

---

# Bachelorarbeit

---

Herr  
Johannes Paul Schmid

**Untersuchungen zur  
Funktionsweise und  
Auslegung von  
Späneschreddern zur  
Zerkleinerung von  
Aluminiumspänen**

Mittweida, 2023

# **Bachelorarbeit**

---

## **Untersuchungen zur Funktionsweise und Auslegung von Späneschreddern zur Zerkleinerung von Aluminiumspänen**

Autor:

**Herr**

**Johannes Paul Schmid**

Studiengang:

**Maschinenbau (B.Eng)**

Seminargruppe:

**MB20f2-B**

Erstprüfer:

**Prof. Dr.-Ing. Ruben Bauer**

Zweitprüfer:

**Dipl.-Ing. Johannes Fischer**

Einreichung:

**Mittweida, 08.10.2023**

Verteidigung/Bewertung:

**Mittweida, 2023**

# Inhalt

<b>Inhalt .....</b>	<b>I</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>III</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>VIII</b>
<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>XI</b>
<b>1 Einleitung und Problemstellung.....</b>	<b>1</b>
<b>2 Stand der Technik .....</b>	<b>4</b>
2.1 <i>Späne</i> .....	4
2.1.1 Einteilung Fertigungsverfahren .....	4
2.1.2 Relevante Verfahren .....	4
2.1.3 Spanformen .....	9
2.1.4 Probleme beim Spanen von Aluminium.....	9
2.1.5 Ursachen des Spanbruches.....	10
2.2 <i>Bestehende Technik</i> .....	13
2.2.1 Arten der Zerkleinerung .....	13
2.2.2 Arten der Zerkleinerungsmaschinen.....	15
2.2.3 Zerkleinerungsprozess Schreddern .....	19
2.3 <i>Materialkreislauf</i> .....	23
<b>3 Analyse spanender Prozesse .....</b>	<b>24</b>
3.1 <i>Analyse der Späne</i> .....	24
3.1.1 Objektive Analyse der Späne aus dem Fräsprozess .....	26
3.1.2 Objektive Analyse der Späne aus dem Horizontalsägeprozess .....	27
3.1.3 Objektive Analyse der Späne aus dem Kreissägeprozess .....	29
3.1.4 Vergleich / Auswertung der Späne .....	30
3.2 <i>Berechnungen spanender Prozesse</i> .....	32
<b>4 Analyse Schneidenkonzepte .....</b>	<b>39</b>
4.1 <i>Schneidenkonzepte von Schreddern</i> .....	39
4.1.1 Axialspalt-Rotorscheren .....	39
4.1.2 Radialspalt-Rotorscheren.....	40
4.1.3 Rotorreißer .....	42

---

4.1.4	Variantenvergleich Rotorscheren / Rotorreißer .....	43
4.2	<i>Vergleich bestehende Schredder</i> .....	45
4.2.1	Axialspalt-Rotorscheren Zerkleinerer .....	45
4.2.2	Rotorreißer / Rotorscheren Zerkleinerer.....	47
4.2.3	Radialspalt-Rotorscheren Zerkleinerer .....	48
4.2.4	Variantenvergleich bestehender Schredder .....	50
<b>5</b>	<b>Auslegung eines Späneschredders</b> .....	<b>52</b>
5.1	<i>Ableitungen aus der Analyse der Späne</i> .....	52
5.2	<i>Berechnungen zur Größenauslegung</i> .....	55
5.3	<i>Festigkeitsberechnungen</i> .....	58
<b>6</b>	<b>Notwendigkeit / Einsatz eines Schredders</b> .....	<b>68</b>
6.1	<i>Gründe für den Einsatz eines Schredders</i> .....	68
6.2	<i>Gründe gegen den Einsatz eines Schredders</i> .....	68
<b>7</b>	<b>Fazit</b> .....	<b>70</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>71</b>
	<b>Anhang</b> .....	<b>73</b>
	<b>Selbstständigkeitserklärung</b> .....	<b>77</b>

## Abkürzungsverzeichnis

AW	Aluminum-wrought (Aluminium-Knetlegierungen)
B	Breite des Werkstücks
b	Breite des Werkzeugs
EU	Europäische Union
EN	Europäische Norm
H	Höhe des Werkstücks
h	Höhe des Werkzeugs
HS	Hauptschneide
kfz	kubisch-flächenzentriert
L	Länge des Werkstücks
l	Länge des Werkzeugs
NE	Nicht Eisen
NS	Nebenschneide
r	Übergangsradius
TCG	Triple-Chip-Grind
WSP	Wendeschneidplatten
$A$	Bruchdehnung
$s_A$	axialer Spalt
$s_R$	radialer Spalt
$z$	Zähnezahl
$v_c$	Schnittgeschwindigkeit
$v_f$	Vorschubgeschwindigkeit

$a_e$	Schnittbreite
$a_p$	Schnitttiefe
$s$	Blechdicke
$d$	Durchmesser
$d_A$	Außendurchmesser
$\sigma_{max}$	Maximalspannung
$\sigma_T$	Trennspannung
$\tau$	Torsionsspannung
$\tau_{krit}$	kritische Torsionsspannung
$\varepsilon_R$	Eckenradius
$\rho$	Dichte
$p$	Teilung
$n$	Drehzahl
$F_c$	Schnittkraft je Schneide
$A$	Spanungsquerschnitt
$k_c$	spezifische Schnittkraft
$z_E$	Anzahl der im Eingriff befindlichen Zähne
$k_v$	Korrekturfaktor der Schnittgeschwindigkeit
$k_{ver}$	Korrekturfaktor des Verschleißes
$k_{st}$	Korrekturfaktor der Spanstauchung
$k_{c1.1}$	Basiswert der spezifischen Schnittkraft
$h_m$	mittlere Spannungsdicke
$m_c$	Werkstoffkonstante
$Q$	Volumenstrom
$\dot{V}$	Förderwirkung des Zerkleinerers

---

$t$	Zeit
$\nu$	Sicherheitsfaktor
$\nu_D$	Sicherheitsfaktor gegen Dauerbruch
$d_R$	Durchmesser des Rotors
$n_R$	Drehzahl des Rotors
$R_{p\ 0,2}$	Dehngrenze
$R_{m\ max}$	maximale Zugfestigkeit
$\tau_{aB\ max}$	maximale Scherfestigkeit
$M_N$	Nennmoment
$M_t$	Torsionsmoment
$M_b$	Biegemoment
$M_v$	Vergleichsmoment
$\sigma_{Grenz}$	Grenzspannung
$\alpha_0$	Anstrengungsverhältnis
$F$	Schnittkraft
$S$	Scherfläche
$U$	Umfang der Schneide
$F_{A/B}$	Auflagekräfte A/B
$\sigma_{a\ vorh}/\tau_{a\ vorh}$	vorhandene Ausschlagsspannung
$\sigma_{zul}/\tau_{zul}$	zulässige Spannung
$W$	axiales Widerstandsmoment
$W_p$	polares Widerstandsmoment
$\sigma_{GW}/\tau_{GW}$	Gestaltwechselfestigkeit für Biegung / Torsion
$\beta_{kb}/\beta_{kt}$	Kerbwirkungszahl für Biegung/ Torsion
$b_1/b_2$	Oberflächenbeiwert 1/2

$l_{10h}$	nominelle Lebensdauer in h
$l_{10}$	nominelle Lebensdauer
$C$	dynamische Tragzahl
$P$	äquivalente Belastung
$X$	Radiallastfaktor
$Y$	Axiallastfaktor
$S_1$	Dauerbetrieb
$T_{KN}$	Nenndrehmoment der Kupplung
$T_N$	Nenndrehmoment
$T_{k max}$	maximale Stoßbelastung der Kupplung
$T_{LN}$	lastseitiges Nenndrehmoment
$T_{AN}$	antriebsseitiges Nenndrehmoment
$S_t$	Temperaturfaktor
$S_L$	Stoßfaktor der Lastseite
$S_A$	Stoßfaktor der Antriebsseite
$J_A$	Massenträgheitsmoment des Antriebs
$J_L$	Massenträgheitsmoment der Lastseite
$P$	Leistung
$P_N$	Nennleistung
$\alpha_R$	Freiwinkel
$\beta_R$	Keilwinkel
$\gamma_R$	Spanwinkel
$\delta_R$	Schnittwinkel
$\theta_R$	Öffnungswinkel
$\varphi$	Vorschubrichtungswinkel



---

mm	Millimeter
cm	Zentimeter
m	Meter
mm <sup>2</sup>	Quadratmillimeter
m <sup>2</sup>	Quadratmeter
mm <sup>3</sup>	Kubikmillimeter
m <sup>3</sup>	Kubikmeter
s	Sekunde
min	Minute
h	Stunde
%	Prozent
N	Newton
kW	Kilowatt
min <sup>-1</sup>	Umdrehungen (U)

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1 Einteilung Fertigungsverfahren [Q25] .....	4
Abbildung 2-2 Fräswerkzeuge [Q28] .....	5
Abbildung 2-3 Sägeblatt Wechselzahn [Q29] .....	6
Abbildung 2-4 Sägeblatt TCG [Q30] .....	6
Abbildung 2-5 Metall Schredder [Q31] .....	7
Abbildung 2-6 Papier Schredder [Q32] .....	7
Abbildung 2-7 Spanformen [Q14] .....	9
Abbildung 2-7 Rissöffnungsarten [Q14] .....	10
Abbildung 2-9 Versetzungen [Q14] .....	11
Abbildung 2-10 a) transkristalliner Riss b) interkristalliner Riss [Q12] .....	12
Abbildung 2-11 Backenbrecher [Q15] .....	16
Abbildung 2-12 Kegelschleifer [Q15] .....	16
Abbildung 2-13 Walzmühlen [Q15] .....	17
Abbildung 2-14 Prallschleifer [Q15] .....	17
Abbildung 2-15 Sturzmühle [Q15] .....	18
Abbildung 2-16 Schwingmühle [Q15] .....	18
Abbildung 2-17 Schneidmühle [Q15] .....	19
Abbildung 2-18 Spannungsverhältnisse der Schneidbeanspruchung [Q23] .....	20
Abbildung 2-19 Radial,-Axialspalt-Rotorschleifer [Q23] .....	21
Abbildung 2-20 Radial,-Axialspalt-Rotorreißer [Q23] .....	21

Abbildungsverzeichnis	IX
Abbildung 2-21 Recyclingkreislauf [Q10].....	23
Abbildung 3-1 Späne Fräse.....	26
Abbildung 3-2 Diagramm Spangrößen Fräse .....	26
Abbildung 3-3 Späne Horizontalsäge .....	27
Abbildung 3-4 Spanbündel Horizontalsäge.....	27
Abbildung 3-5 Diagramm Spangrößen Horizontalsäge .....	28
Abbildung 3-6 Späne Kreissäge .....	29
Abbildung 3-7 Diagramm Spangrößen Kreissäge .....	29
Abbildung 3-8 Diagramm Spanquerschnitt .....	33
Abbildung 3-9 Diagramm Schnittkräfte.....	33
Abbildung 3-10 Diagramm Zeitspanvolumen .....	34
Abbildung 3-11 Einflussgrößen beim Kreissägen .....	35
Abbildung 3-12 Einflussgrößen beim Horizontalsägen .....	36
Abbildung 3-13 Einflussgrößen beim Fräsen .....	36
Abbildung 4-1 Rotor.....	39
Abbildung 4-2 Messer.....	39
Abbildung 4-3 Normalebene HS.....	40
Abbildung 4-4 Normalebene NS .....	40
Abbildung 4-5 Schneidkrone V-Form .....	40
Abbildung 4-6 Normalebene Schneidkrone .....	41
Abbildung 4-7 Öffnungswinkel .....	41
Abbildung 4-8 Axialspalt-Rotorscheren-Zerkleinerer .....	45
Abbildung 4-9 Schneiden am Axialspalt-Rotor .....	46

---

Abbildung 4-10 Rotorreißer .....	47
Abbildung 4-11 Messer Rotorreißer .....	47
Abbildung 4-12 Radialspalt-Zerkleinerer .....	48
Abbildung 4-13 Beschriftung Radialspalt-Zerkleinerer .....	49
Abbildung 5-1 Ablaufdiagramm .....	52
Abbildung 5-2 Spanform 1) .....	53
Abbildung 5-3 Spanform 2).....	53
Abbildung 5-4 Diagramm Volumen Aufgabegut .....	55
Abbildung 5-5 Beispielwelle für Berechnungen .....	58
Abbildung 5-6 Querkraftverlauf Welle .....	62

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Unterscheidung nach Mohs-Härte.....	14
Tabelle 2 Unterscheidung Zerkleinerungsmaschinen.....	15
Tabelle 3 Schnittwerte spanende Prozesse.....	25
Tabelle 4 Vergleich Späne .....	30
Tabelle 5 Variantenvergleich Rotorscheren / Rotorreißer .....	43
Tabelle 6 Vergleich Schredder .....	50
Tabelle 7 Auswahl des Schneidenkonzepts.....	53

# 1 Einleitung und Problemstellung

Spanende Prozesse existieren in jedem metallverarbeitenden Unternehmen. Werkstoffe werden durch Fräsen, Sägen oder Drehautomaten zerkleinert und erzeugen Späne. Anschließend an die spanende Bearbeitung werden die Späne aufgefangen und nach EU-Richtlinien entsorgt bzw. in den ersten Recyclingkreislauf eingebracht. Im ersten Recyclingkreislauf werden die Späne in Pressen zu Briketts verarbeitet. Für eine effektive Funktionsweise der Brikettiermaschinen benötigt es brauchbare Späne mit guter Transportfähigkeit. Aufgrund verschlissener Werkzeuge, falscher Schnittparameter, schlecht spanbarer Werkstoffe oder Bedienungsfehlern sind ungünstige Späne jedoch keine Seltenheit. Die Folgen sind kostenintensive Reparaturen an den Brikettiermaschinen, Stillstand der Fertigungslinie und schlecht verdichtete Briketts. Die Lösungsvorschläge sind hierfür begrenzt. Eine Möglichkeit ist die Optimierung der spanenden Bearbeitungsverfahren. In einem Betrieb mit vielseitigem Werkstoffsortiment würden somit ständig wiederholende Rüstprozesse für verschiedene Werkzeuge die Folge sein. Aus diesem Grund werden häufig Universalwerkzeuge eingesetzt, welche keine optimalen Späne erzeugen. Die weitaus effektivere Variante ist der Einsatz eines Zerkleinerers.

Zerkleinerungsmaschinen für Späne werden zwischen der spanenden Bearbeitungsmaschine und der Brikettiermaschine eingesetzt. Aufgabe ist die definierte Zerkleinerung des Aufgabegutes der Bearbeitungsmaschine. Als Aufgabegut werden die Späne vor der Zerkleinerung durch einen Zerkleinerer bezeichnet. Das Gegenstück sind die Bruchgüter, welche nach der Zerkleinerung vorliegen. Die Herstellung eines Zerkleinerers benötigt eine ausgiebige Analyse des Aufgabegutes. Mit den umfangreichen Erkenntnissen über Spanformen, Spanvolumen und mehr lässt sich ein Konzept für die Konstruktion erstellen. Im Anschluss an die Konstruktion werden Festigkeitsberechnungen zur Dimensionierung verschiedener Bauteile durchgeführt. Diese und weitere Vorgänge zur Funktionsweise und Auslegung eines Aluminiumspäneschredders sind in der Fachliteratur wenig erforscht und benötigen weitere Aufklärung.

Das Ziel dieser Bachelorarbeit ist die Auslegung eines Aluminiumspäneschredders anhand einer bestehenden Arbeitsmaschine. Dabei gilt es, die erforderlichen Schritte von Entwicklung bis zum fertigen Zerkleinerer beispielhaft darzustellen und aufzuzeigen, dass die Herstellung einer eigenen konkurrenzfähigen Maschine möglich ist.

Der Aufbau der Arbeit ist an die Vorgehensweise zur Auslegung eines Zerkleinerers angelehnt. Nach dem Stand der aktuellen Technik sind im ersten Kapitel Grundlagen für verschieden Arten von Zerkleinerern und den ablaufenden Zerkleinerungsprozessen erläutert. Der Eigenanteil der Arbeit beginnt mit einer Analyse verschiedener spanender Prozesse. Im Anschluss werden drei verschiedene Schneidkonzepte vorgestellt, welche im darauffolgenden Kapitel anhand drei verschiedener Beispiele verglichen werden. Im letzten Kapitel wird der Ablauf zur Auslegung eines Zerkleinerers an einem Beispiel erläutert.

Die Durchführung des Praxismoduls sowie die Erarbeitung des Themas für die Bachelorarbeit wurden bei der Firma Bikar AEROSPACE durchgeführt, welche ein Tochterunternehmen der Bikar-Metalle GmbH ist. Dieses Unternehmen beschäftigt sich mit der Verarbeitung und dem Handel von verschiedenen Metallen und ist daher in einzelne Standorte, je nach Metallsorte, aufgeteilt. Das Portfolio umfasst „Aluminium, Kupfer, Messing, Rotguss, Bronzen, Sonderlegierungen und Kunststoffe und das weltweit“. Diese Werkstoffe werden als Halbzeuge, in Form von Platten, Blechen, Zuschnitten, Ronden, Ringen, Stangen, Rohren und Profilen, angeboten. [vgl. Q4]

## **Problemstellung**

Bei spanenden Prozessen entstehen Späne, welche aufgrund unterschiedlichster Anlieferungszustände des Werkstoffes, hinsichtlich Wärmebehandlung und Legierung, Verschleißzustände des Werkzeugs, unterschiedliche Schnittparameter und personeller Einflüsse verschiedene Spanformen besitzen. [Q14] Im Anschluss an die Zerspanung werden die Späne in Brikettiermaschinen zu Briketts verarbeitet. Ziel sind hoch verdichtete Späne für einen optimalen Weitertransport. Zwei

Probleme, welche die Effektivität des Verdichtungsprozesses beeinflussen, kommen hierbei zum Tragen. Zunächst ist die Dichte ungünstiger Späne im Vergleich zu brauchbaren Spänen sehr gering, wodurch die Bestückung des Verdichtungszyinders der Brikettiermaschine nicht optimal ausgenutzt werden kann. Ungünstige Späne charakterisieren sich durch langmaschige Verschlaufungen mit einer großen Spanoberfläche. Brauchbare Späne hingegen besitzen eine kompakte Geometrie mit kleiner Spanoberfläche. Durch langmaschige Verschlaufungen zwischen den Spänen entstehen Verstopfungen innerhalb der Brikettiermaschine, welche während des Verdichtungsprozesses zu Lunkern, Lufteinschlüssen im Brikett, führen. Je nach Charge entstehen somit Briketts mit einer maximalen Abweichung von 20 % zur optimalen Verdichtung. Die Folge sind sinkende Erträge für Schrottgüter und ein höheres Schrottvolumen auf dem Lagergelände. Aus diesem Grund ist es nachhaltig und rentabel, die Späne vor den Pressen zu zerkleinern, um diese zwei Probleme zu umgehen bzw. einzugrenzen.



## 2 Stand der Technik

### 2.1 Späne

#### 2.1.1 Einteilung Fertigungsverfahren

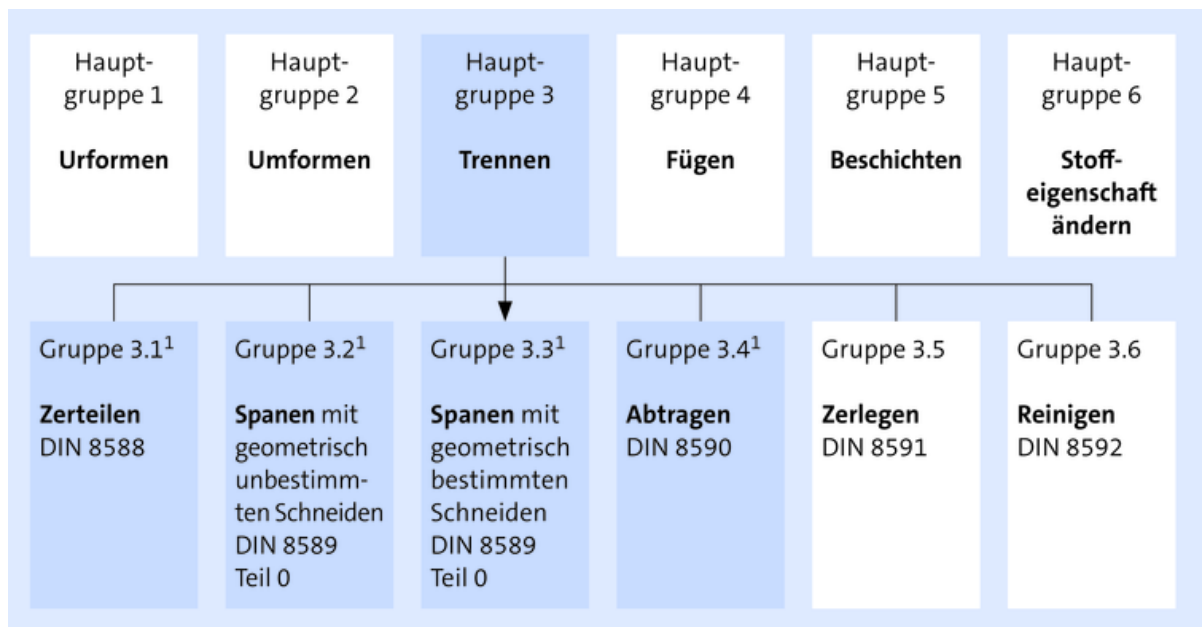


Abbildung 2-1 Einteilung Fertigungsverfahren [Q25]

#### 2.1.2 Relevante Verfahren

Die folgenden spanenden Verfahren sind in dieser Arbeit von Bedeutung, da sie für die Entstehung der Aufgabe- und Bruchgüter zuständig sind.

##### Fräsen

Fräsen ist ein Fertigungsverfahren mit geometrisch bestimmter Schneide, bei dem mithilfe einer rotatorischen Bewegung des Werkzeugs ein Spanabtrag erzielt wird. [vgl. Q17]

Fräsmaschinen werden grundlegend unterschieden in Konsol-, Bett und Sonderfräsmaschinen. Je nach Fräsmaschine sind Bearbeitungen in drei

Vorschubrichtung (X, Y, Z) möglich, wodurch komplexe Geometrien erzeugt werden können. Aufgrund hoher dynamischer Belastungen durch unregelmäßigen Spanabtrag und schwankenden Schnittkräften sind Fräsmaschinen optimal auf die Anforderungen abzustimmen. Dazu gehören die korrekten Schnittwerte sowie Werkzeuge für die Bearbeitung. Fräswerkzeuge werden unterteilt in Vollfräswerkzeuge und Trägerwerkzeuge. Zu den Vollfräswerkzeugen gehören Schafffräser in jeglicher Form und Größe zur Schlicht- und Schruppbearbeitung von Konturen, Flächen und weiteren Geometrien. Trägerwerkzeuge bestehen aus einem Träger, welcher in der Fräsmaschine befestigt wird. In den meisten Fällen versteht man unter Trägerwerkzeug einen Messerkopf. Dieser kann mit einer bestimmten Anzahl von Wendeschneidplatten bestückt werden.



**Abbildung 2-2 Fräswerkzeuge [Q28]**

Fräsprozesse kommen zum Einsatz, wenn hohe Oberflächengüten gefordert sind oder komplizierte Werkstücke aus einem Vollmaterial hergestellt werden.

## Sägen

Sägen ist ein Fertigungsverfahren mit geometrisch bestimmter Schneide zum Trennen von Werkstoffen mittels linearer oder rotatorischer Bewegung eines Sägeblattes- oder Bands. [vgl. Q17]

Bei Bandsägen besteht das Werkzeug aus einem in sich geschlossenem Sägeband, welches über Umlenkrollen in der Bearbeitungsmaschine geführt wird. Die Schnittgeschwindigkeit des Sägebands wird durch die Umfangsgeschwindigkeit der Antriebsrollen bestimmt. Die Vorschubgeschwindigkeit ist orthogonal zur Schnittgeschwindigkeit und kann von Werkzeug oder Werkstück ausgeführt werden. Bei Kreissägeprozessen besteht das Werkzeug aus einem Sägeblatt, welches durch die Rotation eine Schnittgeschwindigkeit erzeugt und mit einer definierter Zustellung und Vorschubgeschwindigkeit das Werkstück abfährt. [vgl. Q14] Die Zähne des Sägewerkzeugs gibt es in verschiedenen geometrischen Ausführungen für unterschiedliche Werkstoffe. Zwei Beispiele sind der Wechselzahn oder der Triple-Chip-Grind (TCG). Der Wechselzahn besteht aus zwei verschiedenen Zähnen, welche abwechselnd in entgegengesetzter Richtung versetzt sind. Die Zahnform eignet sich zum Trennen von Holz. Der TCG schneidet zuerst mit einem trapezförmigen Zahn, worauf ein flacher spitzer Zahn zum Räumen folgt. Die Zahnform eignet sich zum Trennen von NE-Metallen und Laminaten. [vgl. Q27]

Sägeprozesse kommen zum Einsatz, wenn das schnelle Trennen von Werkstücken gefordert ist.



