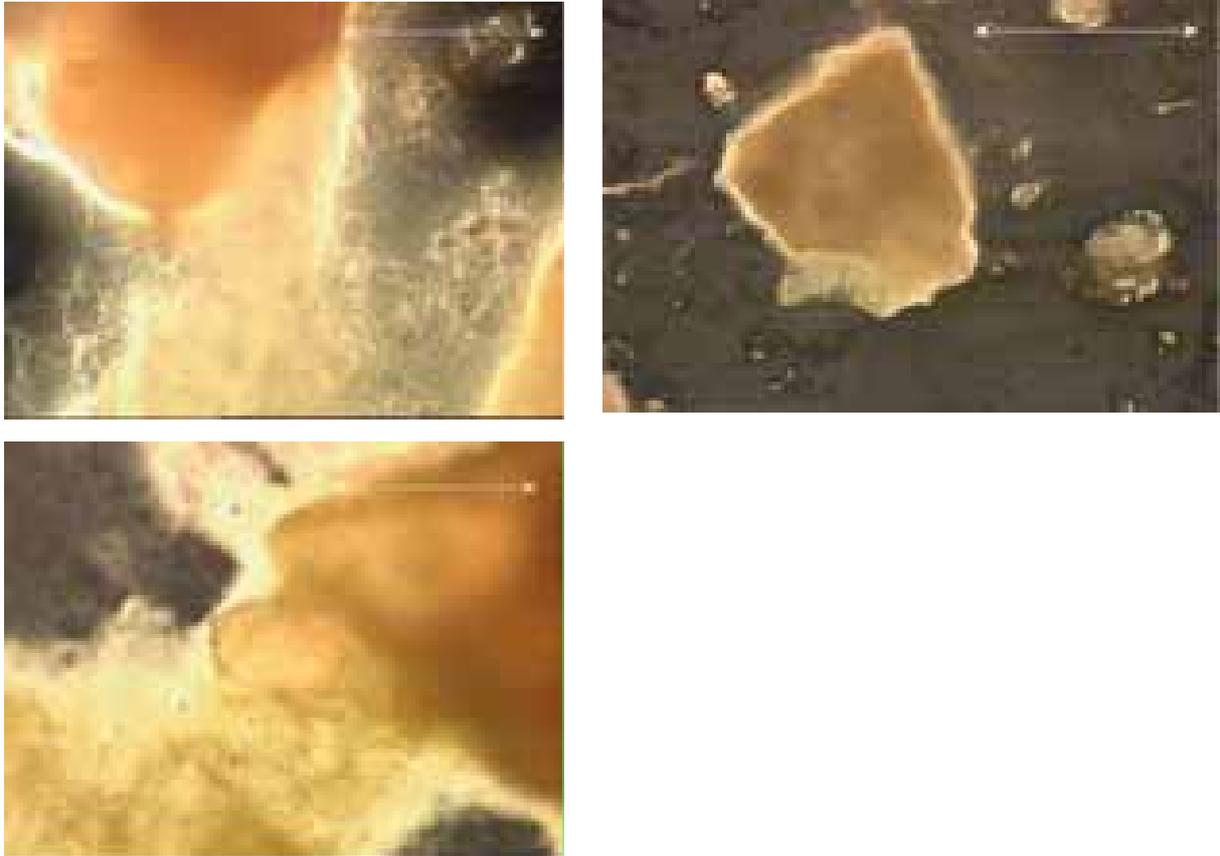


Abb. 4.51: Mikroskopische Aufnahmen der zerkleinerten Zweikomponentengemische Apfel-Möhren (oben links), Apfel-Sonnenblumenkerne (oben rechts) und Mandeln-Avocados (unten links); Maßstab: 500 μm .

plett. Die freigesetzten Substanzen Öl und Fett sind auf der mikroskopischen Aufnahme ebenfalls gut zu erkennen.

Die Abhängigkeiten der Medianwerte und der CSB-Freisetzungsgrade vom spezifischen Energieeintrag für verschiedene Umfangsgeschwindigkeiten der Gemische Apfel-Möhren und Apfel-Sonnenblumenkerne sind in den Abbildungen 4.52 und 4.53 dargestellt. Wegen der schwierigen Aufbereitung der Proben, die Avocados beinhalten, wurde das Mandel-Avocado-Gemisch nur bei der Umfangsgeschwindigkeit von 4,6 m/s beansprucht und somit bereits in Abbildung 4.50 erläutert. Für das Apfel-Möhren-Gemisch zeigen die Abbildungen 4.52 und 4.53, daß für die kleine ($u_1 = 1,8 \text{ m/s}$) und mittlere ($u_2 = 4,6 \text{ m/s}$) Umfangsgeschwindigkeit durch eine Verdreifachung (beispielsweise für $u_2 = 4,6 \text{ m/s}$ von 40 kJ/kg auf 140 kJ/kg) der eingetragenen spezifischen Energie

der Medianwert halbiert werden kann (z.B. für $u_2 = 4,6 \text{ m/s}$ von $1690 \mu\text{m}$ auf $880 \mu\text{m}$) bei kontinuierlich steigendem CSB-Freisetzungsgrad (für $u_2 = 4,6 \text{ m/s}$ von 78% auf 84%). Eine weitergehende mechanische Beanspruchung führt

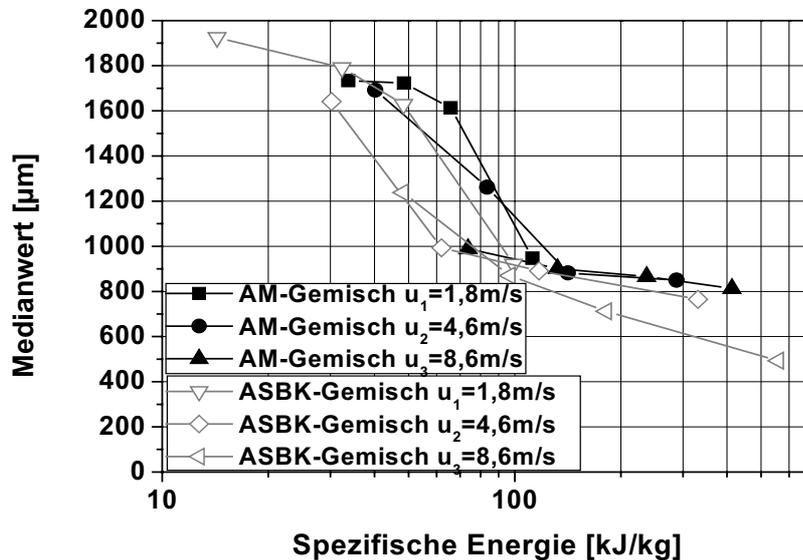


Abb. 4.52: Medianwerte ($x_{50,3}$) [μm] der feuchten organischen Zweikomponentengemische Apfel-Möhren (AM) und Apfel-Sonnenblumenkerne (ASBK) in Abhängigkeit der eingetragenen spezifischen Energie (E_{spez}) [kJ/kg] für drei verschiedene Rotorumfangsgeschwindigkeiten ($u_1 = 1,8 \text{ m/s}$; $u_2 = 4,6 \text{ m/s}$; $u_3 = 8,6 \text{ m/s}$).

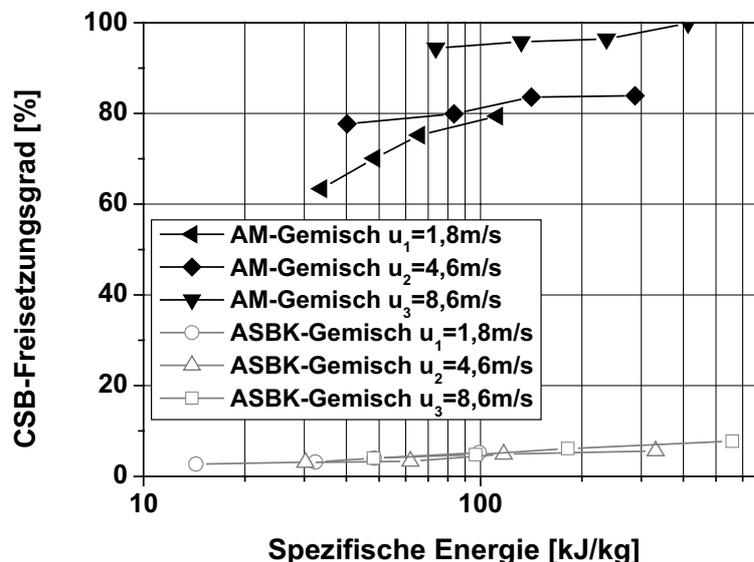


Abb. 4.53: CSB-Freisetzungsgrade [%] der feuchten organischen Zweikomponentengemische Apfel-Möhren (AM) und Apfel-Sonnenblumenkerne (ASBK) in Abhängigkeit der eingetragenen spezifischen Energie (E_{spez}) [kJ/kg] für drei verschiedene Rotorumfangsgeschwindigkeiten ($u_1 = 1,8 \text{ m/s}$; $u_2 = 4,6 \text{ m/s}$; $u_3 = 8,6 \text{ m/s}$).

bei der mittleren Umfangsgeschwindigkeit trotz verdoppeltem Energieeintrag (von 140 kJ/kg auf 290 kJ/kg) zu keinem signifikanten Zerkleinerungserfolg (weitere Reduktion des Medianwertes um lediglich 30 μm). Die größte Umfangsgeschwindigkeit ($u_3 = 8,6 \text{ m/s}$) führt schon bei niedrigen Energieeinträgen (74 kJ/kg) zu Medianwerten von 990 μm und Freisetzungsgraden von 94 %. Eine Steigerung der eingetragenen spezifischen Energie von 74 kJ/kg auf 410 kJ/kg führt zu einer weiteren Abnahme des Medianwertes auf 810 μm und zu CSB-Freisetzungsgraden von nahezu 100 %.

Verglichen mit der mechanischen Beanspruchung beider Materialien (Äpfel, Möhren) als Einzelsubstrate verhält sich das Gemisch für niedrige Energieeinträge nahezu wie Möhren als Einzelsubstrat und nähert sich mit steigendem Energieeintrag dem Verhalten der Äpfel als Einzelsubstrat an. Bei niedrigen Energieeinträgen wird die fasrige Struktur der Möhren noch nicht so stark zerstört, daß sich die beanspruchten, infolge der niedrigeren mechanischen Steifigkeit, kleineren Apfelpartikel an die noch vorhandene Möhrenstruktur anlagern können. Demzufolge verhält sich das Gemisch wie die Möhren als Einzelsubstrat. Durch die weitere Energiezufuhr wird die Möhrenstruktur so zerstört, daß keine Anlagerung kleinerer Apfelpartikel an die nun auch deutlich kleiner werdenden Möhrenpartikel mehr erfolgen kann. Es werden kleinere Medianwerte als die bei mechanischer Beanspruchung beider Materialien als Einzelsubstrate erzielt.

Für das Äpfel-Sonnenblumenkern-Gemisch nehmen der Medianwert mit steigendem Energieeintrag für alle drei Umfangsgeschwindigkeiten ab und der CSB-Freisetzungsgrad zu. Bei gleichem Energieeintrag führt die höchste Umfangsgeschwindigkeit zum kleinsten Medianwert und höchsten CSB-Freisetzungsgrad. Verglichen mit der mechanischen Beanspruchung dieser Materialien als Einzelsubstrate fällt auch bei diesem Gemisch auf, daß niedrigere Medianwerte für das Gemisch als für Äpfel und Sonnenblumenkerne als Einzelsubstrate erzielt werden. Durch die Benetzung der Oberfläche der Sonnenblumenkernpartikel mit kleinen Apfelpartikeln führt eine weitergehende Beanspruchung zu kleineren Medianwerten, da zum einen wohl die Beanspruchung des Äpfel-Sonnenblumenkern-Gemisches zwischen den Festmessern und dem Rotor zu mehr Brüchen der beanspruchten Partikeln führt, und zum anderen die Agglomerationsneigung der Sonnenblumenkerne durch die Benetzung mit Apfelpartikeln und Apfelzellsaft unterbunden wird. Der CSB-Freisetzungsgrad steigt kontinuierlich mit Steigerung des spezifischen Energieeintrages und mit Zunahme der Umfangsgeschwindigkeit. Die Freisetzungsgrade des Gemisches sind niedriger als die der beiden Einzelsubstrate, wie für Abbildung 4.50 erklärt.

Wie für die Materialien als Einzelsubstrate erläutert, wurden die Oberflächenbestimmungen nur für trockene Materialgemische durchgeführt. Abbildung 4.54 zeigt die spezifische Gesamtoberfläche $S_{m,BET}$ in $[m^2/g]$ aufgetragen über der spezifischen äußeren Oberfläche $S_{m,PGV}$ in $[m^2/g]$ am Beispiel des Gemisches Heu-Linsen. Direkte Einflüsse der Rotor-umfangsgeschwindigkeit auf die spezifischen Oberflächen sind Abbildung 4.54 nicht zu entnehmen. Die

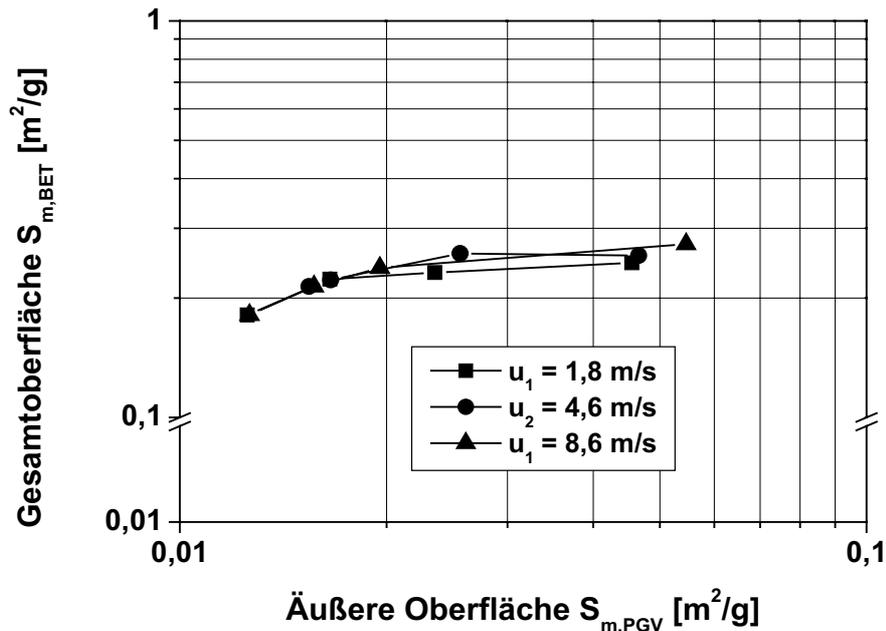


Abb. 4.54: Auftragung der spezifischen Gesamtoberfläche $S_{m,BET}$ [m^2/g] gegen die spezifische äußere Oberfläche $S_{m,PGV}$ [m^2/g] für das trockene organische Gemisch Heu-Linsen für drei Rotorumfangsgeschwindigkeiten ($u_1 = 1,8$ m/s; $u_2 = 4,6$ m/s und $u_3 = 8,6$ m/s).

spezifische Gesamtoberfläche nimmt von $0,18$ m^2/g auf maximal $0,28$ m^2/g zu. Dies entspricht einer relativen Zunahme von ca. 51 %. Die spezifische äußere Oberfläche steigt dabei von $0,013$ m^2/g auf $0,050$ m^2/g an; dies entspricht einer relativen Zunahme von 400 %. Die Gesamtoberfläche ist um den Faktor 5 bis 20 größer als die äußere Oberfläche. Der absolute Zuwachs der Gesamtoberfläche ist etwa doppelt so groß wie der der äußeren Oberfläche. Relativ gesehen bedeutet das einen erheblichen Zuwachs der äußeren Oberfläche, aber nur einen unerheblichen der Gesamtoberfläche. Der Einfluß der mechanischen Beanspruchung auf die Gesamtoberfläche ist daher nicht stark ausgeprägt, der Einfluß auf die äußere Oberfläche hingegen sehr; eine weiterführende mechanische Beanspruchung bewirkt eine erhebliche Zunahme der äußeren Oberfläche. Somit können Untersuchungen von Mundhenke (2002) zu organischen Einzelsubstraten auch für organische Gemische übertragen und angewendet werden.

