

Zerkleinerung nicht-spröder Stoffe in Rotorscheren und -reißen

Von der Fakultät für Maschinenbau, Verfahrens- und Energietechnik

der Technischen Universität Bergakademie Freiberg

genehmigte

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor - Ingenieur

Dr.-Ing.

vorgelegt

von **Dipl.-Ing. Dirk Woldt**

geboren am **16.03.1976** in **Leisnig**

Gutachter: **Prof. Dr.-Ing. habil. Gert Schubert, Freiberg**
Prof. Dr.-Ing. Siegfried Bernotat, Braunschweig
Prof. Dr.-Ing. Dieter Wüstenberg, Kaiserslautern

Tag der Verleihung: **14.10.2004**

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Aufbereitungstechnik der Technischen Universität Bergakademie Freiberg.

An dieser Stelle möchte ich die Gelegenheit nutzen, all denen recht herzlich zu danken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Mein besonderer Dank gilt zuerst Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Gert Schubert für die Anregung zu dieser Arbeit, die wissenschaftliche Betreuung sowie die zahlreichen wertvollen Diskussionen.

Bei Herrn Dr.-Ing. Hans-Georg Jäckel möchte ich mich für sein stetes Interesse an der Forschungsarbeit und die sachkundigen Anregungen und Ratschläge bei der Entwicklung der Versuchseinrichtungen und der Durchführung der Versuche bedanken.

Für die Mitarbeit beim Aufbau der Versuchseinrichtungen und bei der Durchführung der Versuche möchte ich besonders Herrn Wolfgang Liebschner sowie Herrn Gerd Talkenberger und Herrn Siegfried Fröhler danken.

Des weiteren danke ich Herrn Dr. rer. nat. Hartmut Baum und Frau Brigitte Bleiber vom Institut für Metallkunde für die freundliche Unterstützung bei der Anfertigung rasterelektronenmikroskopischer Aufnahmen sowie Herrn Dr.-Ing. Peter Trubitz und Herrn Reinald Weber vom Institut für Werkstoffkunde für die Hilfe bei der Durchführung der Zug-, Scher-, Reiß- und Biegeversuche.

Mein herzlicher Dank gilt außerdem allen Mitarbeitern des Institutes für Mechanische Verfahrenstechnik und Aufbereitungstechnik für die gute Zusammenarbeit und die angenehme Arbeitsatmosphäre.

Der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) danke ich für die finanzielle Unterstützung der Forschungsarbeit im Rahmen des Paketantrages „Zerkleinerung nicht-spröder Stoffe“.

Dirk Woldt

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis.....	III
1 Einleitung	1
2 Stand des Wissens über die Zerkleinerung nicht-spröder Stoffe in Rotorscheren und Rotorreißern.....	2
2.1 Verformungs- und Bruchverhalten nicht-spröder Stoffe.....	2
2.2 Beanspruchungsarten für die Grob- und Mittelzerkleinerung nicht-spröder Stoffe.....	9
2.2.1 Schneidbeanspruchung	10
2.2.2 Scherbeanspruchung	12
2.2.3 Reißbeanspruchung	16
2.3 Rotorscheren und Rotorreißer für die Zerkleinerung nicht-spröder Abfälle und Schrotte.....	17
2.3.1 Bauformen und Einsatzgebiete.....	18
2.3.2 Vergleich von Rotorscheren und Rotorreißern.....	24
2.3.3 Einzugs- und Zerkleinerungsvorgang in Rotorscheren und Rotorreißern.....	26
2.3.4 Einflußgrößen auf den Einzugs- und Zerkleinerungsvorgang.....	29
2.4 Ableitung der Aufgabenstellung	32
3 Versuchseinrichtungen, Versuchsdurchführung und Methodik der Meßwertgewinnung.....	33
3.1 Übersicht über die verwendete Versuchstechnik und die Versuchsmaterialien.....	33
3.2 Scher-/Reißvorrichtung und Biegevorrichtung	34
3.3 Instrumentiertes Schlagwerk	36
3.4 Modell-Zerkleinerungsapparaturen und kleintechnische Rotorscheren und -reißer	39
3.4.1 Modell-Zerkleinerungsapparaturen	41
3.4.2 Kleintechnische Rotorscheren und Rotorreißer.....	47
3.5 Methodik zur Charakterisierung des Zerkleinerungsergebnisses.....	50
3.5.1 Kennzeichnung des Kraft- und Energieaufwandes für die Zerkleinerung	50
3.5.2 Kennzeichnung des Zerkleinerungsproduktes.....	52
3.5.3 Kennzeichnung der Bruchstückverformung.....	53
3.6 Fehlerbetrachtung	54
4 Analyse der Grundbeanspruchungsarten	56
4.1 Schneid- und Scherbeanspruchung	56
4.2 Reiß- und Biegebeanspruchung.....	61
4.3 Zusammenhang zwischen Scher-, Reiß- und Zugbeanspruchung.....	66

5	Untersuchung der Vorgänge bei für Rotorschern und Rotorreißer typischen Beanspruchungsgeometrien	69
5.1	Mikroprozesse der Zerkleinerung in Rotorschern und Rotorreißern.....	69
5.1.1	Untersuchung der Vorgänge bei der Beanspruchung zwischen Rotor und Stator	69
5.1.2	Untersuchung der Vorgänge bei der Beanspruchung zwischen zwei Rotoren.....	78
5.2	Einflußgrößen auf die Zerkleinerung in Rotorschern und Rotorreißern	81
5.2.1	Einfluß der Beanspruchungsgeometrie	81
5.2.2	Einfluß der Eigenschaften des Aufgabematerials	86
5.2.3	Einfluß der betriebsbedingten Einflußgrößen	90
6	Untersuchung der Vorgänge in kleintechnischen Rotorschern und Rotorreißern	93
6.1	Zerkleinerung definierter Probekörper	93
6.1.1	Zerkleinerung in ein- und zweirotorigen Rotorschern.....	93
6.1.2	Zerkleinerung in ein- und zweirotorigen Rotorreißern	103
6.1.3	Vergleich der Zerkleinerungsergebnisse	109
6.2	Zerkleinerung realitätsnaher Abfallschüttungen	111
6.3	Schlußfolgerungen für den Einsatz von Rotorschern und Rotorreißern.....	113
7	Betrachtungen zur Fortführung der Untersuchungen	115
7.1	Untersuchung der Vorgänge in Radialspalt-Rotorschern	115
7.2	Untersuchung der Vorgänge in Schraubenreißern	115
7.3	Maßstabsübertragung der Versuchsergebnisse auf großtechnische Maschinen.....	115
7.4	Modellierung und Simulation der Zerkleinerung in Rotorschern und -reißern.....	116
8	Zusammenfassung	121
	Literaturverzeichnis.....	123
	Anlagenverzeichnis	131

Symbolverzeichnis

<u>Symbol</u>	<u>Erläuterung</u>	<u>Einheit</u>
A	Bruchdehnung	%
$A_{\ddot{A}q}$	äquivalente Bruchstückfläche	mm ²
A_B	Bruchfläche	mm ²
A_K	Projektionsfläche einer der Masse des Bruchstücks entsprechenden Kugel	mm ²
A_N	neu erzeugte Oberfläche	mm ²
A_{Pr}	Projektionsfläche des Bruchstücks	mm ²
A_Q	Querschnittsfläche	mm ²
A_S	Scherfläche	mm ²
a	größte Hauptabmessung (Länge)	mm
$a_{50,3}$	Medianwert der Verteilung $Q_3(a)$	mm
$a_{80,3}$	80%-Stückgröße der Verteilung $Q_3(a)$	mm
a_{St}	Stücklänge im unverformten Zustand	mm
$a_{St,80,3}$	80%-Stückgröße der Verteilung $Q_3(a_{St})$	mm
B	Biegegrad	
$B_{50,3}$	Medianwert der Verteilung $Q_3(B)$	
b	mittlere Hauptabmessung (Breite)	mm
$b_{50,3}$	Medianwert der Verteilung $Q_3(b)$	mm
b_{ij}	diskrete Bruchstückgrößenverteilung	
b_{PK}	Probekörperbreite	mm
b_R	Rotorbreite	mm
	Breite des Rißufers	mm
b_{RS}	Rotorscheiben- bzw. Rotormesserbreite	mm
b_S	Statorwerkzeugbreite	mm
b_{SN}	Schneidenbreite der Frontschneide des Rotormessers	mm
b_{St}	Stückbreite im unverformten Zustand	mm
C	Konstante	
c	kleinste Hauptabmessung (Dicke)	mm
$D_{(Index)}$	Rotorscheibendurchmesser Index: min - minimaler; max - maximaler; m - mittlerer	mm
D_i	Diffusionskoeffizient der i-ten Korn- bzw. Stückgrößenklasse	
D_{MK}	Messerkreisdurchmesser	mm
d	Rohrdurchmesser	mm
d_S	Schichtdicke	mm
E	Elastizitätsmodul	N/mm ²

<u>Symbol</u>	<u>Erläuterung</u>	<u>Einheit</u>
F	Kraft	N
F _A	Ausstoßkraft	N
F _B	Beanspruchungskraft	N
F _{B,max}	maximale Beanspruchungskraft	N
F _{BU}	Biegekraft	N
F _{BU,max}	maximale Biegekraft	N
F _D	Druckkraft	N
F _E	Einzugskraft	N
F _H , F _V	horizontale und vertikale Kraftkomponente	N
F _K	Knickkraft	N
F _N	Normalkraft	N
F _R	Reibungskraft	N
F _S	Scherkraft	N
F _{S,max}	maximale Scherkraft	N
F _{S1}	Hauptscherkraft	N
F _{S2}	Fortschreitkraft	N
F _{S3}	Abdrängkraft	N
F _{ZE}	Einzugskraft der Zuführeinrichtung	N
F ₁ , F ₂	Kraftkomponenten	N
f _{B,max}	maximale querschnittbezogene Beanspruchungskraft	N/mm ²
f _S	querschnittbezogene Scherkraft	N/mm ²
f _Z	querschnittbezogene Zugkraft	N/mm ²
K _{Ic}	Bruchzähigkeit (Rißart I)	MPam ^{1/2}
k _S	Scherfestigkeit, Scherwiderstand	N/mm ²
L _F	Auflagerabstand	mm
l	Länge	mm
l _H	Länge des Hebelarms	mm
l _K	freie Knicklänge	mm
l _{Pendel}	Länge des Pendels	mm
l _{PK}	Probekörperlänge	mm
l _R	Länge des Rißufers	mm
l _{SN}	Rotormesserlänge, Länge der Seitenschneiden	mm
M	Drehmoment	kNm
M _b	Biegemoment	Nm
M _G	Gesamtmoment der Kreismesserscheren	Nm
M _L	Leerlaufdrehmoment	kNm
M _S	Schermoment der Kreismesserscheren	Nm
m	Faktor	
m _{St}	Einzelstückmasse	g

<u>Symbol</u>	<u>Erläuterung</u>	<u>Einheit</u>
m_A	Masse des Aufgabematerials	kg
m_H	Hammermasse des Pendels	kg
m_{PK}	Probekörpermasse	g
m_x	Stück- bzw. Körnermasse im Volumenelement	
$\dot{m}$	Durchsatz	t/h
$\dot{m}_{spez.}$	spezifischer Durchsatz (auf die Rotorbreite bezogener Durchsatz)	t/h*m
n	Drehzahl	min ⁻¹
$n_{(Index)}$	Anzahl Index: b - Biegestellen; K - Knickstellen; Z - Schichten	
P_G	Gesamtleistung pro Rotorwelle	kW
P_{mech}	mechanische Leistung	kW
$P_{mech,B}$	Beanspruchungsleistung der mechanischen Leistung	kW
$P_{mech,L}$	Leerlaufleistung der mechanischen Leistung	kW
$Q_3(\xi)$	Summenverteilung der Größe ξ nach der Mengenart Masse	%
R_m	Zugfestigkeit	N/mm ²
$R_{p0,2}$	0,2%-Dehngrenze	N/mm ²
r_U	Übergangsradius	mm
r_S	Schneidkantenradius	mm
$r_{S,RM}$	Schneidkantenradius der Rotormesserschneiden	mm
$r_{S,SM}$	Schneidkantenradius der Statormesserschneiden	mm
S	statistische Sicherheit	%
S_i	Zerkleinerungsrate (massebezogene Zerkleinerungsgeschwindigkeit) der i-ten Korn- bzw. Stückgrößenklasse	
s	Spaltweite	mm
s_A	axiale Spaltweite	mm
s_C	charakteristischer Wegabschnitt	mm
s_R	radiale Spaltweite	mm
T	Temperatur	°C, K
T_G	Glasübergangstemperatur	°C, K
T_R	Raumtemperatur	°C, K
T_S	Kristallschmelztemperatur	°C, K
T_Z	Zersetzungstemperatur	°C, K
t	Zeit	s
t_B	Beanspruchungszeit	s
t_E	Einzugszeit	s
$\ddot{u}$	Überdeckung	mm
$\ddot{u}_{MK}$	Überdeckung der Messerkreise	mm

<u>Symbol</u>	<u>Erläuterung</u>	<u>Einheit</u>
v	Beanspruchungsgeschwindigkeit, Rotorumfangsgeschwindigkeit	m/s
v_E	Einzugsgeschwindigkeit	mm/s
v_{RS}	mittlere Rotorumfangsgeschwindigkeit der Rotorscheiben	mm/s
v_i	Transportgeschwindigkeit der i-ten Korn- bzw. Stückgrößenklasse	
v_{rel}	Relativgeschwindigkeit	m/s
W_B	Beanspruchungsenergie	J
W_{bx}	Widerstand gegen Biegung bezüglich der Achse x	mm ³
W_{Pendel}	aus der Pendelauslenkung des Schlagwerks resultierende Energie	J
W_S	Scherenergie	J
W_V	Energiebedarf für die Verdichtung	J
w	Wanddicke	mm
$w_{B,A}$	bruchflächenbezogene Beanspruchungsenergie	J/mm ²
$w_{B,m}$	massebezogene Beanspruchungsenergie	kWh/t
$w_{B,Q}$	querschnittbezogene Beanspruchungsenergie	J/mm ²
$w_{BU,Q}$	querschnittbezogene Biegeenergie	J/mm ²
$w_{S,Q}$	querschnittbezogene Scherenergie	J/mm ²
$w_{Z,Q}$	querschnittbezogene Zugenergie	J/mm ²
X_W	Wellenabstand	mm
x	Weg, Scherweg	mm
	Stückgröße	mm
$x_{\ddot{A}q}$	äquivalente Bruchstückgröße	mm
$x_{\ddot{A}q,50}$	Medianwert der Verteilung $Q_3(x_{\ddot{A}q})$	mm
x_{Bruch}	Weg bis zum Bruch	mm
x_G	Gesamtweg der Scherung	mm
x_{RM}	Abstand der Rotormesser auf der Rotorscheibe	mm
x_Z	Stückgröße (Durchmesser) eines zylinderförmigen Stückes	mm
z	Anzahl der wirkenden Kreismesseranten pro Rotorwelle	

<u>Symbol</u>	<u>Erläuterung</u>	<u>Einheit</u>
α	Fallwinkel des Pendels	°
α_A	Angriffswinkel der Scherkraft	°
α_E	Einzugswinkel	°
α_R	Freiwinkel	°
α_l	Biegewinkel der Biegevorrichtung	°
β	Steigwinkel des Pendels	°
β_R	Keilwinkel	°
β_{ZE}	Messereingriffswinkel	°
δ_R	Schnittwinkel	°
ε	Dehnung	
$\dot{\varepsilon}$	Dehngeschwindigkeit (Dehnrage)	s ⁻¹
ε_B	relative Eindringtiefe des Messers bis zum Bruch	
φ	Messerneigungswinkel	°
	Drehwinkel des Rotors	°
γ_R	Spanwinkel	°
γ_S	Statorneigung	°
λ	Winkel zwischen Scherkante und Messerbewegung	°
μ	Reibungskoeffizient	
μ_G	Gleitreibungskoeffizient	
μ_i	Masseanteil der i-ten Korn- bzw. Stückgrößenklasse im Volumenelement	
ρ_M	Materialdichte	g/cm ³
σ	Spannung	N/mm ²
σ_F	Fließspannung	N/mm ²
σ_S	Streckspannung	N/mm ²
σ_Z	Zugspannung	N/mm ²
τ	Schubspannung	N/mm ²

1 Einleitung

In den letzten Jahrzehnten hat mit dem gestiegenen Umweltbewußtsein die mechanische Aufbereitung der Abfälle und Schrotte stark an Bedeutung gewonnen. Die Zerkleinerung steht meist am Anfang solcher Aufbereitungsverfahren und schafft durch die Erzeugung günstiger Stückgrößenverteilungen oder den Aufschluß von Materialverbunden entweder die Voraussetzungen für die Anwendung weiterer Aufbereitungsprozesse oder ein unmittelbar einsetzbares Zerkleinerungsprodukt.

Ausgehend von dem Verhalten bei äußerer mechanischer Beanspruchung weist der überwiegende Teil der Abfälle und Schrotte ein nicht-sprödes Stoffverhalten in Verbindung mit einer großen Stückformvielfalt und einer z. T. komplexen Zusammensetzung auf. Um diese Stoffe zerkleinern zu können, müssen in den Zerkleinerungsmaschinen Beanspruchungsarten erzeugt werden, die auch nach einer größeren plastischen bzw. viskosen Verformung zum Bruch führen. Für die Vor-, Grob- und Mittelzerkleinerung solcher Abfälle und Schrotte werden zunehmend langsamlaufende Rotorscheren und -reißer (Rotorumfangsgeschwindigkeit $< 5 \text{ m/s}$) eingesetzt. Doch trotz ihrer weiten Verbreitung beschränkt sich das bisherige Wissen über diese Zerkleinerungsmaschinen meist nur auf empirisch begründete Auslegungsvorschriften der Hersteller und orientierende Untersuchungen. Eine verfahrenstechnische Durchdringung der ablaufenden Mikroprozesse und der sie beeinflussenden Faktoren ist keinesfalls gegeben. Aber gerade dieses Wissen ist notwendig, um die Zerkleinerungsräume und -elemente im Hinblick auf das Prozeßziel zu optimieren, Richtlinien für den energieeffizienten Betrieb abzuleiten und nicht zuletzt um durch die Modellierung und Simulation der Zerkleinerung das Zerkleinerungsergebnis vorherzusagen zu können.

Durch die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Grundlagenuntersuchungen soll ein Beitrag zur Aufklärung der in ein- und zweirotorigen Rotorscheren und -reißern ablaufenden Vorgänge geleistet werden.

2 Stand des Wissens über die Zerkleinerung nicht-spröder Stoffe in Rotorscheren und Rotorreißern

2.1 Verformungs- und Bruchverhalten nicht-spröder Stoffe

Die mechanische Zerkleinerung eines Stoffes beruht auf der Überwindung der atomaren Bindungen im Innern des Festkörpers. Äußere Beanspruchungen rufen Spannungen im Material hervor, die zu dessen Verformung sowie zur Bildung und Ausbreitung von Rissen führen. Um einen Bruch erzielen zu können, müssen sich die vorhandenen bzw. gebildeten Risse bis in den makroskopischen Bereich ausbreiten.

Das mechanische Verhalten eines Stoffs durch eine äußere Beanspruchung läßt sich grundsätzlich unterteilen in [1]:

- *reversible Verformungen*, bei denen sich die Formänderungen unmittelbar oder zeitlich verzögert nach Beendigung der Beanspruchung zurückbilden (energie-, entropie- und viskoelastische Verformung),
- *irreversible (bleibende) Verformungen*, die dadurch gekennzeichnet sind, daß die auftretenden Formänderungen (plastische und viskose Verformung) bestehen bleiben, sowie
- den *Bruch*.

An eine reversible Verformung schließt sich entweder eine irreversible Verformung an, oder es tritt der Bruch ein, wodurch die drei Grenzfälle: elastisches, elastisch-plastisches und elastisch-viskoses Verhalten voneinander unterschieden werden können. Reale Stoffe verhalten sich im allgemeinen sowohl elastisch als auch plastisch und viskos und lassen sich oft nur in engen Grenzen streng einem der drei Grenzfälle zuweisen. Eine Zuordnung ist häufig nur nach dem die Verformung bestimmenden Anteil möglich. Stoffe mit kristalliner Struktur verhalten sich vorwiegend energieelastisch und plastisch. Dagegen ist das Verformungsverhalten von Stoffen mit amorpher bzw. teilweise amorpher Struktur wesentlich komplexer. Unterhalb einer stoffabhängigen Temperatur (Glasübergangstemperatur) zeigen diese insbesondere ein energieelastisches Verhalten, oberhalb dieser Temperatur sowohl entropieelastische als auch viskose Verformungen bzw. eine Überlagerung der Verformungsmechanismen (Viskoelastizität) [2] [3]. Das elastische Stoffverhalten beruht auf einer zeitweiligen Entfernung der Atome und Moleküle aus ihrer Gleichgewichtslage. **Energieelastische Verformungen** sind auf rein elastische Formänderungen von Atomen und Valenzwinkelverschiebungen zurückzuführen, wobei kennzeichnend ist, daß zwischen der Verformung und der Beanspruchung eine lineare Abhängigkeit besteht und die Formänderungen zeitunabhängig sind. Daher spricht man auch von linear-elastischem Stoffverhalten. Mit Hilfe des Hooke'schen Gesetzes und den darin definierten elastischen Konstanten (Elastizitäts-, Schub- und Kompressions-Modul) läßt sich das energieelastische Verhalten umfassend beschreiben [1] [2]. Hochpolymere mit langen flexiblen Kettenmolekülen weisen oberhalb der Glasübergangstemperatur ein **entropieelastisches Verformungsverhalten** auf, da infolge der mikrobrownschen Bewegung eine höhere Beweglichkeit der miteinander verschlauten und vernetzten Ketten erreicht wird. Unter einer äußeren Beanspruchung werden die Kettenmoleküle verstreckt, wodurch sich eine in Richtung abnehmender molekularer Ordnung bzw. zunehmender Entropie des Systems rückwirkende Kraft ergibt. Durch die lockere Vernetzung der Molekülketten sind elastische Formänderungen von mehreren 100% möglich, ohne daß ein Abgleiten der Molekülsegmente und somit ein Übergang zu

plastischen oder viskosen Formänderungen erfolgt. Die elastischen Verformungen weisen jedoch keinen linearen Zusammenhang mit der einwirkenden Spannung auf. Aufgrund dessen ist der Elastizitätsmodul keine Konstante mehr, sondern von der Höhe der Beanspruchung abhängig. Eine gewisse Zeitabhängigkeit der Verformungen wird insbesondere in der Nähe der Glasübergangstemperatur von größeren Molekümlagerungen hervorgerufen [2]. Ein für Stoffe mit unvernetzten, verkäulten (amorphen) Makromolekülverbänden typisches elastisches Stoffverhalten ist die **Viskoelastizität**. Hierbei überlagern sich energie- und entropieelastische sowie viskose Verformungsanteile. Insgesamt handelt es sich dennoch um ein überwiegend reversibles Verformungsverhalten, aber mit ausgeprägter Temperatur- und Zeitabhängigkeit [2] [4]. Mit zunehmender Temperatur und steigender Beanspruchungsdauer gewinnen die zeitabhängigen, viskosen Verformungskomponenten an Bedeutung, die ähnlich der Entropieelastizität auf Mikroumlagerungen von Molekülsegmenten zurückzuführen sind. Im Unterschied zum elastischen Verhalten gummiartiger Stoffe ist die Beweglichkeit der Molekülsegmente jedoch wesentlich geringer, wodurch zum einen die Einstellung auf den neuen Gleichgewichtszustand träger abläuft und zum anderen auch die Deformationsbeträge deutlich geringer sind.

Für **plastische Verformungen** ist kennzeichnend, daß sie erst nach Überschreiten einer ausgeprägten Mindestspannung (Fließspannung, Streckgrenze) auftreten. In Stoffen mit kristalliner Struktur wird die plastische Deformation durch das Wandern von Versetzungen hervorgerufen. Die Versetzungsbewegung erfolgt durch das Abgleiten der Atomschichten entlang bevorzugter Gleitebenen infolge einer Schubspannung. Dabei bestimmt die Beweglichkeit der Versetzungen maßgeblich die Höhe der erforderlichen Mindestspannung. In amorphen bzw. teilkristallinen Stoffen treten plastische Verformungen im Bereich der Glasübergangstemperatur in lokalisierten Fließzonen (Crazes, Scherbänder) auf. Sie werden in starkem Maße von der Temperatur, der Beanspruchungsgeschwindigkeit und dem Spannungszustand beeinflusst. Bei **viskosen Verformungen** handelt es sich um thermisch aktivierte Vorgänge, die dominieren, wenn sich die Temperatur der Schmelztemperatur eines Stoffs nähert bzw. überschreitet. Dabei gleiten thermisch gelöste Bausteine teilweise aufeinander ab. Im Gegensatz zur plastischen Verformung sind viskose Formänderungen nicht an eine Mindestspannung gebunden [1] [2].

Im Anschluß an eine reversible bzw. irreversible Verformung kommt es zum **Bruch**, wenn die durch die äußere Beanspruchung hervorgerufenen Spannungen die Bruchfestigkeit des Stoffes erreichen. Hierbei breiten sich die vorhandenen oder gebildeten Risse entweder unter der Wirkung von Normalspannungen als Spaltbruch oder infolge von Schubspannungen in Form eines Gleitbruches bis in den makroskopischen Bereich aus. Als Ausgangspunkt für ein Bruchereignis sind die bereits im Werkstoff vorhandenen Risse bzw. rißartigen Werkstoffinhomogenitäten (Kerben, Oberflächenrisse) von wesentlicher Bedeutung, da durch die lokale Spannungskonzentration an der Rißspitze der Übergang von einem ruhenden zu einem bewegten Riß ermöglicht wird (Bild 2.1, Rißeinleitung). Sind solche Risse im Werkstoff nicht enthalten, müssen submikroskopische Rißkeime zunächst durch lokalisierte Gleitvorgänge gebildet werden (Rißbildung). Die weitere Rißausbreitung, d. h. die Vergrößerung des Risses, kann entweder unter ständiger Energiezufuhr (stabil) oder Energiefreisetzung (instabil) erfolgen. Im ersten Fall resultiert im allgemeinen ein makroskopischer Zähbruch ausgehend von einem mikroskopischen Gleitbruch. Dagegen ist der makroskopische Sprödbbruch durch einen verformungsarmen Spaltbruch gekennzeichnet. Mit zunehmender Rißlänge kann eine stabile in eine instabile Rißausbreitung umschlagen, wenn die frei werdende elastische Verformungsenergie gleich oder größer ist als die zur Bildung der neuen Oberfläche erforderliche Grenzflächenenergie [1] [2] [3] [5] [6].

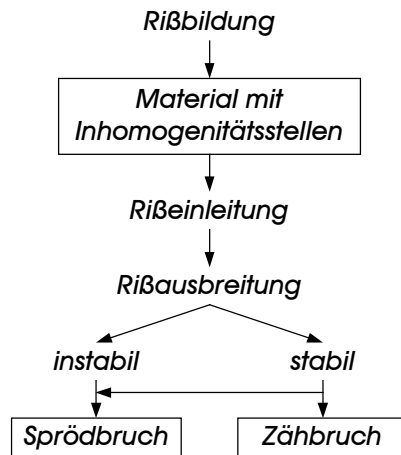


Bild 2.1: Rißbildung und -ausbreitung bei der Zerkleinerung (nach [3] [5])

In Abhängigkeit von den an der Rißspitze wirkenden Zug- und Schubspannungen werden die in Bild 2.2 dargestellten Rißöffnungsarten unterschieden. Bei einer Vielzahl praktischer Beanspruchungsvorgänge liegt eine Überlagerung der Rißöffnungsarten vor. Zur Beschreibung der Spannungsverhältnisse dienen Spannungsintensitätsfaktoren, deren kritische Werte K_{Ic} , K_{IIc} und K_{IIIc} (Bruch- oder Rißzähigkeit) den Beginn der instabilen Rißausbreitung charakterisieren.

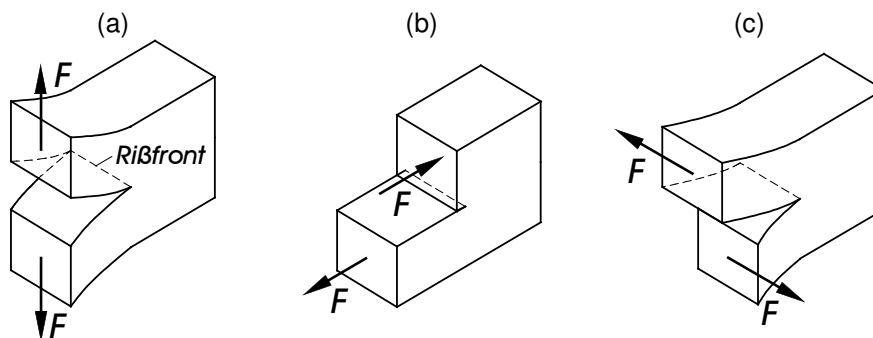


Bild 2.2: Rißöffnungsarten (nach [5])

- (a) Rißart I (einfache Rißöffnung): Eine Zugspannung wirkt senkrecht zur Rißfront.
- (b) Rißart II (Längsscherriß): Eine Schubspannung wirkt senkrecht zur Rißfront.
- (c) Rißart III (Querscherrriß): Eine Schubspannung wirkt parallel zur Rißfront.

Treten vor dem Bruch hauptsächlich energieelastische Verformungsanteile auf, so spricht man von sprödem Stoffverhalten. Sind jedoch hohe irreversible Verformungsanteile vorhanden, liegt ein duktiles bzw. zähes Stoffverhalten vor. Das Verformungsverhalten bis zum Bruch wird aber nicht allein von den Materialeigenschaften bestimmt, sondern weiterhin von den Beanspruchungsbedingungen, wie z. B. der Temperatur und der Beanspruchungsgeschwindigkeit, sowie der geometrischen Gestalt des zu zerkleinernden Materials. Deshalb darf man nicht zwangsläufig von spröden und zähen Stoffen sprechen. Da sich die Materialien jedoch unter vergleichbaren Beanspruchungsbedingungen und ähnlicher geometrischer Gestalt in ihrer Neigung zum Sprödbuch und Zähbruch unterscheiden, sollen im folgenden unter der Bezeichnung „*nicht-spröde Stoffe*“ jene Stoffe verstanden werden, die vor dem Bruch ein von dem linear- bzw. energieelastischen deutlich abweichendes Verformungsverhalten aufweisen. Tabelle 2.1 zeigt eine Gliederung der die Abfälle und Schrotte bildenden Komponenten entsprechend ihres bestimmenden Verformungsverhaltens. Zugleich wird das breite Spektrum im Stoffverhalten der nicht-spröden Stoffe

Tabelle 2.1: Gliederung der die Abfälle und Schrotte bildenden Komponenten nach ihrem bestimmenden Verformungsverhalten bei Normaltemperatur (in Anlehnung an [7])

Verformungs- verhalten	Festigkeit		
	gering (weich)	mittel (mittelhart)	hoch (hart)
<u>reversibel</u> - energieelastisch (linearelastisch) - entropieelastisch (gummielastisch) - viskoelastisch	Duroplaste Elastomere, Thermoplaste Thermoplaste ¹⁾		Glas, Bauschutt, Gußeisen, NE-Metall- Gußlegierungen,
<u>irreversibel</u> - elastisch-plastisch - elastisch-viskos	Thermoplaste ²⁾ Papier ³⁾ , Pappe ³⁾ , biogene Abfälle Thermoplaste ⁴⁾ , textile Fasern		Stahl, NE-Metall- Knetlegierungen

¹⁾ insbesondere amorphe Thermoplaste; ²⁾ in der Nähe der Glasübergangstemperatur;

³⁾ mit geringem viskosen Verformungsanteil; ⁴⁾ oberhalb der Glasübergangstemperatur

deutlich, was sich insbesondere bei den Kunststoffen zeigt. Im folgenden sollen daher das Verformungs- und Bruchverhalten der Kunststoffe und der Metalle sowie wichtige Einflußgrößen zusammenfassend dargestellt werden, um die Vorgänge bei der Zerkleinerung nicht-spröder Stoffe besser deuten zu können.

Mechanische Eigenschaften der Metalle

Die Metalle weisen ein energie- bzw. linearelastisches Verhalten und bei Überschreitung einer bestimmten Grenzspannung (Fließspannung, Streckgrenze) zusätzlich ein plastisches Verhalten auf. Ein sprödes Stoffverhalten ohne ausgeprägte plastische Deformation ist bei der Beanspruchung von Gußeisen und NE-Metall-Gußlegierungen zu erkennen. Bei Stählen und NE-Metall-Knetlegierungen führen dagegen Gleitvorgänge infolge Versetzungsbewegungen und Zwillingsbildung zu einer plastischen Verformung der Metalle vor dem Bruch (Bild 2.3). Dabei ist von beiden Mechanismen das Versetzungsgleiten der weit bedeutendere Vorgang. Dieser vollzieht sich auf besonders geeigneten Gleitebenen, die durch die Kristallstruktur der Metalle vorgegeben werden. Von den drei Kristallstrukturen, kubisch-flächenzentriert (kfz), kubisch-raumzentriert (krz) und hexagonal-dichtgepackt (hdp), ermöglicht die kfz-Struktur aufgrund einer Vielzahl günstiger Gleitmöglichkeiten eine gute Verformbarkeit der Metalle Aluminium, Kupfer und Nickel. Der Mechanismus der Zwillingsbildung spielt nur dann eine Rolle, wenn wie bei dem hexagonalen Gitter nur wenige Gleitmöglichkeiten vorhanden sind bzw. das Versetzungsgleiten infolge ungünstiger Beanspruchungsbedingungen, wie z. B. niedriger Temperatur oder hoher Verformungsgeschwindigkeit, erschwert wird. Die hierbei erreichten Verformungen sind im Vergleich zum Abgleiten jedoch wesentlich geringer. Nach Überschreitung des Formänderungsvermögens beginnen sich bei zäh verhaltenden Metallen an den Einschlüssen im Werkstoff infolge der hohen Spannungskonzentration Mikroporen zu bilden. Mit steigender Beanspruchung vereinigen sich diese durch Abscherung der Brücken zu kleineren Hohlräumen (Hohlraumkoaleszenz), was sich auf der Bruchfläche eines Zäh- bzw. Duktilbruches in einer wabenförmigen Struktur äußert. Der verformungsarme Spröbruch (Spaltbruch) verläuft

entweder entlang der Korngrenzen (interkristallin), wenn Korngrenzenausscheidungen, wie z. B. Phosphor oder Schwefel, die Korngrenzenfestigkeit herabsetzen, oder es kommt zum Aufspalten des Korns (transkristallin), wenn die durch den Aufstau der Versetzungen an unüberwindlichen Hindernissen, wie z. B. harten Einschlüssen und Korngrenzen, verursachten Spannungskonzentrationen durch mikroplastische Vorgänge nicht abgebaut werden können [1] [2] [5] [6].

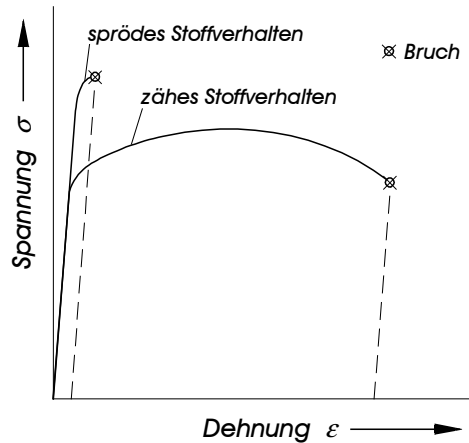


Bild 2.3: Spannungs-Dehnungs-Kurven für Metalle mit sprödem und zähem Stoffverhalten (nach [2])

Das Verformungs- und Bruchverhalten der Metalle wird sowohl durch strukturelle Faktoren (Kristallstruktur, Verunreinigungen, Einschlüsse, Reinheitsgrad) als auch durch die Beanspruchungsbedingungen (Temperatur, Beanspruchungsgeschwindigkeit, Spannungszustand) bestimmt. Bei der Herstellung der Metalle werden gezielt die Kristallstruktur und das Gefüge beeinflusst, um eine Steigerung der Festigkeit, der Dehngrenze und/oder der Bruchzähigkeit zu erreichen. Dabei wird durch die Erzeugung von wirksamen und möglichst gleichverteilten Versetzungshindernissen der Widerstand gegen die plastische Verformung, d. h. gegen Versetzungsbewegungen, erhöht. Solche Hindernisse können während der Verformung (Verformungsverfestigung), infolge von im Gitter gelösten Fremdatomen (Mischkristallverfestigung), durch ausgeschiedene Fremdatome (Teilchenverfestigung) und an den Korngrenzen (Korngrenzenverfestigung) hervorgerufen werden. Jedoch sind die erreichten Festigkeitssteigerungen mit

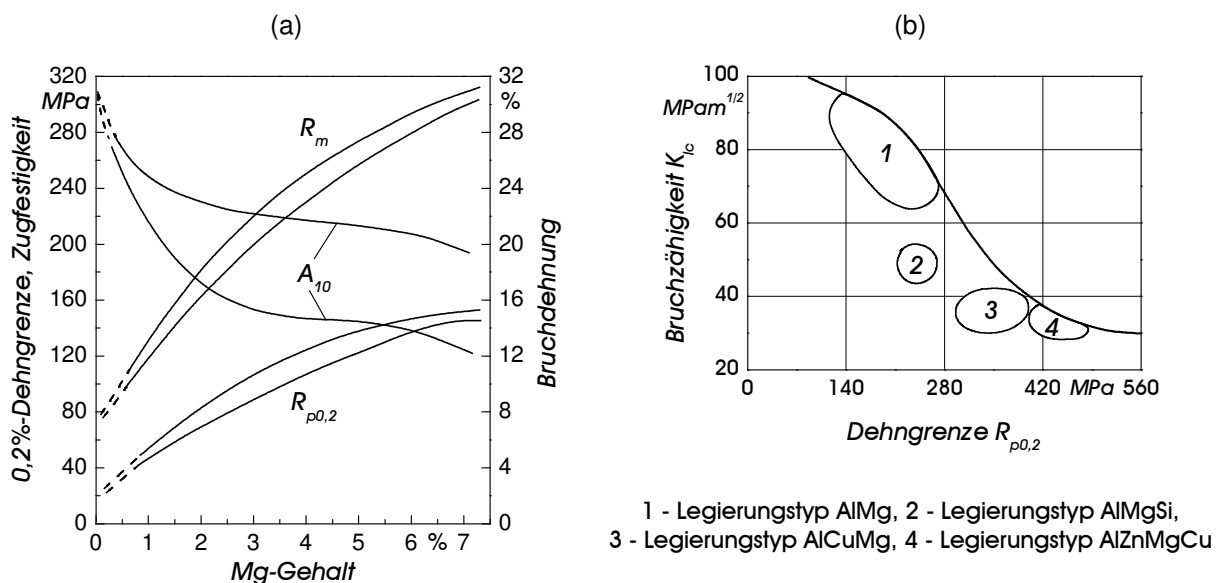


Bild 2.4: Auswirkung der Verfestigung von Aluminium auf die mechanischen Kennwerte des Zugversuchs (a) und die Bruchzähigkeit (b) (aus [5] [8])

Ausnahme der Verfestigung durch ein feinkörniges Gefüge mit einem deutlichen Zähigkeitsverlust verbunden. Das Verformungsverhalten nähert sich dem des spröden Stoffverhaltens an, obwohl der mikroskopische Bruchvorgang duktil verläuft. Daher spricht man auch von einem energiearmen Zähbruch [2]. Bild 2.4 zeigt die Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften von Aluminium am Beispiel der Mischkristallverfestigung (AlMg-Legierungen) und der Verfestigung durch Ausscheidung fester Teilchen (AlMgSi-, AlCuMg-, AlZnMgCu-Legierungen).

Der Einfluß der Temperatur und der Beanspruchungsgeschwindigkeit auf die mechanischen Eigenschaften der Metalle wird maßgeblich von deren Gefüge und Kristallstruktur beeinflusst. Während bei Metallen mit kubisch-flächenzentrierter Gitterstruktur sich das Verformungs- und Bruchverhalten aufgrund der zahlreichen Gleitmöglichkeiten auch bei niedrigen Temperaturen und hohen Geschwindigkeiten im allgemeinen nur unwesentlich ändert, vollzieht sich bei den Metallen mit kubisch-raumzentriertem Kristallgitter ein Übergang zum Sprödbbruch. Dieser Übergang vom Zäh- zum Sprödbbruch wird durch die Übergangstemperatur charakterisiert, bei der die Bruchspannung und die Fließspannung zusammenfallen und der Bruch ohne sichtbare plastische Verformung eintritt [2]. Mehrachsige Spannungszustände, hohe Beanspruchungs- bzw. Dehngeschwindigkeiten und eine Vergrößerung der Gefügebestandteile verschieben den Übergang zum Sprödbbruch zu höheren Temperaturen. Die Metalle mit hexagonaler Gitterstruktur weisen ein Verformungs- und Bruchverhalten auf, das zwischen den Metallen mit kubisch-flächenzentriertem und kubisch-raumzentriertem Gitter liegt [6].

Mechanische Eigenschaften der Kunststoffe

Die Kunststoffe zeigen ein relativ komplexes Verformungsverhalten, was in ihrem strukturellen Aufbau begründet ist. Daher ergibt sich bei verschiedenen Temperaturen ein voneinander abweichendes mechanisches Verhalten der Thermoplaste, Elastomere und Duromere (Bild 2.5).

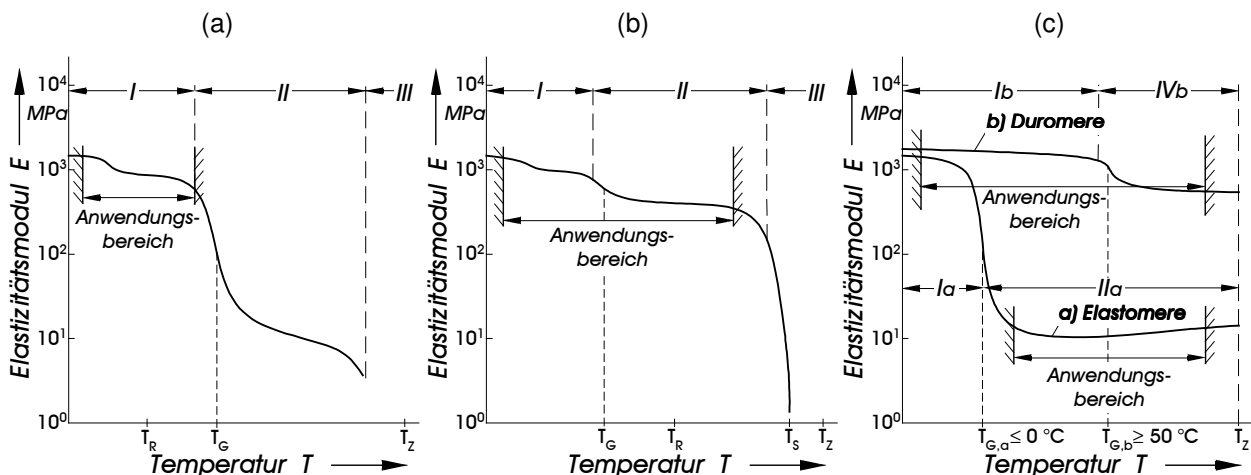


Bild 2.5: Einteilung der Kunststoffe aufgrund der Temperaturabhängigkeit ihres mechanischen Verhaltens (in Anlehnung an [2] [9] bis [12]);

(a) Amorphe Thermoplaste; (b) Teilkristalline Thermoplaste; (c) Vernetzte Kunststoffe

I - energieelastisches Verhalten; II - entropieelastisches Verhalten; III - viskoses Verhalten; IV - Erweichen;

T_G - Glasübergangstemperatur; T_R - Raumtemperatur; T_S - Kristallschmelztemperatur; T_Z - Zersetzungstemperatur

Die **Thermoplaste** bestehen aus unvernetzten, langen Molekülen, die entweder nur als Knäuelstruktur (amorph) vorliegen oder zusätzlich kristalline Strukturanteile, die sog. Sphärolithe, ausbilden (teilkristallin). Bei tiefen Temperaturen ist die Beweglichkeit der Makromoleküle stark

eingeschränkt, wodurch ein energieelastisches, sprödes Verhalten resultiert. Die Glasübergangstemperatur T_G kennzeichnet die Erweichung des Kunststoffes. Oberhalb dieser Temperatur können sich die Makromoleküle zunehmend umlagern und bewegen. Durch die gegenseitig verknäulten und verhakten Moleküle ergibt sich in einem breiten Temperaturbereich zunächst ein entpieleelastisches Verhalten. Während die amorphen Thermoplaste bei Erreichen der Glasübergangstemperatur vollständig erweichen, bleiben die kristallinen Anteile der teilkristallinen Thermoplaste in ihrem gebundenen Zustand. Daraus resultiert ein überwiegend zähes Stoffverhalten, aufgrund dessen die teilkristallinen Thermoplaste bevorzugt oberhalb der Glasübergangstemperatur verwendet werden. Erst bei der Kristallschmelztemperatur lösen sich die Sphärolithe auf. Bei einer weiteren Temperatursteigerung können die Makromoleküle irreversibel aneinander abgleiten. Es erfolgt der Übergang zum viskosen Stoffverhalten im Schmelzzustand.

Elastomere und **Duromere** zählen zu den vernetzten Kunststoffen. Die Elastomere sind weitmaschig vernetzt und lassen sich daher im Temperaturbereich zwischen der Glasübergangstemperatur ($T_G \leq 0\text{ °C}$) und der Zersetzungstemperatur entpieleelastisch dehnen, ohne daß irreversible Verformungsvorgänge stattfinden. Dagegen handelt es sich bei Duromeren um engmaschig vernetzte Kunststoffe, deren Glasübergangstemperatur oberhalb von 50 °C liegt. Durch das dichte, engmaschige Netzwerk treten vor dem Bruch praktisch keine irreversiblen Verformungen auf. Duroplaste verhalten sich bis zur Zersetzungstemperatur vorwiegend energieelastisch.

In Bild 2.6 sind die für die drei Kunststoffgruppen charakteristischen Spannungs-Dehnungs-Verläufe schematisch dargestellt. Die amorphen Thermoplaste, wie z. B. PVC, PS, PC und PMMA, verhalten sich bei Temperaturen, die deutlich unterhalb der Glasübergangstemperatur liegen, bzw. bei hohen Beanspruchungsgeschwindigkeiten vorwiegend energieelastisch (sprödes Stoffverhalten). Geringe plastische Verformungen treten nur in unmittelbarer Umgebung der Rißspitze in Form von Crazes auf. Bei Temperaturen in der Nähe der Glasübergangstemperatur beginnen sich die Moleküle aufgrund der größeren Beweglichkeit durch Umlagerungs-, Streck- und Orientierungsvorgänge der Beanspruchung anzupassen. Diese Vorgänge in amorphen Molekülverbänden verlaufen zeitlich verzögert und sind bei geringer Beanspruchung reversibel (Viskoelastizität). Eine stärkere Beanspruchung führt zu irreversiblen plastischen Verformungen, die sich in lokalisierten Fließbändern als Crazes (Normalspannungsfließzonen) oder Scherbänder (Schubspannungsfließzonen) äußern. Mit zunehmender Temperatur und abnehmender Geschwindigkeit bilden sich ausgedehnte Bereiche von Scherbändern aus, in denen sich größere plastische Verformungen vollziehen. Dabei kommt es auch zur Ausrichtung der Makromoleküle (Kettenver Streckung) und zum viskosen Abgleiten der Makromoleküle.

Für das Spannungs-Dehnungs-Verhalten der teilkristallinen Thermoplaste, wie z. B. PE, PP, PA, POM und PET, ist die Ausbildung einer Streckspannung und ein breiter Dehnungsbereich kennzeichnend. Dieses Verhalten resultiert aus den bei Raumtemperatur bereits beweglichen amorphen Molekülverbänden in Verbindung mit den harten, eingebetteten kristallinen Strukturen (Sphärolithe). Dadurch ergeben sich im Vergleich zu den amorphen Thermoplasten höhere Festigkeits- und Zähigkeitswerte. Geringe Beanspruchungen führen wie bei den amorphen Thermoplasten zu einer viskoelastisch-plastischen Verformung. Erst bei stärkerer Beanspruchung kommt es zu einer Ausrichtung und Verstreckung der kristallinen Sphärolithe. Die Sphärolithstruktur löst sich auf, und es bildet sich eine in Verformungsrichtung orientierte Molekülstruktur (Mikrofibrillen). Daraus resultiert eine Zunahme der Festigkeit. Die weitere Verformung bis zum Bruch erfolgt durch Abgleiten der Mikrofibrillen.

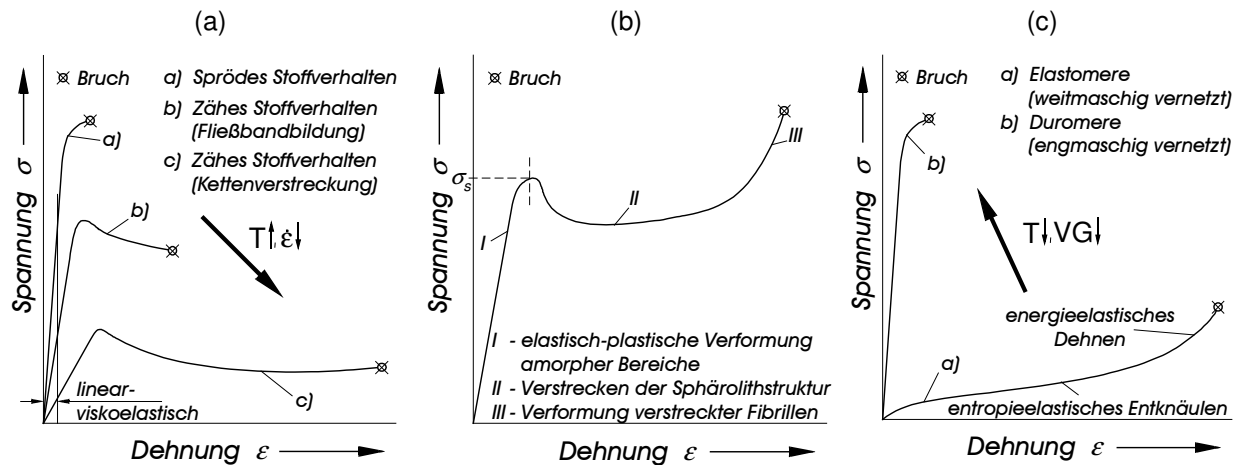


Bild 2.6: Spannungs-Dehnungs-Kurven amorpher (a) und teilkristalliner Thermoplaste (b) sowie der vernetzten Kunststoffe (c) (nach [2] [12] [13])

σ_s - Streckspannung; T - Temperatur; $\dot{\epsilon}$ - Beanspruchungsgeschwindigkeit; VG - Vernetzungsgrad

Das Verformungsverhalten der vernetzten Kunststoffe wird maßgeblich von dem Vernetzungsgrad, d. h. der Dichte des Netzwerks, und der Glasübergangstemperatur bestimmt. Bei den Duromeren (z. B. PF, UF, MF, UP und EP) ist die Beweglichkeit der Moleküle infolge des hohen Vernetzungsgrades so stark eingeschränkt, daß praktisch nur energieelastische Verformungen möglich sind und ein sprödes Bruchverhalten auftritt. Vergleichbare Verhältnisse treten bei den Elastomeren (z. B. BR, NR, PUR-Elastomere) auf, wenn die Moleküle unterhalb der Glasübergangstemperatur eingefroren sind. Im normalen Anwendungsbereich sind die Kettensegmente zwischen den Netzwerkknoten jedoch beweglich, so daß sie sich bei einer Beanspruchung ausrichten können (entropieelastisches Entknäueln). Nach einer vollständigen Ausrichtung der Kettensegmente führt eine weitere Beanspruchung dann zu einer energieelastischen Dehnung bis zum Bruch. Infolge der ausgeprägten entropieelastischen Verformungen grenzen sich die Elastomere deutlich vom Sprödbbruchverhalten ab. Jedoch läßt sich das Stoffverhalten aufgrund der fehlenden irreversiblen Verformungsanteile auch nicht dem Zähbruchverhalten zuordnen.

Das Verformungs- und Bruchverhalten der Kunststoffe wird wie bei den Metallen von ihrem strukturellen Aufbau, der Temperatur, der Beanspruchungsgeschwindigkeit und dem Spannungszustand beeinflusst. Da die Glasübergangstemperatur der meisten Kunststoffe relativ nah bei der üblichen Gebrauchstemperatur liegt, ist der Einfluß der Temperatur und der Geschwindigkeit jedoch wesentlich stärker. Die Auswirkungen auf das Verformungs- und Bruchverhalten der amorphen Thermoplaste verdeutlicht schematisch Bild 2.6a.

2.2 Beanspruchungsarten für die Grob- und Mittelzerkleinerung nicht-spröder Stoffe

Aufgrund des spezifischen Stoffverhaltens erfordert die Zerkleinerung der nicht-spröden Stoffe Beanspruchungsarten, die auch nach einer größeren plastischen bzw. viskosen Verformung zum Bruch führen. Für die Grob- und Mittelzerkleinerung, d. h. bis zu einer unteren Stückgröße des zerkleinerten Gutes von ca. 5 bis 10 mm, eignen sich besonders Schneid-, Scher- oder Reißbeanspruchungen (Zugbeanspruchung in Verbindung mit Biegung und Torsion) und in Sonderfällen eine Biegebeanspruchung (Bild 2.7) [7]. Mit den für die Zerkleinerung der Stoffe mit überwiegend sprödem Verhalten, wie z. B. den mineralischen Rohstoffen sowie den Gußeisen-

und NE-Metall-Gußlegierungsschrotten, geeigneten Druck-, Prall- und Schlagbeanspruchungen wird im allgemeinen keine Zerkleinerung der nicht-spröden Stoffe erreicht.

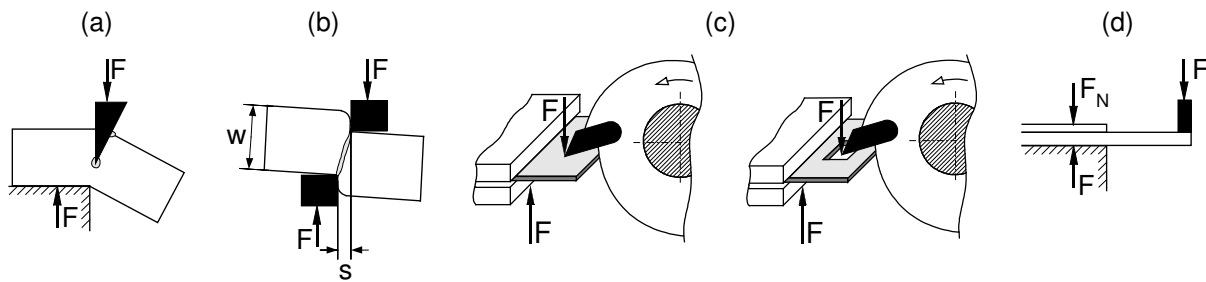


Bild 2.7: Beanspruchungsarten für die Grob- und Mittelzerkleinerung von Stoffen mit nicht-sprödem Verhalten (nach [7] [15] bis [17])

(a) Schneidbeanspruchung (Messerschneiden); (b) Scherbeanspruchung (Scherschneiden); (c) Reißbeanspruchung (Zugbeanspruchung in Verbindung mit Biegung und Torsion); (d) Biegebeanspruchung (Biegebrechen);
 F - Kraft; F_N - Niederhalterkraft; w - Wanddicke; s - Spaltweite

Durch die über die Zerkleinerungswerkzeuge eingeleiteten Kräfte entsteht im Material ein mehrachsiger Spannungszustand aus Normal- (Druck-, Zug-) und Schubspannungen. Dieser Spannungszustand beeinflusst maßgeblich die dem Bruch vorausgehenden Verformungen und die Art des Bruches. So begünstigen hohe Zugspannungen bei einem vergleichsweise geringen Schubspannungsanteil die Ausbildung eines Spaltbruches (Sprödbbruch) [18]. Dagegen muß für eine plastische Verformung eine hohe Schubspannung aus den wirkenden Hauptnormalspannungen resultieren. Erreicht diese die Schubfließgrenze, setzt zunächst eine plastische Verformung ein, bevor nach der Überschreitung der Schubbruchgrenze ein Gleitbruch die Folge ist (Zähbruch). Aufgrund der voneinander abweichenden Werkzeuggeometrien und der Abstandsverhältnisse bilden sich bei der Zerkleinerung der nicht-spröden Stoffe mittels der in Bild 2.7 dargestellten Beanspruchungsarten sehr unterschiedliche Spannungszustände aus.

2.2.1 Schneidbeanspruchung

Die Schneidbeanspruchung (Messerschneiden) ist durch eine linienförmige Krafteinleitung in das Material entlang der Messerschneide mit einem geringen Keilwinkel (i. allg. $< 30^\circ$) gekennzeichnet. Durch die hohe Spannungskonzentration bildet sich die Versagenszone in unmittelbarer Umgebung der Schneide aus. Der Bruch erfolgt durch das Wirken von Schub- und Zugspannungen, wobei letztere durch die Spaltwirkung des Messers hervorgerufen werden (Bild 2.8). Das Gegen- bzw. Statormesser dient als Widerlager und ist nicht aktiv am Zerkleinerungsvorgang beteiligt. Die jeweiligen Schub- und Zugspannungsanteile bei der Schneidbeanspruchung werden maßgeblich durch den Keilwinkel β_R bestimmt. Bei Messern mit einem größeren Keilwinkel ($> 30^\circ$) gewinnen die Schubspannungen immer mehr an Bedeutung, wodurch sich eine kombinierte Schneid-/Scherbeanspruchung ergibt [19].

Wesentliche Erkenntnisse zu den Grundlagen der Schneidbeanspruchung konnten in Verbindung mit der Zerkleinerung von Kunststoffen und Gummi [19] bis [28], Textilien [29], Nahrungsmitteln und landwirtschaftlichen Gütern [30] bis [34] gewonnen werden. Danach können zwei unterschiedliche Varianten des Schneidvorgangs unterschieden werden [19] [20] [21]:

1. die Schneidbeanspruchung mit vollständig duktiler Materialtrennung und
2. die Schneidbeanspruchung mit einem spröden Restbruch im Anschluß an eine duktile Anschnittphase

Während im ersten Fall die Trennung des Materials unter starker plastischer Verformung in der Nähe der Schneide erfolgt, kann bei einer dynamischen Schneidbeanspruchung viskoelastischer Stoffe nach einer duktilen Anschnittphase ein spröder Restbruch auftreten. Hierbei eilt die Rißfront der Messerschneide voraus, wodurch sich der Übergang zum Spalten ergibt. Von wesentlichem Einfluß auf das Auftreten der jeweiligen Variante der Schneidbeanspruchung ist neben den Werkstoffeigenschaften und der Beanspruchungsgeschwindigkeit vor allem der Keilwinkel des Messers. Geringe Keilwinkel und hohe Beanspruchungsgeschwindigkeiten fördern die Ausbildung von Zugspannungen und dadurch das Auftreten des spröden Restbruchs [19].

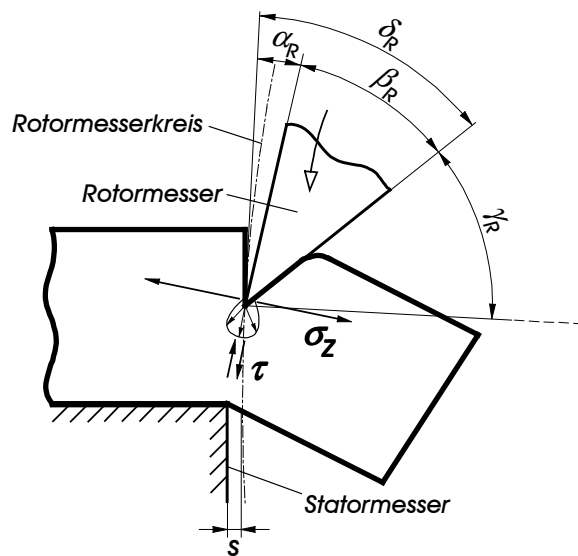


Bild 2.8: Spannungsverhältnisse bei der Schneidbeanspruchung (nach [19] [20])

σ_Z - Zugspannung; τ - Schubspannung;
 α_R - Freiwinkel, β_R - Keilwinkel; γ_R - Spanwinkel,
 δ_R - Schnittwinkel, s - Spaltweite

Allgemein setzt sich die am Messer wirkende Kraft aus den Anteilen für die Trennung des Materials, die Reibung am Messer sowie die Verformung und Beschleunigung des Bruchstücks zusammen. Diese Anteile bestimmen auch die für den Schneidvorgang aufzuwendende Energie, wobei insbesondere der Energiebedarf für Reibung und Verformung entscheidend ist. Nach GOTTBERG [20] und BAUER [19] ist die Geometrie des Messers, d. h. der Frei-, Keil- und Spanwinkel, sowie der Schneidkantenradius maßgebend für die aufzuwendenden Reibungs- und Verformungsanteile. Eine Verringerung des Freiwinkels bewirkt erhöhte Reibungsverluste. Er sollte daher nach GOTTBERG [20] 14° möglichst nicht unterschreiten. Größere Keil- bzw. Schnittwinkel fördern das Entstehen von Schubspannungen, wodurch sich die Zone der plastischen Verformung vor der Messerschneide ausdehnt. Infolgedessen steigt die Schneidkraft und -energie deutlich an [26]. Daher sind aus verfahrenstechnischer Sicht geringe Keil- bzw. Schnittwinkel in Verbindung mit einem ausreichend großen Freiwinkel zu empfehlen. Um jedoch einen übermäßigen Verschleiß bzw. ein Ausbrechen der Schneide zu verhindern, werden je nach dem zu zerkleinernden Material Messer mit Keilwinkeln bis zu 60° eingesetzt [19]. Auch die durch den Verschleiß der Messerschneide entstehenden Schneidkantenradien bewirken einen größeren Verformungsbereich vor der Schneidkante, was sich sowohl im Anstieg des Energiebedarfs als auch in einer größeren Schneidkraft äußert [19].

2.2.2 Scherbeanspruchung

Bei der Scherbeanspruchung (Scherschneiden) werden flächig verteilte Druckkräfte über zwei versetzt angeordnete Messer in das Material eingeleitet. Beide Messer weisen Keilwinkel von 80 bis 90° auf und sind aktiv am Zerkleinerungsvorgang beteiligt. Diese rufen zunächst Schubspannungen im Material hervor, die zum Abgleiten führen, und später einen höheren Zugspannungsanteil, der den Bruch einleitet. Als Voraussetzung für das Wirken hoher Schubspannungen gilt eine gegenüber der Wanddicke w geringe Spaltweite von meist $s \leq 0,2 w$.

In Abhängigkeit von der Gestalt, Anordnung und Bewegung der Messer können die in Tabelle 2.2 dargestellten Varianten der Scherbeanspruchung unterschieden werden [35]. Eine geschlossene Kontur der Schnittlinie ergibt sich beim Lochen mittels eines Stempelmessers. Dagegen bewirkt die Zerkleinerung mit Lang- und Kreismessern eine offene Schnittlinie. Weiterhin lässt sich je nach Messerstellung ein parallelkantiger oder kreuzender Schervorgang unterscheiden. Während im ersten Fall die Scherkanten parallel zueinander stehen, sind sie beim kreuzenden Scheren in einem spitzen Winkel angeordnet. Beim drückenden Scheren bildet die Schneidkante mit der Beanspruchungsrichtung des Messers einen Winkel von $\lambda = 90^\circ$. Beim ziehenden Scheren wird dieser Messerbewegung eine Bewegung in Richtung der Scherkante überlagert. Durch eine entsprechende Stempelgestaltung kann auch beim Scheren mit geschlossener Schnittlinie ein kreuzender und ziehender Schnitt realisiert werden. Unter zerkleinerungstechnischen Gesichtspunkten sind insbesondere die Varianten der Scherbeanspruchung mit Lang- und Kreismessern von Bedeutung.

Tabelle 2.2: Varianten der Scherbeanspruchung (in Anlehnung an [35] bis [37])

B - Messerbewegung; φ - Messerneigungswinkel; λ - Winkel zwischen Scherkante und Messerbewegung

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
Messer-gestalt	Stempelmesser	Langmesser			Kreismesser
Kontur der Schnittlinie	geschlossen	offen			
Messer-stellung	parallel ($\varphi = 0^\circ$)		kreuzend ($\varphi > 0^\circ$)		
Messer-bewegung	drückend ($\lambda = 90^\circ$)			ziehend ($\lambda < 90^\circ$)	

Die bisherigen Erkenntnisse zu den Grundlagen der Scherbeanspruchung (Scherschneiden) sind aus einer Vielzahl von Forschungsarbeiten der Fertigungstechnik zum Stanzen und Beschneiden von Blechen und Platten bekannt [35] bis [59]. Ausgehend von diesen Untersuchungen vollzieht sich der Schervorgang in mehreren charakteristischen Abschnitten.

Schervorgang

In Bild 2.9 ist der Schervorgang am Beispiel des parallelkantigen Scherens mit offener Schnittlinie schematisch dargestellt. Der Schervorgang beginnt mit einer elastischen und später plastischen Verformung des Materials während der **Verformungsphase** (a). Dabei rufen die über

die versetzt angeordneten Messer eingeleiteten Druckkräfte F_V ein Biegemoment M_b hervor, welches zum Abheben des Materials vom Ober- und Untermesser führt. Anschließend bilden sich im Bereich der Scherkanten Verformungszonen (sog. Kanteneinzüge) aus, die auf Fließvorgänge in den Randbereichen des Materials zurückzuführen sind. In der sich anschließenden **Scherphase** (b) kommt es mit weiterem Eindringen der Messer zum Abgleiten des Werkstoffs.

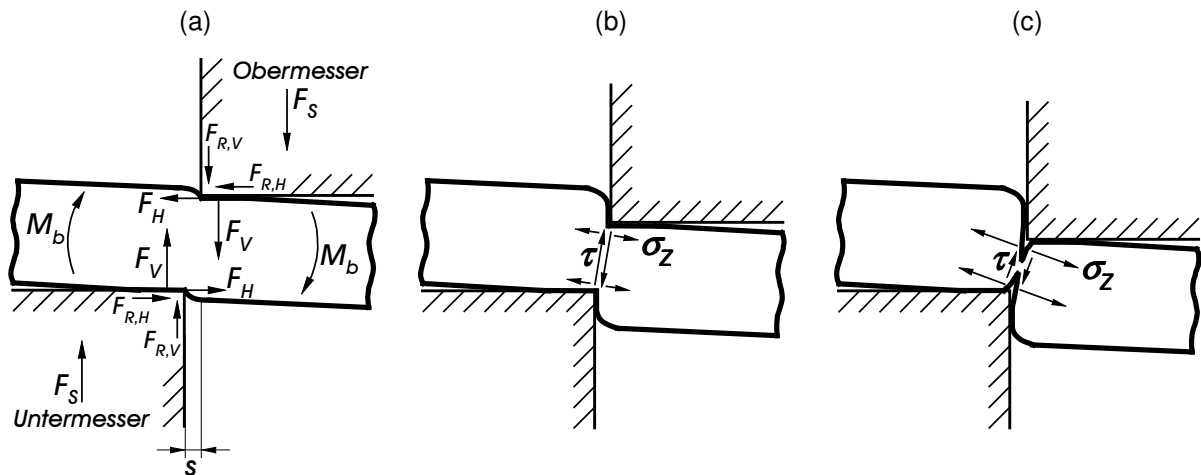


Bild 2.9: Ablauf der Scherbeanspruchung (nach [38] bis [40])

(a) Verformungsphase; (b) Scherphase; (c) Bruchphase; F_S - über die Messer eingeleitete Scherkraft; F_V - vertikale Komponente der Scherkraft (Druckkraft); F_H - horizontale Komponente der Scherkraft (Abdräng- oder Kaukraft); F_R - Reibungskraft; M_b - Biegemoment; s - Spaltweite; σ_z - Zugspannung; τ - Schubspannung;

Der Beginn des Abgleitens ist durch einen mehrachsigen Spannungszustand aus Normal- (Druck-, Zug-) und Schubspannungen charakterisiert, der sich mit hinreichender Genauigkeit mittels der Schubspannungshypothese beschreiben läßt [38] [42] [43]. Nach dieser erfährt das Material eine bleibende Formänderung, wenn die maximal wirkende Schubspannung die Schubfließgrenze erreicht. Im Verlauf des Schervorgangs nimmt der Zugspannungsanteil stetig zu. Sobald die resultierende Schubspannung die Schubbruchgrenze erreicht, entstehen ausgehend von den höchst beanspruchten Zonen nahe der Scherkanten Risse, die den Restbruch in der **Bruchphase** (c) einleiten. Während beim Scheren mit geschlossener Schnittlinie die Risse im allgemeinen von beiden Scherkanten ausgehen, kann beim Scheren mit offener Schnittlinie auch nur eine einseitige Rißausbreitung eintreten. Dann bewirken die infolge des Biegemomentes zusätzlich wirkenden Zugspannungen das Einsetzen der Rißbildung im Bereich der Scherkante des Obermessers [44] [45]. Nach CRASEMANN [39] ist dies beim kreuzenden Scheren meist nur bei sehr schmalen Streifen (Abschnittslänge/Wanddicke < 2) der Fall. Beim Scheren mit geschlossener Schnittlinie kann sich nach dem Bruch zusätzlich eine **Abstreifphase** anschließen. Da sich nach dem Bruch die elastischen Verformungen zurückbilden, entstehen zwischen dem Material und den Mantelflächen der Messer kraftschlüssige Verklebungen. Für eine weitere Bewegung der Messer bzw. des Bruchstücks müssen daher die Reibungskräfte überwunden werden [42] [44].

Die beschriebenen Phasen spiegeln sich deutlich im Scherkraft-Weg-Verlauf sowie in der Ausbildung der Bruchflächen wider (Bild 2.10). Bereits nach einer geringen Eindringtiefe der Messer steigt in Verbindung mit der Verformung des Materials die Kraft sehr stark an. In der folgenden Scherphase tritt zum einen eine Verfestigung des Materials ein und zum anderen nimmt der verbleibende Querschnitt ab. Beide Effekte überlagern sich, so daß die Scherkraft nur

noch geringfügig ansteigt. Die sich vollziehenden Gleitvorgänge bewirken eine glatte Anschnittzone. Anschließend kommt es zur Rißbildung, und die Kraft fällt steil ab. Während dieser Phase entsteht der typische Restbruch. Da beide Messer aktiv am Schervorgang beteiligt sind und sich in entgegengesetzter Richtung bewegen, weisen die zwei Bruchflächen die charakteristischen Zonen in spiegelbildlicher Reihenfolge auf.

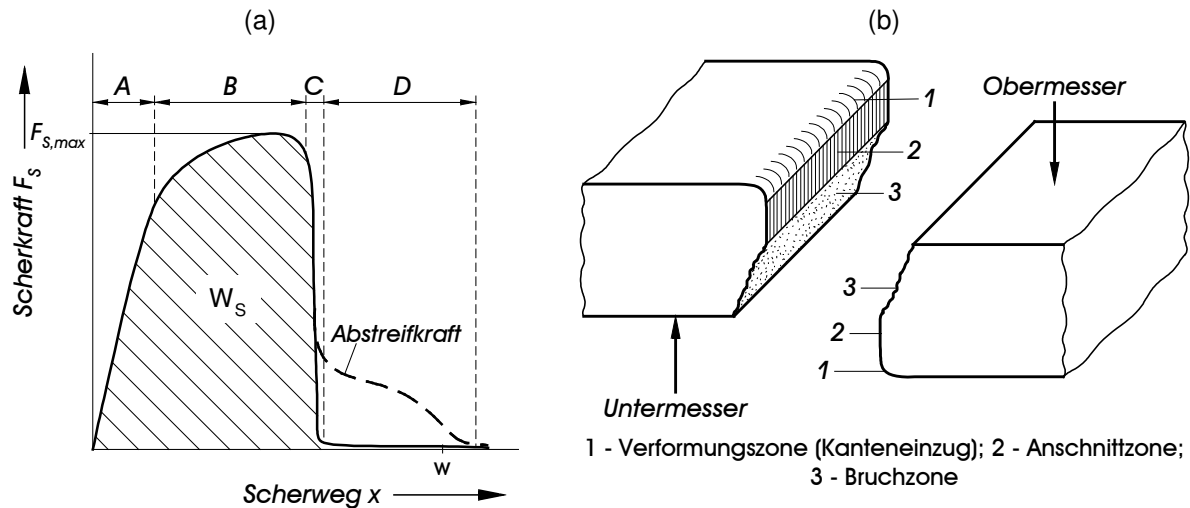


Bild 2.10: Kraft-Weg-Verlauf (a) und Gestalt der Bruchflächen bei der Scherbeanspruchung (b), schematisch (in Anlehnung an [42] [46] [47])

A - elastische Verformung; B - Fließen; C - Rißbildung und Bruch; D - Reibung zwischen Messer und Material; $F_{S,max}$ - maximale Scherkraft; w - Wanddicke; W_S - Scherenergie

Scherkraft und Scherenergie

Die Berechnung der maximalen Scherkraft erfolgt im einfachsten Fall nach Gl. (2.1).

$$F_{S,max} = k_S A_S \quad (2.1)$$

Hierin ist A_S die Scherfläche und k_S die bezogene Scherkraft, die auch als Scherwiderstand bezeichnet wird. Diese ist von den Werkstoffeigenschaften, insbesondere von der Festigkeit und dem Formänderungsvermögen, sowie der Beanspruchungsgeometrie und der Wanddicke des Materials abhängig [38]. Für die Berechnung der bezogenen Scherkraft gilt im allgemeinen:

$$k_S = C \cdot R_m \quad (2.2)$$

Das Verhältnis von bezogener Scherkraft und Zugfestigkeit ist nicht konstant, sondern bewegt sich nach Untersuchungen verschiedener Autoren bei Stahlblechen im Bereich von $C = 0,55 \dots 0,95$ [38] [41] [48] bis [50] und bei Aluminium zwischen $C = 0,60 \dots 0,85$ [44] [50]. Nach TIMMERBEIL [51] sind die Abweichungen zwischen den gemessenen und den berechneten Werten im allgemeinen nicht sehr groß. LANGE [38] gibt die Abweichungen zur tatsächlichen Scherkraft mit $\pm 20\%$ an.

Neben der zur Trennung führenden Scherkraft wirken auch horizontale Kraftkomponenten, sog. Abdräng- oder Kaukräfte, die zu einer elastischen Verformung der Messer führen können. Damit verbunden ist eine Vergrößerung der Spaltweite während des Schervorgangs [52]. Beim Scheren mit geschlossener Schnittlinie treten zusätzlich Abstreifkräfte infolge des Kontaktes zwischen Material und Messer auf. Diese können nach LANGE [38] bis zu 40 % der Scherkraft betragen.

Der Energiebedarf für den Schervorgang entspricht der Fläche unter der Kurve im Kraft-Weg-Diagramm (Bild 2.10a) entsprechend Gl. (2.3).

$$W_S = \int_{x=0}^{x=x_g} F_S(x) dx \quad (2.3)$$

Darin stellt F_S die momentane Scherkraft dar, die über den Gesamtscherweg x_g integriert wird. Des weiteren besteht die Möglichkeit, die Scherenergie aus der berechneten maximalen Scherkraft nach folgender Beziehung zu berechnen:

$$W_S = m \cdot w \cdot F_{S,\max} \quad (2.4)$$

Als Scherweg wird die Wanddicke w angenommen. Mit dem Korrekturwert m werden verschiedene Einflußgrößen wie Werkstoffeigenschaften, Wanddicke, Spaltweite und die auftretende Reibung berücksichtigt. Untersuchungen von KRÄMER [48], ROMANOWSKI [41] und EICKHOFF [53] zeigen, daß der Faktor m für bestimmte k_S -Bereiche zwischen 0,3 und 0,75 variiert.

Einflußgrößen auf den Schervorgang

Die **Eigenschaften des Materials** beeinflussen nicht nur die beim Scheren auftretenden Kräfte und den Energiebedarf, sondern auch maßgeblich die jeweiligen Anteile der drei Phasen am Schervorgang. Bei plastischen Stoffen, wie z. B. Blei, Zinn oder Reinaluminium, kann die Trennung ausschließlich durch Abgleiten des Materials in der Scherphase stattfinden. Eine Rißbildung tritt dabei nicht ein [52]. Mit verschiedenen Aluminiumlegierungen konnte HOOGEN [44] nachweisen, daß sich ausgedehnte Verformungs- und Anschnittzonen insbesondere dann ausbilden, wenn das Material eine geringe Dehngrenze $R_{p0,2}$ und ein niedriges Streckgrenzenverhältnis $R_{p0,2}/R_m$ aufweist.

Der Einfluß der **Spaltweite** auf den Schervorgang ist sehr komplex. Mit größer werdendem Spalt nehmen die Zugspannungen im Querschnitt infolge einer steigenden Biegebeanspruchung zu. Dadurch werden die Verformungs- und die Bruchzone größer [43]. Dagegen bewirkt eine sehr geringe Spaltweite die Ausbildung hoher Schubspannungen, die das Abgleiten in der Scherphase begünstigen. Beim Feinschneiden kann sich deshalb in Verbindung mit einem Niederhalter mit Ringzacke die Anschnittzone über den gesamten Querschnitt erstrecken [54] [55]. Die Scherkraft und die Scherenergie nehmen bei geringen Spaltweiten von weniger als 10 % der Wanddicke zu, was auf eine stärkere Werkstoffverfestigung und eine ungünstigere Rißausbreitung zurückzuführen ist [38] [40] [41] [51] [56] [57]. Übliche Spaltweiten liegen je nach Werkstoff im Bereich von 4 ... 18 % der Wanddicke [40].

Ein **Verschleiß** der Scherkanten bewirkt eine größere Eindringtiefe des Messers bis zum Bruch sowie eine Zunahme der maximalen Scherkraft und der erforderlichen Scherenergie infolge einer stärkeren Verformung des Werkstoffs [58] [59].

Der Einsatz eines **Niederhalters** beeinflusst den Schervorgang dahingehend, daß das Abheben des Materials vom Messer verhindert wird. Dadurch können die horizontalen Kraftkomponenten (Abdrängkräfte) und die Verformung des Werkstoffs in den Randbereichen der Messer (Kanteneinzüge) verringert werden [42] [54].

Mit der Veränderung der *Messergeometrie* können die Scher- und Reibungskräfte reduziert werden. Messer mit Keilwinkeln von 90° verursachen hohe Reibungskräfte an ihren Seitenflächen. Daher ist man bestrebt, geringe Keilwinkel von wenigen Grad zu realisieren. Bereits Keilwinkel von ca. 85° können den Kraft- und Energiebedarf beim Scheren deutlich verringern. Aufgrund der hohen Messerbelastung werden im allgemeinen jedoch beim Scheren keine Messer mit Keilwinkel $< 80^\circ$ eingesetzt [36] [38].

2.2.3 Reißbeanspruchung

Bei der Reißbeanspruchung bewirkt eine überwiegende Zugbeanspruchung, die meist von Biege- und Torsionsvorgängen überlagert wird, die Zerkleinerung des Materials [15]. Dabei unterscheidet man zwei Phasen der Reißbeanspruchung, das Einreißen und das Weiterreißen. Im ersten Fall müssen zunächst Anrisse in Verbindung mit einem Lochvorgang [15] [60], z. B. durch das Eingreifen von Reißwerkzeugen, bzw. durch Umformung (Biegung, Torsion) [15] [61] geschaffen werden, bevor ein Weiterreißen bis zum Bruch möglich ist (s. Bild 2.7c links). Sind jedoch Hohlräume im Material enthalten, so können die Zerkleinerungselemente in diese eingreifen und der Einreißvorgang entfällt (s. Bild 2.7c rechts). Im Vergleich zur Schneid- und Scherbeanspruchung ist das Reißen durch Spaltweiten zwischen den Zerkleinerungselementen gekennzeichnet, die meist ein Mehrfaches der Wanddicke des Aufgabematerials betragen [60] [61].

Obwohl die Reißbeanspruchung für die Zerkleinerung der nicht-spröden Abfälle und Schrotte in vielen Fällen die entscheidende Beanspruchungsart darstellt, liegen unter zerkleinerungstechnischen Gesichtspunkten bisher nur wenige systematische Grundlagenuntersuchungen vor. Ein bedeutender Erkenntnisgewinn konnte in Verbindung mit der Analyse der in schnelllaufenden Hammerreißern (Shredder) sich vollziehenden Zerkleinerungsvorgänge von KIRCHNER [62], TIMMEL [63] und SANDER [64] erzielt werden. Des weiteren ergibt sich durch das Reißen auch auf dem Gebiet der Fertigungstechnik seit kurzem eine Alternative zum Scheren [44].

Reißbeanspruchung von plattenförmigem, hohlraumfreiem Material

KIRCHNER [62] und SANDER [64] untersuchten die Reißbeanspruchung von einseitig eingespannten, plattenförmigen Probekörpern, wie sie in der ersten Phase der Zerkleinerung in Hammerreißern zwischen den Schlagelementen des Rotors und dem Amboß auftreten kann, mit Hilfe eines modifizierten Pendelschlagwerkes. Aus diesen Untersuchungen geht hervor, daß sowohl die geometrischen Abmessungen der Bleche als auch die Abstandsverhältnisse zwischen Amboß und Schlagelement dafür entscheidend sind, ob das Material nur verformt wird oder eine Anrißbildung erfolgt. Ein hohes Widerstandsmoment gegen Biegung und eine geringe Spaltweite begünstigen die Anrißbildung.

Infolge der hohen Spannungskonzentration findet die Anrißbildung bevorzugt in den durch die scharfen Kanten des Zerkleinerungswerkzeuges beanspruchten Materialbereichen statt [62]. Das Eingreifen des Zerkleinerungswerkzeuges führt zunächst zu einer Verformung des Materials, die mit einem Tiefziehprozeß bei großem Ziehspalt verglichen werden kann [62] [63]. Dabei müssen die für die Krafteinleitung erforderlichen Reaktionskräfte durch eine Widerlagerbildung im Zerkleinerungsraum, durch eine Einspannung oder über die Massenträgheit des Materials gebildet werden [62] [63] [64]. Die Reißerweiterung bis zum Bruch verläuft ebenfalls meist entlang der unmittelbaren Einwirkzonen der Zerkleinerungselemente [62].

Nach KIRCHNER [62] und SANDER [64] ist für die Anrißbildung ein deutlich höherer bruchflächenbezogener Energiebedarf als für die Rißerweiterung erforderlich. Das ist darauf zurückzuführen, daß in der Anfangsphase zunächst durch energieintensive Umformvorgänge ausbreitungsfähige Anrisse geschaffen werden müssen. Erst wenn diese vorhanden sind, erfolgt die Rißausbreitung bis zum Bruch unter annähernd konstanter Energiezufuhr.

Reißbeanspruchung von voluminösem, hohlraumhaltigem Material

Günstige Voraussetzungen für eine Reißbeanspruchung des Materials bestehen, wenn dieses Hohlräume enthält, in die die Zerkleinerungselemente eingreifen können [62] [64]. Dann entfällt die Anrißbildung, und die Risse gehen bevorzugt von Materialbereichen aus, die aufgrund von Ecken, Kanten oder Querschnittsänderungen einer höheren Beanspruchung unterliegen bzw. bereits vorbeansprucht worden sind. Ist das Eingreifen der Zerkleinerungswerkzeuge in vorhandene Hohlräume jedoch nicht möglich, findet erst eine Verdichtung des Materials statt. Anschließend müssen wie bei der Reißbeanspruchung von hohlraumfreiem Material zunächst Anrisse durch das Einwirken der Zerkleinerungswerkzeuge geschaffen werden [64].

2.3 Rotorschern und Rotorreißer für die Zerkleinerung nicht-spröder Abfälle und Schrotte

In Abhängigkeit von den Eigenschaften der zu zerkleinernden Materialien sowie der Zielstellung der Zerkleinerung haben sich für die Grob- und Mittelzerkleinerung der Abfälle und Schrotte eine Vielzahl verschiedener Zerkleinerungsmaschinen herausgebildet. Eine Möglichkeit der Systematisierung dieser konstruktiv sehr unterschiedlich gestalteten Zerkleinerungsmaschinen ergibt sich auf der Grundlage der jeweils dominierenden Beanspruchungsart (Bild 2.11).

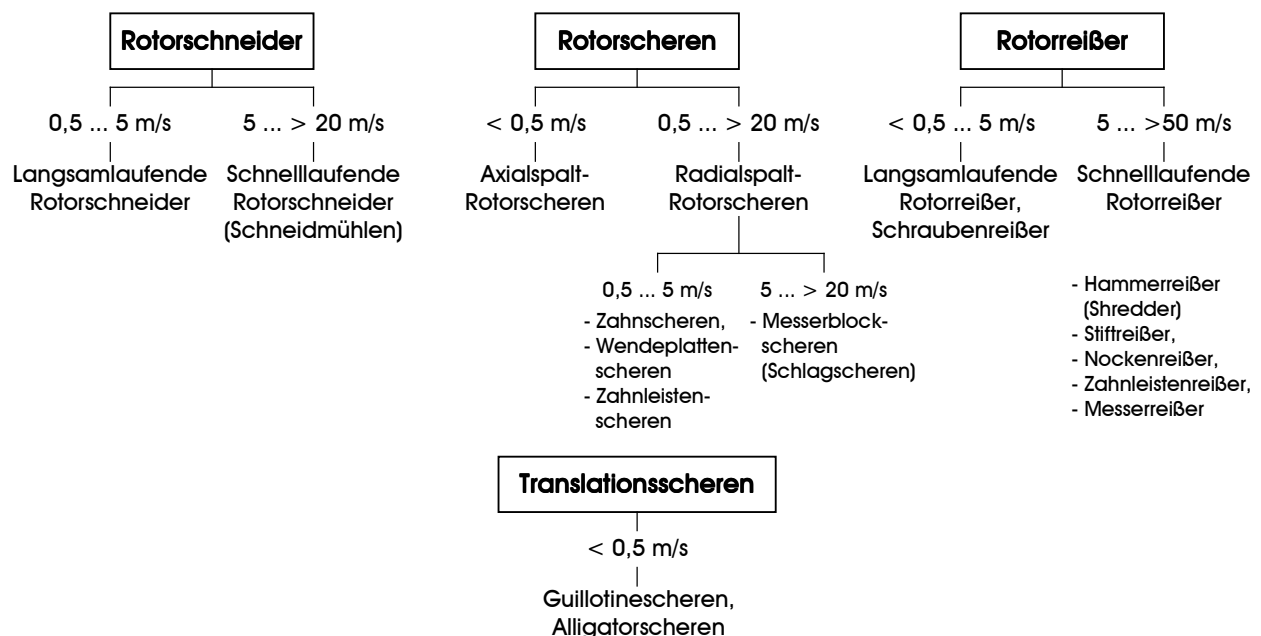


Bild 2.11: Gliederung der Zerkleinerungsmaschinen für die Grob- und Mittelzerkleinerung nicht-spröder Stoffe nach der dominierenden Beanspruchungsart (nach [7] [17] [68])

Bedingt durch die Messergeometrie werden die Rotorschneider vor allem zur Zerkleinerung von Materialien geringer Festigkeit und Härte, wie z. B. von landwirtschaftlichen Gütern, Nahrungs-

mitteln, Kunststoffen und Gummi, Holz sowie Textilien eingesetzt [65] bis [67]. Eine große Bedeutung auf dem Gebiet der Schrott- und Abfallzerkleinerung besitzen die Rotorscheren und Rotorreißer mit Rotorumfangsgeschwindigkeiten von < 5 m/s (langsamlaufende Bauarten) und bis > 50 m/s (schnelllaufende Bauarten). Wegen der geringen Investitionskosten, dem niedrigen spezifischen Energiebedarf, der geringen Lärm- und Staubentwicklung sowie der insgesamt hohen Verfügbarkeit der Zerkleinerungsmaschine haben die langsamlaufenden Rotorscheren und -reißer eine zunehmend größere Verbreitung gefunden [60]. Die Anwendung der Guillotine- und Alligatorscheren beschränkt sich auf die Zerkleinerung großstückiger und z. T. dickwandiger Stahl- und NE-Metallschrotte sowie großflächiger Textilabfälle [6] [7].

2.3.1 Bauformen und Einsatzgebiete

Die Rotorscheren und langsamlaufenden Rotorreißer unterscheiden sich durch ihre konstruktive Gestaltung der Zerkleinerungselemente und -räume. Während Rotorscheren relativ geringe Abstände zwischen den Zerkleinerungselementen aufweisen, betragen diese in Rotorreißern meist ein Mehrfaches der Wanddicke des Aufgabematerials [15] [60]. Trotz dieser Unterschiede in der Gestaltung der Rotorscheren und -reißer werden sie für vergleichbare Zerkleinerungsaufgaben eingesetzt.