Abbildung 2-3 Sägeblatt mit Wechselzahn [Q29]

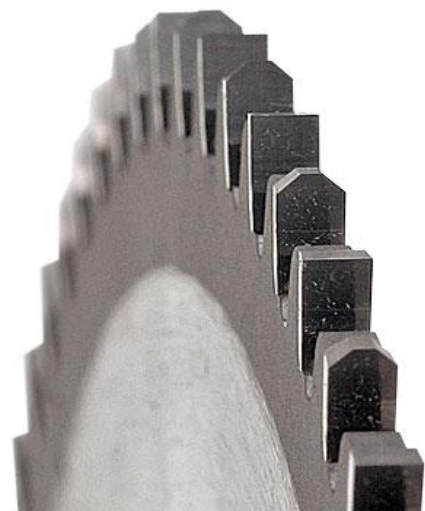


Abbildung 2-4 Sägeblatt TCG [Q30]

## Schreddern

Eine konkrete Definition des Prozesses Schreddern ist in der DIN nicht hinterlegt. Laut der Quelle [vgl. Q15] bezeichnet man Schredder als Zerkleinerungsmaschinen, welche zur übergeordneten Gruppe der Hammerbrecher gehören und zur Zerkleinerung von metallischen Sekundärstoffen geeignet sind. Diese Definition ist jedoch unvollständig, da die Zerkleinerung von nicht metallischen Sekundärstoffen, laut der Quelle [Q23], ebenfalls zum Aufgabengebiet eines Schredders gehört.

Bei Schreddern besteht das Werkzeug aus einem rotierenden Rotor und einem feststehenden oder beweglichen Amboss als Gegenstück. Durch diese Relativbewegung wird im Schneidspalt eine Zerkleinerung erzielt.



Abbildung 2-5 Metall Schredder [Q31]



Abbildung 2-6 Papierschredder [Q32]

### 2.1.3 Spanformen









		Spanraumzahl RZ	Spanform- klasse	Beurteilung
Bandspäne		$\geq 90$	1	<div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center; justify-content: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 10px;">ungünstig</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 10px;">gut</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">brauchbar</div> </div>
Wirrspäne		$\geq 90$	2	
Flachwendel- späne		$\geq 50$	3	
lange, zylindr. Wendelspäne		$\geq 50$	4	
Wendelspan- stücke		$\geq 25$	5	
Spiralspäne		$\geq 8$	6	
Spiralspan- stücke		$\geq 8$	7	
Bröckelspäne		$\geq 3$	8	

Abbildung 2-7 Spanformen [Q14]

Spanform bezeichnet die Form des Spans nach Verlassen des Werkzeugs. „Die Form ist abhängig von Art und Legierung des Werkstoffs, Schnittwerten, Werkzeug, Maschine, Bediener und äußeren Einflüssen.“ [Q14] Die Beurteilung der Spanformen erfolgt nach zwei Kriterien. Die erste Möglichkeit ist die Spanformtabelle, welche Späne anhand der Spanraumzahl in ungünstige, gute und brauchbare Späne unterteilt. Die zweite Möglichkeit ist nach der Transportfähigkeit der Späne. Kurz gebrochene Späne lassen sich gut transportieren und füllen einen Stauraum mit hoher Dichte aus. Lange Späne sind schlecht transportierbar und füllen einen Stauraum mit geringerer Dichte aus. Daher sind bei langen Spänen Aufbereitungen, durch zum Beispiel Zerkleinerungsmaschinen, zu empfehlen. Aus diesem Grund werden brauchbare und gut transportierfähige Späne angestrebt. [vgl. Q6]

### 2.1.4 Probleme beim Spanen von Aluminium

Eine typische Problematik bei der Zerspaltung von Aluminium-Werkstoffen ist die Neigung zu Aufbauschneiden, welche sich auf dem Schneidkeil des Werkzeuges aufbauen und die entstehende Oberfläche negativ beeinflussen. Je nach Legierung

ist es daher sinnvoll Aluminium mit hohen Schnittgeschwindigkeiten zu spanen, da Aufbauschneiden vorwiegend im unteren Drehzahlbereich entstehen. Genauere Eingrenzungen lassen sich hier durch Spanwinkel, Schmiermittel sowie Vorschub und Schnitttiefe vornehmen. Aufbauschneiden gehören zu der Art der Scheinspäne, welche „spanähnliche Gebilde an der Werkzeugfreifläche sind“ [Q1] und ebenfalls die Oberfläche stark beeinträchtigen. Hohe Oberflächengüten lassen sich durch Aluminiumwerkstoffe mit homogenem Gefüge und gesteigerter Festigkeit erzielen.

### 2.1.5 Ursachen des Spanbruches

Die Entstehung eines Bruches und die damit einhergehenden Vorgänge sind essenziell für die trennende Bearbeitung mit geometrisch bestimmter Schneide. Die Ursachen und Erscheinungsformen gestalten sich dabei jedoch sehr unterschiedlich. Grund dafür sind die „mikroskopischen Eigenschaften der Werkstoffe, welche wiederum von Material zu Material stark variieren.“ [Q12]

In diesem Kapitel gilt es zu erörtern, welche Vorgänge während der trennenden Bearbeitungen zum Bruch führen.

„Bruch ist die Trennung eines ursprünglichen ganzen Körpers in zwei oder mehrere Teile, wobei die Bindungen zwischen den Bausteinen des Materials gelöst werden.“ [Q12]

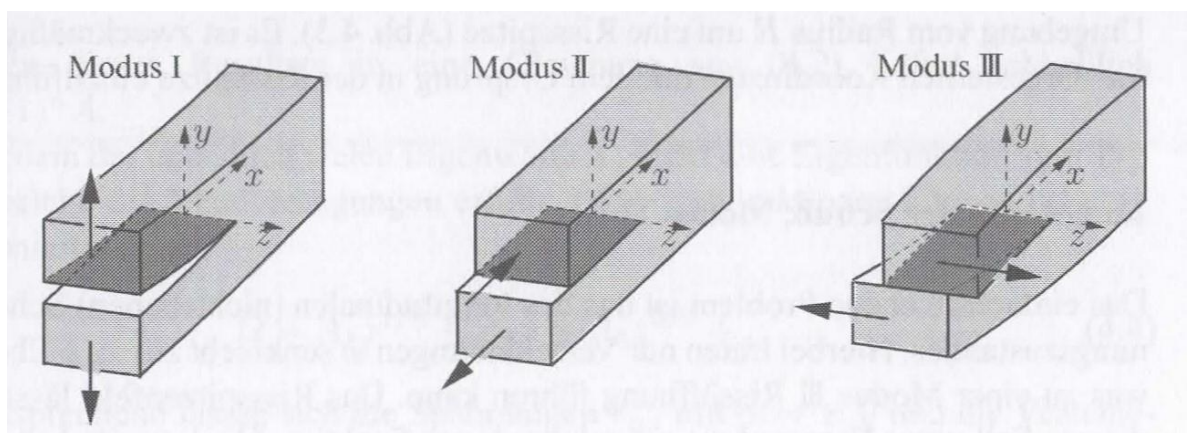
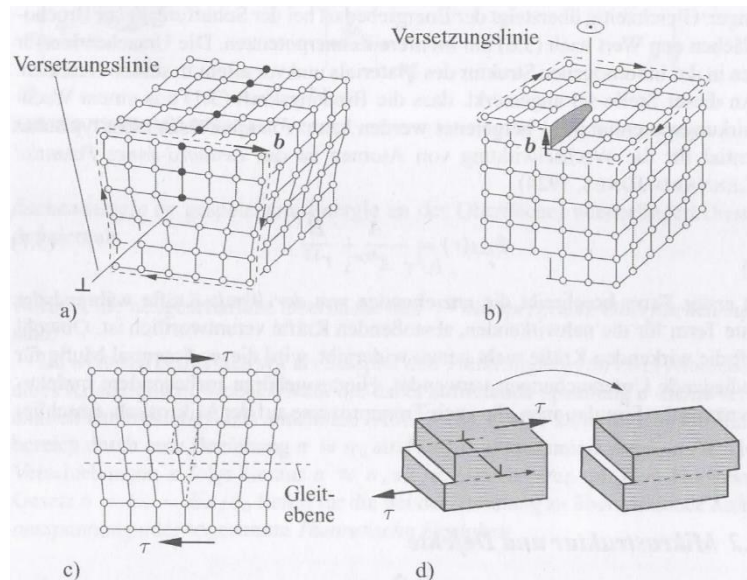


Abbildung 2-8 Rissöffnungsarten [Q12]

Der Bruch lässt sich in Gewaltbruch, Zeitstandbruch (Kriechbruch) und Schwingbruch (Dauerbruch) unterscheiden. Die beim Schreddern auftretenden Bruchmechanismen beschränken sich auf zügig ablaufende statische Belastungen, welche Voraussetzung für einen Gewaltbruch sind. Gewaltbruch ist eine Bruchart, welche auf Zug-, Druck-, Biege- und Torsionsbeanspruchung zurückzuführen ist. Dabei unterscheidet man in Spröbruch und Verformungsbruch. Spröbruch tritt ein, wenn die größte Normalspannung den Wert der Trennfestigkeit erreicht. ( $\sigma_{max} = \sigma_T$ ) Durch die Überschreitung der Trennfestigkeit kommt es zu örtlichen Versetzungsbewegungen und Anrissbildung zwischen den Gleitebenen und den Versetzungshindernissen. Mögliche Versetzungsbewegungen sind die Stufenversetzung a), c) und die Schraubensversetzung b), d). Merkmale eines spröden Bruches sind plötzliches Auftreten bei Überlast, Rissfortschritt mit Schallgeschwindigkeit und keine erkennbare plastische Verformung. Spröbruch speziell bei Aluminium ist eher selten,

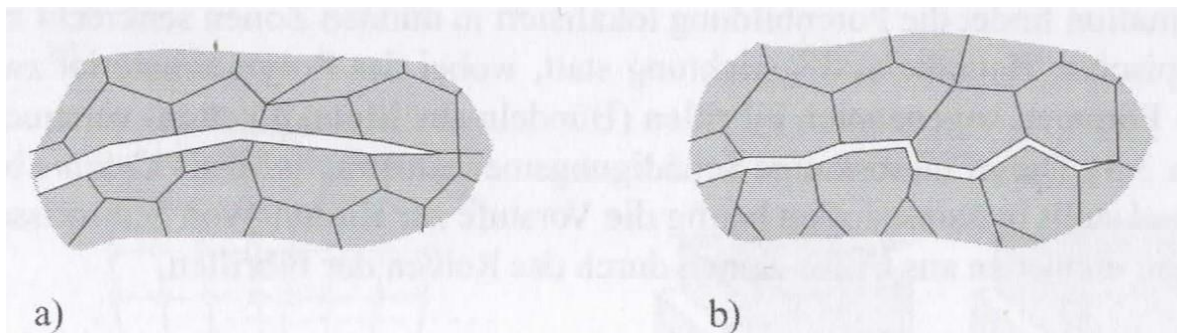


**Abbildung 2-9 Versetzungen [Q12]**

da Aluminium durch sein kfz-Gitter viele Gleitsysteme aufweist und somit für den Verformungsbruch prädestiniert ist. Verformungsbruch tritt ein, wenn die kritische Torsionsspannung überschritten wird. ( $\tau > \tau_{krit.}$ ) Durch die Überschreitung der Torsionsspannung kommt es zum Versagensbeginn durch plastisches Fließen. Die Anrissbildung entsteht an nicht metallischen Einflüssen, wobei Poren aufgeweitet werden. Der Bruch entsteht schlussendlich durch Abscheren der Stege zwischen den Poren. Charakterisiert wird der Verformungsbruch durch allmähliche Rissbildung. Die Einschnürung kündigt den Riss an und bei weiterer Spannungszunahme bricht das Material. [vgl. Q12]

Wichtig für das Erklären der Bruchursachen sind die Vorgänge auf der Ebene der Mikrostruktur. Metalle zählen zu polykristallinem Material, das aus Kristallen, vielen einzelnen Körnern, besteht. „Die einzelnen Kristalle haben anisotrope

Eigenschaften, dessen Orientierung sich in Ebene und Achse von Korn zu Korn ändert.“ [Q12] Durch diese Fehler im Materialaufbau besitzt ein Werkstoff von Natur aus Gitterbaufehler, welche die Versetzungsbewegungen behindern, die Festigkeit steigern und den Widerstand gegen plastische Verformung begünstigen. „Durch den damit verbundenen Versetzungstau wachsen um die Partikel an den Korngrenzen Hohlräume. Mit zunehmender plastischer Deformation vergrößern sich die Löcher durch mikroplastisches Fließen und führen schlussendlich zur Separation und Bruch.“ [Q12] Die mikroskopischen Vorgänge bilden die Grundlage für die makroskopischen Aspekte, welche letztendlich die Rissausbreitung charakterisieren. Die Rissausbreitung kann entweder stabil oder instabil ablaufen. „Man nennt Risswachstum stabil, wenn für eine Rissvergrößerung eine Erhöhung der äußeren Belastung erforderlich ist. Im Gegensatz dazu ist ein Risswachstum instabil, wenn sich ein Riss ohne äußere Krafteinwirkung weiter ausbreitet.“ Der Riss kann dabei in transkristallin oder interkristallin, also durch die Kristallstruktur oder entlang der Kristallstruktur, unterschieden werden. [vgl. Q13]



**Abbildung 2-10 a) transkristalliner Riss b) interkristalliner Riss [Q12]**

Für das trennende Verfahren des Schredderns ist der Ablauf eines Gewaltbruches von Bedeutung, da gezielt Materialien zerkleinert werden sollen. Die mikroskopischen und makroskopischen Prozesse finden in einem Schredder, zwischen den einzelnen Messern im Schneidspalt, statt. Die vorliegende Art des Gewaltbruches ist dabei durch das zu schreddernde Material und die Art des Schredders festzulegen. Bei sehr harten und spröden Werkstoffen findet primär ein Sprödbbruch und bei weichen und zähen Werkstoffen ein Verformungsbruch statt. Im Falle des Aluminiums findet ein Verformungsbruch durch Abscheren statt. [vgl. Q12]



## 2.2 Bestehende Technik

Zerkleinerungsmaschinen sind in Betrieben zur Mineralverarbeitung, in Brikettfabriken, chemischer Industrie, Nahrungsgüter und Sekundärrohstoffwirtschaft für die Herstellung erster Recyclingstufen von Bedeutung. Die Arten der Zerkleinerungsvorgänge werden durch physikalische, chemische und mechanische Eigenschaften sowie die gewünschten Durchsätze, Dispersitätsgrade und Korngrößenzusammensetzungen des Zerkleinerungsgutes festgelegt. Trotz weitreichender Bedeutung in der Wirtschaft existiert nur wenig Fachliteratur zur Berechnung, Konstruktion und technischer Realisierung solcher Maschinen. Vorhandene Fachliteratur zur Gestaltung von Zerkleinerungsmaschinen bezieht sich weitestgehend auf empirisch ermittelte Grundlagen anhand bestehender Maschinen. Das technische Know-how für eine effektive Gestaltung über empirische Grundlagen hinweg liegt in den Händen etablierter Firmen. Mithilfe mathematischer Modellierung von Zerkleinerungsprozessen und der entstehenden Kräfte ist es jedoch möglich, Zerkleinerungsmaschinen mit hoher Zuverlässigkeit, geringem Materialeinsatz und guter Energiebilanz zu entwickeln. Anhand dieser Modellierungen lassen sich Formeln zur Berechnung ableiten, welche neben den empirischen Grundlagen weitere Ansätze zur Gestaltung liefern. [vgl. Q15]

### 2.2.1 Arten der Zerkleinerung

Zerkleinerung definiert einen Vorgang, bei dem Feststoffe mit unterschiedlichen Eigenschaften und Ausgangsgrößen bis auf bestimmte Dispersitätsgrade zerkleinert werden. [vgl. Q15]

Zerkleinerungsprozesse lassen sich einteilen nach stofflicher Widerstandsfähigkeit der Zerkleinerungsprodukte, der Beanspruchungsart und nach Korngröße des zerkleinerten Produktes.

Die stoffliche Widerstandsfähigkeit kann unter Berücksichtigung der mechanischen Beanspruchung in Hart-, -Mittelhart- und Weichzerkleinerung unterschieden werden. Die Unterteilung erfolgt durch die Mohs-Härte, welche häufig bei Verschleißuntersuchungen angewendet wird. Mohs-Härte ist ein Härtewert, welcher aus dem

Vergleich mehrerer Werkstoffzustände hervorgeht. Grundlage für den Härtewert ist die Erkenntnis, dass harte Stoffe weiche Stoffe ritzen. In der folgenden Tabelle sind einige Beispiele aufgeführt.

**Tabelle 1 Unterscheidung nach Mohs-Härte**

	Hart-Zerkleinerung	Mittelhart-Zerkleinerung	Weich-Zerkleinerung
Mohs-Härte	6... 10	2... 5	1... 2
Beispiele	Feldspat, Quarz, Topas, Korund, Diamant	Salze, Kohle, Stahl (4-5), Aluminium (ca. 2,75)	Kalk, Gips, Faserstoffe

Die Beanspruchungsart lässt sich in Druck, Schlag oder Prall, Scherung, Schneiden oder Sägen bzw. durch die Kombination einzelner Beanspruchungsmechanismen charakterisieren. Die Beanspruchungsart bestimmt in den meisten Fällen die Art der Zerkleinerungsmaschine, da sich der konstruktive Aufbau stark zwischen den einzelnen Beanspruchungsmechanismen unterscheidet.

Die Unterteilung in Korngrößen ist nicht genormt und erfolgt laut der Quelle [Q15] in die folgenden vier Arten.

- Grobzerkleinerung  $d_A > 100$  mm
- Mittelzerkleinerung  $5 < d_A < 100$  mm
- Feinzerkleinerung  $0,1 < d_A < 5$  mm
- Feinstzerkleinerung  $d_A < 0,1$  mm

Die gängigste Unterteilung der Zerkleinerungsprozesse ist in die verschiedenen Beanspruchungsarten. In der folgenden Tabelle ist eine Einteilung von Zerkleinerungsmaschinen nach der Quelle [Q15] dargestellt und kurz erläutert. [vgl. Q15]

**Tabelle 2 Unterscheidung Zerkleinerungsmaschinen**

Dominierende Beanspruchungsart	Konstruktives Grundprinzip	Maschinengruppe
Druck	Kraftwirkung an Oberflächenpaaren	Backen,- Kegel,- Walzenbrecher, Walzmühlen
Schlag / Prall	Kraftübertragung durch rotierende Bauteile mit hoher Geschwindigkeit	Hammerbecher und -mühlen, Prallbrecher und -mühlen, Feinprall,-Schlägermühlen
Scherung	Krafteinwirkung durch rotierende oder schwingende freibewegliche Mahlkörper	Sturz,- Schwingmühlen
Schneiden / Sägen	Beanspruchung durch Messer oder sägeförmige Bauteile	Schneidmühlen, Sägen

### 2.2.2 Arten der Zerkleinerungsmaschinen

Je nach Anwendungszweck und Beanspruchungsart gibt es verschiedene Arten von Zerkleinerungsmaschinen. In dem folgenden Abschnitt wird ein grober Überblick über verschiedene Zerkleinerungsmaschinen gegeben. Die Unterteilung erfolgt nach der vorherigen Tabelle.

Beginnend mit der dominierenden Beanspruchungsart Druck lassen sich Backen,- Kegel,- Walzenbrecher und Walzmühlen nennen.

Backenbrecher bestehen aus mindestens zwei Brechbacken, wobei mindestens eine pendelnd befestigt ist und die weitere fest angeschraubt. Durch eine Art Exzenterprinzip kann die pendelnde Brechbacke sehr hohe Druckkräfte aufbringen und das Bruchgut zerkleinern. In der Regel ist der Aufbau so gestaltet, dass sich der Querschnitt des Brechraums in Richtung der Schwerkraft verjüngt, um somit eine definierte Bruchgutgröße am Ausgang einzustellen. Nachteil ist die nicht kontinuierliche Zerkleinerung, da die Brechbacke nur eine Arbeitsrichtung besitzt. Das Einsatzgebiet umfasst die Vor- und Nachzerkleinerung von mittelharten bis harten Erzen, Gesteinen und ähnlichen Materialien. [vgl. Q15]

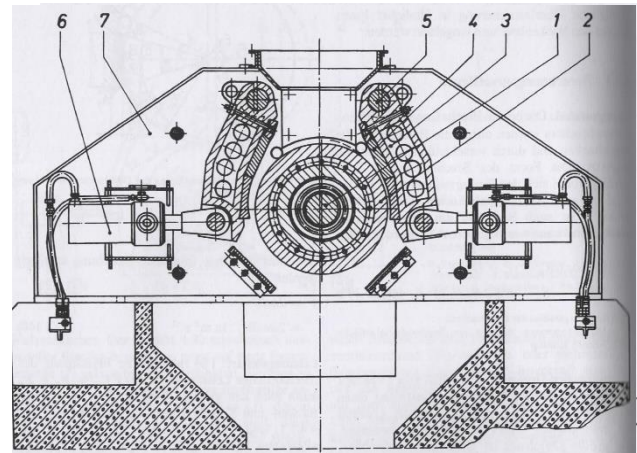


Abbildung 2-11 Backenbrecher [Q15]

Kegelbrecher funktionieren ähnlich wie Backenbrecher, mit dem Unterschied eines feststehenden Mantels, in welchem ein kreisförmiger Brechkegel die Zerkleinerungsarbeit übernimmt. Der Brechkegel wird in der Regel durch eine exzentrische Lagerung auf der Ober- und Unterseite des Mantels angetrieben. Durch diesen Aufbau ist der Brechkegel dauerhaft im Arbeitseinsatz, wodurch die Effektivität einen großen Vorteil dieses Konzeptes darstellt. Während der Kegel auf einer Mantelseite zerkleinert, rutscht das Bruchgut auf der gegenüberliegenden Mantelseite nach oder verlässt den Kegelbrecher. Das Einsatzgebiet umfasst die Vor- und Nachzerkleinerung von harten bis mittelharten Materialien. [vgl. Q15]

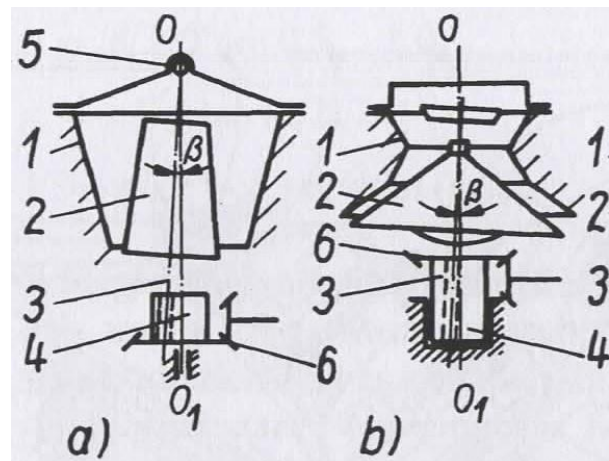


Abbildung 2-12 Kegelbrecher [Q15]

Walzenbrecher zerkleinern ihr Bruchgut zwischen gegenläufigen Walzen oder zwischen Walze und einer geraden oder gewölbten Arbeitsfläche. Die Walzen sind je

nach Anwendungszweck mit verschiedenen Oberflächengeometrien ausgestattet. Als Schutzvorrichtung bzw. zum Einstellen der Zerkleinerung lassen sich die Walzen im Achsabstand verstellen oder sind unter Federspannung gelagert. Das Einsatzgebiet umfasst hauptsächlich die Nach-, Fein- und Vorzerkleinerung von weichen, harten und mittelharten Materialien. [vgl. Q15]

Walzmühlen zerkleinern ihr Mahlgut zwischen Mahlkörpern und Mahlbahnen. Die Mahlkörper können dabei in senkrechter, waagerechter, zylindrischer, kegelförmiger oder ebener Ausrichtung zur Mahlbahn stehen. Das Einsatzgebiet erstreckt sich über die Fein- und Feinstzerkleinerung von weichen bis mittelharten Materialien. Häufig zerkleinerte Materialien sind Baustoffe wie Kalkstein, Kohle, Feldspat und andere. [vgl. Q15]

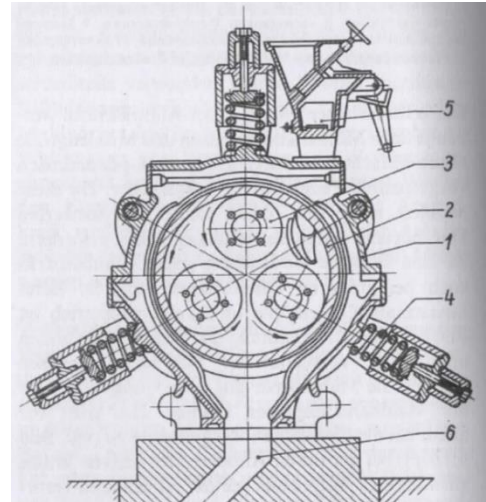


Abbildung 2-13 Walzmühlen [Q15]

Zur zweiten Beanspruchungsart zählen Hammerbrecher, Prallbrecher, Schläger- und Feinprallmühlen und Sturzmühlen. Hammerbrecher bilden die übergeordnete Gruppe der Schredder und werden im folgenden Kapitel erläutert.