Im folgenden wird der CSB-Freisetzungsgrad des Heu-Linsen-Gemisches analog zu Abbildung 4.46 (Heu als Einzelsubstrat) gegen die spezifische äußere Oberfläche aufgetragen. Nach Abbildung 4.55 besteht – im Gegensatz zu den Materialien als Einzelsubstrate – kein von der Umfangsgeschwindigkeit unabhängiger Zusammenhang zwischen der äußeren spezifischen Oberfläche und dem CSB-Freisetzungsgrad. Es besteht ein deutlicher Einfluß der Rotor-

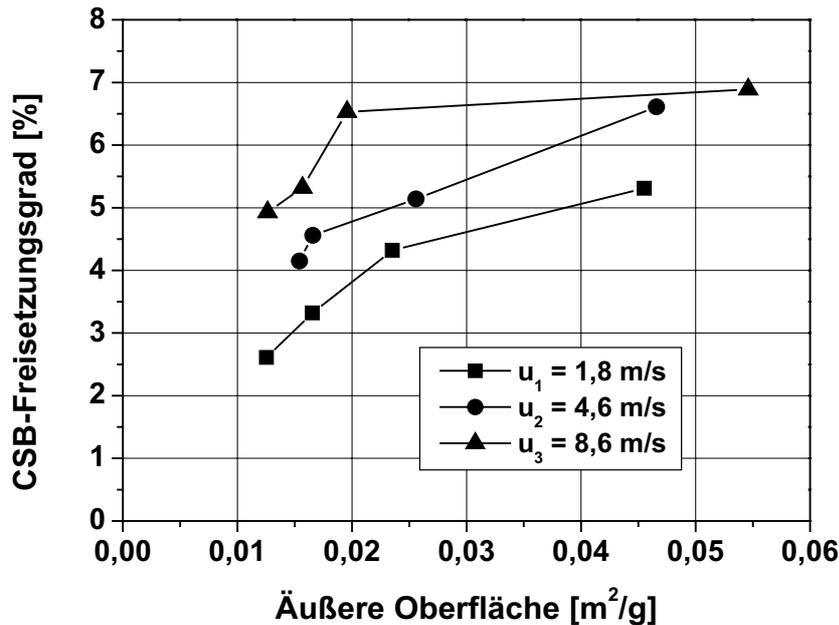


Abb. 4.55: Auftragung des CSB-Freisetzungsgrades [%] gegen die spezifische äußere Oberfläche $S_{m,PGV}$ [m²/g] des trockenen organischen Gemisches Heu-Linsen für drei Rotorumfangsgeschwindigkeiten ($u_1 = 1,8$ m/s; $u_2 = 4,6$ m/s und $u_3 = 8,6$ m/s).

umfangsgeschwindigkeit. Durch die Zunahme der spezifischen äußeren Oberfläche wird die Angriffsfläche für das Wasser bei der CSB-Analytik erhöht, und mehr Zellinhaltsstoffe können in die wäßrige Phase diffundieren. Gleiche CSB-Freisetzungsgrade (beispielsweise $F_{CSB} = 5\%$) können für die drei Umfangsgeschwindigkeiten mit unterschiedlichen spezifischen äußeren Oberflächen erzielt werden ($S_{m,PGV,u=1,8m/s} = 0,013$ m²/g; $S_{m,PGV,u=4,6m/s} = 0,003$ m²/g und $S_{m,PGV,u=8,6m/s} = 0,046$ m²/g). Eine Behinderung bei der CSB-Analytik durch die Anwesenheit zweier Materialien muß demnach vorliegen. Die spezifische äußere Oberfläche kann für organische Zweikomponentengemische nur unter Angabe der Rotorumfangsgeschwindigkeit der mechanischen Beanspruchung als Parameter zur Beschreibung der mechanischen Beanspruchung verwendet werden. Insofern sollte das Ergebnis einer mechanischen Beanspruchung nicht alleine mittels der spezifischen äußeren Oberfläche charakterisiert werden.

4.3.3 Vergleich der Ergebnisse der mechanischen Beanspruchung der Materialien als Einzelsubstrate und als Zweikomponentengemische

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse aus 4.3.1 (Mechanische Beanspruchung der Materialien als Einzelsubstrate) mit den Ergebnissen aus 4.3.2 (Mechanische Beanspruchung der Materialien als Zweikomponentengemische) miteinander verglichen und abschließend diskutiert. Tabelle 4.2 gibt zunächst einen Überblick über die gewonnenen Ergebnisse und Erkenntnisse. Demnach führt eine Erhöhung des spezifischen Energieeintrages für die Einzelsubstrate zu kleineren Medianwerten und größeren CSB-Freisetzungsraten, ausgenommen die fettreichen Materialien; dort stagniert der Medianwert ab einem gewissen Energieeintrag infolge von Agglomeration, bedingt durch Ölfreisetzung. Ein Vergleich der drei trockenen Zweikomponentengemische zeigt, daß die gewonnenen Ergebnisse aus den Versuchen mit den Materialien als Einzelsubstrate nicht direkt übernommen werden können. Tabelle 4.2 ist zu entnehmen, daß sich die Materialien bei gemeinsamer mechanischer Beanspruchung gegenseitig beeinflussen. So kann beispielsweise die Agglomeration der fettreichen Sonnenblumenkerne durch geschickte Kombination mit anderen Materialien (hier Heu bzw. Linsen) unterbunden werden.

Tabelle 4.2: Zusammenfassung der in Kapitel 4.3.1 und 4.3.2 beschriebenen Ergebnisse und Vergleich zwischen den Ergebnissen aus 4.3.1 und 4.3.2. {Abhängigkeiten der Medianwerte ($x_{50,3}$ [μm]) und CSB-Freisetzungsraten (F_{CSB} [%]) mit zunehmendem spezifischen Energieeintrag (E_{Spez} [kJ/kg])}.

Materialien (Einzelsubstrate)	Medianwert	CSB-Freisetzungsraten	Wassergehalt abnehmend
	mit zunehmendem spez. Energieeintrag (für die Materialien, beansprucht als Einzelsubstrate)		bei konstantem spez. Energieeintrag
Äpfel	abnehmend	zunehmend	$x_{50,3}$ abnehmend F_{CSB} zunehmend
Möhren	abnehmend	zunehmend	$x_{50,3}$ gleichbleibend F_{CSB} zunehmend
Heu	abnehmend	zunehmend	nicht variiert
Linsen	abnehmend	zunehmend	nicht variiert
SBK	nahezu unverändert	zunehmend	nicht variiert

Materialien (Gemische)	Medianwert	CSB-Freisetzungs- grad	Wassergehalt ab- nehmend
	im Vergleich mit den Materialien, beansprucht als Einzelsubstrate, bei gleichen spez. Energieeinträgen		
Apfel-Möhren-Gemisch	kleiner als für beide Materialien, beansprucht als Einzelsubstrate	größer als für die Möhren beansprucht als Einzelsubstrat und etwas kleiner als für die Äpfel, beansprucht als Einzelsubstrat	nicht variiert
Heu-Linsen-Gemisch	ungefähr im Größenordnungsbereich der Linsen, beansprucht als Einzelsubstrat	kleiner als für beide Materialien, beansprucht als Einzelsubstrate	nicht variiert
Heu-SBK-Gemisch	kleiner als für SBK, beansprucht als Einzelsubstrat und größer als für Heu, beansprucht als Einzelsubstrat	ungefähr im Größenordnungsbereich der SBK, beansprucht als Einzelsubstrat	nicht variiert
Linsen-SBK-Gemisch	kleiner als für SBK, beansprucht als Einzelsubstrat und größer als für Linsen, beansprucht als Einzelsubstrat	ungefähr im Größenordnungsbereich der SBK, beansprucht als Einzelsubstrat	nicht variiert
Apfel-SBK-Gemisch	kleiner als für Äpfel, beansprucht als Einzelsubstrat und größer als für SBK, beansprucht als Einzelsubstrat	ungefähr im Größenordnungsbereich der SBK, beansprucht als Einzelsubstrat	nicht variiert

Auch bei dem feuchten Zweikomponentengemisch Apfel-Möhren zeigt Tabelle 4.2. die gegenseitige Beeinflussung der Materialien: so können für das Gemisch kleinere Medianwerte erzielt werden als für die beiden Materialien als Einzelsubstrate. Weiterhin verhält sich dieses Gemisch für niedrige Energieeinträge eher wie die Äpfel als Einzelsubstrat und für höhere Energieeinträge eher wie die Möhren als Einzelsubstrat.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, daß sich alle untersuchten Materialien bei gemeinsamer mechanischer Beanspruchung gegenseitig beeinflussen, gewonnene Ergebnisse für die Materialien als Einzelsubstrate

demnach nicht auf Gemische übertragen werden können und die gegenseitige Beeinflussung sehr unterschiedlich sein kann und von dem jeweiligen Gemisch abhängig ist.

4.3.4 Einfluß der mechanischen Beanspruchung auf das anaerobe Abbauverhalten organischer Zweikomponentengemische

Im folgenden wird der Einfluß der mechanischen Beanspruchung auf den anaeroben Abbau von Zweikomponentengemischen dargestellt. Der Einfluß einer mechanischen Beanspruchung als verfahrenstechnischer Schritt vor dem anaeroben Abbau für organische Materialien als Einzelsubstrate wurde bereits ausführlich von Mundhenke (2002) untersucht.

4.3.4.1 Trockene organische Zweikomponentengemische

Der Einfluß der Partikelgröße (charakterisiert über den Medianwert der Partikelgrößenverteilung) wurde zunächst an den trockenen Gemischen (Heu-Linsen, Heu-Sonnenblumenkerne und Linsen-Sonnenblumenkerne) untersucht, da eine repräsentative Probennahme für die feuchten Gemische unmöglich war. Die Beladungsrate bei diesen Abbaueversuchen war 0,7 [g/g]. Abbildung 4.56 zeigt den Abbaugrad, bestimmt aus der Faulgasausbeute, für die drei trockenen Gemische jeweils für drei unterschiedlich mechanisch beanspruchte Proben und vergleichsweise für das unbeanspruchte Gemisch.

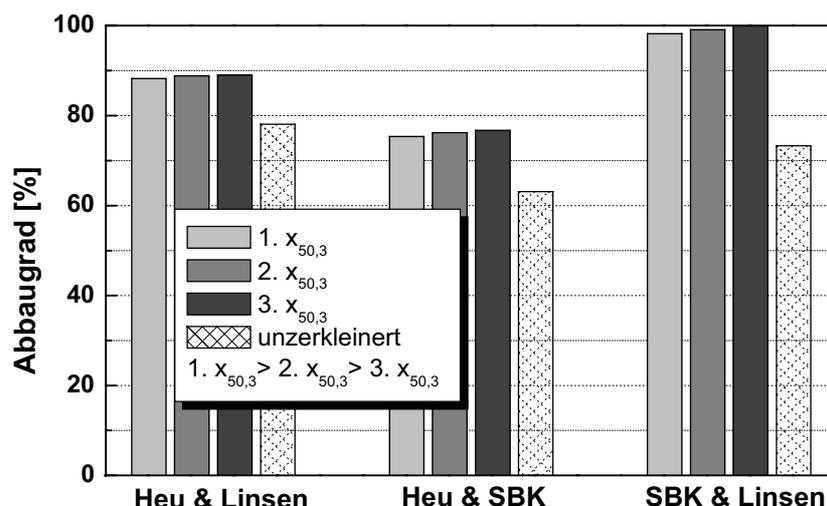


Abb. 4.56: Abbaugrad ξ_G [%] in Abhängigkeit des Medianwertes [μm] bei mechanisch beanspruchten und unbeanspruchten Proben der drei trockenen Zweikomponentengemische Heu-Linsen, Heu-Sonnenblumenkerne (SBK) und Linsen-Sonnenblumenkerne (SBK) bei einer Beladungsrate von 0,7 [g/g].

Es ist ersichtlich, daß durch eine mechanische Beanspruchung die Faulgasausbeute für alle drei Gemische deutlich gesteigert werden kann (Zunahme von 10 % für das Heu-Linsen-Gemisch und 25 % für das Linsen-Sonnenblumenkern-Gemisch). Der Unterschied zwischen den jeweiligen Abbaugraden eines auf verschiedene Partikelgrößen zerkleinerten Zweikomponentengemisches ist mit 1 % bis 3 % nur gering. Dieses Ergebnis konnte Mundhenke (2002) bereits bei den Einzelsubstraten feststellen. Da im folgenden des öfteren die Abbaugrade der Gemische mit denen der Einzelsubstrate verglichen werden, befindet sich im Anhang (Kapitel 7.3, Tabelle 7.3.1) eine tabellarische Auflistung aller Abbaugrade der Gemische sowie Einzelsubstrate (entnommen aus Mundhenke, 2002). Bei Kombination von schwerabbaubaren Materialien (Heu; Sonnenblumenkerne) mit leichtabbaubaren Materialien (Linsen) werden Abbaugrade erreicht, die nahezu dem arithmetischen Mittel der Einzelsubstratabbaugrade entsprechen (vergleiche Tabelle 7.3.1 im Anhang). Bei Kombination zweier schwerabbaubarer Materialien (Heu und Sonnenblumenkerne) werden für das Gemisch kleinere Abbaugrade als für beide Materialien als Einzelsubstrate erzielt (siehe Tabelle 7.3.1 im Anhang). Somit ist vor allem die aus der mechanischen Beanspruchung resultierende Auflockerung der Materialstruktur entscheidend für die Zunahme des Abbaugrades und weniger die Zunahme der spezifischen Oberflächen.

