Fraunhofer Institut
Umwelt-, Sicherheits-,
Energietechnik UMSICHT

Endbericht Forschungsvorhaben 0311982

Nagetierzähne als Vorbild für selbstschärfende, schnitthaltige Zerkleinerungswerkzeuge

Bearbeitung

Dipl.-Ing. Marcus Rechberger
Tel.: 0208-8598-1405
marcus.rechberger@umsicht.fhg.de

Dipl.-Ing. Jürgen Bertling
Tel.: 0208-8598-1168
juergen.bertling@umsicht.fhg.de

Fraunhofer Institut
Umwelt-, Sicherheits-,
Energietechnik UMSICHT
Osterfelder Straße 3
46047 Oberhausen

Wissenschaftliche und experimentelle Begleitung

Prof. Dr. Peter Gängler
Tel.: 02302-926-660
peter.gaengler@uni-wh.de

Fakultät für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde
der Universität Witten/Herdecke
Alfred-Herrhausen-Straße 50
58448 Witten

Netzwerkpartner

Kennametal Widia
HERBOLD Zerkleinerungstechnik
IKA-Werke

Oberhausen, Juli 2005

Inhalt

MOTIVATION UND ZIELSTELLUNG 2

TECHNISCHE SCHNEIDPROZESSE AM BEISPIEL DER SCHNEIDMÜHLE 4

BIOLOGISCHE ZERKLEINERUNGSPROZESSE – SCHNEIDZÄHNE VON NAGERN 7

BIONISCHE KONZEPTE FÜR SELBSTSCHÄRFENDE SCHNEIDWERKZEUGE 13

ENTWURF UND HERSTELLUNG EINES FUNKTIONSMODELLS 17

PRAKTISCHE VERSUCHE ZUR ZERKLEINERUNG HOCH ABRASIVER POLYMERE 20

UMSETZUNGSSTRATEGIE & ANWENDUNGSPOTENZIAL 21

VERÖFFENTLICHUNGEN 23

ZUSAMMENFASSUNG 24

Motivation und Zielstellung

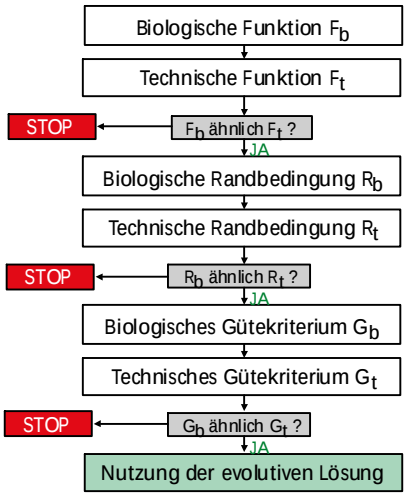
In zahlreichen industriellen Branchen und auch in der heimischen Küche werden unterschiedlichste Materialien zerkleinert, um in Form von Granulaten oder Pulvern (weiter)verarbeitet zu werden. Ziel der Zerkleinerung ist die Herstellung definierter Produkteigenschaften unter ökonomischen und ökologischen Randbedingungen. Insbesondere die Zerkleinerung zäher (viskoelastischer) Materialien stellt hohe Anforderungen an die eingesetzten Zerkleinerungstechnologien. Zur Zerkleinerung viskoelastischer Materialien (Gewürze, Holz, Kunststoff, Gummi, Naturfasern etc.) werden auf dem Schneid- und Schermechanismus basierende Maschinen verwendet. Dem Schneid- und Schermechanismus sind dabei in vielen Fällen Druck-, Zug-, Biege- und Torsionsbeanspruchungen überlagert. Im Gegensatz dazu werden mineralische Rohstoffe, die ein sprödes Bruchverhalten aufweisen, vor allem durch Prall oder Druck zerkleinert.

Anders als bei der Prallbeanspruchung mineralischer Stoffe, bei denen eine Erhöhung der Feinheit vor allem durch die Erhöhung der Zerkleinerungsenergie (Prallgeschwindigkeit) erreicht wird, sind hohe Feinheiten viskoelastischer Materialien nur durch exakte Werkzeuggeometrien in Form von geringen Abständen zwischen Rotor- und Statormessern und scharfen Schnittkanten realisierbar. Dem entgegen steht der Verschleiß an den zerkleinerungswirksamen Bereichen der Werkzeuge. Die Schnitthaltigkeit von Zerkleinerungswerkzeugen bei der Zerkleinerung viskoelastischer Materialien ist somit von zentraler Bedeutung für Maschinenbauer und Anwender.

Die Anatomie und Mikrostruktur verschiedener Säugetierzähne kann als Vorbild und Ideengeber für die Neuentwicklung selbstschärfender Zerkleinerungswerkzeuge dienen; bei den Säugetieren kam es im Verlauf der Evolution zur Ausbildung spezifischer Zahnformen, den Schneidezähnen (Incisivi), Eckzähnen (Canini), Vormahlzähnen (Praemolares) und Mahlzähnen (Molares). In Abhängigkeit der Lebensbedingungen der Säugetiere unterscheiden sich Gebissform, Zahnanzahl und -ausbildung zum Teil erheblich. Bei einigen Säuge-

tieren haben sich Mechanismen und Verbundstrukturen herausgebildet, die eine permanente Selbstschärfung der Zähne über die Gebrauchsperiode bewirken. So bewahren insbesondere die Schneidezähne von Nagetieren wie der Ratte ihre Schärfe durch die ungleichseitige Abrasion der Zähne infolge einer im Verlaufe der Evolution entwickelten wirkungsvollen Schichtung extrem harten Schmelzes und lediglich knochenharten Dentins.

