

Aus dem Institut für Ernährungswissenschaft
der Fakultät für Landwirtschaft und Gartenbau
der Technischen Universität München-Weihenstephan
- Lehrstuhl für Ernährungslehre, FG Haushalttechnik -

VERFAHREN ZUR MECHANISCHEN BE- UND VERARBEITUNG
VON LEBENSMITTELN IM HAUSHALT

HABILITATIONSSCHRIFT

vorgelegt von
Dr.-Ing. Horst Pichert

zur Erlangung des akademischen Grades eines habilitierten
Doktors der Ökotrophologie (Dr.oec.troph.habil.) und der
Feststellung der Lehrbefähigung für das Fachgebiet
Haushalttechnik und Arbeitslehre

München-Weihenstephan 1983

VORWORT

Vorliegende Habilitationsschrift entstand aus meinen Lehr- und Forschungsarbeiten innerhalb des Fachgebietes Haushaltstechnik, das von mir seit dem Jahre 1974 an der Technischen Universität München betreut wird. Angeregt durch meine frühere wissenschaftliche Tätigkeit am Lehrstuhl und Institut B für Mechanik, dessen damaligem Leiter, Herrn Prof. Dr. Kurt Magnus, ich sehr zu Dank verpflichtet bin, galt auch innerhalb der Haushaltstechnik mein besonderes Augenmerk den Problemen der Technischen Mechanik. Der endgültige Entschluß, mich gerade den Verfahren zur mechanischen Be- und Verarbeitung von Lebensmitteln zu widmen, wurde von der Tatsache bestimmt, daß gerade dieser Wissenschaftsbereich im einschlägigen Schrifttum bisher vergessen oder nur mit geringem Interesse behandelt wurde.

An dieser Stelle gilt mein Dank allen, die direkt oder auch indirekt mitgeholfen haben, daß ich diese Habilitationsschrift verfassen konnte. Insbesondere danke ich Frau Dr.oec.troph. Brigitte Thamm, Frau Dipl.oec.troph. Elvira Baier, Frau Dipl.oec.troph. Renate Röber und Frau Dipl.oec.troph. Monika Colling. Frau Karin Halke-Kress hat mit gestalterischem Geschick die Zeichnungen angefertigt.

Weiterhin danke ich den von mir betreuten Diplomanden der Studienrichtung Ökotrophologie, die mit wissenschaftlichen Experimenten zu zahlreichen Ergebnissen vorliegender Arbeit beigetragen haben.

Nicht zuletzt danke ich den Gutachtern sowie dem Vorsitzenden des Prüfungsausschusses und Leiter des Instituts für Ernährungswissenschaft, Herrn Professor Dr. Günther Wolfram.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
VORWORT	1
1. EINFÜHRUNG	2
1.1 ZIELSETZUNG	3
1.2 WIRTSCHAFTSFAKTOR HAUSHALT	4
1.3 TECHNIK IM HAUSHALT	5
1.3.1 Notwendigkeit einer Technisierung	5
1.3.2 Haushalttechnik	6
1.4 ERGONOMISCHE SYSTEME	8
1.4.1 Vollständiges ergonomisches System ...	8
1.4.2 Reduziertes ergonomisches System	9
1.4.3 Basisbeziehung Gerät - Lebensmittel..	10
1.5 SYSTEMATIK DER VERFAHREN	12
2. VERFAHREN UND GERÄTEBEISPIELE	20
2.1 ZERKLEINERN	21
2.1.1 Schneiden	28
2.1.2 Schnitzeln	42
2.1.3 Raspeln	52
2.1.4 Reiben	57
2.1.5 Pürrieren	60
2.1.6 Strangpressen	63
2.1.7 Scheren	69
2.1.8 Mahlen	75
2.1.9 Zerschlagen	86
2.1.10 Hacken	98
2.1.11 Sägen	103
2.2 TRENNEN	110
2.2.1 Sieben	115
2.2.2 Schälen	122
2.2.3 Passieren	130
2.2.4 Absetzen	134
2.2.5 Filtrieren	139
2.2.6 Auspressen	147
2.2.7 Zentrifugieren	156
2.3 MISCHEN	172
2.3.1 Homogenisieren	180
2.3.2 Mixen	185
2.3.3 Vermengen	191
2.3.4 Rühren	198
2.3.5 Kneten	207
2.3.6 Schaumschlagen	218

3.	GRUNDLEGENDE UNTERSUCHUNGEN ZUM SCHAUMSCHLAGEN ...	224
3.1	BEURTEILUNGSKRITERIEN BEIM SCHAUMSCHLAGEN ...	225
3.1.1	Schlagdauer	225
3.1.2	Volumenzunahme	231
3.1.3	Beständigkeit	233
3.1.4	Aussehen	236
3.1.5	Festigkeit	239
3.2	PRÜFVORRICHTUNGEN ZUR MESSUNG DER SCHAUM- FESTIGKEIT	241
3.2.1	DLG-Prüfvorrichtung	241
3.2.2	Neuentwickelte Prüfvorrichtung	245
3.2.2.1	Aufbau	245
3.2.2.2	Messung	247
3.2.2.3	Auswertung	248
3.2.2.4	Fehlerbetrachtung	248
3.2.2.5	Reproduzierbarkeit	249
3.3	GENAUGIGKEIT DER BEURTEILUNGSKRITERIEN	256
3.4	HYPOTHESE DES SCHAUMSCHLAGENS	267
3.4.1	Entwurf der Hypothese	267
3.4.2	Überprüfung der Hypothese anhand wichtiger Geräteparameter	271
3.4.2.1	Drehfrequenz der Werkzeuge	272
3.4.2.2	Durchmesser der Werkzeugstäbe	278
3.4.2.3	Füllmenge im Schlaggefäß	280
3.4.2.4	Art und Form der Werkzeuge	284
3.4.2.5	Form des Schlaggefäßes	288
3.4.3	Untersuchung der Werkzeugkinematik ...	292
3.4.3.1	Analytische Methode	292
3.4.3.2	Bahnkurvenmethode	299
3.5	OPTIMIERUNG VON KÜCHENMASCHINEN MIT PLANETEN- GETRIEBEN	303
3.5.1	Konstruktionsbeispiele von Planeten- getrieben	303
3.5.2	Zweimotorenantrieb	306
3.5.3	Labor-Küchenmaschine	308
3.5.4	Optimierung der Arbeitsergebnisse	315
3.5.5	Transformation der Geräteparameter auf Haushalts-Küchenmaschinen	325
4.	ZUSAMMENFASSUNG	330
5.	VERZEICHNISSE	336
5.1	SCHRIFTTUM	336
5.2	FORMELZEICHEN	345

4 EINFÜHRUNG

Historisch gesehen ist die "Haushaltstechnik" in Form einfacher Küchenwerkzeuge zur Nahrungszubereitung, Feuerstellen und Geräten zur Körperpflege eine der ältesten Anwendungsbeispiele für Technik. Umso erstaunlicher ist es, daß das entsprechende Lehr- und Forschungsgebiet an Universitäten, Hochschulen und Entwicklungslabors der Hausgeräteindustrie erst seit wenigen Jahren stärker berücksichtigt wird. Grund für diesen Trend sind einerseits das zunehmende Verbraucherbewußtsein - das "Testen" der Gebrauchstauglichkeit von Hausgeräten sei hier nur ein Stichwort - und andererseits die anstehenden Energie-, Rohstoff- und Umweltprobleme, bei denen gerade die "Haushaltstechnik" eine Schlüsselfunktion besitzt.

Allerdings ist selbst bis heute das subjektive Interesse an diesem Fachgebiet "Haushaltstechnik" sowie allgemein an den "Haushaltswissenschaften" gering, vergleicht man es beispielsweise mit dem gesellschaftlichen Stellenwert der Ernährungswissenschaften. Dies ist nicht ganz verständlich, da Haushalts- und Ernährungswissenschaft unmittelbar miteinander verbunden sind, was auch durch den Lehrplan der Studienrichtung Ökotrophologie dokumentiert wird. Die Erkenntnisse einer modernen Ernährungswissenschaft können erst dann im vollen Umfang in die Praxis umgesetzt werden, wenn sie in jedem Glied der "Ernährungskette" berücksichtigt werden. Als Ernährungskette soll dabei die Folge aller Technologieglieder - ausgehend von der Erzeugung der Grundnahrungsmittel über Ernte bzw. Schlachtung, Transport, Kühlung, Lagerung, mechanische Be- und Verarbeitung, Wärmebehandlung bis hin zum Verzehr der Nahrung durch den Menschen - verstanden werden. Innerhalb dieser Kette können auch hinsichtlich der Ernährungsphysiologie irreversible Fehler gemacht werden.

Doch bevor detaillierte Betrachtungen über die mechanische Be- und Verarbeitung von Lebensmitteln angestellt werden, sollen die wichtigsten Ziele der vorliegenden Habilitationsschrift dargelegt werden.

1.1 ZIELSETZUNG

Wie bereits erwähnt, existiert, verglichen mit anderen Bereichen, wie z.B. den thermischen Verfahren, zur "Mechanischen Be- und Verarbeitung von Lebensmitteln" nur sehr wenig Schrifttum. Da auch bislang keine allgemein gültige Systematik für diese "mechanischen Verfahren" vorhanden war, ist es ein erstes Ziel vorliegender Habilitationsschrift, erstmals eine solche Systematik zu schaffen und vorzustellen. Hierbei können Erkenntnisse der industriellen Verfahrenstechnik, die wissenschaftlich schon viel stärker untersucht wurde, nur teilweise transformiert werden.

Ein zweites Ziel vorliegender Habilitationsschrift ist es, in dieser Systematik einzelne Grundverfahren - "Unit Operations" - eindeutig zu definieren und zu beschreiben. Dabei sollen vor allem physikalische Grundlagen herangezogen werden, die soweit möglich mit mathematischen Beziehungen belegt werden. Letztere gestatten es, die Wirkung der Verfahrensparameter auf den Verfahrensablauf und auf das Arbeitsergebnis abzuschätzen. Gleichzeitig lassen sich mit solchen mathematischen Ansätzen die Grenzen eines Verfahrens besser erkennen.

Die Optimierung von Verfahren bzw. deren Arbeitsergebnissen setzt jedoch voraus, daß Kriterien und Meßverfahren vorhanden sind, um diese Ergebnisse beurteilen zu können.

Damit läßt sich ein drittes Ziel formulieren, nämlich geeignete Beurteilungskriterien zu definieren und die zugehörigen Meßverfahren festzulegen, bzw. zu entwickeln. Dieser letztgenannte Schritt erfordert Experimente, die in vorliegender Arbeit bei einigen Verfahren durchgeführt und deren Ergebnisse diskutiert werden.

Besonders ausführlich wird in einem eigenen Kapitel das Verfahren "Schaumschlagen" experimentell behandelt. Vorrangiges

Ziel ist dabei die Verfahrensoptimierung, wobei auch hier Beurteilungskriterien, Meßverfahren und Meßeinrichtungen teilweise neu zu schaffen und zu überprüfen sind. Darüberhinaus ist eine einfache Hypothese des Verfahrens "Schaumschlagen" notwendig, um eine rationelle und zuverlässige Optimierungsstrategie aufbauen zu können.

Damit die "Mechanische Be- und Verarbeitung von Lebensmitteln" leichter eingeordnet werden kann, soll zunächst der Begriff "Haushaltstechnik" näher betrachtet werden. Die Relevanz dieses Fachgebietes kann hinsichtlich der wirtschaftlichen Bedeutung mit konkreten Zahlen belegt werden.

1.2 WIRTSCHAFTSFAKTOR HAUSHALT

- Vom Bruttosozialprodukt der BRD fließen etwa 54% (1979: 758 Mrd DM) als privater Verbrauch durch die Haushalte (115).
- Die Hausgeräte-Industrie konnte im Jahre 1979 einen Produktionswert von etwa 25 Mrd DM nachweisen (39).
- In den privaten Haushalten werden nach Schätzungen insgesamt etwa 45 - 50 Mrd Arbeitsstunden pro Jahr abgeleistet gegenüber 54 Mrd in der Erwerbswirtschaft (102).
- In den privaten Haushalten zusammen mit den kleinen Handwerksbetrieben (Kleinverbraucher) werden etwa 45% der Endenergie umgesetzt. Der Rest verteilt sich auf die Bereiche Industrie mit etwa 34% und Verkehr sowie Sonstiges mit etwa 21 % (Zahlenwerte aus dem Jahr 1979) (40). Dabei ist beim Anteil der privaten Haushalte seit Jahren eine deutlich steigende Tendenz zu verzeichnen (110).
- Im Lebensraum Haushalt werden jährlich etwa 9000 tödliche Unfälle (1978: 8755 Tote) verzeichnet. In der Erwerbswirtschaft sind es etwa 3000 Tote (1978: 2825 Tote) (2) (7). Auch dies ist unbestritten ein WIRTSCHAFTSFAKTOR. Das mit jedem einzelnen Toten zusammenhängende Leid läßt sich allerdings nicht in Zahlen ausdrücken. (Die Zahl der Verletzten in den privaten Haushalten wird ohnedies nicht statistisch erfaßt.)

Wenngleich bereits diese wenigen Daten objektiv die Relevanz einer Haushaltstechnik beweisen, so sind dennoch die zugehörigen Wissenschaftsgebiete kaum erforscht. Diese Tatsache muß sich umso nachteiliger auswirken, je stärker Energie-, Rohstoff-, Umwelt- und Ernährungsprobleme auftreten. Um Mißverständnissen vorzubeugen, sei schon an dieser Stelle bemerkt, daß verantwortungsbewußte "Haushaltstechniker" nicht ein Mehr an Technik, sondern eine rationell eingesetzte, langlebige und für den Menschen überschaubare Technik fordern.

1.3 TECHNIK IM HAUSHALT

1.3.1 NOTWENDIGKEIT EINER TECHNISIERUNG

Die Fülle der Aufgaben, die im modernen Haushalt anfallen, sind nur mit Hilfe von Geräten, Maschinen und technischen Einrichtungen zu bewältigen. Dabei ist auch ein hinreichend großes Maß an Planung und Organisation erforderlich, weshalb der Haushalt auch als "technisch-organisatorische Betriebs-einheit" zu sehen ist.

Die Technik wird dabei vielfältig genutzt (119). Ihre Notwendigkeit läßt sich in vorliegender Habilitationsschrift schon aus den nachfolgend definierten vier Hauptaufgaben ableiten, die für alle Verfahren und Geräte zur mechanischen Be- und Verarbeitung von Lebensmitteln ausreichen:

1. VERFAHRENSERMÖGLICHUNG: viele Arbeitsverfahren sind durch den Einsatz von Technik überhaupt erst möglich; dies gilt insbesondere für mechanische Zerkleinerungsverfahren. So ist das Zerkleinern von Brot längs ebener Flächen erst mit Einsatz des MESSERS möglich geworden.
2. MECHANISIERUNG: mit ihrer Hilfe können die beschränkten Fähigkeiten des Menschen - beispielsweise die begrenzten Kräfte der menschlichen Hand - verstärkt, umgelenkt oder

eingeleitet werden. Einige Aufgaben können erst unter Einsatz von Maschinen zu der gewünschten Qualität des Arbeitsergebnisses führen. Eine bestmögliche Homogenität von Speiseeis kann nur mit einem mechanischen Gerät, z.B. dem SPEISEEISBEREITER, erzeugt werden.

3. ARBEITSERLEICHTERUNG: nicht nur die Kräfte und Momente, die vom Menschen aufgebracht werden können, sind begrenzt, sondern auch seine Leistung und Arbeit. Mit mechanischen Bauteilen wie Hebel, Lager und Getriebe, aber insbesondere mit Elektromotoren, können hier Arbeitserleichterungen geschaffen werden. Beispiele hierfür sind die UNIVERSAL-KÜCHENMASCHINEN mit ihren Zusatzgeräten.
4. AUTOMATISIERUNG: sie übernimmt bei Geräten Steuerungs-, Regelungs- bzw. Kontrollaufgaben und macht den Menschen frei für andere Tätigkeiten (3). Eine MAHLWERK-KAFFEEMÜHLE mit Dosiereinrichtung produziert eine vorgegebene Menge Kaffeemehl mit gewünschtem Feinheitsgrad und schaltet schließlich automatisch ab.

1.3.2 HAUSHALTTECHNIK

Im Lehr- und Forschungsgebiet HAUSHALTTECHNIK sind Erkenntnisse mehrerer wissenschaftlicher Disziplinen, wie Mechanik, Wärmelehre, Elektrotechnik, Steuerungs- und Regelungstechnik und im weiteren Sinne auch Werkstoffkunde, Textillehre, Arbeitslehre, Wohnlehre, Lebensmittellehre und Ernährungslehre vereinigt. Nur ein interdisziplinärer Ansatz kann Erfolgsaussichten bei der Lösung der komplexen Probleme, wie sie im Haushalt vorliegen, bieten.

Bislang wurden in der HAUSHALTTECHNIK neben den Grundaufgaben wie Verfahrensermöglichung, Mechanisierung, Arbeitserleichterung und Automatisierung vor allem die Optimierung

der Arbeitsverfahren z.B. hinsichtlich ihres Arbeitsergebnisses verfolgt. Hinzu kamen Fragen der Sicherheit bei Geräten, Maschinen und Einrichtungen im privaten Haushalt (21). Diese Fragen können ebenso wie die der Arbeits- und Betriebsmittelgestaltung einer Arbeitslehre des Haushalts zugeordnet werden.

Heute und stärker noch in der Zukunft werden in zunehmendem Maße Probleme der Energie- und Rohstoffversorgung, der Ernährung und der Umweltbelastung an die Wissenschaftler der Haushaltstechnik und Arbeitslehre herangetragen.

Schließlich gäbe es noch zahlreiche Sonderprobleme, wie z.B. Küchen für Behinderte oder kindergerechte Gestaltung von Geräten und Einrichtungen.

Die HAUSHALTTECHNIK wird auch folgendermaßen definiert:

"Die HAUSHALTTECHNIK umfaßt den geräte- und verfahrenstechnischen Bereich eines Haushalts, insbesondere im Hinblick auf eine rationelle Nutzung technischer Einrichtungen zur Bewältigung hauswirtschaftlicher Arbeiten" (47).

Diese Definition soll auch dazu dienen, die HAUSHALTTECHNIK vom benachbarten Wissenschaftsgebiet HAUSTECHNIK abzugrenzen. Letztere beschreibt Anlagen und Verfahren, die der Versorgung der Gebäude mit Energie und Wasser und der Beseitigung von Abfällen dienen und die für eine günstige Nutzung der Gebäudeeinrichtungen erforderlich sind.

Somit befaßt sich die HAUSTECHNIK mit allen im Haus fest installierten technischen Anlagen für die Bereiche:

- " - Energieversorgung
- Nachrichtentechnik
- Heizung
- Lüftung
- Klima
- Sanitär
- Müllentsorgung
- Fördertechnik
- Brandschutz.

Von Anlage spricht man vor allem dann, wenn man die feste Verbindung mit dem Gebäude dabei in Betracht zieht.

1.4 ERGONOMISCHE SYSTEME

So wie die HAUSHALTSTECHNIK als Ganzes dem Menschen dienen soll, so müssen auch alle Teilbereiche am Menschen orientiert sein.

Solche Bereiche sind Verfahren und die dazugehörigen Geräte zur mechanischen Be- und Verarbeitung von Lebensmitteln. Stellt man dabei den Menschen in den Mittelpunkt, so führt dies zwangsläufig zu einem "ergonomischen System" (38) (45). Der Begriff "Ergonomie" deutet auf die griechischen Worte für Arbeit, Leistung sowie Gesetz und Regel hin. Die Ergonomie als Wissenschaft befaßt sich hauptsächlich mit dem Problemkreis Mensch, Maschine (Gerät) und Umgebung (Umwelt).

1.4.1 VOLLSTÄNDIGES ERGONOMISCHES SYSTEM

Nur mit dem VOLLSTÄNDIGEN ERGONOMISCHEN SYSTEM, welches gegenüber dem anderer Autoren um das Element LEBENSMITTEL erweitert wurde, läßt sich der Gesamtzusammenhang aller Verfahren zur mechanischen Be- und Verarbeitung von Lebensmitteln darstellen (Abb. 10/1).

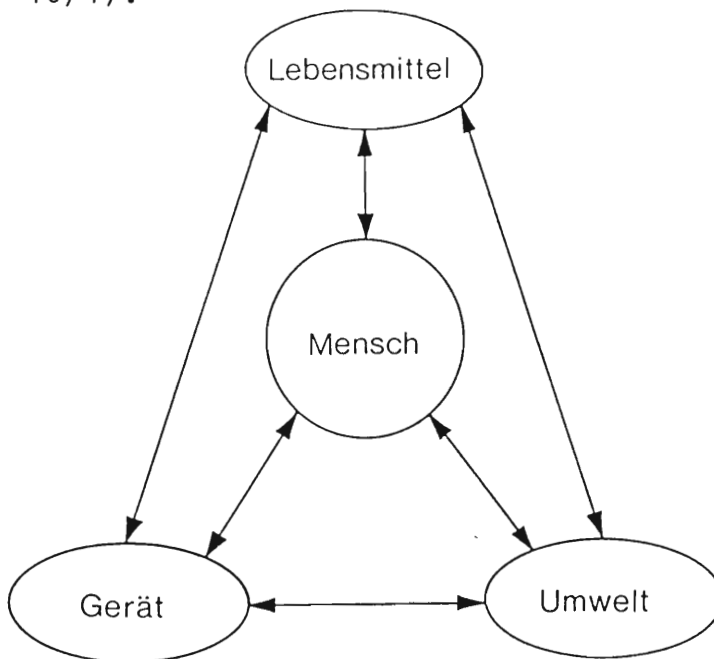


Abb. 10/1: Vollständiges ergonomisches System

Es besteht aus den Elementen:

- MENSCH
- GERÄT
- LEBENSMITTEL
- UMWELT.

Dabei ist der Begriff GERÄT allgemein im Sinne eines ARBEITSMITTELS zu verstehen. Hierzu gehören auch Werkzeuge, Maschinen und Einrichtungen. Unter LEBENSMITTEL wird in diesem Zusammenhang die Gesamtheit aller Nahrungsmittel, Genußmittel sowie Trinkwasser und Luft verstanden. Die Einbeziehung der Luft wird folgendermaßen begründet: Luft enthält zwar keine Nährstoffe, aber sie ist in vielen Lebensmitteln enthalten. Beim Einschlagen von Luft in Sahne wird auch konsequenterweise von einem Lebensmittelgemisch gesprochen.

Zur Bewältigung einer Arbeitsaufgabe stehen beim VOLLSTÄNDIGEN ERGONOMISCHEN SYSTEM sechs Basisbeziehungen in Wirkungszusammenhängen.

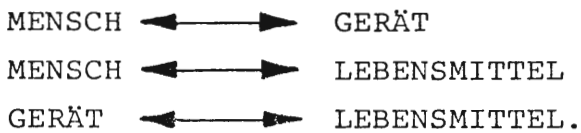
Während bei dem hier gewählten ergonomischen System der Mensch im Mittelpunkt steht, ist es in der Norm DIN 33 400 die Arbeitsaufgabe:

"Ein Arbeitssystem dient der Erfüllung einer Arbeitsaufgabe" (22). Bei dieser Definition wird das ergonomische System sogar in ein hierarchisches Arbeitssystem umstrukturiert.

1.4.2 REDUZIERTES ERGONOMISCHES SYSTEM

Da bei den Verfahren und Geräten zur mechanischen Be- und Verarbeitung von Lebensmitteln im Haushalt die Basisbeziehungen zur UMWELT außer Belastungen durch Lärm (34), Wärme und Entweichen von Gas oder Staub meist vernachlässigbar sind, soll ein REDUZIERTES ERGONOMISCHES SYSTEM betrachtet werden.

Dabei ist das Element UMWELT entfernt, und es stehen nur drei Basisbeziehungen in einem Wirkungszusammenhang:



Der MENSCH betätigt, treibt an oder hält das GERÄT fest. Das GERÄT seinerseits wirkt auf den MENSCHEN mechanisch z.B. über Stellteile, optisch z.B. über Anzeigen und akustisch durch Geräusche zurück (12) (23) (72).

Der MENSCH bringt auch das LEBENSMITTEL an die Wirkstelle, belastet oder führt es und entnimmt es schließlich wieder. Das LEBENSMITTEL wirkt auch hierbei mechanisch durch Kräfte und Momente oder durch sensorische Komponenten, wie Aussehen, Konsistenz und Geruch auf den MENSCHEN.

Das GERÄT bzw. dessen WERKZEUG be- oder verarbeitet das LEBENSMITTEL. Das LEBENSMITTEL wirkt durch Gewichts-, Haft- und Trägheitskräfte sowie Momente belastend auf das GERÄT.

Von diesen drei Basisbeziehungen - auch Wechselbeziehungen genannt - soll in vorliegender Habilitationsschrift vorrangig die zuletzt genannte, also das Zusammenwirken von GERÄT und LEBENSMITTEL, untersucht werden.

1.4.3 BASISBEZIEHUNG GERÄT - LEBENSMITTEL

Die Basisbeziehung zwischen GERÄT und LEBENSMITTEL ist auch in der industriellen Verfahrenstechnik Gegenstand theoretischer und vor allem experimenteller Untersuchungen. Dort spricht man von Maschinen für Stoffänderungsprozesse, d.h. man untersucht die Frage, wie sich Stoffe mittels Maschinen, Einrichtungen oder technischer Anlagen nach Art, Eigenschaften und Zusammensetzung ändern lassen.

Während sowohl in einer industriellen Verfahrenstechnik als auch in einer solchen des Haushalts eine Reihe von thermischen und chemischen Verfahren angewandt werden, soll vorliegende Habilitationsschrift auf mechanische Verfahren beschränkt bleiben.

Eine wissenschaftliche Beschreibung der Basisbeziehung zwischen GERÄT und LEBENSMITTEL erfordert eine Definition der WIRKSTELLE:

Die Stelle, an der das Gerät bzw. dessen Werkzeug auf das Lebensmittel einwirkt - und umgekehrt -, wird als WIRKSTELLE bezeichnet. Je nach Verfahrensart und Geräteauslegung können WIRKSTELLEN sein:

- WIRKLINIEN bzw. } (z.B. Schneide bei Küchenmessern)
- WIRRKANTEN } (z.B. Schneide bei Küchenmessern)
- WIRKFLÄCHEN (z.B. Preßkegel bei Zitruspressen)
- WIRKRÄUME (z.B. Schüsselinneres bei Küchenmaschinen).

Bei den WIRKRÄUMEN hat sich insbesondere bei Optimierungsaufgaben für Mischverfahren eine differenzierte Unterscheidung bewährt (96).

Der PRIMÄRE WIRKRAUM ist der Raum, in welchem von den Werkzeugen ohne Zusatzbewegung von Hand oder von einer Getriebe-kinematik die Lebensmittel unmittelbar bearbeitet werden können.

Der SEKUNDÄRE WIRKRAUM entsteht durch eine Zusatzbewegung, die den primären Wirkraum in einem gedachten oder vorhandenen Lebensmittelvolumen wandern läßt.

Der TERTIÄRE WIRKRAUM ist der Raum, in welchem sich Lebensmittel außerhalb des sekundären Wirkraumes befinden können. Sie können nur bearbeitet werden, wenn sie - zumindest für eine geraume Zeit - in den sekundären Wirkraum transportiert werden.

Fehlt diese Transportwirkung oder ist sie zu wenig ausgeprägt, so wird der tertiäre Wirkraum zum TOTRAUM. Die augenblicklich darin befindlichen Lebensmittel können während der gesamten Verfahrensdauer von den Werkzeugen nicht erfaßt werden.

Diese Definitionen der Wirkräume werden beim VERMENGEN von Lebensmitteln mit der Hand-Küchenmaschine nochmals wiederholt, erweitert bzw. veranschaulicht (Kap. 2.3.3).

1.5 SYSTEMATIK DER VERFAHREN

Die mechanische Be- und Verarbeitung von Lebensmitteln im Haushalt erfordert das Zusammenwirken von Mensch - Gerät - Lebensmittel und Umgebung gemäß dem Ergonomischen System (Abb. 10/1). Hauptsächlich soll dabei die Basisbeziehung Gerät - Lebensmittel an der Wirkstelle, d.h. das Verfahren selbst, betrachtet werden.

Für die Verfahrenstechnik des Haushalts, insbesondere für den Teilbereich "Mechanische Be- und Verarbeitung von Lebensmitteln", existierte bislang noch keine einheitliche Systematik. Aus diesem Grunde war es ein Hauptziel vorliegender Habilitationsschrift, eine solche Systematik erstmals zu schaffen, bevor einzelne Verfahren definiert, beschrieben oder gar experimentell untersucht werden konnten.

Nach Entwurf, Ausarbeitung und Abwägung unterschiedlicher Gliederungsmöglichkeiten wird eine bestechend einfache Lösung für eine solche Systematik vorgestellt. Ihre "Entstehungsgeschichte" soll jedoch in vorliegender Habilitationsschrift nicht näher ausgeführt werden. Die wichtigsten der im Haushalt vorkommenden Arbeitsverfahren zur "Mechanischen Be- und Verarbeitung von Lebensmitteln" lassen sich in die Hauptgruppen

- ZERKLEINERN
- TRENNEN
- MISCHEN

einteilen.

Damit ist folgende Systematik der 24 in dieser Habilitationsschrift behandelten Verfahren möglich (Tab. 10/1).

Tab. 10/1: Systematik der Verfahren zur mechanischen Be- und Verarbeitung von Lebensmitteln im Haushalt

ZERKLEINERN	TRENNEN	MISCHEN
Schneiden	Sieben	Homogenisieren
Schnitzeln	Schälen	Mixen
Raspeln	Passieren	Vermengen
Reiben	Absetzen	Rühren
Pürieren	Filtrieren	Kneten
Strangpressen	Auspressen	Schaumschlagen
Scheren	Zentrifugieren	
Mahlen		
Zerschlagen		
Hacken		
Sägen		

Die Begründung für diese Systematik bzw. der gewählten Zuordnung der Verfahren zu den Hauptgruppen wird - falls erforderlich - bei der Beschreibung der einzelnen Verfahren gegeben. Meist ergibt sich diese Begründung schon aus der nachfolgenden Abgrenzung bzw. Definition der Hauptgruppen ZERKLEINERN, TRENNEN, MISCHEN.

Das mechanische Verfahren ZERKLEINERN wird nach der Terminologie der industriellen Verfahrenstechnik der Gruppe "Oberflächenvergrößerung" zugeordnet (48). Zur letzteren zählt beispielsweise auch die Flüssigkeitszerteilung durch Berieseln, Zerstäuben oder Zerspritzen. Die Betrachtung des Energieaufwandes beim Zerkleinern zeigt, daß dieser über den Oberflächenzuwachs abgeschätzt werden kann (84). Aus diesen Gründen wird das Kennzeichen der "Oberflächenvergrößerung" auch zur Abgrenzung der mechanischen Zerkleinerungsverfahren im Haushalt herangezogen.

Unter TRENNEN versteht man das Zerlegen eines Stoffgemisches in einzelne Komponenten, Phasen oder Eigenschaften des Stoffsystems, ohne die Komponenten stofflich zu verändern (123).

Industriell nutzt man Trennverfahren, wie Sedimentieren, Zentrifugieren, Filtrieren, Entstauben, Destillieren, Diffundieren, Raffinieren, Extrahieren, Flottieren, Klassieren, Sortieren und Auspressen sowie elektrische und magnetische Verfahren.

Für den Haushalt sind nur wenige, und zwar nahezu ausschließlich die in vorliegender Arbeit behandelten mechanischen Trennverfahren von Bedeutung. Jedoch gibt es gerade im Haushalt spezielle Lebensmittelgemische, bei denen die Trennverfahren physikalisch schwierig zu beschreiben und kaum zu automatisieren sind.

MISCHEN ist die Vereinigung eines Stoffes mit einem oder mehreren anderen Stoffen, wobei die Mischungspartner gleichen oder unterschiedlichen Aggregatzustand (fest, flüssig, gasförmig) besitzen können (75). Wie beim Trennen - es kann als komplementäres Verfahren zum Mischen angesehen werden - sollen sich auch hier die Komponenten stofflich nicht verändern. Weiterhin zählt zum Mischen das Homogenisieren, welches im Idealfall zur Erzeugung eines einphasigen Gemisches dient, bei dem alle Konzentrations-, Temperatur- oder Eigenschaftsunterschiede ausgeglichen werden sollen.

In vorliegender Habilitationsschrift wird die Definition des jeweiligen Verfahrens nach dem angestrebten Arbeitsziel vorgenommen, wobei meist die Konsistenz des Ausgangs-Lebensmittels charakterisiert wird. Für das Arbeitsergebnis sind aus physikalischer Sicht wichtig: Abmessung, Form, Homogenität, Konsistenz und evtl. Temperatur der bearbeiteten Lebensmittel.

Die hierbei ebenso wichtigen Kriterien der Sensorik (19) oder der Ernährungsphysiologie sind sehr komplex und können

nur in einigen Beispielen angedeutet werden; denn eine nähere Untersuchung würde den Rahmen vorliegender Arbeit sprengen. Die Reihenfolge der Verfahren innerhalb jeder Hauptgruppe kann verschieden gewählt werden; hier wurde sie vorrangig nach didaktischen Gesichtspunkten festgelegt.

Die Gruppe ZERKLEINERN beginnt mit dem Verfahren SCHNEIDEN, da es wesentliche Grundlage für die späteren Verfahren SCHNITZELN und RASPELN ist. Während jedoch beim SCHNEIDEN die bearbeiteten Lebensmittel noch in beliebig große Teile zerkleinert werden können, ist beim SCHNITZELN die Teilchengröße, zumindest hinsichtlich eines Maßes (Scheibendicke) technisch begrenzt und beim RASPELN sind sogar mehrere Abmessungen (Querschnittsfläche) vorgegeben.

Beim REIBEN sind vergleichsweise die kleinsten Teilchen zu erwarten, wobei deren Abmessungen und Formen sehr unterschiedlich sind. Beim PÜRIEREN schließlich sind die Lebensmittelteilchen am kleinsten und das bearbeitete Lebensmittel hinsichtlich seiner Konsistenz treffend mit breiartig oder teigig zu beschreiben. Ähnliche Konsistenz besitzt das Lebensmittel beim STRANGPRESSEN, hier jedoch bereits im Ausgangszustand.

Während beim SCHNEIDEN vorrangig nur eine Wirkkante am Lebensmittel angreift, sind beim SCHEREN mindestens zwei Wirkkanten (Scherkanten) notwendig. Beim MAHLEN hingegen wird die erforderliche Beanspruchung im Lebensmittel grundsätzlich zwischen zwei Wirkflächen (Mahlbacken) erzeugt.

Die bisher erwähnten Zerkleinerungsverfahren beruhen auf statischen Beanspruchungsarten. Beim ZERSCHLAGEN und HACKEN hingegen ist eine entsprechende Dynamik, das heißt rasche Bewegungen der Werkzeuge, erforderlich. Die Wirkkräfte beruhen auf der Massenträgheit bzw. der kinetischen Energie des Systems.

Das Verfahren SÄGEN besitzt zwar im Haushalt keine allzu große Bedeutung, wurde aber der Vollständigkeit halber an den Schluß der Auflistung über die Zerkleinerungsverfahren gestellt.

Die Gruppe der TRENNVERFAHREN wird hauptsächlich nach der Konsistenz des Ausgangs-Lebensmittels geordnet und beginnt mit dem SIEBEN. Es dient zum Zerlegen von Fest-Fest-Gemischen bei pulvriger Konsistenz. Auch beim SCHÄLEN handelt es sich um Fest-Fest-Stoffgemische, allerdings bei großstückigen Lebensmitteln. Man nutzt hierzu auch Verfahren wie SCHNEIDEN oder REIBEN, vom Arbeitsziel her handelt es sich jedoch um ein TRENNVERFAHREN.

Die Lebensmittelgemische zum PASSIEREN sind von flüssig-fester Konsistenz, ähnlich wie die folgenden zum ABSETZEN, FILTRIEREN, AUSPRESSEN und ZENTRIFUGIEREN. Hinsichtlich des technischen Verfahrensaufwandes ist in der Reihenfolge ABSETZEN, FILTRIEREN und AUSPRESSEN eine erhebliche Steigerung zu verzeichnen. Die höchste Stufe bildet dabei ZENTRIFUGIEREN, welches prinzipiell auch zur Intensivierung der drei vorher genannten Verfahren dienen kann, aber letztlich als eigenes Verfahren eingestuft werden muß.

Die Gruppe der MISCHVERFAHREN beginnt mit HOMOGENISIEREN, welches in der Haushalttechnik als eigenständiges Verfahren eingeführt werden soll, jedoch implizit auch in den folgenden Verfahren enthalten ist. Besonders deutlich wird dies beim MIXEN, welches eindeutig zu den Mischverfahren zählt, jedoch vielfach von ZERKLEINERUNGSVERFAHREN überlagert ist. VERMENGEN wird in der industriellen Verfahrenstechnik auch als Trockenmischen bezeichnet, da es in seiner "reinsten Form" dazu dient, pulvrige Fest-Fest-Lebensmittelkomponenten miteinander zu mischen. Demgegenüber ist das folgende Verfahren RÜHREN in seiner "reinsten Form" ein Mischen von Flüssig-

Flüssig-Stoffgemischen, also von Flüssigkeiten.

Beim KNETEN, dem nachfolgend beschriebenen Verfahren, werden Fest-Flüssig-Lebensmittelkomponenten bearbeitet, und vielfach wird mit einem VERMENGEN oder RÜHREN in der Verfahrensvorstufe begonnen.

Das zuletzt aufgeführte SCHAUMSCHLAGEN innerhalb der Gruppe MISCHEN ist ein Verfahren, bei dem Gas bzw. Luft in eine Flüssigkeit eingeschlagen wird. Es ist dann ein schwer zu realisierendes Verfahren, wenn neben anderen Randbedingungen beispielsweise eine zeitlich lange Beständigkeit des entstehenden Schaumes gewährleistet werden soll.

Die vorgestellte Reihenfolge der Verfahren korrespondiert auch mit der Reihenfolge zugehöriger Geräte, was einer diesbezüglichen Aufstellung die Form einer "Diagonal-Matrix" gibt (Tab. 10/2).

Sind Geräte nur für ein Verfahren ausgelegt bzw. optimiert (●), so werden sie im folgenden als EINZWECKGERÄTE bezeichnet. Im Gegensatz dazu sind MEHRZWECKGERÄTE nach Austausch von Werkzeugen oder Anbringen von Zusatzgeräten für mehrere Verfahren geeignet.

Aber selbst mit manchen EINZWECKGERÄTEN sind - zumindest bedingt - neben dem vorgesehenen Verfahren noch weitere möglich (○).

Mit einem Küchenmesser läßt sich neben SCHNEIDEN auch SCHNITZELN (zur Arbeitserleichterung gibt es hierzu aufsteckbare Anschläge), SCHÄLEN oder gar HACKEN. Umgekehrt ist mit einem Handschäler neben SCHÄLEN auch SCHNITZELN möglich und mit einem Beil neben HACKEN auch SCHNEIDEN denkbar.

Einige Geräte sind insofern noch für andere Verfahren geeignet, da in dem für sie vorgesehenen Verfahren noch ein anderes implizit enthalten ist. Beispielsweise ist HOMOGENISIEREN, definiert als Ausgleich von Konzentrations-, Temperatur-

Tab. 10/2: Gerätebeispiele zur mechanischen Be- und Verarbeitung von Lebensmitteln im Haushalt

- = optimal geeignet
- ◐ = bedingt geeignet
- = ebenso möglich bzw. implizit enthalten
- = möglich mit Zusatzgerät bzw. mit anderem Werkzeug
- * = nur möglich mit der Hand-Küchenmaschine

Gerätebeispiele	ZERKLEINERN							TRENNEN				MISCHEN																				
	Küchenmesser	Motormesser	Schneidemaschine	Schnitzler	Reiber	Teigwarenpresse	Wolf	Getreidemühle	Mahlwerk-Kaffeemühle	Schlagmesser-Kaffeemühle	Beil	Säge	Sieb	Handschäler	Schälgerät	Passiergerät	Aufbrühautomat	Zitruspresse	Fruchtpresse	Saftzentrifuge - interm.	Saftzentrifuge - kontin.	Speiseeisbereiter	Standmixer	Mixstab	Rührwerkzeug	Knetwerkzeug	Schlagwerkzeug	(falls spezielle Zusatzg.)				
ZERKLEINERN	Schneiden	●	●	●						◐																						
	Schnitzeln	◐	◐	◐	●	□				◐				◐																□*		
	Raspeln				□	□																									□	
	Reiben				□	●									◐																□	
	Pürieren																														□	
	Strangpressen						●	□																	●	●	●	●*			□	
	Scheren							●																							□	
	Mahlen								●	●																						□
	Zerschlagen										●																					□
	Hacken	◐									●														●	●					□	
	Sägen											●																				□
	TRENNEN	Sieben												●																		□
		Schälen	◐												●	●																□
Passieren																	●														□	
Absetzen																															□	
Filtrieren																	●														□	
Auspressen																		●	●	●	●	●									□	
Zentrifugieren																			●	●	●	●									□	
MISCHEN	Homogenisieren																						●	○	○	○	○	○	○	○	□	
	Mixen																						●	●	○	○	○	○	○	□		
	Vermengen																						●	●	○	○	○	○	○	□		
	Rühren																								●	●	●	●	●	□		
	Kneten																								●	●	●	●	●	□		
	Schaumschlagen																								●	●	●	●	●	□		

und sonstigen Eigenschaftsunterschieden, lediglich eine Verfahrenskomponente von RÜHREN, KNETEN oder SCHAUMSCHLAGEN. Daher zeigt die Übersicht (Tab. 10/2), daß mit Rühr-, Knet- oder Schlagwerkzeugen neben den zugehörigen Verfahren auch noch Homogenisieren möglich ist (O).

Mit MEHRZWECKGERÄTEN, z.B. nach Austausch von Werkzeugen, können - allerdings vielfach mit Kompromissen - mehrere bzw. zusätzliche Verfahren durchgeführt werden (□).

So kann ein Schnitzler mit den entsprechenden Werkzeugen SCHNITZELN, RASPELN und REIBEN, oder ein Wolf dient mit einem speziellen Zusatzgerät auch zum STRANGPRESSEN.

Wichtigstes Beispiel für Mehrzweckgeräte sind Universal-Küchenmaschinen. Die einzelnen Zusatzgeräte arbeiten jedoch durchwegs nach demselben Verfahren des zugehörigen Einzweckgeräts und werden in vorliegender Arbeit nicht weiter berücksichtigt.

2. VERFAHREN UND GERÄTEBEISPIELE

Beschränkt man sich bei der Beschreibung und Untersuchung der Arbeitsverfahren zunächst auf die Wirkstelle, so lassen sich alle Grundverfahren und davon abgeleiteten Varianten auf einige wenige physikalische Grundlagen zurückführen.

Dies hat nicht nur den Vorteil einer besseren Verständlichkeit - schließlich sind solche einfachen Grundgesetze nicht nur allgemein bekannt -, sondern bei dem Wunsche nach einer gezielten Beeinflussung des Arbeitsergebnisses, lassen sich die maßgebenden Verfahrensparameter klar erkennen. Entsprechend dem Thema der vorliegenden Arbeit werden bei einer solchen Betrachtung die physikalischen Zusammenhänge aus dem Teilgebiet der "Technischen Mechanik" den Vorrang besitzen.

Im Anschluß an die Behandlung der physikalischen Grundlagen mit kleinen Zusatzbetrachtungen - oftmals unterstützt durch kleine Nebenrechnungen - werden GERÄTEBEISPIELE kurz vorgestellt. Sie sollen im wesentlichen dazu beitragen, das Verständnis für die jeweiligen Verfahren zu vertiefen.

Aus den erwähnten und didaktischen Gründen werden diese Gerätebeispiele stark vereinfacht dargestellt und beschrieben. In den Grundzügen sind es entweder handelsübliche Geräte oder es werden modifizierte Geräte aus der Synthese heraus entworfen. Durch diese teilweise normative Vorgabe der Geräte - handelsübliche Hausgeräte sind bei weitem nicht ausgereift - sollen die jeweiligen Verfahrens- bzw. deren Arbeitsergebnisse möglichst optimal realisiert bzw. erreicht werden können.

Die umfangreiche und wichtige Problematik der Gebrauchstauglichkeit (35) dieser Geräte wird dabei nur angesprochen, wenn die jeweiligen Kriterien in direktem Zusammenhang zu Verfahren bzw. Arbeitsergebnis oder evtl. Durchsatzleistung stehen.

2.1 ZERKLEINERN

Definition: Mechanische Verfahren zur Erzeugung kleiner Lebensmittelteilchen, die voneinander getrennt oder noch zusammenhängend sind oder zur "Oberflächenvergrößerung"

Das ZERKLEINERN von festen Lebensmitteln geschieht im Sinne vorliegender Arbeit durch mechanische Beanspruchung, wobei der Molekülaufbau des zu zerkleinernden Materials gesprengt wird. Hierzu müssen die molekularen Anziehungskräfte überwunden werden. Die dabei maßgebende molekulare Zerreißfestigkeit σ_{mol} beträgt für ein fehlerfreies ideales Gefüge etwa

$$\sigma_{\text{mol}} \approx 0,1 E , \quad (21.1)$$

wobei E = Elastizitätsmodul des Materials (75).

Da ein reales Materialgefüge aber Fehlstellen (Strukturfehler) besitzt, können hingegen in der praktischen Anwendung mit Zerreifestigkeiten

$$\sigma_{\text{mol}} \approx 1 \cdot 10^{-4} E \text{ bis } 1 \cdot 10^{-3} E \quad (21.2)$$

angenommen werden. Die größeren Werte für σ_{mol} ergeben sich dabei für weniger fehlerhaftes Gefüge bzw. für kleinere Teilchen. In kleineren Partikeln ist zwangsläufig die durchschnittliche Zahl von Fehlstellen geringer.

Aus diesem Grund wachsen die erforderlichen Zerkleinerungskrfte und dementsprechend auch die Zerkleinerungsarbeit mit zunehmender Teilchenfeinheit stark an.

Eine genaue Ermittlung der Zerreißfestigkeit ist nur empirisch möglich. Die Zerkleinerungsarbeit kann auch aus der Zunahme der freien Grenzflächenenergie abgeleitet werden. Die Moleküle an der Oberfläche eines Festkörpers (oder einer Flüssigkeit) besitzen einen Überschuß an potentieller Energie,

weil sie nicht allseitig von Nachbarteilchen umgeben sind. Dieser Energieüberschuß wird als freie Grenzflächenenergie bezeichnet.

Mit W_0 = freie Grenzflächenenergie

O = gesamte Grenzfläche bzw. Oberfläche

ergibt sich die spezifische freie Grenzflächenenergie

$$\sigma_0 = \frac{W_0}{O} \quad , \quad (21.3)$$

(bei Flüssigkeiten auch als Oberflächenspannung bezeichnet) (129). Beim Zerkleinern von Lebensmitteln wird zwangsläufig deren Gesamt-Oberfläche vergrößert. Bereits aus diesem Grunde muß Arbeit aufgewandt werden, um zusätzliche freie Grenzflächenenergie zu schaffen.

Die "Nutzarbeit" der Zerkleinerung berechnet sich zu

$$W_N = \sigma_0 \Delta O \quad , \quad (21.4)$$

wobei σ_0 = spezifische Grenzflächenenergie und

ΔO = zusätzlich geschaffene Oberfläche ist (106).

Die tatsächlich erforderliche Zerkleinerungsarbeit ist die (maschinen-)technische Zerkleinerungsarbeit

$$W_M = W_N + W_F + W_R \quad (21.5)$$

mit W_N = Nutzarbeit

W_F = Formänderungsarbeit

W_R = Reibungsverluste im System.

Damit läßt sich für die Zerkleinerung der Wirkungsgrad

$$\eta = \frac{W_N}{W_M} \quad (21.6)$$

angeben. Er ist meist äußerst niedrig (z.B. 0,001), da die Formänderungsarbeit und auch die Reibungsverluste sehr große Werte annehmen können. Diese Verluste steigen mit zunehmender Teilchenfeinheit stark an. Damit erhöht sich nicht nur die erforderliche Antriebsleistung der Maschine, sondern auch die Reibungsarbeit und diese wiederum erhöht in entsprechendem Maße die Temperatur des Lebensmittels. Als Folge davon sind möglich:

- Austrocknen des Lebensmittels (z.B. Wasserverlust)
- Schmelzen von Fett (z.B. Ausölen von Nüssen)
- Entweichen flüchtiger Bestandteile (z.B. Aromaverlust bei Kaffee)
- Beschleunigen chemischer Reaktionen.

Chemische Reaktionen sind beispielsweise die Oxidation von Vitaminen (A, D, E, Thiamin, Cobalamin, Ascorbinsäure) oder Polyphenolen (enzymatische Bräunung) z.B. bei Obst, wobei die Enzyme Polyphenoloxidasen durch Zutritt von Sauerstoff möglich machen.

Auch das Wachstum von Keimen nimmt zu, da:

- sich, wie beschrieben, die Temperatur erhöht
- vorhandene Keimkolonien zerschlagen werden
- Zellstrukturen zerstört werden, und so die natürliche Schutzwirkung der Zellwände verloren geht
- die vergrößerte Oberfläche intensivere Einwirkung von Gasen oder Flüssigkeiten zuläßt.

Umgekehrt können Mineralstoffe des Lebensmittels verstärkt in Flüssigkeiten übertreten und, falls letztere weggeschüttet werden, mit verloren gehen ("Auslaugen").

Die Tatsache der Oberflächenvergrößerung wird auch zur Definition der Zerkleinerungsverfahren verwendet. Aus dieser Sicht ist es unstrittig, daß beispielsweise die Verfahren Pürrieren und Strangpressen zu den Zerkleinerungsverfahren zählen.

Die geänderte Teilchenfeinheit eines Lebensmittels bei Zerkleinerungsverfahren kann mit dem Zerkleinerungsgrad

$$z = \frac{D_1}{D_2} \quad (21.7)$$

charakterisiert werden. Dabei ist D_1 die Teilchengröße vor und D_2 die Teilchengröße nach dem Zerkleinern. Die Werte D_1 und D_2 können Durchmesser oder andere charakteristische Größen der Stoffteilchen sein. Da die Teilchen meist keine einheitliche Größe besitzen, werden meist statistische Mittelwerte (z.B. aus Häufigkeitsverteilung) verwendet.

Zum Zerkleinern von Lebensmitteln werden im Haushalt verschiedene Beanspruchungsarten eingesetzt. Welche Beanspruchungsart im jeweiligen Anwendungsfall die günstigste ist, hängt unter anderem von Eigenschaften der Lebensmittel ab, wie:

- mechanische Festigkeit
- Konsistenz
- Viskosität
- rheologische Eigenschaften
- Heterogenitätsgrad.

Unter mechanischer Festigkeit sind dabei im weitesten Sinne die Gesamtheit derjenigen Eigenschaften des Lebensmittels einzuordnen, die seine Fähigkeit kennzeichnen, elastische oder plastische Verformungen aufzunehmen oder auch unter Einwirkung von Kräften zerkleinert zu werden.

Konsistenz und Viskosität sind nicht nur von der Art des Lebensmittels, sondern auch von seiner Temperatur, seinem Wassergehalt und der Vorbehandlung (z.B. Lagerung) abhängig.

Die rheologischen Eigenschaften beschreiben das Fließverhalten eines Lebensmittels, das sich mathematisch in der Beziehung zwischen Schubspannung und dem Geschwindigkeitsgefälle im Lebensmittel ausdrücken läßt (vgl. Abb. 23/16).

Kein Lebensmittel, gleichgültig ob aus pflanzlicher oder tierischer Produktion, ist von Natur aus völlig homogen. Ein unvermeidlicher Heterogenitätsgrad ist auch bei Lebensmittelgemischen anzutreffen und wirkt sich beim Zerkleinern auf den Verfahrensablauf aus.

Hauptsächlich die besprochenen und andere charakteristische Eigenschaften der Lebensmittel sind teilweise auch für die Wahl der Trenn- und Mischverfahren maßgebend.

Die nachfolgend beschriebenen Zerkleinerungsverfahren setzen sich grundsätzlich zusammen aus den sechs Beanspruchungsarten:

- SCHNITT mit einer scharfkantigen, geradlinigen Wirkkante (z.B. Messerschneide) oder mit gekrümmter Wirklinie (z.B. Schneidtasche)
- SCHERUNG zwischen zwei Wirkkanten (z.B. Scherkanten)
- DRUCK zwischen zwei Wirkflächen (z.B. Mahlflächen) oder allseitig im Wirkraum mit Austrittsöffnungen (z.B. Strangpreß-Matrizen)
- SCHLAG von einer Wirkfläche oder Wirkkante (z.B. Schlagmesser)
- PRALL an eine Wirkfläche (z.B. Wand einer Schlagmühle) oder an benachbarten Lebensmittelteilchen
- REIBUNG an einer Wirkfläche (z.B. Reibbelag) oder an benachbarte Lebensmittelteilchen.

Damit läßt sich jedes Zerkleinerungsverfahren des Haushalts einer maßgebenden Beanspruchungsart zuordnen (Tab. 21/1).

Tab. 21/1: Die wichtigsten mechanischen Zerkleinerungsverfahren des Haushalts mit einem Lebensmittelbeispiel und der maßgebenden Beanspruchungsart

Beanspruchungsart	Lebensmittelbeispiel	Zerkleinerungsverfahren
SCHNITT	Brot Gurken Schokolade Fleisch mit Knochen tiefgefrorene Lebensmittel	Schneiden Schnitzeln Raspeln Hacken *1 Sägen *2
SCHERUNG	Fleisch ohne Knochen	Scheren
DRUCK	Getreide Kartoffeln, gekocht Nudelteig	Mahlen Pürieren Strangpressen
SCHLAG und PRALL	Kaffeebohnen	Zerschlagen
REIBUNG	Nüsse	Reiben

Anm.: *1 Hacken kann bei nicht festgehaltenem Lebensmittel auch die Beanspruchungsart SCHLAG und bei Lebensmittel auf fester Unterlage SCHERUNG enthalten.

*2 Sägen kann bei fehlerhafter Werkzeuggeometrie (z.B. abgenutzt) auch die Beanspruchungsart REIBUNG enthalten.

Die Beanspruchungsart SCHNITT ist demnach in den Zerkleinerungsverfahren Schneiden, Schnitzeln, Raspeln sowie teilweise beim Hacken und Sägen zu finden. Sie werden bei weichen, elastischen, zähen, faserigen sowie teilweise bei harten Lebensmitteln angewandt.

Die Beanspruchungsart SCHERUNG hat sich beim Scheren zäher und vor allem faseriger Lebensmittel bewährt.

Mit DRUCK können beim Verfahren Mahlen harte Lebensmittel und beim Pürrieren und Strangpressen auch Lebensmittel mit pastöser Konsistenz zerkleinert werden.

Die Beanspruchungsarten SCHLAG und PRALL werden unter dem Verfahren Zerschlagen vorwiegend bei harten, aber unter Hinzunahme der Beanspruchungsart SCHNITT auch bei weichen Lebensmitteln angewandt.

Die Beanspruchungsart REIBUNG ist im speziellen Verfahren Reiben realisiert, aber implizit auch in allen anderen Verfahren enthalten, bei denen feste bis harte Lebensmittelteilchen aneinander oder an anderen Flächen reiben.

Nachfolgend werden die wichtigsten mechanischen Verfahren zum Zerkleinern von Lebensmitteln im Haushalt einzeln beschrieben.

2.1.1 SCHNEIDEN

Definition: Zerkleinern von weichen bis festen Lebensmitteln meist längs gerader Wirklinien in getrennte oder noch zusammenhängende Teile ohne Dickenbegrenzung (Beispiele: Fleisch, Wurst, Käse, Brot, Schweinebratenkruste).

Wegen der fundamentalen Bedeutung des Verfahrens SCHNEIDEN nach der Beanspruchungsart SCHNITT und in abgeleiteten Verfahren wie SCHNITZELN, RASPELN, SCHÄLEN (nach dem Schneidprinzip) und teilweise beim HACKEN und SÄGEN, soll es besonders ausführlich behandelt werden.

FLÄCHENPRESSUNG

Wird eine Messerklinge mit ihrer Schneidkante von der äußeren Kraft F_N auf die Oberfläche eines Lebensmittels gedrückt, so entsteht unmittelbar unter der Kante die Flächenpressung

$$p_A = \frac{F_N}{b \cdot l} , \quad (21.8)$$

wobei F_N = Kraft senkrecht zur Berührfläche

b = Schneidkantenbreite

l = Berührlänge (Abb. 21/1).

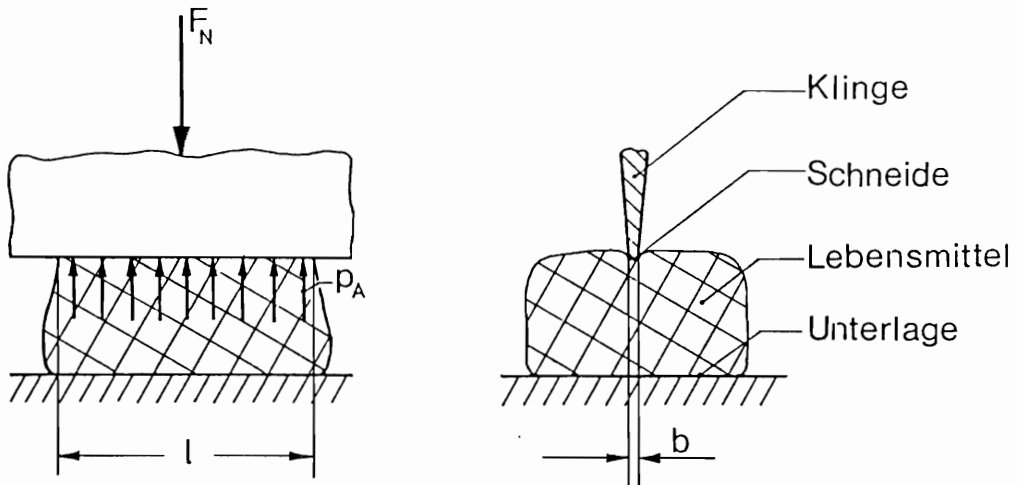


Abb. 21/1: Messerklinge auf Lebensmittel

(Hinweis: nach DIN 1314 wird der Quotient $\frac{F_N}{A}$ als Druck bezeichnet, wobei A = Fläche. Da jedoch in der Norm darauf verwiesen wird, daß sich dies in erster Linie auf den Druck von Flüssigkeiten und Gasen bezieht, soll in dieser Arbeit bei Feststoffen zur Unterscheidung der Begriff Flächenpressung verwendet werden.)

Unter dieser Flächenpressung bildet sich nur in nächster Umgebung des Lebensmittels - auch als Stoff bezeichnet - ein Bereich erhöhter Spannungen aus. Diese führen zu einer elastischen oder plastischen Verformung oder zu einem SCHNITT.

Bei der elastischen Verformung nimmt der Stoff nach der Entlastung seine ursprüngliche Form wieder an, bei der plastischen Verformung hingegen bleibt die Formänderung bestehen (Deformation). Beim SCHNITT, wozu hinreichend große Spannungen im Stoff notwendig sind, können die inneren Kräfte den äußeren nicht mehr standhalten (123). Der Molekülverband wird entgegen seinen Bindungskräften (Kohäsion) aufgesprengt, die Schneidkante dringt in den Stoff ein.

Bei einer scharfen Schneide ist die Breite b der Schneidkante sehr klein, weshalb bereits mit einer mäßig großen Kraft F_N große Flächenpressungen p_A am und große Spannungen im Stoff erzielt werden können (98).

ZUSATZBEWEGUNG

Die Schneidkante ist in Wirklichkeit nicht so glatt, wie dies Abb. 21/1 zeigt. Vielmehr ist die Schneide rauh, besitzt Zähne oder Wellen. Bei geeigneter Vergrößerung können diese sichtbar gemacht werden (Abb. 21/2).

Die tatsächliche Berührfläche zwischen Schneide und Stoff ist damit sehr klein und dementsprechend groß ist die tatsächlich vorhandene Flächenpressung. Wird die Messerklinge

in Längsrichtung zur Schneidkante mit der Geschwindigkeit v relativ zum Lebensmittel bewegt, so "verhaken" sich eventuell vorhandene Lebensmittelfasern in den Zähnen (z.B. bei Fleischfasern).

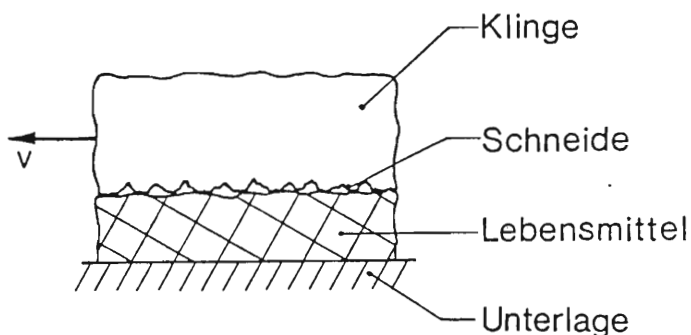


Abb. 21/2: Längsbewegung mit der Geschwindigkeit v einer Messerklinge gegenüber einem Lebensmittel

Während sich im Belastungsfall nach Abb. 21/1 die Molekülverbände in Schneidennähe auf darunterliegende abstützen können, ist dies im Fall nach Abb. 21/2 nur teilweise möglich. Im letzteren werden einzelne Molekülverbände auch tangential zur Stoffoberfläche beansprucht und deshalb von den benachbarten kaum gestützt. Fasern des Lebensmittels, welche quer zur Schneidkante liegen, werden überdehnt, abgerissen oder zumindest geritzt, was den weiteren Schnitt begünstigt.

Diese und andere Effekte lassen sich zusätzlich mit einem Wellen- oder Zahnschliff der Schneide beeinflussen.

REIBUNGSEFFEKTE

Ist die Messerklinge unter elastischer und plastischer Verformung oder durch einen Schnitt in den Stoff eingedrungen, so berühren auch die Seitenflächen der Klinge das Lebensmittel (Abb. 21/3).

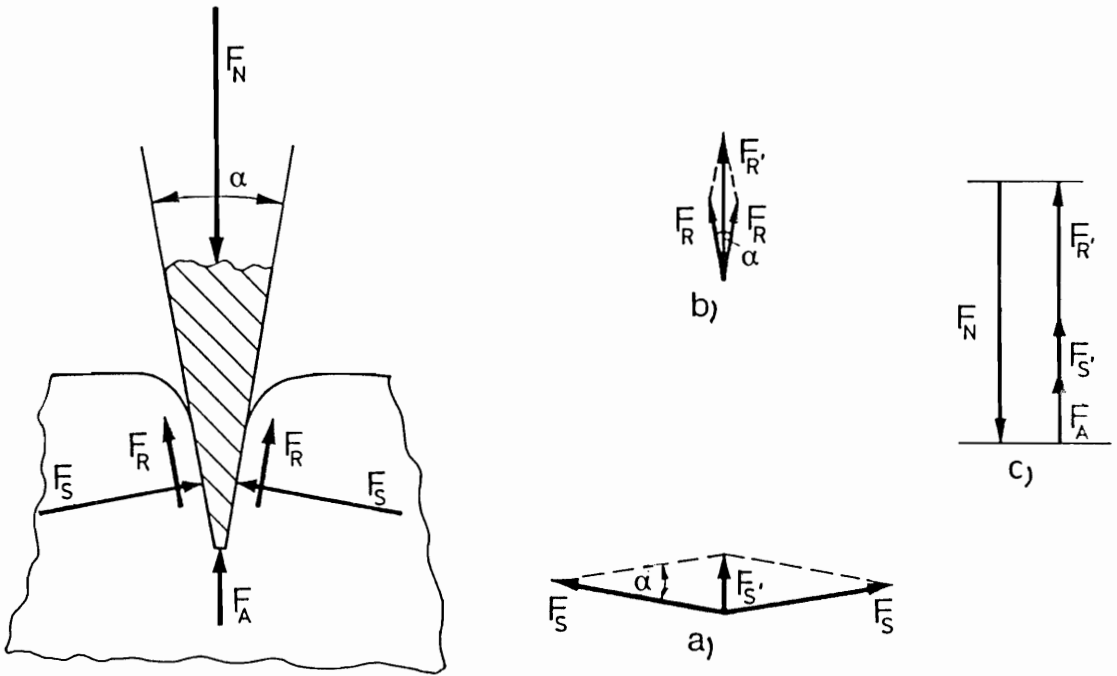


Abb. 21/3: Kräftespiel an einer Messerklinge, die teilweise in das Schneidgut eingedrungen ist;
 a) Kräfteparallelogramm der Seitenkräfte
 b) Kräfteparallelogramm der Reibungskräfte
 c) Kräfteplan der senkrechten Kräfte

Die dabei wirkenden Anpreßkräfte lassen sich ersatzweise mit den Einzelkräften F_S ausdrücken. Nach den Regeln der Vektorrechnung lassen sich die beiden Kräfte F_S zu der gemeinsamen Kraft

$$F_{S'} = 2 F_S \sin \frac{\alpha}{2} \quad (21.9)$$

zusammenfassen (Abb. 21/3, Kräfteparallelogramm a).

Die Wirkung dieser Kraft läßt sich mit dem Effekt vergleichen, bei dem ein feuchter Kirschkern, den man zwischen Daumen und Zeigefinger preßt, bei genügend großem Keilwinkel α ausgeschleudert wird. Dieser Effekt wird in meiner Theorie des Schneidens als "Kirschkerneffekt" bezeichnet.

Beim Eindringen der Klinge in den Stoff in Richtung der Kraft F_N bewirken die seitlichen Anpreßkräfte F_S zusätzlich

die Reibungskräfte

$$F_R = \mu F_S \quad (21.10)$$

Reibungskräfte entstehen immer dann, wenn zwei Berührflächen gegeneinander bewegt werden (Gleitreibung) oder bewegt werden sollen (Haftreibung). Den Zusammenhang zwischen Anpreßkraft und Reibungskraft liefert der Reibungskoeffizient μ (μ ... Gleitreibung, μ_0 ... Haftreibung), der immer nur für eine Materialpaarung, z.B. Klingenfläche auf Schneidgut, definiert ist.

Der Richtungssinn einer Reibungskraft ist immer entgegen der vorhandenen oder angestrebten Relativbewegung. Will z.B. die Messerklinge in Richtung der äußeren Kraft F_N in den Stoff eindringen, so wirken an beiden Klingenseiten die Reibungskräfte F_R dieser Bewegung entgegen.

Diese beiden Reibungskräfte lassen sich zur resultierenden Kraft

$$F_R' = 2 F_R \cos \frac{\alpha}{2} \quad (21.11)$$

zusammenfassen (Abb. 21/3, Kräfteparallelogramm b).

Die äußere Kraft F_N , die aufgewendet werden muß, um eine hinreichend große Flächenpressung p_A bzw. Kraft F_A an der Schneide zu erzielen, erhöht sich wegen der Seitenkräfte (F_S') und der Reibung (F_R'), was die Gleichung

$$F_N = F_A + F_S' + F_R' \quad (21.12)$$

ausdrückt (Abb. 21/3, Kräfteplan c).

Soll die Kraft F_N möglichst klein sein, so müssen bei gegebener Kraft F_A vor allem die Kräfte F_S' und F_R' klein sein. Die Kraft F_S' ist dann klein, wenn der Klingenkantenwinkel α klein ist (Rasierklinge). Bei Einhaltung dieser Forderung besitzt allerdings die Resultierende F_R' der Reibungskräfte ihre volle Größe.

Wird die Klinge nunmehr zusätzlich in Richtung der Schneidkante (Messerlängsrichtung) bewegt - wie dies auch zum Zwecke des leichteren Anschneidens günstig ist - so entstehen günstigere Kräfteverhältnisse.

Wie bereits erwähnt, ergibt sich der Richtungssinn von Reibungskräften immer entgegen der Bewegung. Ist die Geschwindigkeitskomponente in Messerlängsrichtung wesentlich größer als die Einsinkgeschwindigkeit in Richtung der Kraft F_N , so beträgt die Reibungskraft

$$F_R' \approx 2 F_R = 2 \mu F_S , \quad (21.13)$$

wobei ihre Richtung jedoch nahezu senkrecht zur Kraft F_N ist. Damit kann die Reibungskraft F_R' im vertikalen Kräftegleichgewicht (Gleichung 21.12) - entsprechend dem Kräfteplan c (Abb. 21/3) - vernachlässigt werden.

Die äußere Kraft F_N steht - abzüglich der meist kleinen Kraft F_S' (vgl. Kirschkerneffekt) - nahezu mit ihrer vollen Größe an der Schneide zur Erzeugung der erforderlichen Flächenpressung zur Verfügung. Die Reibungskraft F_R' muß allerdings mit einer anderen äußeren Kraft überwunden werden, deren Wirkungslinie jedoch parallel zur Messerlängsrichtung ist.

Wissenschaftliche Grundlagen zum Verfahren Schneiden und zu anderen Zerkleinerungsverfahren wurden insbesondere in der Landtechnik erarbeitet. Wichtigste Anwendungsbeispiele sind die unterschiedlichsten Bauarten von Mähwerken bei der Futter- und Getreideernte (126). Zum Ernten von Zuckerrüben wurden komplizierte Köpforgeane für Rodemaschinen entwickelt, welche die Blätter bzw. den Blätteransatz von der Rübe abtrennen. Forderungen sind dabei saubere, ebene Schnittflächen und exakte Höhenregelung (Mengenverluste) unter Ausnützung der Massenträgheit des Lebensmittels (10).

Bei der klassischen Theorie des Mähens von Halmfrüchten haben sich Ansätze für Kräftespiel und Bewegung der keilförmigen Messerschneiden bewährt, die den Ansätzen vorliegender Habilitationsschrift sehr ähnlich sind (Abb. 21/4).

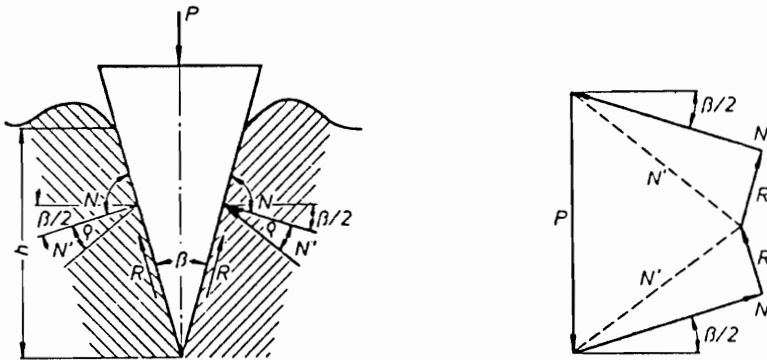


Abb. 21/4: Kräfte und Verformungen beim Schneiden nach KANAFOJSKI (58)

Die dabei verwendeten Gesetzmäßigkeiten und daraus abgeleiteten Folgerungen decken sich weitgehend mit den bisherigen Aussagen (127). Beispielsweise, daß eine geringe Kraft F_N bzw. P einen kleinen Keilwinkel des Messers voraussetzt oder daß aus gleichem Grunde auch die Reibung an den Messer-Seitenflächen klein sein soll. Ebenso daß durch eine Zusatzbewegung der Schneide, auch als "Zügigkeit des Schnittes"

$$\tan \gamma = \frac{v_T}{v_N} \tag{21.14}$$

bezeichnet, (Abb. 21/9) der Schnittwiderstand normal zur Schneide, d.h. in der Geschwindigkeitsrichtung v_N deutlich kleiner ist als ohne Tangentialgeschwindigkeit v_T .

Für das Schneiden von Gemüse wird beispielsweise ein Neigungswinkel $\gamma = 20^\circ$ angegeben und beträgt bei einer Sense etwa 70° .

Die "Zügigkeit des Schnittes" hat, wie beschrieben, noch einen weiteren Effekt durch die mikroskopisch feinen Riefen

und Zacken der Schneidkante, der als "ritzende Wirkung" bezeichnet wird (43). Daher wird die Schneide auch vielfach absichtlich gezahnt ausgebildet, um diese "Feinsägen-Wirkung" zu verstärken.

Der physikalische Hintergrund für die ausschlaggebende Richtungsänderung der Reibungskräfte an den seitlichen Messerfällen wurde jedoch bei dieser Theorie des Mähens nicht explizit berücksichtigt.

GERÄTEBEISPIELE für das Verfahren SCHNEIDEN

Viele der beschriebenen Zusammenhänge können am einfachen KÜCHENMESSER verdeutlicht bzw. ergänzt werden.

Die menschliche Hand leitet Kräfte und Momente in den Griff ein, die sich für theoretische Betrachtungen mit den Einzelkräften F_1 , F_2 und F_3 beschreiben lassen (Abb. 21/5).

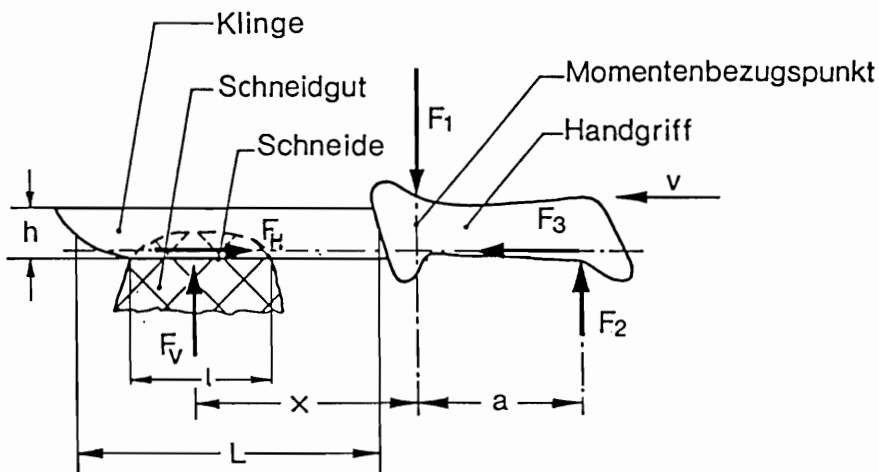


Abb. 21/5: Kräftespiel und Geometrie an einem Küchenmesser (98)

Vom Schneidgut her wirkt an der Schneide die Resultierende F_V , welche sich aus der Flächenpressung und den seitlichen Anpreßkräften zusammensetzt und die Kraft F_H , die sich bei Bewegung der Klinge gegenüber dem Lebensmittel aus Reibungskräften ergibt.

Aus Gleichgewichtsgründen gilt

$$F_3 = F_H \quad . \quad (21.15)$$

Liegen beide Kräfte auf derselben Wirkungslinie, so erzeugen sie auch kein Moment.

Der Kraft F_V vom Schneidgut her kann mit der Handkraft F_1 allein nicht das Gleichgewicht gehalten werden, da die zugehörigen Wirkungslinien den Abstand x besitzen, so daß ein Drehmoment gebildet wird. Um diesem Drehmoment entgegenzuwirken, ist die weitere Handkraft F_2 erforderlich. Mit einem Momentenbezugspunkt auf der Wirkungslinie von F_1 ergibt sich

$$F_V x - F_2 a = 0 \quad , \quad (21.16)$$

und daraus

$$F_2 = F_V \frac{x}{a} \quad . \quad (21.17)$$

Analog ergibt sich

$$F_1 = F_V + F_2 \quad (21.18)$$

bzw. umgeformt

$$F_1 = F_V \frac{x + a}{a} \quad . \quad (21.19)$$

In der Haushaltspraxis wird gewünscht, daß die Handkräfte bzw. -momente, der Arbeitsaufwand und der Zeitaufwand möglichst klein sind.

Die Handkraft F_3 ist dann klein, wenn die seitlichen Anpreßkräfte an der Klinge, die zugehörige Berührfläche und der Reibungsbeiwert zwischen Berührfläche und Lebensmittel klein sind. Für ein gegebenes Lebensmittel wird dies erreicht, wenn der Keilwinkel der Klinge und die Klingenhöhe klein sind, soweit es die Stabilität und Führung des Messers nicht zu sehr beeinträchtigt. Ein kleiner Reibungsbeiwert läßt sich durch Schleifen und Polieren der Klingflächen anstreben, was gleichzeitig auch das Schmutzhaftvermögen verringert.

Die Handkräfte F_1 und F_2 sind dann klein, wenn die Resultierende F_V und die Ausladung x klein sind, der Abstand a jedoch möglichst groß ist (Gl. 21.17 und 21.19). Die Resultierende F_V kann verringert werden, wenn das Messer rasch in Schneidenlängsrichtung bewegt wird (Zusatzbewegung). Eine sehr lange Klinge (Maß L) ermöglicht große Längsgeschwindigkeiten und senkt z.B. den Zeitaufwand beim Schneiden. Eine große Ausladung x bewirkt aber große Handkräfte F_2 und F_1 (Gl. 21.17 und 21.19). Insbesondere bei hartem oder zähem Schneidgut wählt deshalb der Benutzer meist unbewußt die Ausladung x klein und kann so die gesamte Länge der Klinge gar nicht ausnutzen.

Das Griffmaß a ist zunächst von der Griffgestaltung und schließlich von der Hand des Benutzers abhängig (Ergonomie). Feuchtigkeit oder Fettspuren zwischen Hand und der Griffoberfläche senken drastisch den zugehörigen Reibungsbeiwert, weshalb Reibschluß zur Kraftübertragung ungeeignet ist. Vielmehr muß mittels Höcker an den Griffenden Formschluß erreicht werden.

Zwar ist damit die Einleitung einer sehr großen Verschiebekraft F_3 möglich, bei nicht gut festgehaltenem Lebensmittel besteht jedoch die Gefahr, daß dieses auf der Unterlage wegrutscht.

Beim MOTORMESSER werden anstelle einer Messerklinge zwei dicht nebeneinander liegende Klingen mit gleicher Geschwindigkeit, gleicher Frequenz, aber gegensinniger Richtung bewegt (Abb. 21/6).

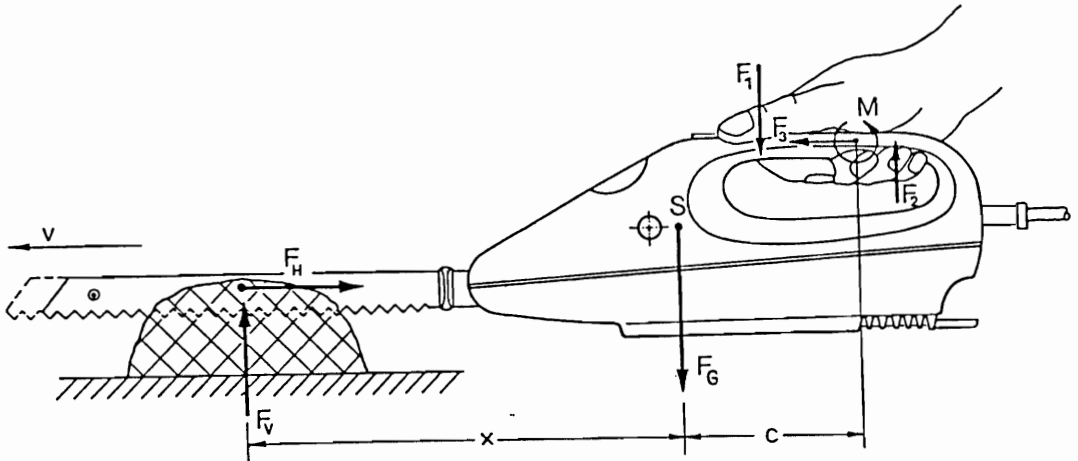


Abb. 21/6: Kräfte spiel an einem Motormesser beim Schneiden eines Lebensmittels

Damit heben sich praktisch alle Kräfte in Klingenlängsrichtung sowohl am Lebensmittel als auch an der menschlichen Hand auf (Abb. 21/7).

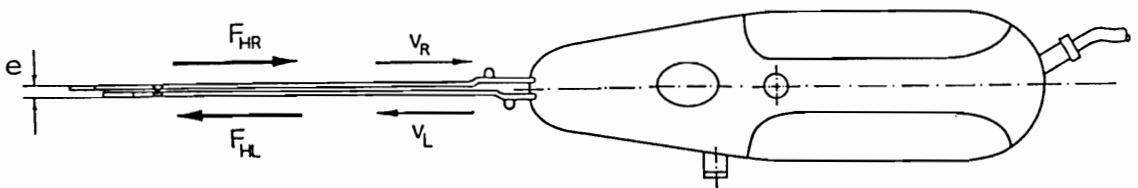


Abb. 21/7: Reibungsverhältnisse an einem Motormesser

Allerdings muß von der Hand das Eigengewicht F_G des Gerätes aufgefangen werden. Liegt der Schwerpunkt S des (gesamten)

Gerätes zwischen dem Lebensmittel und dem Handmittelpunkt M ($c > 0$), so unterstützt das Eigengewicht die Vertikalkraft am Lebensmittel. Befindet sich hingegen der Geräteschwerpunkt S außerhalb der Strecke "Lebensmittel - Handmittelpunkt" im rückwärtigen Gehäusebereich ($c < 0$), so verringert das Eigengewicht F_G die Vertikalkraft F_V am Lebensmittel. Im Sonderfall, daß der Schwerpunkt S genau unterhalb des Handmittelpunktes M liegt ($c = 0$), beeinflusst das Gerätegewicht nicht die Kräfte am Lebensmittel.

Bei der SCHNEIDEMASCHINE wird die hin- und hergehende Bewegung (Zusatzbewegung) des KÜCHENMESSERS oder des MOTORMESSERS durch eine rotierende ersetzt (14). Die dabei entstehenden Reibungskräfte am Messer werden wegen der Rotation in Umfangsrichtung geschwenkt und erfordern ein entsprechendes Antriebsmoment mittels Handkurbel oder Elektromotor. Dabei muß die Umfangsgeschwindigkeit v deutlich größer sein als die Vorschubgeschwindigkeit w , mit der das Lebensmittel gegen die Scheibe bewegt wird. Andernfalls bleiben entgegen der w -Richtung noch merkliche Reibungskräfte übrig, die von der Hand überwunden werden müssen (Abb. 21/8).

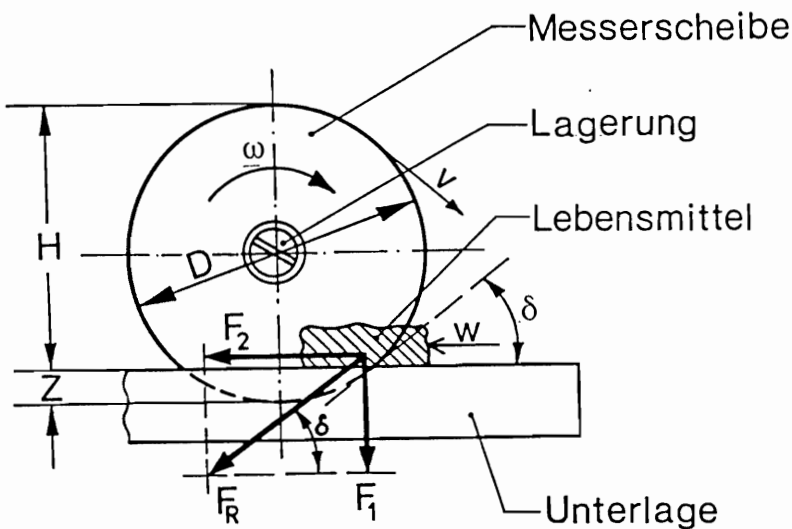


Abb. 21/8: Messerscheibe einer Schneidemaschine beim Zerkleinern eines Lebensmittels (98)

Ist die Umfangsgeschwindigkeit v sehr groß, so erfordert dies eine überflüssig hohe Antriebsleistung, die in Wärme umgewandelt wird. Dies ist auch für das Lebensmittel nachteilig. Beispielsweise bei Fleisch und Wurst schmilzt eingelagertes Fett aus und es können so Geschmacksveränderungen auftreten. Mit Hilfe elektronischer Motorsteuerungen lassen sich die Geschwindigkeiten dem jeweiligen Lebensmittel anpassen (94).

Die Reibungskräfte am Gehäuse können durch die Rotation der Messerscheibe nicht aufgefangen werden, sie müssen ebenfalls von der Handkraft F_N mit überwunden werden. Insbesondere die Kräfte, die vom "Aufkeilen" des Lebensmittels herrühren, können verringert werden, wenn Messerscheibe und Messergehäuse "schlank" sind.

Ein weiteres wichtiges Kriterium bei diesem Schneidverfahren läßt sich aus einem anderen Kräftespiel ableiten (Abb. 21/8). Die Messerscheibe ist in der Unterlage, welche fest oder beweglich sein kann, um das Maß Z versenkt. Die Resultierende F_R der Reibungskräfte, mit denen das rotierende Messer an den Schnittflächen des Lebensmittels angreift, ist näherungsweise tangential, d.h. unter dem Tangentenwinkel δ gerichtet. (Die übrigen Kräfte an der Schneide können bei vorliegender Betrachtung außer acht gelassen werden.) Nach den Regeln der Vektorrechnung läßt sich diese Resultierende F_R in die Komponenten F_1 und F_2 zerlegen. Während F_1 lediglich die Unterlage stärker belastet und so deren Reibungskräfte etwas erhöht, wirkt F_2 in Vorschubrichtung und unterstützt die Handkraft.

Ist F_2 groß, so besteht die Gefahr, daß das Schneidgut - insbesondere bei leichtgängigem Schlitten - mit unerwünscht hoher Vorschubgeschwindigkeit w in das Messer gezogen wird. Dadurch entstehen unsaubere Schnittflächen, und faseriges Schneidgut wird möglicherweise in den schmalen Spalt zwischen Unterlage und Messer gezogen.

Um dies zu vermeiden, muß die Kraft F_2 klein sein, was bei gegebener Kraft F_R mit einem großen Tangentenwinkel δ erreicht werden kann. In der geometrischen Beziehung

$$\cos \delta = \frac{D - 2Z}{D} \quad (21.20)$$

mit D = Durchmesser der Scheibe

Z = Versenktiefe

bedeutet dies, daß $\cos \delta$ klein und bei gegebenem Durchmesser D die Versenktiefe Z groß sein muß. Im Grenzfall $Z = \frac{D}{2}$, d.h. das Messer ist bis zur Hälfte versenkt, gilt $\cos \delta = 0$ und $F_2 \approx 0$.

Diese Forderung wird bei gewerblichen Schneidemaschinen weitgehend erfüllt, bei Maschinen für den Haushalt läßt sie sich nur schwer verwirklichen. Im Haushalt soll mit einer kleinen Messerscheibe eine möglichst maximale Schnitthöhe H erzielt werden. Der Durchmesser D ist nach DIN 1859 derzeit mit 170 mm begrenzt (15). Eine große Versenktiefe Z verringert aber wegen

$$H = D - Z \quad (21.21)$$

diese maximale Schnitthöhe erheblich.

2.1.2 SCHNITZELN

Definition: Zerkleinern von weichen bis festen Lebensmitteln in Scheiben oder Teile vorgegebener Dicke (Beispiele: Gurken, Möhren, Äpfel).

Beim Verfahren SCHNITZELN ist im Gegensatz zum SCHNEIDEN immer ein Dickenanschlag vorhanden, der meist mit der Schneide fest verbunden ist. Weiterhin ist die für das SCHNEIDEN typische Zusatzbewegung nur noch bedingt möglich, aber keinesfalls frei wählbar. Beide Verfahren besitzen die Beanspruchungsart SCHNITT.

Das in der Praxis als Hobeln bezeichnete Zerkleinerungsverfahren besitzt dieselbe physikalische Wirkungsweise wie das SCHNITZELN (74). Der Unterschied Lebensmittel in Ruhe und Schneide bewegt gegenüber Lebensmittel bewegt und ruhende Schneide (z.B. Krauthobel) ist unerheblich, da es nur auf die Relativbewegung ankommt.

Beim SCHNITZELN liegt parallel zur Messerklinge ein Anschlag, dessen Abstand zur Schneide i.a. fest vorgegeben ist. In der Praxis muß dieser Abstand s hinreichend groß sein ($s \geq 2 \text{ mm}$), wenn - insbesondere bei weichen Lebensmitteln - ganze Scheiben bzw. Teile abgeschnitten werden sollen (Abb. 21/9).

Wird die Schneidkante mit genügend großer Kraft an das Lebensmittel gedrückt, so wird - wie im Verfahren SCHNEIDEN beschrieben - durch die große Flächenpressung der Molekülverband des Lebensmittels aufgesprengt und die Schneide dringt ein. Damit entsteht zwischen Schneide und Lebensmittel eine Relativbewegung mit der Geschwindigkeit v .

Bei schräger Schneide, d.h. die Schneidkante ist unter dem Winkel γ gegen die Normale (Senkrechte) zur Bewegungsrichtung

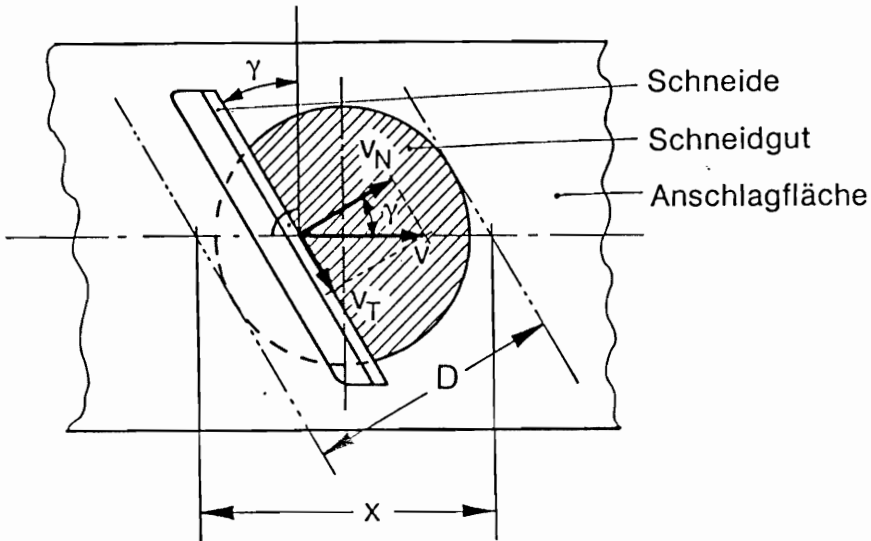


Abb. 21/9: Geschwindigkeiten v , v_N und v_T an der Schneide eines Schnitzlers

tung geneigt, läßt sich die Relativgeschwindigkeit in die Komponenten v_N und v_T zerlegen. Die Komponente v_N besitzt die gleiche Richtung wie die Druckkraft (Schneide auf Schneidgut), welche die erforderliche Flächenpressung erzeugt. Die Komponente

$$v_N = v \cos \gamma \quad (21.22)$$

ist somit kleiner als die vorgegebene Relativgeschwindigkeit v , so daß eine entsprechend längere Zeit benötigt wird, um eine Scheibe vom Schneidgut abzutrennen.

Dieser Sachverhalt läßt sich bei Betrachtung der Wege mathematisch formulieren. Für den Sonderfall einer kreisrunden Scheibe mit dem Durchmesser D beträgt der Weg x , den ein Punkt der Schneide beim vollständigen Abtrennen einer Scheibe zurücklegt

$$x = \frac{D}{\cos \gamma} \quad (21.23)$$

Dieser Weg wird bei sonst gleichen Bedingungen umso größer, je stärker die Schneidkante um den Winkel γ geneigt ist.

Damit verteilt sich auch die Schneidarbeit auf diesen größeren Weg und - insbesondere bei Anordnung mehrerer Messer hintereinander - kann damit erreicht werden, daß die Größe der erforderlichen Antriebskraft weniger schwankt.

Die Geschwindigkeitskomponente v_T , mit der die Klinge in Längsrichtung zur Schneidkante durch das Lebensmittel bewegt wird, errechnet sich zu

$$v_T = v \sin \gamma \quad . \quad (21.24)$$

Diese Bewegung ist vergleichbar mit der "Zusatzbewegung" (Kap. 2.1.1), mit der die Reibungskräfte in eine andere Richtung umgelagert werden, um so das Eindringen der Klinge mit der Geschwindigkeit v_N in das Schneidgut zu erleichtern. Die Gleichungen zeigen aber, daß die Zusatzbewegung v_T immer nur in einem festen Größenverhältnis zur eigentlichen Schneidbewegung v_N stehen kann.

Beim Schneiden von Gras in der Landtechnik konnte experimentell der Einfluß des Schneiden-Neigungswinkels bzw. der daraus resultierenden Zusatzbewegung nachgewiesen werden (13). Bei der Untersuchung der technologischen Eigenschaft "Feuchtigkeitsgehalt" erwies sich der Scharparameter "Neigungswinkel" als sehr bedeutsam (Abb. 21/10).

In der verwendeten Versuchseinrichtung wurde Weidelgras in einem Kanal festgehalten und das Messer mit unterschiedlich großen Neigungswinkeln gegenüber dem Gras bewegt. Diese Anordnung kommt der eines Schnitzlers mit geneigter Schneide sehr nahe (Abb. 21/12). Bei letzterem werden, ähnlich wie das Gras im Schneidkanal eines Häckslers, die Lebensmittelteile in einem Einfüllstutzen festgehalten und das Messer bewegt sich vorbei.

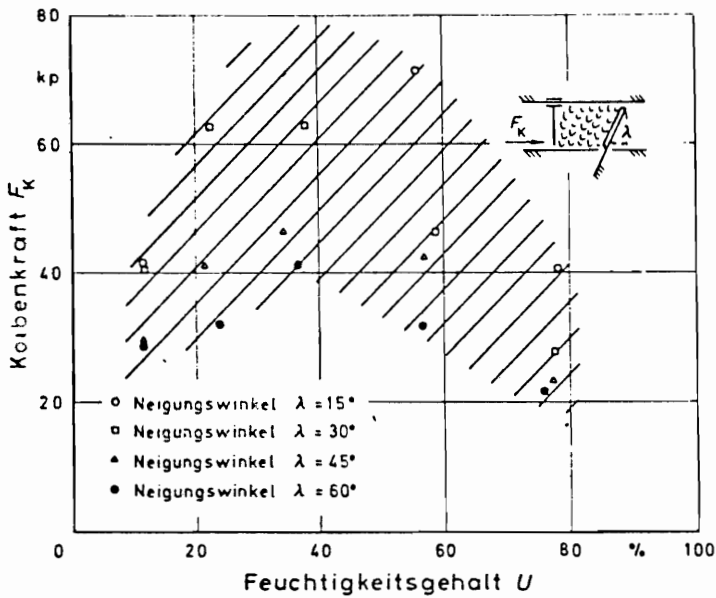


Abb. 21/10: Einfluß des Feuchtigkeitsgehaltes U auf die erforderlichen Schnittkräfte (Kolbenkraft F_K) in einer Kanalschneidvorrichtung bei Weidel^Kgras (Scharparameter Neigungswinkel λ (13)

Ist die Schneide entsprechend geneigt, so setzt die Messerbelastung zunächst nur an einer Stelle der Schneide ein und erfährt dann gleichmäßig ansteigend die gesamte Messerlänge. Dies bewirkt auch einen langsamen Anstieg der Schnittkraft, die zudem deutlich geringer ist als beim Schneiden mit nicht-geneigten Messern.

Im Experiment konnte bereits mit wenigen Messungen diese Tendenz nachgewiesen werden (Abb. 21/11). So verringerte sich beispielsweise die erforderliche Kolbenkraft der Versuchs-Schneidvorrichtung mit zunehmendem Neigungswinkel des Messers auf etwa die Hälfte. Die dargestellten "Sprünge" im Diagramm rühren vermutlich von Einflüssen der Eigenschaften des Grases wie Biegesteifigkeit, Reibungsbeiwert und Feuchtigkeitsgehalt her.

Unter "normalem Schnitt" wird dabei verstanden, daß der Reibungsbeiwert

$$\mu > \frac{F_T}{F_N} \quad (21.25)$$

und beim "ziehenden Schnitt" der Reibungsbeiwert

$$\mu < \frac{F_T}{F_N} \quad (21.26)$$

ist. In der Ausdrucksweise der technischen Mechanik würde dies bedeuten, daß die Resultierende aus Tangentialkraft F_T und Normalkraft F_N einmal innerhalb des sogenannten Reibungskegels (Spitzenwinkel $2\alpha = 2 \arctan \mu$) und im zweiten Fall außerhalb desselben läge.

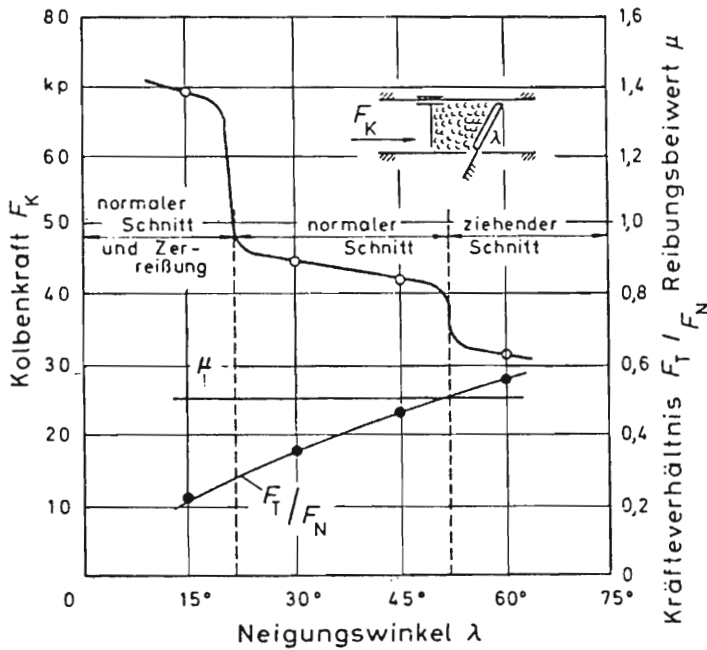


Abb. 21/11: Einfluß des Neigungswinkels λ auf die erforderlichen Schnittkräfte (Kolbenkraft F_K) in einer Kanalschneidvorrichtung bei Weidelgrass (13)

GERÄTEBEISPIELE für das Verfahren SCHNITZELN

Bei einem SCHNITZLER MIT HANDANTRIEB wird unter dem Einfluß von Schwerkraft und der Druckkraft eines Stößels das zu zerkleinernde Lebensmittel im schrägen Einfüllstutzen des Schnitzlers belastet (Abb. 21/12). Dadurch wird das Lebensmittel - nach Abzug verschiedener Reibungskräfte - an die Anschlagfläche der Schnitzelscheibe gedrückt. Rotiert diese, so streicht ihre Fläche am Lebensmittel entlang und die vorstehenden Schneiden dringen bei hinreichend großem Antriebsmoment bzw. großer Flächenpressung in das Lebensmittel ein. Entsprechend dem fest vorgegebenen Maß c , um das die Schneide neben der Anschlagfläche liegt, werden Scheiben mit der maximalen Dicke c abgeschnitten und durch einen Schlitz der Anschlagfläche transportiert. Die maximale Fläche der Lebens-

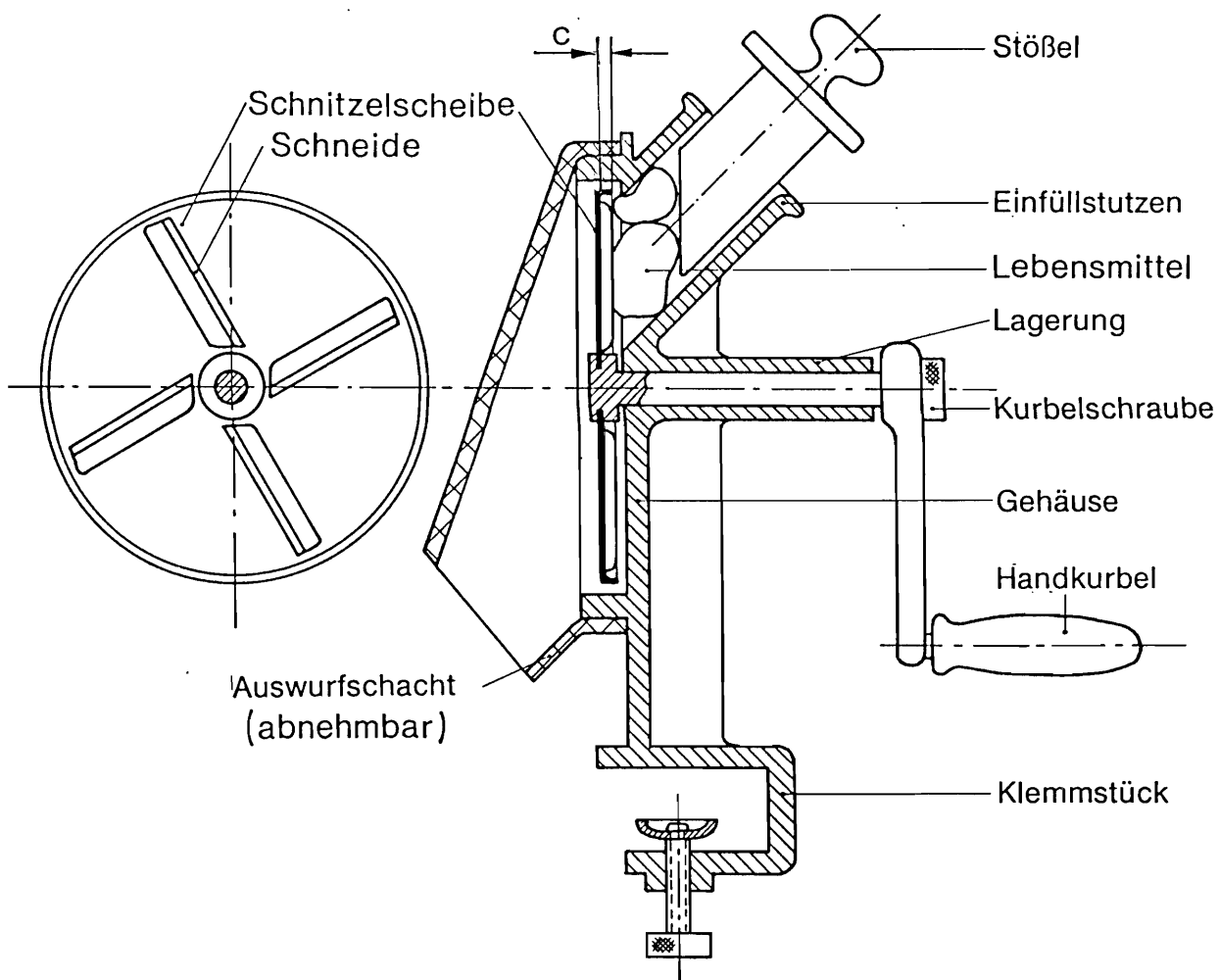


Abb. 21/12: Hand-angetriebener Schnitzler im Einsatz (Vertikalschnitt)

mittelteile wird durch den Querschnitt des Einfüllstutzens, der Länge der Schneide und von der Ausgangsgröße des Lebensmittels begrenzt.

Die Schnitzelscheiben können eben, kugelig-gewölbt oder durch eine Schnitzeltrommel ersetzt sein (Abb. 21/13). Bei gewölbten Werkzeugflächen sind die Stabilitätsprobleme, wie sie bei ebenen Schnitzelscheiben beobachtet wurden, geringer (120). Schnitzler mit Trommeln besitzen einen Aufbau, der dem von Reibern sehr ähnlich ist. Zwar ist die grundsätzliche Wirkungsweise unabhängig von der Form des Schnitzelwerkzeuges, dennoch kann das Arbeitsergebnis unterschiedlich sein.

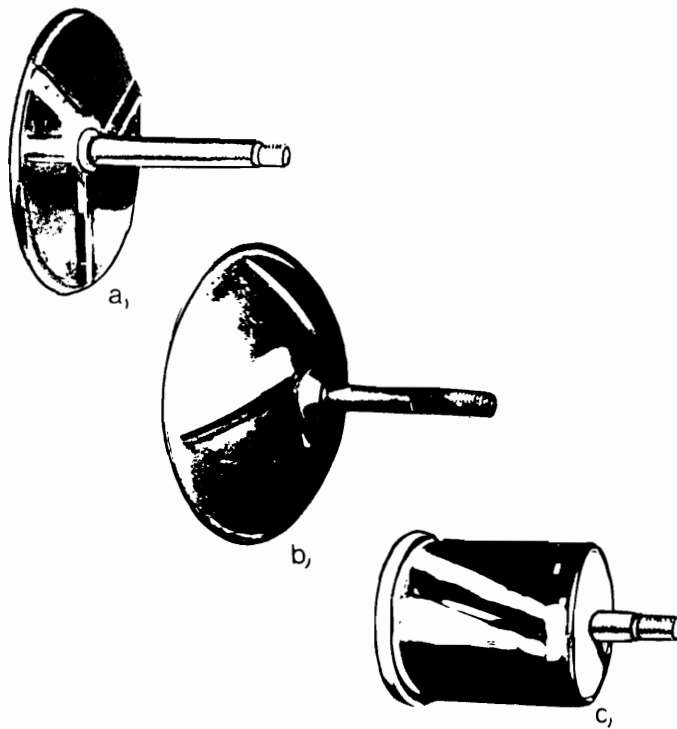


Abb. 21/13: Verschiedene Ausführungsformen von Schnitzelwerkzeugen: a) ebene Schnitzelscheibe, b) kugelig gewölbte Schnitzelscheibe, c) zylindrische Schnitzeltrommel

Bei ebenen Schnitzelwerkzeugen ist die entstehende Lebensmittelscheibe durchwegs eben oder wird es zumindest bei ebener Unterlage.

Bei kugelig-gewölbten Schnitzelwerkzeugen, festen, wenig elastischen Lebensmitteln und großer Dicke c , entstehen Lebensmittelscheiben, die sich nicht eben ablegen lassen. (Kugelförmige Flächen werden als "nicht abwickelbar" bezeichnet.)

Bei zylindrischen Schnitzelwerkzeugen oder auch bei kegeli- gen entstehen bei diesem Verfahren zunächst gewölbte Lebensmittelscheiben, die sich bei weichen und dünnen Lebensmit- teln auch in ebene Scheiben verformen lassen.

SCHNITZLER MIT MOTORANTRIEB (28) haben häufig vertikale oder mit geringem Winkel zur Vertikalen gelagerte Schnitzel- scheiben (Abb. 21/14). Die Zuführung des Lebensmittels und

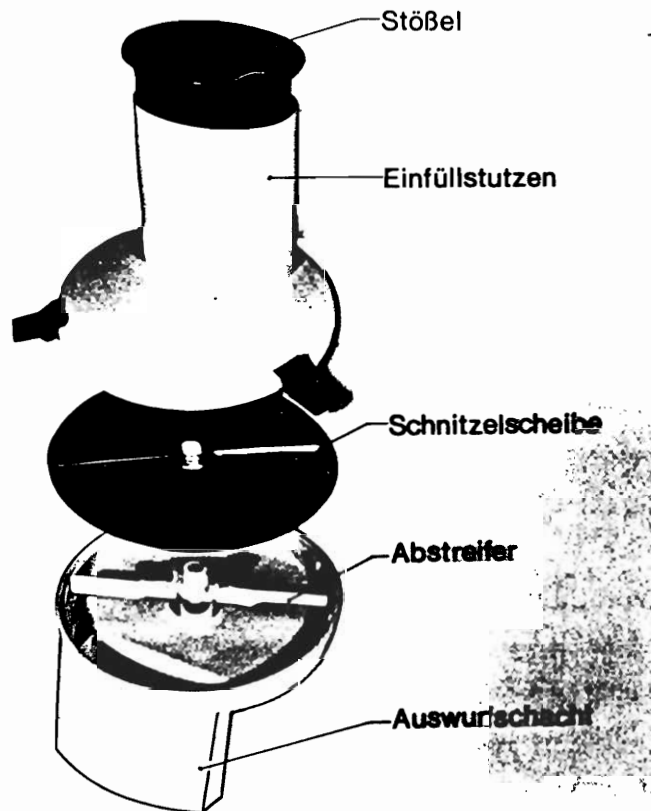


Abb. 21/14: Motor-angetriebener Schnitzler in Explosionsdar- stellung (Handelsbezeichnung: Durchlaufschnitzler)

das Auswerfen der Lebensmittelscheiben ist dabei durchwegs einfacher und problemloser als bei horizontaler Lagerung (Durchlaufschneider). Die Verstopfungsgefahr läßt sich verringern, wenn mit der Scheibe gleichzeitig ein Abstreifer rotiert.