Abbildung 4.57 zeigt den Abbaugrad der beiden trockenen Gemische Heu-Linsen und Heu-Sonnenblumenkerne in Abhängigkeit von der Beladungsrate. Die Wahl der Beladungsrate erfolgte in Anlehnung an die Ergebnisse als Einzelsubstrate, und sie wurde nach der Abbaubarkeit der jeweiligen Materialien, aus denen die Zweikomponentengemische zusammengestellt wurden, ausgewählt. Da ausführliche Untersuchungen von Mundhenke (2002) gezeigt haben, daß eine mechanische Beanspruchung bei Einzelsubstraten für leichtabbaubare Materialien nur zu einer Erhöhung der Faulgasausbeute für Beladungsraten bis 0,9 [g/g] führt, für schwerabbaubare Materialien jedoch für Beladungsraten bis 1,4 [g/g] ein verbesserter anaerober Abbau durch vorhergehende mechanische Beanspruchung erzielt werden kann, wurden bei den Zweikomponentengemischen, die aus zwei leicht abbaubaren Materialien zusammengesetzt wurden, Beladungsraten im Bereich von 0,3 [g/g] bis 1,1 [g/g] und bei Zweikomponentengemische, die aus schwer bzw. leicht und schwer abbaubaren Materialien erstellt wurden, Beladungsraten im Bereich von 0,3 [g/g] bis 1,7 [g/g] eingestellt.

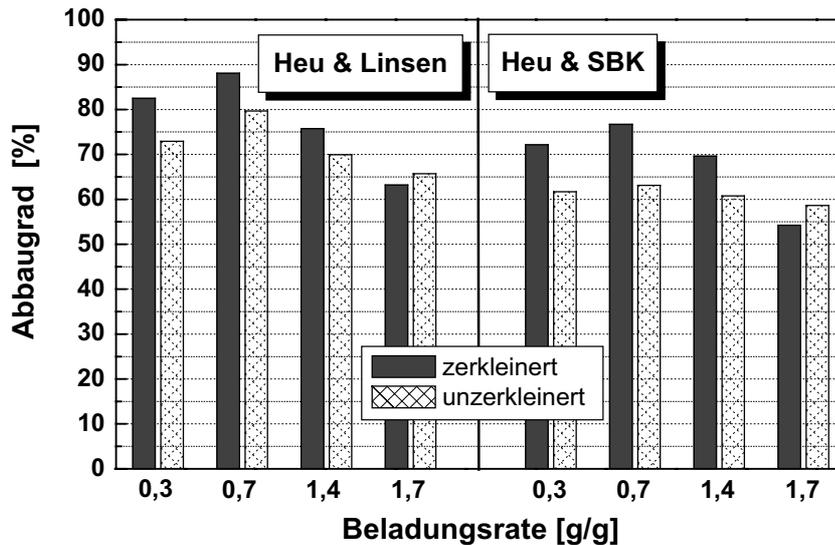


Abb. 4.57: Abbaugrad ξ_G [%] in Abhängigkeit von der Beladungsrate [g/g] bei mechanisch beanspruchten und unbeanspruchten Proben der zwei trockenen Zweikomponentengemische Heu-Linsen und Heu-Sonnenblumenkerne (SBK).

Nach Abbildung 4.57 führt eine Beladungsrate von 1,4 [g/g] sowohl für das Gemisch Heu-Sonnenblumenkerne (beide Materialien schwer abbaubar) als auch für das Gemisch Heu-Linsen (Heu schwer und Linsen leichtabbaubar), [Mundhenke, 2002], noch zu einer Erhöhung der Faulgasausbeute für die mechanisch beanspruchte Probe verglichen mit der unbeanspruchten Probe. Demnach kann bei geeigneter Wahl der Komponenten die Beladungsrate beim anaeroben Abbau von Gemischen gesteigert werden.

Analog zum Zerkleinerungsverhalten wird auch das Abbauverhalten trockener organischer Materialien durch Kombination als Gemisch nicht unbedingt verbessert. Vielmehr hängt eine Verbesserung des Abbauverhaltens mit der geeigneten Wahl der Beladungsrate zusammen.

4.3.4.2 Feuchte organische Zweikomponentengemische

Abbildung 4.58 stellt den Abbaugrad der drei feuchten organischen Gemische Äpfel-Möhren, Äpfel-Sonnenblumenkerne und Mandeln-Avocados jeweils für drei unterschiedlich mechanisch beanspruchte Proben und vergleichsweise für das jeweils unbeanspruchte Gemisch dar. Auch beim anaeroben Abbau der drei feuchten Zweikomponentengemische mit der Beladungsrate 0,7 [g/g] wird deutlich, daß bei allen drei Gemischen ein deutlicher Unterschied im Abbaugrad zwischen den mechanisch beanspruchten und unbeanspruchten Proben besteht, jedoch der Unterschied zwischen den unterschiedlich mechanisch beanspruchten Proben eines Gemisches mit 1 % bis 3 % gering ist. Auch bei

diesen Gemischen zeigt sich, daß bei Kombination von schwer- und leichtabbaubaren Materialien ein Abbaugrad für das Gemisch erreicht wird, der fast dem arithmetischen Mittel der Abbaugrade der Einzelsubstrate entspricht (vergleiche Tabelle 7.3.2 im Anhang). Aus den vorliegenden Ergebnissen wird

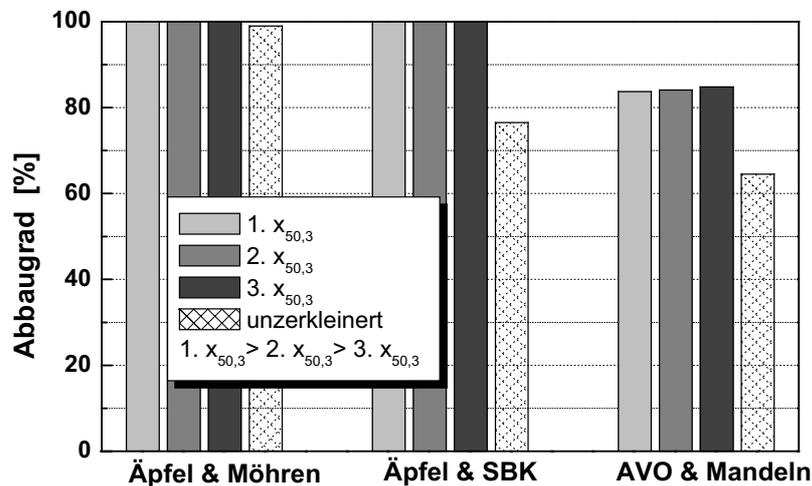


Abb. 4.58: Abbaugrad ξ_G [%] in Abhängigkeit des Medianwertes [μm] bei mechanisch beanspruchten und unbeanspruchten Proben der drei feuchten Zweikomponentengemische Äpfel- Möhren, Äpfel-Sonnenblumenkerne (SBK) und Mandeln-Avocados (AVO) für eine Beladungsrate von 0,7 [g/g].

deutlich, daß der Einfluß einer mechanischen Beanspruchung von Zweikomponentengemischen mit den von Mundhenke (2002) gewonnenen Erkenntnissen korrelieren.

Die Abhängigkeit des Abbaugrades für feuchte Zweikomponentengemische von der Beladungsrate ist vergleichbar mit den in Kapitel 4.3.4.1 dargestellten Abhängigkeiten für trockene Zweikomponentengemische. Nur für Gemische, hergestellt aus zwei schwerabbaubaren Materialien bzw. einem schwer und einem leichtabbaubaren Material, führt eine mechanische Beanspruchung zu einer Erhöhung der Faulgasausbeute im Vergleich zu dem unbeanspruchten Gemisch (vergleiche Tabelle 7.3.2).

4.4 Zusammenhang zwischen den mechanischen Eigenschaften und dem Zerkleinerungsverhalten organischer Materialien

In Kapitel 4.2. wurden die mechanischen Eigenschaften bei uniaxialer Druck-, bei Schneid- und bei Scherbeanspruchung organischer Materialien erläutert. Dabei wurde – auch unter energetischem Gesichtspunkt – der Einfluß des Wassergehaltes auf die Eigenschaften der untersuchten, organischen Einzelmaterialien diskutiert. In Kapitel 4.3 wurde das Verhalten organischer Mate-

rialien bei Beanspruchung von Partikelkollektiven in einer Schneidmühle allgemein und unter Berücksichtigung des Wassergehaltes dargestellt. Im folgenden werden Zusammenhänge zwischen den mechanischen Eigenschaften – bestimmt durch Einzelprobenversuche in der Universalprüfmaschine – und dem Verhalten der Materialien bei Beanspruchung als Partikelkollektive in der Schneidmühle aufgezeigt.

4.4.1 Feuchte organische Materialien

Die Einzelprobenbeanspruchung für feuchte organische Materialien hat gezeigt, daß Möhren, beansprucht quer zu ihrer Materialfaserung, sowohl die größte maximale Druck- (Abbildung 4.7), Schneid- (Abbildung 4.21) als auch Scherfestigkeit (Abbildung 4.33) aufweisen, gefolgt von den Möhren, beansprucht längs zu ihrer Materialfaserung, den Kartoffeln [Ausnahme: $\omega_{\text{Druck,max,Kartoffeln}} > \omega_{\text{Druck,max,Möhre längs}}$] und den Äpfeln (vergleiche Kapitel 4.2.2.1.1 / 4.2.2.2.1 / 4.2.2.3.1). Um einen qualitativen Vergleich der Einzelprobenbeanspruchung mit der Beanspruchung von Partikelkollektiven durchführen zu können, eingetragene spezifische Energien herangezogen. Dazu werden für die Einzelprobenbeanspruchung die spezifischen Energien betrachtet, die aufgebracht werden müssen, um die maximalen Werte der Druck-, Schneid- und Scherbeanspruchung zu erreichen, und für die Kollektivbeanspruchung werden die spezifischen Energien betrachtet, die notwendig sind, um einen Medianwert von $x_{50,3} = 2000 \mu\text{m}$ zu erreichen.

Tabelle 4.3: Tabellarischer Energievergleich für Einzelproben- und Partikelkollektivbeanspruchung.

¹: Rotorumfangsgeschwindigkeit = 1,8 m/s

²: Möhren beansprucht quer zur Materialfaserung

	Möhren ²	Kartoffeln	Äpfel
$E_{\text{Spez}}(\omega_{\text{Druck,max}})$ [kJ/kg]	2,2	0,45	0,15
$E_{\text{Spez}}(F_{\text{Schneid,max}})$ [kJ/kg]	0,6	0,25	0,11
$E_{\text{Spez}}(\omega_{\text{Scher,max}})$ [kJ/kg]	0,95	0,3	0,13
$E_{\text{Spez}}(x_{50,3} = 2000\mu\text{m})^1$ [kJ/kg]	120	80	65

Aus Tabelle 4.3 wird ersichtlich, daß für die Möhren, beansprucht quer zur Materialfaserung, der spezifische Energieeintrag zum Erreichen der Materialkenngrößen (max. Druck-, max. Schneid- und max. Scherfestigkeit) größer ist als für die Kartoffeln und schließlich die Äpfel. Der spezifische Energieeintrag zum Erreichen der gleichen mittleren Partikelgröße (hier: $x_{50,3} = 2000 \mu\text{m}$) bei der Partikelkollektivbeanspruchung ist ebenfalls für die Möhren am höchsten, gefolgt von den Kartoffeln und den Äpfeln. Aufgrund der unterschiedlichen Materialzusammensetzungen und Strukturen weisen die feuchten organischen Materialien ein unterschiedliches Verhalten bei mechanischer Beanspruchung

auf. Dabei korrelieren die Versuchsergebnisse beider Beanspruchungsarten qualitativ miteinander. Für feuchte organische Materialien wird der Energieeintrag mit zunehmenden Materialfestigkeiten bei Druck-, Schneid- und Scherbeanspruchung von Einzelpartikeln ebenso größer wie bei der Beanspruchung von Partikelkollektiven in einer Schneidmühle, um das gleiche Beanspruchungsergebnis (hier: $x_{50,3} = 2000 \mu\text{m}$) zu erhalten. Dieser Vergleich darf jedoch nur mit Vorsicht interpretiert werden, da bei der Partikelkollektivbeanspruchung die gesamte spezifische Energie, die in den Mahlraum eingetragen wird, berücksichtigt wird und bei den in Tabelle 4.3 dargestellten Einzelprobenbeanspruchungen lediglich der spezifische Energieeintrag zum Erreichen der jeweiligen Materialkenngrößen angegeben ist.

Bei Variation des Wassergehaltes hat sich gemäß Kapitel 4.2.2.1.1, 4.2.2.2.1 und 4.2.2.3.1 gezeigt, daß mit abnehmendem Wassergehalt die maximalen Druckfestigkeiten für Möhren und Äpfel abnehmen und für Kartoffeln konstant bleiben (im Bereich des 95 %igen Vertrauensbereich); die maximalen Schneid- und Scherfestigkeiten aller drei untersuchten feuchten organischen Materialien nehmen mit abnehmendem Wassergehalt zu. Die dabei relevanten spezifischen Energien hingegen nehmen mit abnehmendem Wassergehalt ab (vergleiche beispielsweise Tabellen 7.2.10a, 7.2.10b, 7.2.11 im Anhang). Verglichen mit dem Beanspruchungsverhalten dieser Materialien in einer Schneidmühle zeigt sich, daß zum Erreichen eines bestimmten Beanspruchungserfolges mit abnehmendem Wassergehalt weniger spezifische Energie eingetragen werden muß (vergleiche Abbildung 4.39). Demnach besteht für die Einflußgröße „Wassergehalt“ eine Korrelation des Materialverhaltens feuchter organischer Materialien bei den Einzelproben- und Partikelkollektivbeanspruchungen. Der Einfluß des Wassergehaltes auf das Beanspruchungsergebnis in der Schneidmühle ist nach Abbildung 4.39 stärker für Äpfel als für Möhren. Dies korreliert neben den spezifischen Energien auch mit der stärkeren relativen Abnahme der maximalen Druckfestigkeit von Äpfeln (77 %) als von Möhren (34 %). Die Zunahme der maximalen Schneidfestigkeit der drei feuchten organischen Materialien (vergleiche Abbildung 4.24) scheint zunächst im Widerspruch zur Abnahme des spezifischen Energieeintrages zum Erreichen des gleichen Medianwertes mit abnehmendem Wassergehalt nach Abbildung 4.39 in der Schneidmühle zu stehen. Die Ausbildung der Trocknungshaut in Verbindung mit dem überproportionalen Austrocknen der Probenoberfläche ist bei dem kombinierten Beanspruchungsmechanismus in der Schneidmühle weniger relevant. Die getrockneten Probenkörper werden durch die kombinierte Schneid-, Scher- und Druckbeanspruchung derart zwi-

schen Rotor und Festmesser in der Schneidmühle beansprucht, daß die ausgetrocknete Oberfläche keinen Einfluß auf das Beanspruchungsergebnis hat.