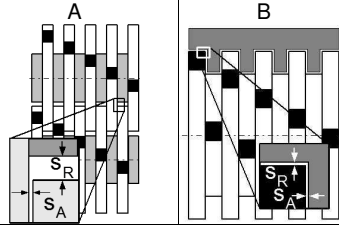
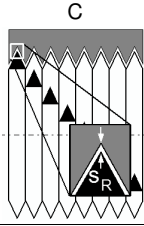
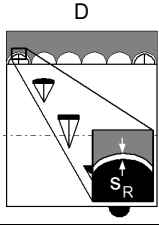
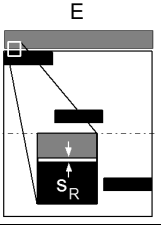
Rotorscheren

Rotorscheren werden für die Vor-, Grob- und Mittelzerkleinerung von ausgewählten Stahl- und NE-Metallschrotten, Haus- und Sperrmüll, Holzabfällen, Altreifen, Altakten u. v. a. eingesetzt. Das Ziel der Zerkleinerung kann in der Erhöhung der Schüttdichte, der Verbesserung der Transporteigenschaften oder der Herstellung eines Fertigproduktes bestehen, aber auch aus der Notwendigkeit resultieren, bestimmte Materialien zu vernichten (Akten, Ordner, Datenträger) bzw. zu zerstören (Ampullen, Injektionsspritzen). Bei einer mehrstufigen Zerkleinerung dienen Rotorscheren oft als Vorzerkleinerungsaggregate (z. B. bei der Aufbereitung von Kabelschrotten).

Je nach Gestaltung der Zerkleinerungsräume und -elemente können die Rotorscheren in Axialspalt- und Radialspalt-Rotorscheren untergliedert werden. Einen Überblick über die Gestaltungsmerkmale und die Baugrößen beider Rotorscherentypen vermittelt Tabelle 2.3.

Die Zerkleinerung in **Axialspalt-Rotorscheren** vollzieht sich sowohl in ihren axialen als auch in den radialen Spalten. Namensgebend für diese Rotorscheren ist die anteilig bedeutsame Scherbeanspruchung im engen axialen Spalt der sich überdeckenden Rotoren (mehrrotorige Bauarten) oder zwischen Rotormesser und Stator (einrotorige Bauarten). Vor allem die mehrrotorigen Bauarten sind sehr weit verbreitet. Sie bestehen aus zwei bis vier Rotoren, die sich aus abwechselnd angeordneten Rotor- und Distanzscheiben zusammensetzen (Bild 2.12). Die Rotorscheiben sind mit mehreren Werkzeugen bestückt und überdecken sich gegenseitig. Infolgedessen ergeben sich in Verbindung mit den gegenläufig rotierenden Wellen relativ günstige Einzugsbedingungen. Dadurch wird in den meisten Fällen ein selbständiger Einzug des Materials erreicht. Für die Zerkleinerung sperriger und voluminöser Abfälle sowie zur Erhöhung des Durchsatzes sind Rotorscheren jedoch häufig mit einer Zwangszuführung, z. B. mit Schieber- oder Schwenksystemen (b) sowie in einigen Fällen mit Einzugswalzen (a) oder Einzugsbändern, ausgestattet. Die Gestaltung der Rotorscheiben und -werkzeuge orientiert sich an dem zu

Tabelle 2.3: Übersicht über die Rotorscheren (nach [7] [17] [68])

	Axialspalt-Rotorscheren		Radialspalt-Rotorscheren		
Rotoranzahl	zwei-/drei-/vierrotorig	einrotorig	einrotorig/zweirotorig (selten)		einrotorig
Rotorumfangsgeschwindigkeit	< 0,5 m/s		0,5 ... 5 m/s		5 ... > 20 m/s
Schematische Darstellung (Draufsicht)					
Hauptbeanspruchungszone	axialer Spalt s_A		radialer Spalt s_R		
Werkzeugkeilwinkel	90° (Seitenkante)	90° (Seitenkante)	80 ... 90° (Vorderkante)	80 ... 90° (Vorderkante)	90° (Vorderkante)
Antriebsleistung	< 10 ... 800 kW	20 ... 300 kW	< 10 ... 320 kW	< 10 ... 300 kW	< 400 kW
Rotorbreite	160 ... 2700 mm	800 ... 2200 mm	100 ... 3000 mm	100 ... 3500 mm	300 ... 2500 mm
Rotordurchmesser	125 ... 850 mm	450 ... 1000 mm	100 ... 750 mm	100 ... 800 mm	200 ... 1000 mm
Rotorbauart	Scheibenrotor mit Distanzscheiben	Scheibenrotor; Flachrotor	Profilorotor; Scheibenrotor	Flachrotor	Flachrotor; Scheibenrotor
Werkzeuggeometrie	ineinandergreifende Rotorscheiben mit zahnförmigen Werkzeugen (Spitze/Schneide) oder T-Messern	Rotorscheiben oder Flachrotor mit U-förmigen Messern	Wendemesser viereckiger Gestalt (Wendeplattenschere); Messerleisten (Zahnleistenschere); Rotorscheiben (Zahnschere)	Wendemesser vier-, dreieckiger oder runder Gestalt (Wendeplattenschere); Messerleisten (Zahnleistenschere)	quaderförmige Messerblöcke
Amboßgeometrie	kein Amboß	U-förmiger Amboß	V-förmiger Amboß	V-, O-förmiger, gerader Amboß	gerader Amboß
Räumorgan/Abstreifer	Räumscheiben (4-/3-rotorig); Kamm (3-/2-rotorig)	-	-	-	-
Siebrost	meist (4-/3-rotorig); selten (2-rotorig)	-/ja	ja	ja	ja
Einzugsvorrichtung	Schieber; Schwenkarm; Einzugswalzen; Einzugsband	Schieber; Einzugswalzen	Schieber; Schwenkarm	Schieber; Schwenkarm	Schieber; Schwenkarm

zerkleinernden Material sowie dem Wartungsaufwand beim Wechsel verschlissener Teile. So finden sowohl Rotorscheiben in Form von Vollscheiben (b, d, f) als auch solche mit einzelnen auswechselbaren Rotorwerkzeugen [75], Verschleißplatten [76] oder Rotorscheibensegmenten (c, e) Anwendung. Die Rotorwerkzeuge weisen meist eine schneidenförmige oder eher spitze Kontur auf. Für die Zerkleinerung dickwandiger Materialien kann jedoch eine aufwendigere Gestaltung der Rotorwerkzeuge erforderlich sein, um die Zerkleinerungswirkung zu verbessern und die maximal auftretenden Kräfte zu reduzieren [77] [78].

Der Rotor der einrotorigen Rotorscheren kann entweder als Flachrotor mit aufgesetzten Rotormessern (a) ausgeführt sein, oder er setzt sich aus abwechselnd angeordneten Rotorscheiben unterschiedlichen Durchmessers zusammen (b) [69] [79] [80]. In Verbindung mit dem an die Rotorkontur angepaßten U-förmigen Stator ergeben sich zusätzlich enge radiale Spalte. Dort vollzieht sich die Zerkleinerung je nach Rotormessergeometrie durch eine Scher- oder Schneidbeanspruchung. Der Anteil der Scherbeanspruchung im axialen Spalt ist im Vergleich zu den mehrrotorigen Bauarten deutlich geringer, wodurch sich die Beanspruchungsgeometrie denen der Radialspalt-Rotorscheren bzw. Rotorstecher annähert.

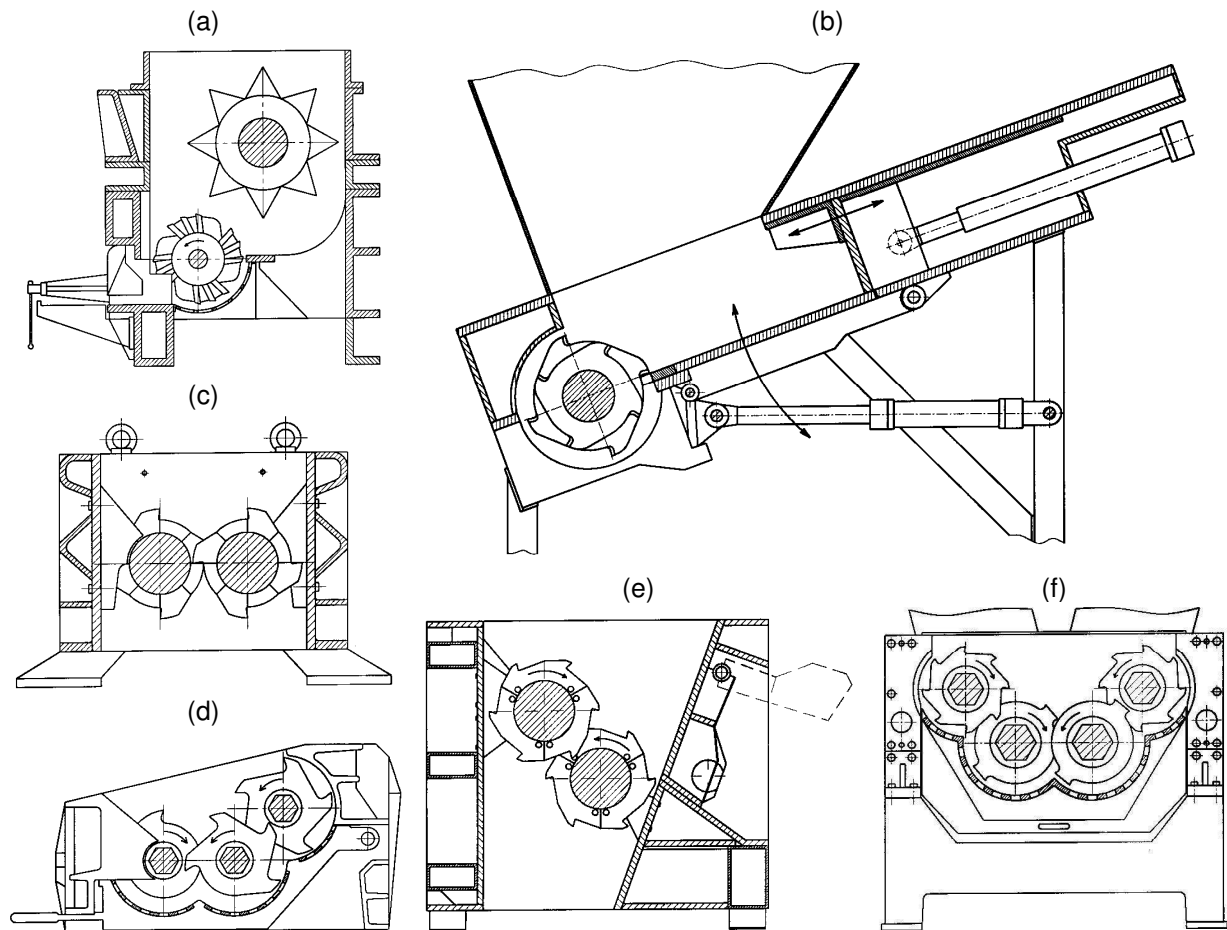


Bild 2.12: Bauarten von Axialspalt-Rotorscheren, schematisch (in Anlehnung an [69] bis [74])

(a) Einrotorige Bauart mit Siebrost und Zuführwalze, Alpine/Deutschland [69]; (b) Einrotorige Bauart mit Schieber, Metso Lindemann/Deutschland [70]; (c) Zweirotorige Bauart, Hoyer/Deutschland [71]; (d) Dreirotorige Bauart mit Siebrost, Erdwich/Deutschland [72]; (e) Zweirotorige Bauart mit versetzt angeordneten Rotoren und Störstoffentfernung, SID/Schweiz [73]; (f) Vierrotorige Bauart mit Siebrost, Untha/Deutschland [74]

Bei den mehrrotorigen Bauarten werden zur Entfernung bereits zerkleinerten Materials von den Rotorelementen kammförmige Abstreifvorrichtungen (c bis e) oder rotierende Räumscheiben (d und f) installiert. Siebroste (a, d und f) dienen der Begrenzung der oberen Stückgröße des Zerkleinerungsproduktes. Massive Stücke können bei einigen Bauarten (b und e) über spezielle Vorrichtungen, z. B. über Klappen, aus dem Zerkleinerungsraum entfernt werden. Dabei kann das Ausschleusen durch eine kaskadenartige Anordnung der Rotoren unterstützt werden (e).

Die Gruppe der Axialspalt-Rotorscheren umfaßt sowohl kleinere Maschinen zur Aktenvernichtung oder Volumenreduzierung geringer Mengen von Gewerbeabfällen mit Antriebsleistungen $< 10 \text{ kW}$ als auch Zerkleinerungsmaschinen mit Antriebsleistungen bis zu 800 kW , die Rotorbreiten bis zu 2700 mm aufweisen. Der Antrieb der Rotoren erfolgt im Leistungsbereich $< 100 \text{ kW}$ überwiegend mit elektro-mechanischen Antrieben und im Leistungsbereich von 100 bis 800 kW über elektro-hydraulische Antriebe [60].

In **Radialspalt-Rotorscheren** vollzieht sich der Zerkleinerungsvorgang im radialen Spalt zwischen den auf dem Rotor angeordneten Rotormessern und dem an die Kontur des Rotors angepaßten Stator (Tabelle 2.3). Die radiale Spaltweite s_R beträgt meist nur wenige Zehntel Millimeter, wodurch bei Messerkeilwinkeln von 80 bis 90° eine Scherbeanspruchung den Zerkleinerungsvorgang bewirkt. Hinsichtlich der Rotorbauart können Profil- und Scheibenrotoren, die eine V-förmige Statorkontur zur Folge haben, von den Flachrotoren unterschieden werden.

Als Rotorwerkzeuge werden bevorzugt Wendeplatten viereckiger, runder oder dreieckiger Gestalt verwendet. Diese Rotormesser besitzen mehrere Scherkanten, so daß sie bei Verschleiß einer Scherkante nicht zwangsläufig gewechselt werden müssen, sondern nur eine scharfe Kante in die Schnittrichtung gedreht werden muß [81]. In Bild 2.13a und b sind zwei typische Bauarten dieser Wendeplattenscheren dargestellt.

Aufgrund der ungünstigen Einzugsbedingungen der einrotorigen Radialspalt-Rotorschern müssen diese mit einer Zwangszuführung ausgerüstet werden. Meist kommen hydraulische Schwenkarme (a) oder Schieber (b) zum Einsatz. Infolge der großen Anzahl der auf dem Rotor angebrachten Messer, der definierten Zerkleinerungsgeometrie und der angebrachten Siebroste ergibt sich ein im Vergleich zu den mehrrotorigen Axialspalt-Rotorschern relativ kleinstückiges Zerkleinerungsprodukt. Die Zahnscheren (c) werden u. a. zur Zerkleinerung von Metallspänen (ohne massive Stücke) und Kunststoffabfällen eingesetzt. Ihre Rotoren setzen sich aus mehreren Rotorscheiben, die mit spitzen, zahnförmigen Werkzeugen versehen sind, zusammen, wodurch sich eine V-förmige Statorkontur ergibt [82] [83]. Im Gegensatz dazu sind die Rotoren der Messerblockscheren (d) mit quaderförmigen Messerblöcken bestückt [84] [87] [88]. Durch die Kombination von robusten Messerblöcken, einer hohen Schwungmasse und Rotorumfangsgeschwindigkeiten von meist 5 bis 20 m/s sind diese Maschinen in der Lage, auch relativ dickwandige Metallstücke, wie z. B. kleine Elektromotoren und Transformatoren, zu zerkleinern [15].

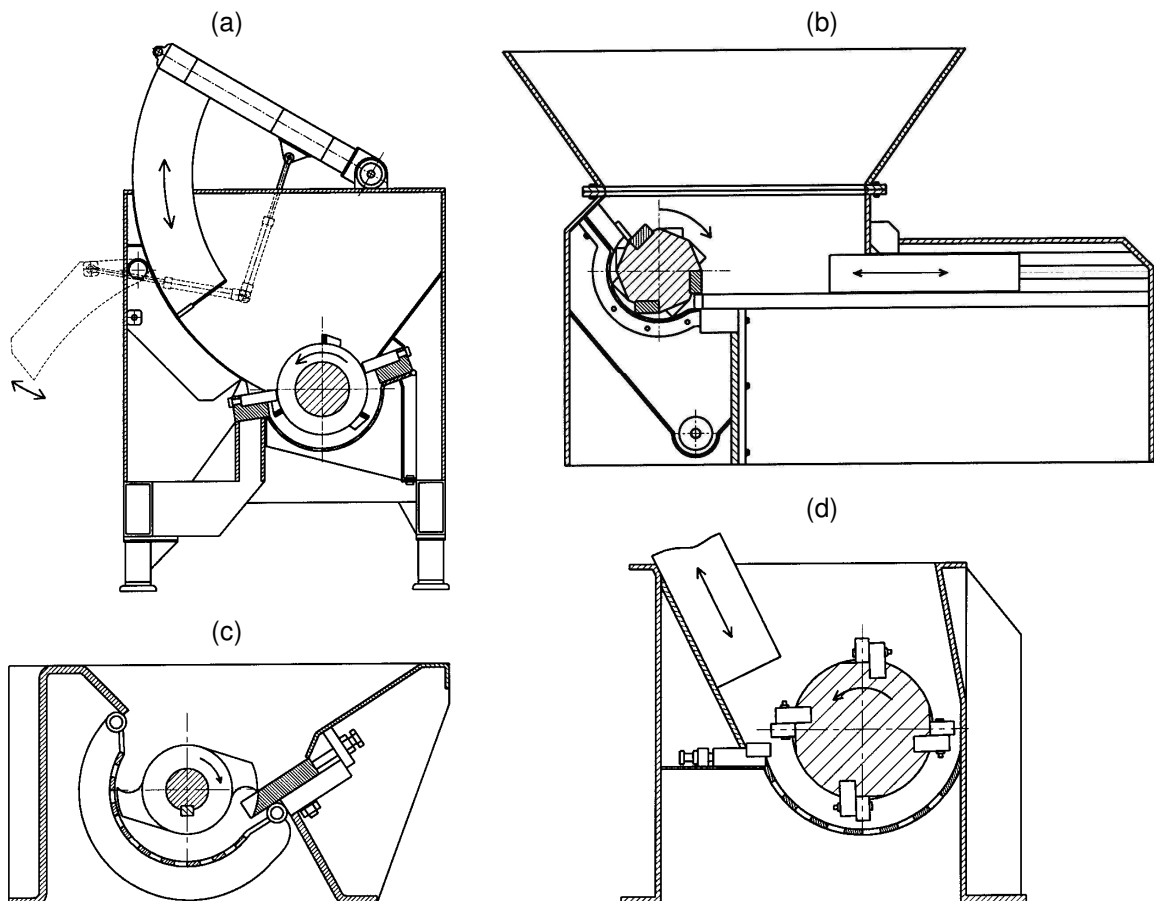


Bild 2.13: Bauarten von Radialspalt-Rotorschern, schematisch

(in Anlehnung an [82] [85] bis [88])

(a) Wendeplattenschere mit Schwenkarm und Störstoffentfernung, Lindner/Österreich [85]; (b) Wendeplattenschere mit Preßstempel, Holzmag/Schweiz [86]; (c) Zahnschere, Erdwich/Deutschland [82]; (d) Messerblockschere, MeWa/Deutschland [87] [88]

Rotorreißer

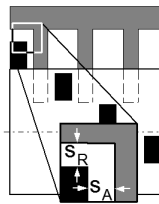
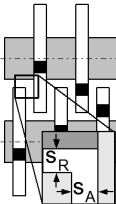
Langsamlaufende Rotorreißer werden für die Zerkleinerung von Haus- und Sperrmüll, von Holzabfällen sowie von voluminösen Stahlleichtschrotten (Pkw-Schrotte), NE-Metallschrotten und Metallspänen eingesetzt. Bei diesen handelt es sich meist um ein- bis dreirorige Bauarten mit Rotorumfangsgeschwindigkeiten unter 2,5 m/s (Tabelle 2.4). Die ein- und zweirorigen Rotorreißer (Bild 2.14a bis c) eignen sich insbesondere für die Zerkleinerung von Haus- und Sperrmüll sowie Holzabfällen, wobei eine Vorzerkleinerung, eine Volumenreduzierung oder günstigere Transporteigenschaften erzielt werden sollen. Des weiteren sind in jüngster Zeit auch größere, robuste mehrrotorige Bauarten von Rotorreißern für die Zerkleinerung von voluminösen Schrotten, wie z. B. Pkw-Karosserien, entwickelt worden, die beispielsweise in der ersten Zerkleinerungsstufe von Shredderanlagen eingesetzt werden können (Bild 2.14c bis e). Im Vergleich zu einer einstufigen Zerkleinerung mit einem Hammerreißer ergeben sich durch den Einsatz eines langsamlaufenden Rotorreißer als Vorzerkleinerungsaggregat folgende Vorteile ([89] bis [91]):

- Einsatz eines kleineren Hammerreißers (Shredder) in der 2. Zerkleinerungsstufe
- Freilegen dickwandiger Stücke (Kurbelwellen, Achsen), die ihre Entfernung ermöglicht
- geringerer Verschleiß am Hammerreißer
- Abbau von Lastspitzen
- höhere Verfügbarkeit der Anlage durch weniger Stillstände und Havarien
- geringere Lärmbelastung und Verminderung der Explosionsgefahr

Demgegenüber stehen die folgenden Nachteile, wovon insbesondere die betriebswirtschaftlichen Aspekte entscheidend sind:

- zusätzliche Kapitalkosten
- eventuell zusätzliche Energieversorgung notwendig
- meist geringerer Durchsatz des langsamlaufenden Rotorreißers
- zusätzlicher Platzbedarf für die Maschine und das vorzerkleinerte Material

Tabelle 2.4: Übersicht über die langsamlaufenden Rotorreißer (nach [68])

Rotoranzahl	einrotorig	zwei-/dreirorig
Rotorumfangsgeschwindigkeit	0,3 ... 2,5 m/s	
Schematische Darstellung (Draufsicht)		
Hauptbeanspruchungszone	radialer (s_R) und axialer (s_A) Spalt	
Antriebsleistung	55 ... 350 kW	50 ... 1260 kW
Rotorbreite	1500 ... 4000 mm	600 ... 3300 mm
Rotordurchmesser	500 ... 1000 mm	350 ... 1000 mm
Rotorbauart	Flachrotor oder Massivrotor; Scheibenrotor	Flachrotor oder Massivrotor; Scheibenrotor
Werkzeuggeometrie	meist auswechselbare Werkzeuge mit spitzer oder schneidenförmiger Kontur, z. T. für beide Drehrichtungen geeignet	meist auswechselbare Werkzeuge mit spitzer oder schneidenförmiger Kontur, z. T. für beide Drehrichtungen geeignet
Amboßgeometrie	U-förmiger oder gerader Amboß	-/U-förmiger Amboß
Räumorgan/ Abstreifer	-/Kamm	-/Kamm
Siebrost	-/Gitter	-
Einzugs- vorrichtung	-	-

Ein weiteres Einsatzgebiet der Rotorreißer ist die Zerkleinerung von Metallspänen, die in Form von großen Zusammenballungen vorliegen und massive Metallstücke enthalten (z. B. Wellenstümpfe) [6]. Solche massiven Bestandteile können im Gegensatz zu den Rotorschern in die größeren Freiräume zwischen den Zerkleinerungselementen ausweichen, ohne daß der Zerkleinerungsprozeß beeinträchtigt wird.

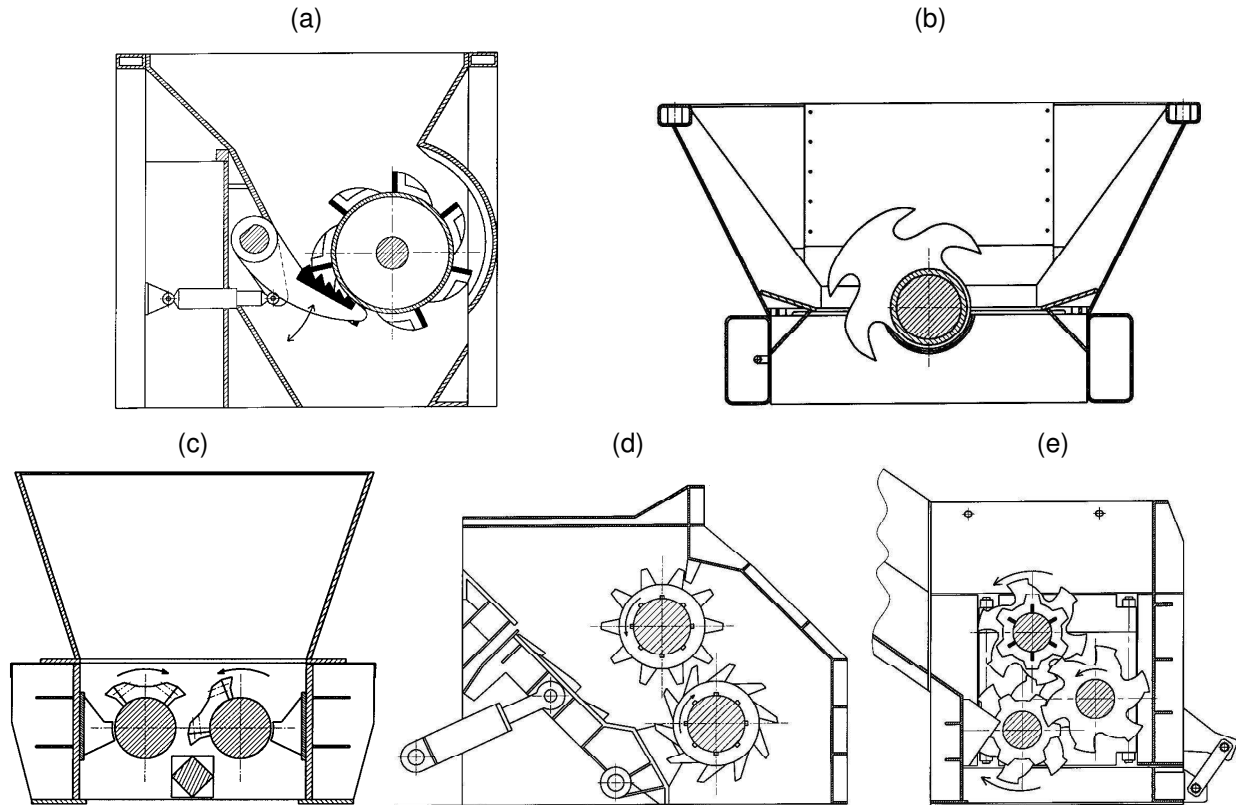


Bild 2.14: Bauarten von langsamlaufenden Rotorreißern, schematisch
(in Anlehnung an [89] [93] bis [96])

- (a) Einrotorige Bauart mit hydraulisch vorgespanntem kammförmigen Amboß, Doppstadt/Deutschland [93];
- (b) Einrotorige Bauart, Niro Industries/Dänemark [94] [95]; (c) Zweierotorige Bauart, SID/Schweiz [96];
- (d) Zweierotorige Bauart mit schwenkbarer Zuführschurre, Fuji/Japan [89];
- (e) Dreierotorige Bauart, Henschel/Deutschland [92]

Die Rotorreißer sind oft mit Statorwerkzeugen versehen, die entweder kontinuierlich am Zerkleinerungsvorgang beteiligt sind (Bild 2.14a bis c) oder als Widerlager im Verlauf eines Reversiervorganges wirken (d, Reißelemente an der schwenkbaren Aufgabeschurre). Bei einigen Bauarten wird zwischen den Rotor- und Statorelementen ein asymmetrischer Abstand eingestellt, so daß auf einer Seite eine möglichst geringe axiale Spaltweite entsteht (b). Durch diese Kombination von Scher- und Reißbeanspruchung soll vor allem die obere Stückgröße des Zerkleinerungsproduktes begrenzt werden. Auf Siebroste, wie sie bei einigen Rotorschern installiert sind, wird jedoch verzichtet, da im allgemeinen nur eine Grobzerkleinerung erzielt werden soll. Aufgrund der größeren Wellenabstände und Abstände der Rotorwerkzeuge ist das Einzugsverhalten bei Rotorreißern günstiger als in Axialspalt-Rotorschern, wodurch keine zusätzliche Beschickungsvorrichtungen notwendig sind. Für die Entfernung des zwischen den Rotorwerkzeugen verklemmten Materials besitzen Rotorreißer meist kammförmige Abstreifer (c bis e). Um einen zusätzlichen Zerkleinerungseffekt zu erreichen, wird bei den mehrrotorigen Bauarten häufig eine Relativgeschwindigkeit zwischen den Zerkleinerungswerkzeugen realisiert [92].

2.3.2 Vergleich von Rotorscheren und Rotorreißern

Im Rahmen der Zerkleinerung der Abfälle und Schrotte haben sich Rotorscheren und Rotorreißer für vergleichbare Zerkleinerungsaufgaben bewährt. Aufgrund ihrer unterschiedlichen Gestaltung weisen beide Maschinengruppen jedoch spezifische Vor- und Nachteile im Hinblick auf den erreichbaren Durchsatz, das entstehende Zerkleinerungsprodukt sowie den erforderlichen Energiebedarf auf.

Der **Durchsatz** der Zerkleinerungsmaschinen wird neben der Gestaltung der Zerkleinerungselemente und Zuführeinrichtungen entscheidend von den Abmessungen und der Anzahl der Rotoren, der Antriebsleistung sowie der Art der zu zerkleinernden Abfälle und Schrotte beeinflusst. Von den Abmessungen des Rotors erweist sich die Rotorbreite als wichtigster Parameter. Größere Rotorbreiten ermöglichen bei entsprechender Antriebsleistung einen höheren Durchsatz (Bild 2.15). Während Rotorscheren und Rotorreißer einen ähnlichen Zusammenhang zwischen Rotorbreite und Antriebsleistung ergeben (a), existieren hinsichtlich des erreichbaren Durchsatzes bei einigen Bauarten deutliche Unterschiede (b). Vor allem die mit den meist einrotorigen Wendeplatten- und Zahnscheren erzielten Durchsätze sind um ca. eine Größenordnung niedriger als die der Axialspalt-Rotorscheren, Schrauben- und Rotorreißer ähnlicher Baugröße.

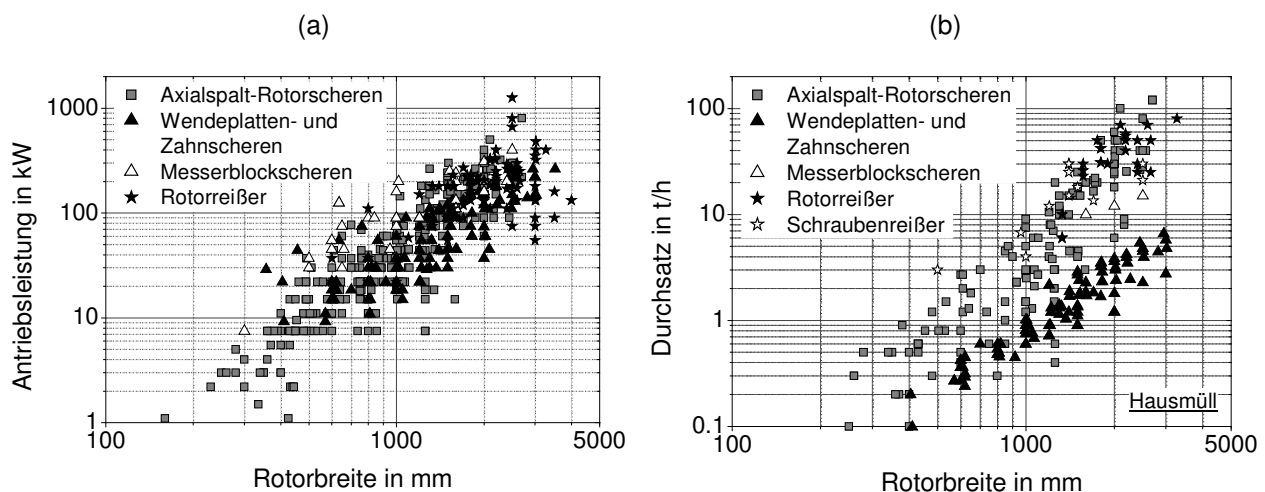


Bild 2.15: Zusammenhang zwischen der Rotorbreite und der Antriebsleistung (a) sowie dem maximalen Durchsatz der Rotorscheren und langsamlaufenden Rotorreißer bei Hausmüll (b) (nach Prospektmaterial verschiedener Hersteller)

Die **Stückgrößenverteilung** des Zerkleinerungsproduktes von Rotorscheren wird maßgeblich durch die Größe der Rotorwerkzeuge bestimmt. Da der Rotor der Wendeplatten- und Zahnscheren mit einer Vielzahl kleinerer Rotormesser bestückt ist und diese Zerkleinerungsmaschinen meist mit Siebrosten ausgestattet sind, entsteht ein relativ kleinstückiges Produkt. Bei den mehrrotorigen Axialspalt-Rotorscheren ist die Rotorscheibenbreite und der Abstand der auf der Rotorscheibe angeordneten Rotorwerkzeuge für das entstehende Zerkleinerungsprodukt ausschlaggebend (Bild 2.16) [60]. Die Zerkleinerung von Stahlblechen führt zu vorwiegend länglichen Bruchstücken mit einem großen Länge/Breite-Verhältnis, wodurch die Stückgrößenverteilung nach der größten Hauptabmessung a ¹ einen weiten Stückgrößenbereich einnimmt (a).

¹ Die größte bzw. mittlere Hauptabmessung a bzw. b eines Stückes ergibt sich, indem man sich dieses von einem rechtwinkligen Parallelepiped mit dem kleinstmöglichen Volumen eingehüllt vorstellt. Somit ist a die lange, b die mittlere und c die kurze Abmessung des einhüllenden Parallelepipeds [6] [97].

Demgegenüber weicht die mittlere Hauptabmessung b vor allem bei größeren Wanddicken nur geringfügig von der Rotorscheibenbreite ab. Um die obere Stückgröße zu begrenzen, kann man die Axialspalt-Rotorschern mit einem Siebrost ausrüsten (s. Bild 2.12a, d und f). Die Zerkleinerung von Staubsaugern in Axialspalt-Rotorschern zeigt, daß auch bei heterogen zusammengesetzten Aufgabegütern die mittlere Hauptabmessung der entstehenden Stücke etwa der Rotorscheibenbreite ($b_{RS} = 20$ bis 45 mm) entspricht (b). Aufgrund der wesentlich größeren Abstände der Zerkleinerungswerkzeuge in Rotorreißern sind demgegenüber die entstehenden Stücke deutlich größer und streuen in einem weiten Bereich. Die obere Stückgröße wird hier vorwiegend durch den Abstand der gegenläufig rotierenden Wellen und ihrer Rotorwerkzeuge begrenzt.

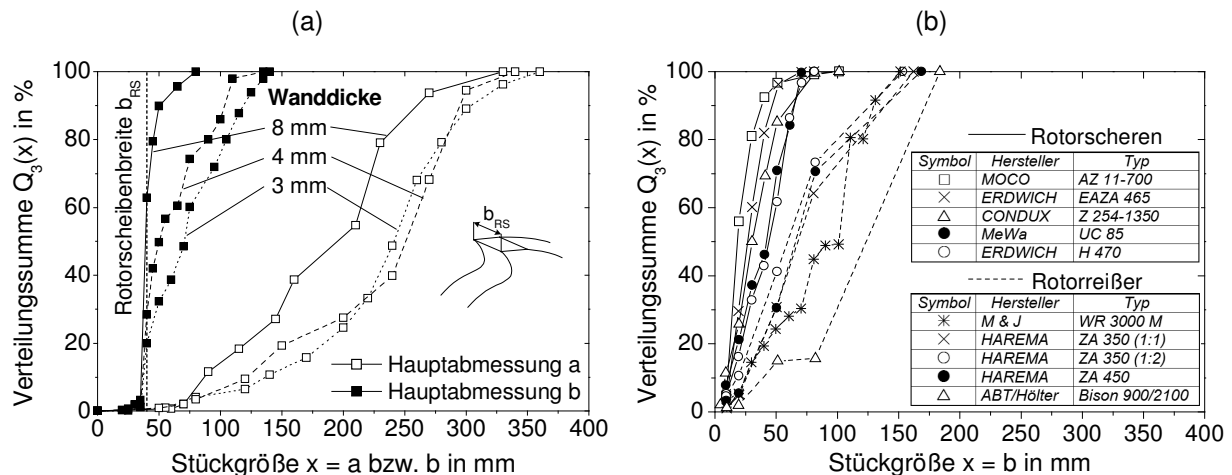


Bild 2.16: Stückgrößenverteilungen von Rotorschern und Rotorreißern

(a) Zerkleinerung von Stahlblech St 14 mit einer Axialspalt-Rotorschere (RO 16-8), Bauart Lindemann; [98]
 (b) Aufschlußzerkleinerung von Staubsaugern in Axialspalt-Rotorschern und Rotorreißern [99]

Von Einfluß auf den *spezifischen (massebezogenen) Energiebedarf* für die Zerkleinerung sind insbesondere die Art des zu zerkleinernden Abfalles bzw. Schrottes sowie das Zerkleinerungsverhältnis. Den Zusammenhang zwischen Durchsatz und installierter Antriebsleistung, aus dem auch der jeweilige mittlere spezifische Energiebedarf abgeleitet werden kann, zeigt Bild 2.17. Wegen der geringeren Produktstückgrößen der Rotorschern sind die bei gleicher Antriebsleistung erreichbaren Durchsätze deutlich geringer als die von Rotor- und Schraubenreißern, was sich auch in einem höheren spezifischen Energiebedarf äußert. Dabei erweist sich der spezifische Energiebedarf für die Zerkleinerung als nahezu unabhängig von der Baugröße der Zerkleinerungsmaschine, d. h. der installierten Antriebsleistung bzw. der Rotorbreite.

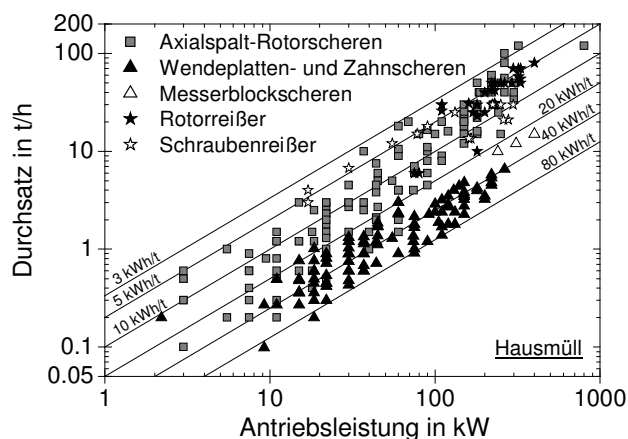


Bild 2.17: Zusammenhang zwischen Durchsatz und installierter Antriebsleistung bei Rotorschern sowie langsamlaufenden Rotor- und Schraubenreißern am Beispiel der Zerkleinerung von Hausmüll (nach Prospektmaterial verschiedener Hersteller)

Einen Überblick über den mittleren spezifischen Energiebedarf für die Zerkleinerung typischer Abfälle und Schrotte vermittelt Tabelle 2.5. Daraus wird ersichtlich, daß die Zerkleinerung mit Rotorreißern den geringsten massebezogenen Energiebedarf erfordert. Auch die Unterschiede zwischen den verschiedenen Abfällen und Schrotten sind bei den Rotorreißern sehr gering. Für die Zerkleinerung in Rotorschern ist im Vergleich dazu ein zwei- bis vierfach höherer spezifischer Energiebedarf aufzuwenden.

Tabelle 2.5: Mittlerer spezifischer Energiebedarf (Vertrauensbereich in Klammern) für die Zerkleinerung typischer Abfälle und Schrotte in Rotorschern und Rotorreißern
(nach Prospektmaterial verschiedener Hersteller)

	Spezifischer Energiebedarf in kWh/t ¹⁾			
	Axialspalt- Rotorschern	Radialspalt- Rotorschern		Rotorreißer
		<i>Wendeplatten-, Zahnschern</i>	<i>Messerblock- schern</i>	
Abfälle				
- Hausmüll	13 (± 2)	43 (± 3)	26 (± 3)	7 (± 1)
- Sperrmüll	17 (± 4)	-	-	9 (± 1)
- Holzabfälle	16 (± 2)	28 (± 2)	-	9 (± 1)
- Kunststoff- und Textilabfälle	33 (± 9)	40 (± 10)	15 (± 3)	8 (± 2) ²⁾
- Papier- und Pappenabfälle	31 (± 6)	-	31 (± 9)	8 ³⁾
- Altreifen (Pkw-Reifen)	19 (± 3)	-	25 (± 6)	-
Schrotte				
- Stahlleichtschrotte (Bleche, Fässer)	29 (± 6)	-	-	10 (± 1)
- Elektronikschrotte	17 (± 2)	-	42 (± 12)	-
- Elektromotoren	-	-	21 (± 5)	-
- Kabelschrotte	-	27 (± 16)	24 (± 4)	-
- Späne	-	22 ³⁾	-	-

¹⁾ Spez. Energiebedarf = Antriebsleistung [kW] / Durchsatz [t/h]; ²⁾ Teppiche und Matratzen; ³⁾ Angabe beruht auf wenigen Werten

Aufgrund der geringen erreichbaren Aufschlußgrade sind Rotorschern und -reißer für eine **Aufschlußzerkleinerung** nur bedingt geeignet. Durch eine Vorzerkleinerung komplex zusammengesetzter Schrotte (z. B. Pkw-Karosserien, Haushaltskleingeräte) mit einem Rotorreißer können jedoch sehr massive Metallteile (z. B. Kurbelwellen, Achsen, Motoren) freigelegt und einer nachfolgenden Sortierung zugänglich gemacht werden [68] [99].

2.3.3 Einzugs- und Zerkleinerungsvorgang in Rotorschern und Rotorreißern

Über die Vorgänge in Rotorschern und -reißern gibt es bisher nur wenige Erkenntnisse [60] [99] bis [102]. Jedoch sind aus anderen Fachgebieten Untersuchungen über Teilvorgänge bekannt, die denen in Rotorschern ähneln. So eignen sich für die Beschreibung des Einzugsvorganges prinzipiell die Beziehungen, die für Glatt- und Zahnwalzenbrecher gelten. Auch lassen sich die Erkenntnisse über das Scherschneiden zwischen zwei Kreismessern (s. Tabelle 2.2 (e)) weitestgehend auf die mehrrotorigen Axialspalt-Rotorschern übertragen.

Einzugsverhältnisse bei mehrrotorigen Axialspalt-Rotorschern

Von den zahlreichen Bauarten der Rotorschern besitzen die 2- bis 4-rotorigen Axialspalt-Rotorschern die größte Bedeutung. Für diese Bauarten ist kennzeichnend, daß der Einzug und die Zerkleinerung des Materials durch zwei oder mehr Rotoren erreicht wird, die sich gegenseitig überdecken und mit speziellen Zerkleinerungswerkzeugen bestückt sind.

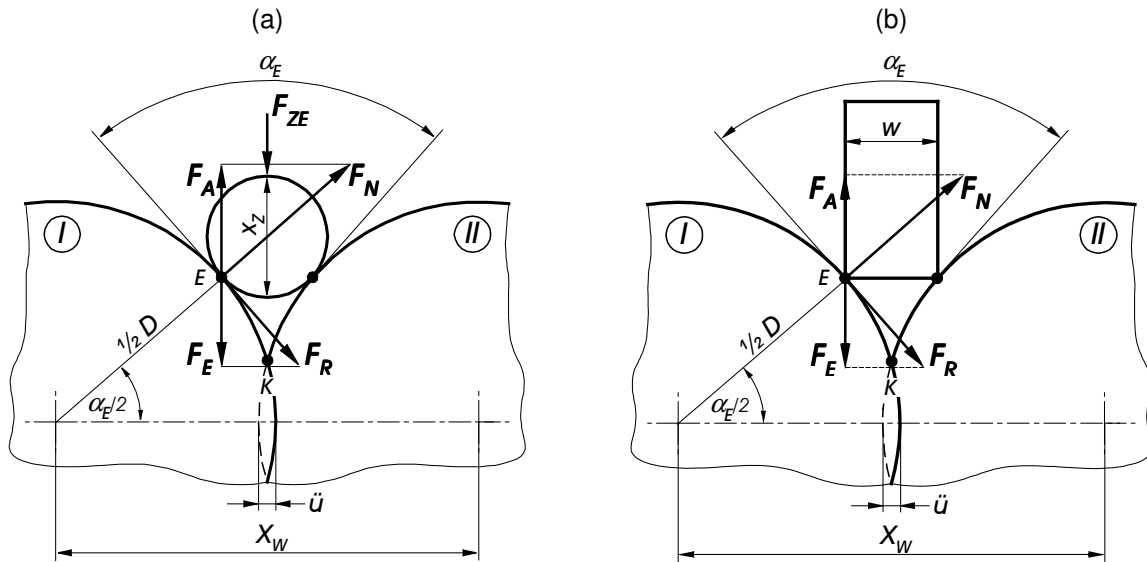


Bild 2.18: Einzugsverhältnisse von voluminösen (a) und plattenförmigen Körpern (b) bei kreisrunden Rotorscheiben (in Anlehnung an [100] [103])

F_A - Ausstoßkraft; F_E - Einzugskraft; F_N - Normalkraft; F_R - Reibungskraft; F_{ZE} - Einzugskraft der Zuführeinrichtung; E - Eingriffspunkt; K - Kreuzungspunkt; D - Durchmesser der Rotorscheiben; x_Z - Stückgröße (Durchmesser des zylinderförmigen Stücks); w - Wanddicke; ü - Überdeckung; X_W - Wellenabstand; α_E - Einzugswinkel; symmetrische Beanspruchung ($D_I = D_{II}$)

Ausgehend von den Beziehungen für Glattwalzenbrecher können die Einzugsbedingungen für voluminöse und plattenförmige Aufgabestücke bei kreisrunden Rotorscheiben abgeleitet werden (Bild 2.18). Die von der Rotorscheibe auf das Material wirkende Normalkraft F_N ruft eine tangential zur Rotorscheibenoberfläche wirksame Reibungskraft $F_R = \mu F_N$ hervor. Während die Vertikalkomponente der Reibungskraft bestrebt ist, das Material einzuziehen, bewirkt die Vertikalkomponente der Normalkraft das Gegenteil. Für den Einzug des Materials muß daher gelten:

$$F_E > F_A \quad (2.5)$$

bzw.

$$\mu > \tan \alpha_E / 2 \quad (2.6)$$

Demnach sind für den Einzug die Reibungsverhältnisse zwischen Aufgabegut und Rotorscheibe sowie der Einzugswinkel α_E entscheidend. Der Einzugswinkel ist von der Größe des Aufgabematerials (Durchmesser bzw. Wanddicke), der Überdeckung und dem Durchmesser der Rotorscheiben abhängig (Tabelle 2.6, Gl. (2.9)). Mit Gl. (2.6) und $\cos(\alpha_E/2) = 1/\sqrt{1 + \tan^2(\alpha_E/2)}$ können daher bei vorgegebener maximaler Aufgabestückgröße der erforderliche Rotorscheibendurchmesser (Gl. (2.10)) oder bei einer vorhandenen Rotorschere die gerade noch einziehbare Aufgabestückgröße (Gl. (2.11)) berechnet werden.

Vergleicht man die Einzugsverhältnisse mit denen der Glattwalzenbrecher, so wird deutlich, daß sich aufgrund der Überdeckung der Rotorscheiben größere Einzugswinkel ergeben. Mit zunehmender Überdeckung der Rotorscheiben verschlechtern sich die Einzugsbedingungen erheblich. Da aber Rotorschern insbesondere für die Zerkleinerung von sperrigen sowie voluminösen Abfällen und Schrotten eingesetzt werden, muß der Einzug des Materials durch die auf den Rotorscheiben angebrachten zahnartigen oder nockenförmigen Werkzeuge und gegebenenfalls durch eine zusätzliche Zuführeinrichtung (Schieber) unterstützt werden [100] [101].

Dabei unterliegen dünnwandige, hohlraumhaltige Aufgabestücke, wie z. B. Fässer oder Rohre, einer Biegebeanspruchung, die eine Umformung zu plattenförmigen Stücken bewirkt [100]. Das Einzugsverhalten wird dadurch entscheidend verbessert.

Tabelle 2.6: Gleichungen für die Berechnung der Einzugsverhältnisse in mehrrotorigen Axialspalt-Rotorscheren (in Anlehnung an [100] [103])

	<i>Voluminöse Körper</i>	<i>Plattenförmige Körper</i>
Überdeckung	$\ddot{u} = \frac{1}{2}(D_I + D_{II}) - X_W \quad (2.7)$ $\ddot{u} = D - X_W \quad \text{für } D_I = D_{II} \quad (2.8)$	
Einzugswinkel	$\cos(\alpha_E/2) = \frac{D - \ddot{u}}{D + x_Z} \quad (2.9a)$	$\cos(\alpha_E/2) = \frac{D - \ddot{u} - w}{D} \quad (2.9b)$
Erforderlicher Rotorscheiben-durchmesser	$D = \frac{x_Z + \ddot{u}\sqrt{1 + \mu^2}}{\sqrt{1 + \mu^2} - 1} \quad (2.10a)$	$D = \frac{(\ddot{u} + w)\sqrt{1 + \mu^2}}{\sqrt{1 + \mu^2} - 1} \quad (2.10b)$
Einziehbare Aufgabestückgröße	$x_Z = X_W\sqrt{1 + \mu^2} - D \quad (2.11a)$	$w = X_W - \frac{D}{\sqrt{1 + \mu^2}} \quad (2.11b)$

Zerkleinerungsvorgang in mehrrotorigen Axialspalt-Rotorscheren

Die Zerkleinerung in mehrrotorigen Axialspalt-Rotorscheren erfolgt vorwiegend durch eine Scherbeanspruchung zwischen den sich gegenseitig überdeckenden Rotorscheiben [60]. Infolge der Überdeckung der Rotorscheiben kreuzen sich die Scherkanten (Bild 2.19). Dadurch treten nach CRASEMANN [39] die vom parallelkantigen Scheren bekannten Phasen nicht in zeitlicher Reihenfolge, sondern gleichzeitig und im Scherquerschnitt örtlich verschoben auf. Im Eingriffspunkt E setzen die Kreismesser auf die Materialoberfläche auf und dringen in den Werkstoff ein (Verformungs- und Scherphase). Kurz vor dem Kreuzungspunkt K erfolgt die lokale Trennung des Materials (Bruchphase). Durch die Rotation der Messer wird kontinuierlich Material eingezogen und zerkleinert. Dadurch verläuft die Scherbeanspruchung unter stationären Bedingungen. Das bedeutet auch, daß die an den Kreismessern wirkenden Kräfte während der Zerkleinerung annähernd konstant bleiben.

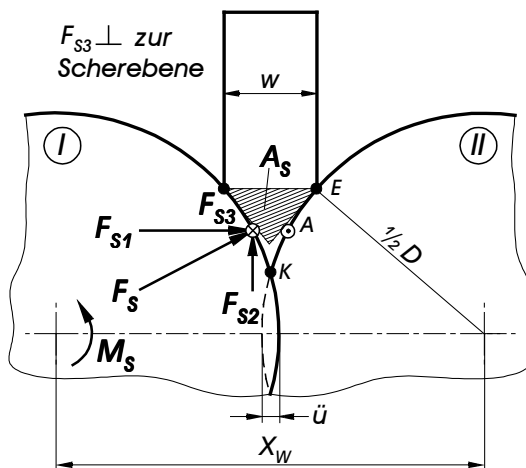


Bild 2.19: Wirkende Kräfte bei der Scherbeanspruchung in Kreismesserschere (nach [39] [52])

F_S - resultierende Scherkraft; F_{S1} - Hauptscherkraft;
 F_{S2} - Fortschreitkraft; F_{S3} - Abdrängkraft; M_S - Schermoment;
A - Angriffspunkt der resultierenden Scherkraft; E - Eingriffspunkt; K - Kreuzungspunkt; A_S - Scherfläche; D - Durchmesser des Kreismessers; X_W - Wellenabstand; $\ddot{u}$ - Überdeckung; w - Wanddicke; symmetrische Beanspruchung ($D_I = D_{II}$)

Im Vergleich zum parallelkantigen Scheren ergeben sich aber insgesamt komplexere Beanspruchungsbedingungen, die auf die Geometrie und die Bewegung der Messer zurückzuführen sind. Zum einen bewirkt die Bewegung der Kreismesser (Translation und Rotation) eine Relativbewegung zwischen Materialoberfläche und Messer, die zusätzliche Reibungsverluste hervorruft. Und zum anderen wird das Material durch die geneigte bzw. kreuzende Messerstellung stärker verformt. Dabei treten sowohl Biege- als auch Torsionsvorgänge auf [39]. Diese sind um so ausgeprägter, je stärker sich die Kreismesser überdecken und je geringer der Durchmesser ist. Deshalb werden in der Fertigungstechnik große Kreismesser von $D \geq 60$ w verwendet und eine möglichst geringe Überdeckung von $\ddot{u} = 0 \dots 0,3$ w realisiert [52].

Die an der Scherkante des Kreismessers entstehende Scherkraft F_S (Bild 2.19) läßt sich in drei Komponenten zerlegen, und zwar in eine Hauptscherkraft F_{S1} , eine Fortschreitkraft F_{S2} und eine Abdrängkraft F_{S3} [50] [104]. Von diesen bewirkt vornehmlich die Hauptscherkraft die Trennung des Materials. Die senkrecht zur Hauptscherkraft angreifende Fortschreitkraft ist dem Einzug des Materials entgegengerichtet. Als dritte Komponente der Scherkraft wirkt die Abdrängkraft im Überdeckungsbereich auf die Seitenflächen der Messer. Sie ruft eine elastische Vergrößerung der Spaltweite während der Scherbeanspruchung sowie zusätzliche Reibungsverluste hervor. Maximale Werte treten bei einer großen Überdeckung und einer geringen Spaltweite auf. Jedoch ist ihr Anteil an der resultierenden Scherkraft relativ gering [39].

Aufgrund der Geometrie und Bewegung der Kreismesser existieren zwei Bereiche, in denen erhebliche Reibungskräfte auftreten können. Die an der Stirnseite der Rotorscheiben infolge der resultierenden Scherkraft F_{S12} wirkende Reibungskraft ist für den Einzug des Materials erforderlich. Dagegen sind die Reibungskräfte im Überdeckungsbereich infolge der Abdrängkraft unerwünscht. Beide Anteile beeinflussen maßgeblich die Antriebsleistung der Rotoren und den Gesamtenergiebedarf für die Zerkleinerung [39] [52]. Eine Zusammenstellung der Beziehungen zur Abschätzung der Kräfte in Kreismesserschere befindet sich in Anlage 1.

Die beschriebenen Vorgänge gelten für symmetrische Beanspruchungsbedingungen bei Kreismesserschere, d. h. identische Kreismesser und eine parallele Anordnung der Messer. Bei der Zerkleinerung in Rotorschere finden aufgrund der Kontur der Rotorscheiben, der Gestaltung der Zerkleinerungswerkzeuge (Zähne, Messer, Nocken) sowie variierender Relativgeschwindigkeiten wesentlich komplexere Vorgänge statt. Zudem erschweren die meist voluminösen und heterogen zusammengesetzten Aufgabegüter die Abschätzung der bei der Zerkleinerung wirkenden Kräfte und Drehmomente. Daher können die Erkenntnisse von den Kreismesserschere nur qualitativ auf die Zerkleinerungsvorgänge in Rotorschere übertragen werden. Jedoch erleichtert ihre Kenntnis die Deutung der in Rotorschere ablaufenden Mikroprozesse.

2.3.4 Einflußgrößen auf den Einzugs- und Zerkleinerungsvorgang

Der Einzugs- und Zerkleinerungsvorgang in Rotorschere und Rotorreißern wird von zahlreichen Faktoren beeinflusst. Eine Systematisierung der Einflußfaktoren unter stoffbedingten, betriebsbedingten und konstruktiven Aspekten zeigt Tabelle 2.7. Ihre Auswirkungen auf das entstehende Zerkleinerungsprodukt sowie den Leistungs- und Energiebedarf der Zerkleinerungsmaschine sind außerordentlich komplex und können bisher nur anhand der Grundlagenuntersuchungen zur Schneid-, Scher- und Reißbeanspruchung sowie der Erfahrungen mit groß-

technischen Rotorscheren und -reißern abgeleitet werden. Daher sollen im folgenden wesentliche Einflußgrößen zusammenfassend dargestellt werden.

Tabelle 2.7: Einflußgrößen auf die Zerkleinerung in Rotorscheren und Rotorreißern

Einflußgrößen		
stoffbedingt	betriebsbedingt	konstruktiv
• Materialart (Verformungs- u. Bruchverhalten, Festigkeitseigenschaften) • Abmessungen - Stückgröße ($x = a$ bzw. b) - Wanddicke • Stückform - stengelig - plattig - voluminös • Hohlraumvolumenanteil	• Beanspruchungsgeschwindigkeit - Rotorumfangsgeschwindigkeit - Relativgeschwindigkeit zwischen den Rotoren • Verschleißzustand der Zerkleinerungselemente	• Gestaltung des Zerkleinerungsraumes - Rotoranzahl - Anordnung der Rotoren - Rotorbreite - Wellenabstand/Überdeckung - Spaltweiten (axial/radial) • Gestaltung der Rotoren - Rotorbauart - Durchmesser - Rotorscheibenbreite - Anzahl der Zerkleinerungselemente • Gestaltung der Zerkleinerungselemente des Rotors - Abmessungen - Form (Spitze, Schneide) - Frei-, Keil- und Spanwinkel • Gestaltung und Anordnung des Stators • Gestaltung und Anordnung des Siebrostes • Gestaltung der Materialzufuhr • Gestaltung der Abstreifer

Hinsichtlich der *stoffbedingten Einflußgrößen* ist zunächst die Materialart von Bedeutung. Das Verformungs- und Bruchverhalten sowie die Festigkeitseigenschaften (siehe Kapitel 2.1) des zu zerkleinernden Materials bestimmen maßgeblich die Gestaltung der Zerkleinerungselemente, die erforderliche Antriebsleistung sowie den Energiebedarf für die Zerkleinerung. So können bei Materialien mit ausgeprägten temperatur- und zeitabhängigen Eigenschaften, wie z. B. Thermoplasten, gezielt sprödebruchfördernde Beanspruchungsbedingungen realisiert werden, wodurch der Energiebedarf deutlich verringert werden kann [19]. Die Stückgröße beeinflusst sowohl die Einzugsverhältnisse als auch die bei der Zerkleinerung auftretenden Kräfte und den Energiebedarf. Mehrere Untersuchungen [19] [62] bis [64] zeigen, daß bei plattenförmigen Aufgabegütern insbesondere die Wanddicke für den Energiebedarf bei Zerkleinerung und der Umformung bestimmend ist. In enger Verbindung mit der Stückgröße ist hinsichtlich des Einzugsverhaltens die Stückform zu sehen. Bei voluminösen Gütern entstehen im allgemeinen ungünstigere Einzugsverhältnisse. Weisen diese aber einen großen Hohlraumvolumenanteil und geringe Wanddicken auf, können die Einzugsbedingungen durch vorhergehende Biegevorgänge verbessert werden [64] [100]. Sind die Hohlräume für die Zerkleinerungselemente zugänglich, wird zudem die Reißbeanspruchung bei Rotorreißern deutlich begünstigt [64].

Von den *betriebstechnischen Einflußgrößen* besitzt die Beanspruchungsgeschwindigkeit einen großen Einfluß. Mit der Steigerung der Beanspruchungsgeschwindigkeit läßt sich bei ausgewählten Kunststoffen ein Übergang zum energiearmen Sprödebruch erzielen, wodurch der Energiebedarf für die Zerkleinerung reduziert werden kann [19]. Eine höhere Rotorumfangsgeschwindigkeit bewirkt gleichzeitig bei ausreichender Antriebsleistung und Materialzufuhr eine Durchsatzsteigerung [105]. Bei einer größeren Relativgeschwindigkeit zwischen den Rotoren der

Rotorscheren entsteht ein kleinstückigeres Zerkleinerungsprodukt [102]. Die ungünstigen Einzugsverhältnisse führen aber auch zu einer Verringerung des Durchsatzes. Durch einen Verschleiß der Zerkleinerungselemente ergaben sich bei der Scher- und Schneidbeanspruchung ungünstigere Beanspruchungsbedingungen, wodurch die Verformung des Materials und der Energiebedarf deutlich anstiegen [19].

Die Gestaltung der Zerkleinerungsräume und -elemente von Rotorscheren und -reißern ist sehr vielfältig, was auch die große Anzahl der ***konstruktiven Einflußgrößen*** erklärt. Diese umfassen die Zuführung des Materials, die allgemeine Gestaltung des Zerkleinerungsraumes, die einzelnen Zerkleinerungselemente des Rotors und Stators sowie den Austrag des Zerkleinerungsproduktes. Aus den bisherigen Grundlagenuntersuchungen (siehe Kapitel 2.2) geht hervor, daß zunächst die Spaltweite sowie die Messergeometrie von entscheidender Bedeutung für die Ausbildung der Schneid-, Scher- und Reißbeanspruchung sind. Die Spaltweite beeinflusst in komplexer Weise den Kraft- und Energiebedarf sowie die bei der Zerkleinerung auftretenden Biegevorgänge. Die Schneid- und Scherbeanspruchung erfordern geringe Spaltweiten, die deutlich unterhalb der Wanddicke des Materials liegen [19] [38] [40]. Dagegen führen große Spaltweiten entweder nur zur Verformung des Materials oder zu einer Reißbeanspruchung in Verbindung mit Biegung und Torsion [62] [64]. Die Messergeometrie, d. h. die Kombination von Frei-, Keil- und Spanwinkel (s. Bild 2.8), wirkt sich unmittelbar auf die Spannungsverhältnisse im Material, die wirkenden Kräfte sowie das Verschleißverhalten des Messers aus. Geringe Keilwinkel begünstigen die Ausbildung von Zugspannungen und führen zu einer Schneidbeanspruchung [19], jedoch bewirkt die hohe Schneidenbelastung einen starken Verschleiß der Messer. Bei großen Keilwinkeln entstehen bevorzugt Schubspannungen, die zu einer Scherbeanspruchung führen. Weiterhin haben die Untersuchungen an Kreismesserschere gezeigt, daß durch die kreuzende Stellung der Messerkanten verbunden mit einer Rotation der Messer eine kontinuierliche Zerkleinerung mit annähernd konstanter Scherkraft erreicht wird. Geringe Durchmesser der Kreismesser und eine große Überdeckung rufen eine stärkere Verformung des Materials, höhere Reibungsverluste und ungünstigere Einzugsbedingungen hervor [39] [52] [100]. Dadurch steigt der Energiebedarf für die Zerkleinerung an.

Die an großtechnischen Rotorscheren und Rotorreißern erlangten Erkenntnisse beziehen sich vorwiegend auf die allgemeine Gestaltung des Zerkleinerungsraumes und der Rotoren. Aus dem Aufbau der Rotorscheren (s. Bild 2.12 und Bild 2.13) kann geschlußfolgert werden, daß zwischen ein- und mehrrotorigen Bauarten deutliche Unterschiede im Einzugsverhalten bestehen. Erstere sind fast ausschließlich mit zusätzlichen Zuführausrüstungen ausgestattet. Bei den mehrrotorigen Rotorscheren kann durch eine kaskadenartige Anordnung der Rotoren der Einzug voluminöser Güter verbessert werden [60]. Zwischen der Rotorbreite und der Antriebsleistung sowie dem Durchsatz besteht bei allen Rotorscheren und Rotorreißern ein direkter Zusammenhang (s. Bild 2.15). Die Stückgrößenverteilung des Zerkleinerungsproduktes der Rotorscheren wird maßgeblich von den Abmessungen der Rotorelemente beeinflusst. Bei mehrrotorigen Axialspalt-Rotorscheren wird die Stückgrößenverteilung durch die Rotorscheibenbreite sowie den Abstand der aufeinanderfolgenden Rotorwerkzeuge bestimmt [60] [99] [102]. Über die Auswirkungen der Anordnung und Gestaltung des Stators, des Siebrostes, der Materialzuführung und der Abstreifer auf die Zerkleinerung in Rotorscheren und Rotorreißern liegen bisher keine Untersuchungen vor.

2.4 Ableitung der Aufgabenstellung

Aus den vorangegangenen Ausführungen geht hervor, daß das bisherige Wissen über die Zerkleinerung nicht-spröder Stoffe in Rotorschern und Rotorreißern vor allem auf orientierenden Untersuchungen und praktischen Erfahrungen beruht. Um Erkenntnisse auf wissenschaftlicher Grundlage gewinnen zu können, sind im Rahmen von Grundlagenuntersuchungen folgende Aufgabenstellungen zu bearbeiten:

- Aufklärung der bei der Schneid-, Scher- und Reißbeanspruchung stattfindenden Mikroprozesse und der sie beeinflussenden Parameter
- Untersuchung der Einzugs- und Zerkleinerungsvorgänge in ein- und zweirotorigen Rotorschern und Rotorreißern
- Ermittlung des Einflusses von stoffbedingten, betriebsbedingten und konstruktiven Parametern auf das Zerkleinerungsergebnis

Mit der Aufklärung der Zerkleinerungsprozesse wird es dann möglich sein, Aussagen zu folgenden Punkten zu treffen:

- Optimierung der Zerkleinerungsräume und -elemente im Hinblick auf das Prozeßziel
- Ableitung von Richtlinien für den energieeffizienten Betrieb der Rotorschern und Rotorreißer
- Auslegung von Rotorschern und Rotorreißern

Die Komplexität der Beanspruchungsverhältnisse in diesen Zerkleinerungsmaschinen erfordert ein schrittweises Vorgehen. Das Arbeitsprogramm gliedert sich daher in drei Abschnitte:

A) *Untersuchung einzelner Mikroprozesse an speziellen Modellapparaturen*

In diesem Versuchsabschnitt sollen einerseits die Grundbeanspruchungsarten (Schneid-, Scher-, Reiß- und Biegebeanspruchung) unter idealisierten Versuchsbedingungen analysiert und andererseits die bei Zerkleinerung in Rotorschern und -reißern sich vollziehenden Mikroprozesse möglichst getrennt voneinander untersucht werden. Dazu ist es notwendig, einfache Modellapparaturen zu entwickeln sowie die Beanspruchungsgeometrie vorhandener Versuchseinrichtungen zu modifizieren.

B) *Einzelstückzerkleinerung bei Beanspruchungsgeometrien, die denen der Rotorschern und Rotorreißer entsprechen*

Mit diesen Versuchen erfolgt die Annäherung an die für Axialspalt-Rotorschern und Rotorreißer typischen Beanspruchungsgeometrien. Durch die Grundlagenuntersuchungen an speziellen Zerkleinerungsvorrichtungen, die einerseits die für Rotorschern und -reißer typischen Beanspruchungsgeometrien aufweisen und andererseits eine Einzelstückzerkleinerung zulassen, können die verschiedenen Phasen der Zerkleinerung und die sie beeinflussenden Faktoren näher analysiert werden.

C) *Kleintechnische Zerkleinerung*

Der letzte Teil des Arbeitsprogrammes stellt den Übergang zur großtechnischen Zerkleinerung dar. Mit diesen Versuchen lassen sich die Auswirkungen veränderter stofflicher, betriebstechnischer und konstruktiver Parameter auf das Zerkleinerungsergebnis feststellen.

3 Versuchseinrichtungen, Versuchsdurchführung und Methodik der Meßwertgewinnung

3.1 Übersicht über die verwendete Versuchstechnik und die Versuchsmaterialien

Um die in Kapitel 2.4 definierten Aufgabenstellungen und das daraus abgeleitete Arbeitsprogramm umzusetzen, waren verschiedene Versuchseinrichtungen erforderlich. Bild 3.1 zeigt die Zuordnung der verwendeten Versuchstechnik zum jeweiligen Untersuchungskomplex.

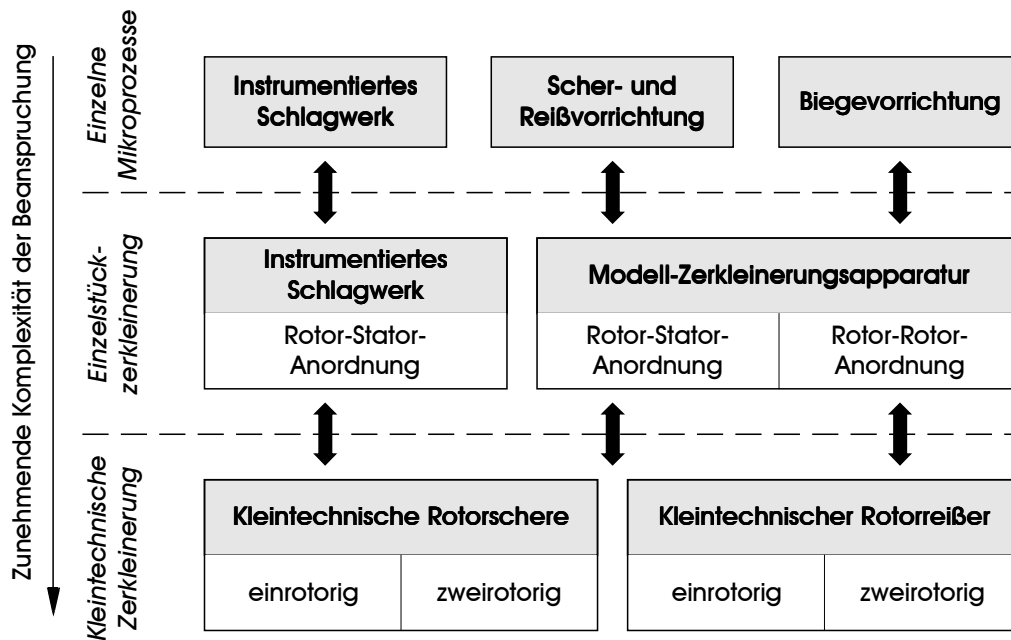


Bild 3.1: Übersicht über die in den drei Untersuchungskomplexen eingesetzten Versuchseinrichtungen

Ausgehend von den Untersuchungen mit den Modellapparaturen bei einer vergleichsweise einfachen Beanspruchungsgeometrie näherten sich die Beanspruchungsbedingungen im Verlaufe des Arbeitsprogrammes schrittweise denen der ein- bzw. zweirotorigen (Axialspalt-)Rotor-scheren und Rotorreißer an. Damit verbunden war ein zunehmender materieller und zeitlicher Aufwand für den Aufbau der Versuchseinrichtungen, die Versuchsdurchführung sowie die Auswertung der Meßergebnisse und der Zerkleinerungsprodukte.

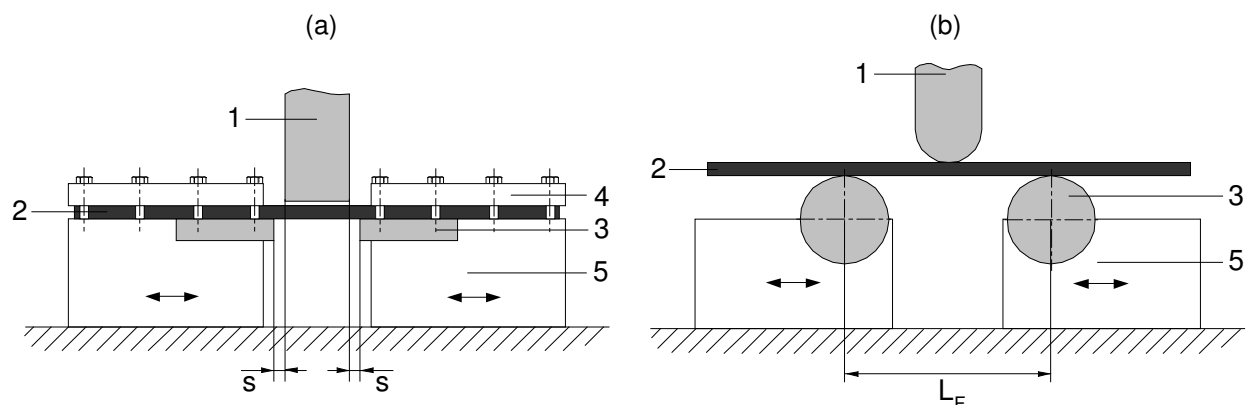
Als Versuchsmaterialien dienten vornehmlich Aluminium-Bleche aus AlMg3 und Polypropylen-Platten verschiedener Wanddicke. Beide Materialien sind typische Vertreter der in Rotorscheren und -reißern zu zerkleinernden nicht-spröden Stoffe. Sie weisen definierte Werkstoffeigenschaften auf und können für Vergleichs- und Reproduzierbarkeitsversuche in ausreichender Menge wiederbeschafft werden. Für die Ermittlung der stoffbedingten Einflußgrößen wurden ergänzende Versuche mit weiteren Aluminiumlegierungen und verschiedenen Probekörperformen (Rohre, Profile) durchgeführt. Die Werkstoffkennwerte der verwendeten Materialien sind in Tabelle 3.1 zusammengestellt. Im Rahmen der kleintechnischen Zerkleinerung erfolgten des weiteren orientierende Untersuchungen mit realitätsnahen Abfallschüttungen.

Tabelle 3.1: Werkstoffkennwerte der plattenförmigen Versuchsmaterialien (z. T. aus [106])

Material	Bezeichnung	Elastizitätsmodul E in N/mm ²	Zugfestigkeit R_m in N/mm ²	Dehngrenze $R_{p0,2}$ in N/mm ²	Bruchdehnung A in %	Spezifische Zugenergie $w_{Z,Q}$ in J/mm ²
Wanddicke 0,5 mm						
Aluminiumknetlegierung	AlMg3	73600	250	176	13,6	2,4
Wanddicke 1,0 mm						
Reinaluminium	Al99.5	56500	123	114	4,4	0,3
Aluminiumknetlegierung	AlMg3	68000	263	200	9,0	1,2
Aluminiumknetlegierung	AlMg4.5Mn0.7	67400	308	159	20,9	2,7
Aluminiumknetlegierung	AlMgSi1	72800	344	304	10,9	2,7
Aluminiumknetlegierung	AlCu4MgSi	72000	428	324	17,4	3,4
Polypropylen	PP	-	33	27	-	3,0
Wanddicke 2,0 mm						
Reinaluminium	Al99.5	53600	94	88	9,7	0,4
Aluminiumknetlegierung	AlMg3	58900	243	167	12,6	1,4
Aluminiumknetlegierung	AlMg4.5Mn0.7	63600	313	159	20,4	2,7
Aluminiumknetlegierung	AlCu4MgSi	72000	427	294	20,9	4,1
Polypropylen	PP	-	32	20	-	3,1
Wanddicke 5,0 mm						
Aluminiumknetlegierung	AlMg3	70500	248	175	15,2	2,4
Polypropylen	PP	-	31	24	-	3,1

3.2 Scher-/Reißvorrichtung und Biegevorrichtung

Für die Aufklärung der bei der Scher-, Reiß- und Biegebeanspruchung stattfindenden Mikroprozesse und der sie beeinflussenden Parameter wurden zwei einfache Modellapparaturen verwendet. Der prinzipielle Aufbau dieser Vorrichtungen geht aus Bild 3.2 hervor. Diese Vorrichtungen wurden in eine bestehende Zug-/Druck-Prüfmaschine (Universalprüfmaschine ZWICK 1476) integriert, so daß die an der Prüfmaschine vorhandene Meßtechnik genutzt werden konnte. Die Beanspruchungsgeschwindigkeit ließ sich mit der Prüfmaschine zwischen 1 und 500 mm/min variieren. Beide Vorrichtungen bestehen aus je einem Stempel (1) und zwei Grundträgern (5), die im Fall der Scher- und Reißvorrichtung mit Statormessern und im Fall der Biegevorrichtung mit beweglichen Auflagerrollen (3) versehen sind.

**Bild 3.2:** Vorrichtung zur Untersuchung des Scher- und Reißvorganges (a) sowie des Biegevorganges (b), schematisch

1 - Stempel; 2 - Probekörper; 3 - Statormesser bzw. Auflagerrolle; 4 - Einspannung des Probekörpers; 5 - Grundträger; s - Spaltweite; L_F - Auflagerabstand

Bei der **Scher- und Reißvorrichtung** (a) ist der Stempel als Messer mit einem Keilwinkel von 90° ausgebildet. Die Messerkanten des Stempels und des Stators liegen parallel zueinander. Dadurch ist in Kombination mit den scharfkantigen Statormessern und einer geringen Spaltweite eine Scherbeanspruchung und bei einer größeren Spaltweite eine Reißbeanspruchung realisierbar. Die Schneidkantenradien von Stempel- und Statormesser betragen 0,03 mm. Für die Versuche ist es erforderlich, symmetrische Beanspruchungsverhältnisse zu gewährleisten, d. h., die Spaltweite muß auf beiden Seiten stets gleich groß eingestellt werden. Für die verwendeten Materialien erwies sich ein Variationsbereich der Spaltweite von 0,1 mm bis 10 mm als günstig. Die Versuche erfolgten ausschließlich mit plattenförmigen Probekörpern, die sowohl bei der Scher- als auch der Reißbeanspruchung eingespannt waren. Während die Einspannung bei der Scherbeanspruchung im wesentlichen als Niederhalter fungiert, unterliegt der Probekörper beim Reißen einer starken Zugbeanspruchung. Um ein Nachrutschen des Materials auch bei größeren Waddicken zu verhindern, war eine feste Einspannung durch massive Platten erforderlich (4). Das gesamte Versuchsprogramm mit der Scher- und Reißvorrichtung geht aus Anlage 2 hervor.

Im Gegensatz zur Scher- und Reißvorrichtung ist der Stempel der **Biegevorrichtung** (b) abgerundet (Radius 10 mm). Um den Einfluß der Reibung auf das Meßergebnis zu minimieren, sind die Auflager als Rollen ausgebildet. Der Biegewinkel kann durch die Wahl des Auflagerabstands L_F und des Stempelwegs eingestellt werden. Mit dieser Vorrichtung ergibt sich somit ein maximaler Biegewinkel von ca. 100° . Neben den plattenförmigen Probekörpern wurden zusätzlich Versuche mit verschiedenen AlMg3-Profilen durchgeführt, mit denen die in der Modell-Zerkleinerungsapparatur beobachteten Verformungsvorgänge schrittweise nachgebildet werden konnten. In Anlage 3 sind die verschiedenen Biegeproben und die aufgenommenen Biegekraft-Biegewinkel-Verläufe zusammengestellt.

Die **Meßwertgewinnung** war über die an der Zug-/Druck-Prüfmaschine vorhandenen Kraft- und Wegmeßeinrichtungen möglich. Aus den aufgezeichneten Kraft-Weg-Verläufen konnten

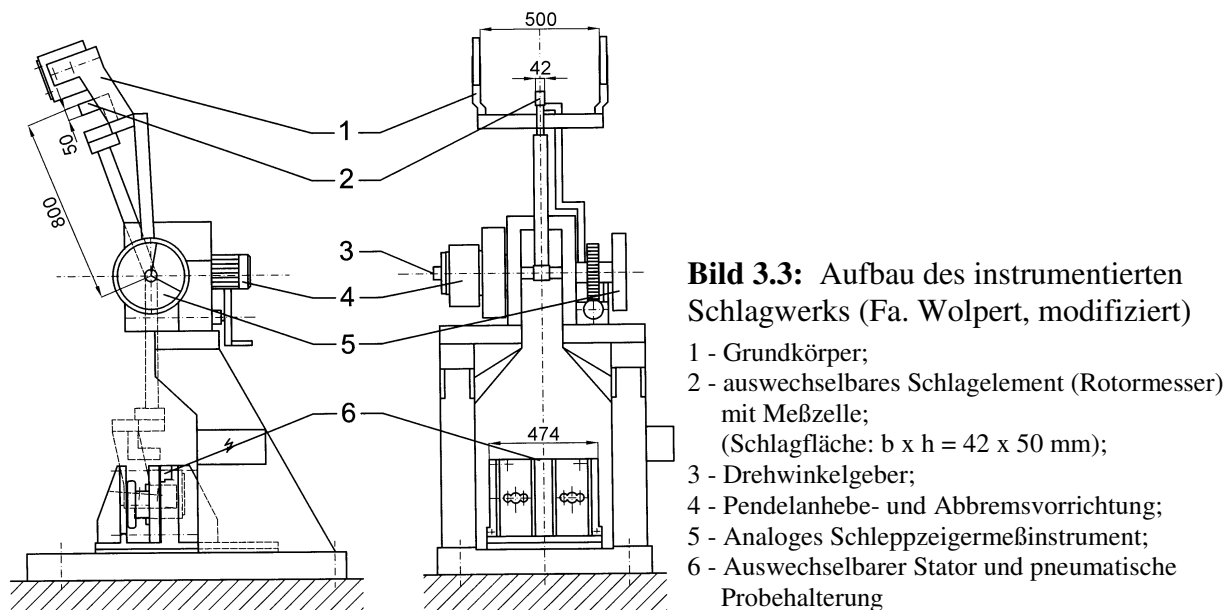
- die maximale Kraft $F_{B,max}$ bei der jeweiligen Beanspruchung,
- der bis zum Bruch zurückgelegte Weg x_{Bruch} sowie
- der Energiebedarf für die Beanspruchung W_B

durch Integration des Kraft-Weg-Verlaufes ermittelt werden. Durch den Bezug auf den Ausgangsquerschnitt des Probekörpers gelangt man zur querschnittbezogenen Beanspruchungskraft und -energie (s. Kap. 3.5.1). Eine von der Waddicke des Probekörpers unabhängige Bewertung der Messerweges bis zum Bruch gelingt bei den Scher- und Reißversuchen durch die relative Eindringtiefe ϵ_B (Gl. (3.1)).

$$\epsilon_B = \frac{x_{Bruch}}{w} \quad (3.1)$$

3.3 Instrumentiertes Schlagwerk

Die Versuche am instrumentierten Schlagwerk wurden mit der Zielstellung durchgeführt, sich ausgehend von den idealen Schneid-, Scher- und Reißbeanspruchungen schrittweise den Beanspruchungsbedingungen in Rotorscheren und Rotorreißern anzunähern. Das Schlagwerk eignet sich für diese Untersuchungen insbesondere deshalb, weil aufgrund des modularen Aufbaus die Rotormesser- und Statorgestaltung auf einfache Weise variiert werden können. Den **Aufbau** des instrumentierten Schlagwerks zeigt Bild 3.3.



Die plattenförmigen Probekörper werden pneumatisch in die Amboßkonstruktion (6) eingespannt. Die Beanspruchung des Probekörpers erfolgt im unteren Totpunkt des Pendels zwischen dem Rotormesser (2) und dem geraden oder U-förmigen Stator (6). Bei maximaler Auslenkung des Pendels wird dort eine Beanspruchungsgeschwindigkeit von 5,5 m/s erreicht, was einer Beanspruchungsenergie von 750 J entspricht. Geringere Geschwindigkeiten können über eine manuelle Fallhöhenregulierung des Pendels eingestellt werden. Damit verbunden ist jedoch eine Reduzierung der maximal möglichen Beanspruchungsenergie. Für die durchgeführten Versuche ergab sich ein sinnvoller Bereich von 0,4 bis 5,5 m/s. Eine detaillierte Darstellung des Versuchsprogrammes befindet sich in Anlage 4.

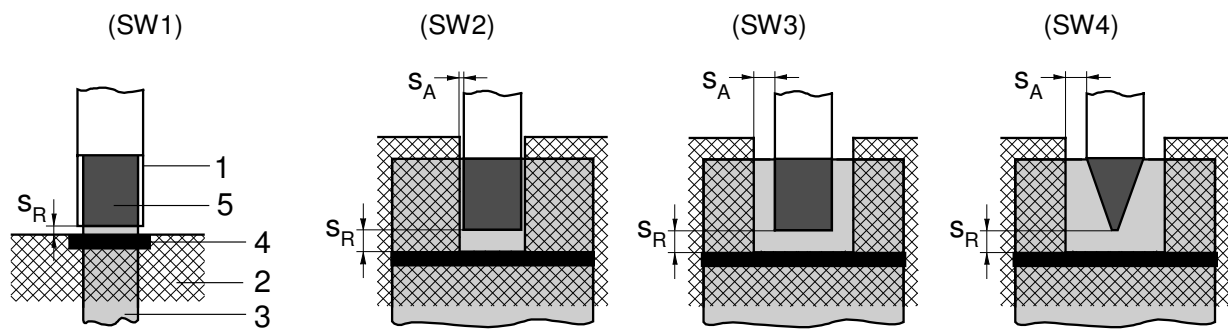
Damit die jeweilige Grundbeanspruchungsart realisiert werden kann, müssen die Geometrie des Rotormessers sowie die Spaltweite variabel sein. Einen Überblick über die verwendeten Rotormesser vermittelt Tabelle 3.2. Mit dem Rotormesser RM1 erfolgte insbesondere die Analyse der Scher- und Reißbeanspruchung. Für die Versuche zur Schneidbeanspruchung standen zwei verschiedene Messer (RM2 und RM3) zur Verfügung. Die Rotormesser RM3 und RM4 sind den Zerkleinerungswerkzeugen der Modell-Zerkleinerungsapparaturen und der kleintechnischen Rotorscheren und Rotorreißer nachgebildet, um vergleichbare Beanspruchungsgeometrien realisieren zu können.

Tabelle 3.2: Kenndaten der verwendeten Rotormesser

(Definition der Winkel: s. Bild 2.8)

Rotormesser	Freiwinkel α_R in °	Keilwinkel β_R in °	Spanwinkel γ_R in °	Schneidkantenradius r_s in mm	Schneidenbreite b_{SN} in mm
RM1	0	90	0	0,1	42
RM2	10	55	25	0,03	42
RM3	3	58	29	0,1	42
RM4	15	58	17	0,1	5

Der Übergang zu einer für Rotorscheren und -reißer typischen Beanspruchungsgeometrie erfordert zudem einen U-förmigen Stator, der eine Zerkleinerung im axialen und radialen Spalt ermöglicht. Zusammen mit der einfachen Geometrie für die Analyse der Grundbeanspruchungsarten standen somit insgesamt vier Beanspruchungsgeometrien zur Verfügung (Bild 3.4). Die axiale und die radiale Spaltweite konnten je nach Statorgestalt stufenlos zwischen 0,1 und 20 mm variiert werden.

**Bild 3.4:** Beanspruchungsgeometrien des Schlagwerks, schematisch;

(SW1) Beanspruchungsgeometrie für die Analyse der Grundbeanspruchungsarten; (SW2) Rotor-scherengeometrie (Axialspalt-Rotorschere); (SW3/4) Rotor-reißergeometrien

1 - Rotormesser; 2 - Stator; 3 - Probekörper; 4 - Einspannung; 5 - Bruchstück; s_A - axiale Spaltweite; s_R - radiale Spaltweite

Die am Schlagwerk installierten **Meßeinrichtungen** sind auf die Bestimmung der für die Verformung bzw. Zerkleinerung des Probekörpers aufgewendeten Energie ausgerichtet. Es können zwei verschiedene Methoden unterschieden werden:

- Messung der Pendelauslenkung
- Messung der am Rotormesser wirkenden Kräfte

Im ersten Fall ergibt sich der Gesamtenergiebedarf W_{Pendel} aus der Differenz zwischen der Pendelauslenkung vor und nach der Beanspruchung entsprechend Gl. (3.2).

$$W_{\text{Pendel}} = m_H g \cdot l_{\text{Pendel}} \cdot (\cos \beta - \cos \alpha) \quad (3.2)$$

m_H - Hammermasse ($m_H = 50$ kg); l_{Pendel} - Länge des Pendels; α bzw. β - Fall- bzw. Steigwinkel

Fall- und Steigwinkel werden über einen an der Pendelwelle befestigten Drehwinkelgeber (Auflösung $0,01^\circ$) erfaßt (s. Bild 3.3). Die Auswertung des Signals erfolgt mittels einer Zählerkarte in einem Meßcomputer. Des weiteren können beide Winkel an einem analogen Schleppzeigermeßinstrument abgelesen und der Energiebedarf ebenfalls nach o. g. Gleichung berechnet werden. Für die Ermittlung der Beanspruchungsenergie W_B ist die Kenntnis der durch die Lagerreibung und den Luftwiderstand hervorgerufenen Leerlaufenergie erforderlich. Diese

wurde vor jeder Versuchsreihe durch mehrmalige Fallversuche ohne Probekörper bestimmt und von der bei der Beanspruchung gemessenen Gesamtenergie abgezogen.

