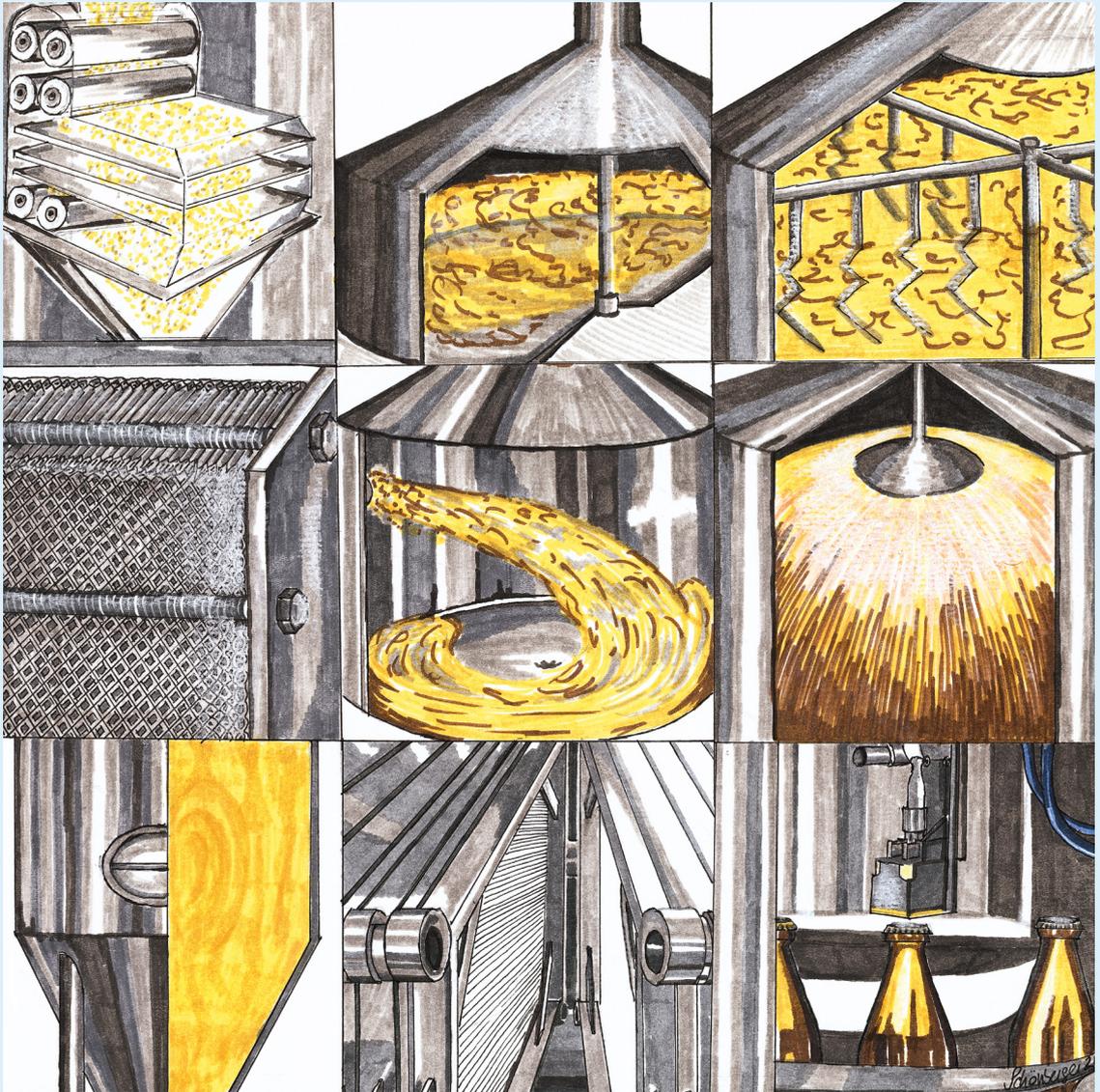


Prozesstechnik und Technologie in der Brauerei

Annette Schwill-Miedaner



FACHVERLAG
HANS CARL

PROZESSTECHNIK UND TECHNOLOGIE IN DER BRAUEREI

PROZESSTECHNIK UND TECHNOLOGIE IN DER BRAUEREI

Annette Schwill-Miedaner



IMPRESSUM

Haftungsausschluss

Alle Angaben in diesem Buch wurden von den Autoren nach bestem Wissen erstellt und gemeinsam mit dem Verlag mit größtmöglicher Sorgfalt überprüft. Dennoch lassen sich (im Sinne des Produkthaftungsrechts) inhaltliche Fehler nicht vollständig ausschließen. Die Angaben verstehen sich daher ohne jegliche Verpflichtung oder Garantie seitens der Autoren oder des Verlages. Autoren und Verlag schließen jegliche Haftung für etwaige inhaltliche Unstimmigkeiten sowie für Personen-, Sach- und Vermögensschäden aus.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

© 2021 Fachverlag Hans Carl GmbH, Nürnberg

Alle Rechte vorbehalten

Das Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung in elektronische Systeme.

Titelbild: Christina Schönberger

Layout und Satz: Komhus Agentur für Kommunikation, Essen

ISBN 978-3-418-00930-8

VORWORT

Der Brauprozess bzw. die Bierbereitung setzt sich aus einer Aneinanderreihung von verfahrenstechnischen Grundoperationen unter Einbeziehung von langjähriger brautechnologischer Wissenschaft zusammen. Mein erstes Buch „Verfahrenstechnik im Brauprozess“ hatte die Zielsetzung, diesen Zusammenhang aufzuarbeiten. Im folgenden Buch „Prozesstechnik und Technologie in der Brauerei“ bleibt dieser Leitgedanke erhalten. Allerdings ergibt sich aufgrund von Entwicklungsarbeiten im Bereich der Sudhaustechnik der letzten 6 Jahre eine Schwerpunktverschiebung hin zur Technologie.

Desweiteren werden die Kapitel zur Filtrations- und Stabilisierungstechnik aktualisiert.

Das Buch wendet sich gleichermaßen an die Studierenden des Brauwesens wie an die Praktiker in Brauereien und Zulieferindustrie und soll als kompaktes Nachschlagewerk dienen. Neben der verfahrenstechnischen Betrachtung werden auch grundlegende hydrodynamische, thermodynamische, physikalisch-chemische und technologische Zusammenhänge aufgegriffen. Die Optimierung der Qualität des Endprodukts Bier steht dabei stets im Vordergrund.

Herrn Dipl.-Ing. Josef Englmann und Herrn Prof. Dr.-Ing. Heinz Miedaner danke ich für die Diskussionsbereitschaft im technisch-technologischen Bereich.

Folgenden Personen und Firmen möchte ich für den regen Informationsaustausch und für die Bereitstellung von Bildmaterial danken:

Dipl.-Ing. Friedrich Banke, Banke process solutions
Dipl.-Ing. Tobias Becher, Ziemann Holvrieka GmbH
Dipl.-Ing. Christoph Föhr, Filtrox AG
Dipl.-Brmstr. Christian Galaske, Lehmann&Voss&Co. KG
Dipl.-Brmstr., Dipl.-Ing. Reiner Gaub, Pall GmbH
Dr.-Ing. Frank Hebmüller, Ingenieurbüro Hebmüller GmbH
Dipl.-Ing. Wolf-Dietrich Herberg, GEA Westfalia Separator Group GmbH
Dipl.-Ing. FH Michael Kurzweil, Ziemann Holvrieka GmbH
Dipl.-Ing. Matthias Lustnauer, Eaton Technologies GmbH
Dr.-Ing. Rudolf Michel, GEA Brewery Systems GmbH
Dipl.-Ing. Michael Rittenauer, Bühler GmbH
Dr.-Ing. Ralph Schneid, Krones AG
Norbert Scholten, SF-SoepenberG GmbH
Dipl.-Ing. Clemens Thüsing, Künzel Maschinenbau GmbH
M. Eng. Isabel Wasmuht, Ziemann Holvrieka GmbH
Brmstr. Klaus Wasmuht
Pentair Flow and Filtration Solutions
Albert Handtmann Armaturenfabrik GmbH & Co.KG

Sonthofen, im Juli 2021

INHALT

1	Zerkleinern – Schroten	13
1.1	Allgemeines	13
1.2	Bruchmechanische Grundlagen	13
1.3	Einteilung der Zerkleinerungsprozesse und Beanspruchungsarten	19
1.4	Zerkleinerungsmaschinen	21
1.4.1	Trockenzerkleinerung	22
1.4.1.1	Walzenmühlen	22
1.4.1.2	Prallmühlen	25
1.4.2	Nasszerkleinerung	28
1.4.2.1	Dispergiermaschinen	28
1.4.2.2	Rührwerkskugelmühle	30
1.4.2.3	Nassschrotung	31
1.5	Charakterisierung des zerkleinerten Produkts	33
1.5.1	Partikelgrößenverteilung	34
1.5.2	Kontrolle der Zerkleinerung (Analysenmethoden)	36
1.5.2.1	Siebturm	36
1.5.2.2	Luftstrahlsieb	36
1.5.2.3	Laserbeugungsspektrometer (Streulichtmessung)	37
1.5.2.4	Bildanalyse	38
1.6	Zerkleinerung des Malzes	38
1.6.1	Aufgaben	38
1.6.2	Malzlösung	39
1.7	Praktische Anwendung von selektiven Zerkleinerungstechniken	43
1.7.1	Einfluss des Spelzeneintrags auf den Brauprozess	43
1.7.2	Einfluss des Blattkeims auf den Brauprozess	43
	Literatur	45
2	Maischen	47
2.1	Kennzeichnung der Stoffsysteme	47
2.2	Verfahrenstechnische Ziele des Maischens	47
2.2.1	Wärmeübertragung	47
2.2.2	Stoffübertragung	52
2.3	Ausführung von Maischgefäßen	56
2.4	Prozessparameter - Bierqualität	57
2.5	Reaktionskinetik	61
2.5.1	Grundlagen	61
2.5.2	Untersuchungen zur Zeitoptimierung von Maischverfahren	62
2.5.2.1	Stärkeabbau	65
2.5.2.2	Eiweißabbau	71
2.5.2.3	β -Glucanabbau	72
2.5.2.4	Schlussfolgerung zur Zeitoptimierung von Maischverfahren	74
	Literatur	77