Im Experiment hat sich gezeigt, daß motor-angetriebene SCHNITZLER zwar eine deutlich größere Durchsatzleistung als hand-angetriebene besitzen, daß aber bei einigen Lebensmitteln Probleme wegen der Reibungswärme auftreten können. Im untersuchten Fall eines FOOD-PROCESSORS rotierte die Schnitzelscheibe mit der Drehfrequenz

$$n \approx 1400 \frac{1}{\text{min}} ,$$

Vorgegeben durch die Lage des Einfüllschachtes beträgt der mittlere Wirkradius

$$r_m = 4,5 \text{ cm},$$

was zu einer mittleren Relativgeschwindigkeit

$$v_m = r_m 2 \pi n \approx 6,6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

führt. Da die ebene Schnitzelscheibe nur eine einseitige Schneide besitzt, reibt das Lebensmittel auf einem sehr langen Umfangsstück auf der Scheibenfläche, die zugleich als Anschlag dient.

Bei Lebensmitteln, die stark fettend, schmelzend oder klebend sind, konnten daher nur mangelhafte Arbeitsergebnisse erzielt werden (Tab. 21/2). Die Beurteilung erfolgte dabei im Hinblick auf die Eignung des Zerkleinerungsproduktes zur vorrangigen Weiterverwendung im Haushalt. Neben der sehr unterschiedlichen Geometrie (Form), z.B. Dicke der Lebensmittel-Teilchen und einem Verschmieren der Schnitzelscheibe, wurden auch Geschmacksveränderungen am Lebensmittel festgestellt. Bei Lebensmitteln hingegen, die im Ausgangszustand feste und be-

ständige Konsistenz besitzen, vor allem dann, wenn genügend Flüssigkeit zur Kühlung vorhanden ist, wären die Ergebnisse gut.

Eine Verfahrensverbesserung läßt sich auch bei den erstgenannten Lebensmitteln (Schinken, Schweinefleisch, Käse) erzielen, wenn man diese möglichst kalt, z.B. unmittelbar aus dem Kühlschrank, einbringt. Damit ergibt sich einerseits zumindest anfänglich eine härtere Konsistenz, andererseits kann die Reibungswärme teilweise kompensiert werden.

Tab.21/2: Arbeitsergebnis bei verschiedenen Lebensmitteln im Hinblick auf deren Weiterverwendung nach Bearbeitung mit der SCHNITZELSCHNEIBE des Food-Processors (Grobklassifikation nach Karlsruher Bewertungsschema: + ... sehr gut bis gut, o ... befriedigend bis ausreichend, - ... mangelhaft bis schlecht)

LEBENSMITTEL	Ergebnis	LEBENSMITTEL	Ergebnis
<u>GEMÜSE</u>		<u>FLEISCH</u>	
Gurken	+	Schinken, roh	-
Zwiebeln	+	Schinken, gekocht	-
Tomaten	o	Schweinefleisch	o
Möhren	+		
Kartoffeln, roh	+	<u>SONSTIGE LM</u>	
Kartoffeln, gekocht	o	Hartkäse	-
Weißkraut	+	Brot, getrocknet	o
Paprika	+	Nüsse	o
Zucchini	+	Mandeln	o
<u>OBST</u>		Schokolade	-
Äpfel	+		
Bananen	o		
Birnen	+		

2.1.3 RASPELN

Definition: Zerkleinern von festen bis harten Lebensmitteln in Streifen oder Teile vorgegebener Querschnittsfläche (Beispiele: Sellerie, Rote Beete, Nüsse, Schokolade).

Während beim Verfahren SCHNITZELN lediglich die Dicke der abgetrennten Stoffscheibe festgelegt werden kann - die anderen Abmessungen Länge und Breite bzw. Durchmesser sind durch das eingebrachte Lebensmittel vorgegeben - werden beim RASPELN mindestens zwei Abmessungen bzw. die Querschnittsfläche des zerkleinerten Teilchens festgelegt. Die Möglichkeit einer "Zusatzbewegung" wie beim SCHNEIDEN ist beim RASPELN noch stärker als beim SCHNITZELN eingeschränkt.

Beim RASPELN wird eine scharfe Schneidtasche gegen das Lebensmittel gedrückt und falls die entstehende Flächenpressung hinreichend groß ist, dringt die Schneidtasche ein. Damit liegt die Beanspruchungsart SCHNITT vor. Zwischen Schneide bzw. Trägerfläche mit Anschlag und Lebensmittel herrscht die Relativgeschwindigkeit v . Bei dieser Bewegung wird ein Streifen abgetrennt, der bei hinreichend großer Verformbarkeit des Lebensmittels gebogen wird und durch eine Öffnung der Trägerfläche tritt (Abb. 21/15).

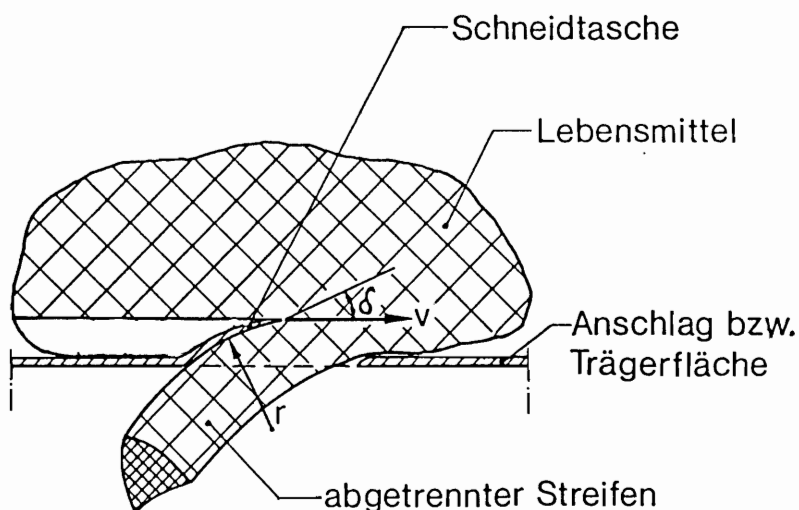


Abb. 21/15: Raspeln eines Lebensmittels

Der Neigungswinkel δ und der Krümmungsradius r der Schneidtasche beeinflussen den Raspelvorgang. Ist der Neigungswinkel δ groß oder der Krümmungsradius r klein, so wird der abgetrennte Streifen stark verformt (Verformungsarbeit). Bei geringer Elastizität bzw. Verformbarkeit des Lebensmittels brechen die abgeraspelten Streifen in kurze Teilstücke. Bei gut verformbaren Lebensmitteln hingegen, entstehen lange Streifen; die maximal mögliche Länge wird durch die Größe des zu bearbeitenden Lebensmittels begrenzt.

Der Querschnitt dieser Streifen wird primär vom Öffnungsquerschnitt der Schneidtasche bestimmt. Bei glatter und eng an den Anschlag anliegender Lebensmitteloberfläche besitzt diese nach dem erstmaligen Überstreichen der Schneidtaschen Rillen (Abb. 21/16a). Bei entsprechendem Versatz des Lebensmittels senkrecht zur Bewegungsrichtung oder bei versetzter bzw. überdeckender Anordnung der Raspeltaschen ist ein weiteres Raspeln möglich.

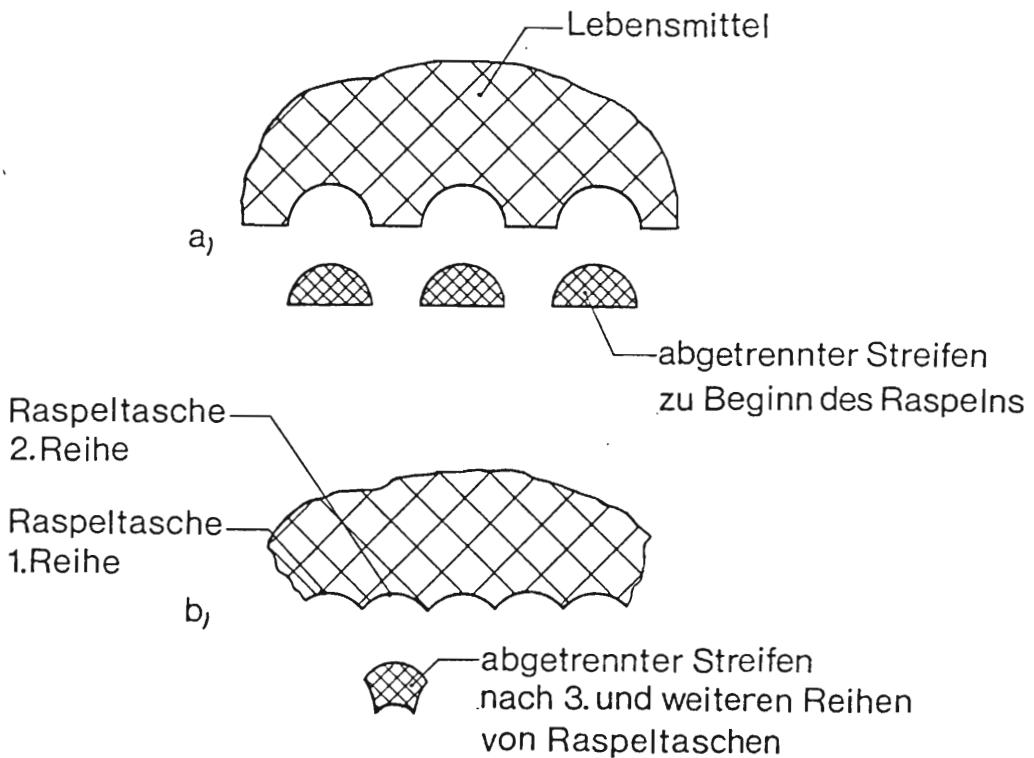


Abb. 21/16: Querschnitte von abgetrennten Lebensmittelstreifen bei erstmaligem Anraspeln a) und bei fortgesetztem Raspeln b)

Während bei erstmaligem Anraspeln des Lebensmittels unter den genannten Vorbedingungen der Querschnitt der Streifen dem der Raspeltasche entspricht (Abb. 21/16a), ist bei fortgesetztem Raspeln der Querschnitt des Streifens kleiner und seine Form anders (Abb. 21/16b).

In Spezialfällen, beispielsweise mit quadratischen Schneidtaschen und entsprechender Anordnung, ist es möglich, Streifen einheitlichen Querschnitts, wie bei Pommes frites üblich, herzustellen (120).

In der Praxis werden sehr unterschiedliche Arten und Formen von Schneidtaschen angewandt. Nur bei Schneidkanten, die zur Bewegungsrichtung schräg angeordnet sind, bilden sich kleine Geschwindigkeitskomponenten aus, die der Zusatzbewegung eines Messers entsprechen und den Raspelvorgang erleichtern können.

GERÄTEBEISPIELE für das Verfahren RASPELN

Bei MOTOR-ANGETRIEBENEN RASPELGERÄTEN ist die wirksame Relativgeschwindigkeit zwischen Schneidkante bzw. Raspeltasche und dem Lebensmittel sehr viel größer als bei hand-angetriebenen. Im erstgenannten Fall ergibt dies zwar große Durchsatzleistungen, bringt aber, ähnlich wie beim SCHNITZELN, Probleme durch Erwärmung mit sich.

In Experimenten mit einem FOOD-PROCESSOR wurde diese Erwärmung zwar nicht direkt gemessen, jedoch wirkte sie sich im Arbeitsergebnis aus (Tab. 21/3). Dabei wurden Form, Konsistenz und Geschmack des Zerkleinerungsprodukts im Hinblick auf die haushaltsübliche Weiterverwendung beurteilt. Die Raspelscheibe des Gerätes, dessen Schnitzelscheibe schon untersucht wurde (vgl. Kap. 2.1.2 SCHNITZELN), rotiert mit der einheitlichen Drehfrequenz

$$n \approx 1400 \frac{1}{\text{min}}$$

Die große Geschwindigkeit verursacht auch erhebliche Schlag- und Prallbeanspruchungen am Lebensmittel, was zu unkontrol-

liertem Zerkleinern bzw. zu Inhomogenitäten und wegen der wachsenden Oberfläche des Lebensmittels zu starkem Flüssigkeitsverlust führt. Auch werden Lebensmittelteilchen von der Scheibe erfaßt und unter der Wirkung der Zentrifugalkräfte nach oben oder an die Gehäuse-Innenflächen geschleudert, wo sie zum Teil haften bleiben.

Insofern erwies sich der Stößel nicht nur aus Sicherheitsgründen als notwendig, sondern auch um den Wirkraum allseitig zu verschließen. Bei einigen Lebensmitteln, z.B. Weißkraut, Brot, ist die Druckkraft des Stößels für das Verfahren notwendig. Bei anderen Lebensmitteln dagegen ist ein solcher Druck zu vermeiden, da dies die Reibungsarbeit an der Schei-

Tab.21/3: Arbeitsergebnis bei verschiedenen Lebensmitteln im Hinblick auf deren Weiterverwendung nach Bearbeitung mit der RASPELSCHEIBE des Food-Processors (Grobklassifikation nach Karlsruher Bewertungsschema: + ... sehr gut bis gut, o ... befriedigend bis ausreichend, - ... mangelhaft bis schlecht)

LEBENSMITTEL	Ergebnis	LEBENSMITTEL	Ergebnis
<u>GEMÜSE</u>		<u>FLEISCH</u>	
Gurken	o	Schinken, roh	-
Zwiebeln	o	Schinken, gekocht	+
Tomaten	-	Schweinefleisch	o
Möhren	o		
Kartoffeln, roh	-	<u>SONSTIGE LM</u>	
Kartoffeln, gekocht	-	Hartkäse	-
Weißkraut	o	Brot, getrocknet	o
Paprika	o	Nüsse	-
Zucchini	o	Mandeln	-
		Schokolade	+
<u>OBST</u>			
Äpfel	o		
Bananen	-		
Birnen	-		

be noch verstärken würde. Durch vorherige Kühlung der Lebensmittel (z.B. Schinken) kann das Arbeitsergebnis verbessert werden.

Faserige Lebensmittel (z.B. Schweinefleisch) oder zähe Lebensmittel (z.B. Käse) verstopfen unter Umständen auch die Raspeltaschen und stören so den Verfahrensablauf.

Bei nachfolgend beschriebenenem Verfahren REIBEN sind die Probleme hinsichtlich unerwünschter Homogenitäten, Erwärmungseffekte und Verstopfung der Werkzeugfläche meist noch größer als bei den bisher beschriebenen Verfahren.

2.1.4 REIBEN

Definition: Zerkleinern von festen bis harten Lebensmitteln in Teilchen begrenzter Korngröße (Beispiele: Kartoffeln, Nüsse, Hartkäse, trockene Semmeln).

Während bei den bisher beschriebenen Zerkleinerungsverfahren bis auf lebensmittelbedingte Abmessungen die Geometrie der bearbeitenden Teilchen sehr genau vorgegeben werden konnte, ist dies beim Verfahren REIBEN nicht mehr möglich.

Beim REIBEN wird das Lebensmittel an eine raue Fläche gedrückt, welche sich gegenüber diesem mit der Relativgeschwindigkeit v bewegt. Damit herrscht die Beanspruchungsart REIBUNG.

Besitzt die Reibfläche scharfkantige Zähne, die z.B. im Profil einem Feilenhieb ähneln, so bildet sich an den Zahnspitzen eine hohe Flächenpressung aus (Abb. 21/17a). Ist letztere hinreichend groß, so werden kleine Stoffteilchen aus dem Molekülverband des Lebensmittels herausgerissen und von der Reibfläche teilweise mitgenommen.

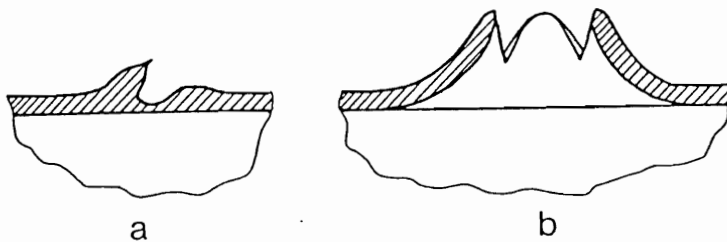


Abb. 21/17: Ausführungsformen der Zähne von Reibflächen:
a) "Feilenhieb", b) Warzenkrone

Besitzt die Reibfläche Warzen mit scharfem Lochrand bzw. Spitzen (Warzenkrone), so entsteht ebenfalls am Lebensmittel eine hohe Flächenpressung, weshalb Teilchen herausgerissen werden (Abb. 21/17b). Die Reibfläche nimmt die Teilchen mit oder sie dringen durch die Öffnungen der Warzen auf die andere Seite der Reibfläche.

Während bei Reibflächen mit Warzen der Richtungssinn der Bewegung beliebig sein kann, gibt es bei Reibflächen mit Zähnen meist nur eine wirksame Bewegungsrichtung. Bei Anordnung weiterer Zähne mit anderem Richtungssinn sind entsprechend mehrere Arbeitsrichtungen möglich.

Die Größe der abgeriebenen Lebensmittelteilchen kann beim Reiben sehr unterschiedlich sein. Das Arbeitsergebnis des Verfahrens wird umso besser eingestuft, je größer der Anteil des Reibgutes mit der gewünschten Korngröße ist. Bei trockenen Lebensmitteln könnte mit dem Verfahren SIEBEN (Kap. 2.2.1), auch in Verbindung mit einer Schüttelmaschine, dieser Korngrößenanteil geprüft werden oder auf diese Weise einheitliche Korngrößen geschaffen werden.

Die maximale Korngröße des Reibgutes ist außer von Stoffeigenschaften vor allem von Höhe und Breite der Zähne bzw. der Warzenkronen abhängig. Bei niedrigen Zähnen oder Warzen (Höhe = 0,4 mm) entsteht beim Reiben weicher Lebensmittel teilweise Mus. Bei stark flüssigkeitshaltigen Lebensmitteln ist dieses Zerkleinerungsverfahren mit großem Flüssigkeitsaustritt (Saft) verbunden. Bei hoher Relativgeschwindigkeit an der Reibfläche und insbesondere bei festen Lebensmitteln sind gerade bei diesem Verfahren örtliche Überhitzungen des Lebensmittels möglich. Letzteres kann bei einigen Lebensmitteln unerwünschte Folgen haben.

GERÄTEBEISPIELE für das Verfahren REIBEN

In ähnlicher Weise wie beim SCHNITZLER wird auch beim REIBER das Lebensmittel im Einfüllstutzen belastet (Abb. 21/18). Es wird durch Reibung geringfügig mitgenommen, bis es an einer Scherkante oder Seitenfläche des Einfüllstutzens Halt findet. Wegen der Relativbewegung und der Kräfte zwischen Trommelfläche und Lebensmittel werden, wie beschrieben,

von den Warzen oder Zähnen der Trommel kleine Teilchen aus dem Lebensmittel herausgerissen.

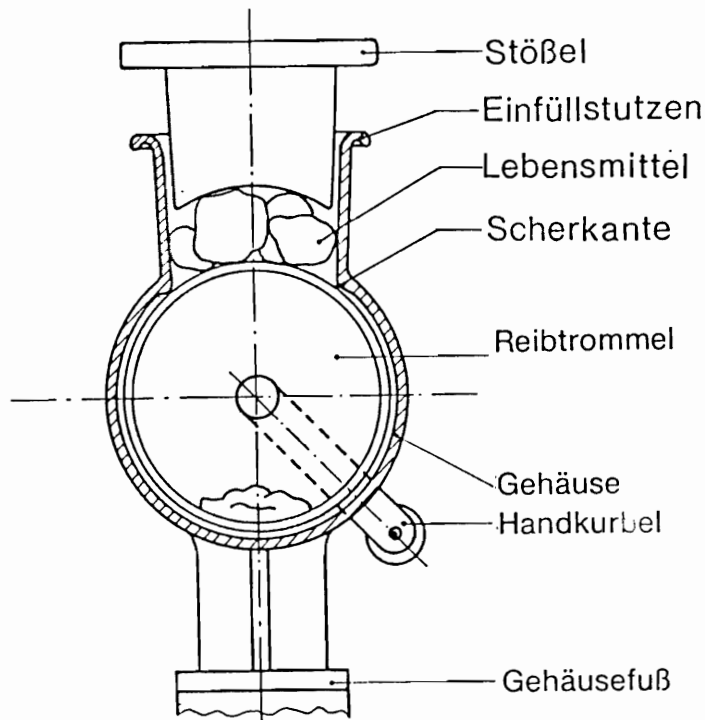


Abb. 21/18: Hand-angetriebener Reiber im Einsatz
(Vertikalschnitt)

Bei gelochter Trommelwand gelangen die Teilchen auch ins Innere der Trommel und fallen nach und nach wegen der Schwerkraft - unterstützt durch die Trommelbewegung - aus der einseitig offenen Trommel bzw. aus dem Gehäuse heraus.

Während bei Maschinen mit Handantrieb eine besonders stabile Befestigung des Gehäuses notwendig ist, um Reaktionskräfte und -momente aufzufangen, sind bei Maschinen mit Motorantrieb besondere Vorkehrungen gegen Unfälle bzw. Verletzungen zu treffen (91) (99).

2.1.5 PÜRIEREN

Definition: Zerkleinern von Lebensmitteln weicher Konsistenz bei gleichzeitigem Kneten und Homogenisieren (Beispiele: Kartoffeln - gekocht, Äpfel - gekocht, Bananen).

Beim Verfahren PÜRIEREN kann - im Gegensatz zu den bisher genannten Verfahren - mit der Werkzeugform das Arbeitsergebnis des bearbeiteten Lebensmittels kaum beeinflußt werden. Von Einfluß sind jedoch die Lebensmitteleigenschaften selbst, die Füllhöhe im Gefäß, die Werkzeugbewegung und die Bearbeitungsdauer.

In einfachster Weise ist das Verfahren mit einem Stempel möglich, dessen Wirkfläche mit der Kraft F und der Geschwindigkeit v in das weiche Lebensmittel eindringt (Abb. 21/19). Dabei entsteht an der unteren Berührfläche A zwischen Pürierstempel und Lebensmittel eine Flächenpressung p_A . Da p_A sicher nicht gleichmäßig groß auf der gesamten Fläche A ist, errechnet sich die Kraft

$$F = \int_A p_A \, dA \quad . \quad (21.27)$$

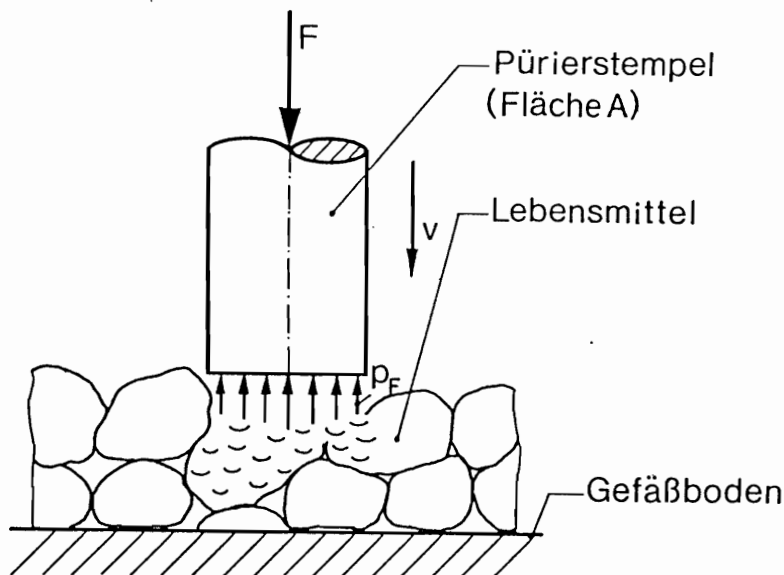


Abb. 21/19: Pürieren eines Lebensmittels mit bewegtem Stempel (Kraft F , Geschwindigkeit v , Flächenpressung p_A)

Bei dieser Beanspruchungsart DRUCK wird ein Spannungszustand im Molekülverband des Lebensmittels hervorgerufen, was dieses verformt und schließlich zu Rissen im Lebensmittel führt. Beim Eindringen des Stempels wird es weiter verformt und fließt quer zur Stempelbewegung und auch seitlich nach oben weg (Verdrängung). Dadurch werden die Lebensmittelteile zerkleinert und gemischt (homogenisiert).

Hat der Pürierstempel den Gefäßboden erreicht, so muß der Stempel wieder angehoben, seitlich versetzt und an einer anderen Stelle wieder in das Lebensmittel gedrückt werden. Dieses Bewegungsspiel wird solange wiederholt, bis der gesamte Gefäßinhalt in gewünschtem Maße zerkleinert, durchgeknetet und homogenisiert ist.

Sind die Haftkräfte zwischen Lebensmittel und Stempel sehr groß, so reicht die Schwerkraft vielfach nicht aus, um bei der Aufwärtsbewegung des Stempels an ihm die Lebensmittelteile abgleiten zu lassen. In diesem Fall sind zusätzliche Abstreifvorrichtungen oder besondere Bewegungscharakteristiken wie Beschleunigung, Vibration oder Taumelbewegung erforderlich.

Die Wirkfläche des Pürierstempels kann auch aus mehreren einzelnen Körpern, Gitterstäben oder aus einem Lochblech bestehen. Damit wird ein Um- bzw. Durchströmen der Lebensmittelteilchen mit erhöhter Geschwindigkeit erreicht, was die Zerkleinerung und das Homogenisieren begünstigt. Da die Relativbewegung zwischen Pürierstempel und Lebensmittel für das Verfahren entscheidend ist, kann auch der Stempel bzw. das Lochblech in Ruhe sein und das Gefäß samt Lebensmittel bewegt werden.

Der Gesamt-Energieaufwand ist beim Pürieren, verglichen mit der tatsächlichen Zerkleinerungsarbeit, relativ hoch. Das ständige Gleiten der Lebensmittelteilchen aufeinander und an den Werkzeugflächen verursacht Reibungskräfte, die multipliziert mit dem Gleitweg eine entsprechende Reibungsarbeit bewirken.

GERÄTEBEISPIELE für das Verfahren PÜRIEREN

Mit einfachen Werkzeugen wie HOLZSTEMPEL mit ebener oder konvexer Stirnfläche lassen sich in einem stabilen Gefäß weiche Lebensmittel in beschriebener Weise zerdrücken bzw. PÜRIEREN. In der Praxis werden auch KÜCHENMASCHINEN, insbesondere handgeführte, mit den Werkzeugen QUIRL oder QUIRLPAAR verwendet. Dabei sind auch bei stillstehendem Antrieb Zerkleinerungsbewegungen ähnlich wie beim einfachen Stempel möglich.

Auch MIXER mit rotierenden Messern werden zum PÜRIEREN eingesetzt. Die vergleichsweise sehr viel größere Werkzeuggeschwindigkeit (Reibungsarbeit) als bei den zuerst genannten Gerätebeispielen führt jedoch - selbst bei gleichem Ausgangsprodukt - zu deutlich anderen Arbeitsergebnissen. Je nach Wassergehalt und Temperatur des eingebrachten Lebensmittels sowie nach Verfahrensdauer ist die Konsistenz des mit dem MIXER erzeugten Pürees eher zähflüssig bis klebrig.

2.1.6 STRANGPRESSEN

Definition: Zerkleinern von Lebensmitteln oder Lebensmittelgemischen pastöser Konsistenz in längliche Teile mit vorgegebenem Querschnitt (Beispiele: Nudelteig, Spritzgebäckteig, Wurstbrät).

Wie beim Verfahren PÜRIEREN werden auch beim STRANGPRESSEN die Lebensmittel in einen Druckzustand gebracht, weshalb die Beanspruchungsart DRUCK vorliegt. Die Lebensmittelteilchen können aber nunmehr nicht unkontrolliert ausweichen. Sie werden nämlich gegen eine Düsen- oder Matrizenöffnung gedrückt (Abb. 21/20). Bei hinreichend großer Druckdifferenz ($p - p_0$) fließt das Lebensmittel durch die Öffnung.

Die zum STRANGPRESSEN geeigneten Lebensmittel müssen eine hinreichend große Viskosität, zumindest nach dem Verlassen der Matrize, aufweisen. Derartige Lebensmittel, wie beispielsweise Teige, besitzen dabei weitgehend die Eigenschaften von Bingham-Pasten (vgl. RÜHREN, Kap. 2.3.4). Die Geschwindigkeit v , mit der der Lebensmittel-Strang aus der Öffnung austritt, kann mit dem Druck p beeinflusst werden, wobei sich wie beim Rühren strukturviskose oder dilatante Eigenschaften des Lebensmittels bei diesem Fließvorgang entsprechend auswirken.

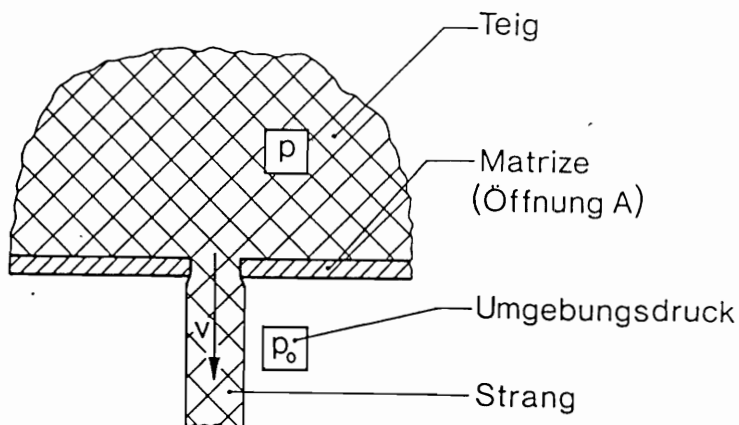


Abb. 21/20: Strangpressen eines Teiges durch eine Matrize

Der Strang besitzt in der Matrizenöffnung exakt den Querschnitt A. Wegen Expansionserscheinungen des komprimierten Lebensmittels sowie zusätzlicher Fließvorgänge an der Matrizenöffnung vergrößert sich i.a. der Strangquerschnitt.

Ist die Matrizenöffnung nicht kreisrund, sondern besitzt sie eckige bzw. andere komplizierte Formen, so treten auch Formveränderungen des Stranges im Vergleich zur Matrize auf.

Aus ähnlichen Gründen oder wegen der Expansion von Gaseinschlüssen kann die Oberfläche des Stranges rissig werden oder sägezahnartig ausfransen. Letzteres wird z.B. von Schwingungen im Lebensmittel an der Matrizenöffnung verursacht, die zu ungleichmäßigen Geschwindigkeiten v führen und vom menschlichen Ohr sogar manchmal als Geräusch wahrgenommen werden können.

Eine unkontrollierte Abweichung des Strangquerschnittes von der Matrizenform oder eine rissige Seitenkontur des Stranges ist für die Haushaltspraxis meist kein Nachteil. Beim Gebrauchtauglichkeitstest von Herden werden jedoch Teigproben benötigt, die auch hinsichtlich ihrer Abmessungen möglichst exakt und reproduzierbar sein sollten.

Dazu wird ein Spritzgebäckteig von definierter Zusammensetzung durch eine Normmatrize (Abb. 21/21) stranggepreßt und auf ein Backblech gelegt (27). Die konkave Form der Matrizenoberseite soll unvermeidbare Deformationen beim STRANGPRESSEN kompensieren, und vor allem das "Aufwölben" des Teigstranges beim Backen begrenzen.

Die maximal mögliche Länge der entstehenden Lebensmittelteile beim STRANGPRESSEN ist abhängig von der Konsistenz des Lebensmittels, von Größe und Form der Matrize und von der Richtung des Strangaustrittes, z.B. ob horizontal oder vertikal (Reißlänge!).

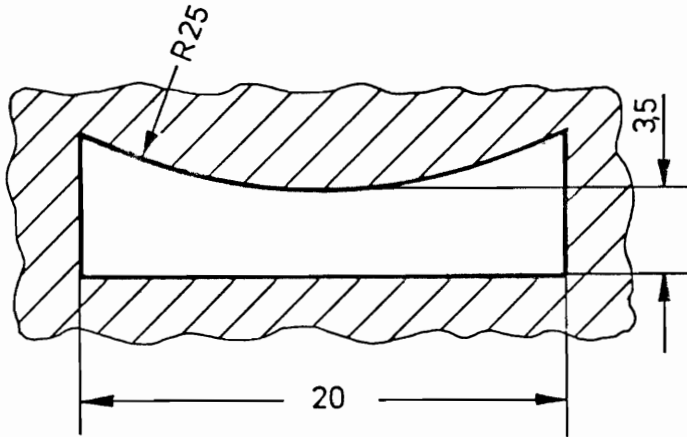


Abb. 21/21: Matrize zum Strangpressen von Test-Spritzgebäck nach DIN 44547, April 1980 (27)

Der Strang kann beim Verlassen der Öffnung in ein Auffanggefäß fließen oder von Hand bzw. mittels Vorrichtung (z.B. Backbrett) abgenommen werden. Bei sehr feuchten oder gut haftenden Lebensmitteln besteht die Gefahr, daß einzelne Stränge zusammenkleben oder mehrere Stränge verklumpen. Mit trockenerer Konsistenz des Teiges - soweit dies möglich ist - durch Bestäuben der austretenden Stränge mit Mehl oder durch Wärmeeinwirkung (Trocknung der Oberfläche) kann diese Gefahr weitgehend vermieden werden.

Zur Erzeugung hohler Stränge wird in die Matrizenöffnung ein entsprechend kleiner Körper eingelassen, dessen Außenquerschnitt dem zu erzeugenden Hohlquerschnitt des Stranges (Hohlprofil) entspricht (Abb. 21/22).

Das unter Druck stehende Lebensmittel umströmt den Zapfenhalter, schließlich den Zapfen selbst und verläßt durch den freien Matrizenquerschnitt den Preßraum.

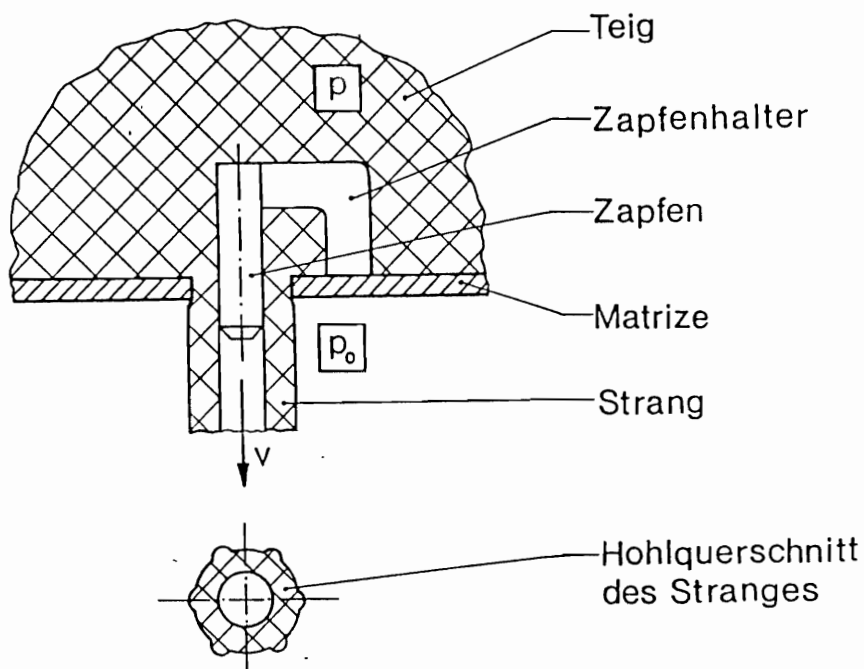


Abb. 21/22: Strangpressen eines Teiges durch eine Matrize mit Zapfen

Nach der Kontinuitätsgleichung muß der Massenstrom \dot{m} im System und so auch in der Matrizenöffnung überall gleich groß sein.

Der Volumenstrom

$$\dot{v} = \frac{\dot{m}}{\varrho}, \quad (21.28)$$

welcher von der Matrize innen (Index i) und beim Verlassen der Matrize außen (Index a) herrscht, ist bei kompressiblen Teigen unterschiedlich. Definiert man die Kompressibilitätszahl

$$\kappa = \frac{\varrho_a}{\varrho_i}, \quad (21.29)$$

wobei ϱ die Dichte des Teiges in den jeweiligen Querschnitten repräsentiert, so ergibt sich im Querschnitt A der Matrize die Austrittsgeschwindigkeit

$$v = \frac{\dot{v}_i}{\kappa A}. \quad (21.30)$$

Um diese Geschwindigkeit zu begrenzen und damit auch an der Matrize die Druckdifferenz

$$p - p_0 = \frac{\zeta_a}{2} v^2 \quad (21.31)$$

klein zu halten, muß bei gegebenem Volumenstrom \dot{V} der Querschnitt A hinreichend groß sein. Beim Strangpressen von Teigprofilen mit kleinen Querschnitten sind daher entsprechend viele Matrizenöffnungen vorzusehen (Abb. 21/25).

Bei mehreren gleichzeitig austretenden Teigsträngen ist allerdings die Gefahr des Verklebens gegeben. Da der größte Teil der Antriebsenergie in Wärme umgewandelt wird, erwärmt sich das Lebensmittel, was einerseits das Fließen begünstigen und andererseits den Trocknungsprozeß beschleunigen kann.

GERÄTEBEISPIELE für das Verfahren STRANGPRESSEN

In ihrer einfachsten Ausführung ist die TEIGWARENPRESSE ein Zusatzgerät zum Wolf. Mit deren Förderschnecke kann bei Teigen niedriger bis mittlerer Viskosität ein hinreichend großer Förderstrom erzeugt werden (Abb. 21/23).

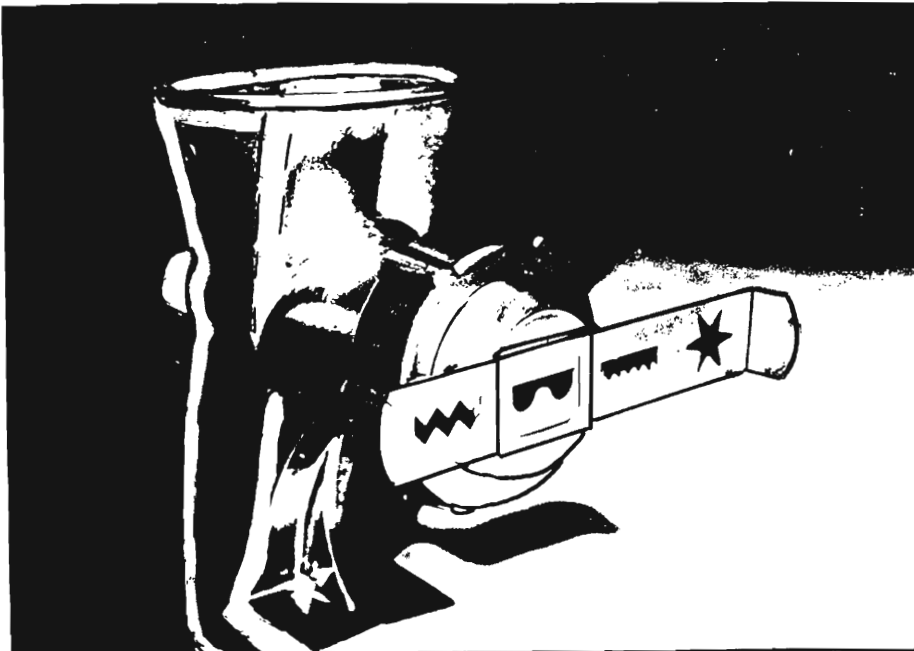


Abb. 21/23: Teigwarenpresse mit verschiebbarem Matrizen-set als Zusatzgerät zum Wolf

Bei hochviskosen Teigen (Knetteige) wird eine Zusatz-Förderschnecke am Wolf befestigt und angetrieben, die den Förderdruck erhöht (Abb. 21/24).

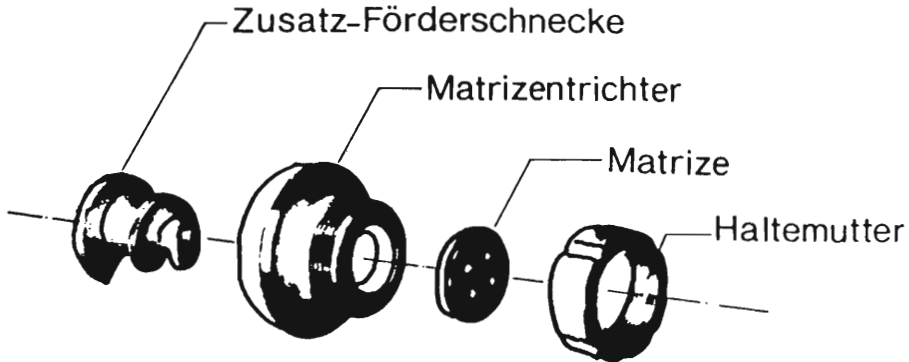


Abb. 21/24: Bauteile einer Teigwarenpresse mit eigener Förderschnecke als Zusatzgerät zum Wolf

Der Förder-Querschnitt zwischen Zusatzschnecke und Matrizen-trichter wird in Richtung zur Matrize hin deutlich kleiner, was zusätzlich drucksteigernd wirkt. Mittels Haltemutter können verschiedene Matrizen am Gerät befestigt werden (Abb. 21/25).

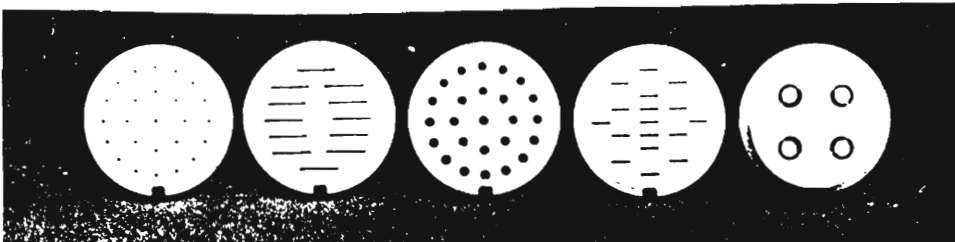


Abb. 21/25: Verschiedene Ausführungsformen von Matrizen einer Teigwarenpresse

Mit dieser Zusatzeinrichtung ist es auch möglich, hohle Stränge (z.B. Makkaroni) zu pressen, bei deren Herstellung große Drücke erforderlich sind (Abb. 21/22).

2.1.7 SCHEREN

Definition: Zerkleinern von weichen, zähen oder faserigen Lebensmitteln in Teilchen begrenzter Querschnittsfläche und vorgegebener Teilchenlänge (Beispiele: Fleisch, Fisch, Innereien).

Beim Verfahren SCHNEIDEN wird das Lebensmittel in irgendeiner Weise festgehalten (z.B. Unterlage, Schlitten, Einfüllschacht), und im Normalfall wirkt nur eine einzige Schneidkante auf das Lebensmittel. Beim SCHEREN - auch Abscheren genannt - wird das Lebensmittel immer zwischen zwei Wirkkanten belastet (Abb. 21/26). Bei hinreichend großer Beanspruchung wird auch hier der Molekülverband des Lebensmittels entgegen seiner Bindungskräfte gesprengt.

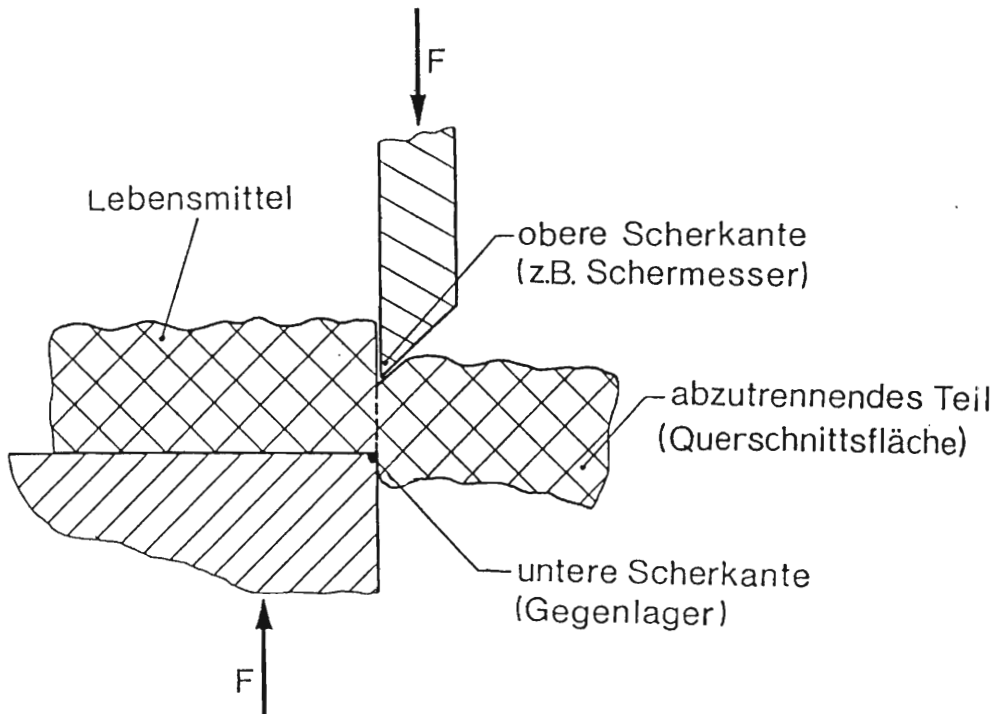


Abb. 21/26: Scheren eines Lebensmittels zwischen zwei Scherkanten

Eine besonders scharfe Schneide, wie sie eine Messerklinge besitzt, ist dabei an den Scherkanten nicht erforderlich, kann jedoch das Abscheren erleichtern.

Werden die Scherkanten mit der Kraft F gegeneinander bewegt, so entsteht in der Querschnittsfläche A des Lebensmittels ein Spannungszustand, der sich physikalisch günstig mit der Schubspannung

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (21.32)$$

ausdrücken läßt.

Für jedes Lebensmittel gibt es obere Grenzwerte für diese Schubspannung. Beim SCHEREN ist es demnach erforderlich, diese Werte zu überschreiten. Erst dann kommt es zum Bruch bzw. zum Ableiten der Lebensmittelflächen im Querschnitt A . Von anderen Autoren wird dieses Verfahren auch als "Scherschnitt" bezeichnet (118).

Lebensmittel sind hinsichtlich ihrer inneren Struktur und Festigkeit sehr heterogen. Oftmals besitzen sie auch faserige Struktur, so daß je nach Belastungsrichtung sehr unterschiedliche Festigkeitswerte auftreten können. Mit dem Verfahren SCHEREN ist ein Zerkleinern von Lebensmitteln auch mit faseriger Struktur zuverlässig möglich.

Bei Scherverfahren mit großem Zerkleinerungsgrad und großer Reibungsarbeit (z.B. stumpfe Werkzeuge) werden Lebensmittel auch erwärmt. Temperaturempfindliche Lebensmittel - z.B. Eiweiß denaturiert bereits ab $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ - oder leicht verderbliche Lebensmittel müssen möglicherweise gekühlt werden (z.B. durch Zumischen von Eisgranulat) (50). Neben der Temperaturerhöhung ist noch unerwünschter Saftverlust bzw. Saftaustritt ein wesentliches Kriterium zur Beurteilung des Arbeitsergebnisses beim SCHEREN.

GERÄTEBEISPIEL zum Verfahren SCHEREN

Beim WOLF - vielfach auch FLEISCHWOLF genannt - wird das zu zerkleinernde Lebensmittel von der Schwerkraft sowie Stößel- oder Handkraft F in einem Einfüllstutzen auf eine rotierende Förderschnecke gedrückt (28). Da die Innenfläche des Gehäuses Längsnuten besitzt, wird ein Mitdrehen des Lebensmittels gemeinsam mit der Förderschnecke verhindert. Die Lebensmittelteile bewegen sich vielmehr parallel zu den Gehäusenuten und treten unter elastischer und plastischer Verformung in die Löcher des Lochbleches ein (Abb. 21/27). Dort werden sie von einem mit der Förderschnecke rotierenden Messer abgeschert und von den nachfolgenden Lebensmittelteilchen durch das Lochblech hindurchgeschoben. Die Schneide des Messers und die jeweilige Lochkante des Bleches bilden demnach die beiden Scherkanten.

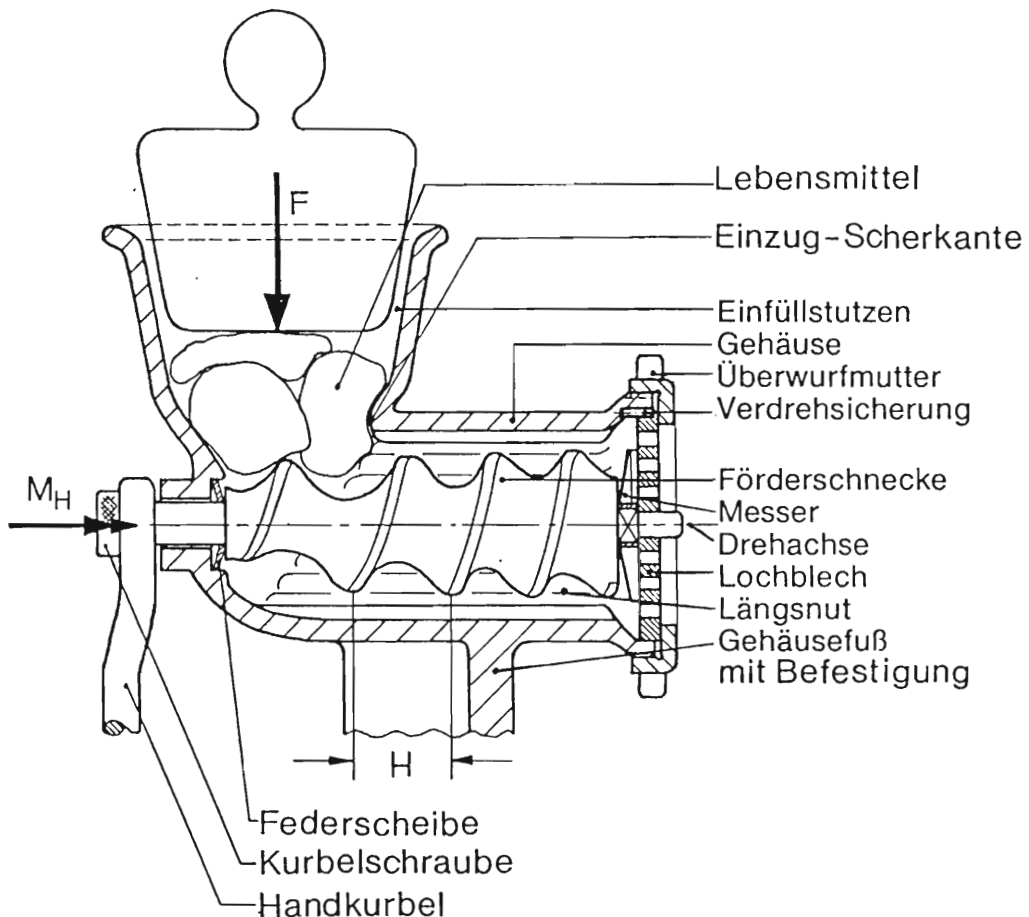


Abb. 21/27: Hand-angetriebener Wolf im Einsatz
(Vertikalschnitt)

Das eine Abschermoment errechnet sich bei homogenem Lebensmittel und einheitlichem Lochdurchmesser im Moment der Betrachtung näherungsweise zu

$$M = \tau A \sum_{i=1}^k R_i \quad , \quad (21.33)$$

wobei τ = Schubspannung im Lebensmittel beim Abscheren

A = Fläche eines Loches

R_i = Abstand des Loches i von der Drehachse

k = Anzahl der momentan am Schervorgang beteiligten Löcher (Abb. 21/28).

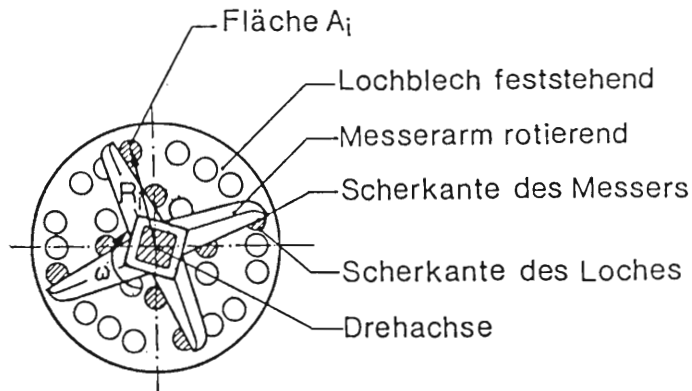


Abb. 21/28: Zerkleinern von Lebensmittel zwischen Messer und Lochblech eines Wolfes

Wird bei einer vollen Umdrehung der Förderschnecke das Lebensmittel-Volumen V_F gegen das Lochblech bewegt und besitzt das Schermesser s Arme, so wird das Volumen

$$V_L = \frac{V_F}{s} \quad (21.34)$$

in die Löcher des Lochbleches gepreßt (Abb. 21/29).

Bei gleichgroßen Löchern (Durchmesser D , Anzahl n) mit der Fläche $A = \frac{D^2 \pi}{4}$ wird dieses näherungsweise um das Maß

$$h = \frac{4 V_F}{\pi n D^2 s} \quad (21.35)$$

in die Löcher gedrückt und in dieser Länge vom Messer abgeschert.

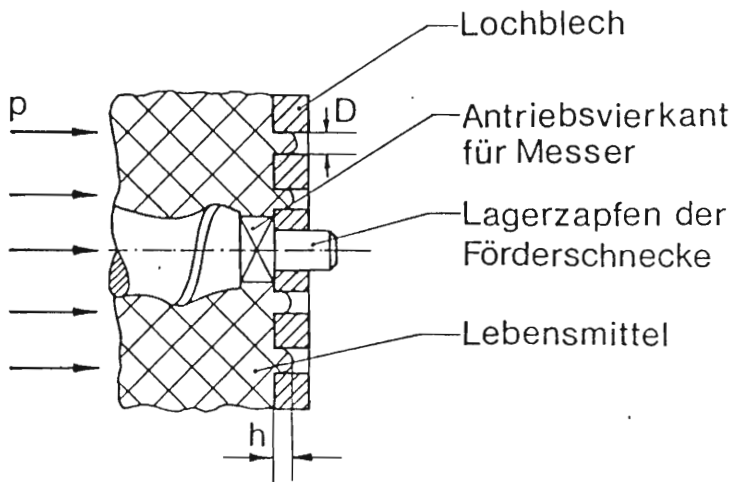


Abb. 21/29: Zur Berechnung der Teilchengröße beim Zerkleinern mit dem Wolf

Bei gegebener Förderschnecke (Fördervolumen V_F) können mit Anzahl s der Messerarme, Durchmesser D der Löcher sowie deren Anzahl n die Form und die Abmessungen der abgescherten Lebensmittelteilchen in weiten Grenzen beeinflusst werden. Wird beispielsweise das vierarmige Messer ($s = 4$) durch ein zweiarmiges ($s = 2$) ersetzt, so verdoppelt sich rein rechnerisch das Maß h und damit die Länge des Lebensmittelteilchens (Gl. 21.35). Entsprechend der unterschiedlichen Aufgabenstellungen bzw. Lebensmitteleigenschaften können bei einem Wolf verschiedene Messer und Lochbleche eingesetzt werden.

Bei GERÄTEN mit Motorantrieb besitzt das Gehäuse meist schraubenförmige Nuten. Damit kann gegenüber Gehäusen mit geraden Nuten die Schnecke mit höherer Drehfrequenz rotieren, das pro Umdrehung transportierte Lebensmittel-Volumen ist kleiner, und die Anzahl der Schervorgänge bei gleichem Messer und Lochblech ist größer oder es genügt z. B. ein kleineres Lochblech.

Ist die Förderschnecke linksgängig geformt (Abb. 21/27), so sind die Nuten im Gehäuse rechtsgängig und zwar sind sie um den Winkel δ gegenüber der Drehachse (windschief) geneigt (Abb. 21/30).

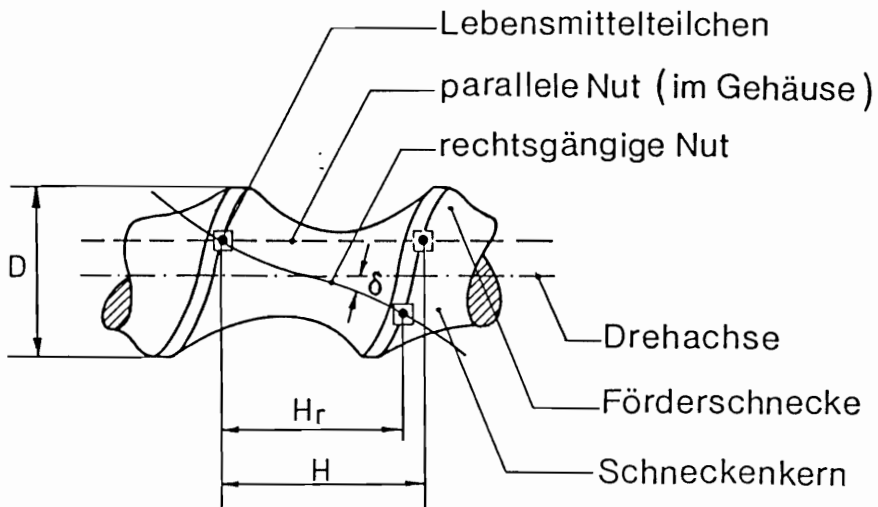


Abb. 21/30: Zur Berechnung der realen Transportstrecke H_r einer Förderschnecke mit der Steigung H und δ einer spiralgig genuteten Gehäuse (δ = Neigungswinkel der Nuten)

Ein Lebensmittelteilchen wird bei einer vollen Umdrehung nicht mehr um die Schneckensteigung H , sondern lediglich um die Strecke $H_r < H$ in Richtung des Lochbleches bewegt. Mit dem Neigungswinkel δ des Gehäuses und dem Durchmesser D der Schnecke errechnet sich die reale Transportstrecke

$$H_r = H \frac{D \pi}{D \pi + H \tan \delta} \quad (21.36)$$

Ist die Steigung H_N der Nut gegeben, die sich auch mit

$$H_N = \frac{D \pi}{\tan \delta} \quad (21.37)$$

angeben läßt, so errechnet sich

$$H_r = H \frac{H_N}{H_N + H} \quad (21.38)$$

Da die reale Transportstrecke H_r kürzer als die Steigung H der Förderschnecke ist, verringern sich auch die Transportvolumina V_F bzw. V_L um den Faktor

$$\frac{H_r}{H} = \frac{H}{H_N + H} \quad (21.39)$$

2.1.8 MAHLEN

Definition: Zerkleinern von harten Lebensmitteln in Teilchen von begrenzter Korngröße (Beispiele: Getreide, Kaffeebohnen, Pfefferkörner, Mohn).

Beim Verfahren MAHLEN sind wie beim SCHEREN mindestens zwei Wirkflächen bzw. -kanten erforderlich, die sich jedoch nicht wie eben beschrieben vollständig begegnen müssen, sondern nur die Beanspruchungsart DRUCK erzeugen.

Wird ein Lebensmittelteilchen weitgehend harter Konsistenz (z.B. Kaffeebohne) zwischen zwei solchen Wirkflächen beansprucht, so verformt sich das Teilchen elastisch und plastisch (Abb. 21/31). Das entstehende Spannungsfeld im Lebensmittel hängt von Materialeigenschaften, Inhomogenitäten und Teilchenform ab. Unterschiedliche Spannungsfelder bewirken unterschiedliche Bruchphänomene und Größenverteilungen der entstehenden Bruchstücke (109).

Im Grenzfall der rein elastischen Verformung ergeben sich beim Bruch geschwungene Bruchbahnen von einem Kontaktbereich bis zu dem gegenüberliegenden (Abb. 21/31).

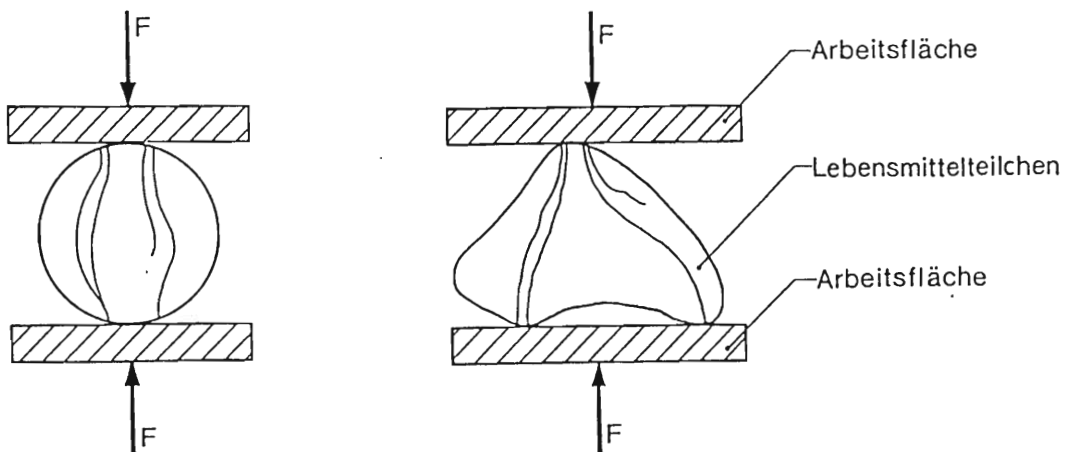


Abb. 21/31: Bruchbahnen bei beginnender, elastischer Verformung von Lebensmittelteilchen zwischen zwei Arbeitsflächen

Der primären Bruchphase folgt eine sekundäre, die auch bei statischer Belastung mit den Kräften F durch dynamische Spannungsfelder bestimmt ist. Denn entlasten primäre Brüche die Druckspannungsgebiete im Kontaktbereich, so werden dort Materialschwingungen angefacht, die auch Zugspannungen und sekundäre Brüche bewirken.

Die Kontaktbereiche im Lebensmittel besitzen vor Bruchbeginn die größte Energiedichte, deren Freisetzung überwiegend Feingut (Mehl) entstehen läßt (Abb. 21/32).

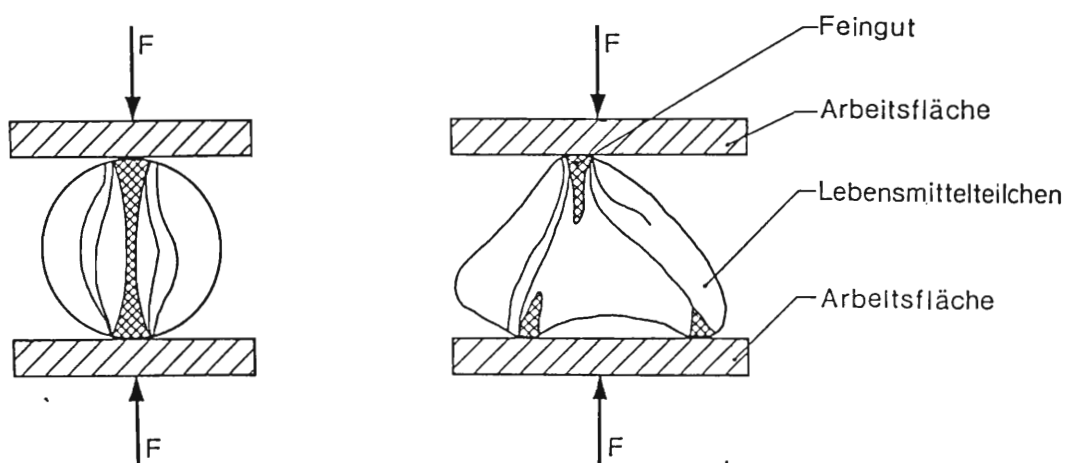


Abb. 21/32: Bruchbahnen und Feingutbereiche bei elastischer Verformung von Lebensmittelteilchen zwischen zwei Arbeitsflächen

Verformt sich ein Lebensmittel überwiegend plastisch, dann wird beim Bruch im Kontaktbereich ein Materialkegel ins Innere des Teilchens geschoben (Abb. 21/33). Zwangsläufig wird dabei das Material im umgebenden Gebiet seitlich nach außen gedrängt. Im äußeren Bereich - insbesondere in Oberflächennähe - entstehen in Tangentialrichtung Zugspannungen, die zu Brüchen und Rissen längs der Meridiane führen. Das Material im Kontaktbereich hingegen wird nicht oder nur geringfügig zerstört. Es entsteht somit bei plastischen Lebensmitteln kein Feingut, wie dies bei elastischen Lebensmitteln festzustellen ist.

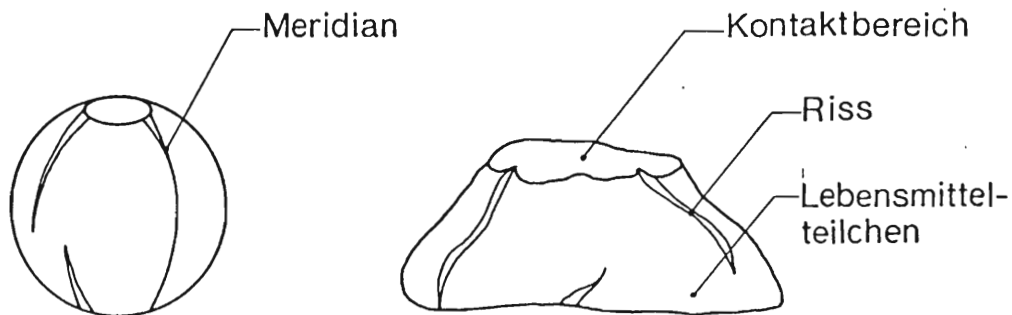


Abb. 21/33: Kontaktflächen und Risse bei plastischer Verformung von Lebensmittelteilchen

Das Verformungsverhalten ist aber keine reine Materialeigenschaft, sondern wird auch von der Lebensmittelltemperatur, Feuchtigkeit, Beanspruchungsgeschwindigkeit sowie Teilchengröße und -form beeinflusst. Je niedriger beispielsweise die Temperatur und je höher die Beanspruchungsgeschwindigkeit sind, umso geringer wird der plastische Anteil - das Material versprödet gewissermaßen. Bei abnehmender Korngröße verstärkt sich jedoch wiederum die Plastizität des Materials. Letzteres erklärt auch die Erhöhung der Zerkleinerungsarbeit bei zunehmender Teilchenfeinheit.

Beim Mahlen entstehen verfahrensbedingt Teilchen von sehr unterschiedlicher Korngröße. Mittels nachgeschalteter Siebe oder Auswurfspalten kann bis zu einem bestimmten Maße eine Einschränkung des Größenspektrums erreicht werden.

Der für das Mahlen erforderliche Spannungszustand im Lebensmittel kann durch Zusammendrücken zweier Mahlflächen (Backenbrecher) oder durch deren gegenseitiges Verschieben ohne Abstandsänderung erzeugt werden (Kegelbrecher, Walzen-, Scheiben-, Reibmühlen). Bei der zuletzt genannten Möglichkeit - welche vorwiegend im Haushalt angewandt wird - nützt man vor allem die unregelmäßige Form der Lebensmittelteilchen (d.h. keine exakte Kugelform) sowie Reibungseffekte.

Liegt ein Lebensmittelteilchen (z.B. Kaffeebohne) in einem vertikalen Kegelspalt zweier Mahlflächen (Backen), die den Keilwinkel γ zueinander besitzen, so ergeben sich bereits aus der Gewichtskraft

$$F_G = m g \quad (21.40)$$

(m = Masse des Teilchens, g = Fallbeschleunigung) die Anpreßkräfte F_N (Abb. 21/34).

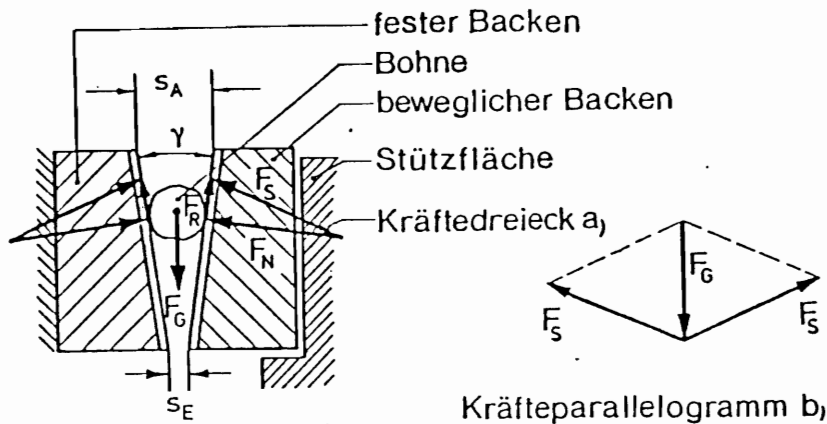


Abb. 21/34: Kräftespiel an einer Kaffeebohne zwischen zwei Mahlbacken (Seitenansicht)

Diese und die Reibungskräfte

$$F_R = \mu F_N \quad , \quad (21.41)$$

wobei μ = Reibungsbeiwert zwischen Teilchen und Backen ist, lassen sich zu den ebenfalls symmetrischen Kräften F_S zusammenfassen (Abb. 21/34, Kräfte-dreieck a). Sind beide Backen unbewegt, so stehen die beiden Kräfte F_S mit der Gewichtskraft F_G des Teilchens im Gleichgewicht (Abb. 21/34, Kräfteparallelogramm b).

Wird der bewegliche Backen mit der Geschwindigkeit v gegenüber dem festen Backen verschoben, so verlagern sich die Wirkungslinien der Reibungskräfte F_R in Richtung des Geschwindigkeitsvektors v (Abb. 21/35).

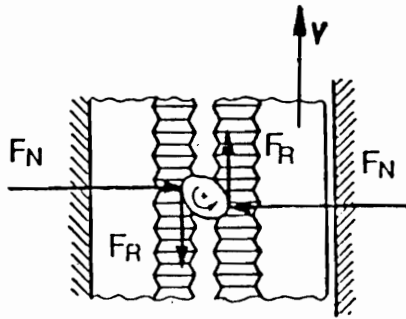


Abb. 21/35: Kräftespiel an einer Kaffeebohne zwischen zwei Mahlbacken (Aufsicht)

Die Reibungskräfte versuchen das Teilchen zu drehen, was bei hinreichend großem Reibungsbeiwert auch gelingt. Die Reibung wird dabei durch die Zahnung der Backen quer zur Bewegungsrichtung unterstützt.

Wird das Teilchen gedreht, so entstehen bei seinem i.a. nicht kreisrunden Querschnitt zusätzliche Anpreßkräfte (Zwangskräfte). Wenn die Backen diesen Kräften standhalten (Stützfläche) und nicht auseinanderweichen, so entstehen im Teilchen sehr große Spannungen, die zu elastischen oder plastischen Verformungen führen. Insbesondere bei harten Lebensmitteln - dies zeigt auch bereits den Anwendungsbereich bzw. die Grenzen des Verfahrens - kommt es zum Bruch, das Teilchen zerspringt.

Zerkleinerte Teile oder deformierte Teile können in den enger werdenden Spalt zwischen den Mahlflächen nachrutschen und der Zerkleinerungsvorgang wiederholt sich. Hinreichend kleine Teile (Feingut) - mindestens eines ihrer Außenmaße muß dabei kleiner als das Spaltmaß s_E sein - können den Wirkraum verlassen.

Das Nachrutschen der Teilchen funktioniert auch bei einem schräg zur Vertikalen liegenden Spalt, sofern die längs des Spaltes wirkende Komponente der Gewichtskraft groß genug ist.

Ist der Keilwinkel γ groß und entstehen beim Mahlvorgang große Anpreßkräfte F_N , so sind deren nach oben gerichtete Kraftkomponenten ebenfalls groß. Die Gewichtskräfte F_G der Lebensmittelteilchen und auch die nunmehr nach unten gerichteten Reibungskräfte F_R können nicht verhindern, daß die Teilchen nach oben ausweichen (Kirschkerneffekt).

Verwendet man anstelle der translatorisch bewegten Mahlflächen rotierende, so kann bei entsprechender Gestaltung erreicht werden, daß auch das Lebensmittel mitrotiert. Die dadurch wirkende Zentrifugalbeschleunigung kann um ein Vielfaches größer sein als die Fallbeschleunigung. Diese Tatsache kann genutzt werden, um die Lebensmittelteilchen hinreichend fest in den Mahlspace zu drücken, und dem "Kirschkerneffekt" entgegenzuwirken.

Eine andere Möglichkeit, das Ausweichen der Stoffteilchen zu verhindern, bietet die Transportschnecke, welche ähnlich wie bei einem Wolf, das zu zerkleinernde Lebensmittel in den Wirkraum drückt.

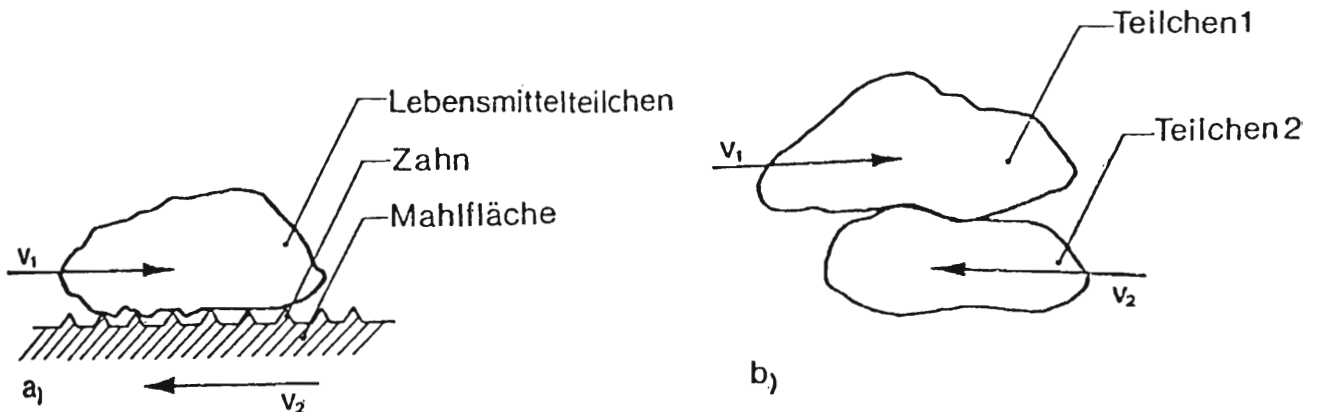


Abb. 21/36: Reibung eines Lebensmittelteilchens an einer Mahlfläche (a) und Reibung von Teilchen aneinander (b)

Bei Teilchen, die zwischen zwei relativ zueinander bewegten Mahlflächen beansprucht werden, treten auch Schubspannungen auf. Deshalb können so beanspruchte Teilchen - abweichend von dem beschriebenen Mahlverfahren - auch durch Abgleiten von Teilchenflächen aufeinander zerkleinert werden (vgl. SCHEREN, Kap. 2.1.7). Weiterhin verhaken sich die Zähne der Mahlbacken in den Teilchen, erzeugen so in der Nähe der Zahnspitzen hohe Flächenpressungen und reißen Stoffteilchen heraus (vgl. Reiben, Kap. 2.1.4). Auch die Teilchen selbst berühren sich, verhaken sich und reiben wegen ihrer unregelmäßig geformten Oberflächen aneinander (Abb. 21/36).

GERÄTEBEISPIELE für das Verfahren MAHLEN

Neuerdings finden GETREIDEMÜHLEN auch in deutschen Haushalten größeres Interesse. Diese Entwicklung erklärt sich aus dem geänderten Ernährungsbewußtsein, nach dem beispielsweise wertvolle Wirkstoffe des Getreides nicht verloren gehen und qualitätsmindernde Oxidationsprozesse im Mehl vermieden werden sollen (111).

Beim Zusatzgerät zur Stand-Küchenmaschine wird die untere Mahlscheibe (Unterläufer) mit niedriger Drehfrequenz angetrieben, wohingegen die obere Mahlscheibe still steht (Abb. 21/37).

Die zu mahlenden Getreidekörner aus dem Vorratsbehälter gleiten unter dem Einfluß der Schwerkraft zur Mitte des Einlauftrichters. Hier werden sie vom Zahnbrecher erfaßt und entsprechend der Steigung der Einziehschnecke nach unten in einen ringförmigen Vorraum transportiert. Dabei wird ein Teil der Körner bereits auf Druck beansprucht, verformt, eventuell bereits gebrochen und schließlich zwischen die Vormahlflächen mit dem Grobverteiler gedrückt.

Diese Transportbewegung wird von der Zentrifugalkraft, die auf alle mitrotierenden Teilchen wirkt, unterstützt. Die harten Korundkörner der gepreßten Mahlsteine nehmen mit ihrer rauhen Oberfläche die Getreidekörner mit. Dabei werden

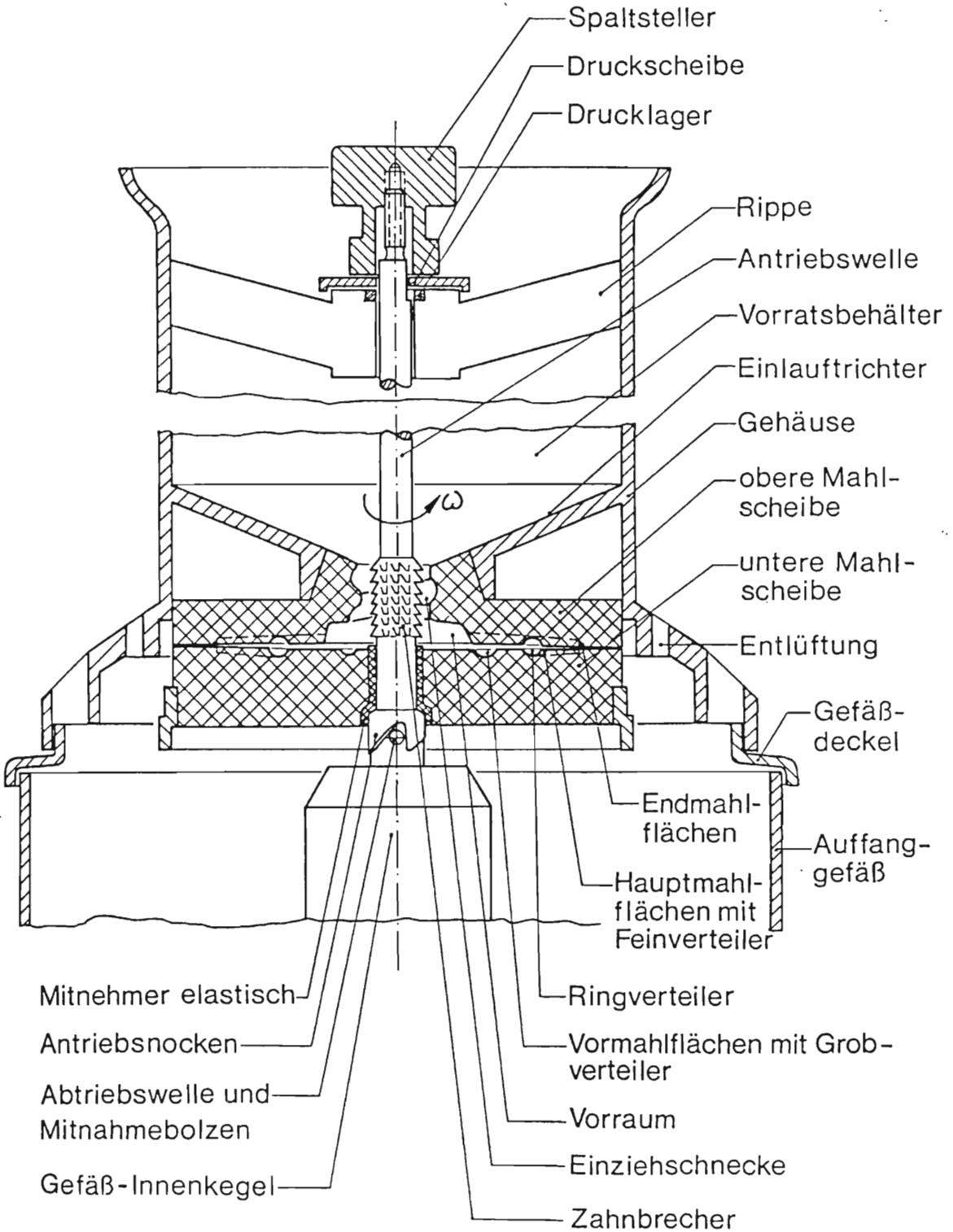


Abb. 21/37: Getreidemühle mit vertikal gelagerten Mahlscheiben für Fremdantrieb z.B. mittels Stand-Küchenmaschine (Vertikalschnitt)

die Körner gedreht, auf Druck beansprucht, verformt und nach dem beschriebenen Verfahren MAHLEN zerkleinert.

Den Wirkraum kann das Mahlgut nur durch den engen Spalt der Endmahlflächen verlassen, in welchem die Teilchen durch Reibung untereinander und Reibung an den Mahlflächen ihren endgültigen Feinheitsgrad erhalten. Letzterer kann mittels Spaltsteller, der den unteren Mahlstein mehr oder weniger stark an den oberen preßt, in einem gewissen Größenbereich beeinflußt werden (möglicher Zerkleinerungsgrad $Z \approx 10$ bis 50 (vgl. Gl. 21.7 Kap. 2.1)).

Wegen der Kompliziertheit der Bruchvorgänge (primäre und sekundäre Bruchphasen) besitzen die austretenden Teilchen noch unterschiedliche Korngröße (Grobgut, Feingut). Eine weitgehend einheitliche Teilchengröße wäre z.B. mittels nachgeschaltetem Siebverfahren möglich (SIEBEN, Kap. 2.2.1).

Außerdem sind die Zerkleinerungsprodukte Mehl, Grieß und Schalenteile bzw. Kleie noch miteinander vermischt. Nach der Terminologie der industriellen Mühlentechnik müßte bei der Haushalts-GETREIDEMÜHLE eigentlich vom Schroten gesprochen werden. Reines Mehl kann erst nach Sichtung des geschroteten Korns und gegebenenfalls durch weiteres Ausmahlen gewonnen werden. Bei der industriellen Getreide-Vermahlung durchläuft das Lebensmittel auch mehrere Walzenstühle, wobei die Walzen unterschiedliche Größen, Riffelung, Drehfrequenzen und Abstände aufweisen.

Vorteilhaft ist es, das Korn vor dem Mahlen etwas anzufeuchten (Netzen), damit die Schalen bei der Beanspruchung weniger brechen und deshalb als größere Partikel entfernt werden können (4).

Beim Schroten hingegen sollen die Schalenteile meist ebenfalls zerkleinert werden, wozu das Getreide möglichst trocken sein muß. Gleichzeitig kann damit ein unerwünschtes Verkleben der Geräte-Mahlflächen verhindert werden. Bei den ein-

fach aufgebauten Haushalts-GETREIDEMÜHLEN würde andernfalls die erforderliche Antriebsleistung sehr groß werden, Maschinenteile könnten Schaden nehmen oder der Zerkleinerungsprozeß würde zum Stillstand kommen.

Aus ernährungsphysiologischer Sicht ist es jedoch empfehlenswert, vorgereinigtes Getreide zu verwenden (Schwarzreinigung und Weißreinigung). Die Schadstoffe aus der Umwelt, die sich vorwiegend auf den äußerden Schalen der Getreidekörner ablagern, können mit diesen Reinigungsmaßnahmen zumindest teilweise entfernt werden.

Bei der KAFFEEMÜHLE rotiert ein Mahlkegel mit niedriger Geschwindigkeit ($n_{\max} < 2000$ 1/min (31)) um eine vertikale Achse in einer Mahlpfanne (Abb. 21/38). Die Kegelflächen beider Mahlkörper besitzen eine Längszahnung ähnlich wie Zahnräder (28). Die zu mahelnden Kaffeebohnen rutschen unter dem Einfluß der Schwerkraft in den Wirkraum zwischen Mahlkegel und Mahlpfanne. Wegen der Relativbewegung der rauhen Mahlflächen werden die Bohnen gedreht, und die grobe Zahnung der Mahlflächen, zusammen mit der unregelmäßigen Außenform der Bohne verursacht dabei eine DRUCK-Beanspruchung im Lebensmittel. Letztere führt - wie beschrieben - zum Bruch der Kaffeebohne (Abb. 21/34 und Abb. 21/35).

Mit einem Spaltsteller läßt sich der Mahlkegel gegenüber der Mahlpfanne vertikal verstellen, so daß der Endspalt s_E innerhalb eines Wertebereiches beliebig eingestellt werden kann. Auf diese Weise läßt sich der Feinheitsgrad des Kaffeemehles beeinflussen. Es kann jedoch nicht verhindert werden, daß bei diesem Verfahren neben dem Grobgut, wie es gerade durch den Spalt paßt, auch sehr feines Gut (Fein- gut) entsteht.

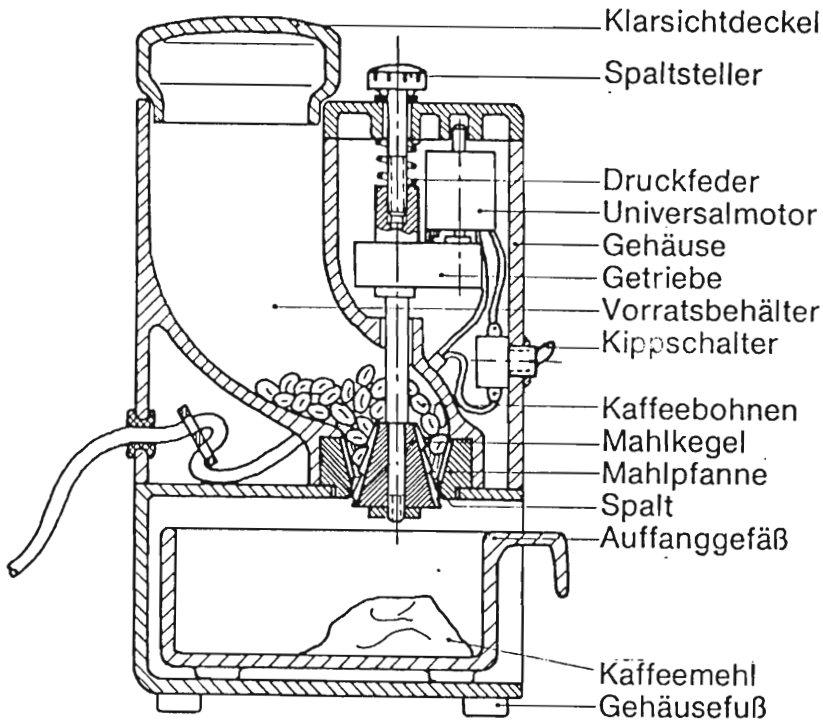


Abb. 21/38: Mahlwerk-Kaffeemühle im Einsatz
(Vertikalschnitt)

Für die Weiterverwendung von Kaffeemehl, zum Beispiel zum Aufbrühen, ist die Partikelgröße bzw. die Korngrößenverteilung ein wichtiger Parameter. Dieser kann mittels Siebverfahren bestimmt oder auch beeinflusst werden. Da Kaffeeteilchen fetthaltig und klebrig sind, werden bei der Prüfung Siebhilfsmittel, zum Beispiel hochdisperse Kieselsäure, beigemischt (Partikeldurchmesser $\approx 20 - 30 \mu\text{m}$). Gemäß der Norm zur Prüfung der Gebrauchseigenschaften von Kaffeemühlen wird die Kornverteilung mit dem "Luftstrahl-Siebverfahren" durchgeführt (18) (32) (33).

2.1.9 ZERSCHLAGEN

Definition: Zerkleinern von festen bis harten Lebensmitteln in Teilchen von unterschiedlicher Korngröße (Beispiele: Kaffeebohnen, Nüsse).

Viele Lebensmittel - insbesondere solche mit harter Konsistenz - lassen sich sowohl nach dem Verfahren ZERSCHLAGEN als auch durch MAHLEN mit ähnlichem Arbeitsergebnis zerkleinern. Die physikalische Wirkungsweise ist jedoch unterschiedlich; denn beim ZERSCHLAGEN - im Gegensatz zum MAHLEN - sind Beschleunigung, Trägheitskräfte bzw. kinetische Energie notwendig. Da sich dieses Verfahren deswegen von allen bisher beschriebenen wesentlich unterscheidet und auch andere Verfahren, z.B. MIXEN, teilweise darauf aufbauen, soll es ausführlich behandelt werden.

Das Verfahren ZERSCHLAGEN von Lebensmitteln kann mit den Beanspruchungsarten SCHLAG oder PRALL erfolgen.

Während beim reinen SCHLAG das Lebensmittel in Ruhe ist und das Werkzeug mit hoher Geschwindigkeit auf das Lebensmittel trifft, ist beim reinen PRALL das Werkzeug oder eine Wand in Ruhe, und das Lebensmittel bewegt sich. Der Zerkleinerungsmechanismus beider Verfahren ist jedoch ähnlich und soll deshalb in diesem gemeinsamen Kapitel beschrieben werden.

Beim reinen PRALL trifft ein Lebensmittelteilchen mit hoher Geschwindigkeit senkrecht auf eine Wirkfläche (feste Wand). Es wird somit auf dem kürzesten Wege abgebremst und im Falle des Zurückspringens wieder beschleunigt. Als Bremsweg steht bei sehr harter Wirkfläche nur der Verformungsweg zur Verfügung, den das Teilchen in der Bewegungsrichtung selbst aufbringen muß (Abb. 21/39).

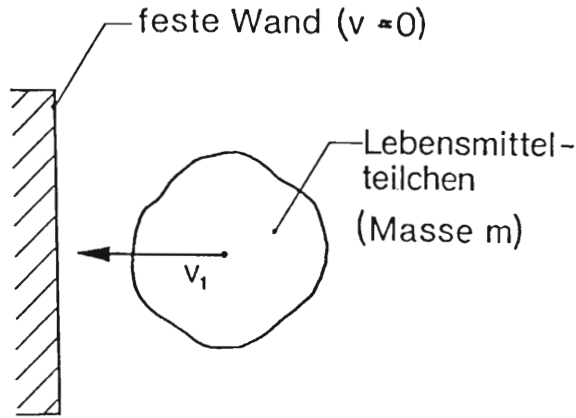


Abb. 21/39: Prall eines Lebensmittelteilchens an eine Wand

Ist die Verformung elastisch, so wird die gesamte kinetische Energie

$$V_{\text{kin}} = \frac{1}{2} m v_1^2 \quad (21.42)$$

in potentielle Energie der elastischen Verformung umgewandelt, die anschließend das Teilchen wieder in entgegengesetzter Richtung beschleunigt (elastischer Stoß).

Bei rein plastischer Verformung wird die kinetische Energie in Verformungsarbeit, Zerkleinerungsarbeit bzw. Wärme umgesetzt. Das Teilchen bleibt abgeplattet und wird nicht mehr beschleunigt (plastischer Stoß).

Bei teilelastischem Stoß kann nur ein Teil der ursprünglichen Bewegungsenergie elastisch aufgenommen werden, und die Restenergie wird von der plastischen Verformungsarbeit und Zerkleinerungsarbeit aufgezehrt. Das Teilchen prallt mit einer Geschwindigkeit $v_2 < v_1$ zurück. Die aufgezehrte Energie beträgt

$$V_{\text{kin}} = W = \frac{1}{2} m (v_1^2 - v_2^2) \quad (21.43)$$

Mit den Geschwindigkeiten v_1 und v_2 läßt sich die sog. Stoßzahl

$$k = \frac{v_2}{v_1} \quad (21.44)$$

definieren, die den Grad der Elastizität des Lebensmittels angibt. Technisch läßt sich die Stoßzahl am einfachsten aus dem Fallversuch ermitteln, mit

$$k = \sqrt{\frac{h_2}{h_1}}, \quad (21.45)$$

wobei h_1 = Fallhöhe und h_2 = Rücksprunghöhe ist (73).

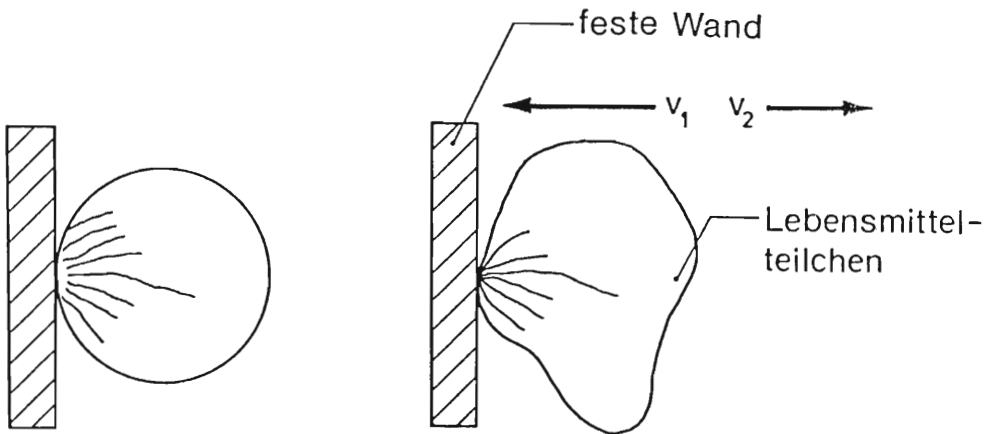


Abb. 21/40: Bruchbahnen bei beginnender, elastischer Verformung von Lebensmittelteilchen durch Prall an eine Wand

Bei starker elastischer Verformung bilden sich ähnlich wie bei der Beanspruchung von Teilchen zwischen zwei Wirkflächen (Mahlen, Kap. 2.1.8) Risse aus, die strahlenförmig von der Aufprallstelle ausgehen (Abb. 21/40). Auch hier folgt der primären Bruchphase eine sekundäre, bei der im Kontaktbereich - dem Gebiet der größten Energiedichte - Materialschwingungen Feingut entstehen lassen (Abb. 21/41).

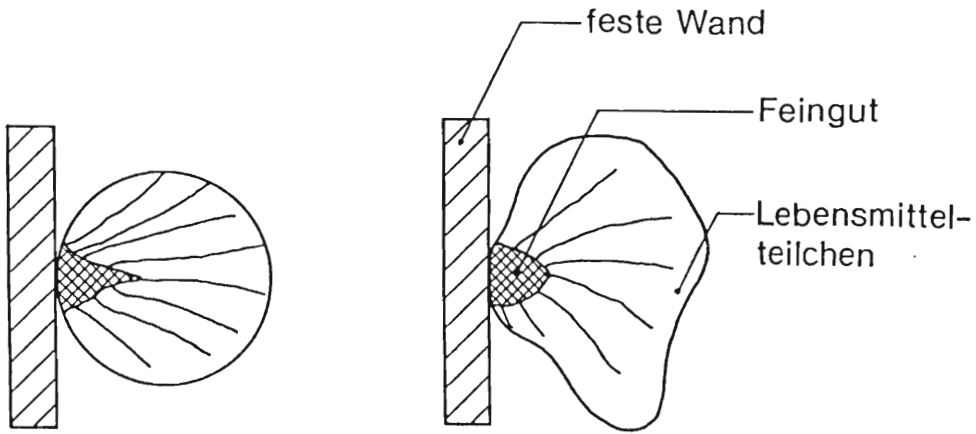


Abb. 21/41: Bruchbahnen und Feingutbereiche bei elastischer Verformung von Stoffteilchen durch Prall an eine Wand

Bei starker plastischer Verformung kann sich ähnlich wie beim Mahlen im Kontaktbereich ein Materialkegel ins Innere des Teilchens schieben. Dieses Gebiet bleibt nahezu unversehrt, an der nächstgelegenen Oberfläche entstehen jedoch Brüche und Risse.

Während beim PRALL das bewegte Lebensmittelteilchen auf eine feststehende, harte Wand trifft, ist es bei der Beanspruchungsart SCHLAG umgekehrt. Hier trifft eine rasch bewegte Wirkfläche oder Wirkkante auf das zunächst ruhende Teilchen (Abb. 21/42). Wird die Wirkkante durch ein rotierendes Messer realisiert, so überlagert sich die Beanspruchungsart SCHNITT und verschiedene physikalische Zusammenhänge sind ähnlich wie beim Verfahren SCHNEIDEN. An der Berührstelle wirkt die Kraft

$$F = m a , \quad (21.46)$$

wobei m = Masse des Teilchens,
 a = Beschleunigung, die diesem erteilt wird.

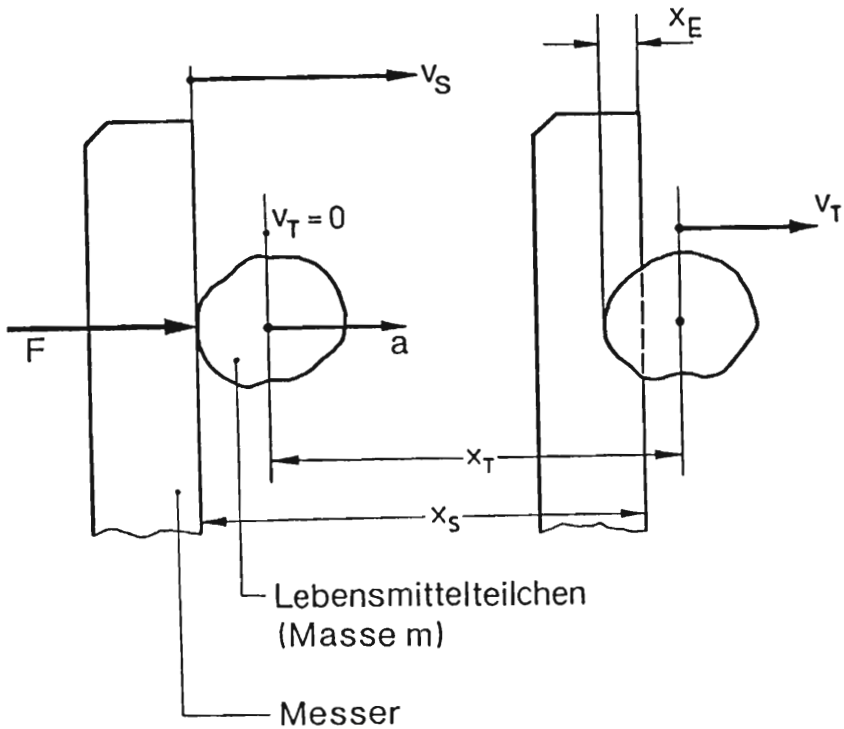


Abb. 21/42: Schlag eines bewegten, scharfen Messers auf ein ruhendes Lebensmittelteilchen; links: Schneide trifft gerade auf das Teilchen, rechts: etwas später ist die Schneide bereits eingedrungen

Sehr ähnliche geometrische und kinematische Beziehungen wurden beim "freien Schnitt" von Halmgut in der Landtechnik aufgestellt (37). Bei modernen Mähwerken, z.B. mit rotierenden Messern, entsteht die erforderliche Schnittkraft ebenfalls vorwiegend durch die Massenträgheitskraft des Halmes. Allerdings werden letztere, im Gegensatz zu kleinen Lebensmittelteilchen, wegen der länglichen Struktur von Halmen zusätzlich durch Biege-, Einspann- und Luftwiderstandskräfte unterstützt.

Aus umfangreichen Untersuchungen mittels Analogrechnen und Laborexperimenten hinsichtlich des "freien Schnittes" am Halm werden vor allem folgende Ergebnisse, zumindest näherungsweise, übernommen (Abb. 21/43 und Abb. 21/44):

- der Eindringweg x_E ist linear abhängig von der Zeit;
- die Schnittkraft F nimmt linear mit größer werdendem Teilchendurchmesser D zu.

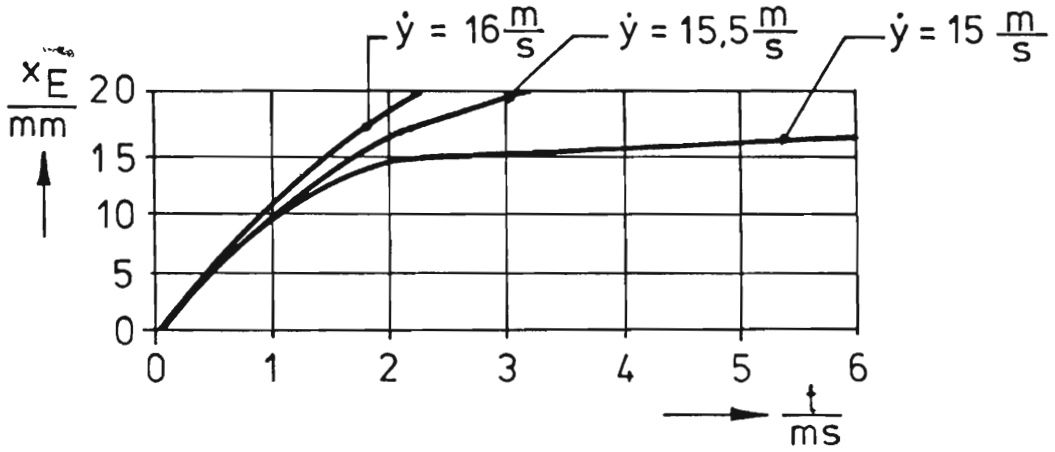


Abb. 21/43: Eindringtiefe x_E des Messers in den Halm als Funktion der x_E Zeit t bei verschiedenen Messergeschwindigkeiten $\dot{y} = 15; 15,5$ und $16 \frac{m}{s}$ (37)

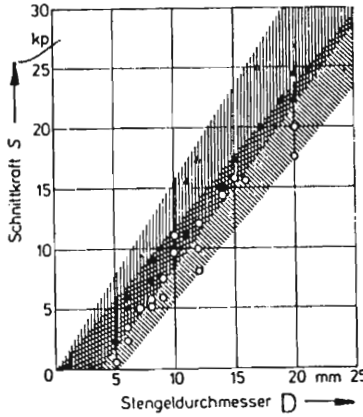


Abb. 21/44: Schnittkraft S in Abhängigkeit vom Durchmesser D an der Schnittstelle bei Sonnenblumenstengeln (37)

Für den Sonderfall einer gleichförmig beschleunigten Bewegung aus dem Ruhezustand ($v_T = 0$) muß diese Beschleunigung

$$a = \frac{v_T^2}{2x_T} \tag{21.47}$$

sein, um dem Teilchen innerhalb des Weges x_T die Geschwindigkeit v_T zu erteilen. Der betrachtete Berührungspunkt der Messerschneide besitzt dabei die konstante Geschwindigkeit v_S . Faßt man die Gleichungen 21.46 und 21.47 zusammen, so wirkt dabei am Teilchen die Kraft

$$F = m \frac{v_T^2}{2x_T} , \tag{21.48}$$

die ähnlich wie bei der Prallbeanspruchung das Teilchen elastisch und plastisch verformt oder gar zertrümmert.

Im Gegensatz zu einer Wand als Arbeitsfläche kann die Schneide als Wirklinie in das Teilchen eindringen oder das Teilchen vollständig durchschneiden.

Dabei kann das Messer den Schwerpunkt des Teilchensystems nach der Zerkleinerung sogar überholen. In diesem Fall gilt

$$v_S > v_T \quad . \quad (21.49)$$

Ist der Zerkleinerungsvorgang unvollkommen, d.h. das Messer dringt nur teilweise elastisch, plastisch oder schneidend in das Teilchen ein und nimmt es (zumindest kurzzeitig) mit, so gilt

$$v_S = v_T \quad . \quad (21.50)$$

Bei konstanter Beschleunigung a des Lebensmittelteilchens gilt für den Schneidenweg

$$x_S = 2x_T \quad , \quad (21.51)$$

d.h. doppelter Teilchenweg x_T .

Damit legt die Schneide während ihres Eindringens den doppelten Weg wie das Teilchen zurück. Aus der Geometrie (Abb. 21/42) errechnet sich andererseits

$$x_S = x_T + x_E \quad , \quad (21.52)$$

weshalb der Eindringweg x_E gerade so groß wie der Teilchenweg x_T ist, längs dem das Teilchen beschleunigt wird, d.h.

$$x_T = x_E \quad . \quad (21.53)$$

Unter diesen Bedingungen ergibt sich die Schnittkraft

$$F = m \frac{v_S^2}{2x_E} \quad . \quad (21.54)$$

Diese Beziehung zeigt, wie wichtig eine große Messergeschwindigkeit v_S ist und daß das Messer in jedem Fall um einen Mindestweg x_E in das Lebensmittel eindringen wird, da für $x_E = 0$ die Kraft unendlich groß werden würde.

Der beschriebene Zerkleinerungsmechanismus kann nicht bis zu einem beliebigen Feinheitsgrad des Lebensmittels fortgesetzt werden. Das verhindert schon die wachsende Plastizität (Mikroplastizität) der Teilchen bei abnehmender Teilchengröße (109). In kleinen Teilchen sind naturgemäß weniger Fehlstellen im Gefüge bzw. in der Struktur vorhanden.

Aber auch aus anderen Gründen kommt der Zerkleinerungsmechanismus ab einem von Lebensmittel- und Werkzeugparametern abhängigen Feinheitsgrad zum Stillstand. Für den Sonderfall weitgehend runder Stoffteilchen (charakteristischer Durchmesser D) errechnet sich bei einem vorwiegend auf Flächenpressung beruhenden Zerkleinerungsverfahren die maximal erforderliche Schnittkraft

$$F_{N,max} = p_A \cdot b \cdot D \quad . \quad (21.55)$$

Dabei wurde dieselbe Zerkleinerungstheorie angenommen wie beim Verfahren SCHNEIDEN (vgl. Abb. 21/1). Gemäß der zugehörigen Gleichung 21.8 ist

$$\begin{aligned} p_A &= \text{erforderliche Flächenpressung} \\ b &= \text{Schneidkantenbreite (Schliff)}. \end{aligned}$$

Beim Zerkleinern nach der Beanspruchungsart PRALL oder SCHLAG können die erforderlichen Zerkleinerungskräfte nur von der Massenträgheit bzw. von der Beschleunigung des Teilchens herühren. Für das runde Lebensmittelteilchen errechnet sich die Trägheitskraft

$$F_T = a \cdot \frac{\pi}{6} D^3 \quad , \quad (21.56)$$

mit a = Beschleunigung (siehe 21.47) und
 ϱ = Dichte des Teilchens.

Der Zerkleinerungsmechanismus kann bei abnehmender Teilchengröße nur solange erhalten bleiben, solange gilt

$$F_T \geq F_{N,max} \quad (21.57)$$

Im Grenzfall (Gl. 21.55, 21.56 und 21.57 zusammengefaßt) ergibt sich der kleinstmögliche Teilchendurchmesser

$$D_{Grenz} = \sqrt{\frac{6 p_A b}{\pi \varrho a}} \quad (21.58)$$

Dies zeigt, daß der Grenzdurchmesser umso größer ausfällt, je größer die Festigkeit (erforderliche Flächenpressung p_A) des Lebensmittels und z.B. beim Messer je stumpfer die Schneide ist (Schneidkantenbreite b).

Der Grenzdurchmesser ist aber umso kleiner, je schwerer (Dichte ϱ) das Lebensmittel und je größer die Beschleunigung a ist, die das Lebensmittel erfährt.

Letzteres bestätigt erneut, daß z.B. bei Messern die Geschwindigkeit entsprechend groß sein muß, um einen gewünschten Feinheitsgrad zu erzielen. Eine kleinere Teilchengröße als D_{Grenz} ist nach dieser Zerkleinerungstheorie nicht möglich.

Daß im Gegensatz dazu in der Praxis kleinere Teilchen (Fein- gut) vorzufinden sind und somit das Mahlgut eine sehr heterogene Größenverteilung aufweist, liegt daran, daß:

- im Kontaktbereich von Lebensmittel-Teilchen und Wirkfläche auch kleine und kleinste Bruchstücke entstehen (sekundäre Bruchphase: Fein- gut, ähnlich wie in Abb. 21/41)

- Lebensmittel-Teilchen im Wirkraum umhergewirbelt werden, so daß sie sehr unterschiedliche Geschwindigkeiten, z.B. auch solche entgegen einer Messerbewegung, besitzen
- die Teilchen sich auch auf andere abstützen können, was die Größe der wirksamen Masse ändert
- die Teilchen auch miteinander zusammenprallen und aneinander oder an Wirkflächen reiben
- die Teilchen nicht zentrisch von der Schneide getroffen werden
- bei begrenzter Verfahrensdauer nicht alle Teilchen hinreichend oft in den Wirkungsbereich gelangen.

Andererseits würde sich bei einer sehr langen Verfahrensdauer das Mahlgut vor allem wegen Reibung desselben an den Wirkflächen und der Teilchen untereinander erwärmen. Bei Kaffee beispielsweise treten bei größeren Temperaturen Aromaverluste auf oder das Kaffeemehl verklumpt (Agglomeration).