Als zweite Möglichkeit zur Ermittlung der Beanspruchungsenergie fand die Messung der am Rotormesser angreifenden Kräfte Anwendung. Hierzu wurde die Rotormesserhalterung als Verformungskörper gestaltet und mit Dehnmeßstreifen instrumentiert (Anlage 4). Dadurch können die in Bewegungsrichtung des Messers wirkenden Kräfte gemessen werden. Das Meßsignal wird über einen Verstärker (HBM: KWS 102.D) geleitet und mittels eines Transientenspeichers (max. Abtastfrequenz 2 MHz, Auflösung 12 bit) aufgezeichnet. Die Kalibrierung des gesamten Meßsystems erfolgte für jedes Rotormesser im Bereich von 0 ... 10 kN an einer speziellen Druckvorrichtung. Aufgrund von dynamischen Störeinflüssen eignet sich die letztgenannte Meßmethode nur bedingt für die Messung sehr kurzer Beanspruchungen (< 1 ms). Infolge der hohen Kräfte am Rotormesser (bis 20 kN) muß die gesamte Meßzelle sehr stabil ausgeführt sein. Die damit verbundenen höheren Massenträgheitskräfte verursachen Eigenschwingungen, die das Meßsignal überlagern. Auch die komplexen Beanspruchungsverhältnisse bei den Rotorscheren- und Rotorreißergeometrien SW2 bis SW4 können mit der Instrumentierung des Rotormessers nicht vollständig erfaßt werden. Daher erfolgte die Kraftmessung am Rotormesser nur bei der Analyse der Grundbeanspruchungsarten (Geometrie SW1) im Geschwindigkeitsbereich von 0,4 ... 1,5 m/s. Einen typischen Kraft-Weg-Verlauf zeigt Bild 3.5 am Beispiel der Scherbeanspruchung von Polypropylen. Durch die Integration der Fläche unter der Kraft-Weg-Kurve ergibt sich die Beanspruchungsenergie W_B . Aufgrund der Schwankungen wird das Meßsignals zur Bestimmung der maximalen Beanspruchungskraft $F_{B,max}$ mittels eines Tiefpaßfilters geglättet.

Die über die Pendelauslenkung und die Instrumentierung gewonnenen Beanspruchungsenergien weisen eine gute Übereinstimmung auf (s. Kap. 3.6, Tabelle 3.5).

Die **Auswertung** der Versuche beruht auf der Charakterisierung der beanspruchten Probekörper hinsichtlich der neu erzeugten Reiß- und Bruchfläche, der Verformung des Bruchstücks sowie der maximalen Beanspruchungskraft und der Beanspruchungsenergie (s. Kap. 3.5). Analog zur Scher- und Reißvorrichtung werden die bei der Schneid- und Scherbeanspruchung (Geometrie SW1) ermittelten Kräfte und Energien auf den Ausgangsquerschnitt der Proben bezogen. Die Bewertung der komplexeren Beanspruchungsverhältnisse der Geometrien SW2 bis SW4 mit anteiliger Reiß- und Biegebeanspruchung (Biegebrechen) erfolgt mit der auf die Bruchfläche bezogenen Beanspruchungsenergie.

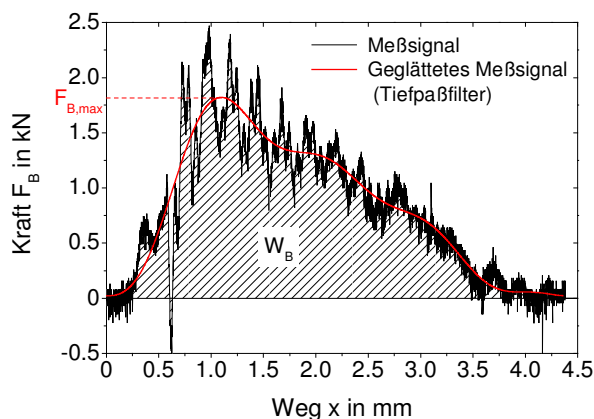


Bild 3.5: Beispiel eines mit dem Schlagwerk erzielten Kraft-Weg-Verlaufes

Polypropylen; Wanddicke 5 mm; Probekörperbreite 10 mm; Geometrie SW1; Rotormesser RM1; Spaltweite 0,2 mm; Beanspruchungsgeschwindigkeit 0,6 m/s

3.4 Modell-Zerkleinerungsapparaturen und kleintechnische Rotorscheren und -reißer

Den Schwerpunkt des Arbeitsprogrammes bildeten die Versuche an den beiden Modell-Zerkleinerungsapparaturen und den kleintechnischen Zerkleinerungsmaschinen. Diese Versuchseinrichtungen basieren auf einer vorhandenen langsamlaufenden Vorzerkleinerungsmaschine. Durch die umfangreichen Variationsmöglichkeiten dieser Maschine im Hinblick auf die Gestalt der Zerkleinerungselemente und des Zerkleinerungsraumes konnten typische Beanspruchungsgeometrien von ein- und zweirotorigen Rotorscheren und -reißern realisiert werden. Für den Vergleich der Versuchsergebnisse ist von besonderem Vorteil, daß bei der jeweiligen Umgestaltung des Zerkleinerungsraumes die mit entsprechender Meßtechnik ausgestattete Antriebseinheit unverändert bleiben konnte. Den **Aufbau** der Vorzerkleinerungsmaschine in der Konfiguration als zweirotorige (Axialspalt-)Rotorschere bzw. -reißer verdeutlicht Bild 3.6. Weitere technische Details können Anlage 5 entnommen werden.

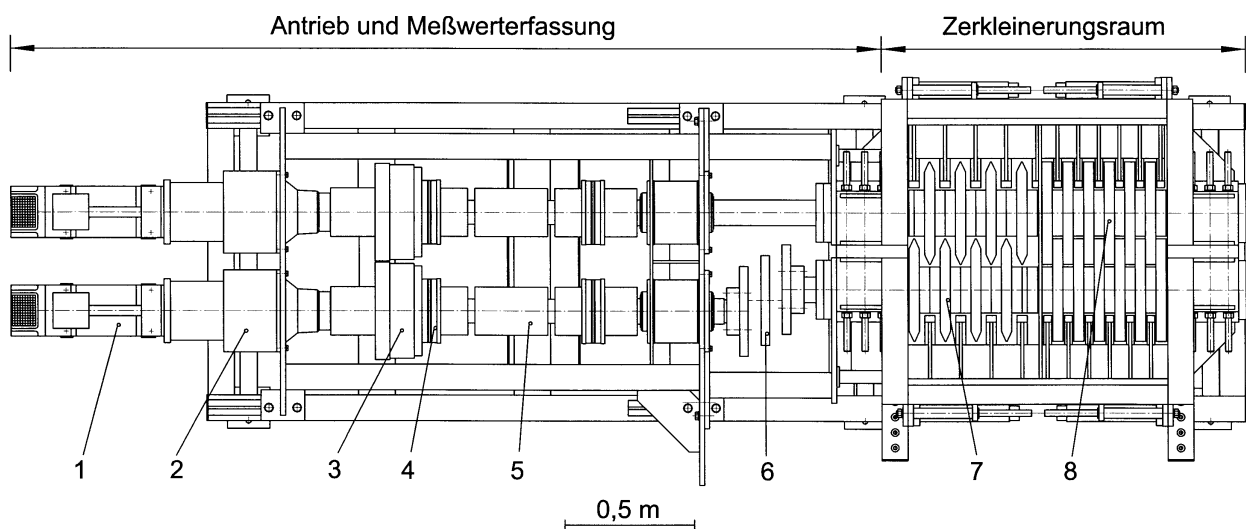


Bild 3.6: Gesamtansicht der Vorzerkleinerungsmaschine mit Antrieb und Meßtechnik in der Ausführung als kleintechnische zweirotorige Rotorschere und -reißer

1 - Elektromotor; 2 - Planetengetriebe; 3 - Freischaltkupplung; 4 - Induktive Drehzahlerfassung; 5 - Drehmomentmeßwelle; 6 - Schmidt-Kupplung; 7 - Welle 1; 8 - Welle 2

Die Vorzerkleinerungsmaschine besitzt zwei Rotoren, die jeweils von einem Elektromotor (1) angetrieben werden. Über ein zweistufiges Planetengetriebe (2) läßt sich die Rotorumfangsgeschwindigkeit im Zerkleinerungsraum im Bereich von 0,1 bis ca. 2,9 m/s variieren. Zudem können durch die separate Steuerung der Elektromotoren verschiedene Relativgeschwindigkeiten zwischen den Rotoren erzeugt werden. Die zur Aufnahme der mechanischen Größen installierte Meßtechnik, bestehend aus einem Zahnkranz und einem induktiven Drehsensor (4) sowie einer Drehmomentmeßwelle (5), kann durch eine Freischaltkupplung (3) vom Antrieb getrennt werden. Diese dient dem Schutz der Drehmomentmeßwelle, indem sie bei zu hohen Drehmomenten die Verbindung zum Antrieb schlagartig unterbricht.

Im Zerkleinerungsraum befinden sich je nach Ausführung eine oder zwei mit Rotorscheiben bestückte Wellen. Zusätzlich können am Gehäuse einzelne Statorelemente bzw. ein spezieller Statorgrundträger (s. Kap. 3.4.1) befestigt werden. Die Rotor- und Statorelemente sind einzeln auswechselbar und können in ihrer Anordnung und Gestalt vielfältig variiert werden. Um den Abstand der Wellen verändern zu können, ist das Gehäuse zweigeteilt. Dadurch ist es möglich,

die Welle 1 (7) radial zu verschieben. Die Verbindung zum Antriebsstrang wird in diesem Fall durch eine Schmidt-Kupplung (6) gewährleistet.

Die an der Vorzerkleinerungsmaschine eingesetzte **Meßtechnik** zur Erfassung der mechanischen Leistung zeigt schematisch Bild 3.7. Vom Drehsensor wird ein Spannungssignal in Form eines Impulses geliefert, das in einem Impulszähler mittels eines Kalibrierfaktors in ein Drehzahlsignal $n(t)$ umgewandelt wird. Bei der Drehmomentmeßwelle vom Typ HBM T1 (Fa. HBM GmbH/Darmstadt) handelt es sich um eine speziell für Grundlagenuntersuchungen und Abnahmemessungen konzipierte Meßwelle (Genauigkeitsklasse 0,1 %), die für statische, reversierende

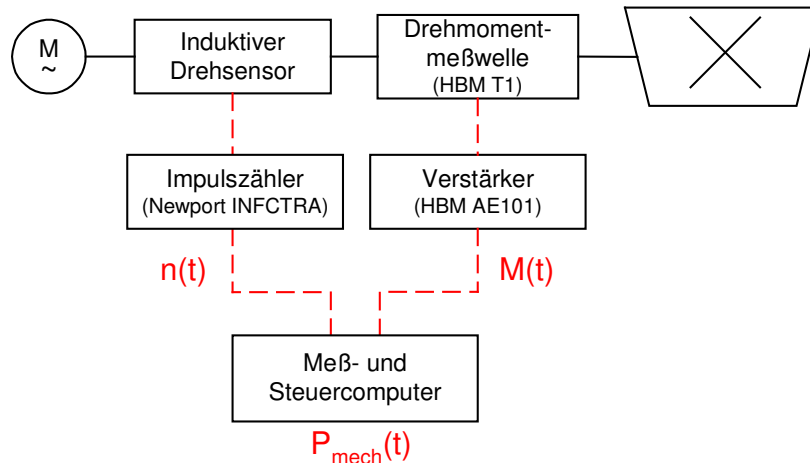


Bild 3.7: Anordnung der Meßtechnik zur Bestimmung der mechanischen Leistung an einer Rotorwelle der Vorzerkleinerungsmaschine

$n(t)$ - Drehzahlsignal; $M(t)$ - Drehmomentsignal; $P_{\text{mech}}(t)$ - berechnete mechanische Leistung

und pulsierende Momente bis zu 10 kNm geeignet ist [107]. Die Verstärkung des Signals $M(t)$ übernimmt ein vom Hersteller der Drehmomentmeßwelle empfohlener Verstärker. Die Drehzahl- und Drehmomentsignale werden in einem zentralen Meß- und Steuercomputer mit einer Frequenz von 100 Hz abgetastet und gespeichert. Gleichzeitig wird die mechanische Leistung $P_{\text{mech}}(t)$ aus beiden Signalverläufen berechnet (Gl. (3.3)).

$$P_{\text{mech}}(t) = 2\pi \cdot n(t) \cdot M(t) \quad (3.3)$$

Die weitere **Auswertung** erfolgt sowohl mit der Software DIADEM (Fa. GfS/Aachen) als auch mit einem speziell für die Berechnung der Beanspruchungsenergie entwickelten Programm. Im folgenden wird zwischen der Leerlaufleistung $P_{\text{mech,L}}(t)$, die durch die Lagerreibung hervorgerufen wird, und der für die Charakterisierung der Zerkleinerung relevanten Beanspruchungsleistung $P_{\text{mech,B}}(t)$ unterschieden (Gl. (3.4)).

$$P_{\text{mech}}(t) = P_{\text{mech,L}}(t) + P_{\text{mech,B}}(t) \quad (3.4)$$

Im allgemeinen ist auch die Leerlaufleistung eine Funktion der Zeit, wobei die Zeitabhängigkeit durch Drehzahlschwankungen während der Beanspruchung verursacht wird. Das gemessene Leerlaufmoment M_L kann als konstant angenommen werden. Demnach ergibt sich die Leerlaufleistung nach folgender Gleichung:

$$P_{\text{mech,L}}(t) = 2\pi \cdot n(t) \cdot M_L \quad (3.5)$$

Aus dem Verlauf der mechanischen Leistung wird unter Abzug der Leerlaufleistung ausgehend von Gl. (3.4) die Beanspruchungsleistung berechnet. Die Bestimmung der Beanspruchungsenergie erfolgt durch numerische Integration des so berechneten Beanspruchungsleistung-Zeit-Verlaufes mittels der Sehnen-Trapez-Formel (Anlage 5/3). Durch den Bezug auf die bei der Zerkleinerung neu entstandene Bruchfläche oder die Aufgabemasse des Probematerials erhält man die bruchflächenbezogene und die massebezogene Beanspruchungsenergie (s. Kap. 3.5.1).

Die Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der Meßergebnisse bei einer sehr kurzen Beanspruchung mit der einrotorigen Modell-Zerkleinerungsapparatur und bei der kleintechnischen Zerkleinerung wird in Anlage 5/4 nachgewiesen. Auch zeigt der Vergleich mit den mittels des Schlagwerks unter vergleichbaren Versuchsbedingungen ermittelten bruchflächenbezogenen Beanspruchungsenergien eine gute Übereinstimmung (s. Kap. 3.6, Tabelle 3.6).

Das Versuchsprogramm der Vorzerkleinerungsmaschine gliedert sich in die Versuche zur Einzelstückzerkleinerung mittels zweier Modell-Zerkleinerungsapparaturen und die kleintechnische Zerkleinerung. Die Gestaltung des Zerkleinerungsraumes und die Versuchsdurchführung unterscheiden sich in beiden Versuchsabschnitten deutlich, so daß sie im folgenden getrennt voneinander betrachtet werden sollen.

3.4.1 Modell-Zerkleinerungsapparaturen

Zur Aufklärung der Einzugs- und Zerkleinerungsvorgänge in ein- und zweirotorigen Rotorscheren und -reißen unter möglichst einfachen Versuchsbedingungen wurden zwei Modell-Zerkleinerungsapparaturen entwickelt.

Den Aufbau der *einrotorigen Modell-Zerkleinerungsapparatur* (Rotor-Stator-System) verdeutlicht Bild 3.8. Im Zerkleinerungsraum befinden sich der Stator (Amboß) und die nur mit einer Rotorscheibe (1) ausgestattete Rotorwelle. Oberhalb der Beanspruchungszone ist der gesamte Zerkleinerungsraum von einem durchsichtigen Schutzgehäuse (9) umgeben, so daß die in der Modell-Zerkleinerungsapparatur ablaufenden Vorgänge sichtbar sind. Auf der Rotorscheibe sind drei um jeweils 120° versetzt angeordnete Rotormesser (2) mit einer definierten Schneidkante (Keilwinkel $\beta_R = 58^\circ$) befestigt (Anlage 5/2). Aufgrund ihrer Einbaulage ergibt sich ein Freiwinkel α_R von 15° und ein Spanwinkel γ_R von 17° . Der Messerkreisdurchmesser beträgt 400 mm. Das Statorsystem besteht aus einem Statorgrundträger (4), auf dem die einzelnen Statorelemente (5, 6, 7) befestigt sind. Um die Beanspruchungs- und Einzugsbedingungen in einem möglichst großen Bereich untersuchen zu können, kann die Position des Statorgrundträgers in horizontaler und vertikaler Richtung stufenlos variiert werden. Des weiteren läßt sich die Neigung der Statorelemente in vier Stufen (30° , 45° , 60° , 80°) einstellen. Dadurch ist es möglich, die geometrischen Verhältnisse von ein- und mehrrotorigen Rotorscheren und -reißen nachzubilden. Die axiale Spaltweite zwischen der Rotorscheibe und den beiden angrenzenden Statorwerkzeugen (5) wird über das Einfügen von Spaltblechen (6) in Abstufung von 0,1 bis 2 mm realisiert. Größere axiale Spaltweiten (> 5 mm), wie sie für die Ausbildung der Rotorreißergeometrien notwendig sind, werden dagegen durch Distanzelemente (7) eingestellt.

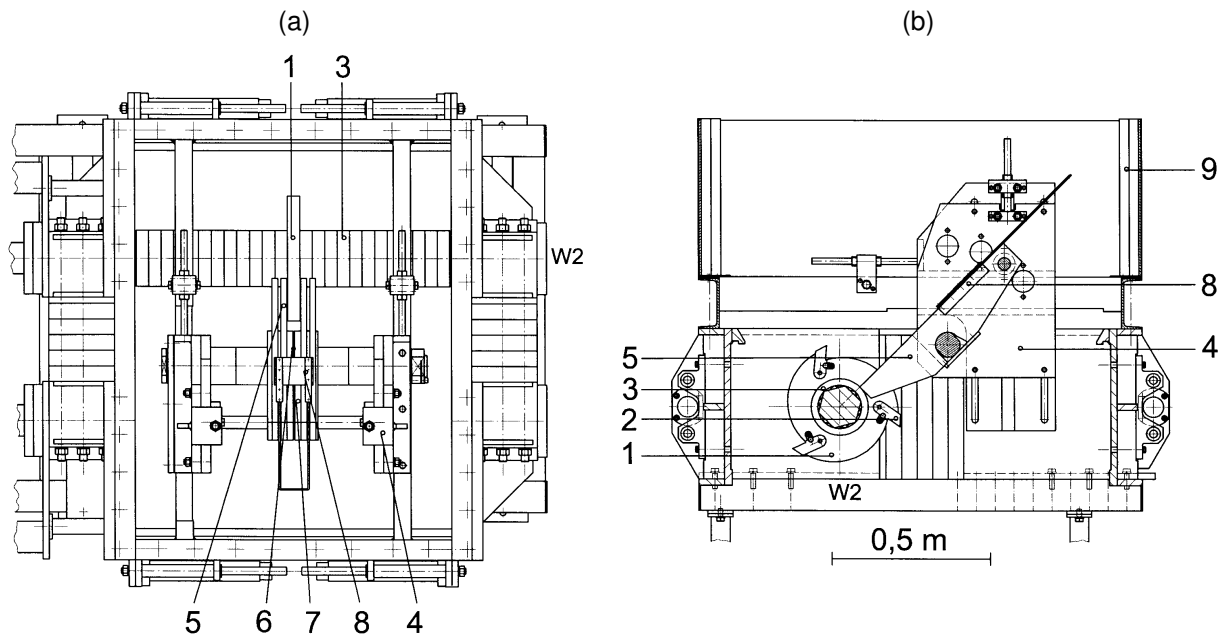


Bild 3.8: Aufbau der einrotorigen Modell-Zerkleinerungsapparatur;

(a) Draufsicht (ohne Schutzgehäuse); (b) Seitenansicht

1 - Rotorscheibe; 2 - auswechselbares Rotormesser; 3 - Distanzring; 4 - Statorgrundträger; 5 - Statorwerkzeug;

6 - Spaltbleche; 7 - Distanzelement; 8 - Probekörper und Probekörpereinspannung; 9 - Schutzgehäuse; W2 - Welle 2

Die Aufgabe des Probekörpers erfolgt entweder über eine Schurre, wobei der Probekörper aufgrund der Neigung der Statorelemente selbständig in den Zerkleinerungsraum gleitet, oder er wird mit einer speziellen Zuführeinrichtung aufgegeben. Diese besteht aus einem Schlitten, auf dem der Probekörper eingespannt ist (8). Während der Probekörperzuführung wird der Schlitten durch die begrenzenden Statorwerkzeuge (5) geführt. Für die Nachbildung typischer Rotorreißergeometrien ist diese Art der Probekörperhalterung und -zuführung dringend erforderlich, da die Beanspruchung mit einer einzelnen Rotorscheibe bei größeren Spaltweiten nur zur Verformung des Materials führen würde. Im Fall der Rotorscherengeometrien übernimmt die Einspannung die Funktion eines Niederhalters und begünstigt somit den Schervorgang im axialen Spalt.

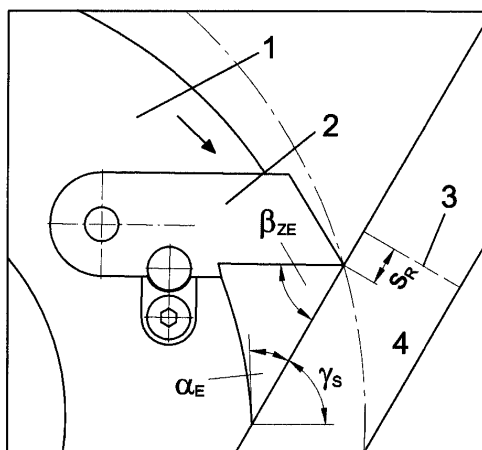


Bild 3.9: Parameter zur Beschreibung der geometrischen Verhältnisse am Rotor-Stator-System

1 - Rotorscheibe; 2 - Rotormesser; 3 - Statorseite des Distanzelements; 4 - Statorwerkzeug;

s_R - radiale Spaltweite; α_E - Einzugswinkel der Rotorscheibe;

β_{ZE} - Messereingriffswinkel; γ_S - Statorneigung

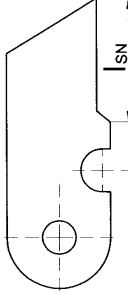
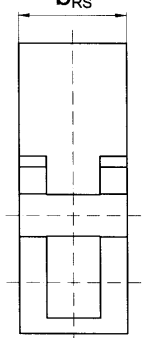
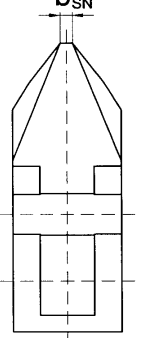
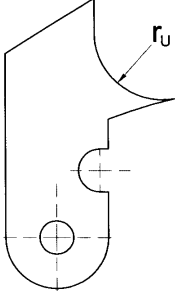
Für die Beschreibung der geometrischen Verhältnisse am Rotor-Stator-System werden die in Bild 3.9 dargestellten Kenngrößen eingeführt. Zwischen den Rotorscheibenseitenkanten und dem Stator ergibt sich am Punkt der ersten Überdeckung der Einzugswinkel α_E . Dieser charakterisiert das Einzugsverhalten des Probekörpers durch die Rotorscheibe. Dagegen kennzeichnet der

Messereingriffswinkel β_{ZE} , der sich zwischen den begrenzenden Statorwerkzeugen und der Messerunterseite bildet, maßgeblich die Verformung und den Einzug des Probekörpers durch das Rotormesser. In Verbindung mit der radialen Spaltweite s_R beschreibt er zugleich die Stellung des Stators gegenüber dem Rotor. Die Neigung des Stators und der Aufgabeschurre wird durch den Schurrenwinkel γ_s bestimmt. Einen Überblick über die realisierten Statorstellungen und die entsprechenden Parameter vermittelt Anlage 6/1.

Neben der Variation der Statorgeometrie und -anordnung bildeten die Untersuchungen zur Optimierung der Rotormessergeometrie im Hinblick auf eine verformungs- und reibungsarme Zerkleinerung einen Schwerpunkt des Versuchsprogrammes. Dazu wurden gezielt einzelne Geometrieparameter der Rotormesser verändert. Tabelle 3.3 gibt einen Überblick über die untersuchten Rotormesser. Die Veränderungen der Rotormessergeometrie umfassen die anteiligen Abmessungen der Front- und Seitenschneiden (a, b), den Übergang von einer Frontschneide zu einer Spitze (c) sowie die Anpassung der Kontur der Seitenschneiden an die Gestalt der Rotorscheibe (d).

Tabelle 3.3: Übersicht über die untersuchten Geometrien der Rotormesser

(a) Rotormessерlänge; (b) Rotormesserbreite; (c) Breite der Frontschneide; (d) Übergangsradius
(Die Standardabmessungen sind dick hervorgehoben.)

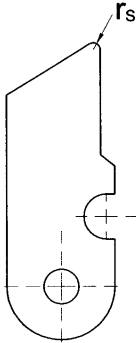
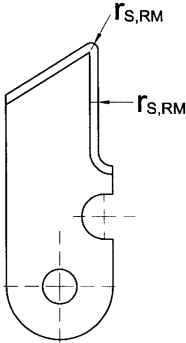
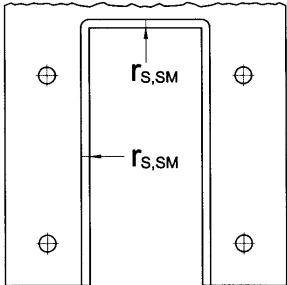
	(a)	(b)	(c)	(d)
Rotormesser- gestalt				
Variations- bereich	l_{SN} : 46/56/66 mm	b_{RS} : 20/40/60/80 mm	b_{SN} : 5/15/25/40 mm	r_U : (0)/5/15/25 mm

Ebenfalls von großer praktischer Bedeutung ist der Einfluß der Schneidkantenradien. Da in großtechnischen Rotorschern die Nutzung der Messer bis zu Schneidkantenradien von mehreren Millimetern erfolgt, wurden bewußt solche großen Radien in die Untersuchungen einbezogen. Der Verschleißzustand von Rotor- und Statormesser konnte mit der Modell-Zerkleinerungsapparatur getrennt in folgenden Abschnitten untersucht werden (Tabelle 3.4):

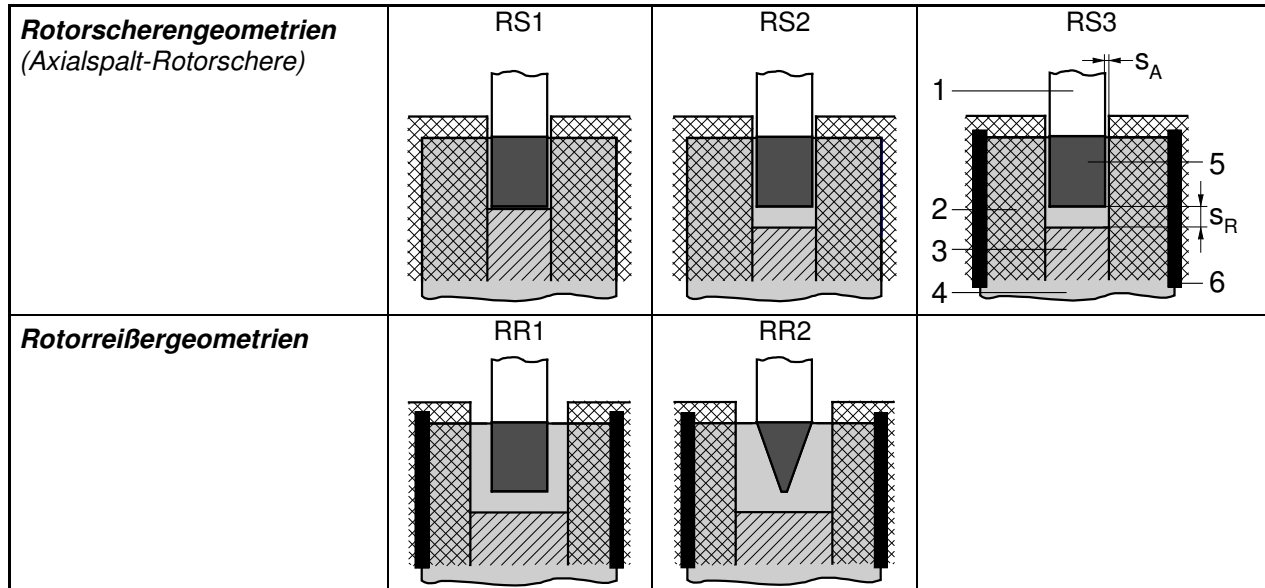
- nur die Rotormesserfrontschneide,
- die Rotormesserfront- und die Rotormesserseitenschneiden sowie
- die Statormesserkanten.

Tabelle 3.4: Variierte Schneidkantenradien von Rotor- und Statormesser

(a) Rotormesserfrontschneide; (b) Rotormesserfront- und Rotormesserseitenschneiden; (c) Statormesserkanten
(Die Standardwerte sind dick hervorgehoben.)

	(a)	(b)	(c)
Schneid- kantenradien			
Variations- bereich	$r_{S,RM}$: 0,03 /0,1/1,0/2,5 mm	$r_{S,RM}$: 0,1 /3,0 mm	$r_{S,SM}$: 0,1 /1,0/3,0 mm

Die sich ergebenden Beanspruchungsgeometrien der Modell-Zerkleinerungsapparatur in der Ausführung als Rotor-Stator-System sind zusammenfassend in Bild 3.10 dargestellt. Die Rotorscherengeometrien sind durch eine geringe axiale Spaltweite von 0,2 mm gekennzeichnet. Sie unterscheiden sich in der radialen Spaltweite und in der Probekörpereinspannung. Im Gegensatz dazu weisen die Rotorreißergeometrien sowohl in radialer als auch in axialer Richtung deutlich größere Spaltweiten auf ($s \geq 10$ mm).

**Bild 3.10:** Beanspruchungsgeometrien der Modell-Zerkleinerungsapparatur, schematisch

1 - Rotorscheibe mit Rotormessern; 2 - axialer Statorteil (Statorwerkzeuge); 3 - radialer Statorteil (Distanzelemente); 4 - Probekörper; 5 - Bruchstück; 6 - Einspannung; s_A - axiale Spaltweite; s_R - radiale Spaltweite

Für die **zweirotorige Modell-Zerkleinerungsapparatur** (Rotor-Rotor-System) wurde analog zum Rotor-Stator-System eine einfache Beanspruchungsgeometrie, bestehend aus einer „aktiven“ Rotorscheibe (1) und zwei gegenüberliegenden Rotorscheiben (2), gewählt (Bild 3.11). Die Rotorscheiben beider Wellen überdecken sich und bilden zwei axiale Spalte mit einer Spaltweite von 0,3 mm. Der plattenförmige oder voluminöse Probekörper wird über eine in Neigung und Position variable Aufgabeschurre (6) zugeführt. Eine Möglichkeit der Probekörpereinspannung vergleichbar mit der einrotorigen Apparatur besteht nicht. Daher konnten typische Beanspruchungsgeometrien der zweirotorigen Rotorreißer nicht nachgebildet werden.

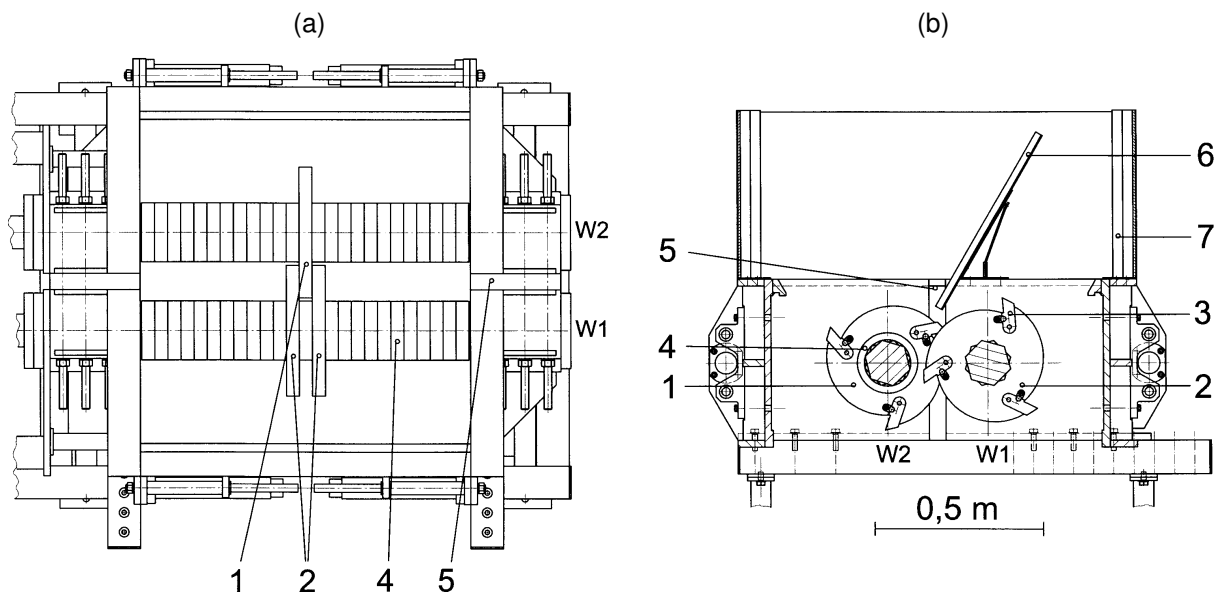


Bild 3.11: Aufbau der zweirotorigen Modell-Zerkleinerungsapparatur;
(a) Draufsicht (ohne Aufgabeschurre und Schutzgehäuse); (b) Seitenansicht

1 - Rotorscheibe; 2 - Gegenscheiben (Standardrotorscheiben); 3 - auswechselbares Rotormesser; 4 - Distanzring;
5 - Distanzelement des Gehäuses; 6 - Aufgabeschurre; 7 - Schutzgehäuse; W1 - Welle 1; W2 - Welle 2

Um die Unterschiede der Einzugs- und Zerkleinerungsvorgänge in ein- und zweirotorigen Rotor-scheren besser erkennen zu können, wurden zwei verschiedene Ausbildungsformen der Gegen-scheiben verwendet:

a) Runde Gegenscheiben ohne Rotormesser

Für diese Versuche wurde die Rotorwelle 1 mit zwei kreisrunden Gegenscheiben (Durchmesser 310 mm) ohne Rotormesser ausgestattet, wodurch sich der Anschluß an die Untersuchungen mit dem Rotor-Stator-System ergab. Durch eine schrittweise Erhöhung der Rotorumfangsgeschwindigkeit der Gegenscheiben konnte der Übergang vom Rotor-Stator-zum Rotor-Rotor-System untersucht werden. Von besonderem Interesse war der Einfluß der mitrotierenden Gegenscheiben auf den Einzugs- und Zerkleinerungsvorgang an den Rotorscheibenkanten.

b) Gegenscheiben mit Rotormessern (Standardrotorscheiben)

Zweirotorige Rotorscheren sind im allgemeinen durch einen einheitlichen Aufbau beider Rotorwellen gekennzeichnet. Daher wurde im zweiten Versuchskomplex auch die Rotorwelle 1 mit Standardrotorscheiben bestückt. Aufbauend auf den Untersuchungen an der einrotorigen Modell-Zerkleinerungsapparatur konnte der Einfluß der Überdeckung der Rotorscheiben und der Relativgeschwindigkeit zwischen beiden Rotorwellen aufgeklärt werden.

Die sich am Rotor-Rotor-System ergebenden geometrischen Verhältnisse können analog zum Rotor-Stator-System mit den in Bild 3.12 zusammengestellten Größen beschrieben werden. Von wesentlicher Bedeutung für die sich einstellenden Einzugs- und Messereingriffswinkel ist die Überdeckung der Rotorscheiben. Sie ändert sich mit dem Wellenabstand, der durch das Einfügen bzw. das Entfernen von Distanzelementen des Gehäuses (Bild 3.11 (5)) eingestellt werden kann. Aufgrund der nicht kreisrunden Kontur der Rotorscheiben sind im Gegensatz zu den Kreismesserschere (s. Bild 2.19) die Überdeckung und die durch sie beeinflussten Einzugs- und Messereingriffswinkel nicht konstant, sondern schwanken je nach Rotorscheibenstellung zwischen einem Minimal- und einem Maximalwert. Im folgenden wird daher für die Kennzeichnung des Überdeckungszustandes der Rotorscheiben die Überdeckung der Messerkreise genutzt. Die sich in Abhängigkeit von den untersuchten Wellenabständen ergebenden Kenngrößen sind in Anlage 6/2 zusammengestellt.

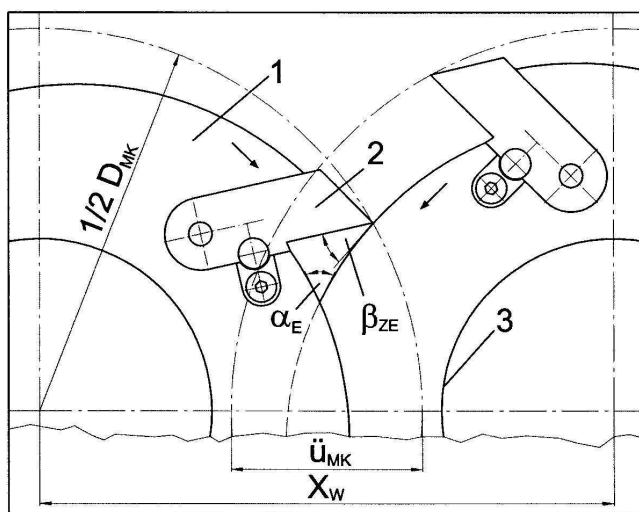


Bild 3.12: Parameter zur Beschreibung der geometrischen Verhältnisse am Rotor-Rotor-System

1 - Rotorscheibe; 2 - Rotormesser; 3 - Distanzring;
 D_{MK} - Messerkreisdurchmesser (400 mm); $\ddot{u}_{MK}$ - Überdeckung der Messerkreise; X_W - Wellenabstand;
 α_E - Einzugswinkel der Rotorscheiben; β_{ZE} - Messereingriffswinkel

Die **Versuche** an beiden Apparaturen wurden sowohl mit plattenförmigen als auch mit hohlraumhaltigen Probekörpern durchgeführt. Die Aufgabe der Probekörper erfolgte einzeln. Um für alle Versuche einheitliche Versuchsbedingungen zu gewährleisten, betrachtete man am Rotor-Stator-System nur den ersten Zerkleinerungsvorgang, d. h. die Zerkleinerung durch das erste Rotormesser. Dadurch war es möglich, das entstandene Bruchstück dem gemessenen Leistungs-Zeit-Verlauf zuzuordnen. Dagegen bewirkten die günstigeren Einzugsverhältnisse am Rotor-Rotor-System, daß die Probekörper vollständig eingezogen und zerkleinert wurden. Dabei entstanden mehrere Bruchstücke, die sich jedoch aufgrund der begrenzten Anzahl auch einzelnen Abschnitten des Leistungs-Zeit-Verlaufes zuordnen ließen. Zur Charakterisierung der unter den gegebenen Versuchsbedingungen ablaufenden Zerkleinerungsvorgänge wurden stets mehrere gleichartige Versuche durchgeführt.

Aufgrund des flexiblen Aufbaus beider Versuchseinrichtungen konzentrierten sich die Untersuchungen einerseits auf die Aufklärung der Mikroprozesse bei der Zerkleinerung in Rotorschere und -reißen und andererseits verstärkt auf die Ermittlung des Einflusses stoffbedingter, betriebsbedingter und konstruktiver Parameter auf das Zerkleinerungsprodukt und den spezifischen Energiebedarf. Der gesamte Versuchsplan ist in Anlage 6 ersichtlich.

Die **Auswertung** der Versuche erfolgte hinsichtlich der Bruchfläche und der Verformung der Bruchstücke (s. Kap. 3.5) sowie des Verlaufes der Leistungs-Zeit-Kurve und der Beanspru-

chungsenergie. Als wichtigste Kenngröße zur Beurteilung der Zerkleinerungsvorgänge diene die bruchflächenbezogene Beanspruchungsenergie $w_{B,A}$ (s. Gl. (3.10)).

3.4.2 Kleintechnische Rotorscheren und Rotorreißer

Für die kleintechnischen Untersuchungen wurde der Zerkleinerungsraum der Vorzerkleinerungsmaschine jeweils so umgestaltet, daß diese als ein- oder zweirotorige Rotorschere bzw. -reißer betrieben werden konnte. Die realisierten Rotor- und Statoranordnungen basieren auf den Erkenntnissen aus den Versuchen mit beiden Modell-Zerkleinerungsapparaturen.

Der Rotor der **einrotorigen Rotorschere** besteht aus abwechselnd angeordneten Rotorscheiben (1, 2) mit verschiedenen Durchmessern (Bild 3.13). Die mit drei Messern bestückten Rotorscheiben sind um jeweils 30° versetzt auf dem Rotor befestigt, um einen zeitlich abgestuften Eingriff der einzelnen Rotormesser zu erreichen und dadurch die Belastung für die Maschine möglichst gering zu halten. Insgesamt ergibt sich eine Rotorbreite von 360 mm. Die Statorplatte (3) weist eine Neigung von 45° auf und ist gegenüber dem Rotor so angeordnet, daß die gedachte Verlängerung der Statoroberkante auf dem Rotormittelpunkt gerichtet ist. Dadurch ergibt sich ein geringer Messereingriffswinkel β_{ZE} von 17° . Durch die an den Rotor angepaßte U-förmige Kontur der Statorkanten wird eine axiale und radiale Spaltweite von 0,1 bis 0,2 mm erzielt. Die Schneidkantenradien der Rotor- und Statorelemente entsprechen dem Fertigungszustand und betragen ca. 0,2 mm (Anlage 7/2). Die Aufgabe der Probekörper geschieht über eine Aufgabeschurre. Während plattenförmige Versuchsmaterialien über eine manuelle Zuführeinrichtung aufgegeben werden, um das Verdrehen des Probekörpers zu verhindern sowie schmalere Probekörper gezielt der gewünschten Anzahl von Rotorscheiben zuführen zu können, müssen voluminöse Probekörper (Rohre, Profile) in einem Aufgabeschacht durch Leitbleche geführt werden.

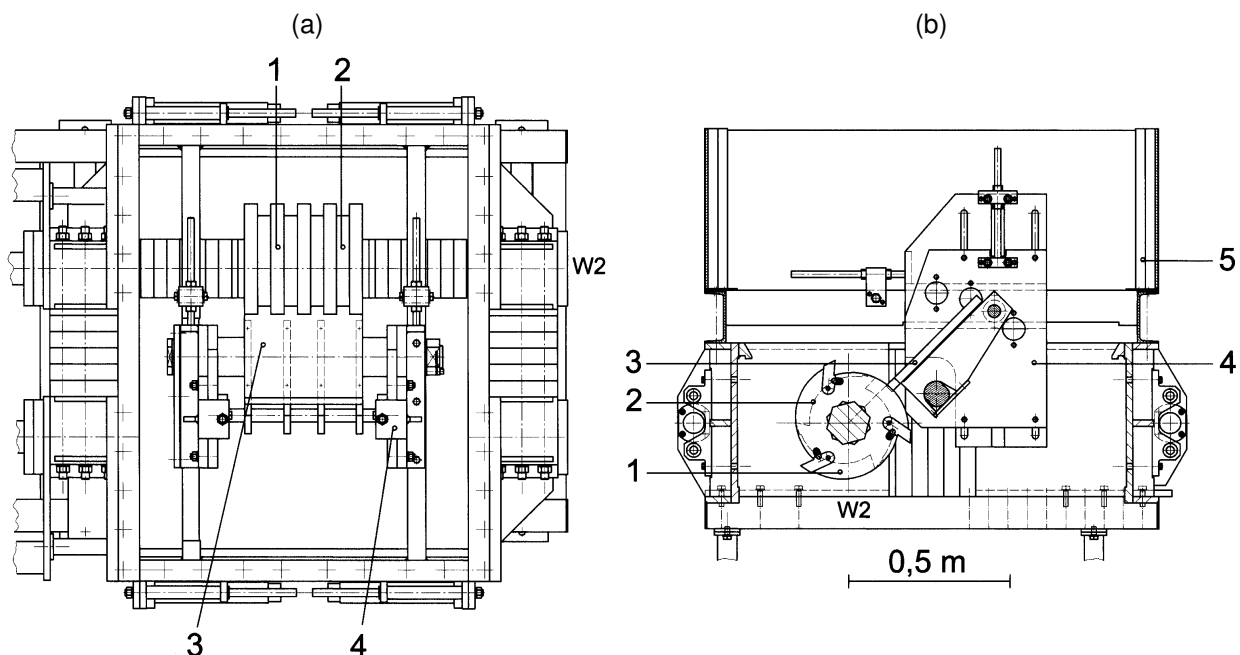


Bild 3.13: Aufbau der einrotorigen Rotorschere;
(a) Draufsicht (ohne Schutzgehäuse); (b) Seitenansicht

1 - Rotorscheibe ($D_{MK} = 400$ mm); 2 - Rotorscheibe ($D_{MK} = 328$ mm); 3 - Statorplatte und Aufgabeschurre;
4 - Statorgrundträger; 5 - Schutzgehäuse; W2 - Welle 2

Der **einrotorige Rotorreißer** weist gegenüber der einrotorigen Rotorschere sowohl in axialer als auch in radialer Richtung größere Spaltweiten auf (Bild 3.14). Im Gegensatz zur einrotorigen Rotorschere sind die Zwischenräume zwischen den Rotorscheiben (1) mit Distanzringen (2) aufgefüllt. Auch der Stator setzt sich aus alternierend angebrachten Distanzelementen und Statorwerkzeugen (3) zusammen. Letztere sind um 60° geneigt und greifen in die Zwischenräume des Rotors ein, so daß eine axiale Spaltweite von 10,5 mm und eine radiale Spaltweite von 18 mm entstehen. Dadurch ergibt sich ein Messereingriffswinkel von 61° . Die Rotorbreite beträgt wie bei der einrotorigen Rotorschere 360 mm. Die Aufgabe der Probekörper erfolgt über eine Aufgabeschurre (5), wobei das Aufgabematerial durch Leitbleche geführt wird.

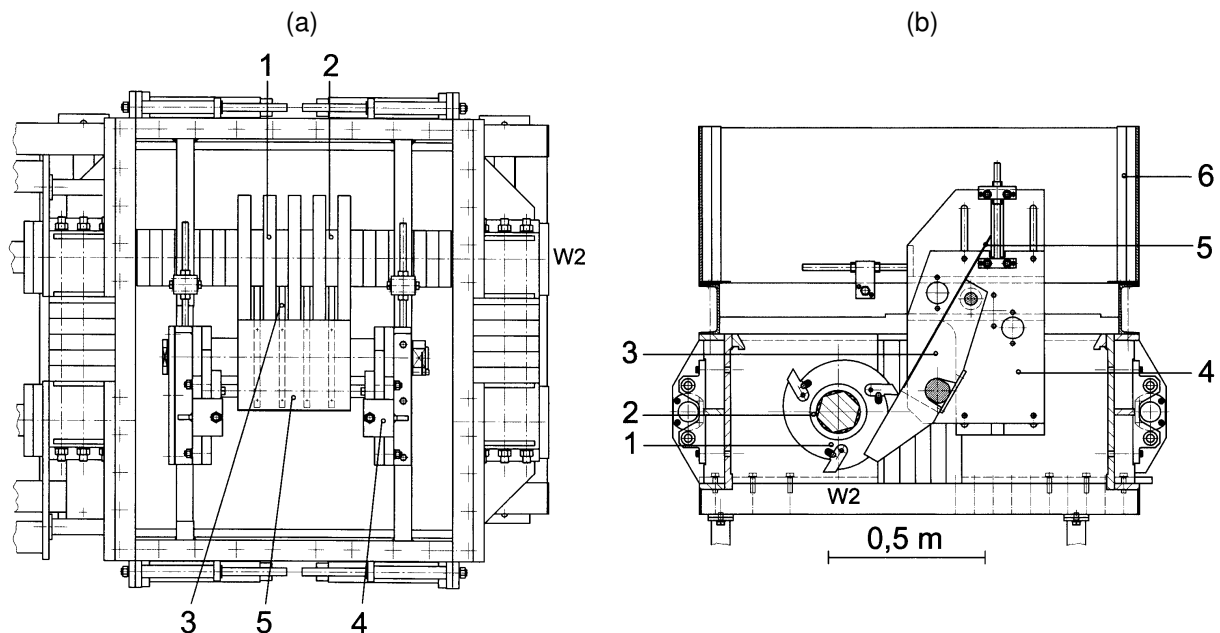


Bild 3.14: Aufbau des einrotorigen Rotorreißers;
(a) Draufsicht (ohne Schutzgehäuse); (b) Seitenansicht

1 - Rotorscheibe; 2 - Distanzring; 3 - Statorwerkzeug; 4 - Statorgrundträger; 5 - Aufgabeschurre; 6 - Schutzgehäuse;
W2 - Welle 2

Für die Umgestaltung zur **zweirotorigen Rotorschere** und zum **zweirotorigen Rotorreißer** wurde der Zerkleinerungsraum der Vorzerkleinerungsmaschine zweigeteilt (Bild 3.15), so daß sich eine Rotorreißeranordnung (RR) und eine Rotorscherenanordnung (RS) ergibt. Beide Rotorabschnitte sind durch eine Trennwand voneinander abgeteilt und weisen eine Breite von 500 mm auf. Der Aufbau der Rotorschere basiert auf der zweirotorigen Modell-Zerkleinerungsapparatur, besteht aber aus insgesamt sechs Rotorscheibenpaaren. Die axiale Spaltweite beträgt durchschnittlich 0,19 mm (Anlage 7/1). Über das Hinzufügen oder Entfernen der Distanzelemente des Gehäuses wird der radiale Abstand der Wellen verändert. Analog zu großtechnischen Rotorreißern wurden für die Rotorreißeranordnung die Rotorscheiben mit spitz zulaufenden Reißwerkzeugen versehen, bei denen die Spitze nur 5 mm breit ist (s. Tabelle 3.3c). Die axialen Abstände zwischen den Rotorscheiben betragen 20 mm. Mit Hilfe der Abstreifer (4) können die zwischen den Rotorscheiben verklemmten Bruchstücke entfernt werden. Die Abstandsverhältnisse zwischen den Abstreiferelementen und den Rotorscheiben belaufen sich in axialer und radialer Richtung auf mehrere Millimeter.

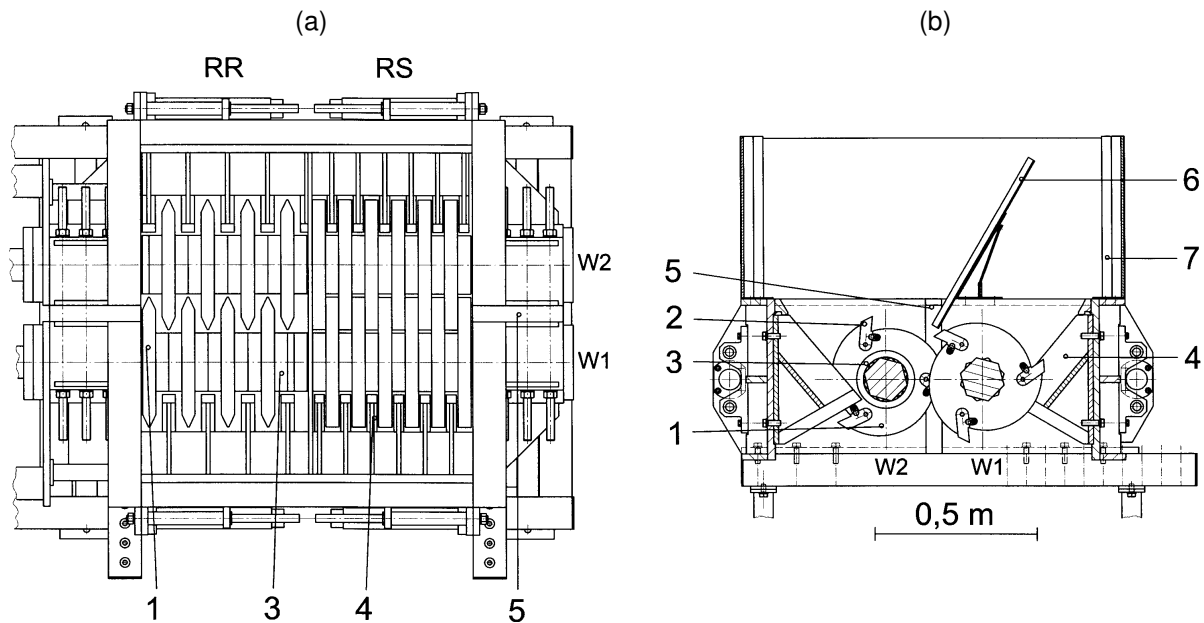


Bild 3.15: Aufbau der zweirotorigen Rotorschere (RS) und des zweirotorigen Rotorreißers (RR); (a) Draufsicht (ohne Aufgabeschurre und Schutzgehäuse); (b) Seitenansicht der Rotorschere

1 - Rotorscheibe; 2 - auswechselbares Rotormesser; 3 - Distanzring; 4 - Abstreifer; 5 - Distanzelement; 6 - Aufgabeschurre; 7 - Schutzgehäuse; W1 - Welle 1; W2 - Welle 2

Die mit den kleintechnischen Zerkleinerungsmaschinen durchgeführten **Versuche** orientierten sich anfangs an den Versuchen mit beiden Modell-Zerkleinerungsapparaturen und näherten sich im Verlaufe des Versuchsprogrammes schrittweise den kleintechnischen Verhältnissen an. Das gesamte Versuchsprogramm gliedert sich wie folgt (Anlage 7):

a) Untersuchung der Zerkleinerungsvorgänge und der sie beeinflussenden Faktoren

Um den Anschluß an die Ergebnisse beider Modellapparaturen zu erzielen, wurden zunächst kleinere plattenförmige Einzelstücke zerkleinert. Die Breite der Probekörper wurde anfangs so gewählt, daß nur wenige Rotorscheiben an der Zerkleinerung beteiligt waren. Mit der stufenweisen Annäherung der Probekörperbreite an die Rotorbreite erfolgte der Übergang zur kleintechnischen Zerkleinerung. Als wichtige Einflußgrößen waren die Abmessungen der Probekörper, der Wellenabstand bzw. die Überdeckung sowie die Relativgeschwindigkeit von Interesse.

b) Aufklärung der Einzugsvorgänge

Die Aufklärung der Einzugsvorgänge bei voluminösen Aufgabegütern war aufgrund der vereinfachten Beanspruchungsgeometrie an den Modell-Zerkleinerungsapparaturen nur eingeschränkt möglich. Daher wurden mit der ein- und zweirotorigen Rotorschere zusätzliche Versuche mit Aluminium- und Polypropylen-Rohren unterschiedlichen Durchmessers und verschiedener Wanddicke durchgeführt.

c) Zerkleinerung von Materialschüttungen

Das Versuchsprogramm umfaßte orientierende Versuche mit realitätsnahen, homogenen Materialschüttungen. Dafür wurden typische Abfallkomponenten, wie z. B. Bierbüchsen, Holz, Reifen und Tetrapaks, getrennt von anderen Materialien mit der zweirotorigen Rotorschere und dem Rotorreißer zerkleinert. Das Ziel der Versuche bestand darin, einen Vergleich zur großtechnischen Zerkleinerung zu ermöglichen.

Die **Auswertung** der Versuche umfaßte die Charakterisierung des Zerkleinerungsproduktes hinsichtlich Stückgröße und Stückverformung (s. Kap. 3.5), die Berechnung der Beanspruchungsenergie aus den aufgezeichneten Meßdaten sowie die Kennzeichnung des Einzugsverhaltens. Von dem Zerkleinerungsprodukt der plattenförmigen Probekörper und der Rohre wurde die Bruchfläche ermittelt, um die bruchflächenbezogene Beanspruchungsenergie berechnen zu können und somit den Anschluß an die Ergebnisse der Einzelstückzerkleinerung herzustellen. Das Einzugsverhalten läßt sich sowohl über die Einzugs geschwindigkeit eines Probekörpers als auch über den spezifischen Durchsatz beschreiben. Die Einzugs geschwindigkeit v_E eines plattenförmigen Probekörpers wurde mittels Videoaufnahmen ermittelt. Sie ergibt sich aus der Zeit, die der Probekörper benötigt um einen definierten Wegabschnitt zurückzulegen:

$$v_E = \frac{x_C}{t_E} \quad (3.6)$$

x_C - charakteristischer Wegabschnitt (z. B. Probekörperlänge); t_E - Einzugszeit

In Verbindung mit der Probekörpermasse und der genutzten Rotorbreite kann weiterhin der spezifische Durchsatz berechnet werden (Gl. (3.7)), der einen Vergleich zum Einzugsverhalten von voluminösen Gütern bzw. Materialschüttungen erlaubt.

$$\dot{m}_{\text{spez.}} = \frac{m_{PK}}{t_E b_R} \quad (3.7)$$

m_{PK} - Probekörpermasse; t_E - Einzugszeit; b_R - Rotorbreite

3.5 Methodik zur Charakterisierung des Zerkleinerungsergebnisses

Für die Charakterisierung des Zerkleinerungsergebnisses müssen sowohl die für die Zerkleinerung aufzuwendenden Kräfte und Energien als auch das Zerkleinerungsprodukt hinsichtlich Stückgröße und Bruchstückverformung bewertet werden. Aufgrund der z. T. extremen Formunterschiede dieser Bruchstücke können die für die Charakterisierung mineralischer Stoffe eingeführten Methoden nur eingeschränkt angewendet werden. Daher stützt sich die Kennzeichnung der Zerkleinerungsprodukte der Rotorscheren und -reißer insbesondere auf jene Methoden, die sich bei ähnlichen Zerkleinerungsprodukten bewährt haben ([6] [62] bis [64] [97]). Im folgenden sollen die im Rahmen dieser Arbeit geeigneten Kenngrößen und Methoden vorgestellt werden.

3.5.1 Kennzeichnung des Kraft- und Energieaufwandes für die Zerkleinerung

Querschnittbezogene Beanspruchungskraft und -energie

Für den Vergleich der bei der Schneid-, Scher-, Zug- und Biegebeanspruchung (Biegeumformung) wirkenden Kräfte und des Energiebedarfs eignen sich die auf den Ausgangsquerschnitt der Proben A_Q bezogenen Größen (Gl. (3.8) und (3.9)).

$$f_{B,\max} = \frac{F_{B,\max}}{A_Q} \quad (3.8)$$

$$w_{B,Q} = \frac{W_B}{A_Q} \quad (3.9)$$

Index B - Beanspruchungsart

(Schneid- (SN), Scher- (S) oder Zugbeanspruchung (Z) sowie Biegeumformung (BU))

Die querschnittbezogenen Größen werden nur für die Auswertung der Untersuchungen zu den Grundbeanspruchungsarten mittels Scher- und Reißvorrichtung, Biegevorrichtung, Schlagwerk und der Ergebnisse der Zugversuche genutzt. Aus der maximalen querschnittbezogenen Beanspruchungskraft des Zugversuchs ergibt sich die Zugfestigkeit R_m . Analog dazu läßt sich im Scherversuch die Scherfestigkeit k_s ermitteln.

Bruchflächenbezogene Beanspruchungsenergie

Mit Kenntnis der Bruchfläche A_B kann die bruchflächenbezogene Beanspruchungsenergie berechnet werden (Gl. (3.10)). Sie gilt als Maß für die Energieausnutzung des Zerkleinerungsvorganges und erlaubt den Vergleich verschiedener Zerkleinerungsmaschinen bzw. Zerkleinerungsprozesse.

$$w_{B,A} = \frac{W_B}{A_B} \quad (3.10)$$

Die Bruchfläche setzt sich aus den Flächenanteilen zusammen, die sich aus den Bruchstücken sowie den Rissen im Material ergeben. Dabei stellt die Bruchfläche A_B den Teil der neu erzeugten Oberfläche A_N dar, der aus einem der beiden Reißufer resultiert (Bild 3.16). Ihre Ermittlung erfolgte manuell, indem man abschnittsweise der Kontur des Reißufers folgte und die Länge und Breite des jeweiligen Abschnittes mittels Meßschieber und Lineal bestimmte (Gl. (3.11a)).

$$A_B = \sum_{i=1}^n l_{R,i} \cdot b_{R,i} \quad (3.11a)$$

$$A_B = w \sum_{i=1}^n l_{R,i} \quad (3.11b)$$

Bei Scher- und Schneidvorgängen läßt sich die Breite des Reißufers durch die Wanddicke w ersetzen (Gl. (3.11b)). In diesem Fall sind die auf die Bruchfläche und die Querschnittsfläche bezogenen Energiewerte identisch. Da aber in Rotorschern und Rotorreißern meist komplexe Beanspruchungsverhältnisse mit anteiliger Reiß- und Biegebeanspruchung (Biegebrechen) vorliegen, muß die Breite des Reißufers für jeden Abschnitt bestimmt werden. Bruch- und Querschnittsfläche weichen insbesondere bei dickwandigen Materialien deutlich voneinander ab. Eventuell vorhandene Abriebspuren auf der Oberfläche des Bruchstückes sowie die Ausgangsfläche des Probekörpers werden nicht zur Bruchfläche gezählt.

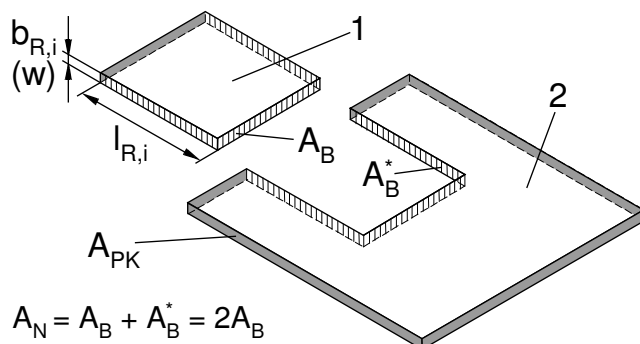


Bild 3.16: Definition der Bruchfläche am Beispiel eines mit der einrotorigen Modell-Zerkleinerungsapparatur zerkleinerten Probekörpers, schematisch

1 - Bruchstück; 2 - Probekörperrest;
 A_B - Bruchfläche; A_B^* - spiegelbildliche Bruchfläche;
 A_N - neu gebildete Oberfläche; A_{PK} - Ausgangsfläche des Probekörpers;
 $b_{R,i}$ u. $l_{R,i}$ - Breite bzw. Länge eines Reißufersegments; w - Wanddicke

Die bruchflächenbezogene Beanspruchungsenergie wird für die Auswertung der Untersuchungen zur Einzelstückzerkleinerung mittels Schlagwerk und den Modell-Zerkleinerungsapparaturen sowie bei der kleintechnischen Zerkleinerung genutzt.

Massebezogene Beanspruchungsenergie

Um den Anschluß an die großtechnischen Zerkleinerungsmaschinen herzustellen, wird bei den kleintechnischen Zerkleinerungsversuchen zusätzlich die massebezogene Beanspruchungsenergie ermittelt. Sie berechnet sich durch den Bezug auf die Aufgabemasse des Probematerials m_A gemäß Gl. (3.12).

$$w_{B,m} = \frac{W_B}{m_A} \quad (3.12)$$

3.5.2 Kennzeichnung des ZerkleinerungsproduktesStückgröße

Für die Kennzeichnung der relativ großen und verformten Bruchstücke der Rotorscheren und Rotorreißer eignet sich die Methode des einhüllenden Parallelepipeds (Bild 3.17). Das Bruchstück wird dabei gedanklich von einem Quader mit kleinstmöglichem Volumen umgeben. Die Hauptabmessungen des Quaders kennzeichnen die Größe des Stückes, wobei $a > b > c$ gilt. Im Rahmen dieser Arbeit werden die Hauptabmessungen a und b als Stückgrößenkennwerte für das verformte Bruchstück verwendet. Diese wurden für jedes Bruchstück mit Meßschieber und Lineal ermittelt. In Verbindung mit der Masse der einzelnen Bruchstücke konnten die Stückgrößenverteilungsfunktionen $Q_3(x)$ der Mengenart Masse berechnet werden.

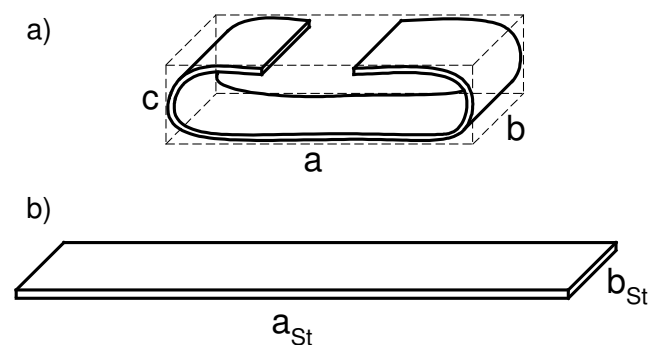


Bild 3.17: Kennzeichnung der Stückgröße eines verformten Bruchstücks (a) durch die Hauptabmessungen ($a > b > c$) des einhüllenden Parallelepipeds und eines gedanklich unverformten Bruchstückes (b) mittels der Stücklänge a_{St} und der Stückbreite b_{St}

Um auch die Abmessungen der Stücke im unverformten Zustand zu erfassen, wurden ebenfalls die Stücklänge a_{St} und Stückbreite b_{St} der gedanklich unverformten Bruchstücke ermittelt. Bei nur leicht gebogenen Bruchstücken konnten beide Größen mit einem flexiblen Stahllineal gemessen werden. Dagegen mußten stark verformte Bruchstücke für diesen Zweck aufgebogen werden. Durch die Darstellung beider Kenngrößen in Form von Stückgrößenverteilungsfunktionen ist der Vergleich mit den Verteilungen der Hauptabmessungen a und b möglich. Entsteht bei der Zerkleinerung ein unverformtes Bruchstück, so sind die Stückgrößenkennwerte a und a_{St} sowie b und b_{St} identisch.

Stückmasse

Mit der Bestimmung der Masse der Einzelstücke kann die Stückmassenverteilung $Q_3(m_{St})$ analog zu den Stückgrößenverteilungen berechnet werden. Die Stückmassenverteilung ist sinnvoll, da die Stückform keinen Einfluß auf die Verteilung ausübt. Zugleich dient die Stückmasse zur Berechnung der äquivalenten Bruchstückfläche und des Biegegrades.

Äquivalente Bruchstückfläche und äquivalente Stückgröße

Bei bekannter Materialdichte ρ_M und Wanddicke w eines Bruchstücks kann aus der Einzelstückmasse die äquivalente Bruchstückfläche $A_{\ddot{A}q}$ errechnet werden (Gl. (3.13)). Sie beschreibt die Größe des Bruchstückes durch eine der Stückmasse entsprechende Bruchstückfläche. Ausgehend von dieser läßt sich die Kantenlänge eines quadratischen Bruchstückes gleicher Wanddicke nach Gl. (3.14) berechnen, die als äquivalente Stückgröße $x_{\ddot{A}q}$ bezeichnet wird. Der Verformungszustand des Stückes sowie das Länge/Breite-Verhältnis bleiben unberücksichtigt.

$$A_{\ddot{A}q} = \frac{m_{St}}{\rho_M w} \quad (3.13)$$

$$x_{\ddot{A}q} = \sqrt{\frac{m_{St}}{\rho_M w}} \quad (3.14)$$

3.5.3 Kennzeichnung der BruchstückverformungBiegegrad

Als Maß für die Gesamtverformung eines Bruchstückes eignet sich der Biegegrad (Gl. (3.15)). Er kennzeichnet den vorhandenen Verformungszustand des Bruchstückes bezogen auf die maximal mögliche Umformung eines plattigen Stückes zu einer hohlraumfreien Kugel gleicher Masse [64] [108]. Für plattenförmige Stücke nimmt der Biegegrad den Wert 0 an und nähert sich mit zunehmender Verformung den Wert 1.

$$B = \frac{A_{\ddot{A}q} - A_{Pr}}{A_{\ddot{A}q} - A_K} \quad (3.15)$$

Dabei bedeuten (Bild 3.18):

- $A_{\ddot{A}q}$ die äquivalente Bruchstückfläche als Maß für die Projektionsfläche des Stückes im unverformten Zustand,
- A_{Pr} die tatsächliche Projektionsfläche des Bruchstücks, bei der die Hauptabmessungen a und b sichtbar sind, und
- A_K die Projektionsfläche einer der Masse des Bruchstückes entsprechenden hohlraumfreien Kugel.

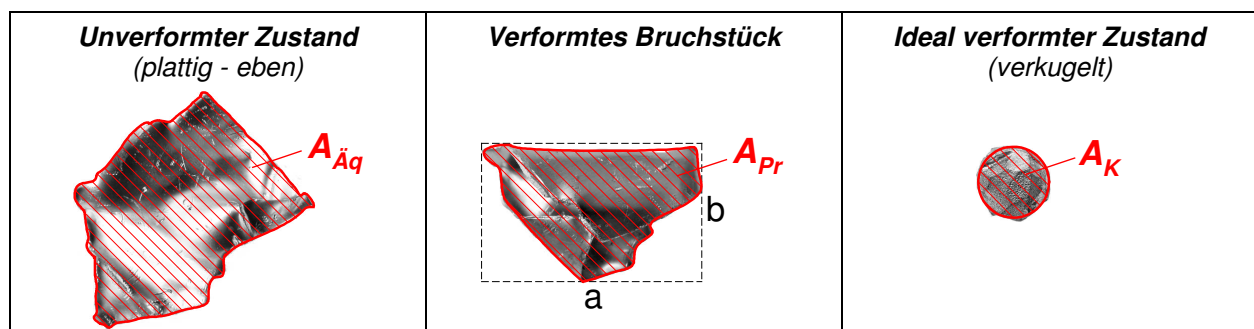


Bild 3.18: Zu ermittelnde Projektionsflächen für die Berechnung des Biegegrades, schematisch
 $A_{\ddot{A}q}$ - äquivalente Bruchstückfläche; A_{Pr} - Projektionsfläche des Bruchstückes, A_K - Projektionsfläche einer masse-
 gleichen Kugel; a , b - Hauptabmessungen des einhüllenden Parallelepeds

Die Projektionsfläche des Bruchstückes wurde mit Hilfe der digitalen Bildanalyse bestimmt [97]. Die äquivalente Bruchstückfläche und die Projektionsfläche der Kugel konnten ausgehend von der Masse, der Wanddicke und der Dichte des Bruchstückes berechnet werden (s. Gl. (3.13)).

Einteilung in Stückformklassen

Die Bruchstücke können entsprechend ihres Verformungszustandes in verschiedene Stückformklassen eingeteilt werden, die eine qualitative Beschreibung der Zerkleinerungsprodukte zulassen [6] [63] [64]. SANDER [64] zeigte am Beispiel eines schnelllaufenden Hammerreißers, daß ein enger Zusammenhang zwischen dem Biegegrad und der Stückformklasse besteht (Bild 3.19). Damit kann mittels des Biegegrades der Verformungszustand des Zerkleinerungsproduktes von Rotorscheren und Rotorreißern charakterisiert werden.

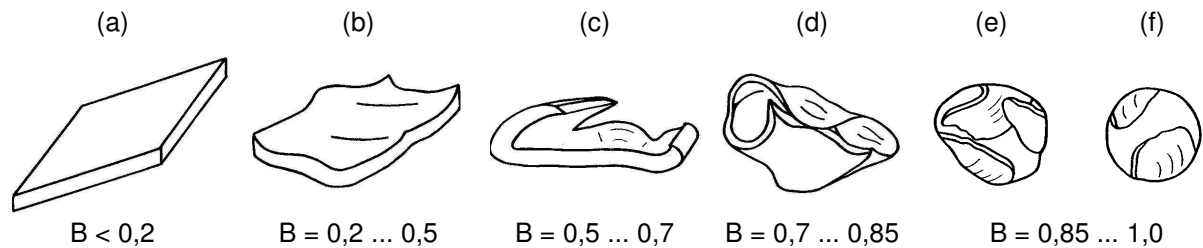


Bild 3.19: Einteilung der Bruchstücke in Stückformklassen in Abhängigkeit vom Biegegrad (nach [64])

(a) plattig - eben; (b) plattig - leicht gebogen; (c) plattig - stark gebogen; (d) stark gebogen, teilweise kompaktiert; (e) kompaktiert; (f) verkugelt; B - Biegegrad

3.6 Fehlerbetrachtung

Bedingt durch die mit den Versuchseinrichtungen variierenden Beanspruchungsverhältnisse werden die Versuchsergebnisse von unterschiedlich ausgeprägten zufälligen Fehlern beeinträchtigt.

Zur Charakterisierung der unter gegebenen Bedingungen ablaufenden Beanspruchungsvorgänge wurden in Abhängigkeit von der Versuchseinrichtung jeweils drei bis fünf gleichartige Versuche durchgeführt, die eine Abschätzung des zufälligen Fehlers für jede Kenngröße ermöglichen. Einen Überblick über die Bereiche des zufälligen Fehlers in den verschiedenen Versuchsabschnitten vermitteln die Tabellen 3.4 und 3.5 sowie Anlage 7/5 am Beispiel der Aluminium-Probekörper. Die Streuung der Kenngrößen bei den ebenfalls verwendeten Polypropylen-Probekörpern ist vergleichbar.

Zur Kennzeichnung der stattfindenden Beanspruchungsvorgänge dienen vor allem die bezogenen Beanspruchungsenergien, die insgesamt eine relativ geringe Streuung aufweisen (Variationskoeffizient i. allg. < 8%). Bei den kleintechnischen Zerkleinerungsmaschinen kommt es systembedingt zu größeren Schwankungen (Anlage 7/5). Da gleichzeitig eine Vielzahl von Zerkleinerungswerkzeugen an der Zerkleinerung beteiligt sind und sich mehrere Beanspruchungsvorgänge überlagern, entstehen wesentlich komplexere Versuchsbedingungen. Das wirkt sich insbesondere auf die Meßergebnisse der zweirotorigen Maschinen aus. Aufgrund des großen Materialbedarfs für die Herstellung der Probekörper und der aufwendigen Versuchsauswertung wurden jeweils nur drei gleichartige Versuche durchgeführt. Das hatte zur Folge, daß insbesondere bei den Versuchen mit dem zweirotorigen Rotorreißer nur wenige Bruchstücke entstanden und daher auch größere zufällige Fehler bei der Charakterisierung des Zerkleinerungsproduktes auftreten. Vor allem bei der Kennzeichnung der Bruchstückverformung durch den Biegegrad

wirken sich die z. T. extremen Form- und Größenunterschiede der wenigen Bruchstücke deutlich auf den zufälligen Fehler aus.

Tabelle 3.5: Abschätzung des zufälligen Fehlers der Versuche zur Analyse der Grundbeanspruchungsarten (Probekörper: AlMg3; Wanddicke 1 mm; jeweils 5 Versuche)

Kenngröße	Mittelwert	Standardabweichung	Variationskoeffizient
a) Schervorrichtung: Beanspruchungsgeschwindigkeit $3,3 \times 10^{-5}$ m/s (2 mm/min); Spaltweite 0,2 mm			
x_{Bruch}	0,78 mm	0,005 mm	0,6 %
$f_{S,\text{max}}$	152,5 N/mm ²	0,42 N/mm ²	0,3 %
$w_{S,Q}$	0,082 J/mm ²	0,0002 J/mm ²	0,2 %
b) Instrumentiertes Schlagwerk: Geometrie SW1; Beanspruchungsgeschwindigkeit 0,6 m/s; radiale Spaltweite 0,2 mm; Rotormesser RM1 (Keilwinkel 90 °)			
$w_{S,Q}$ (Instrumentierung)	0,119 J/mm ²	0,0057 J/mm ²	4,7 %
$f_{S,\text{max}}$ (Instrumentierung)	162,3 N/mm ²	5,28 N/mm ²	3,3 %
$w_{S,Q}$ (Drehsensor)	0,126 J/mm ²	0,0038 J/mm ²	3,0 %
$w_{S,Q}$ (Schleppzeiger)	0,125 J/mm ²	0,0020 J/mm ²	1,6 %
c) Instrumentiertes Schlagwerk: Geometrie SW1; Beanspruchungsgeschwindigkeit 5,5 m/s; radiale Spaltweite 0,2 mm; Rotormesser RM1 (Keilwinkel 90 °)			
$w_{B,A}$ (Drehsensor)	0,066 J/mm ²	0,0041 J/mm ²	6,2 %
$w_{B,A}$ (Schleppzeiger)	0,065 J/mm ²	0,0056 J/mm ²	8,6 %

Tabelle 3.6: Abschätzung des zufälligen Fehlers der Einzelstückzerkleinerung bei typischen Beanspruchungsgeometrien der Rotorscheren (Probekörper: AlMg3; Wanddicke 1 mm; jeweils 5 Versuche)

Kenngröße	Mittelwert	Standardabweichung	Variationskoeffizient
a) Instrumentiertes Schlagwerk: Geometrie SW2; Beanspruchungsgeschwindigkeit 2,5 m/s; axiale Spaltweite 0,3 mm; radiale Spaltweite 20 mm; Rotormesser RM3 (Keilwinkel 58 °)			
$w_{B,A}$ (Drehsensor)	0,338 J/mm ²	0,0124 J/mm ²	3,7 %
$w_{B,A}$ (Schleppzeiger)	0,336 J/mm ²	0,0164 J/mm ²	4,9 %
b) Einrotorige Modell-Zerkleinerungsapparatur: Geometrie RS3; Beanspruchungsgeschwindigkeit 0,4 m/s; axiale Spaltweite 0,2 mm; radiale Spaltweite > 10 mm; Messereingriffswinkel 17 °			
$w_{B,A}$	0,351 J/mm ²	0,0151 J/mm ²	4,3 %
M_{max}	789 Nm	43,7 Nm	5,5 %
t_B	0,064 s	0,0022 s	3,4 %
a	42,8 mm	0,65 mm	1,5 %
b	40,3 mm	0,29 mm	0,7 %
m_{St}	4,59 g	0,046 g	1,0 %
c) Zweiroorige Modell-Zerkleinerungsapparatur: Gegenscheiben mit Rotormessern; Beanspruchungsgeschwindigkeit 0,4 m/s (beide Wellen); axiale Spaltweite 0,3 mm; Wellenabstand 300 mm			
$w_{B,A}$	1,46 J/mm ²	0,092 J/mm ²	6,3 %
M_{max}	762 Nm	79,5 Nm	10,4 %
t_B	1,04 s	0,250 s	24,0 %

In den folgenden Kapiteln erfolgt die Darstellung der Ergebnisgrößen durch den arithmetischen Mittelwert. Für die Diskussion der gefundenen Tendenzen ist es aber weiterhin erforderlich, die Streuung der Ergebnisgrößen in die Diskussion einzubeziehen. Daher wird in den Diagrammen zusätzlich der Vertrauensbereich mit einer statistischen Sicherheit von $S = 95\%$ angegeben.

4 Analyse der Grundbeanspruchungsarten

4.1 Schneid- und Scherbeanspruchung

Bisherige Untersuchungen zur Schneid- und Scherbeanspruchung zeigen, daß zwischen beiden Beanspruchungsarten zahlreiche Parallelen bestehen (s. Kap. 2.2). Für beide wird i. allg. eine Beanspruchungsgeometrie gewählt, die eine gegenüber der Wanddicke des Zerkleinerungsgutes geringe Spaltweite zwischen den Messern aufweist. So können sich die für die Zerkleinerung erforderlichen Schub- und Zugspannungen frühzeitig ausbilden, ohne daß eine starke Biegebeanspruchung die Zerkleinerung beeinträchtigt. Wesentliches Unterscheidungsmerkmal zwischen der Schneid- und Scherbeanspruchung ist der Keilwinkel des Messers, der maßgeblich den jeweiligen Anteil der Schub- und Zugspannungen bei der Zerkleinerung beeinflusst.

Für die Analyse der Beanspruchungsarten dienten im quasistatischen Geschwindigkeitsbereich die Scher- und Reißvorrichtung (s. Bild 3.2b) und bei dynamischer Beanspruchung bis 5,5 m/s das instrumentierte Schlagwerk (s. Bild 3.3). Beide Vorrichtungen unterscheiden sich in ihrer Beanspruchungsgeometrie (Bild 4.1). Am Schlagwerk (a) wird ein einseitig eingespannter Probekörper zwischen einem Stator- und einem Rotormesser beansprucht (einseitige Beanspruchung), wobei die variable Rotormessergeometrie die Analyse der Schneid- und Scherbeanspruchung zuläßt. Diese Beanspruchungsgeometrie ist typisch für Rotorschneider und Radialspalt-Rotorscheren.

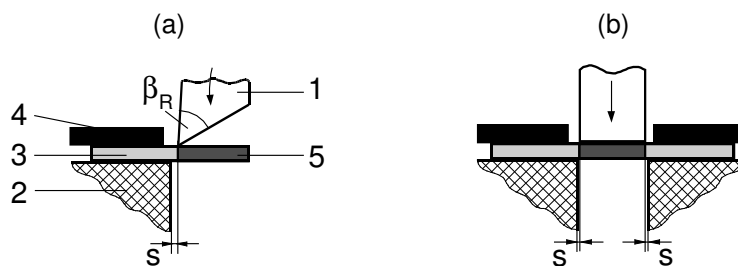


Bild 4.1: Schematische Darstellung der Beanspruchungsverhältnisse bei den Schneid- und Scherversuchen am instrumentierten Schlagwerk (a) und der Scher- und Reißvorrichtung (b)

1 - Rotor- bzw. Stempelmesser; 2 - Statormesser; 3 - Probekörper; 4 - Einspannung; 5 - Bruchstück;
s - Spaltweite (0,2 mm); β_R - Keilwinkel; Darstellung der Geometrie des Schlagwerks um 90° nach rechts gedreht

Dagegen erfolgt bei der Schervorrichtung die Beanspruchung des eingespannten Probekörpers zwischen einem Stempelmesser mit zwei Scherkanten (Keilwinkel 90°) und zwei Statormessern (zweiseitige Beanspruchung). Die Scherbeanspruchung in zwei parallelen Spalten identischer Spaltweite ist mit dem „Scheren bei geschlossener Schnittlinie“ in der Fertigungstechnik vergleichbar und entspricht der Scherbeanspruchung in den Axialspalt-Rotorscheren. Die Untersuchungen mit beiden Versuchseinrichtungen beschränkten sich auf das parallelkantige Schneiden bzw. Scheren zwischen Langmessern (s. Tabelle 2.2).

Die **Schneidbeanspruchung von AlMg3** (Bild 4.2a) beginnt mit der Ausbildung einer schmalen Verformungszone (A) bei Eingriff des Rotormessers. Kennzeichnend für die Schneidbeanspruchung ist, daß aufgrund der Keilform des Messers die Kraft linienförmig in das Material eingeleitet wird und sich infolgedessen eine hohe lokale Spannungskonzentration an der Schneidkante aufbauen kann. Sobald die lokale Spannung die Fließgrenze erreicht, beginnt das Material in unmittelbarer Umgebung der Schneide zu fließen. Auf der Bruchfläche ist dieser

Vorgang an einer ausgeprägten Anschnittzone (B) zu erkennen. Gleichzeitig bewirkt die Keilform des Messers im Verlaufe des Schneidvorgangs eine leichte Biegung (Abkippen) des überstehenden Abschnitts. Aufgrund des vergleichsweise großen Keilwinkels von 58° kommt es zusätzlich zum Abgleiten des leicht gebogenen Abschnitts über den gesamten Restquerschnitt. Deshalb kann sich ausgehend vom Statormesser eine zweite, kleinere Anschnittzone (D) ausbilden. Der im Vergleich zu früheren Untersuchungen [19] [109] [110] größere Schneidkantenradius von 0,1 mm unterstützt die Gleitbewegung. Die weitere Beanspruchung führt zu einem duktilen Restbruch, wenn die Spannungen im Restquerschnitt die Bruchfestigkeit des Materials übersteigen. Eine nähere Betrachtung der Bruchzone zeigt die für den Duktilbruch typische wabenförmige Struktur. Auf der Bruchfläche des eingespannten Probekörperrestes dehnt sich die Anschnittzone über ca. 80-90% der Wanddicke aus. Den restlichen Anteil bildet die Bruchzone.

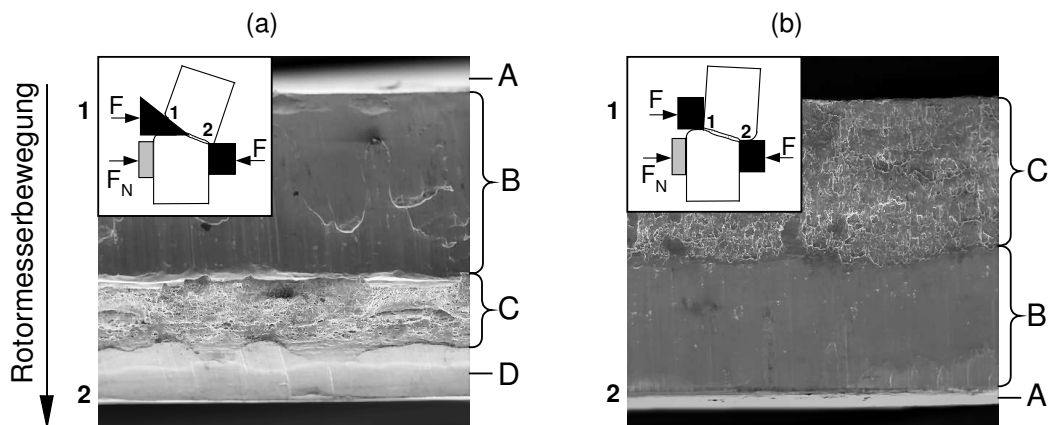


Bild 4.2: Bruchflächen zerkleinerter Probekörper aus Aluminium AlMg3 (Wanddicke 1 mm) durch Schneid- (a) und Scherbeanspruchung (b)

A - Verformungszone; B - Anschnittzone; C - Bruchzone; D - Zweite Anschnittzone ausgehend vom Statormesser; Schlagwerk: Geometrie SW1; Rotormesser RM3 (a) und RM1 (b); radiale Spaltweite 0,2 mm; Beanspruchungsgeschwindigkeit 5,5 m/s

Auch bei der **Scherbeanspruchung von AlMg3** (Bild 4.2b) bildet sich zunächst nach einer elastischen Verformung eine kleine Verformungszone aus (A), die jedoch beim Bruchstück nicht vom Rotormesser stammt, sondern am Statormesser gebildet wird. Durch die rechtwinkligen Messer wird die äußere Kraft großflächig in das Material eingeleitet, wodurch mit fortschreitender Beanspruchung die entstehenden Schubspannungen Gleitvorgänge über den gesamten Materialquerschnitt hervorrufen. Sowohl auf der dem Rotor- als auch der dem Statormesser zugewandten Bruchfläche bildet sich jeweils eine glatte Anschnittzone (B) aus (s. Bild 2.10b). Die im Restquerschnitt ansteigenden Zugspannungen führen schließlich zur Erschöpfung des Formänderungsvermögens und zur Bildung erster Risse, die den Bruch einleiten. Die Restbruchfläche ist durch mikroskopische Waben gekennzeichnet, die in Scherrichtung ausgerichtet sind.

Die **Schneid- und Scherbeanspruchung von Polypropylen** ist mit den bei AlMg3 geschilderten Abläufen vergleichbar. Jedoch sind die viskoelastischen Eigenschaften der Grund dafür, daß sich der Zerkleinerungsvorgang in Abhängigkeit von Geschwindigkeit und Temperatur ändert. Bei einer hohen Beanspruchungsgeschwindigkeit von 5,5 m/s vollzieht sich die Schneidbeanspruchung in zwei Hauptabschnitten (Bild 4.3a). Zunächst wird in einer elastisch-plastischen Anschnittphase das Material unter starker plastische Verformung in der Nähe der Schneide getrennt. Die plastische Verformung hat eine glatte Oberfläche zur Folge (A/B). In einem

zweiten Abschnitt erfolgt der Restbruch (C) durch die Spaltwirkung des Messers. Die Bruchfläche weist eine raue Oberfläche mit scharfkantigen, schuppenförmigen Materialelementen auf, die im Gegensatz zum AlMg3 auf einen spröden Spaltbruch zurückzuführen ist.

Die Scherbeanspruchung hinterläßt auch bei hohen Geschwindigkeiten auf der Bruchfläche wachsartige, verschmierte Strukturen (Bild 4.3b). Obwohl ähnlich dem Restbruch bei der Schneidbeanspruchung größere, schuppenartige Strukturen erkennbar sind, die auf ein eher sprödes Stoffverhalten schließen lassen, treten plastische Verformungen in einer dünnen Schicht auf der Oberfläche auf. Diese können auf eine örtlich begrenzte Wärmetönung beim Gleiten zurückgeführt werden. Daher spricht BAUER [19] von einem schlagartigen Gleitbruch.