3 Rühren	81
3.1 Sedimentation im Schwerefeld	81
3.2 Rührertypen	84
3.3 Rührerleistung	90
3.4 Turbulenz und mechanische Beanspruchung	91
3.4.1 Theorie	91
3.4.2 Betrachtungen zur mechanischen Belastung der Maische	94
3.5 Rheologie	98
3.5.1 Theorie	98
3.5.2 Viskositätsbestimmung in der Maische	101
Literatur	105
4 Kontinuierliches Maischen	107
4.1 Theoretische Grundlagen	107
4.2 Ermittlung der Verweilzeitspektren einer 2-stufigen Rührkesselnkaskade	109
4.3 Kontinuierlicher Maischversuch	112
Literatur	113
5 Abläutern	115
5.1 Theoretische Grundlagen	115
5.1.1 Sedimentation im Schwerefeld	116
5.1.2 Filtration	117
5.1.3 Stofftransport	118
5.2 Der Läuterbottich	118
5.3 Untersuchungen zur Durchlässigkeit von Treberschichten in Läuterbottichen	123
5.4 Der Maischefilter	127
5.5 Alternative Trennsysteme	130
5.5.1 Kontinuierliches Abläutern mit Dekanter	130
5.5.2 Dynamische Membranfiltration	134
5.5.2.1 Trennsystem mit oszillierenden Membranen	134
5.5.2.2 Trennsystem mit Drehscheibenfiltern	134
Literatur	137
6 Würzekochung	139
6.1 Ausdampfverhalten von Aromastoffen bei der Würzekochung	139
6.1.1 Atmosphärische Kochung	142
6.1.2 Entspannungsverdampfung	142
6.1.3 Verdunstung	145
6.2 Wärmeübertragung	145
6.2.1 Dampfseitiger Wärmeübergang	145
6.2.2 Produktseitiger Wärmeübergang	148
6.3 Heißhalten der Würze	149
6.3.1 Thermische Belastung – Thiobarbitursäurezahl (TBZ)	149
6.3.2 Eiweißausscheidung – Koagulierbarer Stickstoff	150
6.3.3 Isomerisierung – Bitterstoffe	153
6.3.4 Entfernung flüchtiger Würzeinhaltsstoffe – Dimethylsulfid (DMS)	153

6.4	Kochsysteme	153
6.4.1	Außenkocher	155
6.4.2	Innenkocher (Robertverdampfer, Naturumlaufverdampfer)	156
6.4.2.1	Jet-Star® (submerged jet)	160
6.4.2.2	Stromboli®	160
6.4.2.3	Shark®	161
6.4.3	Niederdruckkochung	162
6.4.3.1	Dynamische Niederdruckkochung (NDK)	163
6.4.4	Hochtemperaturwürzekochung (HTWK)	163
6.4.5	Dünnschichtverdampfer (Merlin®)	164
6.4.6	Externe Hopfenisomerisierung	165
6.5	Beurteilung von Würzekochsystemen	167
6.6	Maßnahmen zur Wärmerückgewinnung	169
6.6.1	Energiespeicher	169
6.6.2	Würzekochung und Brüdenverdichtung	171
6.7	Korrektur der Würzearomastoffe	171
6.7.1	Verdampfung im Vakuum	172
6.7.1.1	Entspannungskühler	172
6.7.1.2	Vakuumnachverdampfung	172
6.7.1.3	Schonkochverfahren	173
6.7.2	Volatile Stripping mittels Gas	174
6.7.2.1	Stripping mittels Dampf	174
6.7.2.2	Stripping System Boreas®	174
6.7.3	Dünnschichtverdampfung	175
6.7.4	Schaffung großer Oberflächen	175
6.7.5	Unterdrückung der Nachbildung von Aromastoffen	176
6.8	Das Sudhauskonzept OMNIUM®	177
Literatur		184
7	Heißtrubentfernung	187
7.1	Whirlpool	187
7.2	Alternative Trennapparate	190
Literatur		192
8	Würzekühlung	193
Literatur		195
9	Belüftung	197
Literatur		199
10	Kühltrubentfernung	201
Literatur		202

11 Gärung und Reifung	203
11.1 Allgemein	203
11.2 Kontinuierliche Verfahren	209
11.2.1 Coutts-Verfahren (Zulaufverfahren)	211
11.2.2 APV-Gärturm (Durchlaufverfahren)	212
11.2.3 Bio-Brew-Verfahren (Durchlaufverfahren)	212
11.2.4 Optimiertes Bio-Brew-Verfahren	214
11.2.5 Immobilisierung	214
11.2.6 Reaktortypen	215
11.3 Regelung und Optimierung von Gärung und Reifung	216
11.4 Kalthopfung	220
Literatur	221
12 Filtration	223
12.1 Prinzip	223
12.2 Filtrationsarten	223
12.3 Theoretische Modellbeziehungen	224
12.4 Kuchenfiltration	225
12.4.1 Konstanter Volumenstrom ($dV/dt = \text{konst.}$)	226
12.4.2 Konstanter Druck ($\Delta p = \text{konst.}, V_2 \sim t$)	227
12.4.3 Filtration mit veränderlichem Druck und veränderlicher Leistung	227
12.5 Filtration in der Praxis	228
12.5.1 Vorfiltration	232
12.5.2 Filterbauarten	232
12.5.2.1 Kieselgurschichtenfilter	233
12.5.2.2 Horizontalfilter (Drahtgewebefilter)	233
12.5.2.3 Kerzenfilter	234
12.5.2.3.1 Spaltfilter	234
12.5.2.3.2 Kerzenfilter mit Drahtspirale	234
12.5.2.3.3 Kerzenfilter System Twin-Flow®	234
12.5.3 Membranfiltration	236
12.5.3.1 Cross-Flow-Filtration	236
12.5.3.2 Scherspaltfilter	246
12.5.3.3 Filter mit oszillierenden Membranen (VMF-Verfahren)	246
12.5.4 Nachfiltration	247
Literatur	250
13 Stabilisierung	253
Literatur	256

14 Probennahme	259
14.1 Die Bedeutung der Probennahme im Brauprozess	259
14.2 Probennahme und Probenteilung	260
14.3 Eingangskontrolle am Beispiel Malz	263
14.4 Zwischenproduktkontrolle	265
14.4.1 Schrotprobe	265
14.4.2 Treberprobe	266
14.4.3 Pfanne-Voll-Würze	266
14.4.4 Ausschlagwürze	267
14.4.5 Heißwürze nach dem Whirlpool	269
14.4.6 Kühlmittewürze	269
14.4.7 Kaltwürze	269
14.4.8 Reifungsprobe	271
Literatur	274
15 Anhang	275
15.1 Formelzeichen und Abkürzungen	275
15.2 Gebrauchsformeln für den Wärmeübergang (Quelle: Lehrstuhl V.d.S., Weihenstephan)	279
15.2.1 Strömung in Rohren	279
15.2.2 Strömung längs einer ebenen Wand	280
15.2.3 Umströmter Einzelkörper (Kugel)	280
15.3 Stoffwerte	281
15.4 Wasserdampf tabel	282
15.5 A_R - Q -Diagramm	283
Register	284

1 ZERKLEINERN – SCHROTEN

1.1 ALLGEMEINES

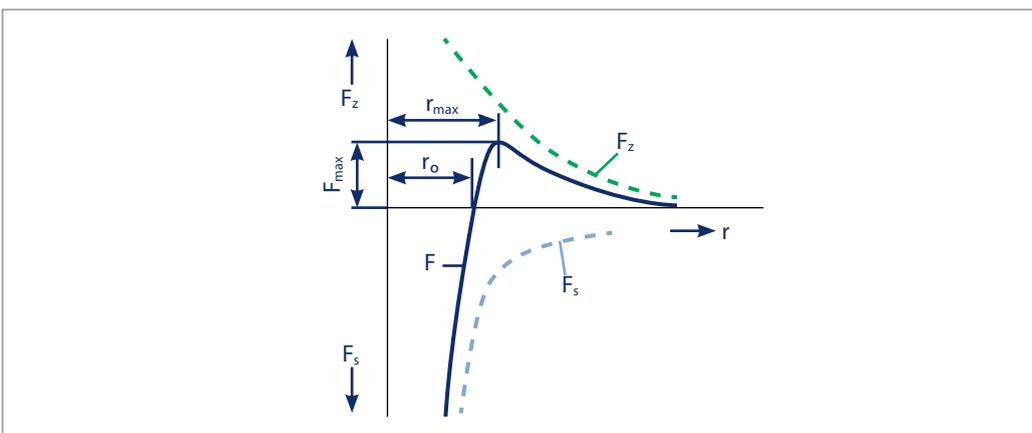
Zerkleinerungsprozesse spielen bei der Verarbeitung von festen Stoffen in zahlreichen Industriebereichen (Baustoffindustrie, Bergbau, chemische und pharmazeutische Industrie, Lebensmittelindustrie usw.) eine maßgebliche Rolle. Der Vorgang des Zerkleinerns ist Bestandteil des Produktionsablaufs. Er liefert die Basis für weitere verfahrenstechnische Schritte (z. B. Sortieren, Mischen, Agglomerieren) und thermische und/oder chemische Umsetzungen. Man definiert die Zerkleinerung als das Zerteilen eines Feststoffgefüges in Teilstücke unter der Wirkung mechanischer Kräfte [1.1]. Damit ist eine Vergrößerung der spezifischen Oberfläche des zu zerkleinernden Guts, eine Verringerung der Korngrößen bzw. eine Veränderung der Korngrößenverteilung verbunden. Der neue Dispersitätszustand beeinflusst die nachfolgenden Prozesse (z. B. Maischen, Läutern). Infolge der vergrößerten Oberfläche können physikalische und chemische Reaktionen schneller ablaufen. Ob dies bei der Würzebereitung zutrifft, wird an späterer Stelle brautechnologisch diskutiert. Weiterhin tritt durch die Zerkleinerung u. a. eine Veränderung der Fließfähigkeit und Mischbarkeit sowie bestimmter Austauschvorgänge ein.