Prallbrecher-Mühlen zerkleinern ihr Bruchgut mithilfe der Massenträgheit des Aufgabegutes. Das Aufgabegut fällt in den Einfülltrichter und trifft auf einen mit hoher Geschwindigkeit rotierenden Rotor. Durch die Massenträgheit der Partikel wird die kinetische Energie sofort in Verformungsenergie umgewandelt und das Bruchgut zerkleinert. Dieser Prozess findet im Zerkleinerer so oft statt, bis das Material klein genug ist, um den Austritt zu passieren. Beruhend auf der Prallbeanspruchung werden „Prallbrecher-Mühlen vorrangig zur Zerkleinerung spröder sowie weicher bis mittelharter Materialien wie Kohle, Gips, Kalkstein“ [Q15] und mehr eingesetzt.

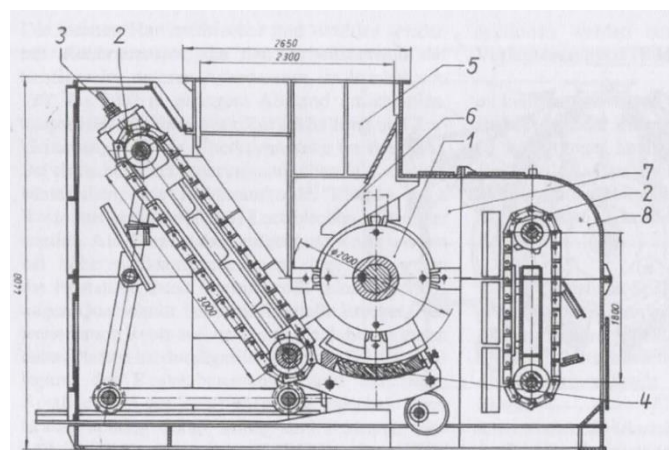


Abbildung 2-14 Prallbrecher [Q15]

Ähnlich den Prallbrecher-Mühlen sind die Schläger- und Feinprallmühlen. Der konstruktive Aufbau dieser Zerkleinerungsmaschinen ähnelt den oben genannten und weist nur geringe Unterschiede auf. Diese wären Größe der Rotoren, Anordnung der Schläger und Größe der entstehenden Güter.

Zur Scherbeanspruchung gehören die Sturzmühlen und Schwingmühlen. Sturzmühlen bestehen aus einem horizontal gelagerten Arbeitsraum, welcher um einen

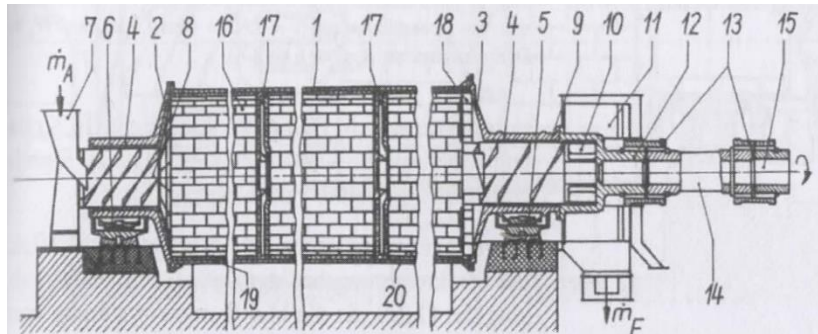


Abbildung 2-15 Sturzmühle [Q15]

Drehpunkt rotiert. Durch die Rotation des Arbeitsraums und einer bereits im Arbeitsraum befindlichen Mahlkörperfüllung wird das zugeführte Mahlgut zerkleinert. Zum Einsatz kommen Mahlkörper aus verschleißfesten, gehärteten Metallkugeln. Das Einsatzgebiet der Sturzmühlen umfasst die Trocken- und Nassmahlung mittelharter bis harter Materialien. Dazu gehört zum Beispiel die Aufbereitung von Mineralien. [vgl. Q15]

Eine weitere Zerkleinerungsmaschine der Scherbeanspruchung ist die Schwingmühle. Schwingmühlen bestehen ähnlich der Sturzmühlen aus einem oder mehreren Mahlräumen, welche horizontal, vertikal oder ringförmig angeordnet sind. Im Gegensatz zu den Sturzmühlen ist die Lagerung durch Federn schwingfähig abgestützt. Angetrieben werden Schwingmühlen mittels kreisschwingender Bewegungen über einen Antriebsmotor.

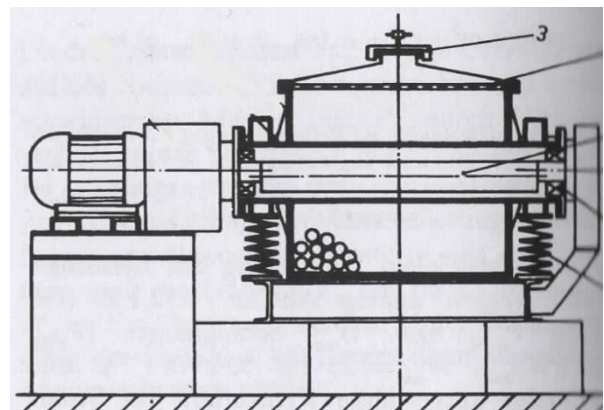


Abbildung 2-16 Schwingmühle [Q15]

Als Mahlkörper werden Kugeln und Stäbe eingesetzt. Das Einsatzgebiet umfasst die Trocken- und Nasszerkleinerung von mittelharten bis harten Materialien. [vgl. Q15]

Zur Beanspruchungsart „Schneiden“ gehören die Schneidmühlen. Schneidmühlen bestehen aus einem Rotor mit Schneidelementen, welcher horizontal oder vertikal um eine Rotationsachse rotiert. Unterteilen lassen sich diese in Strang- und Haufwerkschneider. Bei Strangschneidern wird das Aufgabegut mit Förderbändern als endlos Strang dem Rotor zugeführt und geschnitten.

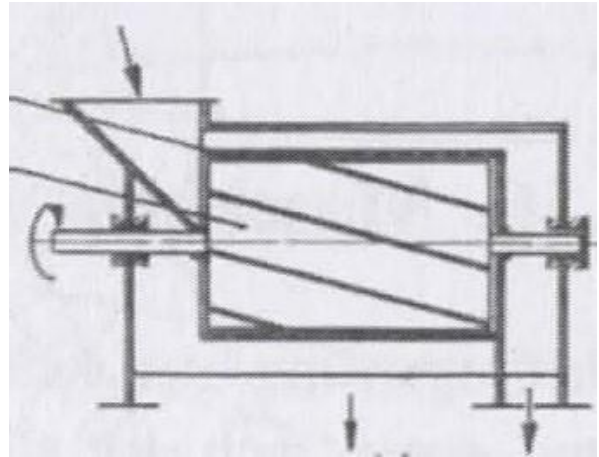


Abbildung 2-17 Schneidmühle [Q15]

Bei Haufwerkschneidern wird das Aufgabegut einem Aufgabeschacht zugeführt und in stückiges Gut geschnitten. Diese Art von Zerkleinerungsmaschinen sind häufig mit einem Austragsrost ausgestattet, um die Größe der entstehenden Partikel einzuschränken. [vgl. Q15]

### 2.2.3 Zerkleinerungsprozess Schreddern

„[Schredder] bestehen aus einem mit Panzerplatten ausgekleidetem Gehäuse [(Amboss)] und mindestens einem Schläger [(Rotor)] als Brecher.“ [Q15] In der Regel ist konzentrisch unterhalb des Rotors ein Gitter angeordnet, um zu verhindern, dass geringfügig zerkleinertes Material durchfällt. In wenigen Fällen wird bewusst auf dieses Gitter verzichtet, wenn zum Beispiel die obere Gutgröße nicht begrenzt ist oder es aufgrund geometrischer Eigenschaften des Bruchgutes zu Materialstau kommen kann. Auf dem Rotor sitzen in bestimmten Abständen angeordnete Schläger, welche das Bruchgut primär durch Schlag- und Prallbeanspruchung und sekundär durch Schneiden, Abscheren und Brechen zerkleinern. Das Bruchgut verbleibt so lange im Arbeitsraum bis es durch die Schläger klein genug ist, um das Gitter zu passieren. Hammerbrecher werden zur Zerkleinerung von weichen bis mittelhartem, sowie zäher als auch feuchter Stoffe eingesetzt. Dazu gehören Kohle, Kalk, Gips und weitere Materialien. [vgl. Q15]

Schredder zerkleinern ihr Aufgabegut zwischen mindestens einem Rotor und Stator bzw. Rotor und Rotor. Im Gegensatz zu allgemeinen Hammerbrechern findet die

Zerkleinerung jedoch nicht primär durch Schlag- und Prallbeanspruchung, sondern durch Scherbeanspruchung statt. Dennoch gehören Schredder, aufgrund baulicher Ähnlichkeiten, zur Untergruppe der Hammerbrecher. Schredder lassen sich nochmals untergliedern in Rotorscheren und Rotorreißer. Diese Konzepte unterscheiden sich in der Beanspruchungsart. Bei Rotorscheren wird mithilfe einer Scherbeanspruchung das Material in einem radialen oder axialen Spalt zerkleinert. Bei Rotorreißern hingegen findet eine Zusammenwirkung aus Scher-, Prall- und Zugbeanspruchung in radialen und axialen Spalt statt. [vgl. Q15]

Im folgenden Bild sind die „Spannungsverhältnisse der Schneidbeanspruchung“ dargestellt. Diese Winkel bilden die Grundlage jedes Schneidkonzepts mit geometrisch bestimmter Schneide.

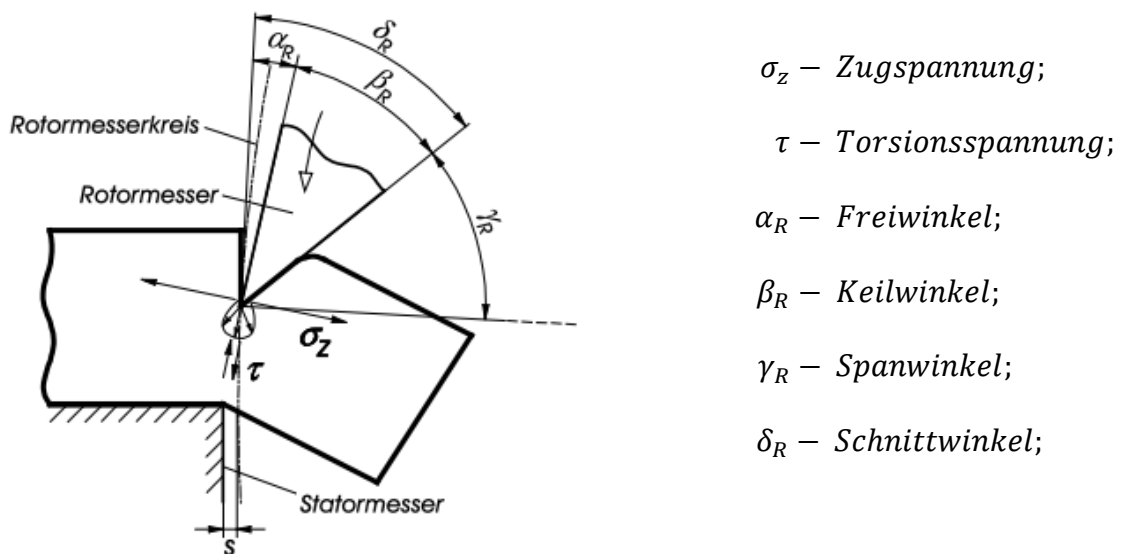


Abbildung 2-18 Spannungsverhältnisse der Schneidbeanspruchung [Q23]

Schneidenkonzepte bei Schreddern unterscheiden sich maßgebend durch den Schneidspalt in welchem die primäre und sekundäre Zerkleinerung stattfindet. Demzufolge ist bei Rotorscheren eine Unterscheidung in Axialspalt- und Radialspalt-Zerkleinerer vorzunehmen. Bei Rotorreißern findet ebenfalls eine Unterteilung in Axialspalt- und Radialspalt-Zerkleinerer statt. Auf den folgenden Bildern sind die gängigsten Arten von Radial- und Axialspalt-Rotorscheren, sowie von Rotorreißern, dargestellt.



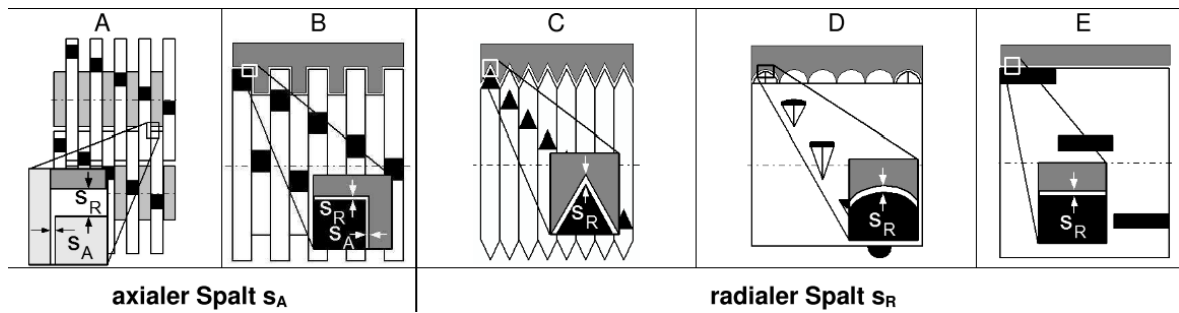


Abbildung 2-19 Radial-, Axialspalt-Rotorscheren [Q23]

A- zwei / drei / vierrotorig; B- einrotorig; C- einrotorig; D- zweirotorig; E- einrotorig

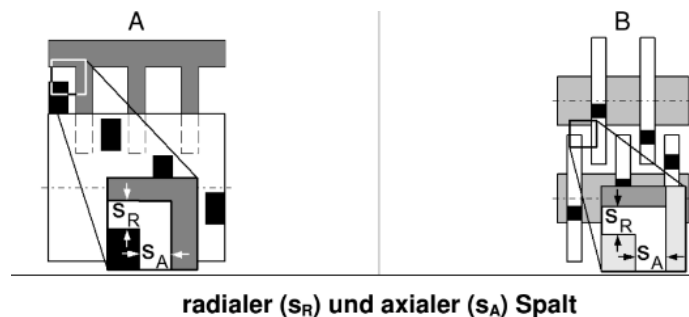


Abbildung 2-20 Radial-, Axialspalt-Rotorreißer [Q23]

A- einrotorig; B- zwei / dreierotorig

Ursprünglich wurden Schredder vorwiegend zur Zerkleinerung von Automobilschrott eingesetzt. In den vergangenen Jahrzehnten hat sich dieses Einsatzgebiet wesentlich verändert. Somit werden Schredder gegenwärtig zum Beispiel für die Zerkleinerung von Leichtmetallschrott eingesetzt. Dazu zählen vorwiegend dünnwandige, meist sperrige Schrottbestandteile zum Beispiel aus ausgemusterten Fahrzeugen und Haushaltsgeräten, Aluminiumschrott oder Elektroschrott.

Ähnlich wie bei Hammerbrechern wird das zugeführte Bruchgut innerhalb des Schredders durch die Relativbewegung von Rotor und Stator bzw. Rotor und Rotor zerkleinert. Die Anzahl der verbauten Rotoren und Statoren ist abhängig von Durchsatz und Art des Bruchgutes. Die Rotoren des Schredders bestehen ähnlich der Hammerbrecher aus Scher- bzw. Schlagelementen, welche konzentrisch um die Rotorwelle in bestimmten Winkeln zueinander angeordnet sind. Abhängig von der Art des Schredders werden zusätzlich Gitterroste verbaut. Diese können unterhalb oder oberhalb der horizontalen Rotoren angeordnet sein. Bei vertikalen Rotoren

wird in der Regel kein Gitterrost verbaut. Bei horizontalen Rotoren mit oberhalb angeordnetem Rost werden die Bruchstücke nach der Zerkleinerung durch Amboss und Schlagelement, in tangentialer Richtung zum Schlagkreis nach oben geschleudert. Dort treffen sie auf das Gitter, welches sie entweder passieren oder erneut in den Arbeitsraum zurückfallen lässt. Bei Schredder mit unterhalb des Rotors angeordnetem Rost werden die Bruchstücke tangential zum Schlagkreis nach unten geschleudert, wo sie ebenfalls passieren oder erneut vom Rotor aufgegriffen und zerkleinert werden. Neben dem Ausritt der zerkleinerten Bruchstücke ist die Zuführung der zu schreddernden Güter ebenfalls zu betrachten. Die einfachste Art der Zuführung ist mithilfe der Schwerkraft. Bei langen Bruchgütern wie zum Beispiel Spänen ist dies kein Problem, da die Späne auf die Messer fallen und über deren Geometrie in den Schredder gezogen werden. Im Falle großer, kantearmer Güter greifen die Messer schlechter in das Gut, wodurch eine externe Zuführeinrichtung sinnvoll ist. Realisiert werden kann diese über Förderbänder oder Kettenantriebe, welche mit einem definierten Druck auf die Zufühhüter drücken und diese somit in den Schredder befördern.

Neben den Rotoren des Schredders hat auch der Amboss einen erheblichen Einfluss auf das Ergebnis der zerkleinerten Bruchgüter und muss sorgfältig bei der konstruktiven Gestaltung betrachtet werden. Zudem muss die Festigkeit betrachtet werden, da der Amboss eines der höchstbelasteten Teile darstellt. [vgl. Q23]

## 2.3 Materialkreislauf

Materialkreisläufe sind von Bedeutung, wenn technisch nützliche Werkstoffe mit Ressourcenknappheit, zunehmender Umweltbelastung oder schlechter Energiebilanzen in Verbindung gebracht werden. Durch Recyclingprozesse ist ein ressourcenschonender, umweltfreundlicher und energetisch effektiver Umgang mit diesen

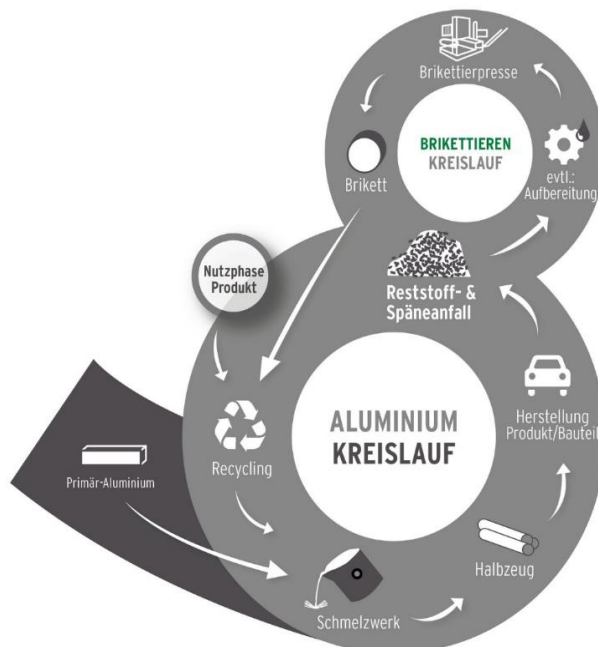


Abbildung 2-21 Recyclingkreislauf [Q10]

Werkstoffen möglich. Laut der Quelle [Q24] beträgt der Energiebedarf des Recyclings nur 5 % von der Neuproduktion des Primäraluminiums. Diese Energieeinsparung, in Verbindung mit dem umweltfreundlichen und ressourcenschonenden Umgang, wird als Nachhaltigkeit bezeichnet.

Der Materialkreislauf des Aluminiums ist ein normaler Ressourcenkreislauf, wie auf dem folgenden Bild dargestellt. Die Herstellung des Primäraluminiums erfolgt durch die Schmelz-

flusselektrolyse von Aluminiumoxid. Besonders ist der zusätzliche Materialkreislauf für die Brikettierung der entstehenden Späne. Dieser Kreislauf schließt die Lücke zwischen losen Spänen und recyclebaren Aluminiumbriketts. Notwendig ist der zusätzliche Kreislauf aufgrund der schlecht transportfähigen langen Aluminiumspäne.

Der erste Schritt im externen Brikettierkreislauf ist die, wenn notwendig, Aufbereitung der Aluminiumspäne. Dazu gehört primär die Zerkleinerung mit einer Zerkleinerungsmaschine, wodurch gut transportfähige Späne erzeugt werden. Im zweiten Schritt werden die Späne in einer Brikettiermaschine brikettiert. Dadurch werden die Späne verdichtet und nochmals transportfähiger gemacht. Neben der Verdichtung können innerhalb der Brikettiermaschine die Kühlschmierstoffe abgeschieden werden. Diese werden anschließend gefiltert und der Bearbeitungsmaschine wieder zugeführt. Durch die Abscheidung der Kühlschmierstoffe wird eine aufwendige Reinigung der Späne hinfällig. Nach der Brikettierung werden die Briketts dem Aluminiumkreislauf erneut zugeführt und weiterrecycelt. [vgl. Q10]

## **3 Analyse spanender Prozesse**

In diesem Kapitel werden die vor dem Zerkleinerungsprozess ablaufenden spanenden Prozesse, welche für das Aufgabegut des Schredders zuständig sind, analysiert. Im Rahmen der Analyse wurden Berechnungen zu den Schnittwerten ausgewählter spanender Prozesse sowie eine Dokumentation über die anfallenden Späne durchgeführt. Die analysierten Prozesse bzw. Maschinendaten stammen aus dem Betrieb Bikar AEROSPACE in Korbußen.

### **3.1 Analyse der Späne**

In der folgenden Tabelle sind alle wichtigen Daten zu den drei spanenden Bearbeitungen aufgelistet, welche die Grundlage für die Ergebnisse im Kapitel „Analyse spanender Prozesse“ bilden. Dazu gehören Werkstoffkennwerte sowie verfahrenstechnische Daten zur Berechnung von Schnittwerten. Die Werte stammen aus den Arbeitsanweisungen der Maschinen.