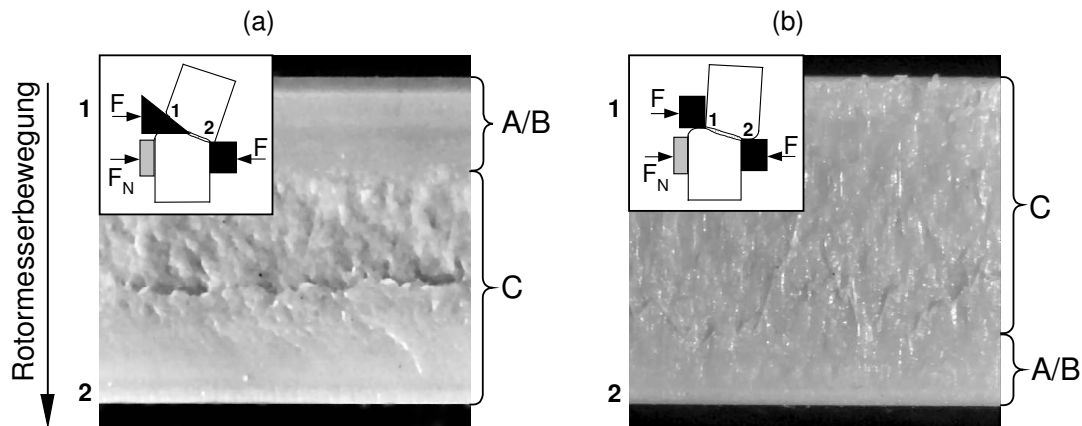


Bild 4.3: Bruchflächen zerkleinerter Probekörper aus Polypropylen (Wanddicke 5 mm) durch Schneid- (a) und Scherbeanspruchung (b)

A - Verformungszone; B - Anschnittzone; C - Bruchzone; Schlagwerk: Geometrie SW1; Rotormesser RM2 (a) und RM1 (b); radiale Spaltweite 0,2 mm; Beanspruchungsgeschwindigkeit 5,5 m/s

Einen **Vergleich zwischen der Schneid- und der Scherbeanspruchung** hinsichtlich der maximalen Schneid- bzw. Scherkräfte und der für die Beanspruchung aufzuwendenden Energie zeigt Bild 4.4. Bei Betrachtung der an den Messern wirkenden maximalen Kräfte wird deutlich, daß für die Schneidbeanspruchung aufgrund der höheren Spannungskonzentration deutlich niedrigere Kräfte erforderlich sind als bei der Scherbeanspruchung. Die maximale Scherkraft beim zwei-

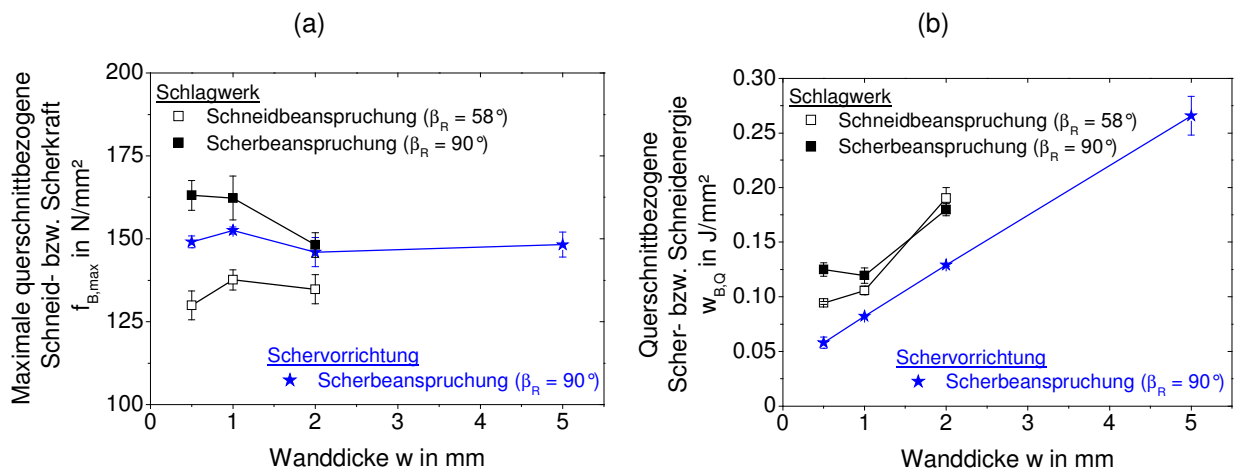


Bild 4.4: Vergleich der bei der Schneid- und Scherbeanspruchung von AlMg3 wirkenden maximalen Kräfte (a) und des erforderlichen Energiebedarfs (b)

Schlagwerk: Geometrie SW1; Rotormesser RM1 und RM3; radiale Spaltweite 0,2 mm; Beanspruchungsgeschwindigkeit 5,5 m/s; Schervorrichtung: Spaltweite 0,2 mm; Beanspruchungsgeschwindigkeit 2 mm/min

seitigen Scheren ist im untersuchten Bereich unabhängig von der Wanddicke des Zerkleinerungsgutes. Die höheren Scherkräfte bei der Zerkleinerung dünnwandiger Probekörper mit dem Schlagwerk sind auf das leichte Abkippen der Probekörper infolge der nur einseitigen Einspannung zurückzuführen. Dadurch unterliegt das Material einer stärkeren Zugbeanspruchung. Hinsichtlich des Energiebedarfs sind keine signifikanten Unterschiede zwischen Schneid- und Scherbeanspruchung erkennbar. Der etwas geringere Energiebedarf bei der Zerkleinerung mit der Schervorrichtung ist einerseits auf die zweiseitige Einspannung des Probekörpers als auch auf den geringeren Schneidkantenradius der Scherkanten zurückzuführen. Vergleichbare Ergebnisse ergaben sich auch für das Polypropylen.

Als wesentliche **Einflußgrößen** auf die Schneid- und Scherbeanspruchung erwiesen sich die Wanddicke des Zerkleinerungsgutes, die Beanspruchungsgeschwindigkeit sowie die Spaltweite (s. Kap. 4.2) und die Werkstoffeigenschaften (s. Kap. 4.3).

Der Einfluß der **Wanddicke** wird aus den Bildern 4.4 und 4.5 deutlich. Sowohl der qualitative Verlauf der Kraft-Weg-Kurven als auch die maximalen bezogenen Kräfte unterscheiden sich nur geringfügig voneinander. Nur bei den sehr dicken AlMg3-Probekörpern schließt sich an die Zerkleinerung eine Abstreifphase bei einem deutlich geringeren Kraftniveau an. Unterschiede ergeben sich insbesondere im Scherweg bis zum Bruch, d. h. bis zum Beginn der Bruchphase. Obwohl die relative Eindringtiefe der Messer (auf die Wanddicke bezogen) bis zum Bruch mit zunehmender Wanddicke deutlich abfällt, ergibt sich ein insgesamt ansteigender Weg der Krafteinleitung. Demnach ist der Anstieg der querschnittbezogenen Scherenergie hauptsächlich auf einen größeren Scherweg zurückzuführen.

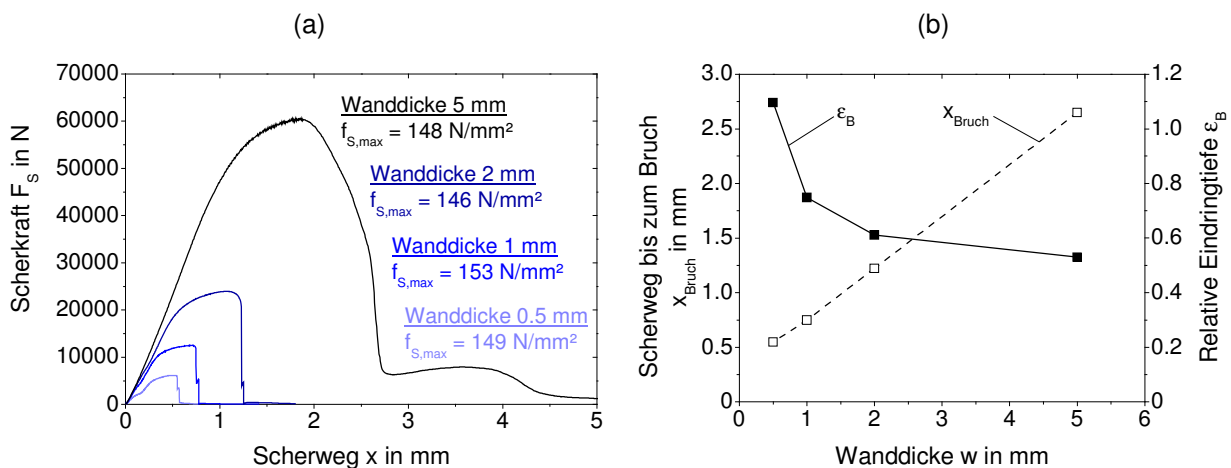


Bild 4.5: Einfluß der Wanddicke auf die Parameter der Scherbeanspruchung von AlMg3; (a) Kraft-Weg-Kurven; (b) Scherweg bis zum Bruch

Schervorrichtung: Probekörperbreite 40 mm; Spaltweite 0,2 mm; Beanspruchungsgeschwindigkeit 2 mm/min

Der Einfluß der **Beanspruchungsgeschwindigkeit** auf die Zerkleinerung von AlMg3 und Polypropylen im Geschwindigkeitsbereich von 1 mm/min ($1,7 \times 10^{-5}$ m/s) bis 5,5 m/s geht aus den Bildern 4.6 und 4.7 hervor. Während sich das Zerkleinerungsverhalten von AlMg3 praktisch nicht ändert, wirkt sich die höhere Geschwindigkeit bei Polypropylen sowohl auf den Verlauf der Kraft-Weg-Kurven als auch auf den Energiebedarf und die maximale Scherkraft aus. Da das Aluminium aufgrund seiner kubisch-flächenzentrierten Struktur über zahlreiche Gleitebenen verfügt, wird die Beweglichkeit der Versetzungen in diesem Geschwindigkeitsbereich nur wenig

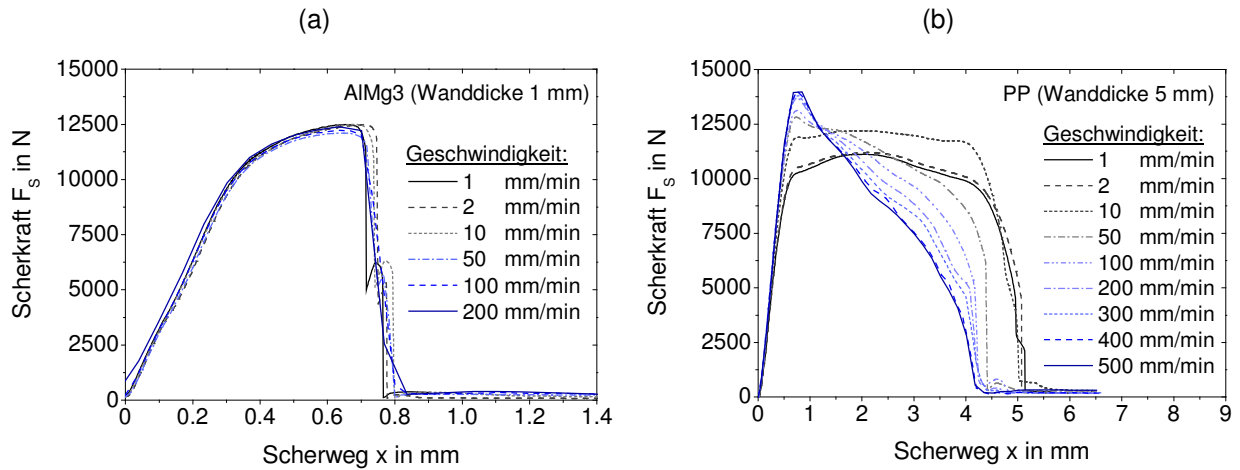


Bild 4.6: Auswirkung der Beanspruchungsgeschwindigkeit auf den Kraft-Weg-Verlauf bei der Scherbeanspruchung von AlMg3 (a) und Polypropylen (b)

Schervorrichtung: Probekörperbreite 40 mm; Spaltweite 0,2 mm

behindert. Die plastische Verformbarkeit und das Bruchverhalten von AlMg3 bleiben unverändert. Dagegen ist das Verformungsverhalten von Polypropylen infolge der überwiegend amorphen Makromolekülverbände temperatur- und zeitabhängig. Mit zunehmender Geschwindigkeit werden die durch Relaxation gekennzeichneten Umlagerungs-, Streck- und Orientierungsvorgänge der Makromoleküle erschwert, wodurch sich der Umfang der plastischen Verformungen reduziert und die Festigkeit des Polypropylens zunimmt. An den Kraft-Weg-Verläufen ist dieses Verhalten an der ansteigenden Scherkraft und dem geringeren Scherweg zu erkennen. Obwohl die Scherenergie bei den höheren Geschwindigkeiten der Schervorrichtung deutlich abnimmt, erfolgt in diesem Geschwindigkeitsbereich noch kein Übergang zum Sprödbbruch. Die Bruchflächen der mit der Schervorrichtung gescherten Probekörper sind durch ein vollständiges duktiles Stoffverhalten gekennzeichnet (Bild 4.8a bis c). Bei den sehr geringen Beanspruchungsgeschwindigkeiten können sich die Makromoleküle ausrichten, und es bildet sich eine sehr glatte und gleichmäßige Oberfläche. Mit zunehmender Geschwindigkeit werden größere Strukturbereiche in die Verformungen einbezogen, die bei 500 mm/min ($8,3 \times 10^{-3}$ m/s)

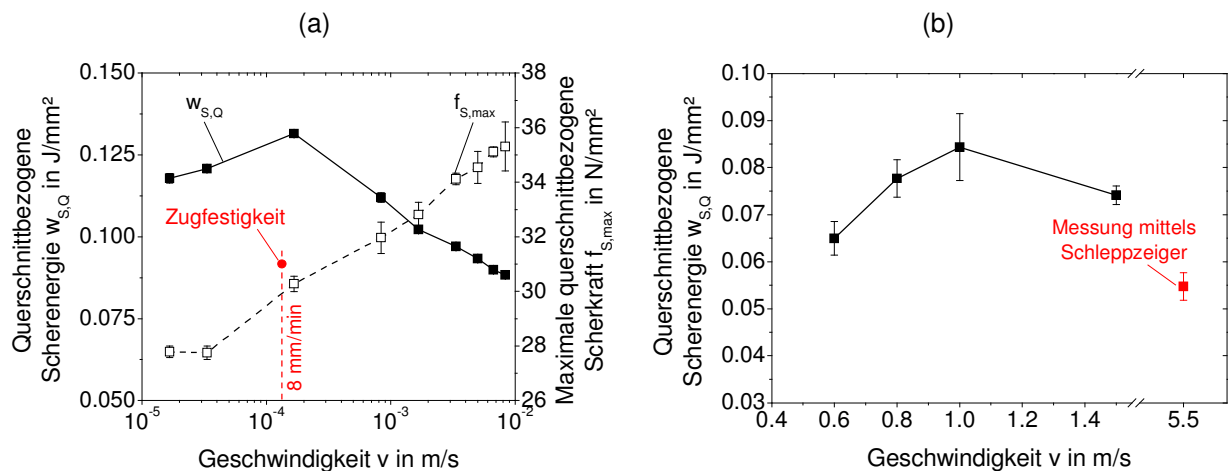


Bild 4.7: Einfluß der Beanspruchungsgeschwindigkeit auf die Scherkraft und die Scherenergie bei der Scherbeanspruchung von Polypropylen mittels Schervorrichtung (a) und Schlagwerk (b)

Probekörperbreite 40 mm; Wanddicke 5 mm; Schervorrichtung: Spaltweite 0,2 mm; Schlagwerk: Geometrie SW1; Rotormesser RM1; radiale Spaltweite 0,2 mm

eine stufenförmige Oberflächenausbildung hervorrufen. Der Übergang zum eher spröden Stoffverhalten erfolgt aber erst bei wesentlich höheren Beanspruchungsgeschwindigkeiten von mehr als 1 m/s. Die plastischen Verformungen der Bruchflächen gehen zurück (Bild 4.8d, e), und demzufolge fällt die Scherenergie deutlich ab (Bild 4.7b).

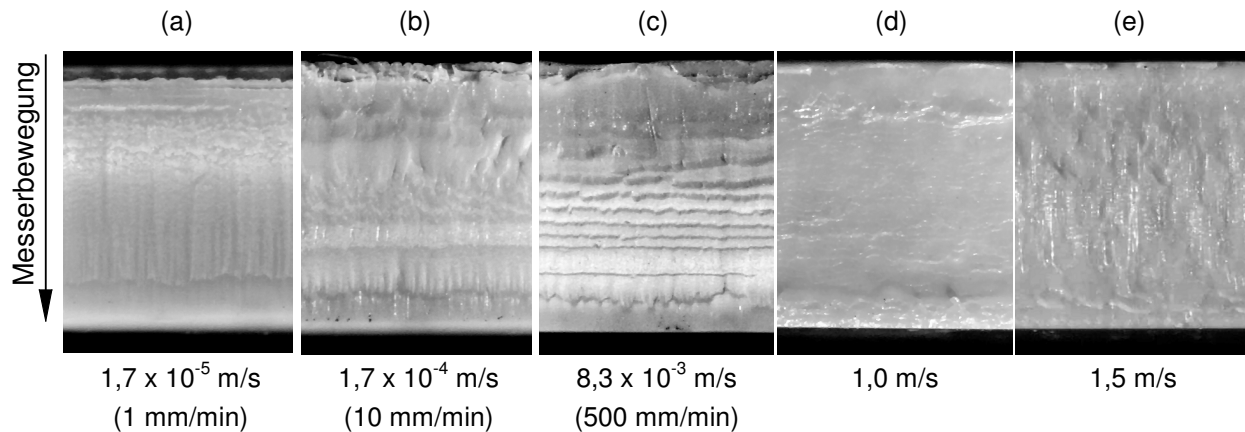


Bild 4.8: Bruchflächen von geschertem Polypropylen (Wanddicke 5 mm) in Abhängigkeit von der Beanspruchungsgeschwindigkeit

(a) bis (c) Schervorrichtung; (d) und (e) Schlagwerk

4.2 Reiß- und Biegebeanspruchung

Die Zerkleinerung durch eine Reiß- oder Biegebeanspruchung findet bei deutlich größeren Spaltweiten statt, als sie für Schneid- und Scherprozesse üblich sind. Bei der Reißbeanspruchung erfolgt die Trennung des Materials durch eine überwiegende Zugbeanspruchung, die von Biege- und z. T. auch von Torsionsvorgängen überlagert wird. Unter bestimmten Bedingungen kann ein Bruch auch nur durch eine Biegebeanspruchung erzielt werden (Biegebrechen).

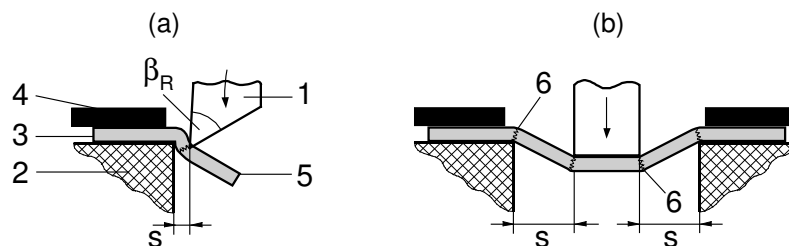


Bild 4.9: Schematische Darstellung der Beanspruchungsverhältnisse bei den Reißversuchen am instrumentierten Schlagwerk (a) und der Scher- und Reißvorrichtung (b)

1 - Rotor- bzw. Stempelmesser; 2 - Statormesser; 3 - Probekörper; 4 - Einspannung; 5 - Bruchstück; 6 - Bereiche höchster Dehnung und bevorzugte Bruchregionen; s - Spaltweite; β_R - Keilwinkel; Darstellung der Geometrie des Schlagwerks um 90° nach rechts gedreht

Die Untersuchung der Reiß- und Biegebeanspruchung erfolgte zunächst mittels der einfachen Beanspruchungsgeometrien des Schlagwerks und der Scher- und Reißvorrichtung (Bild 4.9). Dabei entsprechen die mit dem Schlagwerk (a) bei nur einseitig eingespanntem Probekörper untersuchten Reiß- und Biegebeanspruchungen denen, die in Rotorschneidern und Radialspalt-Rotorscheren bei einer zu großen Spaltweite auftreten können. Mit der Scher- und Reißvorrichtung (b) wurde die für langsamlaufende Rotorreißer typische Reißbeanspruchung untersucht, bei der die Spaltweiten meist ein Mehrfaches der Wanddicke des Zerkleinerungsgutes betragen.

Die Veränderungen im Kraft-Weg-Verlauf bei Übergang von der Scherbeanspruchung zur Reißbeanspruchung bei Spaltweiten bis zu 10 mm zeigt Bild 4.10 für die zwei Versuchsmaterialien AlMg3 und Polypropylen. Mit Vergrößerung der Spaltweite nimmt bei beiden Materialien die maximale Kraft ab und der Weg bis zum Bruch auf ein Vielfaches der Wanddicke zu.

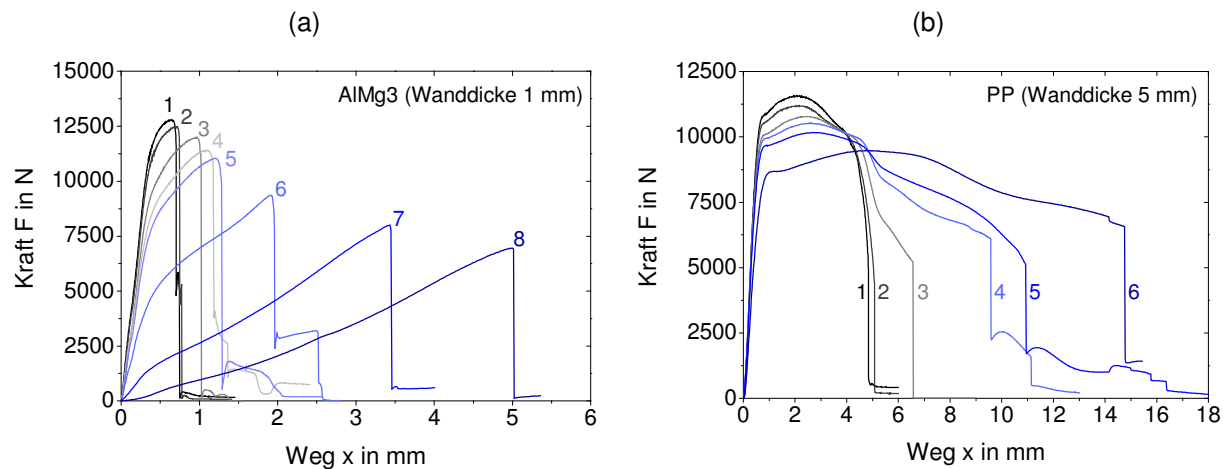


Bild 4.10: Auswirkung der Spaltweite auf den Kraft-Weg-Verlauf bei der Zerkleinerung von AlMg3 (a) und Polypropylen (b) mit der Scher- und Reißvorrichtung

(1) $s = 0,1$ mm; (2) $s = 0,2$ mm; (3) $s = 0,5$ mm; (4) $s = 0,8$ mm; (5) $s = 1,0$ mm; (6) $s = 2,0$ mm; (7) $s = 5,0$ mm; (8) $s = 10,0$ mm; Probekörperbreite 40 mm; Beanspruchungsgeschwindigkeit 2 mm/min

Bei der **Reißbeanspruchung von AlMg3** mit der Scher- und Reißvorrichtung kommt es infolge der beidseitigen Einspannung zunächst zu einer mit dem Tiefziehen vergleichbaren Verformung (s. Bild 4.9b). Das Material wird durch die wirkenden Zugkräfte gedehnt und plastisch verformt. Dabei wird der Probekörper sowohl an den Seitenkanten des Stempels als auch an den Stator-messerkanten scharfkantig gebogen. Durch die Biegung wird das Material in diesen Bereichen geschwächt, wodurch dort zuerst die Rißbildung einsetzt. Der Bruch erfolgt bei Spaltweiten > 1 mm meist nur in einer der in Bild 4.9b gekennzeichneten Bruchregionen. Die Bruchflächen weisen eine ausgeprägte Verformungszone (A) und eine Bruchzone (B) auf (Bild 4.11a). Eine Anschnittzone, wie sie vom Schneiden und Scheren bekannt ist, tritt nicht auf. Betrachtet

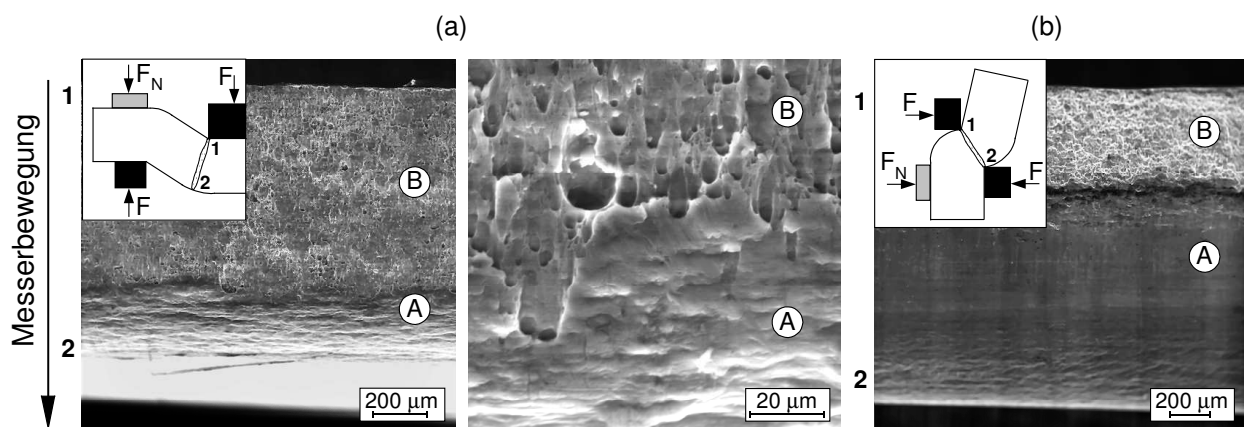


Bild 4.11: Bruchflächen zerkleinerter Probekörper aus Aluminium AlMg3 (Wanddicke 1 mm) durch eine Reißbeanspruchung mit der Scher- und Reißvorrichtung (a) und dem Schlagwerk (b)

A - Verformungszone; B - Bruchzone; Scher- und Reißvorrichtung: Spaltweite 10 mm; Beanspruchungsgeschwindigkeit 2 mm/min ($3,3 \times 10^{-5}$ m/s); Schlagwerk: Geometrie SW1; Rotormesser RM1; radiale Spaltweite 0,8 mm; Beanspruchungsgeschwindigkeit 5,5 m/s

man den Übergangsbereich von Verformungs- und Bruchzone näher, so sind durch Hohlraumkoaleszenz gebildete Waben zu erkennen. Wie auch bei der durch eine Scherbeanspruchung entstandenen Bruchfläche sind die Waben entsprechend der äußeren Kraft ausgerichtet.

Bei einer einseitigen Beanspruchung von AlMg3 am Schlagwerk (Bild 4.11b) gewinnt mit Vergrößerung der Spaltweite die Verformungszone immer mehr an Bedeutung. Gleichzeitig nimmt der Anteil der Anschnittzone stetig ab, bis sie beim Eintreten der Reißbeanspruchung vollständig entfällt. Der Probekörper wird bei Spaltweiten von $s = 0,7 \dots 1,0$ w sehr stark gebogen und in den Spalt eingezogen, wobei der Bruch durch eine überwiegende Zugbeanspruchung erfolgt. Eine Beanspruchung bei Spaltweiten von $s \geq w$ bewirkt nur eine Biegeumformung.

Die geschilderten Vorgänge spiegeln sich auch deutlich in der bruchflächenbezogenen Beanspruchungsenergie wider (Bild 4.12). Im Bereich der Schneid- und Scherbeanspruchung (bis etwa $s = 0,5$ mm) zeigt sich unabhängig von der Beanspruchungsart eine gute Übereinstimmung. Mit zunehmender Spaltweite nimmt die Beanspruchungsenergie des Schlagwerks aufgrund der nur einseitigen Probekörpereinspannung sehr stark zu und erreicht bei $s = w$ ihr Maximum. Bei dieser Spaltweite unterliegt der Probekörper einer starken Biegeumformung begleitet von intensiven Reibungsverlusten zwischen Rotormesser und Probekörper. Der Übergang von der Schneid- zur Reißbeanspruchung vollzieht sich ähnlich. Jedoch deutet sich an, daß sich der Wechsel zur Biegeumformung aufgrund der höheren Spannungskonzentration an der Rotormesserschneide zu geringfügig höheren Spaltweiten verschiebt. Im Gegensatz zum Schlagwerk verhindert die beidseitige Probekörpereinspannung bei der Scher- und Reißvorrichtung das ausgeprägte Einziehen des Materials in den Spalt und die damit verbundenen hohen Reibungsverluste bei Spaltweiten im Bereich der Wanddicke. Der Anstieg der bruchflächenbezogenen Beanspruchungsenergie ist hier im wesentlichen auf die stärkere Verformung zurückzuführen. Mit zunehmender Spaltweite ergeben sich größere Materialbereiche im Spalt, die einer starken Zugbeanspruchung unterliegen und dadurch vor dem Bruch vergleichbar mit dem Zugversuch über die gesamte Länge gedehnt werden (s. Bild 4.10a).

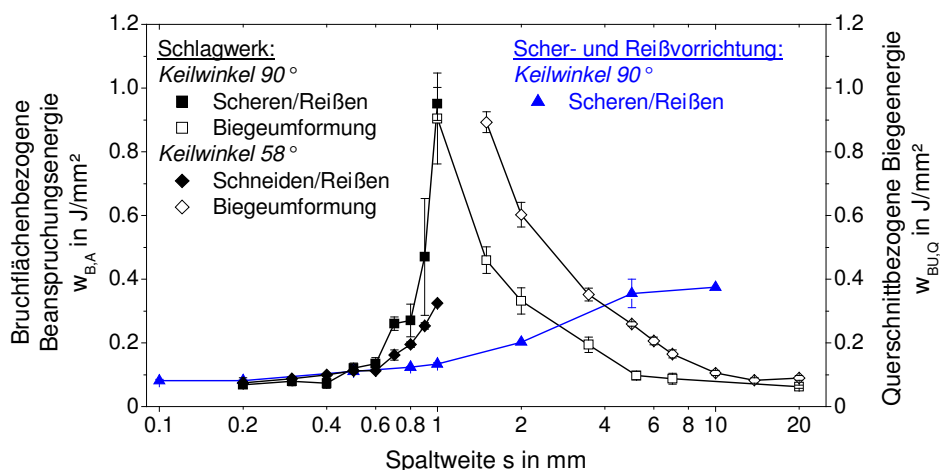


Bild 4.12: Auswirkung der Spaltweite auf den Energiebedarf bei der Zerkleinerung von AlMg3

Wanddicke 1 mm; Probekörperbreite 40 mm; Schlagwerk: Schleppzeigermessung; Geometrie SW1; Rotormesser RM1 bzw. RM3; Beanspruchungsgeschwindigkeit 5,5 m/s; Scher- und Reißvorrichtung: Beanspruchungsgeschwindigkeit 2 mm/min

Bei der **Beanspruchung von Polypropylen** bestimmt die Geschwindigkeit, ob bei größeren Spaltweiten eine Reißbeanspruchung oder das Biegebrechen eintritt. Eine quasistatische Beanspruchung des Polypropylens bei größeren Spaltweiten bewirkt ein Fließen des Materials über den gesamten Querschnitt. Mit zunehmender Spaltweite und Wanddicke vergrößert sich der Fließbereich. Das Material wird im Spalt durch eine Zugbeanspruchung sehr stark gedehnt und bis auf Foliendicke eingeschnürt, wobei sich an den Messerkanten ausgeprägte Verformungsbereiche ausbilden. Durch die Verstreckung der langen, verknäulten Kettenmoleküle werden mit zunehmendem Materialvolumen bzw. größer werdender Spaltweite beachtliche Dehnungen erreicht. Der Bruch tritt im Gegensatz zum AlMg3 nicht nur im Bereich der Messerkanten auf, sondern auch ähnlich dem Zugversuch in den am stärksten eingeschnürten Materialbereichen (Bild 4.13a). Verbunden mit den ausgesprochen starken plastischen Verformungen ist eine deutliche Zunahme der Beanspruchungsenergie (Bild 4.14; s. auch Bild 4.10b).

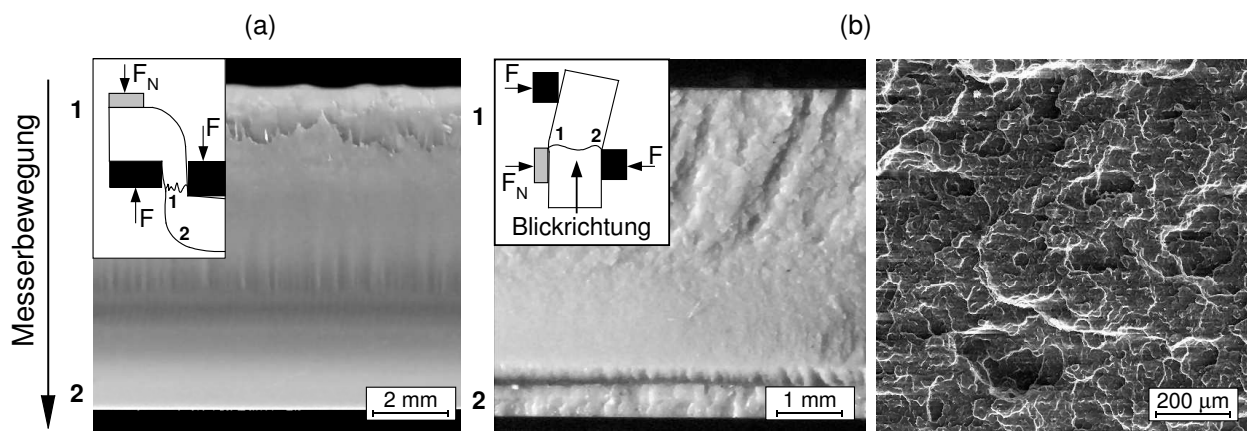


Bild 4.13: Bruchflächen von Polypropylen bei Beanspruchung unter großen Spaltweiten mit der Scher- und Reißvorrichtung (a) und dem Schlagwerk (b);

(a) Reißbeanspruchung; (b) Biegebeanspruchung (Biegebrechen)

Wanddicke 5 mm; Scher- und Reißvorrichtung: Spaltweite 2 mm; Beanspruchungsgeschwindigkeit 2 mm/min ($3,3 \times 10^{-5}$ m/s); Schlagwerk: Geometrie SW1; Rotormesser RM1; radiale Spaltweite 10,5 mm; Beanspruchungsgeschwindigkeit 5,5 m/s

Dagegen bewirkt die höhere Beanspruchungsgeschwindigkeit des Schlagwerks ein überwiegend sprödes Stoffverhalten des Polypropylens. Bei Spaltweiten von weniger als 1 mm erfolgt je nach Rotormesser eine Schneid- oder Scherbeanspruchung. Die Bruchflächen gleichen im wesentlichen denen, die in Kap. 4.1 beschrieben wurden. Bei einem Keilwinkel des Rotormessers von 90° nehmen im Bereich von $s = 1 \dots 3$ mm die plastischen Verformungen deutlich zu, was zu einem Anstieg der Beanspruchungsenergie führt. Oberhalb einer Spaltweite von 3 mm kommt es dann zu einem verformungsarmen Bruch, der durch eine Biegebeanspruchung (Biegebrechen) verursacht wird. Die Beanspruchungsenergie fällt wieder deutlich ab. Auf der Bruchfläche sind vergleichbar mit dem Restbruch bei der Schneidbeanspruchung schuppenförmige und scharfkantige Materialbereiche zu erkennen, die auf einen Bruch durch überwiegende Zugspannungen (Spaltbruch) schließen lassen (Bild 4.13b).

Eine Spaltweitenvergrößerung ausgehend von einer Schneidbeanspruchung (Keilwinkel 58°) wirkt sich zunächst im Bereich von $s = 1 \dots 5$ mm günstig auf die bruchflächenbezogene Beanspruchungsenergie aus, da sich der an der Rotormesserschneide gebildete Riß instabil bis zur Stator-kante ausbreitet und eine größere Bruchfläche hervorruft (Bild 4.15b). Die plastischen

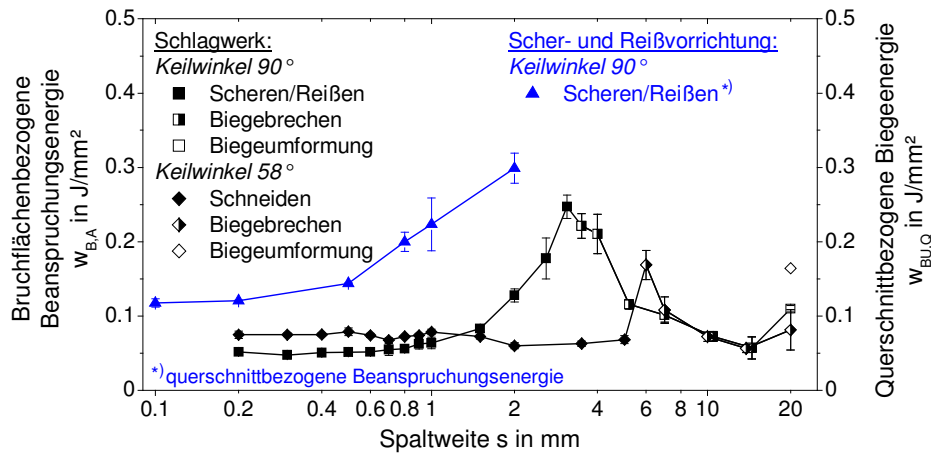


Bild 4.14: Einfluß der Spaltweite auf den Energiebedarf für die Zerkleinerung von Polypropylen
 Wanddicke 5 mm; Probekörperbreite 40 mm; Schlagwerk: Schleppzeigermessung; Geometrie SW1; Rotormesser RM1 bzw. RM3; Beanspruchungsgeschwindigkeit 5,5 m/s; Scher- und Reißvorrichtung: Beanspruchungsgeschwindigkeit 2 mm/min

Verformungen bleiben auf den Anschnittbereich des Rotormessers beschränkt. Ab Spaltweiten von 6 mm wird der Riß nicht mehr an der Rotormesserschneide eingeleitet, sondern es kommt zu einem Bruch an der Statorkante durch eine Biegebeanspruchung (Bild 4.15 c, d). Jedoch bildet sich im Eingriffsbereich der Rotormesserkante noch ein plastisch verformter Anschnitt aus. Bei noch größeren Spaltweiten fehlt dieser Anschnittbereich, wodurch auch die Beanspruchungsenergie weiter abfällt.

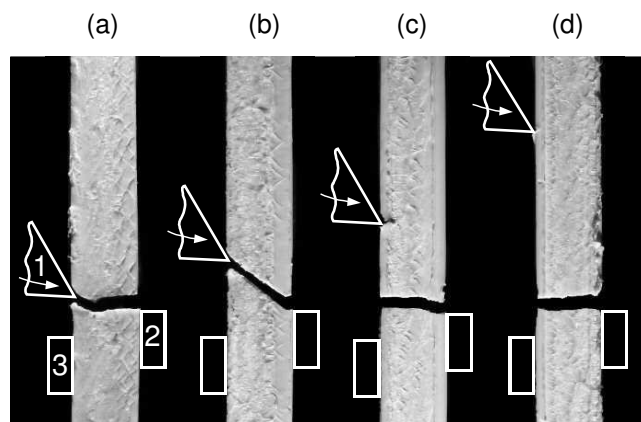


Bild 4.15: Rißverlauf bei der Zerkleinerung von Polypropylen (Wanddicke 5 mm) mit dem Schlagwerk in Abhängigkeit von der radialen Spaltweite
 (a) $s_R = 0,9$ mm; (b) $s_R = 3,5$ mm; (c) $s_R = 6,0$ mm; (d) $s_R = 13,8$ mm; 1 - Rotormesser; 2 - Statormesser; 3 - Einspannung; Geometrie SW1; Rotormesser RM3; Beanspruchungsgeschwindigkeit 5,5 m/s

Werden die Ergebnisse des Aluminiums mit denen des Polypropylens verglichen, so wird ein ähnlicher Zusammenhang zwischen Spaltweite und Energiebedarf festgestellt. Auch wird die Vermutung bestätigt, daß ein geringerer Keilwinkel des Rotormessers den Übergang zur Biegeumformung bzw. zum Biegebrechen zu größeren Spaltweiten verschiebt. Der Bereich des höchsten Energiebedarfs und zugleich der erkennbare Wechsel der Beanspruchungsarten ergibt sich jeweils bei Spaltweiten in der Größenordnung der Wanddicke des zu zerkleinernden Materials. Des weiteren wird deutlich, daß das Biegebrechen bei größeren Spaltweiten unabhängig von der Gestalt des Rotormessers ist.

4.3 Zusammenhang zwischen Scher-, Reiß- und Zugbeanspruchung

Die Zerkleinerung der nicht-spröden Stoffe in Rotorscheren und Rotorreißern erfolgt unter komplexen Beanspruchungsbedingungen auf der Basis einer dominierenden Scher- bzw. Reißbeanspruchung. Für die Ermittlung der Eigenschaften des zu zerkleinernden Materials dient jedoch verbreitet der Zugversuch bei einachsiger Zugbeanspruchung. Daher ist es für die weiteren Betrachtungen zunächst wichtig, die Scher-, Reiß- und Zugbeanspruchung miteinander zu vergleichen und Zusammenhänge zu den Kennwerten des Zugversuches herzustellen.

Die im **Scher- und Zugversuch** ermittelten Kraft-Weg-Kurven der betrachteten Aluminiumwerkstoffe zeigt Bild 4.16. Ausgehend vom Reinaluminium Al99.5 wird durch festigkeitssteigernde Maßnahmen, wie z. B. durch die Verformungsverfestigung beim Walzen, die Mischkristallverfestigung bei den AlMg-Legierungen und die Verfestigung durch Ausscheidung fester Teilchen bei der AlCuMg-Legierung, ein beträchtlicher Festigkeitszuwachs erzielt. Unter einachsiger Zugbeanspruchung nimmt gleichzeitig die Verformungsfähigkeit des Aluminiums zu, was sich in einem größeren Beanspruchungsweg äußert. Auch beim Scherversuch kann ein ähnlicher Anstieg der Scherfestigkeit beobachtet werden, wobei jedoch bei den höherfesten Aluminiumlegierungen früher ein Bruch eintritt. Der Scherweg bis zum Bruch liegt bei allen Aluminiumwerkstoffen deutlich unterhalb der Wanddicke.

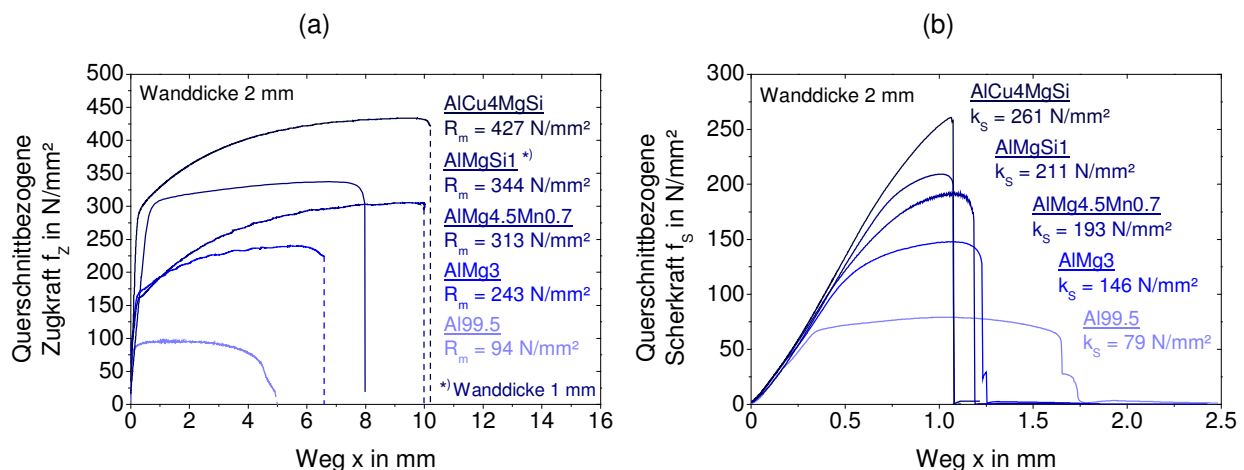


Bild 4.16: Kraft-Weg-Kurven verschiedener Aluminiumwerkstoffe bei einachsiger Zugbeanspruchung (a) und Scherbeanspruchung (b)

Prüfgeschwindigkeit 2 mm/min; Zugversuche: Ergebnisse der Universität Kaiserslautern [106]; Probekörperquerschnitt 20 mm² bzw. 12,5 mm² bei AlMgSi1; Anfangsmeßlänge 50 mm; Scherversuche: Schervorrichtung; Spaltweite 0,2 mm; Probekörperquerschnitt 160 mm²

Noch deutlicher äußern sich die Unterschiede zwischen beiden Beanspruchungsarten in den Kraft-Weg-Verläufen des Polypropylens (Bild 4.17). Die geringe Prüfgeschwindigkeit bedingt beim Zugversuch eine hohe Dehnung des Polypropylens von mehr als 200 % der Ausgangslänge. Diese großen Dehnungen sind auf die kristallinen Sphärolithe des Polypropylens zurückzuführen, deren Struktur erst bei stärkerer Beanspruchung nachgibt. Dagegen entspricht beim Scherversuch der Beanspruchungsweg auch bei geringer Prüfgeschwindigkeit etwa der Wanddicke des Materials. Die Zug- und die Scherfestigkeit unterscheiden sich im Gegensatz zu den Aluminiumwerkstoffen nur geringfügig.

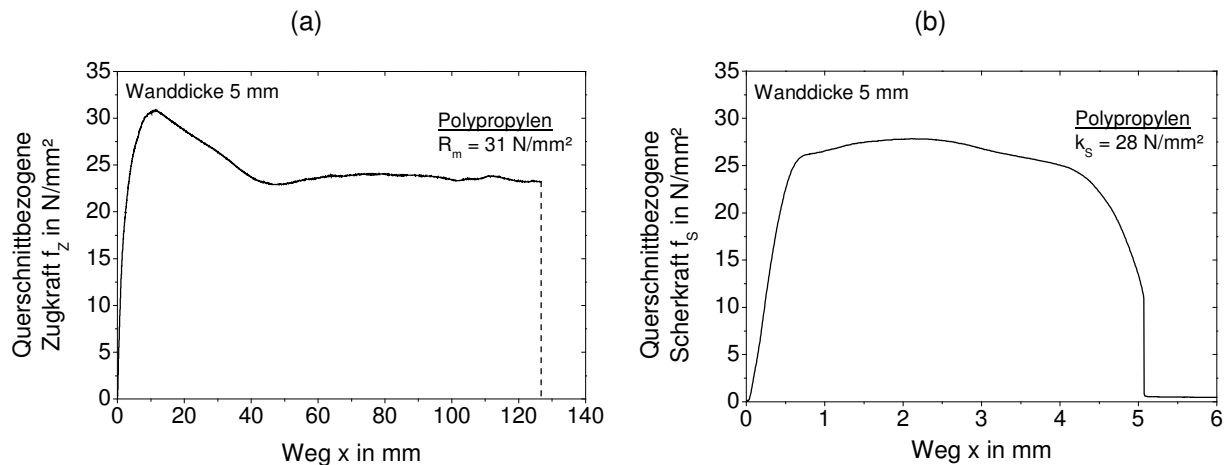


Bild 4.17: Kraft-Weg-Kurven von Polypropylen bei einachsiger Zugbeanspruchung (a) und Scherbeanspruchung (b)

Zugversuch: Prüfgeschwindigkeit 8 mm/min; Ergebnisse der Universität Kaiserslautern [106]; Probekörperquerschnitt 49,2 mm²; Anfangsmeßlänge 60 mm; Scherversuch: Schervorrichtung; Beanspruchungsgeschwindigkeit 2 mm/min; Spaltweite 0,2 mm; Probekörperquerschnitt 402 mm²

Wie bereits aus dem Verlauf der Kraft-Weg-Kurven erkennbar ist, besteht zwischen der Scher- und der Zugfestigkeit ein enger Zusammenhang (Bild 4.18). Sowohl die Messungen des Schlagwerks als auch der Scher- und Reißvorrichtung zeigen, daß die Scherfestigkeit eines Werkstoffs geringer ist als seine Zugfestigkeit. HOOGEN [44] ermittelte für ähnliche Aluminiumwerkstoffe k_s/R_m -Verhältnisse von 0,6 ... 0,85, wobei die höheren Werte für Aluminium geringerer Festigkeit gelten. Diese Tendenz bestätigte sich in den durchgeführten Untersuchungen. Während die höherfesten Aluminiumlegierungen Werte von ca. $k_s/R_m = 0,6$ aufweisen, beträgt das Verhältnis bei Al99.5 im Durchschnitt 0,8. Auch erweisen sich die Werte als nahezu unabhängig von der Wanddicke.

Für das Polypropylen ergeben sich höhere k_s/R_m -Verhältnisse von 0,85 ... 0,96. Die Scherversuche mit dem Schlagwerk bewirkten aufgrund der höheren Beanspruchungsgeschwindigkeit eine Festigkeitssteigerung beim Polypropylen, so daß die Scherfestigkeit mit ca. 40 N/mm² die quasistatisch bestimmte Zugfestigkeit ($R_m = 32 \text{ N/mm}^2$) deutlich übersteigt.

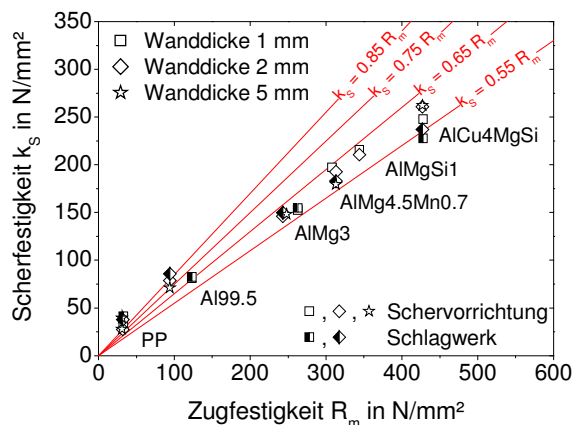


Bild 4.18: Zusammenhang zwischen Scher- und Zugfestigkeit

Zugversuche: Prüfgeschwindigkeit 2...10 mm/min;
Schervorrichtung: Spaltweite 0,2 mm; Beanspruchungsgeschwindigkeit 2 mm/min;
Schlagwerk: Geometrie SW1; Rotormesser RM1; Spaltweite 0,2 mm; Beanspruchungsgeschwindigkeit 0,6 m/s

Der Energiebedarf für die Scher- und Zugbeanspruchung wird vom Verlauf der Kraft-Weg-Kurven bestimmt, wobei sowohl die Festigkeit als auch die Verformung vor dem Bruch entscheidend sind. Bei der Scherbeanspruchung der Aluminiumwerkstoffe ergibt sich mit steigender Festigkeit eine abnehmende relative Eindringtiefe der Messer bis zum Bruch (Bild 4.19a),

wodurch sich eine nahezu konstante querschnittbezogene Scherenergie einstellt (Bild 4.19b). Bei der einachsigen Zugbeanspruchung des Aluminiums nimmt dagegen der Beanspruchungsweg zu. Infolge des großen Verformungsbereiches (Anfangsmeßlänge 50 mm) resultieren querschnittbezogene Energiebeträge, die z. T. mehr als eine Größenordnung über denen des Scherversuchs liegen und deutlich von der Festigkeit des Aluminiums beeinflusst werden.

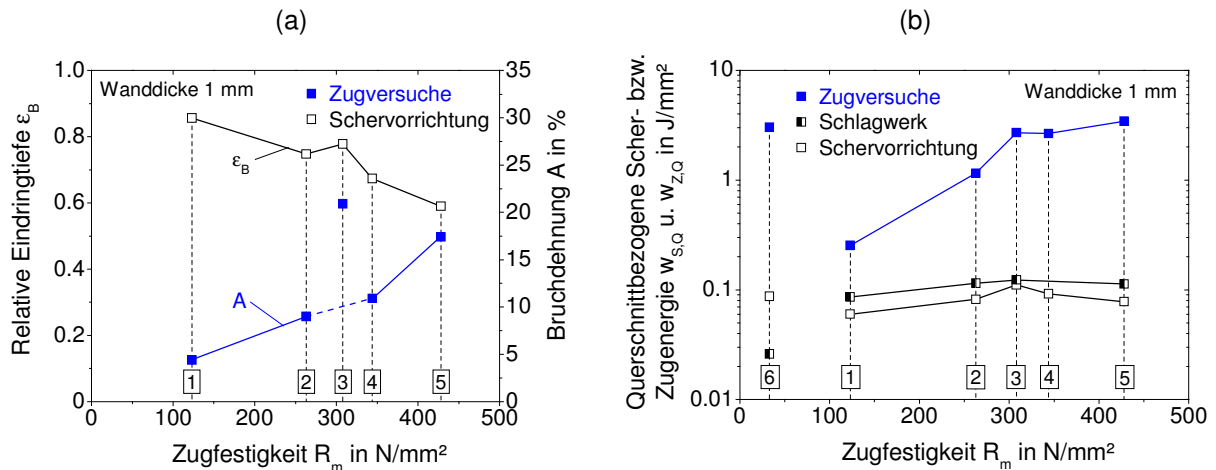


Bild 4.19: Einfluß der Werkstofffestigkeit auf die rel. Eindringtiefe und die Bruchdehnung (a) sowie den Energiebedarf (b) bei einachsiger Zugbeanspruchung und Scherbeanspruchung

(1) Al99.5; (2) AlMg3; (3) AlMg4.5Mn0.7; (4) AlMgSi1; (5) AlCu4MgSi; (6) Polypropylen;

Zugversuche: Prüfgeschwindigkeit 2...10 mm/min; Schervorrichtung: Spaltweite 0,2 mm; Beanspruchungsge-

schwindigkeit 2 mm/min; Schlagwerk: Geometrie SW1; Rotormesser RM1; Spaltweite 0,2 mm; Beanspruchungs-

geschwindigkeit 0,6 m/s

Die **Reißbeanspruchung** unterscheidet sich von der Scherbeanspruchung insbesondere durch die wesentlich größeren Spaltweiten, wodurch das Material einer starken Zugbeanspruchung unterliegt. Zusätzlich entsteht an den Kanten der Zerkleinerungswerkzeuge eine intensive Biegebeanspruchung (s. Bild 4.9b). Dadurch wird im Unterschied zur einachsigen Zugbeanspruchung ein mehrachsiger Beanspruchungszustand in Verbindung mit einer lokal erhöhten Dehnung des Materials erzeugt. In diesen geschwächten Bereichen kommt es frühzeitig zum Bruch, ohne daß eine mit der reinen Zugbeanspruchung vergleichbare, ausgeprägte Verformung des Materials vorausgeht. Damit verbunden sind spezifische Kräfte und Energien für die Reißbeanspruchung, die zwischen denen der Scher- und Zugbeanspruchung liegen (Tabelle 4.1). Für die technische Umsetzung der Reißbeanspruchung sind daher scharfe Werkzeugkanten, an denen das Material verformt und geschwächt wird, von entscheidender Bedeutung.

Tabelle 4.1: Vergleich der Scher-, Reiß- und Zugbeanspruchung von AlMg3

Wanddicke 1 mm; Zugbeanspruchung: Prüfgeschwindigkeit 2 mm/min; Scher- und Reißbeanspruchung: Scher- und Reißvorrichtung; Spaltweite 0,2 bzw. 10 mm; Beanspruchungsgeschwindigkeit 2 mm/min;

	Mittlere bruchflächenbezogene Beanspruchungskraft $f_{B,max}$ in N/mm²	Beanspruchungsenergie $w_{B,A}$ in J/mm²
Scherbeanspruchung	153	0,08
Reißbeanspruchung	173	0,38
Zugbeanspruchung	263 ^{*)}	1,15 ^{*)}

^{*)} auf den Ausgangsquerschnitt der Proben bezogene Werte

5 Untersuchung der Vorgänge bei für Rotorscheren und Rotorreißer typischen Beanspruchungsgeometrien

5.1 Mikroprozesse der Zerkleinerung in Rotorscheren und Rotorreißern

Für die Grundlagenuntersuchungen zur Aufklärung der in Rotorscheren und Rotorreißern ablaufenden Mikroprozesse standen zwei Modell-Zerkleinerungsapparaturen und ein Schlagwerk zur Verfügung. Diese ermöglichten es, die Vorgänge in ein- und mehrrotorigen Axialspalt-Rotorscheren und Rotorreißern unter vereinfachten Bedingungen zu analysieren. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind Gegenstand der folgenden Abschnitte.

5.1.1 Untersuchung der Vorgänge bei der Beanspruchung zwischen Rotor und Stator

In Rotorscheren und -reißern vollziehen sich sehr unterschiedliche Beanspruchungsvorgänge, die sich in Einzugs- und Zerkleinerungsprozesse sowie Verformungs- und Reibungsprozesse unterteilen lassen.

Einzugs- und Zerkleinerungsvorgang

Den Einzugs- und Zerkleinerungsvorgang eines plattenförmigen Probekörpers unter Bedingungen, die denen der **einrotorigen Axialspalt-Rotorscheren** entsprechen, zeigt Bild 5.1. Kennzeichnend für diese Maschinen sind die niedrigen axialen und radialen Spaltweiten sowie ein geringer Messereingriffswinkel. Der Zerkleinerungsvorgang beginnt mit dem Eingreifen der Frontschneide des Rotormessers in das Material (a). Infolge der geringen Spaltweite und der Schneidengeometrie erfolgt die Anrißbildung durch eine kombinierte Schneid-/Scherbeanspruchung. Nach dem Durchbruch der Frontschneide vollzieht sich die weitere Rißausbreitung bis zum Bruch entlang der Seitenkanten des Rotormessers durch eine Scherbeanspruchung (b), wobei sich die Rotormesserseitenkanten und die Statorkanten kreuzen.

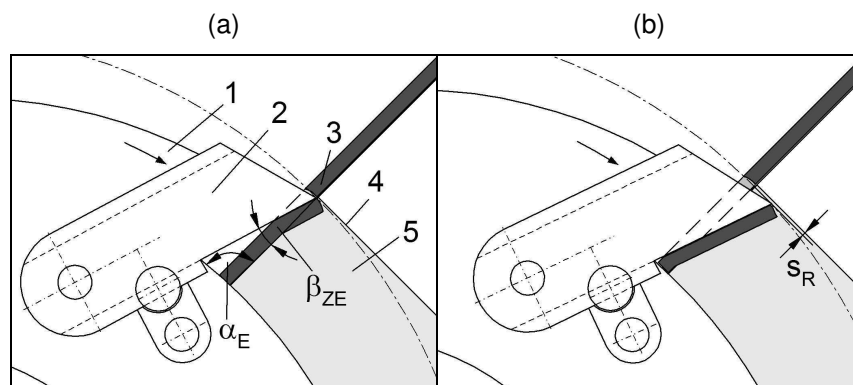


Bild 5.1: Ablauf der Zerkleinerung eines Polypropylen-Probekörpers (Wanddicke 5 mm) bei einer Beanspruchungsgeometrie, die einer einrotorigen Axialspalt-Rotorschere entspricht; (a) Eingreifen des Rotormessers; (b) Beidseitiges Abscheren an den Seitenkanten;

1 - Rotorscheibe; 2 - Rotormesser; 3 - Probekörper; 4 - Radiale Statorkante; 5 - Statorwerkzeug; α_E - Einzugswinkel; β_{ZE} - Messereingriffswinkel; s_R - radiale Spaltweite ($s_R = 0,2$ mm); Geometrie RS1; axiale Spaltweite 0,2 mm

Die Bruchflächen der im radialen und axialen Spalt zerkleinerten Materialbereiche weisen eine vergleichbare Ausbildung auf (Bild 5.2). Im Fall des Polypropylens zeigen sie verschmierte Strukturbereiche, die den gesamten Querschnitt einnehmen. Die plastischen Verformungen sind

jedoch nur auf einen durch die Spaltweite vorgegebenen Bereich begrenzt. Ähnliche Strukturen konnten auch bei den Versuchen am Schlagwerk beobachtet werden.

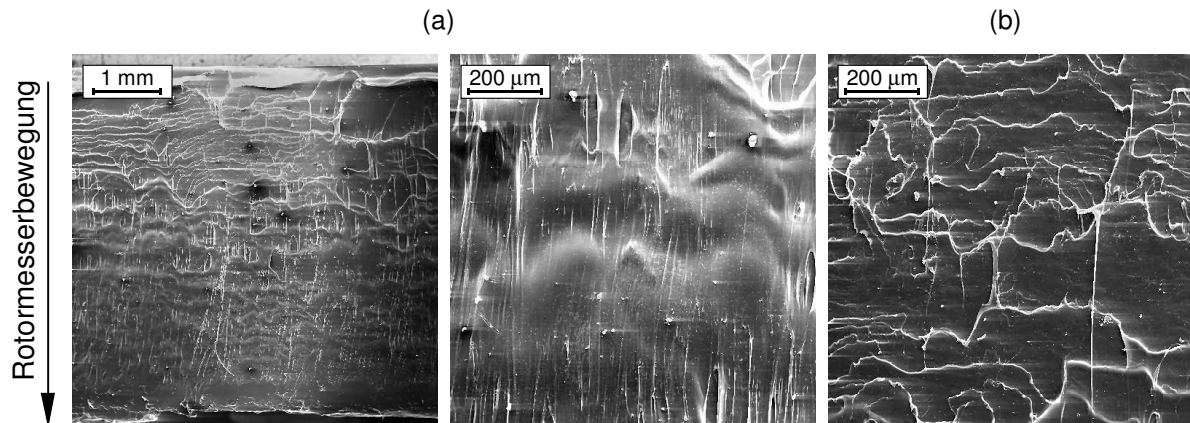


Bild 5.2: Bruchflächen eines im axialen Spalt durch eine Scherbeanspruchung (a) und im radialen Spalt durch eine Scher-/Schneidbeanspruchung (b) abgetrennten Polypropylen-Bruchstückes
Wanddicke 5 mm; Geometrie RS1; Messereingriffswinkel 17° ; axiale und radiale Spaltweite 0,2 mm; Beanspruchungsgeschwindigkeit 0,4 m/s

Vorteilhaft bei dieser Beanspruchungsgeometrie sind die entstehenden, gering verformten Bruchstücke, deren Abmessungen der Länge und Breite bzw. der Kontur des Rotormessers entsprechen. Nachteilig wirkt sich dagegen aus, daß aufgrund des großen Einzugswinkels und des geringen Messereingriffswinkels das Aufgabematerial nicht selbständig eingezogen wird, sondern zwangszugeführt werden muß.

Der Ablauf des Zerkleinerungsvorganges unter günstigen Einzugsbedingungen, d. h. bei einem geringen Einzugswinkel und einem großen Messereingriffswinkel, wie er für **mehrrotorige Axialspalt-Rotorschern** typisch ist, geht aus Bild 5.3 hervor. Der plattenförmige Probekörper wird unter diesen Bedingungen selbständig eingezogen. Im Gegensatz zu den einrotorigen Rotorschern beträgt die radiale Spaltweite bei mehrrotorigen Axialspalt-Rotorschern ein Mehrfaches der Wanddicke des Materials ($s_R \gg w$), so daß die Reißbildung an der Frontschneide des Rotormessers durch eine Reißbeanspruchung erfolgt. Die deutlich geringere axiale Spaltweite führt dagegen zu einer Scherbeanspruchung an den Seitenkanten von Rotorscheibe und -messer. Das Eingreifen des Rotormessers in das Blech (a) bewirkt vorerst eine lokale Verformung des Materials im Bereich der Messerschneide. Erst wenn das Verformungsvermögen des Probekörpers erschöpft ist, bilden sich in diesem Bereich die ersten Anrisse (Einreißen). Mit dem weiteren Eindringen des Rotormessers (b) breiten sich die Risse entlang der beiden Seitenkanten des Rotormessers und der Rotorscheibe durch eine Scherbeanspruchung weiter aus. Der Bruch erfolgt, sobald sich beide Reißfronten treffen (c). Intensive Verformungs- und Reibungsvorgänge treten insbesondere an der Unterseite des Rotormessers auf. Die Bruchstücke werden hier stark eingerollt, während der Schervorgang an den Rotorscheibenkanten nahezu verformungslos abläuft.

Vergleichbare geometrische Verhältnisse in Bezug auf den Einzugs- und Messereingriffswinkel sind bei zweirotorigen Rotorschern anzutreffen. Dort ist der Anteil der Rotorscheibenkanten am Zerkleinerungsvorgang durch die sich gegenüberliegenden Rotorscheiben aber wesentlich größer.

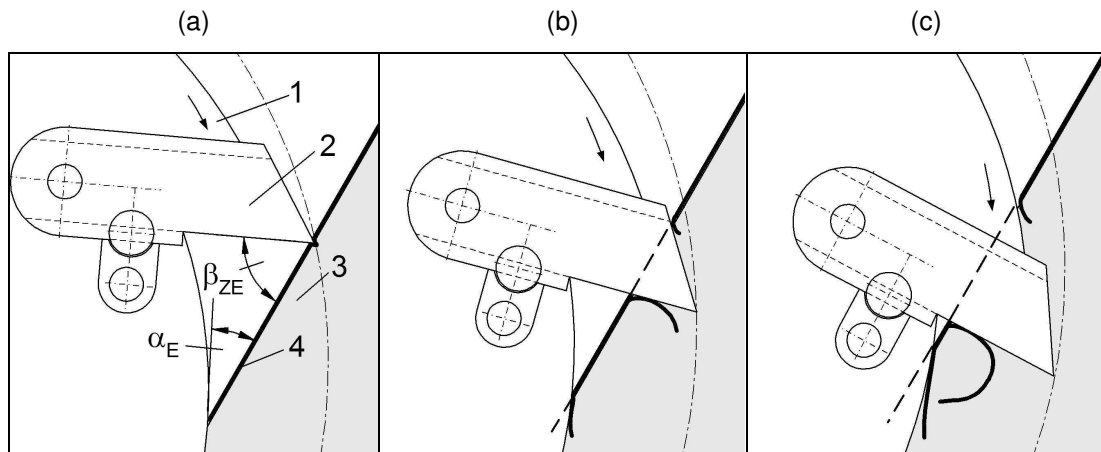
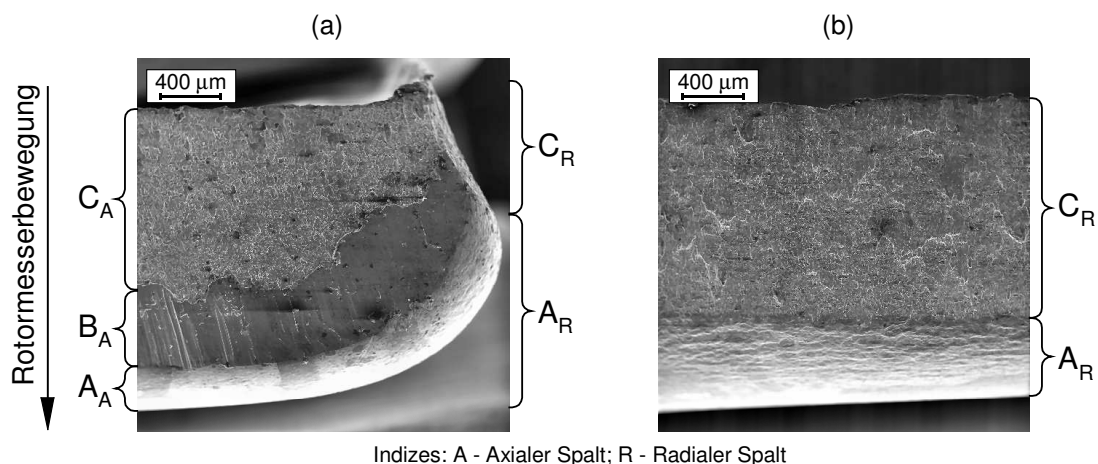


Bild 5.3: Ablauf der Zerkleinerung eines AlMg3-Probekörpers (Wanddicke 1 mm) bei einer Beanspruchungsgeometrie, die einer mehrrotorigen Axialspalt-Rotorschere entspricht [111]; (a) Eingreifen des Rotormessers in den Probekörper; (b) Durchbruch des Rotormessers; (c) Beidseitiges Abscheren an den Seitenkanten;

1 - Rotorscheibe; 2 - Rotormesser; 3 - Statorwerkzeug; 4 - Probekörper; α_E - Einzugswinkel; β_{ZE} - Messereingriffswinkel; Geometrie RS2; axiale Spaltweite 0,2 mm; radiale Spaltweite > 10 mm

In Bild 5.4 sind die Bruchflächen eines im axialen und radialen Spalt beanspruchten AlMg3-Bruchstückes dargestellt. Die an den Seitenkanten von Rotormesser und Stator entstandene Bruchfläche weist im Vergleich zur idealen Scherbeanspruchung (s. Bild 4.2b) eine deutlich ausgeprägte Verformungszone (A_A) auf, die auf die etwas größeren Schneidkantenradien der Statorwerkzeuge zurückzuführen ist. An diese schließen sich die für die Scherbeanspruchung typische Anschnittzone (B_A) und die Bruchzone (C_A) an. Auffallend ist die in der Seitenansicht gut sichtbare, weit in das Bruchstück hineinreichende Verformungszone (A_R), die sich entlang der Vorderkante des Rotormessers gebildet hat. Infolge der großen radialen Spaltweite kann sich das Material beim Einreißvorgang großflächig verformen. Das Material wird dabei an der Messerkante scharfkantig gebogen, wodurch sich vor dem Bruch eine ausgedehnte Verformungszone ausbildet. Im Bereich der Rotormesser- bzw. Statorecken, d. h. im Übergangsgebiet von radialer Reiß- und axialer Scherbeanspruchung, kommt es durch die hohe Spannungs-konzentration zu einer besonders breiten Verformungszone.



Indizes: A - Axialer Spalt; R - Radialer Spalt

Bild 5.4: Bruchflächen eines im axialen Spalt durch eine Scherbeanspruchung (a) und im radialen Spalt durch eine Reißbeanspruchung (b) abgetrennten AlMg3-Bruchstückes [111]

A - Verformungszone; B - Anschnittzone; C - Bruchzone; Wanddicke 2 mm; Geometrie RS2; Messereingriffswinkel 17°; axiale Spaltweite 0,2 mm; radiale Spaltweite > 10 mm; Beanspruchungsgeschwindigkeit 0,4 m/s

Auch bei der Zerkleinerung von Polypropylen treten bei großer radialer Spaltweite im Bereich der Rotormesser- bzw. Statorecken starke plastische Verformungen auf, die auf eine Reißbeanspruchung zurückzuführen sind. Jedoch bewirkt die zunehmende Biegebeanspruchung im radialen Spalt einen eher verformungsarmen Bruch (Anlage 7/1).

Infolge der größeren axialen und radialen Spaltweiten führt in Rotorreißern insbesondere eine Zugbeanspruchung, die im engen Zusammenhang mit Biege- und Torsionsvorgängen auftritt, zur Trennung des Materials (Reißbeanspruchung). Für die **Reißbeanspruchung in Rotorreißern** ist kennzeichnend, daß diese in zwei Abschnitten erfolgt (Bild 5.5).

a) Einreißen

Mit dem Eingreifen des Rotormessers in den Probekörper beginnt sich dieser, zunächst an den Statoranten ähnlich einem Tiefziehvorgang sowie in der Umgebung der Rotormesservorderkante zu verformen. Ohne die Einspannung des Probekörpers, die in großtechnischen Rotorreißern durch das gleichzeitige Eingreifen mehrerer Rotorwerkzeuge hervorgerufen wird, könnten sich die Zugspannungen nicht in ausreichendem Maße aufbauen, um eine Zerkleinerung zu erreichen. Der Probekörper würde sich in diesem Fall nur verformen. Aufgrund der Einspannung nehmen die Spannungen im Bereich der Rotormesserfrontschneide kontinuierlich zu, bis sich dort die ersten Risse durch einen Lochvorgang bilden.

b) Weiterreißen

Die durch den Lochvorgang geschaffenen Risse breiten sich in Gestalt eines Querscherrisses (s. Bild 2.2c) bevorzugt entlang der Seitenkanten der Rotorwerkzeuge aus. Gleichzeitig können je nach Statorstellung auch Risse ausgehend von den Rotorscheibenkanten entstehen. Des weiteren kann die Reißausbreitung ähnlich dem Zerkleinerungsvorgang bei den Geometrien der Rotorscheren auch mit starken Verformungsvorgängen unterhalb des Rotormessers verbunden sein.

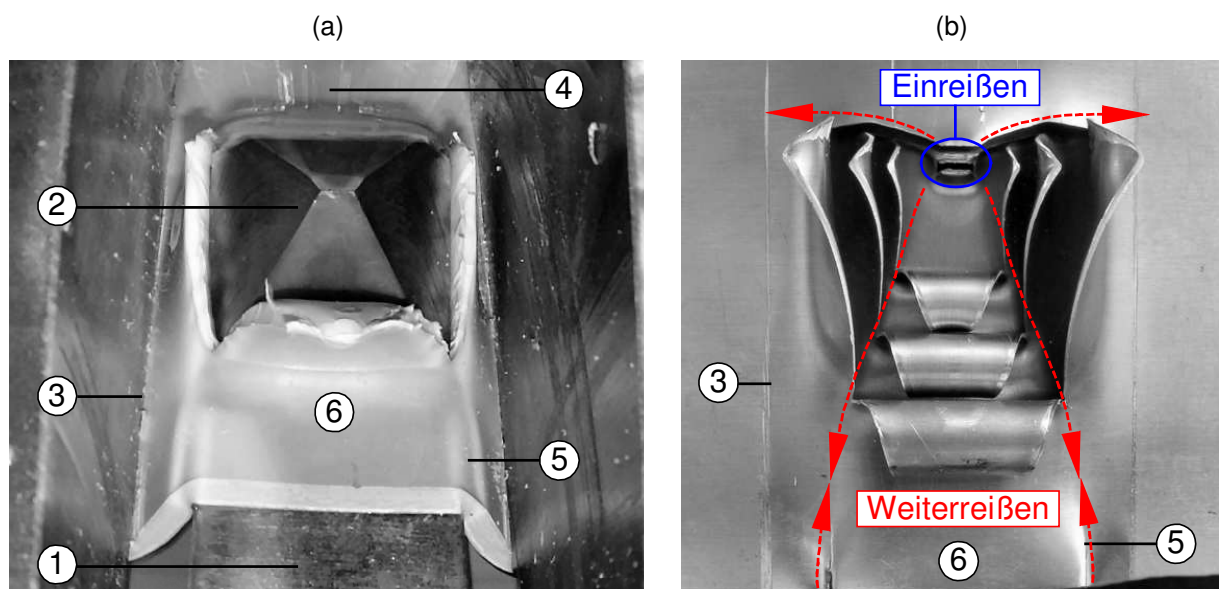


Bild 5.5: Reißbildung und -ausbreitung bei der Reißbeanspruchung von Polypropylen (a) und AlMg3 (b) unter typischen Beanspruchungsbedingungen der langsamlaufenden Rotorreißer

1 - Rotorscheibe; 2 - Rotormesser (Reißwerkzeug); 3 - Kante bzw. Kantenabdruck des Statorwerkzeuges; 4 - Probekörper; 5 - Reißverlauf entlang der Rotorscheibenkante; 6 - Entstehendes Bruchstück; Wanddicke 5 mm (PP) bzw. 1 mm (AlMg3); Geometrie RR1; axiale Spaltweite 10 mm; radiale Spaltweite > 10 mm; Messereingriffswinkel 61°

Die Zerkleinerung von Polypropylen bei den größeren Spaltweiten in Rotorreißern erfolgt durch eine Überlagerung von Reiß- und Biegebeanspruchung (Biegebrechen). Die Rißausbreitung bei der Reißbeanspruchung verläuft meist entlang der Messerkanten und unter starker plastischer Verformung (Bild 5.5a, Zähbruch). Dagegen breiten sich die Risse beim Biegebrechen instabil aus (Spröbruch).

Energiebedarf für die Rißbildung und -ausbreitung

Der Energiebedarf für die Rißbildung und -ausbreitung der geschilderten Zerkleinerungsvorgänge wurde unter vergleichbaren Bedingungen mit dem Schlagwerk untersucht. Die dem Probekörper zugeführte Energie konnte über die Auslenkung des Pendels schrittweise erhöht werden, wodurch sich typische Abschnitte des Zerkleinerungsvorganges nachvollziehen ließen. Am Beispiel der Rotorscherengeometrie (Bild 5.6a) wird deutlich, daß bei Eingreifen des Rotormessers vorerst ein hoher Energiebetrag für die elastische und plastische Verformung des Materials aufgewendet werden muß. Obwohl das Material über die gesamte Rotormesserbreite beansprucht wird, sind die ersten sich in den Randbereichen der Schneide bildenden Risse sehr klein. Dadurch ergibt sich eine hohe bruchflächenbezogene Beanspruchungsenergie. Erst wenn das Verformungsvermögen des Materials erschöpft ist, kommt es zum vollständigen Durchbruch der Schneide. Das bedeutet, daß bei einer geringen zusätzlichen Energiezufuhr plötzlich ein großer Anteil neuer Bruchfläche entsteht. Damit verbunden ist ein starker Abfall der bruchflächenbezogenen Beanspruchungsenergie. Die nachfolgende Rißausbreitung bis zum Bruch entlang der Seitenkanten des Rotormessers verläuft infolge der sich kreuzenden Messerkanten bei konstanter bruchflächenbezogener Beanspruchungsenergie, da die Energiezufuhr unmittelbar mit der Erzeugung neuer Bruchfläche verknüpft ist.

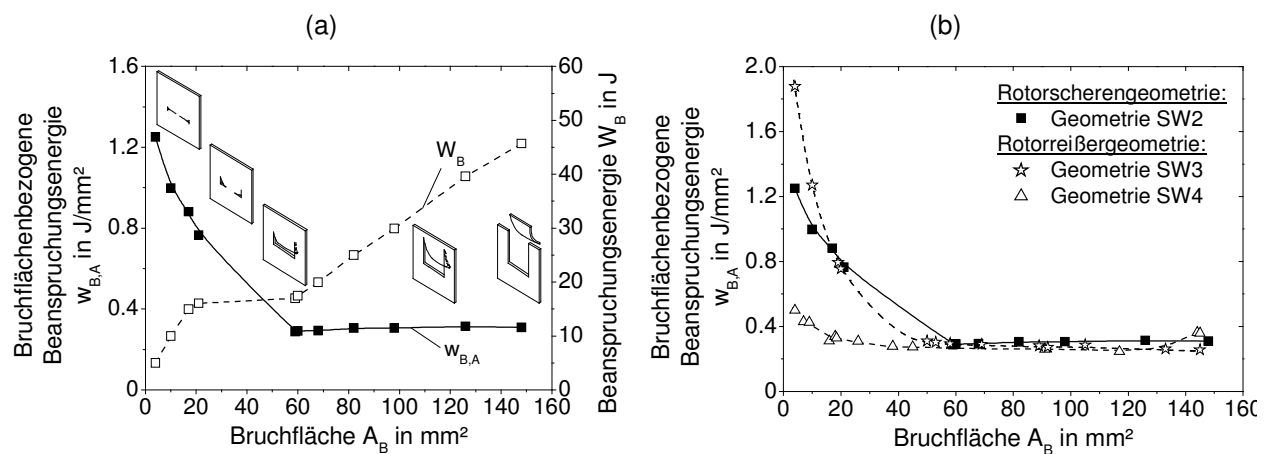


Bild 5.6: Energiebedarf für die Rißbildung und -ausbreitung bei der Zerkleinerung von AlMg3; (a) Rotorscherengeometrie SW2; (b) Vergleich der Beanspruchungsgeometrien

Wanddicke 1 mm; Schlagwerk; Drehsensormessung; Rotormesser RM3 (SW2/3) bzw. RM4 (SW4); axiale Spaltweite 0,3 mm (SW2) bzw. 20 mm (SW3) bzw. 10 mm (SW4); radiale Spaltweite 20 mm

Ein Vergleich von Rotorscheren- und Rotorreißergeometrie (Bild 5.6b) zeigt nur geringe Unterschiede im Energiebedarf für die Rißausbreitung. Bei der Rißbildung an der Frontschneide weichen die Energiebeträge jedoch deutlich voneinander ab. Die großen Spaltweiten bei der Rotorreißergeometrie bewirken eine stärkere Verformung des Probekörpers vor der Anrißbildung. Daher ist der bruchflächenbezogene Energiebedarf für die Anrißbildung bei gleichem Rotormesser (Geometrie SW3) höher als bei der Rotorscherengeometrie. Bei einem spitz zu-

laufenden Rotormesser (Geometrie SW4) bewirkt die hohe Spannungskonzentration an der Spitze frühzeitig die Anrißbildung und den Übergang zum Querscherriß (Weiterreißen). Daraus resultiert im folgenden ein annähernd konstanter bruchflächenbezogener Energiebedarf.

Verformungsvorgänge

In Rotorscheren und Rotorreißern treten neben Schneid-, Scher- und Reißbeanspruchungen sowie dem Biegebrechen auch intensive Verformungsvorgänge auf. Diese können sowohl vor der eigentlichen Zerkleinerung durch einen Verdichtungsvorgang bei voluminösen Aufgabegütern als auch während des Zerkleinerungsvorganges stattfinden.

Bei der Zerkleinerung voluminöser und hohlraumhaltiger Materialien tritt bereits eine **Verformung vor der eigentlichen Zerkleinerung** auf. Die über die Rotorwerkzeuge in das Aufgabematerial eingeleiteten Kräfte bewirken eine Verdichtung in der Beanspruchungszone. Dabei können die sich aufbauenden Spannungen zu einer elastischen und plastischen Verformung durch Biegung, Torsion und Knickung oder auch zum Bruch (Biegebrechen) führen. Von wesentlichem Einfluß auf die ablaufenden Verformungsprozesse sowie den Energiebedarf für die Verdichtung sind die Wanddicke, die Abmessungen und der Aufbau der hohlraumbildenden Strukturen (s. Kap. 5.2.2). Bild 5.7 zeigt einen solchen der Zerkleinerung vorgelagerten Verdichtungsvorgang am Beispiel eines AlMgSi0.5-Rohres. Obwohl die Verdichtung nur eine geringe mechanische Leistung bzw. Kraft erfordert, wird aufgrund des großen Biegeweges (Rohrdurchmesser $d = 75$ mm) bereits ein erheblicher Anteil der Beanspruchungsenergie aufgewendet, ohne daß eine Zerkleinerung erfolgt.

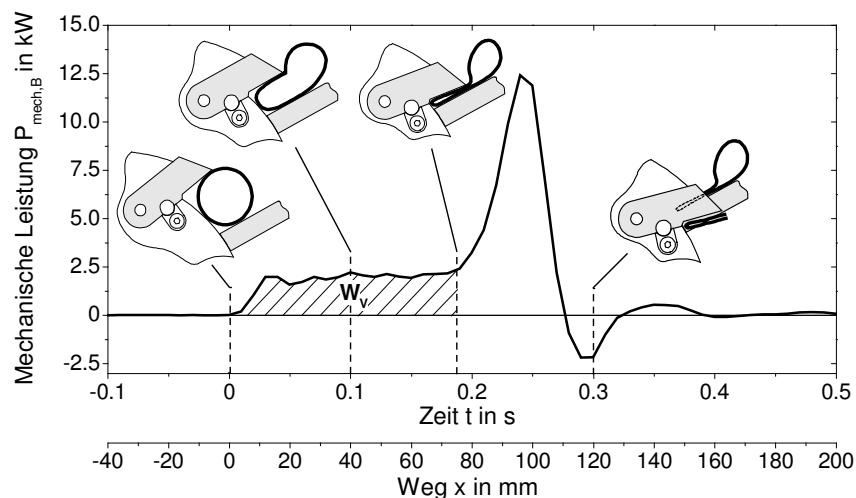


Bild 5.7: Leistungs-Zeit-Verlauf bei der Zerkleinerung voluminöser, hohlraumhaltiger Aufgabematerialien am Beispiel eines AlMgSi0.5-Rohres

W_v - Energieanteil für die Verdichtung; Wanddicke 2 mm; Durchmesser 75 mm; Rotorschergeometrie RS1; Messereingriffswinkel 17° ; axiale und radiale Spaltweite 0,2 mm; Beanspruchungsgeschwindigkeit 0,4 m/s

Die **Bruchstückverformung während der Zerkleinerung** wird maßgeblich von der Stellung des Stators zum Rotor, d. h. dem Messereingriffswinkel (s. auch Kap. 5.2.1), beeinflusst. Mit größer werdendem Messereingriffswinkel nehmen die Verformungsvorgänge an Intensität zu, wodurch auch der Gesamtenergiebedarf für die Zerkleinerung ansteigt (Bild 5.8). Dabei können zwei Abschnitte der Verformung voneinander unterschieden werden.

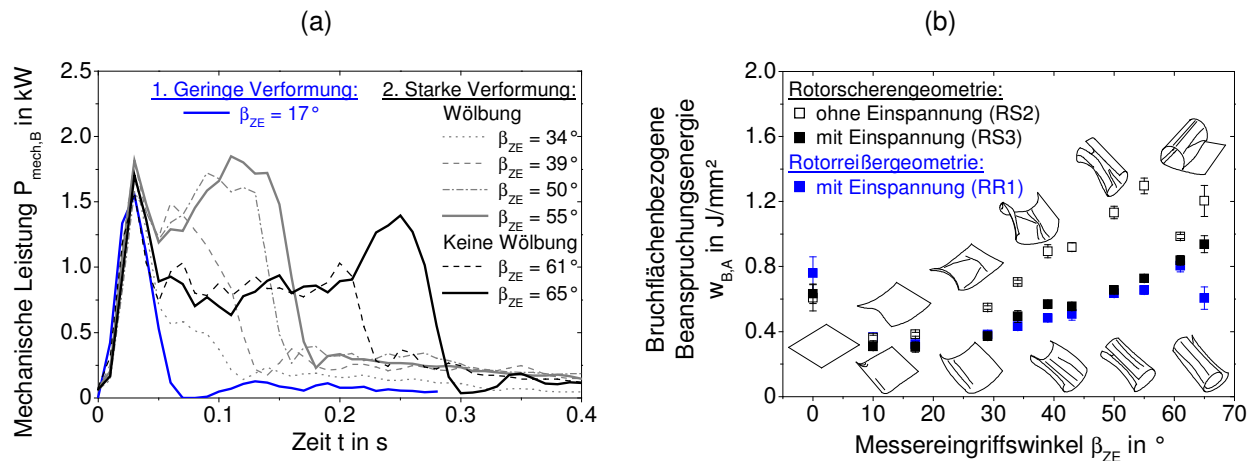


Bild 5.8: Auswirkung des Messereingriffswinkels und der Probekörpereinspannung auf die Bruchstückverformung und die bruchflächenbezogene Beanspruchungsenergie;

(a) Leistungs-Zeit-Kurven (Geometrie RS2); (b) Bruchflächenbezogene Beanspruchungsenergie

AlMg3; Wanddicke 1 mm; Beanspruchungsgeschwindigkeit 0,4 m/s; radiale Spaltweite > 10 mm;

Rotorschergeometrien: axiale Spaltweite 0,2 mm; Rotorreißergeometrie: axiale Spaltweite 10 mm

Wird der Probekörper nicht seitlich eingespannt, so kann sich dieser bei Eingriff des Rotormessers infolge der fehlenden Niederhalterkraft leicht wölben. Bei größeren Messereingriffswinkeln ($> 30^\circ$) schließt sich dieser Wölbung ein durch die Rotormesserbewegung erzwungenes Einrollen des schon gesicherten Materials an (Bild 5.9a). Durch die vorhergehende Wölbung wird diesem Verformungsprozeß ein erhöhter Widerstand entgegengebracht, wodurch der Energiebedarf stark ansteigt. In den Leistungs-Zeit-Verläufen ist dieser Vorgang an dem hohen Leistungsbedarf für die Zerkleinerung im axialen Spalt bei Messereingriffswinkeln von 34 bis 55° erkennbar (Bild 5.8a).

Wird der Probekörper durch die Einspannvorrichtung gehalten, tritt die Wölbung des Bruchstückes nicht auf (Bild 5.9b). Infolgedessen ergibt sich im Bereich größerer Messereingriffswinkel eine erheblich geringere bruchflächenbezogene Beanspruchungsenergie. Bei Messereingriffswinkeln von $< 20^\circ$ ist der Einfluß der Einspannung gering.

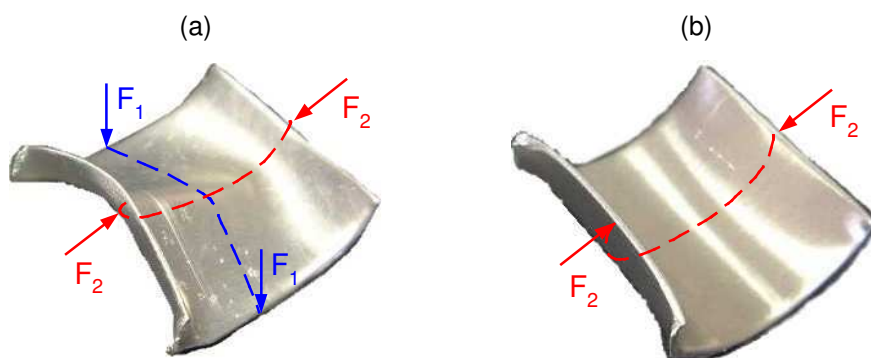


Bild 5.9: Ausbildung der AlMg3-Bruchstücke (Wanddicke 1 mm) bei freier Auflage (a) und Einspannung (b) des Probekörpers

F_1 - Kraft, die zur Wölbung des Materials führt; F_2 - Kraft, die das Einrollen des Materials verursacht; Rotorschergeometrien RS2 (a) und RS3 (b); Messereingriffswinkel 39° ; axiale Spaltweite 0,2 mm; radiale Spaltweite > 10 mm; Beanspruchungsgeschwindigkeit 0,4 m/s

Um die sich unterhalb des Rotormessers vollziehenden Biegevorgänge unter vereinfachten Bedingungen nachvollziehen zu können, wurden Biegeversuche mit verschiedenen Profilen durch-

geführt. Die aus AlMg3-Blech angefertigten Profile (Anlage 3) ermöglichten es, die Biegeumformung ungewölbter (Profile A bis D) als auch mit unterschiedlicher Ausprägung gewölbter Materialbereiche (Profile E bis G) zu untersuchen. Die Kennzeichnung der Profile erfolgt durch das maximale Widerstandsmoment gegen Biegung W_{bx} entsprechend der durch den Schwerpunkt verlaufenden Bezugsachse x.