1.2 BRUCHMECHANISCHE GRUNDLAGEN

Als Bruch wird die zum Verlust der Tragfähigkeit eines Festkörpers führende Stofftrennung im makroskopischen Bereich definiert, bei dem durch äußere oder innere mechanische Spannungen die atomaren bzw. molekularen Bindungen aufgehoben werden [1.2]. Jedem Bruch geht eine Deformation in der beanspruchten Zone voraus. Damit ist die zur Zerkleinerung erforderliche Energie von der Größe des deformierten Bereichs, von den elastischen Eigenschaften des beanspruchten Festkörpers und von der Beanspruchungsart abhängig. Der Bruchvorgang basiert unter Annahme idealer Bedingungen auf folgender Vorstellung [1.2, 1.3]:

Ein fester Körper setzt sich aus einer Vielzahl kleinster Elementarteile zusammen z. B. Ionen, Atome, Moleküle, Kristalle. Seine Elastizität wird durch die Kraftwirkungen zwischen den Elementarteilen, den inneren Kräften (Gitterkräfte) bestimmt. Als mögliche Bindungsart unterscheidet man kovalente Bindungen, Ionenbindungen, metallische Bindungen und Van-der-Waals-Bindungen. Die aus der Deformation der inneren Elektronenschalen resultierenden abstoßenden Kräfte F_s und die aus der Massewirkung resultierenden anziehenden Kräfte F_z wirken als innere Kräfte. Wenn auf den Feststoffkörper keine äußeren Kräfte einwirken, stehen die inneren Kräfte im Gleichgewicht. Die Elementarteilchen nehmen dann einen bestimmten Abstand r_0 zueinander ein (Abb. 1.1).

Abb. 1.1: Schematische Darstellung der Kraftwirkungen zwischen benachbarten Elementarteilchen eines Feststoffkörpers [1.2]

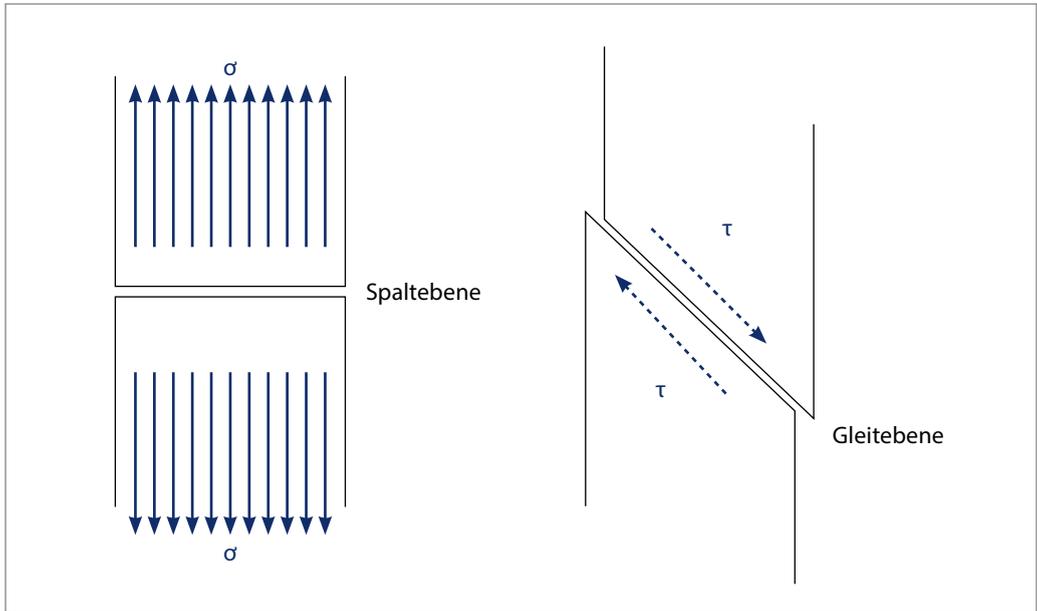


Der Bruch tritt ein, wenn die Wechselwirkungskraft F_{\max} bei r_{\max} überwunden wird. Die inneren Kräfte stehen nun nicht mehr im Gleichgewicht zueinander. Die Einwirkung von äußeren Kräften in Form von Zug- oder Schubspannungen (Abb. 1.2) führt zwischen den Elementarteilchen zu einer Abstandsvergrößerung $r > r_{\max}$. Zur Einleitung des Bruchs muss einem Feststoffteilchen die nach Gleichung (1.1) ermittelte Bruchenergie zugeführt werden.

$$W_{Br} = \int_{r_o}^{r_{\max}} F(r) dr \tag{1.1}$$

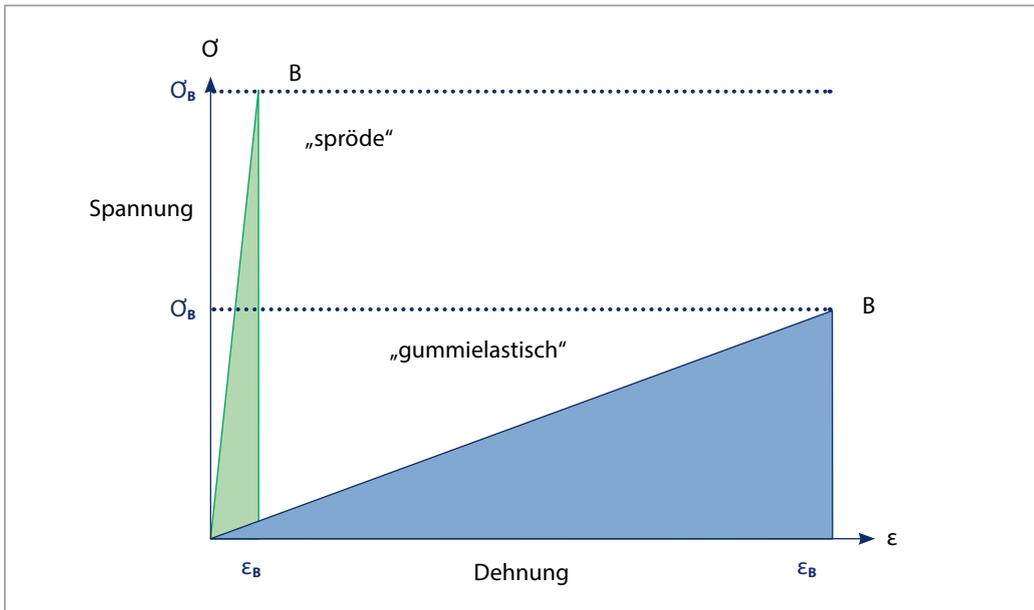
- W_{Br} = Bruchenergie
- r = Abstand zwischen den Elementarteilchen
- r_o = Abstand zwischen den Elementarteilchen im Ruhezustand
- r_{\max} = Abstand zwischen den Elementarteilchen beim Einsetzen der Rissbildung
- F = Kraft

Abb. 1.2: Bruchverhalten (Trennbruch, Gleitbruch)



Der Zerkleinerungsvorgang kann in zwei Abschnitte unterteilt werden. Zuerst erfolgt die elastische Deformation in der Bruchzone, wodurch die zum Bruch erforderlichen Spannungen aufgebaut werden. Darauf folgt der eigentliche Bruchvorgang, der neue Grenzflächen schafft.

Abb. 1.3: Linear-elastisches Materialverhalten nach [1.4]



Man unterscheidet drei verschiedene Arten des Materialverhaltens von festen Stoffen: linear-elastisches, elastisch-plastisches und visko-elastisches Verhalten. Beim linear-elastischen Materialverhalten (Abb. 1.3) besteht eine Proportionalität zwischen der Dehnung ϵ und der Spannung σ .

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad \text{Hooke'sches Gesetz} \quad (1.2)$$

$$\epsilon = \frac{\Delta x}{x} \quad (1.3)$$

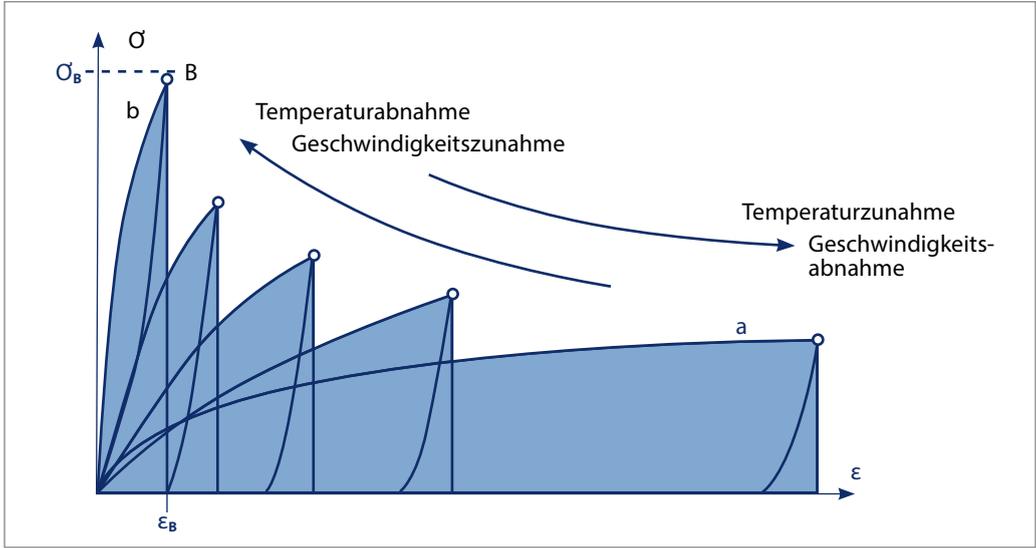
σ = Bruchspannung
 E = Elastizitätsmodul
 Δx = Längenänderung unter Krafteinwirkung
 x = charakteristische Abmessung

Spröde Stoffe haben ein hohes Elastizitätsmodul E (Stoffwert). Dem Sprödebruch geht nur eine geringe Verformung voraus. Nach einem kurzen Verformungsweg (Dehnung ϵ_B) baut sich eine hohe Spannung auf, was beim Erreichen der Bruchspannung σ_B einen Materialbruch zur Folge hat. Gummielastische Stoffe dagegen erfahren bereits durch kleine Spannungen eine deutliche Verformung, die Rissausbreitung schreitet langsam voran [1.4]. Die jeweils eingezeichnete Fläche unter σ - ϵ stellt die auf die Volumeneinheit bezogene eingebrachte Energie (erforderliche Zerkleinerungsarbeit bis zum Erreichen des Bruchs) dar.

$$W_{B,\sigma} = \int_0^{\epsilon_B} \sigma(\epsilon) \cdot d\epsilon \quad (1.4)$$

Malz erfordert, bedingt durch seine spröden Eigenschaften, infolgedessen einen geringeren Energieaufwand zur Zerkleinerung als z. B. unvermälzte Gerste [1.5]. Der aus energetischen Gründen günstigere Spröbruch (Gegensatz Zähbruch, besteht beim Gleitbruch) hängt, neben dem Material, von der Temperatur, der Beanspruchungsgeschwindigkeit und der Ausgangskorngröße ab.