Tabelle 3 Schnittwerte spanende Prozesse

	Fräse	Horizontalsäge	Kreissäge
<b>Gegebene Schnittwert</b>			
Drehzahl $n$	$358 \frac{\text{U}}{\text{min}}$	/	$2600 \frac{\text{U}}{\text{min}}$
Schnittgeschwindigkeit $v_c$	/	$46,67 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	/
Vorschubgeschwindigkeit $v_f$	$3000 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$	$129,6 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$	$10020 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$
<b>Werkzeug</b>			
Durchmesser $d$	2500 mm (Messerkopf)	/	650 mm
WSP,-Zähnezahl	15 WSP	/	60 z
Teilung $p$	/	0,65/0,95 Zoll	/
Abmaße	/	80x1,6 mm	/
Werkzeug-Einstellwinkel	$\kappa = 45^\circ$	$\kappa = 90^\circ$	$\kappa = 90^\circ$
<b>Werkstück</b>			
Werkstoff	EN AW-7075 (Luft- und Raumfahrtlegierung)		
Abmaße ( $L \cdot B \cdot H$ )	3000x2200x40 mm		

### 3.1.1 Objektive Analyse der Späne aus dem Fräsprozess



Abbildung 3-1 Späne Fräse

Die dokumentierten Späne entstanden bei der Bearbeitung einer EN AW-7075 Platte an einer Georg Plattenfräse. Das Werkzeug waren Wendeschneidplatten der Firma LachDiamant mit den in der Quelle [Q18] gegebenen Maßen. Die Länge der Späne, wie auf dem Bild ersichtlich, ist sehr unterschiedlich. Anhand einer stochastischen Untersuchung von 100 Spänen konnten Längen

von 3 cm bis 15 cm dokumentiert werden. Im Gegensatz dazu wurde bei allen Spänen eine Breite von 4 mm bis 5 mm festgestellt. Die einzelnen Späne lassen sich nach Abbildung 2-7 als Bandspäne und somit als ungünstig klassifizieren. Die Transportfähigkeit der Späne ist ebenfalls ungünstig, da die Späne zu Verschlaufungen neigen und eine geringe Dichte von  $\rho = 75 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  besitzen. An der Spanform lässt sich folgendes Merkmal erkennen, welches die Bearbeitung und das Werkzeug charakterisiert. Die Breite der Hauptschneide der Schruppwendeschneidplatte beträgt 5 mm und ist somit nahezu identisch der Spanbreite. In dem Streudiagramm

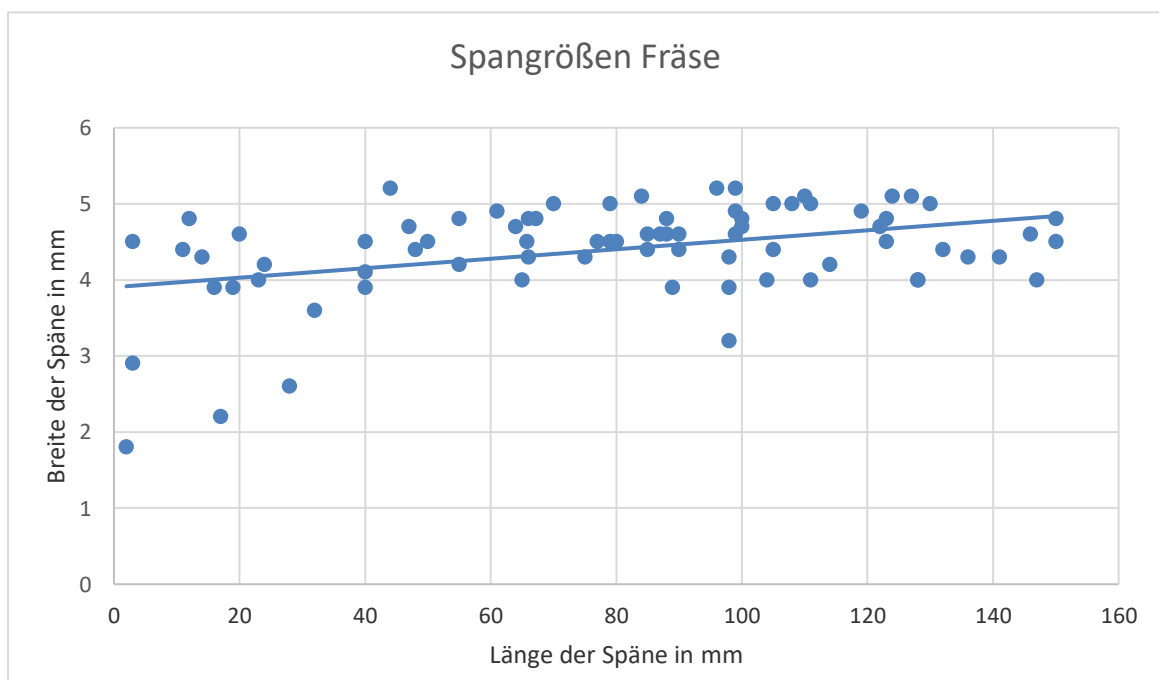


Abbildung 3-2 Diagramm Spangrößen Fräse

sind die Maße von 100 zufällig ausgewählten Spänen dargestellt. In dem Streudiagramm erkennt man gut die Breite der Schneide, da dieser Wert nach oben und unten nur geringe Streuung aufweist. Die Länge der Späne streut etwas weiter in beide Richtungen. Bei der Beurteilung der Späne ist die Unterscheidung von Spanform und Spanungsquerschnitt wichtig. Der Spanungsquerschnitt beschreibt die theoretische Größe der Späne, rückführend auf die Geometrie des Werkzeuges. Die Spanform ist die tatsächliche Form der Späne, welche durch verschlissene Werkzeuge, Unregelmäßigkeiten im Gefüge und Spanstauchung beeinflusst wird.

### 3.1.2 Objektive Analyse der Späne aus dem Horizontalsägeprozess



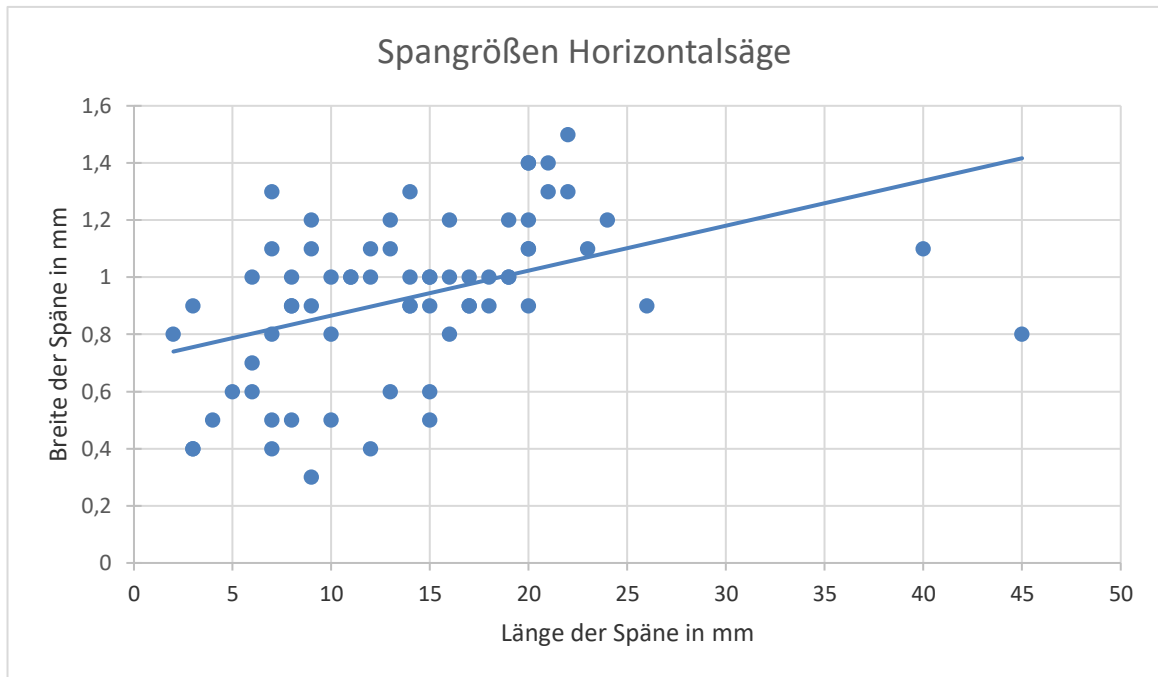
Abbildung 3-3 Späne Horizontalsäge



Abbildung 3-4 Spanbündel Horizontalsäge

Die dokumentierten Späne entstanden bei der spanenden Bearbeitung eines EN AW-7075 Barrens an einer Mössner-Horizontalsäge. Das Werkzeug war in diesem Fall das Sägeband Blue Line der Marke Arnzt mit den in der Quelle [Q9] gegebenen Maßen. Auf der Abbildung 3-4 ist ein Spanbündel zu sehen, wie es nach der Bearbeitungsmaschine entsteht. Auf der Abbildung 3-3 ist eine Auswahl von Spänen aus dem Spanbündel dargestellt. Das Spanbündel zählt mit zu der Hauptursache für die Problemstellungen, welche in der Einleitung erläutert wurden. Die einzelnen Späne lassen sich nach Abbildung 2-7 als Spiralspanstücke und somit als brauchbar klassifizieren. Ein größere Anhäufung von Spänen führt jedoch zur Ausbildung von

Spanbündeln, welche durch ihre Verschlaufungen eine schlechte Transportfähigkeit aufweisen. Die Dichte eines Spanbündels ist im Vergleich zu den zwei weiteren spanenden Verfahren mit  $\rho = 123,89 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  als befriedigend einzustufen. Die schlechte Transportfähigkeit entsteht durch viele kleine Spanbruchstücke, welche durch ihre Form weitere Verschlaufungen fördern und somit lange zusammenhängende Ketten ausbilden. An den Spanformen lassen sich folgende Merkmale erkennen, wel-



**Abbildung 3-5 Diagramm Spangrößen Horizontalsäge**

che auf die Bearbeitung und das Werkzeug schließen lassen. Anhand einer kleinen Auswahl von Spänen erkennt man, dass die Länge der Späne 24 mm und die Breite 1,6 mm nicht überschreitet. Demzufolge wird der der Span innerhalb der Teilungslänge gebrochen und dabei nicht breiter als das Sägeband abgetrennt. In dem folgenden Streudiagramm sind die Maße von 100 zufällig ausgewählten Spänen dargestellt.

In dem Streudiagramm erkennt man eine deutliche Streuung innerhalb der Teilung von 16,51 bis 24,13 mm des Sägebandes. Die Spanbreite hingegen streut unterhalb der Breite des Sägebandes.



### 3.1.3 Objektive Analyse der Späne aus dem Kreissägeprozess



Abbildung 3-6 Späne Kreissäge

Die dokumentierten Späne entstanden bei der spanenden Bearbeitung einer plangefrästen EN AW-7075 Platte an einer Schelling FM10 Plattensäge. Das Werkzeug war in diesem Fall das Sägeblatt 0040 der Firma AKE mit den in der Quelle [Q8] gegebenen Maßen.

Auf der Abbildung 3-6 ist eine zufällige Auswahl von Spänen nach der Bearbeitung durch die Kreissäge zu sehen. Anhand Form, Länge und Breite lassen sich diese Späne nach der Abbildung 2-7 als Spiralspanstücke klassifizieren. Nach der zweiten Bewertungsmethode sind diese Späne gut transportierbar, da sie einen Raum mit einer Dichte von  $\rho = 187,76 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  ausfüllen und keine Bündel ausbilden.

An den Spanformen lassen sich folgende Merkmale erkennen, welche auf die Bearbeitung und das Werkzeug zurückzuführen sind. Die maximale Spanlänge von 34 mm wird nicht überschritten, da dieser Wert der Abstand einzelner Zähne auf dem Sägeblattumfang ist. Die maximale Breite der Späne überschreitet die Schnittbreite

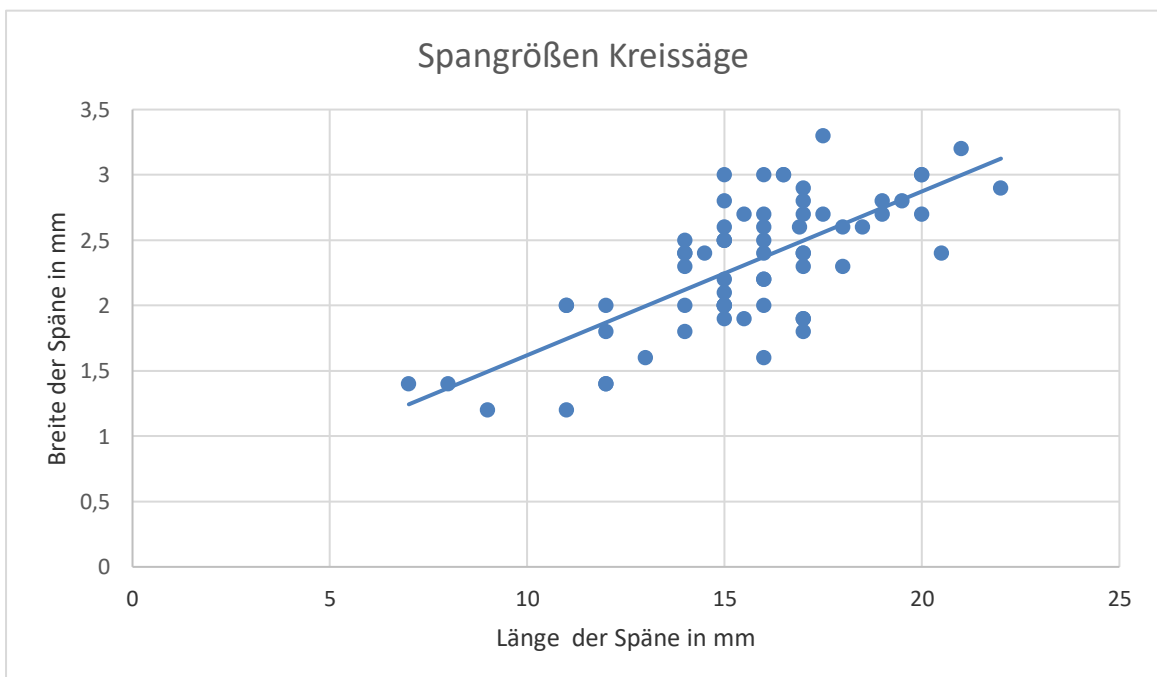


Abbildung 3-7 Diagramm Spangrößen Kreissäge

von 5,2 mm ebenfalls nicht. In dem Streudiagramm sind die Maße von 100 zufällig ausgewählten Spänen dargestellt. Diese weisen eine Anhäufung von Werten um die Länge 15 mm und Breite 2,5 mm auf. Die Streuung fällt im Verhältnis zu den zwei vorherigen spanenden Verfahren gering aus. Anhand der Streuung lässt sich auf einen stabilen Prozess mit stabilen Spanbruch schließen.

### 3.1.4 Vergleich / Auswertung der Späne

Tabelle 4 Vergleich Späne

	Fräse	Horizontalsäge	Kreissäge
Durchschnittliche Länge	80 mm	14 mm	16 mm
Abweichungsbereich	0 mm – 150 mm	0 mm – 45 mm	7 mm – 23 mm
Durchschnittliche Breite	4,4 mm	0,9 mm	2,4 mm
Abweichungsbereich	1,8 mm – 5,2 mm	0,3 mm – 1,5 mm	1,2 mm – 3,3 mm
Dichte der Späne	$75 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	$123,89 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	$187,76 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Transportfähigkeit	schlecht	schlecht	gut
Spanform / Beurteilung	Bandspäne / ungünstig	Spiralspanstücke (Bündel) / ungünstig	Spiralspanstücke / brauchbar

In der Tabelle sind alle wichtigen Daten zu den entstehenden Spänen aufgelistet. Die Höhe der Späne wurde ausgelassen, da der Toleranzbereich des Messschiebers größer war. Anhand der Maße ist schnell zu erkennen, dass die anfallenden Späne unterschiedlicher kaum sein können.

Im direkten Vergleich der Länge, Breite und Höhe der Späne erkennt man deutliche Abweichungen, welche auf die Werkzeuggeometrie zurückzuführen sind. Die Abweichung beschreibt den Bereich von minimaler zu maximaler Abweichung der Späne. Die Längenabweichung schwankt beim Fräsen zwischen 150 mm, Horizontalsäge 45 mm und Kreissäge 16 mm. Die großen Längenabweichungen bei der Fräse und Horizontalsäge sind nicht optimal, da sich ein optimaler Spanbruch in einheitlichen Spänen widerspiegelt. Im Gegensatz dazu weist die Kreissäge einen verhältnismäßig kleinen Abweichungsbereich auf. Demzufolge besitzt die Kreissäge einen besseren Spanbruch. Die Breite der Späne ist bei allen drei Verfahren in einem geringen Abweichungsbereich bzw. gibt es bei den dokumentierten Spänen nur wenige Ausreißer. Große Abweichungen der Breite wären unüblich, da die Breite durch das Werkzeug vorgegeben wird. Die Höhe der Späne weist ebenfalls nur geringe Schwankungen auf, ist aufgrund der geringen Dicke jedoch schwer zu dokumentieren.

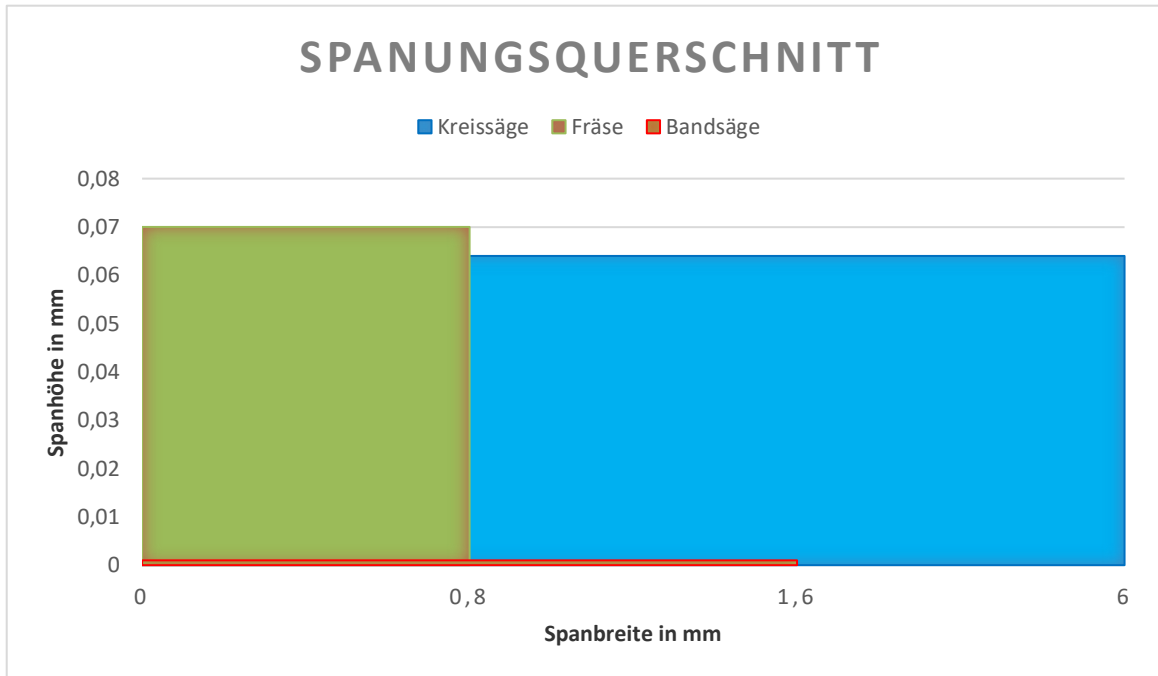
Gründe für die hohen Abweichungen bei der Länge der Späne können verschlissene Werkzeuge, unterschiedliche Aluminiumlegierungen, aber auch verfahrenstechnische Parameter sein. Anhand von Erfahrungswerten sind unterschiedliche Aluminiumlegierungen die primäre Ursache für unterschiedliche Spanbrüche. Die Raum- und Luftfahrtlegierung EN AW-7075 sorgt durch hohe Legierungsbestandteile für schlechte Späne. Die Legierungsbestandteile Zink, Magnesium und Kupfer sorgen für einen hohen Anstieg der Festigkeit, jedoch auch für einen schlechteren Spanbruch. Im Gegensatz dazu erzielt reines Standard Aluminium mit geringen bis keinen Legierungsbestandteilen, zum Beispiel EN AW-1050A, einen optimalen Spanbruch. [vgl. Q2]

Die verfahrenstechnischen Parameter zur Beeinflussung des Spanbruches beschränken sich auf Schnittgeschwindigkeit, Spanwinkel, Einstellwinkel, Vorschub und Zustelltiefe. Durch die unterschiedlichen Spanformen ist die Dichte der Späne sehr unterschiedlich. Die optimale Dichte besitzen die Späne der Kreissäge, gefolgt von den Spänen der Horizontalsäge, welche gut sind. Die Spandichte der Fräse ist sehr schlecht. Bei diesen drei Beispielen ist eine gute Spandichte mit einem konstanten Spanbruch und kleiner Späne verbunden. Die Spanformen der Späne, welche nach Abbildung 2-7 charakterisiert wurden, weisen deutliche Unterschiede auf.

Die beste Spanform besitzen die Späne der Kreissäge, welche als brauchbare konstante Spiralspanstücke klassifiziert wurden. Die Späne der Horizontalsäge sind ebenfalls als Spiralspanstücke zu klassifizieren, weisen jedoch durch hohe Abweichungen in der Geometrie ein ungünstiges Gesamtbild auf. Die schlechtesten Späne verzeichnet die Fräse, welche als ungünstige Bandspäne klassifiziert wurden. Die Transportfähigkeit, welche im Kapitel 2.1.3 charakterisiert wurde, weist eine ähnliche Verteilung wie die Spanform auf. Die Späne der Kreissäge besitzen eine sehr gute Transportfähigkeit, wohingegen die Späne von Horizontalsäge und Fräse eine schlechte Transportfähigkeit besitzen.

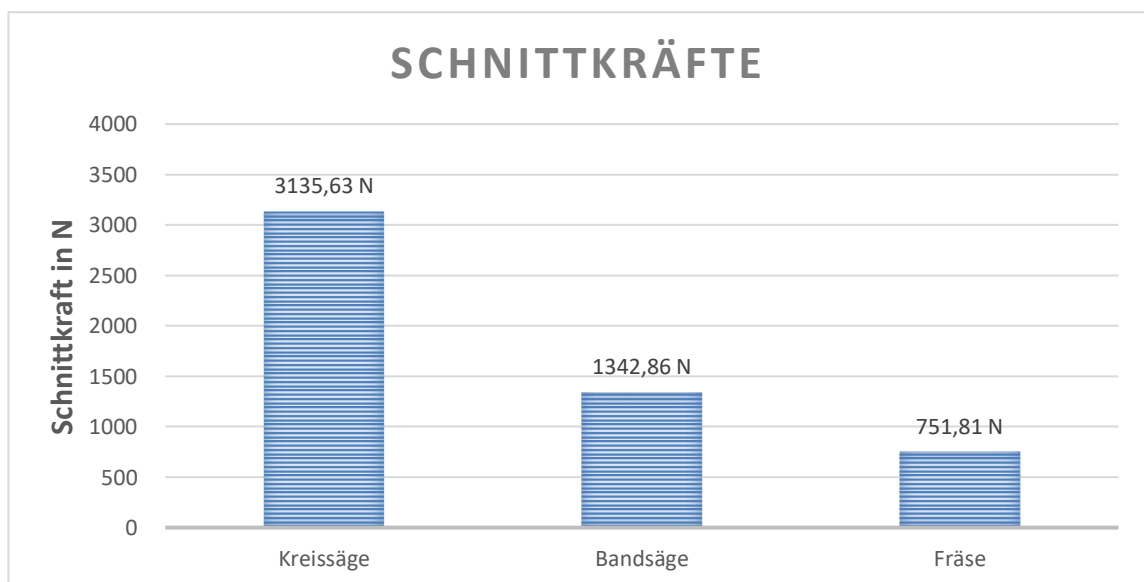
### **3.2 Berechnungen spanender Prozesse**

In diesem Kapitel werden die zuvor objektiv begutachteten Späne mit theoretischen Verfahren analysiert und verglichen. Dazu wurden die spanenden Verfahren mithilfe eines Excel-Tools analysiert und die Ergebnisse in verschiedenen Diagrammen dargestellt. Die Formeln zur Berechnung stammen aus der Quelle [Q3] und werden im folgenden Text zur Nachvollziehbarkeit aufgelistet. Weitere Quellen sind hinter dem jeweiligen Auszug angegeben. Das Excel-Tool besteht in den Eingabezeilen aus den gegebenen Schnittparametern der spanenden Verfahren Bandsägen, Kreissägen und Fräsen, sowie weiteren Werkstoff- und Werkstückkennwerten. In den Ausgabezeilen werden aus den gegebenen Schnittparametern alle möglichen weiteren Schnittwerte berechnet. Die Berechnung der Schnittparameter wird durch die Verknüpfung der Eingabezeilen mit den Formeln erreicht. In den Ausgabezeilen werden die Ergebnisse der Formeln ausgegeben. Bei Veränderung der gegebenen Schnittparameter rechnet das Tool diese automatisch in die aktuellen Werte um. Im Anhang ist das Excel-Tool zum besseren Verständnis bildlich dargestellt. In den folgenden Diagrammen sind die Ergebnisse von Spanungsquerschnitt, Schnittkraft und Zeitspanvolumen der drei Bearbeitungsverfahren dargestellt.