Die Biegung eines einfachen Bleches (A) um ca. 74° erfordert nur einen geringen Kraft- und Energieaufwand, der in der Größenordnung der reinen Scherbeanspruchung liegt (Bild 5.10). Mit größer werdendem Widerstandsmoment gegen Biegung nimmt die Biegekraft und die Biegeenergie stetig zu, was sich insbesondere bei den zur Simulation der Wölbung angefertigten Profilen E bis G zeigt. Der durch die Wölbung hervorgerufene höhere Energieaufwand bei der Zerkleinerung mit der Modell-Zerkleinerungsapparatur wird damit durch die Biegeversuche bestätigt. Die bei eingespannten Probekörpern auftretende Verformung (Geometrien RS3 und RR1) ähnelt der Biegebeanspruchung der Profile A und C.

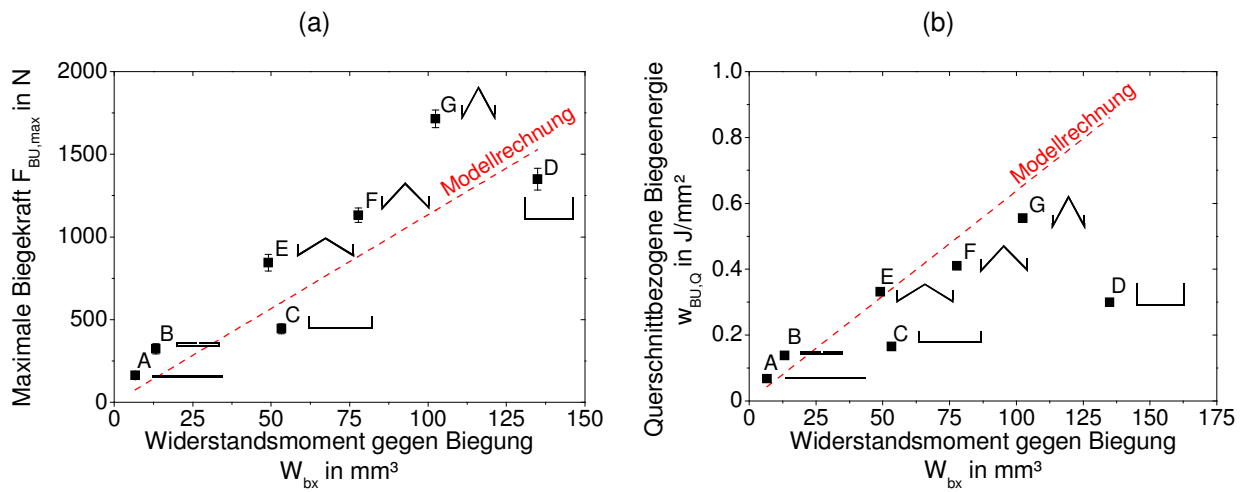


Bild 5.10: Zusammenhang zwischen dem Widerstandsmoment gegen Biegung und der maximalen Biegekraft (a) sowie der querschnittbezogenen Biegeenergie (b)

AlMg3; Wanddicke 1 mm; Querschnittsfläche 40 mm^2 ; Auflagerabstand 70 mm; Biegewinkel $73,7^\circ$; Beanspruchungsgeschwindigkeit 2 mm/min; Profile und Biegekraft-Biegewinkel-Verläufe in Anlage 3

Für eine weitergehende Betrachtung ist es erforderlich, einen Zusammenhang zwischen dem Widerstandsmoment gegen Biegung und den mit der Biegevorrichtung erzielten Ergebnissen herzustellen. Ausgehend vom Widerstandsmoment gegen Biegung W_{bx} kann die maximale Biegekraft $F_{BU,max}$ unter Berücksichtigung der Fließspannung von AlMg3 nach Gl. (5.1) berechnet werden.

$$F_{BU,max} = \frac{4\sigma_F W_{bx}}{L_F} \quad (5.1)$$

σ_F - Fließspannung ($R_{p0,2} = 198 \text{ N/mm}^2$); L_F - Auflagerabstand

Unter der Annahme, daß sich die Biegeenergie aus dem Produkt von Biegekraft und Biegeweg ergibt und der bei der Biegung zurückgelegte Weg ein durch den Biegewinkel und den Auflagerabstand ($L_F/2$) definierter Kreisbogen ist, läßt sich die Biegeenergie nach Gl. (5.2) bestimmen.

$$W_{BU} = \pi\sigma_F W_{bx} \cdot \frac{\alpha_1}{180^\circ} \quad (5.2)$$

Wie aus Bild 5.10 hervorgeht, ergibt bereits diese einfache Modellrechnung eine gute Übereinstimmung mit den experimentell ermittelten Werten, obwohl zum einen keine über den Biegezug konstante Biegezugskraft vorliegt und zum anderen auch die Verfestigung des Materials während der plastischen Verformung unberücksichtigt bleibt. Auch das berechnete Widerstandsmoment gegen Biegung stellt nur einen Richtwert dar, da die Profile fertigungsbedingt von der berechneten Idealform abweichen (z. B. begrenzter Biegeradius) und sich das Widerstandsmoment während der Beanspruchung z. T. änderte. So konnte insbesondere bei den Profilen C und D beobachtet werden, daß sich die Flanken beim Biegen aufweiteten und sich die Profile somit dem Widerstandsmoment des einfachen Bleches annäherten. Das erklärt auch den deutlichen Abfall der Biegezugskraft und die Abweichung zur Modellrechnung bei beiden Profilen.

Die an der Modell-Zerkleinerungsapparatur beobachteten komplexen und zeitlich veränderlichen Verformungsvorgänge können mit der einfachen Biegevorrichtung aber nur eingeschränkt nachvollzogen werden, so daß die durchgeführten Versuche nur einen ersten Anhaltspunkt für die in Rotorscheren und Rotorreißern aufzuwendenden Verformungsenergien in Abhängigkeit von der Größe und der Gestalt des Biegequerschnitts ergeben.

Reibungsvorgänge

Zusätzlich zum Einzugs-, Zerkleinerungs- und Verformungsvorgang treten z. T. intensive Reibungsvorgänge auf, die wesentlich zum Gesamtenergiebedarf von Rotorscheren und Rotorreißern beitragen. Es lassen sich drei Reibungsanteile voneinander unterscheiden:

- Reibung zwischen Rotor und Stator (einrotorige Bauarten) oder den sich überdeckenden Rotoren (mehrrotorige Bauarten) infolge einer elastischen Vergrößerung bzw. Verringerung des axialen Spaltes während der Beanspruchung
- Reibung infolge der Relativbewegung zwischen dem zu zerkleinernden Material und der Rotorscheibe bzw. dem Rotormesser beim Einzugs- und Zerkleinerungsvorgang
- Reibung infolge der Bruchstückabstreifung an den Statorelementen bzw. Rotorscheiben

Die beiden ersten Reibungsanteile sind eng mit dem Einzugs-, Zerkleinerungs- und Verformungsvorgang verbunden, so daß sie im Rahmen dieser Arbeit nicht getrennt voneinander untersucht werden konnten. Dagegen wirkt sich der mit der Bruchstückabstreifung verbundene Reibungsanteil im wesentlichen erst nach dem Bruch aus, indem die elastischen Verformungen zurückgehen und sich das Bruchstück zwischen den begrenzenden Stator- bzw. Rotorelementen verklemmt. Die Bruchstücke müssen demzufolge durch die Rotorwerkzeuge oder spezielle Abstreifer entfernt werden. In den Leistungs-Zeit-Verläufen (Bild 5.8a, z. B. $\beta_{ZE} = 55^\circ$) ist dieser Abstreifvorgang daran zu erkennen, daß die Leistung nicht unmittelbar nach dem Bruch auf das Leerlaufniveau zurückgeht. Die Untersuchungen mit der Rotor-Stator-Anordnung (Rotorscheregeometrie RS2) zeigen, daß bei einer geringen Bruchstückverformung ($\beta_{ZE} = 0 \dots 17^\circ$) der Energieanteil für die Abstreifung vernachlässigbar klein ist. Dagegen erweisen sich stark verformte und insbesondere die zusätzlich gewölbten Bruchstücke als nachteilig. Unter Berücksichtigung des Energiebedarfs für die Bruchstückabstreifung würden die in Bild 5.8b angegebenen bruchflächenbezogenen Beanspruchungsenergien bei Messereingriffswinkeln $\geq 29^\circ$ um 30 bis 40% zunehmen.

5.1.2 Untersuchung der Vorgänge bei der Beanspruchung zwischen zwei Rotoren

Analog zur Rotor-Stator-Anordnung soll im folgenden zunächst der Einzugs- und Zerkleinerungsvorgang geschildert werden, bevor auf die überlagerten Reibungs- und Verformungsprozesse eingegangen wird.

Einzugs- und Zerkleinerungsvorgang

Der Einzugs- und Zerkleinerungsvorgang bei der zweirotorigen Rotorscherngeometrie gliedert sich in zwei Hauptabschnitte:

- eine kontinuierliche Zerkleinerung an den Seitenkanten der Rotorscheiben und der Rotormesser durch eine zweiseitige Scherbeanspruchung im axialen Spalt und
- eine diskontinuierliche Zerkleinerung an der Frontschneide der Rotormesser durch eine Reißbeanspruchung im radialen Spalt.

Die im einzelnen ablaufenden Vorgänge sind schematisch in Bild 5.11 dargestellt. Der Schervorgang im axialen Spalt findet zunächst nur im Kreuzungspunkt der sich überdeckenden Rotorscheiben statt (a). Im weiteren Verlauf werden die sich bildenden Streifen an der Stirnseite der Rotorscheiben abgedrängt und leicht verformt. Das Rotormesser bewirkt anfangs nur eine Biegeumformung des Materials, wobei der Probekörper im Kreuzungspunkt einseitig eingespannt ist. Am Ende der Biegung liegt der Probekörper auf den gegenüberliegenden Rotorscheiben auf (c), die ähnlich der Rotor-Stator-Anordnung als Stator wirken (s. Bild 5.3). Die Rotormesserfrontschneide bewirkt das Einreißen des Materials (b). Im Anschluß daran setzt die Scherbeanspruchung entlang der Seitenkanten des Rotormessers in Verbindung mit einer starken Verformung ein. Nach dem Abscheren des restlichen Materials an der Übergangsstelle von Rotormesser und Rotorscheibe liegt das Bruchstück frei vor. In gleicher Weise vollzieht sich der Zerkleinerungsvorgang an den gegenüberliegenden Rotorscheiben (c, d).

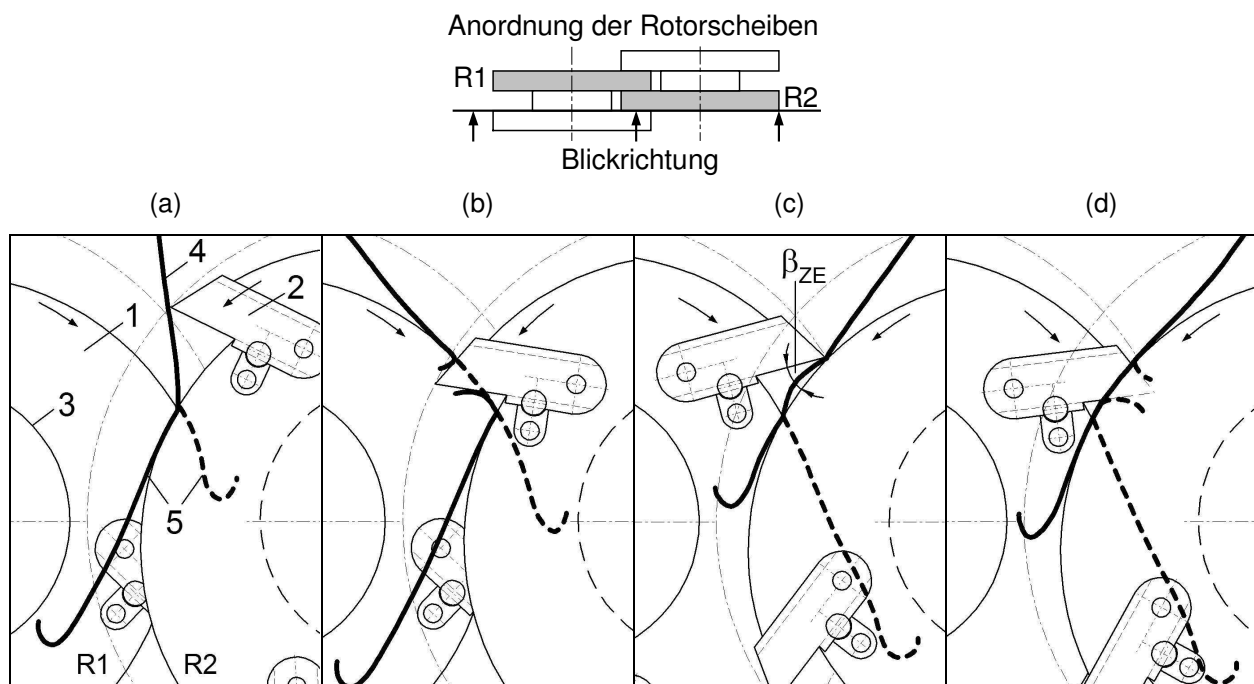


Bild 5.11: Zerkleinerungsvorgang eines AlMg3-Blechtes in einer zweirotorigen Rotorschere

(a) und (c) Biegeumformung durch das Rotormesser und beidseitige Scherbeanspruchung an den Seitenkanten der Rotorscheiben; (b) und (d) Durchbruch und Abscheren an den Seitenkanten des Rotormessers; β_{ZE} - Messereingriffswinkel; 1 - Rotorscheibe; 2 - Rotormesser; 3 - Distanzring; 4 - Probekörper; 5 - Entstehende Bruchstücke

Bei der Zerkleinerung an den Rotormessern können sich sehr komplexe Beanspruchungen ergeben, wenn die gegenüberliegenden Rotormesser gleichzeitig in den Probekörper eingreifen und dieser dadurch nicht bis zur Auflage auf den Rotorscheiben gebogen werden kann. Die Reißbildung und -ausbreitung erfolgt dann zwischen den Rotormessern bei intensiver Biegung und Torsion durch eine Reißbeanspruchung.

Der kontinuierliche Einzug des Materials wird sowohl durch die an der Stirnseite der Rotorscheiben wirkende Reibungskraft als auch durch die einziehende Wirkung der Rotormesser nach dem Durchbruch (Einreißen) gewährleistet. Im Vergleich zum Rotor-Stator-System ergeben sich insgesamt günstigere Einzugsbedingungen, die einen ausgedehnten Schervorgang an den Seitenkanten der Rotorscheibe zur Folge haben. Dadurch entstehen Bruchstücke mit einem großen Länge/Breite-Verhältnis (s. Kap. 6.1.1).

Um die einziehende Wirkung der Rotorscheiben (ohne Rotormesser) abzuschätzen, können die in Tabelle 2.6 zusammengestellten Beziehungen genutzt werden. Da die Rotorscheiben im Gegensatz zu den Kreismesserschern keine kreisrunde Kontur aufweisen, ergeben sich wechselnde Einzugsbedingungen. Aus Bild 5.12a geht hervor, daß mit der zweirotorigen Modell-Zerkleinerungsapparatur ohne Mitwirkung der Rotormesser ein selbständiger Einzug bestenfalls einsetzt, wenn der Reibungskoeffizient den Wert 0,3 übersteigt. Die günstigeren Einzugsbedingungen ergeben sich jeweils unterhalb des Rotormessers ($D_{\min}$). Entsprechend der Rotorscheibenkontur steigt der Durchmesser der Rotorscheibe danach wieder an ($D_{\max}$), wodurch sich die Einzugsbedingungen deutlich verschlechtern. Demzufolge ist ein kontinuierlicher Einzug nur durch die Rotorscheiben erst bei Reibungskoeffizienten von mehr als 0,7 möglich. Eine exakte Bestimmung der sich für die Versuchsmaterialien ergebenden Reibungskoeffizienten war aufgrund der komplexen Beanspruchungsverhältnisse nicht möglich, so daß nur Orientierungswerte zugrunde gelegt werden können. Die Reibungskoeffizienten sind von einer Vielzahl von Einflußfaktoren, wie z. B. der Materialpaarung, der Oberflächenrauigkeit, der Temperatur, der Feuchtigkeit und der Flächenpressung, abhängig. Für die Materialpaarungen Stahl/Aluminium ergeben sich praktische Gleitreibungskoeffizienten von ca. 0,4 ... 0,8 und für Stahl/Polypropylen ca. 0,2 bis 0,4 [112] [113]. Geht man von mittleren Werten aus, wäre ein selbständiger

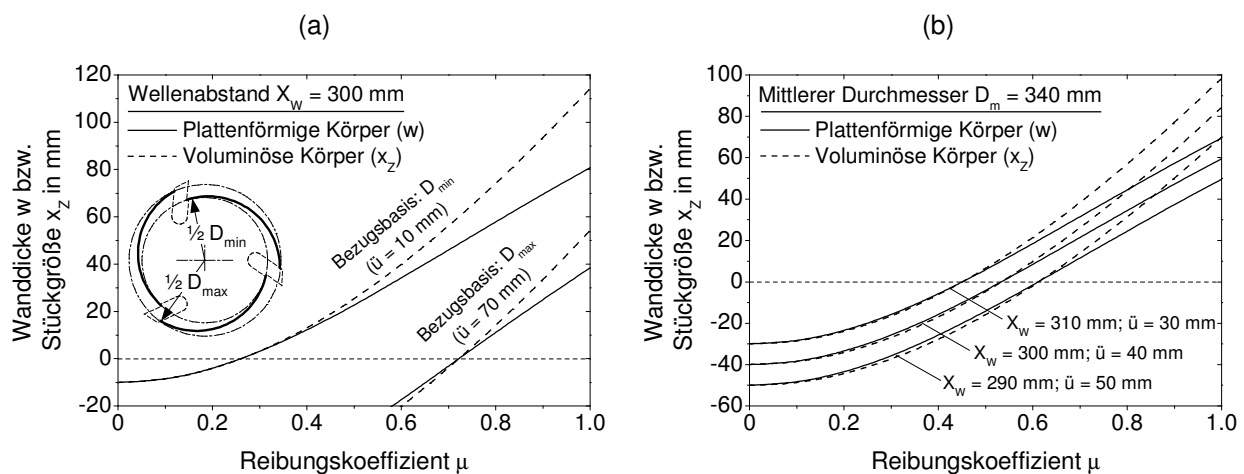


Bild 5.12: Mit der zweirotorigen Modell-Zerkleinerungsapparatur theoretisch einziehbare Probekörper bei mit der Rotorscheibenkontur wechselnden Einzugsbedingungen (a) und bei mittleren Einzugsverhältnissen in Abhängigkeit von der Rotorscheibenüberdeckung (b)

D - Rotorscheibendurchmesser; X_W - Wellenabstand; $\bar{u}$ - Überdeckung;

Standardrotorscheibe ohne Rotormesser (s. Anlage 5/2): $D_{\min} = 310$ mm; $D_{\max} = 370$ mm; $D_m = 340$ mm

Einzug dünnwandiger Aluminiumbleche im Grenzbereich denkbar. Ein selbständiger Einzug von Polypropylen-Platten ist dagegen nicht zu erwarten. Die Einzugsbedingungen können mit der Vergrößerung des Wellenabstandes bzw. der Verringerung der Rotorscheibenüberdeckung deutlich verbessert werden (Bild 5.12b).

Die Modellrechnung zeigt, daß für einen sicheren Materialeinzug die Rotormesser selbst bei plattigen Aufgabegütern unerläßlich sind. Für den Einzug des plattenförmigen Materials ist der Durchbruch der Rotormesserfrontschneide (Bild 5.11b) entscheidend, da das Material in diesem Augenblick kurzzeitig eingespannt ist und der Bewegung des Rotors folgen muß. Erst nach dem Abscheren des seitlichen Materialstegs wird das Material wieder freigegeben. Bei einer großen Anzahl versetzt angeordneter Rotormesser ergibt sich somit in mehrrotorigen Rotorscheren ein kontinuierlicher Materialeinzug.

Im Fall der voluminösen Aufgabestücke besteht die Aufgabe der Rotormesser darin, das Material so zu erfassen, daß es während der Beanspruchung nicht entweichen kann. Günstige Einzugsbedingungen ergeben sich, wenn das Material durch die Rotormesser der gegenüberliegenden Rotoren eingeschlossen wird. Dagegen sind die Einzugsbedingungen bei nur einseitigem Eingriff des Rotormessers deutlich schlechter (Anlage 8/2). Ein Einzug ist meist erst dann möglich, wenn ein Großteil des Materialquerschnitts durch die Rotormesser eingeschlossen wird.

Die weitere Beanspruchung bewirkt entweder eine Verdichtung des hohlraumhaltigen, voluminösen Körpers bis zu einer annähernd plattenförmigen Gestalt, oder es kommt durch Bruchvorgänge zur Bildung kleinerer Stücke. In beiden Fällen wird der sich anschließende Einzugsvorgang erleichtert. Für den Einzug von sehr voluminösen Aufgabestücken, wie z. B. Fässern, Behältern oder Lkw-Reifen, werden meist Zusatzvorrichtungen in Form von Schiebern, Schwenkarmen oder Zuführwalzen eingesetzt, die eine Zwangszuführung realisieren.

Verformungs- und Reibungsvorgänge

Die Verformungsvorgänge bei der zweirotorigen Anordnung sind prinzipiell mit den bei der Rotor-Stator-Anordnung auftretenden Vorgängen vergleichbar. Für die Bruchstückverformung bei der Zerkleinerung am Rotormesser ist ebenfalls der Messereingriffswinkel entscheidend. Je nach Stellung der gegenüberliegenden Rotorscheibe und des Wellenabstandes variiert der Messereingriffswinkel zwischen 30 und 60° und liegt somit in einem Bereich, der eine starke Bruchstückverformung bedingt. Bei der zweirotorigen Modell-Zerkleinerungsapparatur wurde zudem der Probekörper nicht mit einer speziellen Einspannvorrichtung fixiert, so daß sich im Wirkungsbereich des Rotormessers zunächst auch eine Wölbung des Materials einstellt, bevor die Messerbewegung das Einrollen bewirkt (s. Bild 5.9). Der Schervorgang an den Rotorscheibenkanten verläuft dagegen verformungsarm.

Intensive Reibungsvorgänge treten insbesondere im größeren Überdeckungsbereich der Rotoren während der Zerkleinerung und der Abstreifung der Bruchstücke auf. Da bei der zweirotorigen Modell-Zerkleinerungsapparatur eine kontinuierliche Zerkleinerung erfolgt, läßt sich zudem der Energieanteil für die Bruchstückabstreifung nicht vom Einzugs- und Zerkleinerungsvorgang abgrenzen. Der Anteil der Reibung am Gesamtenergiebedarf der Rotor-Rotor-Anordnung nimmt daher im Vergleich zur Rotor-Stator-Anordnung einen wesentlich größeren Stellenwert ein.

5.2 Einflußgrößen auf die Zerkleinerung in Rotorscheren und Rotorreißern

Die Zerkleinerung in Rotorscheren und Rotorreißern wird von außerordentlich vielen Faktoren beeinflusst. Im folgenden wird der Einfluß wesentlicher konstruktiver, stoffbedingter und betriebstechnischer Einflußgrößen diskutiert.

5.2.1 Einfluß der Beanspruchungsgeometrie

Die Beanspruchungsgeometrie bestimmt maßgeblich die wirkenden Beanspruchungsarten, die Intensität der Verformungs- und Reibungsprozesse, den Energiebedarf sowie das entstehende Zerkleinerungsprodukt. Durch die vereinfachten Beanspruchungsgeometrien der ein- und zweiseitigen Modell-Zerkleinerungsapparatur und des Schlagwerks konnte gezielt der Einfluß einzelner Parameter des Stators, der Rotormesser und der Rotorscheiben untersucht werden.

Gestaltung und Anordnung des Stators

Für die den Zerkleinerungsvorgang begleitenden Verformungsprozesse und den damit verbundenen Energiebedarf ist die Anordnung des Stators gegenüber dem Rotor von zentraler Bedeutung. Kennzeichnend für die geometrischen Verhältnisse zwischen Stator und Rotormesser ist der **Messereingriffswinkel**. Die Beanspruchungsbedingungen zwischen Rotorscheibe und Stator bzw. zwischen zwei Rotorscheiben können mit dem **Einzugswinkel** beschrieben werden (s. Bild 3.9). Im untersuchten Bereich von $\beta_{ZE} = 0 \dots 65^\circ$ besteht zwischen beiden Größen ein annähernd linearer Zusammenhang (Anlage 6/1).

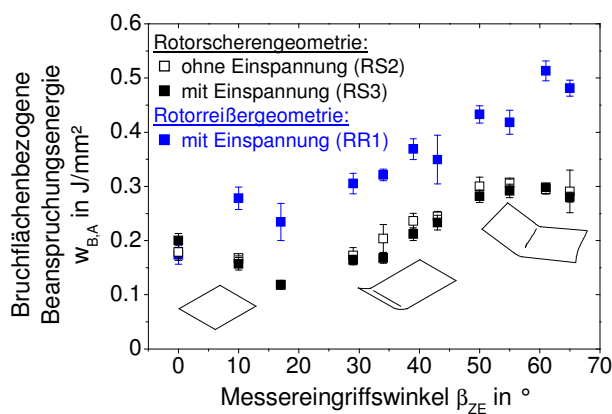


Bild 5.13: Auswirkung des Messereingriffswinkels und der Probekörpereinspannung auf die Bruchstückverformung und die bruchflächenbezogene Beanspruchungsenergie

Polypropylen; Wanddicke 5 mm; Beanspruchungsgeschwindigkeit 0,4 m/s; radiale Spaltweite > 10 mm;
Rotorschergeometrien: axiale Spaltweite 0,2 mm;
Rotorreißergeometrie: axiale Spaltweite 10 mm

Größere Messereingriffswinkel von mehr als 30° führen zu einer intensiven Bruchstückverformung, wodurch die bruchflächenbezogene Beanspruchungsenergie signifikant ansteigt (Bild 5.13 und s. Bild 5.8). Während bei den dünnwandigen AlMg3 die Verformungsprozesse (Wölbung, Einrollen) eine bleibende Formänderung der Bruchstücke verursachen, vollziehen sich bei dem dickwandigen Polypropylen insbesondere reversible Formänderungen. Sowohl die Wölbung des Materials bei fehlender Einspannung als auch das Einrollen unterhalb des Rotormessers tritt nicht auf. Nur die intensive Biegung an der Übergangsstelle von Rotorscheibe und Rotormesser hinterläßt eine sichtbare Verformung des Bruchstückes. Die Einspannung des Polypropylens besitzt keinen Einfluß auf den Energiebedarf. Jedoch ist für die Zerkleinerung bei einer typischen Beanspruchungsgeometrie der Rotorreißer eine insgesamt höhere bruchflächenbezogene Beanspruchungsenergie nötig, was auf eine größere plastische Verformung des Polypropylens vor dem Bruch zurückzuführen ist (s. Einfluß der axialen Spaltweite).

Mit der Vergrößerung des Messereingriffswinkels bzw. einer Abnahme des Einzugswinkels läßt sich zugleich der Übergang zu den Beanspruchungsverhältnissen mehrrotoriger Rotorschern nachbilden. Bei geringem Messereingriffswinkel von $< 30^\circ$ erfolgt die Zerkleinerung nur zwischen Rotormesser und Stator, wobei der Schervorgang im axialen Spalt überwiegt (Bild 5.14). Die Rotorscheibenseitenkanten sind aufgrund des annähernd rechtwinkligen Einzugswinkels nicht an der Zerkleinerung beteiligt. Erst bei kleineren Einzugswinkeln und in Verbindung mit dem Eingreifen des Rotormessers vollzieht sich ebenfalls eine Zerkleinerung an den Seitenkanten der Rotorscheibe. Bei mehrrotorigen Rotorschern ist infolge der günstigen Einzugsverhältnisse der Anteil der Rotorscheibe an der Zerkleinerung mit ca. 60 bis 70 % bestimmend. Am Rotor-Stator-System setzt ein selbständiger Einzug des Probekörpers bei Messereingriffswinkeln von $> 60^\circ$ ein, was hauptsächlich auf die einziehende Wirkung des Rotormessers und weniger auf die Einzugsverhältnisse an der Rotorscheibe zurückzuführen ist.

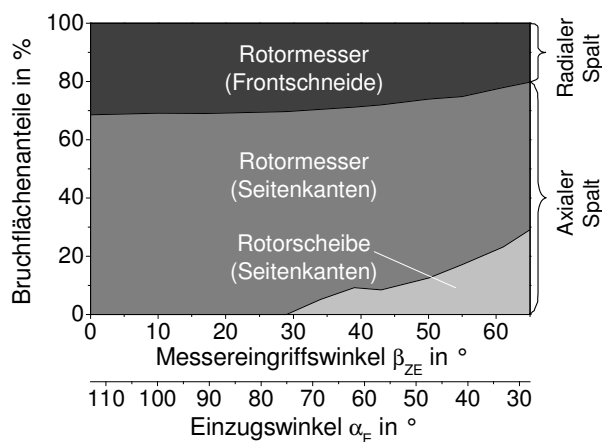


Bild 5.14: Anteile der wirksamen Beanspruchungszonen des Rotors in Abhängigkeit von der Statoranordnung

AlMg3; Wanddicke 1 mm; Rotorschergeometrie RS3; axiale Spaltweite 0,2 mm; radiale Spaltweite > 10 mm; Beanspruchungsgeschwindigkeit 0,4 m/s

Neben der Bruchstückverformung nimmt auch die Stückgröße, d. h. die Bruchstücklänge a_{st} , mit steigendem Messereingriffswinkel zu (Bild 5.15). Erfolgt die Zerkleinerung nur durch das Rotormesser, entstehen Bruchstücke, die den Abmessungen des Rotormessers entsprechen. Mit Einsetzen der Zerkleinerung an den Seitenkanten der Rotorscheibe nimmt die Bruchstücklänge deutlich zu.

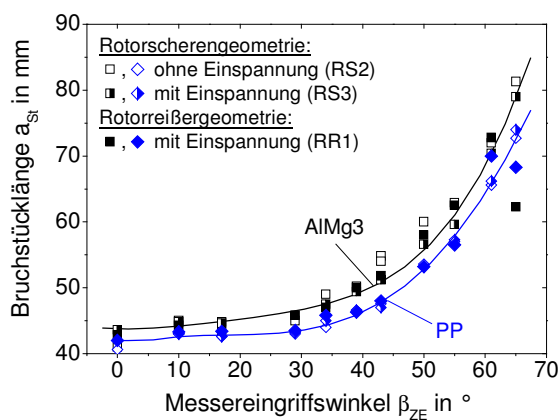


Bild 5.15: Zusammenhang zwischen dem Messereingriffswinkel und der Stückgröße des gedanklich unverformten Bruchstückes

Wanddicke 1 (AlMg3) bzw. 5 mm (PP); Beanspruchungsgeschwindigkeit 0,4 m/s; radiale Spaltweite > 10 mm; Rotorschergeometrien: axiale Spaltweite 0,2 mm; Rotorreißergeometrie: axiale Spaltweite 10 mm

Mit größer werdender **axialer Spaltweite** ändert sich die im axialen Spalt wirkende Beanspruchungsart von einer Scher- zu einer Reißbeanspruchung. Gleichzeitig nehmen die während der Zerkleinerung und beim Abstreifen des Bruchstücks auftretenden Reibungsvorgänge ab. Sowohl der Wechsel der Beanspruchungsart als auch die Abnahme der Reibungsverluste wirken sich auf

die erforderliche bruchflächenbezogene Beanspruchungsenergie aus. Der Energiebedarf für die Zerkleinerung von AlMg3 und Polypropylen verändert sich jedoch nicht einheitlich. Die Zerkleinerung der AlMg3-Probekörper (Bild 5.16a) unter Beanspruchungsbedingungen, die nur relativ gering verformte Bruchstücke hervorrufen, zeigt keinen signifikanten Einfluß der axialen Spaltweite auf die bruchflächenbezogene Beanspruchungsenergie. Demgegenüber ist bei einer starken Bruchstückverformung der Übergang zu größeren axialen Spaltweiten energetisch günstiger, da der Verformungsvorgang aufgrund der geringeren Reibungsanteile erleichtert wird. Des weiteren entfällt bei größeren Spaltweiten der Abstreifvorgang des Bruchstückes an den begrenzenden axialen Statorelementen.

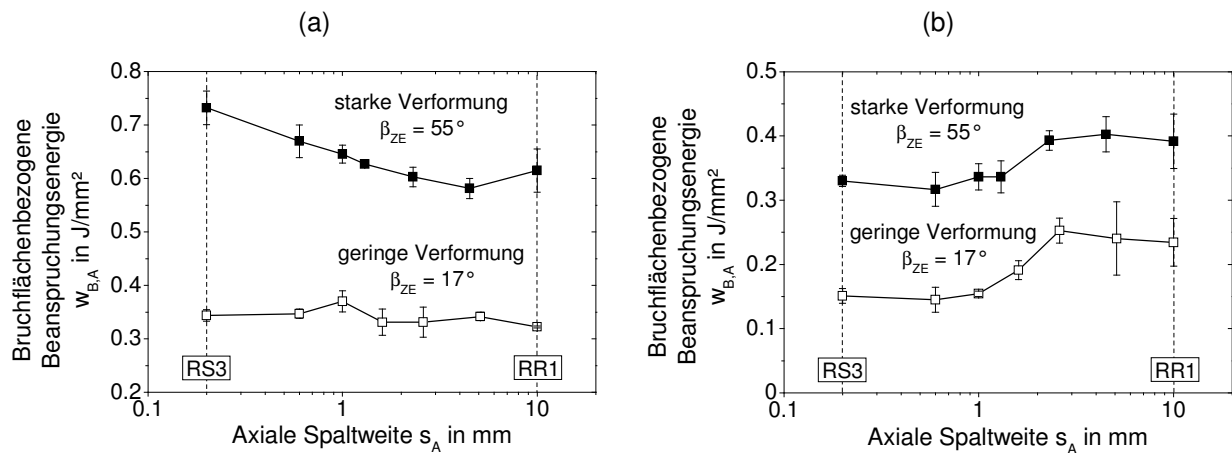


Bild 5.16: Einfluß der axialen Spaltweite auf die bruchflächenbezogene Beanspruchungsenergie bei der Zerkleinerung von AlMg3 (a) und Polypropylen (b)

RS3 - Rotorschergeometrie RS3; RR1 - Rotorreißergeometrie RR1; Wanddicke 1 (AlMg3) bzw. 5 mm (PP); radiale Spaltweite > 10 mm; Beanspruchungsgeschwindigkeit 0,4 m/s

Bei der Zerkleinerung von Polypropylen (Bild 5.16b) tritt mit zunehmender axialer Spaltweite eine starke Verformung des Materials in der Bruchregion auf. Infolgedessen steigt sowohl bei einem geringen als auch bei einem großen Messereingriffswinkel der Energiebedarf signifikant an. Bei einer höheren Beanspruchungsgeschwindigkeit am Schlagwerk zeigen sich die gleichen Tendenzen, wobei sich jedoch der Zähbruch infolge einer Reißbeanspruchung und der überwiegende Spröbruch infolge einer Biegebeanspruchung (Biegebrechen) überlagern (Anlage 8/3).

Der Einfluß der **radialen Spaltweite** auf die bruchflächenbezogene Beanspruchungsenergie ist im Vergleich zur axialen Spaltweite gering (s. auch Bild 5.27). Mit der Vergrößerung der radialen Spaltweite geht die Schneid-/Scherbeanspruchung in eine Reißbeanspruchung bei AlMg3 und eine kombinierte Reiß- und Biegebeanspruchung (Biegebrechen) bei Polypropylen über. Im Gegensatz zu einer großen axialen Spaltweite treten bei Polypropylen nur in den Randbereichen der Rotormesserschneide begrenzte plastische Verformungen auf. Daher steigt der Energiebedarf oberhalb von $s_R = 1$ mm nur geringfügig an.

Gestaltung der Rotormesser und Rotorscheiben

Aus den bisherigen Ausführungen ist deutlich geworden, daß die sich am Rotormesser vollziehenden Vorgänge für die gesamte Zerkleinerung in Rotorscheren und Rotorreißern von wesentlicher Bedeutung sind. Durch eine Veränderung der Gestalt der Rotormesser können sowohl die Stückgröße und die Verformung der Bruchstücke als auch der Energiebedarf für die

Zerkleinerung beeinflusst werden. Tabelle 5.1 gibt einen Überblick über die mit der Variation der einzelnen Rotormesserparameter verbundenen Auswirkungen auf das Zerkleinerungsergebnis.

Tabelle 5.1: Auswirkung der Rotormessergeometrie auf das Zerkleinerungsergebnis bei der Vergrößerung einzelner Parameter (Definition der Parameter s. Tabelle 3.3)

Parameter der Messergeometrie	Auswirkung auf			
	Stückgröße	Stückverformung	Bruchflächenbezogene Beanspruchungsenergie	Maximales Drehmoment
Rotormesserlänge	↑			
Rotormesser- bzw. Rotorscheibenbreite	↑		↑ ¹⁾	↑
Breite der Rotormesserfrontschneide				↑
Übergangsradius		↑↓ ²⁾	↑↓ ²⁾	

¹⁾ bei großem Messereingriffswinkel; ²⁾ abhängig vom Messereingriffswinkel

Die Stückgröße der Bruchstücke wird maßgeblich von den geometrischen **Abmessungen des Rotormessers**, d. h. dessen Breite und Länge, bestimmt. Bei der Zerkleinerung mit Geometrien, die denen der Rotorscheren entsprechen, sind die Abmessungen der Stücke infolge der geringen Spaltweiten zwischen Rotormesser und Stator unmittelbar vorgegeben. Aber auch bei den Rotorreißergeometrien findet die Rißausbreitung bevorzugt entlang der Rotormesserkanten statt, so daß die Abmessungen des Rotormessers die Stückgröße entscheidend bestimmen. Der Einfluß der Länge und Breite des Rotormessers auf die Bruchstückverformung und den bruchflächenbezogenen Energiebedarf ist im allgemeinen gering. Nur bei der Zerkleinerung von AlMg3 unter Bedingungen, die eine starke Bruchstückverformung hervorrufen (großer Messereingriffswinkel), ergibt sich mit steigender Rotormesserbreite ein höherer Energieaufwand, da gleichzeitig die Breite des zu verformenden Materialabschnitts zunimmt (Anlage 8/4).

Die **Rotormesserbreite** bzw. nur die **Breite der Rotormesserfrontschneide** beeinflusst die für den Einreißvorgang erforderlichen Kräfte. Bei einer schmalen Frontschneide wird die Rißbildung infolge der hohen Spannungskonzentration auf einen kleinen Bereich begünstigt. Dadurch werden auch die zur Rißeinleitung erforderlichen Kräfte verringert. An der Modell-Zerkleinerungsapparatur äußert sich dies in einer Verminderung des maximalen Drehmoments (Bild 5.17). Daher kann unter dem Gesichtspunkt einer großtechnischen Zerkleinerung mit der Anpassung der Rotormessergeometrie Einfluß auf die Belastung der Zerkleinerungsmaschine und die benötigte Antriebsleistung genommen werden.

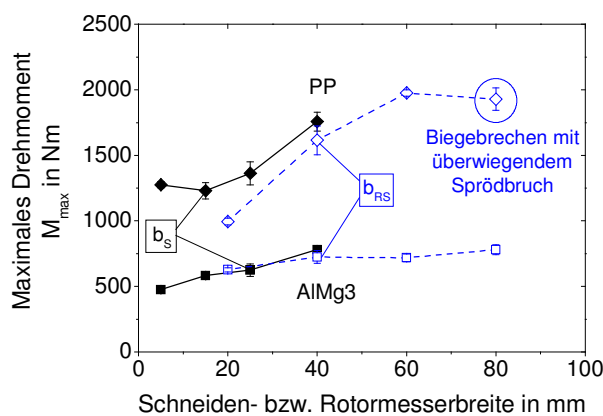


Bild 5.17: Zusammenhang zwischen der Breite der Rotormesserfrontschneide b_s bzw. der Rotormesserbreite b_{RS} und dem maximal auftretenden Drehmoment

Messereingriffswinkel 17° ; Beanspruchungsgeschwindigkeit 0,4 m/s; Rotorreißergeometrien RR1 und RR2: axiale Spaltweite 10 mm; radiale Spaltweite > 10 mm

Als wesentliche Einflußgröße auf den Energiebedarf für die Zerkleinerung und die Bruchstückverformung hat sich der **Übergangsradius** erwiesen. Durch den Wechsel von einer geradlinigen zu einer überwiegend kreisbogenförmigen Kontur der Rotormesserseitenkanten (s. Tabelle 3.3d) konnte ein harmonischerer Übergang vom Rotormesser zur Rotorscheibe erzielt werden, wodurch sich die unterhalb des Rotormessers vollziehenden Verformungsvorgänge änderten. Jedoch ergaben sich in Abhängigkeit von der Statorstellung bzw. dem Messereingriffswinkel unterschiedliche Tendenzen (Bild 5.18). Bei einer Statorstellung, die durch einen großen Messereingriffswinkel gekennzeichnet ist und zu einer erheblichen Bruchstückverformung führt, kommt es mit Vergrößerung des Übergangsradius zu einer deutlichen Verringerung der Verformungsprozesse und der damit verbundenen bruchflächenbezogenen Beanspruchungsenergie. Die Ursache dafür sind die sich während des Zerkleinerungsvorgangs verändernden Messereingriffs-

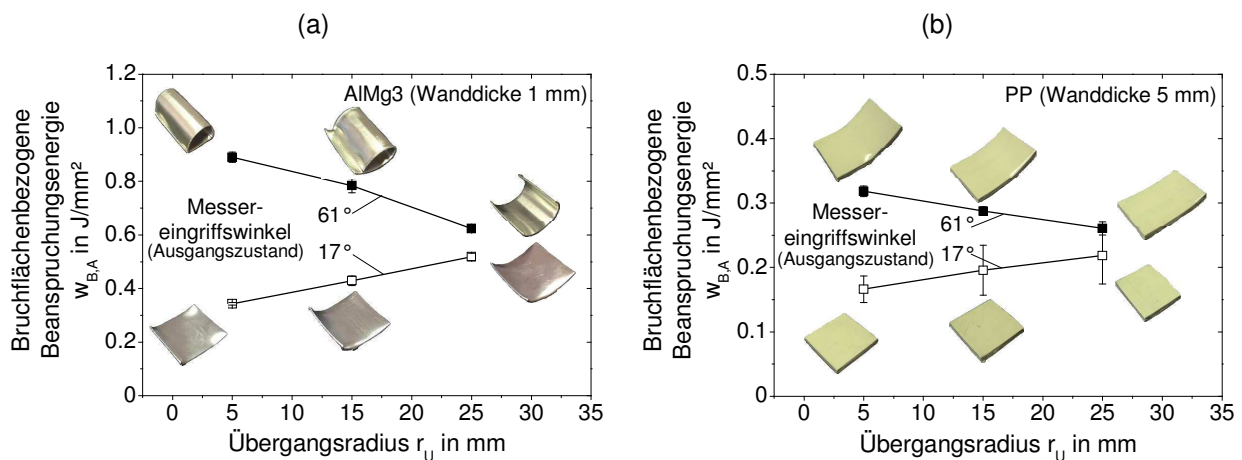


Bild 5.18: Einfluß des Übergangsradius auf die Bruchstückverformung und den Energiebedarf für die Zerkleinerung von AlMg3 (a) und Polypropylen (b)

Rotorschergeometrie RS3: axiale Spaltweite 0,2 mm; radiale Spaltweite > 10 mm; Beanspruchungsgeschwindigkeit 0,4 m/s

und Einzugswinkel (Anlage 8/5). Diese nehmen im Bereich des kreisbogenförmigen Übergangs kontinuierlich ab und erreichen beim Abscheren des letzten Materialrests ihr Minimum, wodurch die intensive Biegeumformung des Materials im Übergangsbereich von Rotormesser und Rotorscheibe verhindert wird. Liegen dagegen Beanspruchungsverhältnisse vor, wie sie den einrotorigen Rotorscheren entsprechen, d. h. ein geringer Messereingriffswinkel und kaum verformte Bruchstücke, so führt die Veränderung der Rotormesserkontur zu einer Verschlechterung des Zerkleinerungsergebnisses. Die Verformung der Bruchstücke und der damit verbundene Energiebedarf steigen mit zunehmendem Übergangsradius merklich an.

Durch die Ausbildung eines Übergangsradius kann insbesondere bei mehrrotorigen Rotorscheren ein energetischer Vorteil erzielt werden, da diese meist größere Messereingriffswinkel aufweisen. Die mit der zweirotorigen Modell-Zerkleinerungsapparatur durchgeführten Versuche bei verschiedenen Überdeckungszuständen der Rotoren bestätigen dieses Erkenntnis (Bild 5.19).

Bei mehrrotorigen Rotorscheren ist die **Überdeckung** der Rotorscheiben ein wesentlicher Einflußfaktor. Sie wirkt sich auf den Energiebedarf, das Einzugsverhalten und das Zerkleinerungsprodukt aus. Der Einfluß auf das Einzugsverhalten und das Zerkleinerungsprodukt ist Gegenstand von Kapitel 6. Die Auswirkungen auf den Energiebedarf für die Zerkleinerung plattenförmiger Probekörper zeigt Bild 5.19. Eine größere Überdeckung führt insbesondere bei der

Zerkleinerung von AlMg3 zu einem signifikanten Anstieg der bruchflächenbezogenen Beanspruchungsenergie, was einerseits auf die Veränderung der geometrischen Beanspruchungsverhältnisse und andererseits auf die ablaufenden Reibungsvorgänge zurückgeführt werden kann. Eine hohe Überdeckung der Rotorscheiben bewirkt eine stärkere Kreuzung der Rotorscheibenseitenkanten, wodurch intensivere Verformungsprozesse auftreten und sich ungünstigere Einzugsverhältnisse an den Rotorscheiben einstellen. Letztere verursachen eine stärkere Relativbewegung zwischen Probekörper und Rotorscheiben und höhere Reibungsverluste. Hauptsächlich dürften aber die Reibungsanteile, die während der Zerkleinerung und beim Abstreifen des gesicherten Materials im unmittelbaren Überdeckungsbereich entstehen, für den deutlichen Anstieg des Energiebedarfs verantwortlich sein. Vor allem die stärker verformten AlMg3-Bruchstücke verklemmen sich und müssen durch die Rotormesser abgestreift werden, wobei sich der Abstreifweg mit steigender Überdeckung entsprechend vergrößert.

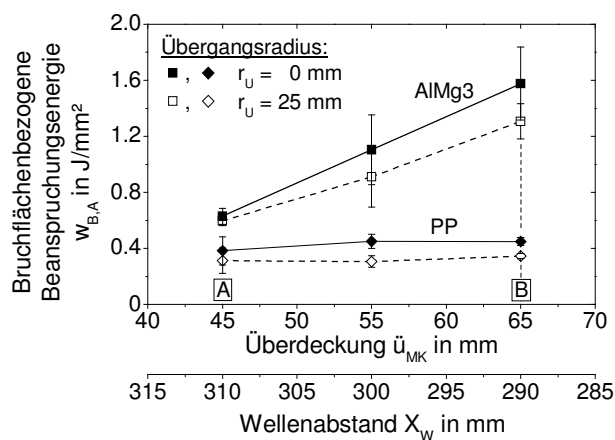


Bild 5.19: Einfluß der Überdeckung der Rotorscheiben auf die bruchflächenbezogene Beanspruchungsenergie bei der Zerkleinerung mit der zweirotorigen Modell-Zerkleinerungsapparatur (runde Gegenscheiben ohne Messer)

(A) Minimale Überdeckung bei der sich die Rotorscheiben gerade noch überdecken; (B) Maximale Überdeckung; Wanddicke 1 (AlMg3) bzw. 5 mm (PP); axiale Spaltweite 0,3 mm; Beanspruchungsgeschwindigkeit 0,4 m/s

5.2.2 Einfluß der Eigenschaften des Aufgabematerials

Aufgrund der zahlreichen Einsatzfelder der Rotorscheren und Rotorreißer weisen die zu zerkleinernden Abfälle und Schrotte eine außerordentlich große Vielfalt hinsichtlich ihrer Größe und Form sowie in ihren Stoffeigenschaften auf. Um den Einfluß dieser Faktoren auf die Vorgänge bei der Zerkleinerung und den damit verbundenen Energiebedarf untersuchen zu können, wurden plattenförmige und voluminöse Probekörper unterschiedlicher Werkstoffeigenschaften, Wanddicke, Größe und Form verwendet.

Ein für die Zerkleinerung in Rotorscheren und -reißern interessanter Bereich der mechanischen **Werkstoffeigenschaften** konnte durch die Versuche mit verschiedenen Aluminiumknetlegierungen untersucht werden. Ihre Charakterisierung erfolgte mittels Scher- und Zugversuchen (Kap. 4.3). Nutzt man die gewonnenen Werkstoffkennwerte zur Beurteilung der mit den Modell-Zerkleinerungsapparaturen untersuchten Zerkleinerungsvorgänge, ergibt sich in erster Linie eine allgemein mit der Festigkeit des Materials ansteigende Tendenz der bruchflächenbezogenen Beanspruchungsenergie (Bild 5.20). Nur im Fall der zweirotorigen Rotorschergeometrie kann aufgrund der stärkeren Streuung der Werte kein signifikanter Zusammenhang festgestellt werden. Die Ursache dafür ist der im Vergleich zu den einrotorigen Rotorschergeometrien höhere Reibungsanteil an der Zerkleinerung.

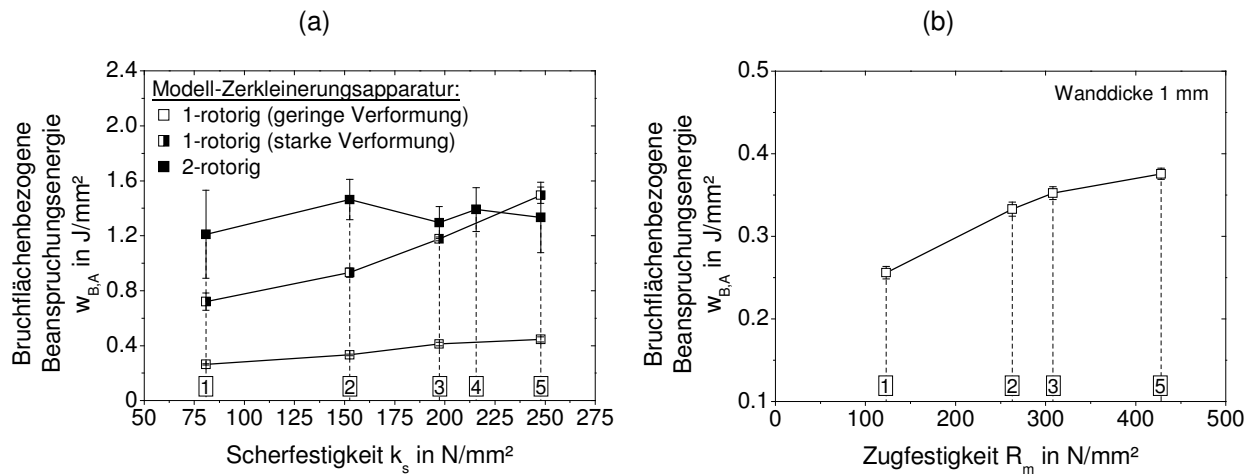


Bild 5.20: Zusammenhang zwischen der Scher- bzw. Zugfestigkeit und dem Energiebedarf für die Zerkleinerung von Aluminium bei typischen Beanspruchungsgeometrien der Axialspalt-Rotorscheren (a) und Rotorreißer (b)

(1) Al99.5; (2) AlMg3; (3) AlMg4.5Mn0.7; (4) AlMgSi1; (5) AlCu4MgSi; Wanddicke 1 mm; (a) Beanspruchungsgeschwindigkeit 0,4 m/s; Rotorschergeometrien: 1-rotorig: Geometrie RS3; Messereingriffswinkel 17° (geringe Verformung) bzw. 61° (starke Verformung); axiale Spaltweite 0,2 mm; radiale Spaltweite > 10 mm; 2-rotorig: Standardrotorschneiden; axiale Spaltweite 0,3 mm; Wellenabstand 300 mm; (b) Rotorreißergeometrie RR1: Messereingriffswinkel 17° (geringe Verformung); axiale Spaltweite 10 mm; radiale Spaltweite > 10 mm

Den Energiebedarf für die „ideale“ Scherbeanspruchung kennzeichnet die Scherenergie. Dagegen beschreibt die bei Rotorschergeometrien aufzuwendende Beanspruchungsenergie das Zusammenwirken mehrerer überlagerter Beanspruchungsvorgänge. Ein Vergleich beider Energien ergibt trotz dessen einen nahezu linearen Zusammenhang, der sich zugleich als unabhängig von der Wanddicke erweist (Bild 5.21). Der Anstieg der Geraden beschreibt den gegenüber der Scherbeanspruchung höheren Energiebedarf bei Rotorschergeometrien, welcher auf Verformungsvorgänge zurückzuführen ist, die unmittelbar mit der Zerkleinerung verbunden sind. Diese treten bei der Reißbildung im radialen Spalt (Einreißen) auf und resultieren aus der vom Idealzustand abweichenden Beanspruchungsgeometrie, wie z. B. den größeren Schneidkantenradien und Spaltweiten sowie der einfacheren Probekörpereinspannung. Bei einer intensiven Bruchstückverformung und der Zerkleinerung mit der zweirotorigen Modell-Zerkleinerungsapparatur ergibt sich ein höheres Energieniveau. Dieses resultiert aus den Reibungs- und Verformungsvorgängen, die der eigentlichen Zerkleinerung überlagert sind. Dazu zählen die Bruchstückverformung unterhalb des Rotormessers sowie Reibungsverluste infolge der Überdeckung, beim Einzug und bei der Bruchstückabstreifung.

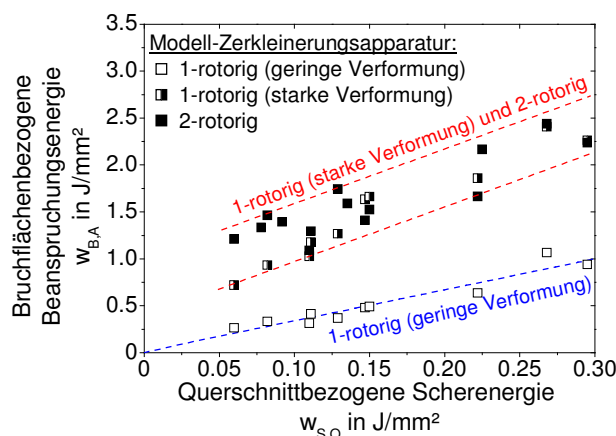


Bild 5.21: Zusammenhang zwischen der Scherenergie und der bruchflächenbezogenen Beanspruchungsenergie für die Zerkleinerung verschiedener Aluminiumwerkstoffe bei typischen Beanspruchungsgeometrien der Axialspalt-Rotorscheren

Wanddicke 1, 2 u. 5 mm; Beanspruchungsgeschwindigkeit 0,4 m/s; 1-rotorig: Rotorschergeometrie RS3; Messereingriffswinkel 17° (geringe Verformung) bzw. 61° (starke Verformung); axiale Spaltweite 0,2 mm; radiale Spaltweite > 10 mm; 2-rotorig: Standardrotorschneiden; axiale Spaltweite 0,3 mm; Wellenabstand 300 mm

Von den Abmessungen der plattenförmigen Probekörper besitzt nur die **Wanddicke** einen wesentlichen Einfluß auf die bruchflächenbezogene Beanspruchungsenergie. Der Energiebedarf für die Zerkleinerung von AlMg3 steigt annähernd linear mit der Wanddicke an, wobei die Ergebnisse der verschiedenen Beanspruchungsgeometrien eng beieinander liegen (Bild 5.22a). Dagegen ergeben sich bei der Zerkleinerung des dickwandigen Polypropylen deutliche Unterschiede, die auf eine stärkere plastische Verformung des Materials bei der Reißbeanspruchung zurückzuführen sind (Bild 5.22b).

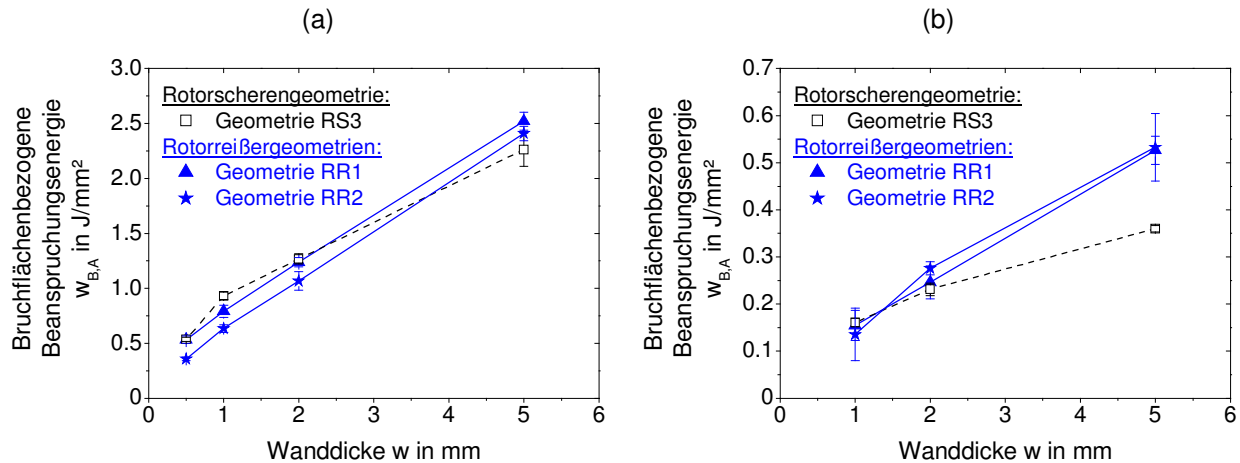


Bild 5.22: Einfluß der Wanddicke auf die Zerkleinerung von AlMg3 (a) und Polypropylen (b) bei typischen Beanspruchungsgeometrien der Axialspalt-Rotorschern und Rotorreißer

Beanspruchungsgeschwindigkeit 0,4 m/s; Messereingriffswinkel 61°; Rotorscherngeometrie: axiale Spaltweite 0,2 mm; radiale Spaltweite > 10 mm; Rotorreißergeometrien: axiale Spaltweite 10 mm; radiale Spaltweite > 10 mm

Vergleichbare Beziehungen bestehen bei den ein- und zweirotorigen Rotorscherngeometrien ohne Probekörpereinspannung (Bild 5.23). Insbesondere in diesen Fällen muß der Wanddicken-einfluß im engen Zusammenhang mit der Spaltweite betrachtet werden. Liegt die Wanddicke der Probekörper im Bereich des Scherspalt, wie z. B. bei den 0,5 mm dicken Probekörpern, so sind die Voraussetzungen für eine Scherbeanspruchung nicht mehr gegeben. Das Material wird in den Spalt eingezogen, wodurch die Reißbeanspruchung und Reibungsprozesse bestimmend werden. Die mit dem Übergang zur zweirotorigen Anordnung komplexer werdenden Reibungs- und Verformungsvorgänge bewirken bei fast jeder Wanddicke einen gegenüber dem Rotor-Stator-System höheren bruchflächenbezogenen Energiebedarf.

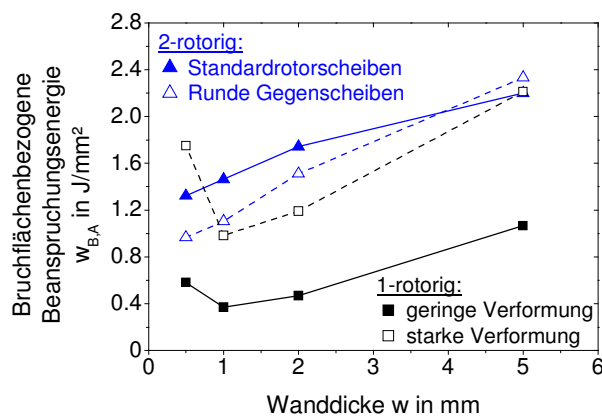


Bild 5.23: Einfluß der Wanddicke auf den Energiebedarf für die Zerkleinerung von AlMg3 bei der ein- und zweirotorigen Rotorscherngeometrie

Beanspruchungsgeschwindigkeit 0,4 m/s; 1-rotorig: Rotorscherngeometrie RS2; Messereingriffswinkel 17° (geringe Verformung) bzw. 61° (starke Verformung); axiale Spaltweite 0,2 mm; radiale Spaltweite > 10 mm; 2-rotorig: Standardrotorscheiben; axiale Spaltweite 0,3 mm; Wellenabstand 300 mm

Die **Stückform und Stückgröße** der voluminösen und hohlraumhaltigen Aufgabegüter wirkt sich zum einen auf den Einzugsvorgang aus, und zum anderen vollziehen sich vor der Zerkleinerung Verformungsprozesse, die eine Verdichtung verursachen (s. Kap. 5.1).

Sobald der hohlraumhaltige Probekörper von den Rotormessern erfaßt wird, unterliegt er einer Druckbeanspruchung, die eine Umformung hervorruft. Im einfachsten Fall findet wie bei der Zerkleinerung der Rohre im Vorfeld nur eine einfache Biegeumformung statt (Anlage 9). Der Energiebedarf für die Biegeumformung wird entscheidend vom Biegeweg und der Biegekraft beeinflusst. Mit steigendem Rohrdurchmesser ergibt sich infolge der günstigeren Hebelverhältnisse eine geringere Biegekraft. Jedoch nimmt gleichzeitig der Biegeweg deutlich zu. Im Ergebnis gleichen sich beide Effekte annähernd aus, so daß die Biegeumformung bei der Zerkleinerung der AlMgSi0.5-Rohre ca. 30 bis 40% des Gesamtenergiebedarfs einnimmt. Ein signifikanter Einfluß des Rohrdurchmessers auf die bruchflächenbezogene Beanspruchungsenergie konnte im Fall der AlMgSi0.5-Rohre nicht festgestellt werden (Bild 5.24).

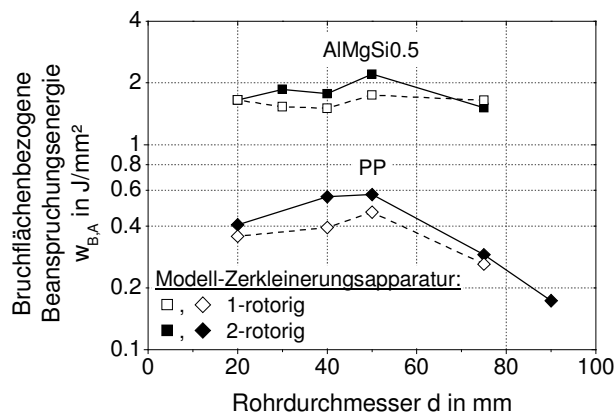


Bild 5.24: Bruchflächenbezogene Beanspruchungsenergie für die Zerkleinerung von Aluminium- und Polypropylen-Rohren mit der ein- und zweirotorigen Modell-Zerkleinerungsapparatur

Wanddicke 2 mm (AlMgSi0.5) bzw. 1,9 - 4,6 mm (PP); Beanspruchungsgeschwindigkeit 0,4 m/s;

1-rotorig: Rotorschergeometrie RS1; Messereingriffswinkel 17° ; axiale und radiale Spaltweite 0,2 mm;

2-rotorig: Standardrotorscheiben; axiale Spaltweite 0,3 mm; Wellenabstand 300 mm

Bei der Zerkleinerung der Polypropylen-Rohre konnte dagegen ein Wechsel der zum Bruch führenden Beanspruchungsarten verzeichnet werden. Rohre größeren Durchmessers beginnen zunehmend unter der Biegebeanspruchung verformungsarm zu brechen (Biegebrechen). Die bruchflächenbezogene Beanspruchungsenergie nimmt daher oberhalb von $d = 50$ mm deutlich ab.

Beinhalten die Aufgabestücke hohlraumbildende, dünnwandige Strukturen, die verstärkt parallel zur Beanspruchungsrichtung orientiert sind, so müssen diese zunächst unter der wirkenden Druckbeanspruchung geknickt werden, bevor der Verdichtungsprozess durch eine Biegung abgeschlossen werden kann. Ein besonders hoher Widerstand gegen Knickung ergibt sich bei kurzen, dickwandigen Abstützungen. Mit Zunahme der Biege- und Knickstellen im zu zerkleinernden Material steigt der Energiebedarf für die Umformung deutlich an (Anlage 10).

Der Verdichtungsprozess verläuft im Idealfall bis zur Ausbildung eines nahezu hohlraumfreien, plattenförmigen Körpers. Um diesen zerkleinern zu können, müssen gleichzeitig mehrere übereinanderliegende Materialsichten getrennt werden. Wie Versuche mit der Schervorrichtung zeigen, ist für die Zerkleinerung übereinanderliegender Schichten der gleiche Energiebetrag aufzuwenden wie für ein einzelnes Blech entsprechender Wanddicke (Bild 5.25). Der eigentliche Zerkleinerungsvorgang verdichteter Aufgabestücke verläuft analog zu den plattenförmigen Aufgabestücken. Der höhere Gesamtenergiebedarf für die Zerkleinerung voluminöser Materialien ist daher im wesentlichen auf den Energiebedarf für die Verdichtung zurückzuführen. Dieser wird weniger von dem Hohlraumvolumenanteil als von der Struktur und Anzahl der hohlraumbildenden Elemente beeinflusst.

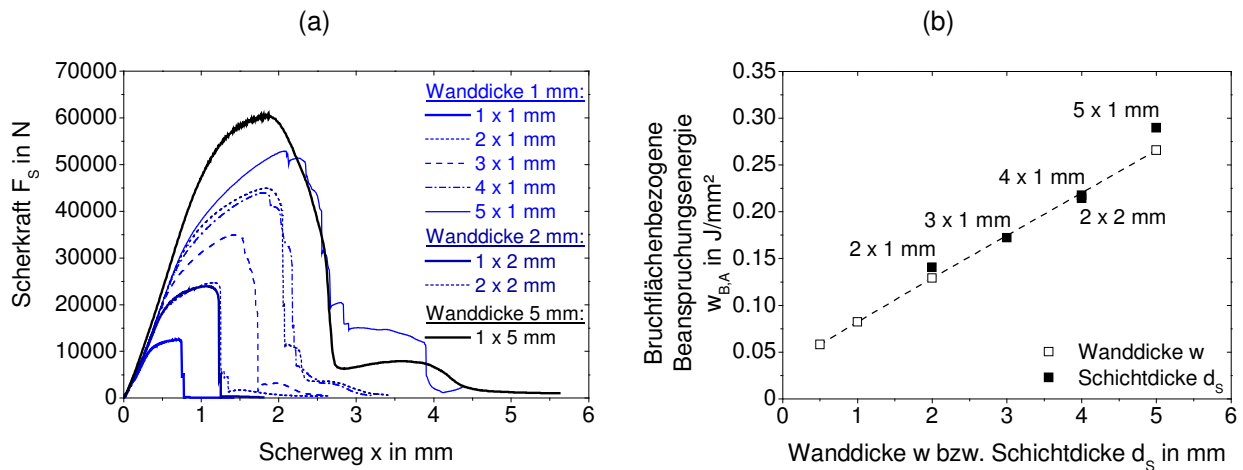


Bild 5.25: Einfluß der Anzahl der gleichzeitig zu scherenen AlMg3-Probekörper auf den Verlauf der Kraft-Weg-Kurven (a) und die bruchflächenbezogene Beanspruchungsenergie (b)

Schervorrichtung: AlMg3; Probekörperbreite 40 mm; Spaltweite 0,2 mm; Beanspruchungsgeschwindigkeit 2 mm/min

5.2.3 Einfluß der betriebsbedingten Einflußgrößen

Zu den betriebsbedingten Einflußgrößen zählen die Beanspruchungsgeschwindigkeit und der sich während des Betriebs einstellende Verschleißzustand der Zerkleinerungselemente.

Ein ausgeprägter **Verschleiß** tritt in Rotorscheren und Rotorreißern insbesondere an den Kanten der Zerkleinerungswerkzeuge des Rotors und des Stators auf. Um verschiedene Verschleißzustände nachempfinden zu können, wurden die Kanten der Rotor- und Statormesser mit definierten Schneidkantenradien versehen (s. Tabelle 3.4)

Aus den mit AlMg3 durchgeführten Versuchen (Bild 5.26a) wird zunächst deutlich, daß im unverschlissenen Zustand der Zerkleinerungswerkzeuge (A) kein Unterschied im bruchflächenbezogenen Energiebedarf zwischen der Rotorscheren- und der Rotorreißergeometrie besteht. Bei der Rotorschergeometrie führte auch der alleinige Verschleiß des Rotormessers, d. h. der Front- (B) und Seitenkanten (C), oder der Storkanten (D) zu keiner signifikanten Änderung der Energiewerte. Erst wenn beide Messer ausgeprägte Schneidkantenradien aufweisen (E), ergibt sich fast eine Verdopplung des Energiebedarfs. In diesem Verschleißzustand wird das Material an den Rotormesser- und Storkanten anfangs vergleichbar mit einem Tiefziehprozeß gebogen. Anschließend führt eine überwiegende Zugbeanspruchung zum Abreißen des Bruchstücks. Damit verbunden sind auch intensive Reibungsverluste im engen Spalt. Bei der Rotorreißergeometrie führt jeglicher Verschleiß zu einer Verschlechterung des Zerkleinerungsergebnisses, da sich das Material vor der Reißbildung infolge einer geringeren Spannungskonzentration im Bereich der Messerkanten stärker verformt.

Im Fall des Polypropylens (Bild 5.26b) führt eine Abweichung von scharfen Rotormesser- und Storkanten sowie die Vergrößerung der Spaltweite immer zu einer energetisch ungünstigeren Zerkleinerung. Dann treten intensive plastische Verformungen nahe der Schneidkanten auf, die bei einem stärkeren Verschleiß zunehmend größere Materialbereiche umfassen. Im ungünstigsten Fall, d. h. bei großen Schneidkantenradien und Spaltweiten (Geometrie RR1; (C)), beträgt der bruchflächenbezogene Energiebedarf fast das 4-fache im Vergleich zu den günstigeren Bedingungen bei der Rotorschergeometrie (Geometrie RS1; (A)).

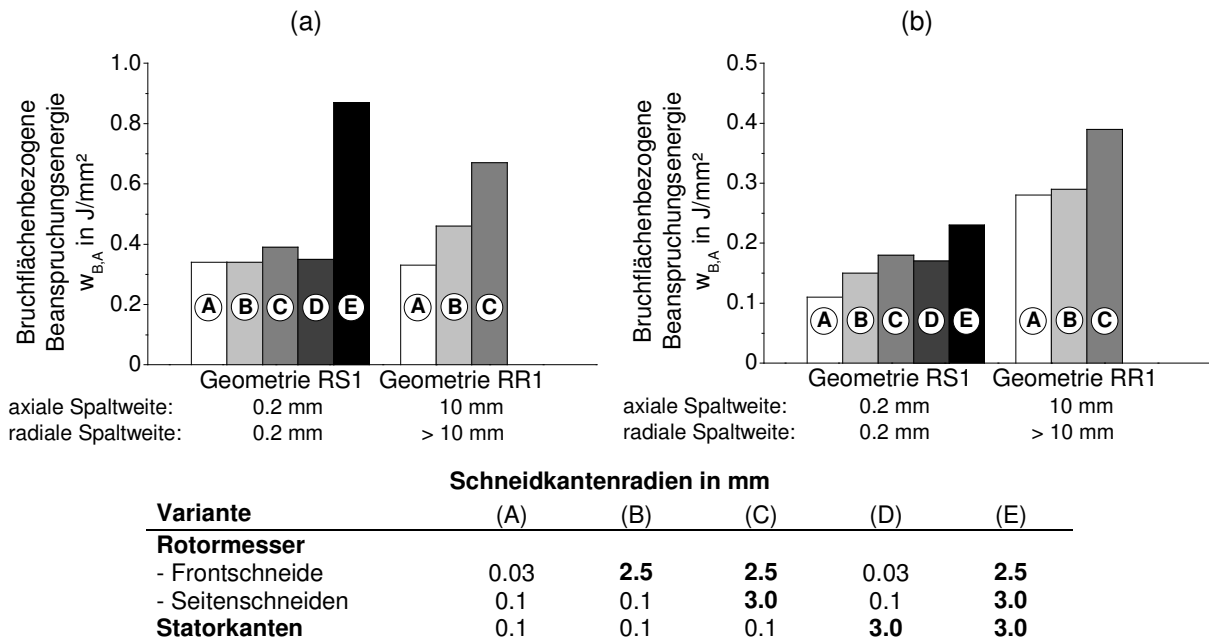


Bild 5.26: Einfluß des Verschleißzustandes von Rotormesser und Stator auf die bruchflächenbezogene Beanspruchungsenergie für die Zerkleinerung von AlMg3 (a) und Polypropylen (b) Wanddicke 1 mm (AlMg3) bzw. 5 mm (PP); Messereingriffswinkel 17°; Beanspruchungsgeschwindigkeit 0,4 m/s

Oft ist mit dem Verschleiß der Rotormesser auch eine Vergrößerung der Spaltweite verbunden. In Bild 5.27 sind die Auswirkungen einer größeren radialen Spaltweite auf die Beanspruchungsenergie für ein Rotormesser mit neuwertiger und verschlissener Frontschneide gegenübergestellt. Ausgehend von einer radialen Spaltweite von 0,2 mm würde sich bei einem Schneidkantenradius von 2,5 mm eine Spaltweite von 1,3 mm ergeben. Damit verbunden ist ein Wechsel der Beanspruchungsart im radialen Spalt von einer Scher- bzw. Schneidbeanspruchung zu einer Reißbeanspruchung. Hierbei führt der oben beschriebene nachteilige Effekt bei der Rißbildung zu einem höheren Energiebedarf. Auch im Fall des Polypropylen wirkt sich die bereits beschriebene Kombination von großer Spaltweite und großem Schneidkantenradius besonders ungünstig aus.

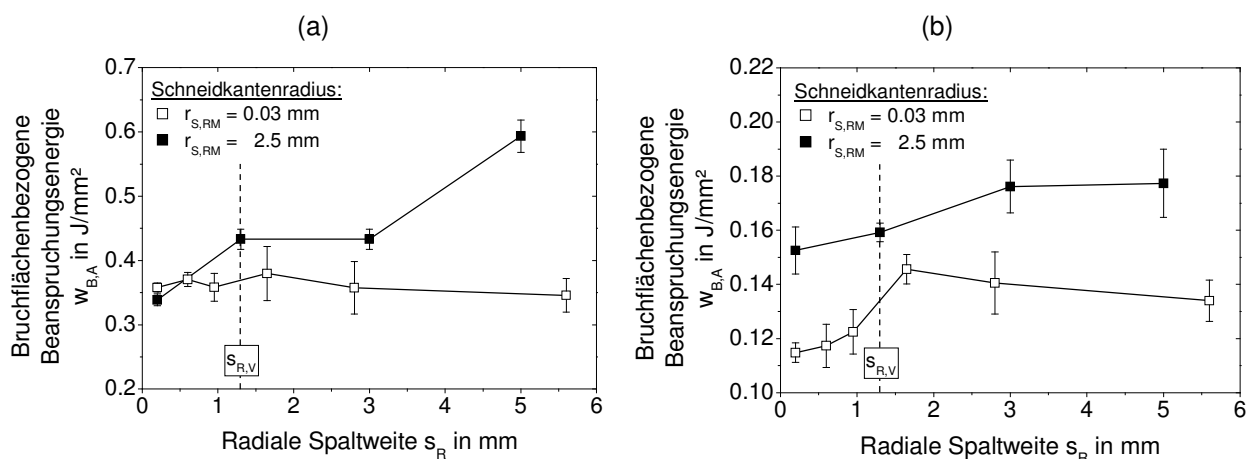


Bild 5.27: Einfluß der radialen Spaltweite und des Schneidkantenradius auf die bruchflächenbezogene Beanspruchungsenergie für die Zerkleinerung von AlMg3 (a) und Polypropylen (b)

$s_{R,V}$ - Spaltweite, die sich ausgehend von 0,2 mm im verschlissenen Zustand ergibt ($s_{R,V} = 1,3$ mm); Wanddicke 1 mm (AlMg3) bzw. 5 mm (PP); Rotorscherngeometrie RS1/RS2; Messereingriffswinkel 17°; axiale Spaltweite 0,2 mm; Beanspruchungsgeschwindigkeit 0,4 m/s; Schneidkantenradien der Rotormesserseitschneiden und der Statorkanten 0,1 mm

Als wichtiger Einflußfaktor auf die Zerkleinerung von Polypropylen erwies sich die **Beanspruchungsgeschwindigkeit**, die im Geschwindigkeitsbereich von 0,1 bis 5,5 m/s einen Wechsel im Verformungs- und Bruchverhalten bewirkt [114]. Der Einfluß auf die bruchflächenbezogene Beanspruchungsenergie geht aus Bild 5.28 hervor. Zunächst nimmt diese stark zu. Oberhalb von $v = 1$ m/s fällt der Energiebedarf ab, was auf die viskoelastischen Eigenschaften des Polypropylen zurückzuführen ist. Bei einer geringen Geschwindigkeit besitzt das Polypropylen ein zähes Stoffverhalten, wie die starken plastischen Verformungen der Bruchfläche bei $v = 0,1$ m/s verdeutlichen (Bild 5.29a). Mit Zunahme der Geschwindigkeit nimmt die Zeit für die lokalen Fließvorgänge der Makromoleküle ab. Die Festigkeit von Polypropylen und der damit verbundene Energiebedarf für die Zerkleinerung steigen an. Zugleich gehen die Verformungen auf der Bruchfläche zurück, zeigen aber bei 1 m/s noch Kennzeichen eines Gleitbruches (Bild 5.29b). Bei noch höheren Geschwindigkeiten können die Spannungsüberhöhungen an den Rißspitzen durch Relaxationsprozesse nicht mehr abgebaut werden. Das Bruchverhalten wird nun vordergründig durch das elastische Materialverhalten bestimmt, das mit der Ausbildung eines Spaltbruches verbunden ist (Bild 5.29c). Aufgrund des überwiegend spröden Stoffverhaltens nimmt der Energiebedarf bei höherer Geschwindigkeit wieder ab.

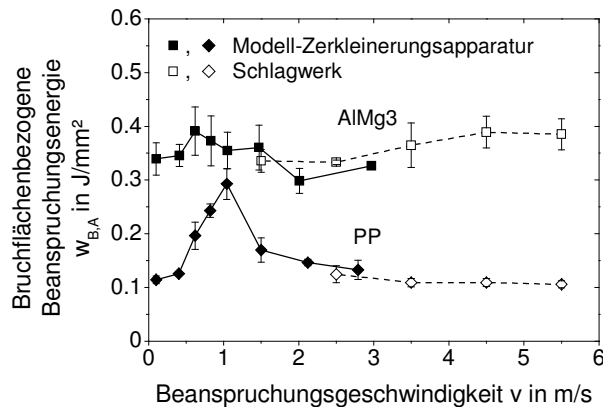


Bild 5.28: Einfluß der Beanspruchungsgeschwindigkeit auf das Zerkleinerungsverhalten von AlMg3 und Polypropylen

Wanddicke 1 mm (AlMg3) bzw. 5 mm (PP);
Modell-Zerkleinerungsapparatur: Rotorschergeometrie RS1; Messereingriffswinkel 17°; axiale und radiale Spaltweite 0,2 mm;
Schlagwerk: Rotorschergeometrie SW2; Rotormesser RM3; axiale Spaltweite 0,3 mm; radiale Spaltweite 20 mm

Aufgrund der zahlreichen Gleitebenen wird das Zerkleinerungsverhalten von AlMg3 in diesem Geschwindigkeitsbereich nicht beeinflusst. Sowohl die Ergebnisse mit der Modell-Zerkleinerungsapparatur als auch des Schlagwerks lassen aufgrund der stärkeren Schwankungen der Meßwerte keinen signifikanten Einfluß erkennen.

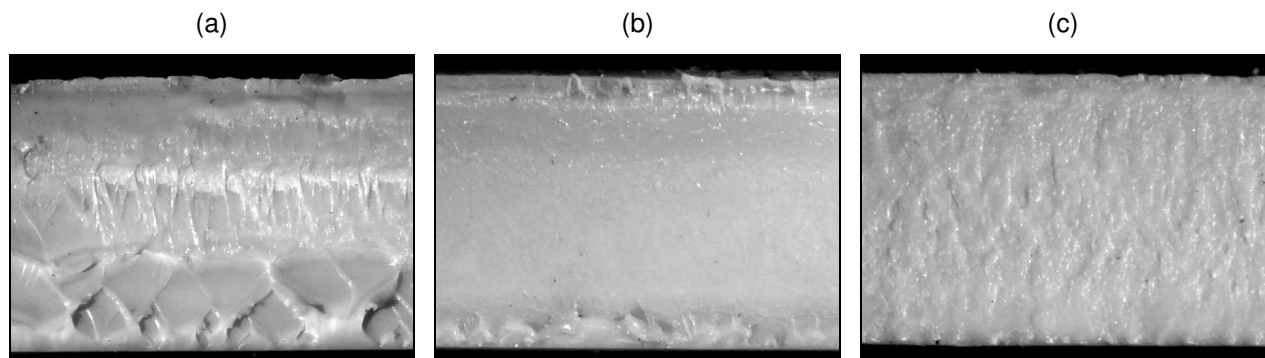


Bild 5.29: Ausbildung der Polypropylen-Bruchflächen, die an der Frontschneide des Rotormessers der Modell-Zerkleinerungsapparatur entstanden, in Abhängigkeit von der Beanspruchungsgeschwindigkeit; (a) 0,1 m/s; (b) 1,0 m/s; (c) 2,5 m/s

Ansicht der Bruchstücke; Rotormesserbewegung von oben nach unten;
Wanddicke 5 mm; Rotorschergeometrie RS1; Messereingriffswinkel 17°; axiale und radiale Spaltweite 0,2 mm

6 Untersuchung der Vorgänge in kleintechnischen Rotorschern und Rotorreißern

6.1 Zerkleinerung definierter Probekörper

Die Zerkleinerung definierter Probekörper bildet den Anschluß an die Untersuchungen mit der ein- und zwirotorigen Modell-Zerkleinerungsapparatur. Aufgrund der unterschiedlichen Zerkleinerungsräume werden die Rotorschern und -reißer getrennt voneinander diskutiert.

6.1.1 Zerkleinerung in ein- und zwirotorigen Rotorschern

Die Untersuchungen konzentrierten sich auf die Besonderheiten des Einzugs- und Zerkleinerungsvorganges beim Wirken mehrerer Zerkleinerungselemente, die Charakterisierung der entstandenen Zerkleinerungsprodukte hinsichtlich Stückgröße und -form sowie auf wesentliche Einflußfaktoren auf das Zerkleinerungsergebnis.

Einzugs- und Zerkleinerungsvorgang

Die Beanspruchungsgeometrie der **einrotorigen Rotorschere** ist analog zur Rotorschergeometrie RS1 der Modell-Zerkleinerungsapparatur durch geringe axiale und radiale Spaltweiten von 0,2 mm sowie einen geringen Messereingriffswinkel von 17° gekennzeichnet. Jedoch ergeben sich abweichend zu dieser Geometrie in der einrotorigen Rotorschere aufgrund der zwei unterschiedlichen Rotorscheiben auch zwei radiale Spalte, in denen eine Zerkleinerung stattfindet (Bild 6.1). Wie mit den Untersuchungen an der Modell-Zerkleinerungsapparatur aufgeklärt werden konnte (s. Kap. 5.1.1, Bild 5.1), beginnt der Zerkleinerungsvorgang durch eine Schneid- bzw. Scherbeanspruchung im engen radialen Spalt zwischen dem Rotormesser der größeren Rotorscheibe und dem Stator (1). Die weitere Rißausbreitung erfolgt im axialen Spalt durch eine Scherbeanspruchung (2), wodurch das erste Bruchstück entsteht. Anschließend kann der Probekörper entsprechend der Kontur der Rotorscheiben nachrutschen (b). Das an der Vorderkante des Stators überstehende Material wird schließlich durch die Rotormesser der kleinen Rotorscheiben infolge einer Schneid-/Scherbeanspruchung abgetrennt (3).

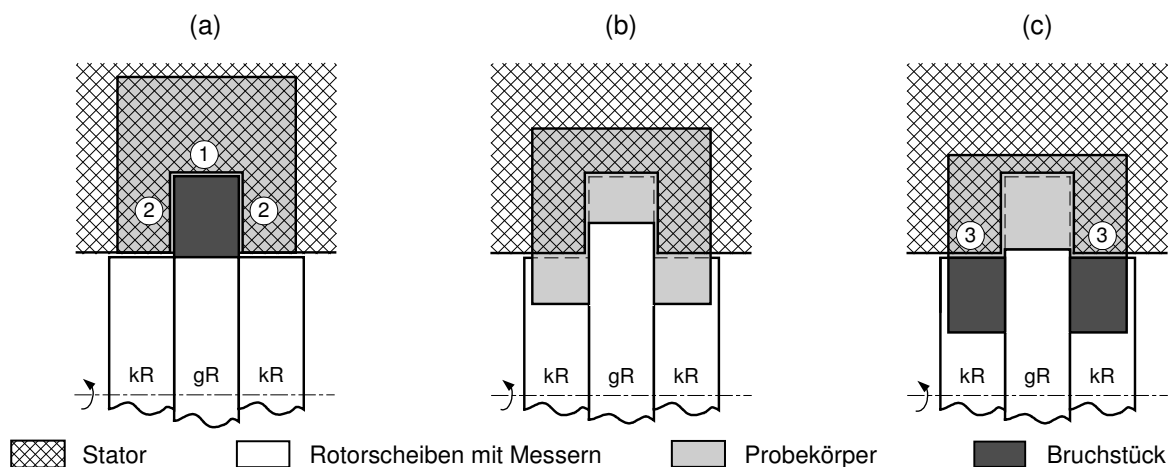


Bild 6.1: Schematische Darstellung des Zerkleinerungsvorgangs in der einrotorigen Rotorschere; (a) Zerkleinerung am Rotormesser der großen Rotorscheibe; (b) Nachrutschen des Probekörpers; (c) Zerkleinerung am Rotormesser der kleinen Rotorscheiben

1 - Scher-/Schneidbeanspruchung im ersten radialen Spalt; 2 - Scherbeanspruchung im axialen Spalt;
3 - Scher-/Schneidbeanspruchung im zweiten radialen Spalt; kR - kleine Rotorscheibe; gR - große Rotorscheibe

Diese drei Zerkleinerungsabschnitte wiederholen sich kontinuierlich, bis der gesamte Probekörper zerkleinert ist. Insgesamt ergibt sich somit ein quasi-diskontinuierlicher Einzugs- und Zerkleinerungsvorgang, bestehend aus den Teilprozessen Materialzufuhr und kombinierter Schneid-/Scherbeanspruchung. Kennzeichnend für diese Zerkleinerung ist, daß durch die versetzte Anordnung der Rotormesser über die Rotorbreite und die kurzen Zerkleinerungsabschnitte immer nur ein bzw. wenige Rotormesser gleichzeitig in das Material eingreifen und sich der Ort der Zerkleinerungszone über die Rotorbreite ständig ändert.

Der Einzugs- und Zerkleinerungsvorgang der **zweirotorigen Rotorschere** bei einer Vielzahl von Rotorscheibenpaaren ist mit dem in Kapitel 5.1.2 (Bild 5.11) beschriebenen Vorgang aus Einreißen durch das Rotormesser und ausgedehnter Scherbeanspruchung im axialen Spalt identisch. Durch den kontinuierlichen Materialeinzug und die anhaltende Scherbeanspruchung im axialen Spalt sind im Gegensatz zur einrotorigen Rotorschere gleichzeitig alle Rotorscheiben an der Zerkleinerung beteiligt. Die Abtrennung der Bruchstücke durch das versetzte Eingreifen der Rotormesser findet jedoch nur in gewissen Abständen und über die Rotorscheibenbreite verteilt statt.