Abb. 1.4: Visko-elastisches Materialverhalten [1.4]



Visko-elastische Stoffe zeichnen sich dadurch aus, dass sie sich bei langsamer und lang andauernder Beanspruchung (Zeitabhängigkeit) ausdehnen und im Inneren gleichzeitig Spannungen abbauen (Relaxation), was entsprechende spezifische Arbeit erfordert (Abb. 1.4, Kurve a). Bei hoher Beanspruchungsgeschwindigkeit und kurzer Dauer tritt die energetisch günstigere Versprödung ein (Kurve b). Den gleichen Effekt hat eine Temperaturerniedrigung.

Abb. 1.5: Bruchphänomene bei elastisch-sprödem Materialverhalten [1.6]

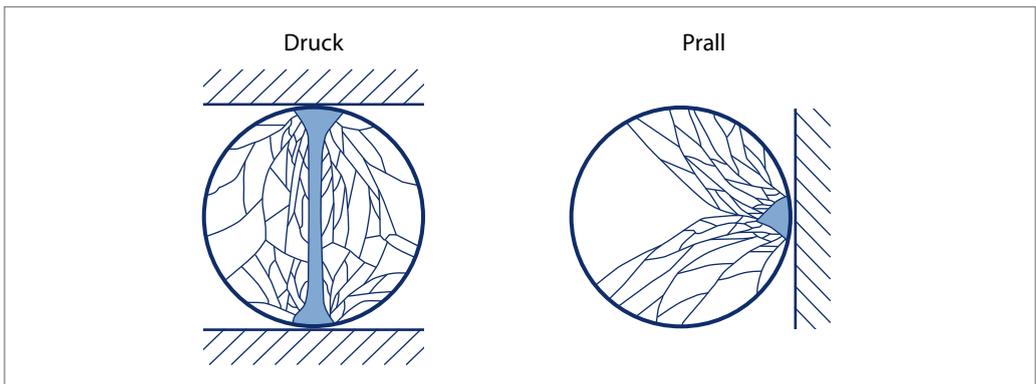


Abb. 1.5 zeigt Bruchbilder bei Einzelkornbeanspruchung durch Druck oder Prall bei elastisch-sprödem Materialverhalten. Während beim Druck Risse von einer Kontaktstelle zur anderen verlaufen, wandern beim Prall die Risse divergent von der Kontaktstelle in die Partikel. Der Bruch beginnt mit einem Riss

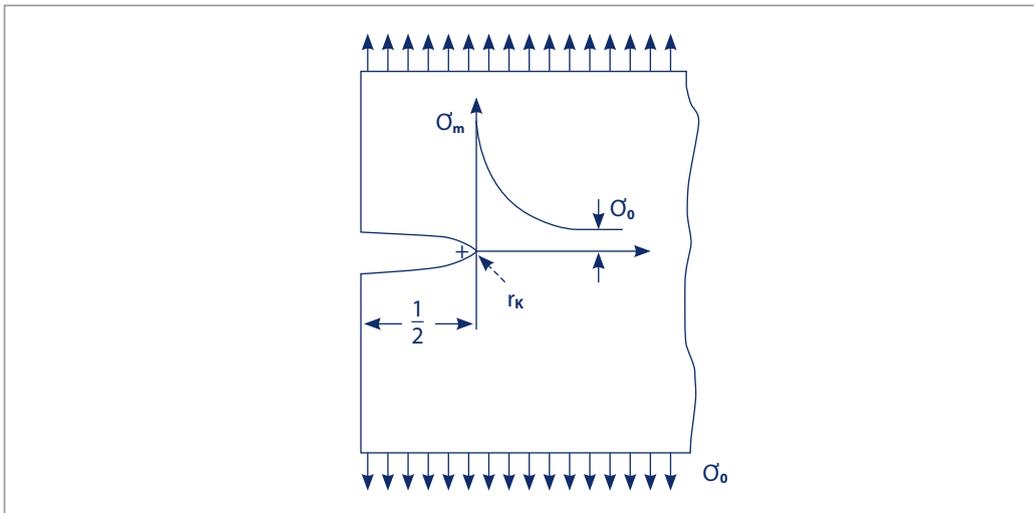
(Primärbruch), der sich mehrmals verzweigt (Sekundärbrüche). Dann entsteht in den Kontaktbereichen ein Bruchfeld mit großer Rissdichte (blaue Fläche), wodurch Feingut erzeugt wird. Bei großen Kugeln hoher Festigkeit bilden sich zwei berührende Feingutkegel aus.

Die theoretischen zum Bruch erforderlichen Spannungen lassen sich bei Zugbelastung des Materials

mit $\sigma = \frac{E}{10}$ und bei Scherbeanspruchungen mit $\tau = \frac{G}{10}$ (G Schubmodul) abschätzen [1.2].

Die in der Praxis erforderlichen Bruchspannungen liegen um zwei bis drei Zehnerpotenzen niedriger als die theoretische Bruchspannung, da reale Körper im Gitteraufbau Inhomogenitäten aufweisen. Diese können aus Gitterfehlern, Korngrenzen oder Anrissen bestehen. Infolge der Störungen im Kristallgitter liegt im beanspruchten Körper eine inhomogene Spannungsverteilung vor. Die Kraftlinien weichen den Störstellen aus und konzentrieren sich vermehrt an den Spitzen der Risse. An diesen Stellen treten dadurch Spannungsspitzen auf, die ein Mehrfaches des theoretischen Mittelwerts der Bruchspannung betragen. Hier ist die Bruchgrenze bereits bei geringer äußerer Beanspruchung überschritten. Der Bruch beginnt an diesen hoch belasteten Stellen (Kerbwirkung) und breitet sich von dort aus. Abb. 1.6 verdeutlicht die Gegebenheiten für einen Anriss in einer ebenen Platte, die von außen mit der zum Bruch erforderlichen Zugspannung σ_0 beaufschlagt ist. Demnach verläuft die Ausbreitung eines bereits vorliegenden Primärrisses schon bei Spannungen, die deutlich unter der theoretischen Bruchspannung liegen. Die Spannungsüberhöhung an der Risssspitze wird umso größer, je länger der Anriss l und je kleiner der Krümmungsradius r_k der Risssspitze ist [1.4, 1.7].

Abb. 1.6: Spannungsverteilung an der Risssspitze
(ebene Platte, linear-elast., halb ellipt. Anriss) [1.4]



l = Länge des ganzen Anrisses

r_k = Kerbradius

σ_m = Maximalspannung an der Risssspitze

σ_0 = homogene Belastung der Probe

$$\frac{\sigma_m}{\sigma_0} = 1 + 2 \cdot \sqrt{\frac{l}{2 \cdot r_k}} \quad (1.5)$$

Mit abnehmender Korngröße infolge weiterer Zerkleinerung ist eine geringere Zahl an Fehlstellen verbunden, wodurch die Festigkeit des Mahlguts zunimmt und zur weiteren Zerkleinerung eine höhere spezifische Arbeit erforderlich ist. Schließlich wird die Mahlbarkeitsgrenze erreicht, die für viele Materialien bei 1 bis 5 µm liegt. In diesem Bereich treten plastische Verformungen, aber keine Brüche mehr auf. Die Zerkleinerung stellt einen sehr energieintensiven Vorgang dar. Nur ein geringer Teil der einer Zerkleinerungsapparatur zugeführten Energie wird als Nutzarbeit verbraucht. Die technische Zerkleinerungsarbeit W_{ges} setzt sich zusammen aus:

$$W_{ges} = W_A + W_{VZ} + W_{VM} \tag{1.6}$$

W_A = Grenzflächenenergie zum Trennen der Elementarteilchen

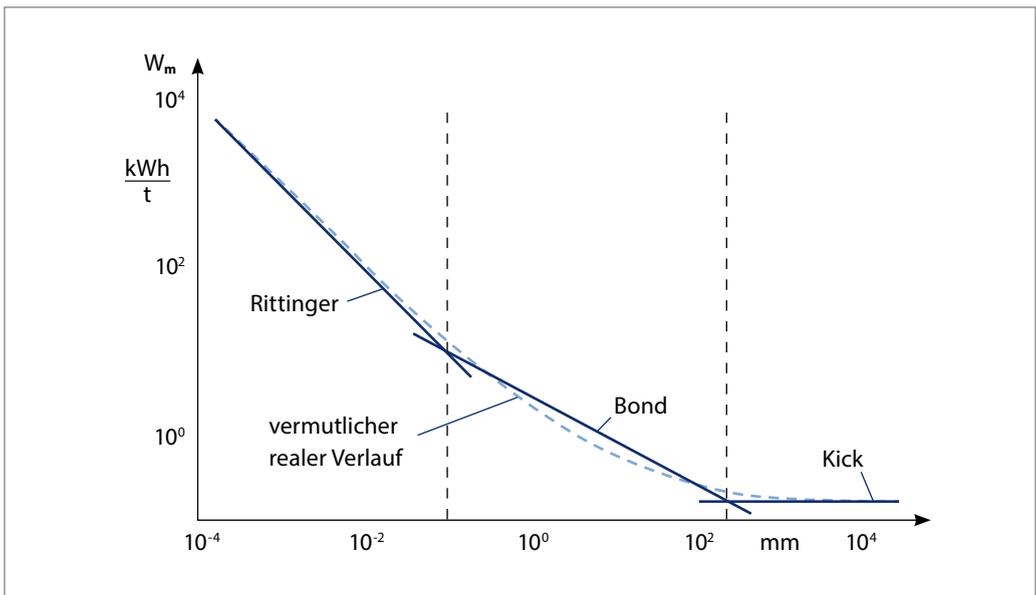
W_{VZ} = zerkleinerungstechnische Verlustarbeit

(z. B. plastische Deformation der Körner ohne Bruch, Reibung der Körner untereinander)

W_{VM} = maschinentechnische Arbeitsverluste (z. B. Reibungsverluste der Antriebselemente)

Erste Ansätze zur Berechnung der Zusammenhänge zwischen der Zerkleinerungsarbeit und der neu geschaffenen Oberfläche bzw. Partikelgröße erarbeiteten Rittinger, Kick und später Bond [1.6] (Abb. 1.7). Die komplette mathematische Erfassung der Zerkleinerungsvorgänge für ein Körnerkollektiv ist, im Gegensatz zur Betrachtung des Einzelkorns [1.8], bis heute nicht möglich, sodass man sich nach wie vor auf Versuchsreihen und die Empirie der Mühlenbauer stützt.