4.4.2 Trockene organische Materialien

Für die trockenen organischen Materialien kann nur ein Vergleich zwischen der Einzelpartikel- und Partikelkollektivbeanspruchung für die unbehandelten Ausgangsmaterialien durchgeführt werden, da diese Materialien nur unbehandelt, d.h. ohne Variation des Wassergehaltes, in der Schneidmühle beansprucht wurden. Ein Vergleich der beiden spröden trockenen Materialien Reis und Linsen zeigt, daß Reis sowohl eine höhere maximale Druck-, Schneid-, als auch Scherfestigkeit bei der Einzelpartikelbeanspruchung aufweist. Die dabei eingetragene spezifische Energie ist jedoch für Reis kleiner als für Linsen (vergleiche beispielsweise Tabelle 7.2.14 im Anhang). Zum Erzielen des gleichen Ergebnisses bei der Partikelkollektivbeanspruchung muß für Reis jedoch mehr spezifische Energie eingetragen werden als für Linsen. Unter Berücksichtigung der Ausgangsgrößen beider Materialien muß für Reis relativ weiter zerkleinert werden. Auch die relative Steigerung des CSB-Freisetungsgrades ist für die weniger mechanisch festen Linsen höher als für Reis (vergleiche Abbildung 4.41). Anhand diese beiden Materialien wird deutlich, daß für einen Vergleich beider Beanspruchungsarten nicht die maximalen Festigkeiten, sondern – wenn überhaupt – die dabei eingetragenen spezifischen Energien verwendet werden müssen. Für die beiden trockenen fettreichen Materialien Mandeln und Sonnenblumenkerne ist ein Vergleich nicht möglich, da infolge der Ölfreisetzung die Agglomeration feiner Partikel zu einer Stagnation des Medianwertes bei steigendem Energieeintrag führt. Das faserreiche Heu wurde aufgrund seiner natürlichen Form und Struktur nur als Kollektiv in der Schneidmühle beansprucht. Deshalb kann ein Vergleich der Beanspruchung für dieses Material nicht erfolgen.

Zusammenfassend zeigt dieser Vergleich der mechanischen Beanspruchung von Einzelproben in einer Universalprüfmaschine mit der Beanspruchung von Partikelkollektiven in einer Schneidmühle, daß das Ergebnis der Partikelkollektivbeanspruchung qualitativ mit den zum Erreichen der Materialkenngrößen (max. Druck-, max. Schneid- und max. Scherfestigkeit) eingetragenen spezifischen Energien der – in dieser Arbeit – untersuchten organischen Materialien verglichen werden kann und daß der Wassergehalt für eine mechanische Beanspruchung organischer Materialien eine wichtige Einflußgröße ist.

Genauere Aussagen bezüglich der Verteilung in der Kombination der drei Mechanismen bei der mechanischen Beanspruchung in einer Schneidmühle sind

nicht möglich, jedoch zeigen die hier vorgestellten Ergebnisse (vor allem bezüglich der spezifischen Energien), daß die Druckbeanspruchung nicht der wichtigste Faktor der drei Mechanismen ist, sondern daß die Materialien in einer Schneidmühle eher durch Scher- und Schneidbeanspruchung zerkleinert werden.

5 Zusammenfassung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden organische Materialien pflanzlicher Herkunft bezüglich ihres Verhaltens bei mechanischer Beanspruchung – als Einzelpartikel und als Partikelkollektive – untersucht. Neun Materialien aus der in der Natur vorkommenden Vielfalt wurden ausgewählt, die sich in ihrer Zusammensetzung, Struktur und ihrem Wassergehalt derart voneinander unterscheiden, daß ein breites Spektrum der natürlich vorkommenden Eigenschaften abgedeckt werden konnte. Die Beanspruchungsversuche wurden mit den trockenen Materialien Reis, Linsen, Sonnenblumenkerne, Mandeln und Heu als auch mit den feuchten Materialien Möhren, Kartoffeln, Äpfel und Avocados durchgeführt. Um Wechselwirkungen zwischen gleichzeitig beanspruchten Materialien untersuchen zu können, wurden modellhaft Zweikomponentengemische hergestellt und untersucht. Der Wassergehalt und die Materialzusammensetzung erwiesen sich als Haupteinflußgrößen für das Verhalten der Materialien bei mechanischer Beanspruchung.

Die Materialien wurden in einer Universalprüfmaschine hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften untersucht. Es wurden uniaxiale Druck-, Schneid- und Scherversuche durchgeführt. Die Charakterisierung der Versuche erfolgte mit Kraft-Weg-Verläufen und der aus diesen Verläufen bestimmten Festigkeitswerte sowie dem Energieeintrag. Für alle Materialien wurde dabei der natürliche Wassergehalt durch Trocknung bzw. Befeuchtung variiert, um den Einfluß des Wassergehaltes auf die mechanischen Eigenschaften untersuchen zu können. Eine Abhängigkeit der mechanischen Eigenschaften der Materialien vom Wassergehalt konnte festgestellt werden. Für die spröden Materialien Reis und Linsen zeigte sich dabei, daß die maximalen Festigkeiten bei Abnahme des Wassergehaltes leicht und bei Zunahme des Wassergehaltes stark abnahmen. Der Einfluß des Wassergehaltes bei den fettreichen Materialien Mandeln und Sonnenblumenkerne war weniger ausgeprägt. Die Variation des Wassergehaltes führte aber dennoch zu kleineren Festigkeiten, verglichen mit dem naturbelassenen Material. Bei den feuchten organischen Materialien führte eine Abnahme des Wassergehaltes zu einer Abnahme der maximalen Druckfestigkeit und zu einer Zunahme der maximalen Schneid- und Scherfestigkeit – mit Ausnahme der maximalen Druckfestigkeit von Kartoffeln, die im Bereich des in dieser Arbeit untersuchten Wassergehaltes konstant blieb. Bei Zunahme des Wassergehaltes war das Verhalten der feuchten Materialien uneinheitlich, so daß keine verallgemeinernde Aussage möglich ist.

Zur Untersuchung des Materialverhaltens bei Beanspruchung von Partikelkollektiven wurden die Materialien als Einzelsubstrate und Zweikomponentenge-

mische diskontinuierlich in einer Schneidmühle beansprucht. Die Charakterisierung der Versuche erfolgte anhand der Parameter spezifische Energie (E_{spez}), CSB-Freisetzungsgrad (F_{CSB}), spezifische Oberflächen ($S_{\text{m,PGV}}$ und $S_{\text{m,BET}}$), Medianwert der Partikelgrößenverteilung ($x_{50,3}$) und Umfangsgeschwindigkeit des Schneidmühlenrotors (u). Der Einfluß der mechanischen Beanspruchung auf den anaeroben Abbau der Zweikomponentengemische wurde mit den beiden Parametern Faulgasausbeute (ξ_{G}) und Beladungsrate (BL) charakterisiert. Außer für die fettreichen Materialien Mandeln und Sonnenblumenkerne wurde für die Materialien als Einzelsubstrate festgestellt, daß mit steigendem Energieeintrag die Medianwerte ab- und die korrespondierenden CSB-Freisetzungsgrade zunahm. Die höchste Umfangsgeschwindigkeit führte bei gleicher Beanspruchungsdauer zum kleinsten Medianwert und größten CSB-Freisetzungsgrad. Lediglich eine Zunahme der äußeren Oberfläche, die aber kleiner ist als die innere Oberfläche, konnte festgestellt werden. Mit Abnahme des Wassergehaltes der feuchten Materialien konnte beobachtet werden, daß zum Erreichen eines bestimmten Beanspruchungsergebnisses der Energieeintrag abnahm und höhere CSB-Freisetzungsgrade erreicht wurden. Bei den fettreichen Materialien Mandeln und Sonnenblumenkerne bewirkte eine weiterführende mechanische Beanspruchung infolge der Ölfreisetzung eine Agglomeration feiner Partikel, so daß eine Stagnation des Medianwertes eintrat. Für Avocados war die Bestimmung der Partikelgrößenverteilungen nicht möglich.

Für die Zweikomponentengemische zeigte sich – zusätzlich zu den für die Einzelsubstrate gemachten Beobachtungen –, daß eine gleichzeitige Beanspruchung zweier Materialien zu Veränderungen der Materialreaktionen auf diese Beanspruchungsvariation in der Schneidmühle führten. Für trockene fettreiche Materialien in Verbindung mit trockenen fettarmen Materialien (Sonnenblumenkern-Heu-Gemisch und Sonnenblumenkern-Linsen-Gemisch) wurde festgestellt, daß - infolge der Adsorption des freigesetzten Öles des fettreichen Materials an den fettarmen Partikeln des jeweils zweiten Materials – die Agglomerationsneigung feiner Partikel unterbunden werden konnte. Für feuchte Zweikomponentengemische (Äpfel-Möhren-Gemisch) konnten – bei vergleichbaren Energieeinträgen - kleinere Medianwerte erzielt werden als für die jeweiligen Einzelsubstrate. Gemische aus trockenen fettarmen Materialien (Heu-Linsen-Gemisch) zeigten keine Abweichungen bei der Beanspruchung, verglichen mit den Einzelsubstraten. Die Charakterisierung der mechanischen Beanspruchung von Zweikomponentengemischen mittels des anaeroben Abbaus bestätigte Ergebnisse von Mundhenke (2002), durchgeführt an organischen Einzelsubstraten. Die mechanische Beanspruchung organischer Zwei-

komponentengemische führte zu höheren Faulgasausbeuten, verglichen mit den unbeanspruchten Gemischen. Es wurden Abbaugrade erreicht, die dem arithmetischen Mittel der Faulgasausbeuten der jeweiligen Einzelsubstrate entsprechen. Jedoch führt – im Gegensatz zu den Einzelsubstraten (Mundhenke, 2002) – eine Beladungsrate von 1,4 [g/g] für die mechanische Beanspruchung von Gemischen aus schwerabbaubaren Materialien noch zu einer Steigerung der Faulgasausbeute bei Zweikomponentengemischen.

In dieser Arbeit konnten Zusammenhänge zwischen der mechanischen Beanspruchung von Einzelproben in einer Universalprüfmaschine und von Partikelkollektiven in einer Schneidmühle in Abhängigkeit der Materialzusammensetzung und des Wassergehaltes für organische Materialien als Einzelsubstrate gefunden werden. Desweiteren konnten – ausgehend von den Einzelsubstraten – Wechselwirkungen zwischen den Materialien bei der Beanspruchung als Zweikomponentengemische aufgedeckt und beschrieben werden. Zur differenzierteren Betrachtung und Beurteilung der physikalischen Zusammenhänge und Vorgänge bei der mechanischen Beanspruchung organischer Materialien wären in Zukunft Untersuchungen auf molekularer Ebene sinnvoll.

6 Literaturverzeichnis

- Baaden, A. Physical properties and comminution behaviour of organic
Mundhenke, R. materials.
Müller, J. 10. European Symposium on Comminution, September
Schwedens, J. 2002, Heidelberg; Conference Proceedings CD-ROM
- Baader, W. Die Beurteilung von Halmfutterzerkleinerungsmaschinen.
Landtechnische Forschung, (1970), S. 164-169
- Bargel, H.-J. Werkstoffkunde.
Schulze, G. 7. Auflage
Springer Verlag, Berlin, (2000)
- Bauer, W. Schneid-Zerkleinerung von Thermoplasten.
Wüstenberg, D. Kunststoffe, München 91, (2001) 2, S. 62-65
- Belitz, H.-D. Lehrbuch der Lebensmittelchemie.
Grosch, W. 4., überarbeitete Auflage
Springer Verlag, Berlin, (1995)
- Bernhardt, G. Zerkleinerung von Boden- und Halmgütern (Stroh und Holz)
Firus, S. aus der Sicht der Minimierung der spezifischen Energie.
XLVIII. Berg- und Hüttenmännischen Tag: „Abfallzerkleinerung – Grundlagen und praktische Erfahrungen“
Freiberg, (1997), S. 57-70
- Bernotat, S. Size reduction.
Schönert, K. in: Ullmann's Encyclopedia of industrial chemistry.
VCH-Verlag Vol. B 2; Kap. 5, (1988), S. 5-1 bis 5-39
- BLS Bundeslebensmittelschlüssel II.3: Bundesinstitut für ge-
 sundheitlichen Verbraucherschutz und Veterinärmedizin
 (BgVV).
 (elektronische Datenbank). Berlin, (1999)
- Bohnet, M. Grundlagen der Verfahrenstechnik in: Dubbel, Taschenbuch
Mersmann, A. für den Maschinenbau, herausgegeben von Beitz, W. und
Schwedens, J. Küttner, K.-H.