Abbildung 1: Kriterien zur Einordnung in die Bionik, nach [Rechenberg-2004]



Im Rahmen des Projektes wurde das entwicklungsbiologische Konzept von Nagezähnen (Incisivi) anhand der Fachliteratur recherchiert aber auch durch Untersuchung von Rattezähnen in Bezug auf die werkstofflichen Mikrostrukturen des »Werkstoffverbunds« Schmelz/Dentin untersucht. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wird eine Überprüfung der Analogie zwischen biologischer und möglicher technischer Ausführungsform hinsichtlich der Aspekte Funktion, Randbedingungen und Gütekriterien durchgeführt (vgl. Abbildung 1). Das Resultat der Studie ist eine Übertragungsstrategie für das Prinzip der Selbstschärfung durch gezielte Abrasion auf intelligent konstruierte, technische Verbund- bzw. Gradientenwerkstoffe. Fokussiert wird dabei auf Werkzeuge zur Zerkleinerung viskoelastischer Materialien in Schneidmühlen und Zahnkranzkolloidmühlen. Durch die Herstellung erster Funktionsmuster und die Durchführung praktischer Versuche werden erste Erfahrungen zur Nutzung des bionischen Konzepts gesammelt.

Technische Schneidprozesse am Beispiel der Schneidmühle

Ein wichtiger verfahrenstechnischer Schneidprozess ist die Granulation[1] von Kunststoffen durch Schneidmühlen, langsam laufenden Shreddern und Granulatoren. Die Granulation von Kunststoffen dient der Herstellung von rieselfähigen, gut dosierbaren und nicht staubenden Schüttgütern. Sie erfolgt an verschiedenen Stellen innerhalb der Wertschöpfungskette vom Polymer zum Kunststoffbauteil mit spezialisierten Maschinen (Stranggranulatoren, Unterwassergranulatoren nach der Compoundierung, Beistellmühlen für das produktionsintegrierte Recycling, Schneidmühlen in massiver Bauweise für polymere post-consumer Abfälle, langsamlaufende Granulatoren für die Grobzerkleinerung und Spezialmaschinen für Kurzfaserherstellung, Rohrrecycling etc.). Die hergestellten Granulate sind die bevorzugte Ausgangsbasis für Spritzguss und Extrusion.

Maschinen zur Granulation von Polymeren unterscheiden sich hinsichtlich Messer- und Rotor- bzw. Statorgeometrien, Schnittgeschwindigkeit und -frequenz und Antriebsleistung. Die Schneidmühle stellt diesbezüglich das komplexeste Schneidsystem dar und ist Gegenstand der weiteren Ausführungen.

Die praxisüblichen geometrischen Verhältnisse in Standard-Schneidmühlen zeigt Abbildung 2. Auf einem Rotor sind mehrere Messer so angeordnet, dass sie mit einem festgelegten Abstand (Schneidspalt) an den Statoren vorbeilaufen. Zusätzlich sorgen große Keilwinkel für eine gute Wärmeableitung von der Schnittstelle. Die Lage des Schnittgutes zwischen den Messern ist unbestimmt, da es im Zerkleinerungsraum durch den Rotor und Strömungsschleppkräfte verwirbelt wird und sich somit ein stochastisches Trennen ergibt. Im unteren Teil des Mühlengehäuses ist ein Sieb angebracht, welches das zerkleinerte Material erst ab einer bestimmten Korngröße passieren lässt. Eine Überlagerung

[1] Der Begriff »Granulation« wird hier für durch Schneidprozesse hergestellte Partikelkollektive genutzt. Typischerweise adressiert der Begriff »Granulation« bzw. »Granulate« Partikelgrößen zwischen 0,3 und 10 mm. Die Form der Granulate ist in der Regel kubisch bis rund. Die ebenfalls übliche Verwendung des Begriffes »Granulation« für die Aufbauagglomeration von Partikeln mittels Wirbelschichttrocknung oder Mischverfahren ist hier nicht Gegenstand.

von Scher- und Keilschneiden bewirkt die Zerkleinerung. Das Statormesser weist üblicherweise einen Keilwinkel von ca. 90° auf, das Rotormesser besitzt häufig Keilwinkel um 40°. Stator- und Rotormesser werden je nach Hersteller unter verschiedenen Winkeln zueinander angeordnet, so dass sich ein vollkantiger Schnitt (Parallelschnitt) oder ein kreuzender Schnitt (Scherschnitt) ergibt. Weiterhin lassen sich verschiedene Rotorbauformen unterscheiden: offene, halboffene und geschlossene Rotoren. In Tabelle 1 sind Kenngrößen und Prozessparameter handelsüblicher Schneidmühlen aufgeführt.

Abbildung 2: Zerkleinerungsgeometrie in Schneidmühlen

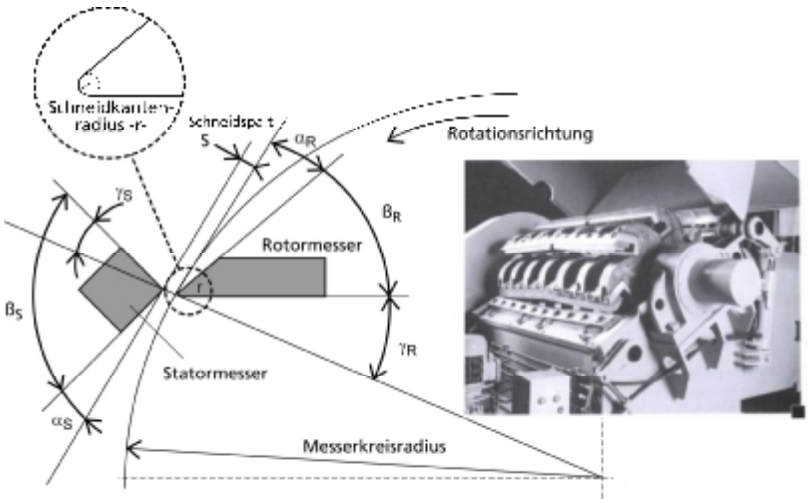
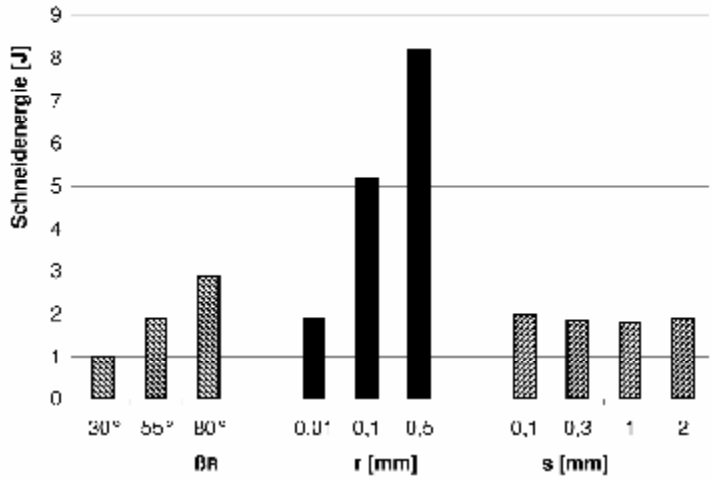