Abb. 1.7: Spezifische Zerkleinerungsarbeit in Abhängigkeit von der Korngröße [1.6]



1.3 EINTEILUNG DER ZERKLEINERUNGSPROZESSE UND BEANSPRUCHUNGSARTEN

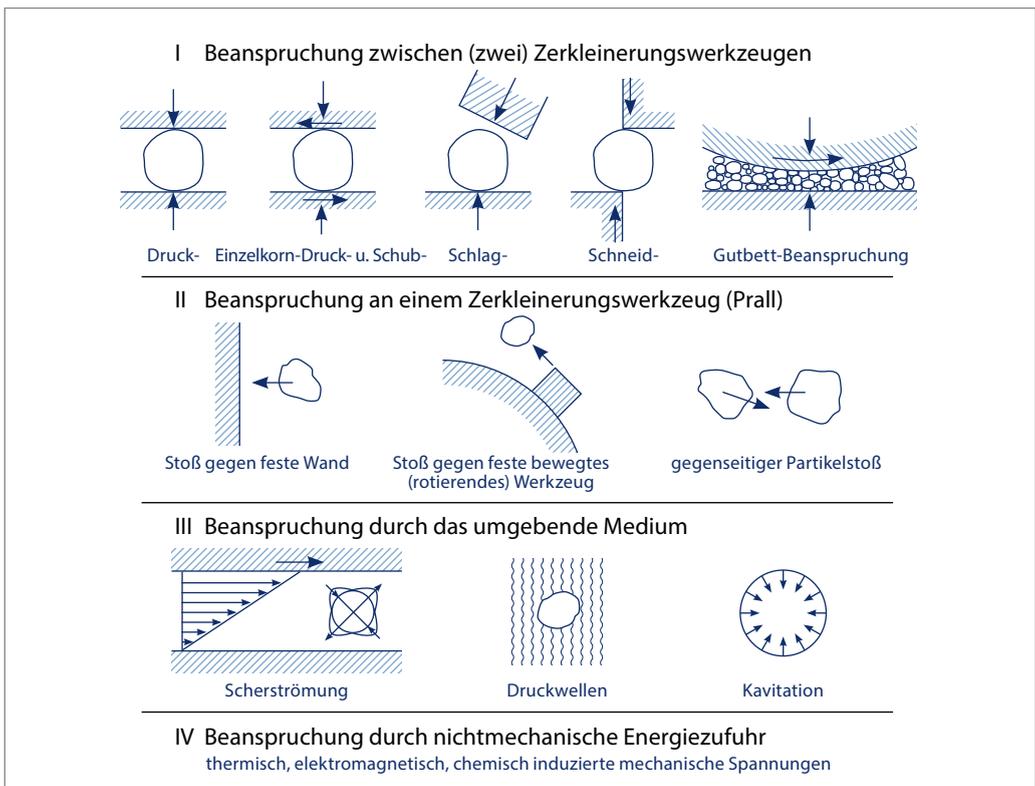
Die Einteilung der Zerkleinerungsprozesse kann nach der Festigkeit der zu zerkleinernden Produkte, der Beanspruchungsart und der Korngröße der zerkleinerten Produkte erfolgen. Je nach der stofflichen Widerstandskraft gegenüber mechanischer Beanspruchung wird in Hart-, Mittel- und Weichzerkleinerung unterschieden (Tab. 1.1). Demnach unterliegt das Produkt Malz der Weichzerkleinerung.

Tab. 1.1: Einteilung der Zerkleinerungsprozesse nach Härtegraden [1.2]

	Hart-zerkleinerung	Mittelhart-zerkleinerung	Weich-zerkleinerung
Mohshärte	6–10	2–5	1–2
Beispiele	Quarz Zementklinker Topas Korund	Salze Kalkstein Kohle Schwefel	Kalk Gips Getreide Faserstoffe

Den einzelnen Zerkleinerungsverfahren können Beanspruchungsmechanismen zugeordnet werden, die sich in Art, Größe und Geschwindigkeit des mechanischen Angriffs unterscheiden (Abb. 1.8). Die Beanspruchung des zu zerkleinernden Materials ist je nach seinen physikalischen Eigenschaften durch Druck, Druck-Schub, Schlagen, Schneiden, Stoß (Prall), Scherung oder durch die Kombination verschiedener Beanspruchungsarten gegeben.

Abb. 1.8: Beanspruchungsarten nach RUMPF [1.4]



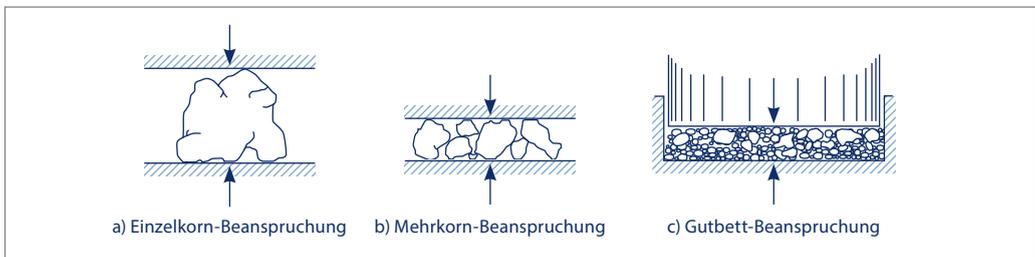
Bei der Beanspruchung zwischen zwei Zerkleinerungswerkzeugen wird die Partikel einer Druckbelastung oder einer kombinierten Druck-Schub-Belastung (Kategorie I) ausgesetzt (Abb. 1.8). Die Zerkleinerung erfolgt bei Druckbelastung durch das Überschreiten der Druckfestigkeit des Kornes. Die Beanspruchungsintensität wird maßgeblich durch die Form der Partikeln beeinflusst und weniger durch die Geschwindigkeit.

Bei der Prallzerkleinerung geschieht die Beanspruchung der Partikeln über Stoßvorgänge (Kategorie II). Die Zerkleinerung erfolgt durch ein bewegtes Werkzeug (z. B. Hammermühle), Stoß gegen eine Prallfläche oder gegenseitigen Partikelstoß. Die Beanspruchungsintensität ist von der Geschwindigkeit abhängig.

Die Kräfte bei der Zerkleinerung durch das umgebende Fluid (Kategorie III) sind im Vergleich zur Zerkleinerung der Kategorie I und II geringer. Das Zerkleinerungsergebnis beruht hierbei auf unsymmetrischen Druck- und Zugbelastungen, die durch eine Scherströmung erzeugt werden. Bei turbulenten Strömungen treten zeitlich und örtlich stark schwankende Belastungen auf.

Die Zerkleinerung kann auch durch Stoßwellen in Fluiden z. B. durch Druckstöße oder infolge von Kavitation hervorgerufen werden.

Abb. 1.9: Beanspruchungsarten in Maschinen [1.6]

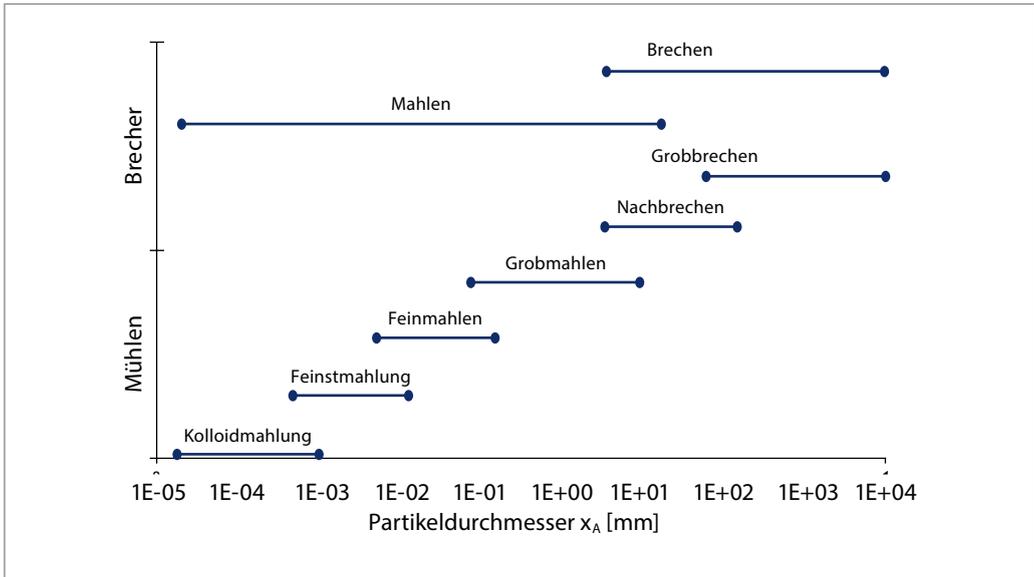


Weiter kann bei Beanspruchungsarten zwischen Einzel-, Mehrkorn- und Gutbettbeanspruchung unterschieden werden (Abb. 1.9). Bezüglich der Energieausnutzung ist eine Einzelkornbeanspruchung anzustreben. Diese ist jedoch nur bei Brechern und bei der Prallzerkleinerung gegeben. Bei der Mehrkornbeanspruchung wird die einwirkende Kraft über zahlreiche Kontaktstellen übertragen, was bei Walzenmühlen der Fall ist. Es liegt eine gegenseitige Beeinflussung der Körner (Abstützung, Reibung) und eine scheinbare Festigkeitserhöhung vor. Dieser Effekt wird bei der Gutbettbeanspruchung durch übereinanderliegende Partikelschichten noch verstärkt.

Die Zerkleinerung kann nach der Korngröße des zerkleinerten Guts (Endfeinheit) in mehrere Bereiche unterteilt werden. Folgende Einteilung ist möglich [1.1, 1.9]:

Grobbrechen	> 50 mm
Feinbrechen	5...50 mm
Grobmahlen (Schroten)	0,5...5 mm
Feinmahlen	50...500 μm
Feinstmahlen	5...50 μm
Kolloidmahlen	< 5 μm

Abb. 1.10: Zerkleinerungsbereiche nach Korngröße des Aufgabeguts [1.2, 1.10]



1.4 ZERKLEINERUNGSMASCHINEN

Die Zerkleinerungsmaschinen können nach Dispersitätsbereich, Beanspruchungsart und konstruktiven Merkmalen unterschieden werden. Demnach werden Brecher der Grobzerkleinerung und Mühlen der Feinzerkleinerung zugeordnet, wobei die Grenze fließend ist (Abb.1.10, Tab. 1.2). Zu den konstruktiven Merkmalen zählt, dass Brecher große Kontaktkräfte haben, die spezifische Zerkleinerungsarbeit jedoch klein ist. Mühlen verfügen über kleine Kontaktkräfte. Allerdings ist die spezifische Zerkleinerungsarbeit beträchtlich [1.11].