GERÄTEBEISPIEL für das Verfahren ZERSCHLAGEN

An einer einfachen SCHLAGMESSER-KAFFEEMÜHLE sollen die Einflußgrößen für die erwähnte Wärmewirkung untersucht werden. Näherungsweise kann man annehmen, daß in einem feinkörnigen Mahlgut dieses an Messerober- und -unterseite des Schlagmessers mit dem Druck p_A auf die Flächen wirkt (Abb. 21/45). In jedem Flächenelement

$$dA = c dr \quad (21.59)$$

wirkt dabei die Normalkraft

$$dF_N = p_A dA \quad , \quad (21.60)$$

wobei sich wegen der Reibung zwischen Mahlgut und Fläche (Reibungsbeiwert μ) die Reibungskraft

$$dF_R = 2 \mu dF_N \quad (21.61)$$

ergibt.

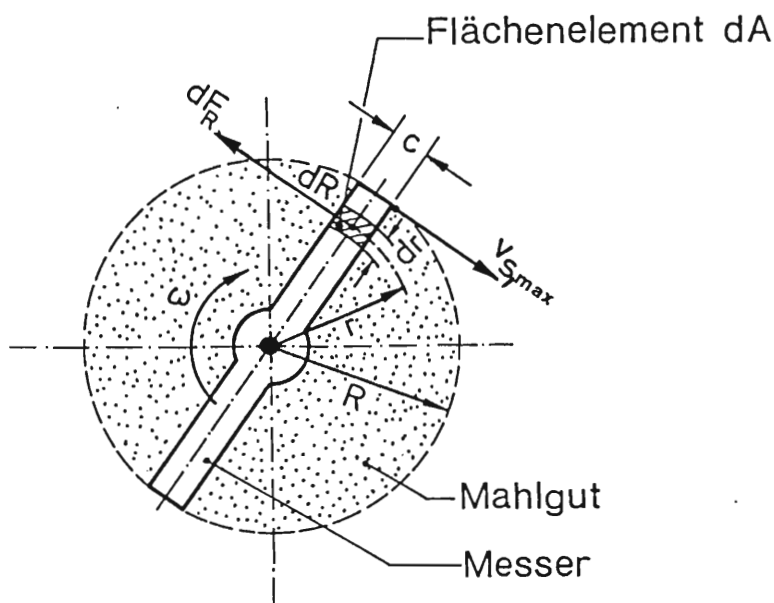


Abb. 21/45: Zur Berechnung der Reibungsarbeit eines rotierenden Messers im Mahlgut

Das Reibungsmoment

$$dM = r dF_R \quad (21.62)$$

erzeugt während der Mahldauer T die Reibungsarbeit

$$dW = T \omega dM \quad (21.63)$$

Mit s = Anzahl der Messerarme und Einsetzen der Gleichungen 21.59 bis 21.63 errechnet sich die gesamte Reibungsarbeit

$$W = \int_{r=0}^{r=R} s T \omega r 2\mu p_A c dr \quad (21.64)$$

oder

$$W = s T \omega \mu p_A c R^2 \quad (21.65)$$

Diese wird neben der eigentlichen Trennarbeit vom Motor aufgebracht, dem Mahlgut zugeführt und erhöht entsprechend der Wärmekapazität des Kaffeemehls dessen Temperatur. Soll

diese Temperaturerhöhung nur gering sein, so müßten aus dieser Sicht nachfolgende Größen ebenfalls klein sein:

- s = Anzahl der Messerarme
(im Beispiel nach Abb. 21/45) ist $s = 2$)
- T = Mahldauer
- ω = Winkelgeschwindigkeit
- μ = Reibungsbeiwert
- p_A = Druck im Kaffeemehl
- c = Breite des Messers
- R = Länge eines Messerarms.

Deshalb begnügt man sich meist mit zwei Messerarmen, deren Seitenflächen zugunsten kleiner Reibungsbeiwerte geschliffen sind, die Arme sind zudem sehr schmal ausgeführt (Maß c) und verjüngen sich meist von der Drehachse weg nach außen.

Die Winkelgeschwindigkeit ω und die Messerlänge R müssen dennoch groß sein, da die maximale Umfangsgeschwindigkeit der Schneide

$$v_{s,max} = \omega R \quad (21.66)$$

direkten Einfluß auf den Zerkleinerungsmechanismus besitzt.

Die Mahldauer T ist so kurz wie möglich zu bemessen, d.h. nur solange bis die geforderte Feinheit und Homogenität des Mahlgutes erreicht ist oder beide Größen nicht mehr deutlich gesteigert werden können.

Eine Verbesserung der Homogenität des Mahlgutes wäre mit nachgeschaltetem Siebverfahren möglich. Das "Luftstrahl-Siebverfahren" wird auch bei der SCHLAGMESSER-KAFFEEMÜHLE zur Bestimmung der Korngrößenverteilung bzw. zur Prüfung der Gebrauchseigenschaften vorgeschlagen (18) (32) (33).

2.1.10 HACKEN

Definition: Spanloses Zerkleinern von Lebensmitteln weicher bis harter Konsistenz in getrennte oder noch zusammenhängende Teile (Beispiele: Knochen, Fleisch, Zwiebeln, Kräuter).

Auch beim Verfahren HACKEN sind Beschleunigung, Trägheitskräfte und kinetische Energie wirksam. Die zu zerkleinernden Lebensmittel liegen dabei meist auf einer festen Unterlage. Unmittelbar an der Schneide, welche auf die Oberfläche des Lebensmittels wirkt, herrscht ein ähnliches Kräftespiel wie beim SCHNEIDEN, d.h. es liegt die Beanspruchungsart SCHNITT vor.

Im Gegensatz zum SCHNEIDEN trifft beim HACKEN die Klinge mit großer Geschwindigkeit auf die Lebensmitteloberfläche (Normalbewegung). Eine Tangentialbewegung im Sinne einer "Zusatzbewegung" (vgl. Kap. 2.1.1.) ist praktisch vernachlässigbar (Abb. 21/46).

Ist die von der Schneide am Lebensmittel erzeugte Flächenpressung hinreichend groß, so dringt die Klinge in das Lebensmittel ein. Erreicht die Klinge auf der gesamten Länge des Lebensmittels die Unterlage, so wird ein Lebensmittelteil vollkommen abgehackt.

Sollen nach diesem Verfahren die Lebensmittelteile weiter zerkleinert werden, so sind dazu mehrere Klingen notwendig oder Klinge und Lebensmittel werden nach jeder Hackbewegung gegeneinander quer zur Klingenlängsachse verschoben (parallele Scheiben). Wird die Klinge gegenüber dem Lebensmittel nicht nur verschoben, sondern auch gedreht (z.B. um 90°), so können prismatische Teilchen erzeugt werden. Bei scheibenförmigen Ausgangsstücken, deren Flächen parallel zur Unterlage aufgelegt werden, können so auch würfelförmige Teilchen entstehen.

Für Lebensmittel geringer Dicke oder solche ohne zäher, faseriger oder harter Konsistenz genügt ein leichtes Werkzeug. Bei Lebensmitteln anderer Konsistenz, großer Dicke oder z.B. bei Fleischstücken mit eingelagerten Sehnen, Knorpeln oder Knochen, ist ein Gerät mit großer Masse m bei gleichzeitig großer Geschwindigkeit v erforderlich. Nur dann steht eine hinreichend große kinetische Energie

$$V_{\text{kin}} = \frac{1}{2} m v^2, \quad (21.67)$$

abzüglich der Verformungs- und Reibungsarbeit für die eigentliche Zerkleinerungsarbeit zur Verfügung.

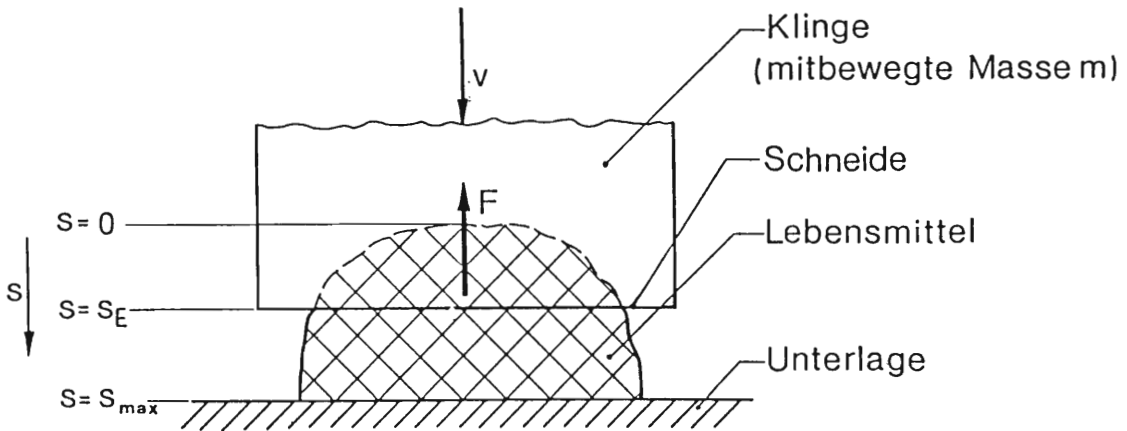


Abb. 21/46: Hackbewegung einer Klinge (Geschwindigkeit v) in einem ruhenden Lebensmittel

Faßt man die vom Lebensmittel auf die Klinge wirkenden Kräfte in der Resultierenden F zusammen, so wird diese kinetische Energie um die Arbeit

$$W = \left| \int_{s=0}^{s=s_E} F(s) ds \right| \quad (21.68)$$

verringert. Dabei ist s_E = Weg, um den die Klinge in das Lebensmittel eingedrungen ist. Im Grenzfall

$$W = V_{\text{kin}} \quad (21.69)$$

wird die gesamte kinetische Energie aufgezehrt. Tritt dies ein, bevor $s_E = s_{\max}$ ist, so bleibt die Klinge im Lebensmittel stecken (s_{\max} = Dicke des Lebensmittels).

Federt hingegen die Klinge mit der Geschwindigkeit v_Z wieder zurück, so wurde nur die kinetische Energie

$$V_{\text{kin}} = \frac{1}{2} m (v^2 - v_Z^2) \quad (21.70)$$

umgesetzt.

Trifft die Schneide auf die Unterlage, welche aus Gründen der Werkzeugschonung weich ist, so dringt die Schneide geringfügig in die Unterlage ein (Abb. 21/47). In diesem Fall überlagert sich der Beanspruchungsart SCHNITT kurz vor Erreichen der Unterlage die Beanspruchungsart SCHERUNG (Tab. 21/1). Besonders offensichtlich ist dies bei einer Unterlage aus Holz, dessen Fasern senkrecht zur Fläche der Unterlage stehen (Stirnholz).

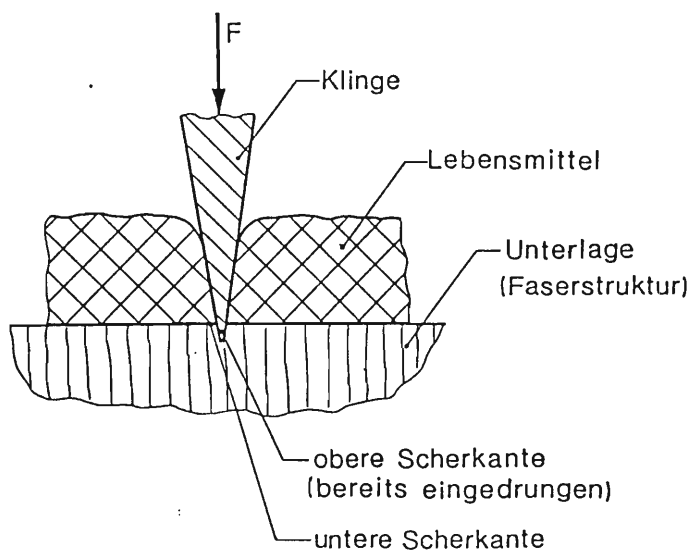


Abb. 21/47: Eindringen der Klinge in die Unterlage beim Hacken eines Lebensmittels

Bei der Rückbewegung der Klinge schließt sich der Spalt zumindest teilweise wieder. Bei mangelhafter Parallelität zwischen Klingebewegung und Fasern tritt ein starker Verschleiß der Unterlage auf. Durch das Eindringen der Schneide werden kleine Lebensmittelpartikelchen in die Unterlage eingeschlagen und auch eingeschlossen (Hygieneproblem).

GERÄTEBEISPIEL für das Verfahren HACKEN

Beim KÜCHENBEIL braucht die Hand - im Gegensatz zum KÜCHENMESSER - keine Kräfte und Momente für das eigentliche Verfahren am Lebensmittel aufbringen (Abb. 21/48). Sie übernimmt bei Auftreffen des Beiles im wesentlichen nur Steuerungsaufgaben. Um möglichst große Kräfte am Lebensmittel zu erzielen, ist es auch beispielsweise nicht notwendig, dieses in Griffnähe zu bearbeiten. In einem solchen Fall würde sogar beim Hackvorgang durch den Abstand von Massenmittelpunkt S und Kraft F ein Drehmoment entstehen, welches am Griff eine nach oben gerichtete Kraft erzeugt und die Hand unangenehm "prellt".

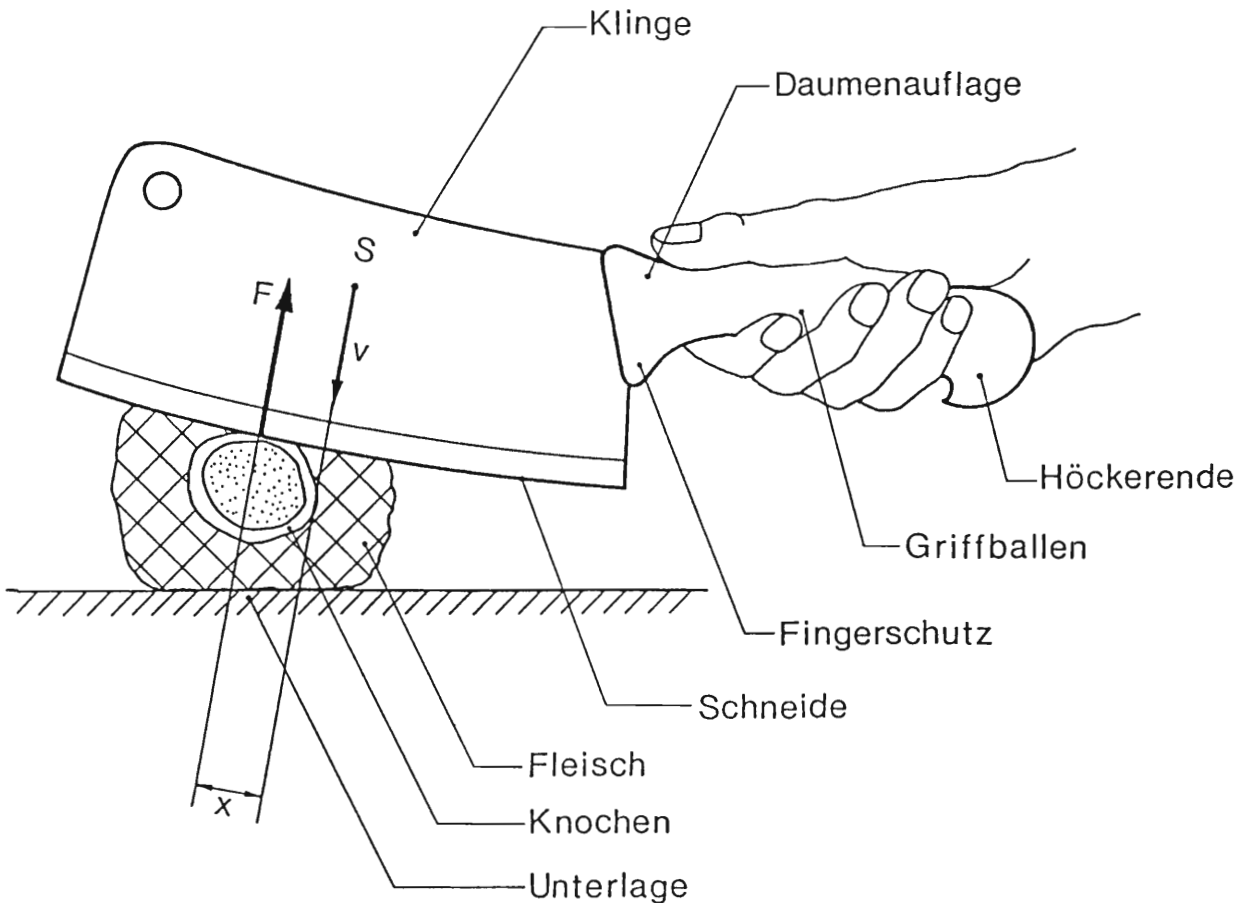


Abb. 21/48: Küchenbeil beim Hacken eines Lebensmittels auf Unterlage

Ein für die Hand weitgehend neutrales Kräftespiel ergibt sich, wenn der Massenmittelpunkt S des Beils etwa über dem Kraftangriff am Lebensmittel liegt.

Die Wirkung der Trägheitskräfte beim HACKEN mit dem KÜCHENBEIL ist ein wesentlicher Unterschied gegenüber dem SCHNEIDEN mit dem KÜCHENMESSER. Ist beispielsweise ein Knochen im Fleisch elastisch eingebettet (Abb. 21/48), so wirkt beim raschen Auftreffen der Schneide die Beschleunigung $a = \frac{dv}{dt}$, welche im Knochenstück die Trägheitskraft

$$F_T = m_K a \quad (21.71)$$

hervorrufen. Dabei ist m_K die Masse des Knochens zuzüglich der in nächster Umgebung mitbewegten Fleischmasse. Auch bei Lebensmitteln ohne eingelagerte Knochen unterstützen derartige Trägheitskräfte den Zerkleinerungsvorgang. Die an der Schneide auftretenden Hackkräfte werden daher nicht in voller Stärke an die Unterlage (z.B. dem Hackstock) oder an andere Befestigungsteile wie Fleischerhaken weitergeleitet.

Beim Zerkleinerungsverfahren HACKEN können insbesondere bei harten Lebensmitteln oder bei Knocheneinschlüssen unerwünschte, spitze oder scharfkantige Teile entstehen. Beim nachfolgend beschriebenen SÄGEN hingegen entstehen Späne, die bei richtigem Verfahrensablauf ungefährlich beim unbeabsichtigten Verzehr sind.

2.1.11 SÄGEN

Definition: Spanabhebendes Zerkleinern von Lebensmitteln fester Konsistenz in einzelne grobe Teile (Beispiele: Tiefgefrorenes, Knochen).

Beim Verfahren SÄGEN wird das Lebensmittel an der Wirkstelle des Werkzeuges zerspant. Form und Abmessungen der entstehenden Späne sind weitgehend beeinflussbar. Deshalb sind diese Späne - sofern sie überhaupt beim Lebensmittel bleiben - für den menschlichen Verzehr ungefährlich - im Gegensatz zu den Spänen bzw. Splintern beim HACKEN.

Auch hier ist SCHNITT die maßgebende Beanspruchungsart, kann jedoch von REIBUNG überlagert werden, insbesondere bei fehlerhafter Geometrie der Werkzeuge, z.B. durch Abnutzung.

Das SÄGEN von Lebensmitteln ist vergleichbar mit dem SÄGEN von Holzwerkstoffen, welches schon früher wissenschaftlich untersucht wurde (42) (108). Bei Lebensmitteln kommt jedoch erschwerend hinzu, daß sie sich weniger gut festhalten lassen als Holz, um den Werkzeugkräften begegnen zu können. Außerdem bleiben wegen der feuchten Lebensmitteloberfläche oder wegen austretender Flüssigkeiten die Späne vielfach im Wirkungsbereich haften.

Am einfachsten läßt sich das Verfahren Sägen am sog. Hobelzahn erklären (Abb. 21/49). Das Sägeblatt wird mit der Kraft F_N senkrecht an die Oberfläche des zu zerkleinernden Lebensmittels gedrückt. Da die Berührfläche der Zahnspitzen klein ist, wirkt - ähnlich wie beim SCHNEIDEN - eine große Flächenpressung. Wird gleichzeitig das Blatt mit der tangential zur Oberfläche des Lebensmittels wirkenden Kraft F_T belastet, so gleitet das Blatt - nach Überwindung der Reibungskräfte - auf dem Lebensmittel.

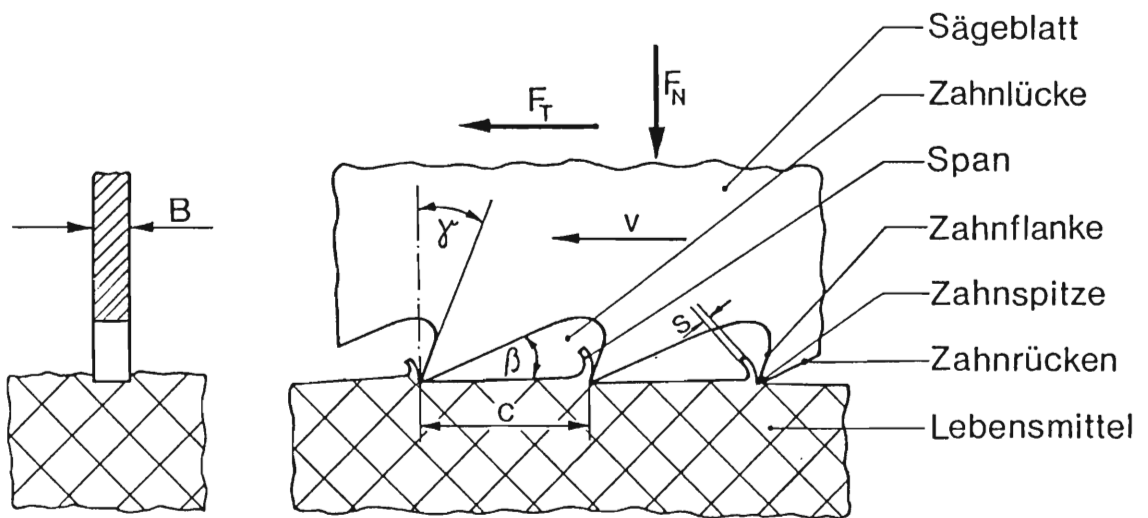


Abb. 21/49: Hobelzähne im Eingriff

Wegen kleiner Unebenheiten der Oberfläche (Rauigkeit) oder wegen elastischem oder plastischem Einsinken der Zähne "verhaken" sich diese, und bei hinreichend großen Spannungen im Lebensmittel wird der Molekülverband aufgerissen. Die Zähne dringen weiter in die Oberfläche des Lebensmittels ein und heben dünne Späne heraus, die an der Zahnflanke umgelenkt werden. Je nach Konsistenz von Lebensmittel, Kräftespiel und Zahngeometrie (z.B. Zahnbreite B , Schneidenwinkel γ) krümmen sich diese Späne bzw. brechen in Teilstückchen ab.

Bei großem positiven Schneidenwinkel γ - d.h. Zahnflanke zeigt in Bewegungsrichtung v - entstehen i.a. lange Späne. Es bilden sich Kraftkomponenten aus, die den Zahn gleichzeitig senkrecht in die Lebensmitteloberfläche hineinzuziehen versuchen. Diese Kräfte unterstützen somit die äußere Kraft F_N . Damit nimmt möglicherweise die Spandicke s in unerwünschtem Maße zu, weshalb auch die erforderliche Tangentialkraft F_T sehr groß werden kann. Bei geringer Berührlänge zwischen Sägeblatt und Lebensmittel können sich die wenigen im Eingriff befindlichen Zähne sogar verhaken, so daß der Sägevorgang zum Stillstand kommt.

Bei kleinem positiven Schneidenwinkel γ oder gar negativem Winkel γ (negativ heißt: die Zahnflanke zeigt entgegen der Bewegungsrichtung) ist die Gefahr des "Verhakens" deutlich geringer. Bei negativem Winkel γ und gleichzeitig großem Freiwinkel β ergeben sich im Gegensatz zu den "liegenden Dreieckszähnen" nunmehr "stehende Dreieckszähne" (42). Derartige Zähne können in zwei Richtungen wirken (Zug- und Stoßzähne bzw. "doppelter Zugschnitt").

Das Sägeverfahren ist jedoch beim klassischen Dreieckszahn anders als beim bisher beschriebenen Hobelzahn. Derartige Dreieckszähne sind dabei nicht nur spitz, sondern ihre Flanken sind ähnlich wie beim Messer angeschärft (Abb. 21/50). Die abwechselnd links und rechts geschärften Zähne schneiden bzw. ritzen bei der Bewegung das Lebensmittel am beidseitigen Rand der Sägefuge. Beim Tieferdringen der Zähne reißen oder bröckeln Lebensmittelteilchen auch am Grund der Sägefuge ab.

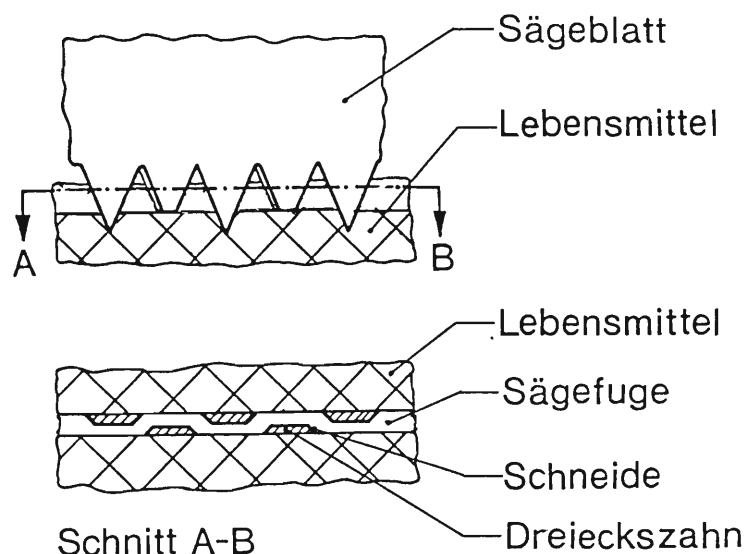


Abb. 21/50: Dreieckszähne eines Sägeblattes im Eingriff

Um dieses Loslösen vom Grund der Sägefuge zu erleichtern - bei zähen Lebensmitteln ist dies noch wichtiger als bei Holzwerkstoffen - wird den Dreieckszähnen vielfach ein Hobelzahn nachgeordnet. Dieser ist kürzer als die übrigen Zähne und nicht messerartig, sondern gerade geschärft (vgl. Fleischsäge, Abb. 21/53).

Im Gegensatz zu den allein wirkenden Hobelzähnen, die auch das seitliche Abreißen der Lebensmittelteilchen in der Sägefuge übernehmen müssen (Abb. 21/49), sind bei der Kombination von Dreiecks- mit Hobelzähnen die Aufgaben geteilt. Die drei charakteristischen Teilvorgänge beim Sägen lassen sich dabei klarer erkennen:

- Abspannen seitlich in der Sägefuge
- Loslösen vom Grund der Sägefuge
- Transport der Sägespäne aus dem Wirkungsbereich (108).

Den zuletzt genannten Transport der Sägespäne übernehmen hauptsächlich die Zahnlücken. Sie müssen deshalb groß genug sein, um das Spanvolumen aufnehmen zu können, welches etwa fünfmal größer ist als das unzerkleinerte Lebensmittelvolumen in der Sägefuge. Ist das Sägeblatt bereits bis zur Zahnhöhe in das Lebensmittel eingedrungen, so können die Späne den Wirkraum nicht mehr seitlich verlassen, sondern werden an der Austrittsstelle des Blattes aus dem Lebensmittel geschoben. Zur vollständigen Entleerung der Zahnlücken muß die Verschiebewegung des Blattes mindestens so groß wie die Lebensmittellänge l sein.

Die Sägespäne können auch am Blatt vorbei den Wirkungsbereich verlassen, wenn die Breite B der Zähne deutlich größer ist als die Blattbreite b (Abb. 21/51). Dazu gibt es mehrere Möglichkeiten:

- im Zahnbereich sind die Sägeblätter verdickt, z.B. durch Anstauchen der Unterseite oder durch Abwalzen der Oberseite

- es sind entsprechend breite Zähne aus einem anderen Werkstoff am Sägeblatt befestigt (z.B. Widia, angelötet)
- die einzelnen Zähne besitzen dieselbe Breite wie das Blatt, sind aber abwechselnd geringfügig seitlich aufgebogen, d.h. geschränkt.

Dieser sog. "Schränk" ist auch deswegen notwendig, damit das Blatt in der entstandenen Sägefuge mit möglichst geringer Seitenreibung bewegt werden kann und nicht klemmt.

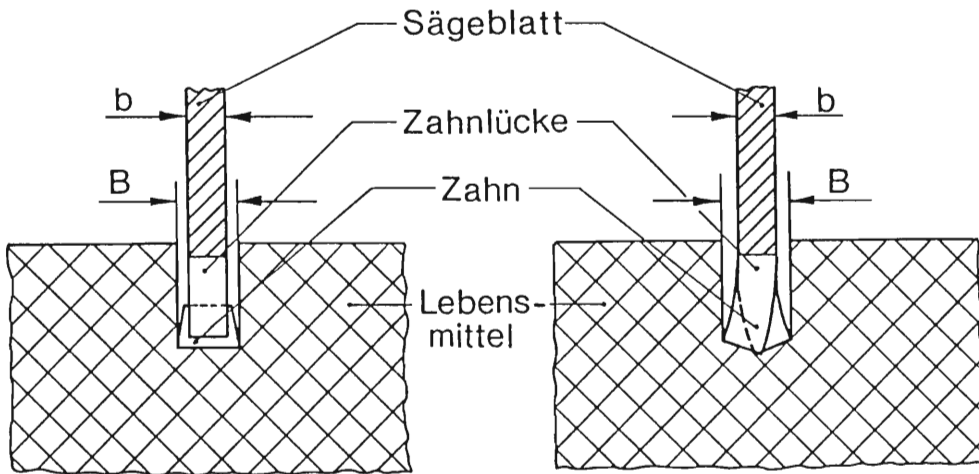


Abb. 21/51: Sägebreite B und Blattbreite b .
Links: bei aufgesetzten Zähnen,
rechts: bei geschränkten Zähnen

Die wirksame Sägebreite B (meist: $B \approx 2b$) beeinflusst aber auch unmittelbar die erforderliche Zerkleinerungsarbeit. Je breiter B ist, umso größer wird bei sonst gleich großer Schnittfläche das zu zerkleinernde Lebensmittelvolumen (Spanvolumen).

Der Zerkleinerungsgrad ist von der Konsistenz des Lebensmittels, von der Zahngeometrie und den wirkenden Kräften abhängig. Beispielsweise erfordern feine Zähne i.a. eine größere Zerkleinerungsarbeit, dafür sind die entstehenden Schnittflächen meist glatter als bei groben Zähnen.

Bei diesen theoretischen Betrachtungen wurden immer geometrisch exakt geformte Zähne vorausgesetzt. Bei Abweichungen davon, bei abgenutzten bzw. stumpfen Zähnen, ändern sich die Kräfteverhältnisse. Der Arbeitsaufwand ist dann deutlich größer als bei scharfen Zähnen, da die Reibungsarbeit im Vergleich zur Zerspanungsarbeit sehr viel größere Werte annimmt.

GERÄTEBEISPIEL für das Verfahren SÄGEN

Bei der BÜGELSÄGE (Handvorspannsäge (17)) müssen die Reaktionskräfte und -momente am Lebensmittel von Unterlage, Einspannvorrichtung oder von der anderen Hand der Bedienperson aufgebracht werden (Abb. 21/52).

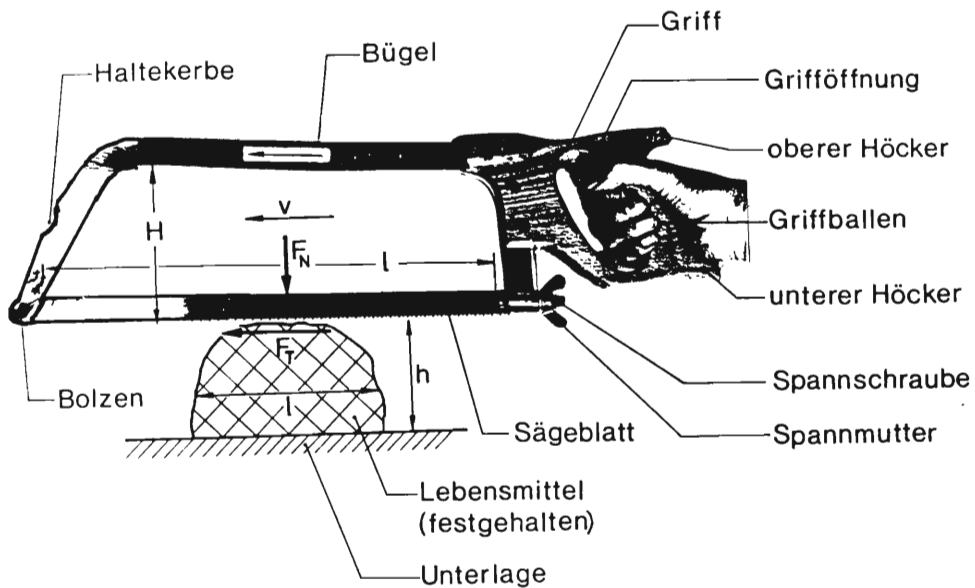


Abb. 21/52: Bügelsäge beim Sägen eines Lebensmittels
(Handelsbezeichnung: Fleischsäge)

Wird die Säge relativ gegenüber dem Lebensmittel bewegt (Relativgeschwindigkeit v), so hobeln die Zähne des Sägeblattes Lebensmittel-Späne ab. Der einzelne Zahn ist unsymmetrisch geformt (liegender Dreiecks-Hobelzahn oder Stoßzahn), d.h. der Schneidewinkel der vorderen und hinteren Zahnflanke

ist unterschiedlich groß. Bei der Vorwärtsbewegung (Geschwindigkeit v positiv) wirkt die steile Zahnflanke, und es werden kräftige Späne herausgehoben. Bei der Rückbewegung (Geschwindigkeit v negativ) werden wegen der nun maßgebenden flachen Zahnflanke praktisch keine Späne abgehobelt (Leerhub).

BÜGELSÄGEN gestatten den Einsatz sehr dünner Blätter, was geringes Zerspanungsvolumen und damit geringe Lebensmittelverluste verursacht. Demzufolge ist auch der Arbeitsaufwand für die Bedienperson gering.

Bei der HANDSÄGE OHNE VORSPANNUNG (Heftsäge: Begriff, DIN 6493 T.1 (17) muß das Blatt relativ dick sein, um vor allem die Druckkräfte bei der Vorwärtsbewegung übertragen zu können (Abb. 21/53). Dieses Haushaltsgerät wird im Handel fälschlicherweise als TIEFKÜHLKOST-MESSER bezeichnet, hat aber lediglich den Griff mit dem Messer gemeinsam und ist von der Wirkungsweise her gesehen eine SÄGE. Die "HEFTSÄGE" im Beispiel besitzt eine kombinierte Verzahnung mit Dreiecks- und Hobelzähnen, wobei nach jeweils vier Dreieckszähnen (zwei linke und zwei rechte) ein kürzerer Hobelzahn angeordnet ist.



Abb. 21/53: Blatt einer Fleischsäge
(Handelsbezeichnung: Tiefkühlkost-Messer)

Da bei der Heftsäge der dicke Bügel entfällt, gibt es keine Begrenzung der Schnitthöhe, wie dies bei der Bügelsäge wegen der Bügelhöhe H der Fall ist. Weiterhin ist die Bearbeitungslänge l des Lebensmittels nicht so streng begrenzt wie es sich bei der Bügelsäge wegen der Bedingung $l < L$ ergibt.

2.2 TRENNEN

Definition: Mechanisches Zerlegen von Lebensmittel-Feststoffgemengen, -Emulsionen, -Suspensionen, Lebensmittelmark und spezielle Lebensmittelgemische in mindestens zwei Fraktionen, ohne die Komponenten stofflich zu verändern.

Zu den Verfahren TRENNEN gehören nach vorliegender Terminologie auch das mechanische Ab- oder Auslösen von Lebensmittelteilen (z.B. Haut, Schale, Kerne oder Stiele) vom Ursprungslebensmittel.

Zum Zerlegen von Stoffsystemen in einzelne Komponenten oder Phasen sind thermische, elektrische oder mechanische Trennverfahren möglich.

Thermische Trennverfahren wenden Methoden der Thermodynamik, also des Wärme- und Stoffaustausches, an.

Bei elektrischen Trennverfahren nutzt man die Wirkung elektrostatischer oder elektromagnetischer Kräfte.

Bei den mechanischen Trennverfahren nutzt man Unterschiede von spezifischem Gewicht, Teilchengröße, Teilchenform, Struktur, Aggregatzustand oder sonstige Eigenschaften, die unterschiedliche Wirkungen mechanischer Kräfte oder Momente gestatten.

In vorliegender Arbeit sollen ausschließlich mechanische Trennverfahren behandelt werden. Sie lassen sich auch nach ihrem Zweck einteilen und man unterscheidet in der industriellen Verfahrenstechnik (109):

- Klassieren:
Trennen von Gemischsystemen nach der Teilchengröße
- Sortieren:
Trennen von Gemischsystemen nach der Stoffsorte
- Abscheiden:
Trennen einer Gemischkomponente von der Trägerphase.

Die Trägerphase (äußere Phase) kann dabei ebenso wie die darin enthaltene Phase (innere Phase) fest, flüssig oder gasförmig sein. Die äußere Phase wird auch als Dispersions-Phase und die innere als disperse Phase bezeichnet. Bei diesen dispersen Systemen gibt es je nach Aggregatzustand neun verschiedene Kombinationsmöglichkeiten (Tab. 22/1).

Tab. 22/1: Einteilung disperser Systeme nach Aggregatzustand für Trennverfahren und Mischverfahren

DISPERSE PHASE (innere Phase)	DISPERSIONSPHASE (äußere Phase)		
	fest	flüssig	gasförmig
fest	GEMENGE	SUSPENSION	STAUB
flüssig	PASTE bzw. MARK	EMULSION	NEBEL
gasförmig	FEST-SCHAUM	FLÜSSIG-SCHAUM	GASGEMISCH

Die Trennverfahren im Haushalt werden hauptsächlich bei den Gemischsystemen GEMENGE, EMULSION, SUSPENSION, MARK und seltener bei SCHAUM angewandt.

Dem System MARK werden dabei alle flüssigkeitshaltigen Lebensmittel mit weitgehend fester Konsistenz zugeordnet. Dies sind beispielsweise alle Früchte bzw. deren Fruchtfleisch, welches entsaftet werden soll. Dem System MARK entspricht bei den Mischverfahren sowie allgemein in der industriellen Verfahrenstechnik das System PASTE.

Die Trennung des Systems SCHAUM kommt im Haushalt selten vor. Jedoch kann bei Verfahren wie z.B. Auspressen von Früchten

mittels Zentrifugen unbeabsichtigt Luft mit eingearbeitet werden, d.h. schaumiger Saft entstehen (120). Durch Stehenlassen bzw. Absetzen trennt sich relativ rasch das Gas von der Flüssigkeit.

Darüber hinaus gibt es im Haushalt noch SPEZIAL-Systeme von Lebensmitteln, z.B. solche, bei denen Schalen, Häute, Stiele oder Kerne vom übrigen Lebensmittel getrennt werden sollen (Tab. 22/2). Bei der Realisation der hierzu gehörenden Verfahren werden zwar teilweise Zerkleinerungsverfahren eingesetzt, die dem Sinn und Zweck nach hier den Trennverfahren zuzuordnen sind.

Damit können alle in dieser Arbeit behandelten Trennverfahren mindestens einem der sechs Systeme zugeordnet werden (Tab. 22/2).

In der Theorie und Praxis interessiert beim TRENNEN vor allem die Güte des Verfahrens, d.h. wie exakt die Lebensmittel-

Tab. 22/2: Die wichtigsten Trennverfahren im Haushalt mit einem Lebensmittelbeispiel zum jeweiligen Gemischsystem

Gemischsystem	Lebensmittelbeispiel	Trennverfahren
GEMENGE	Mehl mit verschieden großer Körnung	Sieben
EMULSION	fette Brühe	Absetzen
SUSPENSION	Kaffeepulver in Wasser	Filtrieren Absetzen
MARK	flüssigkeitshaltiges Fruchtfleisch	Auspressen Zentrifugieren
SCHAUM	schaumiger Saft	Absetzen
SPEZIAL	rohe Gurken gekochte Tomaten	Schälen Passieren

komponenten hinterher getrennt sind. Sie läßt sich formal wie bei Mischverfahren bestimmen, indem aus jeder Komponente nach der Trennung Proben gezogen werden. Die Analyse dieser Proben - z.B. aus der Komponente i - liefert bei hinreichend großer Probenzahl n nach den Rechenvorschriften der Statistik eine Standardabweichung \mathcal{G}_i dieser Komponente (vgl. Kap. 2.3, Gl. 23.5). Bezieht man diese Standardabweichung auf die maximale Standardabweichung $\mathcal{G}_{i,max}$, die sich bei idealer, d.h. völliger Trennung des Gemisches errechnen läßt (Kap. 2.3, Gl. 23.6), so erhält man die Trenngüte (123)

$$(TG)_i = \frac{\mathcal{G}_i}{\mathcal{G}_{i,max}} . \quad (22.1)$$

Bei ideal getrennten Lebensmittel-Komponenten besäße die aus den Proben ermittelte Standardabweichung \mathcal{G}_i die maximal mögliche Größe $\mathcal{G}_{i,max}$ und demnach wäre $(TG)_i = 1$. Diese Definition ist zwar geeignet, die theoretischen Zusammenhänge zwischen TRENNEN und MISCHEN klar herauszustellen, in der praktischen Anwendung sind jedoch einfachere Definitionen zur Kennzeichnung der Trenngüte oft vorteilhafter.

Wird beim TRENNEN die interessierende Komponente (Schlüsselkomponente) aus dem Lebensmittel-Gemisch teilweise entfernt, so ändert sich ihr Massenanteil (vgl. Kap. 2.3, Gl. 23.1). Besitzt die Komponente i im Ausgangsgemisch den Massenanteil g_{iA} (bezogen auf die Gesamtmasse), so verkleinert sich dieser bis zum Ende des betrachteten Trennverfahrens auf den Massenanteil g_{iE} . Mit dem Abscheidegrad

$$A_T = \frac{g_{iA} - g_{iE}}{g_{iA}} \quad (22.2)$$

und dem Eindickungsgrad

$$E_T = \frac{g_{iE}}{g_{iA}} \quad (22.3)$$

läßt sich die Güte von Trennverfahren durch Zahlenwerte (zwischen 0 und 1) ausdrücken. Bei idealem TRENNEN wäre $A_T = 1$ oder $E_T = 0$.

Eine andere Möglichkeit zur Beurteilung ist die Angabe der unerwünschten Gemischanteile in einer Lebensmittelkomponente nach dem Trennen. Beispielsweise bei körnigem Gut bezeichnet man die unerwünschten Anteile als Fehlkorn, bzw. Unterkorn (d.h. zu kleines Korn) im Grobgut oder Überkorn (d.h. zu großes Korn) im Feingut. Im nachfolgend beschriebenen Verfahren SIEBEN lassen sich die zuletzt genannten Begriffe gut veranschaulichen.

2.2.1 SIEBEN

Definition: Trennen eines trockenen Lebensmittel-Feststoffgemisches nach Klassen unterschiedlicher Teilchengröße (Beispiele: Mehl, Puderzucker, Semmelbrösel).

Das Trennverfahren SIEBEN - in der Verfahrenstechnik auch als KLASSIEREN bezeichnet - wird bei fest-fest Systemen angewandt. Diese Lebensmittelgemische werden als GEMENGE systematisiert (Tab. 22/2). Die Dispersitätsgröße ist hier die Teilchengröße x (Korngröße). Meist besteht die Ausgangsmasse m_A aus sehr unterschiedlich großen Teilchen (Abb. 22/1).

Anstelle der Massenverteilungsfunktion $Q(x)$ der absoluten Häufigkeit ist für die mathematische Behandlung die sog. Massendichte $q(x)$ der relativen Häufigkeit besser geeignet (84) (109). Der Charakter der Verteilungsfunktion $Q(x)$ bleibt in $q(x)$ jedoch erhalten. Definitionsgemäß gilt

$$\int_{x=x_{\min}}^{x=x_{\max}} q(x) dx = 1 \quad . \quad (22.4)$$

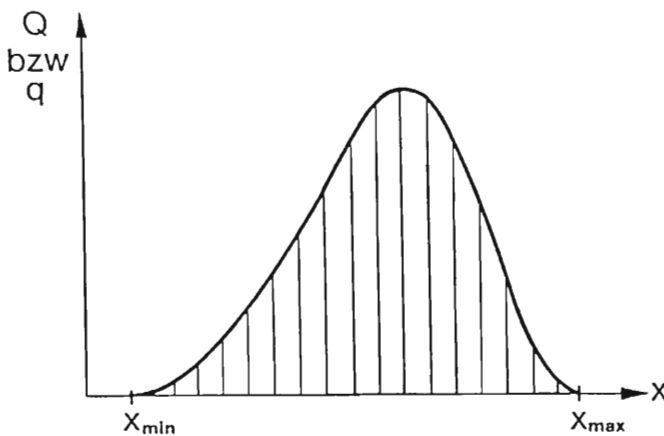


Abb. 22/1: Massenverteilung Q und Massendichte q aufgetragen über der Teilchengröße x (hier: allgemeine Verteilung, d.h. keine Normalverteilung)

Die Massensumme oder der Durchgang

$$D(x) = \int_{x=x_{\min}}^{x=x} q(x) dx \quad (22.5)$$

gibt an, welcher Massenanteil auf die (relative) Gesamtheit aller Teilchen entfällt, deren Teilchengröße kleiner oder gleich x sind. Diese Massensumme oder dieser Durchgang ist ein theoretischer Wert für die Masse bezogen auf die Gesamtmasse, die (z.B. bei aufeinanderfolgenden Sieben mit zunehmender Maschenweite) bis zur Maschenweite x durchgefallen ist (Abb. 22/2).

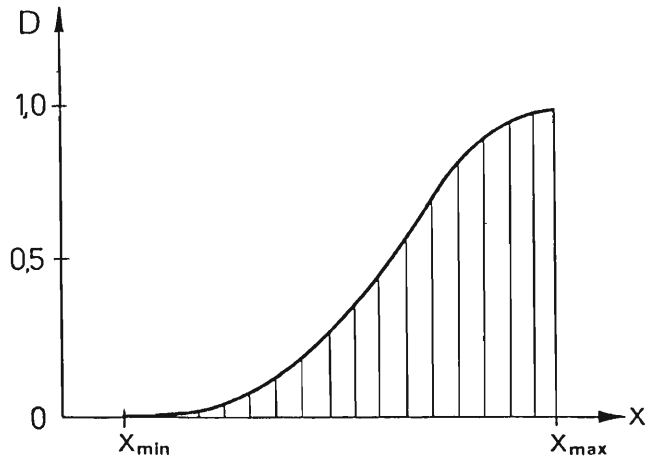


Abb. 22/2: Massensumme oder Durchgang D in Abhängigkeit der Teilchengröße bzw. der Maschenweite x

Umgekehrt ist der Rückstand

$$R = 1 - D \quad (22.6)$$

die relative Masse, die bis zur Maschenweite x am Sieb liegengeblieben ist.

In vielen Fällen besitzt die Massendichte $q(x)$ die Normalverteilung - der Graph ist dann die Gauß'sche Glockenkurve. Die mathematische Behandlung wird dabei besonders erleichtert, da verschiedene Gesetzmäßigkeiten dazu existieren.

Bei Laboruntersuchungen von Küchenmaschinen wird zwar nicht die kontinuierliche Verteilung, so doch eine Verteilung mit mehreren Klassen betrachtet. Die Prüfung erfolgt dabei z.B. mittels Prüfsiebe (16) und einer Schüttelmaschine oder einem Luftstrahl-Siebgerät (18).

Im Haushalt werden Feststoffgemenge meist nur in zwei Klassen getrennt. Somit wird das zu trennende Gut mit der Ausgangsmasse m_A in ein Grobgut m_G und ein Feingut m_F klassiert, wobei

$$m_A = m_G + m_F . \quad (22.7)$$

Mit dem Massenanteil des Grobgutes

$$\alpha_G = \frac{m_G}{m_A} \quad (22.8)$$

und dem Massenanteil des Feingutes

$$\alpha_F = \frac{m_F}{m_A} \quad (22.9)$$

gilt

$$\alpha_G + \alpha_F = 1 . \quad (22.10)$$

Um die Güte eines Trennverfahrens bzw. -apparates beschreiben zu können, wird die Trenngüte

$$T(x) = \frac{\alpha_G q_G(x)}{q_A(x)} \quad (22.11)$$

eingeführt,

wobei $q_A(x)$ = relative Häufigkeit des Ausgangsgutes und

$q_G(x)$ = relative Häufigkeit des Grobgutes.

$T(x)$ gibt für jede Teilchengröße x an, welcher Anteil vom Ausgangsgut im Intervall dx gerade in das Grobgut übergeht.

Bei einem idealen Trennapparat wird das Grobgut vom Feingut bei der Teilchengröße x_T völlig getrennt (Abb. 22/3).

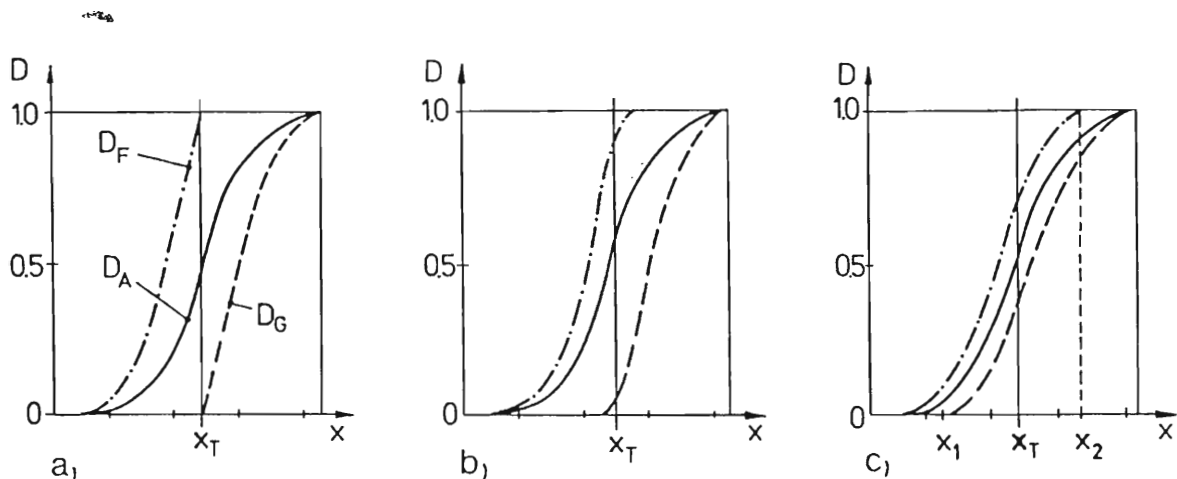


Abb. 22/3: Durchgang D in Abhängigkeit der Teilchengröße x .
Indizes: A = Ausgangsgut, G = Grobgut, F = Feingut.
Gewünschte Trennung bei der Korngröße x_T .
a) idealer Trennapparat, b) guter Trennapparat, c) schlechter Trennapparat (84)

Bei einem schlechten Trennapparat hingegen ist eine exakte Trennung nicht gewährleistet (Abb. 22/3 c). So befinden sich im Grobgut noch Teilchen des Feingutes aus dem Bereich x_1 bis x_T und im Feingut solche des Grobgutes mit der Teilchengröße x_T bis x_2 .

Um die Trenngüte zahlenmäßig charakterisieren zu können, werden in der Praxis die Werte der Teilchengröße $x_{0,25}$ und $x_{0,75}$, die zur Trenngüte $T = 0,25$ und $T = 0,75$ gehören, angegeben (Abb. 22/4).

Das Verfahren SIEBEN ist implizit auch in verschiedenen Zerkleinerungsverfahren, z.B. MAHLEN, enthalten. Dort ist es notwendig, das bereits fein gemahlene Gut aus dem Mahlkreislauf herauszunehmen, hingegen das Grobgut in den Wirkraum zurückzuleiten (Mahlen, Kap. 2.1.8). Enthält nämlich das zu mahlende Grobgut noch viel Feingut, so wird dieses unnötig weitergemahlen (Reibungswärme), puffert die mechanische Beanspruchung der größeren Partikel und bewirkt u.U. eine störende Agglomeration (d.h. Partikel klumpen sich zusammen). Als Sieböffnung dient beim Mahlen meist der schmale Endspalt zwischen den Mahlbacken bzw. den Mahlsteinen.

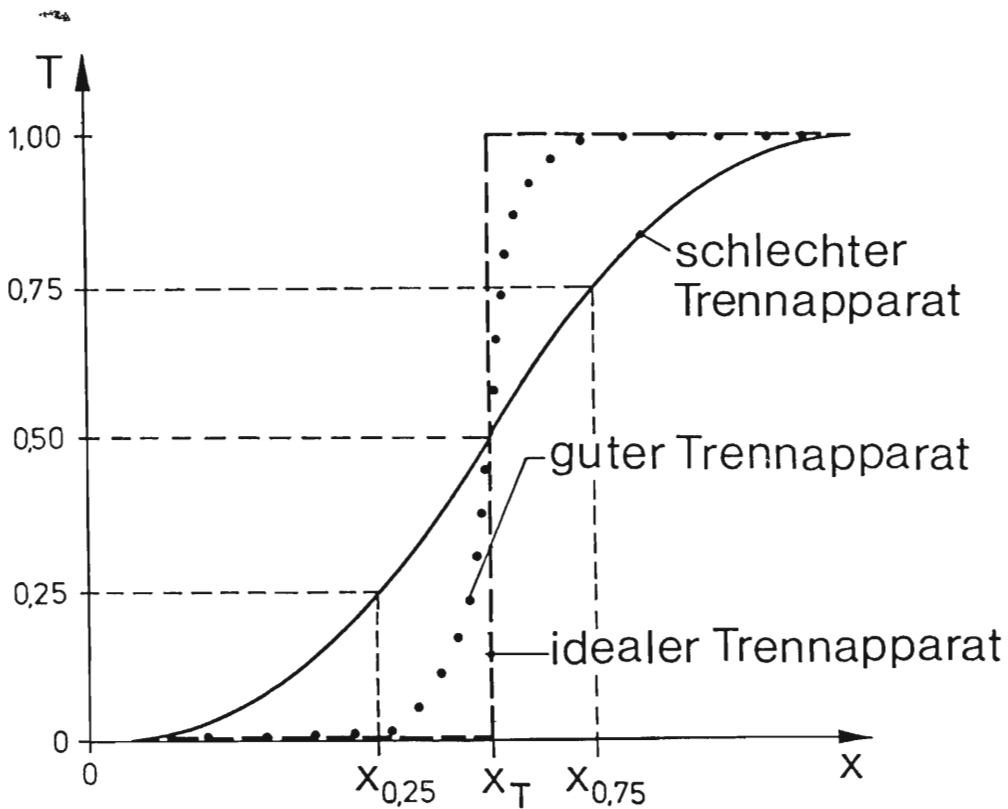


Abb. 22/4: Trenngüte T in Abhängigkeit der Teilchengröße x bei unterschiedlich guten Trennapparaten (84)

GERÄTEBEISPIELE für das Verfahren SIEBEN

Im Haushalt werden meist handgeführte SIEBE mit ebener oder gewölbter Siebfläche verwendet. Entsprechend der Loch- oder Maschengröße dieser Siebfläche fällt infolge der Schwerkraft Feingut (Siebdurchgang) durch das Sieb, während Grobgut (Siebrückstand) dessen Teilchenabmessungen größer als die Sieböffnungen sind, zurückgehalten wird.

Durch horizontale, vertikale oder andere Schüttelbewegungen des Siebes mit großen Beschleunigungen bewirken Trägheitskräfte am Lebensmittel ein kurzzeitiges Abheben der Teilchen von der Siebfläche, und weiteres Feingut kann durchfallen.

Die Durchsatzleistung eines Siebes, mit dem z.B. die zwei Klassen Grobgut und Feingut getrennt werden können, ist abhängig von folgenden Parametern:

- Größe der Sieböffnungen
- Größe der Siebfläche
- Masse des Gemenges bzw. der Füllhöhe im Sieb
- Verhältnis der freien Siebfläche zur gesamten Siebfläche
- Frequenz der Schüttelbewegung
- Beschleunigungen.

Meist ist eine kleine Füllhöhe günstig, da dann der Gewichtseinfluß des Gemenges das Abheben der Teilchen von der Siebfläche nicht zu sehr behindert. Dies gilt besonders bei horizontalen Schüttelbewegungen. Hat sich sehr viel Grobgut im Sieb angesammelt, so muß dieses entfernt werden, bevor neues Ausgangsgut aufgebracht werden kann (intermittierendes Verfahren).

SIEBSYSTEME MIT ABSTREIFER können ebenfalls nur intermittierend betrieben werden, jedoch sind große Füllhöhen möglich (Abb. 22/5). Mittels Betätigungshebel im Haltegriff des Gerätes kann über eine Kuppelstange ein Abstreiferkreuz hin und her gedreht werden.

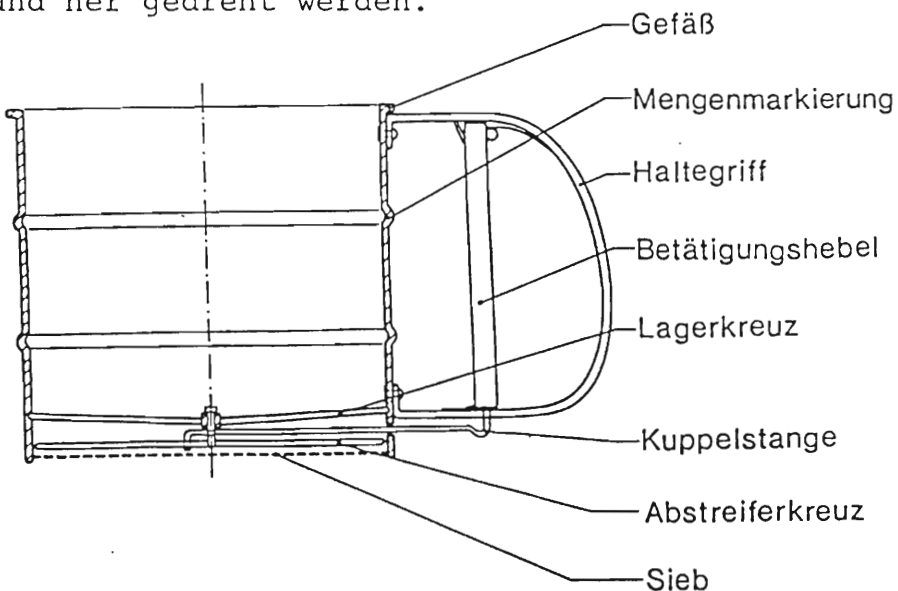


Abb. 22/5: Bechersieb mit handbetätigtem Abstreifer (Vertikalschnitt)

Bereits ohne zusätzliche Schüttelbewegungen des Siebes wird das Grobgut - falls es die Sieböffnungen verdeckt - weggeschoben bzw. angehoben, so daß weiteres Feingut hindurchfallen kann.

SIEBE werden auch zum Trennen der Flüssigkeiten von Feststoffteilchen verwendet, sofern die Teilchen groß und vor allem größer als die Sieböffnungen sind. Man bezeichnet das Gerät in der Haushaltspraxis auch vielfach als SEIHER und das Verfahren als SEIHEN oder ABSEIHEN. Dieses Verfahren wird jedoch in vorliegender Terminologie dem FILTRIEREN zugeordnet.

2.2.2 SCHÄLEN

Definition: Trennen einer äußeren Schicht begrenzter Dicke von einem Lebensmittel fester Konsistenz (Beispiele: Kartoffeln, Gurken, Äpfel).

Beim Verfahren SCHÄLEN werden ebenso wie beim SIEBEN Lebensmittelkomponenten im Aggregatzustand fest voneinander getrennt. Nach der Übersicht lassen sich die zugehörigen Lebensmittelmischungen als SPEZIAL-Systeme einordnen (Tab. 22/2).

Bis auf die Fälle, bei denen die Schalen der Lebensmittel ohne spezielle Werkzeuge abgetrennt werden können (z.B. Abschälen von Zitrusfrüchten oder Knacken von Nußschalen), werden beim SCHÄLEN Zerkleinerungsverfahren wie SCHNEIDEN, SCHNITZELN, RASPELN oder REIBEN zu Hilfe genommen. Da SCHÄLEN jedoch nicht das Zerkleinern von Lebensmitteln, sondern nur das TRENNEN einer Schale oder einer anderen Oberfläche vom übrigen Lebensmittel zum Ziel hat, wird es als eigenes Verfahren definiert.

Während im industriellen Bereich auch Dampf- und Laugenschälverfahren üblich sind, wird im Haushalt zwar manchmal eine Dampfvorbehandlung genutzt, aber vorwiegend werden mechanische Verfahren angewandt. Letztere lassen sich in die zwei Gruppen SCHÄLEN nach systematischem Schneiden oder Schnitzeln (meist von Hand) und SCHÄLEN mit stochastischem Schnitzeln, Raspeln oder Reiben einteilen (meist maschinelle Verfahren).

Beim SCHÄLEN mit systematischem Schneiden oder Schnitzeln wird eine scharfe Schneide mit einer hinreichend großen Kraft F_2 relativ zum Lebensmittel bewegt (Abb. 22/6). Die Klingensfläche ist dabei näherungsweise parallel zur Lebensmitteloberfläche ausgerichtet und der senkrechte Abstand beider Flächen wird durch einen mit der Klinge mitbewegten An-

schlag begrenzt. Somit kann der abgeschälte Streifen eine vorgegebene Dicke s nicht überschreiten. Entsprechend dem Schneidenwinkel α wird der Streifen dabei vom geschälten Lebensmittel abgelenkt.

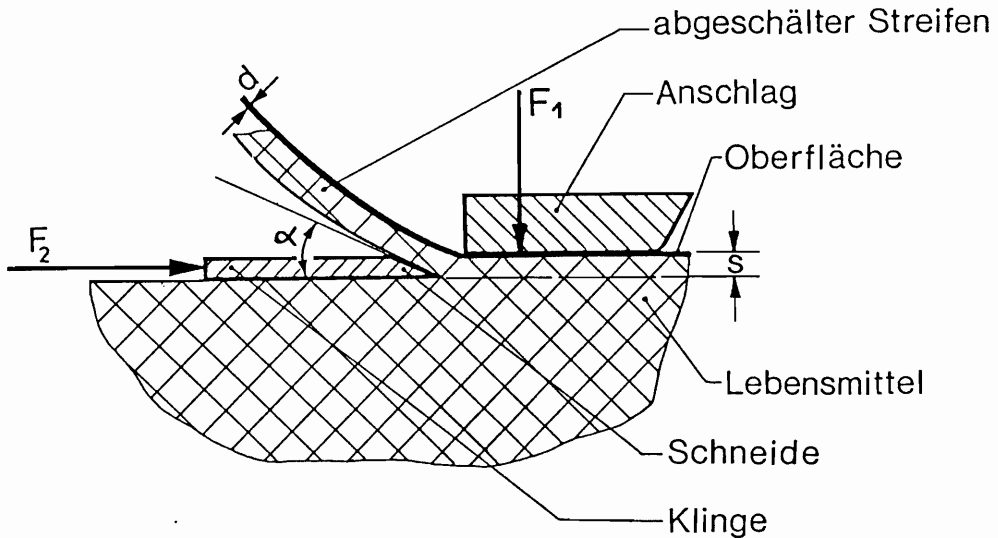


Abb. 22/6: Schälen eines Lebensmittels nach dem Schneiden- bzw. Schnitzelverfahren (d = Schalendicke, s = Streifendicke)

Bei kleinem Winkel α und weichen, elastischen oder zähen Stoffen können die Streifen sehr lang werden. Bei großem Winkel α oder spröden Lebensmitteln bricht der Schälstreifen in kurze Stücke. Mit einem Höcker auf der Klinge in Schneidennähe kann der Ablenkwinkel des Streifens künstlich vergrößert werden, um wiederholtes Brechen des Streifens absichtlich zu fördern (Streifenbrecher).

Durch eine Schrägstellung der Schneide - d.h. die Schneidkante liegt nicht senkrecht zur Richtung der Relativbewegung - tritt eine zusätzliche Geschwindigkeitskomponente in Schneidkanten-Längsrichtung auf, die den Schälvorgang erleichtern kann (Zusatzbewegung, Kap. 2.1.1).

Besitzt das abzuschälende Lebensmittel (z.B. Kartoffel) konvexe bzw. runde Form ($R = \text{Radius}$), so können mit einem Schälgerät, welches eine geradlinige Schneide besitzt, nur entsprechend schmale Streifen abgetrennt werden (Abb. 22/7).

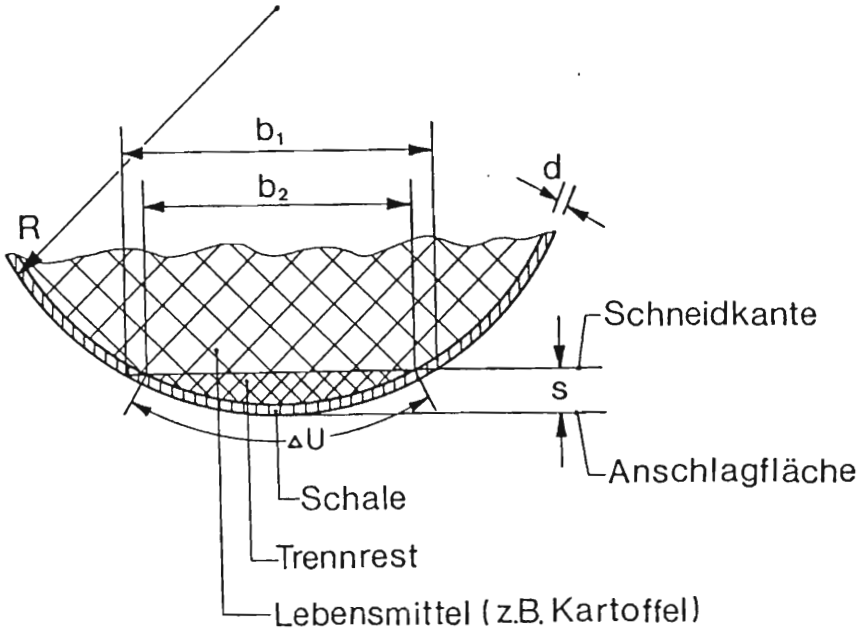


Abb. 22/7: Zur Geometrie des Schälens mit einem Schälmesser

Ist der Anschlag im Abstand s zur Schneide angeordnet, so kann ein Streifen der Breite

$$b_1 = 2 \sqrt{(2R - s) s} \quad (22.12)$$

abgetrennt werden. Besitzt die Schale die Dicke s , dann wird nur die Breite

$$b_2 = 2 \sqrt{(2R - s) s - (2R - d) d} \quad (22.13)$$

des Lebensmittels von der Schale befreit. Demgemäß ergibt sich ein entsprechend langer Schälweg

$$L \sim \frac{1}{s} ,$$

um das gesamte Lebensmittel von der Schale zu trennen. Nach diesem Schälen sind die Querschnittsebenen des übrig bleibenden Lebensmittels teilweise polygonförmig. Ist der Abstand s nicht größer als die Schalendicke d , so wird beim erstmaligen Schälvorgang das Innere des Lebensmittels überhaupt nicht freigelegt, und für $s = d$ ergibt sich $b_2 = 0$ (Gl. 22.13).

Je größer die Streifendicke s , umso kürzer wird der erforderliche Schälweg L , aber umso größer ist der Trennrest m_R . Bei einem kugelförmigen Lebensmittel berechnet sich dessen Querschnittsfläche

$$A_R = \frac{1}{2} \left[(R - d) \Delta U - (R - s) b_2 \right]. \quad (22.14)$$

Für die Näherung Umfangsabschnitt $\Delta U \approx$ Breite b_2 vereinfacht sich

$$A_R \approx \frac{1}{2} \Delta U (s - d). \quad (22.15)$$

Demnach ist die Querschnittsfläche A_R des Trennrestes klein, wenn die Streifendicke s nur wenig größer als die Schalendicke d ist.

Der Trennrest entfällt völlig bei einem Trennverfahren ohne Schälmesser, welches sich bei Lebensmitteln mit weniger fest haftender Schale oder Haut anwenden läßt (z.B. Orangen). Bei sehr dicken Schalen empfiehlt es sich, diese senkrecht zu ihrer Oberfläche einzuschneiden (Beanspruchungsart SCHNITT). Die so entstehenden Schalenteile lassen sich leicht lösen.

Bei dünnen aber fest haftenden Schalen kann in einigen Fällen mit thermischer Vorbehandlung (Dampfbad) der Halt zwischen Schale und innerem Lebensmittel verringert werden.

Bei Lebensmittel mit harten Schalen hingegen kann mit der Beanspruchungsart DRUCK die Schale zertrümmert werden. Eine

Abstandsbegrenzung der Wirkflächen ist jedoch notwendig, um ein unbeabsichtigtes Zerkleinern des Lebensmittelinneren zu verhindern.

Beim SCHÄLEN mit stochastischem Schnitzeln, Raspeln oder Reiben werden Stoffteilchen von der Oberfläche eines Lebensmittels abgetrennt (SCHÄLEN durch Abrieb). Somit wird die außenliegende Schale nach und nach zerkleinert und abgetragen. Dieser Schalenabrieb wird nur in seltenen Fällen weiter verwendet (z.B. bei Zitronen als "Zitronat"). Im Gegensatz zum SCHÄLEN mit systematischem Schneiden oder Schnitzeln wird hier die Oberfläche nicht gezielt, sondern stochastisch abgetrennt. Zwangsläufig werden dabei einige Bereiche des Lebensmittels mehrmals bearbeitet und andere - insbesondere bei zu kurzer Wirkdauer - überhaupt nicht. Um ein weitgehend allseitiges SCHÄLEN des Lebensmittels zu gewährleisten, muß daher die Wirkdauer hinreichend lang gewählt werden. Dementsprechend groß ist aber der Trennrest m_R , der in den meisten Fällen als Verlust anzusehen ist.

Ähneln die Form des Ausgangslebensmittels nicht der Form von Kugel oder Ellipsoid, sondern besitzt die Oberfläche konkav gekrümmte Bereiche, so sind bei mechanischen Schälvverfahren große Lebensmittelverluste zu erwarten.

Die erforderliche Antriebsenergie ist bei langer Wirkdauer entsprechend groß. Eine Erwärmung des Lebensmittels in Gegenwart von Wasser wird vermieden. Das Wasser schwemmt nämlich nicht nur die Trennreste bzw. den Abrieb weg und bewegt das Lebensmittel im Wirkraum, sondern es kühlt auch Werkzeug- und Lebensmittelflächen.

Die Oberflächen der nach dem Reibverfahren geschälten Lebensmittel sind wesentlich rauher und damit größer als die-

jenigen, welche mit "schneidenden" Werkzeugen geschält wurden. Wegen des damit verbundenen stärkeren Nachdunkelns (z.B. bei Kartoffeln durch enzymatische Bräunung) ist eine sofortige Weiterverarbeitung der "reibgeschälten" Lebensmittel empfehlenswert (120).

GERÄTEBEISPIELE für das Verfahren SCHÄLEN

Abgesehen von einigen Sonderkonstruktionen haben sich neben HANDSCHÄLERN mit feststehender Klinge (95) vor allem solche mit schwenkbarer Klinge bewährt. Dabei führt die Arbeitshand lediglich den Rahmen des Schälers, drückt dabei das schwenkbare Teil des Schälers mit Klinge an die Oberfläche des Lebensmittels in der Haltehand und zieht diesen mit der Geschwindigkeit v über die Oberfläche (Abb. 22/8). Die Kräfte im Wirkungsbereich des Schälers stellen sich dabei selbsttätig ein, insbesondere ergibt sich die erforderliche Andruckkraft F_1 am Anschlag zwangsläufig aus der Resultierenden F_2 aller Schneid-, Reib- und Umlenkkräfte an der Schneide.

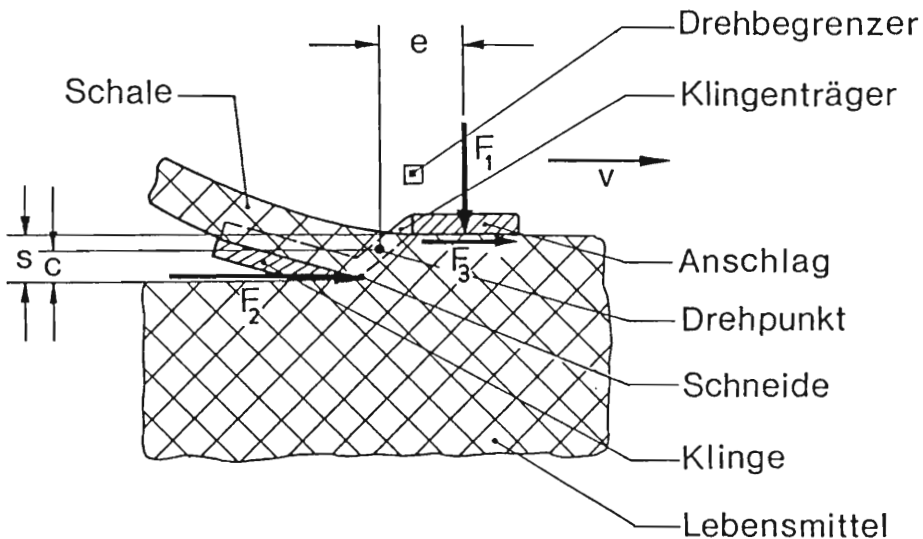


Abb. 22/8: Kräftespiel und Geometrie an einem Schälwerkzeug mit drehbar gelagerter Klinge

Mit der Reibungskraft am Anschlag

$$F_3 = \mu F_1 \quad , \quad (22.16)$$

wobei μ = Reibungsbeiwert zwischen Anschlag und Lebensmitteloberfläche,

lautet das Momentengleichgewicht um den Drehpunkt des Schwenkteils

$$F_2 c - F_1 e - F_3 (s - c) = 0 \quad . \quad (22.17)$$

Somit ergibt sich aus der Geometrie des Schälers die Anschlagskraft

$$F_1 = F_2 \frac{c}{e + \mu (s - c)} \quad (22.18)$$

Da im Nenner der zweite Term $\mu (s - c)$ gegenüber e vernachlässigt werden kann, ist die Anschlagkraft F_1 immer positiv und etwa um den Faktor e/c kleiner als die Klingenkraft F_2 . Der Schäler paßt sich daher automatisch der Kontur des zu schälenden Lebensmittels an.

Auch SCHÄLGERÄTE werden im Haushalt eingesetzt, die dabei unvermeidlichen Trennreste bzw. Lebensmittelverluste sind jedoch merklich größer als beim Handschäler. SCHÄLGERÄTE sind meist Zusatzgeräte zu KÜCHENMASCHINEN. Das Arbeitsgefäß besitzt einen nahezu zylindrischen Mantel, dessen Innenfläche ebenso wie die angetriebene Bodenscheibe mit harten Korundkörnern belegt ist (Abb. 22/9). Rotiert die Bodenscheibe, so nimmt deren raue Oberfläche die Lebensmittel durch Reibung teilweise mit. Wegen der kegeligen Bodenform und wegen der auftretenden Zentrifugalkräfte werden sie auch nach außen auf die feststehende Gefäßwand geschleudert. Das unvermeidliche Gleiten der Lebensmittel auf den Reibflächen verursacht Abrieb am Lebensmittel.

Um den Verlust, d.h. den zusätzlichen Abrieb an bereits geschälten Lebensmittelbereichen bei diesem stochastischen Verfahren zu begrenzen, darf die Wirkdauer nicht zu lang sein. Ein Nachschälen, Ausschneiden bzw. Entfernen der sog.

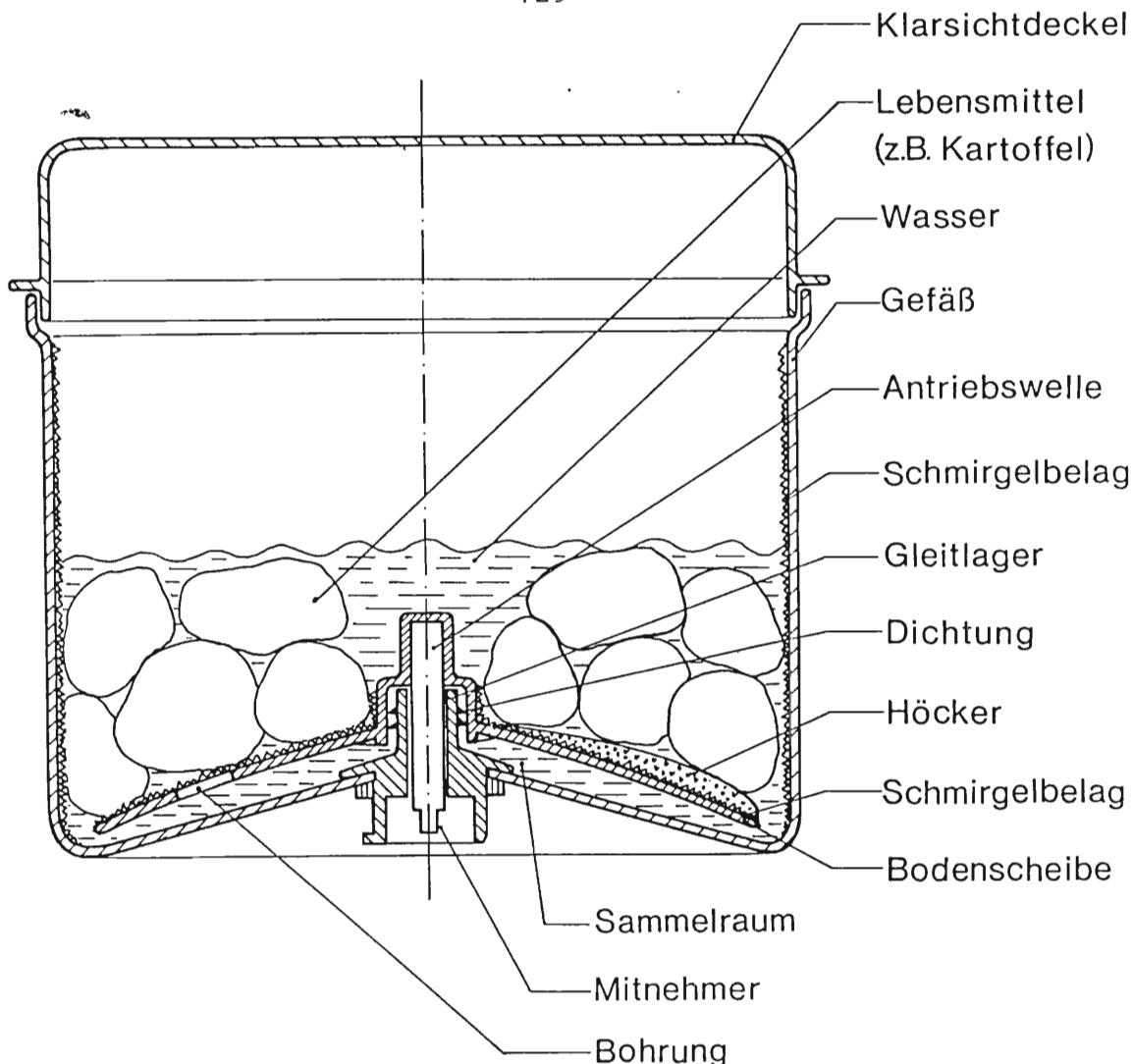


Abb. 22/9: Schälgerät mit korundbeschichteten Wirkflächen für Fremdantrieb (Stand-Küchenmaschine)

"Augen", z.B. bei Kartoffeln, von Hand, ist bei diesem Gerät unerlässlich.

Anstelle des beschriebenen Korundbelages gibt es auch Schäleinsätze aus Metall, ähnlich wie beim Verfahren REIBEN. Die Wirkungsweise ist auch bei diesen Werkzeugen ähnlich, jedoch lassen sich Metalleinsätze leichter reinigen und sind aus hygienischen Gründen den Einsätzen mit Korundbelägen vorzuziehen (120).

Sollen mit diesem Schälgerät auch Lebensmittel länglicher Form wie Gelbe Rüben oder Schwarzwurzeln geschält werden, so sind diese Lebensmittel vorher zu zerkleinern. Nur kurze Lebensmittelstücke können nämlich bei diesem Schälverfahren die notwendige allseitige Eigendrehung ausführen.

2.2.3 PASSIEREN

Definition: Trennen eines Lebensmittels weicher Konsistenz in Grobgut und Feingut bei gleichzeitigem Zerkleinern und Homogenisieren (Beispiele: Tomaten - gekocht, Äpfel - gekocht, Stachelbeeren).

Das Verfahren PASSIEREN beruht, physikalisch gesehen, auf einem völlig anderen Prinzip als das eben behandelte SCHÄLEN. Bei Lebensmitteln, bei denen es um die Entfernung dünnhäutiger Schalen geht, dienen aber beide Verfahren demselben Arbeitsziel. Solche Lebensmittelgemische sind den SPEZIAL-Systemen einzuordnen (Tab. 22/2).

Beim PASSIEREN drücken Stempel, Stab oder Schnecke das weiche Lebensmittel an Siebflächen, kneten es und pressen es teilweise durch die Löcher des Siebes. Wirkt ein Passierstempel mit der momentanen Geschwindigkeit v_A (Schrägbewegung) auf die viskose Lebensmittelmasse, so bildet sich zwischen Stempelfläche und Siebfläche ein Druck aus (Abb. 22/10).

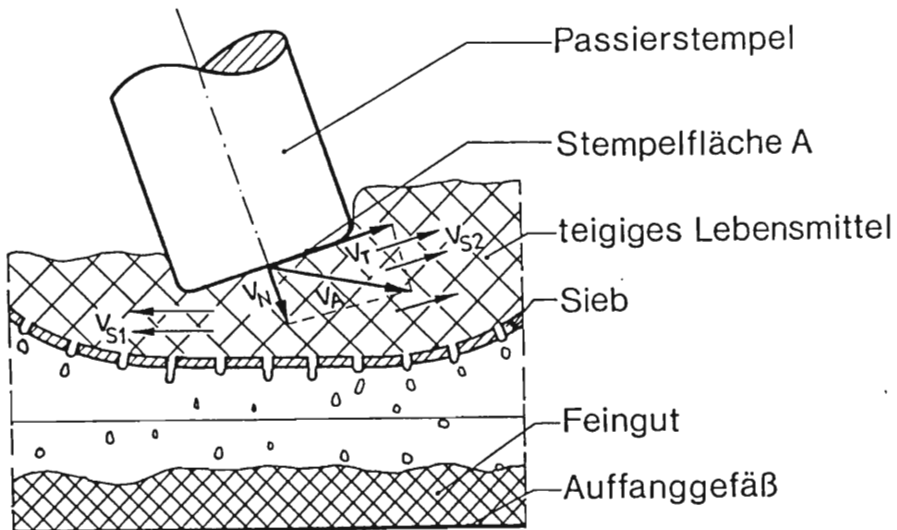


Abb. 22/10: Passieren eines Lebensmittels durch ein Sieb mit bewegtem Stempel (Geschwindigkeiten v_A , v_N , v_T , v_{S1} und v_{S2})

Dieser Druck ist umso größer, je schneller der Stempel mit der Geschwindigkeit v_N bewegt wird, je größer die Stempel­fläche A ist und je geringer der noch freie Durchlaß der Siebfläche im Stempelbereich ist. Bei diesem Verfahren muß die wirksame Stempel­fläche sehr nahe an die Siebfläche herangeführt werden, damit das Lebensmittel nicht ohne weiteres die Möglichkeit hat, den Wirkraum seitlich zu verlassen (seitliche Geschwindigkeitskomponenten v_{S1} und v_{S2}).

Durch die Siebfläche können nur Lebensmittelteilchen treten, bei denen zumindest eine Querschnittsfläche kleiner ist als die Öffnung der Sieblöcher. Besitzt das Lebensmittel häutige Schalen, Kerne oder Stiele, so werden diese je nach Lochquer­schnitt zurückgehalten und verstopfen möglicherweise nach und nach die Sieblöcher. Deshalb soll der Durchmesser D dieser Löcher auf die Art des Lebensmittels abgestimmt sein. Richt­werte aus der Praxis sind (120):

- Beerenfrüchte und Kartoffeln: $D \approx 1,5$ mm
- Tomaten und Äpfel: $D \approx 2,0$ mm
- Kernobst und dgl.: $D \approx 2,5$ mm.

Durch wiederholtes Streichen des Passierwerkzeuges mit einer Bewegungskomponente v_T (Tangentialgeschwindigkeit) parallel zur Siebfläche können die groben Lebensmittelreste, z.B. Schalen, teilweise von den Löchern wieder weggeschoben werden. Ist dies nicht möglich, so müssen die Löcher der Sieb­fläche in bestimmten Zeitabständen vom Grobgut befreit werden (intermittierender Betrieb).

Beim PASSIEREN dringt der Stempel wiederholt in das Lebens­mittel ein, dieses wird durchgeknetet und im Normalfall mit hoher Geschwindigkeit durch die Sieblöcher gepreßt. Dadurch wird das Gut zusätzlich zerkleinert und auch homogenisiert.

GERÄTEBEISPIEL für das Verfahren PASSIEREN

Beim PASSIERGERÄT - es ist meist ein Zusatzgerät zu KÜCHENMASCHINEN - rotiert mit niedriger Drehfrequenz eine Passierschnecke und erfaßt das weiche Lebensmittel (Abb. 22/11).

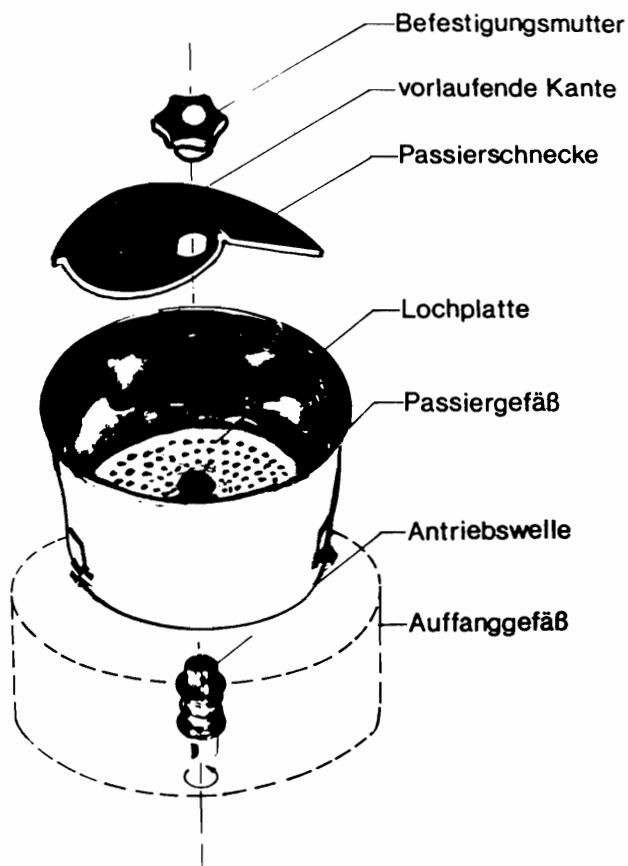


Abb. 22/11: Passiergerät für Fremdantrieb (Zusatzgerät zur Stand-Küchenmaschine) in Explosionsdarstellung

Da Schneckenfläche und Bodenfläche sich relativ zueinander bewegen, das Lebensmittel aber hauptsächlich an der "rauen" Lochplatte Halt findet, werden entsprechend dem enger werdenden Raum zwischen Schnecke und Lochplatte Druckkräfte

auf das Lebensmittel ausgeübt. Diese pressen Lebensmittelteilchen - sofern sie hinreichend klein sind - durch die Löcher hindurch in das Auffanggefäß. Nicht hinreichend zerkleinerte Lebensmittelreste (Grobgut) bleiben oberhalb der Lochplatte liegen und müssen von Hand entfernt werden. Lebensmittel, welche einen erheblichen Anteil an Grobgut besitzen (z.B. ungeschälte Kartoffeln, Beerenobst) können nur in kleinen Mengen (Chargen) bearbeitet werden. Nach jedem Durchlauf müssen die Öffnungen der Lochplatte wieder von Rückständen befreit werden (intermittierender Betrieb).

2.2.4 ABSETZEN

Definition: Trennen einer Lebensmittel-Emulsion oder -Suspension in Komponenten unterschiedlicher Dichte (Beispiel: fette Brühe, Eiweiß - Eigelb, Rahm - Milch).

Während die bisher beschriebenen Trennverfahren für Lebensmittel mit fester bis weicher Konsistenz vorgesehen sind, muß beim ABSETZEN das Lebensmittelgemisch flüssig sein, d.h. das System ist eine EMULSION oder SUSPENSION (Tab. 22.2).

Voraussetzung für das Absetzverfahren ist ein Dichteunterschied der zu trennenden Stoffkomponenten (61). Ein Körper, z.B. ein Öltröpfchen oder ein festes Körnchen (disperse oder innere Phase), mit dem Volumen V und der Dichte ρ_K befindet sich in einer Flüssigkeit, z.B. Wasser (Dispersionsphase oder äußere Phase) mit der Dichte ρ_F (Abb. 22/12). Ist der Körper in Ruhe, so wirkt auf ihn im Schwerfeld der Erde (g = Fallbeschleunigung) nach unten die Gewichtskraft

$$F_G = \rho_K V g \quad (22.19)$$

und nach oben die Auftriebskraft der Flüssigkeit

$$F_F = \rho_F V g . \quad (22.20)$$

Die Differenz beider ist die Sinkkraft

$$F_S = V (\rho_K - \rho_F) g . \quad (22.21)$$

Sie ist nach unten gerichtet, wenn der Körper dichter als die Flüssigkeit ist, d.h.

$$\rho_K > \rho_F \quad (22.22)$$

und der Körper sinkt ab, andernfalls ist die Kraft nach oben gerichtet und der Körper steigt auf.

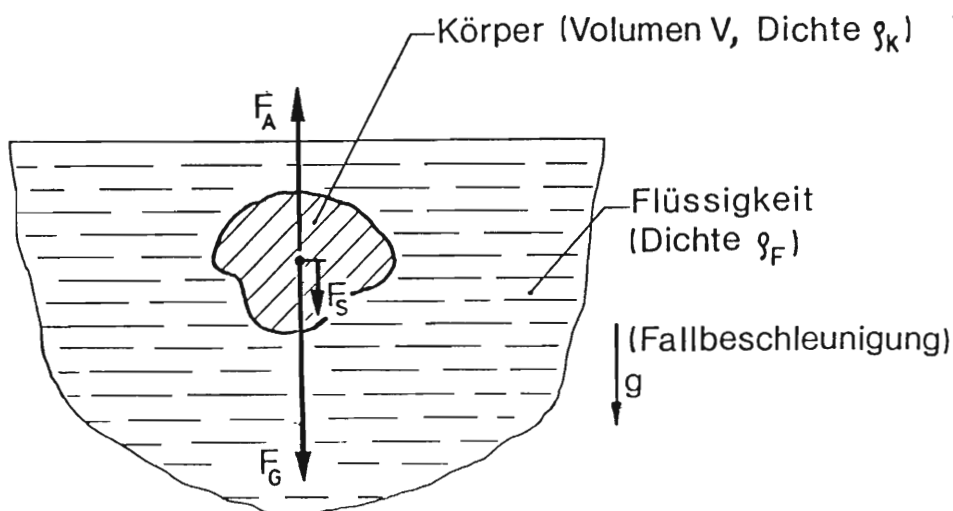


Abb. 22/12: Sinkkraft F_S eines Körpers in einer Flüssigkeit

Der Körper (Masse m), der anfangs in Ruhe war, erfährt zunächst die Beschleunigung

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{F_S}{\rho_K V} \quad (22.23)$$

Sobald aber der Körper eine Geschwindigkeit v besitzt, muß dieser von der Flüssigkeit umströmt werden, was die geschwindigkeitsabhängige Widerstandskraft F_W hervorruft. Dementsprechend reduziert sich die Beschleunigung

$$a = \frac{F_S - F_W}{\rho_K V} \quad (22.24)$$

oder wird sogar Null, wenn die Sinkkraft gleich der Widerstandskraft ist. Der Körper besitzt dann seine maximale Endgeschwindigkeit v_E .

Für einen kugelförmigen Körper ergibt sich die Widerstandskraft

$$F_W = \zeta A \frac{\rho_F}{2} v^2 \quad (22.25)$$

dabei ist ζ = Widerstandsziffer (Newton-Zahl)

A = Anströmfläche des Körpers

ρ_F = Dichte der Flüssigkeit

v = Geschwindigkeit (der Strömung) (61).

Da wegen der niedrigen Geschwindigkeit beim Absetzen laminare Umströmung angenommen werden kann, errechnet sich für einen kugelförmigen Körper die Widerstandsziffer

$$\zeta = \frac{24}{\text{Re}} = \frac{24 \eta}{v D \rho_F}, \quad (22.26)$$

wobei Re = Reynoldszahl (bereits ersetzt)

und η = dynamische Viskosität der Flüssigkeit.

Bei der Endgeschwindigkeit v_E gilt

$$F_W = F_S. \quad (22.27)$$

Mit der Gleichung (22.21) sowie dem Volumen

$$V = \frac{\pi D^3}{6} \quad (22.28)$$

und der Anströmfläche

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad (22.29)$$

ergibt sich

$$v_E = \frac{D^2 (\rho_K - \rho_F) g}{18 \eta}. \quad (22.30)$$

Diese Gleichung zeigt, daß die dynamische Viskosität η der umgebenden Flüssigkeit (Dispersionsphase) klein sein muß, wenn die Absetzgeschwindigkeit groß sein soll (70). Nimmt die Viskosität mit wachsender Temperatur stark ab, wie dies von Fetten und Ölen bekannt ist, so beschleunigt eine hohe Temperatur das ABSETZEN.

Das treibende Gefälle ist zunächst der Dichteunterschied ($\rho_K - \rho_F$). Das bedeutet, daß sich z.B. Feststoffkörper (gleicher Durchmesser) mit großer Dichte rascher absetzen als solche mit weniger großer Dichte. Beim Absetzen von Körpern verschiedener Dichte tritt somit eine zusätzliche Schichtung innerhalb der Ablagerung auf.

Beim Absetzen durchläuft z.B. eine Suspension (fest-flüssig-Gemisch) mehrere Zustände (77). Während zu Beginn eine homogene Suspension vorliegt (Abb. 22/13a), bildet sich kurze Zeit später eine obere Schicht mit einer feststofffreien Flüssigkeit und eine zweite Schicht, die der Ausgangs-Suspension identisch ist. Manchmal entsteht eine dritte dünne Schicht, es handelt sich dabei um eine Übergangsschicht unterschiedlicher Konzentration sowie eine vierte Schicht aus abgesetztem Feststoff (Abb. 22/13b).

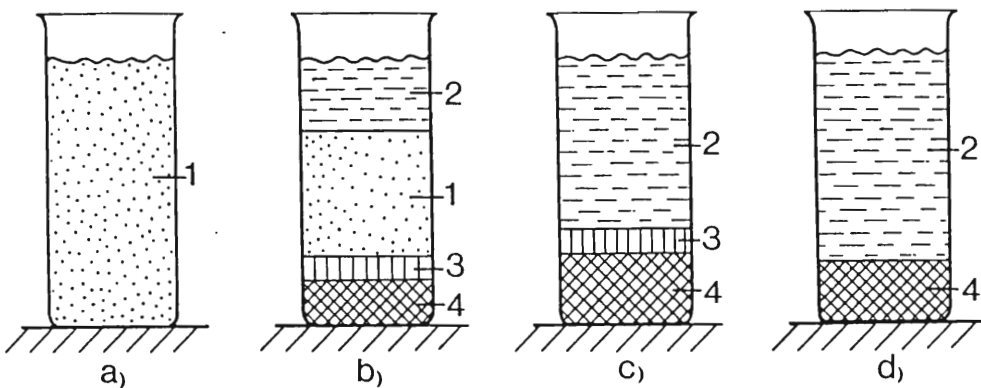


Abb. 22/13: Absetzen einer Suspension in der zeitlichen Folge a bis d. 1 = Anfangs-Suspension, 2 = klare Flüssigkeit, 3 = Übergangsschicht, 4 = sedimentierter Feststoff

Nach längerer Zeit ist die Ausgangs-Suspension völlig verschwunden (Abb. 22/13c) und schließlich auch die Übergangsschicht, so daß der Absetzvorgang als beendet angesehen werden kann (Abb. 22/13d).

Ist die Dichte einer Feststoffart größer, die einer anderen kleiner als die der gemeinsamen Flüssigkeit (Dispersionsphase), so setzt sich die erste Feststoffart ab, und die zweite schwimmt auf. Auf diese Weise können z.B. schlechte, hohle Erbsen von den vollen getrennt werden.

Um diesen Effekt nutzen zu können, muß manchmal die Dichte der gemeinsamen Träger-Flüssigkeit erst eingestellt werden (Schwerflüssigkeitsverfahren). Bei Wasser kann dies bereits durch Zugabe von Kochsalz (NaCl) erreicht werden (Ungeziefer in Blumenkohl).

Die Absetzgeschwindigkeit wird auch vom Teilchen-Durchmesser D und zwar als D^2 beeinflusst (Gl. 22.30). Dies bedeutet, daß sich große Teilchen wesentlich rascher absetzen als kleine Teilchen. Demzufolge ist bei Feststoffen einheitlicher Dichte das Trennverfahren ABSETZEN auch nach Teilchengröße möglich.

Bei sehr kleinen Teilchen (Größenordnung $D \approx 0,1 \mu\text{m}$) kommt jedoch das ABSETZEN kaum in Gang, da diese bereits durch die Stöße der Flüssigkeitsmoleküle (Brownsche Molekularbewegung) in Schwebe gehalten werden.

ABSETZEN ist auch unmöglich, wenn durch Umrühren oder Schütteln die Flüssigkeit in heftiger Bewegung bleibt. Analog kann eine entmischte EMULSION (z.B. Fett in Wasser) oder SUSPENSION (z.B. Mehl in Wasser) durch Umrühren wieder gemischt werden.

GERÄTEBEISPIELE für das Verfahren ABSETZEN

Im Haushalt dienen meist gewöhnliche Kochgeschirre unter Ausnutzung der Schwerkraft zum ABSETZEN. Das Verfahren wird auf diese Weise zur Gewinnung von Fett, Kartoffelstärke oder Eiweiß verwendet.

2.2.5 FILTRIEREN

Definition: Trennen einer Lebensmittel-Suspension in Flüssigkeit (Filtrat) und Feststoffteilchen (Filterkuchen) (Beispiele: Kaffeepulver - Wasser, Quark - Molke, Nudeln - Wasser).

Das Klär-Filtrieren dient zum Reinigen der Flüssigkeit, der darin vorher enthaltene Feststoff wird meist nicht weiter verwertet. Umgekehrt soll beim Scheide-Filtrieren der Feststoff gewonnen werden, wohingegen die Flüssigkeit meist nicht weiter verwendet wird. In beiden Fällen wird das zu filtrierende Gut (Suspension) auf ein Filtermittel (Filter: Tuch, Papier, Filz, poröse Keramik, Drahtgewebe, Siebbleche) gegeben, welches Poren bzw. Kanäle besitzt. Wirkt eine hinreichend große Druckdifferenz Δp zwischen der Vorder- und Rückseite des Filtermittels, so bildet sich in dessen Kanälen eine Strömung aus.

Sind die Durchmesser bzw. die Öffnungen der Kanäle kleiner als die Abmessungen der Feststoffteilchen, so werden letztere zurückgehalten und nur die reine Flüssigkeit - das sog. Filtrat - fließt durch das Filtermittel. Dies ist die im Haushalt meist übliche Oberflächen-Sieb- oder Membranfiltration. Setzen sich Feststoffteile auf dem Filtermittel ab und bilden einen Kuchen, der durchströmt werden muß und Filterwirkung besitzt, so wird dies auch als Kuchenfiltration bezeichnet (1).

Im Gegensatz dazu würden bei der Tiefenfiltration kleine Feststoffteilchen lediglich im Inneren des Filtermittels festgehalten werden. Besitzen die Poren und Kanäle des Filtermittels enge Querschnitte, so ist die Strömungsgeschwindigkeit klein und die Strömung laminar. Nach dem Gesetz von HAGEN und POISEUILLE errechnet sich dabei in einem Kanal die

mittlere Strömungsgeschwindigkeit

$$v = \frac{D^2}{32\eta} \frac{\Delta p}{l} \quad , \quad (22.31)$$

wobei D = mittlerer Durchmesser des Kanals
 η = dynamische Viskosität des Filtrats
 Δp = Druckverlust am Filtermittel
 l = Länge des Kanals (Abb. 22/14).

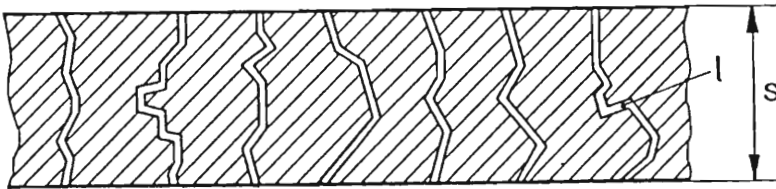


Abb. 22/14: Schematische Darstellung einer Filterschicht (77)

Damit ergibt sich in einem Kanal der Volumenstrom

$$\dot{V} = \frac{D^2 \pi}{4} v \quad . \quad (22.32)$$

Besitzt das Filtermittel n Kanäle je Flächeneinheit, so errechnet sich mit der Gleichung (22.32) bei einer Filterfläche A (Projektionsfläche) der gesamte Volumenstrom

$$\dot{V} = n A \frac{D^4 \pi}{128 \eta} \frac{\Delta p}{l} \quad . \quad (22.33)$$

Diese Beziehung zeigt, daß vor allem der Durchmesser (vierte Potenz) der Filterkanäle den Volumenstrom des Filtrats bestimmt, während alle übrigen Größen sich nur linear auswirken. Dabei wurde vereinfacht angenommen, daß alle Kanäle näherungsweise gleiche Durchmesser und gleiche Längen aufweisen.

Verwendet man die experimentell bestimmbare Filterkenngröße

$$k = \frac{128 l}{\pi n D^4 s} \quad , \quad (22.34)$$

wobei man anstelle der Kanallänge l vorzugsweise die Filterdicke s einführt, so ergibt sich der Volumenstrom

$$\dot{V} = \frac{A \Delta p}{\eta k s} . \quad (22.35)$$

Im Verlauf der Filtration lagern sich zunehmend Feststoffteilchen vor dem Filtermittel ab und bilden den sog. Filterkuchen, der wie ein zweiter Filter wirkt und dem Filtrat einen zusätzlichen Strömungswiderstand entgegensetzt (70). Besitzt der Filterkuchen die Filterkenngröße k_2 , dessen Schichtdicke s_2 ständig zunimmt und ordnet man dem ursprünglichen Filter den Index 1 zu, so ergibt sich ein Volumenstrom

$$\dot{V} = \frac{A \Delta p}{\eta (k_1 s_1 + k_2 s_2)} . \quad (22.36)$$

In einigen Fällen der Praxis kann die Filterwirkung des Kuchens sogar größer sein als die des ursprünglichen Filtermittels. Wird der Kuchen unter der Kraft des wirksamen Druckgefälles zusätzlich komprimiert, so erhöht sich besonders bei feinkörnigen oder leicht verformbaren Feststoffen der Strömungswiderstand erheblich. Letzteres tritt auch ein, wenn sich feine Feststoffteilchen in den Poren und Kanälen des Filtermittels ablagern und dieses nach und nach verengen bzw. zusetzen (unerwünschte Innenfiltration).

Daher darf der Filterkuchen nicht zu dick werden und muß ggf. entfernt werden. Nach der Art dieses Kuchenaustrags lassen sich Filterverfahren analog wie Auspreßverfahren in intermittierend und in kontinuierlich arbeitende Verfahren einteilen. Während bei den erstgenannten der Prozeß unterbrochen werden muß, um den Filterkuchen zu entfernen, wird bei kontinuierlich arbeitenden Verfahren der Kuchen ständig entfernt. Letzteres ist in zuverlässiger Weise bei rotierenden Geräten möglich, wobei die Zentrifugalbeschleunigung auch zur Erhöhung des Filterdruckes genutzt wird (vgl. ZENTRIFUGIEREN, Kap. 2.2.7).

Im Haushalt werden - wegen der Einfachheit der Geräte - meist Filterverfahren angewandt, bei denen die Druckdifferenz am Filter von der Schwerkraft des Filtrats herrührt. Dabei ändert sich meist der Füllstand im Vorratsbehälter und demgemäß der hydrostatische Druck am Filter (Abb. 22/15).

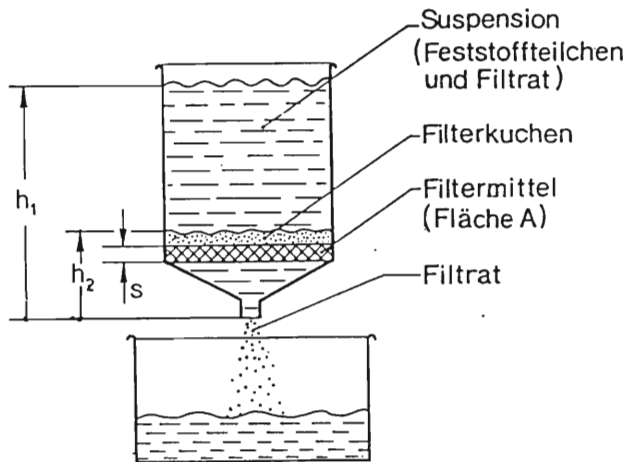


Abb. 22/15: Filtrieren mit variabler Druckdifferenz am Filtermittel durch systembedingte Veränderung der Flüssigkeitshöhe im Vorratsbehälter

Sinkt der Füllstand h um dh , so wurde das Flüssigkeitsvolumen

$$dV = -A dh \quad (22.37)$$

filtriert, wobei A = Fläche des Vorratsbehälters und des Filters ist. Nimmt man an, daß die SUSPENSION einen sehr geringen Feststoffgehalt aufweist (z.B. Kaffee) und der entstehende Filterkuchen zudem sehr durchlässig ist, so errechnet sich näherungsweise (gemäß Gleichung 22.35) ein Volumenstrom

$$\dot{V} = \frac{dV}{dt} = \frac{A \Delta p}{\eta k s} \quad (22.38)$$

Dabei ist η = dynamische Viskosität des Filtrats

k = Filterkennwert

s = Dicke des Filtermittels

Δp = Druckdifferenz, mit

$$\Delta p = \rho g h \quad (22.39)$$

und ρ = Dichte des Filtrats
 g = Fallbeschleunigung
 h = geodätische Höhe.

Setzt man die Gleichungen (22.37) und (22.39) in (22.38) ein, so ergibt sich

$$\dot{V} = - \frac{A \, dh}{dt} = \frac{A \, \rho \, g \, h}{\eta \, k \, s} \quad (22.40)$$

oder

$$- \frac{dh}{h} = \frac{\rho \, g}{\eta \, k \, s} \, dt \quad (22.41)$$

Nach Integration erhält man

$$\ln \frac{h_1}{h_2} = \frac{\rho \, g}{\eta \, k \, s} \, t \quad , \quad (22.42)$$

wobei Strömungsverluste außerhalb des Filtermittels vernachlässigt wurden. Während der Suspensionsspiegel von der Höhe h_1 auf h_2 absinkt und dabei das Volumen

$$V = (h_1 - h_2) \, A \quad (22.43)$$

filtriert wird, verstreicht die Zeit

$$t = \frac{\eta \, k \, s}{\rho \, g} \ln \frac{h_1}{h_2} \quad . \quad (22.44)$$

Kurze Zeiten ergeben sich demnach für Lebensmittelgemische mit kleiner Viskosität η , für kleinen Filterkennwert k sowie kleiner Filterdicke s . Auch mit der Geometrie des Filtersystems, z.B. mit der Lage der Ausflußöffnung, welche den Wert für h_2 mitbestimmt, läßt sich die Filtrierzeit beeinflussen.

Nicht immer werden kurze Zeiten für den Filtriervorgang angestrebt. Findet unmittelbar vor oder während des Filtrierens eine Extraktion statt, so muß die Filtrierzeit entsprechend der erforderlichen Extraktionszeit festgelegt werden. Bei einer Fest-Flüssig-Extraktion (z.B. bei Kaffee

oder Tee) müssen die Feststoffteilchen eine bestimmte Zeit mit dem aufgegossenen heißen Wasser in Kontakt sein (Verweildauer), damit die gewünschten Stoffe in hinreichender Konzentration ins Wasser übertreten können.