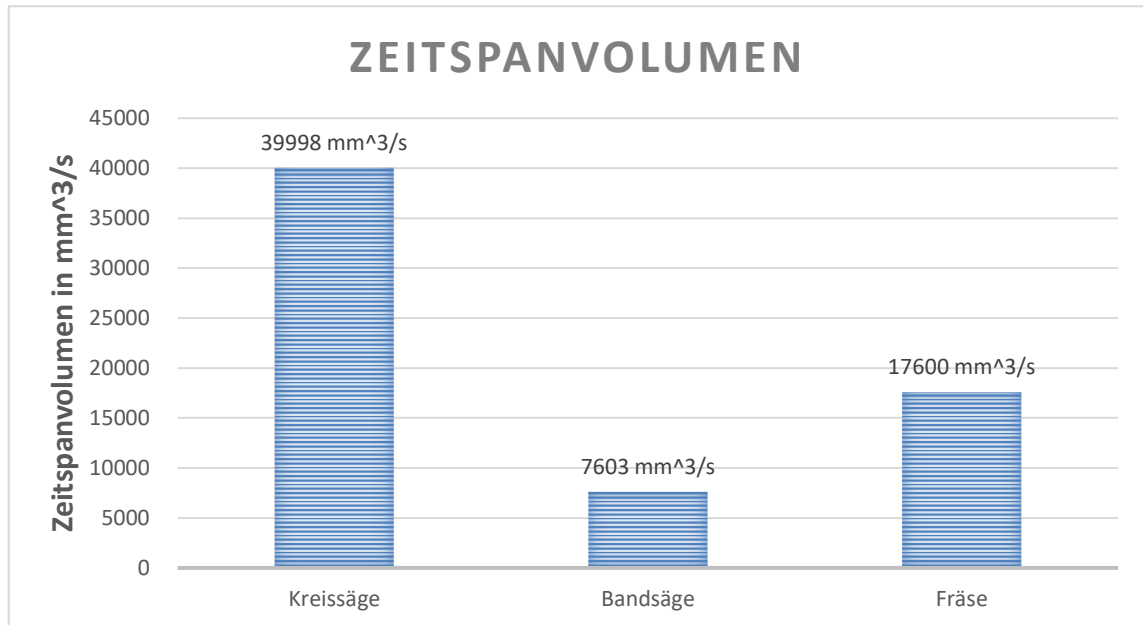
**Abbildung 3-8 Diagramm Spanungsquerschnitt**

In dem Diagramm ist der berechnete Spanungsquerschnitt zu sehen. Auf der x-Achse ist die Spanbreite in mm und auf der y-Achse die Spanhöhe in mm dargestellt. Die Breite des Spans wird bei allen drei Verfahren durch die Breite des Werkzeugs vorgegeben. Die Spanhöhe entsteht durch den Vorschub je Zahn. Der Span der Bandsäge besitzt durch den geringen Vorschub je Zahn eine geringe Spanhöhe, wodurch er im Diagramm schlecht zu sehen ist. Im direkten Vergleich erkennt man Unterschiede bei der Breite der Kreissäge- und Bandsägespäne. Die Späne der Fräse stimmen mit der theoretischen Breite überein.



**Abbildung 3-9 Diagramm Schnittkräfte**

In dem Diagramm sind die Schnittkräfte in Newton dargestellt. Die hohen Schnittkräfte der Kreissäge sind die Folge des breiten Eingriffes in Verbindung mit einem hohen Vorschub je Zahn. Im Gegensatz dazu die geringen Schnittkräfte der Fräse, welche auf den kleinen theoretischen Spanquerschnitt in Verbindung mit der geringen Anzahl an Schneiden im Eingriff zurückzuführen sind.



**Abbildung 3-10 Diagramm Zeitspanvolumen**

In dem Diagramm ist das Zeitspanvolumen in Kubikmillimeter pro Sekunde dargestellt. Ausschlaggebender Parameter für die Unterschiede sind die unterschiedlichen Vorschubgeschwindigkeiten. Die Kreissäge besitzt eine 16-fach höhere Vorschubgeschwindigkeit als die Fräse und eine 77-fach höhere Vorschubgeschwindigkeit als die Bandsäge.

### Spanungsquerschnitt

Bei der Kreissäge und Horizontalsäge ergibt sich der Spanungsquerschnitt aus der Breite  $b$  eines Zahns und dem Vorschub je Zahn  $f_Z$ . Auf den folgenden Bildern sind die Einflussgrößen beim Horizontalsägen und Kreissägen bildlich dargestellt. Die Breite  $b$  der Zähne lässt sich in den Datenblättern aus den Quellen [Q8], [Q9] ablesen. Der Vorschub je Zahn  $f_Z$  berechnet sich mit den folgenden Formeln und ergibt sich bildlich aus den Richtungsvektoren von  $v_f$  und  $v_c$ .

$$f_{Z,Kreissäge} = \frac{v_f}{\left(\frac{n}{60}\right) \cdot z} = \frac{167 \frac{\text{mm}}{\text{s}}}{\left(\frac{2600 \frac{\text{U}}{\text{min}}}{60}\right) \cdot 60} = \mathbf{0,064 \text{ mm}} \quad (\text{Gl. 3.1})$$

$$b_{Kreissäge} = \mathbf{6 \text{ mm}}$$

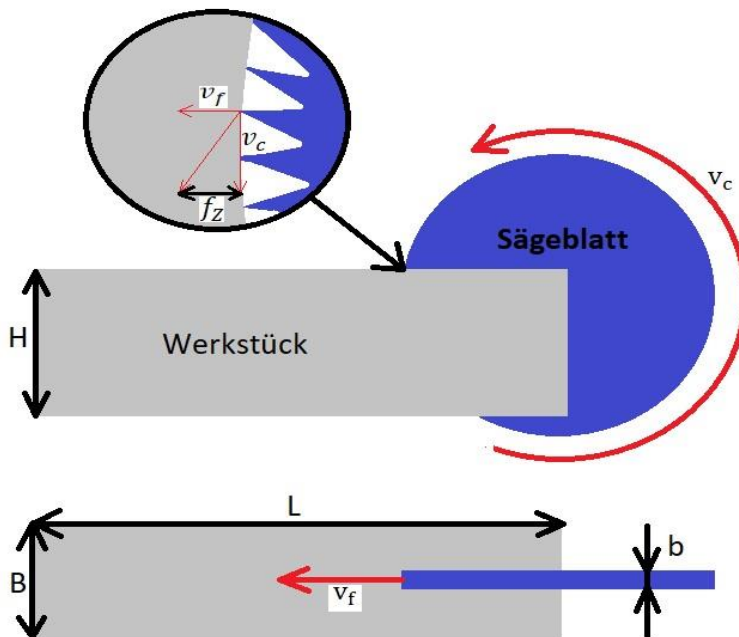


Abbildung 3-11 Einflussgrößen beim Kreissägen

$$f_{Z,mittel \text{ Horizontalsäge}} = \frac{f_{Z,0,65Zoll} + f_{Z,0,95Zoll}}{2} = 9,83 \cdot 10^{-4} \text{ mm} \approx \mathbf{0,001 \text{ mm}} \quad (\text{Gl. 3.2})$$

$$f_{Z,0,65Zoll} = \frac{p \cdot v_f}{v_c} = \frac{(0,65 \cdot 25,4 \text{ mm}) \cdot 2,16 \frac{\text{mm}}{\text{s}}}{46666,67 \frac{\text{mm}}{\text{s}}} = 7,65 \cdot 10^{-4} \text{ mm}$$

$$f_{Z,0,95Zoll} = \frac{p \cdot v_f}{v_c} = \frac{(0,95 \cdot 25,4 \text{ mm}) \cdot 2,16 \frac{\text{mm}}{\text{s}}}{46666,67 \frac{\text{mm}}{\text{s}}} = 1,12 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

$$b_{Horizontalsäge} = \mathbf{1,6 \text{ mm}}$$

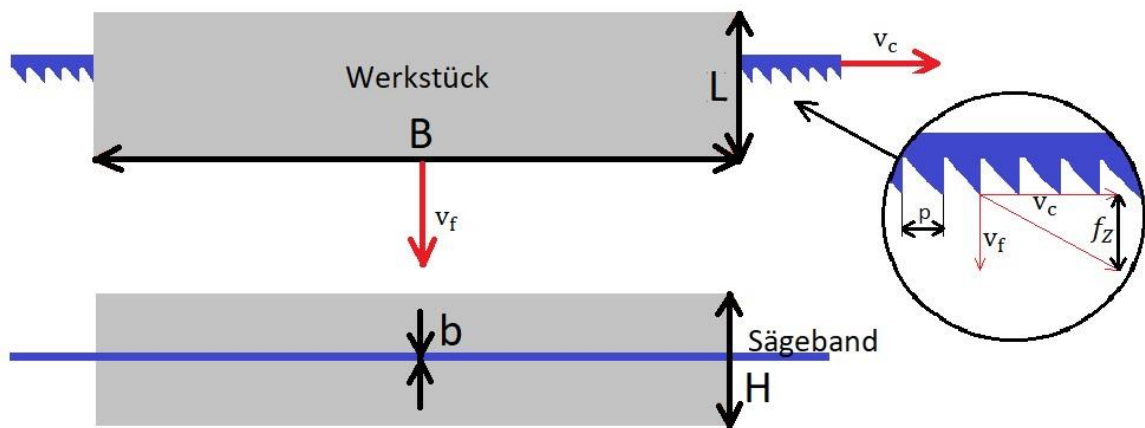


Abbildung 3-12 Einflussgrößen beim Horizontalsägen

Bei der Fräse setzt sich der Spanungsquerschnitt aus der Schnitttiefe und  $\chi$  zusammen. Auf dem folgenden Bild sind die Einflussgrößen beim Fräsen dargestellt. Die Schnitttiefe ist in den Schnittwerten des Herstellers mit  $a_p = 0,8 \text{ mm}$  vorgegeben.  $\chi$  berechnet sich mit folgender Formel.

$$\chi = f_{z,Fräse} \cdot \sin \varphi = 0,07 \text{ mm} \quad (\text{Gl. 3.3})$$

$$f_{z,Fräse} = \frac{v_f}{\left(\frac{n}{60}\right) \cdot z} = \frac{10 \frac{\text{mm}}{\text{s}}}{\left(\frac{258 \frac{\text{U}}{\text{min}}}{60}\right) \cdot 15} = 0,112 \text{ mm} \quad (\text{Gl. 3.4})$$

$$\varphi = (\text{Gl. 3.9})$$

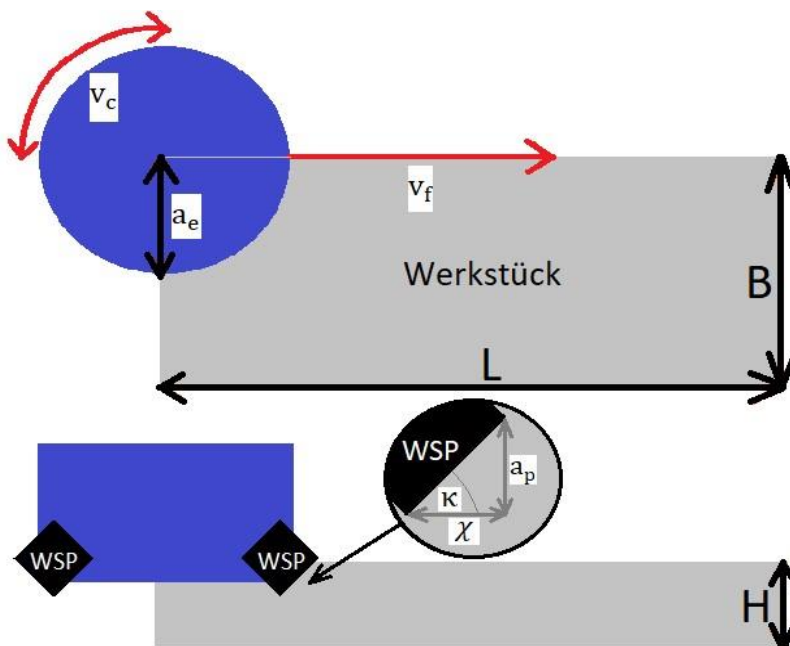


Abbildung 3-13 Einflussgrößen beim Fräsen



**Schnittkräfte**

Die Schnittkraftberechnung erfolgt für alle drei Verfahren nach der gleichen Formel.

$$F_c = A \cdot k_c \cdot z_E \quad (\text{Gl. 3.5})$$

$$A_{\text{Kreissäge, Bandsäge}} = f_z \cdot b \quad (\text{Gl. 3.6})$$

$$A_{\text{Fräse}} = a_p \cdot x \quad (\text{Gl. 3.7})$$

$$x = f_z \cdot \sin \varphi \quad (\text{Gl. 3.8})$$

$$z_E = \frac{\varphi_s \cdot z}{360^\circ} \quad (\text{Gl. 3.9})$$

$$\varphi = \sin\left(\frac{B \cdot 2}{d}\right) \quad (\text{Gl. 3.10})$$

$$k_c = k_c \cdot k_v \cdot k_{ver} \cdot k_{st} \quad (\text{Gl. 3.11})$$

Korrekturfaktor Schnittgeschwindigkeit  $k_v = 1$  [Q6]

Korrekturfaktor Verschleiß  $k_{ver} = 1,3$  [Q6]

Korrekturfaktor Spanstauchung  $k_{st} = 1,2$  [Q6]

$$k_c = \frac{k_{c1.1}}{h_m^{m_c}} \quad (\text{Gl. 3.12})$$

$$k_{c1.1} = 830 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad [\text{Q11}]$$

$$m_c = 0,23 \quad [\text{Q11}]$$

$$h_{m, \text{Fräse}} = \frac{\sin \kappa \cdot 180 \cdot f_z \cdot a_e}{\pi \cdot d \cdot \sin^{-1}\left(\frac{a_e}{d}\right)} \quad [\text{Q20}] \quad (\text{Gl. 3.13})$$

$$h_{m, \text{Bandsäge, Kreissäge}} = f_z$$

$$F_{c, \text{Kreissäge}} = 6 \text{ mm} \cdot 0,064 \text{ mm} \cdot 5869,71 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 1,4 = \mathbf{3135,63 \text{ N}}$$

$$F_{c, \text{Bandsäge}} = 1,6 \text{ mm} \cdot 0,001 \text{ mm} \cdot 6044,27 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 147,6 = \mathbf{1342,86 \text{ N}}$$

$$F_{c,Fräse} = 0,8 \text{ mm} \cdot 0,07 \text{ mm} \cdot 2314,69 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 5,8 = \mathbf{751,81 \text{ N}}$$

### **Zeitspanvolumen**

Das Zeitspanvolumen bestimmt sich für alle drei Verfahren nach der gleichen Formel. Unterschiede entstehen bei der unterschiedlichen Auffassung von Schnittbreite und Schnitttiefe der Verfahren.

$$Q = v_f \cdot a_p \cdot a_e \quad (\text{Gl. 3.13})$$

$$Q_{\text{Kreissäge}} = v_f \cdot b \cdot H = 166,66 \frac{\text{mm}}{\text{s}} \cdot 6 \text{ mm} \cdot 40 \text{ mm} = \mathbf{39998,4 \frac{\text{mm}^3}{\text{s}}}$$

$$Q_{\text{Horizontalsäge}} = v_f \cdot b \cdot B = 2,16 \frac{\text{mm}}{\text{s}} \cdot 1,6 \text{ mm} \cdot 2200 \text{ mm} = \mathbf{7603,2 \frac{\text{mm}^3}{\text{s}}}$$

$$Q_{\text{Fräse}} = v_f \cdot a_p \cdot a_e(B) = 10 \frac{\text{mm}}{\text{s}} \cdot 0,8 \text{ mm} \cdot 2200 \text{ mm} = \mathbf{17600 \frac{\text{mm}^3}{\text{s}}}$$

## 4 Analyse Schneidenkonzepte

In diesem Kapitel werden drei verschiedene Schneidenkonzepte für Schredder vorgestellt und durch ihre Spanbruch beeinflussenden Einstellparameter charakterisiert. Die Beispiele zu den Schneidenkonzepten beruhen auf bestehender Technik des Unternehmens Bikar AEROSPACE.

### 4.1 Schneidenkonzepte von Schreddern

#### 4.1.1 Axialspalt-Rotorscheren

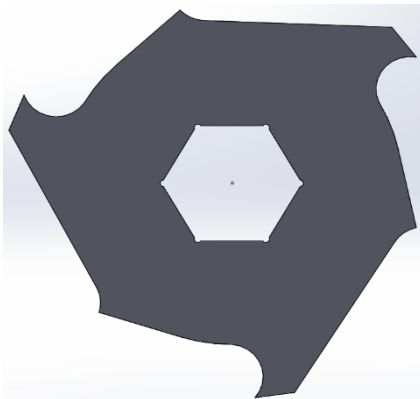


Abbildung 4-1 Rotor

Das Axialspalt-Rotorscheren Konzept beschreibt die Zerkleinerung zwischen mindestens zwei gegenläufig rotierenden Rotoren. Die Zerkleinerung findet primär im axialen Spalt zwischen den einzelnen Rotoren statt, da das Aufgabegut zwischen den Rotoren hindurchgezogen wird. Die sekundäre Zerkleinerung findet im radialen Spalt, zwischen Rotor und Amboss, statt. Der axiale Spalt beträgt in der Regel nur wenige zehntel Millimeter und sorgt somit

für eine Trennung primär durch Scherung. Der Aufbau der Rotoren kann sehr unterschiedlich sein und ist abhängig von der Art des Aufgabegutes. Anhand der Bei-

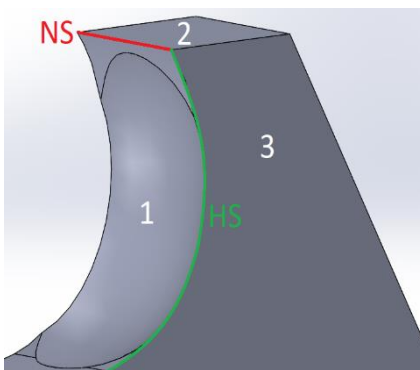


Abbildung 4-2 Messer

spielbilder werden die einzelnen Einstellparameter am Rotor erklärt. Auf der Abbildung 4-1 ist ein Rotor zu sehen, welcher drei Messer besitzt. Die Messer werden jeweils in Haupt (HS) und Nebenschneide (NS) unterteilt. Die Hauptschneide schneidet im axialen und die Nebenschneide im radialen Spalt. Charakterisiert werden die Schneiden durch den Übergangsradius (grün); Stärke des Rotors (rot); Freiwinkel  $\alpha_R$ ; Keilwinkel  $\beta_R$ ; Spanwinkel  $\gamma_R$  und

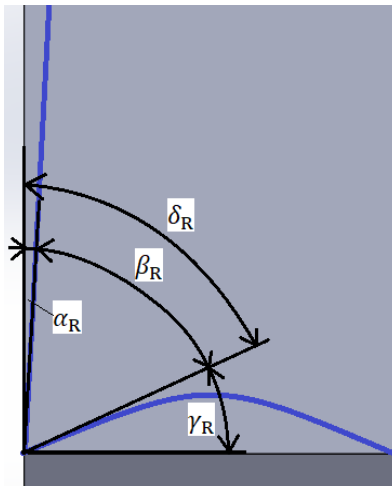


Abbildung 4-3 Normalebene HS

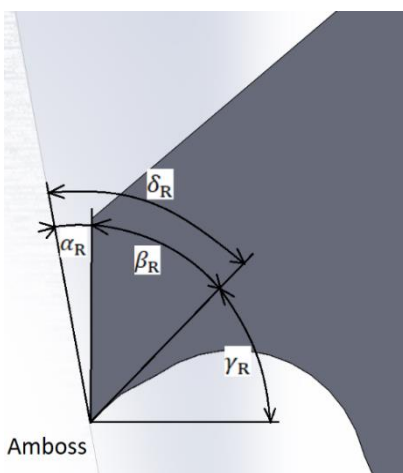


Abbildung 4-4 Normalebene NS

Schnittwinkel  $\delta_R$ . Der Übergangsradius der Schneide sorgt je nach Ausprägung für die Förderwirkung und Menge des zerkleinerten Aufgabegutes, da er zugleich die Hauptschneide darstellt. Das Gegenstück zur Hauptschneide stellt der Rotor auf der gegenüberliegenden Welle dar. Die Nebenschneide des Rotors wird durch die Breite des Rotors definiert. Das Gegenstück zur Nebenschneide ist ein Amboss auf der gegenüberliegenden Welle. Die Stärke des Rotors entscheidet über die Länge des zerkleinerten Materials. Der Freiwinkel an der Schneide sorgt für eine Verringerung der Reibverluste. Laut Gottberg sollte dieser  $14^\circ$  möglichst nicht unterschreiten. Keil- bzw. Schnittwinkel ermöglichen die Trennung des Materials, erzeugen dabei jedoch Schubspannungen, welche mit größeren Winkeln ansteigen. Aus diesem Grund sind aus verfahrenstechnischer Sicht ausreichend große und möglichst geringe Keil- bzw. Schnittwinkel zu empfehlen. Um dem Verschleiß und dem Ausbrechen entgegenzuwirken, empfehlen sich Keil- bzw. Schnittwinkel zwischen  $50^\circ$  und  $60^\circ$ . [vgl. Q23]

#### 4.1.2 Radialspalt-Rotorscheren

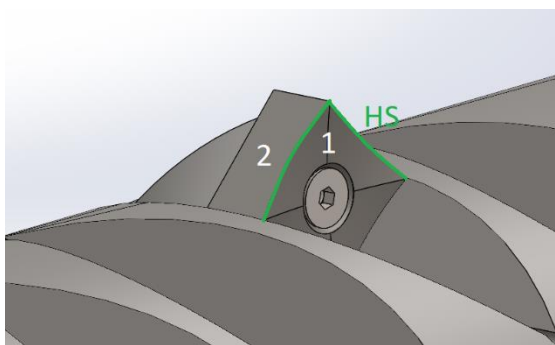
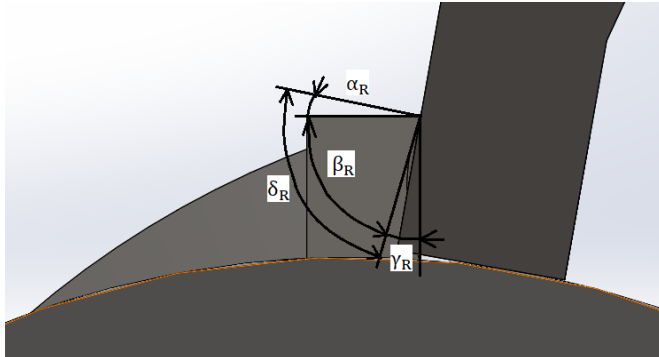


Abbildung 4-5 Schneidkronen V-Form

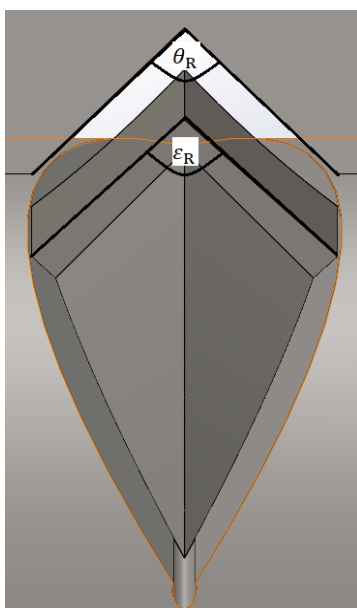
Das Radialspalt-Rotorscheren Konzept beschreibt die primäre Zerkleinerung des Aufgabegutes in einem radialen Spalt zwischen zwei Rotoren bzw. einem Rotor und einem Stator. Bei diesem Konzept sind die gängigsten Schneidelemente Wendemesser bzw. Schneidkronen in V- oder O-

Form mit angepasstem Stator / Amboss. Vorteil dieser Variante sind einfach wechselbare Schneidelemente bei Verschleiß. Der Schneidspalt beträgt in der Regel nur wenige zehntel Millimeter und sorgt in Verbindung mit gängigen Wendemesserkeilwinkeln von  $80^\circ$  bis  $90^\circ$  für eine Zerkleinerung durch Scherbeanspruchung. Auf den Bildern ist ein beispielhaftes Schneidenkonzept eines Radialspalt-Schredders dargestellt.



**Abbildung 4-6 Normalebene Schneidkronen**

Die Schneidkronen sind quadratisch und weisen vier Hauptschneiden auf, wodurch sie nach Verschleiß einmalig um  $180^\circ$  gewendet werden können. Die Oberfläche der Schneidkronen ist konkav gekrümmt, wodurch sich die Winkel in Abbildung 4-6 ergeben. Der Keilwinkel  $\beta_R$  empfiehlt sich zwischen  $80^\circ$  und  $90^\circ$  für eine optimale Scherbeanspruchung. Der Freiwinkel  $\alpha_R$  sorgt für eine Verringerung der Reibverluste und sollte  $14^\circ$  nicht unterschreiten. Der Öffnungswinkel des Ambosses  $\theta_R$  sowie der Werkzeug-



**Abbildung 4-7 Öffnungswinkel**

gestellt. Auf der Abbildung 4-5 ist die Schneidkronen mit dahinterliegender Stabilisierung dargestellt. Die Stabilisierung ist in diesem Fall in der Nut auf der Welle eingeschweißt und besitzt eine Gewindebohrung zur Befestigung der Schneidkronen. Die Schneid-

kronen sind quadratisch und weisen vier Hauptschneiden auf, wodurch sie nach Verschleiß einmalig um  $180^\circ$  gewendet werden können. Die Oberfläche der Schneidkronen ist konkav gekrümmt, wodurch sich die Winkel in Abbildung 4-6 ergeben. Der Keilwinkel  $\beta_R$  empfiehlt sich zwischen  $80^\circ$  und  $90^\circ$  für eine optimale Scherbeanspruchung. Der Freiwinkel  $\alpha_R$  sorgt für eine Verringerung der Reibverluste und sollte  $14^\circ$  nicht unterschreiten. Der Öffnungswinkel des Ambosses  $\theta_R$  sowie der Werkzeug-Eckenwinkel  $\epsilon_R$  in Abbildung 4-7 sollten möglichst gleich groß dimensioniert sein, um eine einheitliche Scherbeanspruchung über den gesamten Schneidspalt zu gewährleisten. Bei einrotorigen Radialspalt-Rotorschneidern sind zusätzliche Einzugshilfen zu empfehlen, da durch schlecht ausgeprägte Übergangsradien nur bedingt Material gefördert werden kann. Gängige Einzugshilfen sind hydraulische Schieber oder Schwenkarme. Eine weitere Möglichkeit sind zwei gegenüberliegende, gegenläufig rotierende Rotoren. Dadurch würde ein Einzugsgebiet realisiert werden, welches den Übergangsradius kompensiert. Vorteil der Radialspalt-Rotorschneidern ist die definierte Geometrie des Stators und Rotors,

welche im Vergleich zu Axialspalt-Rotorscheren ein besser definiertes Zerkleinerungsprodukt zur Folge haben.