Springerverlag, Berlin, (1994)

- Böhnke, B. Anaerobtechnik.
Seyfried, C.F. Springer Verlag, Berlin, (1993)
Bischofsberger, W.
- Brock, T.D. Biology of Microorganisms.
Madigan, M. 8. Auflage
Martinko, J. Prentice-Hall International, London, (1997)
Parker, J.
- Bronstein, I.N. Taschenbuch der Mathematik.
Semendjajew, K. 21./22. Auflage
Verlag Harri Deutsch, Thun und Frankfurt (Main), (1981)
- Capela, I.F. Effects of pretreatment (composting) on the anaerobic
Azeiteiro, C. digestion of primary sludges from a bleached kraft pump mill
Arroja, L. Proceedings of the 2nd International Symposium on Anaero-
Duarte, A.C. bic Digestion of Solid Wastes, Barcelona, 15-18 June 1999,
Vol. 1, S. 113-120
- Christ, O. Leistungscharakteristik der ein- und zweistufigen mesophi-
len Vergärung von Bioabfällen.
Berichte aus Wassergüte- und Abfallwirtschaft Nr. 148,
(1999), TU München
- Cowling, E.B. Physical and chemical constraints in the hydrolysis of cellu-
lose and lignocellulosic materials.
Biotechnology and Bioengineering Symposium 5, (1975),
S.163-181
- Dernedde, W. Zerkleinern von Halmfutter.
Landbauforschung Völkenrode Sonderheft 8, (1970),
S. 53-67
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (Hg.).
Publikation und Dokumentation I, 3. Auflage
DIN 38409 H41 „Summarische Wirkungs- und Stoffkenn-
größen – Bestimmung des Sauerstoffbe-

- darfs (CSB) im Bereich über 15 mg/l“ (1980)
- DIN 38414 S2 „Schlamm und Sedimente – Bestimmung des Wassergehaltes und des Trockenrückstandes bzw. der Trockensubstanz“ (1985)
- DIN 38141 S3 „Schlamm und Sedimente – Bestimmung des Glührückstandes und des Glühverlustes der Trockenmasse eines Schlammes“ (1985)
- DIN 66131 „Bestimmung der spezifischen Oberfläche von Feststoffen durch Gasadsorption nach Brunauer, Emmet und Teller (BET)“ (1993)
- DIN 66141 „Darstellung von Korn- (Teilchen-) größenverteilungen – Grundlagen“ (1974)
- DIN 66165 „Partikelgrößenanalyse: Siebanalyse“ (1987) Teil1: Grundlagen, Teil 2: Durchführung
- Domke, W. Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung. 10., verbesserte Auflage Giradet Buchverlag, Düsseldorf (1986)
- Fan, L.T. Evaluation of pretreatments for enzymatic conversions of agricultural residues. Gharpuray, M.M. Biotechnology and Bioengineering Symposium 11, (1981), Lee, Y.-H. S. 29-45
- Fischer, K. Skriptum zur Vorlesung „Biologische Abfallbehandlung“, SS2001, Universität Stuttgart
- Fridley, R.B. Mechanical Properties of Peaches, Pears, Apricots and Adrian, P.A. Apples. Transactions of the ASEA (1966) 1, S. 135 - 142
- Fritsche, W. Umwelt-Mikrobiologie: Grundlagen und Anwendung. Gustav Fischer Verlag, Jena, Stuttgart, Ulm, (1998)

- Goncharuk, G.P. Mechanical properties of modified thermoplastic elastomers
 Knunyants, M.I. based on low-density polyethylene and rubber powder.
 Serenko, O.A. International Polymer Science and Technology Vol. 26,
 Kryuchkov, A.N. No. 7, (1999)
- Hatakeyama, T. Vaporization of bound water associated cellulose fibres.
 Heinrichs, H. Analyse von Müll.
 Brumsack, H.J. Labor Praxis 15, (1991) 9, S. 709-710
 Schultz, W.
- Helfferich, B. Tierernährung in Stichworten.
 Gütte, J.O. Verlag Ferdinand Hirt, Kiel (1972)
- Hubert, H. Die Leistungsfähigkeit und Stabilität des anaeroben Belebungs-
 verfahren.
 Dissertation, Universität Karlsruhe, (1988)
- Jacob, F. Botanik
 Jäger, E.J. 3. Auflage
 Ohmann, E. VEB Gustav Fischer Verlag Jena, (1987)
- Jung, U. Ansätze zur Vereinfachung der modifizierten Stoffgruppen-
 analyse nach van Soest.
 Busch, G. Müll und Abfall 6, (2000)
- Kaiser, F. Berechnung an der Schneidmühle.
 Dechema Monographien, Bd. 57, Teil 2
 Verlag Chemie, Weinheim (1966), S. 741-775
- Kang, Y.S. Mechanical Properties of Wheat.
 Spillman, C.K. Transactions of the ASAE 38 (1995) 2, S. 573-578
 Steele, J.L.
 Chung, D.S.
- Körmendy, I. Verfahrenstechnische Grundlagen der Entsaftung von Frü-
 chten durch Pressen.
 Fruchtsaft-Industrie 10, (1965) 5, S.246-262
- Kwade, A. Mill selection and process optimization using a physical
 grinding model

10. European Symposium on Comminution, September 2002, Heidelberg; Conference Proceedings CD-ROM

- Kwade, A.
Schwedde, J. Wet comminution in stirred media mills.
KONA 15, S. 91-102
- Lehne, G. Parameter der mechanischen Desintegration von Überschußschlämmen.
Dissertation, TU Braunschweig, (2001)
- Ligock, A. Schneiden landwirtschaftlicher Güter mit Hochdruckwasserstrahl.
Tagungsband zur Informationsveranstaltung Wasserhydraulik, Frankfurt, 24.10.2002
- Löffler, F.
Raasch, J. Grundlagen der Mechanischen Verfahrenstechnik.
Vieweg Verlag, Wiesbaden, (1992)
- Meuser, F.
Witting, J.
Huster, H. Neue verfahrenstechnische Wege zur Stärkegewinnung aus stärkehaltigen Rohstoffen.
Internationale Zeitschrift für Lebensmitteltechnik 37, (1986) 8, S. 535-541
- Mata-Alvarez, J.
Mace, S.
Llabres, P. Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives.
Bioresource Technology 74, (2000) 1, S. 3-16
- Matsumoto, A.
Noike, T. Effects of substrate composition and loading rate on methanogenic process in anaerobic fluidized bed systems.
Water science and Technology 23, (1991), S. 1311-1317
- Mohsenin, N.N. Physical Properties of Plant and Animal Materials.
2d Revised and Updated Edition
Gordon and Breach Science Publishers, New York (1986)
- Müller, F.
Polke, R.F. From the product and process requirements to the mill facility.
Powder Technologies, Laus. 105, (1999), S. 2-13

- Müller, J. Mechanischer Klärschlammaufschluß.
Dissertation, TU Braunschweig, (1996)
- Mundhenke, R. Zerkleinerungseinfluß auf das anaerobe Abbauverhalten
Baaden, A. von trockenen organischen Stoffen.
Müller, J. Müll und Abfall 34, (2002) 1, S. 22-27
Schwedede, J.
- Mundhenke, R. Bezugsparameter für den Vergleich von anaeroben Abbau-
Müller, J. prozessen.
Schwedede, J. Chemie Ingenieur Technik 73, (2001) 10, S.1365-1367
- Mundhenke, R. Influence of the VS-content in digested sludge on anaerobic
Müller, J. degradation.
Schwedede, J. Chem. Eng. Technol. 24, (2001) 6, S.635-637
- Mundhenke, R. Einfluß der Zerkleinerung auf die Bioverfügbarkeit von or-
 ganischen Substraten.
Dissertation, TU Braunschweig (2002)
- Myahe, H. Tensile Properties of Wet Cellulose
Yasuo, G.
Yutaka, O.
Masanobu, N.
- Nultsch, W. Allgemeine Botanik.
9. Überarbeitete Auflage
Thieme Verlag, Stuttgart, New York (1991)
- Pahl, M.H. Zerkleinerungstechnik.
2. Auflage, Fachbuchverlag Leipzig, Köln, (1993)
- Pahl, M.H. Zerkleinerungstechnik.
TÜV-Verlag, Köln (1991)
- Palmowski, L. Zerkleinerungs- und Abbauverhalten organischer Materiali-
 en.
Dissertation, TU Braunschweig (2000)

- Parisi, F. Advances in lignocellulosic hydrolysis and in the utilisation of the hydrolyzates.
Advances in Biochemical Engineering Biotechnology 38
Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, (1989), S.53-87
- Penaud, V.
Delgenes, J.P.
Moletta, R. Thermo-chemical pretreatment of the microbial biomass: influence of sodium hydroxide addition on solubilization and anaerobic biodegradability.
Enzyme and Microbial Technologie 25, (1999), S.258-263
- Peukert, W.
Vogel, L. Product Engineering am Beispiel des Zerkleinerns von Kunststoffen.
Chemie-Ingenieur-Technik 73, (2001) 4, S. 327-331
- Raddatz, E. Untersuchungen zur Prozeßstabilität von Methanfermentationen bei kurzzeitigen Substratstörungen und zur Verwertung biogen organischer Feststoffe durch anaerobe thermophile Hydrolyse und Versäuerung.
Dissertation, Technische Universität Berlin, (1993)
- Regge, H.
Meinel, T. Dicke verholzte Pflanzenstängel schneiden.
Landtechnik 49, (1994) 1, S. 16-18
- Retsch Bedienungsanleitung der Schneidmühle SM2000 (2000)
(Mühlenhersteller)
- Rumpf, H. Beanspruchungstheorie der Prallzerkleinerung.
Chemie-Ingenieur-Technik 31, (1959) 5, S. 323-337
- Rumpf, H. Problemstellung und neuere Ergebnisse der Bruchtheorie.
Materialprüfung 3 (1961) 7, S. 253 - 265
- Rumpf, H. Die Einzelkornzerkleinerung als Grundlage einer technischen Zerkleinerungswissenschaft.
Chemie Ingenieur Technik (37), S. 187-202
Wiley-VCH Verlag, Weinheim (1965)
- Rumpf, H. The Strength of Granules and Agglomerates.
Agglomeration, Interscience Publishers, S. 379-413, (1962)

- Sahm, H. Biologie der Methanbildung.
Chemie Ingenieur Technik 53, (1981), S. 854-863
- Sartorius (Firma) Bedienungsanleitung des Moisture Analyzer MA30 (1998).
- Scherer, R. Das Festigkeitsverhalten des Maiskorns.
Kutzbach, H.D. Grundl. Landtechnik 28 (1978) 6, S. 229-234
- Schicht, E. Die Rotormühle – eine vielseitig einsetzbare Zerkleinerungs-
maschine.
ZKG Int., Ed. B 53, (2000) 2, S. 74-78
- Schieder, D. Thermal hydrolysis (THD) as a pretreatment method for the
Schneider, R. digestion of organic waste.
Bischof, F. Proceedings of II. International Symposium on Anaerobic
Digestion of Solid Waste, 15-17 June 1999, Barcelona, Vol.
I., S. 169-174
- Schlegel, H.G. Allgemeine Mikrobiologie.
7. überarbeitete Auflage. Thieme Verlag Stuttgart, (1992)
- Schliephake, D. Evaluierung der Perspektiven der Ölmühlenverfahrens-
Luck, T. technik.
Wäsche, M. BML-Verbundprojekt: Kraftstoff aus Raps
Kremer, M. Fraunhofer-Institut für Lebensmitteltechnologie und Ver-
Jurisch, C. packung, München, (1995)
- Schneider, Y. Qualitative Prozessevaluierung zum ultraschallunterstützten
Zahn, S. Schneiden von Lebensmitteln.
Linke, L. Chemie Ingenieur Technik (73)
Wiley-VCH Verlag, Weinheim (2001)
- Schönert, K. Liberation of Composite Particles by Single Particle Com-
Marktscheffel, M. pression, Shear and Impact Loading.
6. European Symposium Comminution, Nürnberg, (1986)
- Schubert, G. Einführungsvortrag des XLVIII. Berg- und Hüttenmänni-
schenTags: „Abfallzerkleinerung – Grundlagen und prakti-
sche Erfahrungen“.

- Freiberg, (1997), S. 7-11
- Schubert, G. Zerkleinerungstechnik für das Recycling von Abfällen und Schrotten.
XLVIII. Berg- und Hüttenmännischen Tag: „Abfallzerkleinerung – Grundlagen und praktische Erfahrungen“.
Freiberg, (1997), S. 12-32
- Schubert, H. Skriptum zur Vorlesung „Lebensmittelverfahrenstechnik I“
TH Karlsruhe, (1998)
- Schwedes, J. Skriptum zur Vorlesung „Mechanische Verfahrenstechnik für Studenten der Biotechnologie“.
SS2001, TU Braunschweig
- Schwedes, J. Mechanische Zellaufschlußverfahren.
Bunge, F. Jahrbuch Biotechnologie, Bd. 3
Carl Hanser Verlag, München, (1990), S. 195-218
- Seyfried, C.F. Geschwindigkeitsbestimmende Schritte beim anaeroben Abbau von organischen Verbindungen in Abwässern.
3. Arbeitsbericht des ATV-Fachausschusses 7.5
Korrespondenz Abwasser 41, (1994) 1, S. 101-107
- Shinohara, K. Fine-grinding characteristics of hard materials by attrition mill.
Golman, B. Powder Technology 103, (1999), S.292-296
Uchiyama, T.
Otani, M.
- Sontheimer, H. Wasserchemie für Ingenieure.
Spindler, P. DVGW-Forschungsstelle im Engler-Bunte-Institut der Universität Karlsruhe, (1980)
Rohmann, U.
- Stieß, M. Mechanische Verfahrenstechnik 1 & 2.
Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, (1994)
- Tscheuschner, H.D. Grundzüge der Lebensmitteltechnik.
2. Auflage, B. Behr's Verlag, Hamburg, (1996)

- Vauk, W.R.A. Grundoperationen mechanischer Verfahrenstechnik.
Müller, H.A. 10. Auflage, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, (1994)
- Voß, H. Ermittlung von Stoffgesetzen für Halmgut.
Dissertation, TU Braunschweig, (1969)
- Weipert, D. Rheologie der Lebensmittel.
Windhab, E B. Behr's Verlag, Hamburg, (1993)
Tscheuschner, H.D.
- Wiemer, K. Leitfaden Bioabfallvergärung.
Kern, M. in: Luft, Boden, Abfall 45, (1996)
Mayer, M. Hrsg.: Ministerium für Umwelt und Verkehr, Baden Württemberg
- Wienecke, F. Verfahrenstechnik der Halmfutterproduktion.
Selbstverlag, Göttingen, (1972)
- Wolf, T. Prallzerkleinerung von Kümmel unter Kälteeinfluß.
Pahl, M.H. ZFL-Internationale Zeitschrift für Lebensmitteltechnik 41,
(1990) 10, S. 596-604
- Zwick (Firma) Bedienungsanleitung der Universalprüfmaschine Z010
(2001).

7 Anhang

7.1 Bestimmung des Vertrauensbereiches der Meßwerte

Die Bestimmung des Vertrauensbereiches der Meßwerte erfolgte nach Gleichung A 7.1 gemäß Bronstein & Semendjajew :

$$VB \mid \pm \frac{s}{\sqrt{N}} \Delta t_{N-1, \zeta} \quad \text{Glg. A7.1}$$

Mit: VB: Vertrauensbereich
 s: aus den Meßwerten berechnete Standardabweichung
 N: Anzahl der Meßwerte
 $t_{N-1, \zeta}$: Parameter der Student'schen Verteilung für (N-1) Freiheitsgrade und für eine Wahrscheinlichkeit von $\zeta = 95 \%$

7.2 Tabellarische Auflistung der Meßergebnisse von Kap. 4

Tabelle 7.2.1 (Abb. 4.1): Relativer Massenverlust [%] der feuchten organischen Substrate Äpfel, Möhren und Kartoffeln in Abhängigkeit der Trocknungszeit [h] für eine Trocknungstemperatur von 105 °C im Trockenschrank (Fa. Hae-reus).