Derartige Stoffe können z.B. Coffein, Tein, Tannin, Gerbsäuren oder Polyphenole sein. Beim Aufbrühen von Tee z.B. geht das auf den Menschen anregend wirkende Tein sehr rasch, das beruhigend wirkende Tannin - ein Polyphenol - deutlich später in Lösung (Abb. 22/16).

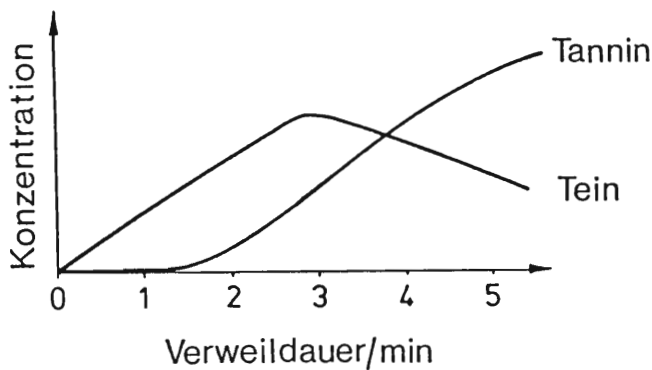


Abb. 22/16: Konzentration der Teebestandteile Tein und Tannin in Abhängigkeit der Verweildauer von Teeblättern im Heißwasser

GERÄTEBEISPIELE für das Verfahren FILTRIEREN

Beim haushaltsüblichen Kaffee-Tee-Automat, hier als AUFBRÜH-AUTOMAT bezeichnet, erfolgt das FILTRIEREN bei gleichzeitigem Extrahieren (Abb. 22/17). Aus einem Geysir-Pumpsystem fließt heißes Wasser durch Düse und Einlauftrichter in das Filtergut, welches innerhalb einer Filtertüte im Filtertrichter gelagert ist (offenes System). Ab diesem Zeitpunkt beginnt der Extraktionsprozeß. Bei nachfolgendem FILTRIEREN werden Festbestandteile, deren Abmessungen größer als die Porenöffnungen des Filtermittels sind, in der Filtertüte zurückgehalten und die Flüssigkeit (Filtrat) sowie sehr winzige Teilchen dringen durch das Filter und gelangen in das Sammelgefäß (24) (25) (26).

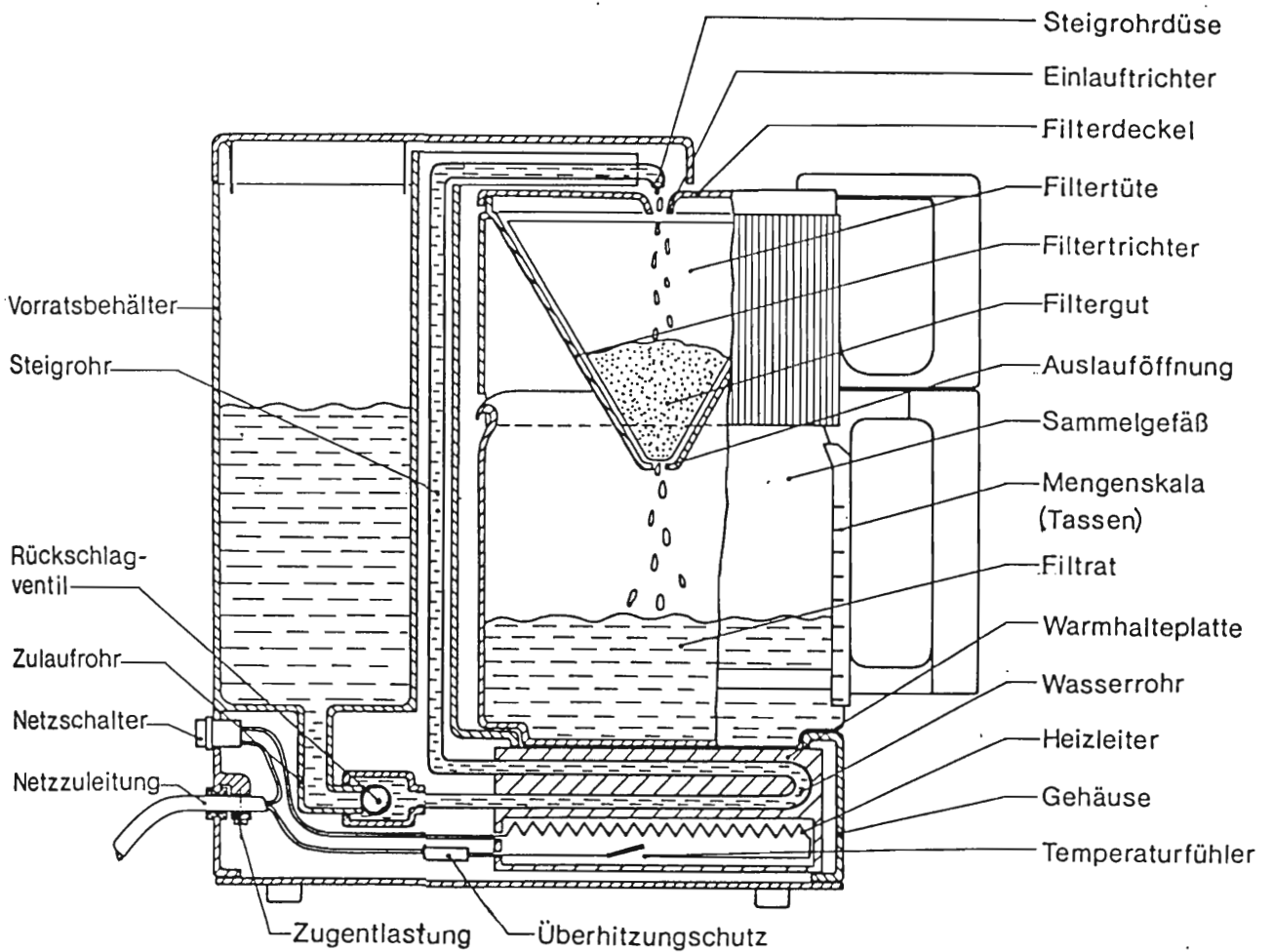


Abb. 22/17: Aufbrüh-Automat mit Elektroheizung im Einsatz (Vertikalschnitt)

Die Wassertemperatur beträgt in der Heizzone systembedingt unter atmosphärischem Druck beim Ausstoß nahezu 100°C (offenes System). Die maximal erreichbare Temperatur (Aufgußtemperatur) im Filtergut liegt aber wegen verschiedener Kühl-effekte deutlich niedriger (Abb. 22/18), Kurve a).

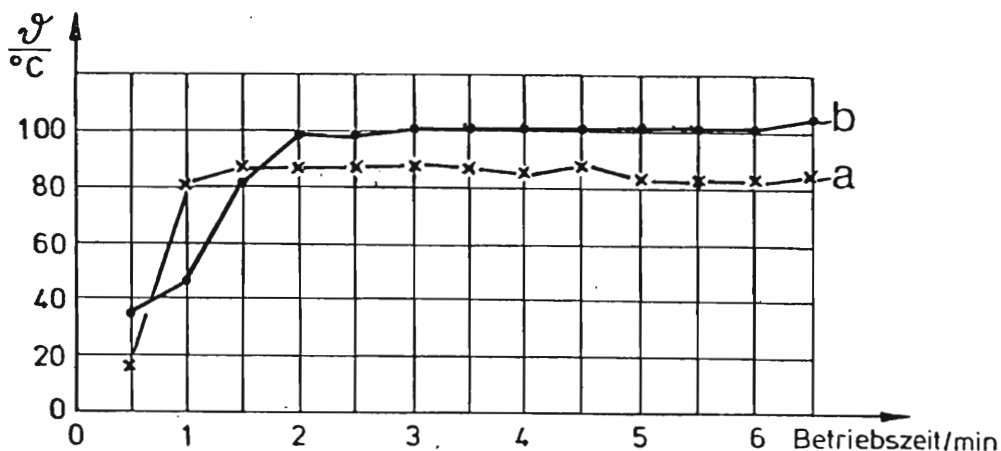


Abb. 22/18: Aufgußtemperatur \mathcal{T} in Abhängigkeit der Betriebszeit bei einem offenen System (Kurve a) und einem geschlossenen System (Kurve b)

Bei sog. geschlossenen Systemen strömt das heiße Wasser nicht wie bisher beschrieben frei aus, sondern das Steigrohr ist gegenüber dem Filtersystem abgedichtet. Bei Betrieb entsteht im System ein Überdruck, was eine entsprechend höhere Siedetemperatur und demgemäß höhere Aufgußtemperatur zur Folge hat (Abb. 22/18, Kurve b). Damit läßt sich die erwähnte Abkühlung des Wassers kompensieren und die Temperaturen können je nach Druck im Filtersystem deutlich oberhalb von 100°C liegen.

Dieser verfahrenstechnische Mehraufwand wird nicht wegen eventuell kürzerer Filtrierzeiten aufgrund des höheren Drucks angesetzt, sondern wegen der höheren Suspensionstemperaturen (Dampfdruckkurve). Bei der Kaffee- oder Tee-Extraktion gehen nämlich bei höheren Temperaturen andere Bestandteile (z.B. ätherische Öle oder Polyphenole) in Lösung als bei niedrigeren Temperaturen. Diese Tatsache hat erhebliche Bedeutung für die sensorische Qualität des Filtrats bei Kaffee oder Tee.

2.2.6 AUSPRESSEN

Definition: Trennen eines Lebensmittels (Mark) in Flüssigkeit (Saft) und Feststoffe (Trester); (Beispiele: Zitronen, Äpfel, Tomaten, Johannisbeeren).

Um Flüssigkeiten von festen Lebensmitteln zu trennen, genügt in einigen Fällen bereits die Wirkung der Schwerkraft wie beim eben beschriebenen Verfahren FILTRIEREN. Bei groben Filtermitteln wie Drahtsiebböden oder Lochblechen spricht man im Haushalt auch vom Seihen oder Abseihen. Sind die Flüssigkeiten jedoch stärker an das Lebensmittel gebunden, z.B. im Fruchtfleisch, so ist zusätzlich ein Druckzustand erforderlich, um die Flüssigkeit freizusetzen. Derartige Lebensmittelgemische werden unter der Systembezeichnung MARK eingeordnet (Tab. 22/2).

Ein zusätzlicher Druck kann in einer Zentrifuge (ZENTRIFUGIEREN, Kap. 2.2.7) entstehen oder in einem Preßkolben erzeugt werden (Abb. 22/19). Wirkt ein Kolben mit der Kraft F und der Stirnfläche A auf ein flüssigkeitshaltiges Lebensmittel, welches in einem Zylinder eingeschlossen ist, so bildet sich der allseitige Überdruck

$$p = \frac{F}{A} \quad (22.45)$$

aus (Abb. 22/19). Dabei verformen sich die Lebensmittelteilchen, so daß die vorhandene Flüssigkeit verdrängt wird und durch die Löcher des Siebes den Preßraum verläßt. Die vor den Sieblöchern liegenden Lebensmittelreste können wie ein Filter wirken, das Sieb teilweise verstopfen oder feine Festbestandteile gelangen durch die Löcher mit in die Flüssigkeit.

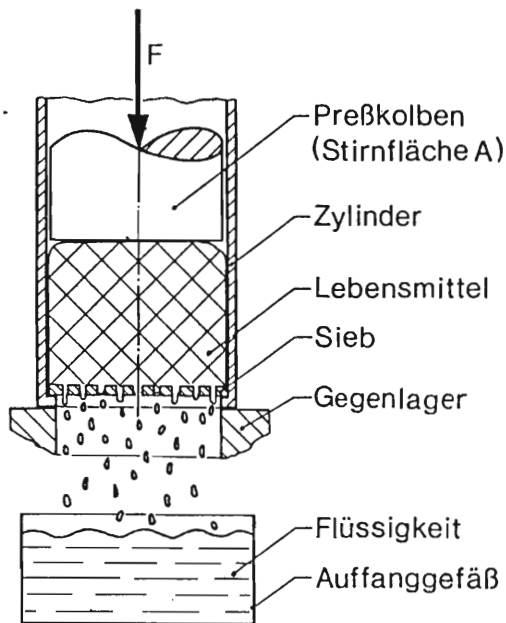


Abb. 22/19: Auspressen eines flüssigkeitshaltigen Lebensmittels durch Preßkolben

Die Saftausbeute

$$\gamma_u = \frac{m_u}{m_{ges}} \quad (22.46)$$

wobei m_u = ungesiebte Saftmenge und

m_{ges} = Gesamtmenge des verarbeiteten Lebensmittels

ist bei einunddemselben Lebensmittel und gleichem Zerkleinerungsgrad ein Maß für die Wirksamkeit des Verfahrens und kann zu vergleichenden Tests herangezogen werden.

Um vollständiges TRENNEN der Flüssigkeit von den Festbestandteilen des Lebensmittels zu erzielen, ist i.a. FILTRIEREN nachzuschalten.

Mit der Menge m_r des reinen Saftes läßt sich der Filterwirkungsgrad

$$\eta_F = \frac{m_r}{m_u} \quad (22.47)$$

angeben, der gleichzeitig ein reziprokes Maß für den Trübstoffgehalt ist. Für die Ausbeute φ_r an reinem Saft gilt demnach

$$\varphi_r = \eta_F \varphi_U = \frac{m_r}{m_{\text{ges}}} \quad (22.48)$$

Beim AUSPRESSEN von ganzen Früchten oder Fruchtstücken wird die im Fruchtfleisch enthaltene Flüssigkeit - sie ist als inkompressibel anzusehen - in einen Überdruck versetzt, der diese durch die Zellwände treibt bzw. letztere platzen läßt. Bei Verfahren mit zusätzlicher Deformation der Zellstruktur, z.B. mittels Preßkegel oder Walkrippen, bewirken örtliche Materialspannungen in den Zellwänden, auch durch Überlagerung mit den Spannungen aus dem Preßdruck, ein Zerstören der Struktur.

Schaltet man parallel oder vorweg zum Auspressverfahren ein Zerkleinerungsverfahren (z.B. REIBEN, Kap. 2.1.4), so ist die Gesamtoberfläche des Lebensmittels, an der Flüssigkeit austreten kann, entsprechend größer. Außerdem werden dabei Zellwände aufgerissen, was das Austreten der Flüssigkeit erleichtert.

Enthalten Früchte beim AUSPRESSEN noch harte Kerne, so sind diese bei kleinen bis mittleren Drücken als inkompressibel anzusehen. Ist das Volumen des Fruchtfleisches um ein Mehrfaches größer als das der festen Kerne, so beeinträchtigt die Gegenwart dieser Kerne das Auspreßverfahren nicht. Bei großem Kernanteil und hohen Drücken brechen harte Kerne. Kerne enthalten aber oft unerwünschte Bitterstoffe, die dann mit in den Saft gelangen können.

Da wegen der Elastizität des Lebensmittels eine Erhöhung der Drücke auch die Verformung verstärkt, beeinflußt die Größe des Preßdruckes wesentlich die Flüssigkeitsausbeute. Ein gewisser Flüssigkeitsdruck ist auch zur Überwindung der Strömungswiderstände notwendig, weshalb der Preßdruck auch die Entsaftungsdauer beeinflußt.

Beim AUSPRESSEN läßt sich nach Art der Druckerzeugung (Stempel, Hebel, Spindel, Schnecke, Walze) oder Art des Sieb- bzw. Filterkörpers (Siebkorb, Lochblech, Seiher, Mantel, Packung) und nach kontinuierlich oder intermittierend arbeitende Verfahren unterscheiden.

GERÄTEBEISPIELE für das Verfahren AUSPRESSEN

Einfachste Geräte sind ZITRUSPRESSEN, mit denen sich allerdings nur Lebensmittel mit fester, formstabiler Schale wie Zitrusfrüchte auspressen lassen. Der erforderliche Druck wird dabei zwischen der menschlichen Hand oder einer entsprechenden Hohlform und einer Preßkuppel erzeugt.

Bei Handgeräten wird entweder die Frucht zusätzlich gegenüber der Preßkuppel geringfügig gedreht oder eine Hohlform wird mittels einer Hebelübersetzung besonders kräftig angedrückt (Hebelpressen). Bei der elektrischen ZITRUSPRESSE wird die Preßkuppel über ein Getriebe von einem Elektromotor angetrieben (Abb. 22/20).

Entsprechend der Handkraft F_H und der Berührfläche zwischen Spitze der Preßkuppel und Lebensmittel entsteht ein Druckzustand unter dem - falls er hinreichend groß ist - die Kuppel in die Schnittfläche der Frucht eindringt. Unterstützt wird dies durch die örtliche Deformation des Fruchtfleisches, herrührend von der Relativbewegung der Walkrippen gegenüber dem Lebensmittel.

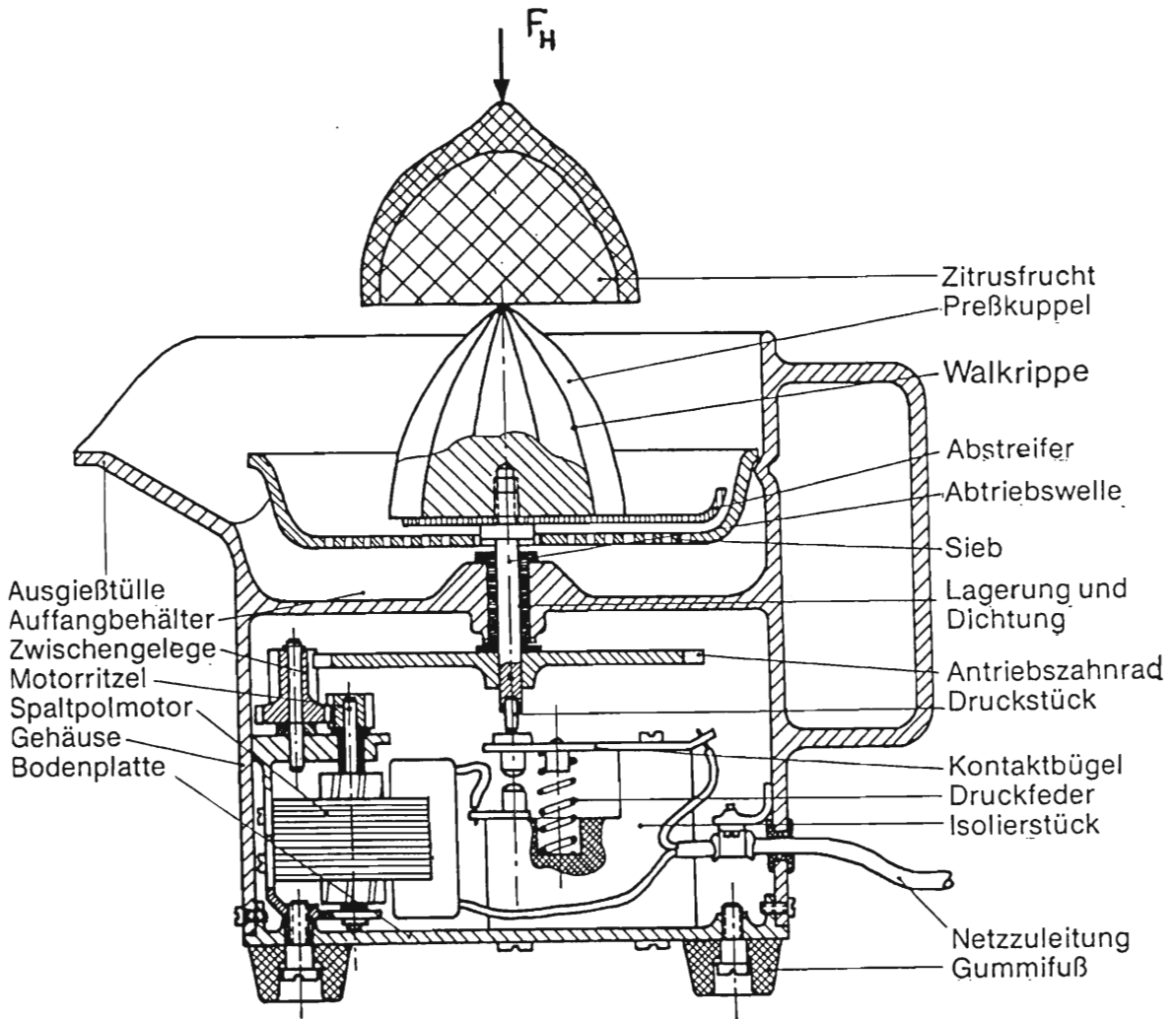


Abb. 22/20: Motor-Zitruspresse mit Zitrusfrucht
(Vertikalschnitt)

Der ausgepreßte Saft fließt unter dem Einfluß der Schwerkraft entlang der Walkrippen durch das Sieb in den Auffangbehälter. Ein mit der Kuppel rotierender Abstreifer hebt oder schiebt loses Fruchtfleisch von den Löchern weg. Die auswechselbare Preßkuppel muß bei diesem Verfahren der Größe der zu bearbeitenden Frucht bestmöglich angepaßt sein.

Bei Lebensmitteln ohne formstabile Schale kann der notwendige Druckzustand nur in einer allseitig begrenzten Druckkammer erzeugt werden. So arbeitende Pressen bezeichnet man als FRUCHTPRESSEN, die bei identischer Wirkungsweise hand-angetrieben oder motor-angetrieben sein können (Abb. 22/21).

FRUCHTPRESSEN MIT FÖRDERSCHNECKE - auch als Beerenpressen bezeichnet - sind vielfach Zusatzgeräte zum WOLF (vgl. Kap. 2.1.7). Anstelle von Messer und Lochblech des Wolfes werden dabei Zusatz-Förderschnecke und Preßmantel angesetzt.

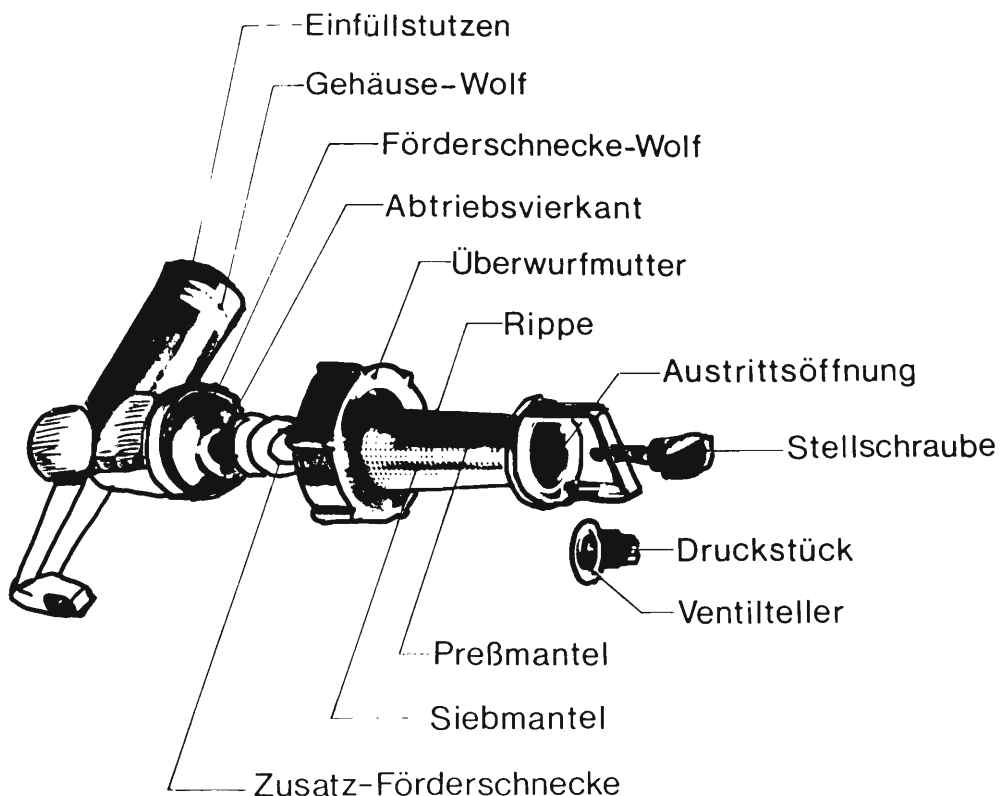


Abb. 22/21: Fruchtresse als Zusatzgerät zum Wolf in zerlegtem Zustand

Da sich der Preßmantel in Richtung seiner Austrittsöffnung verjüngt und sich gleichermaßen der freie Querschnitt der Zusatzschnecke verkleinert, erfährt das Lebensmittel im Wirkraum einen allseitigen Druck. Es wird komprimiert und Saft tritt durch das Sieb aus.

Wird der Druck an der Austrittsöffnung zu groß, öffnet sich ein Ventilteller entgegen der Kraft des elastischen Druckstücks, und die Festbestandteile (Trester) können austreten. Mittels Stellschraube läßt sich die Vorspannkraft am Druckstück und somit der Druck einstellen, bei dem der Ventilteller öffnet. Diese Stellschraube muß auch entsprechend der Konsistenz und des Saftgehaltes des Lebensmittels eingestellt werden. Je saftärmer das Preßgut ist (Viskosität), um so geringer soll die Vorspannkraft sein. Allerdings sind dann - um eine möglichst vollständige Saftausbeute zu erzielen - mehrere Preßvorgänge hintereinander durchzuführen. Das Entsaften mit der Fruchtpresse ist ein kontinuierliches Verfahren, da sowohl Saft als auch Trester ständig abgeführt werden.

Die dem Saft beigemischten Fettstoffteilchen erzeugen eine entsprechende Trübung (Trübe). Letztere ist hauptsächlich von der Vorspannung der Stellschraube und von der Größe der Siebfläche abhängig. Eine weitgehend klare Flüssigkeit (klarer Saft) kann nur mittels nachgeschaltetem FILTRIEREN erreicht werden.

Zur Beurteilung des Verfahrens AUSPRESSEN bzw. der zugehörigen Geräte werden bei experimentellen Untersuchungen meist

- Saftausbeute,
- Saftqualität (Vitamingehalt, Trübstoffgehalt),
- Durchsatzleistung und
- Arbeitszeit

herangezogen.

Beschränkt man sich zunächst auf das wichtige Beurteilungskriterium "Saftausbeute", so ergibt sich bei der FRUCHTPRESSE folgendes Bild (Abb. 22/22). Zu Beginn der Einbringzeit T_{EB} - in diesem Augenblick wird das Lebensmittel in das Gerät eingebracht - kann dem Gerät nicht sofort Saft entnommen werden. Etwas später allerdings nimmt die Ausbeute pro Zeitintervall stark zu.

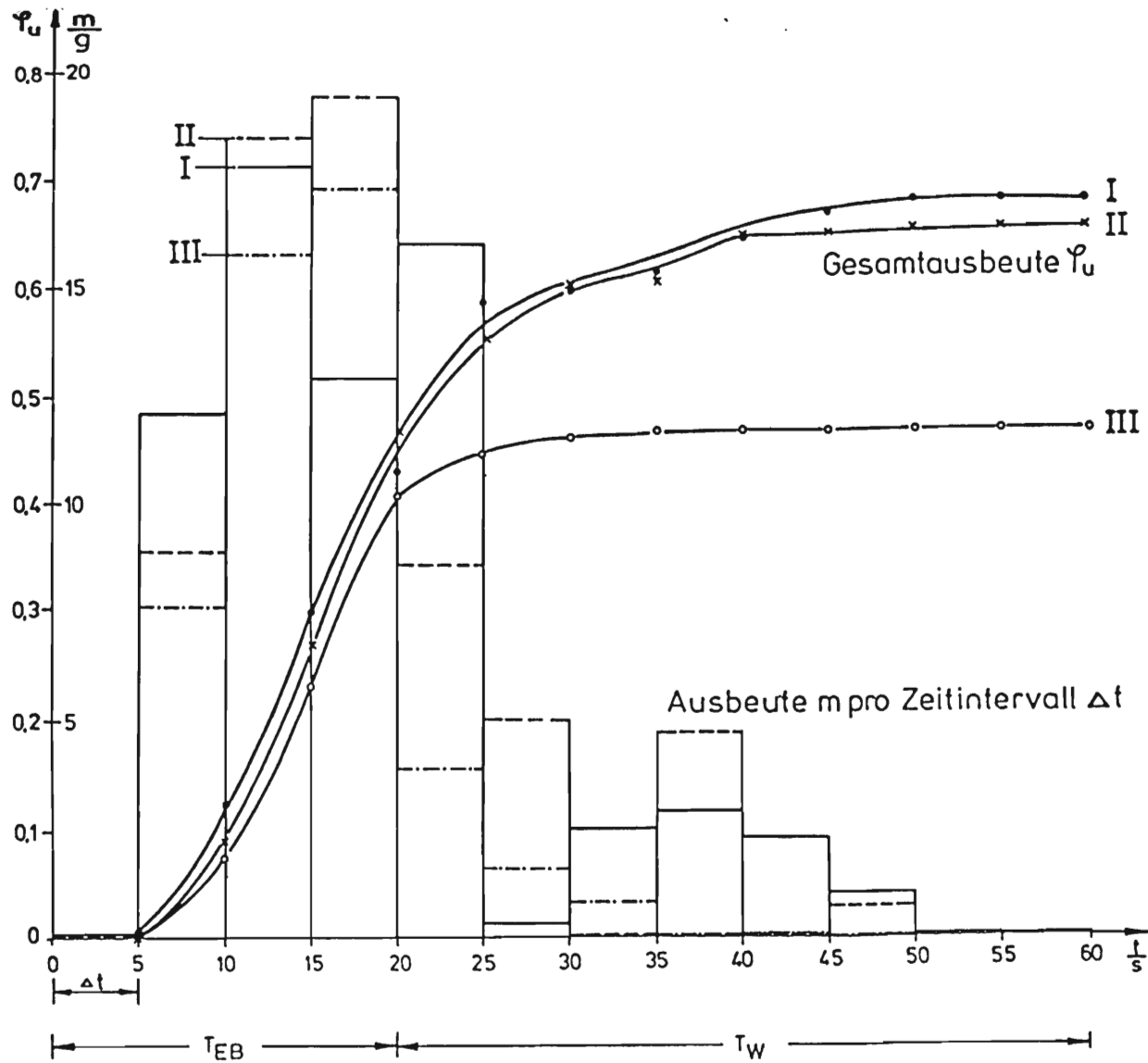


Abb. 22/22: Saftausbeute m pro Zeitintervall Δt und Gesamtausbeute φ_u in Abhängigkeit von der Zeit t bei Äpfeln mittels Fruchtpresse (T_{EB} = Einbringzeit, T_W = Wartezeit). Die Stellungen I, II und III der Druckschraube φ_{EB} entsprechen 1,5; T_W 2,0 und 2,5 Umdrehungen von geschlossener Stellung in Löserichtung (•, x Einzelmessungen; o Mittelwerte aus jeweils drei Einzelmessungen)

Wird kein Lebensmittel mehr eingebracht, so beginnt die Wartezeit T_W , in der immer noch etwas Saft aus dem Gerät fließt. Daher steigt die Gesamtausbeute - es ist mathematisch ausgedrückt das Integral über die Ausbeute pro Zeitintervall - erst nach einer gewissen Totzeit an und nähert sich asymptotisch der maximalen Gesamtausbeute. Letztere ist allerdings sehr stark von dem im Wirkraum der Presse herrschenden Druckzustand abhängig, der sich mit der Stellschraube am elastischen Druckstück beeinflussen läßt.

In der Stellung I ist diese Stellschraube nahezu ganz angezogen (größter Druck). In der Stellung III beispielsweise ist sie weniger stark angezogen (geringer Druck). Die größte Saftausbeute - bei dieser Messung wurden Äpfel ausgepreßt - ergab sich bei der Schraubenstellung I mit $\varphi_u = 0,68$.

Es zeigt sich jedoch, daß der Trübstoffgehalt bei dem beschriebenen Verfahren sehr stark vom Druckzustand in der Presse abhängig ist. In der Stellung I ergibt sich ein dickflüssiger, breiartiger Saft, da durch das grobe Sieb offensichtlich auch sehr viele Festbestandteile hindurchgehen. In den Schraubenstellungen II und III mit geringerem Druckzustand ist der Saft dünnflüssiger und der sogenannte Filterwirkungsgrad η_F ist hier demnach größer als in der Stellung I, wo unter den vorhandenen Versuchsbedingungen $\eta_F = 0,25$ gemessen wurde (vgl. Gl. 22.47). Saftausbeute und Trübstoffgehalt sind bei der FRUCHTPRESSE voneinander abhängig; sie sind in ihren Werten negativ korreliert.

2.2.7 ZENTRIFUGIEREN

Definition: Absetzen, Auspressen oder Filtrieren mittels Zentrifugalbeschleunigung (Beispiele: Äpfel, Möhren, Tomaten, Johannisbeeren).

Beim ZENTRIFUGIEREN nützt man die Zentrifugalbeschleunigung aus, die ein Vielfaches der Fallbeschleunigung sein kann. Demgemäß können nahezu alle Trennverfahren, die normalerweise die Fallbeschleunigung bzw. die Schwerkraft nutzen, durch Einsatz von Zentrifugen entsprechend beeinflußt werden. Dies gilt z.B. für ABSETZEN, FILTRIEREN oder AUSPRESSEN (Kap. 2.2.4, 2.2.5 oder 2.2.6). Im Haushalt wird es bei den Lebensmittelgemischen SUSPENSION, aber vor allem bei MARK angewandt (Tab. 22/2).

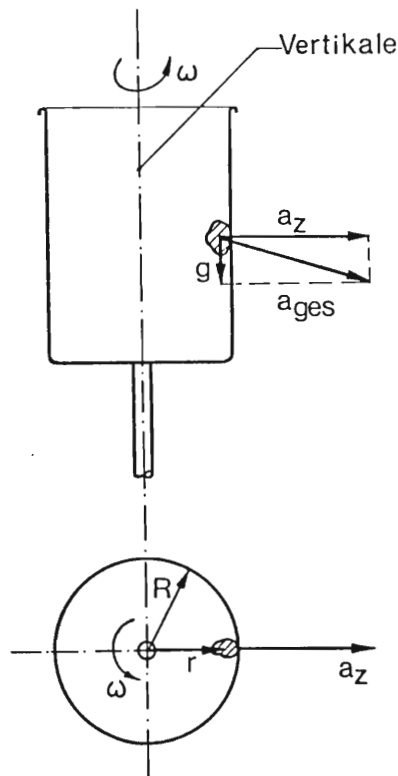


Abb. 22/23: Zentrifugalbeschleunigung a_z und Fallbeschleunigung g bei einer vertikal gelagerten Zentrifuge

Wird ein Lebensmittelteilchen von einer rotierenden Trommel mitbewegt (Abb. 22/23), so wirkt auf dieses Teilchen die Zentrifugalbeschleunigung

$$a_z = r \omega^2, \quad (22.49)$$

wobei r = Abstand des Massenmittelpunktes des Teilchens von der Drehachse

ω = Winkelgeschwindigkeit der Trommel.

Für sehr kleine Teilchen, die an der Trommelwand anliegen, ist $r \approx R$ und die wirkende Zentrifugalbeschleunigung ist gleich der Schleuderwirkung

$$a_{zA} = R \omega^2, \quad (22.50)$$

die eine Kenngröße zum Vergleich von Zentrifugen untereinander darstellt.

Als weitere Kennzahl dient häufig die Schleuderzahl

$$\chi = \frac{a_{zA}}{g}, \quad (22.51)$$

die das Vielfache der Schleuderwirkung bezogen auf die Fallbeschleunigung g repräsentiert.

Ist die Drehachse vertikal gerichtet, wie im Haushalt üblich, so ergibt sich die Gesamtbeschleunigung

$$a_{\text{ges}} = \sqrt{a_z^2 + g^2}, \quad (22.52)$$

die auf das Lebensmittelteilchen wirkt. Bei zylindrischem Trommelmantel ist hierbei meist nur die Zentrifugalbeschleunigung a_z als trennwirksam anzusehen, da die Fallbeschleunigung lediglich parallel zur Trommelwand wirkt und im Verhältnis sehr klein ist.

Zentrifugen für das Verfahren ABSETZEN, auch Sedimentation - hier Fliehkraftsedimentation - genannt, besitzen zylindrische Trommeln mit Vollmantel (Vollmantelzentrifugen). In diesen legen sich bei Rotation Flüssigkeiten bzw. Flüssigkeits-Feststoffgemische unterschiedlicher Dichte in Form von konzentrischen Hohlzylindern an und können so in einfacher Weise mittels Überlaufrohr bzw. Schälmesser getrennt werden.

Im Haushalt werden jedoch meist Verfahren wie AUSPRESSEN oder FILTRIEREN zur Trennung von Flüssigkeit und Feststoffgemisch angewandt, bei denen die Trommel einen konischen, oben enger werdenden Trommelmantel besitzt oder bei denen der Mantel wie ein Sieb gelocht ist (Siebmantelzentrifuge).

Im ersten Fall (Vollmantelzentrifuge) fließt die Flüssigkeit aufgrund der Fallbeschleunigung, ggf. unterstützt von einer Komponente der Zentrifugalbeschleunigung, nach unten und gelangt durch einen mehrfach unterbrochenen Ringspalt am unteren Trommelrand in einen Auffangbehälter.

Im zweiten Fall (Siebmantelzentrifuge) kann die Flüssigkeit durch die Lochung des Trommelmantels das rotierende System verlassen. Hierbei können der gelochte Mantel und vorgelagerte Feststoffteilchen Filterwirkung besitzen oder es ist ein spezielles Filtermittel am Trommelmantel vorgesehen. Der beim Zentrifugieren zur Verfügung stehende Druckunterschied zum Durchströmen der Filterkanäle ist um ein Vielfaches größer als beim Filtrier-Verfahren, bei dem lediglich die Fallbeschleunigung genutzt werden kann.

Die Schleuderzahl z kann allerdings nicht beliebig hoch gewählt werden, da die Zentrifugalbeschleunigung den Trommelmantel ebenfalls beansprucht. Bereits am Beispiel einer leeren, rotierenden Trommel (Vollmantelzentrifuge) läßt sich dies verdeutlichen (Abb. 22/24).

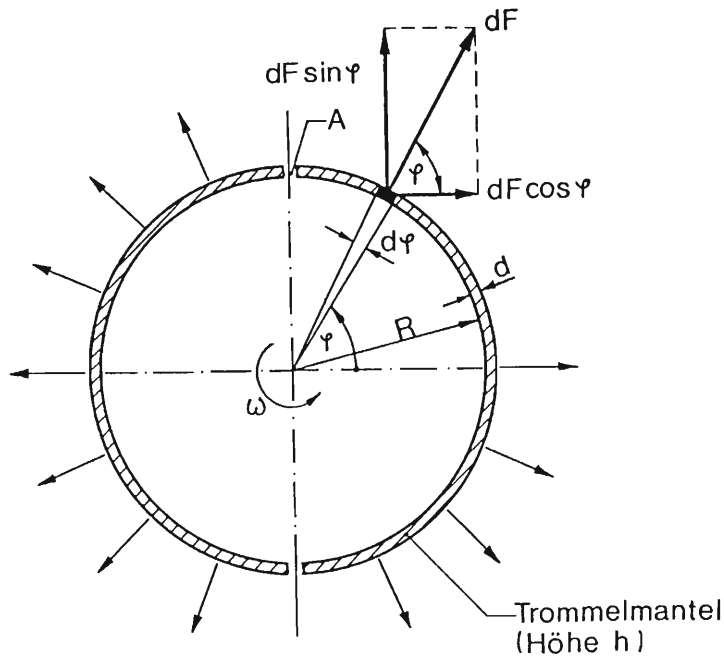


Abb. 22/24: Zur Berechnung der Beanspruchung einer rotierenden Vollmantel-Zentrifuge

Auf einen Massenstreifen dm der Trommel, dessen Lage mit dem Winkel φ beschrieben wird, wirkt die Zentrifugalkraft

$$dF = R \omega^2 dm \quad . \quad (22.53)$$

Dabei ist

$$dm = \rho h d R d\varphi \quad (22.54)$$

ω = Winkelgeschwindigkeit

R = Radius des Trommelmantels

ρ = Dichte des Mantelwerkstoffes

h = Höhe des Trommelmantels

d = Dicke des Trommelmantels .

Nimmt man den Querschnitt $A = h d$ als gefährdet an, so ist die zu A senkrecht wirkende Kraftkomponente $dF \cos \varphi$ maßgebend. Die Gesamtbelastung F_A für den Querschnitt A lie-

fert das Integral

$$F_A = R^2 \omega^2 \rho h d \int_{\varphi=0}^{\varphi=\frac{\pi}{4}} \cos \varphi d\varphi \quad (22.55)$$

und daraus

$$F_A = R^2 \omega^2 \rho h d . \quad (22.56)$$

Somit ergibt sich im Querschnitt A einer dünnwandigen Volltrommel die Zugspannung

$$\sigma = \frac{F_A}{A} \quad (22.57)$$

oder

$$\sigma = R^2 \omega^2 \rho . \quad (22.58)$$

Bei einer leeren Vollmantelzentrifuge erscheint demnach die Wandstärke d selbst nicht in der Gleichung für die Zugspannung.

Wird die Trommel gefüllt und liegt das Lebensmittel in unmittelbarer Wandnähe, so läßt sich mit der fiktiven Dichte ρ^* anstelle von ρ die hinzugekommene Masse berücksichtigen. Daher kann mit

$$\rho^* = \rho + \rho_L \frac{d_L}{d} , \quad (22.59)$$

wobei ρ_L = Dichte des Lebensmittels
 d_L = Dicke der Lebensmittelschicht an der Trommelwand,

die tatsächlich auftretende Zugspannung σ im Werkstoff berechnet werden. Bei der gefüllten Vollmantelzentrifuge ist demnach eine Mindestwandstärke d der Trommel erforderlich, um die Zugspannung σ dem Werkstoff entsprechend zu begrenzen.

Mit einem ähnlichen Korrekturfaktor wie mit der fiktiven Dichte ϱ^* läßt sich bei der Siebmantelzentrifuge die Schwächung der Trommel durch die Löcher berechnen.

Gleichung (22.58) liefert weiterhin das Ergebnis, daß für die Zugspannung \mathcal{G} sowohl die Winkelgeschwindigkeit ω als auch der Radius R quadratisch eingehen. In der Gleichung (22.50) für die Schleuderwirkung geht die Winkelgeschwindigkeit zwar ebenfalls quadratisch, der Radius hingegen nur linear ein. Folglich ist es wirksamer - sofern die maximale Zugspannung \mathcal{G}_{\max} des Trommelwerkstoffes die Winkelgeschwindigkeit begrenzt - Zentrifugen mit kleinem Trommeldurchmesser aber großer Winkelgeschwindigkeit einzusetzen.

Die Kombination beider Gleichungen zeigt quantitativ, daß die Schleuderwirkung

$$a_{ZA} = \frac{\mathcal{G}}{R \varrho} \quad (22.60)$$

bei gegebener Zugspannung \mathcal{G} (bzw. \mathcal{G}_{\max}) dann möglichst groß ist, wenn der Trommelradius R klein gewählt wird.

GERÄTEBEISPIELE für das Verfahren ZENTRIFUGIEREN

Im Haushalt werden ZENTRIFUGEN praktisch ausschließlich zum Entsaften von Lebensmitteln angewandt. Der dazu erforderliche Druckzustand bzw. die Deformation entsteht durch Zentrifugalkräfte der an die rotierende Trommel und aufeinander gepreßten Lebensmittelteilchen. Während das Filtrat meist kontinuierlich abgezogen werden kann, bereitet die Entfernung der Feststoffteilchen bzw. des Tresters Schwierigkeiten. Muß der Trester in gewissen Zeitabständen entfernt werden, so arbeitet die SAFTZENTRIFUGE intermittierend (30).

Gelingt es, stetig oder zumindest ohne Verfahrenspause, den Trester zu entfernen, so arbeitet die SAFTZENTRIFUGE kontinuierlich.

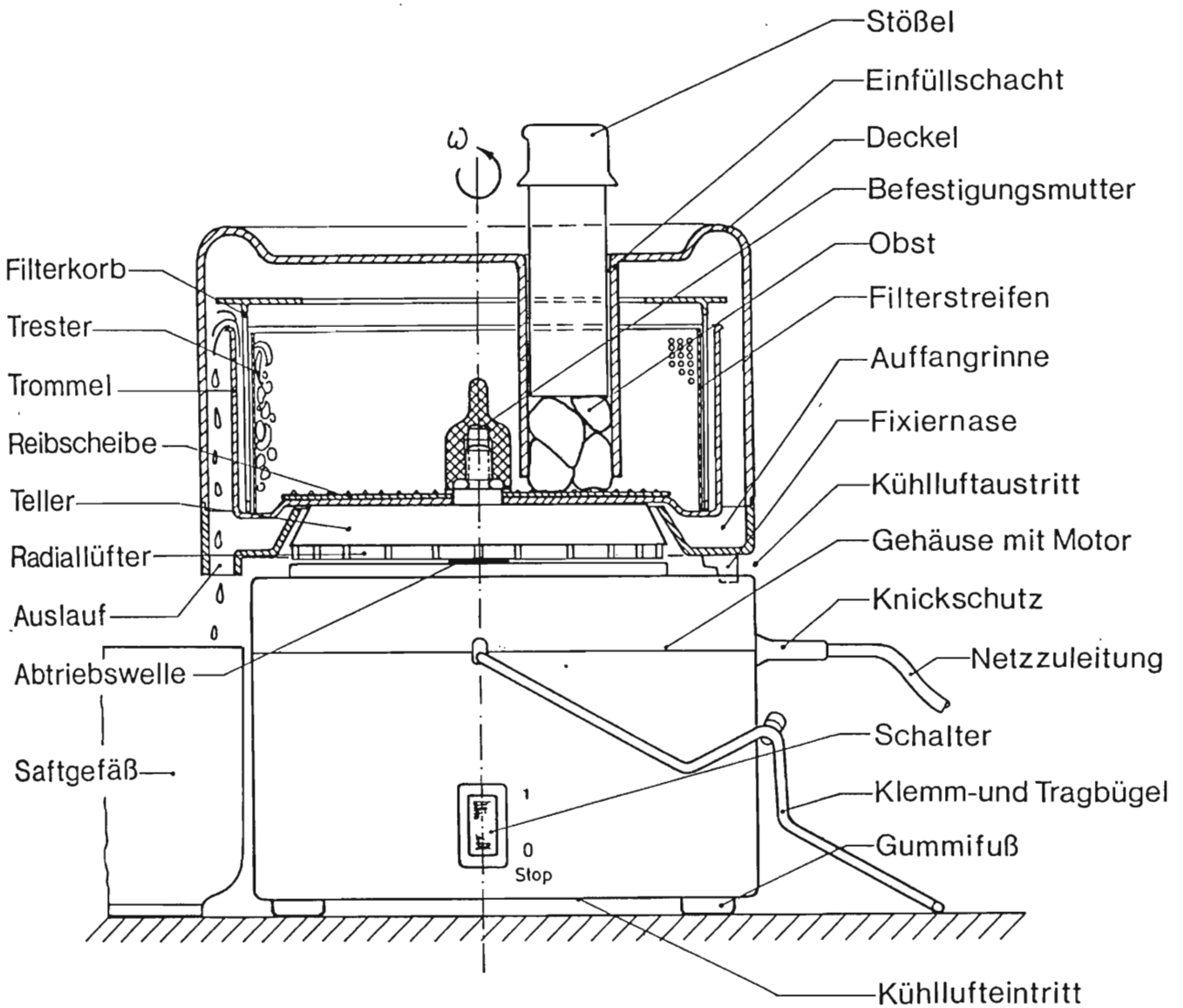


Abb. 22/25: Intermittierend arbeitende Saftzentrifuge mit Zylindertrommel im Einsatz (Vertikal-Teilschnitt)

Bei der intermittierend arbeitenden SAFTZENTRIFUGE werden die flüssigkeitshaltigen Lebensmittelteilchen bei Rotation der zylindrischen Trommel von Zentrifugalkräften an den Filterstreifen gedrückt (Abb. 22/25). Dabei verläßt ein Teil der Flüssigkeit das Lebensmittel, sie tritt durch die Löcher des Filterstreifens und durch die Schlitze des Filterkorbes nach

außen, während Feststoffpartikel zurückgehalten werden. Mit der Trommel gemeinsam rotiert eine Reibscheibe, deren Zahnung die Lebensmittel gleichzeitig zerkleinern kann (vgl. REIBEN, Kap. 2.1.4).

Haben sich sehr viele Feststoffteilchen (Trester bzw. Filterkuchen) am Filterstreifen abgelagert, so behindern diese zusätzlichen Strömungswiderstände das Abfließen der Flüssigkeit. Zudem ist die Zentrifugalbeschleunigung der Teilchen, die näher an der Drehachse liegen, entsprechend geringer. In gewissen Abständen muß daher das Verfahren unterbrochen werden (intermittierend) und im Stillstand der Trommel die abgelagerten Tresterreste (Filterkuchen) durch Herausnehmen des Filterstreifens entfernt werden (28). Außerdem führt die Trestermasse, falls sie nicht rotationssymmetrisch in der Trommel verteilt ist, zu starken Unwuchten und somit zu Schwingungen, deren Dämpfung problematisch ist (93).

Bei der kontinuierlich arbeitenden SAFTZENTRIFUGE werden meist kegelige Siebmanteltrommeln verwendet. Auch hier kann deren Boden als Reibscheibe ausgebildet sein, um das eingefüllte Lebensmittel zu zerkleinern (Abb. 22/26). Die Teilchen werden von der Reibscheibe mitgenommen und an die Trommelwand geschleudert. Dabei wirkt eine Zentrifugalbeschleunigung, welche den Saft durch die Löcher der Trommelwand drückt. Größere Teilchen werden an die Trommel-Innenwand gedrückt oder bewegen sich an dieser entlang.

Die Saftausbeute hängt vom Lebensmittel selbst (Flüssigkeitsgehalt, Konsistenz, usw.), von dessen Aufbereitung (Zerkleinerung), von der wirksamen Zentrifugalbeschleunigung, von der Gestaltung des Siebmantels und von der Zentrifugierdauer ab. Letztere zusammen mit der Bewegung der Lebensmittelteilchen an der Innenwand sind wiederum abhängig von der Form der Trommel - insbesondere von ihrem Neigungswinkel α (Abb. 22/27).

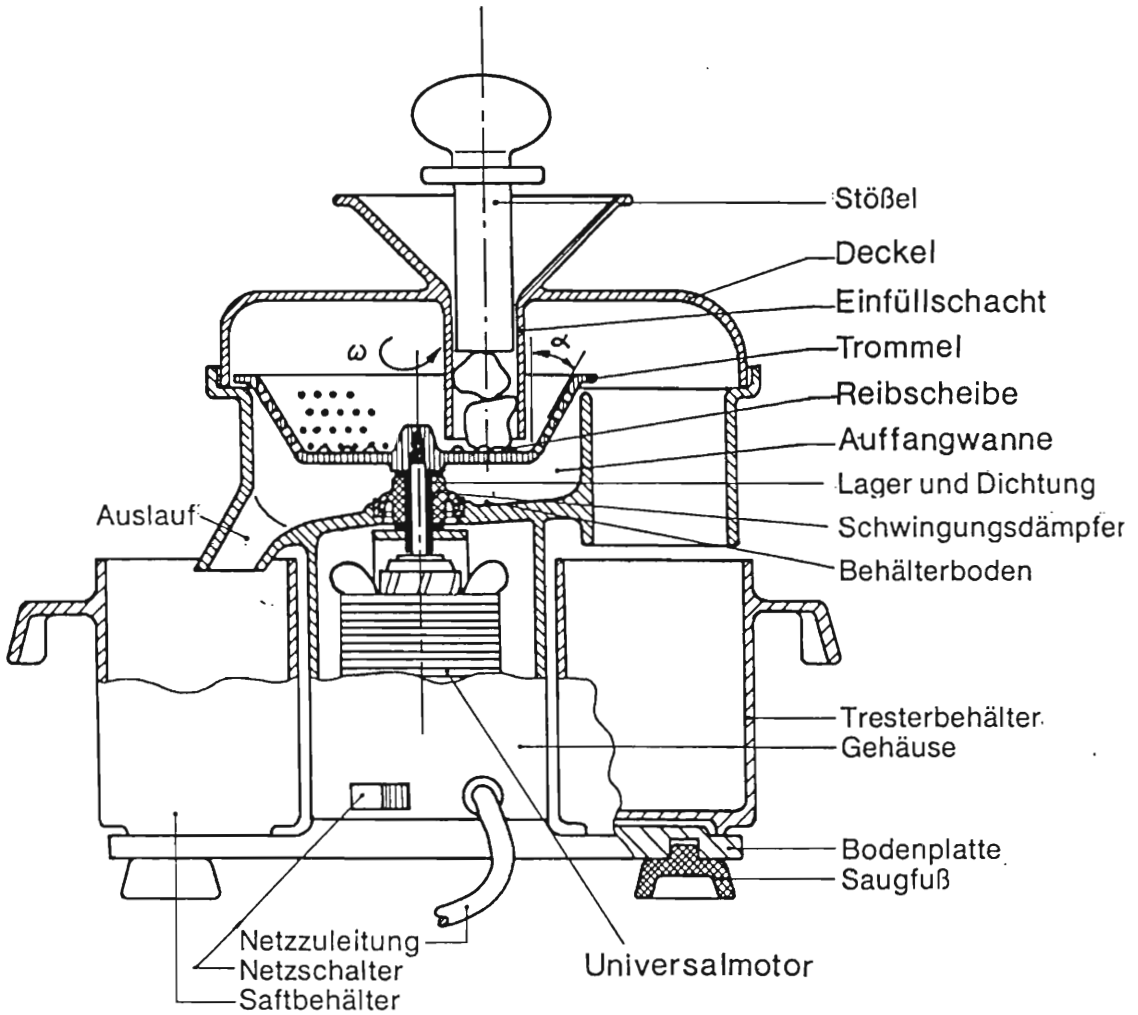


Abb. 22/26: Kontinuierlich arbeitende Saftzentrifuge mit Kegeltrommel im Einsatz (Vertikal-Teilschnitt)

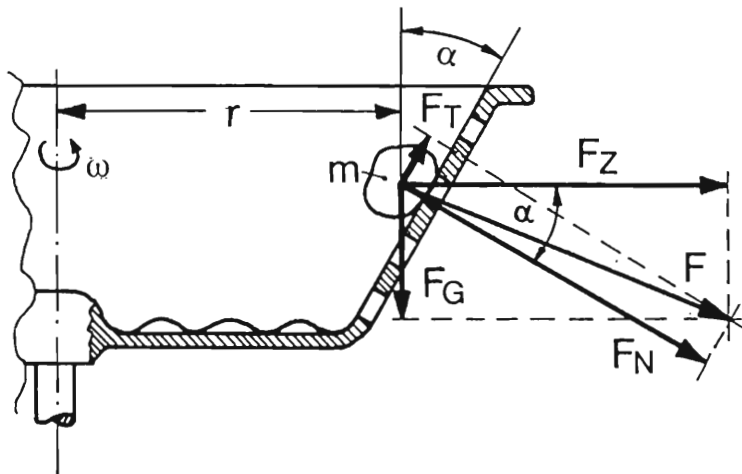


Abb. 22/27: Kraftwirkungen auf ein Teilchen der Masse m in einer vertikal rotierenden Kegeltrommel

Auf ein Teilchen (oder mehrere zusammengeklumpte Teilchen) wirkt im Abstand r von der Drehachse die Zentrifugalkraft

$$F_Z = m r \omega^2 . \quad (22.61)$$

Zusammengefaßt mit der Gewichtskraft

$$F_G = m g , \quad (22.62)$$

ist die Kraft F die Resultierende, mit der sich das Teilchen auf der Trommelwand abstützt. Diese Resultierende zerlegt man zweckmäßigerweise in zwei andere Komponenten; in eine Kraftkomponente F_N , mit der das Teilchen senkrecht auf die Wand gedrückt wird (Normalkomponente) und eine Komponente F_T , welche tangential zur Wand wirkt (Tangentialkomponente). Ist die Kraft F_T größer als die Reibungskraft

$$F_R = \mu F_N \quad (22.63)$$

(μ = Gleitreibungs- bzw. μ = Rollreibungsbeiwert), so gleitet oder rollt das Teilchen entlang der Wand. Erreicht es den oberen Trommelrand, so wird es tangential zum Trommelumfang in den Deckel geschleudert. Sofern es an letzterem nicht haften bleibt, fällt es in den Tresterbehälter oder in die Trommel zurück und wird erneut weggeschleudert.

Ist der Winkel α groß, so besteht die Gefahr, daß auch Flüssigkeit über den Trommelrand tritt; zudem ist die Verweildauer bzw. Zentrifugierdauer der Teilchen an der Trommelwand sehr kurz. Bei kleinem Winkel α ist die Kraft F_T möglicherweise zu klein, um das Teilchen entgegen der Reibungskraft F_R nach oben zu bewegen, und der Trester haftet an der Trommelwand. Lagert sich der Trester in größerer Menge ab, so gleiten zumindest im Bereich des Trommelrandes die Teilchen dennoch weg, so daß für neu auftretende Teilchen ein größerer Winkel α wirksam ist, wodurch das Abgleiten wieder erleichtert wird.

Je nach Kontinuität des Einfüllens wird der Trester mehr oder weniger gleichmäßig aus der Trommel geschleudert und im herausnehmbaren Tresterbehälter aufgefangen. Wegen dieser ständigen Entleerung der Trommel ist bis zur Füllgrenze der großen Saft- und Tresterbehälter ein kontinuierlicher Betrieb möglich (28).

Im Experiment wurden intermittierend und kontinuierlich arbeitende Verfahren miteinander verglichen. Wählt man zunächst die Saftausbeute als Beurteilungskriterium, wie dies auch beim AUSPRESSEN mit der Fruchtpresse geschah, so ergibt sich folgendes Bild (Abb. 22/28). Die kontinuierlich arbeitende Saftzentrifuge Z_K liefert nach einer geringen Totzeit zuerst etwas mehr Saft (Gesamtausbeute) als die intermittierend arbeitende Zentrifuge Z_I . Das gilt sowohl während der Einbringzeit T_{EB} als auch zu Beginn der Wartezeit T_W . Die maximale Gesamtausbeute schließlich ist jedoch bei der Zentrifuge Z_I größer.

Die auftretende Verzögerung bei dieser Zentrifuge Z_I erklärt sich aus den längeren Kanalwegen bzw. den größeren zu benetzenden Flächen, die der Saft durch- bzw. überstreichen muß. Dieser "Anlaufeffekt" verliert mit zunehmender Zentrifugierdauer seinen Einfluß.

Die Schleuderwirkung (Gl. 22.50) beträgt bei der intermittierend arbeitenden Zentrifuge Z_I $a_{ZA} \approx 7000 \frac{m}{s^2}$ und bei der kontinuierlich arbeitenden Zentrifuge

$$Z_K \text{ } a_{ZA} \approx 24000 \frac{m}{s^2} .$$

Entsprechend beträgt die Schleuderzahl (Gl. 22.51) bei der Zentrifuge

$$Z_I \text{ } \alpha_Z \approx 714$$

und bei

$$Z_K \text{ } \alpha_Z \approx 2450.$$

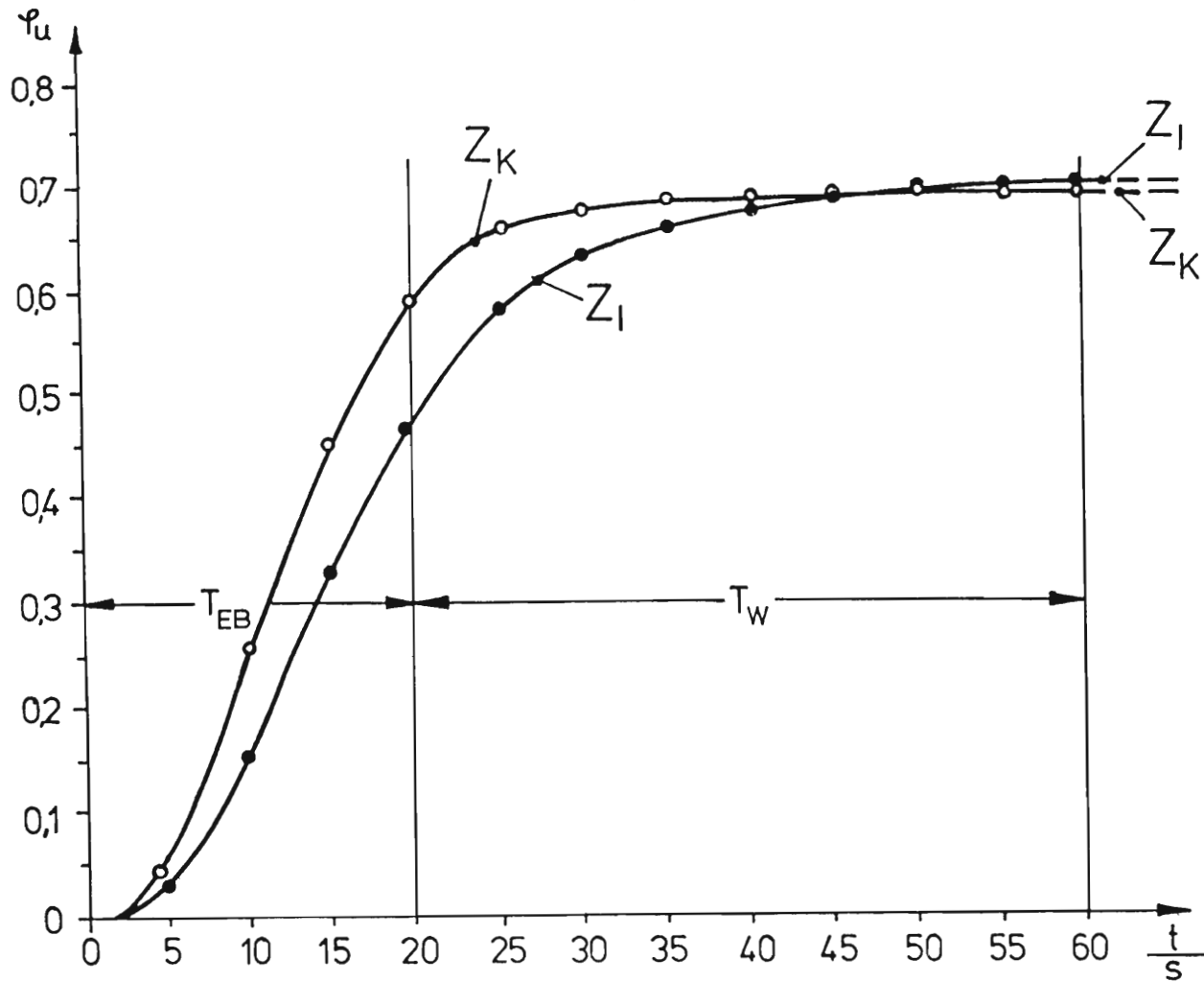


Abb. 22/28: Saftausbeute φ_u in Abhängigkeit von der Zeit t bei Äpfeln mit einer kontinuierlich arbeitenden Zentrifuge Z_K und einer intermittierend arbeitenden Zentrifuge Z_I (T_{EB} = Einbringzeit, T_W = Wartezeit; \circ, \bullet Mittelwerte aus jeweils drei Einzelmessungen)

Diese wesentlich größeren Werte bei der kontinuierlich arbeitenden Zentrifuge - herrührend vor allem vom quadratischen Einfluß der Drehfrequenz - kann sich in der Saftausbeute nicht im selben Maß auswirken. Offensichtlich bedingt durch das Prinzip des kontinuierlichen Verfahrens ist hier die Zentrifugierdauer für ein einzelnes Lebensmittel-Teilchen zu kurz. Aus diesen Gründen ergibt sich trotz der vergleichsweise kleinen Schleuderzahl bei der intermittierend arbeitenden Zentrifuge Z_I eine etwas größere Saft-Gesamtausbeute am Ende des Verfahrens.

Letztere könnte sogar noch gesteigert werden, wenn auch hier eine größere Drehfrequenz und bei begrenzender Werkstoffbeanspruchung der Trommel eventuell eine kleine Trommel zum Einsatz käme (vgl. Berechnung Gl. 22.53 bis 22.60).

Mit der Verfahrensdauer und zunehmender Tresterablagerungen in der Trommel verändert sich bei der intermittierend arbeitenden Zentrifuge Z_I das Verfahren hinsichtlich der Saftausbeute in ungünstiger Weise. Die Tresterablagerungen reduzieren den wirksamen Schleuderradius und der entstehende Filterkuchen erhöht den Strömungswiderstand für den Saft.

Im Experiment können diese theoretischen Aussagen leicht nachgewiesen werden (Abb. 22/29). Mit steigender Lebensmittelmenge (z.B. Anzahl der Äpfel) erhöht sich zunächst die Saftausbeute noch geringfügig. Dies erklärt sich aus der anfänglichen Benetzung der Werkzeug- und Geräteflächen mit Saft, was sich besonders bei kleinen Lebensmittelmengen auswirken muß. Wäre das Geräteinnere vorher nicht mit Wasser angefeuchtet worden, so hätte dieser Effekt noch deutlicher gezeigt werden können.

Bei sehr großen Lebensmittelmengen jedoch innerhalb eines Versuchszyklus' reduzieren die starken Tresterablagerungen, wie beschrieben, die Saftausbeute. Eine erneute Verbesserung

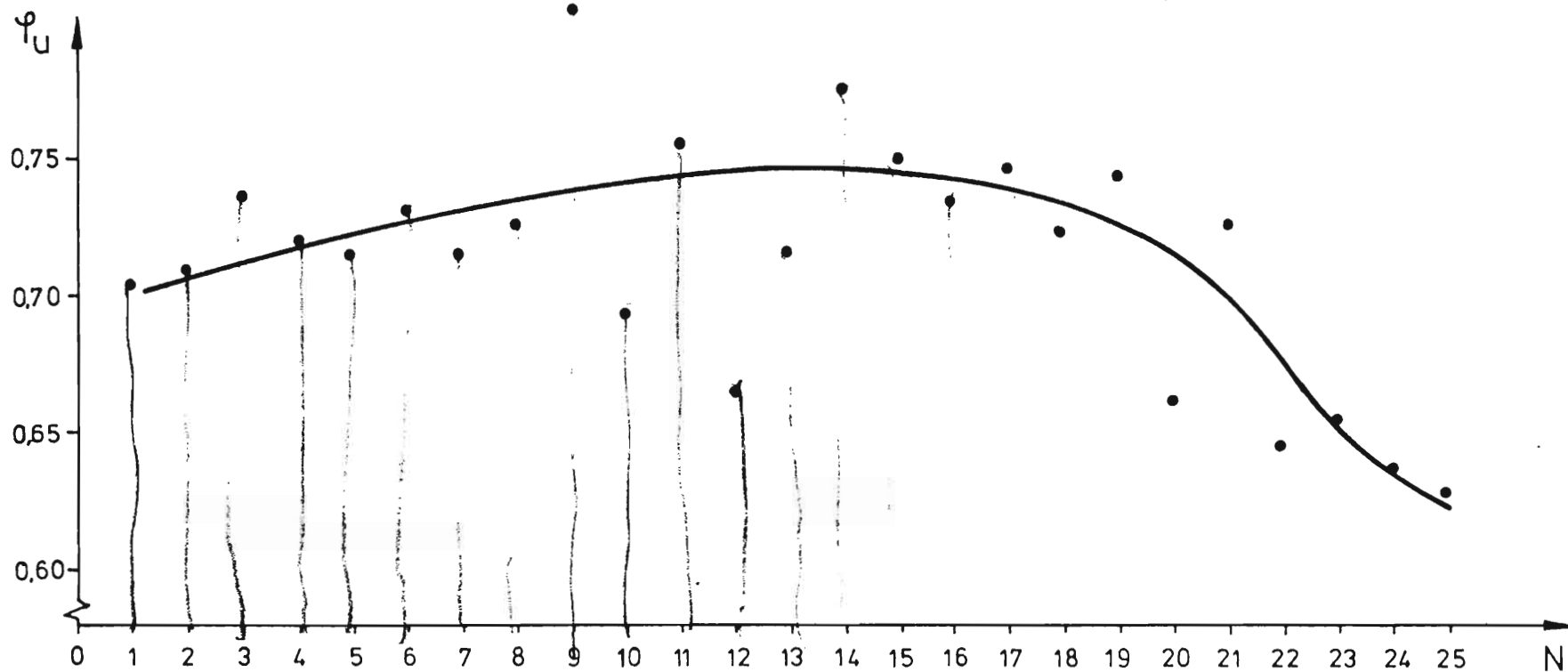


Abb. 22/29: Saftausbeute φ_u in Abhängigkeit von der Anzahl N von Äpfeln ($m = 100 \text{ g}$) bei einer intermittierend arbeitenden Zentrifuge

des Arbeitsergebnisses "Saftausbeute" ist erst nach Unterbrechung des Verfahrens und Entfernung des Tresters bzw. Reinigung des Filterstreifens möglich.

Neben der Saftausbeute ist die Saftqualität, insbesondere der Trübstoffgehalt, ein wichtiges Kriterium zur Beurteilung des Verfahrens. Hier zeigt sich im Experiment, daß die intermittierend arbeitende Zentrifuge Z_I einen Saft mit geringerem Trübstoffgehalt als die Zentrifuge Z_K erzeugen kann. Dieses Ergebnis läßt sich auch aus dem Verhältnis reiner Saftmenge zu ungesiebter Saftmenge, dem Filterwirkungsgrad η_F , ablesen (Gl. 22.47). Beim Entsaften von Äpfeln ergab sich bei

$$Z_I \dots \eta_F = 0,91$$

hingegen bei

$$Z_K \dots \eta_F = 0,68 .$$

Vergleicht man die Werte für die ungesiebten bzw. unfiltrierten Saftmengen beider Zentrifugen mit den Werten der früher untersuchten FRUCHTPRESSE (Druckstellung I), so ergeben sich nur geringe Unterschiede (Abb. 22/30). Die Saftqualität - und zwar speziell hinsichtlich des Trübstoffgehaltes - ist jedoch bei diesen drei Verfahren völlig verschieden. Die Ausbeute an sogenanntem reinem Saft ist sehr unterschiedlich, wobei sich allerdings auch die Art des verwendeten Filters auswirken muß.

Mit der intermittierend arbeitenden Zentrifuge läßt sich bei dem gleichen Lebensmittel - im vorliegenden Fall waren es Äpfel - die größte Menge an reinem Saft erzeugen.

Schon deutlich weniger erhält man mit einer Zentrifuge, die nach dem kontinuierlichen Verfahren arbeitet.

Die Fruchtpresse - im gewählten Beispiel handelt es sich ebenfalls um ein kontinuierliches Verfahren - liefert bei den vorliegenden Randbedingungen die geringste Menge an reinem Saft.

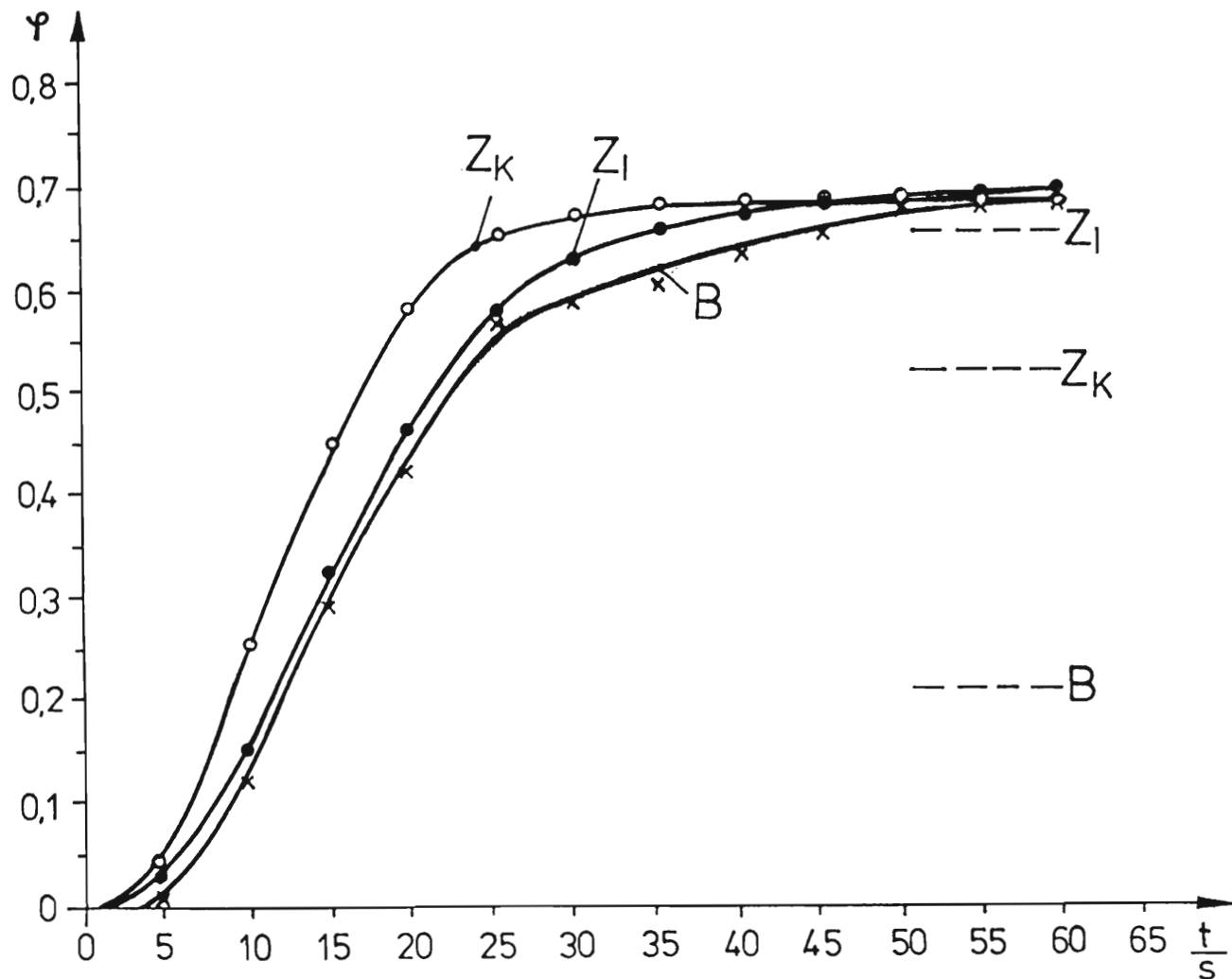


Abb. 22/30: Saftausbeute φ in Abhängigkeit von der Zeit t bei Äpfeln mit kontinuierlich arbeitender Zentrifuge Z_K , intermittierend arbeitender Zentrifuge Z_I und Fruchtpresse B (— φ_u unge-siebte Saftausbeute, - - - φ_r reine Saftausbeute \times Einzelmessungen; \circ, \bullet Mittelwerte aus jeweils drei Einzelmessungen)

2.3 MISCHEN

Definition: Mechanische Verfahren zur Vereinigung von Lebensmitteln untereinander oder mit Gasen, wobei die Mischungspartner festen, flüssigen und/oder gasförmigen Aggregatzustand besitzen können sowie zur Verbesserung der Homogenität bzw. um Konzentrations-, Temperatur- oder sonstige Eigenschaftsunterschiede auszugleichen.

Meist ist es das Ziel von Mischverfahren im Haushalt eine gewünschte gleichmäßige Verteilung zweier oder mehrerer Gemischkomponenten in einem Produkt zu erhalten ohne die einzelnen Komponenten stofflich zu verändern. Die Gemischkomponenten können dabei auch im Haushalt teilweise in allen Aggregatzuständen wie fest, flüssig oder gasförmig vorliegen; so daß die bei den Trennverfahren aufgestellte Übersicht (Tab. 22/1) disperser Systeme übernommen werden kann. Für den Haushalt sind bei den Mischverfahren besonders die Gemischsysteme GEMENGE, EMULSION, SUSPENSION, PASTE und SCHAUM wichtig (Tab. 23/1).

Der bei den Trennverfahren eingeführte Begriff MARK kann beim MISCHEN durch den in der industriellen Verfahrenstechnik üblichen Begriff PASTE ersetzt werden. Auch entfallen die SPEZIAL-Systeme. Das Gemischsystem SCHAUM (flüssiger Schaum) entsteht durch Einschlagen oder Einblasen von Gas in Flüssigkeiten, die meist noch Festbestandteile, beispielsweise Fett oder Eiweiß, enthalten und dann erst einigermaßen beständige "Dreiphasenschäume" bilden (81).

Damit lassen sich alle nachfolgend beschriebenen Mischverfahren einem der sechs Gemischsysteme zuordnen.

Tab. 23/1: Die wichtigsten Mischverfahren im Haushalt mit Lebensmittelbeispielen zum jeweiligen Gemischsystem

Gemischsystem	Lebensmittelbeispiel	Mischverfahren
GEMENGE	Mehl mit Zucker	Vermengen
EMULSION	Mayonnaise	Mixen, Rühren
SUSPENSION	Pfannkuchenteig	Rühren
	Speiseeis	Homogenisieren
PASTE	Hefeteig	Kneten
SCHAUM (flüssig)	Schlagsahne	Schaumschlagen

Bei allen Mischverfahren wird meist eine ideale Homogenität angestrebt, die wegen des vorliegenden stochastischen Prozesses bei endlicher Mischzeit nur unvollkommen erreicht werden kann. Zur Charakterisierung des Mischergebnisses bzw. des Gemisches dient die Gemisch-Zusammensetzung, die Mischgüte und die Mischzeit.

Die Zusammensetzung eines Gemisches läßt sich angeben mittels Massen- bzw. Gewichtsanteilen, Volumenanteilen, Molanteilen, Partialdrücken bzw. Partialdruckverhältnissen oder davon abgeleiteter Eigenschaften wie Dichte, Wärmeleitfähigkeit, ph-Wert usw.

Bei Volumenangaben - wie sie im Haushalt vielfach verwendet werden - oder bei Größen, die auf Volumina bezogen sind, ist zu beachten, daß sich diese insbesondere bei Feststoffteilchen beim Mischen beträchtlich ändern können. Ursachen dafür sind Änderung der Teilchenform, -größe oder Porösität.

Das wichtigste Beurteilungskriterium aller Mischverfahren ist die Mischgüte. Wegen dieser fundamentalen Bedeutung werden nachfolgend die hierzu gehörenden mathematisch-statistischen Zusammenhänge aufgezeigt. Einige der Begriffe lassen sich in komplementärer Weise, z.B. als Trenngüte, zur Beurteilung der Trennverfahren anwenden.

Die Mischgüte eines Produkts ist dann ideal, wenn in jedem beliebigen Volumenelement (Probenmenge) die gleiche Zusammensetzung (oder Eigenschaft) herrscht wie in der Gesamtmenge (84) (109). Werden aus einer Mischung mit s verschiedenen Komponenten der Massenanteile (Volumenanteile usw.) x_1, x_2, \dots, x_s ,

wobei

$$\sum_{i=1}^s x_i = 1, \quad (23.1)$$

Proben entnommen, so sind z.B. in der Probe A die effektiven Massenanteile

$$x_{1A}, x_{2A}, \dots, x_{sA}$$

enthalten (Abb. 23/1).

Bei unvollkommener Mischung gilt aber i.a.

$$x_{1A} \neq x_1; x_{2A} \neq x_2; \dots x_{sA} \neq x_s. \quad (23.2)$$

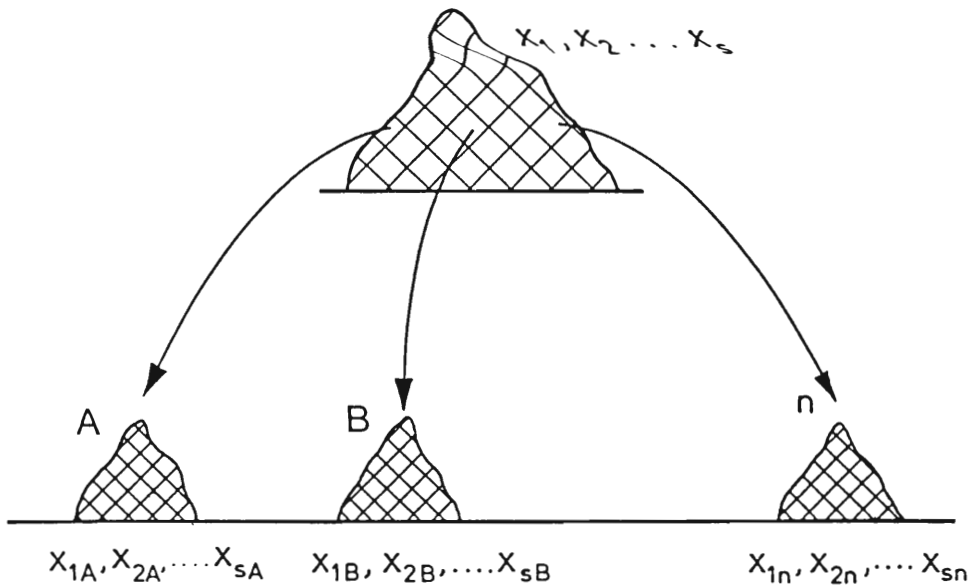


Abb. 23/1: Entnahme der Proben A, B bis n aus einer Mischung mit den Massenanteilen $x_1, x_2 \dots x_s$

Für die weiteren Proben B, C usw. - insgesamt werden n Proben entnommen - gilt diese Ungleichheit analog. So streuen die entnommenen, effektiven Massenanteile x_1 eff z.B. von Komponente 1, um den "wahren" Wert der Komponente x_1 in der Gesamtmischung (Abb. 23/2).

Die Häufigkeitsverteilung zeigt, daß zwar sehr viele Probenwerte in unmittelbarer Nähe des wahren Anteils x_1 liegen, daß aber einige Werte deutlich davon abweichen.

Der "wahre" Wert x_1 der Komponente 1 ist durch Einwiegen der Gesamtmischung bekannt oder ergibt sich - bei hinreichend großer Probenzahl n - als arithmetischer Mittelwert

$$x_1 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_{1,k} \quad (23.3)$$

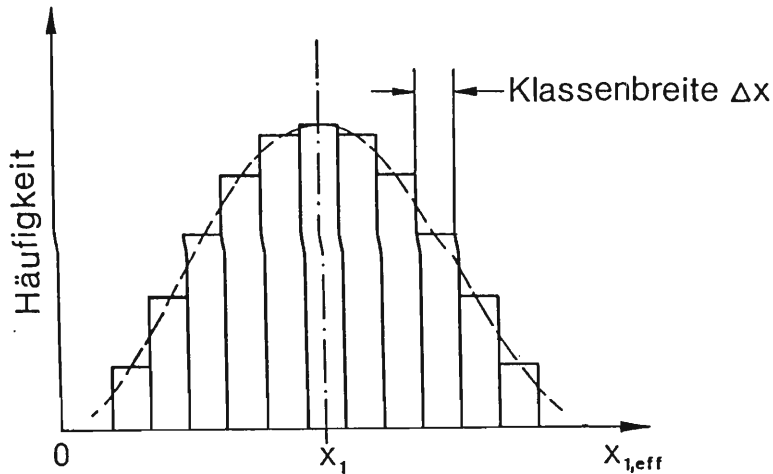


Abb. 23/2: Häufigkeitsverteilung der effektiven Massenanteile $x_{1,eff}$ in den Proben. Die Komponente 1 besitzt $x_{1,eff}$ in der Gesamtmischung den Massenanteil x_1 ("wahrer" Wert)

oder allgemein für den "wahren" Wert x_i der i -ten Komponente (insgesamt s -Komponenten) aus

$$x_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_{i,k} \quad (23.4)$$

Die Abweichung der Probenwerte vom "wahren" Wert bzw. Mittelwert läßt sich mit der sog. Varianz (σ_i^2) oder mit der mittleren quadratischen Abweichung der sog. Standardabweichung

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (x_{i,k} - x_i)^2} \quad (23.5)$$

für die i -te Komponente angeben (11). Verwendet wird dabei nur der positive Wert der Quadratwurzel (71).

In dieser Gleichung steht im Nenner die um eins verminderte Gesamtzahl der Probenwerte, da nur $n-1$ Werte voneinander unabhängig sind ($n-1 =$ Zahl der sog. Freiheitsgrade). Gleichgültig ob der wahre Wert x_i bekannt ist oder ob stattdessen der arithmetische Mittelwert (Gl. 23.3) berechnet werden muß, sind nur $n-1$ Einzelwerte frei wählbar.

Wird bei einer Normalverteilung, die von der Gaußkurve (---in Abb. 23/2) umschlossene Fläche mit 100 % angenommen, so liegen links und rechts vom "wahren" Wert x zwischen $\pm 1\sigma = 68,3 \%$, $\pm 2\sigma = 95,5 \%$ und $\pm 3\sigma = 99,7 \%$ dieser Gesamtfläche (71).

Die Standardabweichung (Gl. 23.5) ist bei idealer Homogenität sowie einer fehlerfreien Bestimmungsmethode Null und erreicht bei völliger Trennung der Komponenten ihren Maximalwert $\sigma_{i,max}$, der allerdings vom jeweiligen Massenanteil der Komponenten abhängt, wobei

$$\sigma_{i,max} = \sqrt{x_i (1 - x_i)} . \quad (23.6)$$

Bezieht man die Standardabweichung nach der Mischung bzw. während des Mischens auf diese maximale Standardabweichung, so läßt sich damit zunächst (Gl. 22.1) die Trenngüte

$$(TG)_i = \frac{\sigma_i}{\sigma_{i,max}} \quad (23.7)$$

ausdrücken (123).

Als Gegenstück der Trenngüte ergibt sich die Mischgüte

$$(MG)_i = 1 - (TG)_i \quad (23.8)$$

oder

$$(MG)_i = 1 - \frac{\sigma_i}{\sigma_{i,max}} . \quad (23.9)$$

Zu Beginn eines Mischverfahrens gilt $\sigma_i = \sigma_{i,max}$ und gemäß Gl. 23.9 $(MG)_i = 0$. Während eines Mischvorganges, bzw. am Ende, gilt

$$\sigma_{i,max} > \sigma > 0 \quad (23.10)$$

und damit

$$0 < (MG)_i < 1 . \quad (23.11)$$

Bei idealer Homogenität wäre $\sigma = 0$ und damit $(MG)_i = 1$.

Zu beachten ist, daß die Mischgüte für jede Komponente getrennt ermittelt werden kann und i.a. zu unterschiedlichen Werten führt. Dies ist praktisch möglich, denn in einem Gemisch aus den Komponenten Mehl, Butter und Rosinen können die Rosinen räumlich sehr gleichmäßig verteilt sein, während Mehl und Butter getrennt in Klumpen vorliegen.

Im Sonderfall von nur zwei Komponenten kann sich jeweils nur ein Wert für Standardabweichung, Trenngüte und Mischgüte ergeben, da aus Symmetriegründen eine ungleiche Verteilung einer Komponente gleichzeitig eine ungleiche Verteilung der anderen bedeutet.

Neben der Mischgüte des Endzustandes interessiert vor allem der zeitliche Ablauf des Mischverfahrens bzw. die erforderliche Mischzeit. Die Mischgeschwindigkeit hängt vom treibenden Gefälle ab, ausgedrückt z.B. durch den Unterschied von augenblicklicher zu bestmöglicher Varianz und einem Übergangskoeffizienten, der für das Lebensmittel und das Mischgerät charakteristisch ist. Das Mischgerät kann dabei auch ein von Hand geführtes einfaches Werkzeug (Löffel) oder die menschliche Hand selbst sein.

Faßt man die Mischgeschwindigkeit als zeitliche Änderung der Varianz auf, so gilt nach der klassischen Theorie von OYAMA (77) für eine Komponente näherungsweise

$$\frac{d\sigma^2}{dt} = -k (\sigma^2 - \sigma_r^2), \quad (23.12)$$

wobei

σ^2 = augenblickliche Varianz

σ_r^2 = bestmögliche Varianz

k = Übergangskoeffizient, der aus Versuchen zu bestimmen ist.

Die Integration ergibt ($t = \text{Zeit}$)

$$\ln \frac{\sigma_{\max}^2 - \sigma_r^2}{\sigma^2 - \sigma_r^2} = kt \quad , \quad (23.13)$$

bzw.

$$\sigma^2 = \sigma_r^2 + (\sigma_{\max}^2 - \sigma_r^2) e^{-kt} \quad . \quad (23.14)$$

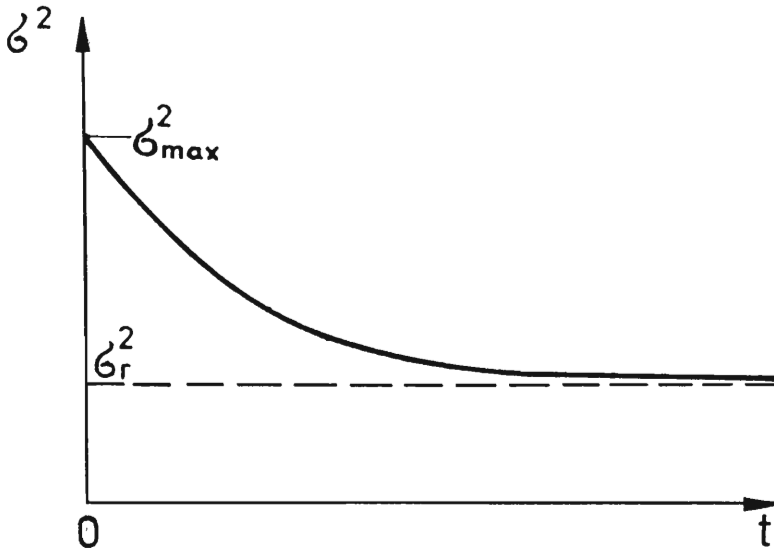


Abb. 23/3: Varianz σ^2 in Abhängigkeit der Mischzeit t

Nach dieser Theorie nähert sich die Varianz σ^2 mit der Zeit t asymptotisch der bestmöglichen Varianz σ_r^2 , was insbesondere bei Mischungen von Pulvern mit Versuchsergebnissen sehr gut übereinstimmt (Abb. 23/3). Das bedeutet, daß anfänglich eine große Mischgeschwindigkeit vorhanden ist, die im Laufe des Mischens abnimmt und bei großen Mischzeiten keine wesentliche Verbesserung der Mischgüte zu erwarten ist. In der Praxis werden bei sehr großen Mischzeiten verschiedentlich sogar erneute Entmischungsvorgänge beobachtet (vgl. VERMENGEN, Kap. 2.3.3).

Hinsichtlich der Mischzeit ist auch zu berücksichtigen, daß bei allen Mischverfahren vom Antrieb Energie zugeführt wird, die zumindest teilweise Schmelzvorgänge oder Temperaturerhöhungen im Lebensmittel verursachen kann (vgl. RÜHREN, Kap. 2.3.4).

2.3.1 HOMOGENISIEREN

Definition: Ausgleich von Konzentrations-, Temperatur- oder sonstigen Eigenschaftsunterschieden in Lebensmitteln (Beispiele: Komponenten zu Speiseeis und Pudding).

HOMOGENISIEREN ist implizit in allen anderen der in dieser Arbeit behandelten Mischverfahren wie MIXEN, VERMENGEN, RÜHREN, KNETEN und SCHAUMSCHLAGEN enthalten. Denn sobald Stoffe gegeneinander bewegt und durchmischt werden, können sich auch andere Unterschiede ausgleichen. Mit der Definition: "Überführen mehrerer homogener oder heterogener Phasen in einen höheren Mischungsgrad (Mischgüte) ...", sowie mit dem Homogenisierschema (Abb. 23/4) wird HOMOGENISIEREN von anderen Autoren sogar als Überbegriff verwendet (75).

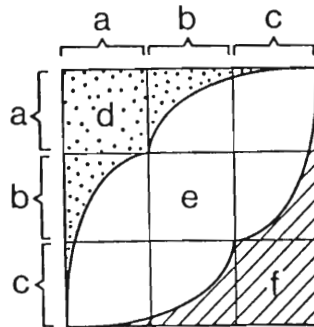


Abb. 23/4: Homogenisierungsschema:

a = Flüssigkeit, b = Paste, c = Feststoff
d = Rühren, e = Kneten, f = Trockenmischen (76)

Völlig anders wird HOMOGENISIEREN beim industriellen Verarbeiten von Milch verstanden. Es dient dort der Reduzierung der Fetttropfendurchmesser ($d < 1 \mu\text{m}$), um so das Aufrahmen der Vollmilch zu verhindern bzw. zu verzögern. Milch ist eine Emulsion von Öl in Wasser. Unter sehr großem Druck ($p > 100 \text{ bar}$) - also wesentlich größer als beim Verfahren PASSIEREN - wird diese Emulsion durch enge Spalten oder Löcher gepreßt. Die hohe Strömungsgeschwindigkeit ($v > 100 \frac{\text{m}}{\text{s}}$)

im engen Spalt zerreißt die Fettkügelchen und verteilt die entstehenden Teilchen weitgehend gleichmäßig (homogen) in der übrigen Flüssigkeit (61).

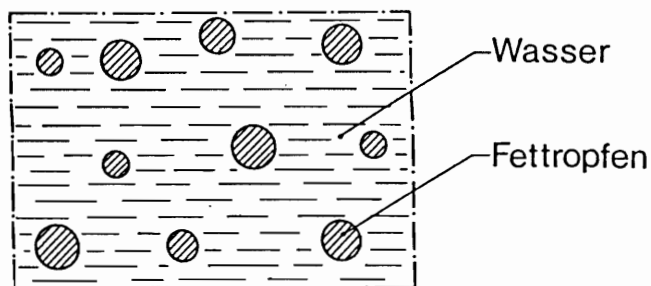


Abb. 23/5: Emulsion Öl in Wasser

HOMOGENISIEREN von Milch bedeutet demnach im wesentlichen Reduzierung der Milchfetttröpfendurchmesser.

Auch bei der industriellen Herstellung von Eiskrem wird das Rohstoffgemisch unter Drücken $p = 150 - 180$ bar durch sog. Homogenisierungsköpfe gedrückt und dabei reduziert sich der Durchmesser der Fettkügelchen auf Werte unter $2 \mu\text{m}$ (49).

In vorliegender Arbeit wird HOMOGENISIEREN als eigenständiges Verfahren definiert. Zwar ist es - wie erwähnt - in anderen Mischverfahren implizit enthalten, doch gibt es auch praktische Fälle, die damit nichts zu tun haben.

Beispielsweise kann der Ausgleich von Temperaturunterschieden in einem einphasigen Lebensmittel bereits mit HOMOGENISIEREN umschrieben werden. Andererseits könnte das mechanische komplizierte Verfahren des SCHAUMSCHLAGENS nicht mit HOMOGENISIEREN überschrieben werden.

Eine spezielle Art des HOMOGENISIERENS wird bei Erstarrungsvorgängen, z.B. bei der Speiseeisbereitung, angewandt.

Ein solches Lebensmittelgemisch läßt sich als SUSPENSION einordnen (Tab. 23/1). Kühlt man eine flüssige Speiseeismischung langsam ab, so setzt der Erstarrungsprozeß an den Stellen zuerst ein, wo die tiefste Temperatur erreicht wird

oder in Lebensmittelbereichen, in denen Anhäufungen von Stoffkomponenten mit höherer Erstarrungs- bzw. Schmelztemperatur vorliegen. In der entstehenden Speiseeismischung können sich bei Abkühlung Eiskristalle bilden, die sich vergrößern, während die Konzentration der übrigen Gemischkomponenten in den Nachbarzonen steigt. Die Konzentrationserhöhung senkt jedoch gerade in diesen Zonen die Erstarrungstemperatur und damit wird das Wachsen der benachbarten Eiskristalle weiter begünstigt.

Dieser Vorgang führt zu einer zunehmenden partiellen Entmischung des Lebensmittels, verbunden mit der Bildung großer Kristalle.

Um dieser Entmischung bzw. dem Wachsen von Großkristallen zu begegnen, muß der Erstarrungsprozeß beschleunigt oder das Lebensmittel während der Erstarrung im gesamten Volumenbereich bewegt und ständig durchmischt werden. In zuletzt genanntem Fall können sich Temperatur- und Konzentrationsunterschiede ausgleichen, die entstehenden Kristalle bleiben klein und die Struktur des Lebensmittels ist weitgehend homogen. Eine völlige Homogenität läßt sich mit keinem Mischverfahren erreichen.

GERÄTEBEISPIEL für das Verfahren HOMOGENISIEREN

Mit einem SPEISEEISBEREITER können im Haushalt Speiseeiskomponenten zu Mischungen HOMOGENISIERT werden (Abb. 23/6). Das Verfahren wird dabei vorzugsweise während der Erstarrung durchgeführt. Zu diesem Zweck betreibt man das Gerät im Tiefkühlfach von Kühlschränken oder in Gefriergeräten. Dabei wird dem flüssigen Lebensmittelgemisch (z.B. aus Milch, Sahne, Zucker, Eiweiß, Früchten), welches zunächst etwa Raumtemperatur besitzt, Wärme entzogen. Damit das Verfahren HOMOGENISIEREN optimal abläuft, muß der dabei fließende Wärme-

strom \dot{Q} hinreichend groß sein und berechnet sich zu

$$\dot{Q} = k A (\vartheta_L - \vartheta_K) \quad . \quad 23.15$$

Wobei gilt k = Wärmedurchgangskoeffizient

A = Wärmeaustauschfläche

ϑ_L = Temperatur des Lebensmittels

ϑ_K = Temperatur der Kühlfläche bzw. der Kühlluft.

Die Größe dieses Wärmestroms beeinflusst auch unmittelbar die Verfahrensdauer, während der die relativ große Erstarrungswärme abgeführt werden muß (z.B. Wasser: Erstarrungswärme = Schmelzenthalpie ≈ 334 kJ/kg). Soll der Wärmestrom groß sein, so ergeben sich gemäß der Gleichung (23.15) einige Forderungen und dazu verschiedene Lösungsmöglichkeiten (Tab. 23/2).

Tab. 23/2 Forderungen und Lösungsmöglichkeiten bei einem Speiseeisbereiter, um eine kurze Erstarrungszeit bzw. Verfahrensdauer zu gewährleisten

Forderungen	Lösungsmöglichkeiten
großer Wärmedurchgangskoeffizient k	dünne Behälterwandstärke gut wärmeleitender Werkstoff (z.B. Aluminium)
große Wärmeaustauschfläche A	große Oberfläche des Behälters inniger Kontakt des Behälters mit der Verdampferfläche des Kühlschranks evtl. wärmeleitende Zwischenschicht (z.B. Wasser eingieBen)
große treibende Temperaturdifferenz ($\vartheta_L - \vartheta_K$)	Innentemperatur ϑ_K des Kühlfaches möglichst niedrig wählen gutes Durchmischen der Lebensmittel zur Erhöhung der Temperatur ϑ_L in Nähe der Behälterwand

Elektromotor und Rührwerk bringen allerdings Energie in das Lebensmittel ein. Global betrachtet wird die gesamte elektrische Energie, welche über eine Innensteckdose oder über das Netzkabel zwischen der Türdichtung des Kühl- oder Gefriergerätes dem SPEISEEISBEREITER zugeführt wird, in Wärme umgewandelt.

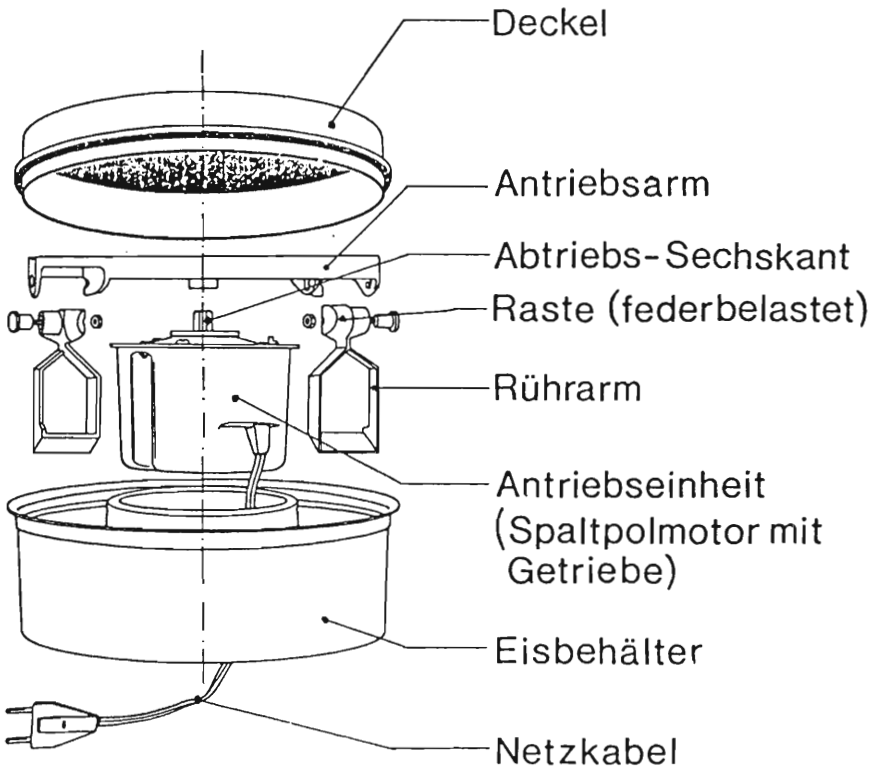


Abb. 23/6: Speiseeisbereiter für den Einsatz in Kühl- oder Gefriergeräten

Da während des Erstarrungsvorganges durch die ständige Umlagerung und Bewegung des Lebensmittelgemisches Temperatur- und Konzentrationsunterschiede sowie die Bildung großer Eiskristalle verhindert wurden, besitzt die Speiseeismischung am Ende des Verfahrens weitgehend cremige und homogene Struktur.

2.3.2 MIXEN

Definition: Mischen von flüssigen, weichen oder auch festen Lebensmitteln - vielfach bei gleichzeitigem Zerkleinern (Beispiele: Bananen und Milch, Tomaten, Komponenten zu Cocktails).

Das eben beschriebene Verfahren HOMOGENISIEREN ist zwar implizit auch im MIXEN enthalten, jedoch schließt MIXEN laut Definition prinzipiell die Möglichkeit des ZERKLEINERNS mit ein.

Bei einer sehr einfachen Verfahrensrealisation durch Schütteln eines geschlossenen Behälters ist ZERKLEINERN kaum oder nur bei sehr weicher Konsistenz der Lebensmittel möglich. Ein solches Lebensmittelgemisch kann z.B. eine EMULSION sein (Tab. 23/1).

Bei Mixverfahren mit schnell bewegten Werkzeugen, insbesondere solchen mit scharfen Schneiden, können auch sehr feste Lebensmittel zerkleinert werden.

Nach genügend langer Verfahrensdauer kann in beiden Fällen eine Durchmischung mit entsprechender Mischgüte erreicht werden.

Dabei ist auch Ausgleich von Konzentrations- und Temperaturunterschieden möglich oder vorangegangene Entmischungsvorgänge, z.B. durch Absetzen können wieder beseitigt werden.

Voraussetzung für das Verfahren MIXEN ist eine hinreichend kleine Viskosität des Gesamtgemisches. D.h. der Feststoffanteil darf nur gering sein, und zwar umso geringer, je zäher die flüssige Komponente selbst ist. In bestimmten Fällen kann mit einer Temperaturerhöhung der Flüssigkeit die Viskosität gesenkt werden. Eine andere Möglichkeit ist es, zusätzlich Flüssigkeiten einzubringen. Nur so ist sichergestellt, daß alle Lebensmittelteilchen nach und nach bzw. mehrmals in den primären Wirkraum gelangen (Wirkräume, Kap. 2.3.3).

Findet beim MIXEN gleichzeitig ZERKLEINERN von dispergierten Flüssigkeitströpfchen (z.B. Fett) oder von Feststoffteilchen statt, so erhöht sich die Mischgüte zusätzlich. Dies gilt vor allem dann, wenn die Mischgüte mittels Probenentnahme bestimmt wird. Bei großen Teilchen kann es vorkommen, daß bei einer Stichprobe nur eine Gemischkomponente erfaßt wird (z.B. $x_1, \text{eff} = 1$) und alle anderen Komponenten fehlen (z.B. $x_2, \text{eff} = 0, x_3, \text{eff} = 0$ usw.).

Bei kleinen Teilchen hingegen ist bei einer gegebenen Stichprobenmenge die Wahrscheinlichkeit entsprechend größer, daß in einer Probe alle Komponenten möglichst im angestrebten Mischverhältnis enthalten sind - was einer hohen Mischgüte entspricht. Aus diesem Grunde können Flüssigkeiten und insbesondere ineinander lösliche Flüssigkeiten (Teilchengröße entspricht Molekülgröße) nahezu homogene Mischungen bilden.

Beim ZERKLEINERN von Feststoffteilchen trifft ein Werkzeug z.B. ein Schlagmesser mit sehr großer Geschwindigkeit auf die Teilchen. Nur so läßt sich die Massenträgheit der freischwimmenden Teilchen ausnützen und damit Gegenkräfte zu den notwendigen Schnittkräften erzeugen (ZERSCHLAGEN, Kap. 2.1.9). Ab einem bestimmten Feinheitsgrad ist weiteres Zerkleinern auch beim MIXEN nicht mehr möglich, da die Trägheitskräfte hierzu nicht mehr ausreichen (Grenzdurchmesser, Gl. 21.58).

Ist der primäre Wirkraum klein - wie z.B. bei rotierenden Messern -, so muß sich im übrigen Wirkraum eine hinreichend große Strömungsgeschwindigkeit ausbilden. Nur so können bei begrenzter Mixdauer alle Lebensmittelkomponenten gemischt oder Feststoffteilchen in den primären Wirkraum transportiert und dort zerkleinert werden.

Werden große Lebensmittelteile von einem rasch bewegten Werkzeug erfaßt, so entstehen i.a. große und wirksame Transportbewegungen. Werden die Teilchen beim MIXEN zunehmend kleiner, so verringern sich meist diese Bewegungen.

Bei rotierenden Werkzeugen und dazu rotationssymmetrischen Wirkräumen können sich dabei Rotationsströmungen ausbilden, die sogar wieder zu teilweisen Entmischungen führen.

Leichte Festbestandteile schwimmen in der Flüssigkeit auf, die schweren Teilchen sinken zu Boden bzw. werden von der Zentrifugalbeschleunigung in die äußere Ringzone gedrängt (ABSETZEN, Kap. 2.2.4).

Mit nicht rotationssymmetrischen, z.B. elliptischen Wirkräumen oder anderen Maßnahmen zur Strömungsbeeinflussung, z.B. Höcker, können diese Entmischungseffekte teilweise unterdrückt werden.

GERÄTEBEISPIELE für das Verfahren MIXEN

Im Haushalt werden STANDMIXER und MIXSTÄBE verwendet. STANDMIXER können Zusatzgeräte zu Universal-Küchenmaschinen sein, oder sie besitzen einen eigenen Antriebsmotor (Abb. 23/7).

Ein kleines mehrrarmiges Messer rotiert knapp über dem Boden eines schlanken Gefäßes (28). Ein Punkt der Schneide mit dem Abstand r von der Drehachse besitzt die Geschwindigkeit

$$v = r \omega , \quad (23.16)$$

wobei ω die Winkelgeschwindigkeit des Messers darstellt. Wäre diese Geschwindigkeit klein, so würden Feststoffteilchen nur angeschnitten, dabei beschleunigt und vor der Schneide hergeschoben werden.

Besitzen die Feststoffteilchen einen bestimmten Feinheitsgrad, so ist eine weitere Zerkleinerung beim Verfahren MIXEN nicht möglich, da die Teilchen nur noch umherbewegt werden, was lediglich eine Durchmischung bewirken kann.

Ein gleichmäßiges (homogenes) Zerkleinern und Durchmischen ist zudem nur möglich, wenn genügend Flüssigkeit im Gefäß ist bzw. die Viskosität des Mixgutes klein ist. Flüssigkei-

ten können daher sehr gut gemischt werden. Zudem besitzt das Mixmesser wegen leichter Schrägstellung seiner Messerflächen auch Pumpwirkung. Um einen möglichst großen primären Wirkraum des Messers zu schaffen, sind die einzelnen Messerarme so geformt, daß sie bei Rotation jeweils eine unterschiedliche Ebene beschreiben (Abb. 23/8).