Charakterisierung der Zerkleinerungsprodukte

Die **Stückgröße** der Bruchstücke bei der Zerkleinerung eines plattenförmigen Probekörpers wird entscheidend von der Geometrie der Zerkleinerungselemente bestimmt (Bild 6.2). Bei beiden Rotorschertypen ist die Rotorscheibenbreite b_{RS} maßgebend für die Abmessung der Bruchstücke quer zur Einzugsrichtung. Die Abmessung der Stücke in Einzugsrichtung wird von der Gestalt und Anordnung der Rotormesser, d. h. der Rotormesserlänge l_{SN} und dem Abstand der Rotormesser auf der Rotorscheibe x_{RM} , sowie von den Einzugsbedingungen beeinflusst. Unter optimalen Einzugsbedingungen dürften somit die Rotorscheiben- bzw. Rotormesserbreite, die Rotormesserlänge und der Abstand der Rotormesser die obere Stückgröße der unverformten Bruchstücke bestimmen. Bild 6.3 zeigt die Stückgrößenverteilungen der Bruchstücke im unverformten und verformten Zustand, die diese Vermutung bestätigen. Zudem werden die verschiedenen Verformungszustände der Bruchstücke der ein- und zweirotorigen Rotorschere sichtbar.

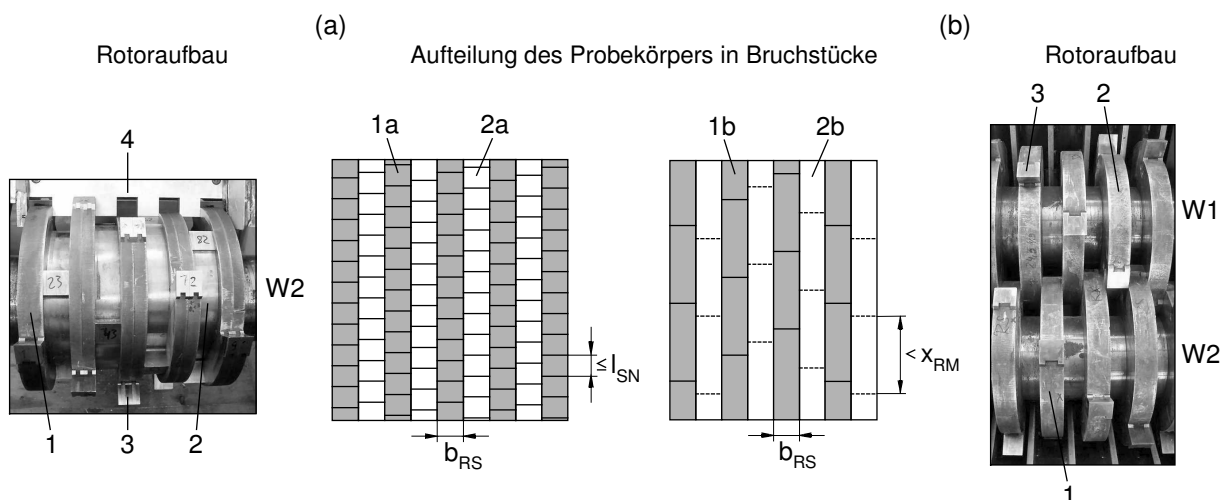


Bild 6.2: Aufteilung der bei der Zerkleinerung eines plattenförmigen Probekörpers mittels ein- (a) und zweirotoriger Rotorschere (b) entstehenden Bruchstücke, schematisch

1 - Standardrotorscheibe; 2 - Kleine Rotorscheibe (einrotorig) bzw. Gegenscheibe (zweirotorig); 3 - Rotormesser; 4 - Stator; 1a und 1b - Bruchstücke ausgehend von den Standardrotorscheiben der Welle 2 (W2); 2a und 2b - Bruchstücke ausgehend von den kleinen Rotorscheiben bzw. den Gegenscheiben der Welle 1 (W1); b_{RS} - Rotormesser- bzw. Rotorscheibenbreite (40 mm); l_{SN} - Länge der Seitenschneiden des Rotormessers (46 mm); x_{RM} - Abstand der Rotormesser auf der Rotorscheibe (ca. 360 mm)

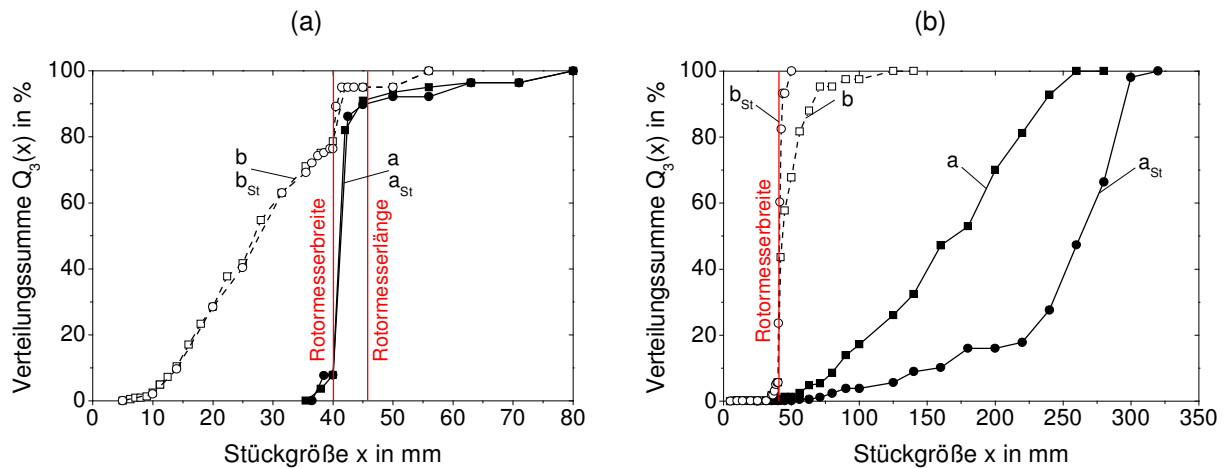


Bild 6.3: Stückgrößenverteilungen der bei der Zerkleinerung mit der ein- (a) u. zweirotorigen (b) Rotorschere entstandenen AlMg3-Bruchstücke im unverformten und verformten Zustand

Wanddicke 1 mm; Beanspruchungsgeschwindigkeit 0,4 m/s; einrotorig: Probekörper $l_{PK} \times b_{PK} = (400 \times 360) \text{ mm}^2$; zweirotorig: Probekörper $l_{PK} \times b_{PK} = (800 \times 200) \text{ mm}^2$; Wellenabstand 300 mm

Infolge des geringen Messereingriffswinkels besitzen die Bruchstücke der einrotorigen Rotorschere eine überwiegend plattige **Stückform** (Bilder 6.4a und 6.5). Nur ein sehr geringer Anteil leicht gebogener Bruchstücke entsteht durch eine stärkere Biegeumformung im radialen Spalt der kleineren Rotorscheiben. Dagegen weist das Zerkleinerungsprodukt der zweirotorigen Rotorschere ein breites Spektrum an Stückformen auf. Der überwiegende Teil der Bruchstücke ist nur im Eingriffsbereich der Rotormesser verformt (Bild 6.4b, leicht gebogen). Jedoch können sich auch stärker verformte Bruchstücke bilden, wenn sich die längeren Bruchstücke während des Abstreifens an den gegenüberliegenden Rotorscheiben oder am Abstreifer verkleben. In diesem Fall wird das Bruchstück unterhalb des Rotormessers stark geknickt und scharfkantig gebogen.

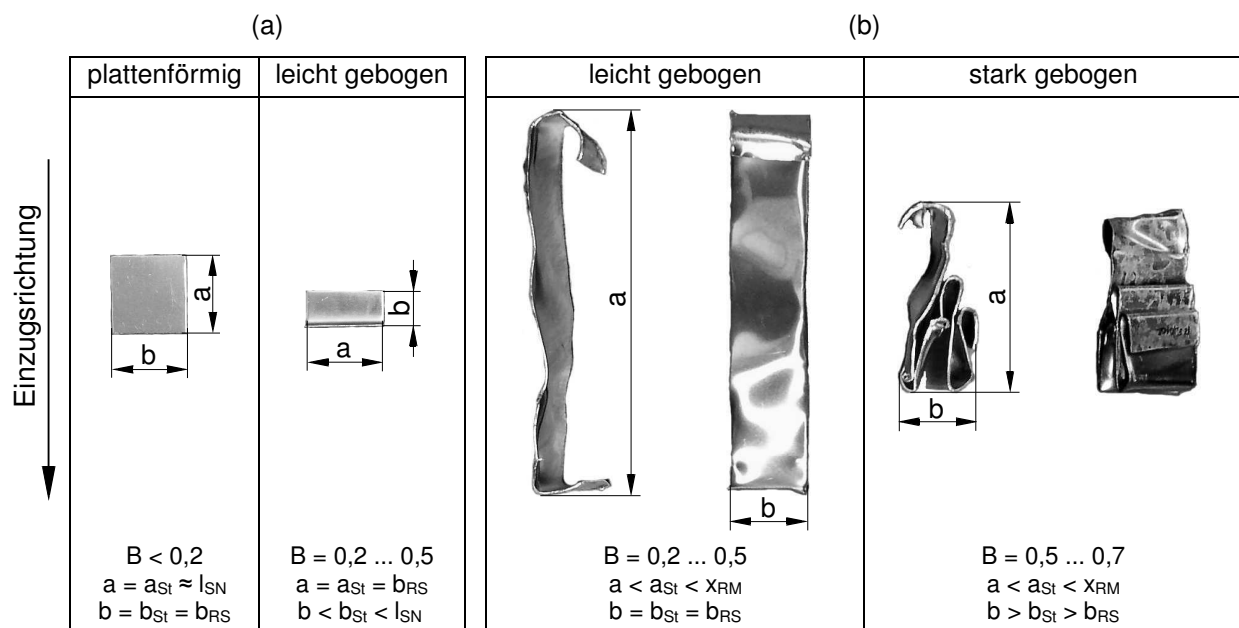


Bild 6.4: Typische AlMg3-Bruchstücke der ein- (a) und zweirotorigen (b) Rotorschere

Maßstabsgetreue Darstellung; B - Biegegrad; a, b - größte und mittlere Hauptabmessung; a_{St} , b_{St} - Stücklänge und -breite im unverformten Zustand; b_{RS} - Rotormesser- bzw. Rotorscheibenbreite; l_{SN} - Länge der Seitenschnitten des Rotormessers; x_{RM} - Abstand der Rotormesser auf der Rotorscheibe; s. auch Anlage 11

Die Bruchstücke des dickwandigen Polypropylens verformen sich während der Zerkleinerung überwiegend elastisch, so daß kaum plastische Verformungen erkennbar sind. Nur die Bruchstücke der zweirotorigen Rotorschere weisen geringe bleibende Verformungen im Eingriffsbereich der Rotormesser auf (Anlage 11).

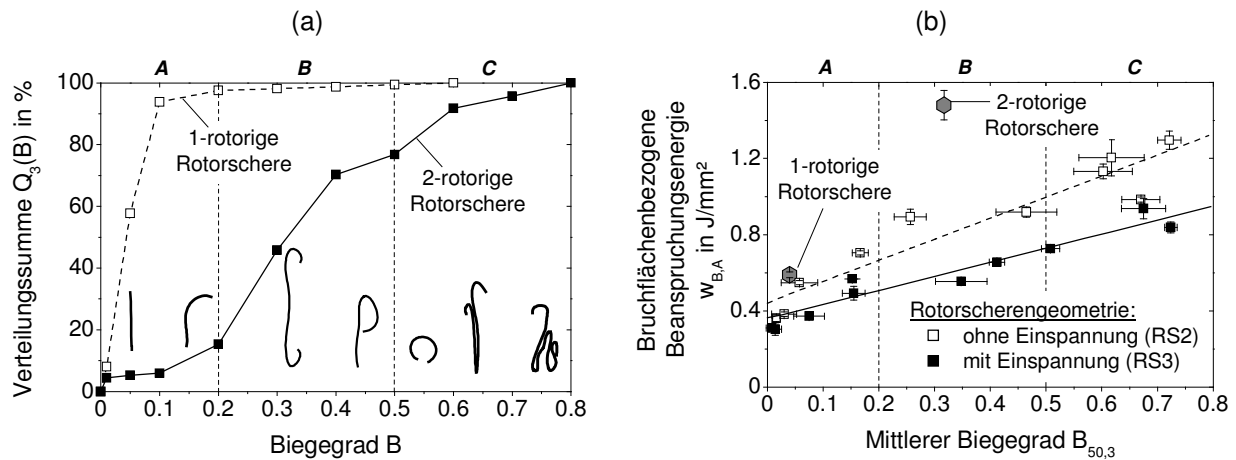


Bild 6.5: Beschreibung der Gesamtverformung der AlMg3-Bruchstücke bei der Zerkleinerung mit der ein- und zweirotorigen Rotorschere durch den Biegegrad; (a) Biegegradverteilung; (b) Zusammenhang zwischen Biegegrad und Energiebedarf für die Zerkleinerung

(A) - plattenförmig; (B) leicht gebogen; (C) stark gebogen; AlMg3; Wanddicke 1 mm; Beanspruchungsgeschwindigkeit 0,4 m/s; Modell-Zerkleinerungsapparat: axiale Spaltweite 0,2 mm; radiale Spaltweite > 10 mm; einrotorig: Probekörper $l_{PK} \times b_{PK} = (400 \times 360) \text{ mm}^2$; zweirotorig: Probekörper $l_{PK} \times b_{PK} = (800 \times 200) \text{ mm}^2$; Wellenabstand 300 mm

Die ablaufenden Verformungsprozesse beeinflussen maßgeblich den **Energiebedarf** der Rotorschern. Wie durch die Versuche mit der einrotorigen Modell-Zerkleinerungsapparat unter Variation des Messereingriffswinkels nachgewiesen werden konnte, besteht zwischen der bruchflächenbezogenen Beanspruchungsenergie und dem Biegegrad der Bruchstücke ein annähernd linearer Zusammenhang (Bild 6.5b). Der Energiebedarf der einrotorigen Rotorschere ist bei einem vergleichbaren Verformungszustand des Zerkleinerungsproduktes nur geringfügig höher. Dagegen erfordert die Zerkleinerung mit der zweirotorigen Rotorschere aufgrund der höheren Reibungsverluste sowie der energieintensiven Knick- und Biegevorgänge während der Bruchstückabstreifung einen deutlich höheren Energiebetrag.

Einflußgrößen auf das entstehende Zerkleinerungsprodukt

Neben der Geometrie der Zerkleinerungselemente wird die Stückgröße der in Rotorschern gebildeten Bruchstücke maßgeblich von den **Einzugsbedingungen** bestimmt.

Bei der einrotorigen Rotorschere ist der dafür entscheidende Abschnitt das Nachrutschen des Materials bis an den Rotorumfang (s. Bild 6.1b). Kleinere Aufgabestücke können leicht bis in die Beanspruchungszone einzelner Rotormesser vordringen, wodurch ein optimaler Eingriff in das Material ermöglicht wird. Die dabei entstehenden Bruchstücke besitzen Abmessungen, die sich an der Rotormesserlänge und -breite orientieren. Mit zunehmender Breite der Aufgabestücke verschlechtert sich jedoch die Materialzufuhr. Infolge der nicht-kreisrunden Kontur der Rotorscheiben und ihrer versetzten Anordnung auf dem Rotor stößt der Probekörper bereits nach einem kurzen Zuführweg wieder auf eine der Rotorscheiben und verbleibt bis zum nächsten Zerkleinerungsabschnitt in dieser Position. Mit zunehmender Probekörperbreite sind daher für

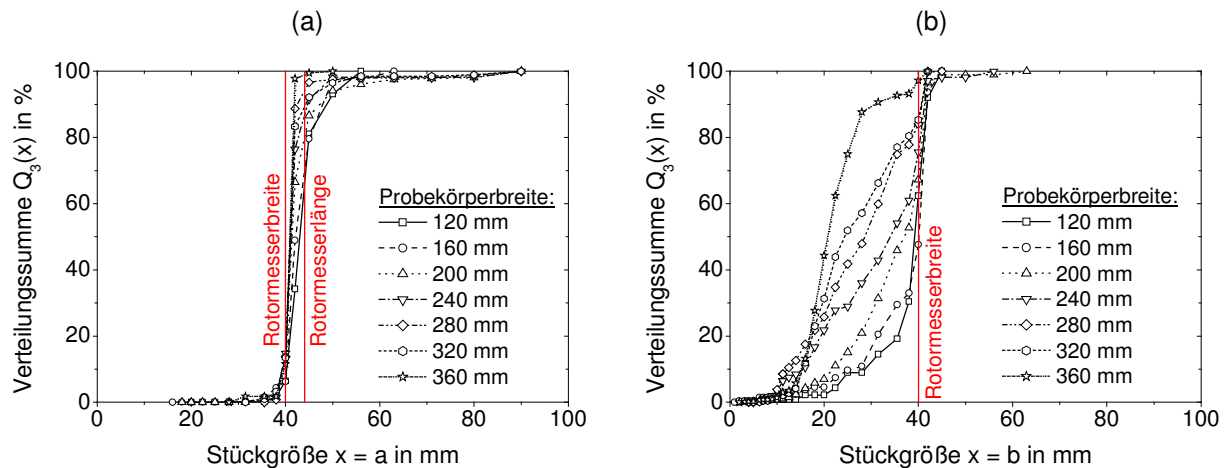


Bild 6.6: Stückgrößenverteilungen von mittels der einrotorigen Rotorschere zerkleinerter Polypropylen-Platten nach der größten (a) und der mittleren Hauptabmessung (b)

Wanddicke 5 mm; Probekörperlänge 200 mm; Beanspruchungsgeschwindigkeit 0,4 m/s

die Zerkleinerung mit der einrotorigen Rotorschere wesentlich mehr Zerkleinerungsabschnitte erforderlich. Damit verbunden ist die Bildung einer Vielzahl kleinerer Bruchstücke, deren größte Hauptabmessung jedoch annähernd konstant bleibt (Bild 6.6). Gleichzeitig steigt die Einzugsdauer für einen Probekörper gleicher Länge deutlich an (Bild 6.7). Die Abmessungen der plattenförmigen Bruchstücke werden nun durch die Rotormesserbreite (Hauptabmessung a) und den zwischen zwei aufeinanderfolgenden Zerkleinerungsabschnitten zurückgelegten Weg des Probekörpers (Hauptabmessung b) bestimmt.

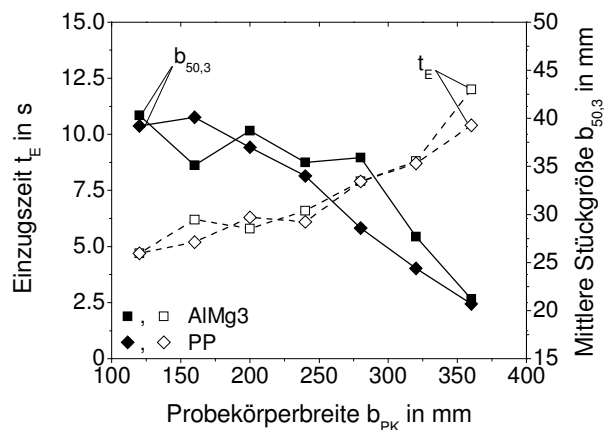


Bild 6.7: Einfluß der Probekörperbreite auf die Einzugsbedingungen und die mittlere Stückgröße

Wanddicke 1 mm (AlMg3) bzw. 5 mm (PP); Probekörperlänge 200 mm; Beanspruchungsgeschwindigkeit 0,4 m/s

Der Einzug plattenförmiger Probekörper bei der zweirotorigen Rotorschere wird sowohl durch die einziehende Wirkung der Rotormesser als auch durch die an der Stirnseite der Rotorscheiben wirkenden Reibungskräfte gewährleistet. Unter optimalen Einzugsbedingungen entstehen Bruchstücke, deren größte Abmessung im unverformten Zustand etwa dem Abstand der Rotormesser auf der Rotorscheibe ($x_{RM} \approx 360$ mm) entspricht. Die Stückgrößenverteilungen entsprechend der Länge der unverformten Stücke $Q_3(a_{Sl})$ zeigen, daß sich bei den untersuchten Materialien jeweils eine klar definierte obere Stückgröße abzeichnet (Bild 6.8a). Jedoch weichen insbesondere die oberen Stückgrößen der Kunststoffe sehr deutlich vom Rotormesserabstand ab, was auf einen größeren Schlupf zwischen dem Probekörper und den Rotorscheiben während des Einzuges hindeutet. Die sich in Abhängigkeit vom Aufgabematerial einstellenden Einzugsge-

keiten der Probekörper bestätigen diese Vermutung (Bild 6.8b). Demnach wird die obere Stückgröße des Zerkleinerungsproduktes der zweirotorigen Rotorschere entscheidend von den Einzugsbedingungen beeinflusst. Kleinere Bruchstücke resultieren vor allem durch die Zerkleinerung an den Rotormessern. Dagegen ist für die Entstehung der langen Bruchstücke der dünnwandigen Metalle ein ausgeprägter Einzugs- und Zerkleinerungsvorgang an den Rotorscheiben notwendig. Bei gleichen Probekörperabmessungen und Versuchsbedingungen ist daher das unterschiedliche Einzugsverhalten auf die abweichenden Reibungskoeffizienten der Materialpaarung Rotorscheibenstahl/Aufgabematerial zurückzuführen. Obwohl diesbezüglich keine Untersuchungen durchgeführt wurden, bestätigen Literaturangaben tendenziell diesen Zusammenhang. Für die jeweiligen Materialpaarungen konnten folgende Gleitreibungskoeffizienten ermittelt werden: Stahl/Aluminiumlegierung 0,5...0,8 [112]; Stahl/Stahl 0,4...0,7 [112] [113]; Stahl/Zink $\approx 0,5$ [116]; Stahl/PE bzw. PP 0,2...0,4 [112]. Im Fall der Kunststoffe trägt zudem die höhere Wanddicke zu einem schlechteren Einzugsverhalten und den geringeren Stückgrößen bei.

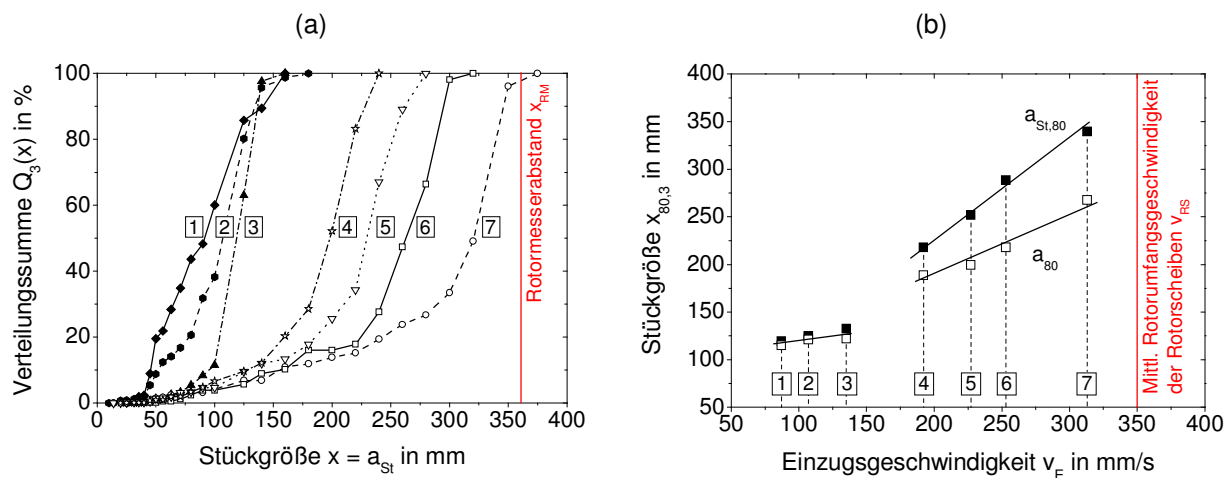


Bild 6.8: Einfluß des Aufgabematerials auf die Einzugsverhältnisse und die obere Stückgröße bei der Zerkleinerung mit der zweirotorigen Rotorschere; (a) Stückgrößenverteilung nach der Stücklänge a_{St} ; (b) Zusammenhang zwischen Einzugs- und Stückgröße

(1) PP ($w = 5$ mm); (2) PP ($w = 3$ mm); (3) PE ($w = 3$ mm); (4) Zn; (5) Stahl St14; (6) AlMg3; (7) Al99.5; x_{RM} - Abstand der Rotormesser auf den Rotorscheiben (ca. 360 mm); v_{RS} - mittlere Rotorumfangsgeschwindigkeit der Rotorscheiben ohne Rotormesser (ca. 350 mm/s); Wanddicke (Metalle) 1 mm; Probekörperbreite 240 mm; Probekörperlänge 800 ... 960 mm; Wellenabstand 290 mm; Rotorumfangsgeschwindigkeit (Messerkreis) 0,4 m/s; Werte z. T. aus [115]

Wie bereits in Kapitel 5 erörtert wurde, verbessert sich das Einzugsverhalten mit zunehmendem **Wellenabstand** bzw. bei einer möglichst geringen **Überdeckung**. Die Auswirkungen auf die Einzugs- und die obere Stückgröße verdeutlicht Bild 6.9. Durch den mit zunehmendem Wellenabstand kleiner werdenden Einzugs- und Zerkleinerungswinkel steigt die Einzugs- und Zerkleinerungsgeschwindigkeit geringfügig an. Damit verbunden ist auch ein Anstieg der oberen Stückgröße. Da bei diesen Untersuchungen kleinere Probekörper verwendet wurden, kann jedoch die bei einem längeren Probekörper entsprechend der Reibungsverhältnisse sich einstellende obere Stückgröße nicht erreicht werden.

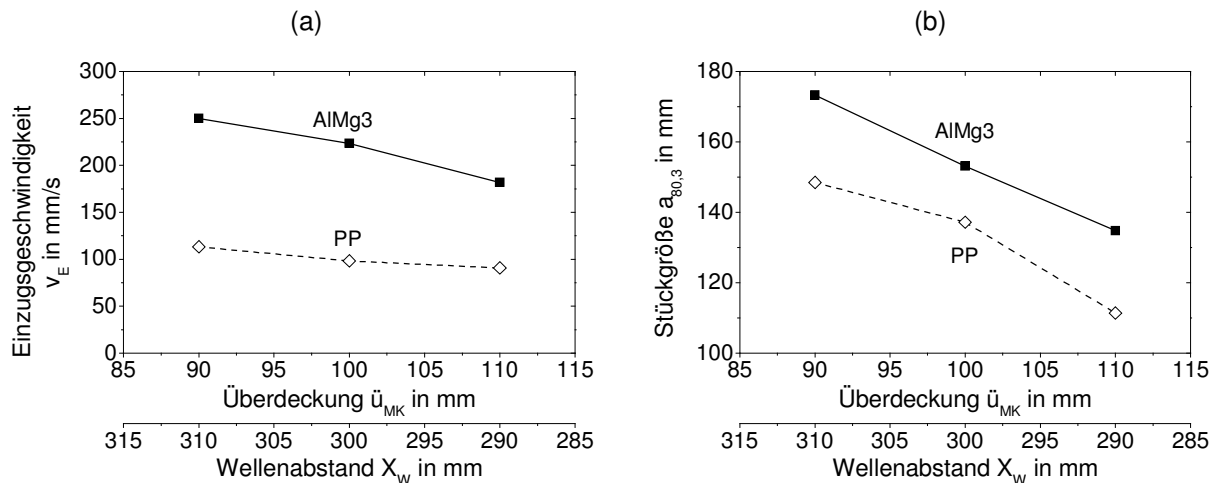


Bild 6.9: Einfluß der Überdeckung bzw. des Wellenabstandes auf die Einzugsverhältnisse (a) und die obere Stückgröße (b) bei der Zerkleinerung mit der zweirotorigen Rotorschere

Wanddicke 1 mm (AlMg3) bzw. 5 mm (PP); Probekörper $l_{PK} \times b_{PK} = (200 \times 200)$ mm²; Beanspruchungsgeschwindigkeit 0,4 m/s

Mit der **Relativgeschwindigkeit** wird das Einzugsverhalten durch eine langsamer rotierende Welle gezielt beeinflusst. Eine Relativgeschwindigkeit bewirkt einen starken Schlupf zwischen dem einzuziehenden Material und dem Rotor, wodurch an den Rotorscheiben zusätzliche Reibungskräfte auftreten, die dem Einzug des Materials entgegengerichtet sind. Das heißt, der Einzug des Materials wird durch den Rotor mit der jeweils geringeren Rotorumfangsgeschwindigkeit begrenzt. Dadurch geht der Zerkleinerungsvorgang an den Seitenkanten der Rotorscheiben zurück, und es entsteht ein höherer Anteil kleinerer Bruchstücke (Bild 6.10a). Die Einzugs- und Zerkleinerungsvorgang und die entstehenden Stücke den des Rotor-Stator-Systems an.

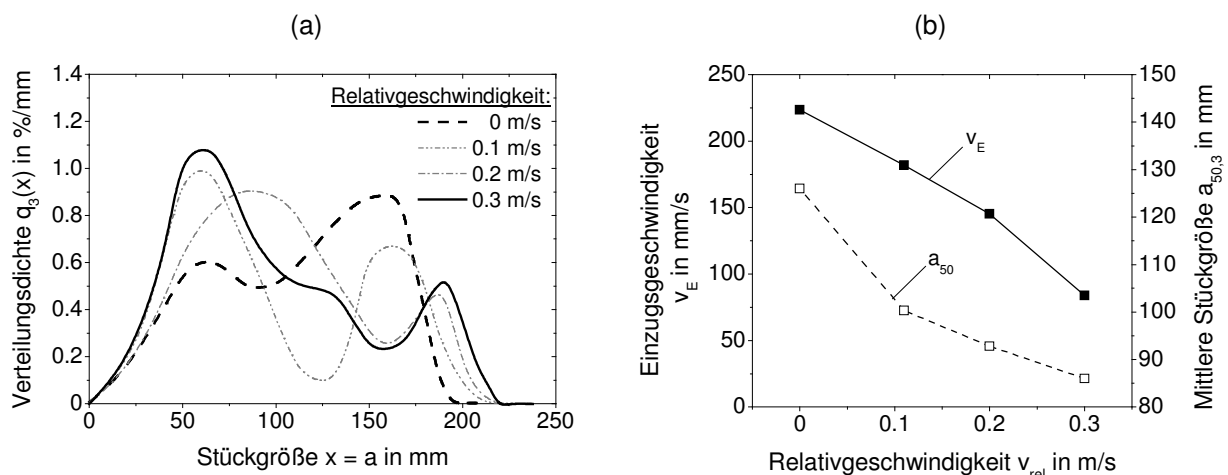


Bild 6.10: Auswirkung der Relativgeschwindigkeit zwischen den Rotoren auf das entstehende Zerkleinerungsprodukt und das Einzugsverhalten der zweirotorigen Rotorschere; (a) Stückgrößenverteilungsdichte; (b) Einzugs- und Zerkleinerungsvorgang und die entstehenden Stücke den des Rotor-Stator-Systems an.

AlMg3; Wanddicke 1 mm; Probekörper $l_{PK} \times b_{PK} = (200 \times 200)$ mm²; Wellenabstand 300 mm; Rotorumfangsgeschwindigkeit der schneller drehenden Welle 0,4 m/s (konstant)

Einflußgrößen auf den Energie- und Leistungsbedarf

Durch die Untersuchungen bei typischen Beanspruchungsgeometrien der Rotorschern ist deutlich geworden, daß sehr viele Parameter den Energie- und Leistungsbedarf für die Zerkleinerung beeinflussen (s. Kap. 5). Im Rahmen der kleintechnischen Zerkleinerung sollen daher nur die wichtigsten Einflußgrößen betrachtet werden.

Mit abnehmendem **Wellenabstand** bzw. zunehmender **Überdeckung** der Rotorscheiben ist ein höherer Energiebedarf für die Zerkleinerung erforderlich (Bild 6.11), wobei die Rotorschere eine insgesamt höhere bruchflächenbezogene Beanspruchungsenergie aufweist. Dafür können im wesentlichen zwei Ursachen angeführt werden. Einerseits resultiert bei der Rotorschere durch die Bestückung beider Rotorwellen mit Standardrotorscheiben eine größere Überdeckung der Messerkreise, welche stärkere Reibungsverluste zur Folge hat, und andererseits vollziehen sich an den Rotormessern komplexe Biegevorgänge. Letztere bewirken im Fall des Polypropylens verstärkt einen Biegebruch, weshalb der Energiebedarf der Rotorschere den der Modell-Zerkleinerungsapparatur nur geringfügig übersteigt.

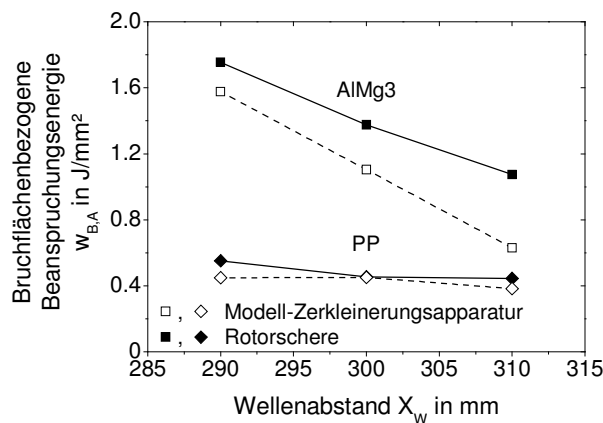


Bild 6.11: Einfluß des Wellenabstandes auf die bruchflächenbezogene Beanspruchungsenergie Wanddicke 1 mm (AlMg3) bzw. 5 mm (PP); Beanspruchungsgeschwindigkeit 0,4 m/s; Modell-Zerkleinerungsapparatur: runde Gegenscheiben; axiale Spaltweite 0,3 mm; Rotorschere: axiale Spaltweite 0,2 mm

Von den stoffbedingten Einflußgrößen ist zunächst die **Wanddicke** der Probekörper von Bedeutung (Bild 6.12). Da sich die Beanspruchungsgeometrie der zweirotorigen Modell-Zerkleinerungsapparatur und der Rotorschere kaum unterscheiden, ergibt sich ein nahezu identischer Anstieg des Energiebedarfs mit zunehmender Wanddicke. Dagegen ist der Energiebedarf der einrotorigen Rotorschere im Vergleich zur Modell-Zerkleinerungsapparatur deutlich größer, da durch den Materialeinzug und die Zerkleinerung in mehreren Beanspruchungszonen zusätzliche Reibungs- und Verformungsprozesse stattfinden. Vor allem die Zerkleinerung der dünnwandigen Probekörper ($w = 0,5$ mm) im radialen Spalt der kleineren Rotorscheiben wird

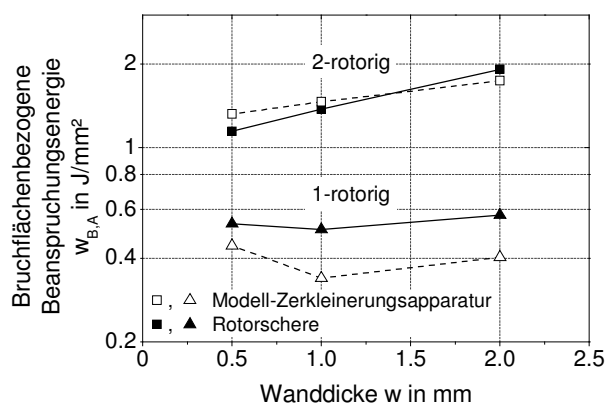


Bild 6.12: Einfluß der Wanddicke auf die bruchflächenbezogene Beanspruchungsenergie AlMg3; Beanspruchungsgeschwindigkeit 0,4 m/s; 1-rotorig: Messereingriffswinkel 17°; axiale und radiale Spaltweite 0,2 mm; 2-rotorig: axiale Spaltweite 0,2 bzw. 0,3 mm; Wellenabstand 300 mm

von einer Biegeumformung überlagert, wodurch sich bereits der Ansatz zur Reißbeanspruchung abzeichnet (s. Bild 4.12). Gleichzeitig entstehen in der Rotorschere höhere Reibungsverluste durch den Abstreifvorgang der Bruchstücke an den Statorwerkzeugen und den Rotorscheiben.

Die **Stückgröße und Stückform des Aufgabematerials** wirken sich zunächst auf den Einzugsvorgang aus, da das Material vor der Zerkleinerung von den Rotormessern erfaßt werden muß. Bei voluminösem Aufgabematerial führt die Beanspruchung der Rotormesser zu einer Verdichtung durch plastische Verformungen oder zu einem verformungsarmen Biegebruch (Anlage 12). Durch den Verdichtungs Vorgang können auch Stücke eingezogen und zerkleinert werden, deren Abmessungen die Rotormesserslänge deutlich übersteigen (z. B. AlMgSi0.5-Rohr, $d = 75$ mm). Dagegen wird das Erfassen größerer PP-Rohre aufgrund der fehlenden plastischen Verformung erschwert. Dabei wirkt sich bei längeren Rohrabschnitten die versetzte Anordnung der Rotorscheiben nachteilig aus, da der Eingriffsbereich der Rotormesser sich merklich verkürzt. Infolgedessen ergeben sich im Vergleich zu den Modell-Zerkleinerungsapparaturen schlechtere Einzugsbedingungen. Grundsätzlich können die mit den Modell-Zerkleinerungsapparaturen gewonnenen Erkenntnisse aber übertragen werden. Auch der bruchflächenbezogene Energiebedarf für die Zerkleinerung der Rohre unterscheidet sich nur wenig (Anlage 12/3).

Die **Produktstückgröße**, wie sie beispielsweise durch die Anpassung der Abmessungen der Rotormesser und -scheiben eingestellt werden kann oder bei einem veränderten Materialeinzug auftritt (Bild 6.13), wirkt sich insbesondere auf die massebezogene Beanspruchungsenergie aus. Eine abnehmende Stückgröße bzw. ein höheres Zerkleinerungsverhältnis ist mit einem ansteigenden massebezogenen Energiebedarf verbunden (a). Bei gleichbleibenden Beanspruchungsbedingungen wird der Zerkleinerungsvorgang dadurch jedoch nicht beeinflusst, was die annähernd konstante bruchflächenbezogene Beanspruchungsenergie verdeutlicht (b).

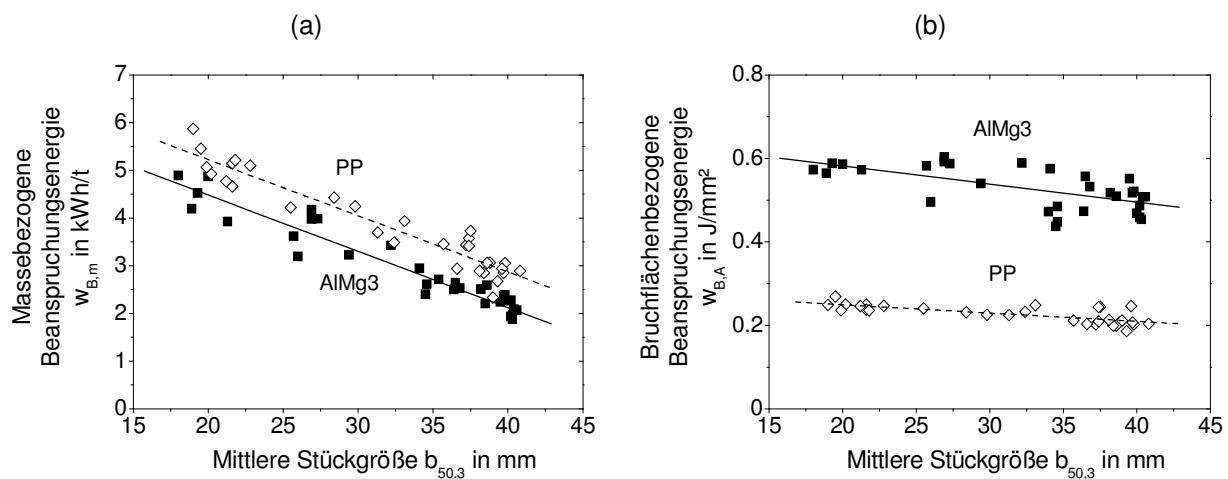


Bild 6.13: Zusammenhang zwischen der mittleren Stückgröße des Zerkleinerungsproduktes und der masse- (a) bzw. bruchflächenbezogenen Beanspruchungsenergie (b)

Einrotorige Rotorschere: Wanddicke 1 mm (AlMg3) bzw. 5 mm (PP); Probekörperbreite 120 ... 360 mm; Probekörperlänge 200 mm; Beanspruchungsgeschwindigkeit 0,4 m/s

Die zweirotorigen Rotorschern werden gewöhnlich mit identischen Rotorumfangsgeschwindigkeiten für beide Rotoren betrieben. In diesem Fall verteilt sich die Antriebsleistung und die zu verrichtende Arbeit gleichmäßig auf beide Rotoren. Aber bereits bei einer geringen **Relativgeschwindigkeit** trägt die Rotorwelle mit der höheren Rotorumfangsgeschwindigkeit deutlich

mehr zur Zerkleinerung bei, was sich sowohl im Leistungs- als auch im Energiebedarf äußert (Bild 6.14). Die langsamer rotierende Rotorwelle wirkt zunehmend als Stator und ist bei einer Relativgeschwindigkeit von mehr als 75% der Rotorumfangsgeschwindigkeit der schnelleren Welle praktisch nicht mehr aktiv an der Zerkleinerung beteiligt. Im Gegensatz dazu ist die andere Rotorwelle einer sehr starken Belastung ausgesetzt. Durch die ungünstigeren Einzugsbedingungen geht der Anteil des Schervorgangs an den Seitenkanten der Rotorscheiben zurück, so daß sich der Hauptteil der Zerkleinerung an den Kanten der Rotormesser vollzieht. Die hohe Belastung der Rotorscheiben- und Rotormesserkanten der schneller rotierenden Rotorwelle

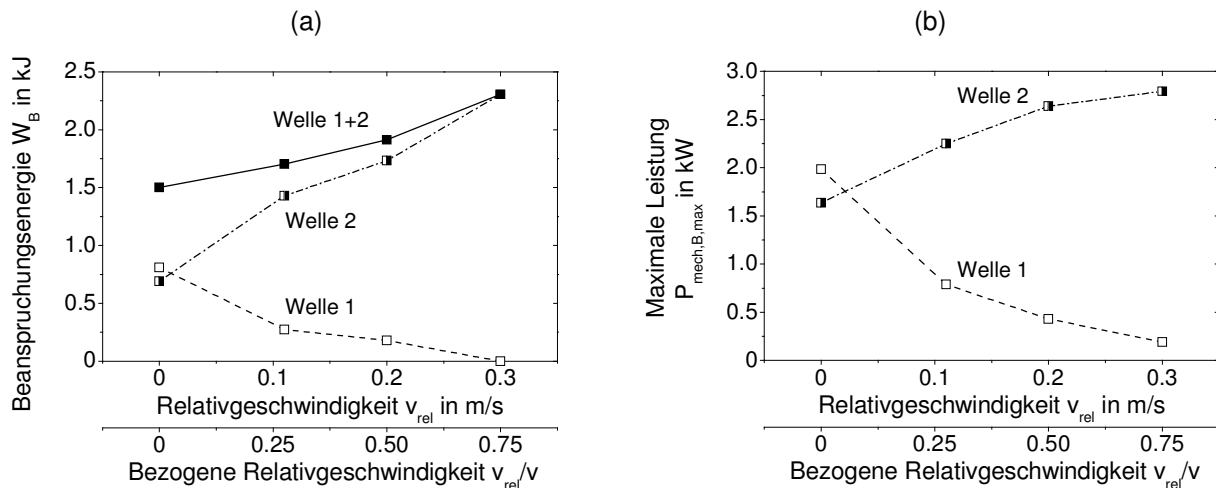


Bild 6.14: Energie- (a) und Leistungsbedarf (b) der einzelnen Rotorwellen in Abhängigkeit von der Relativgeschwindigkeit zwischen den Rotoren der zweirotorigen Rotorschere

AlMg3; Wanddicke 1 mm; Probekörper $l_{PK} \times b_{PK} = (200 \times 200) \text{ mm}^2$; Wellenabstand 300 mm; Rotorumfangsgeschwindigkeit der schneller drehenden Welle 0,4 m/s (konstant)

sowie die ständige Relativbewegung von Rotorscheibe und Aufgabematerial während des Einzugs des Probekörpers trägt zu einem starken Verschleiß der Kanten bei. In Verbindung mit den höheren Reibungsanteilen im Bereich der sich überdeckenden Rotoren als auch zwischen Rotor und Aufgabematerial steigt auch der Gesamtenergiebedarf für die Zerkleinerung deutlich an (Bild 6.15).

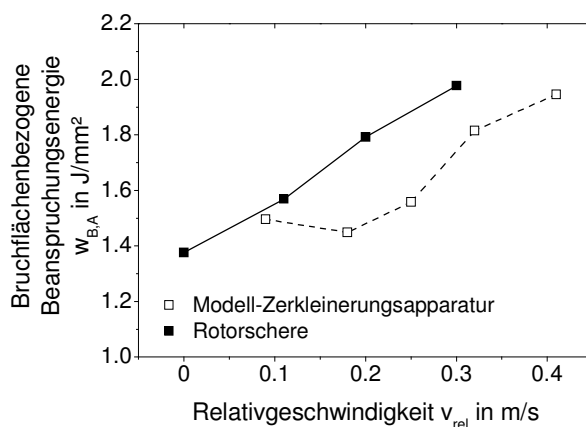


Bild 6.15: Zusammenhang zwischen der bruchflächenbezogenen Beanspruchungsenergie und der Relativgeschwindigkeit der zweirotorigen Rotorschere

AlMg3; Wanddicke 1 mm; Wellenabstand 300 mm; Rotorumfangsgeschwindigkeit der schneller drehenden Welle 0,4 m/s (konstant); Modell-Zerkleinerungsapparat: runde Gegenscheiben; axiale Spaltweite 0,3 mm; Rotorschere: axiale Spaltweite 0,2 mm

6.1.2 Zerkleinerung in ein- und zweirotorigen Rotorreißern

Obwohl großflächige Bleche und Platten ein eher untypisches Aufgabematerial der Rotorreißer darstellen, lassen sich bevorzugt mit solchen Probekörpern die Rißbildung und -ausbreitung sowie die Verformungsvorgänge nachvollziehen. Auch der Vergleich mit den Ergebnissen der Einzelstückzerkleinerung bei den Rotorreißergeometrien und der Zerkleinerung in Rotorscheren wird dadurch erleichtert bzw. erst ermöglicht.

Einzugs- und Zerkleinerungsvorgang

Der **einrotorige Rotorreißer** basiert auf der Rotorreißergeometrie RR1 der Modell-Zerkleinerungsapparatur. Abweichend von dieser wird der Probekörper aber nicht durch eine separate Einspannvorrichtung gehalten, sondern bei Eingriff mehrerer Rotormesser so fixiert, daß sich ausreichend hohe Spannungen für die Anrißbildung ausbilden können. Der Zerkleinerungsvorgang von AlMg3 vollzieht sich dadurch analog zu dem in Kapitel 5.1 (s. Bild 5.5) beschriebenen Ablauf in den zwei Hauptabschnitten Einreißen an der Rotormesserfrontschneide und Rißausbreitung entlang der Seitenkanten der Rotorwerkzeuge und Rotorscheiben. Durch einen relativ großen Messereingriffswinkel von 61° wird das Material einerseits selbständig eingezogen, und andererseits wird das Bruchstück unterhalb des Rotormessers stark verformt. Die dickwandigen Polypropylen-Probekörper werden sowohl durch eine Reißbeanspruchung als auch durch eine Biegebeanspruchung (Biegebrechen) zwischen Rotormesser und Statorwerkzeug zerkleinert.

Der Zerkleinerungsvorgang des **zweirotorigen Rotorreißers** ist durch eine Überlagerung der von beiden Rotoren ausgehenden Abschnitte des Einreißen und Weiterreißen gekennzeichnet. Der Einreißvorgang durch die Rotormesser ist dabei für die Anrißbildung und den Einzug von zentraler Bedeutung. Die Rotormesser bewirken durch eine hohe lokale Beanspruchung frühzeitig eine Anrißbildung. Gleichzeitig wird der Probekörper durch den damit verbundenen Lochvorgang eingespannt. Kann dieser nicht ausreichend arretiert werden, so erfolgt im wesentlichen nur eine Biegeumformung, wobei der Probekörper in den Zwischenraum der sich überdeckenden Rotoren ausweicht (Bild 6.16). Diese Biegeumformung tritt verstärkt auf, wenn die Rotormesser eine breite Rotormesserfrontschneide und einen starken Verschleiß aufweisen, weil dann eine für

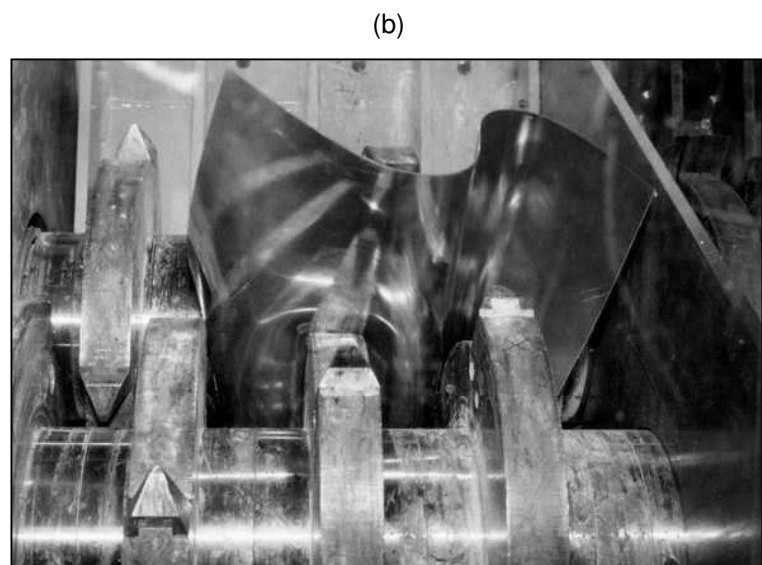
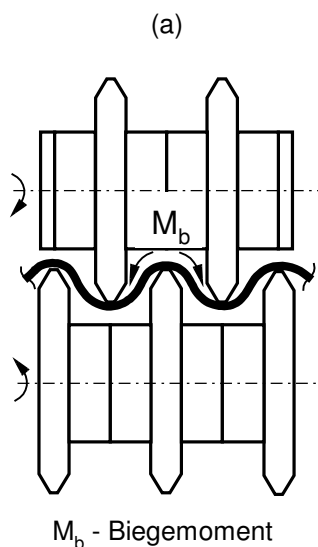


Bild 6.16: Biegeumformung des Probekörpers bei ungenügender Einspannung durch die äußeren Rotorscheiben; (a) Schematische Darstellung; (b) Verformung eines Zink-Blechtes

das Einreißen erforderliche hohe Spannungskonzentration nicht erreicht werden kann. Auch eine gegenüber der Wanddicke des Materials sehr große axiale Spaltweite erschwert die Anrißbildung. Erst wenn mehrere über die Rotorbreite verteilte Rotormesser eingreifen können, bilden sich infolge der Rotorscheibenüberdeckung ausreichend große axial und radial gerichtete Zugspannungen aus (Bild 6.17). Diese bewirken anfangs eine scharfkantige Biegung des Materials an den Rotorscheibenkanten, wodurch sich dort bevorzugte Bruchregionen im Probekörper ausbilden. Ausgehend von den durch die Rotormesser geschaffenen Anrissen breiten sich die Risse im weiteren Verlauf meist entlang der Rotorscheibenkanten in Form eines Querscherrisses aus. Während der Zerkleinerung können durch den gleichzeitigen Eingriff weiterer Rotormesser der Gegenwelle oder durch eine unzureichende Einspannung teilweise keine ausreichenden Zugspannungen mehr aufgebaut werden, so daß die Rißausbreitung nur an einer Rotorscheibenkante verläuft, sich die Ausbreitungsrichtung ändert oder die Rißausbreitung sogar zum Erliegen kommt. Auch bewegen sich die Risse teilweise aneinander vorbei. Dann entstehen größere und meist nur leicht zusammenhängende Materialbereiche sowie nur wenige Bruchstücke.

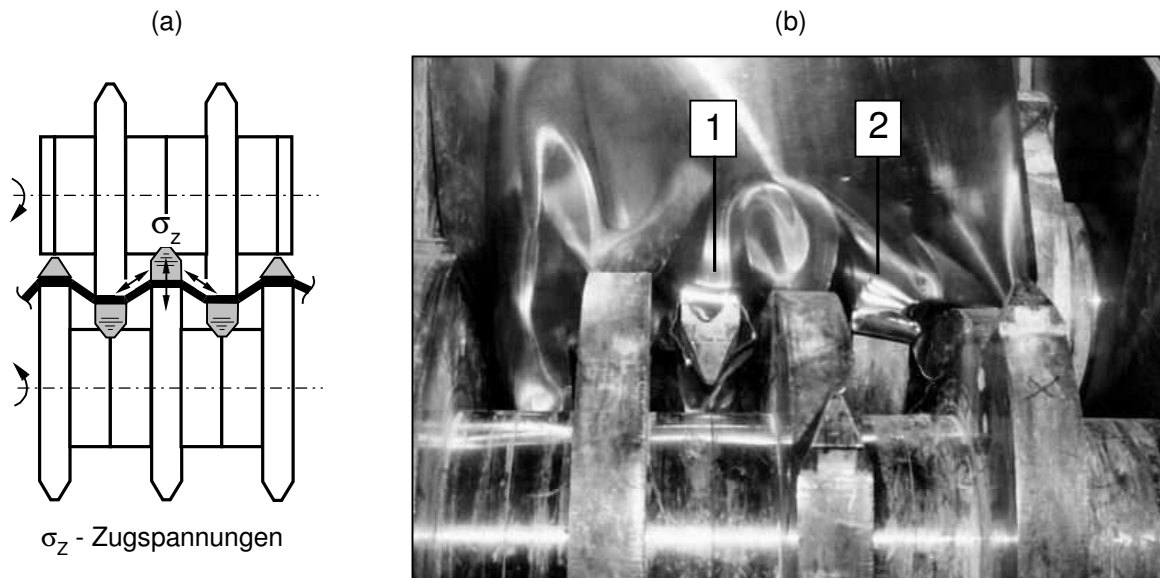


Bild 6.17: Reißbeanspruchung des Probekörpers bei ausreichender Einspannung durch die äußeren Rotorscheiben; (a) Schematische Darstellung; (b) Zerkleinerung eines Zink-Blechtes

1 - Einreißen des Probekörpers durch den Eingriff der Rotormesser;

2 - Weiterreißen entlang der Seitenkanten der Rotorscheiben und Ausbildung des Bruchstückes

Im Fall des Polypropylens wird das Einreißen und Weiterreißen von einer Biegebeanspruchung begleitet. Die hohen elastischen Verformungsanteile begünstigen das Ausweichen des Probekörpers in die Zwischenräume der Rotoren und erschweren die notwendige Einspannung des Materials. Doch selbst bei einer genügenden Einspannung können sich die für die Reißbeanspruchung erforderlichen Zugspannungen nur eingeschränkt ausbilden, da bereits vorher eine instabile Rißausbreitung einsetzt.

Charakterisierung der Zerkleinerungsprodukte

Die Rißausbreitung bei der Zerkleinerung von AlMg3 mit dem *einrotorigen Rotorreißer* verläuft meist entlang der Rotormesser- und Rotorscheibenseitenkanten. Dadurch bestimmen die Abmessungen der Zerkleinerungswerkzeuge maßgeblich die Stückgröße der Bruchstücke (Bild 6.18a).

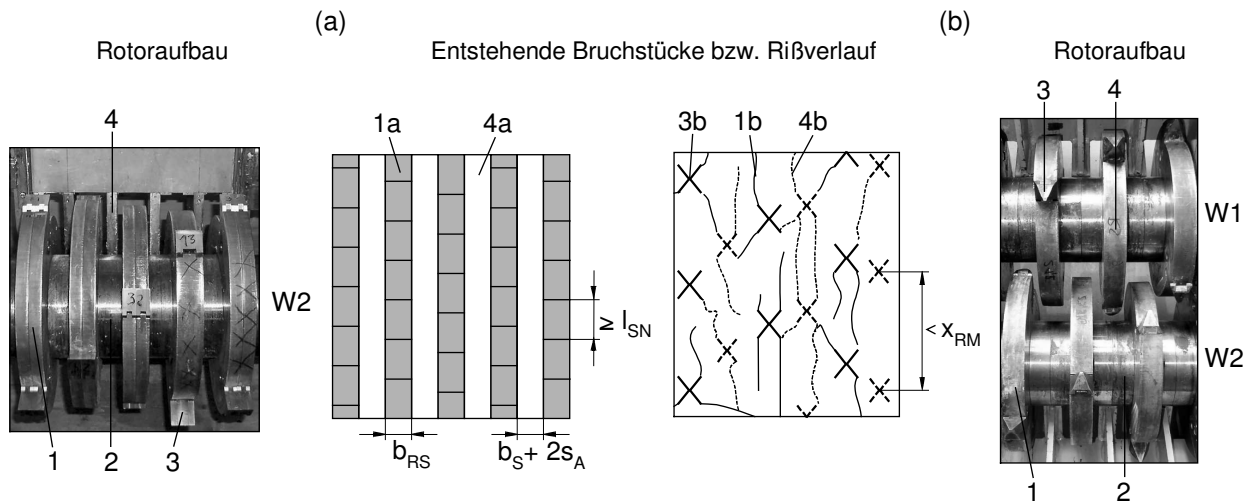


Bild 6.18: Entstehende Bruchstücke und Rißverlauf bei der Zerkleinerung eines plattenförmigen Probekörpers mittels ein- (a) und zweirotorigem Rotorreißer (b), schematisch

1 - Rotorscheibe; 2 - Distanzring; 3 - Rotormesser; 4 - Statorwerkzeug (einrotorig) bzw. Gegenscheibe (zweirotorig); 1a und 1b - Bruchstücke bzw. Risse ausgehend von den Rotorscheiben der Welle 2 (W2); 3b - Anrißbildung durch die Rotormesser; 4a - Unzerkleinerte Reststücke an den Statorwerkzeugen; 4b - Risse ausgehend von den Rotorscheiben der Welle 1 (W1); b_{RS} - Rotorscheibenbreite (40 mm); l_{SN} - Länge der Seitenschnitten des Rotormessers (46 mm); b_S - Statorwerkzeugbreite; s_A - axiale Spaltweite; x_{RM} - Abstand der Rotormesser auf der Rotorscheibe (ca. 360 mm)

Quer zur Einzugsrichtung wird die Stückgröße durch die Rotormesser- und Rotorscheibenbreite sowie den Abstand der benachbarten Rotorscheiben beeinflusst. Die Abmessungen der Stücke in Einzugsrichtung resultieren aus dem sich durch die Statorneigung und die Rotormesserslänge einstellenden Messereingriffsbereich. Im Fall der AlMg3-Bleche entstehen zwei typische Stückform- und Stückgrößenklassen (Bild 6.19a; Bild 6.20a). Die sich unterhalb der Rotormesser bildenden Bruchstücke sind leicht bis stark gebogen. Dagegen bleiben die auf den Statorwerkzeugen liegenden Materialbereiche unzerkleinert. In ihren Abmessungen entsprechen diese Streifen der Probekörperlänge sowie dem Abstand der benachbarten Rotorscheiben und sind nicht bzw. nur leicht verformt. Das Zerkleinerungsprodukt setzt sich ungefähr aus gleichen Anteilen aus den Bruchstücken der Rotormesser und den langen Reststücken zusammen.

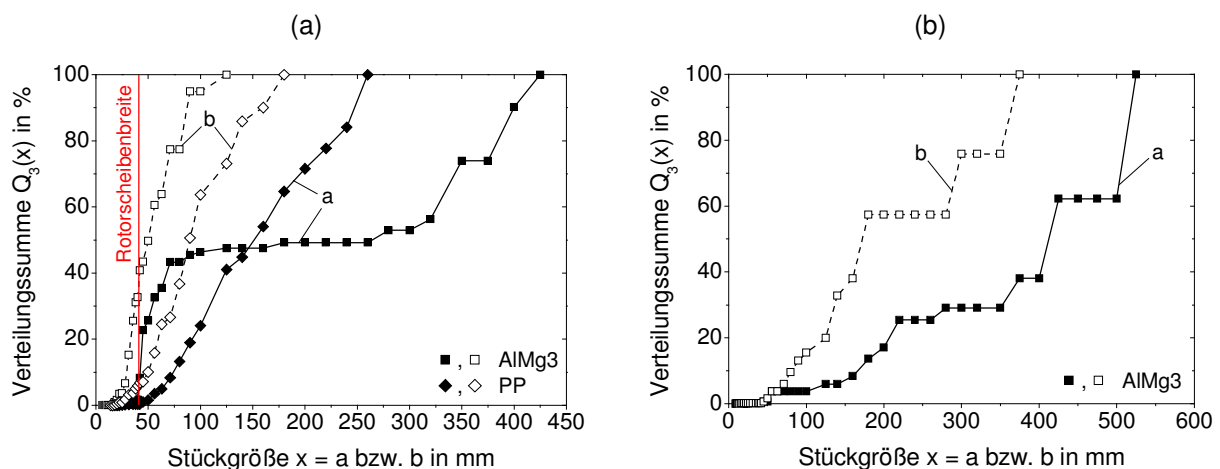


Bild 6.19: Stückgrößenverteilungen der Zerkleinerungsprodukte des ein- (a) und zweirotorigen (b) Rotorreißers

Wanddicke 1 mm (AlMg3) bzw. 5 mm (PP); Beanspruchungsgeschwindigkeit 0,4 m/s; einrotorig: Probekörper $l_{PK} \times b_{PK} = (400 \times 360) \text{ mm}^2$; zweirotorig: Probekörper $l_{PK} \times b_{PK} = (500 \times 500) \text{ mm}^2$; Wellenabstand 300 mm

Das Zerkleinerungsprodukt der zerkleinerten PP-Platten wird durch die instabile Rißausbreitung beim Biegebrechen geprägt. Die Bruchstücke sind unabhängig von den Abmessungen der Zerkleinerungswerkzeuge und nehmen ein breites Stckgrenspektrum ein (Anlage 13/1).

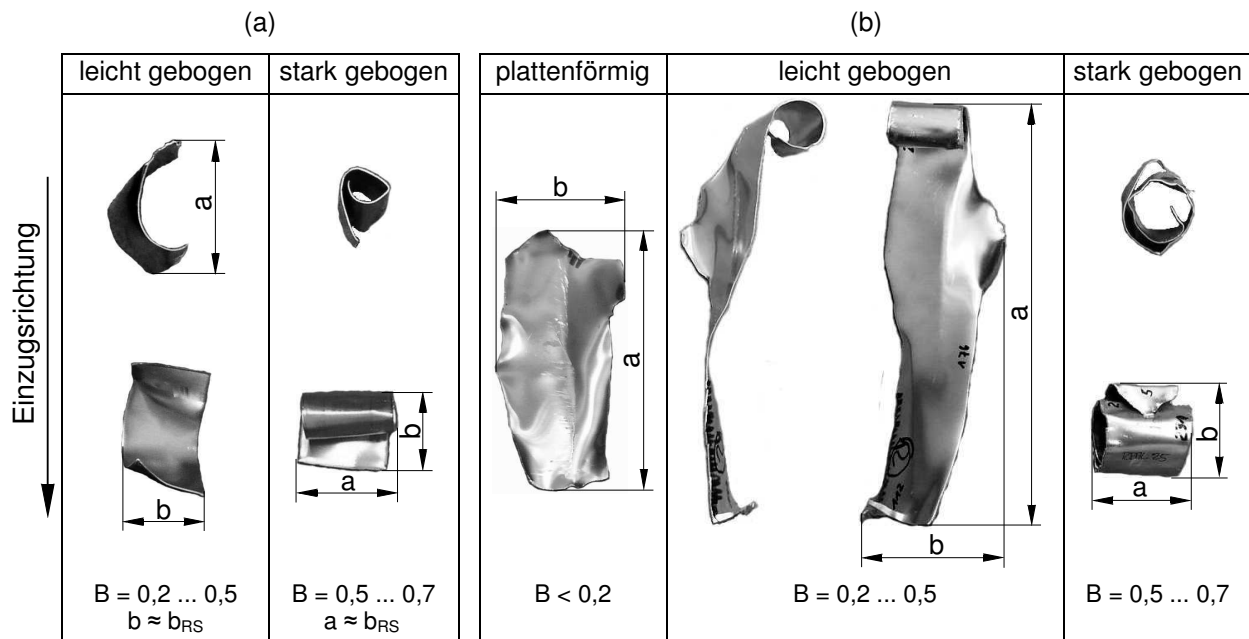


Bild 6.20: Typische AlMg3-Bruchstücke des ein- (a) und zweirotorigen (b) Rotorreißers

Maßstabsgetreue Darstellung; B - Biegegrad; a, b - grte und mittlere Hauptabmessung; b_{RS} - Rotormesser- bzw. Rotorscheibenbreite; s. auch Anlage 13

Die Zerkleinerung mit dem *zweirotorigen Rotorreißer* ist durch einen überwiegend unbestimmten Rißverlauf ausgehend von den durch die Rotormesser geschaffenen Anrissen gekennzeichnet (Bild 6.18b). Daraus resultiert ein sehr breites Stückgrößen- und Stckformspektrum. Typische Stückgrößenverteilungen zerkleinerter AlMg3-Bleche zeigt Bild 6.19b. Es wird deutlich, daß die Stückgröße der Bruchstücke kaum von den Abmessungen der Zerkleinerungselemente beeinflusst wird. Durch die unbestimmte Rißausbreitung bilden sich meist größere und leicht zusammenhängende Materialbereiche, die als einziges Bruchstück zählen (Anlage 13/2).

Das Zerkleinerungsprodukt umfaßt plattenförmige, leicht gebogene und auch stark gebogene Bruchstücke, wie sie beispielsweise in Bild 6.20b zusammengestellt sind. Letztere werden meist durch Verformungsvorgänge beim Weiterreißen entlang der Rotormesser- und Rotorscheibenkanten gebildet und besitzen eine vergleichsweise geringe Stückgröße. Im Gegensatz zur zweirotorigen Rotorschere weisen aber auch die stark gebogenen Stücke keine bzw. nur wenige geknickte oder scharfkantig gebogene Materialbereiche auf, was auf die größeren Abstände zwischen den Zerkleinerungselementen zurückzuführen ist. Auch die intensiven Verformungen infolge der Verklemmung der Bruchstücke beim Abstreifen, wie sie bei der zweirotorigen Rotorschere beobachtet werden konnten, treten daher kaum auf.

Für die Charakterisierung der *Bruchstückverformung* werden im Fall des einrotorigen Rotorreißers nur die durch die Rotormesser gebildeten Bruchstücke betrachtet und beim zweirotorigen Rotorreißer die noch leicht zusammenhängenden Bruchstücke manuell getrennt (Anlage 13/3). Vergleichbar mit der zweirotorigen Rotorschere sind die Bruchstücke des einrotorigen Rotorreißers im wesentlichen in Einzugsrichtung verformt. Diese Verformungen sind die Folge des Einzugs- und Zerkleinerungsvorganges bei großem Messereingriffswinkel. Eine deutliche

Verformung der Bruchstücke des zweirotorigen Rotorreißers tritt meist nur im unmittelbaren Eingriffsbereich der Rotormesser auf. Aufgrund der relativ großflächigen Bruchstücke ist die Gesamtverformung jedoch deutlich niedriger als beim einrotorigen Rotorreißer (Bild 6.21a).

Im **Energiebedarf** unterscheiden sich beide Rotorreißertypen deutlich von der Beanspruchung mit der Modell-Zerkleinerungsapparatur (Bild 6.21b). Eine Ursache dafür ist, daß eine ideale Einspannung des Probekörpers wie bei den Rotorreißergeometrien nicht erreicht werden kann. Dadurch unterliegt der Probekörper insbesondere beim Einreißen einer starken Biegebeanspruchung. Von wahrscheinlich größerer Bedeutung für den Energiebedarf des einrotorigen Rotorreißers ist die Reibung zwischen dem Probekörper und den Zerkleinerungswerkzeugen während des Einzuges. Der Probekörper wird unter der wirkenden Zerkleinerungskraft stark auf die Statorwerkzeuge gepreßt und gleichzeitig in Einzugsrichtung bewegt, so daß zusätzlich eine vergleichsweise hohe Reibungsenergie aufzuwenden ist.

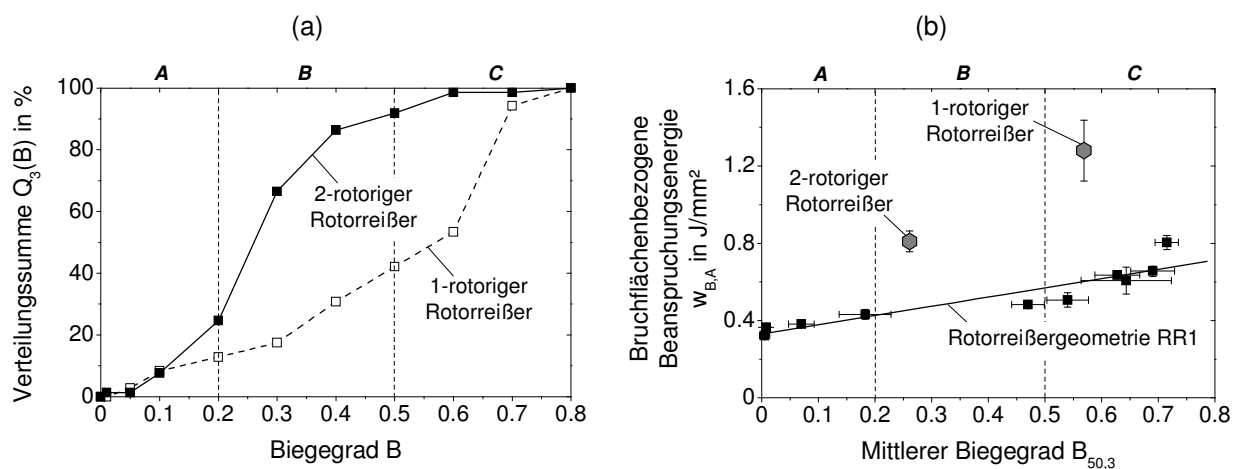


Bild 6.21: Beschreibung der Gesamtverformung der AlMg3-Bruchstücke bei der Zerkleinerung mit dem ein- und zweirotorigen Rotorreißer durch den Biegegrad; (a) Biegegradverteilung; (b) Zusammenhang zwischen Biegegrad und Energiebedarf für die Zerkleinerung

(A) - plattenförmig; (B) leicht gebogen; (C) stark gebogen; AlMg3; Wanddicke 1 mm; Beanspruchungsgeschwindigkeit 0,4 m/s; Modell-Zerkleinerungsapparatur: axiale Spaltweite 10 mm; radiale Spaltweite > 10 mm; einrotorig: Probekörper $l_{PK} \times b_{PK} = (400 \times 360)$ mm²; ohne die Reststücke der Statorwerkzeuge; zweirotorig: Probekörper $l_{PK} \times b_{PK} = (500 \times 500)$ mm²; Wellenabstand 300 mm; Auftrennung der leicht zusammenhängenden Stücke

Einzugsverhalten und Energiebedarf der Rotorreißer

Bei beiden Rotorreißertypen verschlechtert sich der Einzug der plattenförmigen Probekörper mit größer werdender Wanddicke, wobei infolge der Reibungsprozesse an den Statorwerkzeugen mit dem einrotorigen Rotorreißer stets eine geringere Einzugs geschwindigkeit resultiert (Bild 6.22). Der Einzug des Materials erfolgt im wesentlichen durch die Rotormesser. Ein dünnwandiger Probekörper kann bei Eingriff der Rotormesserfrontschneide leichter verformt werden, wodurch sich auch ohne Lochvorgang frühzeitig eine formschlüssige Verbindung mit dem Rotormesser ausbildet. Mit zunehmender Wanddicke wird die Verformung des Materials bei Eingriff der Rotormesser erschwert, so daß sich der Schlupf zwischen Probekörper und Rotormesser vor dem Lochvorgang vergrößert.

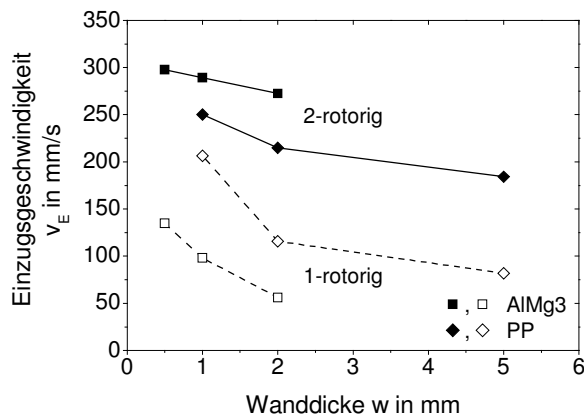


Bild 6.22: Auswirkung der Wanddicke der Probekörper auf das Einzugverhalten der Rotorreißer

Beanspruchungsgeschwindigkeit 0,4 m/s;

einrotorig: Probekörper $l_{PK} \times b_{PK} = (400 \times 360) \text{ mm}^2$;

zweirotorig: Probekörper $l_{PK} \times b_{PK} = (500 \times 500) \text{ mm}^2$;

Wellenabstand 300 mm

Der Energiebedarf der Rotorreißer wird mit zunehmender Wanddicke des Materials maßgeblich von den ablaufenden Verformungsvorgängen beeinflusst (Gl. (5.2): $W_{BU} \sim w^2$). Diese können im Vorfeld der Anrißbildung infolge einer ungünstigen Einspannung des Materials oder während der Rißausbreitung auftreten. Der Zerkleinerungsvorgang des einrotorigen Rotorreißers wird zusätzlich von Reibungsverlusten während des Einzuges beeinträchtigt, so daß mit größer werdender Wanddicke die bruchflächenbezogene Beanspruchungsenergie für die Zerkleinerung der AlMg3-Bleche stark ansteigt (Bild 6.23a). Da sich bei der Modell-Zerkleinerungsapparatur durch die Einspannung des Probekörpers günstige Bedingungen für eine Reißbeanspruchung ergeben und im Fall des zweirotorigen Rotorreißers die Rißausbreitung eine geringere Bruchstückverformung verursacht, wirkt sich die Wanddicke weniger auf den Energiebedarf für die Zerkleinerung aus.

Bei der Zerkleinerung der Polypropylen-Platten überlagern sich stabil und instabil ausbreitende Risse. Mit zunehmender Wanddicke und einer ungünstigen Einspannung erfolgt verstärkt die instabile Rißausbreitung (sprödes Stoffverhalten), weshalb die Zerkleinerung in den kleintechnischen Rotorreißern bei höherer Wanddicke energetisch günstiger abläuft (Bild 6.23b).

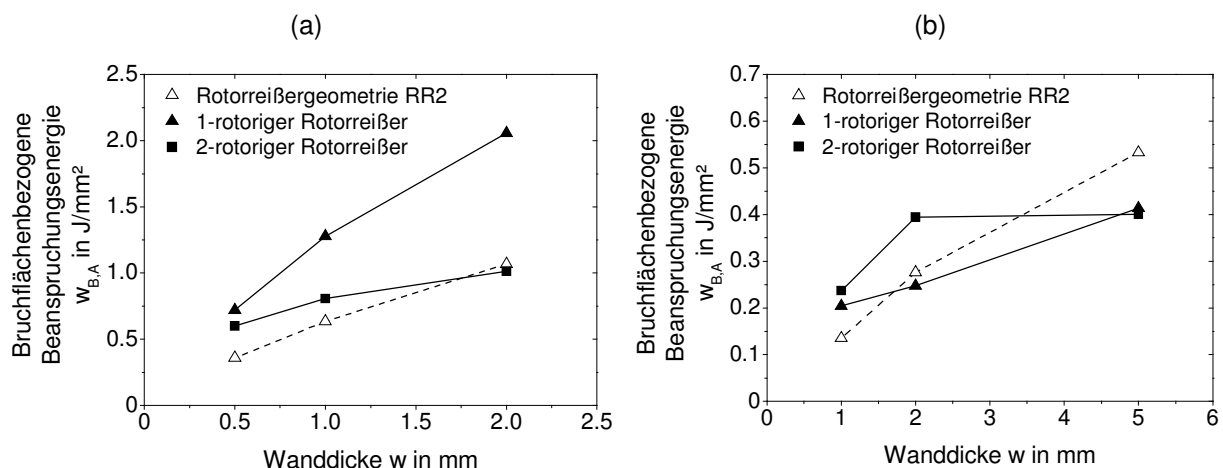


Bild 6.23: Bruchflächenbezogene Beanspruchungsenergie für die Zerkleinerung von AlMg3- (a) und Polypropylen-Platten (b) im Vergleich zur Modell-Zerkleinerungsapparatur

Beanspruchungsgeschwindigkeit 0,4 m/s; Modell-Zerkleinerungsapparatur: axiale Spaltweite 10 mm; radiale Spaltweite > 10 mm; Messereingriffswinkel 61° ; einrotorig: Probekörper $l_{PK} \times b_{PK} = (400 \times 360) \text{ mm}^2$; zweirotorig: Probekörper $l_{PK} \times b_{PK} = (500 \times 500) \text{ mm}^2$; Wellenabstand 300 mm

6.1.3 Vergleich der Zerkleinerungsergebnisse

Einen Vergleich der in Rotorschern und Rotorreißern ablaufenden Beanspruchungsvorgänge ermöglicht die **bruchflächenbezogene Beanspruchungsenergie** (Tabelle 6.1). Aus den Untersuchungen zu den Grundbeanspruchungsarten geht hervor, daß eine Zerkleinerung mittels Schneid- und Scherbeanspruchung aufgrund der auf den engen Spalt begrenzten Verformungs- und Reibungsprozesse nur eine geringe bruchflächenbezogene Beanspruchungsenergie erfordert. In Rotorschern erfolgt die Zerkleinerung durch eine komplexe Beanspruchung aus Schneid-, Scher- und Reißbeanspruchungen, die von z. T. intensiven Verformungs- und Reibungsprozessen überlagert wird. Selbst bei einer geringen makroskopischen Verformung der Bruchstücke ergibt sich daher bei der Einzelstückzerkleinerung ein zwei- bis dreifach höherer Energiebedarf. Mit zunehmender Bruchstückverformung und infolge höherer Reibungsanteile beim Abstreifen

Tabelle 6.1: Mittlere bruchflächenbezogene Beanspruchungsenergien $w_{B,A}$ in J/mm² in Abhängigkeit von der Beanspruchungsart und Beanspruchungsbedingungen

	Geschwindigkeit	AlMg3 (Wanddicke 1 mm)	Polypropylen (Wanddicke 5 mm)
1. Grundbeanspruchungsarten			
• <i>Schneidbeanspruchung</i> - Schlagwerk	0,6 m/s	0,11	0,06
• <i>Scherbeanspruchung</i> - Schervorrichtung	quasistatisch	0,08	0,12
- Schlagwerk	0,6 m/s	0,12	0,07
• <i>Reißbeanspruchung</i> ¹⁾ - Reißvorrichtung	quasistatisch	0,2 ... 0,4	0,15 ... 0,30
- Schlagwerk	5,5 m/s	0,3 ... 1,0	-
• <i>Biegebeanspruchung (Biegebrechen)</i> - Schlagwerk	5,5 m/s	-	0,07
• <i>Einachsige Zugbeanspruchung</i> ²⁾ - Zugversuch	quasistatisch	1,2	3,1
2. Einzelstückzerkleinerung			
• <i>Rotorscherengeometrien</i> - Schlagwerk	2,5 m/s	0,31	0,12
- Modell-Zerkleinerungsapparatur	0,4 m/s	0,34 ... 1,6 ³⁾	0,12 ... 0,38 ³⁾
• <i>Rotorreißergeometrien</i> - Schlagwerk	2,5 m/s	0,28	0,05 ... 0,10 ⁴⁾
- Modell-Zerkleinerungsapparatur	0,4 m/s	0,32 ... 0,80 ⁵⁾	0,23 ... 0,51 ⁵⁾
3. Kleintechnische Zerkleinerung			
• <i>Einrotorige Rotorschere</i>	0,4 m/s	0,6	0,24
• <i>Zweirotorige Rotorschere</i>	0,4 m/s	1,5	0,44
• <i>Einrotoriger Rotorreißer</i>	0,4 m/s	1,3	0,41
• <i>Zweirotoriger Rotorreißer</i>	0,4 m/s	0,8	0,40
4. Großtechnische Zerkleinerung			
• <i>Einrotorige Rotorschere</i>	0,4 m/s	2,5 ⁶⁾	0,2
5. Zerkleinerung in einem Hammerreißer			
als Vergleich (aus [64])	50 m/s	10 ... 12	-

¹⁾ Versuche zur Reißbeanspruchung mit intensiver Verformung und Reibung, ohne Einreißen, keine Riäusbreitung als Querscherriß;

²⁾ Querschnittbezogene Beanspruchungsenergie;

³⁾ Energiebedarf ist abhängig von der Einspannung des Probekörpers, der Bruchstückverformung und den Reibungsverlusten beim Abstreifen der Bruchstücke;

⁴⁾ Biegebrechen mit überwiegendem Sprödbbruch;

⁵⁾ Energiebedarf ist abhängig von der Bruchstückverformung;

⁶⁾ hohe Reibung und Bruchstückverformung aufgrund großer Spaltweiten

der Bruchstücke steigt der Energiebedarf beträchtlich an. Die einrotorige Rotorschere ist aufgrund der geringen Bruchstückverformung durch einen niedrigen Energiebedarf gekennzeichnet. Diese Ergebnisse konnten auch durch Versuche an einer großtechnischen Rotorschere, die mit einer vergleichbaren Meßtechnik ausgestattet war, bestätigt werden. Dagegen treten bei der zweirotorigen Rotorschere intensive Verformungsvorgänge und hohe Reibungsverluste infolge der Rotorscheibenüberdeckung und der Bruchstückabstreifung auf.

Die ausgehend von der Schneid- und Scherbeanspruchung durch die Vergrößerung der Spaltweite erreichte Reißbeanspruchung kann in Schneidmühlen und Radialspalt-Rotorschern vorkommen. Hohe Reibungsverluste im Bereich des Spaltes und intensive Verformungen erhöhen den Energiebedarf beträchtlich. Der für Rotorreißer typische Reißvorgang, d. h. das Einreißen und das Weiterreißen als Querscherriß, erfordert bei der Zerkleinerung von AlMg3 mit dem Schlagwerk und der Modell-Zerkleinerungsapparatur eine mit den Rotorschern vergleichbaren Energiebetrag. Dagegen wirken sich die plastischen Verformungen von Polypropylen beim Reißen nachteilig aus. Bei höheren Geschwindigkeiten am Schlagwerk oder unter einer verstärkt mehrachsigen Beanspruchung vollzieht sich der Übergang zum Biegebruch bei einem geringeren Energiebedarf. Die kleintechnische Zerkleinerung ist wie bei den Rotorschern durch höhere Verformungs- und Reibungsanteile geprägt, so daß sich ein ähnlicher Energiebedarf ergibt. Gegenüber dem Hammerreißer ist der Energiebedarf der Rotorschern und Rotorreißer jedoch um etwa eine Größenordnung niedriger.

Den Zusammenhang zwischen der **Bruchstückverformung** und der bruchflächenbezogenen Beanspruchungsenergie verdeutlicht Bild 6.24. Danach steigt der Energiebedarf der Modell-Zerkleinerungsapparatur annähernd linear mit dem Biegegrad an. Die kleintechnischen Rotorschern und -reißer ergeben bei gleichem Verformungszustand geringfügig höhere Werte, was auf stärkere Reibungsverluste durch die Überdeckung und Abstreifung sowie spezifische Umformvorgänge, wie z. B. eine Knickung, zurückzuführen ist. Solche Vorgänge treten verstärkt bei der zweirotorigen Rotorschere auf. Dadurch ergibt sich bei ähnlicher Bruchstückverformung in etwa der doppelte Energiebedarf gegenüber der Modell-Zerkleinerungsapparatur.

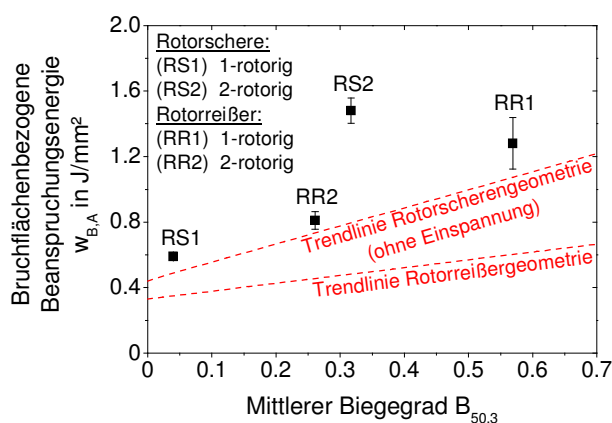


Bild 6.24: Zusammenhang zwischen Bruchstückverformung und bruchflächenbezogener Beanspruchungsenergie

AlMg3; Wanddicke 1 mm; Beanspruchungsgeschwindigkeit 0,4 m/s

Die **massebezogene Beanspruchungsenergie** wird maßgeblich vom Zerkleinerungsverhältnis bzw. der mittleren Stückgröße²⁾ des Zerkleinerungsproduktes beeinträchtigt (Bild 6.25). Das hohe Zerkleinerungsverhältnis der Rotorschern führt gegenüber den Rotorreißern zu einem

²⁾ Da sich die Produkte der einzelnen Zerkleinerungsmaschinen in ihren Abmessungen und Verformungszuständen stark unterscheiden, dient zur Kennzeichnung der Stückgröße die äquivalente Stückgröße (s. Gl. (3.14)), die ein unverformtes Stück quadratischer Grundfläche mit gleicher Masse und Wanddicke beschreibt.

größeren massebezogenen Energiebedarf. Die Überlagerung der Werte von AlMg3 und Polypropylen ist in der höheren Wanddicke des Polypropylen begründet.

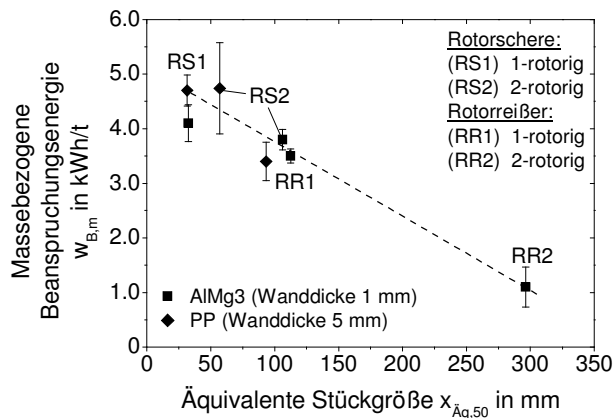
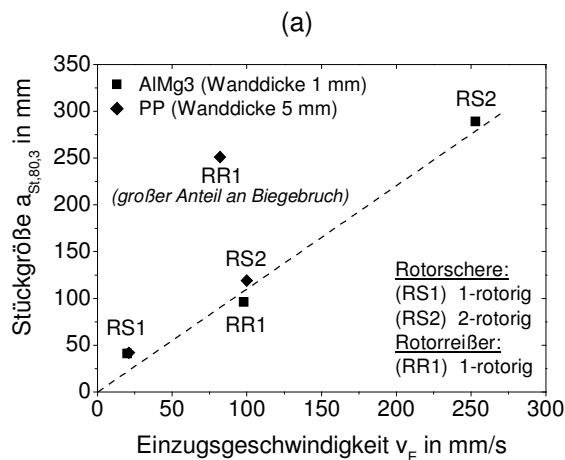


Bild 6.25: Zusammenhang zwischen der mittleren Stückgröße des Zerkleinerungsprodukts und der massebezogenen Beanspruchungsenergie
Beanspruchungsgeschwindigkeit 0,4 m/s

Eine enge Verbindung zwischen Rotorschern und Rotorreißern besteht ebenfalls bei der sich entsprechend der *Einzugsverhältnisse* ergebenden oberen *Stückgröße* (Bild 6.26). Danach nimmt die obere Stückgröße, die sich meist in Einzugsrichtung ergibt, proportional zur Einzugs- geschwindigkeit zu. Die höchsten Durchsätze können demzufolge mit den zweirotorigen Bauarten erzielt werden. Von wesentlichem Einfluß auf die entstehenden Stücke und den Einzug dürfte die Gestalt der Rotorscheiben sein, d. h. der Durchmesser und die Anzahl der Rotormesser pro Rotorscheibe. Diese Einflußgrößen konnten jedoch nicht untersucht werden.