Tabelle 1: Kenngrößen und Prozessparameter von Schneidmühlen

Kenngröße	Einheit	Werte
Antriebsleistung	[kW]	1 bis 400
Durchsatzleistung	[t/h]	Bis 15 t/h
Breite d. Schneidkante	[mm]	< 100 bis 2.500
Rotordurchmesser	[mm]	Bis > 2.000 mm
Umfangsgeschwindigkeit	[m/s]	2 bis 30, üblich 12 bis 16
Anzahl d. Messer	[-]	2 bis > 20
Anzahl der Statoren	[-]	Bis 15, üblich 3 bis 8
Schneidspalt	[mm]	0,05 bis 0,8, üblich 0,3 bis 0,4

Anhand praktischer Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass die Schärfe des Messers, gemessen als Schneidkantenradius r, die im Hinblick auf die Schneideffizienz wirksamste Kenngröße darstellt (vgl. Abb. 3) [Bauer-2001, Powitz-2004].

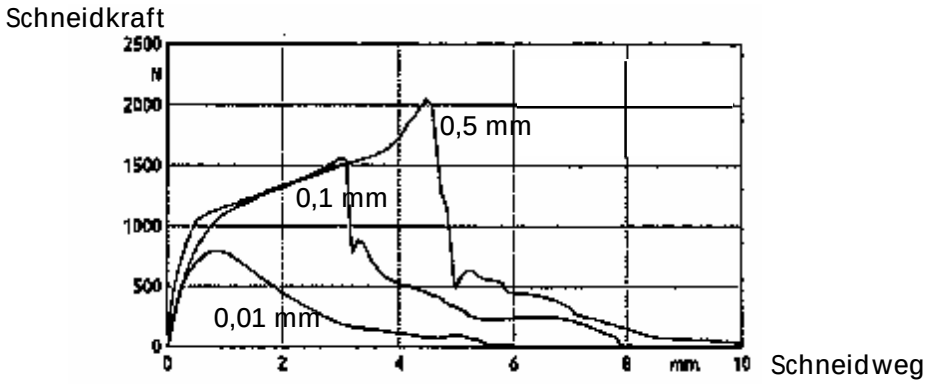
Abbildung 3: Schneidenergie in Abhängigkeit der Parameter $ß_R$, r und s, nach [Bauer-2001]



$ß_R$: Keilwinkel; r: Schneidkantenradius; s: Schneidspalt

Der Verlauf von Schneidkraft-Weg-Kurven verdeutlicht, dass es sich bei der Zerkleinerung mit stumpfen Messern um einen Trennprozess handelt, der sich grundsätzlich von dem des scharfen Messers unterscheidet. Der Schneidweg verlängert sich, da das viskoelastische Material zuerst geschert wird und es abschließend schlagartig versagt. Der Energiebedarf des Zerkleinerungsvorgangs vervielfacht sich (vgl. Abb. 4).

Abbildung 4: Schneidkraft-Weg-Kurven bei unterschiedlichen Schneidkantenradien [Bauer-2001]



Die Standzeiten der Messer in Schneidmühlen sind im hohen Maße von

Schnittgut und Störstoffanteil abhängig. Stumpfe Messer äußern sich vielfach im Überschreiten einer kritischen Produkttemperatur (Aufschmelzung, Zersetzung, z. B. PET ca. 1 Woche). Austausch der Messer und damit Produktionsausfälle dauern je nach Bauart und -größe zwischen 1 und 8 Mannstunden. Die Gesamtstandzeit von Schneidmühlenmessern beträgt einige hundert bis tausend Volllaststunden [Keldenich-2000]. „Runde“ Messer werden mehrfach nachgeschliffen. Der Schneidspalt muss beim Wiedereinbau nachjustiert werden, was durch spezielle Vorrichtungen auch außerhalb der Mühle möglich ist.

Als Schneidmesser-Werkstoff hat sich gehärteter Werkzeugstahl des Typs 1.2379 etabliert. Der Einkaufspreis solch konventioneller Messer ist durch ostasiatische Konkurrenz in den letzten Jahren immer weiter gefallen. Daneben werden Schneidmesser auf Basis pulvermetallurgischer Stähle (z.B. Hartmetalle) angeboten. Mit Ihnen werden gegenüber konventionellen Werkzeugstählen um den Faktor 3 bis 5 längere Standzeiten erreicht. Die Kosten dieser Messer betragen jedoch ebenfalls das Fünffache konventioneller Messer. Zusammen mit einem höheren Aufwand für das Nachschärfen der Messer und der Gefahr des Werkzeugbruchs aufgrund ihrer höheren Sprödigkeit ist dies der Grund dafür, dass sich Hochleistungswerkstoffe für Schneidmesser bis heute am Markt nicht etablieren konnten. Weitere Messerentwicklungen blieben aus. Da die Qualität der Messer die Effizienz des Schneidprozesses wie oben beschrieben wesentlich beeinflusst, sind die Entwicklungsmöglichkeiten auf maschineller Seite eingeschränkt.