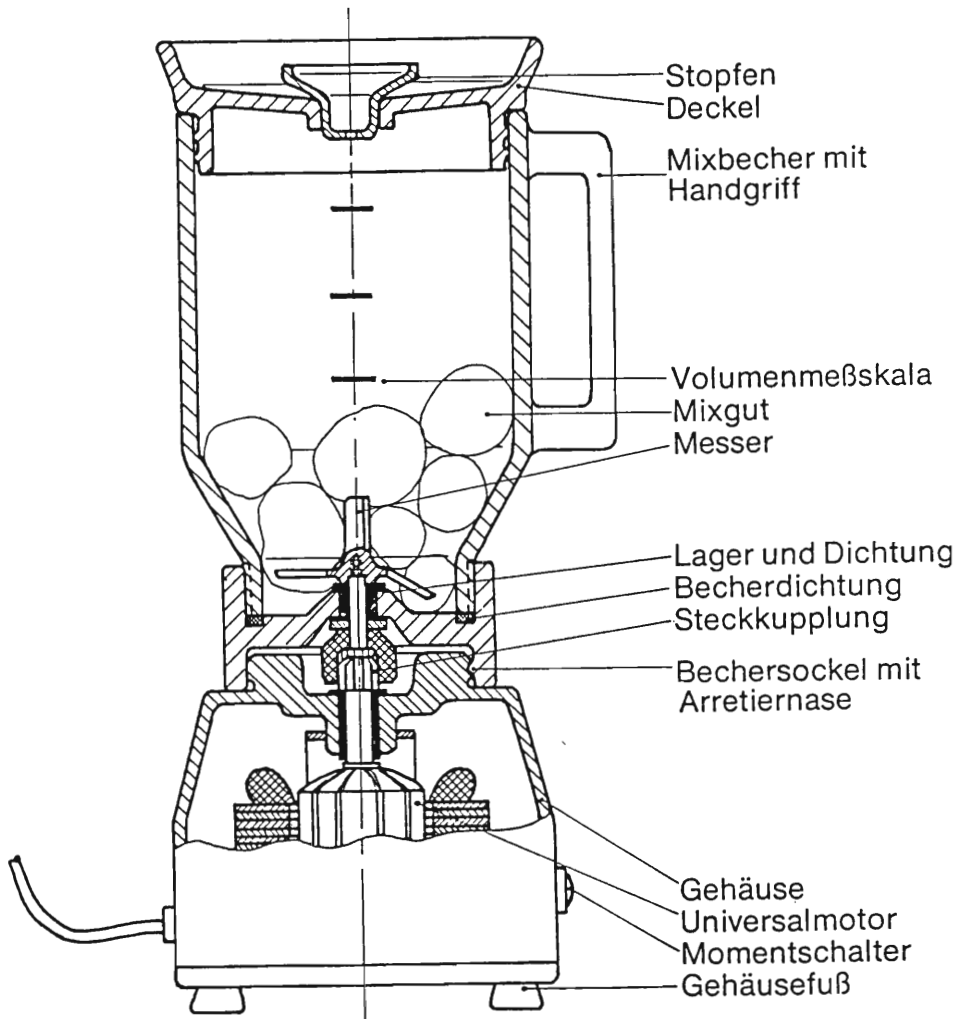


Abb. 23/7: Standmixer im Einsatz
(Vertikal-Teilschnitt)

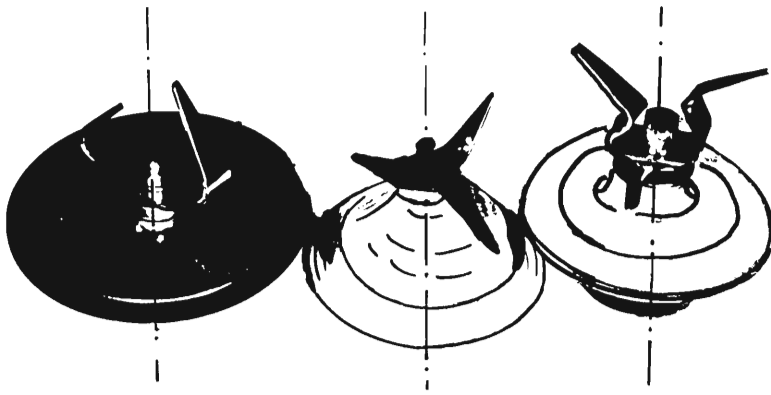


Abb. 23/8: Messer mit Lagerflansch und Dichtung zu verschiedenen Standmixern

Je nach Viskosität und Menge des flüssigen Lebensmittels ist die Mixdauer hinreichend lang zu wählen, um die gewünschte Mischgüte zu erzielen.

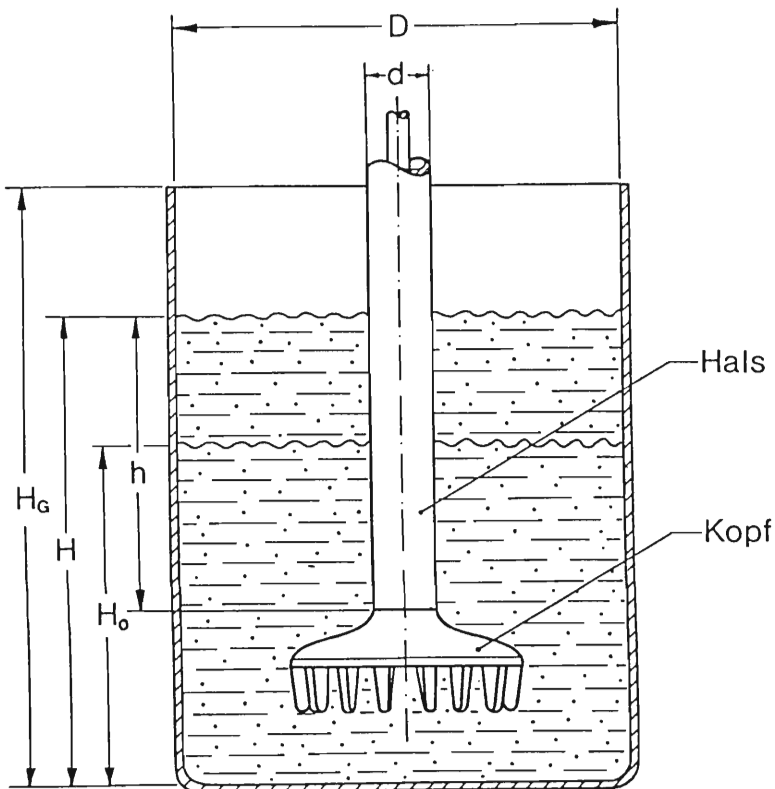


Abb. 23/9: Zur Berechnung der Eintauchtiefe eines Mixstabes in einem flüssigkeitsgefüllten Gefäß

Beim MIXSTAB ist die Pumpwirkung des Messers für den Verfahrensablauf nicht so wichtig, da das gesamte Gerät im Lebensmittel zusätzlich auf und ab bewegt wird. Allerdings ergeben sich dabei wieder andere Probleme, beispielsweise die Gefahr des Überschwappens oder Herausspritzens von Lebensmitteln. Der Gerätehals, in welchem die Messerwelle gelagert und abgedichtet ist, muß möglichst schlank sein, damit das beim Eintauchen verdrängte Flüssigkeitsvolumen klein ist (Abb. 23/9).

Ist das Mixgefäß (Gesamthöhe H_G , Durchmesser D) bis zur Höhe H_O mit Flüssigkeit gefüllt, so steigt nach vollständigem Eintauchen ($h = 0$) des Mixkopfes der Flüssigkeitsspiegel um

$$H_K = V_K \frac{4}{D^2 \pi} , \quad (23.17)$$

wobei V_K das Verdrängungsvolumen des Mixkopfes ist.

Nach weiterem Eintauchen verdrängt der Gerätehals das Flüssigkeitsvolumen

$$V_H = h \frac{d^2 \pi}{4} , \quad (23.18)$$

wobei sich Gerät und Flüssigkeit um das Maß h gegeneinander bewegen.

Insgesamt ist damit der Flüssigkeitsspiegel auf die Höhe

$$H = H_O + V_K \frac{4}{D^2 \pi} + h \frac{d^2}{D^2 - d^2} \quad (23.19)$$

gestiegen und die Flüssigkeit würde rechnerisch für

$$H > H_G \quad (23.20)$$

bereits ohne Schwappbewegungen über den Gefäßrand treten.

Um letzteres zu vermeiden, darf das Gefäß nicht zu sehr gefüllt werden (Anfangsfüllhöhe H_O) und das Verdrängungsvolumen V_K des Mixkopfes muß klein sein (Gl. 23.19). Verwendet man wegen des günstigen Wirkraumes ein schlankes Gefäß (Durchmesser D), so erfordert dies vor allem einen hinreichend dünnen Gerätehals (Durchmesser d). Um mit dem Mixkopf auch den Gefäßboden erreichen zu können (Arbeitshub h), ohne dabei das obere Gehäuseteil einzutauchen, muß der Gerätehals jedoch hinreichend lang sein.

2.3.3 VERMENGEN

Definition: Mischen von Lebensmitteln bei trockener bis leicht pastöser Konsistenz (Beispiele: Mehl mit Zucker, pürierte Kartoffeln mit Stärke).

Während das Verfahren MIXEN für Lebensmittel weitgehend flüssiger Konsistenz geeignet ist, sind zum VERMENGEN möglichst trockene oder nur leicht pastöse Lebensmittel vorzusehen. Sie werden als GEMENGE bezeichnet (Tab. 23/1). Das VERMENGEN von Feststoffen geschieht durch ständiges Umlagern der Komponenten bzw. des Gemisches und wird auch als Trockenmischen bezeichnet (Abb. 23/4) (76). Es kann mit bewegten Behältern oder mit feststehenden Behältern und bewegten Mischwerkzeugen erfolgen.

Die erreichbare Mischgüte ist von der Korngröße der Lebensmittelteilchen und von der Größe der betrachteten Probe abhängig (vgl. MIXEN, Kap. 2.3.2). Große Teilchen und kleines Probenvolumen bzw. Portionsvolumen wirken sich nachteilig auf die Mischgüte nach der hier gewählten Definition aus.

Erschwerend kommt beim VERMENGEN trockener Feststoffgemische hinzu, daß während des Verfahrens bereits wieder Entmischungseffekte auftreten können. Letztere resultieren aus unterschiedlicher Korngröße, -form, Dichte, Haft- oder anderen Eigenschaften des Lebensmittels. Beim VERMENGEN wächst zunächst die Mischgüte bis zu einem Optimalwert an, der von vielen Parametern abhängig ist, und nur experimentell bestimmt werden kann. Mit längerer Mischzeit vermindert sich die Mischgüte wegen dieser Entmischungsvorgänge wieder und nähert sich dann einem von Lebensmittel und Verfahren abhängigen Grenzwert (Gleichgewicht zwischen MISCHEN und ENT-MISCHEN).

In der industriellen Verfahrenstechnik werden Mischverfahren meist nur für ein Gemisch mit definierten Eigenschaften ausgelegt. Im Haushalt hingegen muß die Mischeinrichtung für eine Vielzahl von Lebensmitteln mit sehr unterschiedlicher Konsistenz einsetzbar sein.

Da Gemenge und insbesondere Pasten nicht wie Flüssigkeiten bereits unter Einwirkung der Schwerkraft den Werkzeugen zufließen können, ist die Werkzeugkinematik besonders wichtig. Die Mischwerkzeuge sollten möglichst das gesamte Gefäßvolumen durchlaufen. Im nicht erfaßten Volumen muß zumindest die Transportwirkung so groß sein, daß die dort lagernden Gemischkomponenten nach und nach am Verfahren beteiligt werden können.

Bei rotierenden Rührarmen, Schaufeln oder Besen erreicht man dies, indem die Werkzeuge neben ihrer Eigendrehung noch eine Zusatzbewegung im Gefäß ausführen (Planetengetriebe) oder das Gefäß ebenfalls rotiert. Damit lassen sich die eingangs vorgestellten allgemeinen Definitionen der Wirkräume beim Verfahren VERMENGEN in den folgenden Gerätebeispielen anschaulich beschreiben.

GERÄTEBEISPIELE für das Verfahren VERMENGEN

Mit einer HAND-KÜCHENMASCHINE und Einsatz von QUIRL- oder KNETWENDELPAAR lassen sich die trockenen Lebensmittelkomponenten, z.B. für einen später zu rührenden oder zu kneten den Teig, vermengen. Ohne Zusatzbewegung, das heißt bei festgehaltener Küchenmaschine und Schüssel besitzen diese Werkzeuge näherungsweise prismatischen Wirkraum, dessen Querschnittsfläche einer liegenden Zahl 8 ähnelt (Abb. 23/10). Dies wäre definitionsgemäß ein primärer Wirkraum. In diesem Bereich werden Lebensmittel ständig bearbeitet.

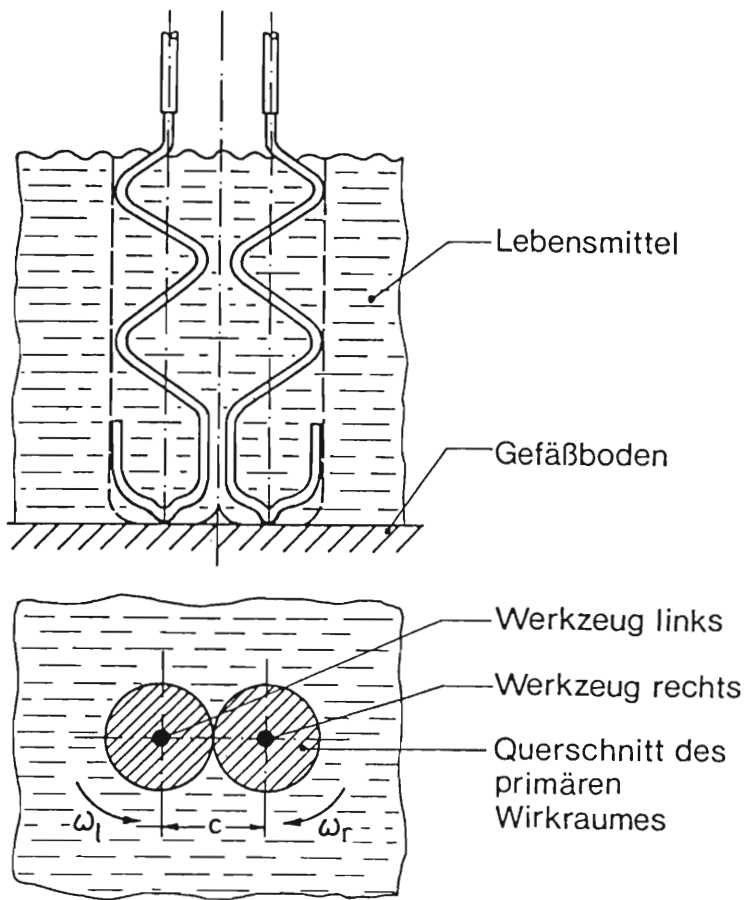


Abb. 23/10: Primärer Wirkraum der Knetwerkzeuge einer Hand-Küchenmaschine

Bewegt man die KÜCHENMASCHINE noch zusätzlich von Hand, so vergrößert sich der Wirkungsbereich und es entsteht ein sekundärer Wirkraum. In diesem Bereich werden die Lebensmittel nur von Zeit zu Zeit bearbeitet. Zur Arbeitserleichterung werden auch HAND-KÜCHENMASCHINEN vielfach in einem Gestell befestigt, in welchem gleichzeitig die Schüssel mit den Lebensmittelkomponenten rotiert (Abb. 23/11). Bei einer solchen Anordnung entstehen Wirkräume in der Form von Voll- oder Hohlzylindern (Abb. 23/12).

Dabei ist es praktisch unvermeidlich, daß auch Lebensmittel- bzw. Schüsselbereiche vorhanden sind, die von den Werkzeugen nicht erfaßt werden. Diese Bereiche werden konsequenterweise

und zusammenfassend als tertiärer Wirkraum bezeichnet. Das Lebensmittelgemisch, welches sich im tertiären Wirkraum befindet, kann demgemäß nur bearbeitet werden, wenn es durch Querströmungen in den sekundären Wirkraum gelangt. Dort muß es mindestens solange verweilen, bis auch die Werkzeuge - sie erzeugen ja den primären Wirkraum - die jeweilige Stelle erreicht haben.

Ist diese Querströmung unzureichend, so wird der tertiäre Wirkraum zum Totraum. Bei Universal-Küchenmaschinen existiert meist ein innerer und ein äußerer tertiärer Wirkraum.

Die Transportbewegungen und damit das Verfahren schlechthin, sind außer von der Geometrie (Abmessungen der Werkzeuge, Schüssel und anderer Systemteile) auch von der Größe der einzelnen Winkelgeschwindigkeiten, und vor allem vom Richtungssinn der Drehungen abhängig (96). Kinematik und Wirkräume sind wichtige Verfahrensparameter beim VERMENGEN, RÜHREN, KNETEN und SCHAUMSCHLAGEN.

Bei der HAND-KÜCHENMASCHINE mit rotierenden Schüsseln unterscheiden sich Kinematik und Wirkräume deutlich von denen, die mit feststehenden Schüsseln und Zusatzbewegung der Küchenmaschine von Hand entstehen. Selbst bei einer idealisierten Handbewegung auf einer exakten Kreisbahn handelt es sich im letztgenannten Fall um eine reine Translation zwischen Küchenmaschine und Schüssel. Die Wirkräume besitzen hier elliptischen Querschnitt (Abb. 23/13).

Werden bei einer rotierenden Schüssel die Werkzeugachsen nicht auf einer gemeinsamen Umfangslinie, sondern auf einem gemeinsamen Radiusvektor angeordnet, so ergibt sich bei sonst gleicher Geometrie eine andere Kinematik und ein deutlich größerer sekundärer Wirkraum - meist in Form eines Vollzylinders (Abb. 23/14). Soll in der Nähe des Schüssel-

randes eine möglichst große Relativgeschwindigkeit zwischen Schüssel und äußerem Werkzeug erzielt werden, so müssen beide (ω_r und ω_z) wie gezeichnet, gegensinnig rotieren.

Genügt die von den Werkzeugen hervorgerufene Transportbewegung nicht, um die Lebensmittelkomponenten aus dem tertiären Wirkraum in den sekundären bzw. primären Wirkraum zu fördern, so können Abstreifer oder ähnliche Hilfsmittel verwendet werden. Diese schaben Lebensmittelreste im tertiären Wirkraum (Totraum) von Haftflächen ab und schieben sie nach innen.

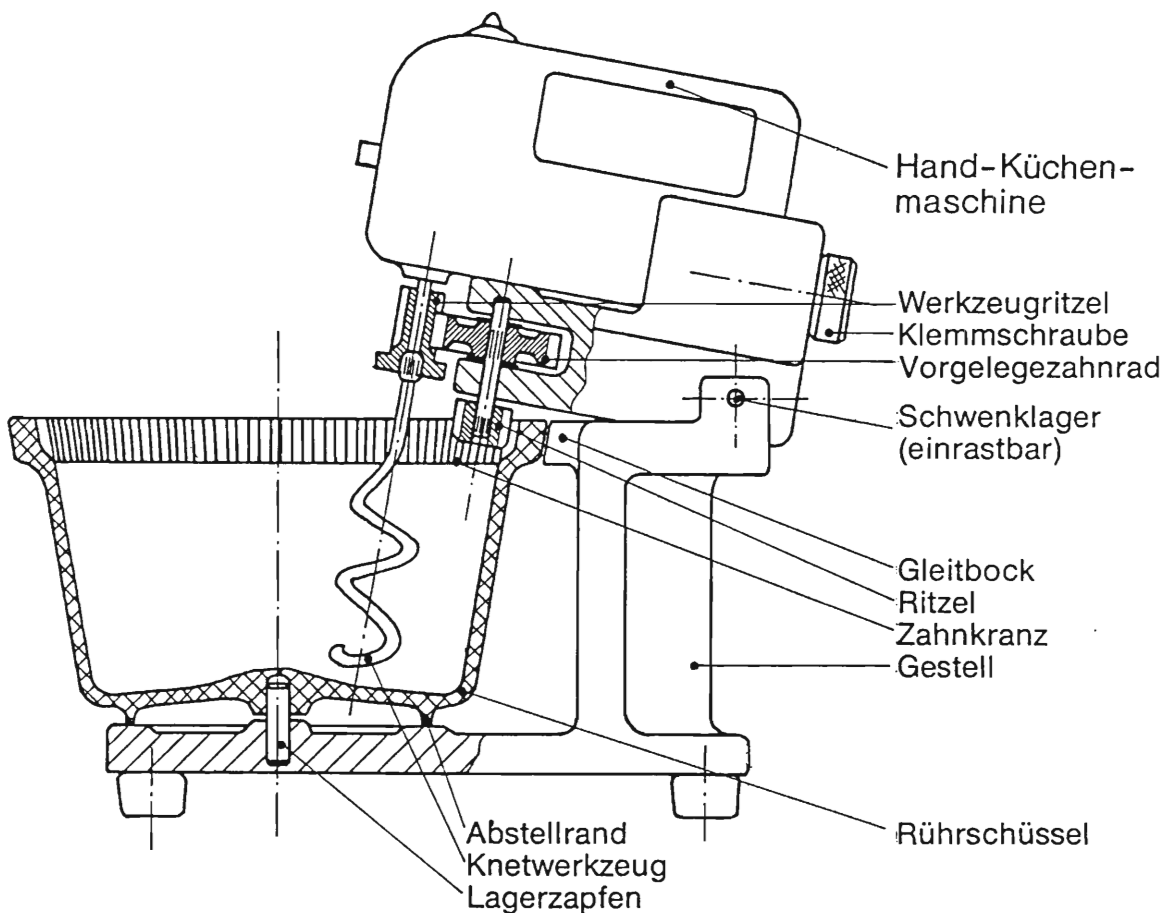


Abb. 23/11: Schüssel mit Gestell und Hand-Küchenmaschine (Vertikal-Teilschnitt)

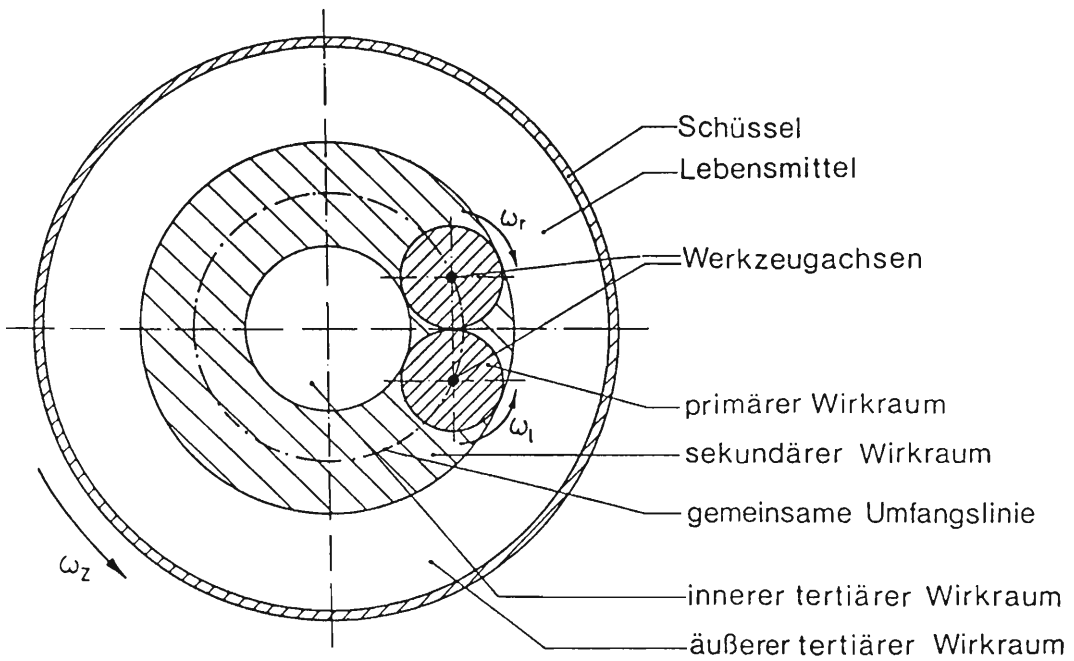


Abb. 23/12: Wirkräume der Knetwerkzeuge einer Hand-Küchenmaschine mit rotierender Schüssel und Anordnung der Werkzeugachsen auf gemeinsamer Umfangslinie

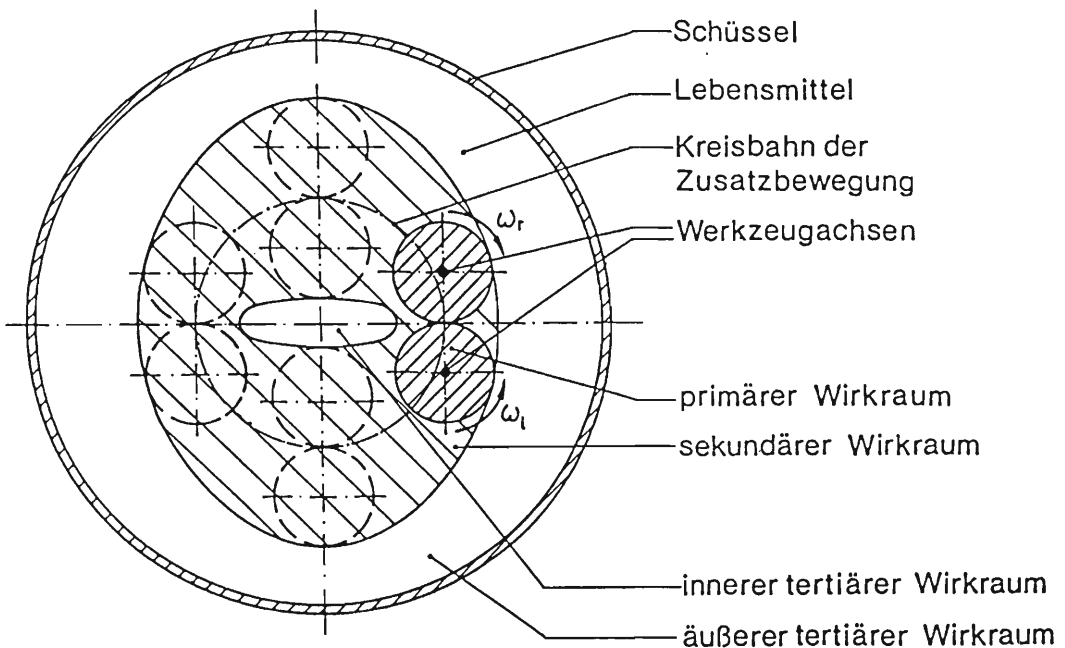


Abb. 23/13: Wirkräume der Knetwerkzeuge bei handgeführter Küchenmaschine und feststehender Schüssel

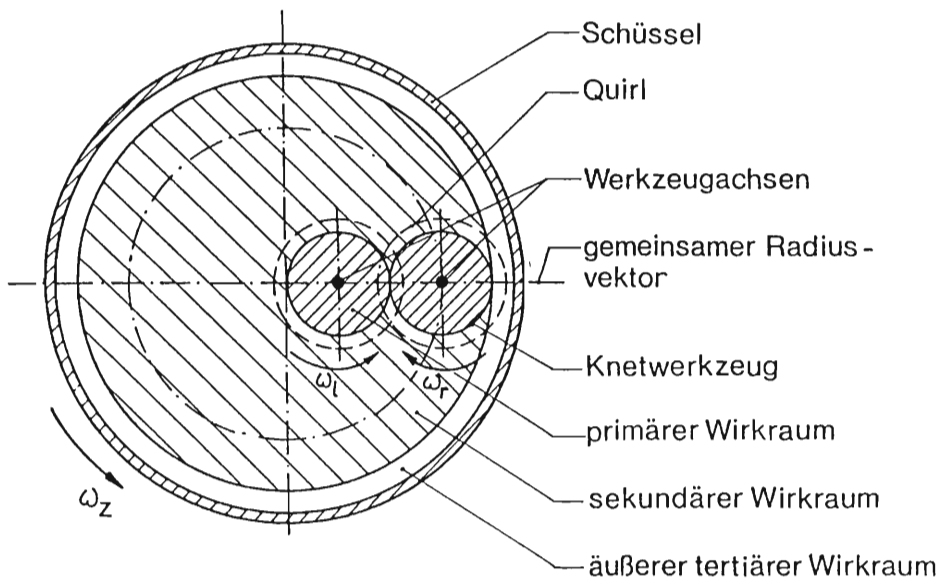


Abb. 23/14: Wirkräume der Knetwerkzeuge bei einer Hand-Küchenmaschine mit rotierender Schüssel und Anordnung der Werkzeugachsen auf gemeinsamen Radiusvektor

2.3.4 RÜHREN

Definition: Mischen von Lebensmitteln bei flüssiger bis leicht pastöser Konsistenz (Beispiele: Komponenten zu Pfannkuchenteigen, Marmeladen und Soßen).

Im Vergleich zum SCHAUMSCHLAGEN handelt es sich beim RÜHREN um ein einfaches Verfahren. Bei sehr dünnflüssigen Lebensmittelgemischen ist es sogar wesentlich unproblematischer als das VERMENGEN. Solche Lebensmittelgemische sind beispielsweise SUSPENSIONEN (Tab. 23/1).

Besitzen die Lebensmittel jedoch pastöse Konsistenz, so können beim RÜHREN ähnliche Probleme wie beim VERMENGEN auftreten. Eingeschränktes Fließverhalten erfordert eine besondere Kinematik der Werkzeuge, um das gesamte Lebensmittelvolumen erfassen zu können.

Die Rührwerkzeuge bewegen die zu mischenden Lebensmittelkomponenten bzw. das flüssige Gemisch in einem Gefäß. Dabei strömen die Teilchen mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten und Richtungen umher, so daß nach und nach an jedem Ort des Rührgefäßes ein vollständiger Plattaustausch der Teilchen stattfindet. Unterschiedliche Geschwindigkeiten bilden sich zwangsläufig zwischen einer feststehenden Wand und den Flüssigkeitsteilchen, die in Wandnähe z.B. von einem Rührwerkzeug bewegt werden, aus (Abb. 23/15).

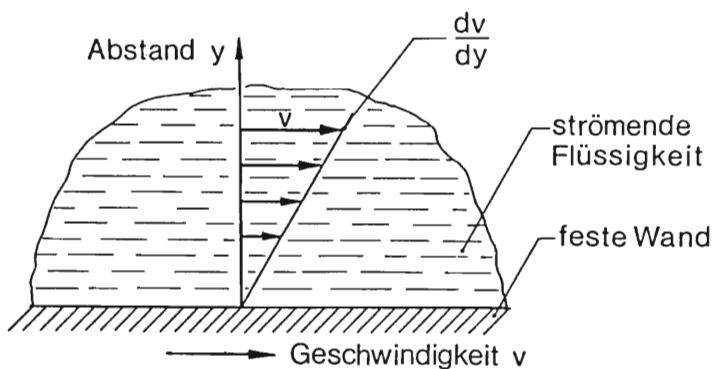


Abb. 23/15: Geschwindigkeit v einer Flüssigkeit im Abstand y von einer festen Wand

Die an der Wand haftenden Moleküle besitzen die Geschwindigkeit $v = 0$. Mit zunehmendem Wandabstand y ist eine wachsende Strömungsgeschwindigkeit v festzustellen. Der Gradient $\frac{dv}{dy}$ wird als Geschwindigkeitsgefälle bezeichnet.

Da in den verschiedenen parallelen Ebenen zur Wand unterschiedliche Geschwindigkeiten herrschen, verschieben sich die Flüssigkeitsmoleküle gegeneinander.

Mit der daraus resultierenden Schubspannung τ läßt sich das Gesetz

$$\frac{dv}{dy} = \frac{1}{\eta} \tau \quad (23.21)$$

angeben, wobei η = dynamische Zähigkeit ist. Flüssigkeiten, die diesem Schubspannungsansatz gehorchen, werden als Newtonsche Flüssigkeiten bezeichnet.

Bei Nicht-Newtonischen Flüssigkeiten ergeben sich zwar ebenfalls die zum MISCHEM notwendigen unterschiedlichen Geschwindigkeiten $\frac{dv}{dt}$, der Zusammenhang mit der Schubspannung lautet jedoch

$$\frac{dv}{dy} = k (\tau - \tau_F)^m \quad (23.22)$$

Dabei ist k = Fließvermögen, meist $k = \frac{1}{\eta}$
 τ_F = Schubspannung an der Fließgrenze
 m = Fließbeiwert (123).

(Gleichung 23.22 gilt nur für positive Werte der Klammer).

Die bekannte Gleichung 23.21 für Newtonsche Flüssigkeiten ergibt sich aus dieser neuen Gleichung für $m = 1$ und $\tau_F = 0$.

Nicht-Newtonische Flüssigkeiten lassen sich bei Lebensmitteln in verschiedene Untergruppen einteilen (90) (123):

- BINGHAM-FLÜSSIGKEITEN (PASTEN)

Mit $m = 1$ und $\tau_F \neq 0$ muß die von außen wirkende Schubspannung τ über der Fließgrenze τ_F liegen, um in der Flüssigkeit ein Geschwindigkeitsgefälle zu erzeugen.

Beispielsweise kann ein Eßlöffel in einem Kuchenteig für Schubspannungswerte $\tau < \tau_F$ regelrecht stecken- bzw. stehenbleiben.

- STRUKTURVISKOSE FLÜSSIGKEITEN

Mit $\tau_F = 0$ und $m > 1$ sinkt die Schubspannung τ und damit der Fließwiderstand mit größer werdendem Geschwindigkeitsgefälle bzw. zunehmender Geschwindigkeit. Dies trifft für Lebensmittel zu, die langgestreckte Moleküle enthalten, welche sich bei zunehmendem Geschwindigkeitsgefälle ausrichten, so daß die Schubspannung abnimmt.

- DILATANTE FLÜSSIGKEITEN

Mit $\tau_F = 0$ und $m < 1$ steigt die Schubspannung τ mit wachsendem Geschwindigkeitsgefälle an. Bei Lebensmitteln, die Suspensionen von Wasser sind oder z.B. bei Sahne läßt sich dies beobachten (Abb. 23/16).

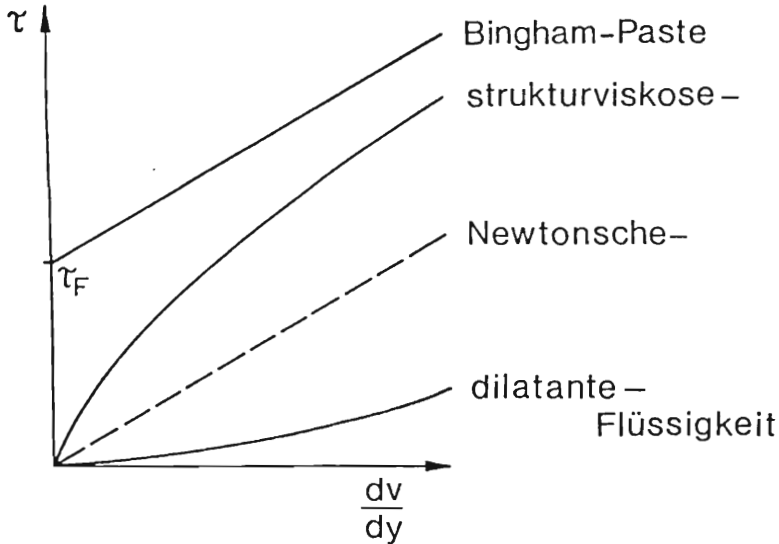


Abb. 23/16: Zusammenhang von Schubspannung τ und Geschwindigkeitsgefälle $\frac{dv}{dy}$ bei verschiedenen Flüssigkeitstypen mit $\frac{dv}{dy}$ unterschiedlich rheologischen Eigenschaften

Über diese Gruppierung hinaus gibt es noch Lebensmittel, z.B. Mayonnaise, bei denen die Schubspannung und die Viskosität noch von der Zeit abhängen. Derartige Stoffe bezeichnet man als thixotrop. Während des Rührens nimmt ihre Vis-

kosität ab. Nach Beendigung der mechanischen Einwirkung steigt sie jedoch wieder an. In einem Diagramm, in dem die Scherspannung τ über dem Geschwindigkeitsgefälle $\frac{dv}{dy}$ aufgetragen ist, können die beschriebenen Flüssigkeitstypen anschaulich charakterisiert werden.

Manche Lebensmittel lassen sich nicht so eindeutig zuordnen. Ihr Verhalten ist bereichsweise eine Superposition der dargestellten Flüssigkeitstypen. So kann z.B. Teig bei kleinem Geschwindigkeitsgefälle $\frac{dv}{dy}$ die Charakteristik einer Bingham-Paste besitzen ($\tau_F \neq 0$), jedoch bei zunehmenden Werten für das Geschwindigkeitsgefälle $\frac{dv}{dy}$ strukturviskose oder dilatante Eigenschaften aufweisen.

Da hochviskose Lebensmittelmischungen vielfach als Bingham-Pasten betrachtet werden können, muß in den zu teilenden Ebenen - ähnlich wie beim Abscheren von Feststoffen (Kap. 2.1.7) - erst die Schubspannung τ_F überschritten werden, ehe das Gemisch zu fließen beginnt. Daher und wegen der hohen dynamischen Viskosität sind große Kräfte an den Werkzeugen erforderlich.

Selbst bei den relativ kleinen Lebensmittelmengen wie sie im Haushalt bearbeitet werden, erfordern diese Kräfte multipliziert mit den Werkzeug-Geschwindigkeiten große Antriebsleistungen. Einerseits beansprucht dies Werkzeuge und Geräte, andererseits wird die mechanische Energie in Wärme umgewandelt und erhöht die Temperatur des Lebensmittels.

Die Antriebsleistungen lassen sich bei Rühr- und Knetwerken aus Modellversuchen ermitteln, wenn man die dimensionslose Ähnlichkeitszahl oder Newton-Zahl

$$Ne = \frac{P}{\rho n^3 D^5} \quad (23.23)$$

einführt, wobei P = Antriebsleistung

ρ = Dichte der Flüssigkeit

n = Drehfrequenz

D = charakteristischer Rührdurchmesser.

Die Reynoldszahl

$$Re = \frac{\rho n D^2}{\eta} , \quad (23.24)$$

ist in der Strömungsmechanik eine der wichtigsten Kenngrößen (η = dynamische Zähigkeit). Insbesondere können damit Strömungsformen erkannt werden (hier: $Re < 30$ Laminarströmung; $Re > 100.000$ Turbulenzströmung und dazwischen Übergangsströmung (48)). Der Zusammenhang zwischen der Reynoldszahl und der Newtonzahl wurde bei Rührwerken ausführlich untersucht (Abb. 23/11) (77) (109).

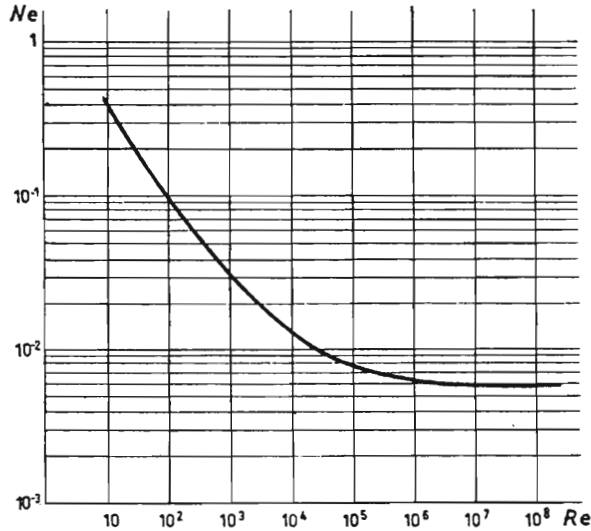


Abb. 23/17: Diagramm zur Bestimmung der Antriebsleistung von Rührwerken über die Newtonzahl (Ne) in Abhängigkeit der Reynoldszahl (Re) (77)

Damit kann die Antriebsleistung

$$P = Ne \rho n^3 D^5 \quad (23.25)$$

berechnet werden (48). Diese Gleichung läßt sich auch bei Knetwerkzeugen anwenden. Allerdings ist die Newtonzahl dabei schwieriger zu ermitteln, da sie nicht nur von der Reynoldszahl abhängt, sondern von weiteren Kennzahlen wie Fließeigenschaften, Schubspannung usw.

Bei überlagerten Bewegungen aus Eigenbewegung der Werkzeuge und Zusatzbewegungen sind entsprechend mehrere Momentenanteile bzw. Leistungsanteile zu berücksichtigen.

Die Gleichung 23.25 zeigt, daß bei fester Ähnlichkeitszahl Ne sich insbesondere der charakteristische Durchmesser D (fünfte Potenz) und die Drehfrequenz n (dritte Potenz) stark auswirken.

Nimmt man in erster Näherung an, daß die gesamte zugeführte Antriebsleistung in Wärme umgewandelt wird und vernachlässigt man dabei die Kühlwirkung der Umgebung, so erhält das Lebensmittel die Temperatur

$$\mathcal{J} = \mathcal{J}_0 + \frac{P t}{m c} , \quad (23.26)$$

wobei \mathcal{J}_0 = Temperatur des Lebensmittels bei Beginn

P = zugeführte Leistung (Wärmestrom)

t = Bearbeitungszeit

m = Masse des Lebensmittels

c = spezifische Wärmekapazität des Lebensmittels.

Diese Temperaturerhöhung senkt i.a. die Viskosität des Lebensmittels, weshalb sich bei gleicher Drehfrequenz die Antriebsleistung der Werkzeuge etwas verringert.

Bei temperaturempfindlichen Lebensmitteln oder solchen, die leicht schmelzende Komponenten enthalten, ist die Bearbeitungsdauer bzw. die Rührleistung zu begrenzen oder notfalls das Lebensmittel verstärkt zu kühlen.

GERÄTEBEISPIELE für das Verfahren RÜHREN

Beim RÜHRWERKZEUG rotieren in einer kreisrunden Schüssel zwei korbähnliche Werkzeuge - in der Küchenpraxis auch Besen genannt - im flüssigen Lebensmittel (Abb. 23/18). Die Schüssel ist im Betrieb mit ihrem Zentrierbund auf der STAND-KÜCHEN-

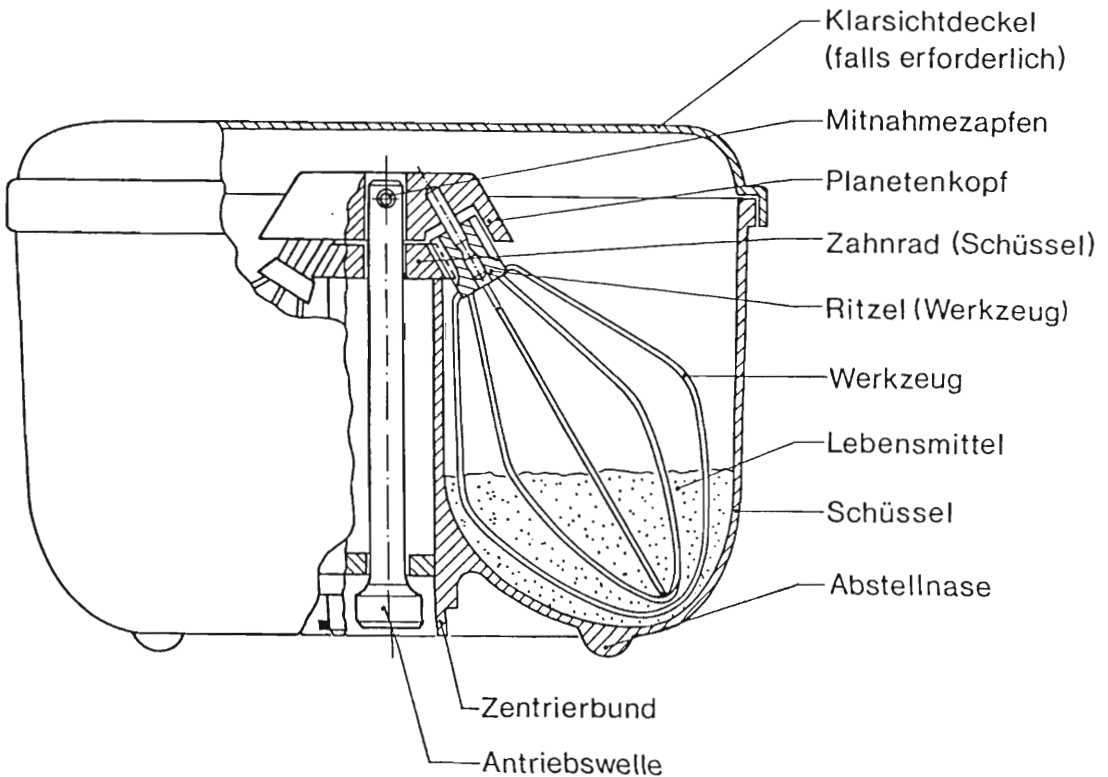


Abb. 23/18: Rührwerkzeuge mit Schüssel einer Stand-Küchenmaschine (Vertikal-Teilschnitt)

MASCHINE befestigt, deren Abtriebswelle 2 (niedrige Drehfrequenz) in die Antriebswelle greift (Abb. 23/19). Die Leistung des Universalmotors gelangt über zwei Zahnrad-Untersetzungsgetrieben und einem Riementrieb sowie über Steckkupplungen an den Planetenkopf bzw. an die RÜHRWERKZEUGE. Das Drehmoment verstärkt sich dabei entsprechend der jeweiligen Untersetzungsverhältnisse.

Im Haushalt werden Lebensmittel von sehr unterschiedlicher Konsistenz und Viskosität bearbeitet. Daher müssen die Werkzeuge für sehr unterschiedliche Arbeitsbedingungen ausgelegt sein. Einerseits müssen sie in niedrig-viskosen Flüssigkeiten hinreichend starke Strömungsgeschwindigkeiten erzeugen können, was große Werkzeugflächen und große Antriebsgeschwindigkeiten erfordert. Andererseits müssen auch hoch-viskose

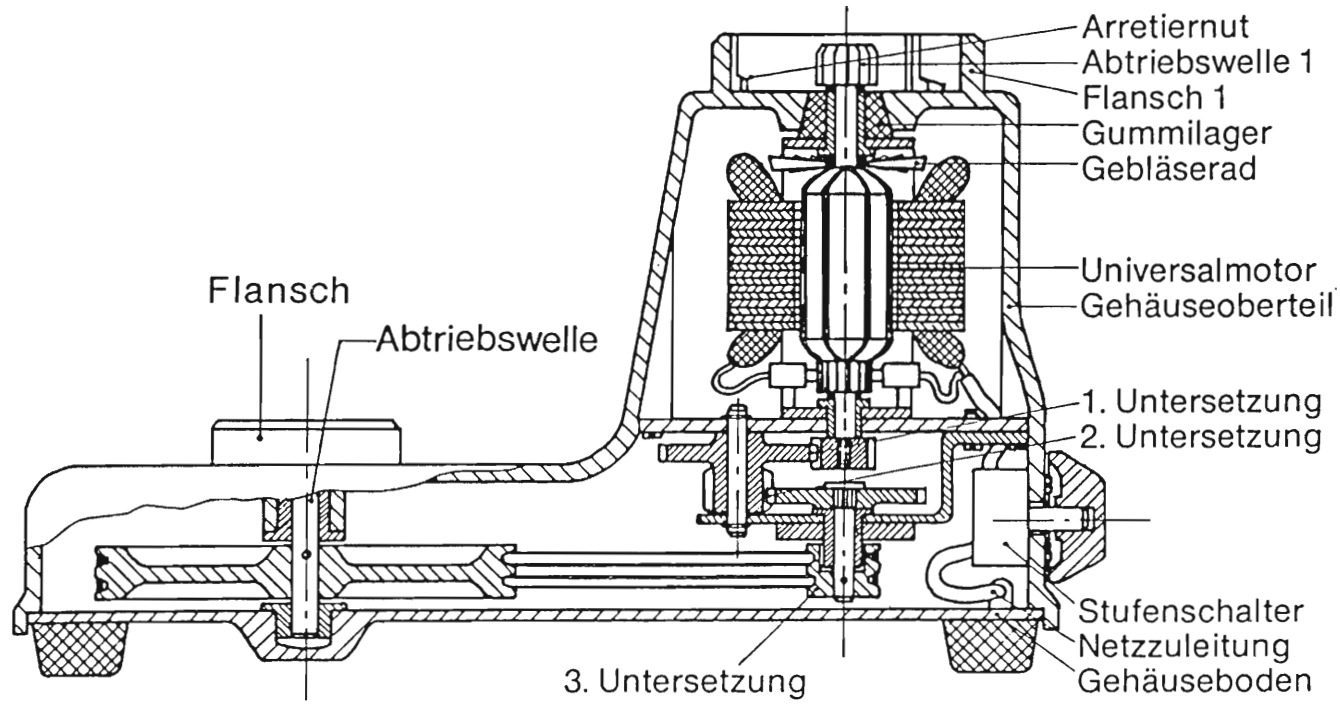


Abb. 23/19: Grundgerät einer Stand-Küchenmaschine (Vertikalschnitt)

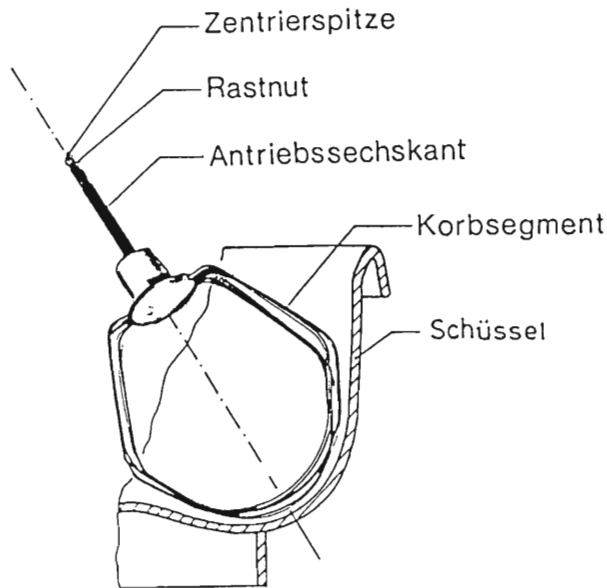


Abb. 23/20: Rührwerkzeug mit Schüssel einer Klein-Küchenmaschine (Vertikal-Teilschnitt)

Lebensmittel bearbeitet werden können, die meist stark haften, weshalb die Werkzeuge nicht zu großflächig sein dürfen (Rührdurchmesser), um das Drehmoment entsprechend zu begrenzen.

Korbähnliche Werkzeuge sind zum RÜHREN dünnflüssiger Lebensmittel gut geeignet. Bei hoch-viskosen Lebensmitteln hingegen besteht die Gefahr, daß sich der Werkzeuginnenraum mit Rührgut auf Dauer zusetzt. Kompromisse sind Rührwerkzeuge mit unsymmetrischem Aufbau bzw. stark unterschiedlicher Teilung des Außenkorbes (Abb. 23/20). Eine andere Möglichkeit ist es, gegenläufig rotierende Rührwerkzeuge zu verwenden, die ineinandergreifen und so ein längeres Festklumpen des Rührgutes im Innenraum der Werkzeuge verhindern (Quirlpaar, Abb. 23/14).

2.3.5 KNETEN

Definition: Mischen von Lebensmitteln bei pastöser Konsistenz (Beispiele: Komponenten zu Hefeteigen, Fleischteigen und Lebkuchenteigen).

Nach dem sog. Homogenisierungsschema grenzen an das Verfahren KNETEN einerseits VERMENGEN (Trockenmischen) und andererseits RÜHREN (Abb. 23/4). Damit sind beim KNETEN teilweise die aufgezeigten Probleme beider Verfahren zu berücksichtigen. Beispielsweise müssen die Werkzeuge möglichst jeden Ort des Gefäßvolumens erreichen und die Antriebskräfte müssen relativ groß sein. Zusätzlich neigen die hochviskosen Lebensmittel, wie sie beim KNETEN anzutreffen sind, zum Haften an Werkzeugen und Gefäßwänden. Derartige Lebensmittelgemische werden als PASTEN bezeichnet (Tab. 23/1).

Dem eigentlichen Knetverfahren ist meist ein VERMENGEN von weitgehend trockenen Lebensmittelkomponenten vorgeschaltet. Anschließend bewegt das Knetwerkzeug das Lebensmittelgemisch in einem Gefäß, belastet es zwischen Werkzeug- und Gefäßwand oder zwischen zwei Werkzeugen und schert es auch ab. Wegen der hohen Viskosität bildet sich dabei eine laminare Strömung aus: Mischwirkungen durch turbulente Strömungen sind praktisch unmöglich.

Die Knetmasse wird in Schichten gegeneinander verschoben und abgeschert. Modellhaft ist vorstellbar, daß Anordnungen paralleler Schichten der zu knetenden Lebensmittelkomponenten mehrfach abgeschert werden (Abb. 23/21a). Versetzt man die abgescherten Ebenen um das Maß h_a , so entsteht eine einheitliche Mischungsstruktur (Abb. 23/21b). Werden aus diesem Gemisch senkrecht zur vorangegangenen Scherbewegung erneut Schichten abgeschert und um das Maß h_b verschoben, so entsteht ein neuer Mischungszustand (Abb. 23/21c).

Schert man noch einmal senkrecht zur vorangegangenen Bewegung alle Schichten und verschiebt diese um das Maß h_c , so erhält man einen bereits sehr feinen Mischungszustand (Abb. 23/21d).

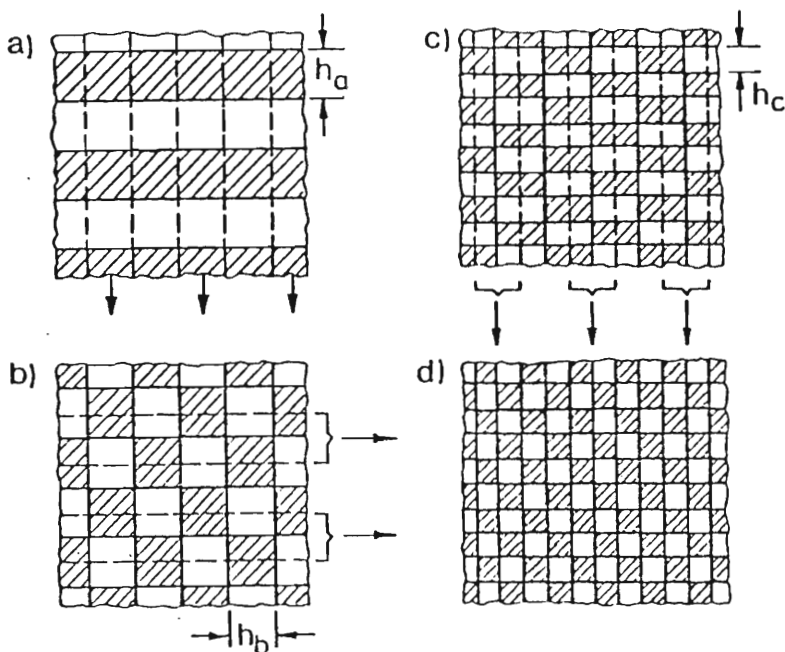


Abb. 23/21: Prinzip des Knetens durch wiederholtes Abscheren, Verschieben und erneutes Zusammenfügen

Durch Wiederholung der Vorgänge Abscheren und Verschieben, bzw. Teilen und neu Vereinigen, läßt sich die Mischgüte theoretisch beliebig verbessern (109). Bei diesem Knetprinzip ist demnach partiell ein Zerkleinerungsverfahren mit einem Mischverfahren kombiniert. Besonders wichtig ist auch das Ablösen des meist stark haftenden Knetgutes von Werkzeug und Gefäßwand. Hierzu dienen Abstreifer und zum Teil auch Strombrecher, welche in die Strömung eingreifen.

Am Ende dieses Knetprinzips ist vielfach noch ein Nachkneten erforderlich, bei dem aber ein Abscheren bzw. Abreißen des Knetgutes vermieden wird. Vielmehr wird unter Anwendung großer Flächenkräfte - z.B. im Haushalt von Hand auf Unterlage - das Knetgut nur in sich umgeformt und gewalzt. Dabei wird der Zusammenhalt des Teiges verbessert und die Oberfläche geglättet. Bei mechanischer Bearbeitung wird der Teig plastisch (Thixotropie), die Stärkekörner orientieren sich nach der Kraftrichtung. Das so behandelte Lebensmittel erhält damit bessere Eigenschaften für die weitere Verarbeitung wie Auswalzen und Ausformen.

Die Qualität von Teigen kann indirekt über das gebackene Produkt bestimmt werden oder direkt nach dem Kneten. Beim Backtest werden zwar alle Einflußfaktoren berücksichtigt, aber unvermeidliche Fehler oder Toleranzen bei der Wärmebehandlung verfälschen die Beurteilung des eigentlichen Knetergebnisses. Bei der direkten Prüfung des frischen Teiges besteht diese Gefahr nicht. Es muß jedoch klar definiert werden, welche Eigenschaften anzustreben bzw. günstig sind.

Für den gewerblichen Bereich wurden zur Beurteilung von plastischen Knetteigen aus Weizenmehl oder Weizenmehlgemischen genormte Prüfmethode mit dazugehörigen Knet- bzw. Prüfgeräten entwickelt (53) (54).

In vorliegender Habilitationsschrift ist aber nicht die Beurteilung des Lebensmittels vorrangig, sondern die Beurteilung des Verfahrens bzw. des Gerätes zur technischen Realisation des Verfahrens. Deshalb wird hier vorgeschlagen, das Lebensmittel zu standardisieren und die genormten Prüfmethode, die Prüfgeräte und die bisherigen Erfahrungen dabei zu nutzen, um so die Knetverfahren im Haushalt zu bewerten oder Küchenmaschinen damit optimieren zu können.

Das STANDARD-KNETGERÄT (z.B. Farinograph) (9) dient dann lediglich zur Einstellung der Lebensmittelzusammensetzung, z.B. Gewichtsanteile der Komponenten - insbesondere der Wassermenge - und damit zur Standardisierung des Ausgangsproduktes (Abb. 23/22).

Unter definierten Bedingungen - ein sehr wichtiger Parameter ist beispielsweise die Lebensmitteltemperatur - wird mit dem zu untersuchenden Verfahren der Teig bearbeitet. Dies ist auch notwendig, da z.B. Knetdauer und Knetgeschwindigkeit die Teigqualität und die Volumenzunahme beeinflussen (51). In die Bearbeitungsdauer können auch

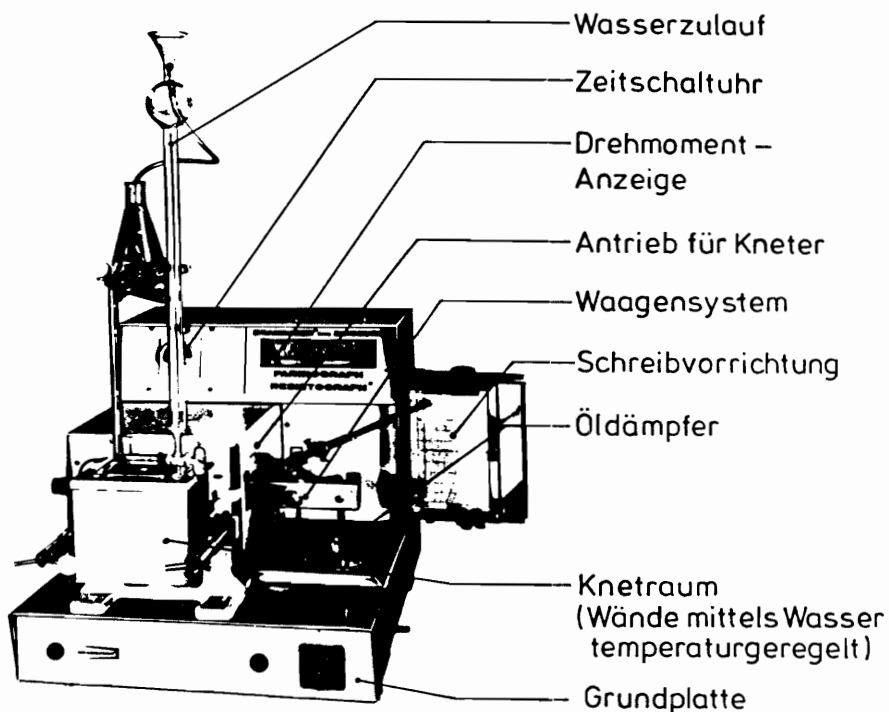


Abb. 23/22: Standard-Knetgerät
Farinograph, Hersteller BRABENDER OHG
Duisburg (9)

Zeiten für Teigruhe oder Gärung miteinbezogen sein, was bei Hefeteigen besonders wichtig ist.

Mit einem TEIGPRÜFGERÄT (z.B. Extensograph) (8) können verschiedene Eigenschaften des (frischen) Teiges ermittelt werden (Abb. 23/23). Dabei wird ein zylindrischer Teigstrang an beiden Enden in speziellen Vorrichtungen befestigt und von einem Hebel mit konstanter Geschwindigkeit v quer zur Längsachse des Teiges gedehnt, bis der Teig reißt. Die dabei auftretende Kraft F wird über ein Dynamometer in Abhängigkeit des Dehnungsweges s bzw. der Zeit t ($v = \text{konst.}$) auf ein Schreibgerät übertragen (Abb. 23/24).

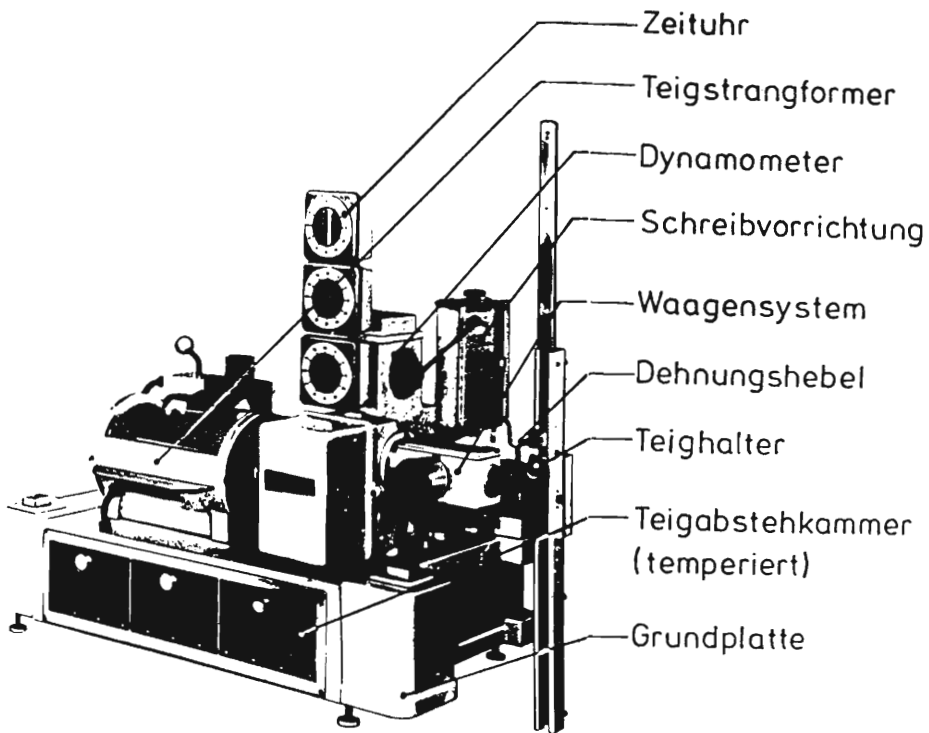


Abb. 23/23: Teigprüfgerät Extensograph
Hersteller BRABENDER OHG Duisburg (8)

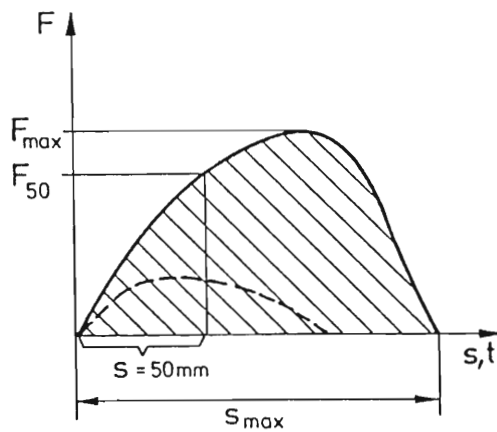


Abb. 23/24: Extensogramm: Abhängigkeit der Zugkraft F in
Abhängigkeit des Dehnweges s bzw. der Dehnzeit t .
Beim maximalen Weg s_{max} reißt der Lebensmittel-
strang ab

Die so gewonnenen Kurven werden als Extensogramme bezeichnet und charakterisieren verschiedene Ausprägungen von Teigeigenschaften (Abb. 23/25).

Der DEHNWIDERSTAND ist die Kraft F , die der Teig einer Dehnung bei konstanter Geschwindigkeit v entgegengesetzt. Dabei bewertet man entweder die maximale Kraft F_{\max} oder F nach einer bestimmten Zeit t bzw. Dehnweg s (z.B. $s = 50 \text{ mm}$).

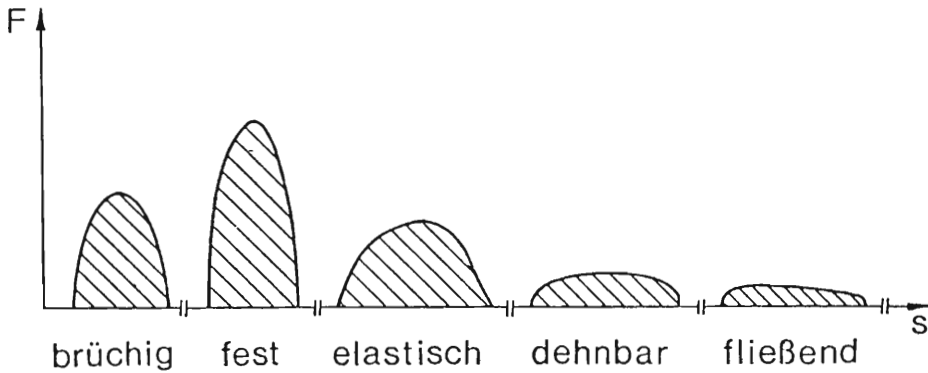


Abb. 23/25: Extensogramm: Kraft F in Abhängigkeit des Dehnweges s von Teigen mit unterschiedlichen Dehneigenschaften (8)

Die DEHNBARKEIT ist der Dehnweg s_{\max} , bei dem der Teigstrang abreißt.

Die DEHNUNGSENERGIE E wird in Kraft-Weg-Diagrammen als Fläche (schraffiert) unter der Kurve dargestellt und ist mathematisch ausgedrückt.

$$E = \int_{s=0}^{s=s_{\max}} F(s) \, ds \quad . \quad (23.27)$$

Sie läßt sich am einfachsten mit dem Planimeter ermitteln.

Aus diesen Kenngroßen lassen sich durch Quotientenbildung z.B. Dehnwiderstand/Dehnbarkeit oder unter Einbezug von Querschnittsfläche und Einspannlänge des Teiges sowie Verformungsgeschwindigkeit noch weitere Beurteilungskriterien schaffen.

Damit sind Rückschlüsse auf das Knetverfahren möglich. Beispielsweise können bei einem schlecht gemischtem Teig (inhomogen) keine großen Werte für DEHNWIDERSTAND oder DEHNBARKEIT erwartet werden, da der belastete Teigstrang an seinen Fehlstellen vorzeitig abreißt. Die Beurteilung kann jedoch nicht absolut, sondern nur relativ zum Knetverfahren des Standard-Knetgerätes oder bei Knetverfahren untereinander erfolgen.

Neben der beschriebenen Methode mittels Dehnungsversuch kann die Homogenität eines Knetgutes auch über eine statistische Bestimmung nach Probenentnahme beurteilt werden. Die letztgenannte Methode ist auch beispielsweise auf Rührgut anwendbar (vgl. MISCHGÜTE, Kap. 2.3). Hierzu werden meist Indikatoren wie Mohnkörner, Kunststoffkugeln, Kieselgel oder sonstige unlösliche Partikel zugegeben.

Dabei sind an den Indikator folgende Forderungen zu stellen:

- leicht aus dem Teig entfernbar
- optischer Kontrast zum Teig
- keine Gewichtsveränderungen (z.B. durch Wasseraufnahme)
- spezifisches Gewicht dem Teig angepaßt
- Form und Größe möglichst gleichmäßig.

In umfangreichen Experimenten, bei denen der Einfluß wichtiger Parameter (z.B. Werkzeugform, Drehfrequenz, Knetdauer, Wasserzusatz und Temperatur) auf Verfahrensablauf bzw. Arbeitsergebnisse untersucht wurde, erwiesen sich Kunststoffgranulat (Volumen $V = 4 \pm 1 \text{ mm}^3$) und Kieselgel ($V = 2 \pm 0,5 \text{ mm}^3$) als vorteilhaft.

Ein geringer Mengenanteil (etwa 2 - 3 %) dieser Indikatoren wird zu Beginn des Knetprozesses den Teigkomponenten beigemischt. Nach Beendigung des Knetverfahrens werden 5 Proben nach einem vorgegebenen Schema entnommen (Abb.23/26).

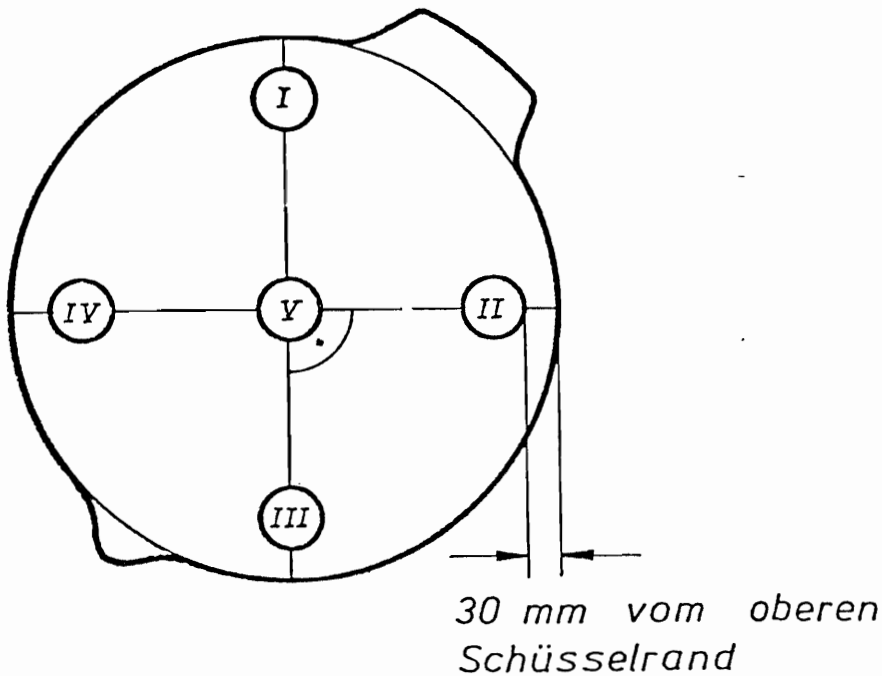


Abb. 23/26: Schema zur Entnahme der Teigproben aus der Schüssel einer Hand-Küchenmaschine (Aufsicht)

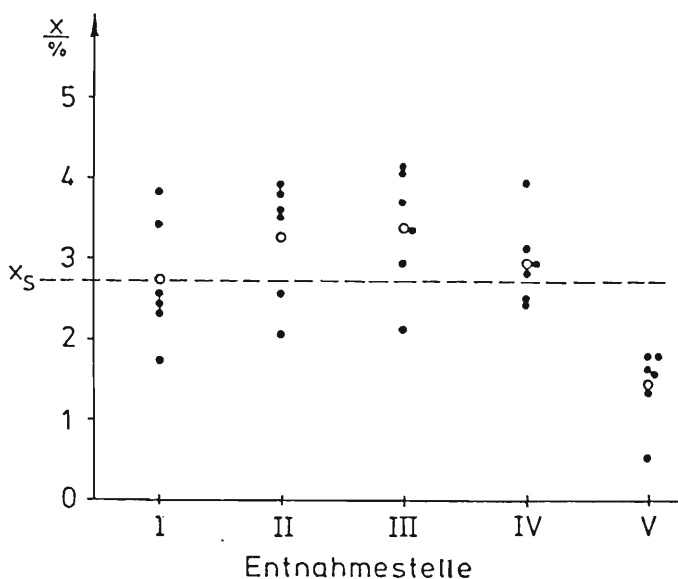
Jede Probe wird mit einem Stanzrohr (Innendurchmesser $D = 18,8$ mm) ausgestochen und die Teigprobe anschließend gewogen. Unter fließendem Wasser wird die Probe gewaschen, wobei der Indikator zuverlässig in einem Sieb (Maschenweite $d = 0,8$ mm) zurückgehalten wird. Da das Kunststoffgranulat durchsichtig ist, lassen sich noch vorhandene Verunreinigungen erkennen und so der Wascherfolg beurteilen.

Nach dem Trocknen des Indikators im Trockenschrank (Temperatur = 50 °C, Zeit = 20 min) wird der Indikatoranteil einer jeden Probe gewogen und ihr prozentualer Anteil berechnet (Abb. 23/27).

Das Ergebnis zeigt sehr unterschiedliche Anteile des Indikators, weniger hinsichtlich der 6 Knetversuche, sondern vor allem bezüglich der Verteilung in der Schüssel. Offensicht-

lich ist der Anteil des Indikators im Zentrum der Schüssel (Entnahmestelle V) wesentlich geringer als in den äußeren Zonen (Entnahmestellen I bis IV).

Um ein Mischverfahren zuverlässig beurteilen zu können, ist das Verfahren und insbesondere die Probenentnahme mehrmals zu wiederholen. Erst über eine statistische Auswertung gemäß den angegebenen mathematischen Grundlagen lassen sich genauere Aussagen über die Homogenität des Lebensmittels bzw. über die Qualität des Mischverfahrens machen.



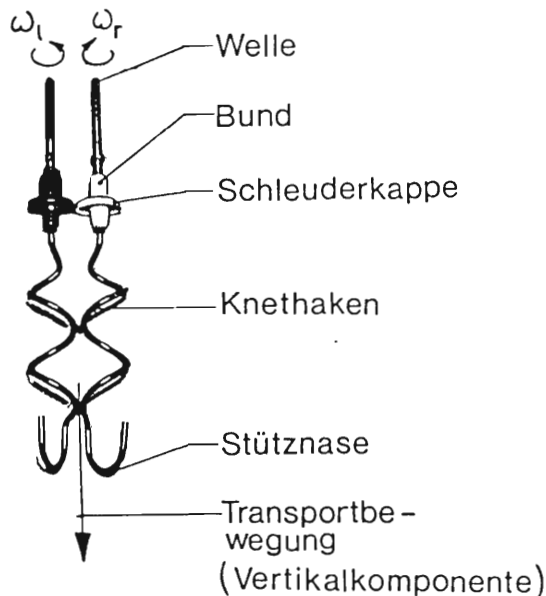
- Abb. 23/27: Massenanteil x des Indikators Kunststoffgranulat in sechs Teigproben jeweils an den Entnahmestellen I mit V. (● = Meßwert je Probe und Entnahmestelle, ○ = Mittelwert je Entnahmestelle, x_s = "wahrer" bzw. vorgegebener Massenanteil in der Gesamtmischung)

Die Mischgüte einschließlich Gleichmäßigkeit der Porung läßt sich auch an Schnittflächen von Lebensmittelportionen beurteilen. Zusätzliche Farbindikatoren, die vor oder während der Bearbeitung zugegeben werden, erleichtern diese Beurteilung. Die dabei notwendige "Versteifung" des Lebensmittels kann auch mit anderen Methoden wie beispielsweise Tiefgefrieren oder durch Zusatz chemischer Härter erfolgen.

GERÄTEBEISPIELE für das Verfahren KNETEN

Bei einem KNETWENDELPAAR zur HAND-KÜCHENMASCHINE läßt sich das Verfahren KNETEN, gekennzeichnet durch Abscheren, Verschieben und erneutes Zusammenfügen des Lebensmittelgemisches verdeutlichen.

Derartige KNETWERKZEUGE sind schrauben- oder wendelförmig ausgebildet und werden deshalb auch als Knetwendel bezeichnet (Abb. 23/28). Dabei ist eine Wendel im Sinne einer Rechtsschraube und die andere als Linksschraube geformt. Die spiegelsymmetrischen Knetwendel berühren sich fast und "rollen" bei gegenseitiger Rotation der Wellen nahezu aufeinander ab. Damit wird die charakteristische Abscherbewegung im Wirkraum erzielt. Neben Transportwirkungen senkrecht zu den Drehachsen bildet sich auch eine Transportwirkung nach unten aus (Vertikalkomponente).



- Abb. 23/28: Knetwendelpaar zu einer Hand-Küchenmaschine

Beim KNETWERKZEUG zu einer KLEIN-KÜCHENMASCHINE muß das Ab-scheren des Teiges vorwiegend zwischen dem Einzelwerkzeug

und der Schüsselwand erfolgen (Abb. 23/29). Deshalb ist das Wirkteil des Werkzeuges (Haken) hinsichtlich seiner Form dem Wandprofil der Schüssel angepaßt. Das Werkzeug ist zusätzlich räumlich gekrümmt, wobei der Haken windschief zur Antriebsachse liegt.

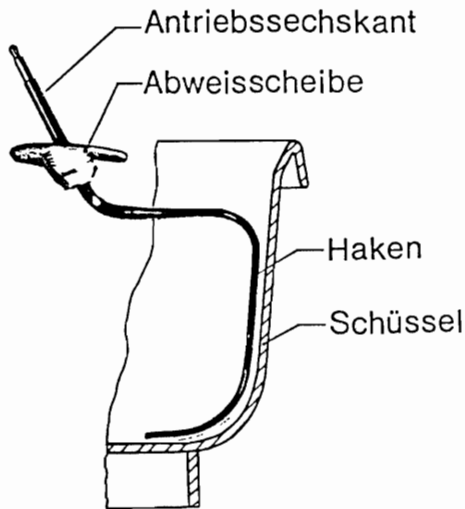


Abb. 23/29: Knetwerkzeug mit Schüssel einer Klein-Küchenmaschine (Vertikal-Teilschnitt)

Zusammen mit der Kinematik des Planetengetriebes (Bahnkurve, Abb. 34/19) bewirkt dies eine große, radiale Geschwindigkeitskomponente, das heißt, der Haken nähert sich stellenweise senkrecht der Schüsselwand und schert so den Teig ab. Im Schüsselinneren entstehen kräftige Querbewegungen, was Ver-schieben und erneutes Zusammenfügen des Lebensmittel-Gemisches bewirkt.

Die angesprochene Kinematik des Knetwerkzeuges ist beim folgenden Kapitel über SCHAUMSCHLAGEN von noch größerer Bedeutung.

2.3.6 SCHAUMSCHLAGEN

Definition: Mischen von flüssigen Lebensmitteln mit Gas (Luft) zu einem feinblasigen Membrangebilde (Beispiele: Luft in Sahne, Luft in Eiweiß, Luft in Ei mit Zitronensaft).

Das Verfahren SCHAUMSCHLAGEN nimmt in Bezug zu allen übrigen Mischverfahren eine Sonderstellung ein, da es nur unter stark eingeeengten Randbedingungen möglich ist, Schäume in Lebensmitteln zu erzeugen. Bei SCHAUM ist die disperse Phase (innere Phase) gasförmig und die Dispersionsphase (äußere oder kontinuierliche Phase) ist flüssig oder kann z.B. nach Aushärtung auch fest sein (Hartschaum) (vgl. Tab. 22/1).

Zum Erzeugen von Schaum in Flüssigkeiten sind mehrere Verfahren möglich, drei davon sind:

- Einschlagen von Gas (Schaumschlagen)
- Einblasen von Gas (Schaumblasen)
- Einschlagen und gleichzeitiges Einblasen von Gas (Kombination von Schlagen und Blasen).

Als Ergebnis der Verfahren ist dabei Gas bzw. Luft in Form kleiner Bläschen in der Flüssigkeit verteilt. In einer reinen Flüssigkeit vermag ein Gas jedoch lediglich "nackten" und deshalb wenig stabilen Kugelschaum zu bilden, wie er etwa bei Sekt auftritt (129). Soll der entstehende Schaum zumindest für begrenzte Zeit stabil sein, so ist anstelle des "Zweiphasenschaumes" ein "Dreiphasenschaum" mit einer dritten zur Filmbildung befähigten Komponente notwendig.

Bei Lebensmitteln wie Sahne und Eischnee sind die für stabilen Schaum notwendigen Komponenten:

- Luft (gasförmig), seltener Kohlendioxid
- Wasser (flüssig) incl. gelöster Salze
- Eiweißstoffe und/oder Fettbestandteile (fest bzw. halbfest) (116).

Kolloidales Eiweiß und/oder flüssige Fettbestandteile können Oberflächen- bzw. Grenzflächenfilme bilden und die Oberflächenspannung der wässrigen Phase erheblich reduzieren. Während destilliertes Wasser die Oberflächenspannung $\sigma_W = 72,9 \cdot 10^{-3} \frac{N}{m}$ besitzt (129), wurde bei Sahne (30% Fett, 20 °C) die Oberflächenspannung $\sigma_S = 29,5 \cdot 10^{-3} \frac{N}{m}$ und bei Eiklar $\sigma_E = 52,3 \cdot 10^{-3} \frac{N}{m}$ ermittelt. (Die Meßwerte - jeweiliger Mittelwert aus zehn Einzelmessungen - wurden mit dem Digitaltensiometer am Institut für Chemie und Physik der Milch, Südd. Versuchs- und Forschungsanstalt, Weißenstephan durchgeführt).

Zu Beginn eines mechanischen Schlagprozesses entstehen zunächst große Luftblasen in der Flüssigkeit und die darin makroskopisch unsichtbaren festen und halbfesten Stoffe haften nur locker in den anfänglich noch dicken Wänden zwischen den Blasen. Unterbricht man den Schlagprozeß, so fällt dieser Schaum ähnlich rasch wie ein Zweiphasenschaum zusammen (116). Wird der Schlagprozeß aber fortgesetzt, so wird weiter Luft eingebracht, größere Schaumblasen werden zu kleineren zerteilt und das Gesamtvolumen des Gemisches nimmt zu. Dabei erhöht sich bis zu einem gewissen Punkt die Stabilität des Schaumes. Darüberhinaus nimmt die Stabilität wieder ab.

Wegen der Oberflächenspannung der wässrigen Phase besitzen die Luftblasen zunächst Kugelgestalt. Mit fortschreitendem Schlagprozeß verringert sich der Abstand der Bläschen und somit nimmt die Lamellendicke ab. Der kleinste Durchmesser der Bläschen wurde z.B. bei Sahne mit $D = 60 \div 80 \mu m$ gemessen (89).

In dichtester Kugelpackung könnte der Gasanteil etwa 74 Volumenprozent nicht überschreiten. Diese sogenannte "Raumerfüllung" wurde von MINKOWSKI für eine reguläre 12-er Kugelpackung zu 0,7405 berechnet (80).

Gelingt es, noch mehr Luft in den Schaum einzuschlagen, so müssen die Bläschen Polyederform annehmen. Im Gegensatz zum Kugelschaum haben beim Polyederschaum die Bläschen ihre Selbständigkeit verloren (81). Die gasgefüllten Hohlpolyeder teilen den Raum fast lückenlos auf (79).

Diese Deformation der Blasenform von Kugeln zu Polyedern entspricht der Forderung nach einem Minimum an Oberflächenenergie. Zwar besitzt die einzelne Blase in Kugelform für sich allein betrachtet bei vorgegebenem Volumen geringstmögliche Oberfläche, aber ein Verband von kugelförmigen Blasen würde selbst bei dichtester Kugelpackung ein relativ großes Flüssigkeitsvolumen zwischen den Kugeln aufweisen. Im Gegensatz dazu füllt ein aus Polyedern bestehender Verband den Raum wesentlich besser aus. In den so verbleibenden dünnen Flüssigkeitslamellen werden kolloidales Eiweiß oder Fettkügelchen gehalten und verhindern das zu rasche Absetzen der Flüssigkeit bzw. versteifen die Lamellen.

Beim Lebensmittel Eiklar geschieht dies vorwiegend durch gerichtete Eiweißmoleküle, wobei auch durch Koagulation derselben an der Grenzfläche Luft-Flüssigkeit die Lamelle versteift und der Schaum dadurch fester wird (83) (113).

Beim Lebensmittel Sahne, welches im Gegensatz zu Eiklar sehr viel Fett enthält (etwa 30%), sind an der Schaumentstehung Fettkügelchen beteiligt, die in der kontinuierlichen Phase, dem wässrigen Rahmplasma, dispergiert sind. Diese Fettkügelchen sind von einer Membrane, die Proteine oder Lipoproteine enthält, umgeben. Das feste Fett - sein Anteil ist umso größer, je tiefer die Temperatur des Lebensmittels ist - wirkt im Gegensatz zum flüssigen Fett stabilisierend auf den Schaum (60). Im übrigen ist der prozentuale Anteil an festem Milchfett bei "Wintersahne" aufgrund der geänderten Fütterung gegenüber "Sommersahne" deutlich größer (65) (66).

Um dies etwas auszugleichen wird bei der Produktion im Sommer der Fettgehalt oftmals auf die Werte bis 34% eingestellt, wohingegen im Winter 30% ausreichen (57).

Der letztgenannte Wert entspricht dem neuen gesetzlichen Mindestfettgehalt (früher 28%); der Höchstoffgehalt ist mit 36% festgelegt (69).

Andere Autoren nennen als Grund für diese Fettgehaltseinstellung auch den jahreszeitlich unterschiedlichen Gehalt an fettfreier Trockenmasse (121).

Der Schlagprozeß bzw. die Volumenerhöhung läßt sich jedoch nicht beliebig fortsetzen. Austretendes "Butteröl" bewirkt eine fortschreitende Agglomeration und demzufolge eine "Sprengung" der dünnen Schaumlamellen (64). Das freie Fett dieses irreversiblen Butterungsprozesses zerstört den Schaum, dessen Oberfläche dann naß glänzend und grießlig wird.

Beim Lebensmittel Eiklar läßt sich die Volumenzunahme oder zumindest die Schlagdauer weiter steigern, ohne daß gravierende Änderungen im Prozeß auftreten. Das spezifische Gewicht des Eischnees nimmt ab und die Flüssigkeitslamellen zwischen den polyederförmigen Luftbläschen werden dünner. Extrem dünne Trennwände neigen aber vermehrt zum Zusammenbrechen und die dazwischen gehaltene Flüssigkeit kann dadurch auslaufen. Hinsichtlich der Beständigkeit von Eischnee ist demnach zu erwarten, daß diese umso geringer ist, je größer die Volumenzunahme wird.

Soll das Verfahren SCHAUMSCHLAGEN beurteilt werden, so lassen sich schon nach diesen Vorbetrachtungen folgende Kriterien herausstellen:

- Schlagdauer
- Volumenzunahme
- Beständigkeit
- Aussehen.

Diese Kriterien werden auch größtenteils bei der Bestimmung der Gebrauchseigenschaften von elektrischen Haushalt-Küchenmaschinen nach DIN 44960 T.2 angewandt (29) . Dabei wird zunächst die Verwendung eines Referenzgerätes empfohlen, welches unveränderlich ist, d.h. konstante Geräteparameter besitzt und zur Qualitätsbeurteilung und -einstufung des jeweiligen Lebensmittels dienen soll. Um Qualitätsschwankungen des Lebensmittels innerhalb einer Prüfreihe zu vermeiden, muß möglichst die gesamte Lebensmittelmenge im voraus berechnet und in einer Charge vorbereitet z.B. homogenisiert werden.

Nach der Versuchsdurchführung - entsprechend einer Prüfvorschrift oder nach Empfehlungen des Geräteherstellers - wird der geschlagene Schaum in ein Becherglas mit Teilung (20) eingefüllt, die Oberfläche glattgestrichen und das Schaumvolumen $V_S(t)$ ermittelt.⁺ Das relative Schaumvolumen

$$V'_S(t) = \frac{V_S(t)}{V_0} \cdot 100 \% , \quad (23.28)$$

mit V_0 Anfangsvolumen der Flüssigkeit, ist ein Maß für die Volumenzunahme, die mit dem untersuchten Verfahren erzielt wurde. Dieses relative Schaumvolumen wird von anderen Autoren auch als "Schaumindex" bezeichnet (104).

Beim Lebensmittel Sahne wird die Schlagdauer t_D zunächst mit 30 Sekunden festgelegt, und in den weiteren Versuchen um jeweils 10 Sekunden erhöht, bis die Sahne ihr maximales Schaumvolumen erreicht hat. Je nach Gerät oder Qualität der Sahne kann die Anfangsdauer von 30 Sekunden und das Zeitintervall von 10 Sekunden verändert werden (29).

Beim Lebensmittel Eischnee wird nach der gleichen Prüfnorm (29) bezüglich der Schlagdauer t_D folgendes festgelegt:

"Durch einen Vorversuch ist die Schlagdauer festzustellen, die für einen annähernd schnittfesten Eischnee notwendig ist. Von dieser Schlagdauer ausgehend sind im Abstand von 15 Sekunden mindestens zwei Meßpunkte unterhalb und mindestens vier Meßpunkte oberhalb zu ermitteln."

Zur Bestimmung der Beständigkeit bzw. des Abtropfvolumens (derzeit nur bei Eischnee vorgesehen) wird die Schaummenge in einen Trichter eingefüllt, über dessen Ablaufrohr eine Keramik-Filterscheibe (Lochdurchmesser 1 mm) lagert.

⁺) Die Schreibweise für die zeitabhängigen physikalischen Größen (z.B. Volumen V) in DIN 44960 T.2 (29) konnte nicht übernommen werden, da dort der Eindruck entsteht, der Index sei zeitabhängig und nicht die physikalische Größe selbst; aus $V_S(t)$ wird somit in vorliegender Arbeit $V_S(t)$.

Die abtropfende Flüssigkeit wird in einem Meßzylinder aufgefangen und deren Volumen $V_A(t)$ nach 30 Minuten bestimmt. Das relative Abtropfvolumen

$$V'_A(t) = \frac{V_A(t)}{V_O} \cdot 100\% \quad (23.29)$$

ist ein umgekehrtes Maß für die Schaumbeständigkeit

$$B(t) = \frac{V_O - V_A(t)}{V_O} \cdot 100\% \quad (23.30)$$

Über diese DIN-Prüfvorschrift für Haushalt-Küchenmaschinen hinausgehend, sind nach den DLG-Prüfbestimmungen für Milch und Milchprodukte (36) auch bei Sahne die Messung der Schaumbeständigkeit bzw. der Absetzmenge vorgeschrieben (DLG = Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft). Zusätzlich werden mittels spezieller Prüfvorrichtung die Festigkeit des Schaumes gemessen und auch sensorische Prüfungen hinsichtlich Geruch, Geschmack und Aussehen des Produkts durchgeführt (63).

Mangelnde Qualität von Sahneschaum kann ihre Ursache nicht nur in Schlagfehlern, sondern auch in Produktions- oder Fütterungsfehlern haben. Letztere können sich dann auch in Geruchs- oder Geschmacksbeeinträchtigungen äußern (117). Da in vorliegender Arbeit nicht das Produkt, sondern vorrangig das Verfahren beurteilt werden soll, wird auf sensorische Prüfungen verzichtet.

Die bisherigen Betrachtungen waren der Schaumerzeugung gewidmet. Jedoch nicht immer ist Schaum erwünscht. In vielen technischen Prozessen, so auch manchmal im Haushalt, wird das gegenteilige Ziel verfolgt, nämlich die Schaumentstehung zu verhindern oder bereits vorhandenen Schaum wieder zu zerstören. Dazu dienen sogenannte Schauminhibitoren, die beispielsweise Tensidmoleküle adsorbieren, so daß die Schaumlamellen destabilisiert werden (41). Da bei der Schaumbekämpfung zwangsläufig ähnliche Gesetzmäßigkeiten gelten wie bei der Schaumerzeugung, können manche Forschungsergebnisse der einen Zielrichtung auf die andere transformiert werden.

3. GRÜNDFEGENDE UNTERSUCHUNGEN ZUM SCHAUMSCHLAGEN

Von allen in vorliegender Habilitationsschrift beschriebenen Verfahren ist das SCHAUMSCHLAGEN das komplizierteste. Insbesondere wenn weitgehend stabile Dreiphasenschäume erzeugt werden sollen, sind die physiko-chemischen Eigenschaften der Lebensmittel, eine Vielzahl von Geräteparametern sowie Umgebungsparameter zu berücksichtigen.

Im Haushalt können die Eigenschaften des Lebensmittels nur noch indirekt beeinflusst werden; beispielsweise über Lagerbedingungen, Vorbereitung, Bearbeitungszustand.

Geringfügig beeinflussbar sind die Umgebungsparameter, wie Lufttemperatur, Wärmestrahlung und Luftfeuchtigkeit.

Von den Geräteparametern sind in der Haushaltspraxis zumindest Bearbeitungsdauer, Eintauchtiefe der Werkzeuge bzw. Füllmenge und meistens auch die Drehfrequenz beeinflussbar. Seltener sind verschiedene Werkzeuge bzw. Werkzeugformen oder gar Gefäßformen wählbar.

Die Hauptlast bei der Optimierung des Verfahrens SCHAUMSCHLAGEN liegt somit beim Gerätehersteller. Optimierung ist aber nur möglich, wenn neben den maßgebenden Eingangsparametern des Verfahrens auch die Arbeitsergebnisse beurteilt werden können. Die dazu notwendigen Beurteilungskriterien zu definieren sowie die zugehörigen Meßverfahren festzulegen bzw. zu entwickeln, entspricht dem dritten Ziel vorliegender Habilitationsschrift und ist gleichzeitig die wesentliche Aufgabenstellung des nachfolgend behandelten experimentellen Teils.

Die beim Verfahren SCHAUMSCHLAGEN (Kap. 2.3.6) zitierten Prüfbestimmungen nach DIN (29) bzw. nach den DLG-Prüfungsbestimmungen (36) reichen dazu nicht aus. Für wissenschaftliche Untersuchungen oder für Optimierungsaufgaben mit hinreichend guter Konvergenz sind weitere und auch "schärfere" Beurteilungskriterien notwendig.

Die nachfolgend vorgestellten Beurteilungskriterien wurden in einem Wechselspiel zwischen Theorie und Experiment geschaffen und haben sich bei verschiedenen Optimierungsaufgaben für Haushalts-Küchenmaschinen bereits bewährt.

3.1 BEURTEILUNGSKRITERIEN BEIM SCHAUMSCHLAGEN

Bei den Vorbetrachtungen (Kap. 2.3.6) wurden für die Beurteilung von Lebensmittelschäumen folgende Kriterien herausgestellt:

- Schlagdauer
- Volumenzunahme
- Beständigkeit
- Aussehen.

Bei umfangreichen Experimenten erwies sich zusätzlich das Kriterium

- "Festigkeit"

als nützlich und notwendig. Das für den Verfahrensablauf zunächst jedoch wichtigste Kriterium ist die Wahl der Bearbeitungsdauer bzw. der Schlagdauer.

3.1.1 SCHLAGDAUER

Die Schlagdauer (Formelzeichen t_D) ist definiert als die Zeit, die benötigt wird, um die Flüssigkeit zu einem Schaum mit den gewünschten (optimalen) Eigenschaften zu schlagen. Während eines solchen Schlagprozesses wächst durch Einschlagen von Gas bzw. Luft in die Flüssigkeit das Schaumvolumen.

Beim Lebensmittel Sahne gibt es jedoch bei fest vorgegebenen Werten aller übrigen Parameter eine maximale Volumenzunahme nach einer bestimmten Schlagdauer. Dieses Volumen kann nicht weiter erhöht werden, bzw. nimmt sogar bei Fortsetzung des Schlagprozesses wieder ab, insbesondere weil der Rahm "ausbuttert".

Entgegen der DIN-Prüfvorschrift, nach welcher die maximale Volumenzunahme durch mehrere Versuche mit unterschiedlich langer Schlagdauer iterativ ermittelt werden muß, wird gemäß der DLG-Prüfungsbestimmungen sowie früherer Forschungsergebnisse (100) ein anderer Weg gewählt.

Dieser rationellere Weg ist auch notwendig, um die bei Optimierungsaufgaben ohnedies große Versuchsanzahl zu reduzieren und mit möglichst kleinen, homogenen Lebensmittelchargen auszukommen.

Bei der maximalen Volumenzunahme ist die Struktur des Sahneschaumes optimal und seine Festigkeit am größten. Letztere drückt sich bereits während des Verfahrens im Bewegungswiderstand aus, den der Schaum den Schlagwerkzeugen entgegensetzt. Dieser Bewegungswiderstand läßt sich versuchstechnisch direkt über das Antriebsmoment der Werkzeuge oder indirekt über die Stromaufnahme des Elektromotors ermitteln.

Bei Sahneschlag-Prüfgeräten für Molkereilabors - dort geht es um die Beurteilung des Lebensmittels und nicht des Gerätes - wird das Drehmoment eines Planetengetriebes mechanisch gemessen. Mit einem Schleppzeiger und einem aktuellen Zeiger, der das augenblickliche Drehmoment anzeigt, kann das maximale Drehmoment sehr zuverlässig ermittelt und das Verfahren bei der optimalen Schlagdauer t_D beendet werden (Abb. 31/1).

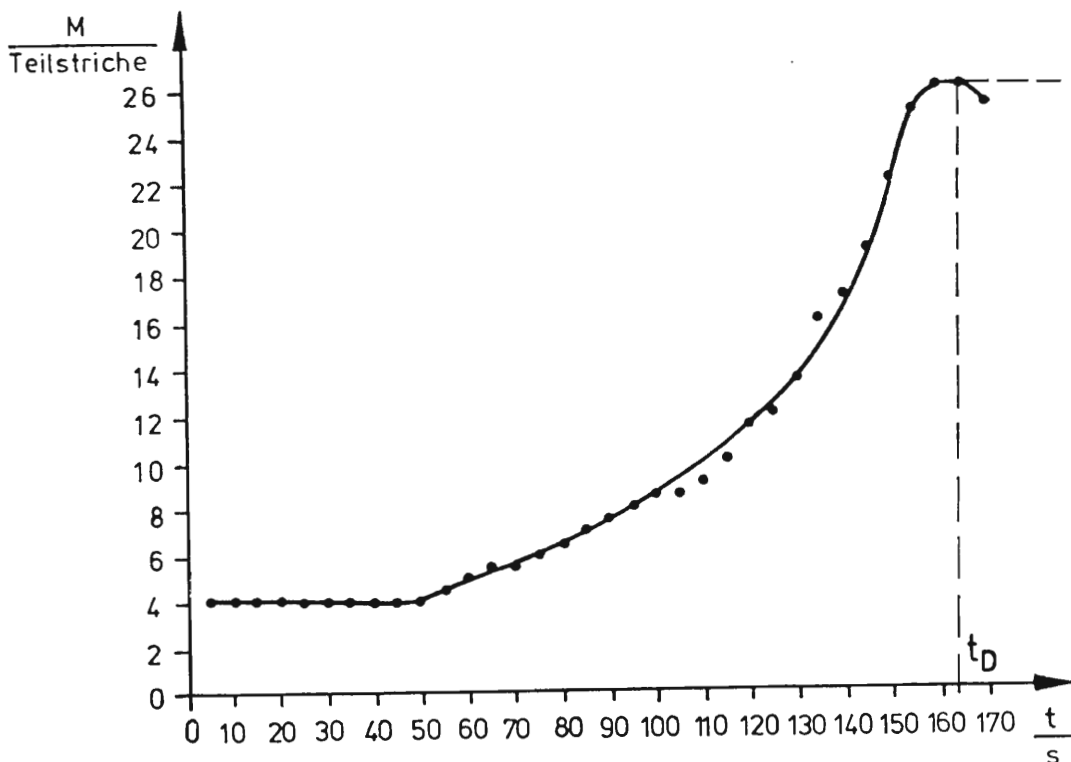


Abb. 31/1: Drehmoment M des Planetengetriebes in Abhängigkeit von der Schlagzeit t beim Schlagen von Sahne mit dem Prüfgerät FUCOMA ($V_A = 100$ ml). Entfernt sich der aktuelle Zeiger (—) vom Schleppzeiger (---), so ist die optimale Schlagdauer t_D erreicht

Bei sehr reibungsfreien Antrieben ist es auch möglich, das Drehmoment über die elektrische Wirkleistung und bei einem guten Leistungsfaktor ($\cos \varphi \approx 1$) des Elektromotors über den elektrischen Strom zu bestimmen (Abb. 31/2).

Der Absolutwert der elektrischen Wirkleistung ist bei ein und demselben Schlaggerät auch abhängig von der Anzahl der Stäbe des rotierenden Schlagwerkzeuges. Bei einer größeren Stabanzahl liegt die aufgenommene Leistung erwartungsgemäß bei höheren Werten (125).

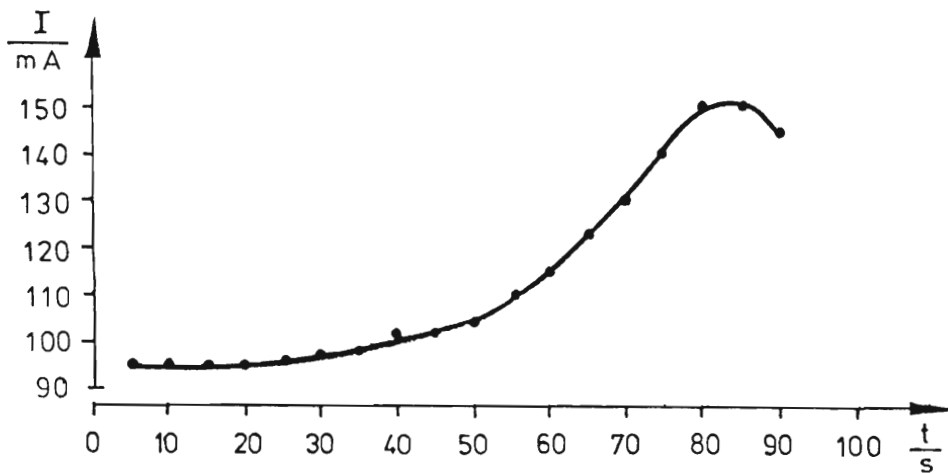


Abb. 31/2: Stromstärke I in Abhängigkeit von der Schlagzeit t beim Schlagen von Sahne mit dem Prüfgerät JANZ ($V_A = 100$ ml)

Bei den stark reibungsbehafteten Antrieben und leistungsstarken Motoren der Haushalts-Küchenmaschinen - sie müssen auch für Knetverfahren geeignet sein - ist der Stromzuwachs infolge des sich verfestigenden Schaumes nicht mehr deutlich zu erkennen. In zahlreichen Experimenten konnte jedoch beobachtet werden, daß der Sahneschaum im optimalen Zustand in sich so fest ist (Kohäsionskräfte, "maximale Steifigkeit"), daß die bewegten Werkzeuge den Schaum entgegen den Adhäsionskräften von den

Wänden des Schlaggefäßes ablösen und in großen Teilstücken im Schüsselinneren umherschoben. Die Oberfläche der Schaumstücke ist in diesem Augenblick normalerweise mattglänzend und von feinporiger Struktur.

Beim Lebensmittel Eischnee ist es wesentlich schwieriger als bei Sahne, einen ähnlich definierten Schlagendpunkt zu finden. Das Volumen dieses Lebensmittels läßt sich mit zunehmender Schlagdauer meist weiter erhöhen, wohingegen die Beständigkeit - ein weiteres wichtiges Beurteilungskriterium - immer weiter abnimmt (Abb. 31/3). In der Praxis muß deshalb im Hinblick auf die vorgesehene Verwendung des Eischnees entschieden werden, ob das Kriterium Volumenzunahme oder das Kriterium Beständigkeit stärker gewichtet werden soll. Zum kurzfristigen Lockern einer Speise (z.B. Baiser) genügt eine kleine Beständigkeit. Bei längerfristiger Verwendung (z.B. Pudding) muß die Beständigkeit groß sein.

Neuerdings konnte mit empfindlichen Meßgeräten beim Schlagen von Eischnee ein periodischer Wechsel von Maximum und Minimum der Stromstärke des Elektromotors nachgewiesen werden (59). Eischnee mit guter Qualität wird nach dieser Methode durch Beendigung des Schlagprozesses im Minimum der Stromaufnahme nach dem ersten Maximum gefunden (Extremum C in Abbildung 31/4). Sichere theoretische Begründungen stehen jedoch dafür noch aus. Möglicherweise entstehen die gemessenen Stromschwankungen durch periodischen Auf- und Abbau von Schaumteilen. Die Schaumbildung nimmt bis zum Punkt B zu (maximale Stromaufnahme). Anschließend werden kleinere Schaumbereiche wieder zerstört, etwas Flüssigkeit läuft aus dem Schaum, das Antriebsmoment der Werkzeuge und damit die Stromstärke nimmt ab bis zum Punkt C (minimale Stromaufnahme). Durch erneutes Einschlagen von Luft erhöhen sich Antriebsmoment und Stromaufnahme wieder bis zum Punkt D usw.

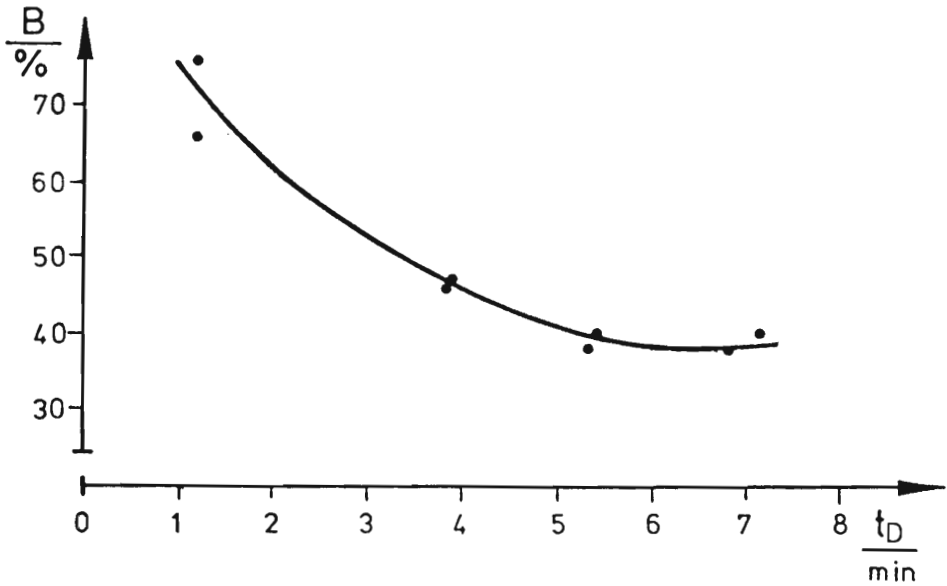
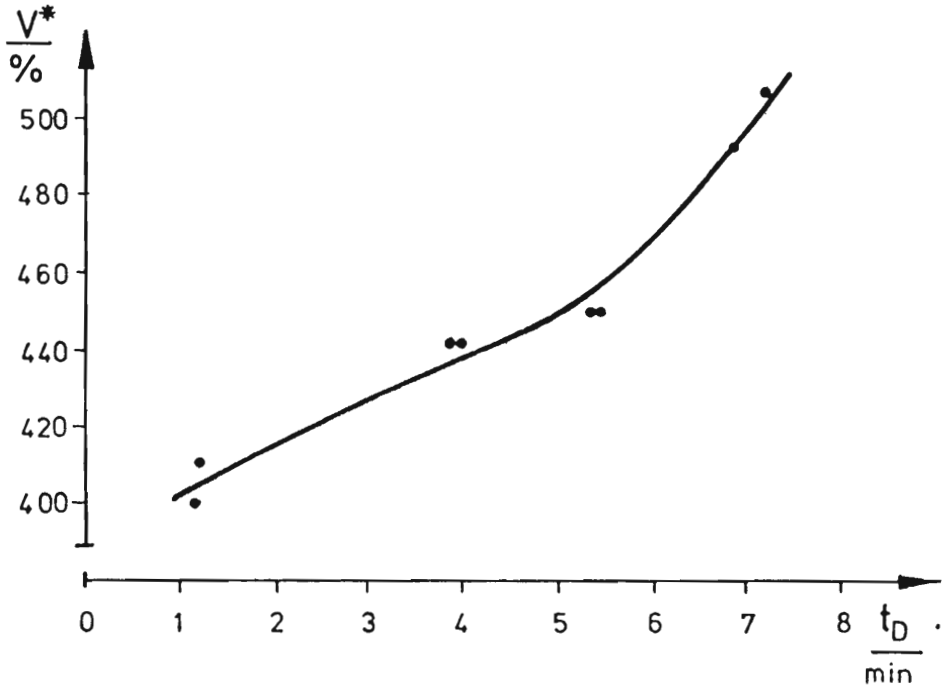


Abb. 31/3: Volumenzunahme V^* und Beständigkeit B in Abhängigkeit von der Schlagdauer t_D bei Eischnee (Hand-Küchenmaschine mit Spezialdrehtisch, vgl. Abb. 32/7; $V_A = 100$ ml).