	ÄPFEL	KARTOFFELN	MÖHREN
Trocknungszeit [h]	Rel. Massenverlust [%]	Rel. Massenverlust [%]	Rel. Massenverlust [%]
0	0	0	0
1	11,3	7,0	4,2
2	18,7	19,6	10,6
3	25,5	31,0	24,7
4	36,9	48,8	36,0
5	62,2	61,5	47,1
6	71,6	69,6	66,4
9	85,7	74,5	83,5
12	85,6	76,9	87,7
21	86,6	78,1	89,2
23	87,3	78,1	89,4
25	86,4	77,7	90,5
27	87,3	78,2	90,3
29	87,7	78,2	90,1
31	87,0	78,0	89,8
33	87,3	77,9	90,1
36	86,3	77,8	90,6
45	87,7	78,3	90,1
48	86,8	78,0	89,8

Tabelle 7.2.2 (Abb. 4.2): Vergleich der Trockenrückstände der feuchten Materialien Äpfel, Kartoffeln und Möhren, bestimmt durch Trocknung mittels eines elektronischen Feuchtigkeitsmeßgerät (105 °C) und eines herkömmlichen Trockenschrankes (105 °C, Fa. Haereus).

Material	Trockenrückstand _{Trockenschrank} [g/kg]	Trockenrückstand _{moisture analyser} [g/kg]
Äpfel	126,8	131,2
Kartoffeln	179,5	185,3
Möhren	90,5	95,7

Tabelle 7.2.3: Relative Massenzunahme [%] der feuchten organischen Substrate Äpfel, Möhren und Kartoffeln in Abhängigkeit der Befeuchtungszeit [min].

	ÄPFEL	KARTOFFELN	MÖHREN
Befeuchtungszeit [min]	Rel. Massenzunahme [%]	Rel. Massenzunahme [%]	Rel. Massenzunahme [%]
0	0	0	0
10	3,9	0,5	4,6
15	4,6	2,7	2,4
30	5,6	4,9	3,5
45	7,9	8,7	5,4
60	8,2	9,5	6,0
120	8,9	12,6	7,2
240	10,3	9,4	9,4

Tabelle 7.2.4 (Abb.4.3): Relative Massenzunahme [%] in Abhängigkeit der Befeuchtungszeit [min] der trockenen organischen Substrate Mandeln, SBK, Linsen und Reis.

	MANDELN	SBK	LINSEN	REIS
Befeuchtungszeit [min]	Rel. Massenzunahme [%]	Rel. Massenzunahme [%]	Rel. Massenzunahme [%]	Rel. Massenzunahme [%]
0	0	0	0	0
10	3,9	16,4	22,0	19,9
15	4,8	23,1	30,1	26,1
20	7,1	24,9	35,6	29,5
25	8,7	28,9	42,6	31,6
30	9,9	31,5	52,4	34,3
40	11,7	36,1	58,9	40,4
50	15,2	41,2	66,9	44,6
60	18,1	42,2	78,4	51,2
120	24,5	49,4	88,2	53,6

Tabelle 7.2.5 (Abb. 4.7): Maximale Druckfestigkeiten $\omega_{\text{Druck,max}}$ [N/mm²] der feuchten organischen Materialien Äpfel, Kartoffeln und Möhren (beansprucht längs und quer zu ihrer Materialfaserung) (mit Vertrauensbereich für eine Wahrscheinlichkeit von $\zeta = 95\%$).

Material	Max. Druckfestigkeit $\omega_{\text{Druck,max}}$ [N/mm ²]	Fehler (Wahrscheinlichkeit von $\zeta = 95\%$) N = 10
Äpfel	0,25	0,023
Kartoffeln	1,48	0,049
Möhren längs	1,3	0,11
Möhren quer	2,06	0,096

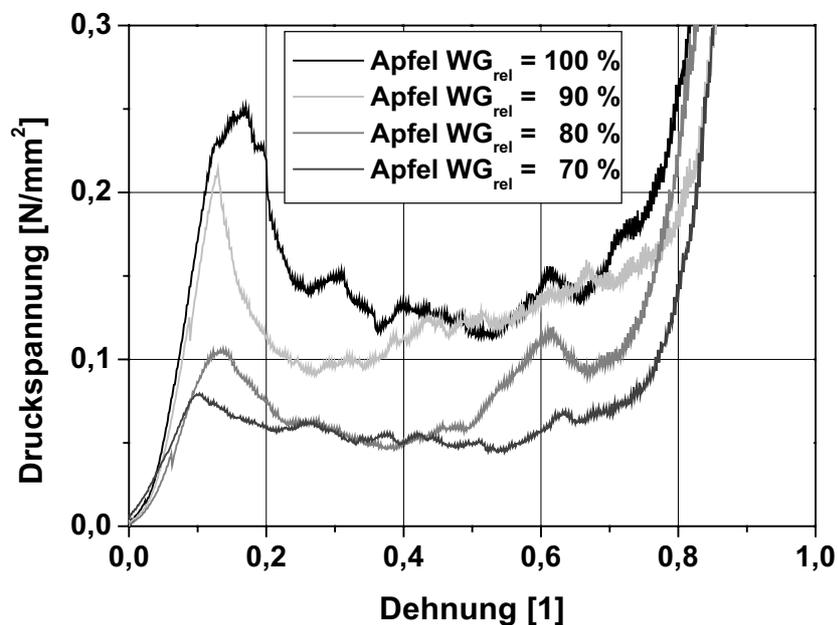


Abb. 7.2.1: Spannungs-Dehnungs-Verläufe für uniaxiale Druckversuche mit Äpfeln für das unbehandelte Material ($WG_{\text{rel}} = 100\%$) und die verschiedenen Trocknungsstufen ($WG_{\text{rel}} < 100\%$) für eine Trocknungstemperatur von $T = 105\text{ °C}$.

Tabelle 7.2.6a (Abb. 4.9): Abhängigkeit der maximalen Druckfestigkeit $\omega_{\text{Druck,max}}$ [N/mm²] vom Wassergehalt [%] des organischen Materials Möhren bei verschiedenen Trocknungstemperaturen (mit Vertrauensbereich für eine Wahrscheinlichkeit von $\zeta = 95\%$); Wassergehalt von 100% entspricht dem unbehandelten Ausgangsmaterial, Wassergehalt > 100 % entspricht der Befeuchtung und Wassergehalt < 100 % entspricht der Trocknung. T kennzeichnet die Trocknungen, U kennzeichnet das Ausgangsmaterial und B kennzeichnet die Befeuchtungen.

		Max. Druckfestigkeit $\omega_{\text{Druck,max}}$ [N/mm ²] MÖHREN (quer)							
	Wassergehalt [%]	105 °C	Fehler N = 10	80 °C	Fehler N = 5	60 °C	Fehler N = 5	Befeuchtung	Fehler N = 5
T	70	1,37	0,064	1,46	0,0534	1,70	0,054	-	-

T	80	1,59	0,0189	1,63	0,067	2,01	0,0685	-	-
T	90	1,95	0,066	2,06	0,0599	2,089	0,0625	-	-
U	100	2,06	0,065	2,06	0,0652	2,069	0,0652	2,069	0,0652
B	104	-	-	-	-	-	-	2,18	0,0743
B	106	-	-	-	-	-	-	2,26	0,0272
B	108	-	-	-	-	-	-	2,48	0,0743

Tabelle 7.2.6b (Abb. 4.9): Abhängigkeit der maximalen Druckfestigkeit $\omega_{\text{Druck,max}}$ [N/mm²] vom Wassergehalt [%] des organischen Materials Äpfel bei verschiedenen Trocknungstemperaturen (mit Vertrauensbereich für eine Wahrscheinlichkeit von $\zeta = 95\%$); Wassergehalt von 100% entspricht dem unbehandelten Ausgangsmaterial, Wassergehalt > 100 % entspricht der Befeuchtung und Wassergehalt < 100 % entspricht der Trocknung. T kennzeichnet die Trocknungen, U kennzeichnet das Ausgangsmaterial und B kennzeichnet die Befeuchtungen.

Max. Druckfestigkeit $\omega_{\text{Druck,max}}$ [N/mm ²] ÄPFEL									
	Wassergehalt [%]	105 °C	Fehler N = 10	80 °C	Fehler N = 10	60 °C	Fehler N = 5	Befeuchtung	Fehler N = 5
T	70	0,06	0,013	0,12	0,01	0,12	0,004	-	-
T	80	0,13	0,0087	0,17	0,008	0,182	0,0014	-	-
T	90	0,20	0,0148	0,23	0,017	0,222	0,015	-	-
U	100	0,25	0,0228	0,25	0,223	0,252	0,023	0,25	0,023
B	104	-	-	-	-	-	-	0,15	0,0143
B	106	-	-	-	-	-	-	-	-
B	108	-	-	-	-	-	-	0,08	0,0075

Tabelle 7.2.7: Abhängigkeit der maximalen Druckfestigkeit $\omega_{\text{Druck,max}}$ [N/mm²] vom Wassergehalt [%] des organischen Materials Möhren bei verschiedenen Trocknungstemperaturen (mit Vertrauensbereich für eine Wahrscheinlichkeit von $\zeta = 95\%$); Wassergehalt von 100 % entspricht dem unbehandelten Ausgangsmaterial).

Max. Druckfestigkeit $\omega_{\text{Druck,max}}$ [N/mm ²] MÖHREN (längs)						
Wassergehalt [%]	105 °C	Fehler N = 10	80 °C	Fehler N = 5	60 °C	Fehler N = 5
70	0,713	0,06	0,821	0,07	0,885	0,17
80	0,864	0,07	1,064	0,05	1,11	0,06
90	1,23	0,07	1,283	0,07	1,315	0,04
100	1,30	0,17	1,30	0,17	1,30	0,17

Tabelle 7.2.8 (Abb. 4.10): Abhängigkeit der maximalen Druckfestigkeit $\omega_{\text{Druck,max}}$ [N/mm²] vom Wassergehalt [%] des organischen Materials Kartoffeln bei verschiedenen Trocknungs-temperaturen (mit Vertrauensbereich für eine Wahrscheinlichkeit von $\zeta = 95\%$); Wassergehalt von 100 % entspricht dem unbehandelten Ausgangsmaterial, Wassergehalt > 100 % entspricht der Befeuchtung und Wassergehalt < 100 % entspricht der Trocknung. T kennzeichnet die Trocknungen, U kennzeichnet das Ausgangsmaterial und B kennzeichnet die Befeuchtungen.

Max. Druckfestigkeit $\omega_{\text{Druck,max}}$ [N/mm ²] KARTOFFELN									
	Wassergehalt [%]	105 °C	Fehler N = 10	80 °C	Fehler N = 10	60 °C	Fehler N = 5	Befeuchtung	Fehler N = 5
T	70	1,24	0,106	1,33	0,045	1,34	0,085	-	-
T	80	1,19	0,082	1,27	0,034	1,32	0,111	-	-
T	90	1,33	0,027	1,24	0,0598	1,28	0,067	-	-
U	100	1,48	0,049	1,48	0,049	1,48	0,049	1,48	0,049
B	104	-	-	-	-	-	-	1,32	0,08
B	106	-	-	-	-	-	-	1,34	0,052
B	108	-	-	-	-	-	-	-	-

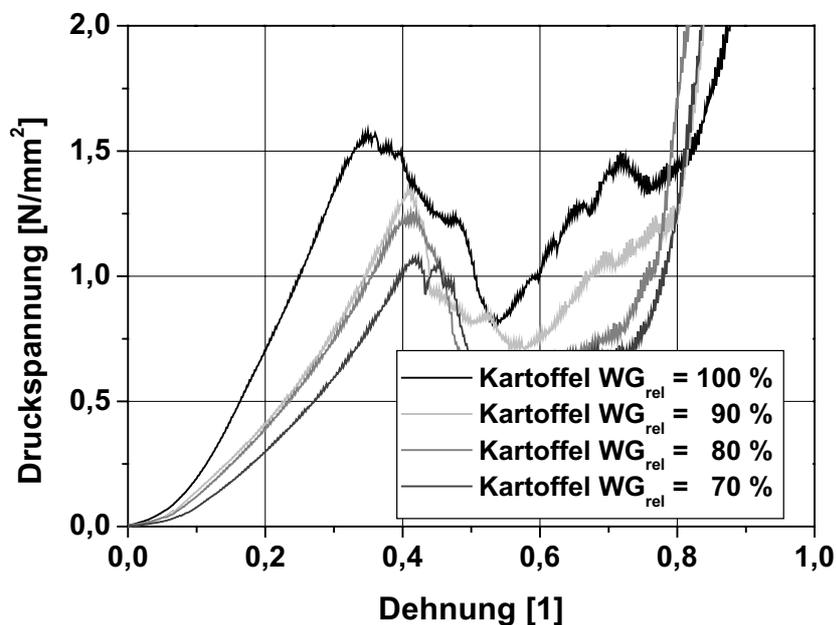


Abb. 7.2.2: Spannungs-Dehnungs-Verläufe für uniaxiale Druckversuche mit Kartoffeln, für das unbehandelte Material ($WG_{\text{rel}} = 100\%$) und die verschiedenen Trocknungsstufen ($WG_{\text{rel}} < 100\%$) für eine Trocknungstemperatur von $T = 105\text{ °C}$.

Tabelle 7.2.9 (Abb. 4.11): Abhängigkeit der Dehnung [-] zum Erreichen der maximalen Druckfestigkeit $\omega_{\text{Druck,max}}$ [N/mm²] vom Wassergehalt [%] der organischen Materialien Möhren, Äpfel und Kartoffeln (mit Vertrauensbereich für eine Wahrscheinlichkeit von $\zeta = 95\%$); Wassergehalt von 100 % entspricht dem unbehandelten Ausgangsmaterial, Wassergehalt >100 % entspricht der Befeuchtung und Wassergehalt < 100 % entspricht der Trocknung (T-Temperatur T = 80 °C). T kennzeichnet die Trocknungen, U kennzeichnet das Ausgangsmaterial und B kennzeichnet die Befeuchtungen.

		Dehnung κ bei $\omega_{\text{Druck,max}}$ [-]					
	Wassergehalt [%]	$\kappa_{\text{Möhren}}$	Fehler N = 10 (5)	$\kappa_{\text{Äpfel}}$	Fehler N = 10 (5)	$\kappa_{\text{Kartoffeln}}$	Fehler N = 10 (5)
T	70	0,325	0,019	0,157	0,0057	0,446	0,0188
T	80	0,337	0,010	0,155	0,0112	0,469	0,0054
T	90	0,381	0,035	0,147	0,0149	0,428	0,0118
U	100	0,323	0,012	0,143	0,0148	0,402	0,0303
B	104	0,305	0,013	0,147	0,0147	0,396	0,012
B	106	0,332	0,016	-	-	-	-
B	108	0,339	0,0126	0,195	0,0412	0,405	0,0189

Tabelle 7.2.10a (Abb. 4.12): Abhängigkeit der spezifischen Energie E_{Spez} [J/kg] zum Erreichen der maximalen Druckfestigkeit vom Wassergehalt [%] des organischen Materials Möhren (beansprucht längs zur Materialfaserung) bei verschiedenen Trocknungstemperaturen (mit Vertrauensbereich für eine Wahrscheinlichkeit von $\zeta = 95\%$); Wassergehalt von 100 % entspricht dem unbehandelten Ausgangsmaterial, Wassergehalt > 100 % entspricht der Befeuchtung und Wassergehalt < 100 % entspricht der Trocknung. T kennzeichnet die Trocknungen, U kennzeichnet das Ausgangsmaterial und B kennzeichnet die Befeuchtungen.