Biologische Zerkleinerungsprozesse – Schneidzähne von Nagern

Nicht immer dienen Zähne allein der Zerkleinerung von Nahrung. Bei vielen Tieren übernehmen Zähne die Rolle von Greiforganen, um die Beute zu ergreifen und festzuhalten, bevor sie in großen Stücken verschlungen wird. Oftmals dienen sie als Angriffs- oder Verteidigungswaffe oder aber sie werden nur als Drohgebärde dem meist gleichartigen Gegner präsentiert. Als Werkzeuge ermöglichen beispielsweise Nagezähne die Gewinnung von Baumaterialien oder unterstützen bei der Überwindung von Barrieren zur Futtersuche. Die notwendigen Zerkleinerungsprozesse sind entsprechend vielfältig: Abbeißen, Abrei-

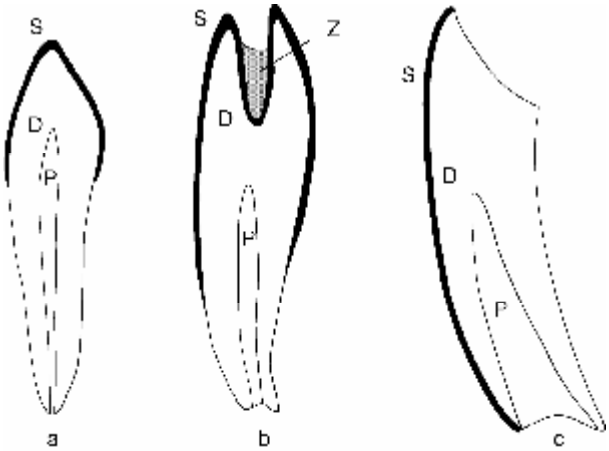
ßen, Abnagen, Zerschneiden, Aufschlitzen und letztlich das Zerkleinern der Nahrung durch kombinierte mahlende, quetschende und schneidende Beanspruchungen. Die Nahrung muss dabei möglichst weit reichend zerkleinert werden, um den Magensäften eine große Angriffsfläche zu bieten und eine optimale Energieausnutzung zu gewährleisten. Durch Anpassung an diese unterschiedlichen Anforderungen hat die Evolution gänzlich unterschiedliche spezifisch optimierte Lösungen hervorgebracht. Die Zähne sind dabei immer zusammen mit Kiefergelenk, Kiefermuskulatur, Zungen- und mimischer Muskulatur als funktionelle Einheit zu sehen.

Zähne sind grundsätzlich aus zwei unterschiedlichen Gewebetypen aufgebaut; dem knochenähnliche Kern, dem Dentin, und dem harten Schmelz. Zahnschmelz stellt das widerstandsfähigste im Tierreich vorkommende Material dar [Owen-1840]. Beide Werkstoffe, Schmelz und Dentin, bestehen aus Kalzium und Phosphat, unterscheiden sich aber in ihrem organischen Anteil. Während Schmelz fast vollständig aus Mineralien besteht (organische Matrix 1 Gew.-%, Wasser 4 Gew.-%), beträgt der Organikanteil des Dentins 20 Gew.-% (bei einem Wasseranteil von 10%) [Schröder-1987]. Daher ist das Dentin weicher und elastischer als der Schmelz.

Bei Säugetieren bildet sich nach Überbrückung der Wachstumsphase durch ein Milchgebiss ein Dauergebiss aus. Dem während der Lebensspanne teilweise intensiv wirkenden Verschleiß, setzen verschieden spezialisierte Zähne gänzlich unterschiedliche Schutzstrategien entgegen (vgl. Abbildung 5). Dabei gibt es Zähne, deren dicker Schmelz ein Leben lang dem Abrieb widerstehen muss. Das Dentin des menschlichen Zahns beispielsweise ist im Bereich der Zahnkrone vollständig von einer dicken Schmelzschicht kappenförmig ummantelt. Bei anderen Zähnen jedoch ist ein hoher Verschleiß in Form, Material und Wachstum vorprogrammiert. So setzen hochkronige Zähne z. B. Backenzähne der Pferde dem Verschleiß einen entsprechenden Materialeinsatz entgegen. Dies sind in der Regel schmelzfaltige Zähne, d.h. der Zahnschmelz hat faltenartige Einbuchtungen in das Dentin ausgebildet. Diese Falten sind oft mit Kronenzement gefüllt, einem knochenähnlichen Material, welches stammesgeschichtlich aber eigentlich als Wurzelzement zum Zahnhalteapparat gehört. Beim Verschleiß dieser Zähne bilden sich während der gesamten Lebensspanne strukturierte Oberflächen mit geometrisch erhöhten Schmelzanteilen – so genannte Kronenmuster - aus, die ein effektives Zerreiben von beispielsweise faseriger

pflanzlicher Nahrung ermöglichen. Bei einigen Säugetieren haben sich wurzellose Zähne entwickelt, die permanent wachsen und deren Wachstumsraten im Gleichgewicht zu ihrer Abnutzung stehen. Schneidezähne von Nagetieren sind ein bemerkenswertes Beispiel für dieses Prinzip [Tülp-1997].

Abbildung 5: Anpassung verschiedener Schneidezähne an starke Abnutzung, nach [Tülp-1997]



a) Schneidezahn mit Schmelzkappe; b) hochkroniger Zahn mit Kunde im Kronenbereich; c) permanent wachsender, wurzelloser Schneidezahn mit einseitigem Schmelzbelag; S=Schmelz, D=Dentin, P=Pulpa, Z=(Kronen)Zement

Der Nagezahn besitzt keine geschlossene Schmelzumhüllung, sondern nur eine dünne Schmelzbedeckung an der Vorderseite der Zähne. Durch den verstärkten Abrieb des dahinter frei liegenden weicheren Dentins bildet sich permanent eine messerscharfe Schneidkante an der so entstehenden Zahnspitze aus [Pfretzschner-1997]. Zusätzlich zum Abrieb durch die Nahrung sorgen obere und untere Schneidezähne durch gegenseitigen Kontakt für Abrieb und Schärfung der Zähne.