Hinweis: Jede Meßpunktgruppe entspricht einem separaten Versuch, der nach Erreichen der vorgegebenen Schlagdauer t_D beendet wurde

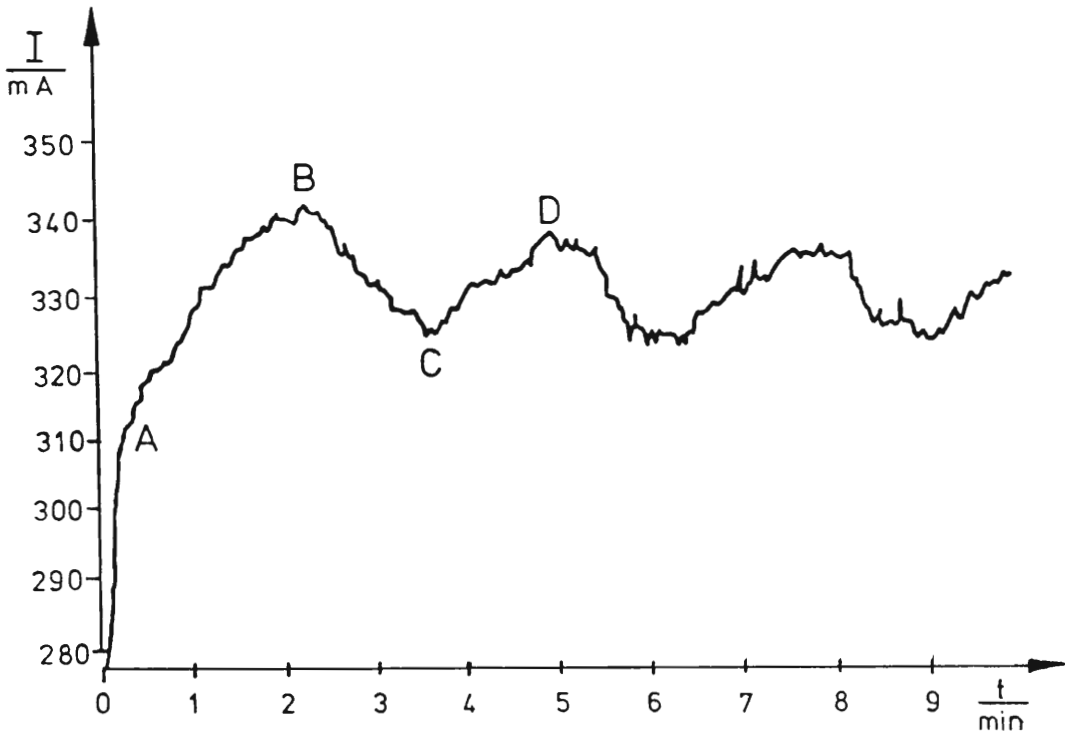


Abb. 31/4: Aufgenommene Stromstärke I des Elektromotors einer Hand-Küchenmaschine beim Schlagen von Eischnee in Abhängigkeit der Zeit t (Versuchsanordnung vgl. Abb. 32/7, $V_A = 100$ ml (59))

Diese Annahmen könnten nur mit speziellen Versuchseinrichtungen und sehr empfindlichen Meßgeräten überprüft werden. Bei Bestätigung dieser Annahmen könnte auch bei Eischnee der Schlagendpunkt bzw. die Schlagdauer t_D über den Bewegungswiderstand der Schlagwerkzeuge festgelegt werden, was bei Sahne ohnedies in eindeutiger Weise möglich ist.

3.1.2 VOLUMENZUNAHME

Das Schaumvolumen V_E , welches sich am Ende eines Schlagprozesses ergibt, ist bei sonst gleichen Randbedingungen vom Anfangsvolumen V_A , d.h. vom Flüssigkeitsvolumen zu Beginn des Schlagprozesses abhängig. Um die Volumenzunahme aus verschiedenen Verfahren vergleichen zu können, wird die relative Volumenzunahme

$$V^* = \frac{V_E - V_A}{V_A} \cdot 100\% \quad (31.1)$$

definiert. Im Gegensatz zur Festlegung nach DIN 44960 T.2 (29) beginnt der Wertebereich bei Null und wird auch von anderen Autoren vorzugsweise so gewählt (87).

Die Messung des Anfangsvolumens V_A ist unproblematisch und kann mit vergleichsweise geringen Fehlern (Haftmengen) in einem schlanken Meßzylinder erfolgen (vgl. auch Kap. 3.3: Genauigkeit der Beurteilungskriterien).

Im Gegensatz dazu ist es notwendig, das Endvolumen V_E mittels Maßstab und Eich-tabelle unmittelbar im Schlaggefäß zu bestimmen. Die in der DIN-Prüfnorm vorgeschriebene Methode wäre ungeeignet; beim Umfüllen in ein Volumen-Meßglas würde erstens die Schaumstruktur teilweise zerstört werden, und zweitens entstünden Hohlräume, was zwangsläufig Fehlmessungen ergibt.

Die Volumenbestimmung mittels Volumenmeßstab nach DLG (36) ist viel zu grob, da dieser nur die Meßmarken 100, 125, 150, 175 usw., die Volumenprozenten entsprechen, besitzt.

Auch die amerikanische Bestimmungsmethode durch Auswiegen der geschlagenen Sahne und der ungeschlagenen Sahne in ein und demselben Meßbecher und Berechnung der Volumenzunahme (Overrun) ist zwangsläufig ungenau.

Bei großflächigen Schlaggefäßen muß aus Gründen der Genauigkeit die Messung an mehreren Umfangstellen jedoch bei definierter Bodenhöhe vorgenommen und aus mehreren Einzelmessungen ein Mittelwert berechnet werden. Besonders notwendig ist dies bei Schlaggefäßen mit Innenkegeln (z.B. wegen der Antriebe) oder

bei Gefäßen, die zur Verkleinerung des tertiären Wirkraumes Bodenkegel besitzen. Aus dem Mittelwert der Schaumhöhe im Schlaggefäß wird über eine Eichkurve das Endvolumen V_E ermittelt (Abb. 31/5). Eine solche Eichkurve wird vorzugsweise durch portionsweises Einfüllen definierter Flüssigkeitsmengen und Messen der jeweils erreichten Füllhöhe ermittelt.

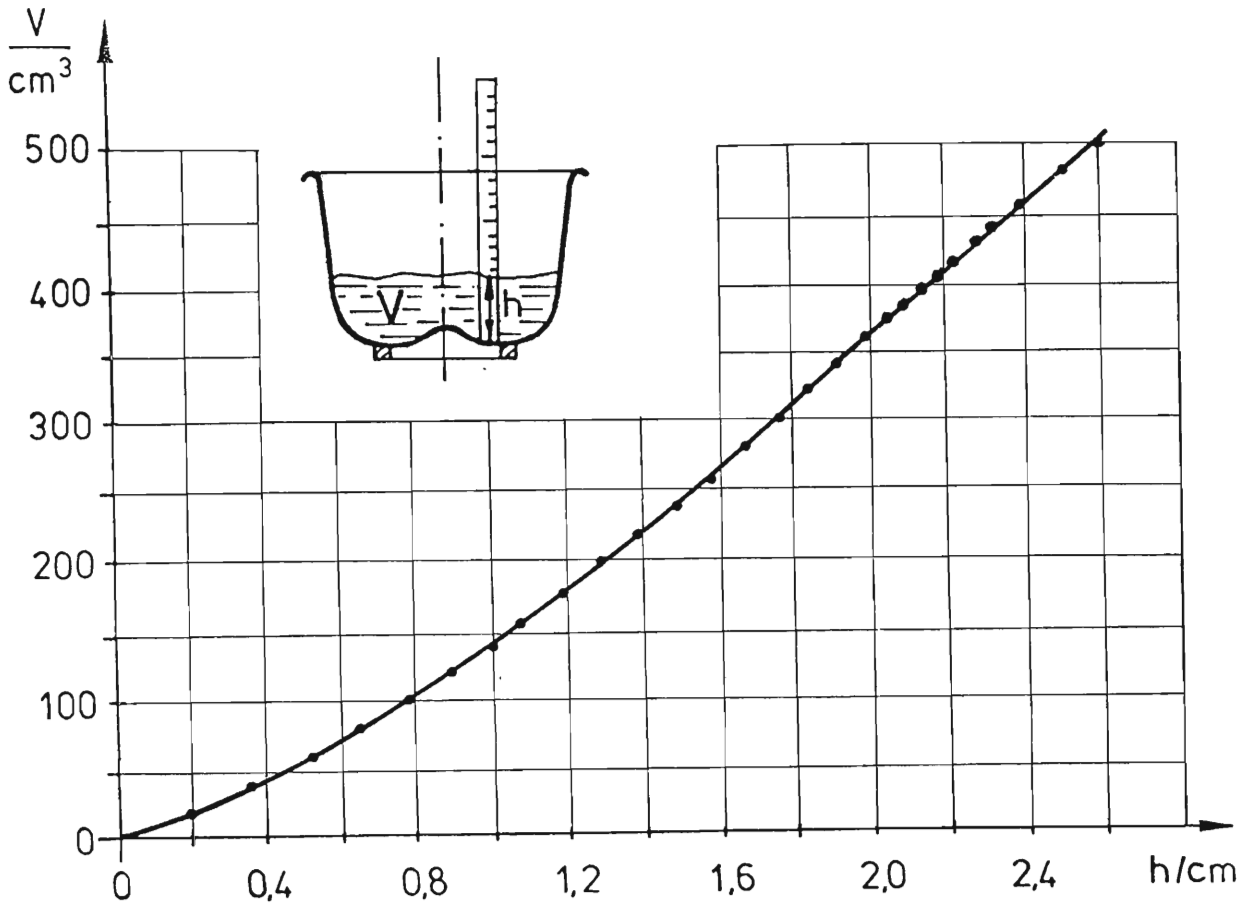


Abb. 31/5: Eichkurve als Abhängigkeit des Lebensmittelvolumens V von der Füllhöhe h beim Schlaggefäß (links oben im Bild) einer Klein-Küchenmaschine (Vgl. Abb. 34/19)

3.1.3 BESTÄNDIGKEIT

Bei Lebensmittelschäumen läßt sich die Beständigkeit

$$B = \frac{V_F - V_R}{V_F} \cdot 100\% \quad (31.2)$$

definieren, wobei

V_R = Absetzvolumen der Schaumprobe

V_F = Ausgangsvolumen derselben Schaumprobe (flüssig).

Wird die gesamte Schaummenge einer Probe zur Bestimmung des Absetzvolumens herangezogen, wie beispielsweise in Versuchen mit Eiklar, so ist das Bezugsvolumen V_F ebenso groß wie das Anfangsvolumen V_A d.h.:

$$V_F = V_A \quad (31.3)$$

(V_A vgl. Berechnung Volumenzunahme).

Wird hingegen nur eine kleinere Prüfmenge V_P verwendet, z.B. Prüfwürfel bei Sahne, so errechnet sich das Bezugsvolumen

$$V_F = V_A \frac{V_P}{V_E} \quad (31.4)$$

Bei qualitativ hochwertigen Schäumen ist das Absetzvolumen, d.h. die aus den Schaumlamellen ausgetretene Flüssigkeitsmenge, sehr gering. Andererseits ist die verwendete Probengröße für den jeweiligen Einzelversuch innerhalb einer Versuchsserie meist konstant, weshalb vielfach die absolute Absetzmenge V_R - im Schrifttum auch als A bezeichnet - angegeben wird.

Beim Lebensmittel Eischnee wird der zu prüfende Schaum vorsichtig in einen Glastrichter eingefüllt, wobei die in der DIN-Prüfnorm (29) vorgesehene Keramik-Filterscheibe weggelassen wird, da in ihren Bohrungen ($d = 1 \text{ mm } \phi$) und an ihren Flächen meßtechnisch nicht erfassbare Flüssigkeitsmengen haften bleiben. Im Experiment setzt sich die Flüssigkeit stetig, nahezu linear ab (Abb. 31/6).

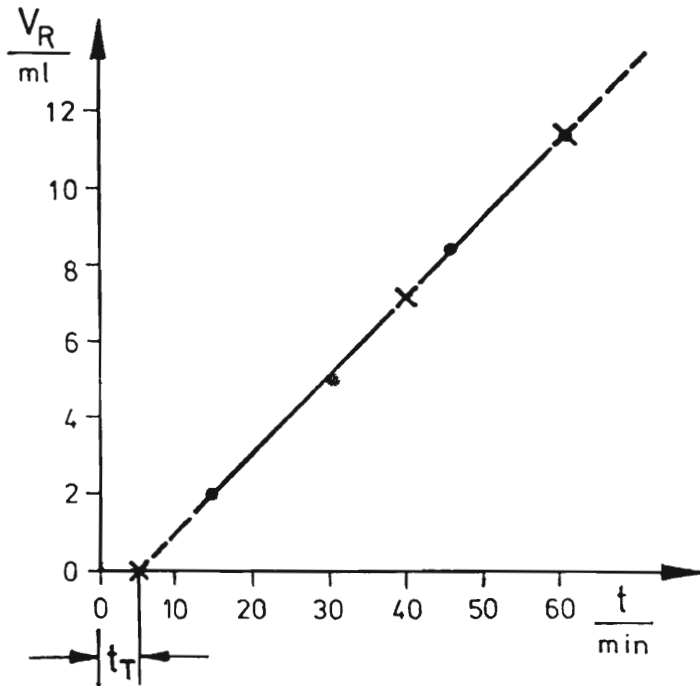


Abb. 31/6: Absetzvolumen V_R in Abhängigkeit von der Absetzzeit t bei Eischnee (Hand-Küchenmaschine mit Spezialdrehtisch, $V_A = 50$ ml; ●... gemessene Werte, ×... berechnete Werte der Regressionsgeraden) (71)

Zur Berechnung der Schaumbeständigkeit wird das Absetzvolumen nach 60 Minuten ermittelt. Zwar erfolgt die Weiterverarbeitung des Eischnees im Haushalt meist in kürzerer Zeit, doch erhöht die lange Absetzdauer bei der Prüfung die Meßgenauigkeit, da andernfalls die abzumessenden Flüssigkeitsmengen klein und nur ungenau zu bestimmen wären (Haftmengen). Außerdem ist eine Mindestwartezeit notwendig, bis die Trichterflächen benetzt sind und erstmalig Flüssigkeit im Meßzylinder aufgefangen werden kann. Mit Hilfe der Regressionsgeraden (Korrelationskoeffizient $r = 0,99$) läßt sich hierzu eine Ersatz-Totzeit t_T definieren und interpretieren.

Die Beständigkeit wird in Erweiterung der DIN-Prüfvorschrift nicht nur beim Lebensmittel Eischnee, sondern auch bei Sahne bestimmt. Dabei wird aus der Sahne mittels Lochschablone ein Würfel mit den Kantenlängen 6cm ausgeformt und auf ein Prüfsieb 04 DIN 4188 T.1 gegeben (16).

Das Sieb (Fläche $100 \cdot 100 \text{ mm}^2$) liegt dabei horizontal auf einem Trichter ($\phi = 150 \text{ mm}$), dessen Ablaufrohr in einen schlanken Meßzylinder mündet. Bei einer möglichst konstanten Raumtemperatur von 18°C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von maximal 75% wird dabei die abgesetzte Flüssigkeitsmenge V_R nach einer Stunde und in manchen Fällen auch nach zwei Stunden abgelesen (63). Werden diese Raumparameter während einer Versuchsserie nicht konstant gehalten, so führt dies zu nicht vergleichbaren Ergebnissen bei der Absetzmenge (86). Sowohl mit zunehmender Luftfeuchtigkeit als auch mit steigender Raumtemperatur nimmt die Absetzmenge erheblich zu (Abb. 31/7).

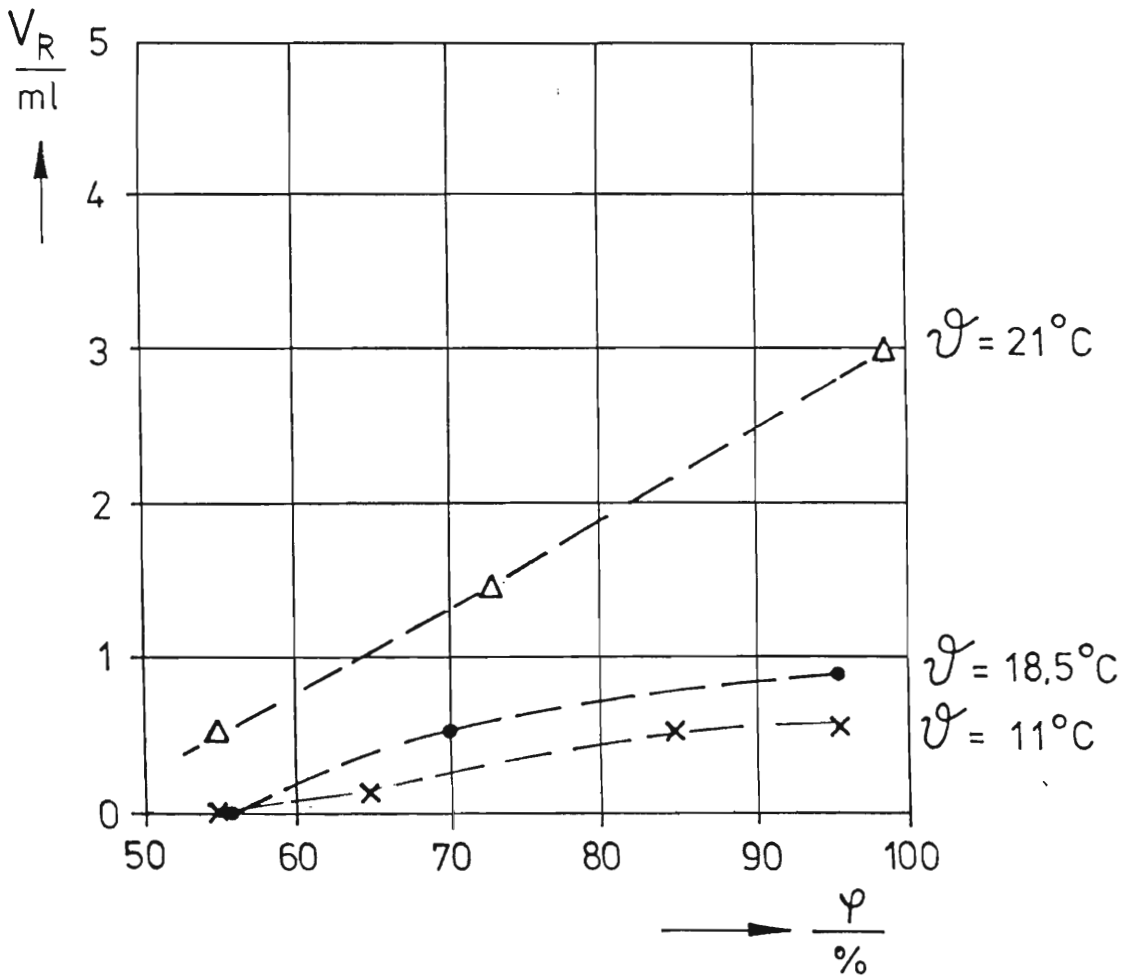


Abb. 31/7: Absetzvolumen V_R von geschlagener Sahne in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit φ und der Raumtemperatur (Scharparameter) nach 1 Stunde. (DLG-Prüfvorschrift, $V_A = 100 \text{ ml}$, Fettgehalt 32%, Auswertung der Ergebnisse von MOHR und BECKMANN)

Möglicherweise wird bei zunehmender Luftfeuchtigkeit der Flüssigkeitsanteil, der verdunsten kann, geringer und die Absetzmenge entsprechend größer. Bei steigender Temperatur sinkt die Viskosität des Schaumes, was das Auslaufen von Flüssigkeit begünstigt.

Unabhängig von diesem Effekt ergeben sich auch bei Schäumen, die aus ultrahoherhitztem und homogenisiertem Rahm geschlagen wurden, nachteilige Arbeitsergebnisse (44) (46) (56).

Grundsätzlich werden in vorliegender Arbeit Lebensmittel ohne weitere Vorbehandlungen oder ohne Zusätze wie z.B. Zucker, Stärke, Wasser verwendet.

3.1.4 AUSSEHEN

Das Kriterium Aussehen ist bei Schäumen im allgemeinen nur schwer zu erfassen und in der DIN-Prüfnorm nicht vorgesehen. Hingegen ist in den DLG-Bestimmungen eine "Sinnenprüfung" für das Aussehen von geschlagener Sahne enthalten (36). An diesem Kriterium läßt sich zumindest grob abschätzen, ob der Schlagprozeß in Ordnung war.

Beim Lebensmittel Sahne ist für das Aussehen einerseits die Formbeständigkeit (Grobstruktur) und andererseits die Art der Oberfläche (Feinstruktur) maßgebend. Die Formbeständigkeit läßt sich vorzugsweise an einem ausgeformten Würfel bewerten, welcher gleichzeitig zur Messung des Absetzvolumens notwendig ist. Die Würfelform läßt sich sogar objektiv erfassen, da im Laufe der Prüfzeit, je nach Qualität der Sahne, die Würfelhöhe abnimmt und die Würfelkanten sich runden (Abb. 31/8 und Abb. 31/9).



Abb. 31/8: Ausgeformter Sahnewürfel zur Bestimmung der Absetzmenge im Meßzylinder und Beurteilung der Formbeständigkeit (Ausgangsmaße des Würfels $6 \cdot 6 \cdot 6 \text{ cm}^3$)

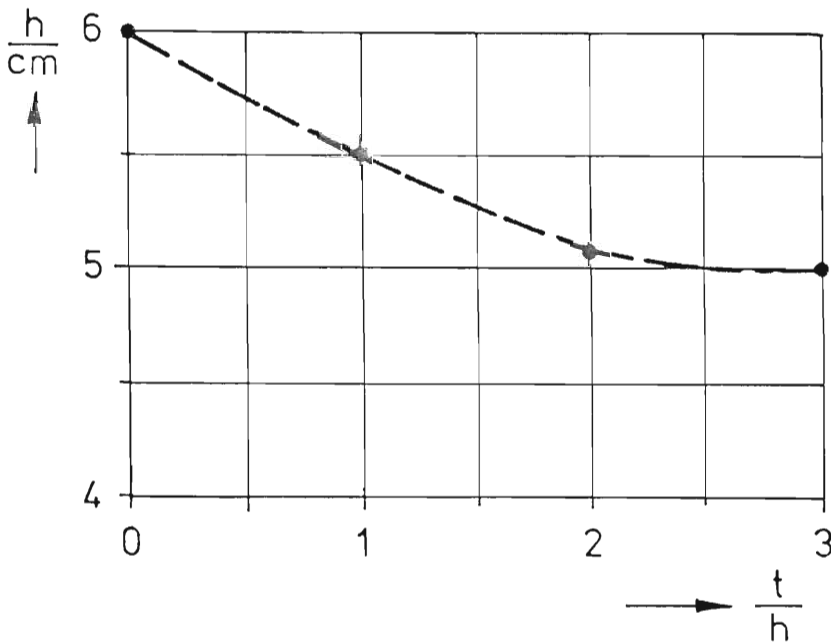


Abb. 31/9: Abnahme der Höhe h des Sahne-Prüfwürfels in Abhängigkeit von der Prüfzeit t (Umgebungstemperatur $\vartheta_U = 18^\circ \text{C}$, Luftfeuchtigkeit $\varphi_U = 65\%$)

Auch bei der Prüfung der Formbeständigkeit müssen die wichtigen Raumparameter Lufttemperatur (18 °C) und relative Luftfeuchtigkeit (maximal 75%) möglichst genau eingehalten werden. Im Experiment führen höhere Lufttemperaturen zu einem rascheren Abnehmen der Würfelhöhe, da beispielsweise auch der Anteil an flüssigem Fett zunimmt und deswegen die Stabilität des Würfels leidet.

Die Art der Oberfläche des Schaumes kann z.B. nach Eigenschaftsunterschieden wie mattglänzend, naßglänzend oder grießlig eingestuft werden.

Beim Lebensmittel Eischnee ist die Bewertung des Aussehens schwieriger als bei Sahne. Zudem gibt gerade fest und trocken aussehender Eischnee meist rasch und relativ viel Flüssigkeit ab. Hingegen besitzt ein feucht und weich erscheinender Eischnee oft eine hohe Beständigkeit. Das Aussehen des Eischnees wird daher meist nicht bewertet und nur in Ausnahmefällen ermittelt.

Dieses Kriterium ist bei Eischnee auch deswegen nicht so wichtig, da er in anderen Lebensmitteln oder Speisen meist "untergezogen" und seine Oberfläche beim Verzehr nicht sichtbar ist.

Das "Zusammensinken" einer Sahneprobe unter dem Einfluß der eigenen Schwerkraft wird bei guter Schaumqualität nur gering sein. Eine starke Deformation bzw. eine Aussage über die Festigkeit des Schaumes ist erst bei Einwirkung größerer Kräfte z.B. mittels spezieller Prüfvorrichtung möglich.

3.1.5 FESTIGKEIT

Die Beurteilung der Festigkeit von geschlagenen Schäumen ist zur Prüfung der Gebrauchseigenschaften von Küchenmaschinen nach DIN 44960 T.2 nicht vorgesehen. Bei Experimenten im Rahmen vorliegender Habilitationsschrift und bei Optimierungsaufgaben mit Küchenmaschinen zum SCHAUMSCHLAGEN ist die Schaumfestigkeit jedoch ein wichtiges Kriterium. In den DLG-Prüfungsbestimmungen zur Qualitätsbeurteilung des Lebensmittels Sahne wird die Festigkeit berücksichtigt (36). Die im Molkereiwesen dazu heute noch übliche Prüfvorrichtung (Abb. 32/1) erwies sich in Experimenten als zu ungenau (Tab. 31/1).

Tab. 31/1: Einsinkdauer T des Prüfstempls in Sahne bei 6 Versuchspaaren mit unterschiedlichen Randbedingungen, wobei die Vergleichsproben a und b mit identischen Randbedingungen geschlagen wurden (DLG-Prüfvorrichtung)

Versuch	Vergleichsproben	Einsinkdauer T/s
I	a	210
	b	495
II	a	150
	b	111
III	a	285
	b	230
IV	a	11
	b	106
V	a	9
	b	18
VI	a	10
	b	17

Selbst bei Vergleichsproben, die unter möglichst konstanten Randbedingungen geschlagen wurden, wie dies jeweils beim Probenpaar a und b der Fall war, ergaben sich sehr unterschiedliche Werte für die Einsinkdauer des Prüfstempels. Diese Ungenauigkeiten waren innerhalb der gesamten Bandbreite des Parameters Schaumfestigkeit, d.h. bei festen und bei weniger festen Schäumen, festzustellen. Für sehr weiche Schäume, wie beispielsweise für Eischnee, erwies sich die für Sahneschaum konzipierte Prüfvorrichtung als völlig ungeeignet. Die Einsinkgeschwindigkeit des Prüfstempels war zu groß und ebenfalls ungleichmäßig.

Gemäß einer Zielsetzung vorliegender Habilitationsschrift, nämlich geeignete Beurteilungskriterien zu definieren und die zugehörigen Meßverfahren festzulegen bzw. zu entwickeln, ergaben sich folgende Aufgaben: Einerseits müssen die Ursachen für die Ungenauigkeit der bisherigen Prüfvorrichtung aufgespürt werden und, falls diese nicht zu beseitigen sind, andererseits neue brauchbare Vorrichtungen für das Beurteilungskriterium "Festigkeit" konstruiert werden.

3.2 PRÜFVORRICHTUNG ZUR MESSUNG DER SCHAUMFESTIGKEIT

Die "Festigkeit" ist bei festen Werkstoffen eine wichtige Kenngröße. Unter Zug-, Druck- und Bruchfestigkeit versteht der Materialprüfer definierte Größen. Diese Begriffe auf Schäume, wie geschlagene Sahne oder Eischnee anzuwenden, ist schwierig. Schließlich handelt es sich hierbei um viskose Stoffe, bei denen - mehr als bei anderen Werkstoffen - neben den Kräften vor allem die Zeit bzw. die Geschwindigkeit, mit der eine Belastung z.B. ein Prüfstempel einwirkt, von Bedeutung ist. Physikalisch gesehen mißt die nachfolgend beschriebene Prüfvorrichtung die Zeit, welcher ein gewichtsbelasteter Prüfstempel in einem Schaum für einen vorgegebenen Einsinkweg benötigt.

3.2.1 DLG-PRÜFVORRICHTUNG

Bei der DLG-Prüfvorrichtung ist der Schaft eines Prüfstempels, dessen Achsenkreuz zwei konzentrische Drahringe trägt, in einer Gleithülse vertikal geführt und besitzt eingravierte Meßmarken (Abb. 32/1) (DLG = Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft (36)).

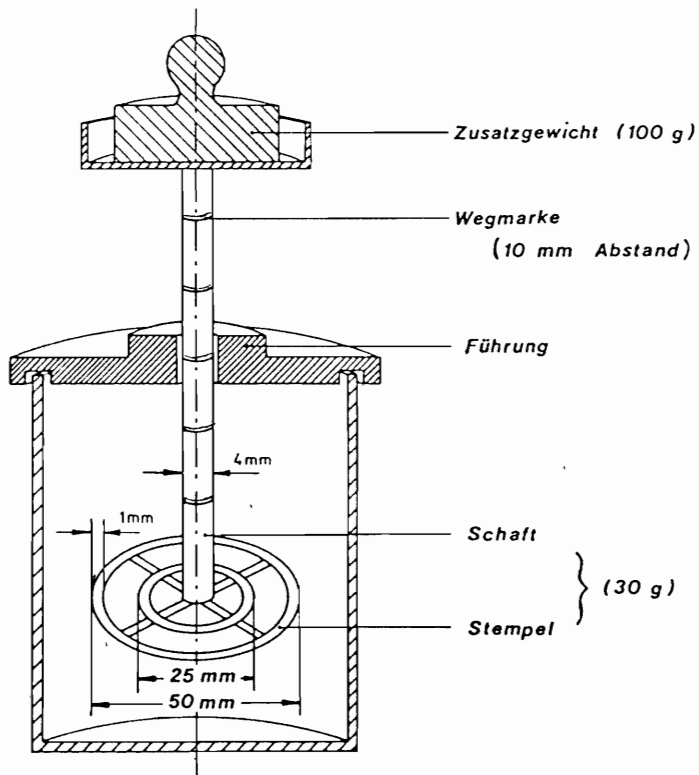


Abb.32/1: DLG-Prüfvorrichtung zur Messung der Festigkeit von Sahne

Dringt der gewichtsbelastete Prüfstempel in den Schaum ein, welcher sich im Prüfgefäß befindet, so kann mittels Stoppuhr die Zeit für den Einsinkweg zwischen zwei Meßmarken bestimmt werden. Bei dieser Messung sind gewisse Ablesefehler unvermeidlich. Eine Hauptursache für die nachgewiesenen Fehlmessungen können jedoch auch Reibungskräfte in der Gleitführung sein. Bereits rechnerisch läßt sich dies insbesondere bei Neigung der Führungsachse gegenüber der Vertikalen nachweisen (Abb. 32/2).

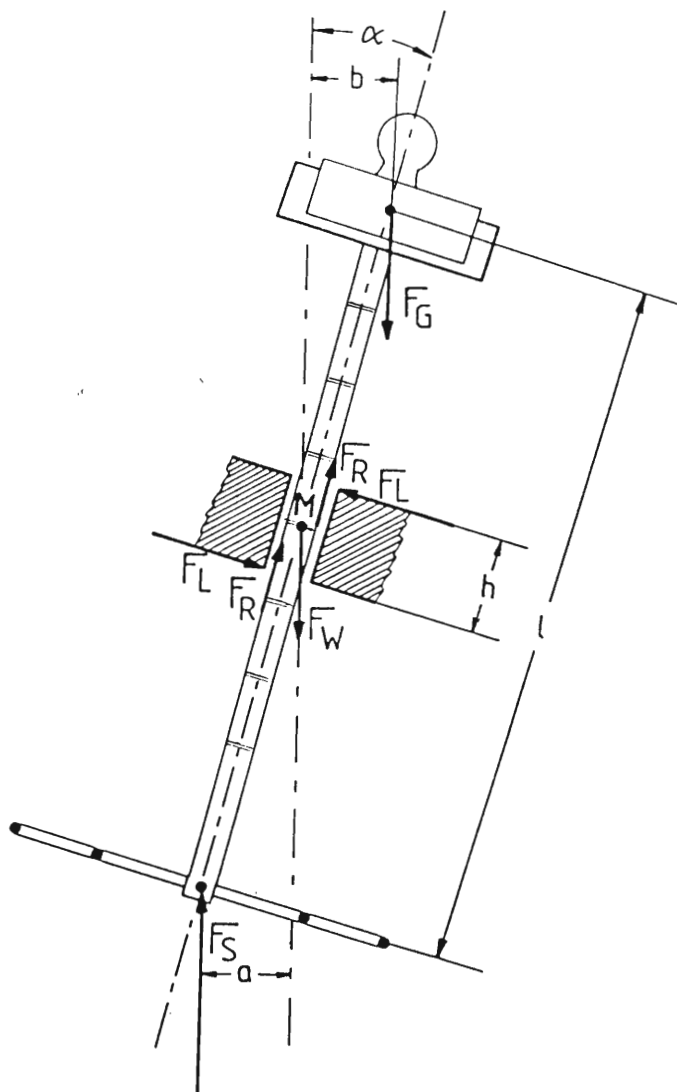


Abb.32/2: Kräftespiel an der DLG-Prüfvorrichtung bei Abweichung der Gleitführungsachse von der Vertikalen (Schema)

Die Kraft F_S , die vom Schaum auf den Prüfstempel wirkt, errechnet sich ohne Reibung zu

$$F_{S,1} = F_W + F_G , \quad (32.1)$$

wobei F_W = Eigengewicht der Welle samt Prüfstempel
 F_G = Zusatzgewicht, welches oben aufgelegt ist.

Mit Reibung in der Gleitführung (Reibungskräfte F_R) reduziert sich aber die Kraft am Schaum zu

$$F_{S,2} = F_W + F_G - 2 F_R . \quad (32.2)$$

Damit besitzt die Prüfvorrichtung allein wegen dieses Reibungseffektes den relativen Fehler

$$\alpha = \frac{F_{S,2} - F_{S,1}}{F_{S,1}} . \quad (32.3)$$

Mit dem Reibungsbeiwert μ ergibt sich die Reibungskraft

$$F_R = \mu F_L . \quad (32.4)$$

Die Lagerkraft F_L ist im Momentengleichgewicht um den Punkt M enthalten, welches lautet:

$$F_{S,2} a + F_G b = F_L h . \quad (32.5)$$

Für die gezeichnete Mittelstellung sind die Abstände

$$a = b = \frac{1}{2} \sin \alpha , \quad (32.6)$$

so daß sich die Lagerkraft

$$F_L = (F_{S,2} + F_G) \frac{1}{2h} \sin \alpha \quad (32.7)$$

ermitteln läßt.

Damit errechnet sich aus Gleichung (32.3) und Einsetzen der Gleichungen (32.2), (32.4) und (32.7) der relative Fehler

$$\alpha = \frac{F_W + F_G - 2\mu (F_{S,2} + F_G) \frac{1}{2h} \sin \alpha - (F_W + F_G)}{F_W + F_G} . \quad (32.8)$$

Durch Vereinfachung dieser Beziehung und Ersatz von $F_{S,2}$ in der

Klammer durch $F_{S,1}$ (die Gleichung ist sonst transzendent) ergibt sich

$$\alpha \approx - \frac{F_W + F_G + F_G}{F_W + F_G} \cdot \frac{\mu l}{h} \sin \alpha \quad . \quad (32.9)$$

Mit den an der Prüfvorrichtung ermittelten Daten (wobei die Kräfte F_W und F_G durch die Massen m_W und m_G ersetzt werden):

$$m_W = 30 \text{ g}, m_G = 100 \text{ g}, l \approx 170 \text{ mm}$$

$$h \approx 14,5 \text{ mm}, \mu = 0,1 \text{ (geschätzt)}$$

ergibt sich bei einer Schräglage des Prüfstempels (z.B. bedingt durch Lagerspiel, Gefäß- oder Tischungenauigkeiten) von $\alpha = 5^\circ$

$$|\alpha| \approx \frac{230 \text{ g}}{130 \text{ g}} \cdot \frac{0,1 \cdot 170 \text{ mm}}{14,5 \text{ mm}} \sin 5^\circ \approx 0,18 \text{ ,}$$

was einem relativen Fehler von 18 % entspricht. Mit diesem Wert lassen sich die gemessenen Fehler noch nicht erklären (vgl.Tab.31/1). Demnach sind beim praktischen Einsatz der Prüfvorrichtung noch andere Fehlerquellen zu berücksichtigen wie:

- seitlicher Versatz des Zusatzgewichtes
- außermittiger Angriff der Schaumkraft F_S z.B. wegen Inhomogenitäten im Schaum
- Verhaken der als Rillen ausgebildeten Wegmarken.

Eine andere Ursache für die Fehlmessungen liegt in der unterschiedlich großen Geschwindigkeit des Prüfstempels während des Einsinkvorgangs. Mit der Stoppuhr wird diejenige Zeit ermittelt, die der Prüfstempel benötigt, die Strecke zwischen zwei Wegmarken des Schaftes zurückzulegen. Diese Meßmethode ist jedoch nur sinnvoll, wenn die Geschwindigkeiten des Stempels zwischen diesen Wegmarken konstant bleibt oder wenn sichergestellt ist, daß das Einsinken immer mit der gleichen Beschleunigungs- bzw. Bewegungscharakteristik erfolgt (vgl. Kurvenan- und -auslauf, Abb. 32/5, Abb. 32/6 u.ä.).

Mit der DLG-Prüfvorrichtung waren diese bereits theoretisch nachweisbaren Unzulänglichkeiten nicht zu beseitigen. Aus diesem Grunde war die Entwicklung einer neuen Prüfvorrichtung notwendig (92) (97).

3.2.2 NEUENTWICKELTE PRÜFVORRICHTUNG

Bei einer verbesserten Prüfvorrichtung müssen vor allen Dingen die möglichen Ablesefehler (zwei Wegmarken, Zeituhr) vermieden werden und die reibungsbehaftete Gleitführung durch eine reibungsarme Lagerung ersetzt werden. Für das Erstgenannte bieten sich elektronische Meß- bzw. Aufzeichnungsmöglichkeiten an und für das Zweitgenannte sind Drehbewegungen in Kugellagern denkbar.

3.2.2.1 AUFBAU

Um Vergleichsmöglichkeiten mit der bisherigen DLG-Prüfvorrichtung beizubehalten, wurde deren ringförmiger Prüfstempel mit dem Achsenkreuz und den zwei konzentrischen Draht ringen ($\varnothing = 25$ mm und 50 mm) weiterhin verwendet. Die Gleitführung wurde durch ein Drehlager und einen langen Hebel ($R = 500$ mm) ersetzt (Abb. 32/3).

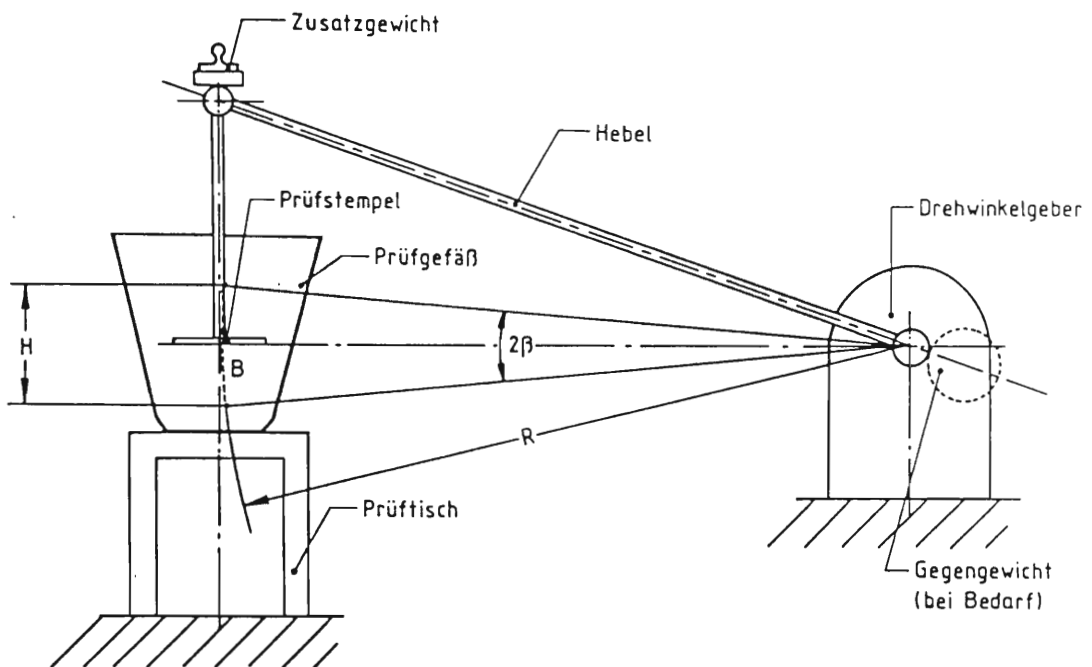


Abb.32/3: Neuentwickelte Prüfvorrichtung zur Bestimmung der Festigkeit von flüssigen Schäumen (unmaßstäbliche Skizze). Mit Gegengewicht (gestrichelt dargestellt) auch zur Prüfung sehr weicher Schäume geeignet

Die Eindringtiefe des Prüfstempels, dessen Befestigung am Hebel auch die Verwendung hoher Prüfgefäße gestattet, wird in einem Drehwinkel dieses Hebels abgebildet und das elektrische Spannungssignal eines Drehwinkelgebers (Hall-Generator) wird einem x,t -Schreiber zugeführt (Abb. 32/4). Prüfstempel und Hebel besitzen Eigengewichte, die sich in einer Stempelfkraft äußern. Mit Hilfe von Zusatzgewichten kann diese noch verstärkt werden.

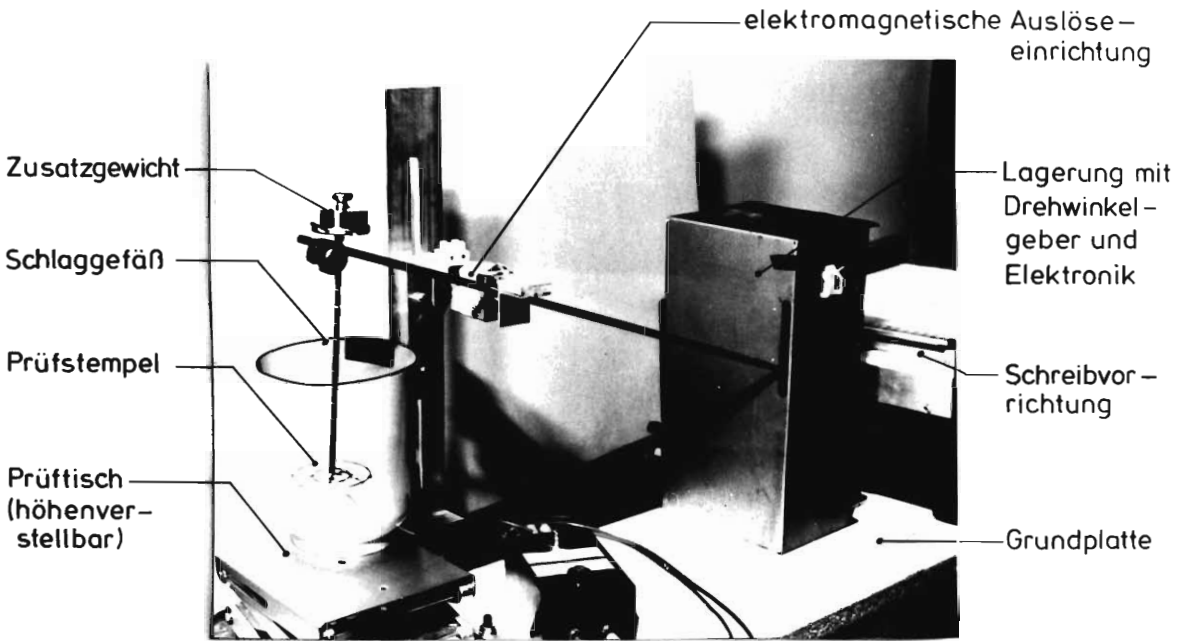


Abb.32/4: Prüfvorrichtung zur Bestimmung der Festigkeit von Schäumen
Links: höhenverstellbarer Prüftisch mit Schlaggefäß, Prüfstempel und Zusatzgewicht;
rechts: Lagerung mit Drehwinkelgeber und Elektronik;
Mitte: elektromagnetische Auslöseeinrichtung (97)

Umgekehrt kann für besonders "weiche" Schäume am entgegengesetzten Ende des Hebels ein Gegengewicht angebracht werden, welches die Eigengewichte des Prüfstempels und des Hebels teilweise kompensiert (128). Das Gegengewicht ist jedoch möglichst nahe an der Drehachse montiert, um das Massenträgheitsmoment dieses Gewichts klein zu halten. (Hinweis: Das Trägheitsmoment

einer Masse erhöht sich quadratisch mit dem Abstand zur Drehachse, das Gegenmoment jedoch nur linear.) Bei vorliegender Konstruktion sowie bei den im allgemeinen niedrigen Einsinkgeschwindigkeiten ist die Trägheitswirkung des Systems praktisch vernachlässigbar.

3.2.2.2 MESSUNG

Das Prüfgefäß mit dem zu untersuchenden Schaum wird unter den Prüfstempel gestellt, wobei die Höhe des Prüftisches entsprechend der Mitte des gewählten Meßbereichs angepaßt sein muß. Letzteres ist notwendig, um die Bewegung des Prüfstempels auf einer Kreisbahn ersatzweise als translatorische Bewegung annehmen zu können. Mittels Tastschalter wird gleichzeitig die elektromagnetische Hebelhalterung (Prüfstempel) und der x,t-Schreiber (Zeitachse) ausgelöst. Damit kann der Einsinkweg des Prüfstempels in Abhängigkeit der Zeit in entsprechend vergrößertem Maßstab aufgezeichnet werden (Abb. 32/5).

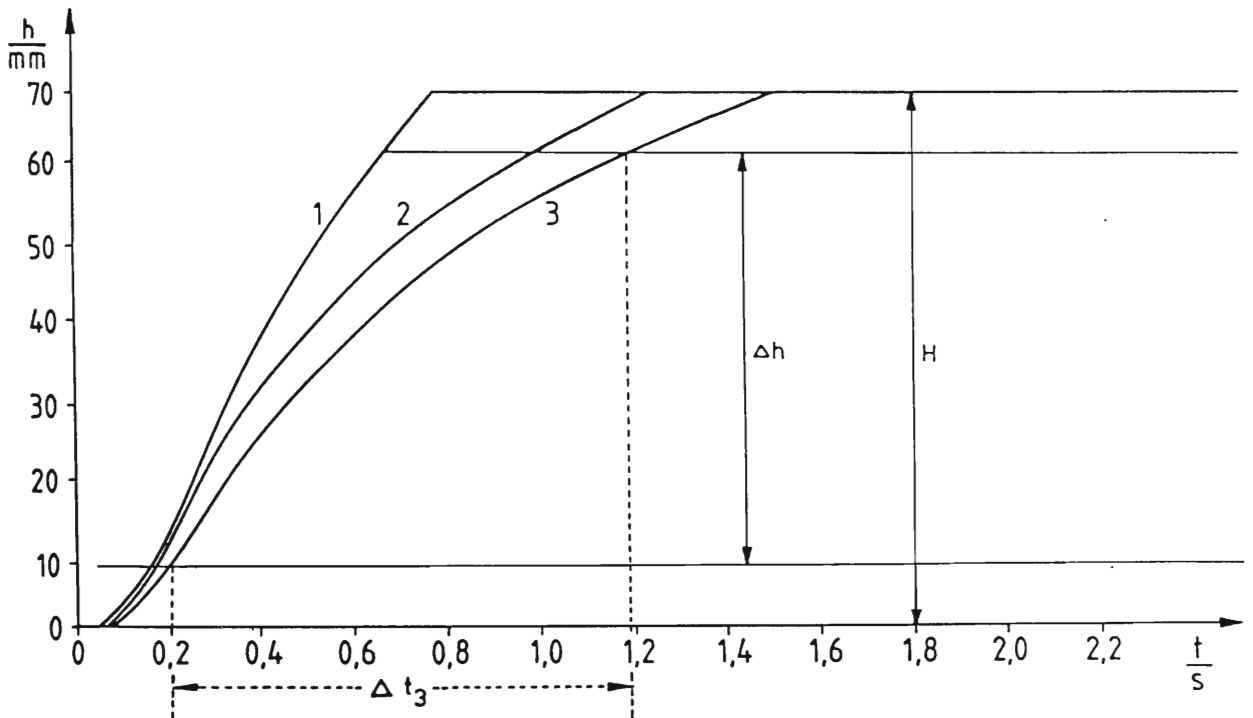


Abb.32/5: Meßdiagramm: Einsinkweg h in Abhängigkeit von der Zeit t . Die Zeitdauer Δt (z.B. Δt_3) für den Prüfweg $\Delta h = 50$ mm ist ein Maß für die Schaumfestigkeit ausgedrückt mit der Einheit $\frac{s}{m}$ (Sekunden durch Meter)

3.2.2.3 AUSWERTUNG

Die Steigung der Weg-Zeit-Kurve (Graph) repräsentiert die Geschwindigkeit, mit der der Prüfstempel einsinkt. Ein steiler Graph entspricht einer großen Einsinkgeschwindigkeit und resultiert aus einer geringen Festigkeit des Schaumes und umgekehrt.

Die "Festigkeit" ergibt sich somit als Reziprokwert der Einsinkgeschwindigkeit in den Einheiten $\frac{s}{m}$ (Sekunden durch Meter). Da die Kurven keineswegs lineare Abhängigkeiten aufweisen - insbesondere stören die An- und Auslaufvorgänge - muß ein geeignetes Auswertungsverfahren definiert werden. In den bisherigen Versuchsserien wurde aus dem gesamten Einsinkweg (etwa 70 mm) nur das Mittelteil des Graphen entsprechend einem Prüfweg von 50 mm ausgewertet. Dabei wird theoretisch die meist gekrümmte Kurve durch eine Sekante innerhalb des Prüfweges ersetzt. Bei konstantem Prüfweg ist dann die zur Sekante gehörende Zeit Δt unmittelbar ein Maß für die Festigkeit.

3.2.2.4 FEHLERBETRACHTUNG

Da die Prüfvorrichtung fest auf einer Fußplatte verankert und definiert gelagert ist, sind Fehler durch Reibungseffekte, wie sie bei der DLG-Prüfvorrichtung auftreten, vernachlässigbar. Weiterhin entfallen wesentliche Fehler bei der Zeitmessung, da der Graph des Meßprotokolls mit großem Maßstab nachträglich in Ruhe ausgewertet werden kann. Voraussetzung ist allerdings ein exakter mechanischer und elektronischer Abgleich der Prüfvorrichtung einschließlich x,t-Schreiber.

Da die früher translatorische Stempelbewegung durch eine Bewegung auf einem Kreisbogen ersetzt wird, ist der dadurch entstehende Fehler abzuschätzen. Bei einem vorgeschlagenen Meßbereich von $H = 50$ mm und einem effektiven Hebelarmradius $R = 500$ mm ergibt sich der tatsächliche Prüfweg

auf dem Bogenstück B (Abb. 32/3). Da dieser Prüfweg B länger ist als der auszuwertende vertikale Meßbereich H, errechnet sich der konstruktiv bedingte Fehler $\alpha = \frac{B - H}{H}$. Nach Einsetzen der realen Daten ergibt sich $\alpha = 0,0004$ und ist somit vernachlässigbar.

Aus der noch ungünstigen Anordnung des Zusatzgewichtes, bei dem sich während des Absenkens des Prüfstempels das belastende Moment und damit die Stempelkraft zunimmt, beträgt der Gesamtfehler $\alpha \approx 0,015$. Würde dieses Gewicht durch ein anderes ersetzt werden, so daß der gemeinsame Massenmittelpunkt aller Hebelteile in der Mittelstellung mit Prüfstempel und Drehlager in derselben Horizontalebene läge, so könnte der letztgenannte Fehler erheblich verringert werden. Mit dieser Maßnahme und mit der Genauigkeitsforderung $\alpha \approx 0,01$ wäre es sogar möglich, den derzeitigen Hebelarm in seiner Länge von $R = 500$ mm auf etwa 200 mm zu kürzen, wodurch das Gerät handlichere Abmessungen bekäme.

Neben diesen theoretischen Betrachtungen können nur Experimente sicherstellen, ob diese neue Prüfvorrichtung einwandfrei und mit reproduzierbaren Meßergebnissen arbeitet.

3.2.2.5 REPRODUZIERBARKEIT

Da Lebensmittelschäume physiko-chemisch bedingt eine empfindliche Struktur aufweisen, sind Mehrfachmessungen in einer Schaumprobe problematisch. Bereits bei einem Einsinkvorgang des Prüfstempels wird die Schaumstruktur verändert und teilweise zerstört. Daher ist eine zuverlässige Festigkeitsmessung in jeder Schaumprobe nur einmal möglich. Um die Reproduzierbarkeit der Prüfvorrichtung untersuchen zu können, muß jeweils eine neue Probe zur Verfügung stehen bzw. neu geschlagen werden. Dadurch muß jedoch in Kauf genommen werden, daß andere raum-, produkt- oder geräteabhängige Parameter unvermeidliche Streuungen in die Experimente einbringen. Insbesondere aus den zuletzt genannten Gründen

wurde die mechanisch-elektrische Reproduzierbarkeit der neuen Prüfvorrichtung an einem anderen stark viskosen Lebensmittel überprüft. Aus Vorversuchen erwies sich homogenisierter, kalter Bienenhonig als brauchbar, da bei diesem ähnliche Einsinkgeschwindigkeiten wie bei den zu untersuchenden Lebensmittelschäumen auftraten (Abb. 32/6). Das nächste Meßdiagramm weist aus den zehn getrennt durchgeführten Versuchen nahezu identische Meßlinien aus. Sie sind gekennzeichnet durch einen Beschleunigungsvorgang des Prüfstempels oberhalb der Lebensmitteloberfläche (h klein), einem kurzen Aufprall, einem gleichmäßigen Einsinkvorgang und einem Auslauf beim Auftreffen des Stempels auf dem Gefäßboden.

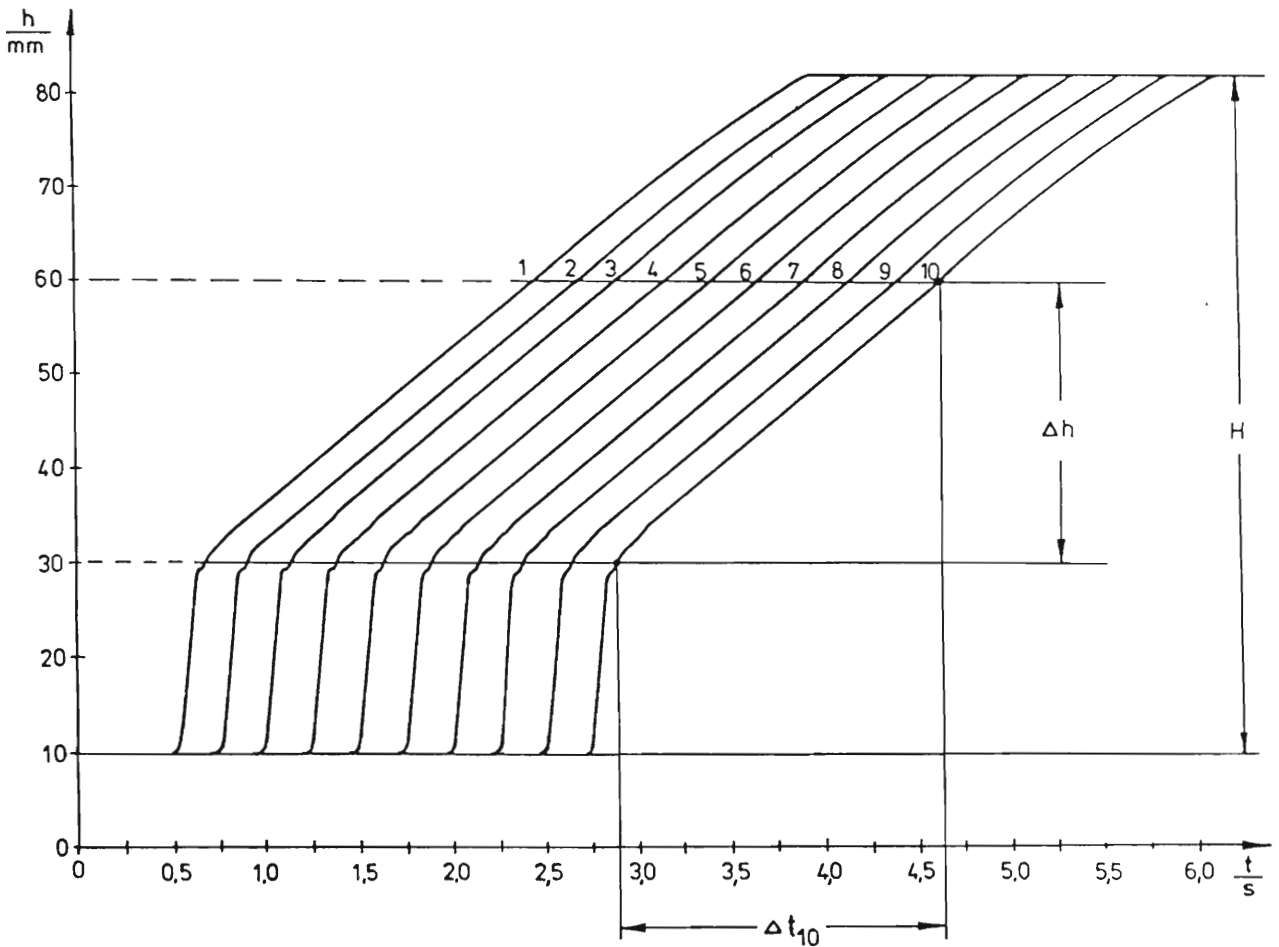


Abb.32/6: Meßdiagramm: Einsinkweg h des Prüfstempels in Abhängigkeit von der Zeit t bei Bienenhonig in 10 aufeinanderfolgenden Versuchen (Beruhigungszeit zwischen den Einzelmessungen 30 s)

Sieht man von dem "Bodeneffekt" bei Annäherung des Stempels an den Gefäßboden ab, so ist innerhalb des eigentlichen Prüfweges Δh der Differentialquotient $\frac{dh}{dt}$, d.h. die Stempelgeschwindigkeit konstant. Notfalls muß bei einer gekrümmten Meßlinie eine Sekante definiert werden. Die Auswertung des Meßprotokolls vereinfacht sich daher auf die Bestimmung des Differenzenquotienten, d.h. auf die Ermittlung von Δt und Δh für die Berechnung der Festigkeit

$$F \cong \frac{\Delta t}{\Delta h} . \quad (32.10)$$

Der kleine Prüfweg $\Delta h = 30$ mm entspricht dem Prüfweg der DLG-Prüfvorrichtung und verkleinert bei der neuentwickelten Prüfvorrichtung den für den Meßbereich $H = 50$ mm errechneten Systemfehler noch weiter.

Beim Lebensmittel Sahneschaum ist es im Gegensatz zum Bienenhonig aus den vorher erwähnten Gründen notwendig, die Sahneprobe jeweils in einem neuen Versuch zu schlagen. Unvermeidbar werden auf die Ergebnisse auch alle Schwankungen der produkt-, geräte- und raumabhängigen Parameter einwirken. Um die Produktparameter möglichst konstant zu halten, wird nur Sahne einer (Herstellungs-)Charge verwendet. Ebenso werden die Versuche unmittelbar kurz hintereinander durchgeführt, um möglichst konstante Raumparameter zu gewährleisten.

Hinsichtlich der Geräteparameter sind jedoch weitergehende Voraussetzungen zu erfüllen. Soll zunächst die Festigkeitsmessung unmittelbar im Schlaggefäß durchgeführt werden, so sind dazu die meist schlanken Gefäße der Hand-Küchenmaschine günstig. Wie der Name bereits ausdrückt, werden diese Maschinen von Hand geführt und zwar translatorisch auf einer Kreisbahn. Zusätzlich werden die Werkzeuge dabei vielfach im Schlaggefäß auf und ab bewegt. Da diese Bewegungen je nach Bedienperson sehr unterschiedlich ausfallen können und somit den Verfahrensablauf beeinflussen, wird für vorliegende Versuchsserie ein Laboraufbau konstruiert. Bei diesem kann

die Hand-Küchenmaschine an einem Stativ befestigt werden und die Werkzeuge tauchen in definierter Stellung in das Schlaggefäß (Abb. 32/7).

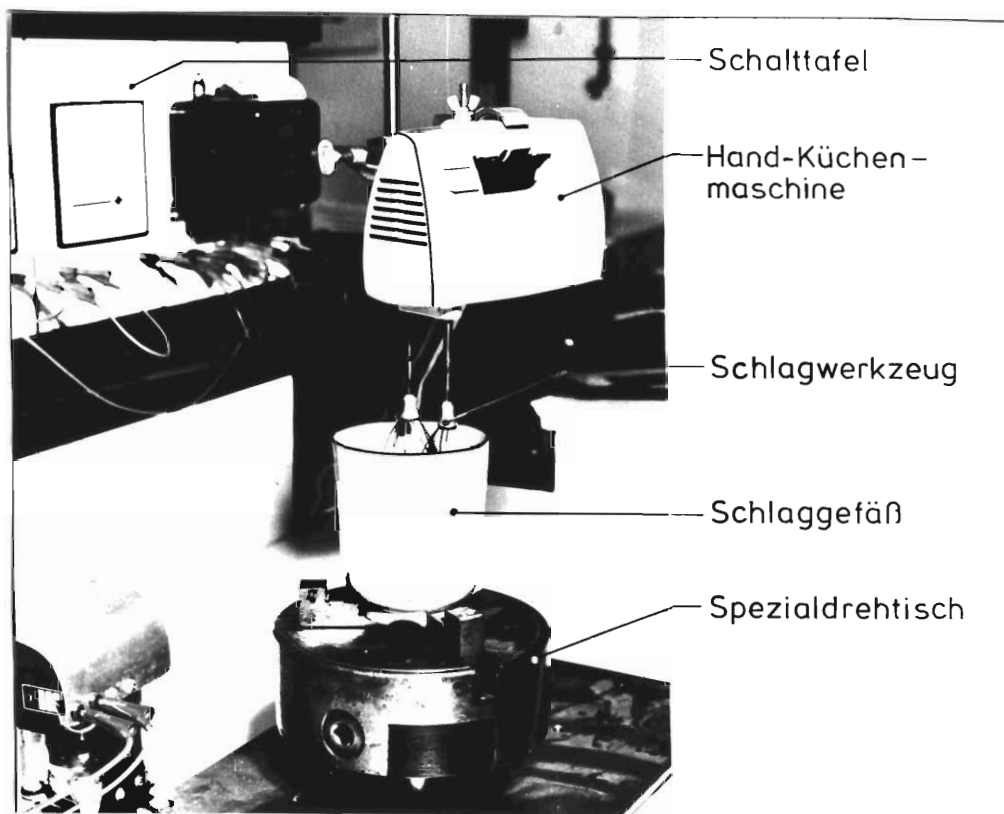


Abb. 32/7: Spezialdrehtisch zur Simulation der Handbewegung mit eingespanntem Schlaggefäß sowie Hand-Küchenmaschine mit Schlagwerkzeugen. Der obere Rand, die Ausgießnase und der Handgriff des Gefäßes sind aus versuchstechnischen Gründen entfernt worden

Letzteres ist in einem Drehbank-Dreibackenfutter eingespannt und wird von einem Spaltpolmotor und mehrstufigem Getriebe um eine vertikale Achse mit niedriger Drehfrequenz bewegt. Die haushaltsüblichen, von der Hand-Küchenmaschine angetriebenen Rührschüsseln mit Gestell sind wegen ungünstiger Kinematik und Wirkräume hierfür nicht geeignet. In diesem Zusammenhang muß daran erinnert werden, daß Kinematik und Wirkräume von rotierenden Schlaggefäßen nicht identisch sind mit solchen von (translatorisch) handgeführten Geräten und feststehenden Gefäßen.

Beim Schlagen von Sahne mit diesem Laboraufbau sind dennoch Parameterschwankungen und Inhomogenitäten im Schaum unvermeidlich, was sich besonders bei der Bestimmung der Schaumfestigkeit äußert. Die Einsinkkurven weichen bereits in ihrer Form voneinander ab und besitzen nicht das z.B. beim Honig experimentell nachgewiesene identische Aussehen (Abb. 32/8).

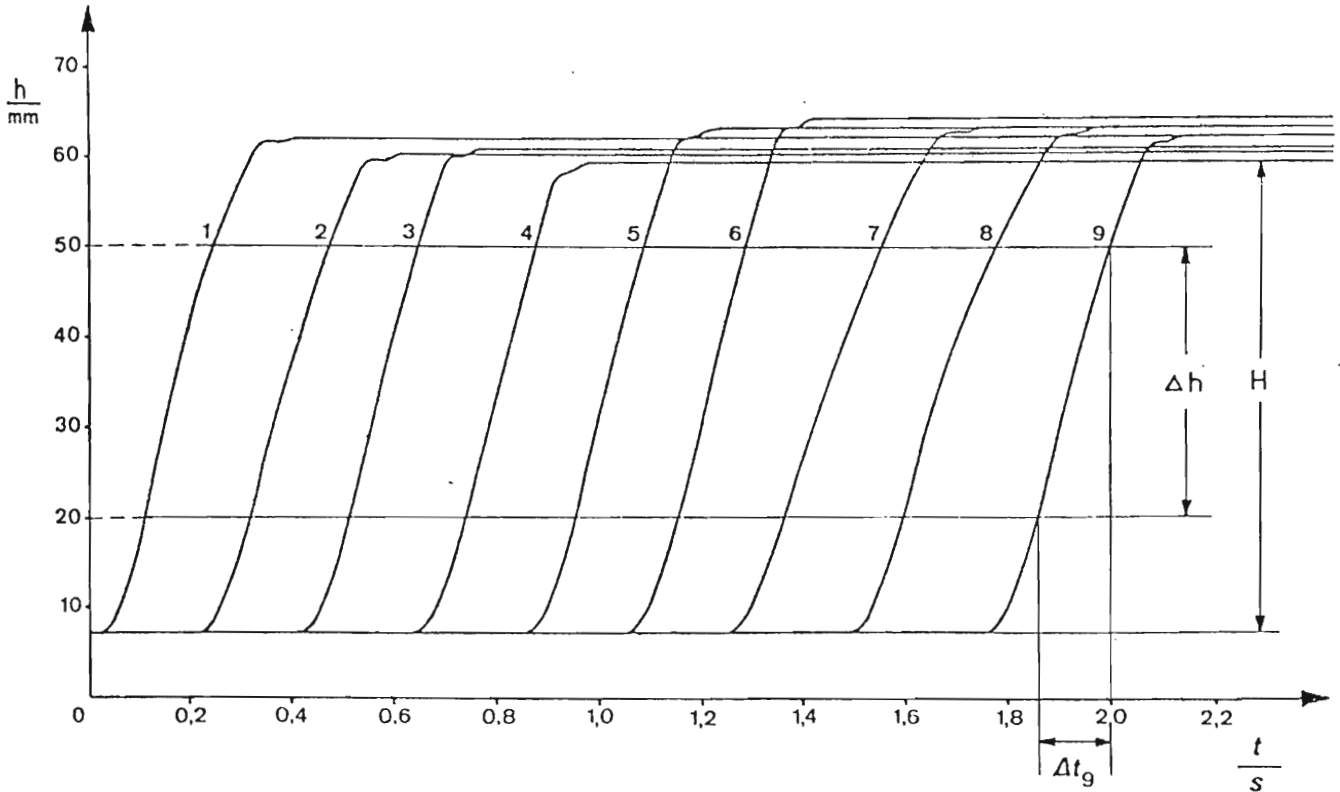


Abb.32/8 Meßdiagramm: Einsinkweg h des Prüfstempels in Abhängigkeit von derzeit t bei Sahneschaum, der in getrennten Versuchen geschlagen und unmittelbar im Schlaggefäß geprüft wurde

Wertet man die einzelnen Graphen des Meßdiagrammes aus, so ergeben sich für den einheitlichen Prüfweg $\Delta h = 30$ mm im allgemeinen verschiedene Zeitintervalle Δt_i für $i = 1$ bis 9.

Aus den Festigkeitswerten $F_i = \frac{\Delta t_i}{\Delta h}$ läßt sich der arithmetische Mittelwert (Gleichung 23.3) für die Festigkeit

$$\bar{F} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_i = 5,06 \frac{\text{s}}{\text{m}}$$

berechnen.

Die Standardabweichung (Gleichung 23.5)

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (F_i - \bar{F})^2} = 0,81 \frac{\text{S}}{\text{m}}$$

und der Variationskoeffizient (Gleichung 33.1)

$$\text{VK} = \frac{\sigma}{\bar{F}} \cdot 100 \% = 16 \%$$

können in vorliegendem Fall noch als klein bezeichnet werden. Daß die Graphen im Meßdiagramm sich dennoch deutlich voneinander unterscheiden, ist ein Vorteil der neuen Prüfmethode und läßt beispielsweise auch die Bewertung des übrigen Verlaufes von Prüfweg bzw. Einsinkweg zu.

Bei den bisherigen Experimenten war es möglich, die Festigkeitsmessungen ohne Umfüllvorgänge im selben Gefäß durchzuführen, in welchem der Schaum auch geschlagen wurde. Standküchenmaschinen besitzen jedoch meist sehr großflächige Schlaggefäße, weshalb bei geringen bzw. bei haushaltsüblichen Schaummengen der Einsinkweg des Prüfstempels und somit der Prüfweg in diesen Gefäßen zu klein wäre. Bei Gefäßen mit Innenkegeln würde die Festigkeitsprüfung auch unmittelbar an der Geometrie des Schlaggefäßes scheitern.

Muß der fertige Schaum im nachhinein vom Schlaggefäß in ein Festigkeits-Prüfgefäß umgefüllt werden, so sind zusätzliche Inhomogenitäten unvermeidbar. Je nach Geschick der Bedienungsperson werden unkontrolliert unterschiedlich große Luftblasen mit eingefüllt oder zumindest die Schaumstruktur verändert bzw. teilweise zerstört.

Im Experiment konnte dies auch indirekt nachgewiesen werden. Bei einer Versuchsserie, bei der alle Randbedingungen möglichst konstant gehalten wurden, zeigten die Graphen der

Festigkeitsmessung mehrerer Sahneproben unterschiedliches Aussehen (Abb. 32/9). Wertet man das Meßdiagramm wie bereits beschrieben aus, so ergibt sich die mittlere Festigkeit

$$F_m = 19,07 \pm 7,93 \frac{\text{S}}{\text{m}} .$$

Die Standardabweichung ist somit deutlich größer als bei den früheren Messungen, bei denen der Schaum nicht umgefüllt wurde (vgl. Abb. 32/8). Bei Optimierungsaufgaben hat es sich aber gezeigt, daß trotz dieser Ungenauigkeiten auf die Festigkeitsmessung nicht verzichtet werden kann.

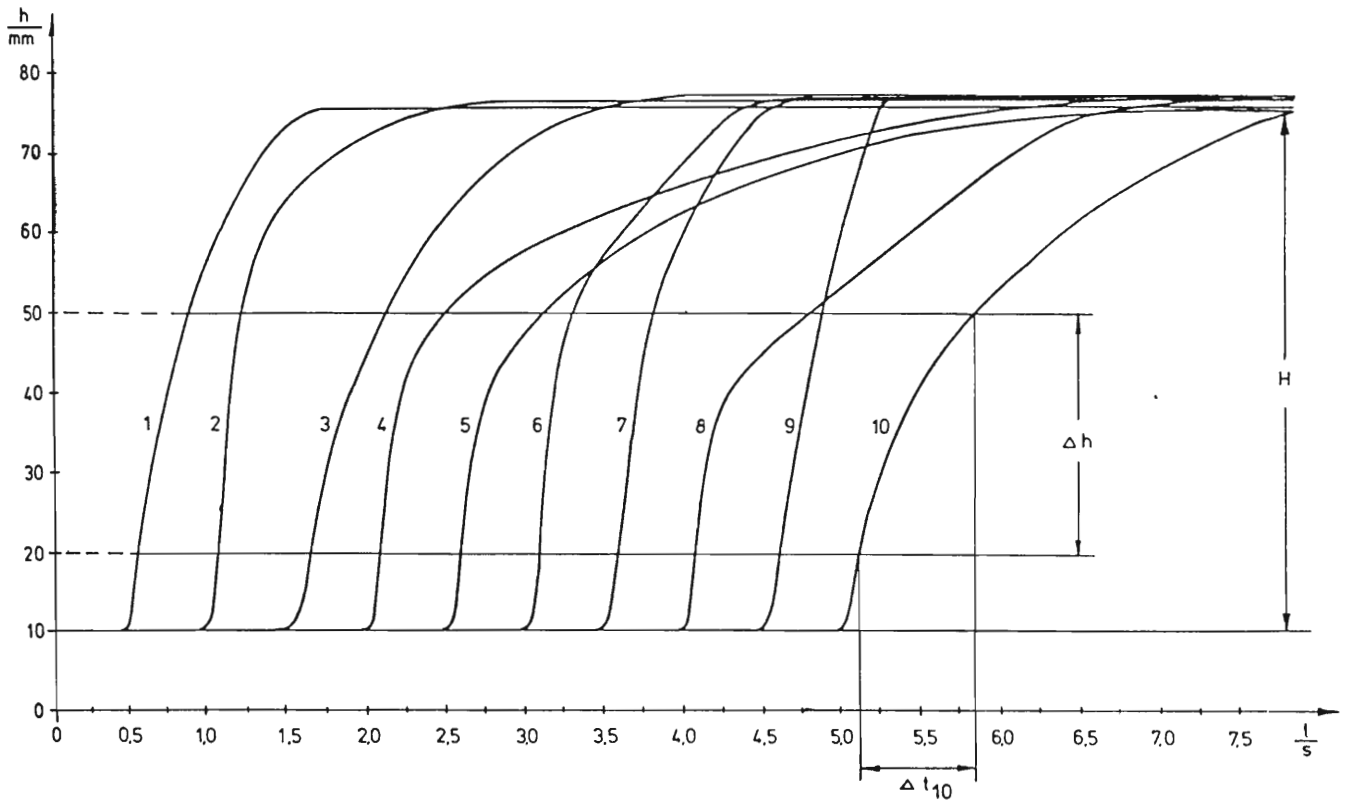


Abb.32/9: Meßdiagramm: Einsinkweg h des Prüfstempels in Abhängigkeit von der Zeit t bei Sahnescraum, der in getrennten Versuchen geschlagen und in ein Prüfgefäß umgefüllt wurde

3.3 GENAUIGKEIT DER BEURTEILUNGSKRITERIEN

Untersuchungen zur Reproduzierbarkeit der Festigkeits-Prüfvorrichtung lieferten vor allem Aussagen darüber, welche Genauigkeit für das Kriterium "Festigkeit" zu erwarten ist bzw. garantiert werden kann. Ähnliche Aussagen sollen nachfolgend auch für die anderen Beurteilungskriterien gemacht werden. Aus mehreren Meßreihen werden zu diesem Zweck die Ergebnisse für die wichtigen Kriterien Schlagdauer, Volumenzunahme, Beständigkeit bzw. Absatzmenge und Festigkeit zusammengestellt und diskutiert (Tab. 33/1 und Tab. 33/2).

Die Schlagdauer t_D läßt sich mit einer Zeituhr, z.B. einer Labor-Stoppuhr, sehr genau ermitteln. Stoppfehler (zweimalig) und Ablesefehler betragen zusammengefaßt durchwegs weniger als 1 Sekunde. Bei den Mindestzeiten für die Schlagdauer von etwa 2 Minuten ist demnach der dadurch auftretende Fehler $\mathcal{R} \approx 1\%$.

Bei vorliegenden Experimenten wird die Schlagdauer nur selten fest vorgegeben. Vielmehr wird der optimale Schlagendpunkt aus dem Verfahrensablauf ermittelt. Bei Sahneschaum beispielsweise ist dies der Augenblick "maximaler Steifigkeit" (maximaler Werkzeugwiderstand), der sich auch durch ein typisches Ablösen des fertigen Schaumes von den Wänden des Schlaggefäßes erkennen läßt.

Im Experiment werden in jeweils getrennten Versuchen zehn Sahneproben aus einer Charge unter möglichst konstanten Bedingungen geschlagen (Tab. 33/1, Meßreihe a). Nach statistischer Auswertung ergeben sich

- mittlere Schlagdauer $\bar{t}_D = 127,4$ s bei der
- Standardabweichung $\sigma = 4,9$ s, was dem
- Variationskoeffizienten

$$VK = \frac{\sigma}{\bar{t}_D} \cdot 100\% , \quad (33.1)$$

in vorliegendem Fall $VK = 3,8\%$ entspricht (Tab. 33/1, Meßreihe a).

Tab. 33/1: Urliste mit Meßreihen aus Schlagversuchen mit Sahne
zur Abschätzung der Genauigkeit wichtiger Beurteilungskriterien

Kriterium	Meßwerte aus den Einzelversuchen Nr.:										Mittelwert \bar{X}	Standard- Abweichung σ	Variations- Koeffizient VK	Meßreihe Nr.
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10				
Schlagdauer t_D/s	122,0	130,0	120,0	128,0	124,0	135,0	129,0	123,0	131,0	132,0	127,40	4,90	3,8 %	a
Endvolumen V_E/ml	364,0	356,0	371,0	358,0	360,0	358,0	380,0	360,0	340,0	340,0	358,70	12,22	3,4 %	b
Volumenzunahme $V^*/%$	82,0	78,0	85,5	79,0	80,0	79,0	90,0	80,0	70,0	70,0	79,30	6,11	7,7 %	c
Endvolumen V_E/ml	445,4	421,2	427,2	390,9	403,0	397,0	427,2	403,0	397,0	410,8	412,30	17,30	5,0 %	d
Volumenzunahme $V^*/%$	122,7	110,5	113,5	95,4	101,5	98,5	113,5	101,5	98,5	105,5	106,10	8,67	8,2 %	e
Festigkeit $F/\frac{S}{m}$	4,6	5,1	4,6	4,6	4,6	4,6	6,7	6,2	4,6	-	5,06	0,81	16,0 %	f
Festigkeit $F/\frac{S}{m}$	10,9	5,7	17,7	18,0	23,3	17,9	17,1	32,0	17,8	30,3	19,07	7,93	41,6 %	g

Berücksichtigt man, daß in die so definierte Schlagdauer auch unvermeidbare Schwankungen aller produkt-, geräte- und raumabhängiger Parameter eingehen, so läßt sich daraus folgern, daß das Kriterium "Schlagdauer" mit großer Genauigkeit bestimmt werden kann.

Die Volumenzunahme V^* wurde gemäß Gleichung 31.1 definiert zu

$$V^* = \frac{V_E - V_A}{V_A} \cdot 100\% .$$

Das Anfangsvolumen V_A der Flüssigkeit wird in einem Meßzylinder gemessen. Bei einer Ablesegenauigkeit von $\Delta V_A \approx 4$ ml und einer Normalmenge $V_A = 200$ ml beträgt der relative Fehler $\varkappa \approx 2\%$.

Das Endvolumen V_E des Schaumes wird in vorliegenden Experimenten grundsätzlich im Schlaggefäß mittels Längenmaßstab gemessen und über eine Eich-tabelle das tatsächliche Volumen bestimmt (vgl. Abb. 31/5).

Bei einer Ablesegenauigkeit von etwa 1 mm auf dem Maßstab und nach Mittelwertbildung aus mindestens drei Meßwerten ergibt sich in Abhängigkeit der Steigung der Eichkurve die Bestimmungsgenauigkeit $\Delta V_E \approx 20$ ml.

Bei einem Endvolumen $V_E \approx 400$ ml wäre demnach ein äußerster relativer Fehler $\Delta V_E / V_E$ von etwa 0,05 entsprechend $\varkappa \approx 5\%$ zu erwarten.

Der relative Fehler ergibt sich unter Berücksichtigung der linearen Glieder einer Taylorreihenentwicklung für die Volumenzunahme V^* aufgrund der Differentialrechnung

$$\frac{\Delta V^*}{V} = \left| \frac{\Delta V_E}{V_E - V_A} \right| + \left| \frac{V_E \Delta V_A}{V_A (V_E - V_A)} \right| . \quad (33.2)$$

Nach Einsetzen der bereits angegebenen Zahlenwerte errechnet sich der äußerste relative Fehler

$$\frac{\Delta V^*}{V} \approx 0,14 \quad \text{entsprechend} \quad \varkappa \approx 14\% .$$

Bei den zehn Sahneproben, aus der Meßreihe für die Schlagdauer wurde die jeweilige Volumenzunahme unmittelbar im Schlaggefäß d.h. ohne Umfüllen bestimmt. Nach dem Herausnehmen der Schlagwerkzeuge und "Abtropfen" derselben wird die Sahneoberfläche mit einer dem Schlaggefäß angepaßten Schablone vorsichtig glattgestrichen. Die Messung der Sahnehöhe an drei verschiedenen Stellen, Mittelwertbildung und Umrechnung mittels Eich-tabelle ergibt nach statistischer Auswertung das Endvolumen

$$V_E = 358,7 \pm 12,22 \text{ ml,}$$

mit dem Variationskoeffizienten $VK = 3,4\%$ (Tab. 33/1, Meßreihe b).

Berechnet man aus derselben Meßreihe die Volumenzunahme, so ergibt sich

$$V^* = 79,3 \pm 6,11\% ,$$

wobei $VK = 7,7\%$ beträgt (Tab. 33/1, Meßreihe c).

Bei Optimierungsaufgaben wird man zur weiteren Bewertung der Arbeitsergebnisse vor allem den Mittelwert \bar{x} des jeweiligen Kriteriums heranziehen. Dieser ist bei vorliegenden Bestimmungsmethoden selbst auch fehlerbehaftet, wobei die Vertrauensgrenzen (obere und untere) lauten:

$$\left. \begin{aligned} \bar{x}_{\max} &= \bar{x} + \frac{t}{\sqrt{n}} \sigma \\ \bar{x}_{\min} &= \bar{x} - \frac{t}{\sqrt{n}} \sigma \end{aligned} \right\} (33.3)$$

Der Faktor t ist von der gewählten Wahrscheinlichkeit und von der Anzahl n der Einzelmessungen abhängig.

Für die vorliegenden Meßreihen mit zehn Einzelmessungen ($n = 10$) ergibt sich bei 95% Wahrscheinlichkeit der Faktor $t = 2,26$ (105)

Beispielsweise bedeutet dies hinsichtlich der eben untersuchten Volumenzunahme, daß deren "wahrer" Mittelwert innerhalb des gesamten Vertrauensbereiches

$$\bar{V}_{\text{ges}}^* = 79,3 \pm 4,36\%$$

liegen kann.

Bei Vergleich der Zahlenwerte aus statistischer Berechnung mit denen aus der Abschätzung des äußersten relativen Fehlers, sei darauf hingewiesen, daß bei letzterem das ungünstigste Zusammenreffen aller Einzelfehler angenommen wird. Im übrigen bezieht sich die einfache Standardabweichung $\pm 1\sigma$ nur auf 68,3% der Meßwerte. Bei $\pm 2\sigma$ werden 95,5% und erst bei $\pm 3\sigma$ werden 99,7% aller Meßwerte einer Normalverteilung erfaßt.

Um abschätzen zu können, wie sich mit Umfüllen in ein Becherglas gemäß den DIN-Prüfbestimmungen (29) die Werte für die Volumenzunahme ändern, wurden dieselben Sahneproben der eben ausgewerteten Experimente weiter verwendet. Da dieses Becherglas eine Teilung mit den Teilungsintervallen $\Delta V = 100$ ml besitzt, empfiehlt es sich auch hier mittels Längenmaßstab (mm-Teilung) die Sahnehöhe zu ermitteln und rechnerisch das Endvolumen V_E zu bestimmen. Die statistische Auswertung ergibt

$$V_E = 412,3 \pm 17,3 \text{ ml}$$

mit dem Variationskoeffizienten $VK = 5\%$ (Tab. 33/1, Meßreihe d) und für die spezifische Größe Volumenzunahme

$$V^* = 106,1 \pm 8,67\%$$

entsprechend einem Variationskoeffizienten $VK = 8,2\%$ (Tab. 33/1, Meßreihe e).

Diese Ergebnisse zeigen klar, daß mit Umfüllen das Endvolumen V_E im Mittel um 54 ml bzw. 15% größer ist, als das Endvolumen ohne Umfüllen. Da die Menge des Sahneschaumes beim Umfüllen nicht zunehmen kann - es bleiben sogar noch kleine Reste im Schlaggefäß haften - ist dieses größere Schaumvolumen auf unabsichtlich eingebrachte Luftkammern zurückzuführen. Die Größe dieser Lufteinschlüsse ist auch abhängig von Geschick und Übung des Laborpersonals sowie von den verwendeten Umfüllwerkzeugen.

Noch stärker wirkt sich das Umfüllen bei der berechneten Volumenzunahme V^* aus. Hier wird im Mittel eine um 33% erhöhte Volumenzunahme vorgetäuscht, welche die untersuchte Küchenmaschine gar nicht erbracht hat.

Die Genauigkeit bei der Bestimmung der Beständigkeit

$$B = \frac{V_F - V_R}{V_F} \cdot 100\%$$

(gemäß Gl. 31.2) hängt ab von der Genauigkeit der Werte für das flüssige Probenvolumen V_F und der Absetzmenge V_R (in Diagrammen vielfach als A bezeichnet).

Bei Sahne errechnet sich das Bezugsvolumen

$$V_F = V_A \frac{V_P}{V_E}$$

(gemäß Gl. 31.4) aus Anfangsvolumen V_A , Prüfwürfelvolumen V_P und (Gesamt-) Schaumvolumen V_E . Die Werte dieser drei Größen sind im allgemeinen fehlerbehaftet. Die relativen Fehler wurden bereits abgeschätzt für $V_A \approx 2\%$ und $V_E \approx 5\%$. Der relative Fehler für V_P wird mit etwa 15% abgeschätzt und ergibt sich, je nach Geschicklichkeit der Laborperson, aus der mehr oder weniger guten Ausformung des Prüfwürfels. Gemäß den Regeln für das Rechnen mit Näherungswerten ergibt sich der äußerste relative Fehler

$$\frac{\Delta V_F}{V_F} = \left| \frac{\Delta V_A}{V_A} \right| + \left| \frac{\Delta V_E}{V_E} \right| + \left| \frac{\Delta V_P}{V_P} \right|. \quad (33.4)$$

Nach Einsetzen der genannten Einzelfehler errechnet sich im ungünstigsten Fall

$$\frac{\Delta V_F}{V_F} = 0,22 \text{ oder } \varkappa = 22\%.$$

Nach denselben Regeln, wie sie bei der Fehlerabschätzung für die Volumenzunahme V^* (Gl. 33.2) angewandt wurden, errechnet sich für die Beständigkeit B der äußerste relative Fehler

$$\frac{\Delta B}{B} = \left| \frac{V_R \Delta V_F}{V_F (V_F - V_R)} \right| + \left| \frac{\Delta V_R}{V_F - V_R} \right|. \quad (33.5)$$

Nimmt man an, daß die maximal zu erwartende Absetzmenge $V_R = 10 \text{ ml}$ und in einem schlanken Meßzylinder die Ablesegenauigkeit $\Delta V_R = 0,5 \text{ ml}$ beträgt, so ergibt sich zusammen mit den bisherigen Werten

$$\frac{\Delta B}{B} = 0,0124 \text{ entsprechend } \varkappa \approx 1,3\%.$$

Der große Fehler beim Bezugsvolumen V_F der im wesentlichen vom ungenauen Ausformen des Probewürfels herrührt, wirkt sich bei kleinen Absetzmengen V_R demnach weniger stark aus. Dennoch wird bei Sahneschaum der Einfachheit halber vorgeschlagen die absolute Absetzmenge V_R zu messen und nur diese zu bewerten. Im übrigen ist nach optimalem Verfahrensablauf bei Sahneschaum überhaupt keine Absetzmenge festzustellen, d.h. $V_R \approx 0$, weshalb auf die Angabe einer Meßreihe in den Tabellen auch verzichtet wurde.

Bei großen Absetzmengen, wie dies z.B. beim Lebensmittel Eischnee auftreten kann, ist die Berechnung der Beständigkeit dann unproblematisch, wenn das gesamte Schaumvolumen als Probedient, d.h. Bezugsvolumen $V_F = \text{Anfangsvolumen } V_A$.

Die Bestimmung der Festigkeit F wurde schon an einigen Beispielen besprochen (vgl. Kap. 3.2). Nachfolgend soll die Genauigkeit dieses Beurteilungskriteriums unter verschiedenen Einsatzbedingungen zusammenfassend diskutiert werden.

Für die DLG-Prüfvorrichtung wurde mit einer Berechnung der Reibungsverhältnisse - insbesondere bei Schrägstellung der Gleitführung - bereits eine Meßunsicherheit mit einem Fehler von $\alpha \approx 18\%$ abgeschätzt.

In mehreren Versuchsreihen - beispielsweise in einer mit insgesamt 21 Einzelmessungen - wurde der Variationskoeffizient $VK = 49,5\%$ für die Einsinkdauer und damit gleichzeitig für die Festigkeit F berechnet. Noch größere Schwankungen hinsichtlich der Einsinkdauer bzw. der Festigkeit ergaben sich mit derselben DLG-Prüfvorrichtung, wobei jeweils die zwei Sahneproben a und b unter möglichst konstanten Randbedingungen bearbeitet wurden (vgl. Tab. 31/1). Diese Schwankungen sind im gesamten Meßbereich der Prüfvorrichtung zu beobachten, da absichtlich Probenpaare mit fester und weniger fester Sahnekonsistenz erzeugt und untersucht wurden.

Die neuentwickelte Prüfvorrichtung besitzt denselben Prüf-
stempel wie die DLG-Vorrichtung, er bewegt sich jedoch auf
einem Kreisbogen in einer reibungsarmen Lagerung. Der Fehler -
herrührend von dieser Kreisbogenbewegung - kann bei der augen-
blicklichen Konstruktion angegeben werden mit $\alpha \approx 1,5\%$.

Am Lebensmittel Bienenhonig - er besaß einen ähnlich großen
Bewegungswiderstand am Prüfstempel wie Sahneschaum - wurde
die Reproduzierbarkeit dieses neuen Meßsystems überprüft
(Abb. 32/6). Die von einer elektronischen Schreibvorrichtung
aufgezeichneten Meßlinien aus zehn Einzelversuchen sind zu-
mindest für das menschliche Auge identisch. Die systembeding-
ten Meßwertschwankungen sind demnach praktisch Null.

Bei der Festigkeitsprüfung an Sahneschaum sind Mehrfachmessun-
gen in ein- und derselben Probe im allgemeinen nicht ratsam,
da bereits beim erstmaligen Einsinken des Prüfstempels die
Schaumstruktur verändert wird. Schlägt man den Schaum für jede
Festigkeitsmessung neu, so gehen hier - wie auch bei den an-
deren Beurteilungskriterien - unvermeidbare Schwankungen aller
produkt-, geräte- und raumabhängiger Parameter mit ein.

Bei einer Meßreihe mit neun Schaumproben wurden die Festig-
keitsprüfungen unmittelbar im Schlaggefäß durchgeführt und
die Meßdiagramme ausgewertet (Abb. 32/8). Es errechnete sich
die Festigkeit

$$F = 5,06 \pm 0,81 \frac{\text{S}}{\text{m}},$$

was dem Variationskoeffizienten $VK = 16\%$ entspricht (Tab. 33/1,
Meßreihe f).

Ist es jedoch notwendig, den Sahneschaum vom Schlaggefäß wegen
der Festigkeitsprüfung in ein anderes Gefäß umzufüllen - z.B.
falls das Schlaggefäß einen störenden Innenkegel besitzt -, so
streuen die Meßdiagramme und damit die Meßwerte erheblich
stärker (Abb. 32/9).

Tab. 33/2: Abschätzen der Genauigkeit wichtiger Beurteilungskriterien beim Schlagen von Sahne *)

Kriterium	Meßeinrichtung	Fehler- ermittlung	Bemerkung	Fehler / % α = äußerster relativer Fehler VK = Variationskoeffizient	Meßreihe Nr. (vgl. Tab. 33/1)
SCHLAGDAUER t_D	Laborstoppuhr dto.	Berechnung 10 Messungen	--- vgl. Hinweis unten	$\alpha \approx 1,0$ VK = 3,8	--- a
VOLUMEN					
Anfangsvolumen V_A	Meßzylinder	Berechnung	---	$\alpha \approx 2,0$	---
Endvolumen V_E	Gefäß - Eichkurve	Berechnung	---	$\alpha \approx 5,0$	---
Volumenzunahme V^*	$V^* = \frac{V_E - V_A}{V_A} \cdot 100\%$	Berechnung	---	$\alpha \approx 14,0$	---
Endvolumen V_E	Gefäß - Eichkurve	10 Messungen	ohne Umfüllen	VK = 3,4	b
Volumenzunahme V^*	Gleichung f. V^* s.o.	10 Messungen	ohne Umfüllen	VK = 7,7	c
Endvolumen V_E	Becherglas	10 Messungen	mit Umfüllen	VK = 5,0	d
Volumenzunahme V^*	Gleichung f. V^* s.o.	10 Messungen	mit Umfüllen	VK = 8,2	e
BESTÄNDIGKEIT					
Absetzmenge V_R	Meßzylinder	Berechnung	bei $V_R = 10$ ml	$\alpha \approx 5,0$	---
Probenvolumen V_P	Ausformschablone	Berechnung	Sahnewürfel	$\alpha \approx 15,0$	---
Bezugsvolumen V_F	$V_F = V_A \frac{V_P}{V_E}$	Berechnung	Flüssigkeitsmenge	$\alpha \approx 22,0$	---
Beständigkeit B	$B = \frac{V_F - V_R}{V_F} \cdot 100\%$	Berechnung	bis max. $V_R = 10$ ml	$\alpha \approx 1,3$	---
FESTIGKEIT F					
	DLG-Prüfvorrichtung dto.	Berechnung 21 Messungen	--- ohne Umfüllen	$\alpha \approx 18,0$ VK = 49,5	--- ---
	neuentwickelte Prüfvorrichtung dto.	Berechnung 10 Messungen	--- "Bienenhonig"	$\alpha \approx 1,5$ VK ≈ 0	--- ---
	dto.	9 Messungen	ohne Umfüllen	VK = 16,0	f
	dto.	10 Messungen	mit Umfüllen	VK = 41,6	g

*) Hinweis: Bei den Messungen wurden - bis auf die Festigkeitsprüfungen mit Bienenhonig - jeweils neue Lebensmittelproben bearbeitet, so daß unvermeidliche Schwankungen von produkt-, geräte- und raumabhängigen Parametern in den Meßergebnissen mit enthalten sein können.

Die statistische Auswertung ergab bei dieser Versuchsreihe mit zehn Einzelversuchen die Festigkeit

$$F = 19,07 \pm 7,93 \frac{\text{S}}{\text{m}}$$

und damit den Variationskoeffizienten $VK = 41,6\%$ (Tab. 33/1, Meßreihe g).

Daß auch bei diesen Schlagversuchen sorgfältig gearbeitet wurde, zeigt die Auswertung der Volumenzunahme V^* für diese zehn Einzelversuche. Sie konnte mit

$$V^* = 123,5 \pm 2,89\%$$

berechnet werden, was einem Variationskoeffizienten $VK = 2,34\%$ entspricht und somit ein hohes Maß an Reproduzierbarkeit bestätigt.

Die Schlagdauer wurde bei vorliegenden Versuchen konstant mit zwei Minuten festgelegt, wobei nach dieser Zeit auch die für den optimalen Schlagendpunkt typischen Ablöseerscheinungen der Sahne von den Geräteteilen beobachtet werden konnten. Für die Absetzmenge wurden nach einer Stunde Werte von 0 bis 0,3 ml gemessen, was ebenfalls die Qualität des verwendeten Schaumes bestätigt.

Zusammenfassend läßt sich für die Beurteilungskriterien feststellen (vgl. Tab. 33/2): Die Schlagdauer t_D und die Beständigkeit B können mit großer Genauigkeit bestimmt werden. Die Werte für die Volumenzunahme V^* sind dann genau bestimmbar, wenn das Schaumvolumen unmittelbar im Schlaggefäß mittels Eichkurve bestimmt wird, wie dies durchwegs in vorliegender Arbeit geschah.

Falls jedoch der Schaum in ein anderes Gefäß umgefüllt wird, ist die Bestimmung des von der Maschine erzeugten Schaumvolumens ungenau, da durch Lufteinschlüsse eine zu große Volumenzunahme vorgetäuscht wird.

Nachteilig wirkt sich dieses Umfüllen auch bei der Prüfung der Festigkeit F aus, ist allerdings in der Praxis nicht immer zu vermeiden. Selbst die neuentwickelte Prüfvorrichtung, die vom System her hohe Genauigkeit garantiert, kann in einer solchen Versuchsreihe nur ungenaue Meßwerte liefern.

Dennoch kann auf die Prüfung der Schaumfestigkeit nicht verzichtet werden, da nur unter Berücksichtigung dieses Kriteriums eine zuverlässige Optimierung von Küchenmaschinen möglich ist. Dies konnte in zahlreichen Versuchsreihen, von denen in vorliegender Arbeit nur Ausschnitte wiedergegeben sind, nachgewiesen werden.

3.4 * HYPOTHESE DES SCHAUMSCHLAGENS

Die Kenntnis über Entstehung und Struktur von Dreiphasenschäumen ist kaum ausreichend, das Verfahren SCHAUMSCHLAGEN zu bewerten und wenig hilfreich es zu optimieren (vgl. Kap. 2.3.6). Die mikroskopische oder kolloidale Betrachtungsweise der Schaumbläschen und -lamellen ist auch unzureichend, da die Werkzeuge und Werkzeugelemente beim Schaumschlagen vergleichsweise als grob zu bezeichnen sind. Gemäß einer der Zielsetzungen vorliegender Habilitationsschrift mußte zusätzlich eine andere Betrachtungsweise herangezogen werden. Deshalb wurde unter makroskopischer Betrachtungsweise eine Hypothese des Schaumschlagens entworfen, die sich bei einer Vielzahl von Experimenten bewährt hat.

Insbesondere bei Optimierungsaufgaben bot diese Hypothese zahlreiche Entscheidungshilfen für die Optimierungsstrategie. Neben der Bedingung, das Optimum hinsichtlich der interessierenden Arbeitsergebnisse zu finden, soll auch die dazu notwendige Anzahl an Experimenten möglichst klein sein. Die letztgenannte Forderung ergibt sich nicht nur aus der begrenzten Versuchszeit oder aus ökonomischen Gründen, sondern aus Gründen der Genauigkeit; denn alle Experimente zu einer Untersuchungsaufgabe sollen möglichst mit einer Lebensmittelcharge und innerhalb eines kurzen Zeitraumes durchgeführt werden.

3.4.1 ENTWURF DER HYPOTHESE

Die in vorliegender Habilitationsschrift entworfene und angewandte Hypothese des SCHAUMSCHLAGENS läßt sich folgendermaßen erklären. Taucht ein schlanker Stab, der horizontal bewegt wird, vertikal in eine Flüssigkeit ein, so kann die Flüssigkeit bis zu einer Relativgeschwindigkeit v_{\min} den Stab vollständig umströmen (Abb. 34/1a). Ab der Geschwindigkeit

$$v \geq v_{\min} \tag{34.1}$$

reißt am Stab die Strömung ab. Solche Ablösungserscheinungen

sind von anderen Strömungsvorgängen her bekannt. Bei einem Körper (z.B. zylindrisch oder kugelförmig), der vollständig von einer Flüssigkeit umströmt ist, schließt sich bei niedrigen Geschwindigkeiten die Strömung ohne weitere Störungen hinter dem Körper (laminare Umströmung). Bei größeren Geschwindigkeiten löst sich die Grenzschicht ab, und hinter dem Körper bildet sich ein wirbelbehaftetes Strömungsgebiet, in welchem Unterdruck herrscht (6).

Die Grenzgeschwindigkeit bei der diese Strömungsänderung auftritt hängt im wesentlichen von der Reynoldszahl Re ab (siehe auch Gl. 23.24) und damit vom charakteristischen Durchmesser des Körpers sowie von Dichte und dynamischer bzw. kinematischer Zähigkeit der Flüssigkeit. Da der Körper jedoch vollkommen in die Flüssigkeit eintaucht sind Gaszutritt und völlige Strömungsablösung zunächst ausgeschlossen.

Im vorliegenden Fall des Schaumschlagens taucht der Körper jedoch nur teilweise von oben her in die Flüssigkeit ein. Die vom bewegten Stab quer zu seiner Geschwindigkeitsrichtung zwangsweise verdrängten Flüssigkeitsmoleküle fließen bei niedrigen Geschwindigkeiten durch den Druck in der Flüssigkeit hinter dem Stab wieder zusammen.

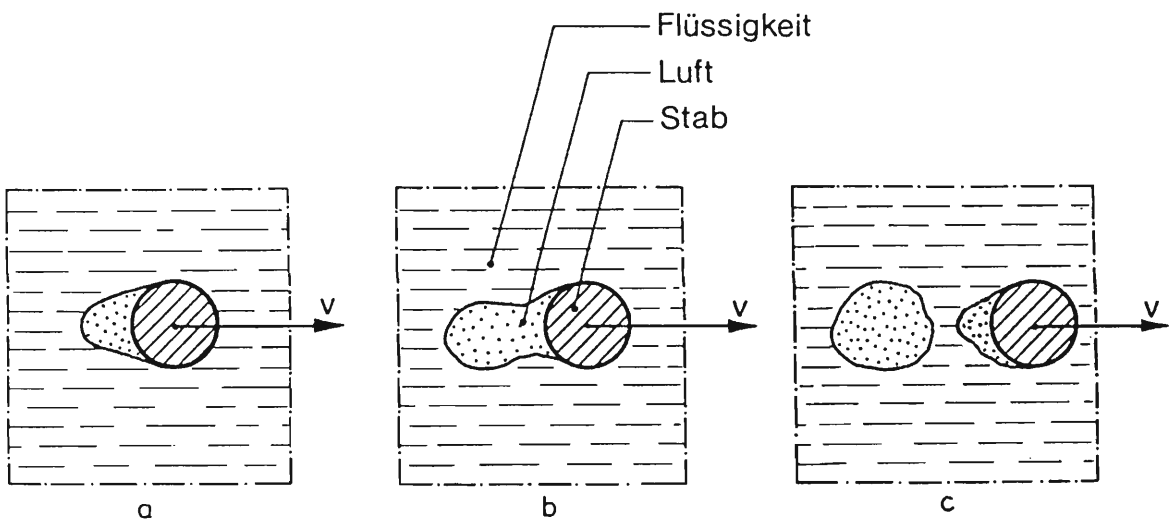


Abb. 34/1: Prinzip des Schaumschlagens mittels bewegtem Stab (Aufsicht)

Diese Druckkräfte können den Flüssigkeitsmolekülen jedoch nur eine vergleichsweise geringe Beschleunigung erteilen. Oberhalb einer Mindestgeschwindigkeit des Stabes (Gl. 34.1) ist die Flüssigkeit offensichtlich zu träge, um rechtzeitig wieder hinter dem Stab zusammenzuströmen und es bildet sich ein Hohlraum. An der Grenzfläche Luft-Flüssigkeit wird durch den Unterdruck im entstandenen Hohlraum Luft eingesaugt. Die Luft dringt dabei auch tief in die Flüssigkeit ein und im weiteren bildet sich eine Einschnürung der Luft hinter dem Stab (Abb. 34/lb). Diese Einschnürung entsteht durch die Druckkräfte innerhalb der Flüssigkeit.

Schließlich trennt sich der hintere Teil der "Luftröhre" vollständig vom Stab und wird von der sich ausbildenden Nachbarströmung verschlossen bzw. in mehrere Luftkammern zerteilt (Abb. 34/lc). Gleichzeitig werden die Luftblasen (bzw. Gasblasen) durch den Mischvorgang auch tiefer in das Innere und an andere Stellen des Flüssigkeitsvolumens gefördert.

Physikalisch gesehen ist es demgegenüber sehr viel einfacher den Schaum durch direktes Einblasen von Gas mittels Überdruck zu erzeugen. Sind die Düsen am Boden eines Gefäßes angeordnet, so dringt das Gas von unten nach oben in die Flüssigkeit ein. Typisch ist dabei, daß sich diese "Gassäulen" einschnüren, von den Düsen abtrennen und als einzelne Blasen von nahezu gleicher Größe aufsteigen (5).

Energetisch gesehen ist das Einblasen auch sehr viel günstiger, als das "mechanische Schaumschlagen", weshalb letzteres bei industriellen Verfahren kaum zu finden ist. Meist verwendet man zum Begasen von Flüssigkeiten hohle Rührwerkzeuge, in deren Kanäle das Gas unter Druck zugeführt wird.

Wissenschaftlich untersucht wurden auch sog. "selbstansaugende Rührer", bei denen der Gaskompressor entfallen kann (122) (130) (131).

Bei diesen sind die Rührwerkzeuge ebenfalls hohl und das Gas wird durch eine Öffnung oberhalb der zu begasenden Flüssigkeit angesaugt. Dazu müssen die Werkzeuge - ähnlich wie beim mechanischen Schaumschlagen - eine gewisse Mindestgeschwindigkeit

besitzen, damit der sich ausbildende Unterdruck hinter dem Werkzeug größer ist als der hydrostatische Druck in der Flüssigkeit. Nur so kann Gas eingesaugt werden, das im Gegensatz zum mechanischen Schaumschlagen unmittelbar ins Innere der Flüssigkeit bzw. ins Innere des entstehenden Schaumes geleitet wird.

Mit dem vorgestellten Mechanismus der Schaumbildung wurde begründet weshalb der Stab eine gewisse Mindestgeschwindigkeit v_{\min} besitzen muß. Er soll jedoch auch eine Höchstgeschwindigkeit v_{\max} nicht überschreiten. Diese Bedingung ergibt sich hauptsächlich aus der üblichen Konstruktion von Schlagwerkzeugen: Sie besitzen zur Beschleunigung des Verfahrens durchwegs mehrere Stäbe bzw. Drähte, die sich bei der Schaumerzeugung gemäß der vorgestellten Hypothese gegenseitig u. U. nachteilig beeinflussen. Der vorausseilende Stab kann die beschriebenen Luftkammern nicht aufbauen, wenn sie der nachfolgende bei zu rascher Geschwindigkeit verändert bzw. wieder zerstört. Demnach ist für die Geschwindigkeit v des schaum erzeugenden Stabes zu fordern

$$v_{\min} \leq v \leq v_{\max}. \quad (34.2)$$

Innerhalb dieses Geschwindigkeitsbereiches ist die Schaumerzeugung zwar gewährleistet, das Ergebnis ist jedoch nicht zwangsläufig optimal. Für ein optimales Verfahren ist der zulässige Geschwindigkeitsbereich noch weiter einzuschränken oder die Werkzeuggeschwindigkeiten v sind einer optimalen Geschwindigkeit v_{opt} möglichst anzunähern.

In den nachfolgend beschriebenen Versuchsserien soll diese Hypothese des Schaumschlagens näher untersucht werden.

3.4.2 ÜBERPRÜFUNG DER HYPOTHESE ANHAND WICHTIGER GERÄTEPARAMETER

Zur Überprüfung der Schaumschlag-Hypothese werden jeweils Geräte und Verfahren gewählt, die es gestatten, den zu untersuchenden Parameter möglichst gut von den anderen Parametern zu isolieren. Dennoch sind wegen der Vielzahl der Parameter und deren praxisübliche Bandbreite meist nur qualitative Untersuchungen möglich. Erst bei speziellen Optimierungsaufgaben an Küchenmaschinen können zumindest für einige Parameter auch quantitative Aussagen gemacht werden.

Neben der Bandbreite erschweren zusätzlich unvermeidbare Parameterschwankungen die Untersuchungen. Im Labor wäre es mit großem technischen Aufwand möglich z.B. Raumparameter wie Lufttemperatur, Feuchtigkeit oder Intensität der Wärmestrahlung konstant zu halten. Solche Einschränkungen stünden aber im Widerspruch zur Haushaltspraxis, in der angenommen werden muß, daß die Werte dieser und anderer Parameter erheblich schwanken.