Tab. 1.2: Einteilung der Zerkleinerungsmaschinen [1.11]

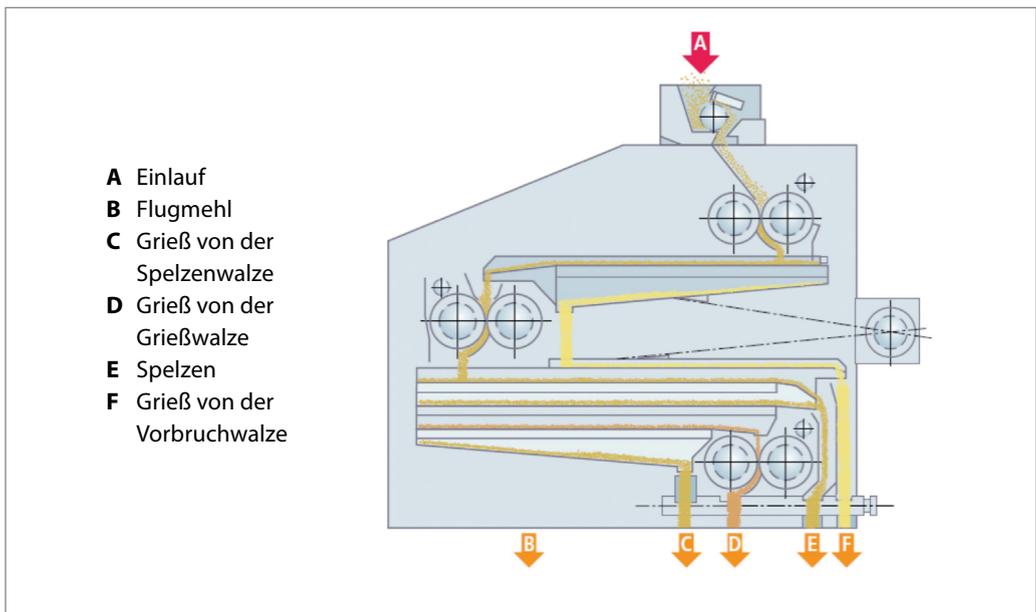
Brecher	Mühlen
<i>Backenbrecher</i>	<i>Mahlkörpermühlen</i>
Pendelschwingen-, Kurbelschwingenbrecher	Kugel-, Stab-, Autogen-, Planeten-, Schwing-, Zentrifugal-, Rührwerksmühlen
<i>Kegelbrecher</i>	<i>Walzenmühlen</i>
Steil-, Flachkegelbrecher	Wälzmühlen, Walzenstühle, Gutbett-Walzenmühlen
<i>Walzenbrecher</i>	<i>Prallmühlen</i>
Walzenbrecher mit Nocken- oder Glattwalzenbrecher	Rotor-, Strahlprallmühlen
<i>Hammer- und Prallbrecher</i>	<i>Schneidmühlen</i>
Hammerbrecher, Schredder, Prallbrecher	

1.4.1 TROCKENZERKLEINERUNG

1.4.1.1 Walzenmühlen

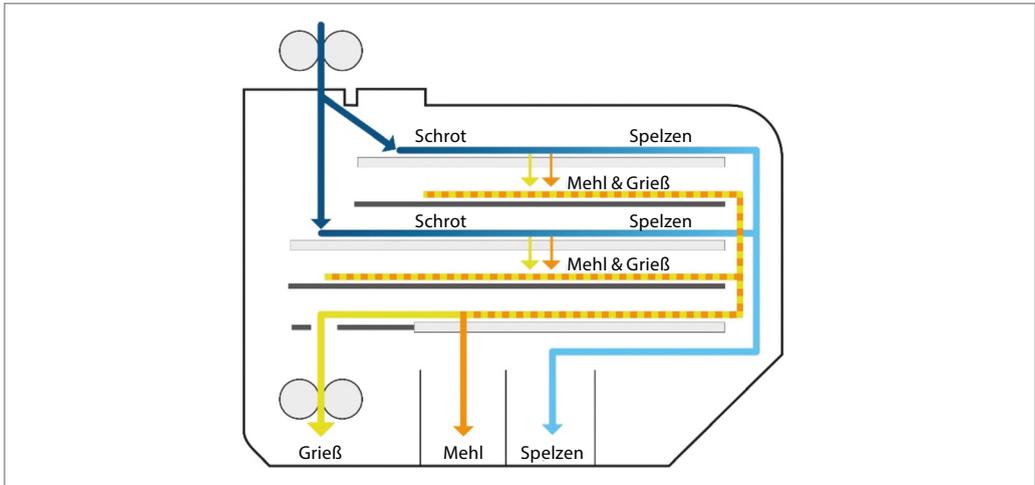
Die Zerkleinerung des Produkts erfolgt im Spalt zwischen zwei achsparallelen, zylindrischen, gegenläufig rotierenden Walzen ($D = 250 \text{ mm}$, $l = 300\text{--}1500 \text{ mm}$). Das Mahlgut passiert einen Spalt nach dem anderen, wobei sich die Spaltweiten zunehmend verringern. In der Brauindustrie werden 2-bis 6-Walzenmühlen eingesetzt. Die Malzkörner werden angebrochen, der Mehlkörper herausgewalzt und weiter auf die angestrebte Feinheit zerkleinert. Im einfachsten Fall (z. B. bei kleinen Sud- bzw. Pilotanlagen) kommt eine 2-Walzenmühle zum Einsatz. Der eingestellte Mahlspalt von ca. 0,8 mm liefert ein relativ grobes Schrot und ist ein Mittelweg für die anschließende Läuterarbeit und Sudhausausbeute. Wichtig ist hier das Vermahlen von gutgelösten Malzen (s. Pkt. 2.5.2.4). Die 4-6-Walzenmühlen ermöglichen eine differenziertere Zerkleinerung des Malzes mit zwei bzw. drei Mahlgängen. Die zwischengeschalteten Siebe sorgen für eine Klassierung. Bei Bauart 1 der 6-Walzenmühle werden nach dem Vorbruch die fertigen Grieße ausgesiebt. Dementsprechend werden nur die Fraktionen (angebrochene Körner und Spelzen), die weiter zerkleinert werden müssen, nach dem Vorbruch der zweiten Mahlpassage, dem Spelzenwalzenpaar zugeführt. Nach dem zweiten Mahlgang wird eine größere Siebfläche eingesetzt (Abb. 1.11) und damit eine geringere Belastung des Siebsatzes erzielt [1.12]. Die ausgemahlten Spelzen und die fertigen Grieße werden dem Schrotbehälter zugeführt, die Grobgrieße werden auf dem folgenden Grießwalzenpaar fertig vermahlen.

Abb. 1.11: 6-Walzenmühle mit doppelter Zwischensiebung, Bauart 1 [1.13]



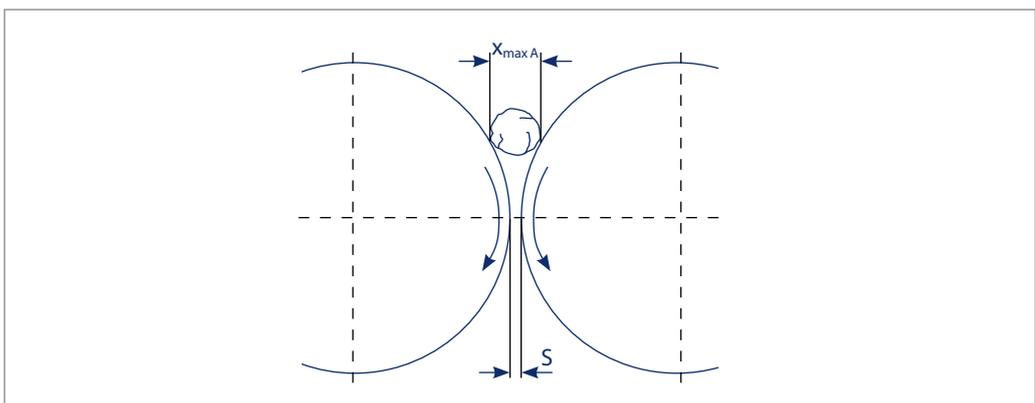
Eine zweite Bauart verzichtet auf die Zwischensichtung nach der ersten Mahlpassage und setzt auf das Prinzip „Vermahlen-Vermahlen-Sichten-Vermahlen“ mit dem Ziel einer schonenden Spelzenabtrennung (Abb. 1.12).

Abb. 1.12: 6-Walzenmühle, Bauart 2, Darstellung der unteren zwei Mahlpassagen mit Sieben [1.14]



Durch die rechtzeitige Entfernung des Feingutanteils (Feingrieße, Mehl) wird eine verstärkte Leistungsaufnahme durch Reibung und ein zusätzlicher Walzenverschleiß bei den heutigen Bauarten eingeschränkt. Parameter wie Anzahl der Walzenpaare, Abstand der Walzenpaare zueinander, Drehzahl oder Drehzahldifferenz der Walzenpaare, Gestaltung der Walzenoberfläche, Stellung der Riffel, Anzahl und Anordnung der Siebe sowie Siebbespannung beeinflussen die Schrotzusammensetzung. Bei gleicher Umfangsgeschwindigkeit der Walzen erfährt das Mahlgut eine reine Druckbeanspruchung. Bei unterschiedlichen Umfangsgeschwindigkeiten der Walzen kommt es zusätzlich zu einer Schubbeanspruchung. Man spricht von Friktion. Die Walzendrehzahlen betragen 160–180 U/min für 2-Walzenmühlen und 200–550 U/min bei 6-Walzenmühlen. Hohe Drehzahlen führen zu einer zusätzlichen Schlagbeanspruchung. Sehr hartes Gut wird zwischen Glattwalzen und ohne Friktion zerkleinert. Bei der Weichzerkleinerung, z. B. von Getreide, werden geriffelte Walzen bevorzugt, da diese einen geringeren Verschleiß aufweisen. Die Walzenriffelung begünstigt den Korneinzug und öffnet das Malzkorn durch Einschneiden. Für einen vollständigen Einzug des Aufgabeguts müssen Walzendurchmesser und Spaltbreite auf die maximale Korngröße x_{\max} abgestimmt sein (Abb. 1.13).