Abbildung 6: Anatomie des Feldhamstergebisses

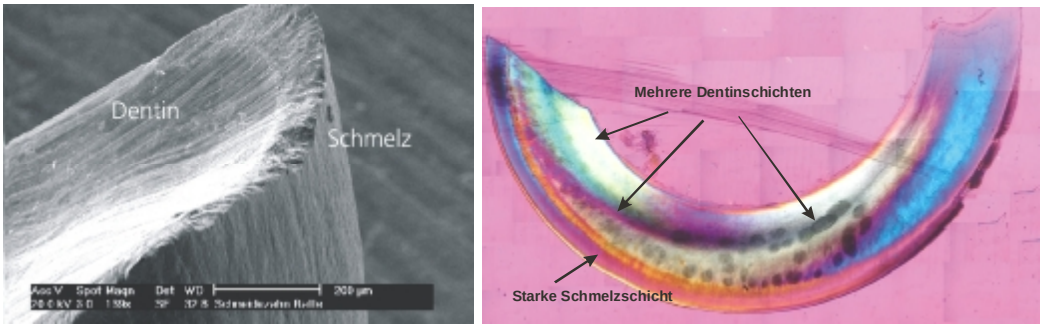


Abbildung 7: REM-Aufnahme (li.) und Polarisationsmikroskopische Aufnahme (re.) eines Rattenschneidzahns

Da der Schmelz in einem steilen Winkel zur Kaufläche steht, wird der Querschnitt der Schmelzschicht belastet. Je dünner die einseitige Schmelzauflage ist, desto schärfer ist der Zahn. Mit abnehmender Stärke steigt jedoch das Bruchrisiko der Schmelzschicht. Die besondere Belastungsfähigkeit der dünnen Schmelzlamelle liegt in der Mikrostruktur des Schmelzes begründet. Der Schmelz bildet eine komplexe, einem Verbundwerkstoff vergleichbare Mikrostruktur aus Schmelzprismen (P) und interprismatischer Matrix (IPM). Schmelzprismen sind aus gebündelten Hydroxylapatit-Kristalliten aufgebaut. Die Prismen verlaufen von der Schmelz-Dentingrenze (enamel dentin junction – EDJ) durch die gesamte Schmelzschicht bis zur äußeren Oberfläche [Martin-1997]. Die zwischen den Prismen liegende interprismatische Matrix besteht aus Apatitkristallit-Bündeln, die schraubenähnlich gewunden sind. Sie verlaufen quer zur Richtung der Schmelzprismen und bilden so eine dreidimensional geflochtene, sperrholzähnliche Schmelzstruktur, den so genannten Hunter-Schreger-Schmelztyp, aufgebaut aus Schichten parallel gelagerter Prismen. Bei manchen Nagezähnen (z.B. bei hamsterartigen) sind die Schichten jeweils nur ein Prisma dick (vgl. Abbildung 8) [Pflumm-1989].

Zur Vorderseite der Schmelzlamelle hin schließt sich der so genannte radiale Schmelztyp an. Die Schmelzprismen steigen parallel nach außen und zur Kaufläche hin an. Der Schmelz der Nagezähne ist somit aus unterschiedlichen biomechanisch spezialisierten Schmelztypen aufgebaut, welche die Bruchgefahr mindern: Die Ausrichtung der sich überkreuzenden Prismenstrukturen des Hunter-Schreger-Schmelztyps ermöglicht es, die durch den Kaudruck entstehenden Zugspannungen, die aus den auftretenden Querkräften resultieren, optimal aufzunehmen. Gleichzeitig wirkt die gekreuzte Struktur als Rissfangmechanismus. Die verbesserte Bruchfestigkeit führt zu einer etwas geringeren Härte dieser Schmelzstruktur. Der sich anschließende härtere radiale Schmelz

an der Zahnaußenseite wirkt jedoch als eine verschleißfeste Beschichtung. Beide Schmelztypen bilden in ihrer Kombination eine sehr fraktursichere Schicht [Koenigswald-1999].

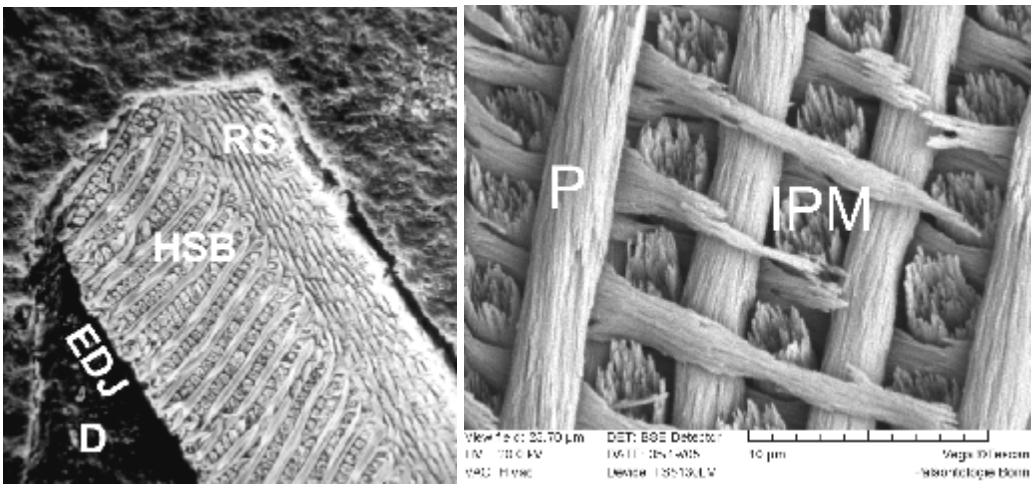


Abbildung 8: Schmelzmuster des Schneidezahns von Nagern (li.); Schmelztyp Hunter-Schräger-Bänder (re.) [Quelle: Institut für Paläontologie der Universität Bonn]