### 4.1.3 Rotorreißer

Bei Rotorreißern findet die Zerkleinerung in einem axialen- sowie radialen Spalt statt. Die Spaltabstände können mehrere Zentimeter betragen und müssen abhängig von dem Aufgabegut ausgewählt werden. Rotorreißer bestehen aus mindestens einem Rotor, welcher gegen einen Stator / Amboss läuft. Eine weitere gängige Bauart besteht aus mehreren gegenüberliegenden, gegenläufigen und ineinandergreifenden Rotoren. Durch diese Bauart findet primär eine Reißbeanspruchung und sekundär eine Scher- und Prallbeanspruchung statt. Durch die grobe Zerkleinerung von Rotorreißern eignen sich diese weniger zur definierten Zerkleinerung eines Aufgabegutes, sondern vorwiegend zur Zerkleinerung von voluminösen Stahlleichtschrotten. Die Schneidengeometrie von Rotorreißern ist aufgrund der Reißbeanspruchung nicht zwingend in Haupt- und Nebenschneide sowie die einzelnen Winkel einer Schneide zu unterteilen. Wichtig bei der Konstruktion einer Rotorreißerschneide ist die Kombination der rotierenden Schneide mit dem Stator / Amboss bzw. den weiteren rotierenden Schneiden auf den gegenüberliegenden Wellen. Die Schneid- bzw. Reißelemente auf dem Rotor sind so zu konstruieren, dass sie eine möglichst große Fläche erzeugen, um Späne zu fördern. Zudem sollten Schneid- und Reißelemente scharfkantig sein, um das Aufgabegut bestmöglich zu reißen. Der Keilwinkel ist dabei mit  $90^\circ$  ausreichend dimensioniert. Aufgrund der großen Wellen- sowie Rotorabstände ist das Einzugsverhalten von Rotorreißern günstiger als das von Rotorscheren, wodurch zusätzliche Maßnahmen zur Verbesserung der Förderwirkung nicht notwendig sind. [vgl. Q23]

#### 4.1.4 Variantenvergleich Rotorscheren / Rotorreißer

Tabelle 5 Variantenvergleich Rotorscheren / Rotorreißer

	Axialspalt-Rotorscheren	Radialspalt-Rotorscheren	Rotorreißern
Rotorwellenanzahl	einrotorig / mehrrotorig		
Hauptbeanspruchungszone	axialer Spalt	radialer Spalt	axialer / radialer Spalt
Werkzeugkeilwinkel	90°	70...90°	90°
Rotorbauart	Scheibenrotor		Scheibenrotor oder Massivrotor
Werkzeuggeometrie	ineinandergreifende Rotorscheiben mit Zahnförmigen Schneiden	Rotorscheiben mit Wendemessern / Schneidkronen in runder; dreieckiger oder viereckiger Gestalt	meist auswechselbare Werkzeuge mit schneidenförmiger Gestalt
Ambossgeometrie	kein Amboss oder U-förmiger Amboss	V- oder O-förmiger Amboss	U-förmiger oder gerader Amboss
Siebrost	meist bei einrotorigen; selten bei zwei bis vier rotorigen	wenn erforderlich	wenn erforderlich
Einzugsvorrichtung	wenn nötig Schieber; Schwenkarm oder Einzugsband		/

Rotorscheren sowie Rotorreißer dienen zur Zerkleinerung von Abfällen und Schrotten. Trotz vergleichbarer Zerkleinerungswerkstücke unterscheiden sich diese Zerkleinerer in ihrer konstruktiven Gestaltung. Dadurch ergeben sich Vor- und Nachteile bezüglich des Durchsatzes und des entstehenden Zerkleinerungsproduktes.

Der Durchsatz des Zerkleinerungsproduktes wird entscheidend durch die Anzahl und Abmessungen der Rotoren, Größe der Spaltabstände sowie der Drehzahl der Rotoren beeinflusst. Rotorscheren und Rotorreißer besitzen einen ähnlichen Zusammenhang bezüglich Drehzahl, Abmessungen und Anzahl der Rotoren, jedoch ergeben sich bei den Spaltabständen große Unterschiede, welche den Durchsatz zugunsten der Rotorreißer beeinflussen.

Die Größe des Zerkleinerungsproduktes wird bei Rotorscheren durch die Rotorwerkzeuge bestimmt. Bei mehrrotorigen Axialspalt-Zerkleinerern ist die Breite der Rotoren entscheidend für die Größe des Zerkleinerungsproduktes. Radialspalt-Zerkleinerer sind hingegen mit Wendemessern oder Schneidkronen besetzt, welche durch vorgegebene Maße die Größe Zerkleinerungsproduktes bestimmen. Bei Rotorreißern sorgen große Spaltabstände für die Entstehung eines deutlich gröberen Zerkleinerungsproduktes. Die Streuung der Stückgrößen kann sehr unterschiedlich sein und wird nach oben hin meist von dem Wellenabstand gegenläufig rotierender Rotoren begrenzt. [vgl. Q23]

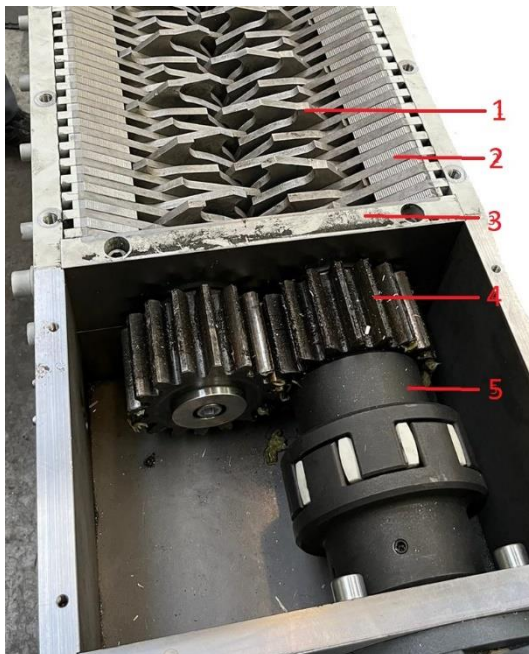


## 4.2 Vergleich bestehende Schredder

Während des Praxismoduls bei Bikar AREOSPACE konnte auf zwei bereits bestehende Schredderkonzepte zugegriffen werden. Im direkten Vergleich beider Schredder konnten viele Gemeinsamkeiten und Unterschiede festgestellt werden, welche sowohl Vor- und Nachteile in Bezug auf die entstehenden Späne haben. Mithilfe der zwei bestehenden Konzepte konnte das dritte Schredderkonzept entwickelt werden und dabei Vorteile genutzt und Nachteile ausgebessert werden.

Bei den bestehenden Schreddern handelt es sich um Späneschredder, welche ursprünglich für diesen Zweck angeschafft wurden, jedoch nicht die gewünschten Ergebnisse lieferten.

### 4.2.1 Axialspalt-Rotorscheren Zerkleinerer



**Abbildung 4-8 Axialspalt-Rotorscherenzerkleinerer**

Das erste Schredderkonzept ist von einer externen Firma und bereits im Bestand der Firma Bikar AEROSPACE. Dieser Schredder gehört zur Untergruppe der Axialspalt-Rotorscheren. Demzufolge findet die Zerkleinerung zwischen den Rotoren im axialen Spalt statt. Durch den geringen Spalt von wenigen zehntel Millimetern findet eine Zerkleinerung primär durch Scherung und sekundär durch Reiß- und Prallbeanspruchung statt.

Mittelpunkt der Konstruktion sind zwei Sechskantwellen mit darauf aufgesteckten Rotoren (1), welche parallel nebeneinander angeordnet sind. Die Rotoren sind abwechselnd mit einer Distanzscheibe aufgesteckt, sodass sich immer ein Rotor und eine Distanzscheibe gegenüberstehen. Der Wellenabstand ist so gewählt, dass die

gegenüberliegenden Rotoren ineinander greifen. Die Rotoren besitzen eine Sechskantaustragung, welche es mit  $0^\circ$  und  $60^\circ$  Versatz gibt. Durch die Sechskantaustragung können die Rotoren auf der Welle montiert werden. Mithilfe des Versatzes wird verhindert, dass alle Rotoren auf einer Welle identisch angeordnet sind. Somit lassen sich die Einzugsverhältnisse verbessern, da die Periode von Einzug bis zum Schneiden halbiert wird.



**Abbildung 4-9 Schneiden am Axialspalt-Rotor**

Ein Rotor besitzt jeweils drei Messer, welche um  $120^\circ$  versetzt sind. Ein Messer lässt sich in Haupt- und Nebenschneide unterteilen. Die Hauptschneide (blaue Linie) schneidet im axialen Spalt und die Nebenschneide (rote Linie) im radialen Spalt. Die Schneidenform weist eine lang ausgeführten Übergangsradius  $r$  auf,

wodurch ein sehr guter Einzug des Aufgabegutes ermöglicht wird. Auf dem Bild ist der Übergangsradius anhand der blauen Linie verdeutlicht. Die Winkelverhältnisse der Schneiden sind bei diesem Konzept unkompliziert gehalten. Die Hauptschneide besitzt keinen Freiwinkel  $\alpha_R$  und der Keilwinkel  $\beta_R$  beträgt  $90^\circ$ . Die Nebenschneide, welche zwangsläufig durch den radialen Spalt gegeben ist, besitzt keinen Freiwinkel  $\alpha_R$ , aber einen Keilwinkel  $\beta_R$  mit  $75^\circ$ . Beide Wellen sind beidseitig auf zweigeteilten Lagerböcken (3) kugelgelagert. Für die gewünschte Spanführung sorgt das Gehäuse des Schredders. Dieses besteht aus zwei Metallplatten, woran alle Einzelteile angeschraubt sind. Der Spanraum wird durch eine Abweiserkonstruktion (2) aus vier Einzelteilen begrenzt. Die Wellen sind zur Kraftübertragung mit zwei Zahnrädern (4) mechanisch verbunden und werden durch einen SEW Getriebemotor angetrieben. Der Motor ist mit dem Zerkleinerer verschraubt und überträgt die Kraft mit einer elastischen Klauenkupplung (5) auf eine der zwei Wellen.

## 4.2.2 Rotorreißer / Rotorscheren Zerkleinerer



Abbildung 4-10 Rotorreißer

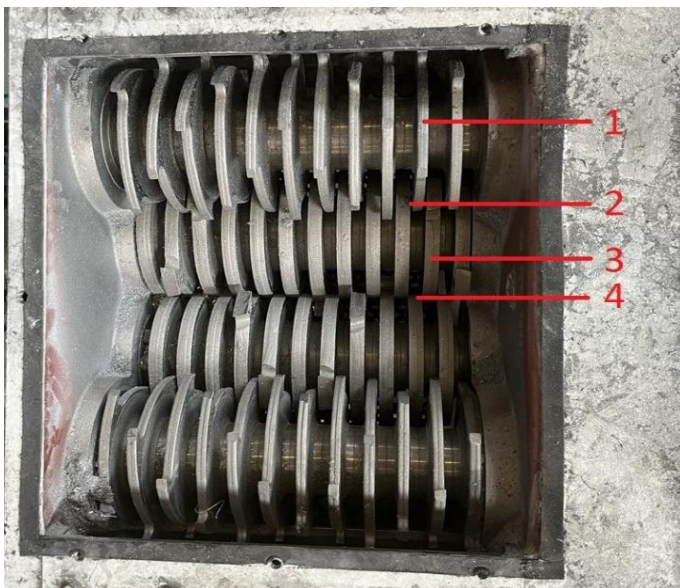


Abbildung 4-11 Messer Rotorreißer

Der Zerkleinerungsvorgang dieses Zerkleinerers lässt sich in zwei verschiedene Abläufe unterteilen. Im oberen Bereich des Zerkleinerers werden die Aufgabegüter gefördert. Die erste Zerkleinerung findet im Schneidspalt zwischen der unteren und

Der zweite Schredder ist von einer externen Firma und ebenfalls im Bestand der Firma Bikar AEROSPACE. Dieser Schredder ist eine Kombination der Untergruppen Rotorreißer und Rotorscheren, da eine Zerkleinerung zwischen großen sowie kleinen Spaltabständen durch primär Reiß- und sekundär Scher- und Prallbeanspruchung stattfindet.

Der Schredder besteht aus insgesamt vier Wellen, welche zueinander versetzt sind und ineinandergreifen. Die Zerkleinerung findet mithilfe zwei verschiedener Arten von Rotoren statt. Die Rotoren der oberen Reihe (1) besitzen Distanzringe, wodurch ein definierter Spalt von ca. 3 mm (2) entsteht. Die Rotoren der unteren Reihe (3) besitzen einen

Schneidspalt von wenigen zehntel Millimetern (4). Alle Rotoren besitzen einen

Durchmesser von 180 mm. Die Rotoren der oberen Reihe besitzen jeweils vier Schneiden mit stark ausgeprägtem Übergangsradius, um eine hohe Förderwirkung im oberen Bereich des Schredders zu erzielen. Einmal ergriffen, werden die Späne in die untere Wellenreihe befördert. Die Rotoren der unteren Reihe besitzen jeweils eine scharf ausgeprägte Schneide zur Zerkleinerung.

Alle Rotoren besitzen einen Durchmesser von 180 mm. Die Rotoren der oberen Reihe besitzen jeweils vier Schneiden mit stark ausgeprägtem Übergangsradius, um eine hohe Förderwirkung im oberen Bereich des Schredders zu erzielen. Einmal ergriffen, werden die Späne in die untere Wellenreihe befördert. Die Rotoren der unteren Reihe besitzen jeweils eine scharf ausgeprägte Schneide zur Zerkleinerung.

oberen Wellenreihe statt. Durch den großen Schneidspalt werden die Späne primär durch Reißbeanspruchung zerkleinert. Der zweite Zerkleinerungsprozess findet im zehntel Millimeter großen Schneidspalt der unteren Wellenreihe statt. Durch den geringen Schneidspalt findet in der unteren Wellenreihe eine Zerkleinerung primär durch Scherung statt.

Unterhalb der Wellen ist zusätzlich ein Gitterrost angeordnet, welcher die Größe des Ausgabegutes festlegt.

### 4.2.3 Radialspalt-Rotorscheren Zerkleinerer

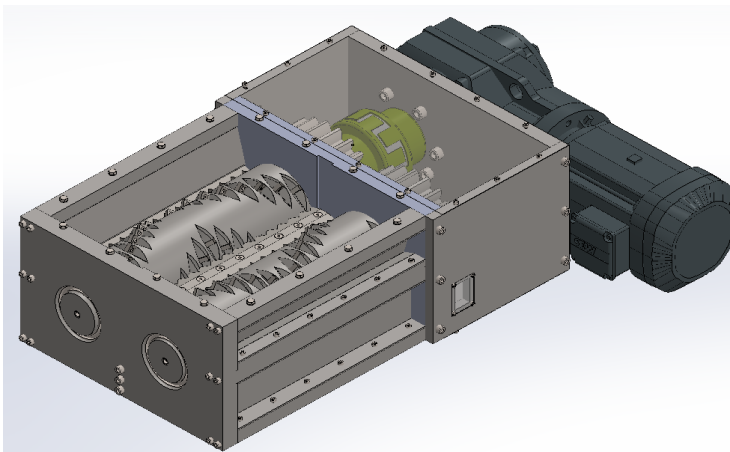


Abbildung 4-12 Radialspalt-Zerkleinerer

Der dritte Schredder ist eine Konstruktion, welche im Rahmen der Bachelorarbeit ausgearbeitet wurde. Dieser Schredder gehört zur Gruppe der Radialspalt-Rotorscheren, da eine Zerkleinerung im radialen Spalt durch primär Scher- und sekundär Reiß- und Prallbeanspruchung

stattfindet. Der Schredder besteht aus zwei Hohlwellen (5), welche parallel nebeneinander angeordnet sind. Auf der Mantelfläche der Hohlwelle sind Stabilisierungen (7) aufgeschweißt, welche als Auflagefläche für Schneidkronen (8) dienen. Die Schneidkronen sind in Form einer Welle in drei Reihen auf der Mantelfläche angeordnet. Durch die spezielle Anordnung werden gute Einzugsverhältnisse erzielt. Im Gegensatz zu den zwei anderen Konzepten, findet die Zerkleinerung bei diesem Konzept nur im radialen Spalt statt. Vorteil dieser Variante ist der geringere Aufwand für die Einrichtung der Schneiden zueinander. Im Gegensatz zu Axialspalt-Rotorscheren besteht die Welle mit Rotoren aus einem Teil, wodurch die Ausrichtung vieler einzelner Rotoren entfällt. Ein weiterer Vorteil sind wechselbare

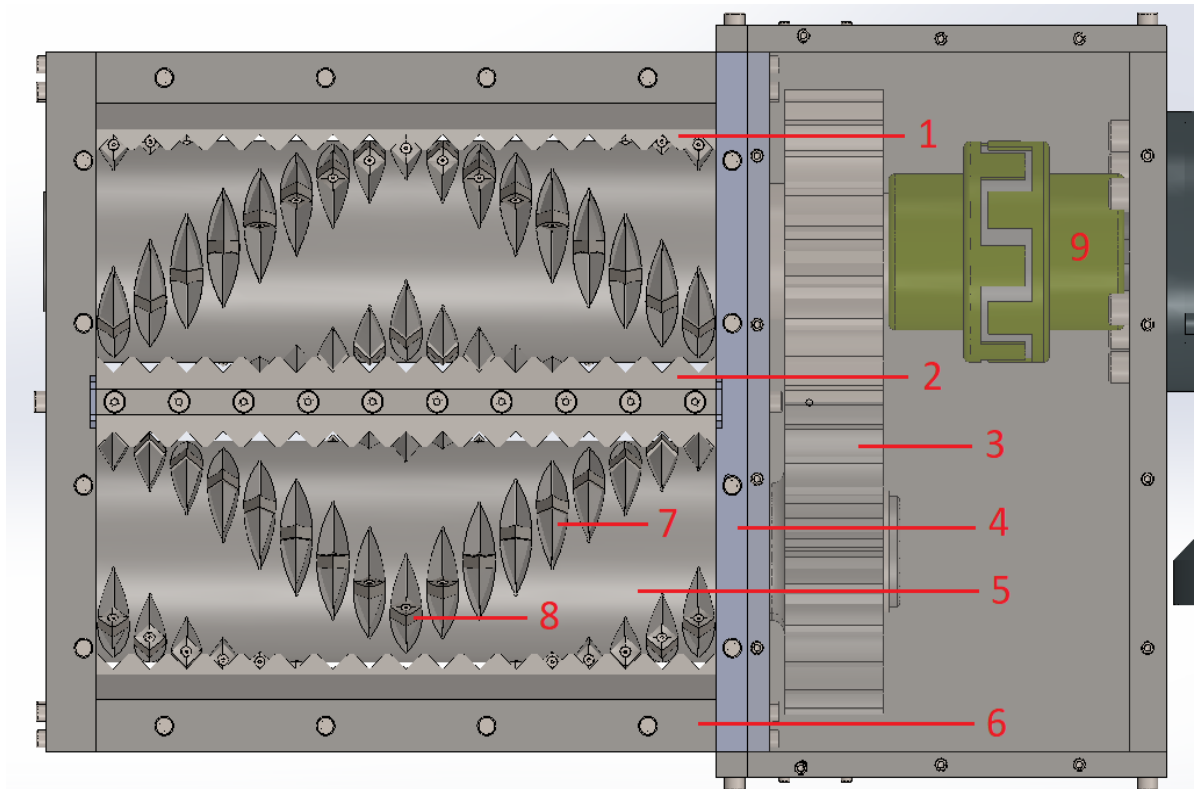


Abbildung 4-13 Beschriftung Zerkleinerer

Schneidkronen durch die Befestigung mittels Torx-Schraube. Die Schneidengeometrie wird bei diesem Konzept durch das Zusammenwirken von Schneidkrone und Amboss bestimmt. Die Schneidkrone besitzt eine quadratische Form mit einer Seitenlänge von 15 mm, sowie eine konkave Wölbung, wodurch ein Keilwinkel  $\beta_R$  von  $75^\circ$  entsteht. Durch die konkave Wölbung entsteht zugleich ein definierter Übergangsradius, welcher zusätzlich zur Anordnung der Schneidkronen die Einzugsverhältnisse verbessert. Der Freiwinkel  $\alpha_R$  wird durch die Befestigung auf der angeschweißten Stabilisierung festgelegt. Bei Eintritt der Schneidkrone in den Amboss beträgt der Freiwinkel  $\alpha_R$   $15^\circ$ .

Beide Wellen sind beidseitig auf Lagerböcken (4) kugelgelagert und über Zahnräder (3) mechanisch miteinander verbunden. Der Spanraum dieser Konstruktion besitzt steil abfallende Seitenwände, wodurch Spänen keine große Auflagefläche geboten wird. Das Gehäuse dieser Konstruktion besteht aus zwei Lagerböcken, welche durch vier Vierkantstäbe (6) miteinander verbunden sind. Die Seitenwände des Schredders bestehen aus Blechen, welche zugleich die Spanleitbleche des Schredders sind. In der Mitte des Spanraums befindet sich der Hauptamboss (2). An beiden Seitenwänden ist zusätzlich eine Amboss ähnliche Matrice (1) angebracht,

welche unerwünschten Spandurchsatz an den Seitenwänden verhindern soll. Des Weiteren können Späne erneut zerkleinert werden, falls sie den Schredder nicht verlassen haben. Angetrieben wird der Schredder über einen Getriebemotor, welche mit einer elastischen Klauenkupplung (9) an eine der beiden Wellen gekoppelt ist.

#### 4.2.4 Variantenvergleich bestehender Schredder

Tabelle 6 Vergleich Schredder

	Schredder 1	Schredder 2	Schredder 3
Hersteller	Athna	Weima	Bikar AEROSPACE
Rotor			
Abmessung, Anzahl	$d = 180 \text{ mm}$ 49 Rotoren	$d = 180 \text{ mm}$ 44 Rotoren	$d = 180 \text{ mm}$ 2 Hohlwellen
Drehzahl	$21 \frac{\text{U}}{\text{min}}$	untere Reihe $24 \frac{\text{U}}{\text{min}}$ obere Reihe $36 \frac{\text{U}}{\text{min}}$	$21 \frac{\text{U}}{\text{min}}$
Schneide	Rotor	Rotor	Schneidkronen
Schneidenzahl	147	44	102
Wellen	Sechskantwelle	Sechskantwelle	Hohlwelle
Gehäuse			
Abmessungen	1425x850x350 mm	1400x800x1000 mm	1200x800x370 mm
Austragrost	/	vorhanden	/

Kaufteile			
Motor	SEW Getriebemotor $P = 4 \text{ kW}$	2x MOLL-MOTOR mit je $P = 13,2 \text{ kW}$	SEW Getriebemotor $P = 4 \text{ kW}$
Kupplung	Flexible Klauenkupplung	Unbekannt	Flexible Klauenkupplung
Getriebe	Getriebemotor	Zahnradgetriebe Übersetzung unbekannt	Getriebemotor

## 5 Auslegung eines Späneschredders

In diesem Kapitel werden die wichtigsten Abläufe zur Auslegung eines Aluminiumspäneschredders anhand eines Beispiels erläutert. Das Beispiel stammt aus dem Betrieb Bikar AEROSPACE und konnte während der Erarbeitung ausgiebig analysiert werden. Die Formeln sowie Kennzahlen stammen hauptsächlich aus der Quelle [Q22]. Zusätzliche Quellen sind an dem jeweiligen Auszug gekennzeichnet. Anhand des Flow-Chart-Diagramms ist der allgemeine Ablauf zur Dimensionierung dargestellt.