(b)

	Spezifischer Durchsatz $\dot{m}_{\text{spez.}}$ in kg/h*m	
	AlMg3 (Wanddicke 1 mm)	PP (Wanddicke 5 mm)
<u>1-rotorig</u>		
Rotorschere	200	340
Rotorreißer	920	1350
<u>2-rotorig</u>		
Rotorschere	2420	1630
Rotorreißer	2750	2980

Bild 6.26: Auswirkung der Einzugsverhältnisse auf die obere Stückgröße (a) und den spezifischen Durchsatz (b)

Beanspruchungsgeschwindigkeit 0,4 m/s; Rotorscheibendurchmesser $D_{\text{MK}} = 400$ mm; 3 Messer pro Rotorscheibe

6.2 Zerkleinerung realitätsnaher Abfallschüttungen

Im Gegensatz zur großtechnischen Zerkleinerung wurden für die Versuche nur homogen zusammengesetzte Abfallschüttungen verwendet. Die Stückgrößenverteilungen der mit der kleintechnischen Rotorschere zerkleinerten Abfälle zeigt Bild 6.27. Im Vergleich zu den plattenförmigen Probekörpern weisen die Verteilungen einen ähnlichen Verlauf auf. Die untere Stückgröße wird ebenfalls durch die Rotorscheibenbreite begrenzt. Dagegen überspannt die größte Hauptabmessung der Stücke einen weiten Stückgrößenbereich. Bei der Zerkleinerung der Pkw-

Reifen entstehen viele größere Stücke aufgrund des entpieelastischen Stoffverhaltens sowie der eingebetteten Stahldrähte, die durch die Scherbeanspruchung in der Rotorschere nicht immer zerkleinert werden können. Daraus resultiert auch eine höhere massebezogene Beanspruchungsenergie. Im Vergleich zu den Literaturwerten (s. Tabelle 2.5) sind die spezifischen Energiebeträge jedoch deutlich niedriger, da nur die tatsächliche Zerkleinerungsenergie (ohne Leerlaufenergie) betrachtet wird.

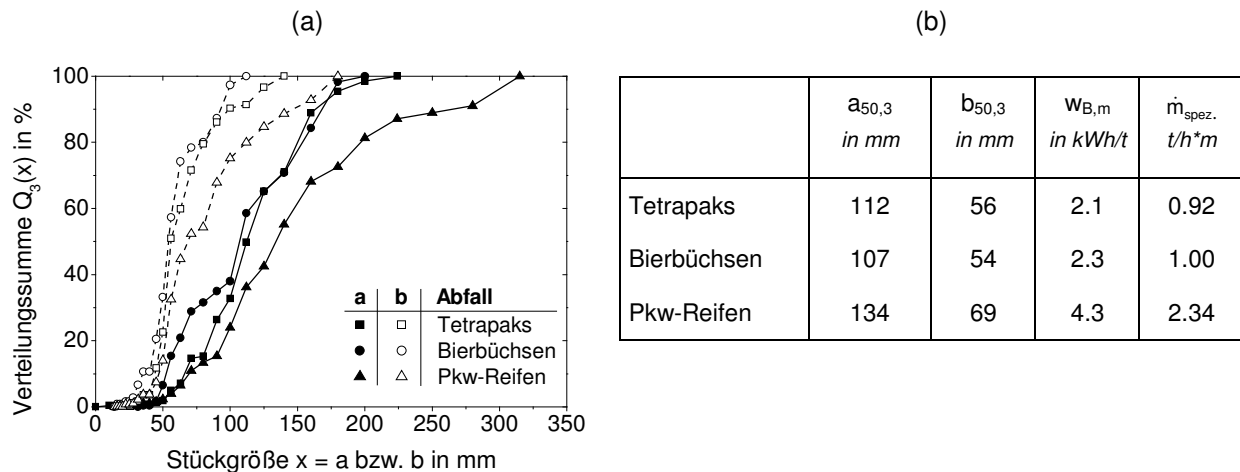


Bild 6.27: Zerkleinerung typischer Abfälle mit der zweirotorigen Rotorschere (aus [115]); (a) Stückgrößenverteilungsfunktionen; (b) Charakterisierung der Zerkleinerungsergebnisse Beanspruchungsgeschwindigkeit 0,4 m/s; Wellenabstand 290 mm

Durch die Vergrößerung des Wellenabstandes ergeben sich wie bei der Zerkleinerung der Bleche und Platten größere Bruchstücke und ein höherer Durchsatz (Bild 6.28). Bei den Abfallschüttungen lassen sich diese jedoch nicht allein auf die günstigeren Einzugsbedingungen zurückführen. Vor allem vergrößern sich die radialen Abstandsverhältnisse mit zunehmendem Wellenabstand, so daß größere Stücke z. T. unzerkleinert durchtreten können. Damit verbunden ist auch ein niedriger massebezogener Energiebedarf, da das Zerkleinerungsverhältnis abnimmt.

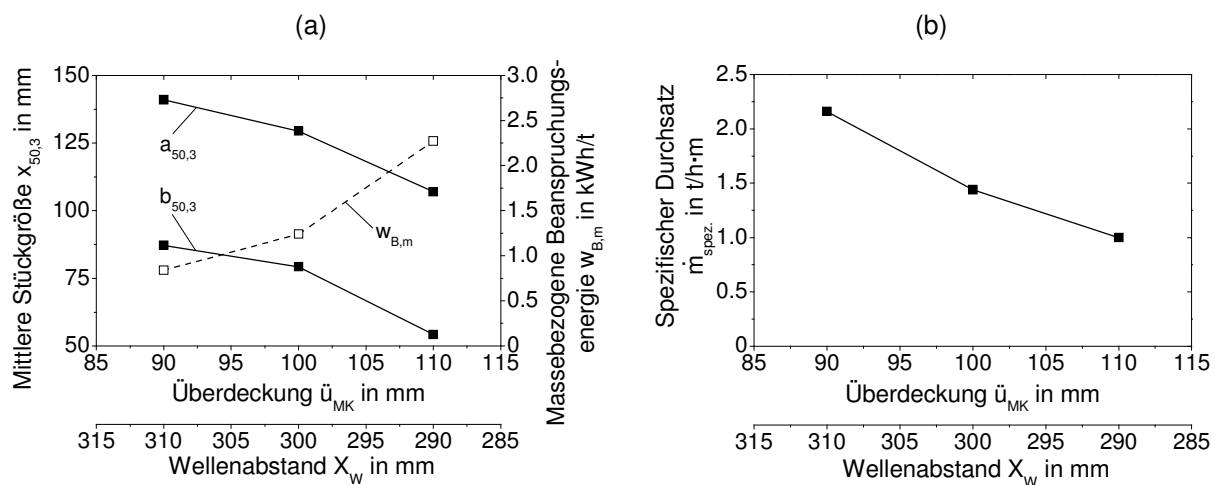


Bild 6.28: Einfluß der Überdeckung bzw. des Wellenabstandes auf die Zerkleinerung von Bierbüchsen mit der zweirotorigen Rotorschere (aus [115]) Beanspruchungsgeschwindigkeit 0,4 m/s

Einen Vergleich von Rotorschere und Rotorreißer ermöglicht die Zerkleinerung von Holzabfall (Bild 6.29). Sowohl bei der Rotorschere als auch beim Rotorreißer weist die Stückgrößenverteilung nach der größten Hauptabmessung einen sehr breiten Bereich auf, was in dem anisotropen Stoffverhalten von Holz begründet ist. Holz besitzt bei einer Zugbeanspruchung quer zur Faserrichtung eine merklich geringere Festigkeit als in Faserrichtung. So entsteht bei einer

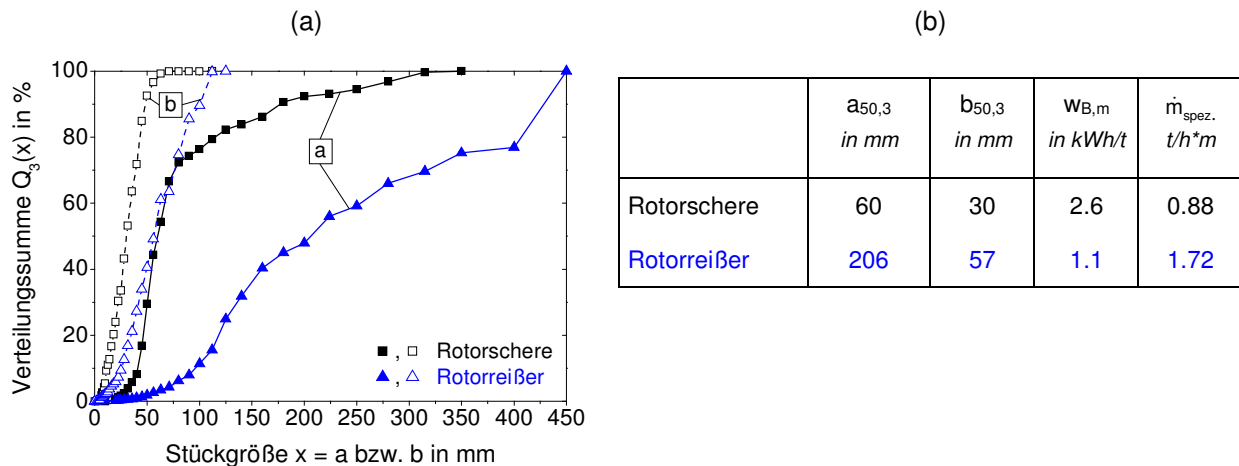


Bild 6.29: Zerkleinerung von Holzabfall mittels zweirotoriger Rotorschere und Rotorreißer; (a) Stückgrößenverteilungsfunktionen; (b) Charakterisierung der Zerkleinerungsergebnisse Dielenbretter aus Fichten- und Kiefernholz; Beanspruchungsgeschwindigkeit 0,4 m/s; Wellenabstand 290 mm

Biege- und Scherbeanspruchung parallel zur Faserrichtung ein eher verformungsarmer Bruch, während die Fasern nur durch Schneid-, Scher- oder Reißbeanspruchung unter hohem Energieeinsatz zerkleinert werden können. Der höhere Anteil längerer Bruchstücke bei der Rotorschere ist daher auf Holzstücke zurückzuführen, die quer zur Faserrichtung nicht vollständig getrennt wurden. Die größeren Spaltweiten beim Rotorreißer fördern die Biegebeanspruchung und den Bruch entlang der Fasern, wodurch besonders viele längere Bruchstücke entstehen. Infolge des deutlich geringeren Zerkleinerungsverhältnisses wird mit dem Rotorreißer ein höherer Durchsatz bei einem niedrigen massebezogenen Energiebedarf erzielt.

6.3 Schlußfolgerungen für den Einsatz von Rotorschern und Rotorreißern

Auf der Grundlage der gewonnen Erkenntnisse können bevorzugte Einsatzgebiete und Betriebsparameter der Rotorschern und Rotorreißer abgeleitet werden (Tabelle 6.2). Die einrotorigen Rotorschern zeichnen sich durch ein kleinstückiges Zerkleinerungsprodukt mit enger Stückgrößenverteilung aus und eignen sich daher besonders für die Erzeugung definierter Produkte. Wird dagegen eine Vor- oder Grobzerkleinerung mit hohem Durchsatz gefordert (z. B. eine Vorzerkleinerung in Müllverbrennungsanlagen), dann sollten insbesondere zweirotorige Rotorschern oder -reißer eingesetzt werden. Für die Freilegung massiver Stücke (z. B. die Zerkleinerung von Altfahrzeugen) sind aufgrund der größeren Freiräume zwischen den Zerkleinerungselementen zweirotorige Rotorreißer von Vorteil. Des weiteren kann durch die Anpassung der Beanspruchungsgeometrie und der Betriebsparameter an das zu zerkleinernde Material und die Zerkleinerungsaufgabe im allgemeinen eine deutliche Verringerung des Energiebedarfs erzielt werden.

Tabelle 6.2: Empfehlung für den Einsatz der Rotorscheren und Rotorreißer entsprechend der Zielstellung der Zerkleinerung

Zielstellung	Zerkleinerungsmaschine/Parameter
<u>Herstellen eines Produktes:</u> enge, definierte Stückgrößenverteilung	<u>Rotorscheren (insbesondere einrotorig):</u> Anpassung der Zerkleinerungselemente an die gewünschte Stückgröße (Rotormesserlänge und -breite, Rotorscheibenbreite, Anzahl der Rotormesser pro Rotorscheibe); geringe axiale und radiale Spaltweite; evtl. Einbau eines Siebrostes
<u>Grob- und Vorzerkleinerung:</u> günstiger Einzug, hoher Durchsatz, geringer massebezogener Energiebedarf	<u>Zweirotorige Rotorscheren und Rotorreißer:</u> geringe Überdeckung, keine bzw. geringe Relativgeschwindigkeit zwischen den Rotoren, kein Siebrost, Festlegung der axialen und radialen Spaltweiten sowie der Abmessungen der Zerkleinerungselemente in Abhängigkeit von der geforderten Stückgröße, evtl. zusätzliche Zuführeinrichtung
<u>Aufschlußzerkleinerung:</u> Freilegen massiver Stücke, geringe Belastung der Zerkleinerungsmaschine	<u>Rotorreißer (insbesondere zweirotorig):</u> Anpassung der axialen und radialen Abstandsverhältnisse an die Abmessungen der enthaltenen massiven Stücke
<u>Geringer Energiebedarf</u>	<u>Rotorscheren und Rotorreißer:</u> Reibungs- und Verformungsprozesse minimieren durch: geringen Messereingriffswinkel, minimale Überdeckung, geringe Schneidkantenradien, Anpassung des Übergangsradius an den Messereingriffswinkel, keine bzw. geringe Relativgeschwindigkeit zwischen den Rotoren

7 Betrachtungen zur Fortführung der Untersuchungen

Durch die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen konnte ein Beitrag zum Verständnis der in Rotorschern und -reißern ablaufenden Vorgänge geleistet werden. Ein abgestuftes Versuchsprogramm ermöglichte es, wesentliche Mikroprozesse getrennt voneinander in speziellen Modellapparaturen und im komplexen Zusammenwirken in kleintechnischen Zerkleinerungsmaschinen zu untersuchen. Jedoch hinterläßt die Arbeit auch offene Fragen, deren detaillierte Klärung den Umfang der Arbeit überstiegen hätte. Ausgehend von den bisherigen Erkenntnissen lassen sich folgende interessante Ansatzpunkte für eine Fortführung ableiten.

7.1 Untersuchung der Vorgänge in Radialspalt-Rotorschern

Mit den Versuchen zur Scherbeanspruchung am Schlagwerk (s. Kap. 4) konnten bereits erste Erkenntnisse zum Zerkleinerungsvorgang in Radialspalt-Rotorschern gewonnen werden. Für eine umfassende Aufklärung ist jedoch ein abgestuftes Versuchsprogramm analog zu den Axialspalt-Rotorschern notwendig, das zunächst die Untersuchung der Mikroprozesse bei typischen Beanspruchungsgeometrien der Radialspalt-Rotorschern (s. Tabelle 2.3) zuläßt. In einem zweiten Versuchsabschnitt kann dann der Übergang zur kleintechnischen Zerkleinerung erfolgen. Als Ausgangspunkt bietet sich unter Anpassung der Rotor- und Statorgeometrie der Versuchsaufbau der einrotorigen Rotorschere an (s. Bild 3.13). Aus verfahrenstechnischer Sicht ist bisher ungeklärt, wie sich die Rotorgestaltung (Profil-, Flachrotor) sowie die Anordnung, Gestalt und Anzahl der Rotormesser auf den Energiebedarf, das Zerkleinerungsprodukt und das Einzugsverhalten auswirken. Auch die optimale Anpassung von Materialzufuhr (Schieber), Zerkleinerung und Produktaustrag (Siebrost) sollte Gegenstand des Versuchsprogrammes sein. Im Ergebnis der Untersuchungen wären konkrete Aussagen zu den in Radialspalt-Rotorschern ablaufenden Vorgängen in Abhängigkeit von konstruktiven Gesichtspunkten und dem Aufgabematerial möglich, die als Grundlage für eine Maßstabsübertragung und Modellierung genutzt werden könnten.

7.2 Untersuchung der Vorgänge in Schraubenreißern

Zu den Zerkleinerungsvorgängen in Schraubenreißern existieren bisher keine Untersuchungen. Im Gegensatz zu den Rotorreißern tritt in diesen Maschinen durch eine schraubenförmigen Rotorgestaltung insbesondere eine axial gerichtete Zugbeanspruchung auf [7]. Durch eine Nachbildung dieser Beanspruchung in Modellapparaturen könnten wesentliche Erkenntnisse zur Anrißbildung und Rißausbreitung sowie zu den erforderlichen Zerkleinerungskräften und -energien gewonnen werden. Von besonderem Interesse ist der Vergleich zur Reißbeanspruchung in Rotorreißern.

7.3 Maßstabsübertragung der Versuchsergebnisse auf großtechnische Maschinen

Als ein wesentlicher Gesichtspunkt für die Fortführung der Forschungsarbeit wird die Übertragung der Versuchsergebnisse auf großtechnische Rotorschern und -reißer angesehen. Eine ein-

fache Methode stellt die Interpolation bzw. Extrapolation der Ergebnisse bei geometrisch ähnlichen Maschinen dar [103]. Die Voraussetzung dafür ist, daß bei mindestens zwei Zerkleinerungsmaschinen gleicher Bauart, aber unterschiedlicher Größe, die entsprechenden Kennwerte (z. B. spezifischer Energiebedarf, Durchsatz, Stückgrößenverteilungen) durch Versuche ermittelt werden können. Diese lassen sich dann in Abhängigkeit von einer charakteristischen Abmessung der Zerkleinerungsmaschine oder der Zerkleinerungselemente darstellen (s. Bilder 2.15 u. 2.17). Aus den so erzielten Zusammenhängen könnten unter der Voraussetzung eines stetigen Kurvenverlaufs die interessierenden Kenngrößen für weitere Maschinen durch Interpolation bzw. Extrapolation ermittelt werden.

Die Aufstellung solcher Beziehungen für langsamlaufende Rotorscheren und Rotorreißer setzt jedoch einen hohen Versuchsaufwand voraus. Zunächst müßten unterschiedliche Baugrößen dieser Maschinen untersucht werden, die gleichzeitig mit der erforderlichen Meßtechnik zur Leistungs-, Drehzahl- und Drehmomenterfassung auszustatten wären. Um der Bedingung der geometrischen Ähnlichkeit gerecht zu werden, müßten des weiteren ein- und zweirotorige Bauarten getrennt voneinander betrachtet werden. Für die Durchführung der Versuche ist ein Vorgehen analog zu der von SANDER [64] vorgeschlagenen Reihenfolge sinnvoll. Danach sollten die Versuche bei gleichartigen Versuchsbedingungen anfangs mit definierten Probekörpern durchgeführt werden. Anschließend kann der Übergang zu realen Abfällen und Schrotten erfolgen, wobei Anpassungsfaktoren zu ermittelt sind. Aufgrund des hohen Versuchsaufwandes ist es empfehlenswert, sich zunächst nur auf eine Maschinengruppe zu konzentrieren. Wie die bisherigen Untersuchungen zeigen, dürften enge Zusammenhänge zwischen der Abmessung und Anordnung der Rotorwerkzeuge, dem spezifischen Energiebedarf, der Antriebsleistung, dem Durchsatz und dem Zerkleinerungsprodukt bestehen.

7.4 Modellierung und Simulation der Zerkleinerung in Rotorscheren und -reißern

Längerfristiges Ziel sollte die Modellierung wichtiger Mikroprozesse und des gesamten Makroprozesses sein, um in Abhängigkeit von der Gestaltung der Zerkleinerungsmaschine sowie den stoff- und betriebsbedingten Einflußgrößen das Zerkleinerungsergebnis vorhersagen zu können. Ausgehend von den bisherigen Erkenntnissen zeichnen sich bereits erste Ansätze für eine Modellierung der Scher- und Reißbeanspruchung ab. Für eine umfassende Modellierung sind jedoch noch umfangreiche Untersuchungen notwendig. Aus heutiger Sicht erscheinen folgende Aufgabenkomplexe als besonders wichtig:

a) Charakterisierung der zu zerkleinernden Stoffe und der Zerkleinerungsprodukte

Um die Zerkleinerung in Rotorscheren und -reißern modellieren zu können, ist es zwingend erforderlich, die Stückgröße und -form der zu zerkleinernden Stoffe und des Zerkleinerungsproduktes mit nur wenigen allgemeingültigen und einfach bestimmbar Kennwerten zu beschreiben. Aufgrund der außerordentlich großen Stückformvielfalt der Abfälle und Schrotte und der z.T. geringen Steifigkeit sowie der Verformbarkeit einiger Stücke bereitet das bisher große Schwierigkeiten, so daß die existierenden Kennwerte nur bedingt für die Modellierung geeignet sind [7] [97]. Eine Charakterisierung solcher Stücke erfordert eine dreidimensionale Analyse. Zukünftiges Ziel dieser Untersuchungen muß es sein, eine automatische Stückgrößen- und Stückformanalyse für verschiedene Abfälle und Schrotte zu entwickeln.

b) Weiterführende experimentelle Untersuchungen zu den Mikroprozessen

Für eine Modellierung der für Rotorreißer typischen Reißbeanspruchung aus Einreißen und Weiterreißen ist zunächst wichtig, diese unter idealisierten Versuchsbedingungen getrennt von überlagerten Verformungs- und Reibungsvorgängen zu analysieren. Dazu sollte das Stempel-messer der vorhandenen Scher- und Reißvorrichtung (vgl. Bild 3.2a) dahingehend modifiziert werden, daß beide Abschnitte betrachtet werden können. Denkbar wäre eine keilförmige Messerkontur. Im Ergebnis der Versuche könnten die für das Einreißen und Weiterreißen aufzuwendenden Kräfte (Einreiß- und Weiterreißfestigkeit) sowie der Energiebedarf für beide Abschnitte aus den Kraft-Weg-Verläufen ermittelt werden.

Einen weiteren Schwerpunkt sollten die Reibungsprozesse bilden. Diese treten insbesondere bei zweirotorigen Rotorschern in Verbindung mit dem Materialeinzug und der Bruchstückabstreifung sowie während der Zerkleinerung und infolge der Rotorscheibenüberdeckung auf. Eine gezielte Analyse der Reibungsprozesse war im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich. Daher sollten in zukünftigen Arbeiten diese Vorgänge unter typischen Bedingungen der Rotorschern und -reißer untersucht werden. Sinnvoll erscheint dafür zunächst die Entwicklung einfacher Modellapparaturen, mit denen die Reibungsbedingungen definiert eingestellt werden können. Mit den Versuchen sollte der Einfluß der Materialpaarung, der Oberflächenbeschaffenheit der Rotorscheiben, der auftretenden Flächenpressung sowie der Relativgeschwindigkeit geklärt werden. Dadurch wäre es dann möglich, einen wesentlichen Erkenntnisgewinn zum Einzugsverhalten und zur Reduzierung des Energiebedarfs bei Rotorschern und -reißern zu erzielen.

c) Charakterisierung des Zerkleinerungsverhaltens der nicht-spröden Stoffe bei scherender und reißender Beanspruchung

Eine Modellierung der Zerkleinerungsvorgänge erfordert die Kenntnis von Werkstoffkennwerten, die das Verhalten des Stoffes bei der jeweiligen Beanspruchungsart beschreiben. Durch die ersten Untersuchungen mit verschiedenen Aluminiumwerkstoffen ist deutlich geworden, daß mittels der im quasistatischen Zug- und Scherversuch bestimmten Kennwerte erste Ansätze bestehen, das Stoffverhalten in Rotorschern beschreiben zu können, wenn keine ausgeprägte Zeitabhängigkeit der Stoffeigenschaften vorhanden ist. Jedoch sollten die gefundenen Zusammenhänge durch die Einbeziehung weiterer Werkstoffe vertieft und erweitert werden. Des weiteren wäre es zur Charakterisierung des Stoffverhaltens in Rotorreißern erforderlich, zusätzlich den Reißversuch in das Versuchsprogramm zu integrieren. Da in der Praxis die Werkstoffkennwerte vor allem im Zugversuch bestimmt werden, ist es von besonderem Interesse, Zusammenhänge zwischen den Kennwerten des Scher- und Reißversuchs und denen des Zugversuchs herzustellen (Tabelle 7.1). Ein erster Ansatz könnte sich zwischen den Festigkeitskennwerten sowie den spezifischen Energien der einzelnen Prüfmethoden ergeben. Anschließend müßte versucht werden, die ermittelten Kennwerte auf die Zerkleinerung in Rotorschern und -reißern zu

Tabelle 7.1: Kennwerte der Prüfmethoden

Zugversuch	Scherversuch	Reißversuch
• Zugfestigkeit • Dehn- bzw. Streckgrenze • Elastizitätsmodul • Bruchdehnung • Spezifische Zugenergie	• Scherfestigkeit • Relativer Scherweg bis zum Bruch • Spezifische Scherenergie	• Einreißfestigkeit • Weiterreißfestigkeit • Spezifische Reißenergie

übertragen. Dafür sind Vergleichsversuche bei ausgewählten Rotorscheren- und Rotorreißergeometrien notwendig. Auf der Grundlage der zu erwartenden Zusammenhänge wäre es dann möglich, den für die Zerkleinerung erforderlichen Leistungs- und Energiebedarf vorherzusagen. Bei stark temperatur- und zeitabhängigem Stoffverhalten (z. B. bei Kunststoffen oder Metallen mit hexagonaler oder kubisch-raumzentrierter Struktur) müssen die Beanspruchungsbedingungen den realen Verhältnissen angepaßt werden. Dafür ist zunächst der Übergang zu dynamischen Prüfmethoden erforderlich. Diesem schwierigen Thema widmet sich bereits im Rahmen des DFG-Verbundprojektes „Zerkleinerung nicht-spröder Stoffe“ eine Forschergruppe unter der Leitung von Prof. Weichert an der TU Clausthal [117].

d) Beschreibung der Bruchstückverformung in Verbindung mit der Verformungsenergie

Eine wichtige Aufgabenstellung ist die Erfassung der bei der Zerkleinerung für die Verformung aufzuwendenden Energie. Dazu sollten in einem ersten Versuchsabschnitt zunächst definiert verformte Bruchstücke mit Kenntnis der Verformungsenergie erzeugt werden. Als Ausgangspunkt bietet sich die Zerkleinerung mit der Scher- und Reißvorrichtung an. Durch die Variation der Messergeometrie, d. h. des Messereingriffswinkels, kann der Scher- bzw. Reißbeanspruchung eine definierte Biegeumformung des Materials überlagert werden. Anhand der Kraft-Weg-Verläufe läßt sich der Verformungsvorgang nachvollziehen. Dadurch wäre es dann möglich, mit Kenntnis der „idealen“ Scher- bzw. Reißenergie den Energiebedarf für die Verformung in Abhängigkeit vom Verformungszustand zu ermitteln.

Für weitere Verformungsprozesse (z. B. Knickung, Torsion, Ziehen) könnte eine ähnliche Vorgehensweise gewählt werden. Ziel sollte es sein, Kennwerte zur Charakterisierung der durch Zerkleinerung entstandenen realen Bruchstücke zu entwickeln, welche die jeweiligen Anteile der Verformungsprozesse berücksichtigen.

Modellierung und Simulation einzelner Mikroprozesse

Vordergründiges Ziel der Modellierung und Simulation einzelner Mikroprozesse ist die Vorhersage der erforderlichen Kräfte und Energien bei einer Beanspruchung in Abhängigkeit von weitestgehend allen technisch interessanten Parametern. Dadurch könnten aufwendige experimentelle Untersuchungen entfallen. Gleichzeitig leistet die Modellierung und Simulation einen Beitrag zum besseren Verständnis der Vorgänge. Die Voraussetzungen für die Modellierung sind eine umfassende Analyse der Mikroprozesse und der Einflußgrößen sowie ausreichend genaue Werkstoffkennwerte. Mit der Modellierung der Schneid-, Scher- und Reißbeanspruchung beschäftigen sich mehrere Forschergruppen im Rahmen eines DFG-Verbundprojektes „Zerkleinerung nicht-spröder Stoffe“. Durch die einzelnen Teilprojekte werden sowohl die Datengrundlagen für die Modellierung geschaffen [118] [119] als auch die dynamischen Werkstoffkennwerte [117] ermittelt. Diese Daten fließen gemeinsam in eine Modellierung der Zerkleinerungsvorgänge auf Basis einer FE-Strategie ein [120].

In zukünftigen Forschungsprojekten sollte zusätzlich die Modellierung der Verformungs- und Reibungsprozesse angestrebt werden. Ziel muß es sein, durch eine Verknüpfung der Modelle auch die komplexe Beanspruchung in Rotorscheren und -reißen zu beschreiben.

Prozeßkinetische Modellierung der Zerkleinerung in Rotorscheren und -reißen

Für die Beschreibung der in Rotorscheren und -reißen ablaufenden Zerkleinerung in ihrer Gesamtheit müssen Modelle entwickelt werden, die alle prozeßrelevanten Grundvorgänge in Abhängigkeit von Zeit und Ort beschreiben [3] [103] [121] [122]. Die Voraussetzung dafür ist, daß die theoretischen Grundlagen der sich vollziehenden Vorgänge bekannt und die zur Prozeßcharakterisierung notwendigen Größen (Einfluß-, Ziel- und Systemgrößen) bestimmbar sind. Die Ziele einer solchen Modellierung bestehen unter anderem darin, die verfahrenstechnische Prozeßführung sowie die Optimierung und Automatisierung des Prozesses zu ermöglichen.

Die Modelle zur Zerkleinerung beschreiben die Mengenänderungen in den einzelnen Korn- bzw. Stückgrößenklassen durch gekoppelte Differentialgleichungssysteme [3] [121]. Eine Lösung dieser Gleichungssysteme erfordert sinnvolle Vereinfachungen und die experimentelle Ermittlung notwendiger Parameter. Für einen Zerkleinerungsprozeß mit eindimensionalem Transportvorgang gilt für die während der Zerkleinerung auftretenden Masseänderungen folgende Gleichung [3]:

$$\frac{\partial [m_x \mu_i]}{\partial t} = - \frac{\partial [m_x \mu_i v_i]}{\partial x} + \frac{\partial \left[D_i \frac{\partial (m_x \mu_i)}{\partial x} \right]}{\partial x} - S_i m_x \mu_i + \sum_{\substack{j=1 \\ i > j}}^{i-1} S_j b_{ij} m_x \mu_i \quad (7.1)$$

zeitliche
konvektive
diffuse
Abnahme
Zunahme

Mengenänderung
(Senke)
(Quelle)

m_x	Körnermasse im Volumenelement
μ_i	Masseanteil der i-ten Korn- bzw. Stückgrößenklasse im Volumenelement
v_i	Transportgeschwindigkeit der i-ten Korn- bzw. Stückgrößenklasse
D_i	Diffusionskoeffizient der i-ten Korn- bzw. Stückgrößenklasse
S_i	Zerkleinerungsrate (massebezogene Zerkleinerungsgeschwindigkeit) der i-ten Korn- bzw. Stückgrößenklasse
b_{ij}	diskrete Bruchstückgrößenverteilung

Die Prozeßgleichung berücksichtigt die gerichteten (konvektiven) und zufälligen (diffusen) Mengenänderungen infolge von Transportvorgängen sowie Mengenänderungen durch die Zerkleinerung, die sich insgesamt in zeitlichen Mengenänderungen der betrachteten Korn- bzw. Stückgrößenklasse äußern. Von besonderem Interesse für die Modellierung sind

- die Zerkleinerungsrate S_i , die den Masseanteil einer Korn- bzw. Stückgrößenklasse i angibt, der in der Zeiteinheit Bruchereignissen unterworfen wird,
- die diskrete Bruchstückgrößenverteilung b_{ij} , die den Masseanteil der gebrochenen Körner bzw. Stücke kennzeichnet, der von einer Klasse j auf die Klasse i übergeht,
- die Transportgeschwindigkeit v_i der i-ten Korn- bzw. Stückgrößenklasse sowie
- der Diffusionskoeffizient D_i der i-ten Korn- bzw. Stückgrößenklasse.

Ist der Zerkleinerung ein Klassierprozeß überlagert (z. B. der Materialaustrag durch einen Siebrost), muß zusätzlich eine Klassiergeschwindigkeit für jede Korn- bzw. Stückgrößenklasse berücksichtigt werden. Bei der Betrachtung aller Klassen ergibt sich somit ein Gleichungssystem mit außerordentlich vielen Koeffizienten. Für ihre Darstellung nutzt man meist die Vektor- bzw. Matrixschreibweise. Die Anzahl der Koeffizienten läßt sich im allgemeinen jedoch deutlich reduzieren, da diese über Gesetzmäßigkeiten miteinander verknüpft sind [121]. Die Bestimmung der restlichen Zerkleinerungskoeffizienten kann durch Versuche erfolgen.

Ausgangspunkt für die Modellierung der untersuchten Zerkleinerungsmaschinen sollten zunächst die Rotorscheren sein. Insbesondere die einrotorige Rotorschere dürfte durch ihre abgegrenzte Zerkleinerungszone, die geringen Verformungs- und Reibungsprozesse sowie das sich an den Abmessungen der Rotormesser orientierende Zerkleinerungsprodukt die Aufstellung eines Modells begünstigen. Auch sollte man sich anfangs auf ein definiertes Aufgabematerial beschränken. Zur Vereinfachung der Modellierung könnten folgende Annahmen getroffen werden:

- Bei stationären Verhältnissen braucht die zeitliche Änderung nicht berücksichtigt werden ($\partial[m_x \mu_i] / \partial t = 0$).
- Der konvektive Transport dominiert gegenüber dem diffusen Transport. Damit kann auf das diffuse Glied verzichtet werden.
- Durch die Beschränkung auf die ein- bzw. zweidimensionale Betrachtungsweise vereinfacht sich das Gleichungssystem.

Erst nach einer erfolgreichen Beschreibung der Zerkleinerung in Rotorscheren sollte der Übergang zu den Rotorreißern erfolgen. Auch die Zusatzeinrichtungen (z. B. Zwangszuführung, Siebrost, Abstreifer) sollten erst später integriert werden.

Problematisch erscheinen in diesem Zusammenhang die bisher unzureichende Charakterisierung der realen Abfälle und Schrotte, die deutliche Abhängigkeit der Beanspruchungsvorgänge von den konstruktiven Gestaltungsmerkmalen sowie die Einbeziehung der Verformungs- und Reibungsprozesse, die nicht zum Bruch führen. Daher ist die Anwendung der Modellierung und Simulation auf die großtechnische Zerkleinerung vorerst skeptisch zu betrachten.

8 Zusammenfassung

Der überwiegende Teil der Abfälle und Schrotte weist ein nicht-sprödes Stoffverhalten auf. Um diese Stoffe zerkleinern zu können, müssen im Material Schub- bzw. Zugspannungen durch äußere Beanspruchungen erzeugt werden. Für die Grob- und Mittelzerkleinerung, d. h. bis zu einer unteren Stückgröße des Zerkleinerungsproduktes von ca. 5 bis 10 mm, eignen sich Schneid-, Scher- und Reißbeanspruchungen. Die technische Umsetzung dieser Beanspruchungsarten erfolgt bevorzugt in Rotorschneidern, Rotorscheren und Rotorreißern, die auf Grundlage einer umfangreichen Literaturrecherche systematisiert werden konnten. Danach werden für die Zerkleinerung der Schrotte und Abfälle verbreitet langsamlaufende Rotorscheren und -reißer (Rotorumfangsgeschwindigkeit < 5 m/s) eingesetzt. Jedoch sind die sich bei der Zerkleinerung vollziehenden Vorgänge weitestgehend unbekannt. Ihre Aufklärung erfolgte auf der Basis systematischer Grundlagenuntersuchungen, die sich ausgehend von der Analyse einzelner Mikroprozesse schrittweise den realen Beanspruchungsbedingungen in Rotorscheren und -reißern annäherten. Die dafür eingesetzte Versuchstechnik umfaßte mehrere Vorrichtungen zur Analyse der Grundbeanspruchungsarten, Modellapparaturen mit typischen Rotorscheren- und Rotorreißergeometrien sowie kleintechnische ein- und zweirotorige Zerkleinerungsmaschinen.

Die wichtigsten Ergebnisse der drei Untersuchungskomplexe lassen sich wie folgt zusammenfassen:

a) Analyse der Grundbeanspruchungsarten

- Eine Schneid- bzw. Scherbeanspruchung führt zur Zerkleinerung, wenn zwischen den Messern eine gegenüber der Wanddicke geringe Spaltweite ($s \leq 0,5w$) vorhanden ist. Da die plastischen Verformungen auf den engen Spalt begrenzt sind, erfordern beide Beanspruchungsarten nur geringe Zerkleinerungsenergien.
- Eine Reiß- oder Biegebeanspruchung tritt mit dem Übergang zu größeren Spaltweiten auf. Die Reißbeanspruchung bei Spaltweiten im Bereich von $s = (0,5 \dots 1,0)w$ wird bei nur einseitiger Materialeinspannung von starken Reibungs- und Verformungsvorgängen begleitet, wodurch der Energiebedarf im Vergleich zur Schneid- oder Scherbeanspruchung beträchtlich ansteigt.
- Durch scharfe Messerkanten werden die Verformungen vor dem Bruch begrenzt und eine frühzeitige Rißbildung begünstigt.
- Übersteigt die Spaltweite die Wanddicke des Materials, erfolgt eine intensive Biegeumformung oder bei sprödebruchempfindlichen Stoffen ein verformungsarmer Biegebruch.

b) Untersuchung der Vorgänge bei für Rotorscheren und Rotorreißer typischen Beanspruchungsgeometrien

- In Rotorscheren treten komplexe Beanspruchungen auf, die in Abhängigkeit von der Anordnung und Gestalt der Zerkleinerungselemente auf eine Überlagerung von Schneid-, Scher- und Reißbeanspruchungen zurückzuführen sind.
- Bei der Zerkleinerung in Rotorreißern werden zunächst durch das Eingreifen der Rotormesser Anrisse geschaffen (Einreißen), die sich bevorzugt entlang der Werkzeugkanten in Form eines Querscherrisses ausbreiten (Weiterreißen).
- Für den Einzug des Materials sind die Rotormesser von zentraler Bedeutung. Ein alleiniger Einzug durch die Reibungskräfte an der Stirnseite der Rotorscheiben ist bei zweirotorigen Rotorscheren nur im Fall von dünnwandigem, plattenförmigem Aufgabematerial denkbar.

- Den Einzugs- und Zerkleinerungsvorgang begleiten intensive Reibungs- und Verformungsvorgänge, die den Gesamtenergiebedarf erheblich erhöhen können. Dazu zählen vor allem die Bruchstückverformung unterhalb des Rotormessers sowie die Reibungsverluste durch die Bruchstückabstreifung und die Rotorscheibenüberdeckung.
- Der Anteil der Verformungen wird maßgeblich von der Anordnung und der Gestalt der Zerkleinerungselemente (z. B. Messereingriffswinkel, Übergangsradius) und deren Verschleißzustand bestimmt. Bei einem voluminösen, hohlraumhaltigen Aufgabematerial sind im Vorfeld der Zerkleinerung zusätzliche Verformungsprozesse für die Verdichtung erforderlich.

c) *Untersuchung der Vorgänge in kleintechnischen Rotorscheren und -reißen*

- Der Einzugs- und Zerkleinerungsvorgang der einrotorigen Rotorschere setzt sich aus alternierenden Phasen der Zerkleinerung durch die Rotormesser und Phasen der Materialzufuhr zusammen, wodurch sich eine quasi-diskontinuierliche Zerkleinerung ergibt. Dagegen wird bei der zweirotorigen Rotorschere kontinuierlich Material eingezogen und insbesondere an den Seitenkanten der Rotorscheiben zerkleinert.
- Für die Zerkleinerung in Rotorreißen ist die Einspannung des Materials durch das Eingreifen mehrerer Rotormesser entscheidend. Erst im Anschluß daran können sich die Anrisse infolge der durch die Überdeckung von Rotormesser und Stator (einrotorig) bzw. der Rotorscheiben (zweirotorig) hervorgerufenen Zugspannungen weiter ausbreiten.
- Die großen Spaltweiten der Rotorreißer und die mehrachsige Beanspruchung fördern bei sprödebruchempfindlichen Stoffen (z. B. Polypropylen) das Biegebrechen.
- Die Zerkleinerungsprodukte der Rotorscheren werden maßgeblich von den Abmessungen der Rotormesser und Rotorscheiben beeinflusst. In Rotorreißen entstehen dagegen sehr breite Stückgrößenverteilungen. Aufgrund der günstigen Einzugsbedingungen weisen die zweirotorigen Bauarten größere Bruchstücke und einen höheren Durchsatz auf.
- Die Unterschiede im Energiebedarf der Rotorscheren und -reißer beruhen auf unterschiedlich ausgeprägten Verformungs- und Reibungsprozessen, wobei ein enger Zusammenhang zwischen dem mittleren Biegegrad $B_{50,3}$ und dem Energiebedarf besteht. Im Vergleich zu den schnelllaufenden Hammerreißen (Shredder) ist der Energiebedarf der langsamlaufenden Rotorscheren und Rotorreißer jedoch um ca. eine Größenordnung niedriger.

Ausgehend von den gewonnenen Erkenntnissen können für den Einsatz der Rotorscheren und Rotorreißer folgende Schlußfolgerungen gezogen werden:

- Die Rotorscheren eignen sich aufgrund der engen, sich an den Abmessungen der Zerkleinerungselemente orientierenden Stückgrößenverteilungen zur Herstellung definierter Zerkleinerungsprodukte.
- Die für die Vor- und Grobzerkleinerung geforderten hohen Durchsätze bei einem geringen spezifischen Energiebedarf werden mit zweirotorigen Rotorscheren und -reißen erreicht.
- Für die Freilegung massiver Bestandteile bei der Aufschlußzerkleinerung sollten wegen der größeren Freiräume im Zerkleinerungsraum zweirotorige Rotorreißer bevorzugt werden.

Eine Fortführung der Untersuchungen sollte verstärkt auf die Maßstabsübertragung der Ergebnisse auf großtechnische Rotorscheren und -reißer sowie die Modellierung einzelner Mikroprozesse und des gesamten Makroprozesses ausgerichtet sein. Für Letztere sind ergänzende Untersuchungen zur Beurteilung des Zerkleinerungsverhaltens der Stoffe bei scherender und schneidender Beanspruchung, zur Charakterisierung der Bruchstückverformung in Verbindung mit der Verformungsenergie und zu den Reibungsprozessen notwendig.

Literaturverzeichnis

- [1] Schatt, W. (Hrsg.): Einführung in die Werkstoffwissenschaft.
7., überarbeitete Auflage. Leipzig: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie 1991
- [2] Bergmann, W.: Werkstofftechnik - Teil 1: Grundlagen.
2., durchgesehene Auflage. München, Wien: Carl Hanser Verlag 1989
- [3] Schubert, H.: Aufbereitung fester mineralischer Rohstoffe.
Bd. 1, 4., stark überarbeitete Auflage. Leipzig: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie 1989
- [4] Schönert, K.: Zerkleinerung von Polymeren.
In: DECHEMA-Monographien Bd. 79. Weinheim: Verlag Chemie 1976, S. 67-88
- [5] Blumenauer, H. u. P. Pusch: Technische Bruchmechanik.
3., stark überarbeitete Auflage. Leipzig: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie 1993
- [6] Schubert, G.: Aufbereitung metallischer Sekundärrohstoffe.
Leipzig: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie 1983
- [7] Schubert, G.: Zerkleinerungstechnik für nicht-spröde Abfälle und Schrotte.
Aufbereitungs-Technik 43 (2003) 9, S. 6-23
- [8] Beyer, B. u. a.: Tabellenbuch Aluminiumwerkstoffe: Eigenschaften und Verarbeitung.
Leipzig: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie 1981, S. 149
- [9] Menges, G. u. a.: Werkstoffkunde Kunststoffe.
5., völlig überarbeitete Auflage. München, Wien: Carl Hanser Verlag 1999
- [10] Domininghaus, H.: Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften.
4., überarbeitete Auflage. Düsseldorf: VDI-Verlag 1992
- [11] Retting, W.: Mechanik der Kunststoffe.
München, Wien: Carl Hanser Verlag 1992
- [12] Erhard, G.: Konstruieren mit Kunststoffen.
2. Auflage. München, Wien: Carl Hanser Verlag 1999
- [13] Michler, G. H.: Kunststoff-Mikromechanik: Morphologie, Deformations- und Bruchmechanismen. München, Wien: Carl Hanser Verlag 1992
- [14] Schreyer, G.: Konstruieren mit Kunststoffen - Teil 1.
München, Wien: Carl Hanser Verlag 1972
- [15] Schubert, G.: Zerkleinerungstechnik für das Recycling von Abfällen und Schrotten.
Freiberger Forschungsheft A840, 1997, S. 12-32
- [16] Schubert, G. u. S. Bernotat: Comminution of non-brittle materials.
Proceedings, 10. European Symposium on Comminution, 2. bis 5.09.2002, Heidelberg
- [17] Woldt, D., Schubert, G. u. H.-G. Jäckel: Size reduction by means of low speed shears and cutters. Proceedings, 10. European Symposium on Comminution, 2. bis 5.09.2002, Heidelberg

- [18] Lange, K. (Hrsg.): Umformtechnik.
Bd. 1, 2., völlig neu bearbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 1984
- [19] Bauer, W.: Untersuchung des Einzelzerkleinerungsvorganges in Schneidmühlen am Beispiel von Polypropylen. Fortschrittsberichte VDI-Reihe 3, Nr. 694,
Düsseldorf: VDI-Verlag 2001
- [20] Gottberg, J. P.: Untersuchung des Schneidvorganges bei der Zerkleinerung von homogenen Weichstoffen am Beispiel hochpolymerer Kunststoffe.
Dissertation. TU Braunschweig, 1969
- [21] Redeker, D.: Analyse der Beanspruchungsmechanismen und deren Auswirkung auf die Schnittkraft beim Zerkleinern weicher, hochpolymerer Stoffe.
Dissertation. TU Braunschweig, 1975
- [22] Redeker, D.: Der Schneidvorgang an hochpolymerem Kunststoff und Gummi.
In: VDI-Gesellschaft Kunststofftechnik (Hrsg.): Aufbereiten von Kunststoffabfällen.
Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, 1973, S. 5-16
- [23] Gottberg, J. P.: Schneidvorgang und Arbeitsbedarf bei der Zerkleinerung hochpolymerer Weichstoffe. Kunststofftechnik 10 (1971) 6, S. 209-223
- [24] Gottberg, J. P.: Untersuchung des Schneidvorganges bei der Zerkleinerung hochpolymerer Weichstoffe. In: DECHEMA-Monographien Bd. 69,
Weinheim: Verlag Chemie 1971, S. 193-232
- [25] Bauer, W. u. D. Wüstenberg: Schneidzerkleinerung von Thermoplasten.
KU-Kunststoffe 91 (2001) 2, S. 62-65
- [26] Bauer, W. u. D. Wüstenberg: Bruchverhalten von Polypropylen bei dynamischer Schneid- und Scherbeanspruchung in Schneidmühlen.
Mat.-wiss. und Werkstofftechnik 32 (2001) 7, S. 601-606
- [27] Konieczka, R.: Untersuchen des Schneidvorganges beim Zerkleinern von Kunststoffen.
Kunststoffe 79 (1989) 7, S. 598-601
- [28] Okuda, S.: Fundamental study on impact crushing of viscoelastic materials and its application to actual crushing device. Amsterdam: European Symposium on Particle Technology 1980, Vol. A, S. 240-254
- [29] Großkreutz, D.: Die Gestaltung des Schneidwerkzeuges beim ziehenden Schneiden textiler Flächengebilde. Dissertation. Universität Kaiserslautern, 1996
- [30] Stroppel, Th.: Zur Systematik der Technologie des Schneidens.
Grundlagen der Landtechnik (1953) 5, S. 120-134
- [31] Firus, S., Belter, A. u. a.: Schnittkräfte bei der Erzeugung von Holzhackschnitzeln.
Landtechnik 52 (1997) 2, S. 70,71
- [32] Werner, S.: Einige Untersuchungen zur Zerkleinerung weicher Stoffe.
In: Rumpf, H. (Hrsg.): Symposium Zerkleinern,
Weinheim: Verlag Chemie, 1962, S. 128-137

- [33] Kluge, C. u. L. Linke: Schneiden von Obst und Gemüse: Ursache - Wirkung - Zusammenhänge. ZFL 44 (1993) 7/8, S. 26-30
- [34] Bernhardt, G. u. S. Firus: Zerkleinerung von Boden und Halmgütern (Stroh und Holz) aus der Sicht der Minimierung der spezifischen Energie. Freiburger Forschungsheft A 840 (1997), S. 57-70
- [35] DIN 8588: Fertigungsverfahren Zerteilen.
In: Dt. Inst. für Normung e. V. (Hrsg.): Fertigungsverfahren: Normen. 1. Auflage. DIN-Taschenbuch, Band 220, Berlin, Köln: Beuth Verlag 1986, S. 44-59
- [36] Krabbe, E.: Stanzereitechnik - Erster Teil.
4., neubearbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 1968
- [37] Zünkler, B.: Beitrag zur Geometrie der Schneidwerkzeuge und zur Mechanik des Schneidvorganges. Bänder Bleche Rohre (1963) 7, S. 344-350
- [38] Lange, K. (Hrsg.): Umformtechnik.
Bd. 3, 2., völlig neu bearbeitete und erweiterte Auflage.
Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 1990
- [39] Crasemann, H.-J.: Der offene, kreuzende Scherschnitt an Blechen.
Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen, Nr. 916,
Köln und Opladen: Westdeutscher Verlag 1960
- [40] Jahnke, H., Retzke, R. u. W. Weber: Umformen und Schneiden.
5., bearbeitete Auflage. Berlin: Verlag Technik 1971
- [41] Romanowski, W. P.: Handbuch der Stanzereitechnik.
3., wesentlich erweiterte und überarbeitete Auflage. Berlin: Verlag Technik 1965
- [42] Schmütsch, H.-H.: Einflußgrößen auf das Schneidergebnis beim Scherschneiden von Feinblechen. Fortschrittsberichte VDI-Reihe 2, Nr. 196, Düsseldorf: VDI-Verlag 1990
- [43] Stromberger, C. u. Th. Thomsen: Glatte Lochwände beim Lochen.
Werkstatt und Betrieb 98 (1965) 10, S. 739-747
- [44] Hoogen, M.: Einfluß der Werkzeuggeometrie auf das Scherschneiden und Reißen von Aluminiumfeinblechen. utg-Forschungsberichte, Band 6,
München: Hieronymus GmbH 1999
- [45] Buchmann, K.: Schneiden von Stahlblech im geschlossenen Schnitt.
Klepzig-Fachberichte 72 (1964) 5, S. 177-181
- [46] König, W.: Fertigungsverfahren.
Bd. 5, 2. Auflage. Düsseldorf: VDI-Verlag 1990
- [47] Zhou, Q. u. T. Wierzbicki: A tension zone model of blanking and tearing of ductile metal plates. Int. J. Mech. Sci. 38 (1996) 3, S. 303-324
- [48] Krämer, W.: Beitrag zur Kraft- und Arbeitsermittlung beim Schneiden von Blech.
Industrie-Anzeiger: Werkzeugmaschine und Fertigungstechnik - Teil II:
Umformtechnik 90 (1968) 19, 361-365

- [49] Eickhoff, W.: Untersuchungen über den Kraft- und Arbeitsbedarf beim Lochen von Grobblechen. Werkstatt und Betrieb 94 (1961) 7, S. 487-499
- [50] Crasemann, H.-J.: Die Kräfte beim Schneiden von Blechtafeln und Blechbändern. Microtecnic 16 (1962) 3, S. 109-123
- [51] Timmerbeil, F. W.: Untersuchung des Schneidvorgangs bei Blech, insbesondere beim geschlossenen Schnitt - Erster Teil: Der Schneidvorgang bei scharfen Werkzeugkanten - die Schneidkräfte. Werkstattstechnik und Maschinenbau 47 (1957) 5, S. 231-239
- [52] Autorenkollektiv: Walzwerke.
1. Auflage. Leipzig: Verlag für Grundstoffindustrie 1979
- [53] Eickhoff, W.: Über die Form und Oberflächengestalt von Löchern und Folgerungen für die Berechnung der Kräfte beim Lochen von Grobblechen.
Werkstatt und Betrieb 94 (1961) 11, S. 849-660
- [54] Rotter, F.: Feinschneiden dicker Bleche.
Dissertation. Technische Hochschule Aachen, 1984
- [55] Guidi, A.: Nachschneiden und Feinschneiden.
München: Carl Hanser Verlag 1965
- [56] Keller, F.: Messungen zum Einfluß des Schneidspaltes auf Kraftbedarf und Schnittarbeit beim Lochen von Stahlblech.
Werkstatt und Betrieb 84 (1951) 2, S. 67-73
- [57] Peter, H.: Der Schneidspalt des Schnittwerkzeuges.
Werkstattstechnik und Maschinenbau 46 (1956) 2, S. 53-57
- [58] Timmerbeil, F. W.: Untersuchung des Schneidvorgangs bei Blech, insbesondere beim geschlossenen Schnitt - Zweiter Teil: Die Schnittflächengüte von Schnitteilen.
Werkstattstechnik und Maschinenbau 47 (1957) 7, S. 350-356
- [59] Timmerbeil, F. W.: Der Einfluß der Schneidkantenabnutzung auf den Schneidvorgang am Blech. Werkstattstechnik und Maschinenbau 46 (1956) 2, S. 58-66
- [60] Jäckel, H.-G. u. G. Schubert: Zerkleinerung von Abfällen mittels Rotorscheren, Rotorreißen und Schraubenreißen.
Chemie Ingenieur Technik 69 (1997) 5, S. 640-648
- [61] Kirchner, J. u. G. Schubert: Zerkleinerung der Schrotte und Metalle in Shreddern.
Freiberger Forschungsheft A840, 1997, S. 122-133
- [62] Kirchner, J.: Mikroprozesse und Einflußgrößen bei der Zerkleinerung der Schrotte und Metalle in Shreddern mit horizontal angeordnetem Rotor.
Dissertation, TU Bergakademie Freiberg, 2000
- [63] Timmel, G.: Zerkleinerung von Metallen in Shreddern mit vertikalem Rotor.
Dissertation, TU Bergakademie Freiberg, 2000
- [64] Sander, S.: Grundlagen der Zerkleinerung von Metallen in Hammerreißen
Dissertation, TU Bergakademie Freiberg, 2003

- [65] Mayerhauser, D.: Zerkleinerungsmaschinen.
In: VDI-Gesellschaft Kunststofftechnik (Hrsg.): Aufbereiten von Kunststoffabfällen.
Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, 1973, S. 17-42
- [66] Hess, V.: Schneidmühlen.
In: Pahl, M. H. (Hrsg.): Zerkleinerungstechnik. 2. Auflage, Köln: Verlag TÜV
Rheinland, Leipzig: Fachbuchverlag, 1993, S. 236-248
- [67] Wüstenberg, D. u. W. Bauer: Die Grundlagen der Schneidtechnologie.
Freiberger Forschungsheft A 840 (1997), S. 33-44
- [68] Woldt, D., Schubert, G. u. H.-G. Jäckel: Low speed rotary shears and shredders in size
reduction of scrap metals and metalliferous wastes. Proceedings, Recycling and Waste
Treatment in Mineral and Metal Processing: Technical and Economic Aspects, 16. bis
20.06.2002, Luleå, Schweden, Band 1, S. 285 - 294
- [69] N. N.: Universal-Zerkleinerer ZU.
Alpine Aktuell Nr. 14, Prospektmaterial, Fa. Alpine AG, Augsburg
- [70] Spiesshofer, T.: Rotary crushing shears for bulky waste of e.g. paper, wood, plastics,
etc.. Offenlegungsschrift: DE 19700808, 1998
- [71] N. N.: Doppelrotor-Shredder.
Prospektmaterial, Fa. Hoger Maschinenbau GmbH & Co. KG, Bergkirchen
- [72] N. N.: Zerkleinerungs- und Recyclingtechnologie.
Prospektmaterial, Fa. Erdwich Zerkleinerungssysteme GmbH, Kauferring, 2001
- [73] N. N.: Rotorscheren Typ S, Typ I.
Prospektmaterial, Fa. Societe Industrielle de la Doux SA, Saint-Sulpice (Schweiz), 2001
- [74] N. N.: Industriezerkleinerer.
Prospektmaterial, Fa. UNTHA Shredders, Karlstadt, 2001
- [75] N. N.: Rotorschere.
Gebrauchsmuster: DE 29707896 U1, 1997
- [76] Dubech, G. u. C. Madaule: Waste shredder, component parts and maintenance method.
Patentschrift: WO 01/89700 A1, 2001
- [77] Bauer, W., Wüstenberg, D. u. P. Heßler: Zerkleinerung von Magnesium-Druckguß im
Rahmen des Recyclings. Proceedings, 7. Magnesium Abnehmerseminar,
29./30.09.1999, Aalen
- [78] Spiesshofer, T.: Rotor shear for comminuting particularly bulky waste material.
Patentschrift: US 6024312, 2000
- [79] Rößler, K.: Zerkleinerungsvorrichtung.
Gebrauchsmuster: G 9114899.5, 1991
- [80] Davenport, R. W.: Rotary shredder.
Patentschrift: US 5971305, 1999
- [81] Richard, J.: Cutter block for material shredders.
Offenlegungsschrift: DE 4443275, 1996

- [82] N. N.: Spänezerkleinerung.
Prospektmaterial, Fa. Erdwich Zerkleinerungssysteme GmbH, Kauferring, 2001
- [83] Erdwich, H.: Device for cutting comminution of materials.
Offenlegungsschrift: DE 4406675, 1994
- [84] Mckie, R. T.: Grinding mill apparatus.
Patentschrift: US 4919344, 1990
- [85] Lindner, M.: Zerkleinerungsvorrichtung für durch Messereinwirkung zu zerkleinerndem Material mit einem in einem Gehäuse angeordnetem Rotor.
Patentschrift: EP 1050340 A1, 2000
- [86] N. N.: Zerkleinerungsmaschine.
Gebrauchsmuster: DE 9218951 U1, 1996
- [87] Schäfer, S.: Präsentationsmaterial der Fa. MeWa Recycling Maschinen und Anlagenbau GmbH, Gechingen, 2002
- [88] N. N.: UNI-CUT® Universal-Granulator.
Prospektmaterial, Fa. MeWa Recycling Maschinen und Anlagenbau GmbH, Gechingen, 2001
- [89] Nijkerk, A. A. u. W. L. Dalmijn: Handbook of Recycling Techniques.
5., überarbeitete und erweiterte Ausgabe. The Hague: Nijkerk Consultancy, 2001
- [90] Nijkerk, A. A.: The return of the pre-shredder.
Recycling International (2001) 10, S. 50/51
- [91] N. N.: Henschel-Drei-Wellen-Zerreißer.
Prospektmaterial, Fa. Henschel Recycling Technik, Kassel, 2001
- [92] Witzel, J.: Vorrichtung zum Zerreißen von metallischen Schrott.
Patentschrift: DE 19925729 C1, 2000
- [93] Doppstadt, W.: Walzenzerkleinerer.
Gebrauchsmuster: G 9409707.0, 1994
- [94] Poul, E.: A comminution machine.
Patentschrift: WO 97/10057, 1997
- [95] N. N.: WR 2000 S - 1-shaft stationary wastereducer.
Prospektmaterial, Fa. Niro Industries A/S, Horsens (Dänemark), 2001
- [96] N. N.: Rotorreißer S 350 XL-C.
Prospektmaterial, Fa. Societe Industrielle de la Doux SA, Saint-Sulpice (Schweiz), 2002
- [97] Sander, S., Schubert, G. u. G. Timmel: Characterisation of fragments produced by the comminution of metals considering especially the fragment shape.
Powder Technology, 122 (2002), S. 177-187
- [98] Willing, C.: Verfahrenstechnische Untersuchungen an einer Rotorschere.
Studienarbeit. TU Bergakademie Freiberg, 1996

- [99] Jäckel, H.-G., Schubert, G. u. J. Kirchner: Die Zerkleinerung der Abfälle mittels Rotorscheren, Rotorreißern und Schraubenreißern.
Freiberger Forschungsheft A840, 1997, S. 82-98
- [100] Csöke, B. u. a.: Entwicklung einer Rotorscherenfamilie in der Jászberényer Zerkleinerungsmaschinenfabrik AG.
Freiberger Forschungsheft A840, 1997, S. 111-121
- [101] Schmiemann, A.: Die Rolle der Zerkleinerung im Kunststoffrecycling.
Freiberger Forschungsheft A840, 1997, S. 71-81
- [102] Dillmann, J. u. a.: Einflußgrößen auf das Zerkleinerungsverhalten von Rotorscheren.
Freiberger Forschungsheft A840, 1997, S. 99-110
- [103] Höffl, K.: Zerkleinerungs- und Klassiermaschinen.
1. Auflage. Leipzig: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie 1985
- [104] Crasemann, H.-J.: Kräfte in Scheren.
Werkstattstechnik 51 (1961) 8, S. 396-403
- [105] Richter, J.: Untersuchungen zur Zerkleinerung von Haushalt- und Sperrmüll mittels Rotorschere. Studienarbeit. TU Bergakademie Freiberg, 1998
- [106] Kasper, J.: Ergebnisse der an der Universität Kaiserslautern durchgeführten Zugversuche. Lehrstuhl für Konstruktion im Maschinen- und Apparatebau (KIMA), Universität Kaiserslautern, 2003
- [107] N. N.: Drehmomentmeßwellen richtig einsetzen.
Hottinger Baldwin Meßtechnik GmbH, Darmstadt, 1989
- [108] Silbermann, F.: Grundlagenuntersuchungen zu den im Zerkleinerungsraum des Shredders auftretenden Beanspruchungen.
Diplomarbeit, TU Bergakademie Freiberg, 1998
- [109] Wüstenberg, D. u. J. Kasper: Entwicklung einer Versuchsanlage und Durchführung von Versuchen zur Schneid- und Reißzerkleinerung unter kontrollierten Bedingungen. (Teilprojekt 2 des DFG-Paketantrages „Zerkleinerung nicht-spröder Stoffe“).
Arbeitsbericht an die DFG, Universität Kaiserslautern, 2001
- [110] Kasper, J. u. D. Wüstenberg: Required energy and structural breakdown at the process of dynamic cutting-comminution of polypropylene and aluminium.
Proceedings, 10. European Symposium on Comminution, 2. bis 5.09.2002, Heidelberg
- [111] Woldt, D., Schubert, G. u. H.-G. Jäckel: Zerkleinerung nicht-spröder Stoffe in Rotorscheren. Chemie Ingenieur Technik 75 (2003) 12, S. 1860-1863
- [112] Czichos, H. u. K.-H. Habig: Tribologie Handbuch: Reibung und Verschleiß.
Braunschweig, Wiesbaden: Vieweg 1992
- [113] Beitz, W. u. K.-H. Grote (Hrsg.): Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau.
19., völlig neubearbeitete Auflage. Springer-Verlag 1997
- [114] Bauer, W., Wüstenberg, D., Woldt, D. u. G. Schubert: Die richtige Geschwindigkeit.
Kunststoffe 92 (2002) 2, S. 43-46

- [115] Woldt, D: Untersuchungen zu den Grundlagen des Zerkleinerungsprozesses in Rotorscheren. Diplomarbeit, TU Bergakademie Freiberg, 1999
- [116] Simon, H. u. M. Thoma: Angewandte Oberflächentechnik für metallische Werkstoffe. 2., durchgesehene Auflage. München, Wien: Hanser Verlag 1989
- [117] Weichert, R. u. R. Olwig: Experimentelle Ermittlung von dynamischen Materialkennwerten für die numerische Simulation von Schneid- und Reißvorgängen. (Teilprojekt 3 des DFG-Paketantrages „Zerkleinerung nicht-spröder Stoffe“). Arbeitsbericht an die DFG, TU Clausthal, 2003
- [118] Schubert, G. u. D. Woldt: Analyse der Zerkleinerungsvorgänge in Rotorscheren und Rotorreißen. (Teilprojekt 1 des DFG-Paketantrages „Zerkleinerung nicht-spröder Stoffe“). Arbeitsbericht an die DFG, TU Bergakademie Freiberg, 2003
- [119] Wüstenberg, D. u. J. Kasper: Entwicklung einer Versuchsanlage und Durchführung von Versuchen zur Schneid- und Reißzerkleinerung unter kontrollierten Bedingungen. (Teilprojekt 2 des DFG-Paketantrages „Zerkleinerung nicht-spröder Stoffe“). Arbeitsbericht an die DFG, Universität Kaiserslautern, 2003
- [120] Steinmann, P. u. O. Häsner: Modellierung und Numerik von Schneid- und Reißvorgängen duktiler Materialien. (Teilprojekt 4 des DFG-Paketantrages „Zerkleinerung nicht-spröder Stoffe“). Arbeitsbericht an die DFG, Universität Kaiserslautern, 2003
- [121] Schönert, K.: Modellierung der Zerkleinerungskinetik. In: Schubert, H. (Hrsg.): Handbuch der Mechanischen Verfahrenstechnik. Bd. 1, Weinheim: WILEY-VCH Verlag, 2003, S. 371-382
- [122] Prasher, C. L.: Crushing and Grinding Process Handbook. Chichester: John Wiley & Sons Limited, 1987

Anlagenverzeichnis

Anlage zu Kapitel 2

Anlage 1: Berechnung der Scherkräfte bei Kreismesserschere

Anlagen zu Kapitel 3

Anlage 2: Versuchsprogramm mit der Scher- und Reißvorrichtung und technische Details

Anlage 3: Details der durchgeführten Biegeversuche

Anlage 4: Details der Meßwertgewinnung und Versuchsprogramm mit dem instrumentierten Schlagwerk

Anlage 5: Details zum Aufbau der Vorzerkleinerungsmaschine und zusätzliche Angaben zur Versuchsauswertung

Anlage 6: Versuchsprogramm mit der ein- und zweirotorigen Modell-Zerkleinerungsapparatur sowie Details der Beanspruchungsgeometrien

Anlage 7: Detailangaben zum Aufbau der kleintechnischen Zerkleinerungsmaschinen und zur Versuchsdurchführung

Anlagen zu Kapitel 5

Anlage 8 Zusätzliche Abbildungen zu den Untersuchungen bei typischen Beanspruchungsgeometrien der Rotorschere und Rotorreißer

Anlage 9 Ablauf der Biegeumformung bei AlMgSi0.5-Rohren

Anlage 10 Ablauf der Knick- und Biegeumformung bei AlMgSi0.5-Profilen

Anlagen zu Kapitel 6

Anlage 11 Typische Bruchstücke der ein- und zweirotorigen Rotorschere

Anlage 12 Zerkleinerung von Rohren mit der ein- und zweirotorigen Rotorschere

Anlage 13 Typische Bruchstücke des ein- und zweirotorigen Rotorreißers

Berechnung der Scherkräfte bei Kreismesserscheren

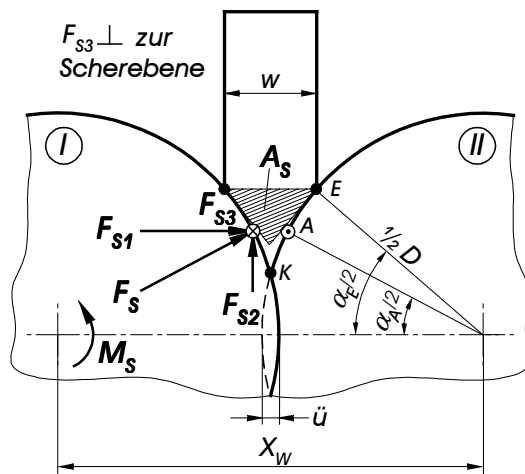


Bild A1.1: Wirkende Kräfte bei der Scherbeanspruchung in Kreismesserscheren (nach [39] [52])

F_s - resultierende Scherkraft; F_{s1} - Hauptscherkraft; F_{s2} - Fortschreitkraft; F_{s3} - Abdrängkraft; M_s - Schermoment; A - Angriffspunkt der resultierenden Scherkraft; E - Eingriffspunkt; K - Kreuzungspunkt; A_s - Scherfläche; D - Durchmesser des Kreismessers; X_W - Wellenabstand; $\ddot{u}$ - Überdeckung; w - Wanddicke; $\alpha_{A/E}$ - Winkel am Angriffs- bzw. Eingriffspunkt; symmetrische Beanspruchung ($D_I = D_{II}$)

Die an der Scherkante des Kreismessers wirkende Scherkraft F_s (Bild A1.1) setzt sich aus folgenden Kraftkomponenten zusammen [50] [104]:

- Hauptscherkraft F_{s1}
- Fortschreitkraft F_{s2}
- Abdrängkraft F_{s3}

Die Berechnung der **Hauptscherkraft** erfolgt unter Berücksichtigung der besonderen geometrischen Verhältnisse grundsätzlich über den durch die Messer eingeschlossenen Scherquerschnitt A_s und den Scherwiderstand k_s (s. Gl. (2.1)). Da die exakte Ermittlung des Scherquerschnittes zwischen zwei gekrümmten Schneiden zu relativ komplexen Gleichungen führt, legte CRASEMANN [39] ein angenommenes „Scherdreieck“ zugrunde, das durch die Tangenten in beiden Eingriffspunkten gebildet wird. Ausgehend von den Gl. (2.7) und (2.9b) ergibt sich somit der Scherquerschnitt nach folgender Beziehung:

$$A_s = \frac{w^2}{4 \tan(\alpha_E/2)} \quad (\text{A 1.1})$$

Nach seinen Versuchen ist der so berechnete geringere Scherquerschnitt gerechtfertigt, da die Trennung des Materials gewöhnlich vor dem Kreuzungspunkt der Messer abgeschlossen ist. Die Hauptscherkraft F_{s1} kann deshalb wie folgt berechnet werden:

$$F_{s1} = \prod_i (C_i) \cdot k_s \frac{w^2}{4 \tan(\alpha_E/2)} \quad (\text{A 1.2})$$

CRASEMANN [39] [50] berücksichtigt zusätzlich mit insgesamt 14 Korrekturfaktoren C_i den Einfluß werkstofflicher, geometrischer und kinematischer Parameter auf die Scherkraft. Eine geringe Hauptscherkraft ergibt sich bei einem großen Eingriffswinkel α_E sowie einem niedrigen w/D -Verhältnis [104].

Für die Berechnung der **Fortschreitkraft** ist die genaue Kenntnis der Lage des Angriffspunktes der resultierenden Scherkraft notwendig. Dieser befindet sich zwischen dem Eingriffspunkt und dem Kreuzungspunkt der Kreismesser und wird maßgeblich von der Wanddicke und dem Durchmesser der Kreismesser beeinflusst. Bei einer geringen Wanddicke und einem großen Kreismesserradius liegt er in der Nähe des Eingriffspunktes, so daß sich die jeweiligen Winkel am Eingriffs- und Angriffspunkt nur geringfügig unterscheiden. Bei der Beanspruchung in Rotorscheren, d. h. einem relativ großen Wanddicke/Durchmesser-Verhältnis, verschiebt sich der Angriffspunkt in Richtung des Kreuzungspunktes. Die Lage des Angriffspunktes kann dann aus dem Winkelverhältnis gemäß Gl. (A 1.3) ermittelt werden [39].

$$\frac{\alpha_A}{\alpha_E} \approx 0,8 \quad \text{für} \quad \frac{w}{D} > 0,02 \quad (\text{A } 1.3)$$

Mit Kenntnis des Angriffswinkels α_A gilt für die senkrecht zur Hauptscherkraft wirkende Fortschreitkraft F_{S2} [39]:

$$F_{S2} = F_{S1} \cdot \tan(\alpha_A/2) \quad (\text{A } 1.4)$$

Als dritte Komponente der Scherkraft wirkt die **Abdrängkraft** F_{S3} im Überdeckungsbereich auf die Seitenflächen der Messer. Sie ruft eine elastische Vergrößerung der Spaltweite während der Scherbeanspruchung sowie zusätzliche Reibungsverluste hervor. Maximale Werte treten bei einer großen Überdeckung und einer geringen Spaltweite auf (Gl. (A 1.5)). Jedoch ist ihr Anteil an der resultierenden Scherkraft relativ gering.

$$F_{S3} = (0,05 \dots 0,25) \cdot F_{S1} \quad (\text{A } 1.5)$$

Das durch die Scherkraft hervorgerufene **Drehmoment** an einem einzelnen Kreismesser kann entsprechend Gl. (A 1.6) berechnet werden. Der Einfluß der Reibungskräfte wird mit dieser Gleichung nicht gesondert erfaßt. Mit den von CRASEMANN [39] definierten Korrekturfaktoren wird der Reibungsanteil aber teilweise berücksichtigt.

$$M_S = \frac{D}{2} [F_{S1} \sin \alpha_A - F_{S2} \cos \alpha_A] \quad (\text{A } 1.6)$$

Eine Erweiterung der Beziehung auf mehrere Kreismesser und unter Einbeziehung der Reibungskräfte im Überdeckungsbereich führt zu dem an einer Welle insgesamt auftretenden Drehmoment (Gl. (A 1.7)) [52].

$$M_G = z \frac{D}{2} [F_{S1} \sin \alpha_A - F_{S2} \cos \alpha_A + \mu_G F_{S3}] \quad (\text{A } 1.7)$$

z - Anzahl der wirkenden Kreismesseranten pro Welle; μ_G - Gleitreibungskoeffizient

Ausgehend von Gl. (A 1.7) kann die **Antriebsleistung** einer Welle nach folgender Beziehung abgeschätzt werden.

$$P_G = M_G \cdot 2\pi n = M_G \cdot \frac{2v}{D} \quad (\text{A } 1.8)$$

n - Drehzahl; v - Rotorumfangsgeschwindigkeit

Versuchsprogramm mit der Scher- und Reißvorrichtung und technische Details

1. Versuchsplan

Tabelle A 2.1: Versuchsprogramm

n_z - Anzahl der Schichten

Variierter Parameter	Material	Wanddicke bzw. Schichtdicke w bzw. d_s in mm	Spaltweite s in mm	Geschwindigkeit v in mm/min
1. Spaltweite	AlMg3; PP	1 (AlMg3); 5 (PP)	0,1; 0,2; 0,5; 0,8; 1,0; 2,0; 5,0; 10,0	2
2. Wanddicke	AlMg3; PP	AlMg3: 0,5; 1,0; 2,0; 5,0; PP: 1,0; 2,0; 5,0	0,2	2
3. Geschwindigkeit	AlMg3; PP	1 (AlMg3); 5 (PP)	0,2	AlMg3: 1; 2; 10; 50; 100; 200; PP: 1; 2; 10; 50; 100; 200; 300; 400; 500
4. Aluminiumwerkstoffe	Al99.5; AlMg3; AlMg4.5Mn0.7; AlMgSi1; AlCu4MgSi	1; 2; 5	0,2	2
5. Schichtdicke	AlMg3	$n_z \times w$: 2 x 1; 3 x 1; 4 x 1; 5 x 1; 2 x 2	0,2	2

2. Details der Scher- und Reißvorrichtung

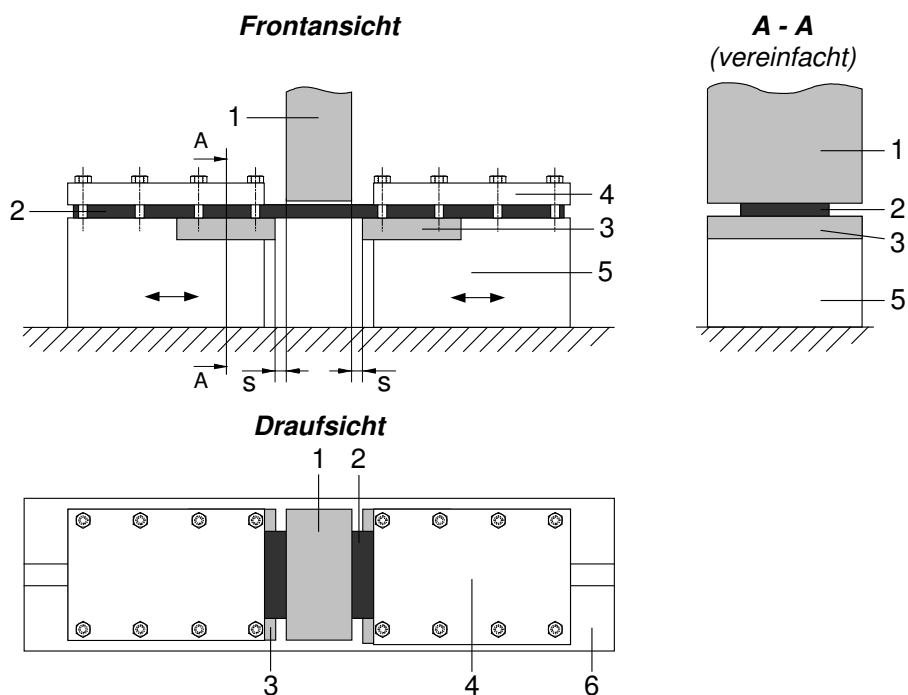


Bild A 2.1: Aufbau der Scher- und Reißvorrichtung, schematisch

1 - Stempel (Obermesser); 2 - Probekörper ($b_{PK} \leq 40$ mm); 3 - Statormesser, zur exakten Spaltweiteneinstellung und Ausrichtung horizontal verschiebbar; 4 - Einspannung des Probekörpers; 5 - Grundträger, verschiebbar; 6 - Träger zur Aufnahme der Vorrichtung; s - Spaltweite

Details der durchgeführten Biegeversuche

1. Gestalt der Biegeproben und Definition des Biegewinkels

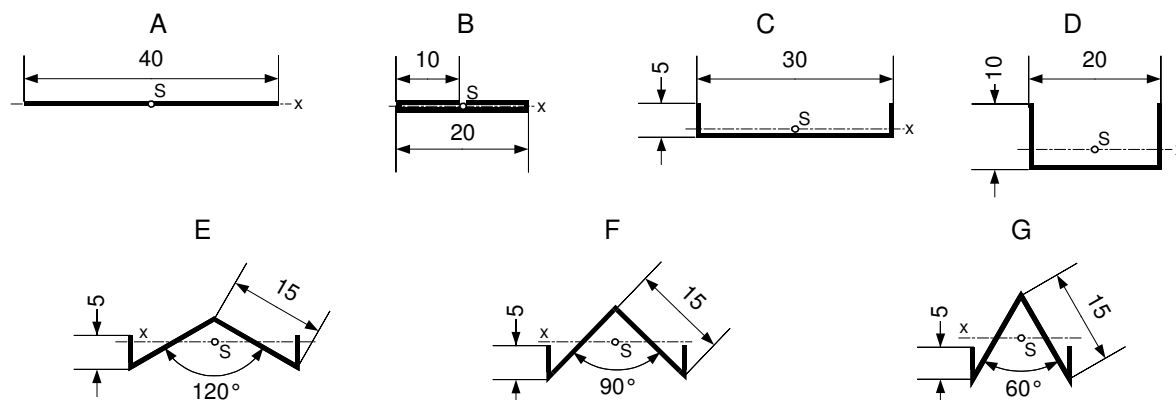


Bild A 3.1: Gestalt der Biegeproben aus Aluminium AlMg3 (Wanddicke 1 mm) mit gleicher Querschnittsfläche von 40 mm²
S - Schwerpunkt; x - Bezugsachse der Biegung

Tabelle A 3.1: Maximales Widerstandsmoment gegen Biegung der Biegeproben

Profiltyp	Maximales Widerstandsmoment gegen Biegung W_{bx} in mm ³
A	7
B	53
C	135
D	13
E	78
F	49
G	102

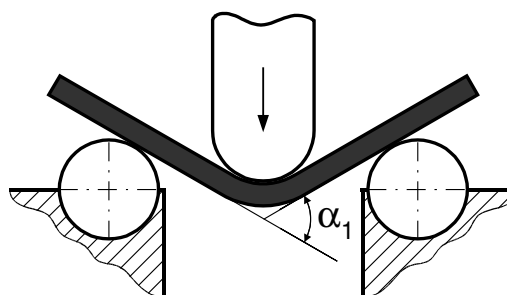


Bild A 3.2: Definition des Biegewinkels

2. Biegekraft-Biegewinkel-Verläufe

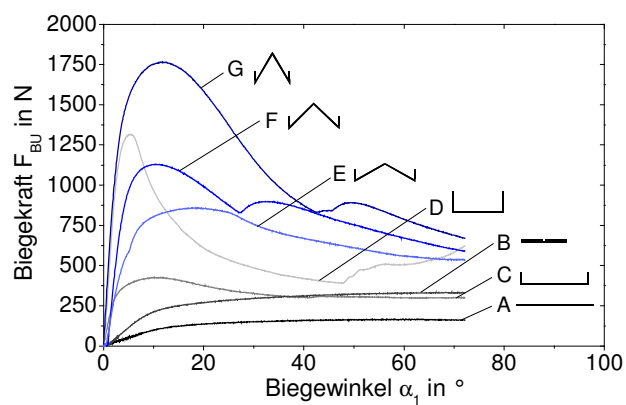


Bild A 3.3: Biegekraft-Biegewinkel-Verläufe verschiedener Profile aus AlMg3

Wanddicke 1 mm; Querschnittsfläche 40 mm²; Auflagerabstand 70 mm; Beanspruchungsgeschwindigkeit 2 mm/min

Details der Meßwertgewinnung und Versuchsprogramm mit dem instrumentierten Schlagwerk

1. Details der Meßwertgewinnung

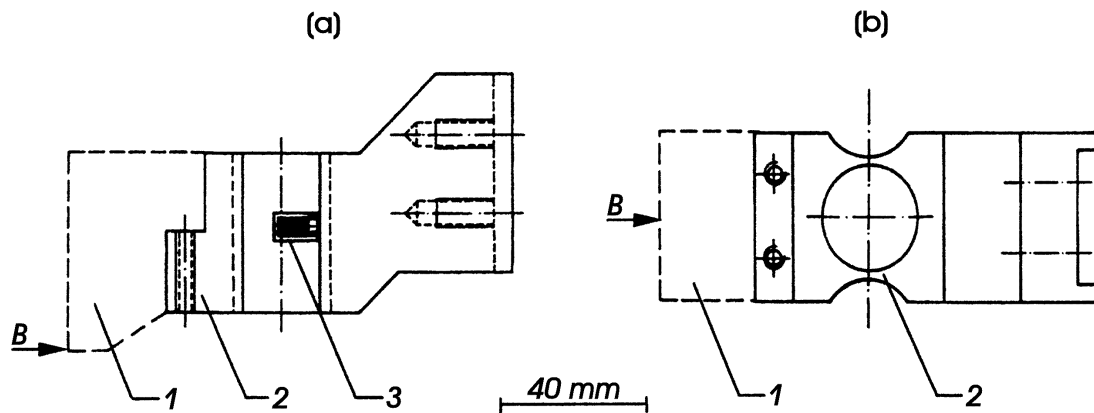


Bild A 4.1: Aufbau der Meßzelle (aus [62]);

(a) Seitenansicht; (b) Draufsicht

1 - austauschbares Rotormesser; 2 - Meßzellengrundkörper; 3 - Dehnmeßstreifen; B - Beanspruchungsrichtung

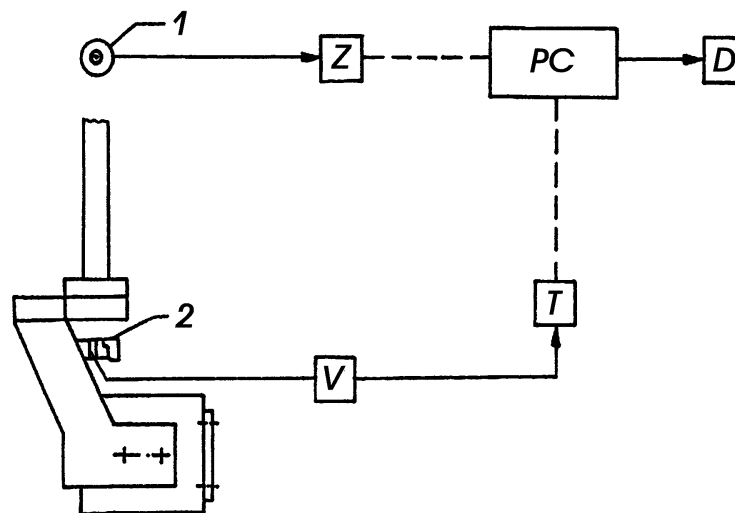


Bild A 4.2: Schematischer Aufbau des Meßwerterfassungs- und -verarbeitungssystems (aus [62])

1 - Winkelmessung; 2 - Kraftmessung; V - Verstärker; Z - Zählerkarte; T - Transientenkarte;

PC - Personalcomputer; D - Drucker

2. Versuchspläne des instrumentierten Schlagwerks

Tabelle A 4.1: Versuchsprogramm zur Analyse der Grundbeanspruchungsarten (Geometrie SW1)

Variierter Parameter	Material	Wanddicke w in mm	Rotor-messer	Radiale Spaltweite s _R in mm	Geschwindigkeit v in mm/min	Meßmethode/ Ergebnisse
1. Radiale Spaltweite	AlMg3; PP	1 (AlMg3); 5 (PP)	RM1; RM3	0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0; 1,5; 2,0; 3,5; 5,0; 6,0; 7,0; 10,0; 13,8; 20,0	5,5	Pendelauslenkung/ W _B
2. Wanddicke	AlMg3; PP	AlMg3: 0,5; 1,0; 2,0; PP: 1,0; 2,0; 5,0	RM1; RM3	0,2	0,6	Instrum- tierung/ F _{B,max} ; W _B
3. Geschwindigkeit	AlMg3; PP	1 (AlMg3); 5 (PP)	RM1	0,2	0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 1,5	Instrum- tierung/ F _{B,max} ; W _B
4. Aluminiumwerkstoffe	Al99.5; AlMg3; AlMg4.5Mn0.7; AlCu4MgSi	1; 2	RM1	0,2	0,6	Instrum- tierung/ F _{B,max} ; W _B

Tabelle A 4.2: Versuchsprogramm zur Analyse der Vorgänge bei typischen Beanspruchungsgeometrien der Rotorscheren und -reißer (Geometrien SW2, SW3 und SW4)

Messung über Pendelauslenkung; radiale Spaltweite 20 mm

Variierter Parameter	Material	Wanddicke w in mm	Geometrie	Rotor-messer	Axiale Spaltweite s _A in mm	Geschwindigkeit v in mm/min
1. Beanspruchungsenergie und -geometrie (Rißbildung und -ausbreitung)	AlMg3	1	SW2; SW3; SW4	RM3; RM4	0,3; 10; 20	variabel
2. Axiale Spaltweite	AlMg3; PP	1 (AlMg3); 5 (PP)	SW2; SW3	RM3	0,3; 0,6; 1,0; 2,0; 5,0; 10,0; 20	2,5
3. Geschwindigkeit	AlMg3; PP	1 (AlMg3); 5 (PP)	SW2	RM3	0,3	1,5; 2,5; 3,5; 4,5; 5,5

Details zum Aufbau der Vorzerkleinerungsmaschine und zusätzliche Angaben zur Versuchsauswertung

1. Technische Daten der Vorzerkleinerungsmaschine

Tabelle A 5.1: Parameter der Vorzerkleinerungsmaschine

<u>Antrieb:</u>	
- Installierte Antriebsleistung	2 x 9 kW
- Maximales Drehmoment	10 kNm
- Rotordrehzahl:	
Getriebestufe 1	0 ... 40 min ⁻¹
Getriebestufe 2	40 ... 140 min ⁻¹
- Rotorumfangsgeschwindigkeit ¹⁾	0,1 ... 2,9 m/s
<u>Abmessungen:</u>	
- Länge	4800 mm
- Breite	1600 mm
- Tiefe	1700 mm
- Wellenabstand	250 ... 570 mm
- Aufgäbeöffnung:	
Wellenabstand 250 mm	1000 x 1000 mm ²
Wellenabstand 570 mm	1000 x 1320 mm ²
- Gesamtmasse	ca. 3400 kg
<u>Besonderheiten:</u>	
- Reversierschaltung	
- Sicherheitskupplung	
- separate Steuerung der Rotorwellen	
- Wellenabstand und Bestückung variierbar	
Drehzahl-, Drehmoment- und Leistungsmessung	

¹⁾ bei einem Messerkreisdurchmesser von 400 mm

2. Gestalt der Zerkleinerungselemente des Rotors

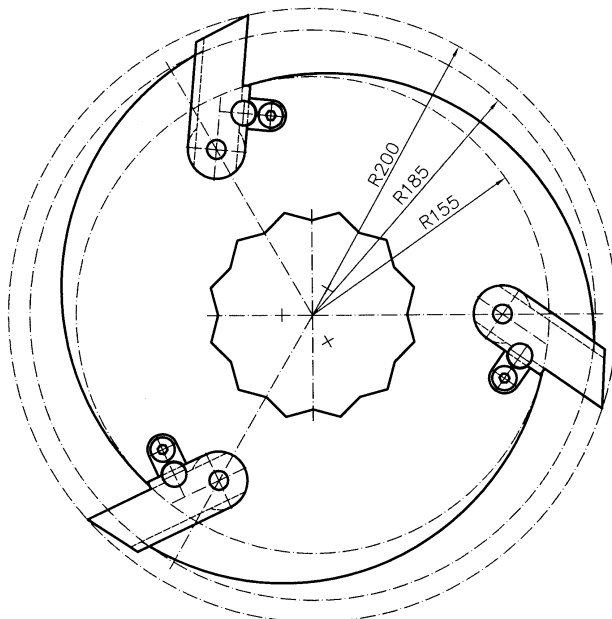


Bild A 5.1: Standardrotorscheibe mit auswechselbaren, schneidenförmigen Rotormessern
(Rotorscheibenbreite 40 mm)

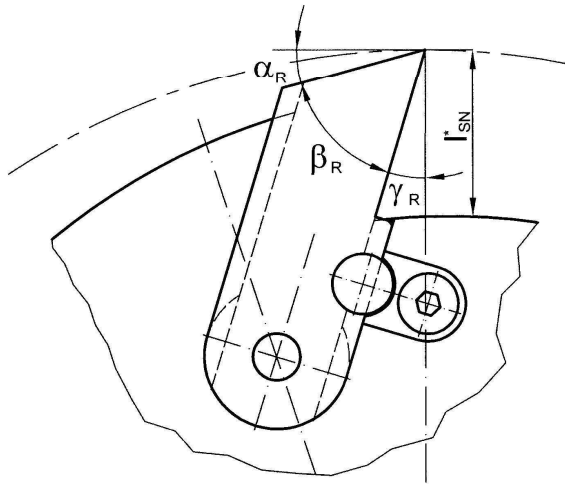


Bild A 5.2: Gestalt und Einbaulage der schneidenförmigen Rotormesser

α_R - Freiwinkel (15°); β_R - Keilwinkel (58°); γ_R - Spanwinkel (17°); l_{SN}^* - Effektive Rotormesslänge (45 mm)

3. Vorgehen bei der Ermittlung der Beanspruchungsenergie

Berechnungsgrundlagen:

Berechnung der mechanischen Leistungen $P_{\text{mech}}(t)$ aus dem Drehzahlssignal $n(t)$ und dem Drehmomentsignal $M(t)$:

$$P_{\text{mech}}(t) = 2\pi \cdot n(t) \cdot M(t) \quad (\text{A 5.1})$$

Zusammensetzung der mechanischen Leistungen $P_{\text{mech}}(t)$ aus der Leerlaufleistung $P_{\text{mech,L}}(t)$ und der Beanspruchungsleistung $P_{\text{mech,B}}(t)$:

$$P_{\text{mech}}(t) = P_{\text{mech,L}}(t) + P_{\text{mech,B}}(t) \quad (\text{A 5.2})$$

Berechnung der Leerlaufleistung $P_{\text{mech,L}}(t)$ aus dem zeitabhängigen Drehzahlssignal $n(t)$ und dem konstanten Leerlaufdrehmoment M_L :

$$P_{\text{mech,L}}(t) = 2\pi \cdot n(t) \cdot M_L \quad (\text{A 5.3})$$

Typische Leistungs-Zeit-Verläufe:

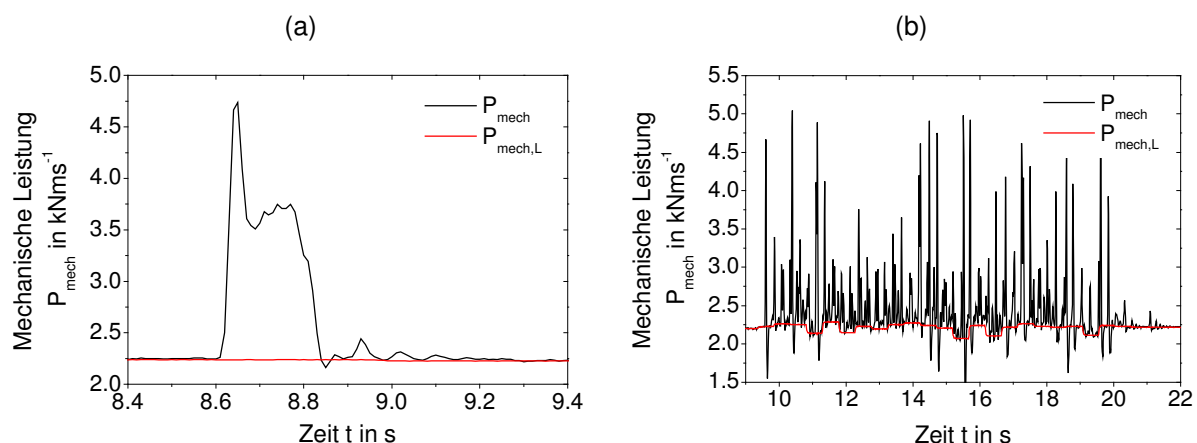


Bild A 5.3: Leistungs-Zeit-Verläufe der Zerkleinerung mittels einrotoriger Modell-Zerkleinerungsapparatur (a) und kleintechnischer, einrotoriger Rotorschere (b)

(a) Polypropylen; Wanddicke 5 mm; Rotorscheregeometrie RS3; Messereingriffswinkel 61° ; axiale Spaltweite 0,2 mm; radiale Spaltweite > 10 mm; Beanspruchungsgeschwindigkeit 0,4 m/s ($19,5 \text{ min}^{-1}$);

(b) AlMg3; Wanddicke 1 mm; Abmessungen (360x200) mm²; Messereingriffswinkel 17° ; axiale und radiale Spaltweite 0,2 mm; Beanspruchungsgeschwindigkeit 0,4 m/s ($19,5 \text{ min}^{-1}$)

Zwei typische Leistungs-Zeit-Verläufe der Modell-Zerkleinerungsapparatur und der kleintechnischen Rotorschere sind in Bild A 5.3 gegenübergestellt. Bei der Einzelstückzerkleinerung in der Modell-Zerkleinerungsapparatur (a) treten nur geringe Drehzahlschwankungen auf, wodurch sich eine über die Beanspruchungsdauer annähernd konstante Leerlaufleistung ergibt. Dagegen ist die Zerkleinerung in der kleintechnischen Rotorschere (b) durch eine Vielzahl von in kurzen Zeitabständen aufeinanderfolgenden Zerkleinerungsvorgängen gekennzeichnet, die den Drehzahlverlauf beeinflussen. Die während der Zerkleinerung auftretenden Drehzahlunterschiede spiegeln sich deutlich im Verlauf der Leerlaufleistung wider.