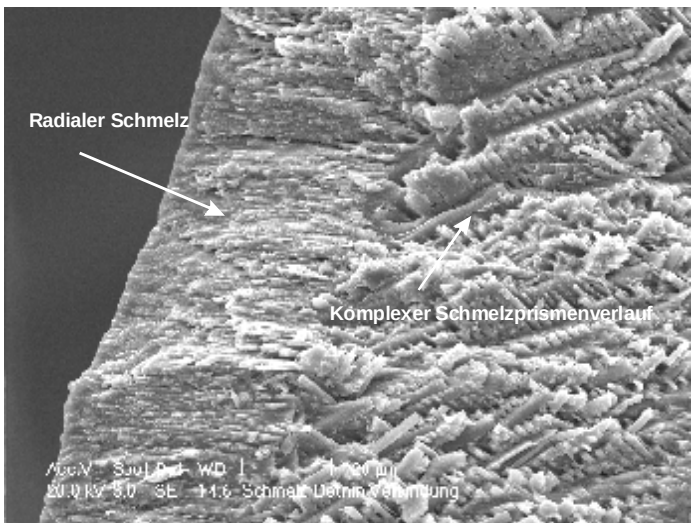
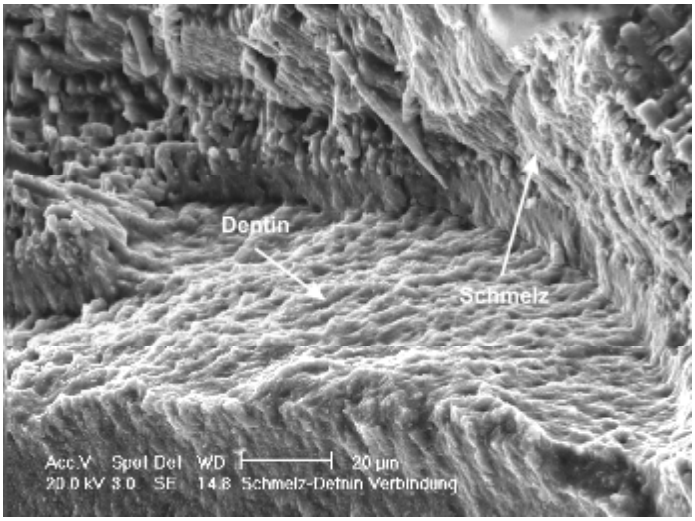


Abbildung 9: REM Aufnahme des Schmelzes eines Rattenzahnes mit Schmelzprismenverlauf, der an der Schmelz-Dentin-Grenze komplex beginnt und radial auf der vestibulären Seite endet

Zwischen Schmelz und Dentin sorgt eine organische Basalmembran quasi als Kitt für eine feste Verbindung. Beim Nagezahn ist die Grenzfläche zusätzlich verzahnt, wodurch die Stabilität der Verbindung erhöht wird.

Abbildung 10:
Struktur der EDJ



Die Ausbildung permanent scharfer Schneidekanten an den Zähnen der Pflanzenfresser wird somit nicht durch maximale Werkstoffhärten erreicht. Vielmehr dient gerade ein beträchtlicher Verschleiß in Kombination mit unterschiedlichen Härten von Schmelz und Dentin für die Realisierung permanenter Selbstschärfung.

Die Kombination des hochkronigen Zahnaufbaus mit permanentem Wachstum auf der einen Seite und Verschleiß auf der anderen zeigt das Beispiel der Wühlmaus (vgl. Abbildung 11).

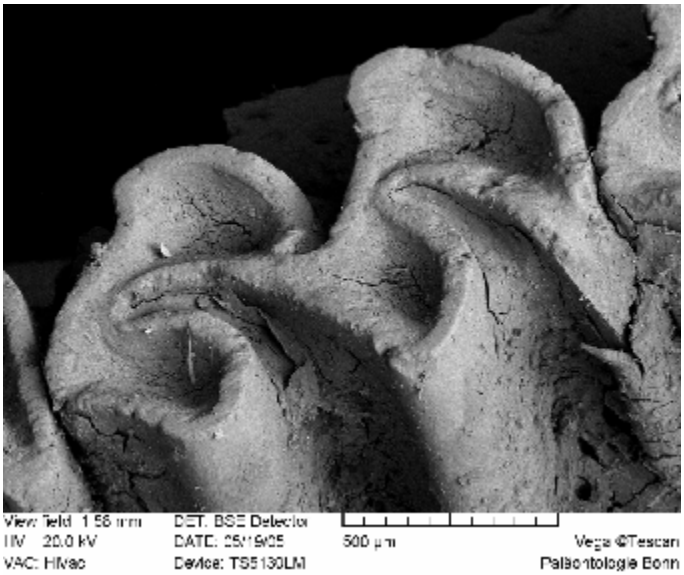


Abbildung 11: Schneidkanten am Backenzahn einer Wühlmaus (Clethrionomys glareolus) [Quelle: Institut für Paläontologie der Universität Bonn]

Ihr permanent wachsender hochkroniger Backenzahn ist so ausgebildet, dass beim Kauvorgang (Vorziehen des Unterkiefers) möglichst viele Schneidkanten für die Zerkleinerung der Nahrung zur Verfügung stehen. Dazu sind die Seitenwände tief eingefaltet, wodurch sich charakteristische Dentindreiecke ergeben, an deren Vorder- und Rückseite einschneidende Schmelzkanten ausgebildet sind. Die Schmelzkanten sind dabei so geformt, dass der Nahrungsbrei seitlich abfließen kann. Konkav und konvex gebogene Schmelzkanten wechseln sich ab.