Abb. 1.13: Abbaugrad bei Walzenmühlen (max. Partikelgröße x_{\max} /Spaltweite s) [1.4]



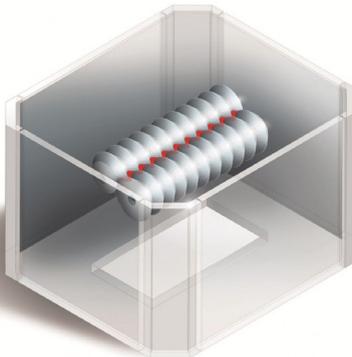
Der Kraftbedarf der 6-Walzenmühle wird mit 1.4–2.5 kWh/t angegeben [1.15]

Aus einer weiteren Entwicklung des Mühlensystems für Brauereien ist die Keilscheibenmühle entstanden, eine Lösung mit der Zielstellung, moderne technologische Anforderungen mit Blick auf nachgelagerte Maisch- und Läuterarbeit zu erfüllen. Das kompakte und vereinfachte System ermöglicht eine Entkopplung von der Rohstoffbeschaffenheit und der Art des Läutersystems [1.16]. Die Läuter- und Würzequalität ist trotz abweichender Schrotzusammensetzung von einschlägigen Normwerten zu oben beschriebenen Schrotsystemen äquivalent.

Abb. 1.14: Keilscheiben aus Edelstahl [1.17]



Abb. 1.15: Prinzip Keilscheibenmühle, T-Rex by Ziemann® [1.17]



Statt herkömmlicher Walzen besteht das Mahlwerk aus mehreren Keilscheiben in harter Edelstahllegierung mit radialer Riffelung (kompakte Mahlfläche) (Abb.1.14). Diese befinden sich auf zwei gegenüberliegenden Wellen. Die Beanspruchung erfolgt durch Scher-, Druck- und Schneidkräfte. Durch die besondere Geometrie der Mahlwerkzeuge ergibt sich selbst bei kompakten Wellenabmessungen ein sehr günstiger Einzugswinkel, welcher es ermöglicht, in nur einer Passage die gesamte, notwendige Zerkleinerungsenergie einzubringen, um die Spelze ausreichend auszumahlen. Durch den Wegfall weiterer Passagen kann so der feindisperse Anteil (Pudermehl) im Mahlgut reduziert werden, was sich positiv auf die Läutereigenschaften auswirkt. Die elektrische Leistungsaufnahme (70 % im Vergleich zur 6-Walzenmühle) und Lärmentwicklung fallen bei niedriger Erwärmung des Mahlguts geringer aus. Die Mühle, welche mit einer Weichkonditionierung ausgestattet sein kann, erzeugt Schrot für Läuterbottich- und Siebscheiben-

filtersysteme. Die Zerkleinerung von Rohgerste erfordert je nach Anforderung zwei Mahlgänge, darstellbar in zwei Durchläufen oder in Verwendung von zwei übereinander gesetzten Modulen.

Meist geht der Trockenschrotung eine Konditionierung des Malzes durch Dampf (0,5 barÜ) oder bevorzugt durch Wasser ($T < 40\text{ °C}$) voraus. Die geringfügige Befeuchtung (im Malz max. 1,5 %, in den Spelzen $\geq 3\text{ %}$) führt zu einer höheren Elastizität der Spelzen, einem höheren Spelzenvolumen und einer besseren Durchlässigkeit der Treberschicht im Läuterbottich. Der Trend geht inzwischen zu einer höheren Befeuchtung der Spelzen auf $\geq 6\text{ %}$.

Mit den beschriebenen Mühlen wird das Schrot für den Betrieb von Läuterbottich, klassischen Maischefilter (6–8 cm) und Siebscheibenfilter hergestellt. Sollen die elastischen Spelzen eine weiter gehende Zerkleinerung erfahren, müssen beispielsweise Prallmühlen zum Einsatz kommen.

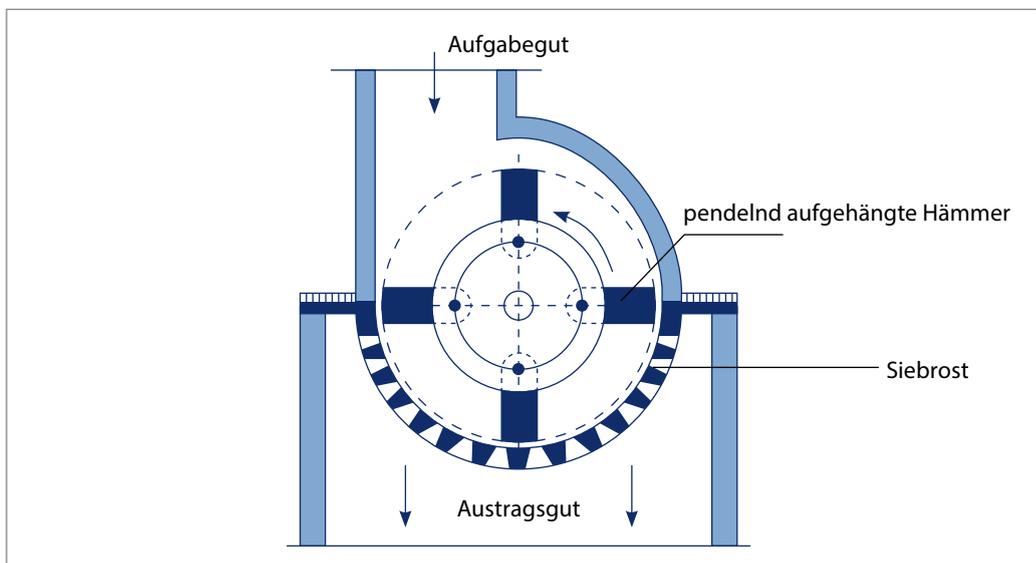
1.4.1.2 Prallmühlen

Die Prallmühlen dienen der Feinerzkleinerung. Der Energieeintrag erfolgt entweder durch einen schnell laufenden Rotor oder durch Gas- bzw. Dampfstrahlen. Demzufolge wird zwischen Rotorprallmühlen (Hammer-, Stift-, Pralltellermühlen) und Strahlprallmühlen unterschieden. In Ersteren werden Partikel-Werkzeug-Stöße, in Letzteren Partikel-Partikel-Stöße erzeugt.

Das Mahlergebnis von Prallzerkleinerungsmaschinen kann durch Umfangsgeschwindigkeit, Mahlspalte zwischen Rotor und Stator, Form, Größe und Anzahl der Zerkleinerungswerkzeuge, Mahlgutkonzentration im Mahlraum, Temperatur und Feuchtigkeit des Trägergases, Verweilzeit und Lochweite der Siebeinrichtung gesteuert werden. Da die Partikeln, je kleiner sie sind, eine umso höhere Festigkeit besitzen, müssen die Umfangsgeschwindigkeiten der Rotoren entsprechend größer sein, je feiner das Produkt vermahlen werden soll. [1.4, 1.18]. Der Einsatz zur Hartzerkleinerung ist aufgrund der starken Verschleißwirkung nachteilig.

Hammermühlen weisen im Prozessraum schnell umlaufende Rotoren auf. Ein Schlägerwerk zerkleinert das Malz zu Pulverschrot ($> 70\text{ %} < 150\text{ }\mu\text{m}$). An den Rotoren befinden sich gelenkig angeordnete hammerförmige Schläger (Flachstähle), die im Betriebszustand infolge der entstehenden Zentrifugalkräfte eine radiale Schlagstellung einnehmen (Abb. 1.16).

Abb. 1.16: Hammermühle [1.4]



Das Aufgabegut wird hauptsächlich durch Prall und Schlag beansprucht. Die Umfangsgeschwindigkeiten betragen zwischen 20 und 70 m/s [1.4]. Infolgedessen unterliegen die Zerkleinerungswerkzeuge einem nicht zu vernachlässigenden Verschleiß. Der hohen Vermahlungstemperatur muss durch eine ausreichende Ventilation entgegengewirkt werden. In der unteren Hälfte des Mahlraums befindet sich ein Siebmantel (0,5–1 mm), wodurch eine Feinheitseinstellung (Klassierung) der Partikeln erfolgt. Die Einstellung einer Inertgasatmosphäre schützt vor Explosionen. Ein hoher Energieeintrag ist erforderlich. Als spezifischer Kraftbedarf werden 7 bis 12 kWh/t [1.5, 1.15] bei bis zu 20 t/h genannt. Der Trend zu größeren Sieblochungen (≥ 2 bis 3 mm) führt zu einem geringeren Energieverbrauch sowie einer Verschleißminderung der Siebe und Hämmer. Die vertikale Ausführung der Hammermühle hat zudem einen um 30 % geringeren Energieverbrauch und benötigt keine Aspiration (Abb. 1.18) [1.19]. Außerdem ist die Beaufschlagung der Flachstähle (Flächenstoß) günstiger (Abb. 1.17).