Außerdem können noch eine Reihe von bedeutsamen Parametern nicht ohne weiteres als konstant vorausgesetzt werden. Beim Lebensmittel Milch, dem Ausgangspunktprodukt für Sahne, sind Menge und Beschaffenheit des MilCHFettes aber auch des Milcheiweißes sehr stark von der Fütterung abhängig (65). Daher sind auch jahreszeitliche Schwankungen zu berücksichtigen (52). Sind die Kühe auf der Sommerweide, so ist ein deutlich größerer Fettgehalt der Milch als zu Zeiten der Winterweide zu erwarten. Bei Experimenten mit "Sommerrahm" wurden - bei sonst gleichen Randbedingungen - wesentlich größere Absatzmengen als bei "Winterrahm" gemessen. Dies ist offensichtlich auf den hohen Flüssiganteil des Fettes beim "Sommerrahm" zurückzuführen. Aus diesem Grund werden beispielsweise die DLG-Qualitätsprüfungen für Sahne vorwiegend nur in den Wintermonaten, also zur Zeit der Stallfütterung durchgeführt (67) (114).

Jahreszeitliche Schwankungen sind auch beim Lebensmittel Eischnee zu berücksichtigen (107). Die Zusammensetzung von Eiklar und andere Produktparameter werden beispielsweise von Alter der Eier, Lagerbedingungen, Hühnerrasse und Futterart beeinflußt (103).

Das Verhältnis von Eiklar zu Eigelb und der Anteil an Trockensubstanz von Eiklar ist in hohem Maße vom Alter der Legehennen abhängig (62).

Wegen dieser Problematik hinsichtlich der Produkt- und Raumparameter konzentrieren sich die Untersuchungen in vorliegender Arbeit hauptsächlich auf Geräteparameter. Für eine geschlossene Versuchsserie muß eine möglichst homogene Lebensmittelcharge vorbereitet und die zusammengehörigen Experimente rasch nacheinander durchgeführt werden. Die Ergebnisse aus mehreren Versuchsserien, die mit unterschiedlichen Chargen durchgeführt wurden, sind zwar qualitativ, aber nicht immer quantitativ vergleichbar.

Zur Überprüfung der Hypothese werden nachfolgend einzelne, meist voneinander unabhängige Versuchsserien herangezogen. Die Aussage hinsichtlich des begrenzten Geschwindigkeitsbereiches (Gl. 34.2) läßt sich am günstigsten mit zylindrischen Werkzeugen verifizieren.

3.4.2.1 DREHFREQUENZ DER WERKZEUGE

Die Stäbe des rotierenden Werkzeugkorbes besitzen in zunächst ruhender Flüssigkeit die Relativgeschwindigkeit

$$v = R \omega . \quad (34.3)$$

Mit R = Radius des Werkzeugkorbes

ω = Winkelgeschwindigkeit,

wobei $\omega = 2\pi n$

mit n = Drehfrequenz des Werkzeuges (Abb. 34/2).

Bei niedriger Geschwindigkeit ($v < v_{\min}$) fließt die Flüssigkeit hinter den bewegten Stäben ohne Schaumbildung wieder zu-

sammen. Erst bei höherer Geschwindigkeit ($v \geq v_{\min}$) reißt die Strömung hinter den Stäben ab und es kann Schaum entstehen. Bei sehr großer Geschwindigkeit ($v > v_{\max}$) stören sich die Stäbe gegenseitig, da der nachfolgende Stab die Entstehung von Luftkammern am voreilenden Stab behindert. Diese Behinderung wird sich in einer verringerten Schaumbildung äußern. Mit einem Labor-Schlaggerät, bestehend aus zwei zylindrischen Werkzeugen, Planetengetriebe mit Gleichstrom-Nebenschlußmotor und stillstehendem Schlaggefäß, wurde bei verschiedenen Drehfrequenzen Sahne zu Schaum geschlagen (Abb. 34/3).

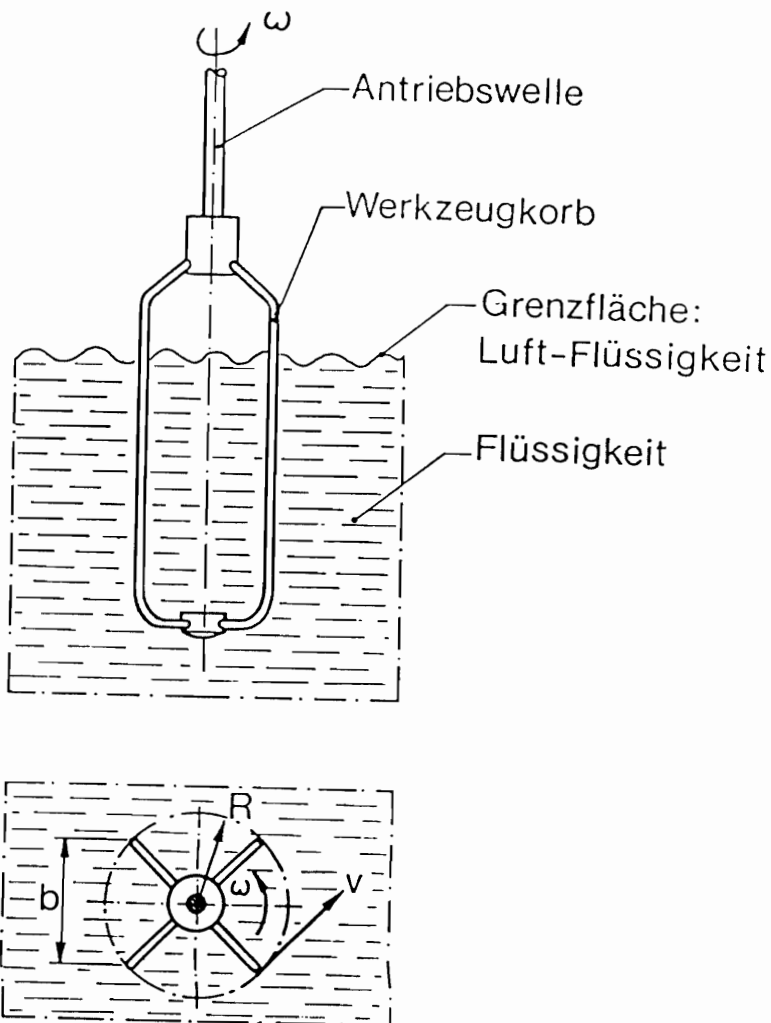


Abb. 34/2: Rotierendes Werkzeug zum Schlagen von Schäumen

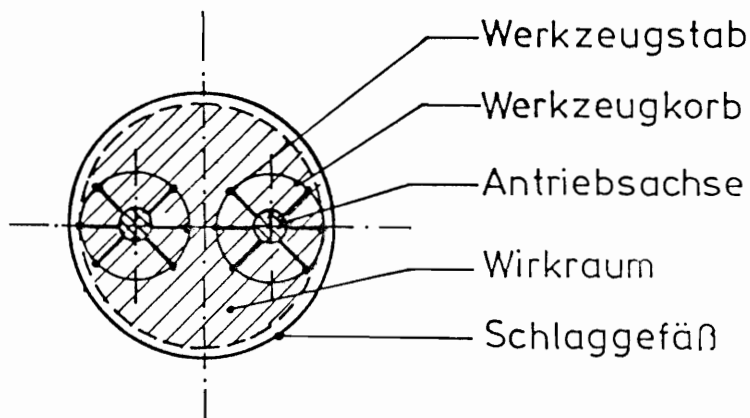


Abb. 34/3: Schlagwerkzeuge und Schlaggefäß eines Laborgerätes (Aufsicht im Schnitt)

Die wichtigsten Ergebnisse aus diesen Versuchen lassen sich wie folgt darstellen (Abb. 34/4) (100):

Das wesentliche Kriterium für die Schaumbildung, die Volumenzunahme V^* , besitzt nur in einem schmalen Drehfrequenzbereich gute Werte. Bei niedrigen Drehfrequenzen n ist die Volumenzunahme gering. Sie nähert sich bei sehr kleinen Drehfrequenzen dem Wert 0. Ebenso verringern sich die Werte für die Volumenzunahme bei größeren Drehfrequenzen sehr deutlich. Der Zahlenwert für die optimale Drehfrequenz gilt nur für die hier vorliegende Parameterkonfiguration.

Eine ähnliche Abhängigkeit von der Drehfrequenz besitzt die Schaumbeständigkeit B , die hier durch die zu B negativ korrelierte Absatzmenge A dargestellt ist. Im optimalen Drehfrequenzbereich ist die Absatzmenge praktisch Null.

Die Werte für die Schlagdauer t_D hingegen werden mit steigender Drehfrequenz n noch deutlich kleiner. Diese Abhängigkeit der Volumenzunahme, Absatzmenge und Schlagdauer von der Antriebs-

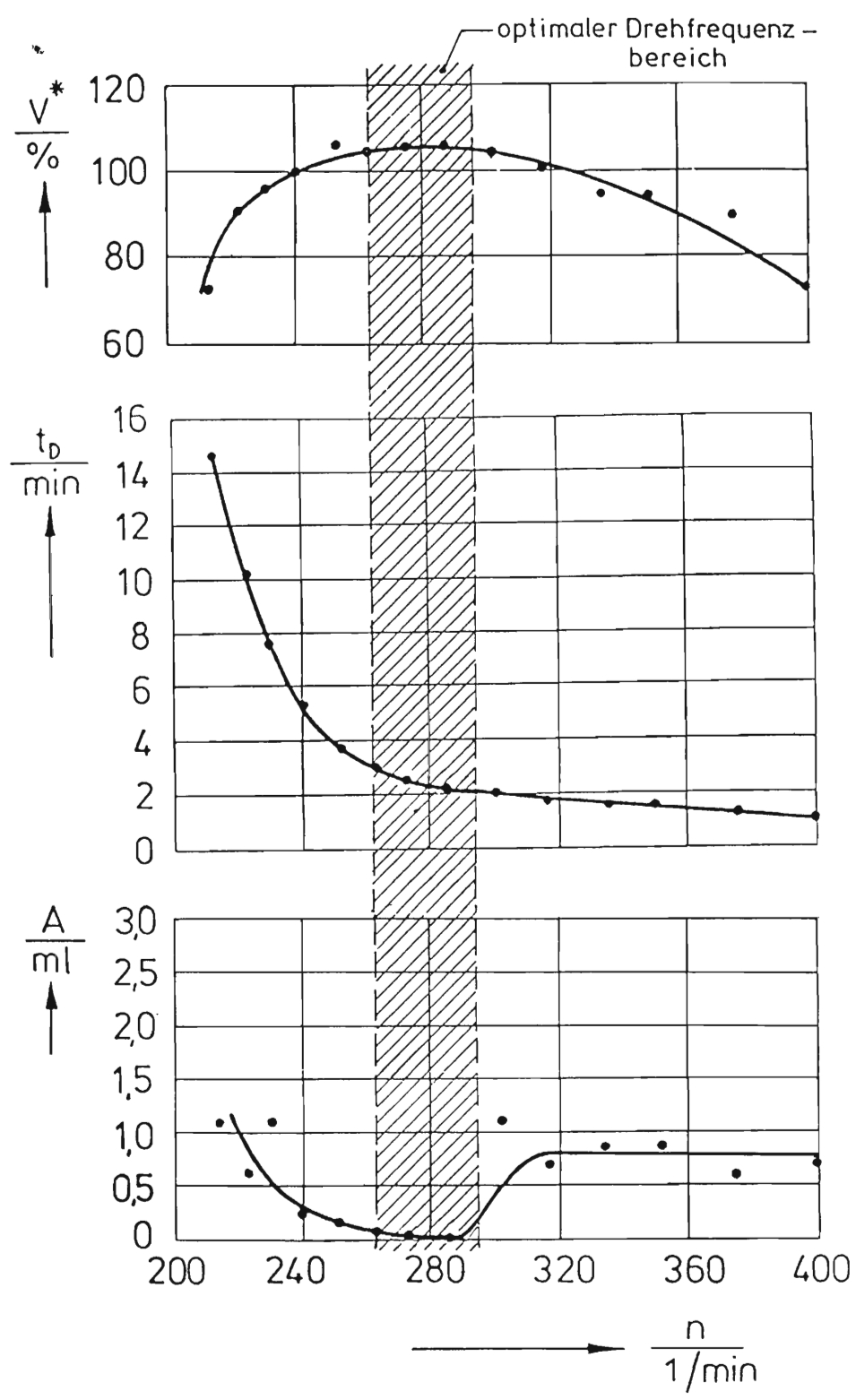


Abb. 34/4: Volumenzunahme V^* , Schlagdauer t_D und Absetzmenge A in Abhängigkeit der Drehfrequenz n bei Sahne mit einem modifizierten Molkerei-Sahneschlaggerät ($V_A = 100$ ml, Gefäßdurchmesser $D = 72$ mm). Hinweis: Jede Meßpunktgruppe zur jeweiligen Drehfrequenz entspricht einem separaten Versuch, der dann beendet wurde, wenn die Werkzeuge im Schaum den größten Bewegungswiderstand überwinden mußten ("maximale Steifigkeit" $\hat{=}$ max. Stromstärke)

Drehfrequenz ist charakteristisch für das Schlagen von Sahne, und wurde auch bei anderen Maschinen immer wieder so ermittelt (vgl. z. B. Abb. 35/7).

Die Abnahme der Schlagdauer ist auch physikalisch erklärbar, da mit steigender Drehfrequenz der Weg der Werkzeugstäbe im Schaum und damit die "Schlaghäufigkeit" zunimmt. Umgekehrt ist die "Schlaghäufigkeit" bei niedriger Drehfrequenz ebenfalls gering.

Eine geringe Schlaghäufigkeit ergibt sich auch - bei sonst gleichen Bedingungen - mit Werkzeugen die nur sehr wenig Stäbe besitzen. Würde man nun dennoch gleiche oder ähnliche Arbeitsergebnisse anstreben, so müßte die Schlagdauer entsprechend größer gewählt werden. Andererseits könnte auch die Drehfrequenz gesteigert werden, da die obere Geschwindigkeitsgrenze, d.h. v_{\max} nach der vorgestellten Hypothese ebenfalls bei größeren Werten liegen müßte.

Als Nachweis für die Richtigkeit dieser Voraussagen wurde in einer Versuchsreihe das Schlagwerkzeug einer Küchenmaschine in Originalausführung verwendet und bei verschiedenen Drehfrequenzen jeweils die erforderliche Schlagdauer t_D und die damit erreichte Volumenzunahme V^* gemessen. In einer unmittelbar folgenden Versuchsserie aus gleicher Lebensmittelcharge wurde ein Schlagwerkzeug verwendet, bei dem von den ursprünglich 16 Stäben des Werkzeuges jeder zweite Stab entfernt wurde (Abb. 34/5).

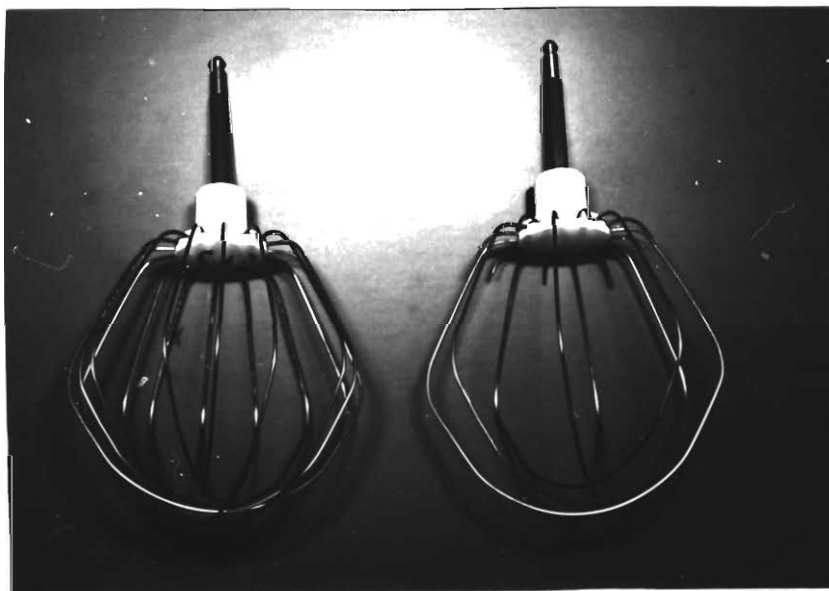


Abb. 34/5: Schlagwerkzeuge einer Klein-Küchenmaschine.
Links: Original-Werkzeug mit 16 Stäben;
rechts: modifiziertes Werkzeug mit 8 Stäben

Die Ergebnisse zeigen die vorausgesagte Erhöhung der optimalen Drehfrequenz von n_1 auf n_2 , welche zum Bestwert der Volumenzunahme für die jeweilige Parameterkonfiguration führt. Demnach ist auch die optimale Geschwindigkeit v_{opt} und die obere Geschwindigkeitsgrenze v_{max} bei größeren Werten anzunehmen (Abb. 34/6).

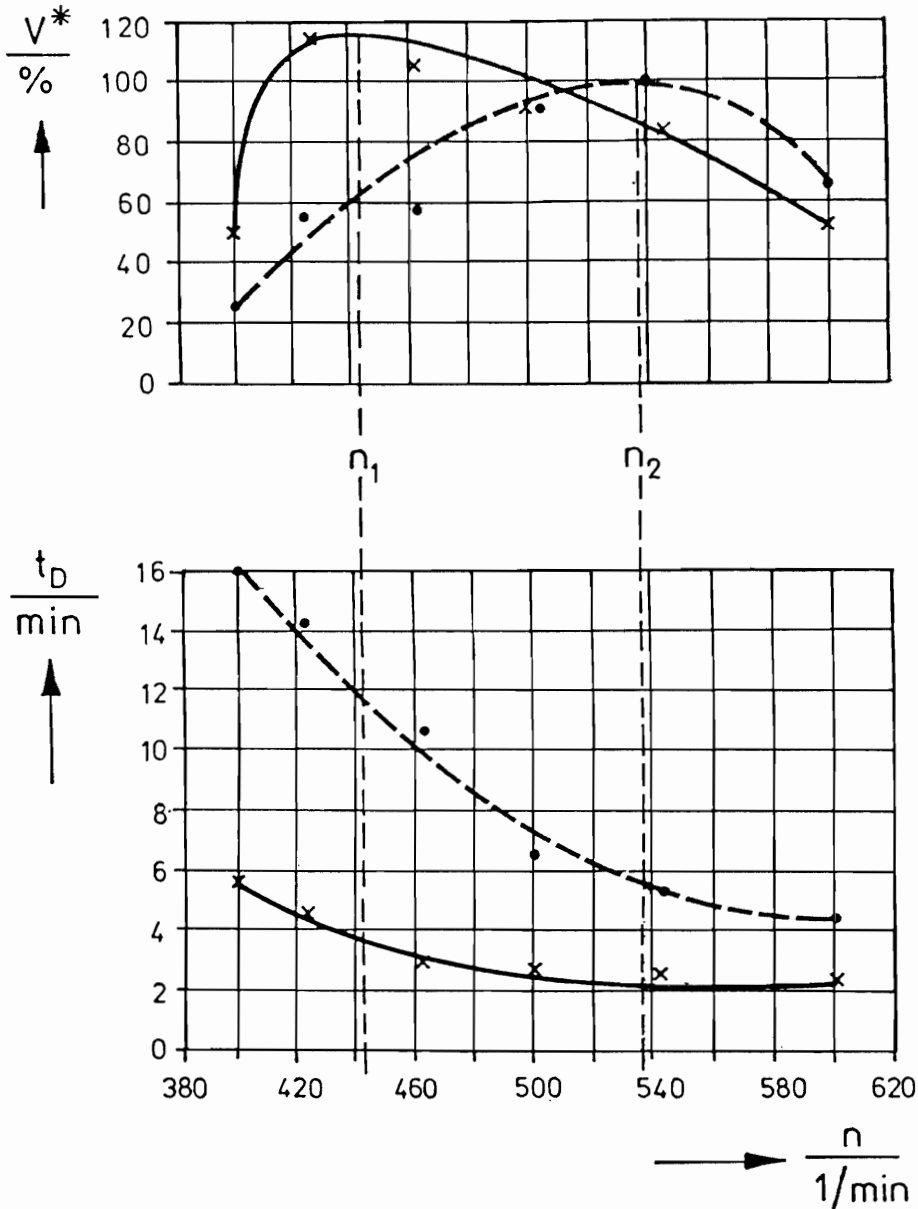


Abb. 34/6: Volumenzunahme V^* und Schlagdauer t_D in Abhängigkeit der Drehfrequenz n bei einem Schlagwerkzeug mit 16 Stäben (— Original-Werkzeug) und mit 8 Stäben (----- modifiziertes Werkzeug) zu einer Klein-Küchenmaschine ($V_A = 200$ ml Sahne). Hinweis: Jede Meßpunktgruppe zur jeweiligen Drehfrequenz n entspricht einem separaten Versuch, der bei "maximaler Steifigkeit" der Sahne beendet wurde

Das absolute Maximum der Volumenzunahme V^* ist allerdings bei den Versuchen mit dem modifizierten Werkzeug kleiner, da das Originalwerkzeug für diese Maschine optimiert wurde. Diese Optimierung äußert sich auch in der kurzen Schlagdauer des Originalwerkzeuges, wohingegen sie beim modifizierten Werkzeug noch etwas mehr als doppelt so groß ist. Nach der Hypothese des Schaumschlagens lassen sich für die gleiche Drehfrequenz und Schlaghäufigkeit voraussagen, daß die Schlagdauer beider Werkzeuge sich etwa wie 1:2 verhalten müßte.

3.4.2.2 DURCHMESSER DER WERKZEUGSTÄBE

Bestwerte für Volumenzunahme, Beständigkeit und Aussehen lassen sich nur mit feinblasigem Schaum erzielen. Abgeleitet von der entworfenen Hypothese ist zu erwarten, daß zur Erzeugung von feinblasigem Schaum vorrangig Werkzeuge mit dünnen Stäben geeignet sind.

Bei umfangreichen Experimenten im Rahmen der Optimierung einer Klein-Küchenmaschine konnte dieser Trend zumindest annähernd nachgewiesen werden (Abb. 34/7). Die Korrelationen zwischen Volumenzunahme V^* und Stabdurchmesser d sowie Schlagdauer t_D und Stabdurchmesser d sind nur sehr schwach signifikant, da bei V^* , d der Korrelationskoeffizient $r = 0,4$ und bei t_D , d der Korrelationskoeffizient $r = 0,52$ berechnet wurde.

Gemäß der 20 Einzelmessungen, die allerdings mit Werkzeugen unterschiedlich großer Stabanzahl durchgeführt wurden, beträgt die Zahl der Freiheitsgrade 18 und bei 95% Wahrscheinlichkeit wäre der Zufallshöchstwert des Korrelationskoeffizienten $r = 0,44$ (105).

Die beiden Regressionsgeraden zeigen aber deutlich, daß mit steigendem Stabdurchmesser d die Volumenzunahme V^* kleiner, die erforderliche Schlagdauer t_D jedoch größer wird. Stäbe mit großem Durchmesser besitzen demnach für das Schaumschlagen keineswegs eine bessere Wirkung, wie aus der Sicht des Strömungsmechanikers zunächst zu erwarten wäre.

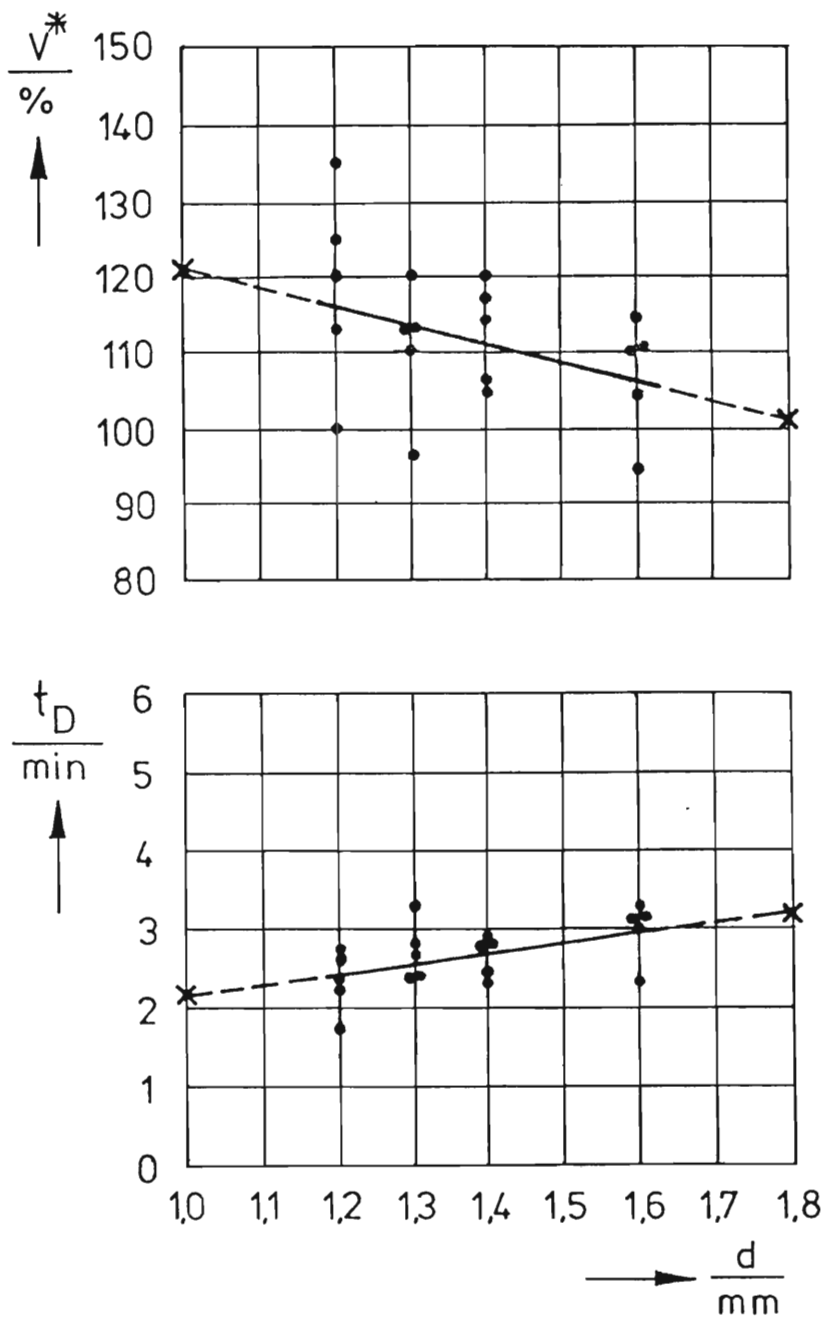


Abb. 34/7: Volumenzunahme V^* und Schlagdauer t_D in Abhängigkeit des Stabdurchmessers d beim Schlagen von Sahne mit einer Klein-Küchenmaschine ($n = 545 \frac{1}{\text{min}}$; ●... Einzelmessungen mit Werkzeugen bestehend aus 12, 14, 16, 18 und 20 Stäben; ×... berechnete Werte der Regressionsgeraden)

Ist der Durchmesser der Werkzeugstäbe jedoch sehr klein, so kann je nach Konfiguration der übrigen Parameter die Schaumbildung unzureichend sein. Hinter einem sehr dünnen Stab oder Draht schließt sich die Flüssigkeit wieder so rasch, daß nicht genügend Luft in die kleine "Luftröhre" einströmen kann. Weiterhin neigen sehr dünne Werkzeulemente zu unkontrollierten Schwingungen während der Bewegung, was ebenfalls die Schaumerzeugung beeinflusst.

In der Praxis werden auch aus anderen Gründen meist Werkzeuge mit relativ großen Stabdurchmessern bevorzugt. Derartige Werkzeuge sind mechanisch stabiler, damit für Dauerbelastung geeignet und können bei Bedarf auch zum Mischen anderer, z.B. hochviskoser Lebensmittel verwendet werden.

3.4.2.3 FÜLLMENGE IM SCHLAGGEFÄß

Die optimale Füllmenge in einem Schlaggefäß ist vor allem von der Gefäß- und Werkzeugform abhängig. Bei zu geringer Füllmenge bzw. Füllhöhe ist die Mechanik im Lebensmittel unzureichend groß, da die Werkzeuge nur noch wenig eintauchen. Umgekehrt erschwert bei großer Füllhöhe der entsprechend große hydrostatische Druck in der Flüssigkeit das Einschlagen der Luft. Vor allem ist das Verhältnis von Grenzfläche Luft-Flüssigkeit (nur an dieser kann Luft eindringen) zu Flüssigkeitsvolumen entsprechend klein, d.h. ungünstig. Schon aus diesen Gründen ist bei einer großen Füllmenge auch eine große erforderliche Schlagdauer zu erwarten. In der Praxis ist es daher manchmal günstiger, eine große Lebensmittelmenge in kleinere Chargen aufzuteilen und zu bearbeiten.

Eine große Lebensmittelmenge erfordert auch eine große Leistung des Antriebsmotors, damit dieser die Werkzeuge entgegen dem Widerstand des Lebensmittels hinreichend schnell bewegen kann. Beim Lebensmittel Sahne wird dies besonders am Schlagendpunkt deutlich, da in diesem Augenblick die Sahne ihre größte "Steifigkeit" aufweist. Die Stromstärke I des Elektromotors

besitzt dabei jeweils den Maximalwert (Abb. 34/8). Um dieses Maximum eindeutig als solches zu erkennen, muß es geringfügig überschritten werden. Für diese empfindliche Messung eignet sich ein Labor-Schlaggerät mit Antrieb durch einen Gleichstrommotor am besten.

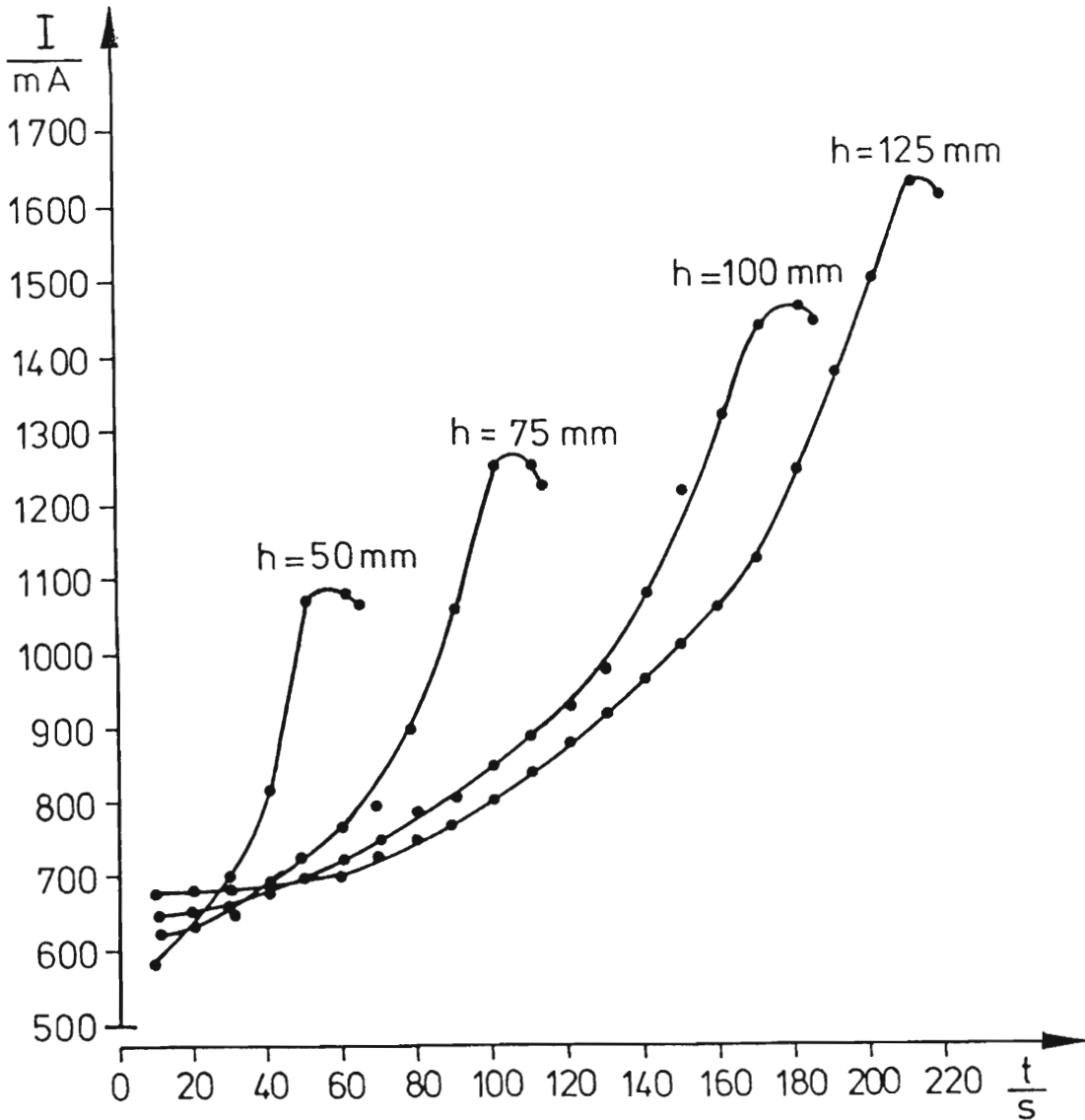


Abb. 34/8: Stromstärke I in Abhängigkeit der Schlagzeit t bei unterschiedlich großen Füllhöhen h (Scharparameter) beim Schlagen von Sahne in einem zylindrischen Schlaggefäß ($D = 72$ mm). Labor-Sahneschlaggerät mit zylindrischen Werkzeugen und Antrieb durch einen Gleichstrommotor

Mit zunehmender Füllmenge - bei vorliegendem zylindrischen Gefäß entspricht dies linear auch der Füllhöhe - erhöht sich nicht nur der Motorstrom I , sondern auch die Schlagdauer t_D .

Diese letztgenannte Tendenz konnte auch unter Einsatz einer Hand-Küchenmaschine mit einem haushaltsüblichen konischen Schlaggefäß nachgewiesen werden. Um die Zusatzbewegung der Werkzeuge im Gefäß unabhängig von der Bedienperson zu machen und somit reproduzierbar, rotiert das Gefäß langsam mit dem Spezialdrehtisch (vgl. Abb. 32/7).

Die Versuchsergebnisse zeigen, daß für einen kleinen Wertebereich der Füllmenge Q die Volumenzunahme V^* - es handelt sich wie definiert um eine spezifische Größe - gute Werte besitzt (Abb. 34/9). Bei kleiner und bei großer Füllmenge sind die Werte für die Volumenzunahme V^* aber auch für Absetzmenge A und Festigkeit F vergleichsweise ungünstig.

Eine ähnliche Kurvencharakteristik wurde bei Experimenten mit dem Lebensmittel Eiklar nachgewiesen (59). Dabei wurde der Schlagvorgang jeweils beim Erreichen des ersten Stromminimums des Elektromotors beendet und auf diese Weise die Schlagdauer für jede Einzelmessung individuell festgelegt (vgl. Abb. 31/4). Bei einer weiteren Erhöhung der Schlagdauer würde sich zwar die Volumenzunahme noch steigern lassen, die Beständigkeit würde jedoch merklich abnehmen (101).

Wie schon erwähnt, steht der Parameter "Füllmenge" in engem Zusammenhang mit den Parametern "Art und Form der Werkzeuge" und "Form des Schlaggefäßes". Im nachfolgenden Kapitel soll daher der Einfluß der Werkzeuge auf Schlagprozeß und Arbeitsergebnisse näher betrachtet werden.

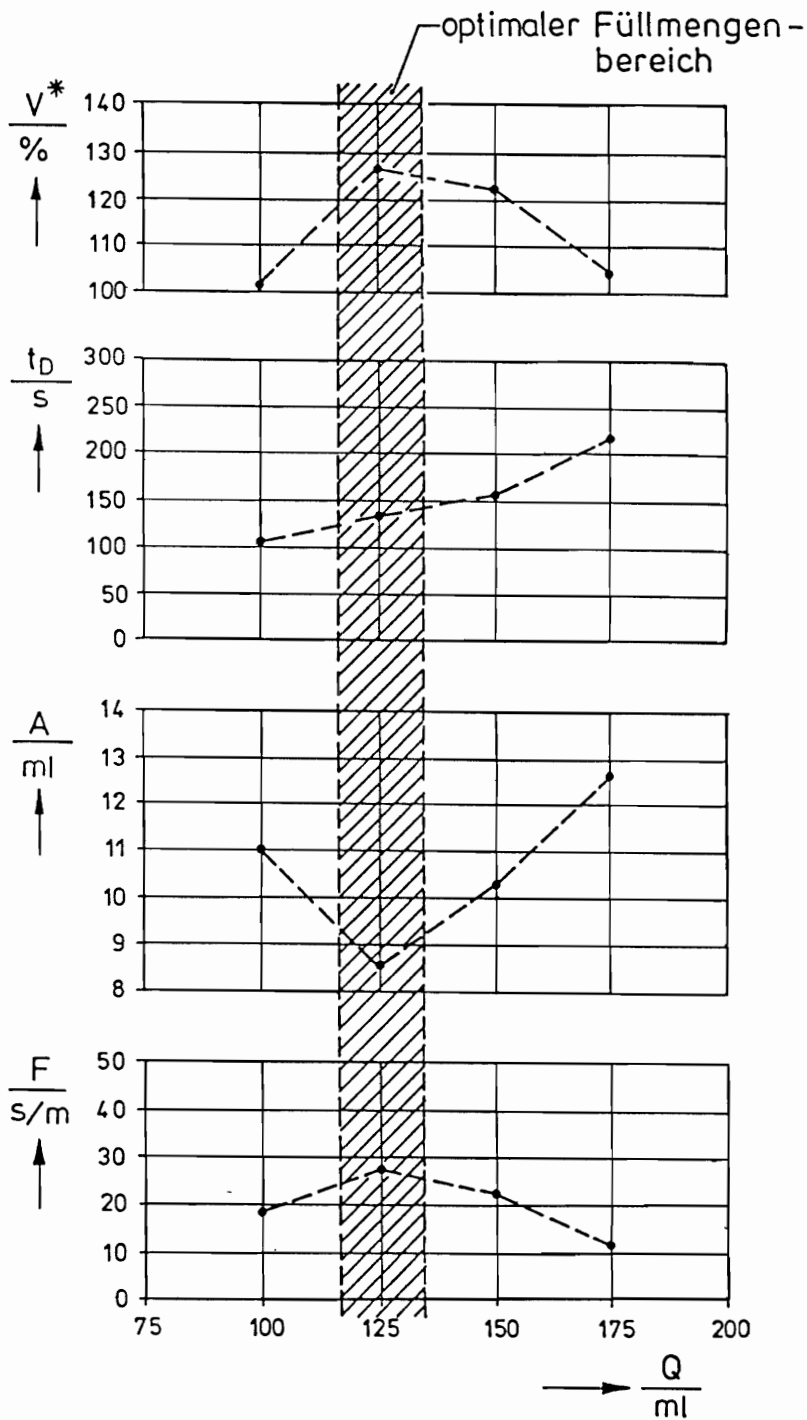


Abb. 34/9: Volumenzunahme V^* , Schlagdauer t_D , Absetzmenge A und Festigkeit F in Abhängigkeit von der Füllmenge Q beim Schlagen von Sahne mit einer Hand-Küchenmaschine auf Spezialdrehtisch (vgl. Abb. 32/7).

Hinweis: Jeder Meßpunkt wurde als arithmetischer Mittelwert aus jeweils 4 - 6 Einzelversuchen ermittelt (Küchenmaschine: $n_K = 1000 \frac{1}{min}$; Drehtisch: $n_D = 29 \frac{1}{min}$)

3.4.2.4 ART UND FORM DER WERKZEUGE

Die bisherigen Untersuchungen wurden hauptsächlich an Werkzeugen durchgeführt, deren Form von einfacher Geometrie ist. In der Praxis sind - vermutlich weniger aus technischen, sondern mehr aus patentrechtlichen oder marktpolitischen Gründen - kompliziert geformte Werkzeuge im Einsatz. Die theoretische Beurteilung des Schlagverhaltens solcher Werkzeuge ist schwierig (Abb. 34/10).

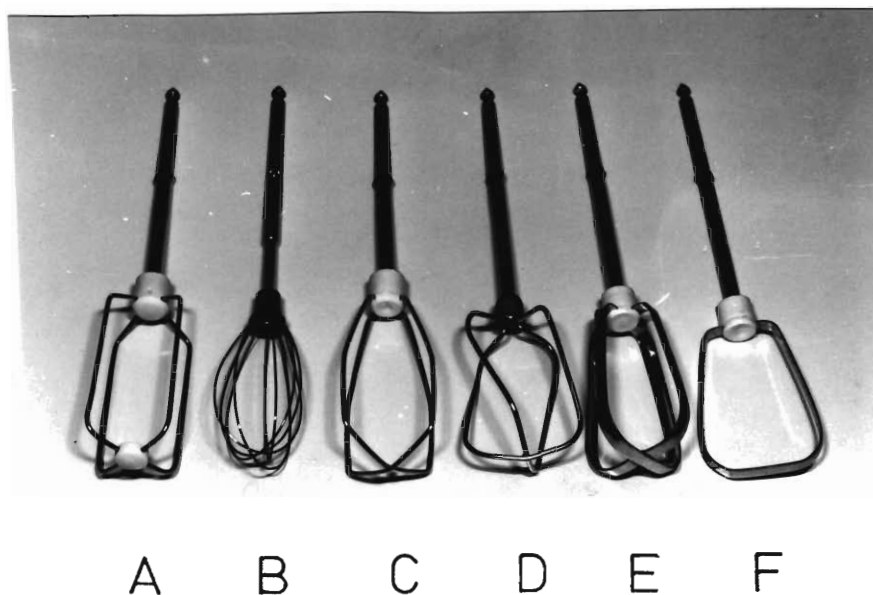


Abb. 34/10: Unterschiedliche Ausführungsformen von Schlagwerkzeugen zu Hand- Küchenmaschinen (Werkzeugschaft vereinheitlicht)

Die experimentellen Ergebnisse lassen sich jedoch unter Zuhilfenahme der entworfenen Hypothese einigermaßen deuten. In Abb. 34/10 sind die Schlagwerkzeuge in einer Reihenfolge abgebildet, wie sie gleichzeitig den steigenden Werten für die erforderliche Schlagdauer entspricht (Abb. 34/11).

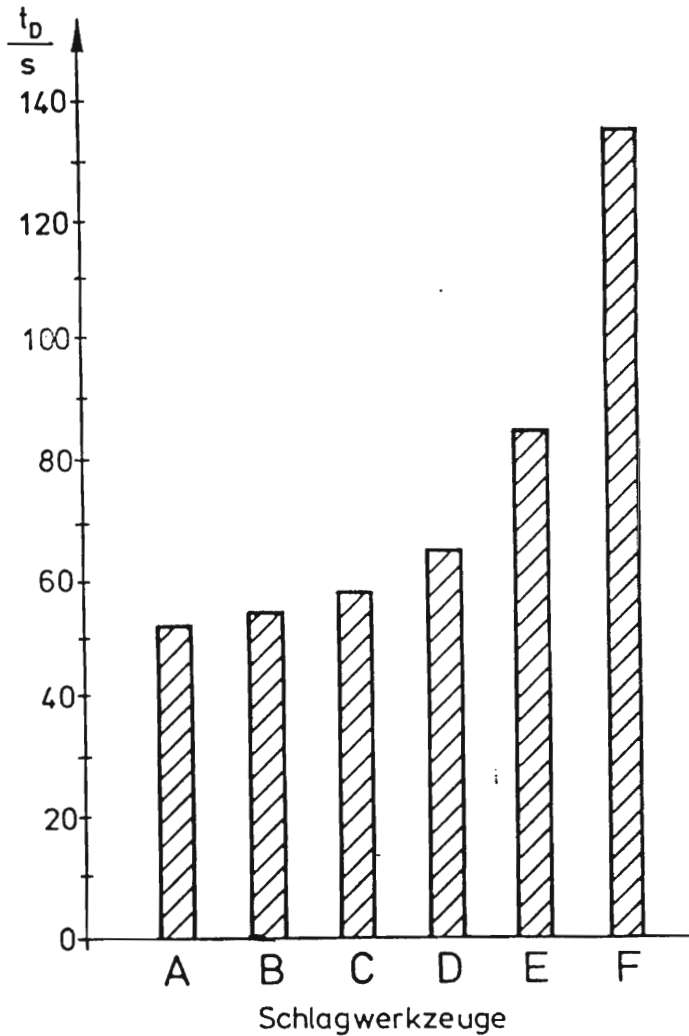


Abb. 34/11: Schlagdauer t_D beim Schlagen von Sahne ($V_A = 150 \text{ ml}$) mit unterschiedlichen Werkzeugen nach Abb. 34/10; Hand-Küchenmaschine ($n_K = 1000 \frac{1}{\text{min}}$) mit Spezialdrehtisch ($n_D = 29 \frac{1}{\text{min}}$)

Die Antriebsschäfte der Werkzeuge, die in Originalausführung für unterschiedliche Küchenmaschinen vorgesehen sind, wurden so vereinheitlicht, daß sie in die Antriebskupplungen einer einzigen Maschine passen. Die Werkzeuge werden jeweils paarweise mit gegenläufigem Drehsinn in einem zylindrischen Metallgefäß ($D = 100 \text{ mm}$) betrieben, welches im Spannfutter des Spezialtisches befestigt ist. (vgl. Abb. 32/7).

Die Ergebnisse zeigen deutlich, daß die Schlagdauer der Werkzeuge A, B und C von ähnlicher Größe ist, wobei sich beim Werkzeug C allerdings schon der nach oben verjüngende Durchmesser bemerkbar macht.

Die flachen Metallbänder des Werkzeuges E sind zur Schaumbildung gemäß der entworfenen Hypothese weniger gut geeignet, da sie bei großer Werkzeugdrehfrequenz und bei kleiner Drehfrequenz des Schlaggefäßes die Flüssigkeit eher "schonend" durchkämmen und demnach eine geringe Schlagmechanik besitzen.

Das Werkzeug F besitzt nur halb so viele Stäbe wie das Werkzeug E; demzufolge muß seine geringere "Schlagzahl" mit einer entsprechend längeren Schlagdauer ausgeglichen werden. Dennoch sind die Arbeitsergebnisse der Werkzeuge E und F nicht gleich (Abb. 34/12).

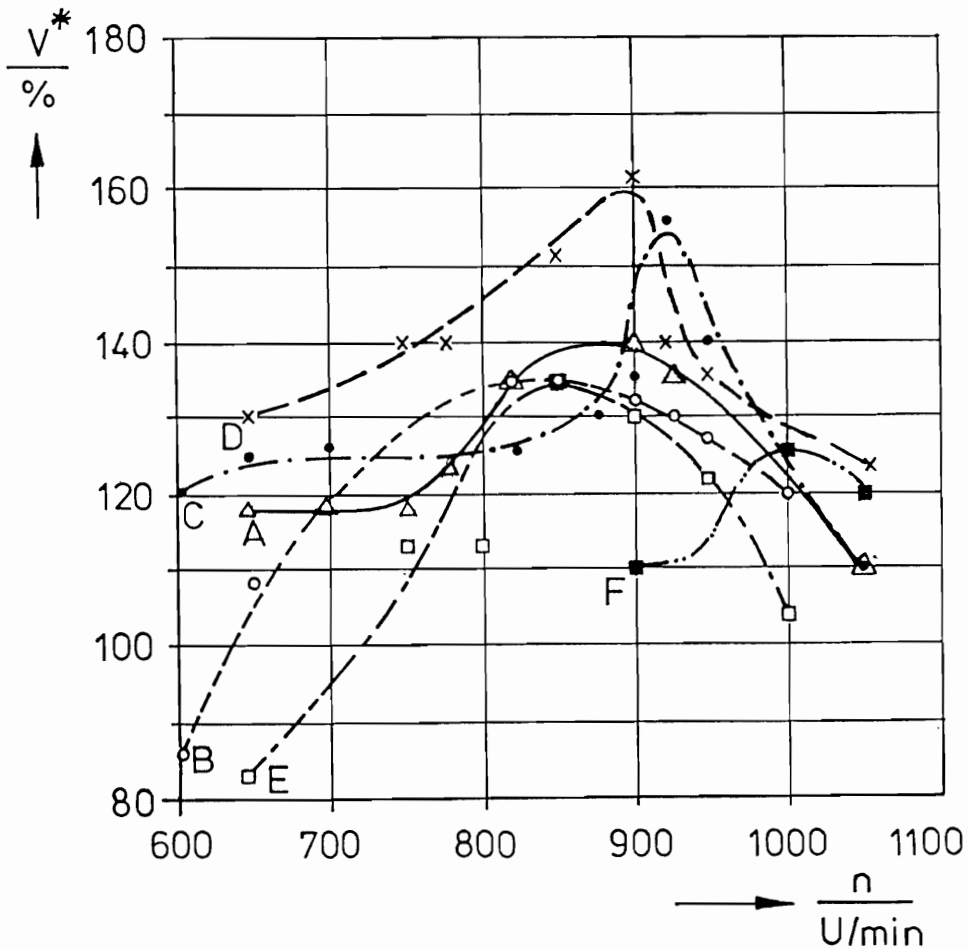


Abb. 34/12: Volumenzunahme V^* in Abhängigkeit der Drehfrequenz n beim Schlagen von Sahne ($V_A = 150$ ml) mit den Werkzeugen Nr. A bis F nach Abb. 34/10 (rotierendes, zylindrisches Schlaggefäß; $D = 100$ mm; $n_D = 29 \frac{1}{\text{min}}$)

Selbst bei großer Drehfrequenz ist die Volumenzunahme des Werkzeuges F deutlich geringer als die des Werkzeuges E, welches darüberhinaus in einem größeren Drehfrequenzbereich einsetzbar wäre.

Die Kurven für die Volumenzunahme V^* der Werkzeuge D und C besitzen in der unmittelbaren Nachbarschaft ihrer Maxima steile Flanken und sind hinsichtlich des Parameters Drehfrequenz als empfindlich einzustufen. Eine für die Praxis brauchbare Charakteristik ("flaches Volumenmaximum") besitzt das Werkzeug B, welches viele dünne Stäbe aufweist, wie es gemäß der Schaumschlag-Hypothese grundsätzlich günstig sein müßte.

Die Absolutwerte für die Volumenzunahme sind auch bei optimaler Drehfrequenz nicht sehr groß, da die Form des metallischen Schlaggefäßes wegen der übrigen Werkzeuge zylindrisch ist.

Eine Anpassung des Schlaggefäßes an die Werkzeuge - oder umgekehrt - ist jedoch für einen optimalen Verfahrensablauf notwendig. Im folgenden Kapitel soll daher vorrangig der Einfluß der Gefäßform untersucht werden.

3.4.2.5 FORM DES SCHLAGGEFÄSSES

Bei der Hypothese des Schaumschlagens wurde vereinfachend abgeleitet, daß besonders die Kinematik des Schlagwerkzeuges an der Flüssigkeitsoberfläche das Einschlagen von Luft beeinflußt. Selbstverständlich ist aber auch die Mechanik innerhalb der Wirkräume und die Zuordnung der primären, sekundären und tertiären Wirkräume entscheidend für den Verfahrensablauf (Wirkräume, vgl. Kap. 2.3.3).

Aufgrund der während des Schlagprozesses steigenden Viskosität des Schaumes ist ein möglichst kleiner tertiärer Wirkraum anzustreben. Bei Experimenten hat es sich erwiesen, daß sich zylindrische Werkzeuge gut für zylindrische Schlaggefäße eignen (z.B. Molkerei-Sahneschlaggerät) und ballige Werkzeuge in konischen oder halbkugelförmigen Gefäßen günstig sind (59) (Abb. 34/13). Nur so ist eine gute Anpassung gewährleistet, d.h. die tertiären Wirkräume sind klein und bei ausreichender Transportbewegung entstehen keine Toträume, in denen sich unbenutzte Lebensmittelreste ablagern können.

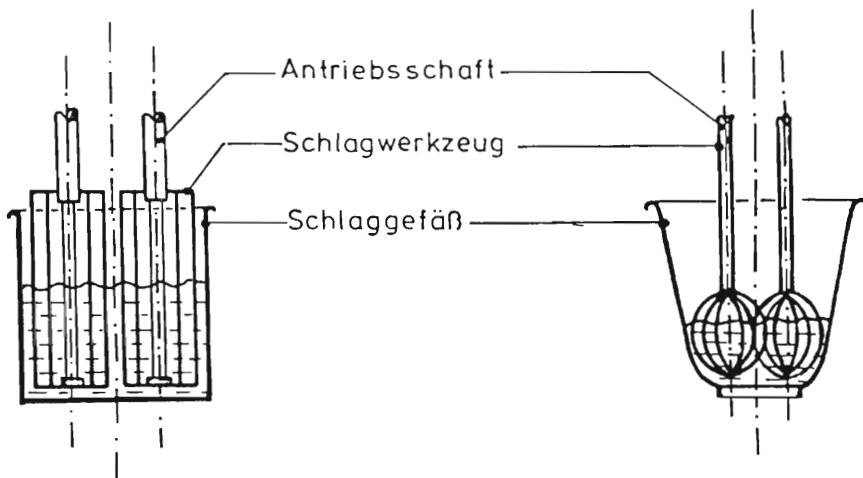


Abb. 34/13: Zur Anpassung der Schlagwerkzeuge an Schlaggefäße (Teilausschnitte).
Links: Molkerei-Sahneschlaggerät (gut angepaßt);
rechts: Hand-Küchenmaschine (noch unzureichend angepaßt)

Die bei der allgemeinen Funktionsprüfung von Küchenmaschinen nach DIN 44960 T.2 (29) vorgesehene Verwendung eines einheitlichen Schlaggefäßes kann aus den genannten Gründen zu falschen Ergebnissen führen, da in diesem Gefäß nicht angepaßte Werkzeuge aufgrund der möglichen Toträume eindeutig benachteiligt werden.

In der Haushaltspraxis sind vielfach halbkugelförmige Gefäße bzw. Wirkräume mit entsprechend angepaßten Werkzeugen in Verwendung. Damit ist eine möglichst große Bandbreite hinsichtlich des Parameters Füllmenge gewährleistet (Abb. 34/14).

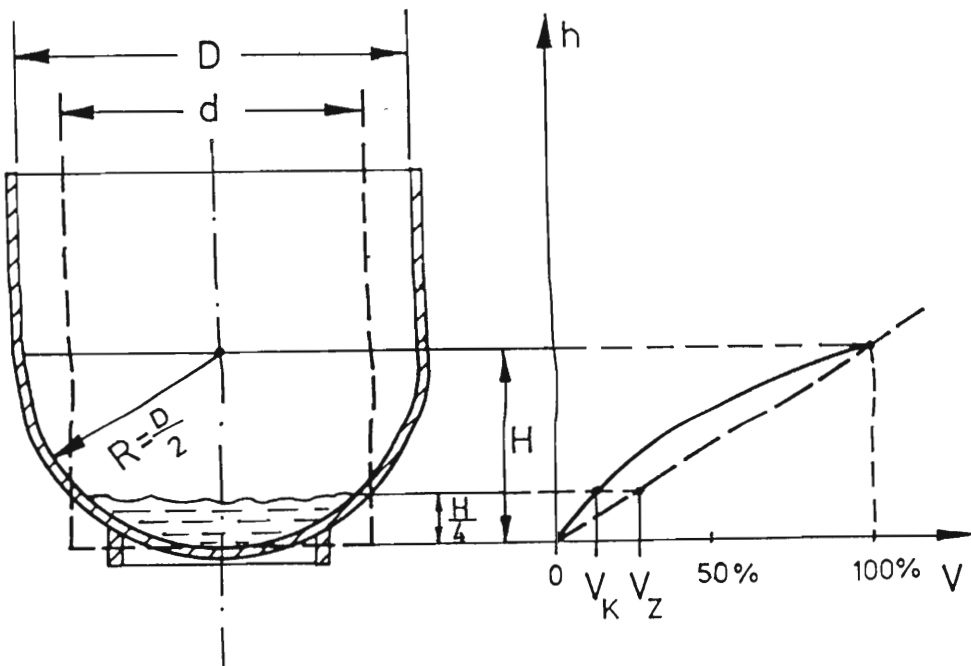


Abb. 34/14: Zusammenhang zwischen Füllhöhe h und Füllvolumen V bei einem idealisierten Schlaggefäß mit halbkugelförmigem Boden (—) und einem Gefäß mit ebenem Boden (-----) bei gleichgroßem Nenn-Füllvolumen $V_{\max} = 100\%$ und der gemeinsamen Nenn-Füllhöhe H

Bei einem Gefäß mit halbkugelförmigem Boden ist der Zusammenhang zwischen Füllhöhe h und Füllvolumen

$$V = \pi h^2 \left(\frac{D}{2} - \frac{h}{3} \right) . \quad (34.4)$$

Fordert man für einen wirksamen Verfahrensablauf beispielsweise die Mindesteintauchtiefe $h = \frac{H}{4}$, so genügt das Füllvolumen $V_K = \frac{11}{128} \cdot V_{\max}$, d.h. die Mindestfüllmenge beträgt nur 8,6% der maximalen Füllmenge.

Bei zylindrischen Gefäßen mit ebenem Boden wäre hingegen wegen des linearen Zusammenhanges zwischen Füllhöhe und Füllvolumen im gewählten Beispiel ein Mindestfüllvolumen $V_Z = 25\%$ zu fordern, was die Bandbreite der zulässigen Füllmengen entsprechend verringern würde.

Ähnliche Zusammenhänge wie bei dem beschriebenen kugelig geformten Gefäßboden ergeben sich bei Gefäßen mit Innenkegel oder -höcker. Bei kugelförmiger Werkzeug-Außenform und konvexer oder weitgehend ebener Gefäßbodenmitte ergäbe sich ein tertiärer Wirkraum, der bei zunehmender Viskosität des Schaumes als Totraum anzusehen wäre. Mit einem entsprechend geformten Bodenkegel läßt sich dieser Totraum vermeiden (Abb. 34/15).

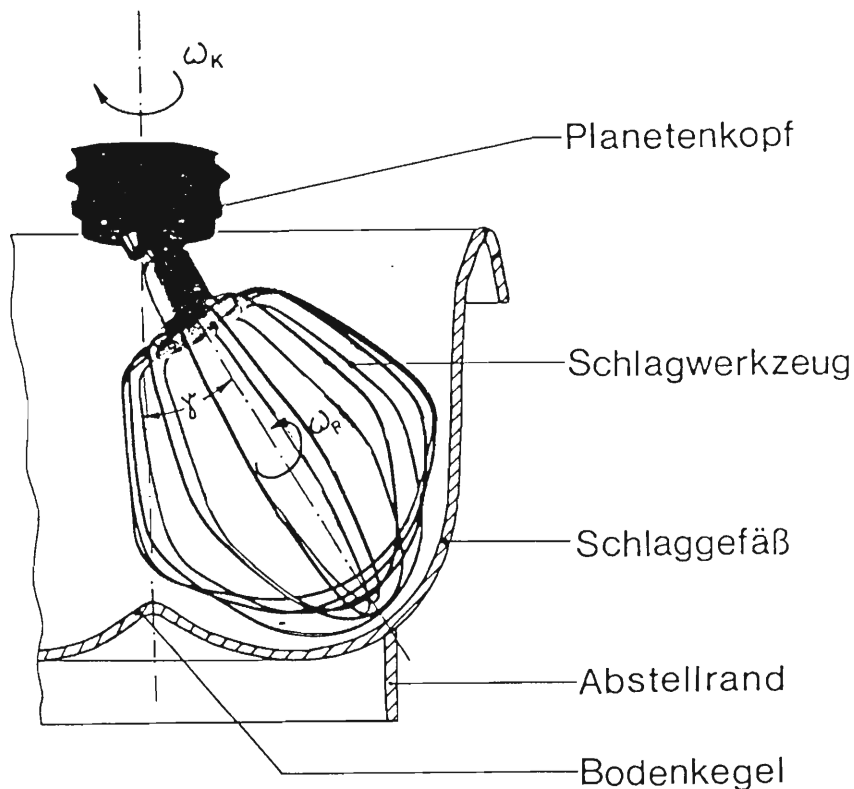


Abb. 34/15: Gut angepaßtes Schlagwerkzeug mit Schlaggefäß einer Klein-Küchenmaschine mit Planetenantrieb

Mit einer modernen Klein-Küchenmaschine, deren Schlaggefäß nach diesen Gesichtspunkten konzipiert ist, können daher sehr unterschiedliche Lebensmittelmengen mit guten Ergebnissen bearbeitet werden. Bei Sahne z.B. kann das Anfangsvolumen V_A von 100 ml bis 500 ml und bei Eiklar kann $V_A = 30$ ml bis 120 ml betragen.

Der Forderung, daß möglichst das gesamte Lebensmittelvolumen im Schlaggefäß von den Werkzeugen gleichmäßig erfaßt wird, könnte grundsätzlich auch mit einem sehr großen Werkzeug, welches das gesamte Gefäß ausfüllt, nachgekommen werden. Allerdings würden sich hier die Lebensmittelteile weitgehend gemeinsam mit dem Werkzeug mitdrehen, so daß die erforderliche Relativbewegung zwischen Werkzeug und Lebensmittel unzureichend wäre. Ein übliches Prinzip ist es, neben der Eigendrehung der Werkzeuge eine Zusatzbewegung des Gefäßes oder eine Zusatzdrehung der Werkzeugaufnahmen (z.B. mittels Planetengetriebe) vorzusehen.

Soll gemäß der Schaumschlag-Hypothese die Relativgeschwindigkeit v des Werkzeugstabes gegenüber der Flüssigkeit innerhalb vorgegebener Grenzen v_{\min} und v_{\max} (Gl. 34.2) bleiben, so ist die Kinematik der Werkzeuge entsprechend auszulegen.

3.4.3 UNTERSUCHUNG DER WERKZEUGKINEMATIK

Die hohen Kosten für experimentelle Untersuchungen bei Optimierungsaufgaben sowie die Vielzahl der dabei zu berücksichtigenden Parameter erfordern es, zumindest die Voruntersuchungen weitgehend analytisch durchzuführen. Bei der Beurteilung der Werkzeugkinematik, die für den Verfahrensablauf beim SCHAUMSCHLAGEN besonders wichtig ist, bietet sich zunächst eine analytische Berechnungsmethode an.

3.4.3.1 ANALYTISCHE METHODE

Bei modernen Küchenmaschinen wird neben der Werkzeug-Eigendrehung eine Zusatzbewegung vielfach durch die Rotation eines Planetenkopfes erzeugt. Der Kopf wird über eine vertikale Welle vom Grundgerät der Küchenmaschine mit der Winkelgeschwindigkeit ω_K angetrieben (Abb. 23/18). Somit rollt das Ritzel (Zähnezahl Z_R) des Werkzeuges auf dem feststehenden Zahnrad (Zähnezahl Z_Z) des Schüsselinnenkegels ab (Abb. 34/16).

Um die Werkzeug-Lagerachse des Planetenkopfes (drehendes Bezugssystem) rotiert das Ritzel mit der Winkelgeschwindigkeit ω_R . Entsprechend dem Verhältnis der Zähnezahlen Z_Z/Z_R ergibt sich

$$\omega_R = \omega_K \frac{Z_Z}{Z_R} . \quad (34.5)$$

Da beim SCHAUMSCHLAGEN u.a. die Relativgeschwindigkeiten zwischen Werkzeug und Lebensmittel wichtig sind, wählt man zur Beschreibung der Kinematik vorzugsweise ein schüsselfestes, hier also ein raumfestes Bezugssystem (x, y, z) , und drückt darin die Winkelgeschwindigkeiten und die Geometrie der Werkzeuge aus.

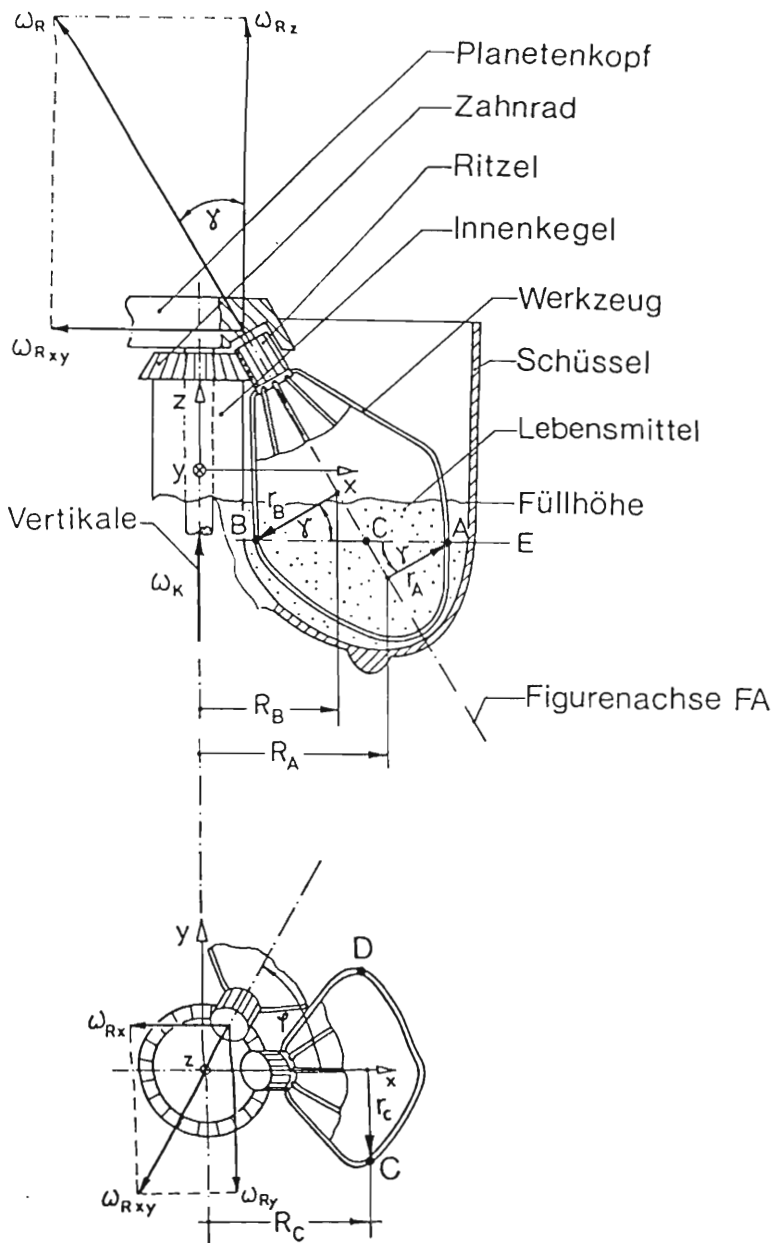


Abb.34/16: Werkzeug und Planetenkopf sowie Schüssel mit Innenkegel einer Stand-Küchenmaschine klassischer Bauart

Für eine vertikale Figurenachse FA des Werkzeuges wären die Vektoren $\vec{\omega}_K$ und $\vec{\omega}_R$ parallel, d.h. der Neigungswinkel $\gamma = 0$, und es ergäbe sich der Vektor für die absolute Winkelgeschwindigkeit

$$\vec{\omega}_W = \begin{bmatrix} \omega_{Wx} \\ \omega_{Wy} \\ \omega_{Wz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \omega_R + \omega_K \end{bmatrix} . \quad (34.6)$$

Dabei drückt der Summand ω_K aus, daß das Werkzeug bereits ohne Zahnradabrollbewegung im raumfesten Bezugssystem gemeinsam mit dem Planetenkopf (z.B. starr) rotiert.

Da im Beispiel die Werkzeugachse um den Winkel γ gegenüber der Vertikalen geneigt ist und sich gleichzeitig in der x, y-Ebene des raumfesten Bezugssystems mit dem Winkel

$$\varphi = \omega_K t \quad (34.7)$$

bewegt, ergibt sich die Winkelgeschwindigkeit

$$\vec{\omega}_W = \begin{bmatrix} -\omega_R \sin\gamma \cos\varphi \\ -\omega_R \sin\gamma \sin\varphi \\ +\omega_R \cos\gamma + \omega_K \end{bmatrix} . \quad (34.8)$$

Die Geschwindigkeit \vec{v}_A eines Werkzeugstabes, z.B. Punkt A in der Horizontalebene E, ergibt sich gegenüber dem Lebensmittel als Überlagerung der Kopfgeschwindigkeit \vec{v}_K (Translation) und der Werkzeugzusatzgeschwindigkeit \vec{v}_A um K (Rotation) als

$$\vec{v}_A = \vec{v}_K + \vec{v}_A \text{ um K} . \quad (34.9)$$

Die Kopfgeschwindigkeit

$$\vec{v}_K = \vec{\omega}_K \times \vec{R}_A \quad (34.10)$$

ist dabei nach den Regeln der Vektorrechnung ein Vektorprodukt aus Winkelgeschwindigkeit $\vec{\omega}_K$ des Kopfes und Radiusvektor \vec{R}_A der Figurenachse des Werkzeuges, um den der Punkt A zusätzlich rotiert.

Betrachtet man die Geschwindigkeiten für den Moment, in dem die Figurenachse FA und der Punkt A gerade in der x, z-Ebene liegen ($\varphi = 0$), so ist der Radiusvektor

$$\vec{R}_A = \begin{bmatrix} R_A \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} . \quad (34.11)$$

Mit der Kopf-Winkelgeschwindigkeit

$$\vec{\omega}_K = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \omega_K \end{bmatrix} \quad (34.12)$$

ergibt sich aus Gleichung 34.10 die Kopfgeschwindigkeit

$$\vec{v}_K = \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_K R_A \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (34.13)$$

Mit gleicher Rechenoperation ergibt sich für die Werkzeug-zusatzgeschwindigkeit

$$\vec{v}_{A \text{ um } K} = \vec{\omega}_W \times \vec{r}_A. \quad (34.14)$$

Setzt man ω_W gemäß Gleichung 34.8 ein, so errechnet sich für die Momentanstellung $\varphi = 0$ ($\sin \varphi = 0$; $\cos \varphi = 1$) mit dem Radiusvektor

$$\vec{r}_A = \begin{bmatrix} r_A \cos \gamma \\ 0 \\ r_A \sin \gamma \end{bmatrix} \quad (34.15)$$

die Zusatzgeschwindigkeit

$$\vec{v}_{A \text{ um } K} = \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_K \left[\frac{z_Z}{z_R} + \cos \gamma \right] r_A \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (34.16)$$

Das Ergebnis Gl. 34.9 mit 34.13 und 34.16 zeigt, daß der Punkt A des Werkzeuges in der Momentanstellung ($\varphi = 0$) sich lediglich in y-Richtung mit der Geschwindigkeit

$$v_{Ay} = \omega_K \left[R_A + \left(\cos \gamma + \frac{z_Z}{z_R} \right) r_A \right] \quad (34.17)$$

bewegt.

Analog läßt sich dies für den Punkt B des Werkzeuges berechnen, wobei sich die Geschwindigkeit

$$v_{By} = \omega_K \left[R_B - \left(\cos \gamma + \frac{z_Z}{z_R} \right) r_B \right] \quad (34.18)$$

ergibt. Diese y -Komponente kann auch negativ sein, d.h. bei großem Zahnradübersetzungsverhältnis Z_Z/Z_R weist ihr Geschwindigkeitsvektor in die negative y -Richtung (Abb. 34.16) aus der Zeichenebene heraus oder im Sonderfall ist die Geschwindigkeit Null.

Im untersuchten Beispiel ist die Geschwindigkeit v_B deutlich kleiner als v_A (auch betragsmäßig), oder der Werkzeugpunkt B kommt im Bereich des Schüssel-Innenkegels nahezu oder ganz zum Stillstand.

Mit gleicher Rechenoperation lassen sich auch für andere Werkzeugpunkte oder für andere Lebensmittel-Bezugsebenen die Geschwindigkeiten errechnen. Beispielsweise würde sich für den Werkzeugpunkt C (Abb. 34.16) eine Geschwindigkeit \vec{v}_C ergeben, die hinsichtlich ihres Betrages zwischen $|v_A|$ und $|v_B|$ läge, d.h.

$$|v_B| < |v_C| < |v_A| \quad . \quad (34.19)$$

Ihre Richtung wird hauptsächlich durch eine große x -Komponente bestimmt, welche innerhalb der Schüssel von innen nach außen gerichtet ist. Umgekehrt würde die Geschwindigkeit des Punktes D von außen nach innen gerichtet sein. Wegen der Schrägstellung der Werkzeug-Figurenachse (Winkel γ) ergeben sich zusätzlich noch Auf- und Abwärtsbewegungen. Alle diese Transportbewegungen sorgen für eine wünschenswerte MISCHUNG des Lebensmittels im gesamten Wirkraum.

Stellt sich beim Optimieren von Schlag- und Rührwerkzeugen die Forderung nach möglichst gleich großen Geschwindigkeiten, so gibt es mehrere Möglichkeiten, diesem Ziel näher zu kommen. Eine davon ist, den Drehsinn der Werkzeug-Eigenrotation entgegen des Drehsinns des Kopfantriebes zu wählen. Mit einem Zusatzzahnrad zwischen Schüssel-Zahnrad und Werk-

zeugritzel gelingt dies; die Geschwindigkeiten analog Gl. 34.17 und 34.18 betragen dann

$$v_{AY} = \omega_K \left[R_A + \left(\cos \gamma - \frac{z_Z}{z_R} \right) r_A \right] \quad (34.20)$$

$$v_{BY} = \omega_K \left[R_B - \left(\cos \gamma - \frac{z_Z}{z_R} \right) r_B \right] . \quad (34.21)$$

Da in vorliegendem Beispiel gilt: $R_A > R_B$ und $\frac{z_Z}{z_R} \gg \cos \gamma$, kann erreicht werden, daß $|v_A| \approx |v_B|$ wird.

Diese Berechnungsmethode läßt sich auch auf andere Systeme mit Schlag-, Rühr- und Knetwerkzeugen übertragen, z.B. solche, die keinen Schüsselinnenkegel besitzen wie die Klein-Küchenmaschine (Abb. 35.19) und solche mit rotierender Schüssel (Abb. 23/11).

Bei der letztgenannten Anordnung empfiehlt sich zur mathematischen Beschreibung der Kinematik ein gemeinsam mit der Schüssel drehendes Bezugssystem. Rotiert das Werkzeug um eine raumfeste Lagerachse mit der Winkelgeschwindigkeit $\vec{\omega}_R$ und die Schüssel mit der Winkelgeschwindigkeit $\vec{\omega}_S$, so besitzt im rotierenden Bezugssystem das Werkzeug die Winkelgeschwindigkeit

$$\vec{\omega}_W = \vec{\omega}_R - \vec{\omega}_S \quad (34.22)$$

oder in Komponenten

$$\vec{\omega}_W = \begin{bmatrix} -\omega_R & \sin \gamma \cos \varphi \\ -\omega_R & \sin \gamma \sin \varphi \\ +\omega_R & \cos \gamma - \omega_S \end{bmatrix} . \quad (34.23)$$

Dabei gilt jedoch anstelle von Gleichung (34.7) nunmehr

$$\varphi = -\omega_S \cdot t . \quad (34.24)$$

Das negative Vorzeichen würde ein mit dem Bezugssystem rotierender Beobachter bestätigen, da aus seiner Sicht der Planetenkopf entgegengesetzt dreht bzw. räumlich zurückbleibt.

Für positive Winkelgeschwindigkeiten ω_R und ω_S ist nach bisheriger Terminologie eine gegensinnige Bewegung vorhanden.

Im Sonderfall $\vec{\omega}_R = \vec{\omega}_S$ führt das Werkzeug lediglich eine Translationsbewegung aus.

Eine solche liegt auch vor, wenn eine Bedienperson beispielsweise eine Hand-Küchenmaschine (mit ausgeschaltetem Werkzeugantrieb) auf einer Kreisbahn in einem Schlaggefäß bewegt.

Während hinsichtlich der Bahnkurven und Geschwindigkeiten zunächst keine prinzipiellen Unterschiede zwischen Planetengetrieben und rotierenden Schüsseln erkannt werden, treten Differenzen bezüglich der Beschleunigungen auf. Bei rotierenden Schüsseln wirken auf mitbewegte Lebensmittelteilchen Fliehkräfte, welche die Durchmischung und damit auch das Verfahren Schaumschlagen erheblich beeinflussen können.

Die beschriebene analytische Methode zur Untersuchung der Kinematik hat den Vorteil, daß sie ohne konstruktiven, fertigungstechnischen oder experimentellen Aufwand möglich ist. Bei ausgeführten Systemen ist eine Beurteilung der Kinematik, auch über eine experimentelle Bestimmung der Bahnkurven von Werkzeugen nach der "Bahnkurvenmethode" möglich. Eine ähnliche Methode wurde auch zur Ermittlung von Bahnkurven bei Bumerang und Kreisel angewandt (78).

3.4.3.2 BAHNKURVENMETHODE

Bei der Bahnkurvenmethode wird eine möglichst punktförmige Lichtquelle an der zu untersuchenden Stelle des Werkzeuges befestigt und die Maschine mit niedriger Drehfrequenz betrieben. Bei derartigen Untersuchungen haben sich im Labor batteriegespeiste Lichtquellen und Elektronikschaltung bewährt (Abb. 34/17).

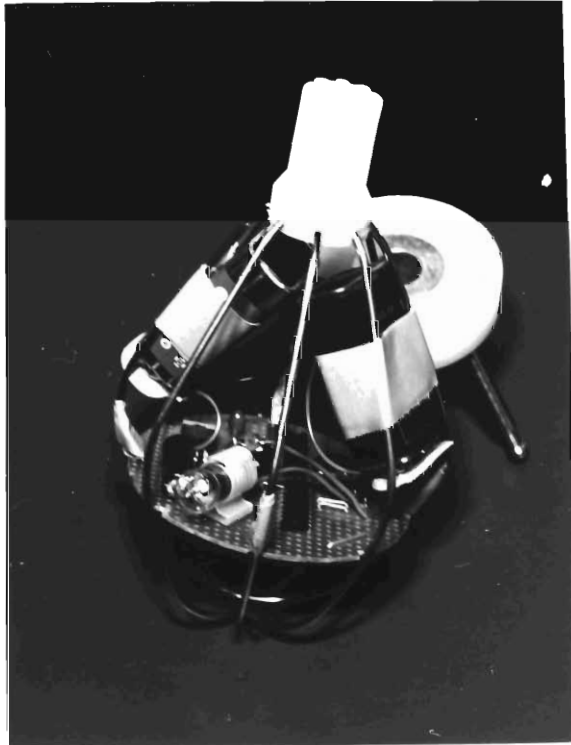


Abb.34/17: Batteriegespeiste Elektronikschaltung mit Lichtquelle im Schlagwerkzeug einer Küchenmaschine zur Ermittlung von Bahnkurven

In einem abgedunkelten Versuchsraum kann mittels feststehendem Fotoapparat und ständig geöffnetem Blendenverschluß die Bahn der bewegten Lichtquelle aufgezeichnet werden (Abb. 34/18 und Abb. 34/19).

Die feste Verankerung für den Fotoapparat ist bei feststehenden Schlaggefäßen notwendig. Bei rotierenden Schlaggefäßen

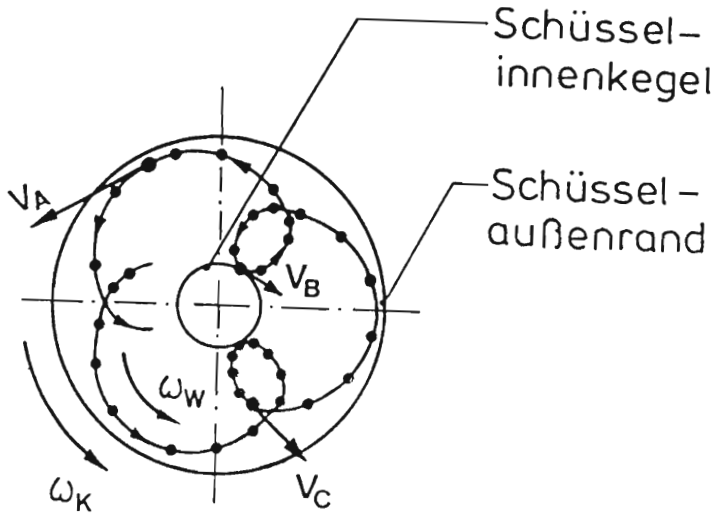


Abb.34/18: Bahnkurve des Schlagwerkzeuges einer Stand-Küchenmaschine mit "gleichsinnig" rotierendem Planetengetriebe (v_A , v_B , v_C sind die Geschwindigkeiten der Werkzeugpunkte A, B, C nach Abb.34/16)

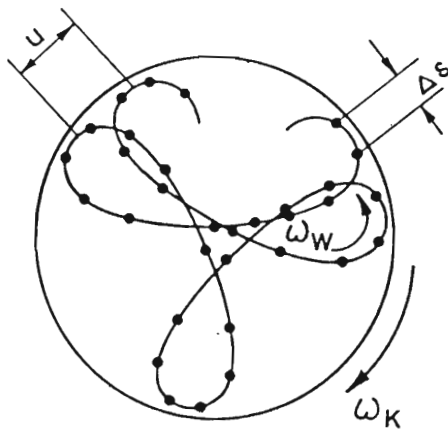


Abb.34/19: Bahnkurve der Werkzeuge einer Klein-Küchenmaschine mit "gegenseitig" rotierendem Planetengetriebe (ω_W = Werkzeug- und ω_K = Kopf-Winkelgeschwindigkeit, Δs = Werkzeugweg zwischen 2 Blitzpunkten, u = Versatz nach einer Kopfumdrehung)

wäre es notwendig, den Fotoapparat synchron mit den Gefäßen zu drehen, um so ein zwar räumlich drehendes aber schüssel-festes Bezugssystem zu erhalten.

Erfolgt der Antrieb mit konstanter Prüf-Drehfrequenz ω_P und blitzt die Lichtquelle mit konstanter, entsprechend hoher Frequenz f , so entsteht eine Bahnkurve mit Zeitmar-
kierungen.

Bei vertikaler Drehachse (z-Achse) des Planetenkopfes und ebenfalls vertikaler Objektivachse der Kamera werden dabei die räumlichen Bahnkurven in die Horizontalebene (x, y-Ebene nach Abb. 34/16) projiziert.

Die tatsächliche Strecke zwischen zwei Lichtpunkten auf der Bahnkurve - gegebenenfalls Photomaßstab und Neigungswinkel der Bahn einrechnen - ist dann der Weg Δs , der während der Zeit

$$\Delta t = \frac{1}{f} \quad (34.25)$$

zurückgelegt wurde. Daraus läßt sich die Prüf-Momentan-
geschwindigkeit

$$v_P = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (34.26)$$

für diese Stelle der Bahnkurve ermitteln. Die tatsächliche Momentangeschwindigkeit bei der Betriebs-Drehfrequenz ω_K errechnet sich

$$v = v_P \cdot \frac{\omega_K}{\omega_P} \quad (34.27)$$

Liegen die Lichtpunkte eng beisammen, so ist die Momentan-
geschwindigkeit v klein, besitzen sie große Entfernung, so
ist v groß.

Der Vergleich einer Bahnkurve des "gleichsinnig" rotierenden Planetengetriebes mit der des "gegensinnig" rotierenden zeigt charakteristische Unterschiede (Abb. 34/18) und (Abb. 34/19). Die erstgenannte Bahnkurve bestätigt den analytisch unter-
suchten Fall. Da sich die gleichsinnigen Drehungen des Pla-
netenkopfes und des Werkzeuges in ungünstiger Weise addieren,

ist die Geschwindigkeit v_A des Werkzeuges gegenüber dem Schüsselaußenrand deutlich größer als die Geschwindigkeit v_B am Schüsselinnenrand (Gl. 34.17 und Gl. 34.18). Möglicherweise erfüllen v_A und/oder v_B auch nicht die Bedingung $v_{\min} \leq v \leq v_{\max}$ gemäß Gleichung 34.2.

In der Bahnkurve äußert sich diese Tatsache in den großen Abständen der Zeitmarkierungen außen (v_A) und den kleinen Abständen innen (v_B). Die Geschwindigkeiten anderer Werkzeugpunkte (z.B. v_C) liegen betragsmäßig zwischen $|v_A|$ und $|v_B|$.

Bei einem "gegensinnig" rotierenden System läßt sich die Forderung nach möglichst ähnlich großen Geschwindigkeiten im gesamten Wirkbereich gemäß der vorgestellten Hypothese der Schaumerzeugung besser erfüllen. Dies beweisen sowohl die Gleichungen (Gl. 34.20 und Gl. 34.21) als auch die Bahnkurve, bei der die Zeitmarkierungen etwa gleiche Abstände zumindest auf längeren Bahnabschnitten besitzen (Abb. 34/19).

Die Bahnkurve zeigt auch, daß nach drei Umdrehungen des Werkzeugkorbes der Planetenkopf sich etwa einmal gedreht hat. Da sich aber Anfang und Ende der Bahnkurven nicht treffen, sondern um das Maß u versetzt sind, entspricht im vorgestellten Beispiel dieses Verhältnis ω_W zu ω_K nicht exakt der Zahl 3. Das bedeutet, daß ein Werkzeugstab zwar eine ähnliche, jedoch anders gelagerte Bahn beschreibt und sich deshalb nacheinander jeder Stelle der Gefäßwand nähern kann.

Eine solche Kinematik ist notwendig, wenn bei fester werdendem Schaum das gesamte Lebensmittelvolumen vollständig bearbeitet werden soll.

Beim Entwurf von Küchenmaschinen ist die analytische Methode qualitativ und quantitativ anwendbar. Sobald erste Versuchsmodelle vorliegen, kann flankierend auch die Bahnkurvenmethode genutzt werden. Bei der Optimierung von Küchenmaschinen können beide Methoden zumindest qualitative Entscheidungshilfen für die Optimierungsstrategie bieten.

3.5 OPTIMIERUNG VON KÜCHENMASCHINEN MIT PLANETENGETRIEBEN

Bei einfachen Hand-Küchenmaschinen rotieren die Werkzeuge lediglich um ihre Figurenachse und werden von einem Elektromotor angetrieben. Hinreichend große, sekundäre Wirkräume entstehen nur, wenn das Gerät von Hand zusätzlich im Schlaggefäß entsprechend umherbewegt wird (vgl. Wirkräume, Kap.2.3.3).

Technisch aufwendiger sind Küchenmaschinen, bei denen diese Zusatzbewegung durch rotierende Gefäße erzeugt wird. Die so entstehenden Wirkräume und Kinematiken (nicht die Kräfte und Momente im Lebensmittel) sind vergleichbar mit denen von Küchenmaschinen, bei denen die Gefäße feststehen, jedoch die Werkzeuge durch Planetengetriebe die erforderliche Zusatzbewegung erhalten.

Von diesen, bei modernen Haushalts-Küchenmaschinen meist üblichen Planetengetrieben, sollen nachfolgend drei unterschiedliche Prinzipien behandelt werden.

3.5.1 KONSTRUKTIONSBEISPIELE VON PLANETENGETRIEBEN

Weit verbreitet ist ein Prinzip, bei dem im Schlaggefäß eine vertikale Welle, die durch einen Hohlkegel geführt ist, den Planetenkopf von unten her antreibt (Abb. 35/1).

Wählt man für den Planetenkopf anstelle eines Antriebes von unten einen solchen von oben, so kann der oftmals störende Schüssel-Innenkegel entfallen (Abb. 35/2).

Beide Antriebsmöglichkeiten weisen prinzipiell dieselbe Kinematik auf. Rotiert z.B. der Kopfantrieb gegen den Uhrzeigersinn (von oben her gesehen), so rollt das Werkzeugritzeln in beiden Fällen auf dem feststehenden Zahnrad ab; die Eigenbewegung des Werkzeuges ist dann ebenfalls gegen den Uhrzeigersinn.

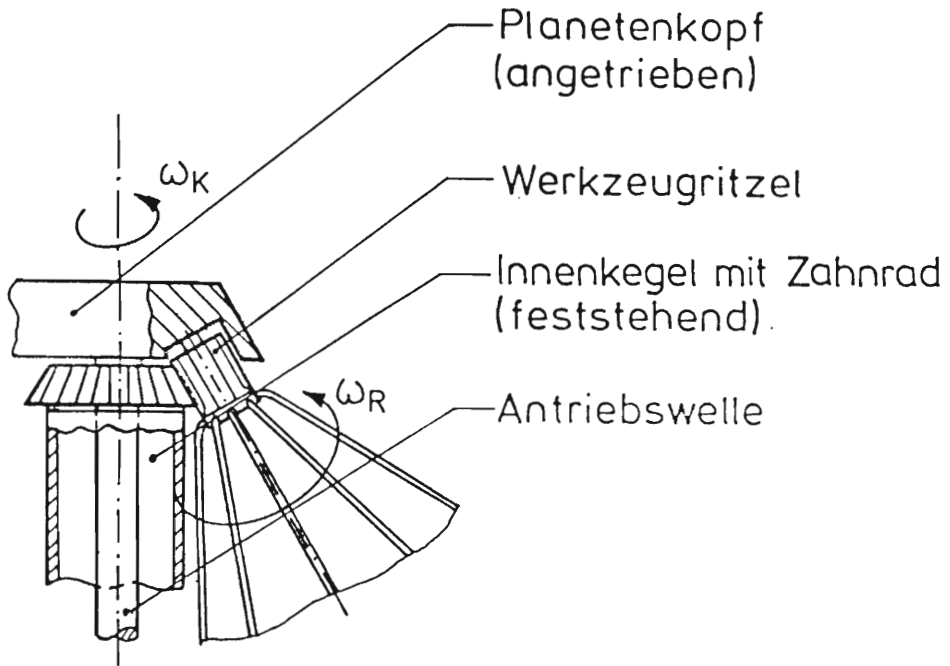


Abb.35/1: Planetenkopf mit Schlagwerkzeug;
Kopfantrieb mittels Welle von unten durch den
hohlen Schüsselkegel einer Stand-Küchenmaschine
(gleichsinnig rotierendes System)

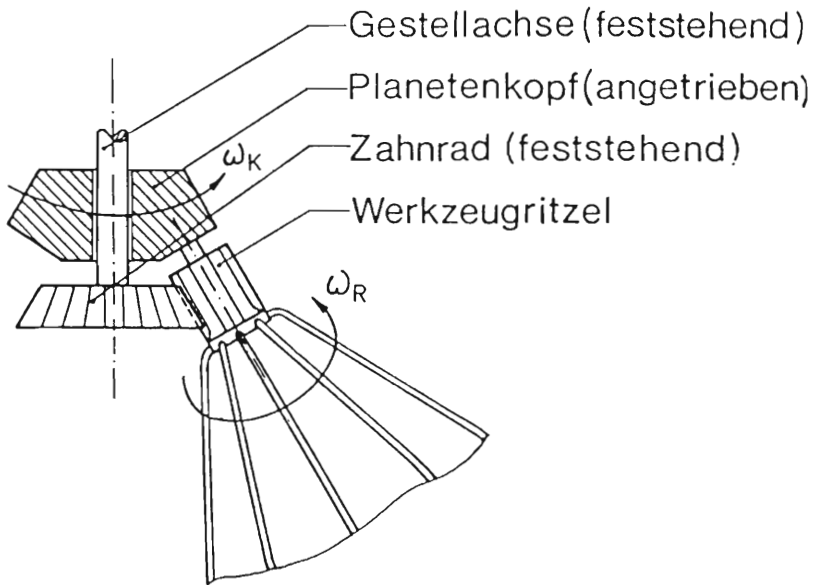


Abb.35/2: Planetenkopf mit Schlagwerkzeug;
Antrieb von oben (gleichsinnig rotierendes System)

Wie mit der analytischen und mit der Bahnkurven-Methode schon nachgewiesen wurde, besitzen die Werkzeugpunkte bei dieser gleichsinnigen Bewegung in der Nähe der Gefäßaußenwand große und in der Gefäßmitte vergleichsweise kleine Geschwindigkeiten.

Nach der vorgestellten Hypothese des Schaumschlagens wären derart große Geschwindigkeitsunterschiede von Nachteil, was sich mit einem gegensinnigen Antriebsprinzip vermeiden läßt. Dabei wird die Werkzeuglagerung beispielsweise von oben her angetrieben und das Werkzeugritzeln rollt auf einer feststehenden Innenverzahnung ab (Abb. 35/3). Zwangsläufig rotiert deshalb das Werkzeug selbst gegensinnig zum Lagerkopf.

Diese gegensinnige Kinematik ist im allgemeinen der gleichsinnigen vorzuziehen, da bei ersterer längs größerer Bahnabschnitte die Geschwindigkeit von ähnlicher Größenordnung sein kann.

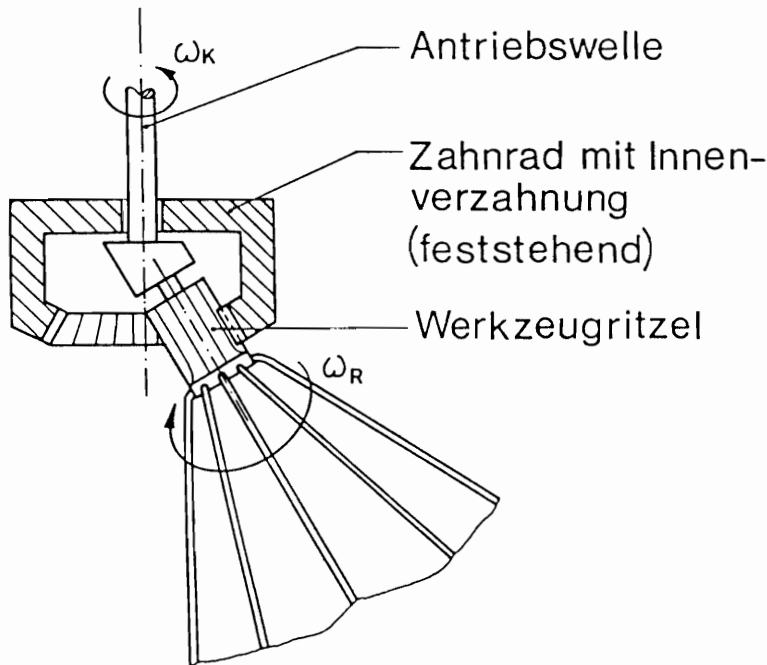


Abb.35/3: Planetenkopf mit Schlagwerkzeug;
Antrieb von oben (gegensinnig rotierendes System)

Bei der gleichsinnigen Kinematik ergeben sich, wie mathematisch nachgewiesen, für außenliegende Werkzeugpunkte bereits wegen des großen Abstandes von der Drehachse große Geschwindigkeitswerte. Zusätzlich addieren sich aber Kopfdrehung und Werkzeugeigendrehung mit gleichem Vorzeichen.

Liegt ein Antriebssystem hinsichtlich Antriebsprinzip, Geometrie und Zahnrad-Übersetzungsverhältnis fest, so können durch Variation der Drehfrequenz des Antriebsmotors zwar die Geschwindigkeiten, nicht aber deren Verhältnisse oder die Form der Bahnkurven beeinflusst werden. Zur Änderung der Bahnkurven, der Geschwindigkeitsverhältnisse bzw. der Kinematik müssen beispielsweise Zahnräder ausgetauscht werden. Für wissenschaftliche Untersuchungen im Labor wäre dies jedoch zu umständlich. Hier ist ein Antrieb mit zwei Motoren vorteilhaft.

3.5.2 ZWEIMOTORENANTRIEB

Bei einem Zweimotorenantrieb, der speziell für vorliegende Untersuchungen entwickelt wurde, treibt ein Motor den Planetenkopf an (Kopfantrieb: Winkelgeschwindigkeit ω_K). Ein zweiter Motor dreht das Zahnrad, welches früher gestellfest war (Fußantrieb: Winkelgeschwindigkeit ω_F), auf welchem das Werkzeugritzel abrollt (Abb. 35/4). Auf dem Lagerzapfen des Planetenkopfes, d.h. in einem mit diesem Kopf drehenden Bezugssystem rotiert das Ritzel mit der Winkelgeschwindigkeit

$$\omega_R = (\omega_K - \omega_F) \frac{z_Z}{z_R} . \quad (35.1)$$

Setzt man diese Größe in die bisherigen mathematischen Beziehungen ein (z.B. Gleichung 34.8), so lassen sich in gleicher Weise wie früher schon beschrieben, alle wichtigen Kenndaten berechnen.

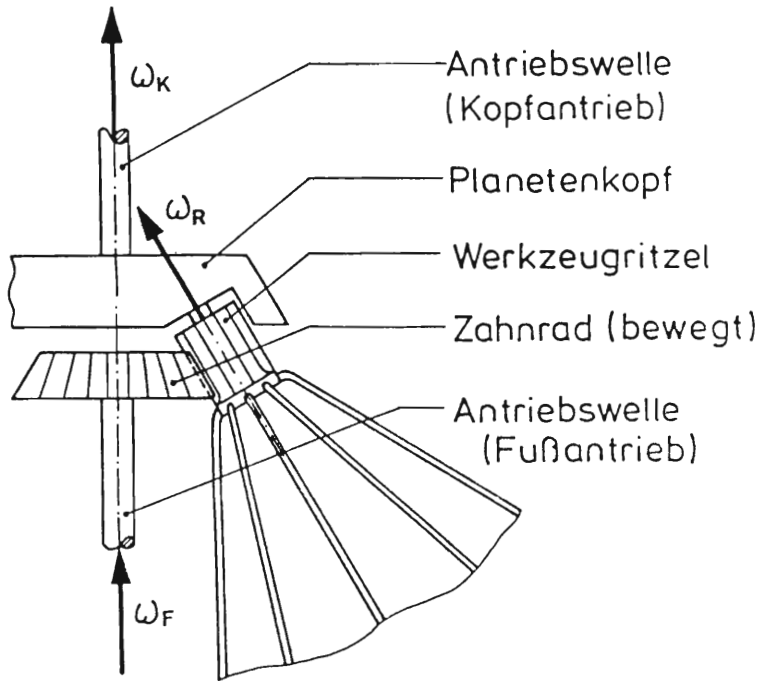


Abb.35/4: Planetenkopf mit getrennt steuerbaren Kopf- und Fußantrieben; Antrieb von oben und unten (wahlweise gleichsinnig oder gegensinnig rotierendes System)

Ohne Fußantrieb, d.h. mit gestellfestem Zahnrad galt (nach Gleichung (34.5)) für die Winkelgeschwindigkeit $\omega_R = \omega_K \frac{Z_Z}{Z_R}$.

Vergleicht man diese Winkelgeschwindigkeit mit der nach Gleichung (35.1), so zeigen sich die Möglichkeiten des Zweimotorenantriebes. Ist beispielsweise ω_F gegensinnig zu ω_K (ω_K positiv), so ist der Klammerausdruck (Gleichung 35.1) größer als ω_K allein; damit läßt sich ein größeres Zahnrad-Übersetzungsverhältnis Z'_Z/Z'_R simulieren.

Rotiert der Planetenkopf gleichsinnig zum Fußantrieb, so läßt sich hingegen ein kleineres Übersetzungsverhältnis Z'_Z/Z'_R simulieren.

Im Sonderfall $\omega_F = \omega_K$ rotiert das Werkzeug starr mit dem Planetenkopf.

Bei noch rascherer Drehung des Fußantriebes, d.h. $\omega_F > \omega_K$, wird der Klammerausdruck (Gleichung 35.1) sogar negativ, und die Werkzeugdrehung erfolgt bei gleicher konstruktiver Anordnung gegensinnig zur Kopfdrehung.

Die Bestätigung der beschriebenen Schaumschlag-Hypothese und der daraus abgeleitete Vorzug gegensinniger Antriebe konnte an unterschiedlichen Küchenmaschinen jeweils getrennt nachgewiesen werden. Ein exakter Beweis ist jedoch nur mit ein und derselben Küchenmaschine möglich.

Im Rahmen der Nachoptimierung einer klassischen Stand-Küchenmaschine, die laut Herstellerangabe weltweit mit über zwei Millionen Stück verbreitet ist, konnte dieser Beweis geführt werden. Der Einsatz einer Haushalts-Küchenmaschine, die für vorliegende Untersuchungen entsprechend modifiziert werden mußte, hat den Vorteil des bestmöglichen Praxisbezuges. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse lassen sich auch auf das Seriengerät wieder leichter rücktransformieren. Eine weitere Bedingung bei der Untersuchung war, daß gegebenenfalls verbesserte Konstruktionsteile kompatibel zu den vorhandenen Geräteteilen sein sollen, um sie in der Praxis einzusetzen.

3.5.3 LABOR-KÜCHENMASCHINE

Bei der untersuchten Maschine wird in Serienausführung der Planetenkopf mittels vertikaler Welle von unten her durch einen hohlen Schüssel-Innenkegel angetrieben. Bei der Laborausführung erfolgt der Antrieb des Planetenkopfes mittels Riemenscheibe und Keilriemen von einem zusätzlich angeflanschten Antrieb (Kopfantrieb). Hierzu dient eine andere leistungsstarke Haushalts-Küchenmaschine, bei der anstelle eines Werkzeuges eine kleine Keilriemenscheibe auf dem gekürzten Werkzeugschaft sitzt (Abb. 35/5).

Der Originalantrieb der Stand-Küchenmaschine treibt das nunmehr drehbar gelagerte Zahnrad an, auf dem die beiden Werkzeugritzeln abrollen (Fußantrieb).

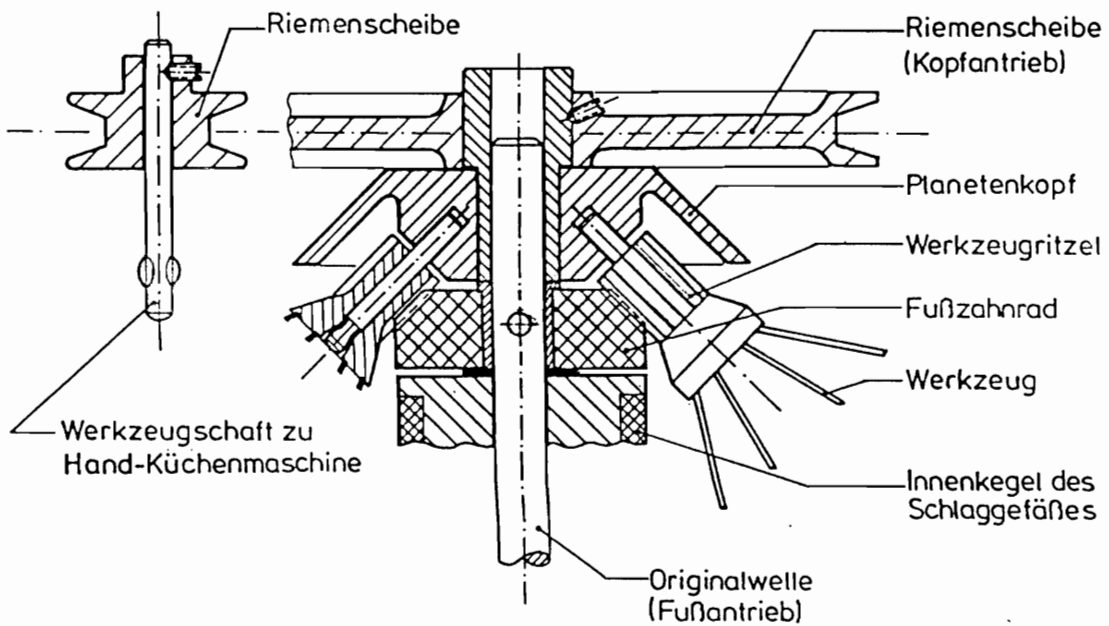


Abb.35/5: Planetenkopf mit Riemenscheibe für Kopfantrieb und Zahnrad mit Originalwelle für Fußantrieb

Beide Antriebe besitzen Universalmotoren, sind für Rechts- und Linkslauf schaltbar, und die Drehfrequenzen sind mittels zweier Stell-Trenntransformatoren in großen Bereichen steuerbar (Abb. 35/6).

Die tatsächlichen Drehfrequenzen beider Antriebe können über nachträglich eingebaute Impulsgeber und Digital-Universalzähler überwacht werden.

Wird die Labor-Küchenmaschine mit stillgesetztem Fußantrieb ($\omega_F = 0$) nur mit dem Keilriemen angetrieben, so entspricht die Kinematik der Werkzeuge im Wirkraum der des Seriengerätes.

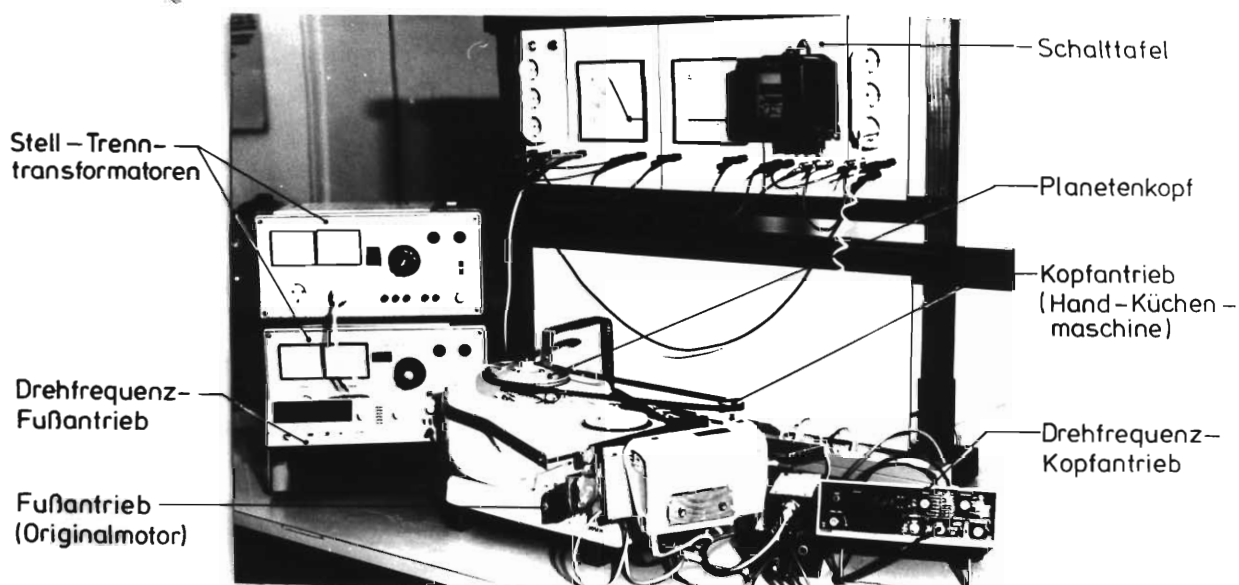


Abb. 35/6: Labor-Küchenmaschine mit getrennt steuerbaren Antrieben über Stell-Transformatoren und Drehfrequenzmessung über Universalzähler im Versuchsaufbau

Bei den Untersuchungen im Rahmen der Optimierungsaufgabe wird vorrangig das Lebensmittel Sahne verwendet. Dies hat den Vorteil, daß bei jedem Einzelversuch der Schlagendpunkt in eindeutiger Weise festgestellt werden kann (z.B. über das maximale Werkzeug-Drehmoment) und eine zusätzliche Variation der Schlagdauer entfällt. Im übrigen scheint Sahne beim Verfahren SCHAUMSCHLAGEN vergleichsweise ein sehr kritisches Lebensmittel zu sein, was vermutlich von der komplexen Zusammensetzung dieses Produktes herrührt.

Ist das Verfahren hinsichtlich dieses Lebensmittels optimiert, so genügt meist eine geringfügige Parameteränderung, um auch bei einem anderen Lebensmittel optimale Ergebnisse zu erzielen. Bei Eiklar beispielsweise ist die optimale Drehfrequenz bei höheren Werten anzunehmen. Dies hängt auch mit der größeren Viskosität des Lebensmittels zusammen, welche die Gefahr des Herausspritzens von Flüssigkeit aus dem Schlaggefäß mindert.