Bionische Konzepte für selbstschärfende Schneidwerkzeuge

Die Gegenüberstellung des technischen Systems der Schneidmühle mit der biologischen Lösung des Nagezahns zeigt eindeutige Analogien, allerdings unter Beachtung gegebener Randbedingungen: Eindeutige Analogien sind hinsichtlich Ihrer Funktion zu erkennen. Technisches und biologisches System zielen auf eine möglichst effiziente Zerkleinerung des Schnittguts bzw. der Nahrung ab. Permanente Schnitthaltigkeit ist für beide Systeme Grundvoraussetzung für diese Effizienz.

Die Randbedingungen hinsichtlich auftretender Kräfte und Verschleißwirkung

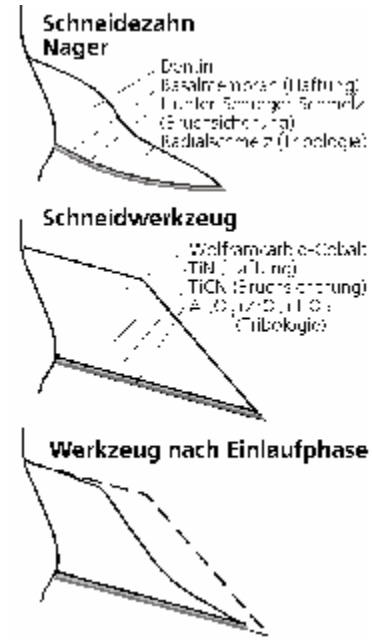
unterscheiden sich hingegen deutlich. Rotorumfangsgeschwindigkeiten von üblicherweise 12 bis 16 m/s und Frequenzen über 160 Hz stehen Frequenzen von 1 bis 10 Hz des natürlichen Nagevorgangs gegenüber. Durch die Änderung des (viskoelastischen) Materialverhaltens des Schnittguts mit steigender Belastungsgeschwindigkeit muss diesem Punkt besondere Bedeutung zugesprochen werden. Auch resultieren daraus Unterschiede auf Seiten der Schneidwerkstoffe. Während Dentin eine Härte von 150 HV bzw. Schmelz von 300 HV aufweist, besitzt ein konventioneller gehärteter Werkzeugstahl bereits Härten oberhalb von 800 HV. Unterschiedliche Schneidgeometrien resultieren aus der drehenden Bewegung der Schneidrotoren im Gegensatz zur repetierenden Kaubewegungen des Nagers. Die Fähigkeit gelegentliche Zahnabbrüche durch Nachwachsen des Zahns kompensieren zu können, scheint technisch nicht übertragbar.

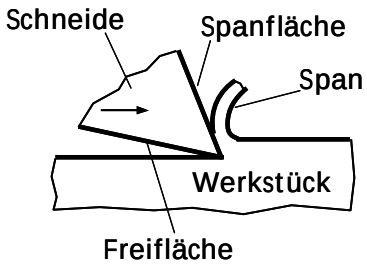
Unter Beachtung dieser Randbedingungen ist es jedoch möglich und sinnvoll, Elemente der biologischen Struktur des Nagezahns auf die Technik zu übertragen. Im Bereich der Maschinenmesser hat der technische Entwicklungsprozess in den letzten Jahrzehnten immer eine Verringerung der Verschleißraten angestrebt. Hierzu wurden immer leistungsfähigere Werkstoff- und Beschichungssysteme hervorgebracht: Kolumnare oder gradierte Systeme, Multilayer oder Nanokomposite können abgeschieden werden. Als Materialien stehen Hartmetalle, keramische Oxide, Carbide und Nitride, Kohlenstoff oder polykristalliner Diamant zur Verfügung. Weitere Fortschritte im Hinblick auf Produktionsleistung, Schnittkantenqualität, erreichbare Feinheiten, Energieeffizienz und neue Anwendungen sind auf diese Weise jedoch kaum zu erwarten. „Selbstschärfung durch gelenkten Verschleiß“ ist das biologische Prinzip, das dauerhafte Schnitthaltigkeit ermöglicht und einen optimalen Schnitt gewährleistet. Bei den Nagetieren ist es bis zur Perfektion herausgebildet.

Der Selbstschärfeffekt kann durch eine harte Beschichtung oder eine gehärtete Oberfläche auf der Freifläche eines weicheren Werkzeuggrundkörpers realisiert werden. Indem der Beschichtungswerkstoff tribologisch auf das jeweilige Schnittgut zur Gewährleistung niedriger Reibkoeffizienten ausgewählt wird, wird die Verschleißwirkung des überlaufenden Spans fast vollständig auf die Spanfläche gelenkt, welche dadurch auskolkt. Die dünne, harte Beschichtung bildet dadurch dauerhaft eine scharfe Schneidkante aus (vgl. Abb. 12). Für die technische Umsetzung ist dementsprechend ein detailliertes »Verschleißengi-

neering« notwendig.

Abbildung 12: Bionisches Konzept selbstschärfender Schneidwerkzeuge





Konstruktiver Aufbau der Schneidwerkzeuge, Geometrie und Werkstoffe des Messergrundkörpers und die Beschichtung müssen so ausgewählt werden, dass sich eine für die Ausbildung einer permanent scharfen Schnittkante geeignete Belastungssituation ergibt. Eine diesbezüglich zielgerichtete und wissensbasierte Entwurfsmethodik erfordert detailliertes Studium und Ausarbeitung technischer Lösungen hinsichtlich der Vermeidung von Spannungsspitzen an der Phasengrenze Beschichtung/Substrat, die Minimierung der Gleitreibung zwischen Schneidobjekt und Beschichtung und vor allem die durch geeignete geometrische Konstruktionen bewirkte Lenkung von Abrasion und Erosion zur Ausbildung permanent scharfer Messer.