Abb. 1.17: Auftreffen der Partikeln auf das Zerkleinerungswerkzeug (Flächenstoß/Kantenstoß) [1.4]

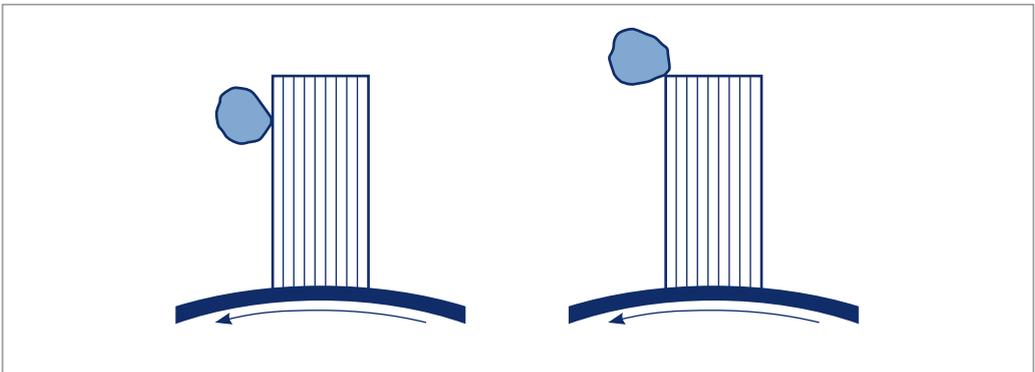


Abb. 1.18: Hammermühle, vertikale Ausführung [1.14]

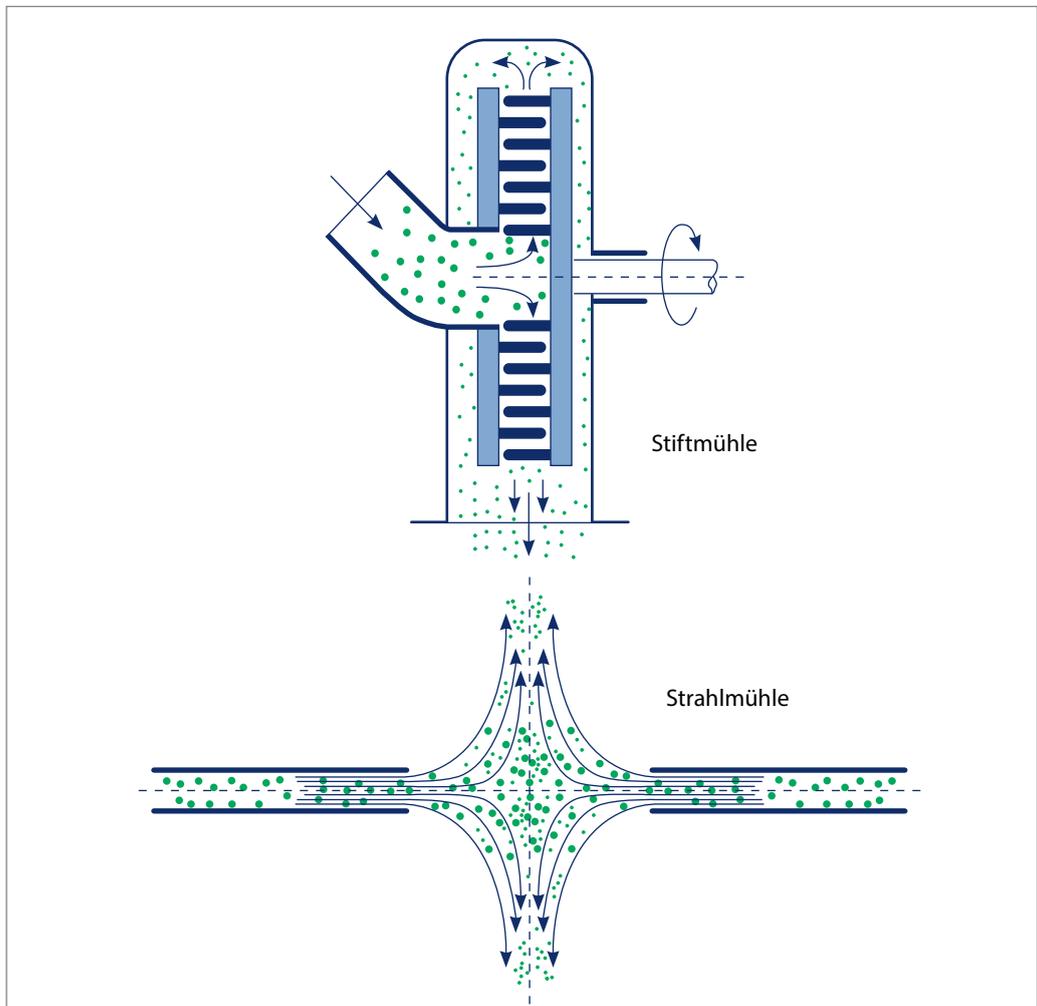


Mit den oben beschriebenen Hammermühlen wird Schrot für Dünnschichtfilter hergestellt. *Stiftmühlen* sind sieblos arbeitende Zerkleinerungsmaschinen (Abb. 1.19). Die Zerkleinerung erfolgt zwischen zwei mit konzentrischen Schlägerkreisen versehenen, ineinandergreifenden Schlägerscheiben. Es gibt zwei Ausführungen von Stiftmühlen: mit feststehender und umlaufender Stiftscheibe oder mit

zwei gegenläufig rotierenden Scheiben. Das Mahlgut wird axial in den Prozessraum aufgegeben und durch die Zentrifugalbeschleunigung nach außen geschleudert. Dabei wird es durch die Schlägerkreise erfasst und überwiegend durch Prall, aber auch durch gegenseitigen Abrieb zerkleinert. Stiftmühlen werden für die Fein- und Feinstmahlung verwendet. Dazu sind Umfangsgeschwindigkeiten von bis zu 200 m/s notwendig. Eine Klassierung ist aufgrund der fehlenden Siebe nicht möglich.

Zur Feinstzerkleinerung und Desagglomeration werden *Strahlmühlen* eingesetzt, die ohne bewegte Maschinenteile arbeiten (Abb. 1.19). Es werden größere Stoßgeschwindigkeiten als in Rotorprallmühlen und infolgedessen höhere Feinheitgrade erzielt. Das Mahlgut wird mithilfe eines sehr schnellen Gasstrahls auf 500 bis 1200 m/s beschleunigt und entweder gegen einen weiteren Gutstrahl aus einer anderen Richtung oder gegen relativ ruhendes Gut gelenkt, in seltenen Fällen auch gegen eine Prallplatte. Die Beschleunigung des Mahlguts erfolgt durch Druckluft oder überhitzten Dampf. Die Zerkleinerungswirkung beruht hauptsächlich auf gegenseitigem Partikelstoß, aber auch auf Reibung und Prall. Die Partikelgrößenverteilung wird über einen Sieber im Auslass der Strahlmühle reguliert [1.4, 1.18]. Es können Korngrößen $< 2 \mu\text{m}$ erzielt werden. Der Nachteil liegt im geringen Durchsatz mit $< 1\text{t/h}$ und dem hohen spezifischen Energiebedarf bis $> 1000 \text{ kWh/t}$.

Abb. 1.19: Stiftmühle, Strahlmühle [1.4]

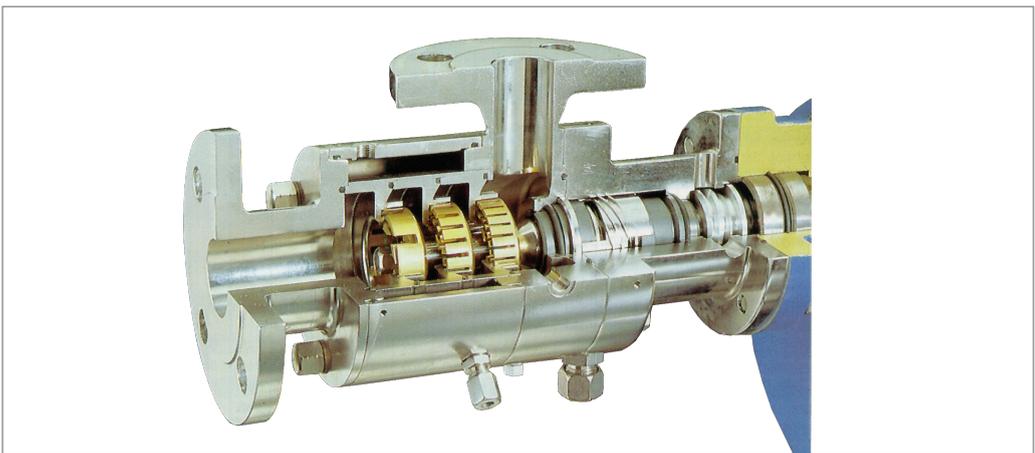


1.4.2 NASSZERKLEINERUNG

1.4.2.1 Dispergiermaschinen

Das Dispergieren ist als Feinverteilen einer oder mehrerer Komponenten in einer kontinuierlichen Phase definiert. Mittels Dispergiermaschinen werden Scherspannungen erzeugt (Beanspruchung durch das umgebende Medium), die zur Zerkleinerung der Teilchen führen. Derartige Zerkleinerungsapparaturen werden in der chemisch-pharmazeutischen Industrie, der Lebensmittelindustrie und der Papierindustrie für die Zerkleinerung und Feinverteilung von Gasblasen, Flüssigkeitstropfen und Feststoffpartikeln in Flüssigkeiten, für den Aufschluss von Zellstoffen sowie zur Lösungs-, Reaktions- oder Extraktionsbeschleunigung eingesetzt. Hauptbestandteile der Maschine sind die Generatoren, bestehend aus einer rotierenden (Rotor) und einer feststehenden Scheibe (Stator), ähnlich einer Stiftmühle. Die Scheiben sind jeweils mit konzentrisch angeordneten Stiftreihen versehen, die ineinander greifen. Die Spaltweiten zwischen den Stiftreihen bleiben je Generatoreinheit konstant. Je nach Prozessbedingungen können bis zu drei Generatoren, die in der Verzahnung variieren, hintereinander gesetzt werden (Abb. 1.20). Beim Durchlaufen wird das Produkt wechselnd tangential beschleunigt, abgebremst und zerkleinert. Die Feinheit des zu zerkleinernden Guts kann durch die Anzahl der eingesetzten Rotor-Stator-Einheiten, die Art der Bestiftung, die Anzahl der Stiftreihen, die Rotordrehzahl und den Volumendurchsatz beeinflusst werden. Neben der Zerkleinerungsarbeit wird aufgrund der Zentrifugalbeschleunigung der Flüssigkeit eine Pumpleistung von wenigen bar erzeugt, die zum Transportieren des zerkleinerten Produkts genutzt werden kann [1.20]. Gebräuchlich sind Inlinegeräte, die einen gleichmäßigen Durchfluss und eine definierte Passagenfolge gewährleisten.

Abb. 1.20: Schnittdarstellung Dispax-Reactor® DR 3/6 der Firma IKA, Staufen [1.20]



Der Stoffstrom in Dispergiermaschinen und die Wirkung auf das Zerkleinerungsgut wird wie folgt beschrieben [1.5, 1.10]

1. Axiale Zufuhr des Produkts
2. Eintritt der Ausgangsprodukte in den ersten Generator der Dispergierkammer
3. Beschleunigung der Flüssigkeits- und Feststoffteilchen auf die Rotor-Umfangsgeschwindigkeit
4. Eintritt der Teilchen in den ersten Scherspalt zwischen Rotor und Stator
5. Zerkleinerung der Teilchen infolge von Scherspannungen
6. Austritt aus dem ersten Scherspalt und Eintritt in den nächsten Scherspalt
7. Eintritt in einen weiteren Generator
8. Radialer Austritt aus der Dispergierkammer