		Spezifische Energie bis $\omega_{\text{Druck,max}}$ [J/kg]							
		MÖHREN							
	Wassergehalt [%]	105°C	Fehler N = 10	80°C	Fehler N = 10	60°C	Fehler N = 5	Befeuchtung	Fehler N = 5
T	70	1425,32	239,25	1325,979	94,54	1593,887	127,81	-	-
T	80	2141,71	190	2120,232	98,61	2125,33	169,56	-	-
T	90	2464,13	257,92	2562,32	238,61	2684,07	328,39	-	-
U	100	2204,61	206,58	2204,61	206,58	2204,61	206,58	2204,61	206,58
B	104	-	-	-	-	-	-	2219,549	170
B	106	-	-	-	-	-	-	2355,523	189
B	108	-	-	-	-	-	-	2542,29	208

Tabelle 7.2.10b (Abb. 4.12): Abhängigkeit der spezifischen Energie E_{Spez} [J/kg] zum Erreichen der maximalen Druckfestigkeit vom Wassergehalt [%] des organischen Materials Äpfel bei verschiedenen Trocknungstemperaturen (mit Vertrauensbereich für eine Wahrscheinlichkeit von $\zeta = 95\%$); Wassergehalt von 100 % entspricht dem unbehandelten Ausgangsmaterial, Wassergehalt > 100 % entspricht der Befeuchtung und Wassergehalt < 100 % entspricht der Trocknung.

	Spezifische Energie bis $\omega_{\text{Druck,max}}$ [J/kg]								
	Äpfel								
	Wassergehalt [%]	105°C	Fehler N = 10	80°C	Fehler N = 10	60°C	Fehler N = 5	Befeuchtung	Fehler N = 5
T	70	40,54	11,75	38,2	6,52	38,41	4,28	-	-
T	80	63,48	15,11	71,37	9,18	66,85	9,21	-	-
T	90	104,58	20,4	103,18	16,01	91,79	6,17	-	-
U	100	147,8	15,8	147,8	15,8	147,8	15,8	147,8	15,8
B	104	-	-	-	-	-	-	94,97	29,57
B	106	-	-	-	-	-	-	-	-
B	108	-	-	-	-	-	-	73,51	25,12

Tabelle 7.2.11: Abhängigkeit der spezifischen Energie E_{Spez} [J/kg] zum Erreichen der maximalen Druckfestigkeit vom Wassergehalt [%] des organischen Materials Kartoffeln bei verschiedenen Trocknungstemperaturen (mit Vertrauensbereich für eine Wahrscheinlichkeit von $\zeta = 95\%$); Wassergehalt von 100 % entspricht dem unbehandelten Ausgangsmaterial, Wassergehalt > 100 % entspricht der Befeuchtung und Wassergehalt < 100 % entspricht der Trocknung.

	Spezifische Energie bis $\omega_{\text{Druck,max}}$ [J/kg]							
	Kartoffeln							
Wassergehalt [%]	105°C	Fehler N = 10	80°C	Fehler N = 10	60°C	Fehler N = 5	Befeuchtung	Fehler N = 5
70	415,2	36,7	395,6	17,5	405,3	14,3	-	-
80	410,2	25,2	405,3	19,1	408,5	19,2	-	-
90	420,5	20,4	415,5	16,1	429,5	16,7	-	-
100	450,3	27,1	450,3	27,1	450,3	27,1	450,3	27,1
104	-	-	-	-	-	-	464,9	29,7
106	-	-	-	-	-	-	-	-
108	-	-	-	-	-	-	453,5	25,2

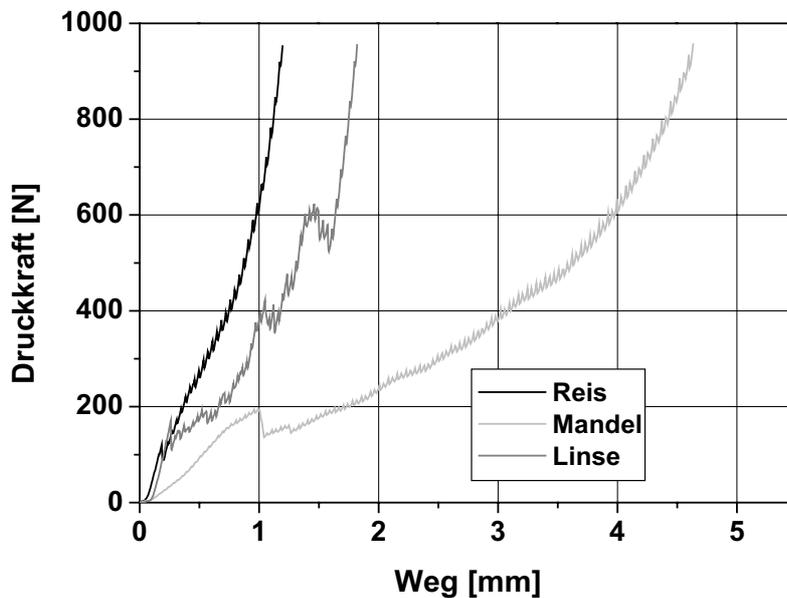


Abb. 7.2.3: Kraft-Weg-Verläufe für uniaxiale Druckversuche mit Reis, Linsen und Mandeln (unbehandelt).

Tabelle 7.2.12 (Abb. 4.15): Maximale Druckfestigkeiten $\omega_{\text{Druck,max}}$ [N/mm^2] der trockenen organischen Materialien Linsen, Reis, Mandeln und Sonnenblumenkerne (mit Vertrauensbereich für eine Wahrscheinlichkeit von $\zeta = 95\%$).

Material	Max. Druckfestigkeit $\omega_{\text{Druck,max}}$ [N/mm^2]	Fehler N = 10
Linse	6,23	0,511
Reis	12,05	1,216
Mandeln	2,87	0,352
SBK	3,56	0,489

Tabelle 7.2.13 (Abb. 4.16): Maximale Druckfestigkeiten $\omega_{\text{Druck,max}}$ [N/mm^2] der trockenen organischen Materialien Reis und Mandeln (mit Vertrauensbereich für eine Wahrscheinlichkeit von $\zeta = 95\%$) als Funktion des Wassergehaltes (hier als Parameter die Trocknungs- bzw. Befeuchtungszeit [min]).

REIS			MANDELN		
Trocknungszeit/Befeuchtungszeit [min]	Max Druckfestigkeit [N/mm^2]	Fehler N = 10	Trocknungszeit/Befeuchtungszeit [min]	Max Druckfestigkeit [N/mm^2]	Fehler N = 10
-60	7,2	-	-120	1,24446	0,34
-30	7,5	-	-60	1,204	0,177
-20	8,3	-	-45	1,3819	0,1879
-10	9,1	-	-15	1,16932	0,01879
-5	10,2	-	-5	0,94271	0,17631
0	12,0528	1,216	0	2,865	0,352

5	11,12453	0,4355	16	2,5807	0,2835
10	9,14426	0,93654	31	2,0564	0,22275
40	5,96894	0,53321	60	1,52248	0,05983
60	3,38647	0,22375	120	1,35429	0,38591
120	0,67615	0,10744	180	0,86378	0,206
180	0,56713	0,05004	240	0,85479	0,3105
240	0,52009	0,052009			

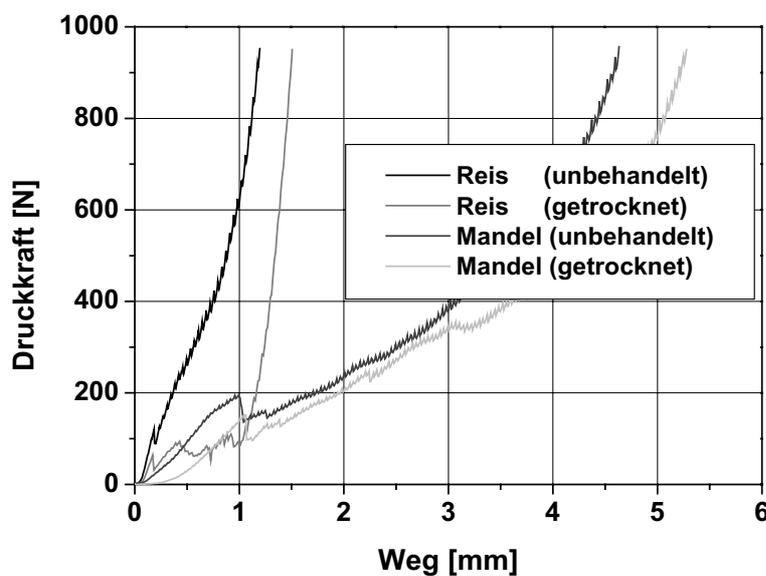


Abb. 7.2.4: Kraft-Weg-Verläufe für uniaxiale Druckversuche mit Reis (unbehandelt), Reis (60 min. bei T = 105 °C getrocknet), Mandeln (unbehandelt) und Mandeln (120 min bei T = 105 C getrocknet).

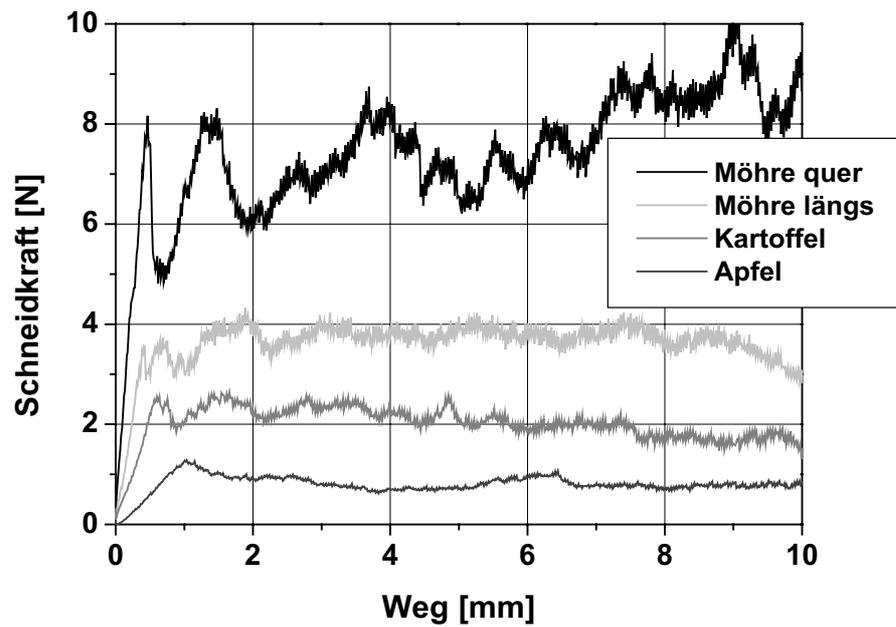


Abb. 7.2.5: Kraft-Weg-Verläufe für Schneidversuche mit Möhren (quer und längs zur Faserung), Kartoffeln und Äpfel (alle Materialien unbehandelt).

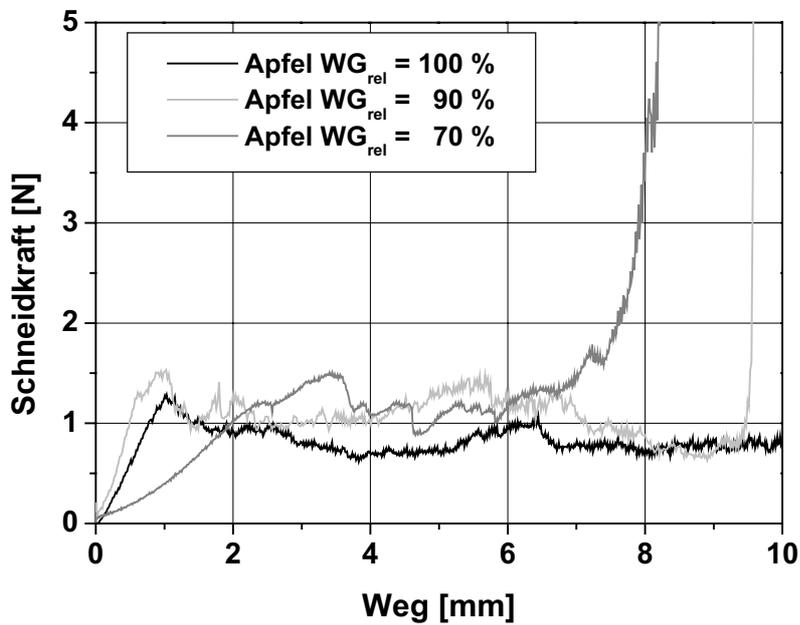


Abb. 7.2.6: Kraft-Weg-Verläufe für Schneidversuche mit Äpfeln (unbehandelt [$WG_{rel} = 100\%$] und getrocknet [$WG_{rel} = 90\%$ bzw. 70%]).

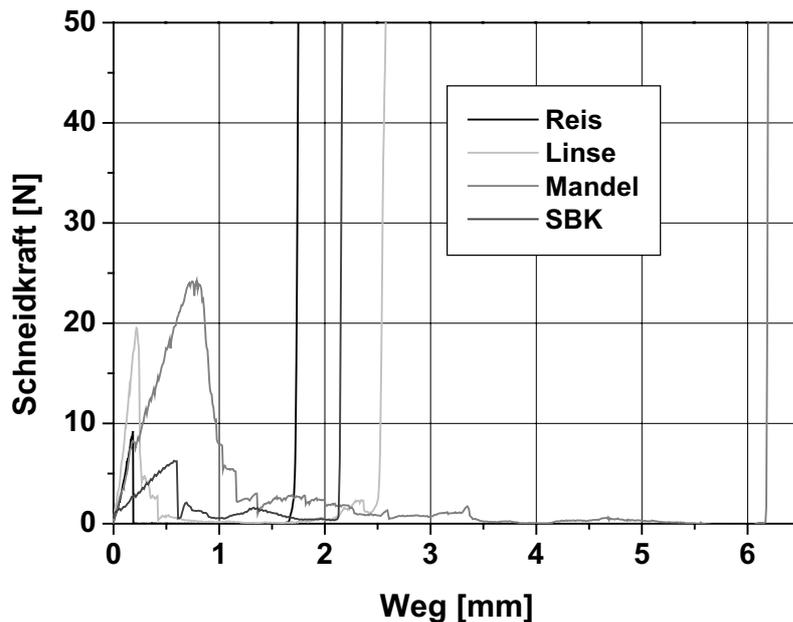


Abb. 7.2.7: Kraft-Weg-Verläufe für Schneidversuche mit Reis, Linsen, Mandeln und Sonnenblumenkernen (SBK); alle Materialien unbehandelt.