Aus dem Verlauf der mechanischen Leistung wird unter Abzug der Leerlaufleistung mittels Gl. (A 5.2) die Beanspruchungsleistung berechnet. Die Bestimmung der Beanspruchungsenergie zwischen der im Auswerteprogramm festzulegenden Start- und Endzeit erfolgt mittels der Sehnen-Trapez-Formel durch numerische Integration (Bild A 5.4).

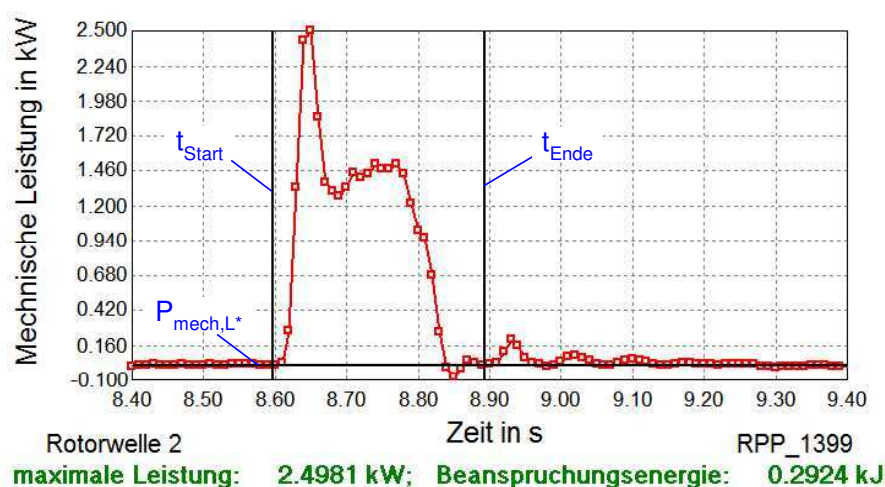


Bild A 5.4: Integration des Leistungs-Zeit-Verlaufes zur Ermittlung der Beanspruchungsenergie

t_{Start} , t_{Ende} - Start- bzw. Endzeitpunkt der Integration; $P_{\text{mech,L*}}$ - Leerlaufleistung für die Berechnung; (Versuchsbedingungen s. Bild A 5.3a)

4. Reproduzierbarkeit und Genauigkeit der Meßergebnisse

Um die Reproduzierbarkeit und die Genauigkeit der Meßergebnisse beurteilen zu können, wurden Versuche an typischen Beanspruchungsgeometrien der Modell-Zerkleinerungsapparatur und der einrotorigen Rotorschere bei einer möglichst geringen und einer längeren Beanspruchungsdauer durchgeführt. Die mit der Modell-Zerkleinerungsapparatur realisierten Rotorschergeometrien sind schematisch in Bild A 5.5 dargestellt.

Bei einer Rotorumfangsgeschwindigkeit von 0,4 m/s ergibt sich in Abhängigkeit von der Wanddicke vom ersten Eingriff der Rotormesserfrontschneide in den Probekörper bis zum endgültigen Bruch des Probematerials an den Seitenkanten der Rotormesser bzw. -scheibe eine theoretisch berechnete Beanspruchungsdauer von:

- **46 ms** (Wanddicke 1 mm) bis **57 ms** (Wanddicke 5 mm)
für die in Bild A 5.5a und
- **209 ms** (Wanddicke 1 mm) bis **218 ms** (Wanddicke 5 mm)
für die in Bild A 5.5b

dargestellten Beanspruchungsgeometrien.

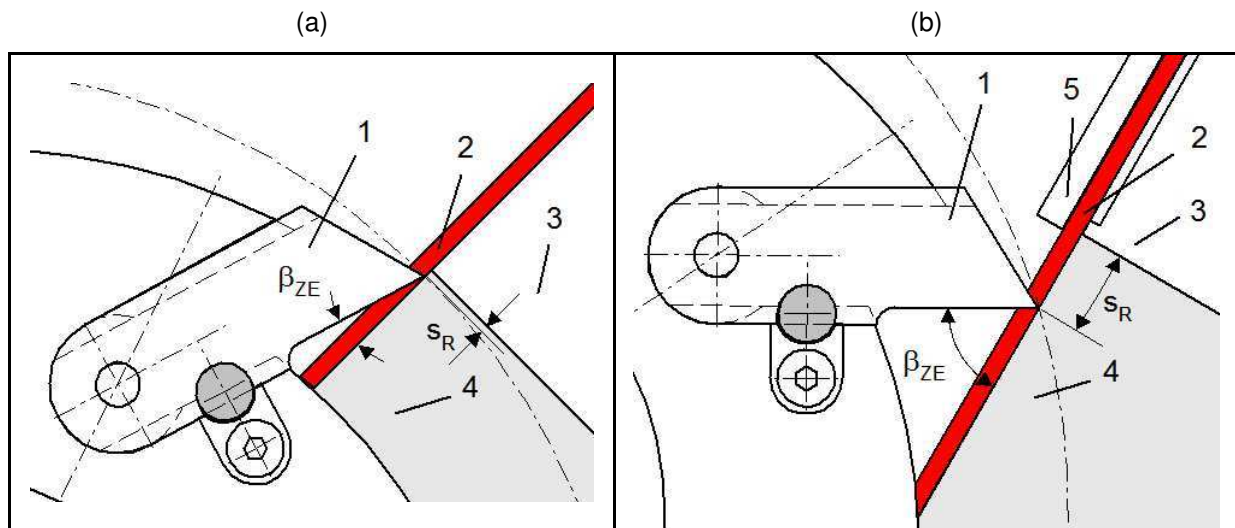


Bild A 5.5: Beanspruchungsgeometrien der Modell-Zerkleinerungsapparatur mit geringer (a) und längerer Beanspruchungsdauer (b), schematisch

1 - Rotormesser; 2 - Probekörper; 3 - radialer Stator; 4 - axialer Stator; 5 - Einspannung; s_R - radiale Spaltweite; β_{ZE} - Messereingriffswinkel; (a) Rotorschergeometrie RS1; Messereingriffswinkel 17° ; axiale und radiale Spaltweite 0,2 mm; Beanspruchungsgeschwindigkeit 0,4 m/s; (b) Rotorschergeometrie RS3; Messereingriffswinkel 61° ; axiale Spaltweite 0,2 mm; radiale Spaltweite > 10 mm; Beanspruchungsgeschwindigkeit 0,4 m/s

Zur Charakterisierung der unter den gegebenen Versuchsbedingungen ablaufenden Zerkleinerung werden jeweils 4 bis 5 gleichartige Versuche durchgeführt. Die Auswertung der Meßwerte erfolgt nach dem oben beschriebenen Schema, so daß die einzelnen Leistungs-Zeit-Verläufe und die entsprechenden Beanspruchungsenergien bzw. die auf die neu entstandene Bruchfläche bezogenen Beanspruchungsenergien den Zerkleinerungsvorgang abbilden. Unter den in Bild A 5.5 angegebenen Versuchsbedingungen konnten für beide Geometrien die in Bild A 5.6 dargestellten Leistungs-Zeit-Verläufe und die in Tabelle A 5.2 zusammengestellten Beanspruchungsenergien bestimmt werden. Die einzelnen Kurvenverläufe zeigen sowohl in der maximalen Leistung als auch in der Beanspruchungsdauer eine gute Übereinstimmung, was durch die aus allen Einzelmessungen berechneten mittleren Leistungs-Zeit-Verläufe nochmals verdeutlicht wird. Auch die Energiewerte weichen nur geringfügig voneinander ab. Um die

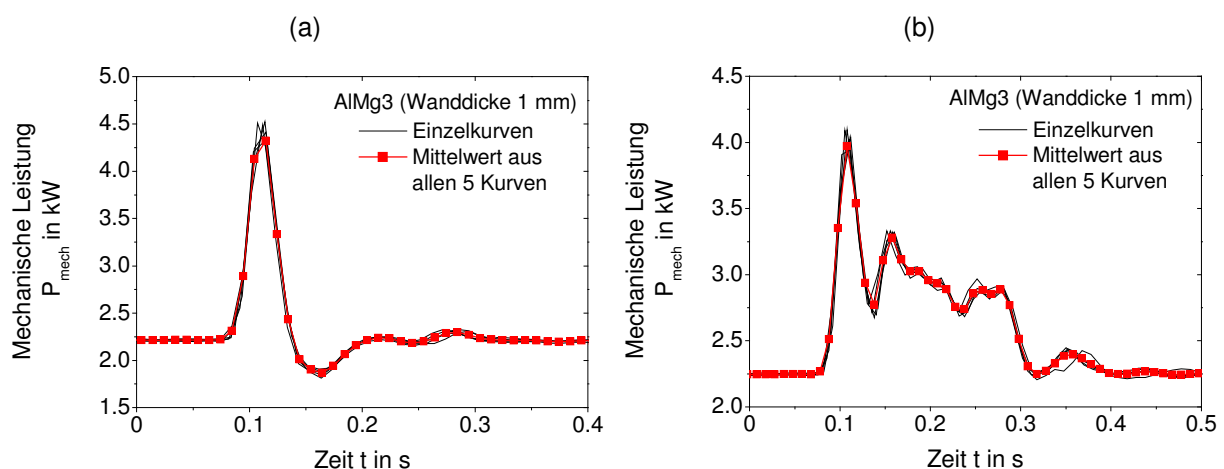


Bild A 5.6: Leistungs-Zeit-Kurven typischer Zerkleinerungsvorgänge der Modell-Zerkleinerungsapparatur mit geringer (a) und längerer Beanspruchungsdauer (b)

(Versuchsbedingungen s. Bild A 5.5)

Streuung der bruchflächenbezogenen Energiewerte nicht zu vernachlässigen, wird jeweils das Konfidenzintervall mit einer statistischen Sicherheit von $S = 95\%$ berechnet und in den Diagrammen neben dem Mittelwert angegeben.

Tabelle A 5.2: Beanspruchungsenergien typischer Zerkleinerungsvorgänge der Modell-Zerkleinerungsapparatur

Geringe Beanspruchungsdauer (s. Bild A 5.5a und A 5.6a)			Längere Beanspruchungsdauer (s. Bild A 5.5b und A 5.6b)		
Versuch	W_B kJ	$W_{B,A}$ J/mm ²	Versuch	W_B kJ	$W_{B,A}$ J/mm ²
RAL_1204	0.0526	0.4109	RAL_1330	0.1572	0.8932
RAL_1205	0.0467	0.3766	RAL_1331	0.1612	0.9264
RAL_1206	0.0467	0.3648	RAL_1332	0.1649	0.9423
RAL_1207	0.0468	0.3774	RAL_1333	0.1662	0.9497
RAL_1208	0.0479	0.3742	RAL_1334	0.1685	0.9684
Mittelwert		0.3808	Mittelwert		0.9360
Konfidenzintervall (S = 95%)			Konfidenzintervall (S = 95%)		
von		0.3590	von		0.9009
bis		0.4026	bis		0.9711

Mit Hilfe eines zusätzlichen Meßcomputers konnte weiterhin geprüft werden, inwieweit eine Abtastung der Signale mit einer höheren Frequenz die Genauigkeit der Messung verbessert. Dazu wurden Vergleichsmessungen an der einrotorigen Rotorschere durchgeführt, da aufgrund der kurzzeitigen Aufeinanderfolge der Zerkleinerungsvorgänge der Kurvenverlauf besonders starken Leistungsschwankungen unterliegt. Die Beanspruchungsgeometrie sowie die Versuchsbedingungen entsprechen im wesentlichen den in Bild A 5.5a angegebenen Werten,

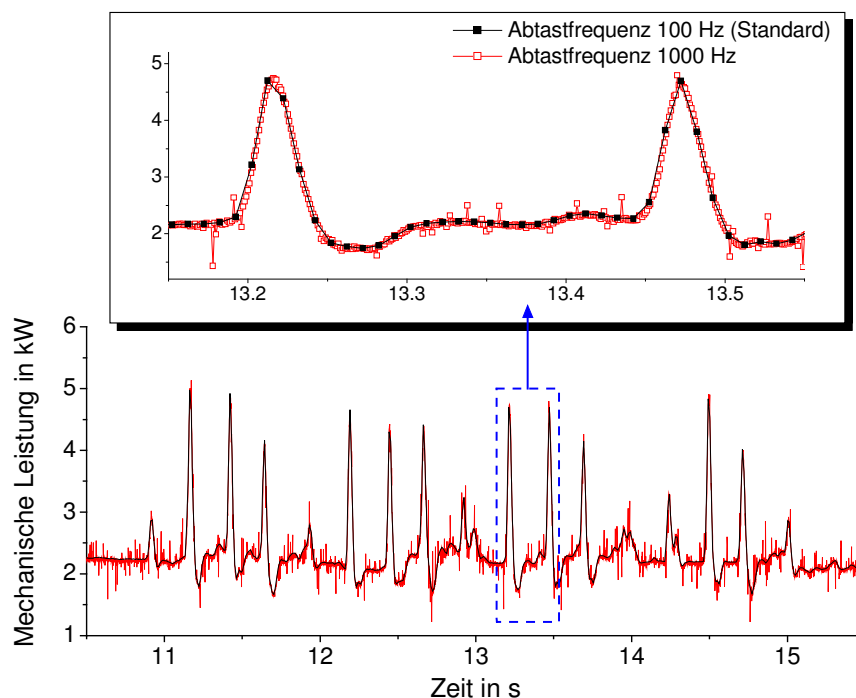


Bild A 5.7: Mit verschiedenen Abtastfrequenzen gemessene Leistungs-Zeit-Verläufe der einrotorigen Rotorschere

AlMg3; Wanddicke 1 mm; Abmessungen (200x200) mm²; Messereingriffswinkel 17°;
axiale und radiale Spaltweite 0,2 mm; Beanspruchungsgeschwindigkeit 0,4 m/s (19,5 min⁻¹)

wodurch der einzelne Zerkleinerungsvorgang und der Leistungs-Zeit-Verlauf grundsätzlich mit den bekannten Ergebnissen der Modell-Zerkleinerungsapparatur vergleichbar sind. Jedoch treten infolge der über die Rotorbreite verteilt ablaufenden Zerkleinerungsvorgänge sowie durch die Überlagerung mehrerer Vorgänge auch Unterschiede im Kurvenverlauf auf. Wie Bild A 5.7 verdeutlicht, sind die Meßergebnisse des standardmäßig eingesetzten Meß- und Steuercomputer bei 100 Hz weitestgehend identisch mit der Aufzeichnung bei einer deutlich höheren Abtastfrequenz von 1000 Hz. Kleinere Leistungsspitzen, die nur durch einen einzelnen Wert markiert werden, spiegeln nicht die Vorgänge bei der Zerkleinerung wider, sondern sind auf das Rauschen des Meßsignals zurückzuführen. Ebenso kann der Unterschied in den bruchflächenbezogenen Beanspruchungsenergien, die mit $0,4585 \text{ J/mm}^2$ (100 Hz) und $0,4546 \text{ J/mm}^2$ (1000 Hz) ermittelt wurden, unter den Bedingungen einer kleintechnischen Zerkleinerung vernachlässigt werden.

Versuchsprogramm mit der ein- und zweirotorigen Modell-Zerkleinerungsapparatur sowie Details der Beanspruchungsgeometrien

1. Parameter der Statorstellungen der einrotorigen Modell-Zerkleinerungsapparatur

Tabelle A 6.1: Kennwerte zur Beschreibung der Beanspruchungsgeometrie der einrotorigen Modell-Zerkleinerungsapparatur

Statorstellung	Statorneigung γ_S in °	Messereingriffswinkel β_{ZE} in °	Einzugs- winkel α_E in °	Radiale Spaltweite s_R in mm
1/1	30	29	77	125
1/2	30	0	113	140
1/3	30	10	100	135
2/1	45	34	69	108
2/2	45	43	59	23
2/3	45	17	93	131
3/1	60	39	64	106
3/2	60	61	35	18
3/3	60	65	28	34
3/4	60	50	49	67
3/5	60	55	45	57

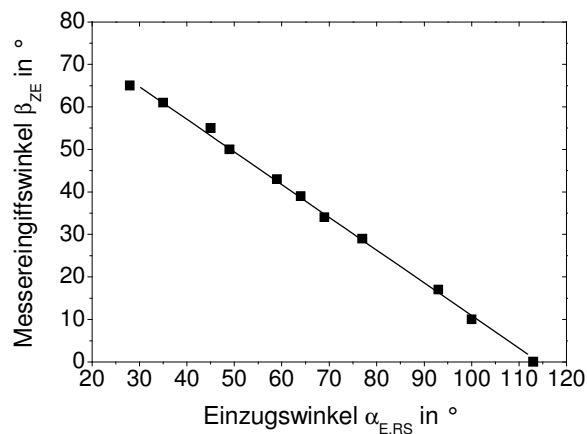


Bild A 6.1: Zusammenhang zwischen Einzugs- und Messereingriffswinkel

2. Parameter der Beanspruchungsgeometrie bei verschiedenen Wellenabständen der zweirotorigen Modell-Zerkleinerungsapparatur

Tabelle A 6.2: Kennwerte zur Beschreibung der Beanspruchungsgeometrie der zweirotorigen Modell-Zerkleinerungsapparatur bei runden Gegenscheiben ohne Rotormesser ($D = 310$ mm)

Wellen- abstand X_W in mm	Überdeckung		Einzugs- winkel		Messereingriffswinkel β_{ZE} in °
	min $\ddot{u}_{min}$ in mm	max $\ddot{u}_{MK}$ in mm	min $\alpha_{E,min}$ in °	max $\alpha_{E,max}$ in °	
290	20	65	43	66	38
300	10	55	31	60	44
310	0	45	0	51	50

Tabelle A 6.3: Kennwerte zur Beschreibung der Beanspruchungsgeometrie der zweirotorigen Modell-Zerkleinerungsapparatur bei Standardrotorscheiben ($D_{MK} = 400 \text{ mm}$)

Wellen- abstand X_W in mm	Überdeckung		Einzugswinkel		Messereingriffswinkel	
	min $\ddot{U}_{min}$ in mm	max $\ddot{U}_{MK}$ in mm	min $\alpha_{E,min}$ in °	max $\alpha_{E,max}$ in °	min $\beta_{ZE,min}$ in °	max $\beta_{ZE,max}$ in °
290	20	110	43	78	26	38
300	10	100	31	75	31	44
310	0	90	0	69	37	50
330	-20	70	-	55	47	66

3. Versuchspläne der einrotorigen Modell-Zerkleinerungsapparatur

Tabelle A 6.4: Versuchsplan für die Untersuchung der allgemeinen Geometrie des Zerkleinerungsraumes

Beanspruchungsgeschwindigkeit 0,4 m/s; plattenförmige Probekörper

Variierter Parameter	Material	Wanddicke w in mm	Geo- metrie	Messerein- griffswinkel β_{ZE} in °	Axiale Spaltweite s_A in mm	Radiale Spaltweite s_R in mm
1. Stator- stellung (Messerein- griffswinkel)	AlMg3; PP	1 (AlMg3); 5 (PP)	RS2; RS3;RR1	0; 10; 17; 29; 34; 39; 43; 50; 55; 61; 65	0,2 (RS2; RS3); 10 (RR1)	> 10 (abhängig v. d. Statorstellung)
2. Axiale Spaltweite	AlMg3; PP	1 (AlMg3); 5 (PP)	RS3; RR1	17; 55	0,2; 0,6; 1,0; 1,6; 2,6; 4,5; 5,1; 10,0	>10
3. Radiale Spaltweite	AlMg3; PP	1 (AlMg3); 5 (PP)	RS1; RS2	17	0,2	0,2; 0,6; 1,0; 1,7; 2,8; 5,6; 10,8; 20,0

Tabelle A 6.5: Versuchsplan für die Untersuchung der Rotormesser- und Rotorscheiben-geometrie

Beanspruchungsgeschwindigkeit 0,4 m/s; plattenförmige Probekörper

Variierter Parameter	Variations- bereich	Material	Wand- dicke w in mm	Geo- metrie	Messerein- griffswinkel β_{ZE} in °	Axiale Spaltweite s_A in mm	Radiale Spaltweite s_R in mm
1. Rotormesser- länge	l_{SN} in mm: 46; 56; 66	AlMg3; PP	1 (AlMg3); 5 (PP)	RS1; RS2	17; 61	0,2	0,2 (RS1); > 10 (RS2)
2. Rotormesser- bzw. Rotor- scheibenbreite	b_{RS} in mm: 20; 40; 60; 80	AlMg3; PP	1 (AlMg3); 5 (PP)	RS2; RS3; RR1	17; 61	0,2 (RS2/3); 10 (RR1)	> 10
3. Breite der Rotormesser- frontschneide	b_{SN} in mm: 5; 15; 25; 40	AlMg3; PP	1 (AlMg3); 5 (PP)	RR1; RR2	17; 61	10	> 10
4. Übergangs- radius	r_U in mm: 5; 15; 25	AlMg3; PP	1 (AlMg3); 5 (PP)	RS3	17; 61	0,2	> 10

Tabelle A 6.6: Versuchsplan für die Untersuchung zum Einfluß der Eigenschaften des Aufgabematerials

Beanspruchungsgeschwindigkeit 0,4 m/s

Variierter Parameter	Material	Wanddicke w in mm	Probekörperform und -abmessungen	Geometrie	Messereingriffswinkel β_{ZE} in °	Axiale Spaltweite s_A in mm	Radiale Spaltweite s_R in mm
1. Wanddicke	AlMg3; PP	AlMg3: 0,5; 1,0; 2,0; 5,0; PP: 1,0; 2,0; 5,0	Platten	RS1; RS2; RS3; RR1; RR2	17, 61	0,2 (RS1/3); 10 (RR1/2)	0,2 (RS1); > 10 (RS2/3; RR1/2)
2. Aluminiumwerkstoffe	Al99.5; AlMg3; AlMg4.5Mn0.7; AlMgSi1; AlCu4MgSi	1,0; 2,0; 5,0	Platten	RS1; RS3; RR1	17, 61	0,2 (RS1/3); 10 (RR1)	0,2 (RS1); > 10 (RS2; RR1)
3. Probekörperform/ Rohre	AlMgSi0.5; PP	Rohre: d x w in mm AlMgSi0.5: 20x2; 30x2; 40x2; 50x2; 75x2; PP: 20x1,9; 40x3,7; 50x4,6; 75x4,3; 90x5,1		RS1	17	0,2	0,2
4. Probekörperform/ Profile	AlMgSi0.5	Profile: Wanddicke 2 mm; Querschnitt (30x30) mm²; L-Profil; U-Profil; Vierkantrrohr		RS1	17	0,2	0,2

Tabelle A 6.7: Versuchsplan für die Untersuchung der betriebsbedingten Einflußgrößen

Beanspruchungsgeschwindigkeit 0,4 m/s (1. bis 4.); plattenförmige Probekörper

Variierter Parameter	Variationsbereich	Material	Wanddicke w in mm	Geometrie	Messereingriffswinkel β_{ZE} in °	Axiale Spaltweite s_A in mm	Radiale Spaltweite s_R in mm
1. Schneidkantenradius der Rotormesserfrontschneide	$r_{S,RM}$ in mm: 0,03; 0,1; 1,0; 2,5	AlMg3; PP	1 (AlMg3); 5 (PP)	RS1; RS3; RR1	17	0,2 (RS1/3); 10 (RR1)	0,2 (RS1); > 10 (RS1; RR1)
2. Schneidkantenradius der Rotormesserseitenkanten	$r_{S,RM}$ in mm: 0,1; 3,0	AlMg3; PP	1 (AlMg3); 5 (PP)	RS1; RS3; RR1	17	0,2 (RS1/3); 10 (RR1)	0,2 (RS1); > 10 (RS1; RR1)
3. Schneidkantenradius der Statorkanten	$r_{S,SM}$ in mm: 0,1; 1,0; 3,0	AlMg3; PP	1 (AlMg3); 5 (PP)	RS1	17	0,2	0,2
4. Radiale Spaltweite und Schneidkantenradius der Rotormesserfrontschneide	$r_{S,RM}$ in mm: 2,5	AlMg3; PP	1 (AlMg3); 5 (PP)	RS1	17	0,2	0,2; 1,3; 3,0; 5,0
5. Beanspruchungsgeschwindigkeit	v in m/s: 0,1; 0,4; 0,6; 0,8; 1,1; 1,5; 2,0; 2,8; 3,0	AlMg3; PP	1 (AlMg3); 5 (PP)	RS1	17	0,2	0,2

4. Versuchsplan der zweirotorigen Modell-Zerkleinerungsapparatur

Tabelle A 6.8: Versuchsplan für die Untersuchung mit der zweirotorigen Modell-Zerkleinerungsapparatur

RRS - runde Rotorscheiben (D = 310 mm); SRS - Standardrotorscheiben mit Messern ($D_{MK} = 400$ mm); Beanspruchungsgeschwindigkeit 0,4 m/s (1. bis 4. beide Wellen; 5. Welle 2)

Variierter Parameter	Material	Wanddicke w in mm	Probekörperform und -abmessungen	Rotor-scheibengestalt (W1/W2)	Wellenabstand X_W in mm	Relativgeschwindigkeit v_R in m/s
1. Wellenabstand und Übergangsradius (r_U)	AlMg3; PP	1 (AlMg3); 5 (PP)	Platten	RRS/SRS	$r_U = 0$ mm: 290; 300; 310; $r_U = 25$ mm: 290; 300; 310	0
2. Wanddicke	AlMg3; PP	<u>AlMg3</u> : 0,5; 1,0; 2,0; 5,0; <u>PP</u> : 1,0; 2,0; 5,0	Platten	RRS/SRS; SRS/SRS	300	0
3. Aluminiumwerkstoffe	Al99.5; AlMg3; AlMg4.5Mn0.7; AlMgSi1; AlCu4MgSi	1,0; 2,0; 5,0	Platten	SRS/SRS	300	0
4. Probekörperform/ Rohre	AlMgSi0.5; PP	Rohre: d x w in mm <u>AlMgSi0.5</u> : 15x2; 30x2; 40x2; 50x2; 75x2; <u>PP</u> : 20x1,9; 40x3,7; 50x4,6; 75x4,3; 90x5,1		SRS/SRS	300	0
5. Relativgeschwindigkeit	AlMg3; PP	1 (AlMg3); 5 (PP)	Platten	RRS/SRS	300	0,09; 0,18; 0,25; 0,32; 0,41

Detailangaben zum Aufbau der kleintechnischen Zerkleinerungsmaschinen und zur Versuchsdurchführung

1. Axiale und radiale Spaltweiten

Die Schwankung der axialen und radialen Spaltweite ist nur zu einem geringen Teil auf die Spaltweitereinstellung mittels Fühlerlehre ($\pm 0,05$ mm) zurückzuführen. Größere Unterschiede resultieren vor allem von den geringfügigen axialen und radialen Größenunterschieden der Rotorscheiben. Vergleichbare Schwankungsbereiche ergeben sich auch bei dem ein- und zweiseitigen Rotorreißer. Jedoch sind bei diesen die Schwankungen in bezug auf die eingestellte Basisspaltweite von ≥ 10 mm vernachlässigbar.

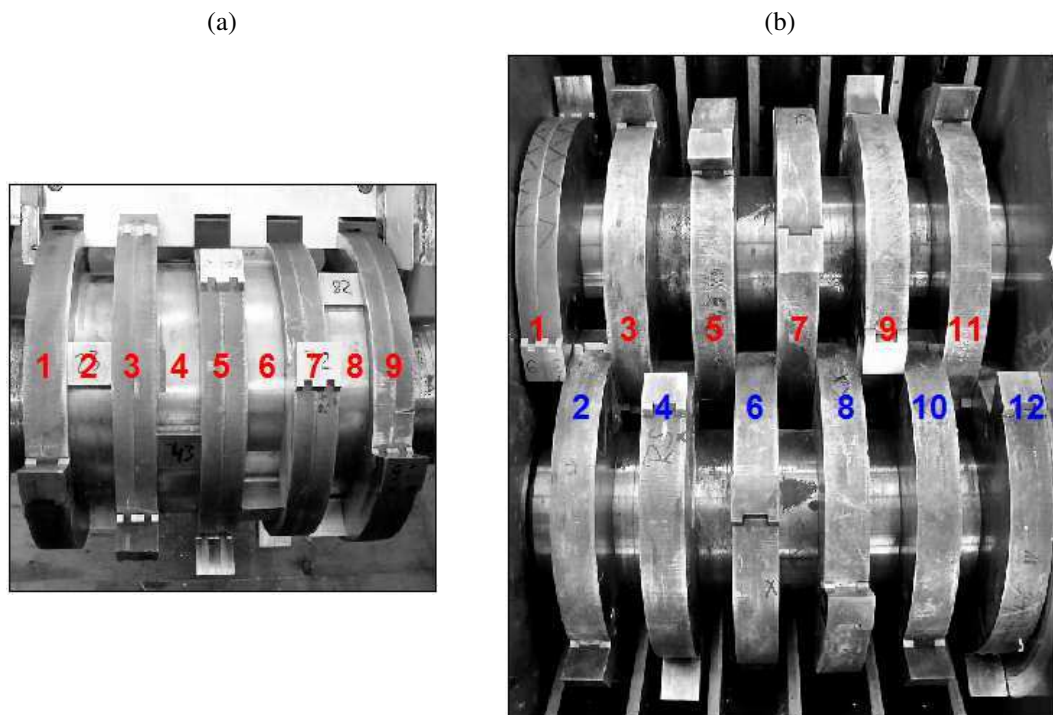


Bild A 7.1: Bezeichnung der Rotorscheiben für die Kennzeichnung der Spalte;
(a) Einrotorige Rotorscheibe; (b) Zweiroorige Rotorscheibe

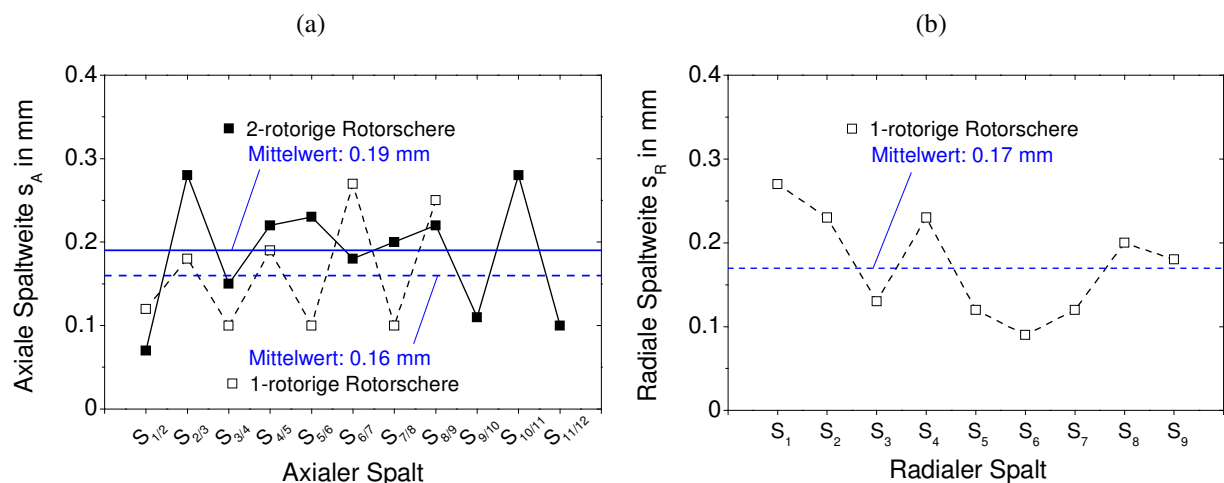


Bild A 7.2: Axiale (a) und radiale Spaltweiten (b) der ein- und zweiroorigen Rotorscheibe

2. Schneidkantenradien der Rotor- und Statorelemente

Für die Ermittlung der Schneidkantenradien der Messer wurden die Kanten mit einer Formmasse (additionsvernetzendes Vinylsilicon, Fa. BISICO/Bielefeld) überzogen. Nach Aushärtung der Formmasse wurde diese entfernt und in dünne Scheiben geschnitten, so daß die Schneidkante im Querschnitt sichtbar war. Die Bestimmung des Kantenradius der so abgebildeten Schneidkante erfolgte mikroskopisch mittels digitaler Bildanalyse.

Während die Schneidkanten der Rotor-/Stempel- und Statormesser der Scher- und Reißvorrichtung, des Schlagwerkes und der Modell-Zerkleinerungsapparaturen durch Abschleifen der Messer auf die gewünschten Radien eingestellt wurden, konnte bei den kleintechnischen Zerkleinerungsmaschinen die große Anzahl der Messer nicht nachgeschliffen werden. Ihre Schneidkantenradien entsprechen dem Fertigungszustand bzw. weisen durch vorhergehende Versuche geringfügig höhere Werte auf. Für die kleintechnischen Zerkleinerungsmaschinen ergeben sich daher folgende Mittelwerte und Schwankungsbereiche der Schneidkantenradien:

Rotorwerkzeuge

- Frontschneiden der Rotormesser: $0,04 \text{ mm} \leq r_s \leq 0,30 \text{ mm}$ (**$r_s = 0,14 \text{ mm}$**)
- Seitenschneiden der Rotormesser: $0,05 \text{ mm} \leq r_s \leq 0,43 \text{ mm}$ (**$r_s = 0,26 \text{ mm}$**)
- Seitenkanten der Rotorscheiben: $0,05 \text{ mm} \leq r_s \leq 0,37 \text{ mm}$ (**$r_s = 0,18 \text{ mm}$**)

Stator der einrotorigen Rotorschere

- Radiale Statorkanten gegenüber den großen Rotorscheiben ($D_{MK} = 400 \text{ mm}$): $0,18 \text{ mm} \leq r_s \leq 0,24 \text{ mm}$ (**$r_s = 0,21 \text{ mm}$**)
- Radiale Statorkanten gegenüber den kleinen Rotorscheiben ($D_{MK} = 328 \text{ mm}$): $0,44 \text{ mm} \leq r_s \leq 0,64 \text{ mm}$ (**$r_s = 0,58 \text{ mm}$**)
- Axiale Statorkanten: $0,04 \text{ mm} \leq r_s \leq 0,28 \text{ mm}$ (**$r_s = 0,16 \text{ mm}$**)

Stator des einrotorigen Rotorreißers

- Axiale Statorkanten $0,04 \text{ mm} \leq r_s \leq 0,34 \text{ mm}$ (**$r_s = 0,19 \text{ mm}$**)

3. Versuchsprogramm zur Zerkleinerung definierter Probekörper

Tabelle A 7.1: Versuchsplan für die Zerkleinerung definierter Probekörper mit der einrotorigen Rotorschere

Beanspruchungsgeschwindigkeit 0,4 m/s

Variierter Parameter	Material	Probekörper				Durchmesser d in mm
		Form	Länge l _{PK} in mm	Breite b _{PK} in mm	Wanddicke w in mm	
1. Probekörperbreite	AlMg3; PP	Platten	200	120; 160; 200; 240; 280; 320; 360	1 (AlMg3); 5 (PP)	-
2. Probekörperlänge	AlMg3; PP	Platten	200; 400	360	1 (AlMg3); 5 (PP)	-
3. Wanddicke	AlMg3; PP	Platten	200	200	<u>AlMg3:</u> 0,5; 1,0; 2,0; <u>PP:</u> 1,0; 2,0; 5,0	-
4. Probekörperform/ Rohre	AlMgSi0.5; PP	Rohre	360	-	d x w in mm <u>AlMgSi0.5:</u> 15x2; 30x2; 40x2; 50x2; 75x2; <u>PP:</u> 20x1,9; 40x3,7; 50x4,6; 75x4,3; 90x5,1	

Tabelle A 7.2: Versuchsplan für die Zerkleinerung definierter Probekörper mit der zweirotorigen Rotorschere

Beanspruchungsgeschwindigkeit 0,4 m/s (1. bis 5. beide Wellen; 6. Welle 2)

Variierter Parameter	Material	Probekörper				Durchmesser d in mm	Wellenabstand X _W in mm	Relativgeschwindigkeit v _{rel} in m/s
		Form	Länge l _{PK} in mm	Breite b _{PK} in mm	Wanddicke w in mm			
1. Probekörperbreite	AlMg3; PP	Platten	200	120; 160; 200; 240; 280; 320; 360	1 (AlMg3); 5 (PP)	-	300	0
2. Probekörperlänge	AlMg3; PP	Platten	200; 400; 600; 800	200; 360	1 (AlMg3); 5 (PP)	-	300	0
3. Wanddicke	AlMg3; PP	Platten	200	200	<u>AlMg3:</u> 0,5; 1,0; 2,0; <u>PP:</u> 1,0; 2,0; 5,0	-	300	0
4. Wellenabstand	AlMg3; PP	Platten	200	200	1 (AlMg3); 5 (PP)	-	290; 300; 310	0
5. Probekörperform/ Rohre	AlMgSi0.5; PP	Rohre	360	-	d x w in mm <u>AlMgSi0.5:</u> 20x2; 30x2; 40x2; 50x2; 75x2; <u>PP:</u> 20x1,9; 40x3,7; 50x4,6; 75x4,3; 90x5,1		300	0
6. Relativgeschwindigkeit	AlMg3; PP	Platten	200	200	1 (AlMg3); 5 (PP)	-	300	0; 0,1; 0,2; 0,3

Tabelle A 7.3: Versuchsplan für die Zerkleinerung definierter Probekörper mit dem einrotorigen Rotorreißer

Beanspruchungsgeschwindigkeit 0,4 m/s

Variierter Parameter	Material	Probekörper			
		Form	Länge l _{PK} in mm	Breite b _{PK} in mm	Wanddicke w in mm
1. Wanddicke	AlMg3; PP	Platten	400	360	AlMg3: 0,5; 1,0; 2,0; PP: 1,0; 2,0; 5,0

Tabelle A 7.4: Versuchsplan für die Zerkleinerung definierter Probekörper mit dem zweirotorigen Rotorreißer

Beanspruchungsgeschwindigkeit 0,4 m/s (beide Wellen)

Variierter Parameter	Material	Probekörper				Wellenabstand X _W in mm	Relativgeschwindigkeit v _{rel} in m/s
		Form	Länge l _{PK} in mm	Breite b _{PK} in mm	Wanddicke w in mm		
1. Wanddicke	AlMg3; PP	Platten	500	500	AlMg3: 0,5; 1,0; 2,0; PP: 1,0; 2,0; 5,0	300	0

4. Versuchsprogramm zur Zerkleinerung realitätsnaher Abfallschüttungen

Tabelle A 7.5: Versuchsplan für die Zerkleinerung typischer Abfallschüttungen

Beanspruchungsgeschwindigkeit 0,4 m/s; Relativgeschwindigkeit 0 m/s

Zerkleinerungsmaschine	Abfallart	Abmessungen (Einzelstücke) (a x b x c) in mm ³	Aufgabemasse m _A in kg	Wellenabstand X _W in mm
1. Zweirotorige Rotorschere	Tetrapaks (1 l)	165x95x65	3,0	290; 310; 330
	Bierbüchsen (0,5 l)	170x65x65	3,0	
	¼ Pkw-Reifen	ca. 400x200x200	5,4 - 6,2	
	Dielenbretter	450x165x22	3,2	290
2. Zweirotoriger Rotorreißer	Dielenbretter	450x165x22	6,1	

5. Zufälliger Fehler der Kenngrößen bei den kleintechnischen Zerkleinerungsversuchen

Tabelle A 7.6: Abschätzung des zufälligen Fehlers der kleintechnischen Zerkleinerungsversuche (Probekörper: AlMg3; Wanddicke 1 mm; jeweils 3 Versuche)

Kenngröße	Mittelwert	Standardabweichung	Variationskoeffizient
a) Einrotorige Rotorschere: Beanspruchungsgeschwindigkeit 0,4 m/s; axiale und radiale Spaltweite 0,2 mm; Messereingriffswinkel 17°			
W _{B,A}	0,59 J/mm ²	0,008 J/mm ²	1,4 %
W _{B,m}	4,05 kWh/t	0,113 kWh/t	2,8 %
V _E	20,4 mm/s	1,15 mm/s	5,6 %
m _{spez.}	195 kg/h*m	10,6 kg/h*m	5,4 %
a _{50,3}	41,0 mm	0,12 mm	0,3 %
b _{50,3}	26,9 mm	0,35 mm	1,3 %
m _{50,3}	2,77 g	0,012 g	0,4 %
B _{50,3}	0,04 -	0,0131 -	32,8 %
b) Zweirotorige Rotorschere: Beanspruchungsgeschwindigkeit 0,4 m/s (beide Wellen); axiale Spaltweite 0,2 mm; Wellenabstand 300 mm			
W _{B,A}	1,48 J/mm ²	0,031 J/mm ²	2,1 %
W _{B,m}	3,82 kWh/t	0,075 kWh/t	2,0 %
V _E	253,0 mm/s	17,67 mm/s	7,0 %
m _{spez.}	2421 kg/h*m	161,4 kg/h*m	6,7 %
a _{50,3}	170,1 mm	21,63 mm	12,7 %
b _{50,3}	44,7 mm	2,12 mm	4,7 %
m _{50,3}	26,97 g	1,250 g	4,6 %
B _{50,3}	0,33 -	0,057 -	17,3 %
c) Einrotoriger Rotorreißer: Beanspruchungsgeschwindigkeit 0,4 m/s; axiale Spaltweite 10,5 mm; radiale Spaltweite 18 mm; Messereingriffswinkel 61°			
W _{B,A}	1,28 J/mm ²	0,063 J/mm ²	4,9 %
W _{B,m}	3,49 kWh/t	0,052 kWh/t	1,5 %
V _E	98,1 mm/s	2,69 mm/s	2,7 %
m _{spez.}	916 kg/h*m	23,5 kg/h*m	2,6 %
a _{50,3}	301,3 mm	39,15 mm	13,0 %
b _{50,3}	50,6 mm	2,54 mm	5,0 %
m _{50,3}	36,6 g	7,627 g	20,8 %
B _{50,3}	0,57 -	0,043 -	7,5 %
d) Zweirotoriger Rotorreißer: Beanspruchungsgeschwindigkeit 0,4 m/s (beide Wellen); axiale Spaltweite 20 mm; Wellenabstand 300 mm			
W _{B,A}	0,81 J/mm ²	0,0218 J/mm ²	2,7 %
W _{B,m}	1,12 kWh/t	0,147 kWh/t	13,1 %
V _E	289,0 mm/s	14,95 mm/s	5,2 %
m _{spez.}	2753 kg/h*m	142,4 kg/h*m	5,2 %
a _{50,3}	441,0 mm	95,67 mm	21,7 %
b _{50,3}	165,6 mm	11,24 mm	6,8 %
m _{50,3}	176,45 g	80,822 g	45,8 %
B _{50,3}	0,27 -	0,059 -	21,9 %

Zusätzliche Abbildungen zu den Untersuchungen bei typischen Beanspruchungsgeometrien der Rotorscheren und Rotorreißer

1. Zerkleinerung von Polypropylen bei großer radialer Spaltweite

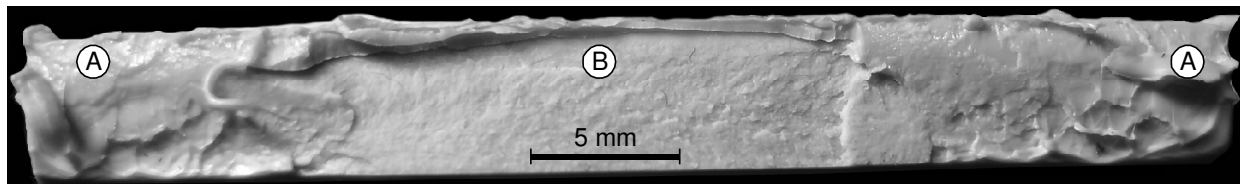


Bild A 8.1: Bruchfläche eines Polypropylen-Bruchstückes bei großer radialer Spaltweite

Rotormesserbewegung von oben nach unten; A - Plastisch verformte Materialbereiche im Bereich der Messerkanten; B - Sprödbbruch infolge Biegebrechen; Wanddicke 5 mm; Geometrie RS2; Messereingriffswinkel 17°; axiale Spaltweite 0,2 mm; radiale Spaltweite > 10 mm; Beanspruchungsgeschwindigkeit 0,4 m/s

2. Einzug voluminöser Körper durch die Rotormesser

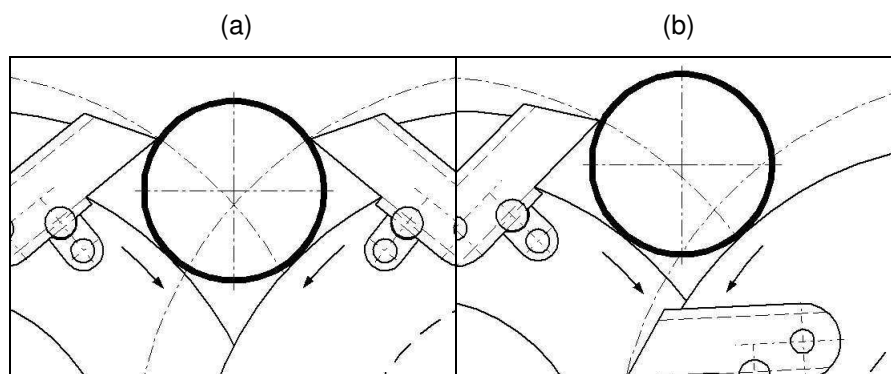


Bild A 8.2: Einzug von voluminösen Probekörpern (Rohren) durch die Rotormesser bei günstiger (a) und ungünstiger (b) Stellung der Rotoren zueinander

Maßstabsgetreue Darstellung; Rohrdurchmesser 90 mm; Rotormesserslänge 46 mm; Wellenabstand 300 mm

3. Einfluß der axialen Spaltweite

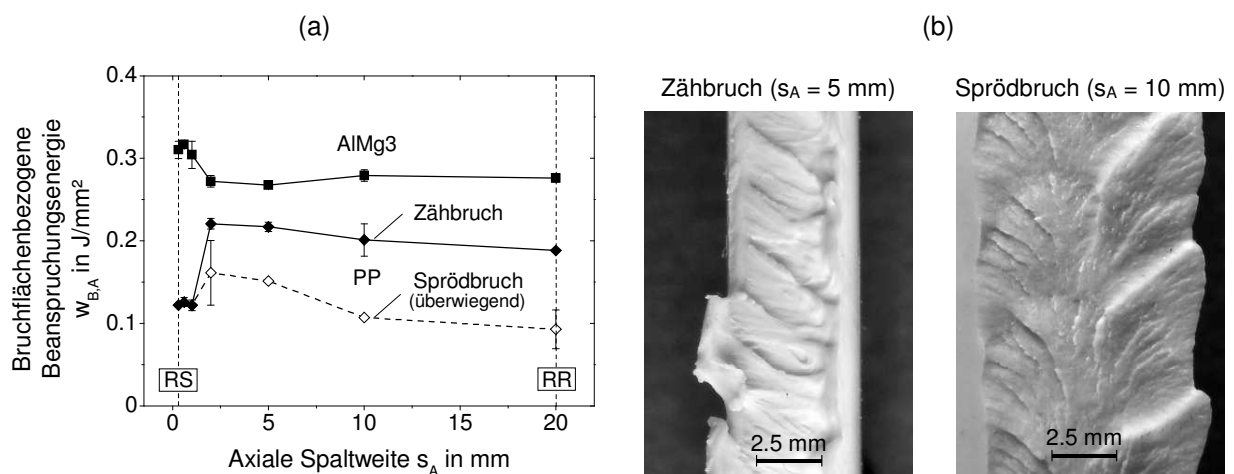


Bild A 8.3: Einfluß der axialen Spaltweite auf die Zerkleinerung von AlMg3 und Polypropylen bei höherer Beanspruchungsgeschwindigkeit am Schlagwerk;

(a) Bruchflächenbezogene Beanspruchungsenergie; (b) Typische Bruchflächen von Polypropylen
RS - Geometrie SW2; RR - Geometrie SW3; Rotormesser RM3; Wanddicke 1 (AlMg3) bzw. 5 mm (PP); Schleppzeigermessung; radiale Spaltweite 20 mm; Beanspruchungsgeschwindigkeit 2,5 m/s

4. Einfluß der Rotormesser- bzw. Rotorscheibenbreite

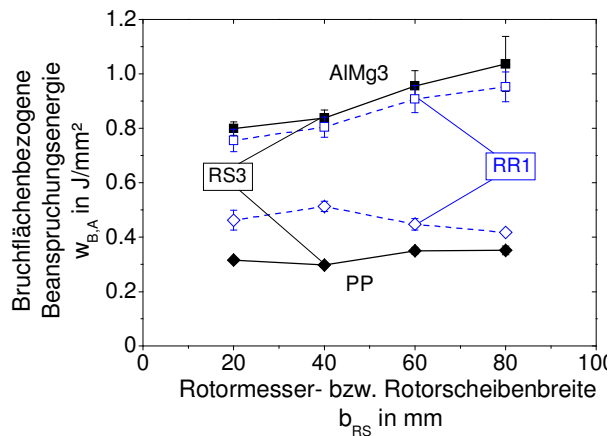


Bild A 8.4: Einfluß der Rotormesser- bzw. Rotorscheibenbreite auf die bruchflächenbezogene Beanspruchungsenergie

Messereingriffswinkel 61° ; Beanspruchungsgeschwindigkeit 0,4 m/s; radiale Spaltweite > 10 mm;
 Rotorscheergeometrie RS3; axiale Spaltweite 0,2 mm;
 Rotorreißergeometrie RR1; axiale Spaltweite 10 mm

5. Einfluß des Übergangsradius

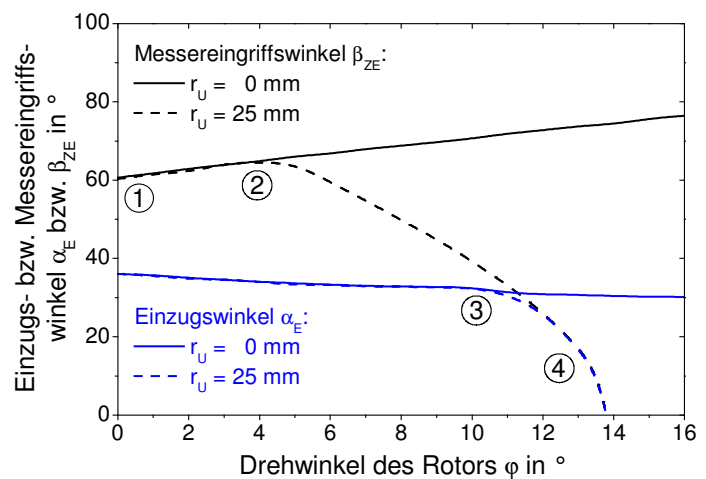
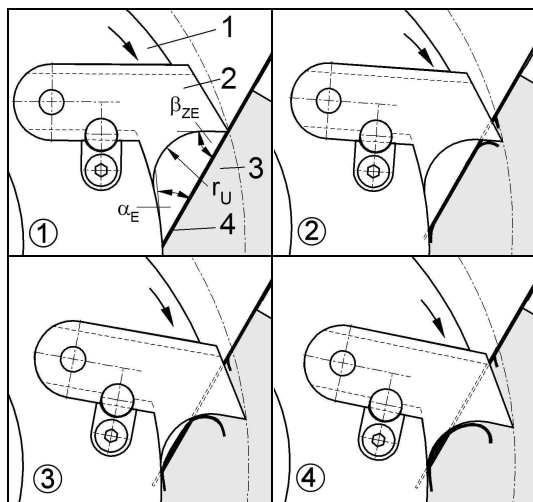


Bild A 8.5: Auswirkung des Übergangsradius r_U auf die Winkelverhältnisse am Rotormesser

(1) Eingriff der Rotormesserfrontschneide; (2) Verringerung des Messereingriffswinkels im Übergangsbereich;
 (3) Verringerung des Einzugs winkels im Übergangsbereich; (4) Abscheren des restlichen Materials
 1 - Rotorscheibe; 2 - Rotormesser; 3 - Statorwerkzeug; 4 - Probekörper (AlMg3; Wanddicke 1 mm);
 Übergangsradius 25 mm; Rotorscheergeometrie RS3; axiale Spaltweite 0,2 mm; radiale Spaltweite > 10 mm

Ablauf der Biegeumformung bei AlMgSi0.5-Rohren

Die Beanspruchung dünnwandiger Rohre in Rotorscheren und Rotorreißern bewirkt vor der Zerkleinerung einen Verdichtungsvorgang durch eine Biegeumformung. Dabei bilden sich im Querschnitt des Rohres zwei Biegestellen aus (Bild A 9.1), die durch den Hebelarm l_H , die Wanddicke des Rohres w , die beanspruchte Rohrbreite b und den Rohrdurchmesser d definiert sind. Für die Biegekraft bei rechteckigem Querschnitt gilt $F_{BU} \sim \sigma_F w^2 b / l_H$ (s. Gl (5.1)). Der Biegeweg entspricht dem Innendurchmesser des Rohres, so daß im Ergebnis der Biegeumformung ein nahezu plattenförmiger Körper vorliegt.

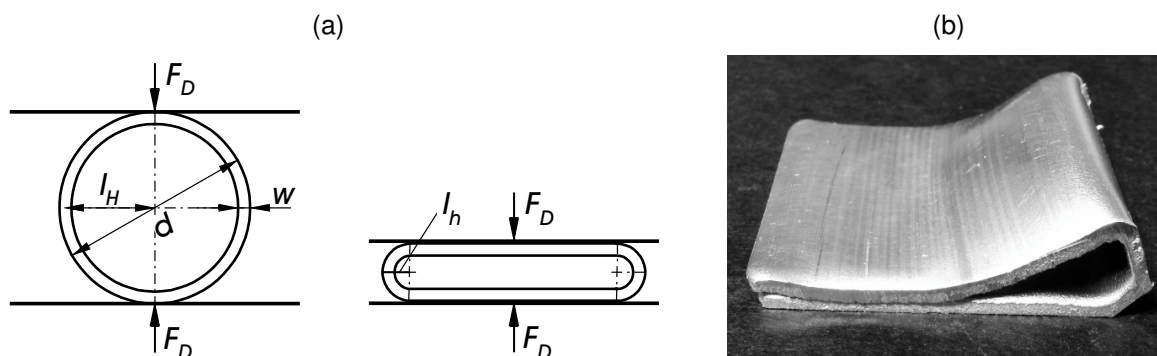


Bild A 9.1: Ablauf der Biegeumformung bei der Zerkleinerung eines dünnwandigen Rohres; (a) Schematische Darstellung; (b) Bruchstück eines AlMgSi0.5-Rohres

(a) F_D - Äußere Druckkraft; d - Rohrdurchmesser; w - Wanddicke; l_H - Hebelarm der Biegekraft;
 (b) Wanddicke 2 mm; Rohrdurchmesser 40 mm; Rotorscheregeometrie RS1; Messereingriffswinkel 17° ; axiale und radiale Spaltweite 0,2 mm; Beanspruchungsgeschwindigkeit 0,4 m/s

Während der Umformung nimmt der Hebelarm der Biegung ständig ab, wodurch die Biegekraft ansteigt. In Bild A 9.2a ist das an einer Zunahme der mechanischen Leistung kurz vor dem Einsetzen der Zerkleinerung zu erkennen. Da sich bei unterschiedlichen Rohrdurchmessern sowohl die Hebelverhältnisse, d. h. die Biegekraft, als auch der Biegeweg ändern, ergibt sich bei der Zerkleinerung der AlMgSi0.5-Rohre identischer Wanddicke ungefähr der gleiche Energieanteil für die Verdichtung von 30 bis 40% der gesamten Beanspruchungsenergie (Bild A 9.2b).

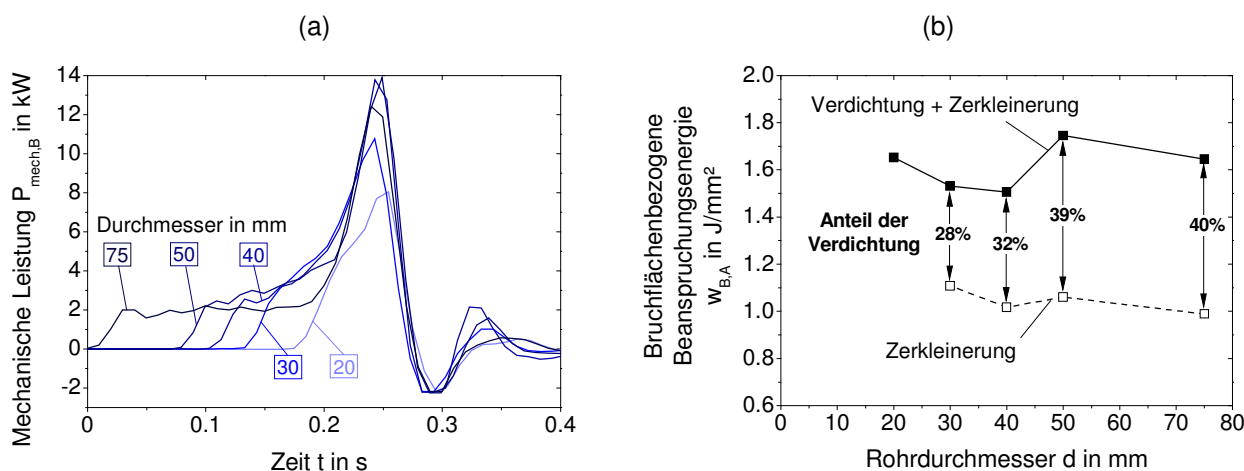


Bild A 9.2: Auswirkung der Zerkleinerung von AlMgSi0.5-Rohren verschiedener Durchmesser auf den Leistungs-Zeit-Verlauf (a) und die bruchflächenbezogene Beanspruchungsenergie (b)

Wanddicke 2 mm; Rotorscheregeometrie RS1; Messereingriffswinkel 17° ; axiale und radiale Spaltweite 0,2 mm; Beanspruchungsgeschwindigkeit 0,4 m/s

Ablauf der Knick- und Biegeumformung bei AlMgSi0.5-Profilen

Um den kombinierten Knick- und Biegevorgang nachzubilden, wurden L-, U- und Kastenprofile aus Aluminium zerkleinert. Eine typische Verformung durch Knickung und Biegung verdeutlicht Bild A 10.1 am Beispiel des Kastenprofils.

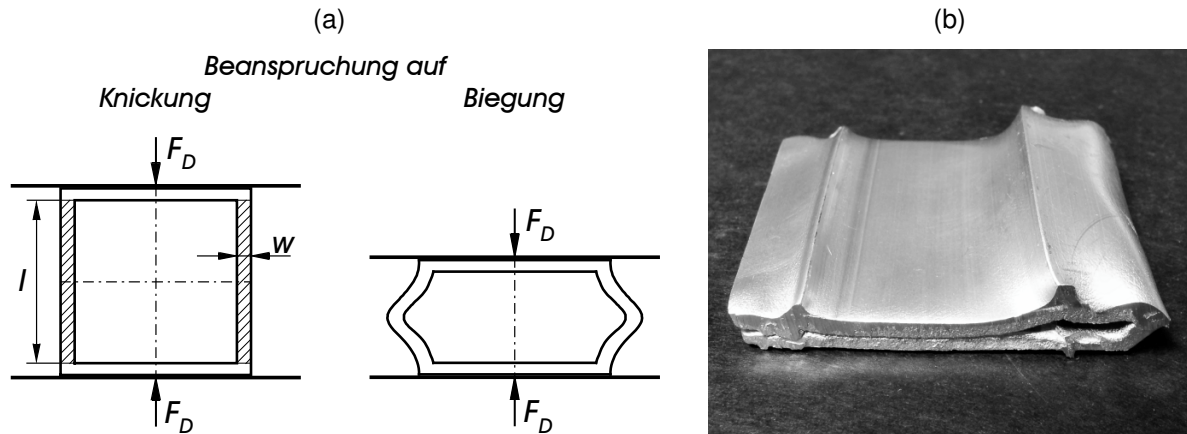


Bild A 10.1 : Umformvorgänge bei der Zerkleinerung eines Vierkantrohres (Kastenprofil);

(a) Schematische Darstellung; (b) Bruchstück eines AlMgSi0.5-Vierkantrohres

(a) F_D - Äußere Druckkraft; l - Länge des beanspruchten Materialquerschnitts; w - Wanddicke;

(b) Wanddicke 2 mm; Kantenlänge 30 mm; Rotorscheergeometrie RS1; Messereingriffswinkel 17° ; axiale und radiale Spaltweite 0,2 mm; Beanspruchungsgeschwindigkeit 0,4 m/s

Die in Richtung der äußeren Druckkraft ausgerichteten Profilabschnitte werden im Verlaufe der Beanspruchung geknickt, so daß insgesamt sechs Biegestellen entstehen. Die sich anschließende Biegeumformung ist mit der der Rohre vergleichbar. Das Knicken des beanspruchten Materialabschnitts setzt plötzlich ein, sobald die Druckkraft einen kritischen Wert, die Knickkraft, erreicht. Für die Knickkraft gilt bei rechteckiger Querschnittsfläche $F_K \sim Ew^3b/l_K^2$. D. h., ein hoher Widerstand gegen Knickung wird mit kurzen, dickwandigen Abstützungen erreicht. Die freie Knicklänge l_K ergibt sich aus der Länge des abstützenden Materialbereichs und den Führungs- bzw. Einspannungsverhältnissen an den Enden. Besonders hohe Knickkräfte müssen aufgebracht werden, wenn eine beidseitige, feste Einspannung vorhanden ist. Dieser Fall ist annähernd durch die Gestalt des Kastenprofils gegeben. Erreichen die Spannungen bei ungünstigen Knickbedingungen die Festigkeit des Materials, bevor eine Knickung einsetzen kann, dann findet keine Knickung, sondern das Fließen des Materials bzw. der Bruch statt. Ein Vergleich des Energiebedarfs für die Zerkleinerung eines einfachen Bleches, eines Rohres und verschiedener Profile ist in Bild A 10.2 ersichtlich. Mit Zunahme der Biege- und Knickstellen steigt der Energiebedarf deutlich an.

Typische Bruchstücke der ein- und zweirotorigen Rotorschere

1. Bruchstücke der einrotorigen Rotorschere

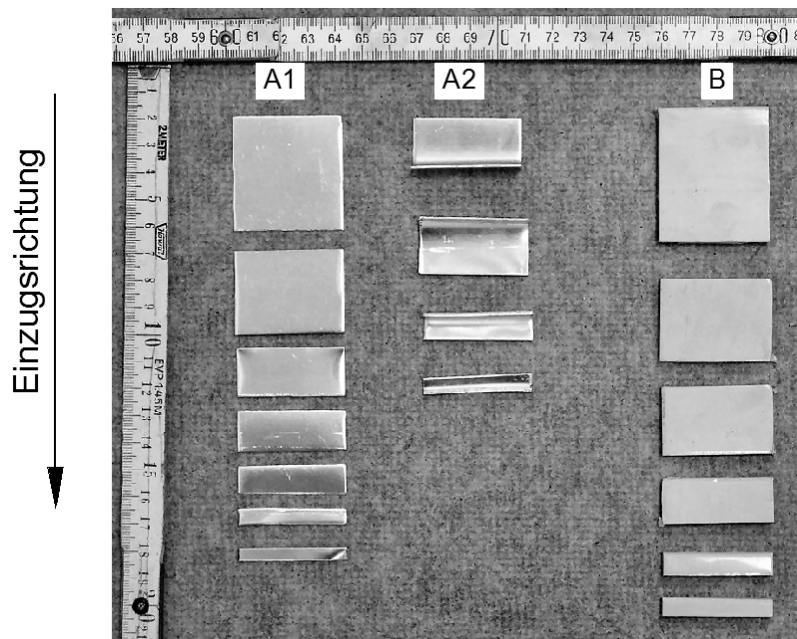


Bild A 11.1: Bruchstücke von mit der einrotorigen Rotorschere zerkleinerten plattenförmigen Probekörpern; (A1) AlMg3 (Wanddicke 1 mm) - plattenförmig; (A2) AlMg3 - leicht gebogen; (B) Polypropylen (Wanddicke 5 mm) - plattenförmig

2. Bruchstücke der zweirotorigen Rotorschere

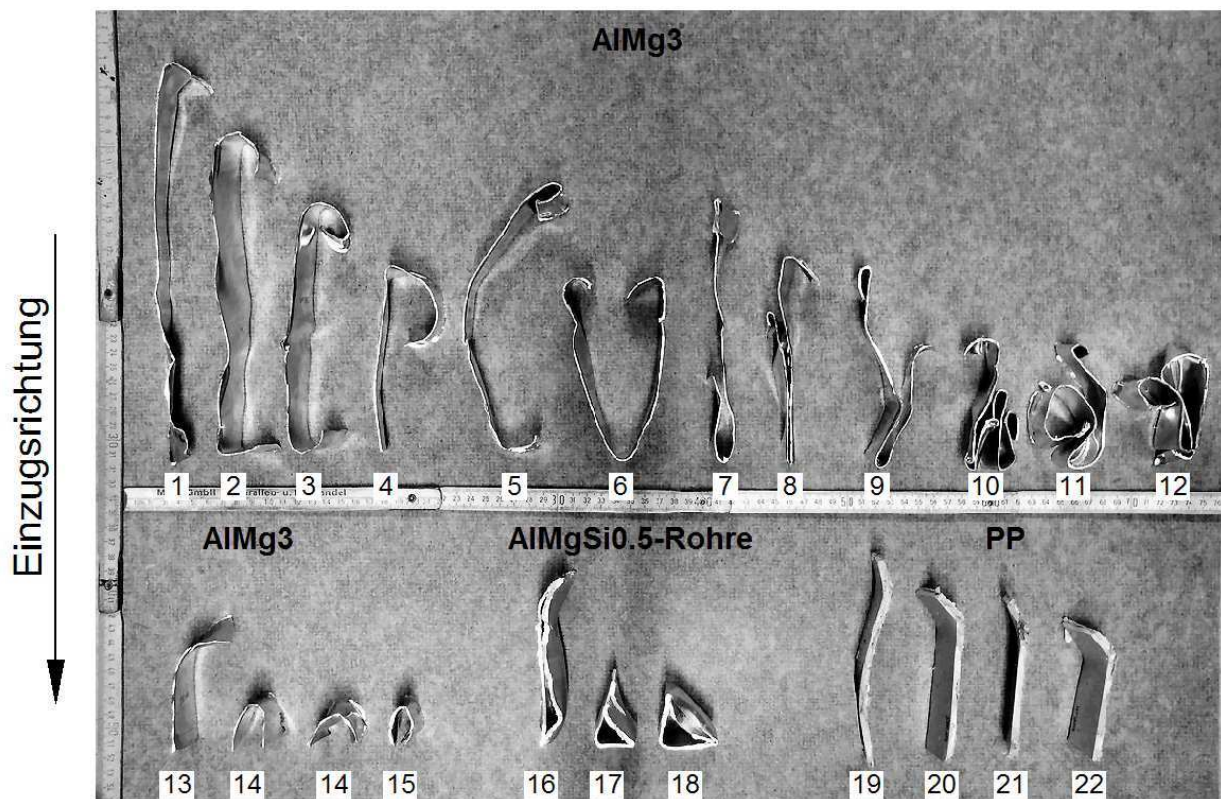


Bild A 11.2: Bruchstücke von mit der zweirotorigen Rotorschere zerkleinerten Probekörpern Wanddicke 1 mm (AlMg3-Bleche), 2 mm (AlMgSi0.5-Rohre), 5 mm (PP-Platten)

Tabelle A 11.1: Kennwerte der in Bild A 11.2 dargestellten Bruchstücke

Bruch- stück	Stückgröße				Stück- masse m in g	Biege- grad B
	verformt		unverformt			
	a in mm	b in mm	a _{St} in mm	b _{St} in mm		
a) AlMg3: Längere Bruchstücke entsprechend der Einzugsbedingungen						
1	269	41	292	40	31.0	0.02
2	213	40	285	40	29.9	0.21
3	167	40	253	40	27.3	0.33
4	123	45	214	40	22.4	0.39
5	180	60	262	40	27.3	0.27
6	125	66	305	40	31.9	0.52
7	173	42	265	40	28.4	0.37
8	139	43	275	40	29.8	0.55
9	140	50	255	40	28.2	0.51
10	95	41	292	40	32.0	0.69
11	86	48	275	40	28.8	0.68
12	86	48	281	40	30.0	0.71
b) AlMg3: Kürzere Bruchstücke aus den Randbereichen der Probekörper						
13	89	41	97	40	10.4	0.17
14	40	33	71	40	7.1	0.49
15	40	30	55	40	5.8	0.52
16	40	28	64	40	6.1	0.57
c) Polypropylen						
19	139	42	145	40	26.2	0.01
20	113	43	118	40	21.7	0.02
20	105	42	108	40	19.7	0.03
21	87	41	93	40	16.7	0.02

Zerkleinerung von Rohren mit der ein- und zweirotorigen Rotorschere

1. Einzug und Zerkleinerung von dünnwandigen Metallrohren

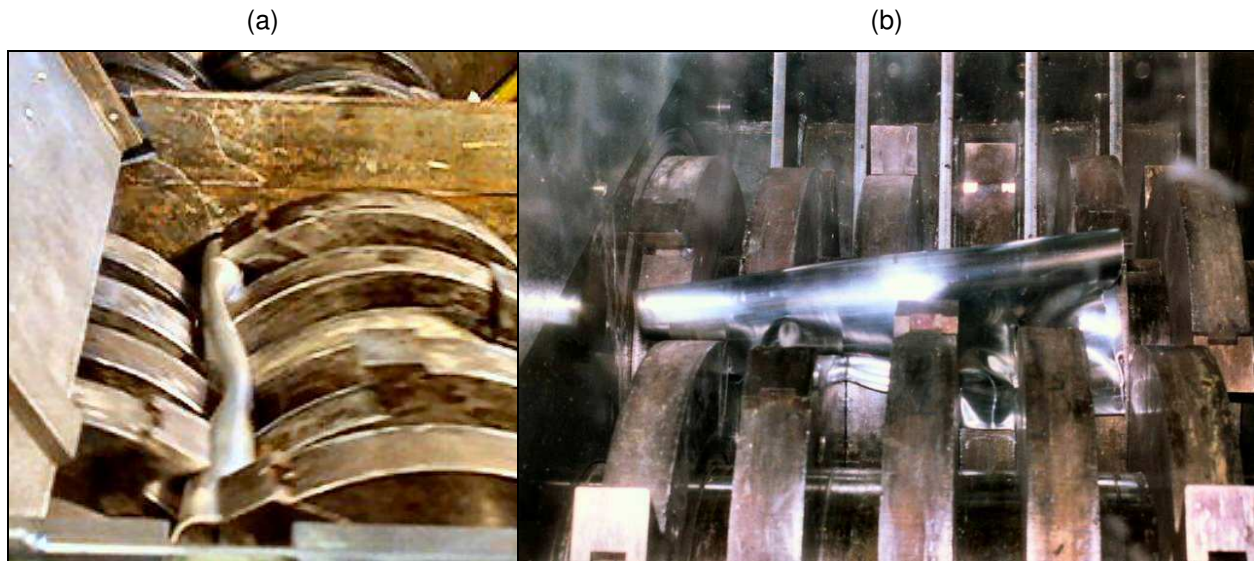


Bild A 12.1: Verdichtung der dünnwandigen Metallrohre während des Einzugs und Zerkleinerung als annähernd plattenförmige Körper

(a) AlMgSi0.5-Rohr: Wanddicke 2 mm; Durchmesser 75 mm; (b) Zink-Rohr: Wanddicke 0,65 mm; Durchmesser 100 mm

2. Einzug und Zerkleinerung eines dickwandigen Polypropylen-Rohres



Bild A 12.2: Verformungsarmer Bruch eines Polypropylen-Rohres infolge einer Biegebeanspruchung beim Eingriff der Rotormesser

Wanddicke 5,1 mm; Durchmesser 90 mm

3. Einfluß des Rohrdurchmessers auf die bruchflächenbezogene Beanspruchungsenergie

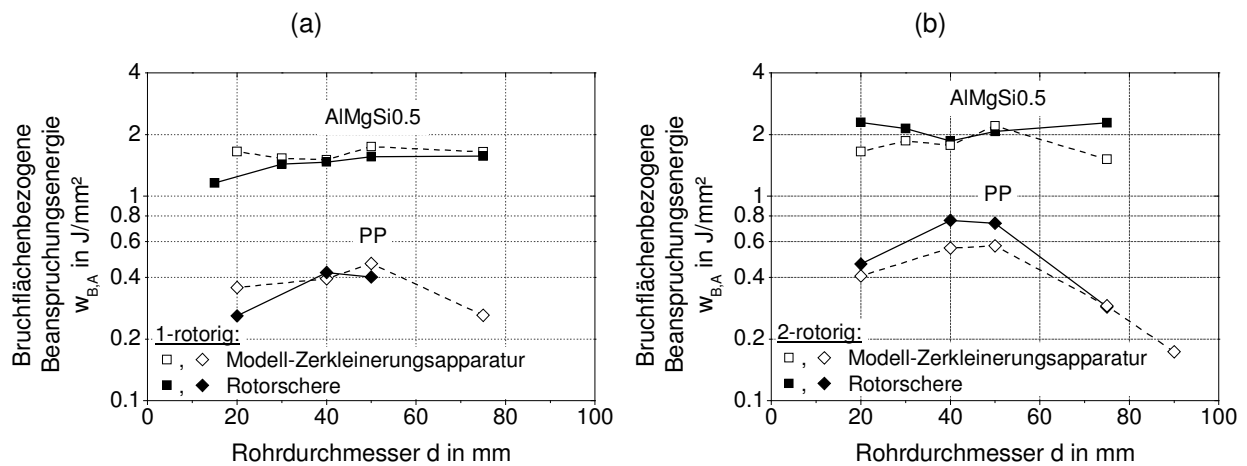


Bild A 12.3: Bruchflächenbezogene Beanspruchungsenergie für die Zerkleinerung von Aluminium- und Polypropylen-Rohren im Vergleich zu den Modell-Zerkleinerungsapparaturen; (a) Einrotorige Versuchseinrichtungen; (b) Zweirotorige Versuchseinrichtungen

Wanddicke 2 mm (AlMgSi0.5) bzw. 1,9 - 4,6 mm (PP); Beanspruchungsgeschwindigkeit 0,4 m/s;

Modell-Zerkleinerungsapparaturen: Rohrlänge 120 mm; vgl. Bild 5.24; Rotorschere: Rohrlänge 360 mm

Typische Bruchstücke des ein- und zweirotorigen Rotorreißers

1. Bruchstücke des einrotorigen Rotorreißers

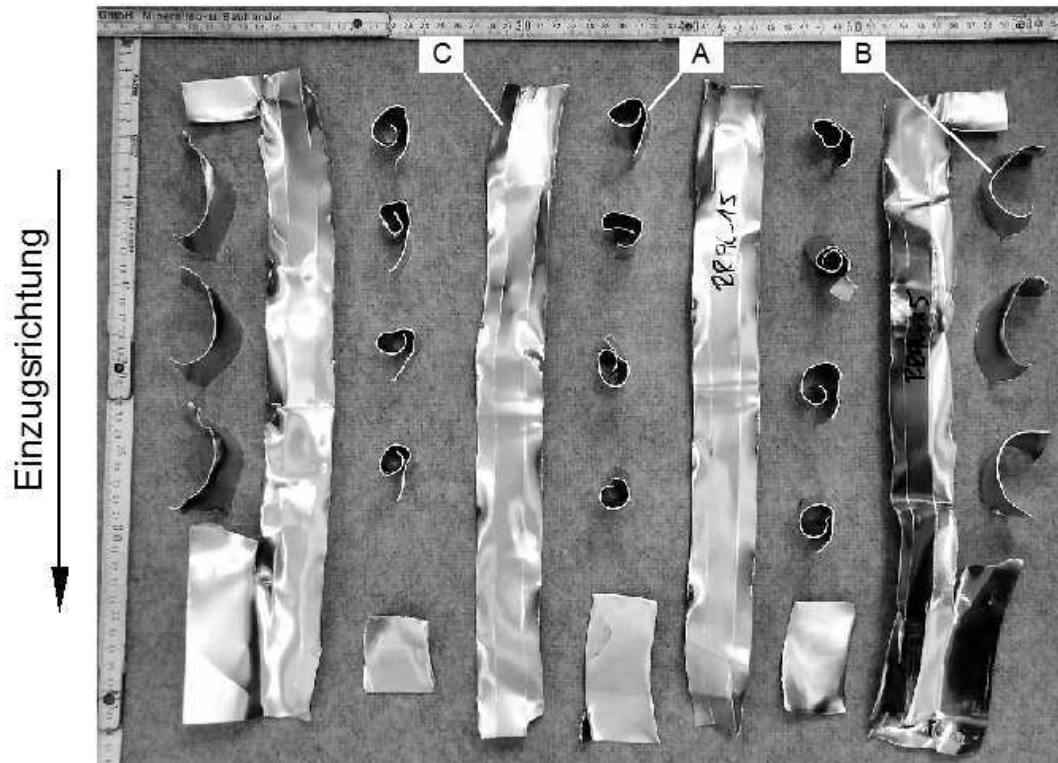


Bild A 13.1: Bruchstücke eines mit dem einrotorigen Rotorreißer zerkleinerten AlMg3-Bleches Wanddicke 1 mm; (A) unterhalb der Rotormesser eingerollte Stücke; (B) Randstücke; (C) unzerkleinerte Reststücke der Statorwerkzeuge

Tabelle A 13.1: Kennwerte der in Bild A 13.1 dargestellten Bruchstückgruppen

Bruchstückgruppe		Biegegrad B ^{*)}
(A)	eingerollte Stücke	0.63
(B)	Randstücke	0.31
(C)	Reststücke	0.13

^{*)} mittlere Werte



Bild A 13.2: Bruchstücke einer mit dem einrotorigen Rotorreißer zerkleinerten Polypropylen-Platte
Wanddicke 5 mm

2. Bruchstücke des zweirotorigen Rotorreißers



Bild A 13.3: Bruchstücke eines mit dem zweirotorigen Rotorreißer zerkleinerten AlMg3-Blech
Wanddicke 1 mm

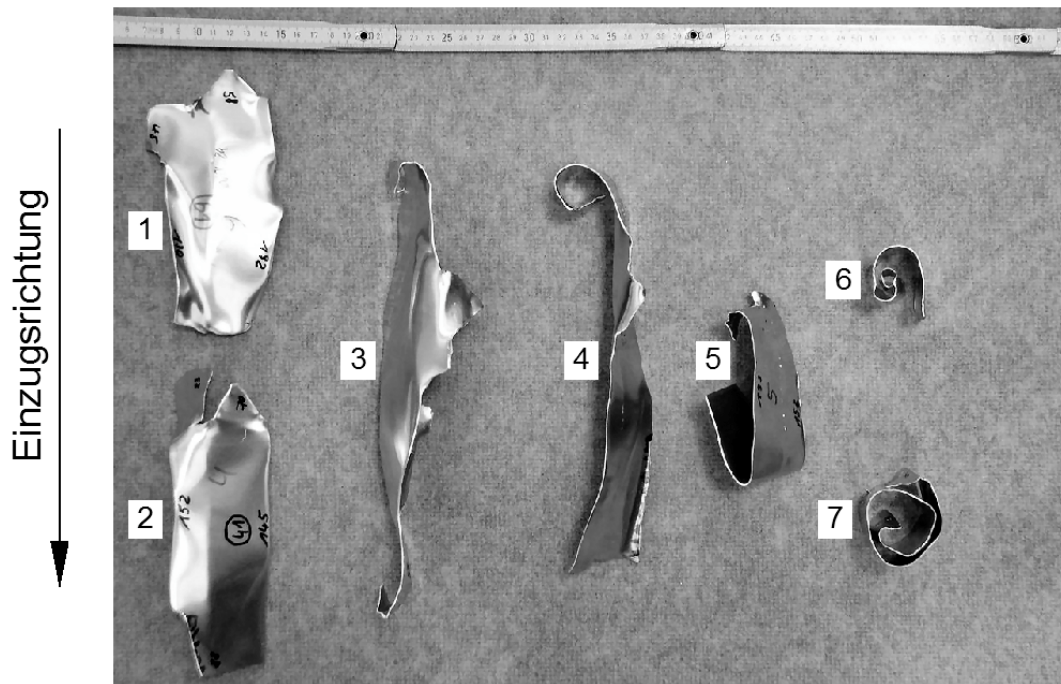


Bild A 13.4: An den Verbindungsstellen manuell aufgetrennte AlMg3-Bruchstücke
Wanddicke 1 mm

Tabelle A 13.2: Kennwerte der in Bild A 13.4 dargestellten Bruchstücke

Bruch- stück	Biegegrad B
1	0
2	0.14
3	0.18
4	0.26
5	0.41
6	0.50
7	0.79

3. Stückgrößenverteilung der Zerkleinerungsprodukte

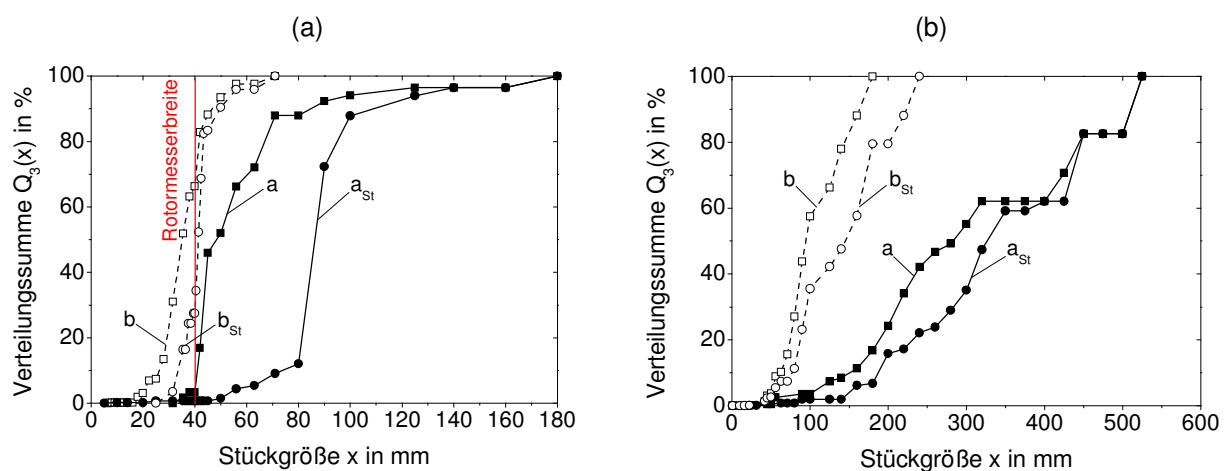


Bild A 13.5: Stückgrößenverteilungen der bei der Zerkleinerung mit dem ein- (a) und zweirotorigen (b) Rotorreißer entstandenen AlMg3-Bruchstücke im unverformten und verformten Zustand
Wanddicke 1 mm; Beanspruchungsgeschwindigkeit 0,4 m/s; einrotorig: Probekörper $l_{PK} \times b_{PK} = (400 \times 360) \text{ mm}^2$; ohne die Reststücke der Statorwerkzeuge; zweirotorig: Probekörper $l_{PK} \times b_{PK} = (500 \times 500) \text{ mm}^2$; Wellenabstand 300 mm; Auftrennung der leicht zusammenhängenden Stücke an den Verbindungsstellen