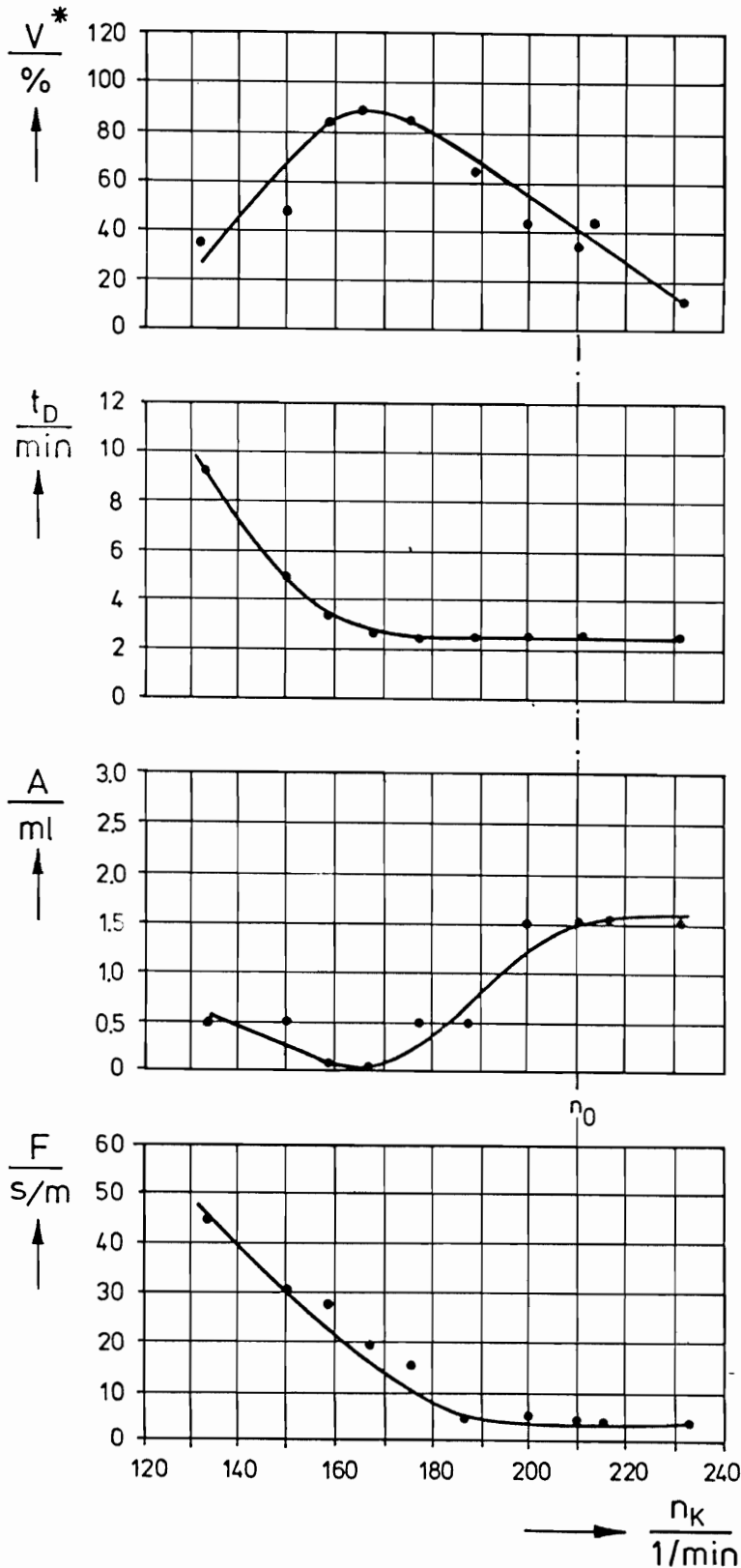


Abb.35/7: Volumenzunahme V^* , Schlagdauer t_D , Absetzmenge A und Festigkeit F in Abhängigkeit von der Kopfdrehfrequenz n_K bei Sahne ($V_A = 200$ ml; Labor-Küchenmaschine mit Fußdrehfrequenz $n_F = 0$; die Drehfrequenz $n_K = n_0$ ist die Originaldrehfrequenz der Serienmaschine).

Hinweis: Jede Meßpunktgruppe zur jeweiligen Drehfrequenz n_K entspricht einem separaten Versuch, der bei "maximaler Steifigkeit" der Sahne beendet wurde

Bei den mit vorliegender Labor-Küchenmaschine durchgeführten Experimenten zeigten sich folgende Ergebnisse, die nur beispielhaft aus einer größeren Zahl von Versuchen herausgegriffen wurden (Abb. 35/7). Die Bestwerte für die Volumenzunahme V^* , Schlagdauer t_D und Absatzmenge A können mit Drehfrequenzen erzielt werden, die deutlich niedriger sind als die vom Hersteller vorgesehene Original-Drehfrequenz n_0 des Seriengerätes ($n_0 = 210 \frac{1}{\text{min}}$).

Die Festigkeit F besitzt bei dieser Originaldrehfrequenz sogar ein Minimum und bei der für die Volumenzunahme V^* günstigen Drehfrequenz noch nicht ihren Bestwert, da hier ein Randmaximum vorliegt.

Eine geringfügige Verbesserung der optimalen Werte ist durch Variation der Drehfrequenz des Fußantriebes möglich. Bei einer langsamen Bewegung desselben im Vergleich zum rasch rotierenden Kopfantrieb, werden unterschiedliche Zahnrad-Übersetzungsverhältnisse eines Einmotoren-Planetenantriebes simuliert. (Normalerweise besitzt ein solcher Antrieb nur ein Zahnradübersetzungsverhältnis Z_Z/Z_R , mit Z_Z = Zähnezahl des Fußzahnrades und Z_R = Zähnezahl des Werkzeugritzels).

Bei einer Rotation des Fußantriebes, die gleichsinnig aber schneller ist als die des Kopfantriebes, ändern die Werkzeuge auf ihren Lagerzapfen im Planetenkopf die Drehrichtung. Dies ergibt eine gegenläufige Bewegungskinematik, die nach der vorgestellten Hypothese des Schaumschlagens und nach früheren Untersuchungen zu bevorzugen ist.

Im Experiment wurde die Kopfdrehfrequenz n_K von $150 \frac{1}{\text{min}}$ bis $188 \frac{1}{\text{min}}$ variiert und die Fußdrehfrequenz n_F in einem Wertebereich von $260 \frac{1}{\text{min}}$ bis $340 \frac{1}{\text{min}}$ untersucht (Hinweis: $\omega = 2\pi n$). Der Wertebereich für die Kopfdrehfrequenz wurde aufgrund der früheren Bestwerte, zumindest für Volumenzunahme, Schlagdauer und Absatzmenge so gewählt (vgl. Abb. 35/7).

Drei ausgewählte Graphen je für Volumenzunahme V^* und Schlagdauer t_D zeigen folgendes Bild (Abb. 35/8). Mit zunehmender Drehfrequenz n_F des Fußantriebes verbessern sich bei allen Kopfdrehfrequenzen n_K (Scharparameter) die Werte für Volumenzunahme V^* und Schlagdauer t_D . Die Kopfdrehfrequenz $n_K = 167 \frac{1}{\text{min}}$ liefert dabei die größte Volumenzunahme, wie dies auch schon bei stillstehendem Fußantrieb ($n_F = 0$) gemessen wurde (vgl. Abb. 35/7). Da aus technischen Gründen die Fußdrehfrequenz nicht weiter erhöht werden konnte, war das Randmaximum der dargestellten Graphen nicht weiter zu überprüfen.

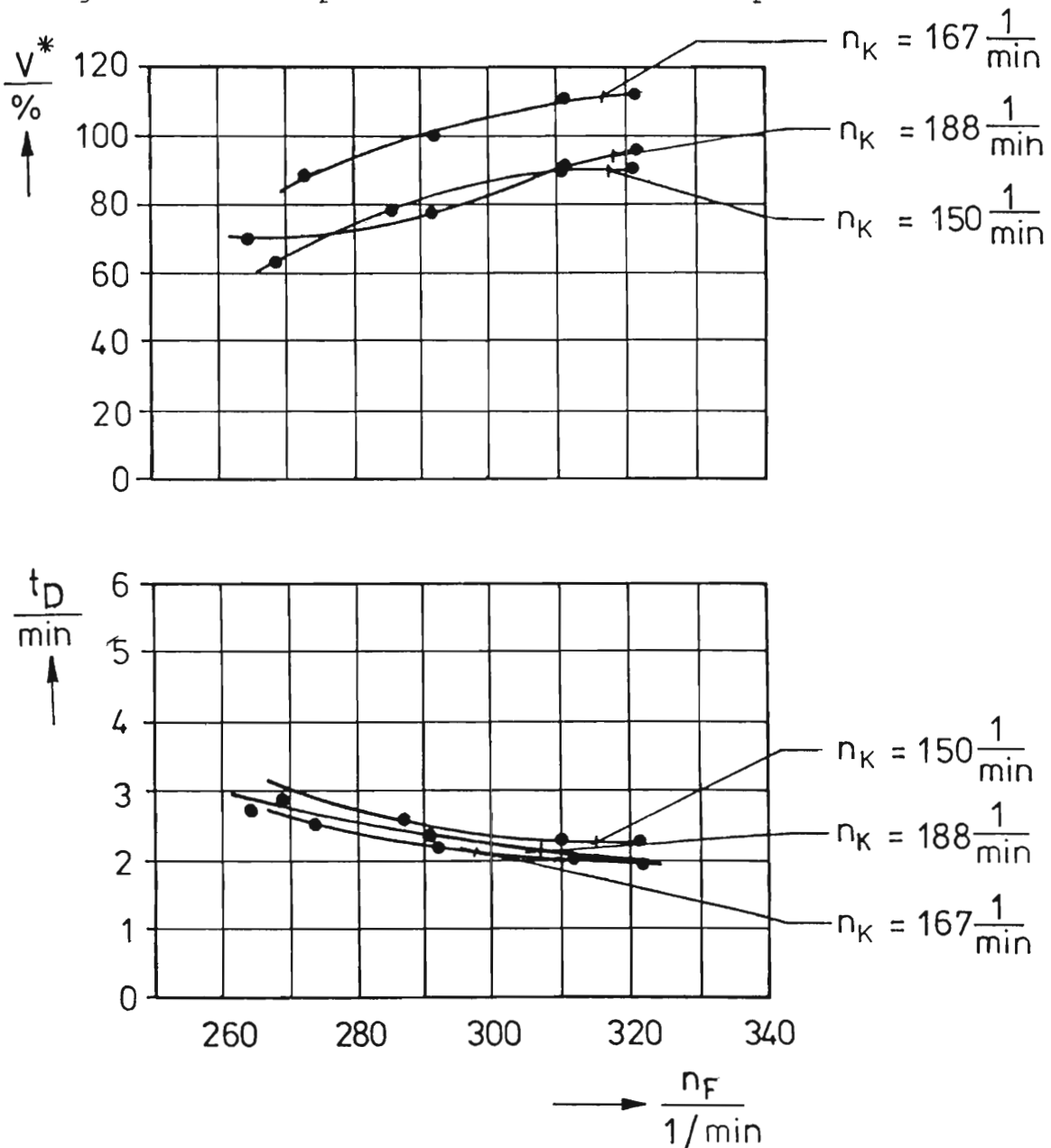


Abb. 35/8: Volumenzunahme V^* und Schlagdauer t_D bei Sahne in Abhängigkeit von der Fußdrehfrequenz n_F bei drei unterschiedlich großen Werten für die Kopfdrehfrequenz n_K als Scharparameter ($V_A = 200 \text{ ml}$; Labor-Küchenmaschine, wobei wegen $n_F > n_K$ gegenläufige Kinematik vorliegt)

Festzustellen ist, daß bei diesen Experimenten der Fußantrieb deutlich rascher rotiert als der Kopfantrieb, so daß gegenläufige Kinematik vorliegt.

Um beim Fußantrieb wieder mit betragsmäßig kleineren Drehfrequenzen auskommen zu können, empfiehlt es sich, die gegenläufige Bewegungskinematik unmittelbar durch eine andere Konstruktion des Planetenkopfes zu erzeugen (Abb. 35/9).

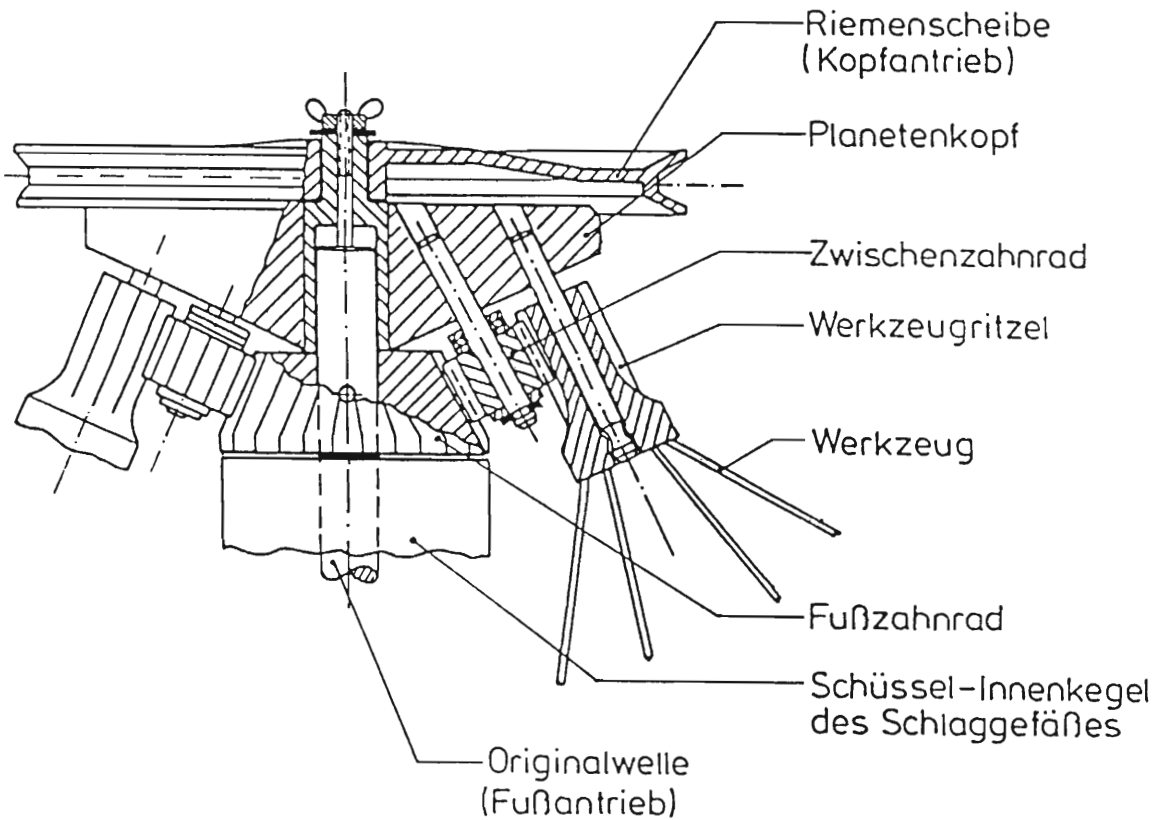


Abb.35/9: Spezial-Planetenkopf mit Riemenscheibe für Kopfantrieb, Zwischenzahnrad für Drehrichtungsumkehr und Zahnrad mit Originalwelle für Fußantrieb

Bei diesem Spezial-Planetenkopf rollt das Werkzeugritzel nicht mehr direkt auf dem Fußzahnrad ab, da ein Zwischenzahnrad eingebaut ist. Bei Antrieb des Planetenkopfes entgegen dem Uhrzeigersinn würden sich bei vergleichsweise niedrigen Fußdrehfrequenzen n_F (oder $n_F = 0$) die Werkzeuge in ihrer Lagerung im Uhrzeigersinn drehen.

3.5.4 OPTIMIERUNG DER ARBEITSERGEBNISSE

Die Arbeitsergebnisse beim SCHAUMSCHLAGEN mit einer Küchenmaschine werden durch eine Vielzahl von Produkt-, Geräte- und Raumparameter beeinflusst. Beschränkt man sich auf das Gerät, so ist die Zahl der zu berücksichtigenden Parameter immer noch sehr groß. Die wichtigsten wurden bereits bei der Überprüfung der vorgestellten Schaumschlag-Hypothese aufgeführt (Kap. 3.4.2).

Nimmt man zunächst an, daß Gefäß- und Werkzeugform sowie Ausladung und Schrägstellung der Werkzeugachsen im Hinblick auf eine volle Nutzung des Gefäßvolumens festliegen, so verbleibt zumindest die Bewegungskinetik als der noch zu optimierende Parameter.

Die absoluten Geschwindigkeiten bzw. die Drehfrequenzen lassen sich bei modernen Küchenmaschinen durchwegs in mehreren Stufen, neuerdings sogar stufenlos, einstellen und der jeweiligen Arbeitsaufgabe anpassen. Beim Lebensmittel Eischnee muß - wie bereits erwähnt - die Drehfrequenz deutlich größer gewählt werden als bei Sahne, um gute Arbeitsergebnisse zu erzielen. In einigen Fällen, insbesondere bei Lebensmitteln mit niedriger Viskosität, empfiehlt es sich darüberhinaus, die Anfangsdrehfrequenz kleiner anzusetzen, um ein Herauspritzen der Flüssigkeit aus dem Gefäß zu vermeiden.

Die zu untersuchende Küchenmaschine wurde bislang so weit modifiziert, daß der Planetenkopf gegensinnige Bewegungskarakteristik besitzt, was gegenläufige Bahnkurven ermöglicht (Abb. 35.10). Letztere garantieren gleichmäßige Geschwindigkeiten der Werkzeugpunkte in weiten Bereichen der

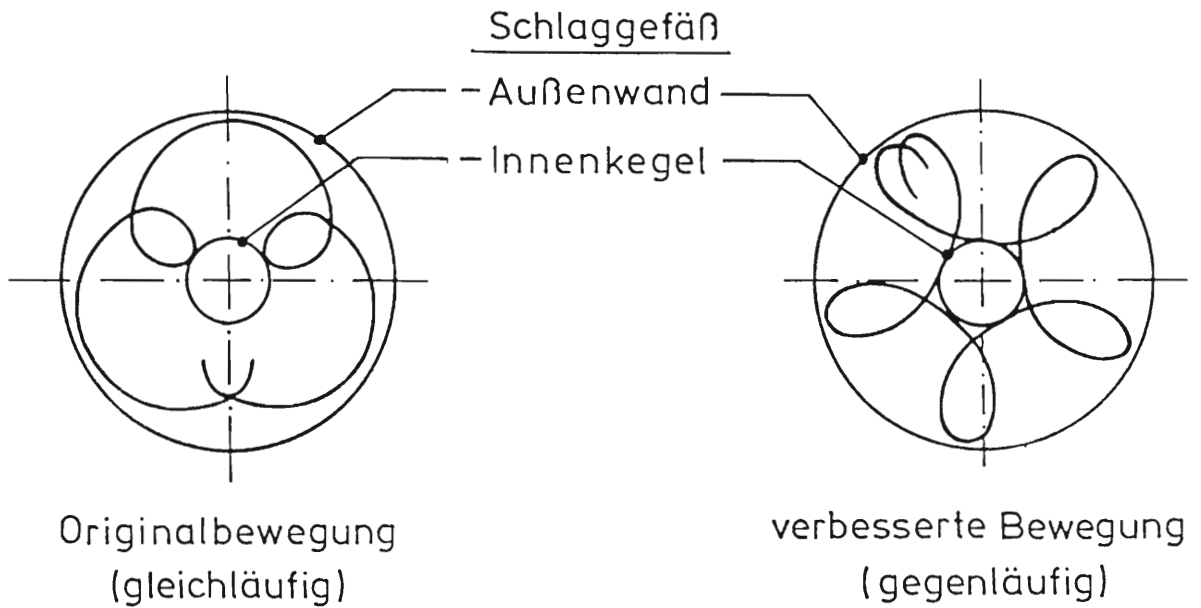


Abb.35/10: Bahnkurven der Labor-Küchenmaschine (Blick von oben auf das Schlaggefäß). Bei der photographischen Aufnahme der Kurven war im Schlagwerkzeug eine ständig eingeschaltete Leuchtdiode befestigt

Bahnkurve im Gegensatz zu gleichläufigen Systemen.

Die günstigste Form der Bahnkurve, die quantitativen Geschwindigkeitswerte und die damit zusammenhängenden Transportbewegungen innerhalb der Wirkräume lassen sich am sichersten über das jeweils angestrebte Arbeitsergebnis festlegen.

Die Kenntnisse über den Mechanismus des Schaumschlagens und der für das Arbeitsergebnis entscheidenden Verfahrensparameter gestatten eine wirkungsvolle Optimierungsstrategie. Bei einer minimalen Anzahl von Versuchen wird ein Höchstmaß an Treffsicherheit hinsichtlich des tatsächlichen Optimums garantiert.

Dennoch waren allein für die nachfolgend ausgewertete Versuchsreihe ohne Vorversuch und Kontrollversuche bereits 77 gültige Hauptversuche notwendig. Wäre die Schlagdauer bzw. der Schlagendpunkt nicht nach der in vorliegender Arbeit

beschriebenen Methode (vgl. Kap. 3.1.1) bestimmt worden, sondern nach DIN 44960 T.2 (29), so hätte sich die Anzahl der erforderlichen Versuche vervielfacht, was praktisch nicht durchführbar gewesen wäre.

Der zu untersuchende Wertebereich konnte aufgrund von Vorversuchen stark eingeschränkt werden. Für den Antrieb des Planetenkopfes (Kopfdrehfrequenz n_K) erschien ein Drehfrequenzbereich von $n_K = 143 \frac{1}{\text{min}}$ bis $188 \frac{1}{\text{min}}$ als ausreichend (vgl. Volumenzunahme, Abb. 35/7). Für den Fußantrieb (Fußdrehfrequenz n_F) wurde ein Drehfrequenzbereich von $n_F = - 60 \frac{1}{\text{min}}$ bis $+ 60 \frac{1}{\text{min}}$ vorgesehen. Dieser Wertebereich konnte gegenüber früheren Experimenten auch deswegen eingeschränkt werden, da der Spezial-Planetenkopf bereits die günstige, gegenseitige Kinematik besitzt. Daß der vorgesehene Wertebereich der zu variierenden Parameter ausreicht, läßt sich mit den Arbeitsergebnissen bestätigen, in denen das Optimum enthalten ist.

So zeigte sich, daß es für jede Kopfdrehfrequenz n_K innerhalb eines gewissen Wertebereiches Drehfrequenzen n_F gibt, die zu Extremwerten für Volumenzunahme V^* , Schlagdauer t_D , Absatzmenge A (Beständigkeit) und Festigkeit F führen.

Im allgemeinen treten die günstigsten Werte für Volumenzunahme V^* und Schlagdauer t_D einerseits, jedoch für Absatzmenge A und Festigkeit F andererseits, jeweils paarweise aber nicht gleichzeitig auf.

Beispielsweise besitzen V^* und t_D bei $n_F = - 20 \frac{1}{\text{min}}$, jedoch A und F erst bei positiven Werten von n_F ihre Bestwerte (Abb. 35/11). Eine gemeinsame Fußdrehfrequenz - ihr entspräche dann eine gemeinsame Bahnkurve - würde hier eine Gewichtung der einzelnen Beurteilungskriterien erfordern und nicht zum Maximalwert jedes einzelnen Kriteriums führen.

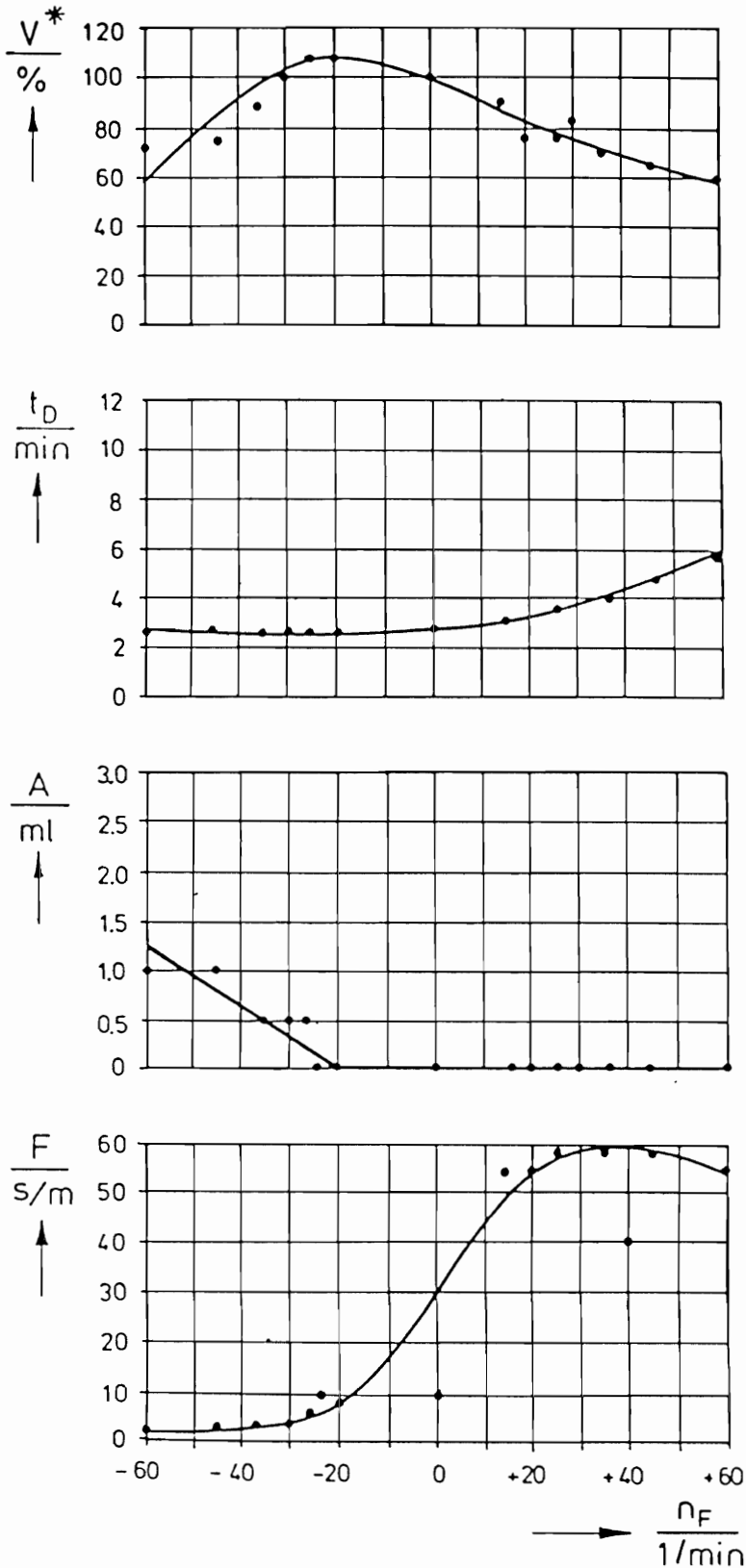


Abb.35/11: Volumenzunahme V^* , Schlagdauer t_D , Absetzmenge A und Festigkeit F in Abhängigkeit von der Fußdrehfrequenz n_F beim Schlagen von Sahne ($V_A = 200 \text{ ml}$) mit einer Labor-Küchenmaschine, Kopfdrehfrequenz $n_K = 143 \frac{1}{\text{min}}$.

Hinweis: Jede Meßpunktgruppe zur jeweiligen Drehfrequenz n_F entspricht einem separaten Versuch, der bei "maximaler Steifigkeit" der Sahne beendet wurde

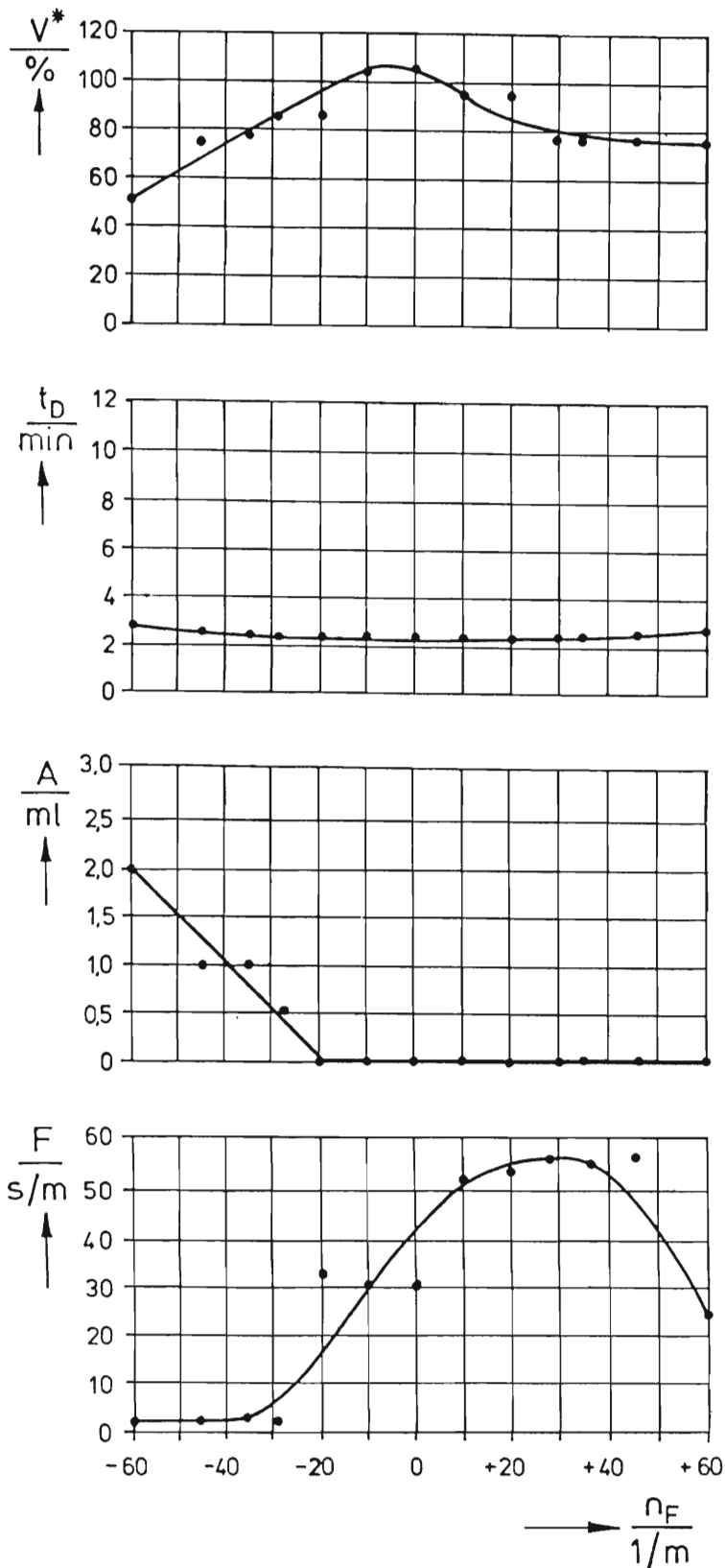


Abb.35/12: Volumenzunahme V^* , Schlagdauer t_D , Absetzmenge A und Festigkeit F in Abhängigkeit von der Fußdrehfrequenz n_F beim Schlagen von Sahne ($V_A=200$ ml) mit einer Labor-Küchenmaschine, Kopfdrehfrequenz $n_K = 150 \frac{1}{min}$.

Hinweis: siehe Abb. 35/11

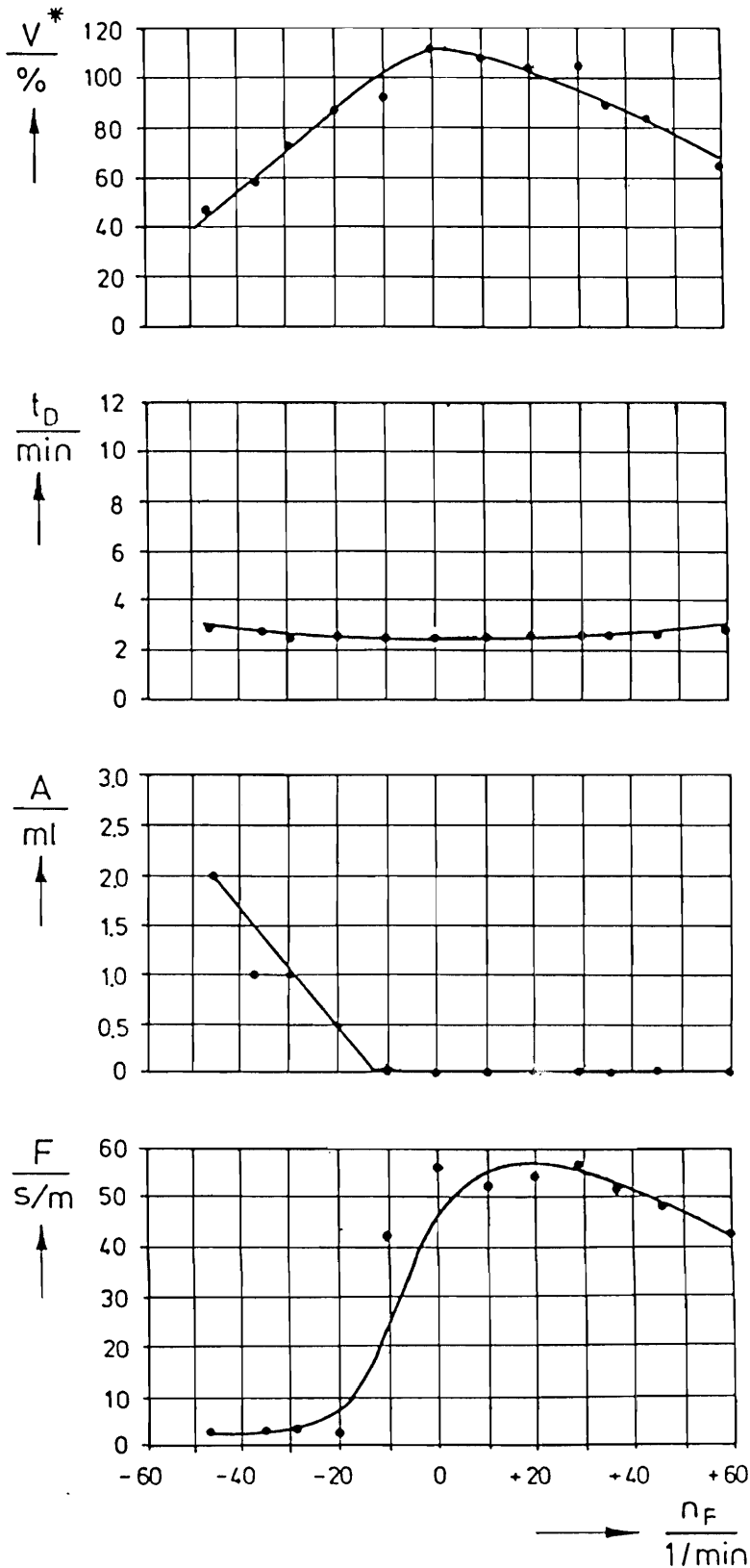


Abb.35/13: Volumenzunahme V^* , Schlagdauer t_D , Absetzmenge A und Festigkeit F in Abhängigkeit von der Fußdrehfrequenz n_F beim Schlagen von Sahne ($V_A = 200$ ml) mit einer Labor-Küchenmaschine, Kopfdrehfrequenz $n_K = 158 \frac{1}{\text{min}}$.

Hinweis: siehe Abb. 35/11

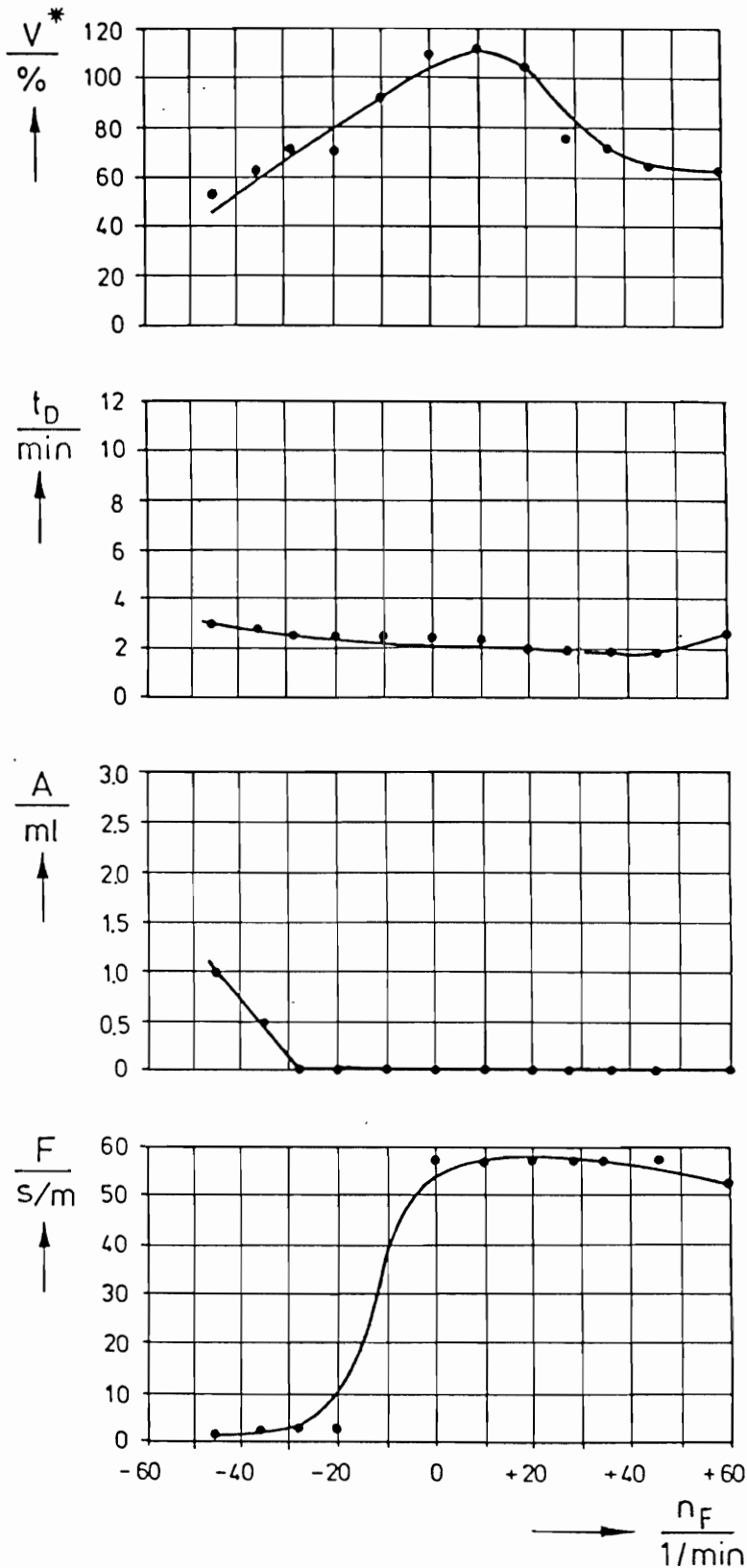


Abb.35/14: Volumenzunahme V^* , Schlagdauer t_D , Absetzmenge A und Festigkeit F in Abhängigkeit von der Fußdrehfrequenz n_F beim Schlagen von Sahne ($V_A = 200 \text{ ml}$) mit einer Labor-Küchenmaschine, Kopfdrehfrequenz $n_K = 167 \frac{1}{\text{min}}$.

Hinweis: siehe Abb. 35/11

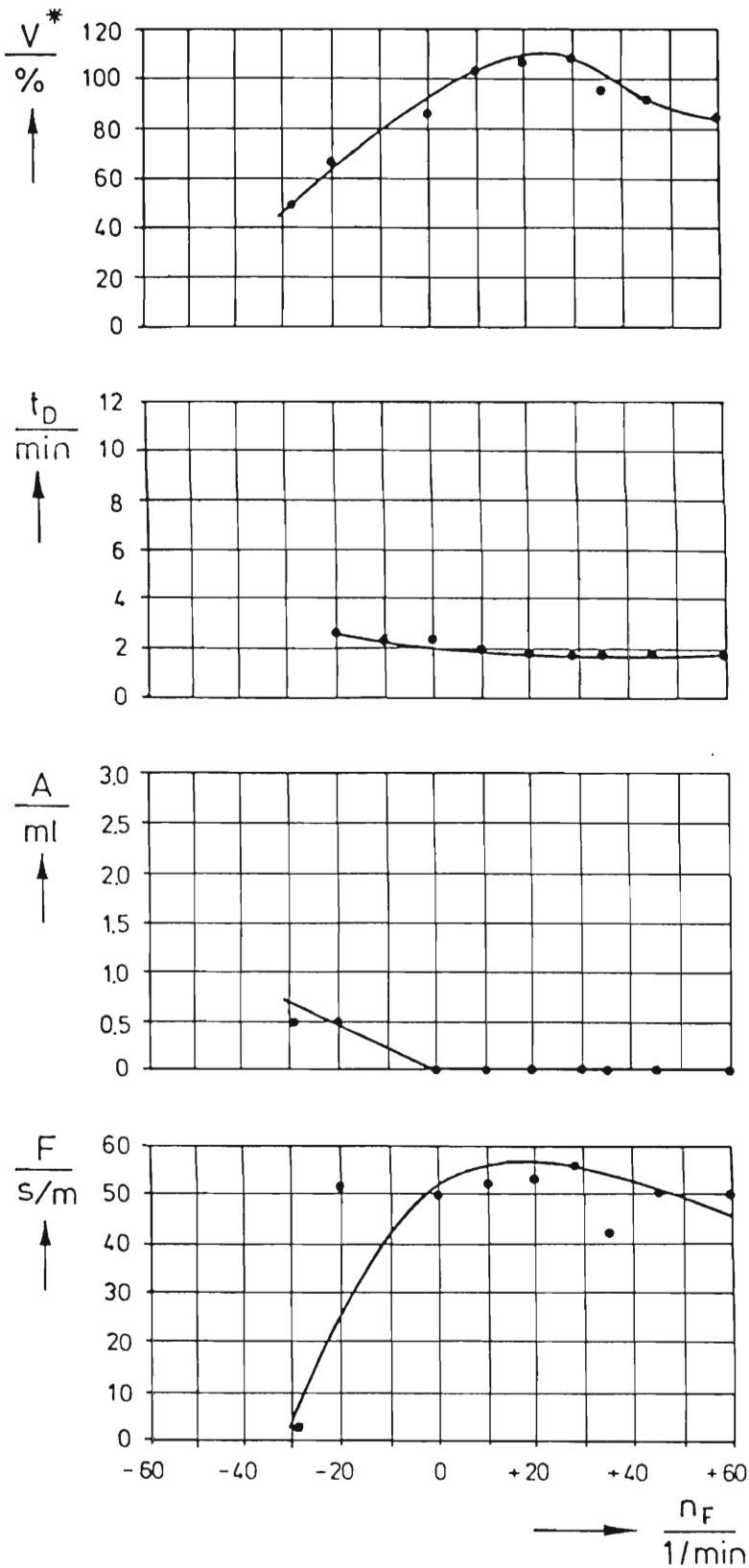


Abb.35/15: Volumenzunahme V^* , Schlagdauer t_D , Absetzmenge A und Festigkeit F in Abhängigkeit von der Fußdrehfrequenz n_F beim Schlagen von Sahne ($V_A=200 \text{ ml}$) mit einer Labor-Küchenmaschine, Kopfdrehfrequenz $n_K = 176 \frac{1}{\text{min}}$.

Hinweis: siehe Abb. 35/11

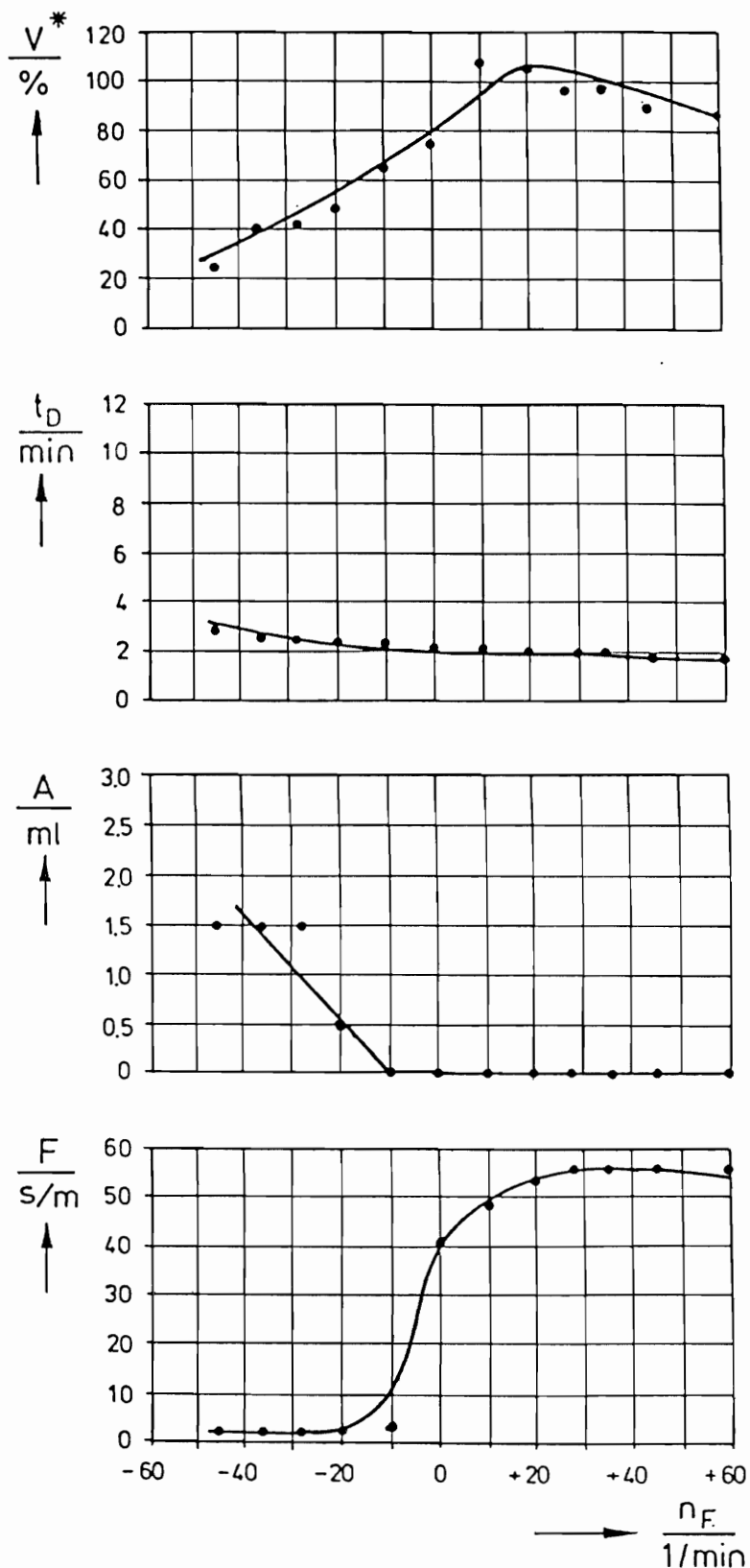


Abb.35/16: Volumenzunahme V^* , Schlagdauer t_D , Absetzmenge A und Festigkeit F in Abhängigkeit von der Fußdrehfrequenz n_F beim Schlagen von Sahne ($V_A=200$ ml) mit einer n_F Labor-Küchenmaschine, Kopfdrehfrequenz $n_K = 188 \frac{1}{\text{min}}$.

Hinweis: siehe Abb. 35/11

Durch Erhöhung der Kopfdrehfrequenz n_K - sie tritt hier als Scharparameter auf - "gleitet" das Maximum der Volumenzunahme V^* in Richtung positiver bzw. steigender Werte für die Fußdrehfrequenz n_F . Umgekehrt verlagert sich das Maximum der Festigkeit nur geringfügig in Richtung kleinerer Werte für die Fußdrehfrequenz n_F (Abb. 35/11 bis Abb. 35/16). Dabei erweist sich gerade die Festigkeit als besonders "scharfes" Kriterium. Mit den Kombinationen Kopfdrehfrequenz $n_K = 167 \frac{1}{\text{min}}$ und Fußdrehfrequenz $n_F = 10 \frac{1}{\text{min}}$ oder auch $n_K = 176 \frac{1}{\text{min}}$ und $n_F = 28 \frac{1}{\text{min}}$ lassen sich optimale Arbeitsergebnisse erzielen - vorausgesetzt alle übrigen Verfahrensparameter sind fest vorgegeben. Die Volumenzunahme V^* und die Festigkeit F besitzen ihre Maximalwerte, die Schlagdauer t_D ist nahezu minimal und die Absetzmenge A ist praktisch Null.

In den zurückliegenden Untersuchungen der Werkzeugkinematik wurden hauptsächlich konstante Werkzeuggeschwindigkeiten gefordert, um die Schaumentstehung zu ermöglichen bzw. längs der gesamten Bahn zu sichern. Bei vorliegendem Untersuchungsabschnitt wurden die Bahnkurven der Küchenmaschine hinsichtlich ihrer Arbeitsergebnisse optimiert. Indirekt werden dadurch auch Transportbewegungen in Quer- und Vertikalrichtungen innerhalb des Schlaggefäßes bewertet. Wären beispielsweise größere Lebensmittelbereiche im Gefäß nicht hinreichend gut bearbeitet worden (Toträume, mangelhafte Mischgüte), so würden sich z.B. Flüssigkeitsreste auf Absetzmenge und Festigkeit stark auswirken. Dies ist offensichtlich auch ein Grund, weshalb gerade die Festigkeit sich als "scharfes" Kriterium erweist.

Wichtig ist bei derartigen Optimierungsaufgaben nicht so sehr die Größe der tatsächlich erreichten Extrema, sondern deren "flacher" Verlauf, d.h. eine geringe Parameterempfindlichkeit innerhalb des praxisrelevanten Bereichs. Dies ist vor allen Dingen dann zu fordern, wenn die Ergebnisse auf Serien-Küchenmaschinen übertragen werden sollen. In der Haushaltspraxis sind unvermeidbare zusätzliche Schwankungen auch der produkt- und raumbedingten Parameter zu erwarten bzw. aufzufangen.

3.5.5 TRANSFORMATION DER GERÄTEPARAMETER AUF HAUSHALTS-KÜCHENMASCHINEN

Bei der Labor-Küchenmaschine mit Zweimotorenantrieb kann durch Variation von Kopfdrehfrequenz n_K und Fußdrehfrequenz n_F die Kinematik und damit die Bahnkurve des Werkzeuges beeinflusst werden. Im untersuchten Wertebereich gibt es zu jeder Kopfdrehfrequenz n_K eine Fußdrehfrequenz n_F , bei der Bestwerte erzielt werden können. Nimmt man als ausschlaggebendes Kriterium die maximale Volumenzunahme, so ergibt sich zwischen n_F und n_K ein charakteristischer Zusammenhang (Abb. 35/17). Demnach läßt sich eine zunehmende Kopfdrehfrequenz n_K zumindest teilweise mit einer größer werdenden Fußdrehfrequenz n_F kompensieren.

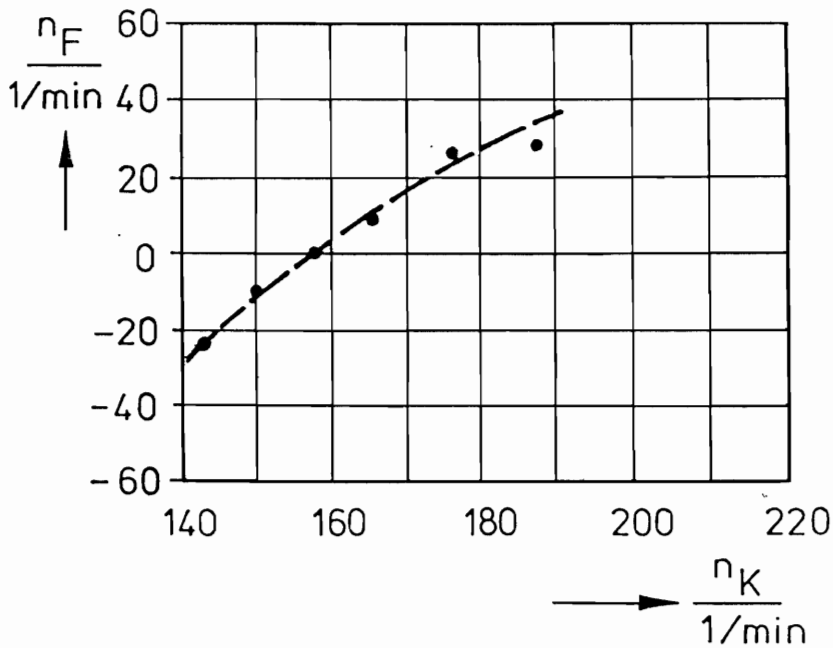


Abb.35/17: Kombination von Fußdrehfrequenzen n_F und Kopfdrehfrequenzen n_K für maximale Volumenzunahme bei Sahne ($V_A = 200$ ml, Labor-Küchenmaschine mit Spezial- Planetenkopf).
Hinweis: Die Werte für jeden Meßpunkt wurden aus den Kurven für die Volumenzunahme V^* der Abb. 35/11 bis Abb. 35/16 graphisch ermittelt

Bei Haushalts-Küchenmaschinen, die lediglich Einmotorenantriebe besitzen, ist n_F nicht mehr zu variieren. Die mit der Labor-Küchenmaschine ermittelte optimale Bahnkurve kann jedoch durch ein entsprechendes Zahnrad-Übersetzungsverhältnis des Planetengetriebes auch für Einmotorenantriebe erreicht werden.

Beim Einmotorenantrieb rotiert das Werkzeug mit der Kopfdrehfrequenz n_K auf seinem Lagerzapfen im Planetenkopf mit der Drehfrequenz.

$$\left| n_1 \right| = n_K \left(\frac{Z_Z}{Z_R} \right)_1, \quad (35.2)$$

wobei Z_Z die Zähnezahl des großen Zahnrades und Z_R die Zähnezahl des Werkzeugritzels ist. Beim Zweimotorenantrieb dreht sich das Werkzeug wegen der Differenz zwischen Kopfdrehfrequenz n_K und Fußdrehfrequenz n_F mit der Drehfrequenz

$$\left| n_2 \right| = (n_K - n_F) \left(\frac{Z_Z}{Z_R} \right)_2. \quad (35.3)$$

Sollen die Bahnkurven beider Antriebe identisch sein, so müssen neben Geometrie und sonstigen Abmessungen beider Kopfdrehfrequenzen n_K gleich sein und es muß auch für die Werkzeugdrehungen gelten

$$\left| n_1 \right| = \left| n_2 \right|. \quad (35.4)$$

Damit errechnet sich unter Zuhilfenahme der Gleichungen 35.2 und 35.3 das zu wählende Zahnrad-Übersetzungsverhältnis

$$\left(\frac{Z_Z}{Z_R} \right)_1 = \left(1 - \frac{n_F}{n_K} \right) \left(\frac{Z_Z}{Z_R} \right)_2. \quad (35.5)$$

Bei den zuletzt beschriebenen Experimenten wurde eine optimale Bahnkurve beispielsweise bei einer Kopfdrehfrequenz $n_K = 176 \frac{1}{\text{min}}$ und einer Fußdrehfrequenz $n_F = 28 \frac{1}{\text{min}}$ ermittelt. Das Zahnrad-Übersetzungsverhältnis der Labor-Küchenmaschine

betrug

$$\left(\frac{Z_Z}{Z_R} \right)_2 = \frac{23}{8}.$$

Nach Gleichung 35.5 müßte bei Einmotorenantrieb das neue Zahnrad-Übersetzungsverhältnis

$$\left(\frac{z_z}{z_R} \right)_1 = 2,417$$

sein, was mit $\frac{23}{9}$ oder $\frac{20}{8}$ angenähert werden könnte.

Die in den Experimenten ermittelten absoluten Werte für die optimalen Arbeitsergebnisse, sind verglichen mit den Werten, wie sie im Labor schon mit anderen Maschinen erreicht wurden, als noch unbefriedigend einzustufen. Ungünstig war bei der verwendeten Küchenmaschine der Schüsselinnenkegel, der keine optimale Kinematik zuließ. Der Wirkraum - er ist in seiner Form torusähnlich - erschwert zusätzlich die Durchmischung des Lebensmittels und die benetzte Gefäßoberfläche ist bezogen auf das eingefüllte Lebensmittelvolumen als groß anzusehen. Haften aber nicht vollständig bearbeitete Lebensmittelreste an den Gefäßflächen, so wirken sich die unvermeidbaren Inhomogenitäten nachteilig auf das Arbeitsergebnis insbesondere auf die Festigkeitswerte aus.

In diesem Zusammenhang beweisen die Experimente, daß eine sichere Beurteilung des Verfahrens SCHAUMSCHLAGEN nur unter Hinzunahme des Kriteriums Schaumfestigkeit möglich ist. Deswegen sollte dieses Kriterium in die Prüfvorschrift für "Elektrische Küchenmaschinen" DIN 44960 T.2 (29) aufgenommen werden. Derzeit ist die Festigkeitsprüfung bei der

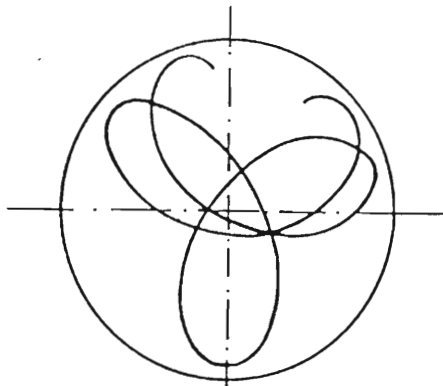


Abb. 35/18: Bahnkurve einer Klein-Küchenmaschine ohne Schüsselinnenkegel mit gegensinnig rotierendem Planetenantrieb (gegenläufige Bahnkurve)

Ermittlung von Gebrauchseigenschaften elektrischer Küchenmaschinen weder für Sahne noch für Eischnee oder für andere Lebensmittel vorgesehen.

Bei modernen Küchenmaschinen, deren Planetenkopf von oben her angetrieben wird, ist kein störender Schüsselkegel vorhanden. Ihre Wirkräume und Kinematik (Abb. 35/18) lassen sich sehr viel günstiger gestalten, als bei der in vorliegender Habilitationsschrift hauptsächlich untersuchten Labor-Küchenmaschine.

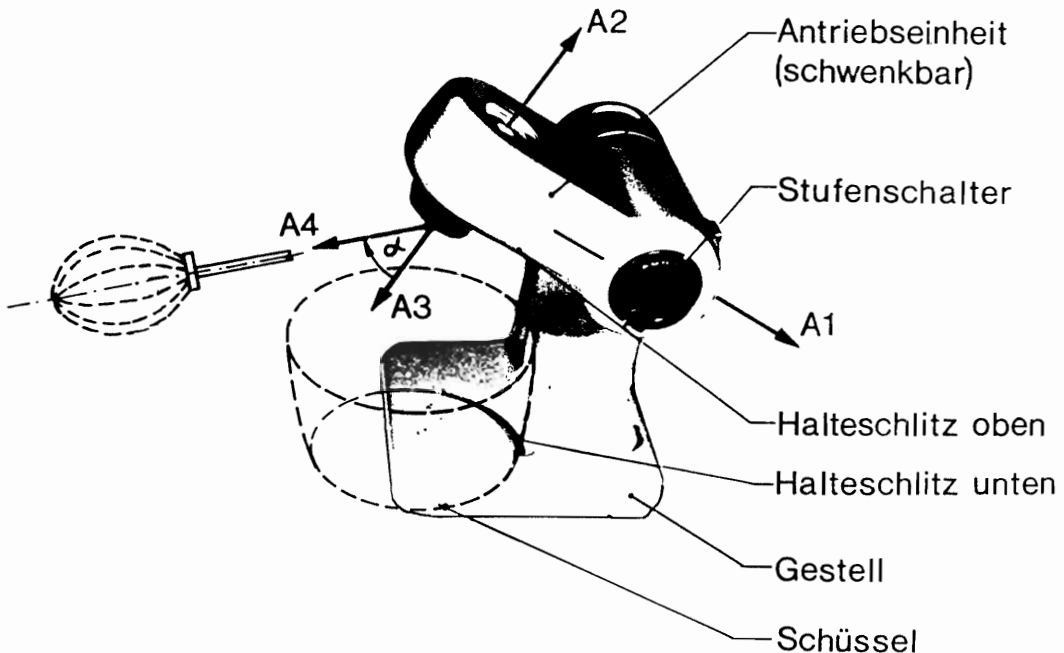


Abb. 35/19: Moderne Klein-Küchenmaschine mit schwenkbarer Antriebseinheit und den Antriebswellen A1 bis A4 zur Aufnahme der verschiedenen Werkzeuge bzw. Zusatzgeräte

Bei Untersuchungen im Rahmen der Optimierung einer Klein-Küchenmaschine ließen sich sehr gute Untersuchungsergebnisse erzielen (Tab. 35/1). Beispielsweise wurde beim Lebensmittel Sahne eine Volumenzunahme $V^* = 170\%$ bei einer Schlagdauer $t_D = 146$ s gemessen. Bei Eischnee konnte die Volumenzunahme $V^* = 900\%$ bei der Schlagdauer $t_D = 112$ s erreicht werden. Die Beständigkeit - hier $B = 57\%$ - läßt sich verbessern, wenn auf so große Werte für die Volumenzunahme verzichtet und das Verfahren nach kürzerer Schlag-

dauer beendet wird. Diese Entscheidung muß individuell im Hinblick auf die Weiterverwendung des Eischnees getroffen werden.

Auch die Festigkeit F ist mit der Volumenzunahme V^* bei Eischnee und bei Sahne negativ korreliert. Dieser Trend wurde in früheren Untersuchungen schon nachgewiesen (92) (97).

Die erreichten Werte für die Volumenzunahme V^* auch bei Sahne sind bemerkenswert im Vergleich zum geforderten Mindestwert $V^* = 80 \%$, gemäß der DLG-Qualitätsprüfungen (36).

Tab. 35/1: Auszug aus Untersuchungsergebnissen zur Optimierung einer Klein-Küchenmaschine (vgl. Abb. 35/19). Schlagwerkzeug mit 18 Stäben, Stabdurchmesser 1,2 mm

Kriterium	Kopfdrehfrequenz	Schlagdauer	Volumenzunahme	Absetzmenge bzw. Beständigkeit	Festigkeit	
Lebensmittel	$n/\frac{1}{\text{min}}$	t_D/s	$V^*/\%$	A/ml	B/%	$F/\frac{S^+}{m}$
Sahne	428	146	170	0,3	---	13,5
	545	103	135	2,0	---	48,8
Eischnee	545	112	900	---	57	12,2
	600	85	810	---	63	19,0

+) Hinweis: Die Festigkeitsprüfung bei Eischnee wurde mit Gegengewicht durchgeführt.

Bei sensorischen Tests wurde allerdings festgestellt, daß bei Sahne Volumenzunahmen über 120 % zu einem "leeren" Geschmack führen können (68). Sicher ist jedoch, daß mit einer optimierten Küchenmaschine jederzeit auch kleine Werte für die Volumenzunahme möglich sind, indem beispielsweise die Schlagdauer verkürzt oder, was günstiger ist, die Drehfrequenz abweichend von der optimalen gewählt wird.

4. ZUSAMMENFASSUNG

Im komplexen Wissenschaftsgebiet "Haushaltstechnik" ist die MECHANISCHE BE- UND VERARBEITUNG VON LEBENSMITTELN nur ein kleiner Teilbereich. Hierzu gehören 24 wichtige Verfahren, die in vorliegender Habilitationsschrift definiert, beschrieben und in eine allgemeingültige Systematik mit den Hauptgruppen ZERKLEINERN, TRENNEN und MISCHEN eingeordnet werden.

Die ZERKLEINERUNGSVERFAHREN weisen das Kennzeichen der "Oberflächenvergrößerung" auf und lassen sich auf die mechanischen Beanspruchungsarten SCHNITT, SCHERUNG, DRUCK, SCHLAG, PRALL und REIBUNG zurückführen (Tab. 21/1).

Mit den TRENNVERFAHREN werden Lebensmittel in Komponenten zerlegt, ohne sie stofflich zu verändern. Im Haushalt gibt es die Gemischsysteme GEMENGE, EMULSION, SUSPENSION, MARK, SCHAUM und SPEZIAL (Tab. 22/2). Neu ist hier der Begriff MARK, dem flüssigkeitshaltiges Fruchtfleisch zugeordnet wird. Unter SPEZIAL-Systemen sind Lebensmittel zusammengefaßt, bei denen Schalen, Häute, Stiele oder Kerne vom übrigen Lebensmittel getrennt werden sollen.

Komplementär zu den Trennverfahren haben MISCHVERFAHREN die Vereinigung von Lebensmitteln zum Ziel, wobei die Mischungspartner festen, flüssigen und/oder gasförmigen Aggregatzustand besitzen können. Neben den schon genannten Gemischsystemen GEMENGE, EMULSION, SUSPENSION und SCHAUM wird wie in der industriellen Verfahrenstechnik der Begriff PASTE verwendet (Tab. 23/1). Er ersetzt hier den Begriff MARK und beide entsprechen letztlich einer dispersen Phase "flüssig" in einer Dispersionsphase "fest".

Die Reihenfolge der Einzelverfahren innerhalb der drei Hauptgruppen wird vorrangig nach didaktischen Gesichtspunkten gewählt. Bei den jeweiligen Verfahren werden, soweit sinnvoll

und *möglich, bekannte oder neue Theorien bzw. Hypothesen zur Beurteilung des Verfahrens oder dessen Arbeitsergebnisse vorgestellt.

Beim Zerkleinerungsverfahren SCHNEIDEN werden die Phänomene Flächenpressung, Zusatzbewegung und Reibung mit physikalischen Beziehungen erklärt. Ähnliche Ansätze haben sich bei der klassischen Theorie des Mähens in der Landtechnik bewährt (Abb. 21/4).

Viele Erkenntnisse lassen sich auch auf die Verfahren SCHNITZELN, RASPELN, SCHÄLEN und teilweise auch auf HACKEN und SÄGEN anwenden. Bei geeigneten Schnitzelmessern z.B. treten Geschwindigkeitskomponenten auf, welche die genannte Zusatzbewegung bewirken (Abb. 21/9). Im analogen Verfahren der Landtechnik wurde mit einer Kanalschneidevorrichtung der günstige Einfluß dieses Neigungswinkels zur Senkung der erforderlichen Schnittkraft experimentell nachgewiesen (Abb. 21/11).

Eigene Experimente werden an Schnitzel- und Raspelscheiben eines Food-processors durchgeführt. Als nachteilig erweisen sich dabei die großen Umfangsgeschwindigkeiten der Werkzeugflächen, was bei vielen Lebensmitteln zu einer nachteiligen Erwärmung der Schnittflächen führt (Tab. 21/2 und Tab. 21/3).

Bei den Verfahren MAHLEN und ZERSCHLAGEN werden rechnerisch die zum Zerkleinern erforderlichen Kräfte bzw. Beschleunigungen abgeschätzt. Eine Gleichung für die Grenzkorngröße bei der Beanspruchungsart SCHLAG bestätigt unter anderem die experimentelle Erfahrung (Gl. 21.58). Danach können bei einem gegebenen Lebensmittel die Teilchen umso feiner zerkleinert werden, je schärfer die Werkzeuge sind und je rascher sich diese bewegen. Es zeigt sich, daß die eigenen mathematischen Ansätze gut übereinstimmen mit den Ansätzen und Experimenten am "freien Schnitt" bei Halmgut in der Landtechnik.

Das SCHÄLEN - gemäß seinem Arbeitsziel den Trennverfahren zugeordnet - wird meist unter Zuhilfenahme der Verfahren SCHNEIDEN, RASPELN oder REIBEN realisiert. Das SCHÄLEN von Lebensmitteln erweist sich als ein Kompromiß zwischen "Lebensmittelverlust" und "Automatisierbarkeit" des Verfahrens. Es werden Parameter angegeben, die diesen Verlust des geschälten Lebensmittels beeinflussen (Gl. 22.15) und unter welchen Bedingungen sich die drehbar gelagerte Klinge eines Handschälers der Form des Lebensmittels anschmiegt (Gl. 22.18).

Beim SIEBEN lassen sich wichtige Begriffe zur Charakterisierung von Trennverfahren wie Trenngüte, Abscheidegrad, Siebdurchgang und Rückstand anschaulich deuten (Gl. 22.1 bis 22.11). Eine Gleichung für die Sinkgeschwindigkeit beim ABSETZEN zeigt, daß in einer Flüssigkeit sowohl nach der Dichte als auch nach dem Teilchendurchmesser des Lebensmittels getrennt werden kann (Gl. 22.30). Diese Verfahren sowie AUSPRESSEN und FILTRIERN können durch ZENTRIFUGIEREN verbessert bzw. beschleunigt werden. Falls Werkstoffbeanspruchungen die Drehfrequenz der Zentrifuge begrenzen, so sind schnellaufende Zentrifugentrommeln mit kleinen Durchmessern für das Verfahren wirkungsvoller als langsamlaufende, große Zentrifugen. Diese Berechnung wird für dünnwandige, leere und volle Trommeln angegeben (Gl. 22.53 bis 22.60).

Im Experiment werden Fruchtpresse mit Förderschnecke und Zentrifugen zum Entsaften von Lebensmitteln eingesetzt. Die Ausbeute an trüben Saft ist bei richtiger Handhabung der Fruchtpresse ähnlich groß wie bei den Zentrifugen, die reine Saftmenge ist jedoch wesentlich geringer (Abb. 22/30). Eine kontinuierlich arbeitende Zentrifuge mit Kegeltrommel benötigt eine mehrfach größere Drehfrequenz, als eine intermittierend arbeitende Zylindertrommel-Zentrifuge, wenn die Arbeitsergebnisse beider etwa gleich sein sollen.

Bei den Mischverfahren dienen mathematisch-statistische Methoden dazu, Zusammensetzung, Mischgüte, Mischgeschwindigkeit bzw. Mischzeit abschätzen zu können. Einige Begriffe, z.B. Mischgüte, lassen sich komplementär als Trenngüte zur Beurteilung der Trennverfahren heranziehen (Gl. 22.1). Das aus dem Schrifttum bekannte Homogenisierungsschema grenzt die Verfahren VERMENGEN, RÜHREN und KNETEN gegeneinander ab, jedoch fehlt das Mischverfahren SCHAUMSCHLAGEN (Abb. 23/4).

Beim VERMENGEN von nicht rieselfähigen Lebensmitteln ist es wichtig, daß die Werkzeuge das gesamte Schüsselinnere durchlaufen. Wie gut dies gelingt, läßt sich mit dem neuen Begriff Wirkraum charakterisieren, der in ähnlicher Weise auch bei den anderen Verfahren anwendbar ist. Der primäre Wirkraum wird von den Werkzeugen ständig durchlaufen, wohingegen der sekundäre Wirkraum eine Zusatzbewegung erforderlich macht (Abb. 23/12). Der tertiäre Wirkraum wird von den Werkzeugen nicht erreicht, sondern das dort lagernde Lebensmittel muß den Werkzeugen zugeführt werden. Fehlt diese Transportbewegung, so wird dieser Bereich zum Totraum.

Beim RÜHREN lassen sich einige Erkenntnisse aus der industriellen Verfahrenstechnik übernehmen. So wird eine Gleichung für die Antriebsleistung von Rührwerken angegeben, die sinngemäß auch für das KNETEN gilt (Gl. 23.25). Die Qualität des Arbeitsergebnisses, z.B. die Mischgüte, wird experimentell nach Zugabe von Kunststoffgranulat als Indikator aus Teigproben bestimmt (Abb. 23/27).

Auch über Dehnwiderstand, Dehnbarkeit und Dehnungsenergie lassen sich Teige beurteilen (Abb. 23/24). Während im gewerblichen Bereich die Beurteilung des Lebensmittels im Vordergrund steht, sollen es in dieser Habilitationsschrift die Verfahren und ihre zugehörigen Geräte sein. Standardisiert man das Lebensmittel in Vorversuchen mit dem Farinographen, und bearbeitet es mit der zu untersuchenden Küchenmaschine, so können mit dem Extensographen die genannten Teigeigenschaften gemessen werden (Abb. 23/22 und Abb. 23/23).

Der experimentelle Schwerpunkt vorliegender Habilitationsschrift ist dem Verfahren SCHAUMSCHLAGEN gewidmet. Hierüber lagen bislang keine brauchbaren, wissenschaftlichen Ergebnisse vor, da die Verfahrenstechnik des Haushalts kaum untersucht ist und industriell Schäume vor allem aus energetischen Gründen durch Einblasen oder mittels begasten Rührern erzeugt werden. Das "mechanische Schaumschlagen" nimmt innerhalb der Mischverfahren eine Sonderstellung ein, da es nur unter sehr engen Randbedingungen gelingt, hinreichend stabilen Schaum zu erzeugen. Um diese Randbedingungen und den Einfluß wichtiger Parameter auf das Verfahren abschätzen zu können, beispielsweise mit dem Ziel, Küchenmaschinen zu optimieren, wird eine leicht verständliche Hypothese des Schaumschlagens entworfen.

Übliche "mikroskopische" oder kolloidale Betrachtungsweisen können bestenfalls dazu flankierend genutzt werden. Ebenso sind die bekannten Prüfvorschriften und -kriterien z.B. nach DIN (29) und DLG (36) nicht ausreichend bzw. nicht genau genug. Es zeigt sich, daß zur Qualitätsbeurteilung der Verfahrensergebnisse vor allem die Kriterien: Volumenzunahme, Schlagdauer, Beständigkeit, Aussehen, Festigkeit wichtig sind. Zur Messung der Schaumfestigkeit wird eine neue Prüfvorrichtung entwickelt und erprobt (Abb. 32/3).

Die Genauigkeit der Beurteilungskriterien läßt sich rechnerisch und experimentell absichern (Tab. 33/2)

Die vorgestellte Hypothese des Schaumschlagens wird anhand der wichtigen Geräteparameter Drehfrequenz der Werkzeuge, Stabdurchmesser, Füllmenge im Schlaggefäß sowie Werkzeug- und Gefäßform überprüft. Teilergebnisse sind:

- Es existiert für eine vorgegebene Parameterkonfiguration nur eine optimale Drehfrequenz (Abb. 34/4).
- Günstig sind Schlagwerkzeuge mit vielen Stäben und kleinem Stabdurchmesser (Abb. 34/6 und Abb. 34/7).
- Es existiert nur eine optimale Füllmenge (Abb. 34/9).
- Die Werkzeugform muß dem Gefäß angepaßt sein; bei halbkugelförmigem Gefäßboden vorzugsweise ballig (Abb. 34/13).
- Günstig sind Gefäßformen mit innen konkav gewölbten Böden (Abb. 34/14), evtl. mit Bodenkegel (Abb. 34/15).

Weiterhin bestätigt die Schaumschlag-Hypothese die Bedeutung der Werkzeugkinematik und fordert dabei in der Grenzfläche Luft-Flüssigkeit konstante Werkzeug-Geschwindigkeiten über die gesamte Bahnkurve. Zur Beurteilung dieser Kinematik wird eine "Analytische Methode" und eine "Bahnkurven-Methode" angegeben.

Mit diesen theoretischen und experimentellen Grundlagen können Entscheidungen beim Optimieren von Verfahren und Maschinen sehr rasch und zuverlässig getroffen werden. So zeigt sich deutlich, daß "gegensinnige" Drehbewegungen von Werkzeug- und Planetenkopf (Zusatzdrehung) günstiger sind als "gleichsinnige" (Abb. 34/18 und Abb. 34/19). Im Rahmen umfangreicher Optimierungsaufgaben wird zunächst eine Labor-Küchenmaschine entwickelt, deren Zweimotoren-Antrieb eine vielseitige Variation von Geschwindigkeiten, Geschwindigkeitsverhältnissen und Bahnkurven ermöglicht.

Als besonders "scharfes" Kriterium hinsichtlich der Arbeitsergebnisse erweist sich die Schaumfestigkeit, die in der augenblicklich gültigen Norm "Allgemeine Funktionsprüfungen für elektrische Küchenmaschinen" nach DIN 44 960 T.2 (29) fehlt.

Die optimalen Arbeitsergebnisse der Labor-Küchenmaschine lassen sich auch mit einer (Einmotoren-) Haushalts-Küchenmaschine erzielen. Dazu müssen einige Geräteparameter der Labor-Küchenmaschine mit den angegebenen mathematischen Beziehungen auf die der Haushalts-Küchenmaschine transformiert werden.

Die Forderung nach verbesserter Gebrauchstauglichkeit von Küchengeräten und -maschinen wird mit zunehmendem Verbraucherbewußtsein und angesichts der Energie-, Rohstoff- und Umweltprobleme zukünftig noch stärker artikuliert werden. Am Beispiel der hier experimentell untersuchten Verfahren läßt sich aber retrospektiv erkennen, daß kaum wissenschaftlich gesicherte Grundlagen vorhanden sind. Dies wäre bei genauer Betrachtung auch für die übrigen Verfahren zur "Mechanischen Be- und Verarbeitung von Lebensmitteln im Haushalt" festzustellen.

Langfristiges Ziel muß es daher sein, im Fachgebiet "Haushaltstechnik und Arbeitslehre" dieses aufgezeigte Forschungsdefizit zu beseitigen.

5. VERZEICHNISSE

5.1 SCHRIFTTUM

- 1) ALT, Ch.: Filtration. In: Verfahrenstechnik 1. Ullmanns Encyklopädie der technischen Chemie, Bd.2. 4. Aufl. Weinheim: Verlag Chemie 1972. S. 154-198.
- 2) ARBEITSSICHERHEIT '80. Unfallverhütungsbericht. Hrsg. vom Bundesminister für Arbeit und Sozialordnung. Bonn: Bonner Universitäts-Buchdruckerei 1980. S. 17, 33.
- 3) AUTOMATEN und Geräte mit Automatik für den Haushalt. Hrsg. von der Deutschen Gesellschaft für Hauswirtschaft. Essen: DGH 1974.
- 4) BELITZ, H.-D.; GROSCH, W.: Lehrbuch der Lebensmittelchemie. Berlin: Springer-Verlag 1982. S. 521-547.
- 5) BIKERMAN, J. J.: Foams. Berlin: Springer-Verlag 1973. S. 33-64.
- 6) BOHL, W.: Technische Strömungslehre. 2. Aufl. Würzburg: Vogel-Verlag 1975. S. 81-83.
- 7) BOLDT, A.: Heim, Freizeit, Schule. Forschungsberichte der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Unfallforschung, Bd. 219. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW 1979. S. 1-5.
- 8) BRABENDER-EXTENSOGRAPH. Gebrauchsanleitung. Duisburg: Brabender o.J.
- 9) BRABENDER-FARINOGRAPH. Gebrauchsanleitung. Duisburg: Brabender o.J.
- 10) BRINKMANN, W.: Geräte und Verfahren für die Produktion von Rüben und Mais. In: Landtechnik. Landwirtschaftliches Lehrbuch, Bd. 4. 6. Aufl. Stuttgart: Verlag E. Ulmer (voraussichtlich 1983).
- 11) BRONSTEIN, I. N.; SEMENDJAJEW, K. A.: Taschenbuch der Mathematik. 5. Aufl. Zürich: Verlag H. Deutsch 1965.
- 12) BULLINGER, H.-J.; SOLF, J. J.: Systematik. Ergonomische Arbeitsmittelgestaltung, Bd. 1. Forschungsberichte der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Unfallforschung, Bd. 196. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW 1979. S. 2-18.
- 13) DERNEDDE, W.: Die technologischen Eigenschaften von Gras und deren Einfluß auf den Schneidvorgang. In: Zerkleinern von Halmfutter. Arbeiten aus dem Institut für Landmaschinenforschung der Forschungsanstalt für Landwirtschaft, Sonderheft 8. Völkenrode: Landbauforschung 1970. S. 53-67.

- 14) DIN 1558: Handbetriebene Schneidemaschinen für Brot und Aufschnitt. Begriffe, Güte- und Sicherheitsanforderungen. Mai 1969.
- 15) DIN 1859: Elektro-Schneidemaschinen. Begriffe, Güte- und Sicherheitsanforderungen. Aug. 1971.
- 16) DIN 4188, T.1: Drahtsiebböden für Analysensiebe. Maße. Okt. 1977.
- 17) DIN 6493, T.1: Handsägen für Holz. Begriffe. Okt. 1964.
- 18) DIN 10 765: Untersuchung von Kaffee und Kaffee-Erzeugnissen. Bestimmung der Korngröße von gemahlenem Röstkaffee. Luftstrahlsieb-Verfahren. Dez. 1975.
- 19) DIN 10 950: Allgemeine Grundlagen der Sensorik. Begriffe. Nov. 1973.
- 20) DIN 12 331: Laborgeräte aus Glas. Becher, hohe Form. April 1971.
- 21) DIN 31 000 / VDE 1000: Allgemeine Leitsätze für das sicherheitsgerechte Gestalten technischer Erzeugnisse. März 1979.
- 22) DIN 33 400: Gestalten von Arbeitssystemen nach arbeitswissenschaftlichen Erkenntnissen. Begriffe und allgemeine Leitsätze. Okt. 1981.
- 23) DIN 33 401: Stellteile. Begriffe, Eignung, Gestaltungshinweise. Juli 1977.
- 24) DIN 44 539, T.1: Elektrische Haushalt-Kaffeebereiter. Gebrauchseigenschaften. Begriffe. Febr. 1979.
- 25) DIN 44 539, T.2: Elektrische Haushalt-Kaffeebereiter. Gebrauchseigenschaften. Prüfungen. Febr. 1979.
- 26) DIN 44 539, T.3: Elektrische Haushalt-Kaffeebereiter. Gebrauchseigenschaften. Anforderungen. Febr. 1979.
- 27) DIN 44 547: Elektroherde für den Haushalt. Gebrauchseigenschaften. Prüfungen. April 1980.
- 28) DIN 44 960, T.1: Elektrische Küchenmaschinen. Gebrauchseigenschaften. Begriffe. Okt. 1975.
- 29) DIN 44 960, T.2: Elektrische Küchenmaschinen. Gebrauchseigenschaften. Allgemeine Funktionsprüfungen. Febr. 1981.
- 30) DIN 44 962, T.1: Elektrische Küchenmaschinen. Entsafter. Gebrauchseigenschaften. Begriffe. Mai 1976.
- 31) DIN 44 963, T.1 (Entw.): Elektrische Küchenmaschinen. Kaffeemühlen. Gebrauchseigenschaften. Begriffe. Jan. 1979.

- 32) DIN 44 963, T.2 (Entw.): Elektrische Küchenmaschinen. Kaffeemühlen. Gebrauchseigenschaften. Prüfungen. Jan. 1979.
- 33) DIN 44 963, T.3 (Entw.): Elektrische Küchenmaschinen. Kaffeemühlen. Gebrauchseigenschaften. Anforderungen. Jan. 1979.
- 34) DIN 45 635, T.18 (Entw.): Geräuschmessung an Maschinen. Luftschallmessung, Hüllflächen-Verfahren. Geräte für den Hausgebrauch und ähnliche Zwecke. Jan. 1976.
- 35) DIN 66 050: Gebrauchstauglichkeit. Begriff. Aug. 1980.
- 36) DLG Qualitätsprüfungen. Prüfungsbestimmungen für Milch und Milchprodukte. Hrsg. von der Deutschen Landwirtschafts-Gesellschaft, Fachbereich Markt und Ernährung. 25. Aufl. Frankfurt: DLG o.J. S. 47-51.
- 37) DOBLER, K.: Der freie Schnitt beim Mähen von Halmgut (Hohenheimer Arbeiten, H. 62). Stuttgart: Verlag E. Ulmer 1972.
- 38) DÜRR, H.: Bewertung der Handhabung von Haushaltsgeräten im Rahmen von Warentests. Hauswirtsch. Wiss. Jg. 26 (1978) H. 6, S. 261-267.
- 39) ENERGIEBERICHT über elektrotechnische Gebrauchsgüter im Haushalt. Hrsg. v.d. Hauptarbeitsgemeinschaft der Deutschen Hausgeräte-Industrie und dem Zentralverband der elektrotechnischen Industrie. Frankfurt: HDHI/ZVEI (um 1980). S. 2.
- 40) ENERGIEBILANZEN der Bundesrepublik Deutschland. Hrsg. von der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen. Frankfurt: VDEW 1980. Zitiert in: Energieversorgung: Daten und Fakten. Hrsg. von der HEA. Frankfurt: HEA 1981. S. 20.
- 41) FINK, H.-F.; KOERNER, G.: Schaumbekämpfung. In: Ullmanns Encyklopädie der technischen Chemie, Bd. 20. 4. Aufl. Weinheim: Verlag Chemie 1981. S. 411-414.
- 42) GAYER, K.: Forstbenutzung. Ein Lehr- und Handbuch. Berlin: Verlag P. Parey 1949. S. 147-154.
- 43) GORJATSCHKIN, W. P.: Theorie des Schneidens mit der Schere. In: Landwirtschaftliche Maschinen. Charkow: 1930.
- 44) GRAF, E.; MÜLLER, H. R.: Fine structure and whippability of sterilized cream. Milchwiss. Jg. 20 (1965) H. 6, S. 302-307.
- 45) GRANDJEAN, E.: Physiologische Arbeitsgestaltung. Thun: Ott-Verlag 1967.
- 46) HÄNNI, H.; FLÜCKIGER, E.; BÜRKI, Ch.: Verbesserung der Schlagfähigkeit von UHT-Rahm. Schweiz. Milchzeitung Jg. 24 (1977) S. 175-176.

- 47) HAUSHALTTECHNIK. Begriffe und Benennungen. Hrsg. v.d. Deutschen Gesellschaft für Hauswirtschaft. 2. Aufl. München: Verlag K.M. Lipp 1975.
- 48) HEMMING, W.: Verfahrenstechnik. Würzburg: Vogel-Verlag 1975.
- 49) HERRMANN, K.: Tiefgefrorene Lebensmittel. Grundlagen und Fortschritte der Lebensmitteluntersuchung, Bd. 12. Berlin: Verlag P. Parey 1970. S. 187-195.
- 50) HOFMANN, K.; HAMM, R.: Einfluß der Erhitzung auf Struktur und Zusammensetzung von Muskeleiweiß. Fleischwirtsch. Jg. 49 (1969) H. 9, S. 1180-1184.
- 51) HUBER, H.: Der Einfluß bestimmter Teigkomponenten auf den Kneteffekt. Getreide, Mehl, Brot Jg. 26 (1972) S. 64-66.
- 52) HUYGHEBEART, A.; HENDRICKX, H.: The relation between the fatty acid composition and the iodine value and refractive index of butterfat. Milchwiss. Jg. 25 (1970) H. 9, S. 506-510.
- 53) ICC-Standard Nr. 114: Methode für den Einsatz des Brabender-Extensographen. Detmold: Verlag M. Schäfer 1972.
- 54) ICC-Standard Nr. 115: Methode für den Einsatz des Brabender-Farinographen. Detmold: Verlag M. Schäfer 1972.
- 55) JOHN, G.: Der Leistungsbedarf beim Begasen von Flüssigkeiten in bewehrten Rührbehältern. Verfahrenstechnik Jg. 3 (1969) H. 9, S. 393-398.
- 56) KAMMERLEHNER, J.: Schlagrahm (pasteurisiert, ultrahocherhitzt) - Verbesserung der Festigkeit, Vermeidung des Absetzens. Dt. Molkerei-Zeitung (1974) F. 48, S. 1758-1825.
- 57) KAMMERLEHNER, J.: Untersuchungen über verschiedene Einflüsse auf die physikalischen Eigenschaften von Schlagrahm. Dt. Molkerei-Zeitung (1973) F. 38, S. 1516-1521.
- 58) KANAFOJSKI, C.: Halmfruchterntemaschinen. Theorie, Berechnung und Konstruktion der Landmaschinen, Bd. 2, T. 1. Berlin: VEB Verlag Technik 1961. S. 12-21.
- 59) KAZANTINOU, S.: Optimierung der Schaumbildung durch Schlagen von fettreichen oder fettarmen aber proteinreichen Lebensmitteln. Diss., TU München-Weihenstephan 1981.
- 60) KELLER, K.: Gedanken zur Schlagsahne-Herstellung. Deutsche Molkerei-Zeitung Jg. 77 (1956) H. 17, S. 549.
- 61) KESSLER, H. G.: Lebensmittelverfahrenstechnik. Schwerpunkt Molkereitechnologie. München-Weihenstephan: Kessler 1976. S. 65-68, 113-123.

- 62) KIEFER, H.: Der Einfluß des Hennenalters auf Eigewicht und Zusammensetzung des Eies. In: Qualität von Geflügelprodukten. Hohenheimer Arbeiten. Bd. 72. Stuttgart: Verlag E. Ulmer 1973.
- 63) KIERMEIER, F.; LECHNER, E.: Milch und Milcherzeugnisse. Grundlagen und Fortschritte der Lebensmitteluntersuchung, Bd. 15. Berlin: Verlag P. Parey 1973. S. 333-337.
- 64) KING, N. M. S.: Die Membran der Milchfettkügelchen. Kempten: Volkswirtschaftlicher Verlag 1957. S. 48-67.
- 65) KIRCHGESSNER, M.: Tierernährung. 5. Aufl. Frankfurt: DLG-Verlag 1982. S. 280-283.
- 66) KIRCHGESSNER, M.; FRIESECKE, H.; KOCH, G.: Fütterung und Milchzusammensetzung. München: BLV 1965. S. 29-87.
- 67) KOENEN, K.: Sind die DLG-Prüfbestimmungen für Schlag- sahne und die DLG-Schlagsahneprüfungen nicht marktge- recht? Deutsche Molkerei-Zeitung (1975) F. 38, S. 1263-1264.
- 68) KOENEN, K.: Herstellung und Behandlung von Schlagsahne. Deutsche Molkerei-Zeitung Jg. 82 (1961)F . 25, S. 907-909.
- 69) KOENEN, K.: Schlagsahne im objektiven Qualitätstest. Milchwirtsch. Jg. 27 (1974) S. 947-949.
- 70) KRELL, E., u.a.: Einführung in die Trennverfahren. Leipzig: VEB 1975. S. 298-300.
- 71) KREYSZIG, E.: Statistische Methoden und ihre Anwendungen. 3. Aufl. Göttingen: Verlag Vandenhoeck und Ruprecht 1968.
- 72) KROEMER, K. H. E.: Was man von Schaltern, Kurbeln und Pedalen wissen muß. Auswahl, Anordnung und Gebrauch von Betätigungsteilen. Sonderheft der REFA-Nachrichten. Hrsg. vom Verband für Arbeitsstudien, REFA. Darmstadt 1967.
- 73) KUCHLING, H.: Taschenbuch der Physik. Thun: Verlag H. Deutsch 1978.
- 74) LEBENSMITTELVERRARBEITUNG im Haushalt. Hrsg. von der Deutschen Gesellschaft für Hauswirtschaft. 2. Aufl. Stuttgart: Verlag E. Ulmer 1975. S. 22-29.
- 75) LEXIKON der Verfahrenstechnik. Hrsg. v. K. Schiefer. In: Lueger Lexikon der Technik, Bd. 16. Stuttgart: Deutsche Verlags-Anstalt 1970.
- 76) LIST, H.: Kontinuierliches Mischen und Kneten. Pratteln 1958. Zitiert in: LONCIN (77).
- 77) LONCIN, M.: Grundlagen der Verfahrenstechnik in der Lebensmittelindustrie. Aarau: Verlag Sauerländer 1969.

- 78) MAGNUS, K.: Kreisel. Theorie und Anwendungen. Berlin: Springer-Verlag 1971. S. 181, 182, 264.
- 79) MANEGOLD, E.: Grundriß der Kolloidkunde. 2. Aufl. Dresden: Verlag Th. Steinkopff 1959. S. 110-116.
- 80) MANEGOLD, E. Kapillarsysteme. Bd. 1. Heidelberg: Straßenbau, Chemie und Technik Verlagsges.m.b.H. 1955. S. 233-324, 435-445.
- 81) MANEGOLD, E.: Allgemeine und angewandte Kolloidkunde. Bd. 1. Heidelberg: Straßenbau, Chemie und Technik Verlagsges.m.b.H. 1956. S. 30, 31, 286-296, 846-870.
- 82) MANEGOLD, E.: Schaum. Heidelberg: Straßenbau, Chemie und Technik Verlagsges.m.b.H. 1953. S. 422-447.
- 83) MANSVELT, J. W.: The use of foams in foods and food production. In: Foams. Hrsg. von R. J. Akers. London: Academic Press 1976. S. 283-296.
- 84) MERSMANN, A.: Unterlagen zur Vorlesung Grundlagen der Mechanischen Verfahrenstechnik. Unveröff. Manuskript. München 1978.
- 85) MOHR, W.; BAUR, K.: Über die Änderung des Volumens, der Festigkeit und des Absetzens von Schlagsahne in den verschiedenen Stadien des Schlagprozesses im Vergleich mit der mit Wattmeter bestimmten Festigkeit. Molkerei-Zeitung Jg. 50 (1936) S. 1709-1711.
- 86) MOHR, W.; BECKMANN, K.: Abhängigkeit der Absetzflüssigkeit geschlagener Sahne von der Temperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit. Molkerei- und Käserei-Zeitung Jg. 13 (1962) S. 1551-1552.
- 87) MOHR, W.; KOENEN, K.: Die Beurteilung der Qualität von Schlagsahne. Deutsche Molkerei-Zeitung (1953) F. 15, S. 468-471.
- 88) MOHR, W.; KOENEN, K.: Eine neue Standard-Apparatur zum Schlagen von Schlagsahne. Molkerei- und Käserei-Zeitung Jg. 4 (1953) H. 8, S. 244-245.
- 89) MOHR, W.; MOHR, E.: Das Schlagsahneproblem. Molkerei- und Käserei-Zeitung (1955) H. 2, S. 34-37.
- 90) MOHSEIN, N. N.: Physical properties of plant and animal materials. Bd. 1. Schrift der Pennsylvania State University. New York: Gordon and Breach Science Publishers 1968.
- 91) PICHERT, H.: Befestigungselemente für Küchenmaschinen. Der Küchenplaner (1982) H. 6, S. K 21 - K 26 .

- 92) PICHERT, H.: Beurteilungskriterien von Schlagsahne unter besonderer Berücksichtigung der Festigkeit. Dt. Molkerei-Zeitung Jg. 100 (1979) S. 1042-1046.
- 93) PICHERT, H.: Bewegungsverhalten eines elastisch gelagerten Rotors mit innerer Dämpfung. Diss., TU München 1972.
- 94) PICHERT, H.: Elektronik im Haushalt - Theorie und Anwendung. Hauswirtsch. Wiss. Jg. 26 (1978) H. 2, S. 59-64.
- 95) PICHERT, H.: Haushaltstechnik. Stuttgart: Verlag E. Ulmer 1978.
- 96) PICHERT, H.: Optimierung der Kinematik von Schlag-, Rühr- und Knetwerkzeugen bei Küchenmaschinen. Hauswirtsch. Wiss. Jg. 29 (1981) H. 2, S. 101-109.
- 97) PICHERT, H.: Eine neue Prüfvorrichtung zur Messung der Festigkeit viscoser Schäume von Lebensmitteln. Z. Lebensm. Unters. Forsch. Bd. 169 (1979) S. 284-289.
- 98) PICHERT, H.: Schneidwerkzeuge im Haushalt. Aufbau, Wirkungsweise, Gebrauchstauglichkeit. Hauswirtsch. Wiss. Jg. 26 (1978) H. 6, S. 268-273.
- 99) PICHERT, H.: Standsicherheit von Küchenmaschinen. Experimentelle und analytische Beurteilungskriterien. Hauswirtsch. Wiss. Jg. 30 (1982) H. 4, S. 193-203.
- 100) PICHERT, H.; WILDBRETT, G.: Untersuchungen an Küchengeräten unter Berücksichtigung der Eigenschaften der zu bearbeitenden Lebensmittel. 1. Mitteilung: Grundlegende Untersuchungen zum Schlagen von Sahne. Hauswirtsch. Wiss. Jg. 24 (1976) H. 2, S. 60-65.
- 101) PICHERT, H.; WILDBRETT, G.: Untersuchungen an Küchengeräten unter Berücksichtigung der Eigenschaften der zu bearbeitenden Lebensmittel. 2. Mitteilung: Grundlegende Untersuchungen zum Schlagen von Eischnee. Hauswirtsch. Wiss. Jg. 25 (1977) H. 2, S. 60-66.
- 102) PROSS, H.: Die Wirklichkeit der Hausfrau. Reinbek: Rowohlt Verlag 1975. S. 14, 80-106.
- 103) RAUCH, W.: Eier. In: Tierische Lebensmittel. Handbuch der Lebensmittelchemie, Bd. 3, T. 2. Berlin: Springer-Verlag 1968. S. 879-927.
- 104) RAUCH, W.: Vergleichende Untersuchungen zur Qualitätsbeurteilung von Frischeiern. Archiv für Geflügelkunde Jg. 22 (1958) S. 74-104.
- 105) RENNER, E.: Mathematisch-statistische Methoden in der praktischen Anwendung. 2. Aufl. Berlin: Verlag P. Parey 1981.

- 106) RITTINGER, P. V.: Lehrbuch der Aufbereitungskunde. Berlin: Verlag von Ernst und Korn 1867. S. 19-24.
- 107) ROMANOFF, A. L.; ROMANOFF, A. J.: The Avian Egg. New York: J. Wiley and Sons, Inc. 1949. S. 61-110.
- 108) RUBNER, K.: Neudammer Forstliches Lehrbuch. Radebeul: Neumann-Verlag 1955. S. 602-605.
- 109) RUMPF, H.: Mechanische Verfahrenstechnik. München: Carl Hanser Verlag 1975. S. 22-25, 95, 111.
- 110) SCHAEFER, H.: Struktur und Analyse des Energieverbrauchs der Bundesrepublik Deutschland. Gräfelfing: Resch-Verlag 1980. S. 69-79, 116-182.
- 111) Das SCHNITZER-SYSTEM zur Wiederherstellung der natürlichen Gesundheitsgrundlagen. Hrsg. v.d. Schnitzer KG. 12. Aufl. Stuttgart: Schnitzer o.J.
- 112) SCHOLTYSSSEK, S.: Handbuch der Geflügelproduktion. Stuttgart: Verlag E. Ulmer 1968. S. 31-52.
- 113) SCHULZ, M. E.: Technologische Grundlagen zur Herstellung von Lebensmittelschäumen. Milchwiss. Jg. 26 (1971) H. 8, S. 481-486.
- 114) SCHULZE, A.: Sind die Prüfungsbestimmungen für Schlag- sahne und die DLG-Schlagsahneprüfungen wirklich markt- gerecht? Deutsche Molkerei-Zeitung Jg. 95 (1974) S. 590-591.
- 115) STATISTISCHES JAHRBUCH 1979. Hrsg. v. Statistischen Bundesamt. Stuttgart: Verlag W. Kohlhammer 1979.
- 116) STORCK, W.: Die Schlagsahne. Hildesheim: Milchwirtschaft- licher Verlag Th. Mann 1953. S. 53-75.
- 117) STORCK, W.: Schlagsahne - Sterilmilch. Molkereitechnische Schriftenreihe, Bd. 4 . Hildesheim: Verlag Th. Mann 1961. S. 56, 57, 68-75.
- 118) STROPPEL, Th.: Zur Systematik der Technologie des Schneidens. Grundlagen der Landtechnik (1953) H. 5, S. 120-134.
- 119) STÜBLER, E.: Aufriß einer Arbeitslehre des Haushalts. AID-Schriftenreihe, H. 176. Frankfurt: AID 1973. S. 9, 10.
- 120) STÜBLER, E.; HÜBSCHER, G.; EILENBURG, A.: Küchenmaschinen. Eine Gegenüberstellung von Hand- und Maschinenarbeit. Wissenschaftliche Schriftenreihe des AID, Bd. 15. Frankfurt: AID 1958.
- 121) SUDHOLT, H.; PISCHEL, J.: Die monatliche Schlagsahneprüfung. Molkerei- und Käserei-Zeitung (1959) H. 4, S. 85-88.

- 122) TODTENHAUPT, E. K.: Blasengrößenverteilung in technischen Begasungsapparaten. Chemie-Ing.-Techn. Jg. 43 (1971) H. 6, S. 336-342.
- 123) ULLRICH, H.: Mechanische Verfahrenstechnik. Berlin: Springer-Verlag 1967.
- 124) VDE 0730, T.2 G/H: Bestimmungen für Geräte mit elektromotorischem Antrieb für den Hausgebrauch und ähnliche Zwecke. Besondere Bestimmungen für Küchenmaschinen. Sept. 1976.
- 125) VLEESCHAUWER, A. de; DESCHACHT, W.; HENDRICKX, H.: Recherches sur la fabrication de la crème fouettée. Milchwiss. Jg. 16 (1961) H. 3, S. 125-127.
- 126) WENNER, H.-L. u.a.: Verfahrenstechniken. Die Landwirtschaft, Ausg. f. Bayern, Bd. 3. 7. Aufl. München: BLV Verlagsgesellschaft 1980.
- 127) WIENEKE, F.: Verfahrenstechnik der Halmfutterproduktion. Göttingen: Wieneke 1972. S. 96-145.
- 128) WILDBRETT, G.; PICHERT, H.: Untersuchungen an Küchengeräten unter Berücksichtigung der Eigenschaften der zu bearbeitenden Lebensmittel. 3. Mitteilung: Schlagen von Eischnee mit gefriergetrocknetem Eiklar. Hauswirtsch. Wiss. Jg. 27 (1979) H. 2, S. 72-76.
- 129) WILDBRETT, G. u.a.: Technologie der Reinigung im Haushalt. Stuttgart: Verlag E. Ulmer 1981. S. 39-59.
- 130) ZLOKARNIK, M.: Rohrrührer zum Ansaugen und Dispergieren großer Gasdurchsätze in Flüssigkeiten. Chemie-Ing.-Techn. Jg. 42 (1970) H. 21, S. 1310-1314.
- 131) ZLOKARNIK, M.; JUDAT, H.: Rohr- und Scheibenrührer - zwei leistungsfähige Rührer zur Flüssigkeitsbegasung. Chemie-Ing.-Techn. Jg. 39 (1967) H. 20, S. 1163-1168.

5.2 FORMELZEICHEN

(Auswahl der wichtigsten physikalischen Größen und Einheiten)

Physikalische Größe		SI-Einheit (außer []) (SI = Systéme International d'Unités)	
Formel- zeichen	Name	Kurz- zeichen	Name
A	Fläche	m ²	Quadratmeter
A	Absetzmenge	m ³	Kubikmeter
B	Breite	m	Meter
B	Beständigkeit	[%]	Prozent
D	Durchmesser	m	Meter
D	Durchgang, Massensumme	-	-
E	Elastizitätsmodul	$\frac{N}{m^2}$	Newton durch Quadratmeter
F	Kraft	N	Newton
F	"Schaumfestigkeit"	$\frac{s}{m}$	Sekunde durch Meter
H	Höhe	m	Meter
I	elektr. Stromstärke	A	Ampere
J	Massenträgheits- moment	kgm ²	Kilogramm-Quadratmeter
L	Länge	m	Meter
M	Moment, Drehmoment	Nm	Newtonmeter
MG	Mischgüte	-	-
N	Anzahl	-	-
Ne	Newtonzahl	-	-
O	Oberfläche	m ²	Quadratmeter
P	Leistung	W	Watt
Q	Wärme, Energie	J	Joule
\dot{Q}	Wärmestrom, Energiestrom	W	Watt
Q	Massenverteilung	kg	Kilogramm
Q	Füllmenge	m ³	Kubikmeter
R	Radius, Länge	m	Meter
R	Rückstand, Rest	kg	Kilogramm
Re	Reynoldszahl	-	-
T	Zeitdauer	s	Sekunde
TG	Trenngüte	-	-
U	Umfang	m	Meter

Physisikalische Größe		SI-Einheit (außer []) (SI = Système International d'Unités)	
Formel- zeichen	Name	Kurz- zeichen	Name
V	Volumen	m ³	Kubikmeter
\dot{V}	Volumenstrom	$\frac{m^3}{s}$	Kubikmeter durch Sekunde
V*	Volumenzunahme	[%]	Prozent
V _{pot}	potentielle Energie	J	Joule
V _{kin}	kinetische Energie	J	Joule
VK	Variationskoeffizient	[%]	Prozent
W	Arbeit, Energie	J	Joule
Z	Höhe	m	Meter
Z	Zahl, Zerkleine- rungsgrad	-	-
Z _i	Zahnrad-Überset- zungsverhältnis der Stufe i	-	-
a	Beschleunigung	$\frac{m}{s^2}$	Meter durch (Sekunde) ²
a	Abstand	m	Meter
b	Breite	m	Meter
c	Abstand	m	Meter
c	spezifische Wärme- kapazität	$\frac{J}{kgK}$	Joule durch Kilogramm Kelvin
d	Dicke, Durchmesser	m	Meter
e	Abstand	m	Meter
e	Basis der natürli- chen Logarithmen	-	e = 2,71828
f	Frequenz	$\frac{1}{s}$	reziproke Sekunde
g	Fallbeschleunigung	$\frac{m}{s^2}$	Meter durch (Sekunde) ²
g	Anteil (z.B. Massen-)	-	-
h	Höhe	m	Meter
i	Summationsindex	-	-
k	Anzahl, Stoßzahl, Konstante	-	-
k	Wärmedurchgangs- koeffizient	$\frac{W}{m^2K}$	Watt durch Quadratmeter Kelvin

Physikalische Größe		SI-Einheit (außer []) (SI = Syst�me International d'Unités)	
Formel- zeichen	Name	Kurz- zeichen	Name
k	Filterkennwert	$\frac{1}{m^2}$	reziproke Quadratmeter
k	Übergangs- koeffizient	$\frac{1}{s}$	reziproke Sekunde
l	Länge	m	Meter
ln	natürlicher Logarithmus	-	-
m	<i>Masse</i>	kg	Kilogramm
\dot{m}	Massenstrom	$\frac{kg}{s}$	Kilogramm durch Sekunde
m	Fliebeiwert	-	-
n	Drehfrequenz	$\frac{1}{s}$	reziproke Sekunde
n	Anzahl	-	-
p	Druck	$\frac{N}{m^2}$	Newton durch Quadratmeter
p_A	Flächenpressung	$\frac{N}{m^2}$	Newton durch Quadratmeter
q	Massendichte	$\frac{kg}{m}$	Kilogramm durch Meter
r	Abstand, Radius	m	Meter
s	Weg, Dicke, Abstand	m	Meter
s	Anzahl	-	-
t	Zeit	s	Sekunde
v	Geschwindigkeit	$\frac{m}{s}$	Meter durch Sekunde
w	Geschwindigkeit	$\frac{m}{s}$	Meter durch Sekunde
x	Längenkoordinate	m	Meter
x	Anteil (z.B. Massen-)	-	-
x_W	Wassermenge	$\left[\frac{g}{kg} \right]$	Gramm durch Kilogramm
y	Längenkoordinate	m	Meter
z	Längen bzw. Höhen- koordinate	m	Meter

Physikalische Größe		SI-Einheit (außer []) (SI = Système International d'Unités)	
Formel- zeichen	Name	Kurz- zeichen	Name
Σ	Summenzeichen	-	-
α	Winkel	rad	Radian (Bogenmaß) (1 rad = $\frac{180^\circ}{\pi}$)
β	Winkel	rad	(siehe α -Winkel)
γ	Winkel	rad	(siehe α -Winkel)
δ	Winkel	rad	(siehe α -Winkel)
ζ	Widerstandsziffer	-	-
η	Wirkungsgrad	-	-
η	dynamische Viskosität	$\frac{\text{Ns}}{\text{m}^2}$	Newtonsekunde durch Quadratmeter
ϑ	Temperatur	[°C]	Grad Celsius
κ	Kompressibilitäts- zahl, Massenanteil	-	-
χ	Schleudernzahl	-	-
δ	relativer Fehler	[%]	Prozent
μ	Reibungsbeiwert	-	-
π	Konstante	-	$\pi = 3,14159$
ρ	Dichte	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Kilogramm durch Kubik- meter
σ	Normalspannung	$\frac{\text{N}}{\text{m}^2}$	Newton durch Quadrat- meter
σ	Oberflächenspannung	$\frac{\text{N}}{\text{m}}$	Newton durch Meter
σ	Standardabweichung	→	je nach Bezug
σ^2	Varianz	→	je nach Bezug
τ	Schubspannung	$\frac{\text{N}}{\text{m}^2}$	Newton durch Quadrat- meter
φ	Drehwinkel, Phasenwinkel	rad	(siehe α -Winkel)
φ	Ausbeute, -grad	-	-
φ	relative Luft- feuchtigkeit	[%]	Prozent
ω	Winkelgeschwindig- keit, Kreisfrequenz	$\frac{\text{rad}}{\text{s}}$	Radian durch Sekunde