Tabelle 7.2.14: Maximale längenbezogene Schneidkraft der feuchten organischen Materialien Möhren (längs zur Faserung beansprucht) und Kartoffeln in Abhängigkeit des Wassergehaltes und der Trocknungstemperatur.

Max. längenbezogene Schneidkraft $F_{\text{Schneid,max}}$ [N/mm]						
MÖHREN (längs)						
Wassergehalt [%]	105 °C	Fehler N = 10	80 °C	Fehler N = 5	60 °C	Fehler N = 5
70	1,38	0,2	0,89	0,15	0,74	0,06
80	1,21	0,18	0,78	0,14	0,73	0,08
90	0,8	0,11	0,65	0,11	0,46	0,05
100	0,41	0,06	0,41	0,06	0,41	0,06
Max. längenbezogene Schneidkraft $F_{\text{Schneid,max}}$ [N/mm]						
Kartoffeln						
Wassergehalt [%]	105 °C	Fehler N = 10	80 °C	Fehler N = 5	60 °C	Fehler N = 5
70	0,64	0,08	0,56	0,07	0,52	0,08
80	0,63	0,09	0,41	0,08	0,41	0,09
90	0,55	0,07	0,36	0,05	0,36	0,07
100	0,21	0,03	0,21	0,03	0,21	0,03

Tabelle 7.2.15: Spezifischer Energieeintrag zum Durchschneiden von Reis, Linsen, Mandeln und Sonnenblumenkernen (unbehandelt).

Material	Reis	Linsen	Mandeln	SBK
Spez. Energie [J/kg]	30,5	65,2	120,5	90,3

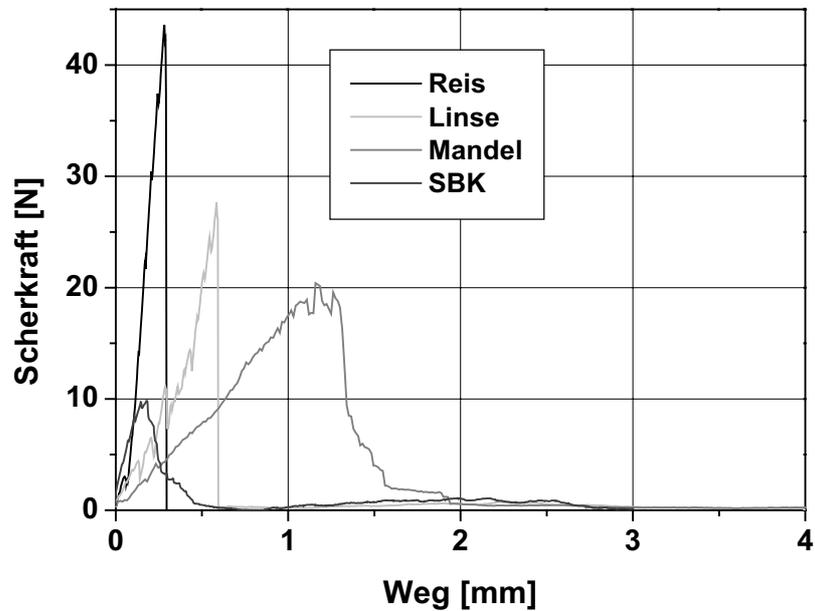


Abb. 7.2.8: Kraft-Weg-Verläufe für Scherversuche mit Reis, Linsen, Mandeln und Sonnenblumenkernen (SBK); alle Materialien unbehandelt.

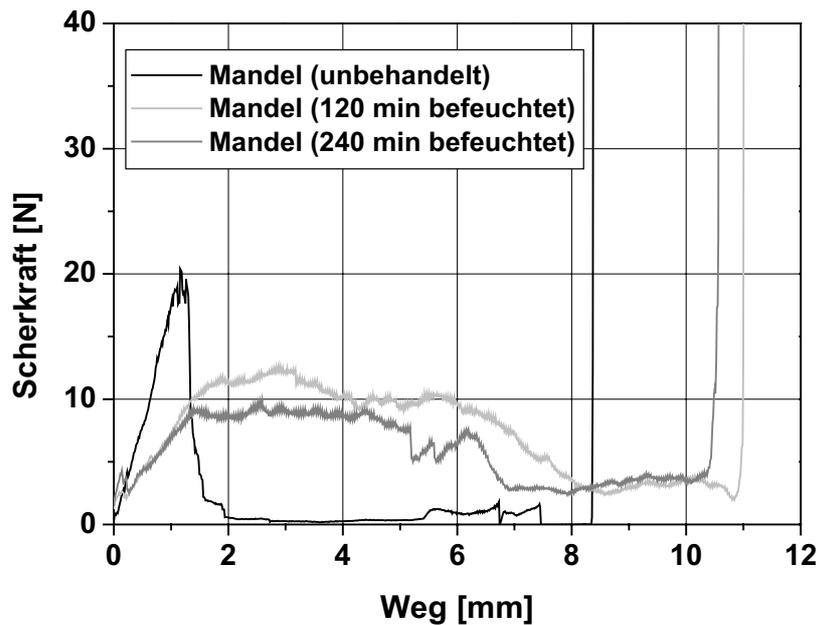


Abb. 7.2.9a: Kraft-Weg-Verläufe für Scherversuche mit Mandeln (unbehandelt, 120 min und 240 min befeuchtet).

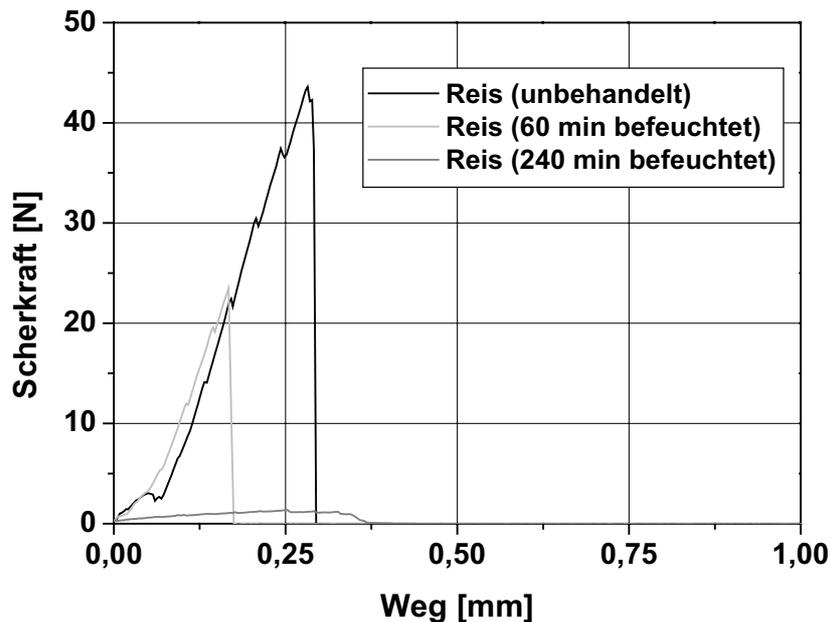


Abb. 7.2.9b: Kraft-Weg-Verläufe für Scherversuche mit Reis (unbehandelt, 60 min und 240 min befeuchtet).

7.3 Anaerober Abbau

Tabelle 7.3.1: Auflistungen sämtlicher Medianwerte [μm], Abbaugrade [%] und Steigerungen der Abbaugrade [%] für die trockenen Materialien als Einzelsubstrate (aus Mundhenke, 2002) und Zweikomponentengemische.

Material	Medianwert [μm]	Abbaugrad [%]	Steigerung [%]
Heu	unzerkleinert	63,7	
	170	80,5	16,8
	225	79,4	15,7
	687	78,5	14,8
Linsen	unzerkleinert	91,8	
	237	97,8	6,0
	409	96,4	4,6
	680	96,1	4,3
Sonnenblumenkerne	unzerkleinert	65,2	
	700	100	34,8
	900	100	34,8
Heu-Linsen	unzerkleinert	78,8	
	265	89	10,2
	408	88,8	10
	641	88,1	9,3
Heu-SBK	unzerkleinert	63,1	

	212	76,7	13,6
	386	76,2	13,1
	518	75,9	12,7
Linsen-SBK	unzerkleinert	75,3	
	260	100	24,7
	390	99,1	23,8
	580	98,2	22,9

Tabelle 7.3.2: Auflistungen sämtlicher Medianwerte [μm], Abbaugrade [%] und Steigerungen der Abbaugrade [%] für die feuchten Materialien als Einzelsubstrate (aus Mundhenke, 2002) und Zweikomponentengemische.

Material	Medianwert [μm]	Abbaugrad [%]	Steigerung [%]
Äpfel	unzerkleinert	99,7	
	1. Medianwert	100	0,3
	2. Medianwert	100	0,3
Möhren	unzerkleinert	96,6	
	1. Medianwert	100	3,4
	2. Medianwert	100	3,4
Avocados	unzerkleinert	58,1	
	1. Medianwert	68,9	10,8
	2. Medianwert	69,7	11,6
Sonnenblumenkerne	unzerkleinert	58,2	
	700	97,4	39,2
	900	97,6	39,4
Mandeln	unzerkleinert	61,3	
	724	90,5	29,2
	788	89,4	28,1
Äpfel-Möhren	unzerkleinert	99	
	1502	100	1
	1600	100	1
	1700	100	1
Äpfel-SBK	unzerkleinert	76,5	
	550	100	33,5
	670	100	33,5
	900	100	33,4
Mandeln-Avocados	unzerkleinert	64,5	
	2000	83,7	19,2
	1900	84,8	20,3
	1700	85,2	20,7

7.4 Bestimmung der Formfaktoren

Gemäß Gleichung 3.18 wird der Formfaktor π aus dem Quadrat des Quotienten vom Durchmesser der oberflächengleichen Kugel (x_s) und dem Durchmesser der volumengleichen Kugel (x_v) bestimmt. In diesem Teil des Anhanges sind die Ableitungen der in dieser Arbeit verwendeten Formfaktoren aufgeführt. Das Volumen V_K einer Kugel und die Oberfläche A_K einer Kugel berechnen sich hierbei gemäß Gleichungen 7.3.1 und 7.3.2:

$$V_K = \phi * x_s^2 \quad \text{Glg. 7.3.1}$$

$$A_K = 1/6 * \phi * x_v^3 \quad \text{Glg. 7.3.2}$$

7.4.1 Formfaktor für zylindrische Partikel (Höhe:Durchmesser = 2:1)

Die Oberfläche A_z eines Kreiszylinders wird aus der Höhe und dem Radius bestimmt. Bei einem Höhen h : Durchmesser $x = 2r$ – Verhältnis von 2:1 kann der Radius r gleich einem Viertel der Höhe h gesetzt werden. Damit ergibt sich die Oberfläche zu:

$$A_z = 2 * \phi * r(r + h) = 2 * \phi * h/4 * (h/4 + h) = 0,625 * h^2 * \phi \quad \text{Glg. 7.3.1.1}$$

Durch Gleichsetzen von Glg. 7.3.1 mit Glg. 7.3.2 ergibt sich $x_s = 0,625^{0,5}$. Das Volumen V_z für den Kreiszylinder ergibt sich aus:

$$V_z = \phi * r^2 * h = \phi * (h/4)^2 * h = \phi * 1/16 * h^3 \quad \text{Glg. 7.3.1.2}$$

Durch Gleichsetzen von Glg. 7.3.1.2 mit Glg. 7.3.1 ergibt sich x_v zu $0,375^{1/3}$. Damit wird

$$\pi = (x_s / x_v)^2 = (0,625^{0,5} / 0,375^{1/3})^2 = 1,202 \quad \text{Glg. 7.3.1.3}$$

Der Formfaktor $\pi = 1,202$ wurde für die Materialien Mandeln, Sonnenblumenkerne und Heu sowie die aus diesen Materialien hergestellten Zweikomponentengemische verwendet.

Die mathematische Vorgehensweise zur Bestimmung der weiteren Formfaktoren ist identisch, weshalb im folgenden nur noch die geometrische Form und der Endwert der jeweiligen Formfaktoren angegeben wird.

7.4.2 Formfaktor für zylindrische Partikel (Höhe:Durchmesser = 3:1)

Der Formfaktor ergibt sich zu:

$$\pi = 1,2841$$

Er wurde für das Material Äpfel verwendet.

7.4.3 Formfaktor für pyramidale Partikel (Höhe:Breite = 1:1)

Der Formfaktor ergibt sich zu:

$$\pi = 1,647$$

Er wurde für die Materialien Reis und Linsen verwendet.

7.4.4 Formfaktor für oktaedrische Partikel

Die Seitenlängen a wurden hier – den mikroskopischen Aufnahmen entsprechend – gleich lang („1“) gesetzt.

Der Formfaktor ergibt sich somit zu:

$$\pi = 1,1826$$

Er wurde für das Material Möhren verwendet.

7.4.5 Formfaktoren für die Zweikomponentengemische

Die Formfaktoren der Zweikomponentengemische ermittelten sich aus dem arithmetischen Mittel der – zur Herstellung der Gemische – verwendeten Materialien, da eine genauere Zuordnung mittels der mikroskopischen Aufnahmen nicht möglich war.

7.5 Ergänzende Angaben zur Bestimmung der spezifischen Energie bei der Einzelpartikelbeanspruchung

Zur Bestimmung der spezifischen Energie bei der Einzelpartikelbeanspruchung in der Universalprüfmaschine benötigt man nach Gleichung 3.9 (Kapitel 3.3.2.5, Seite 35) neben dem Trockenrückstand TR, der in Tabelle 3.8, Seite 44, tabellarisch aufgetragen ist, die Massen der beanspruchten Probenkörper und die Integrationsfläche unter dem Kraft-Weg-Verlauf. Diese beiden Größen werden als gemittelte Werte für die drei Materialien Äpfel, Mandeln und Möhren in den Tabellen 7.5.1 und 7.5.2 dargestellt. Es ist zu beachten, daß es sich hierbei um mittlere Größen handelt. Die angegebenen Werte sind also nur zur überschlagsmäßigen Nachrechnung der Versuchsergebnisse in Kapitel 4.2 gedacht.

Tabelle 7.5.1: Mittlere Masse der Probenkörper für Äpfel, Mandeln und Möhren zur Berechnung der spezifischen Energie bei den Einzelpartikelbeanspruchungen mit der Universalprüfmaschine.

Material	Äpfel	Mandeln	Möhren
Probenkörpermasse [g]	0,9	1,1	1,2

Tabelle 7.5.2: Mittlere Integrationsfläche zur Berechnung der spezifischen Energie bei den uniaxialen Druckversuchen für Äpfel, Mandeln und Möhren mit der Universalprüfmaschine.

Material	Äpfel	Mandeln	Möhren
Integrationsfläche	17	120	240