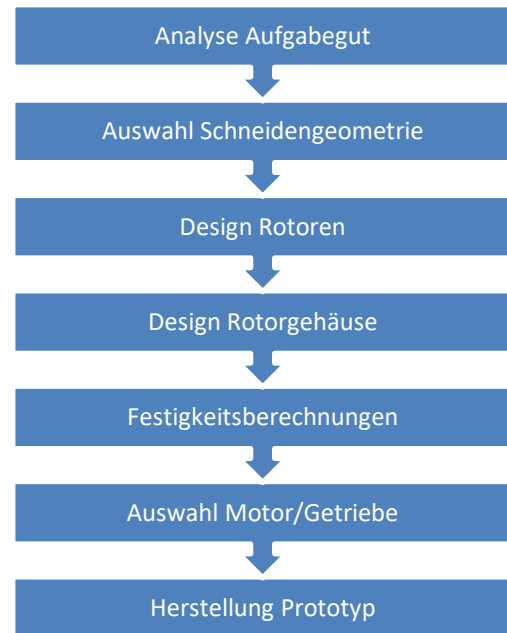


Abbildung 5-1 Ablaufdiagramm

### 5.1 Ableitungen aus der Analyse der Späne

Der Ablauf zur Auslegung eines Schredders beginnt bei der Analyse des Aufgabegutes und der Definition des Bruchgutes. Das Aufgabegut kann in die Kennwerte Werkstoff, Volumenstrom und Spanform unterschieden werden. Der Werkstoff des Aufgabegutes besitzt eine maximale Zugfestigkeit von  $R_{m \max} = 540 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$  und eine maximale Bruchdehnung von  $A = 25 \%$ . [vgl. Q2] Diese Werte stehen für eine zähen und mittelfesten Werkstoff. Unter dem Volumenstrom des Schredders versteht man das Volumen des Aufgabegutes in einer definierten Zeit. In dem Kapitel Analyse der Späne wurde der Volumenstrom des Aufgabegutes bereits ermittelt. Der letzte Kennwert ist die Spanform, welche mittels Spanformtabelle oder nach Transportfähigkeit im Kapitel Späne bewertet wurde.

Die Definition eines Bruchgutes bedeutet primär eine Spanform oder Eigenschaft festzulegen, welche die Späne nach dem Zerkleinerungsprozess besitzen sollen. In unserem Fall war der Anspruch rieselfähige Späne mit einer maximalen Länge von



20 mm. Durch die Analyse der Spanformen konnte der Einsatzbereich des Späneschredders auf das Aufgabegut von Horizontalsäge und Fräse eingegrenzt werden, da die Späne der Kreissäge die Definition des Bruchgutes erfüllen.

Anhand der Analyse, welche im Vorfeld getätigt wurde, können nun wegweisende Entscheidungen über Art und Aufbau des Zerkleinerers getroffen werden. Die Kombination von Werkstoff, Spanform und Volumenstrom des Aufgabegutes bestimmt die Art des Späneschredders. In der folgenden Tabelle ist eine Auswahl für sinnvolle Kombinationen dargestellt.

**Tabelle 7 Auswahl des Schneidenkonzepts**

Spanform Aufgabegut	Volumen- strom	Axialspalt- Rotorschere	Radialspalt- Rotorschere	Rotorreißer
1)	hoch			x
	niedrig	x	x	x
2)	hoch	x		
	niedrig	x	x	



**Abbildung 5-2 Spanform 1)**



**Abbildung 5-3 Spanform 2)**

Erklärung zur Tabelle:

Mithilfe dieser Tabelle ist die Auswahl eines Schneidenkonzeptes nach einer einfachen Unterscheidung in zwei Spanformen und einer Volumenstromberechnung möglich. Die erste Spanform besteht aus ungünstigen bis guten Spänen mit einer schlechten Transportfähigkeit. Die zweite Spanform besteht aus guten bis brauchbaren Spänen mit guter Transportfähigkeit. Der Volumenstrom wird in einen hohen Volumenstrom  $> 100000 \frac{\text{mm}^3}{\text{s}}$  und kleinen Volumenstrom  $< 100000 \frac{\text{mm}^3}{\text{s}}$  unterschieden.

Die Richtwerte zum Volumenstrom stammen aus Überschlagsrechnungen zum Durchsatz eines Späneschredder (siehe Kap. 5.2) im Zusammenhang zur Größe des Späneschredders. Da bei Axial- und Radialspalt-Rotorschern der Volumenstrom des zu zerkleinernden Aufgabegutes durch das Messerkonzept begrenzt ist, ist es sinnvoll, ab einem Volumenstrom von  $> 100000 \frac{\text{mm}^3}{\text{s}}$  über ein Rotorreißerkonzept nachzudenken, sofern das Bruchgut dies zulässt. Wenn dies nicht der Fall ist, muss die Größe des Späneschredders angepasst werden. In unserem Fall entschieden wir uns für ein Radialspalt-Rotorschern Konzept, da der Volumenstrom klein und die Anforderungen an das Bruchgut hoch waren.

Aus der Analyse des Aufgabegutes lassen sich nun weitere wichtige Information zur Gestaltung gewinnen. Im Falle eines Zerkleinerers mit Rotorschern findet die Zerkleinerung in einem zehntel Millimeter großen Spalt, also zwischen zwei definierten Kanten, statt. Um Verschleißbeständigkeit und Haltbarkeit zu gewährleisten, ist die Festlegung eines Schneidwerkstoffes von großer Bedeutung. Hierbei zu empfehlen sind Werkzeugstähle wie zum Beispiel 1.2379 oder 1.2767. Die Informationen zu den Werkzeugstählen stammen aus den Datenblättern der Quelle [Q21]. Auf den Datenblättern finden sich meist empfohlene Einsatzgebiete für die Auswahl eines Schneidstoffes. In unserem Fall entschieden wir uns für die Zerkleinerung mit einem 1.2379 Werkzeugstahl.

## 5.2 Berechnungen zur Größenauslegung

Nachdem im vorherigen Kapitel das Schneidenkonzept festgelegt wurde, wird in diesem Kapitel ein Lösungsweg zur Berechnung der Größe präsentiert. Die Formeln zur Berechnung wurden der Quelle [Q15] entnommen. Einfluss auf die Größenauslegung haben hauptsächlich der Volumenstrom des Aufgabegutes, jedoch auch nebensächliche Faktoren wie zum Beispiel Bestückungszeit und Größe des Einfülltrichters. Während der Volumenstrom und Bestückungszeit durch die Bearbeitungsmaschine bestimmt wird, lässt sich die Größe des Einfülltrichters auf die Bestückungszeit abstimmen, um somit eine konstante Zerkleinerung zu realisieren. Hauptproblemstellung bei der Berechnung der Größenauslegung ist die Förderwirkung der Späne während der Zerkleinerung. Eine wichtige Einflussgröße ist die Dichte des Aufgabegutes, da diese geringer ist als die des festen Materials. In dem folgenden Diagramm ist der Volumenunterschied zwischen Vollmaterial und den Aufgabegütern verdeutlicht.

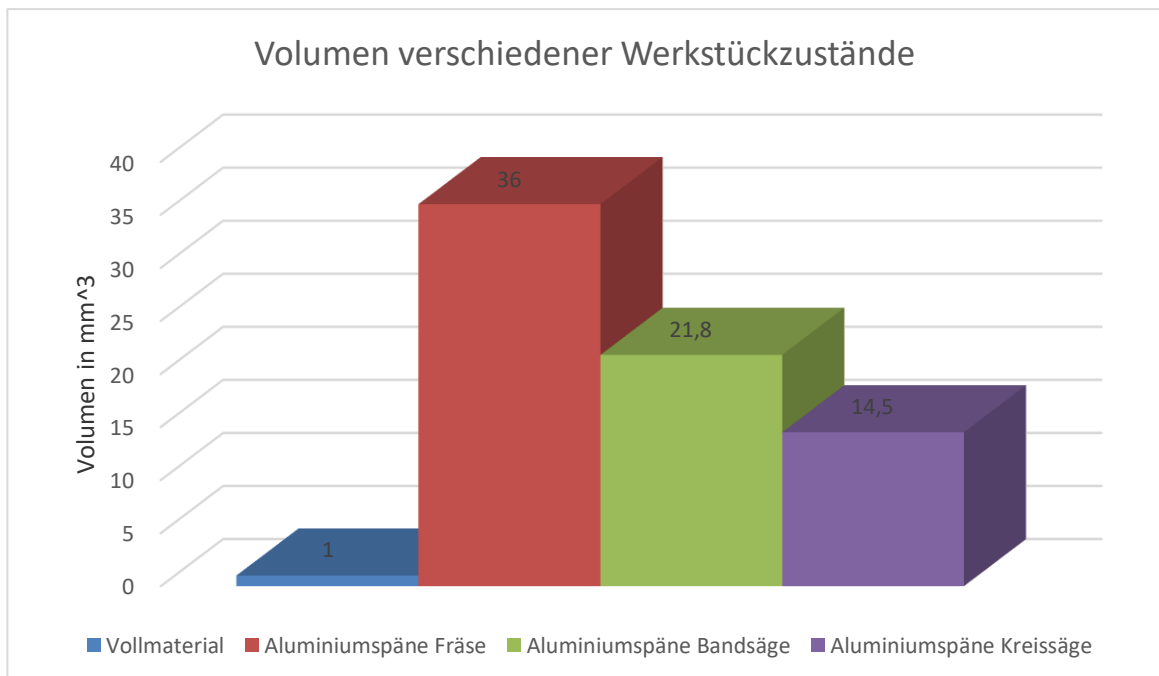


Abbildung 5-4 Diagramm Volumen Aufgabegut

Demzufolge muss die Förderwirkung auf die Dichte des Aufgabegutes angepasst werden. Die Dichte des Aufgabegutes kann jedoch nicht als konstant angenommen werden, da durch schlechten Spanbruch oder Fehler während der Bearbeitung immer neue Spanformen entstehen, welche Einfluss auf die Zerkleinerung haben. Aus diesem Grund ist es nötig, neben dem Volumenstrom eine Sicherheit für die

Förderwirkung einzuplanen. An der folgenden Rechnung werden diese Zusammenhänge verdeutlicht.

### **Berechnung des Volumenstroms des Aufgabegutes**

$$Q = \frac{V}{t} \quad (\text{Gl. 1.1})$$

In diesem Fall wurde der Volumenstrom über der Fräse ermittelt, da diese das größte Zeitspanvolumen der relevanten Maschinen besitzt.

$$Q = \frac{3 \text{ m} \cdot 1,8 \text{ m} \cdot 0,0008 \text{ m}}{5 \text{ min}} = 0,000864 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} = 0,052 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Der ermittelte Volumenstrom bezieht sich auf die Dichte von Aluminium  $\rho = 2700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ . Da der Volumenstrom nicht aus einem festen Aluminiumblock besteht, ist es notwendig, den Volumenstrom auf die Dichte des Aufgabegutes herunterzurechnen. Im Kapitel Analyse der Späne konnte ermittelt werden, dass die Späne der Fräse die geringste Dichte mit  $\rho = 75 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  hatten und somit den Extremfall für unsere Berechnungen darstellen. Der korrigierte Volumenstrom sieht somit wie folgt aus.

$$Q_{\text{korrigiert}} = \frac{\rho_{\text{Aluminium}}}{\rho_{\text{Aluminiumspäne}}} \cdot Q = \left( \frac{2700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{75 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} \right) \cdot 0,052 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} = 1,87 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \quad (\text{Gl. 1.2})$$

Der korrigierte Volumenstrom beschreibt den maximalen Durchsatz, welchen der Schredder bei Dauerbetrieb pro Stunde durchsetzen müsste. Da ein Dauerbetrieb aufgrund von Rüstprozessen nicht möglich ist, ist dieser Wert sehr hoch gerechnet und beinhaltet bei einer Rüstzeit von 5 min und einer Hauptzeit von 25 min einen Sicherheitsfaktor von  $v = 1,16$ .

### **Berechnung der Förderwirkung des Späneschredders**

In dem Buch [Q15] findet man die zwei folgenden Überschlagsformeln zur Bestimmung der Förderwirkung eines Zerkleinerers mit Rotoren. Diese Formeln können als Berechnungsgrundlage zur Dimensionierung der Größe dienen. Die Formeln zur Überschlagsberechnung lauten:

$$\dot{V} = 1,66 \cdot d_R^2 \cdot \dot{L} \cdot n_R \text{ bei } d_R > L \quad (\text{Gl. 2.1})$$

$$\dot{V} = 1,66 \cdot d_R \cdot L^2 \cdot n_R \text{ bei } d_R < L \quad (\text{Gl. 2.2})$$

$$d_R = 0,18 \text{ m}$$

$$\text{Länge aller Rotoren} = L = 0,5 \text{ m}$$

$$n_R = 21 \text{ min}^{-1}$$

In unserem Fall überschreitet die Länge des Zerkleinerers den Durchmesser der Rotoren, demzufolge ist die Gleichung 2.2 zur Berechnung auszuwählen.

$$\dot{V} = 1,66 \cdot 0,18 \text{ m} \cdot 0,5 \text{ m}^2 \cdot 1260 \frac{\text{U}}{\text{h}} = 94,12 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Mit dem korrigierten Volumenstrom des Aufgabegutes und der möglichen Förderwirkung des Schredders lässt sich nun beurteilen, ob ein Schredder ausreichend dimensioniert ist. In dem Fall des Beispielschredders ist die Förderwirkung mit  $\dot{V} = 94,12 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$  ausreichend dimensioniert und beinhaltet einen Sicherheitsfaktor von  $\nu = 50,33$ . Neben der Berechnung beeinflussen jedoch noch weitere Faktoren die Förderwirkung des Schredders. Diese Faktoren beruhen auf langfristigen Studien und sind daher in dieser Arbeit nicht erfasst worden. In der folgenden Aufzählung finden Sie ein Überblick bezüglich dieser Einflüsse:

- unterschiedliche Spanvolumen
- unterschiedliche Legierungen
- Einzug von Wollartigen Spänen
- Verschleiß der Schneidengeometrie
- Spänestau im Einzugsbereich

### 5.3 Festigkeitsberechnungen

Zur fachgerechten Auslegung einer Werkzeugmaschine gehört die Festigkeitsberechnung aller beanspruchten Maschinenelemente. Die Festigkeitsberechnung ist diesem Fall für den Beispielspäneschredder durchgeführt. Je nach Art und Ausführung des Zerkleinerers können weitere Maschinenelemente oder Verbindungen zu der Berechnung hinzukommen. Die Reihenfolge der Berechnungen richtet sich entlang des Kraftweges ausgehend von den Schneiden. Die Formeln zu den Festigkeitsberechnungen stammen aus der Quelle [Q11], insofern nichts anderes angegeben ist. Zur Vereinfachung wird der Antriebsstrang auf der folgenden Abbildung berechnet.

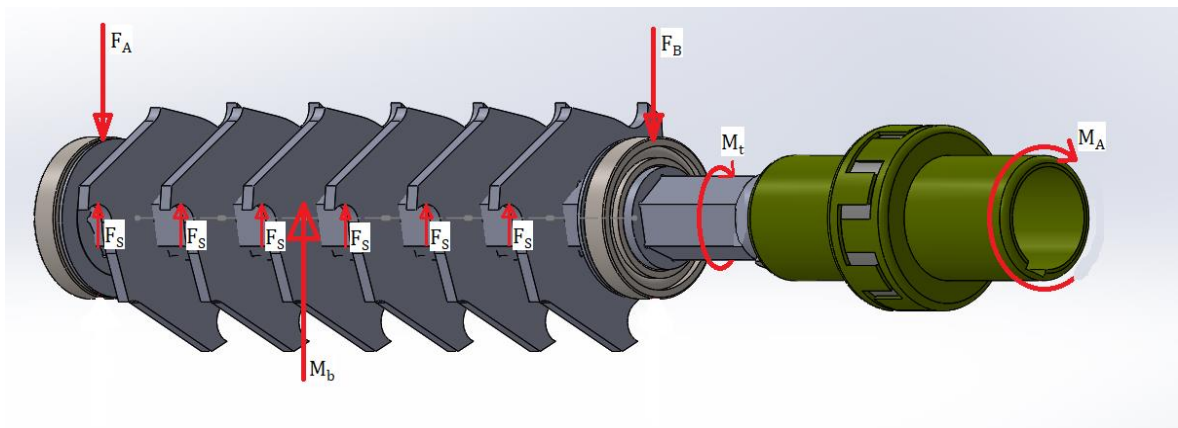


Abbildung 5-5 Beispielwelle für Berechnung

#### **Berechnung Festigkeit Schneiden**

Die Schneiden bzw. der Amboss stellen die höchstbelasteten Bauteile in einem Zerkleinerer dar. Demzufolge ist ihre Dimensionierung essenziell für die Funktionsweise des Späneschredders. Da die Beanspruchungsart bei Rotorscheren primär auf Scherung beruht, ist eine statische Festigkeitsberechnung auf Scherung notwendig. Die Kontrolle sieht dabei vor, dass die Scherfestigkeit der Schneide um einen Sicherheitsfaktor  $\nu = 1,7$  [Q11] größer ist als die Scherfestigkeit des Aufgabegutes.

$$\tau_{aBmax\ Schneide} \geq \tau_{aBmax\ Aufgabegut} \cdot \nu \quad (\text{Gl. 3.1})$$

$$696 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \geq 484,5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Die maximalen Scherfestigkeiten für Aluminium und Stahl lassen sich näherungsweise mit den folgenden Formeln berechnen.

$$\tau_{aBmax\ Aufgabegut} = 0,6 \cdot R_{p\ 0,2} \quad (\text{Gl. 3.2})$$

$$\tau_{aBmax} = 0,6 \cdot R_{p\ 0,2} = 0,6 \cdot 475 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 285 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$R_{p\ 0,2} = 475 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \text{ [Q2]}$$

$$\tau_{aBmax\ Schneide} = 0,8 \cdot R_{m\ max}(1.2379) \quad (\text{Gl. 3.3})$$

$$\tau_{aBmax} = 0,8 \cdot R_{m\ max} = 0,8 \cdot 870 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 696 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$R_{m\ max} = 870 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \text{ [Q21]}$$

Der Werkzeugstahl 1.2379 ist zulässig für die Scherbeanspruchung, da die Scherfestigkeit um einen Sicherheitszahl von  $\nu = 2,44$  größer ist und die notwendige Sicherheitszahl  $\nu = 1,7$  somit übersteigt.

### **Berechnung Festigkeit Wellen**

Wellen sind Rotationskörper, welche durch eine tangentielle Krafteinleitung beispielsweise über ein Zahnrad angetrieben werden und immer ein Drehmoment übertragen. Diese Kraft wirkt sich als Torsionsmoment  $M_t$  sowie Biegemoment  $M_b$  auf die Welle aus. Das Torsionsmoment ist zuständig für die Rotation der Welle und somit auch für die Kraft, welche die Zerkleinerung ausübt. Wenn eine Welle zu gering dimensioniert ist, sorgt das Torsionsmoment  $M_t$  für eine Verdrehung der Welle. Das Biegemoment hingegen ist zuständig für die Durchbiegung zwischen den Lagern.

Zunächst ist es notwendig, einen vorläufigen Wellendurchmesser zu dimensionieren. Im Anschluss muss aufgrund der schwellenden dynamischen Belastung ein dynamischer Spannungsnachweis durchgeführt werden. In der Berechnung wird der Werkstoff 41Cr4 auf Festigkeit überprüft. Die vorliegende Welle ist eine

Sechskantwelle mit einem Absatz auf einer Seite, welche mithilfe aufgesteckter Lagersitze auf Kugellagern gelagert ist.

Die Formel zur Berechnung des Wellendurchmessers bei Torsion und Spannung lautet:

$$d \approx 3,4 \cdot \sqrt[3]{M_v / \sigma_{grenz}} \approx 3,4 \cdot \sqrt[3]{786337 \text{ Nmm} / 800 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}} = \mathbf{33,81 \text{ mm}} \quad (\text{Gl. 4.1})$$

$$\sigma_{grenz} = 800 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad [\text{Q11}]$$

$$M_v = \sqrt{M_b^2 + 0,75 \cdot (\alpha_0 \cdot M_t)^2} =$$

$$\sqrt{598500 \text{ Nmm}^2 + 0,75 \cdot (1 \cdot 588924 \text{ Nmm})^2} = \mathbf{786337 \text{ Nmm}} \quad (\text{Gl. 4.2})$$

$$\alpha_0 = 1, \text{ da gleicher Lastfall von Biegung \& Torsion (schwellend) } [\text{Q11}]$$

Für die Berechnung des Vergleichsmomentes  $M_v$  ist es zunächst notwendig, das Torsionsmoment  $M_t$  zu ermitteln. Je nach Anzahl der gleichzeitig im Eingriff befindlichen Schneiden muss das Torsionsmoment erweitert werden. In unserem Fall sind sechs Schneiden gleichzeitig im Eingriff.

$$M_t = F \cdot r \cdot \text{Anzahl der Schneiden} = 82 \text{ mm} \cdot 1197 \text{ N} \cdot 6 = \mathbf{588924 \text{ Nmm}} \quad (\text{Gl. 4.3})$$

$$F = \tau_{aBmax} (\text{ENAW} - 7075) \cdot S = 285 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 4,2 \text{ mm}^2 = \mathbf{1197 \text{ N}} \quad (\text{Gl. 4.4})$$

$$\tau_{aBmax} (\text{EN AW} - 7075) = (\text{Gl. 3.2})$$

$$S = U \cdot s = 60 \text{ mm} \cdot 0,07 \text{ mm} = 4,2 \text{ mm}^2 \quad (\text{Gl. 4.5})$$

Problem dieser Formel ist die Dicke des Aufgabegutes  $s$ . Aufgrund der losen Späne lässt sich keine bestimmte Dicke  $s$  definieren, da es während der Rotation der Welle zu einer Verdichtung der losen Späne im Einzugsbereich kommt. Des Weiteren können die Späne in unterschiedlicher Ausrichtung in den Schneidspalt gelangen. Aus diesem Grund wird die Spandicke näherungsweise mit dem höchsten durchschnittlichen Spanquerschnitt der drei Bearbeitungsverfahren bestimmt. Dieser beträgt



0,07 mm und stammt aus der Fräsbearbeitung (Gl. 3.3). Der Umfang einer Schneide beträgt 60 mm.

Die letzte fehlende Variable ist das Biegemoment  $M_b$ , welches sich mithilfe der Gleichgewichtsbedingungen von Kräften berechnen lässt. Die Gleichgewichtsbedingung *I* fällt weg, da in axialer Richtung keine Kräfte auf die Welle wirken. Mithilfe der Gleichgewichtsbedingung *II* lassen sich die Auflagerkräfte  $F_A$  und  $F_B$  und mit der Gleichgewichtsbedingung *III* das maximale Biegemoment der Welle berechnen.

$$I \sum F_y = 0, \text{ entfällt} \quad (\text{Gl. 4.6})$$

$$II \sum F_x = 0 \quad (\text{Gl. 4.7})$$

$$II \sum F_{x_A} = F_A - 6 \cdot F + F_B = 0, \quad \mathbf{F_A = 3591 \text{ N}}$$

$$F = 1197 \text{ N} = (\text{Gl. 4.4})$$

$$l = 500 \text{ mm} = \text{Abstand der Lager}$$

$$F_B = 3591 \text{ N} = (\text{Gl. 4.8})$$

$$III \sum M = 0 \quad (\text{Gl. 4.8})$$

$$III \sum M = F \cdot \frac{1}{7} \cdot l + F \cdot \frac{2}{7} \cdot l + F \cdot \frac{3}{7} \cdot l + F \cdot \frac{4}{7} \cdot l + F \cdot \frac{5}{7} \cdot l + F \cdot \frac{6}{7} \cdot l - F_B \cdot l = 0, \quad \mathbf{F_B =}$$

$$\mathbf{3591 \text{ N}}$$

$$F = 1197 \text{ N} = (\text{Gl. 4.4})$$

$$l = 500 \text{ mm} = \text{Abstand der Lager}$$

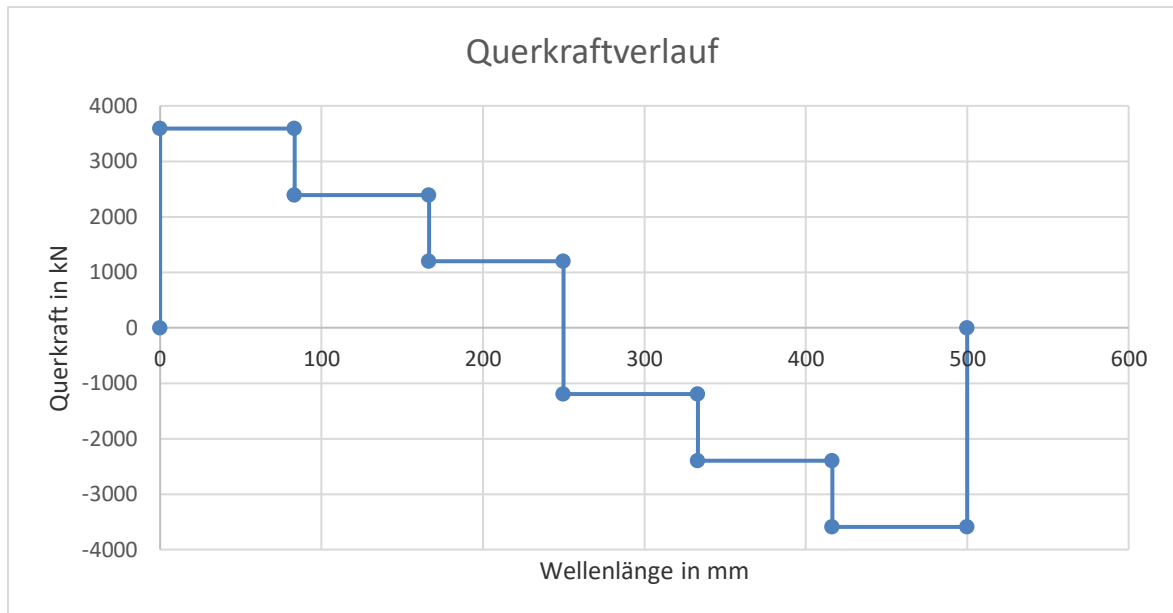


Abbildung 5-6 Querkraftverlauf Welle

Anhand des Querkraftverlaufs der wirkenden Kräfte lässt sich die Stelle des größten Biegemoment ermitteln. Das größte Biegemoment liegt im Querkraftverlauf an einer Nullstelle an. Berechnet wird es mit der folgenden Formel.

$$M_{bmax} = F \cdot \frac{1}{6} \cdot l + F \cdot \frac{2}{6} \cdot l - F_B \cdot \frac{3}{6} \cdot l = \mathbf{598500 \text{ Nmm}} \quad (\text{Gl. 4.9})$$

Der Mindestwellendurchmesser der Vordimensionierung für den Werkstoff 41Cr4 beträgt **d ≥ 33,81 mm**.

Im Anschluss an die Vordimensionierung wird ein vereinfachter Spannungsnachweis über die dynamische Belastung der Welle durchgeführt. Der Nachweis über ausreichende Dimensionierung erfolgt mit den folgenden Formeln:

$$\sigma_{avorh} \leq \sigma_{zul} \quad (\text{Gl. 4.10})$$

$$\mathbf{228,88 \frac{N}{mm^2} \leq 126,7 \frac{N}{mm^2}, \text{ nicht erfüllt}}$$

$$\tau_{avorh} \leq \tau_{zul} \quad (\text{Gl. 4.11})$$

$$\mathbf{123,88 \frac{N}{mm^2} \leq 76 \frac{N}{mm^2}, \text{ nicht erfüllt}}$$

$$\sigma_{avorh} = \frac{M_b}{W} = \frac{598500 \text{ Nmm}}{2614,9 \text{ mm}^3} = \mathbf{228,88 \frac{N}{mm^2}} \quad (\text{Gl. 4.12})$$

$$W = \frac{5 \cdot \sqrt{3} \cdot d^3}{128} = \frac{5 \cdot \sqrt{3} \cdot 33,81 \text{ mm}^3}{128} = 2614,9 \text{ mm}^3 \quad (\text{Gl. 4.13})$$

$$M_b = 598500 \text{ Nmm} = \text{Gl. 4.6}$$

$$\tau_{avornh} = \frac{M_t}{W_p} = \frac{588924 \text{ Nmm}}{4753,8 \text{ mm}^3} = \mathbf{123,88} \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad (\text{Gl. 4.14})$$

$$W_p = 0,123 \cdot d^3 = 0,123 \cdot 33,81 \text{ mm}^3 = 4753,8 \text{ mm}^3 \quad (\text{Gl. 4.15})$$

$$M_t = 588924 \text{ Nmm} = \text{Gl. 4.3}$$

$$\sigma_{zul} = \frac{\sigma_{GW}}{\nu_D} = \frac{190 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{1,5} = \mathbf{126,7} \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad (\text{Gl. 4.16})$$

$$\nu_D = 1,5 \text{ [Q11]}$$

$$\sigma_{GW} = \frac{\sigma_W \cdot b_1 \cdot b_2}{\beta_{kb}} = \frac{500 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 1 \cdot 0,76}{2} = 190 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad (\text{Gl. 4.17})$$

$$\sigma_W = 500 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \text{ [Q11]}$$

$$\beta_{kb} = 2 \text{ [Q11]}$$

$$b_1 = 1 \text{ [Q11]}$$

$$b_2 = 0,76 \text{ [Q11]}$$

$$\tau_{zul} = \frac{\tau_{GW}}{\nu_D} = \frac{114 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{1,5} = \mathbf{76} \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad (\text{Gl. 4.18})$$

$$\nu_D = 1,5 \text{ [Q11]}$$

$$\tau_{GW} = \frac{\tau_W \cdot b_1 \cdot b_2}{\beta_{kt}} = \frac{300 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 1 \cdot 0,76}{2} = 114 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad (\text{Gl. 4.19})$$

$$\tau_W = 300 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \text{ [Q11]}$$

$$\beta_{kt} = 2 \text{ [Q11]}$$

$$b_1 = 1 \text{ [Q11]}$$

$$b_2 = 0,76 \text{ [Q11]}$$

In diesem Fall ist weder die Sicherheit gegen Biegung ( $\sigma_{zul} < \sigma_{avorh}$ ), noch die Sicherheit gegen Torsion ( $\tau_{zul} \ll \tau_{avorh}$ ) gegeben. Somit ist eine Neudimensionierung des Wellenquerschnitts notwendig, bis die Sicherheit gegen Dauerbruch für Biegung und Torsion gegeben ist. Neben dem Querschnitt können weitere Parameter, zum Beispiel der Werkstoff der Welle oder die Art der Welle (Keilwelle, Rundwelle u.a.), verändert werden.

### **Berechnung Festigkeit Lager**

Lager dienen zur Führung beweglicher Maschinenelemente. Dabei können sie bestimmte Freiheitsgrade der Bauteile zulassen oder beschränken. In dem Fall der Welle nehmen die Lager Axial- sowie Radialkräfte auf. Aufgrund fehlender axialen Krafteinwirkung im Schredder wird die axiale Lagerkraft in der Berechnung vernachlässigt. Ziel der Lagerauswahl ist die Bestimmung der nominellen Betriebsdauer eines Lagers. Damit wird anhand von Richtwerten abgeschätzt, ob es für die Anwendung geeignet ist oder größer dimensioniert werden muss.

$$l_{10h\text{ erf}} \leq l_{10h}$$

$$l_{10h\text{ erf}} = 30000 \text{ h [Q11]}$$

$$l_{10h} = \frac{l_{10}}{60 \cdot n} = \frac{1280995505}{60 \cdot 21 \text{ min}^{-1}} = \mathbf{448348 \text{ h}} \gg \mathbf{30000 \text{ h}} \quad (\text{Gl. 5.1})$$

$$l_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^3 \cdot 10^6 = \left(\frac{39000 \text{ N}}{3591 \text{ N}}\right)^3 \cdot 10^6 = 1280995505 \quad (\text{Gl. 5.2})$$

$$P = X \cdot F_r + F_A \cdot Y = 3591 \text{ N} \cdot 1 = 3591 \text{ N} \quad (\text{Gl. 5.3})$$

$$X = 1, Y = 0 \text{ [Q11]}$$

$$F_r = 3591 \text{ N} = (\text{Gl. 4.7})$$

$$C = 39 \text{ kN [Q11]}$$

In diesem Fall ist das Lager 6014 für die vorliegende Beanspruchung überdimensioniert. Somit wäre eine neue Lagerauslegung möglich.

### **Berechnung Auswahl Motor**

Der Motor dient zum Antrieb der Zerkleinerungsmaschine. Die Antriebsleistung muss ausreichend dimensioniert werden, um das gegenläufige Torsionsmoment zu überwinden. Der Wirkungsgrad  $\eta_K$  der Kupplung wird mit 1 angenommen.

Die Nennleistung  $P_N$  des Motors errechnet sich mit der folgenden Formel.

$$P_N = \frac{M_L \cdot n}{9550} = \frac{588,92 \text{ Nm} \cdot 21 \text{ min}^{-1}}{9550} = \mathbf{1,3 \text{ kW}} \quad (\text{Gl. 6.1})$$

$$M_L = M_t = 588,92 \text{ Nm} = (\text{Gl. 4.3})$$

$$n = 21 \text{ min}^{-1}$$

Motorauswahl: K77DRN100L4 [Q7]

Der Motor wurde ausgewählt, da er eine ausreichende Leistung besitzt, die geforderte Drehzahl erfüllt und das Antriebsmoment höher ist als das Lastmoment der Arbeitsseite. Ein weiterer wichtiger Schritt ist das Angleichen der Massenträgheiten zwischen Last- und Antriebsseite. Bei einem hohem Verhältnis von zum Beispiel 20:1 kann es ansonst passieren, dass die Lastseite den Motor dreht und nicht andersherum.

Bei der Berechnung mehrere Wellen werden die weiteren Lastmomente unter Berücksichtigung von Übersetzungsverhältnissen und Wirkungsgraden hinzuaddiert. Für den Dauerbetrieb S1 muss das Nennmoment  $M_N$  dauerhaft über dem Lastmoment  $M_L$  liegen, da der Motor ansonsten überhitzen könnte, was zu Ausfall führen würde.

### **Berechnung Festigkeit Kupplung**

Die Kupplung dient zur Übertragung des Antriebsmomentes auf die Welle. Dabei muss sie in der Lage sein, Drehmomentspitzen abzdämpfen, um einen gleichmäßigen Zerkleinerungsprozess zu realisieren. In den Datenblättern von Kupplungen stehen Angaben zum dauerhaft übertragbaren Torsionsmoment sowie zum übertragbaren Ausschlagstorsionsmoment. Anhand der Angaben lässt sich schnell die geeignete Kupplung finden.

Eine mögliche Kupplung ist die elastische Klauenkupplung KLST der Firma Dellner-Bubenger. Diese eignet sich für den Einsatz, da sie Drehmomentspitzen sehr gut abbaut. [vgl. Q5]

Für eine sichere Kupplungsauslegung ist die Berechnung des Nenndrehmomentes  $T_{KN}$  und des Drehmomentes bei einer Stoßbelastung  $T_{Kmax}$  notwendig. Mithilfe der Datenblätter ist anschließend eine geeignete Kupplung auszuwählen. Die Formeln zur Festigkeitsberechnung der Kupplung stammen aus dem Skript. [Q16] Die Leistung und Drehzahl stammen aus den SEW-Datenblättern für den ausgewählten Motor. [Q7]

$$T_{KN} \geq T_N \cdot S_t = 1302,3 \text{ Nm} \cdot 1,4 = \mathbf{1562,76 \text{ Nm}} \quad (\text{Gl. 7.1})$$

$$T_N = \frac{9550 \cdot P_{Motor}}{n} = \frac{9550 \cdot 3 \text{ kW}}{22 \text{ min}^{-1}} = 1302,3 \text{ Nm} \quad (\text{Gl. 7.2})$$

$$S_t = 1,2 \text{ [Q16]}$$

$$T_{kmax} \geq T_S \cdot S_t = 2330,98 \text{ Nm} \cdot 1,2 = \mathbf{2797,18 \text{ Nm}} \quad (\text{Gl. 7.3})$$

$$T_S = T_{LN} \cdot \frac{J_A}{J_A + J_L} \cdot S_L = 9,52 \text{ Nm} \quad (\text{Gl. 7.4})$$

$$T_{LN} = 942,28 \text{ Nm}$$

$$J_A = 118 \cdot 10^{-4} \text{ kgm}^2 \text{ [Q7]}$$

$$J_L = 2,09 \text{ kgm}^2 \text{ [Q7]}$$

$$S_L = 1,8 \text{ [Q16]}$$

$$T_S = T_{AN} \cdot \frac{J_L}{J_A + J_L} \cdot S_A = \mathbf{2330,98 \text{ Nm}} \quad (\text{Gl. 7.5})$$

$$T_{AN} = 1302,3 \text{ Nm}$$

$$J_A = 118 \cdot 10^{-4} \text{ kgm}^2 \text{ [Q7]}$$

$$J_L = 2,09 \text{ kgm}^2 \text{ [Q7]}$$

$$S_A = 1,8 \text{ [Q16]}$$

Mithilfe des Nenndrehmomentes und des maximalen Ausschlagmomentes der Kupplung ist dem Datenblatt aus der Quelle [Q5] die Kupplung KLST 230, als ausreichend dimensionierte Kupplung, zu entnehmen.

## **6 Notwendigkeit / Einsatz eines Schredders**

### **6.1 Gründe für den Einsatz eines Schredders**

In Betrieben mit spanenden Prozessen sorgen „ungünstige“ Spanformen häufig für Probleme in der Prozesskette. Damit einhergehend sind unerwünschte Spanwollen, zusätzliche Eingriffe von Mitarbeitern und schlechte Voraussetzungen für die Weiterverarbeitung. Aus diesem Grund stellen Späne oft einen weit unterschätzten Kostenfaktor mit Optimierungspotential dar. Durch den Einsatz eines Späneschredders zwischen der spanenden Bearbeitungsmaschine und der Weiterverarbeitung, zum Beispiel durch eine Brikettiermaschine, lassen sich unnötige Arbeitsgänge wie das Reinigen der Brikettiermaschine verringern. Ein weiterer Vorteil sind die damit fallenden Personalkosten.

Durch die geschredderten Späne mit geringerer Dichte ist eine effizientere Brikettierung möglich. Die kurzen rieselfähigen Späne werden innerhalb der Presse effizienter von der Spindel befördert als wollige Späne, wodurch in kürzerer Zeit eine größere Menge Material zu Briketts verdichtet wird. Des Weiteren kann bei gleichem Kraftaufwand eine größere Menge Material verdichtet werden, da weniger Verformungskräfte überwunden werden müssen. Schlussendlich lässt sich durch den korrekten Einsatz in der Prozesskette Zeit, Geld, Mitarbeiter und Arbeit ersparen.

### **6.2 Gründe gegen den Einsatz eines Schredders**

Neben einer ganzen Reihe Vorteile, welche der Schredder mit sich bringt, gibt es auch einige Nachteile. Durch die aufwendige Geometrie eines Schredders benötigt es ein hohes Know-how zur Entwicklung. Damit einhergehend sind hohe Herstellungskosten, welche durch zeitintensive Konstruktion und Erprobung entstehen. Während der Bearbeitung sind die Schneidekomponenten sehr hohen Belastungen ausgesetzt. Daher ist es wichtig, Verschleißteile, vor allem die Schneiden aus verschleißfesten Werkzeugstählen herzustellen. Das ist nicht nur aufwendig, sondern



auch teuer. Anhand der Schneiden des Schredders definiert sich schlussendlich der geschnittene Span. Somit ist die vielfältige Einsetzbarkeit eines Schredders begrenzt. Jeder Schredder ist für einen bestimmten Zweck konzipiert und kann auch nur in diesem Bereich optimale Ergebnisse abliefern.

## 7 Fazit

Das Ziel dieser Bachelorarbeit war die Auslegung eines Aluminiumspäneschredders anhand eines Beispielschredders. Um diesen Ablauf zu erklären, wurden vorherige Analysen zu den Spänen der spanenden Bearbeitungsverfahren, Vergleiche bestehender Zerkleinerer und Vergleiche über verschiedene Schneidengeometrien durchgeführt.

In dieser Arbeit wurde nach ausgiebiger Quellenarbeit und Analyse ein Späneschredder ausgelegt. Aufgrund des Umfangs des Themengebietes wurden in dieser Arbeit alle drei relevanten Schneidengeometrien aufgeführt, jedoch bei der Auslegung auf das Axialspalt-Konzept beschränkt.

Durch die Analyse des Aufgabegutes der drei spanenden Verfahren konnte festgestellt werden, dass ein Zerkleinerer nur bei zwei der drei Verfahren notwendig ist. Anhand des Spanvolumens konnte der erforderliche Durchsatz des Zerkleinerers ermittelt werden. Durch die Dokumentation aller ermittelten Informationen konnte zunächst ein sinnvolles Konzept für den Zerkleinerer erstellt werden. Im Anschluss wurde dieses Konzept durch Berechnungen zu Durchsatz und Festigkeit ausgelegt.

Durch diese Arbeit wurde gezeigt, dass die Auslegung eines konkurrenzfähigen Aluminiumspänezerkleinerers möglich ist.

## Literaturverzeichnis

- [Q1] Aluminium Deutschland e.V. (25.08.2023). *Aluminium Deutschland*.  
<https://www.aluminiumdeutschland.de/>
- [Q2] AMCO Metalle. (03.08.2023). *Datenblätter Werkstoffe*. <https://amco-metall.de/download/>
- [Q3] Bauer, R. *Skript Abtrenntechnik*. Hochschule Mittweida.
- [Q4] Bikar Metalle GmbH. (20.07.2023). *Produktpalette*. <https://www.bikar.com/>
- [Q5] DellnerBubenzer. (28.07.2023). *Datenblätter Kupplungen*.  
<https://www.dellnerbubenzer.com/product-types/couplings>
- [Q6] Dietrich, J. (2016). *Praxis der Zerspantechnik* (12. Auflage.). Dresden: Springer Vieweg.
- [Q7] SEW Eurodrive. (18.08.2023). *Datenblätter Motoren*. <https://download.sew-eurodrive.com/download/pdf/23478055.pdf>
- [Q8] AKE GmbH. (27.07.2023). *Datenblatt Kreissägeblatt*. <https://ake.de/flip-pdf/de/AKE%20Aluminiumprogramm/mobile/index.html>
- [Q9] Arntz GmbH. (10.08.2023). *Datenblatt Sägeband*.  
[https://www.arntz.de/media/253/download/ARNTZ\\_FactBook\\_DE\\_23.pdf?v=7&inline=1](https://www.arntz.de/media/253/download/ARNTZ_FactBook_DE_23.pdf?v=7&inline=1)
- [Q10] RUF Brikettiersysteme GmbH. (15.07.2023). *Funktionsweise Brikettiersysteme*.  
<https://www.brikettieren.de/>
- [Q11] Gomeringer, R., Heinzler, M., Kilgus, R., Menges, V., Oesterle, S., Rapp, T., . . . Wienecke, F. (2017). *Tabellenbuch Metall* (47. Auflage.). Haan- Gruiten: Europa Lehrmittel.
- [Q12] Gross Dietmar., S. T. (2015). *Bruchmechanik* (6. Auflage.). Springer Vieweg.
- [Q13] Hahn, F. *Skript Grundlagen der Werkstofftechnik*. Hochschule Mittweida
- [Q14] Hans Kurt Tönshoff, B. D. (2004). *Spanbildung* (2. Auflage.). Berlin Heidelberg: Springer.
- [Q15] Höfl, K. (1986). *Zerkleinerungs-und Klassiermaschinen*. Berlin: Springer Verlag.
- [Q16] Hübler, J. *Antriebstechnik Seminar*. Hochschule Mittweida
- [Q17] Imkenberg. (26.08.2023). *Fachwissen Technik*. <https://www.fachwissen-technik.de/index.html>
- [Q18] LachDiamant. (23.08.2023). *Datenblatt Wendeschneidplatten*. [https://www.lach-diamant.de/wp-content/uploads/2021/07/ISO-Nummernschluessel\\_Schneidplatten\\_2-1250x1536.png](https://www.lach-diamant.de/wp-content/uploads/2021/07/ISO-Nummernschluessel_Schneidplatten_2-1250x1536.png)
- [Q19] Lehrerfreund GmbH. (14.08.2023). *Technische Berechnungsformeln*.  
<https://www.lehrerfreund.de/technik>

- [Q20] Meusburger. (20.08.2023). *Schnittdaten Meusburger*.  
<https://schnittdaten.meusburger.com/mittlere-spandicke/>
- [Q21] Stauberstahl. (17.08.2023). *Datenblätter Werkstoff*. <https://www.stauberstahl.com/>
- [Q22] Weidemann, F., Rieg, F., Engelken, G., Hackenschmidt, R., & Alber-Laukant, B. (2018). *Decker Maschinenelemente*. München: Hanser.
- [Q23] Woldt, D. I. (2004). *Zerkleinerung nicht spröder Stoffe in Rotorscheren und -reißern*. Freiberg. TU Freiberg.
- [Q24] Utopia. (29.09.2023). *Wie schädlich ist Aluminium für Umwelt und Gesundheit*. <https://utopia.de/ratgeber/wie-schaedlich-ist-aluminium-fuer-umwelt-und-gesundheit/>.
- [Q25] wiwiweb.de Digitale Prüfungsvorbereitung. (29.09.2023). *Schaubild trennende Verfahren*. <https://www.wiwiweb.de/fertigungstechnik/html>.
- [Q26] IndustryArena. (03.10.2023). *Website zu Fräsmaschinen*. <https://de.industryarena.com/wiki/Fr%C3%A4smaschine>.
- [Q27] NortonAbrasives. (03.10.2023). *Der ultimative Leitfaden für Sägeblattzähne*. <https://www.nortonabrasives.com/de-de/downloads/technische-informationen/anwendungen/der-ultimative-leitfaden-fur-sageblattzahne>.
- [Q28] backend.kuhn. (03.10.2023). *Bild von Fräswerkzeugen*. 1616 [https://backend.kuhn-fachmedien.de/wp-content/themes/kuhn-backend/uploads/firmendaten/1616486895-Jongen\\_Bild\\_1024.jpg486895-Jongen\\_Bild\\_1024.jpg](https://backend.kuhn-fachmedien.de/wp-content/themes/kuhn-backend/uploads/firmendaten/1616486895-Jongen_Bild_1024.jpg486895-Jongen_Bild_1024.jpg) (1024×754) (kuhn-fachmedien.de).
- [Q29] Sägeblatt.shop. (03.10.2023). *Bild von Sägeblatt mit Wechselzahn*. <https://cdn.eazytion.de/img/800x800.jpeg>.
- [Q30] conrad.de. (03.10.2023). *Bild von Sägeblatt mit TCG*. R.574053b18d0d07afacd9a8a076b8f1a8 (300×413) (bing.com).
- [Q31] directindustry.de. (03.10.2023). *Bild von Metall Schredder*. [https://img.directindustry.de/images\\_di/photo-g/51431-12629877.jpg](https://img.directindustry.de/images_di/photo-g/51431-12629877.jpg).
- [Q32] qvc.com. (03.10.2023). *Bild von Papier Schredder*. <https://qvc.scene7.com/is/image/QVC/e/58/e250958.002>.

# Anhang

## 1. Excel-Berechnungstool für Schnittwerte bei Säge- und Fräsprozessen

<b>Tool Berechnung Schnittparameter</b>			
<b>Eingabe</b>			
<b>Sägeblatt</b>		<b>Sägeband</b>	
Durchmesser Sägeblatt	550 mm	Bandbreite	1,6 mm
Blattbreite	6 mm	Bandhöhe	80 mm
Zähnezahl	60	Teilung	20,32 mm
Drehzahl	2600 U/min	Schnittgeschwindigkeit	46666,67 mm/s
Vorschubgeschwindigkeit	167 mm/s	Vorschubgeschwindigkeit	2,16 mm/s
<b>Platte</b>		<b>Fräswerkzeug</b>	
Plattenlänge	3000,0mm	Messerkopfdurchmesser	2500 mm
Plattendicke	40,0mm	Anzahl WSP	15
Plattenbreite	2200,0mm	Schnitttiefe	0,8 mm
<b>Korrekturfaktoren</b>		Drehzahl	358 U/min
Schnittgeschwindigkeit		Vorschubgeschwindigkeit	10 mm/s
Hartmetall	1	Schnittbreite	2200, mm
SS-Werkzeuge	1,15	<b>Werkstoff</b>	
Spanstauchung	1,2	$k_{c1.1}$	780
Verschleißfaktor	1,3	$m_c$	0,23
<b>Ausgabe (Berechnung)</b>			
	<b>Kreissäge</b>	<b>Bandsäge</b>	<b>Fräse</b>
Vorschub je Zahn	0,064 mm	0,001 mm	0,112 mm
Schnittgeschwindigkeit	74874,62 mm/s		46862,09 mm/s
Hauptzeit	18 s	1.389 s	300 s
Eingriffswinkel	8,3°		139,5°
Zähne/WSP im Eingriff	1,4	147,6	5,8
Umrechnungsfaktor h	0,001	0,001	0,112
spez. Schnittkraft	5869,71 N/mm <sup>2</sup>	6044,27 N/mm <sup>2</sup>	2014,37 N/mm <sup>2</sup>
Schnittkraft	3135,63 N	1342,86 N	751,81 N
Schnittleistung	31198,75 W	5930,5 W	35452,85 W
Zeitspanvolumen	39998,4 mm <sup>3</sup> /s	7603,2 mm <sup>3</sup> /s	17600, mm <sup>3</sup> /s
Vorschub je Umdrehung			1,68 mm

## **Selbstständigkeitserklärung**

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Bad Köstritz, den 06.10.2023

Johannes Paul Schmid