Weiterhin ist anwendungsspezifisches Know-how über die verschiedenen Abtragsmechanismen an der Schneide notwendig. Durch die Gestaltung verschiedener, in Härte und Risszähigkeit angepasster Zonen muss der Abtrag der Schneide an die Trennaufgabe angepasst werden. Dies muss sowohl im mikroskopischen Bereich von etwa 100 µm um die Schneidkante, als auch im Abstand einiger Millimeter erreicht werden.

Neue Grundlagen für den Werkzeugbau sind zu definieren. Diese Anforderung ist nur in einer engen Zusammenarbeit von Entwicklern neuer Substrate, ange-

passter Schichtsysteme und Werkzeug- und Maschinenexperten möglich. Dieser notwendige interdisziplinäre Ansatz mag der Grund dafür sein, dass bislang kein einziges umfassendes Entwicklungsprojekt zur Nutzung des kontrollierten Verschleißes durchgeführt wurde, obwohl bereits früher „Selbstschärfung“ an Werkzeugen beobachtet worden ist [Barz-1966a, Barz-1966b, Deger-1969, Stühmeier-1989, Timoscenko-1993, Panckow-2001].

Patentlage

Es wurde eine Recherche in der Patentdatenbank DEPATISnet des Deutschen Patent- und Markenamtes durchgeführt. Ziel war es, zu ermitteln, ob es Schutzrechte gibt, bei denen der Selbstschärfeffekt durch Härteunterschiede an den Schneidkanten hervorgerufen wird. Eine Recherche in den Volltexten ergab nur 42 Patente, in denen der Begriff selbstschärfend anzutreffen war. Als Möglichkeiten, den Härteunterschied zu erzielen, wurden Beschichten und Härten in der Recherche betrachtet. Es wurde nach deutschen und englischsprachigen Dokumenten recherchiert.

Es ergaben sich fünf Patent- und Offenlegungsschriften, die einen Selbstschärfeffekt durch Härteunterschiede zum Inhalt haben: DE3607907C1, EP0735922B1, DE3715326A1, DE3413614C2, DE3406441A1. Der härtere Bereich wird dabei durch Flammspritzen, Ionenimplantieren, Polymeraushärten, Auftragsschweißen und Belegen mit PKD erzeugt. Die Kombination von selbstschärfend mit Zerkleinerung, Mühle und Schneidmühle, Messer ergab 9 Treffer. Komplizierte Verbundstrukturen oder räumliche Gradienten sind eher selten Gegenstand der Patentansprüche. Strukturen, die denen diverser biologischer Mikrostrukturen von Zahnmaterial nachgebildet sind, sowie generelle Bezüge, Vergleiche und Analogien zu biologischen Vorbildern wurden nicht gefunden. Die übrigen Patentanmeldungen nutzen die Selbstschärfung für Schleifscheiben durch gezielten Partikelausbruch (Schneiden mit undefinierter Schneide) und Walzenmühlen.

Auch die weiteren für den vorliegenden Ansatz charakteristischen Merkmale sind nicht in den recherchierten Schutzrechten erfasst: Anbindung der harten Schicht bzw. Randzone durch eine gezielte Morphologieausbildung am Substratkörper, Minimierung der Gleitreibung zwischen Schneidobjekt und Beschichtung sowie die geometrische Gestaltung bei paarigen Werkzeugen zur Einhaltung eines konstanten Schnittspaltes.

Patent von Fraunhofer UMSICHT

Die grundlegende Idee der selbstschärfenden bionischen Zerkleinerungswerkzeuge wurde für die Anwendung in Schneidmühlen, Granulatoren, Feinschneidmühlen und Zahnkranzkolloidmühlen von Fraunhofer UMSICHT zum Patent angemeldet [»Selbstschärfendes, schnitthaltiges Schneidwerkzeug für Mühlen«].

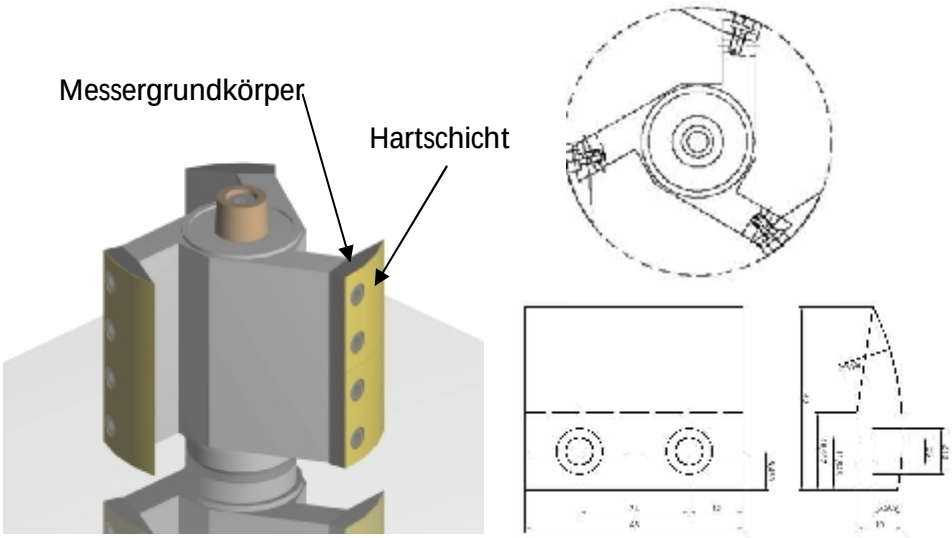
Entwurf und Herstellung eines Funktionsmodells

Als Versuchsapparatur wurde eine am Institut vorhandene Laborschneidmühle des Herstellers RETSCH ausgewählt (RETSCH Laborschneidmühle SM2000). Im Rahmen des Projektes wurde ein konventioneller Parallelschnittrotor als Versuchsrotor angeschafft.

In Zusammenarbeit mit dem Netzwerkpartner KENNAMETAL WIDIA wurden Funktionsmuster selbstschärfender Schneidwerkzeuge entworfen:

Aufgrund der vorgegebenen Maschinengeometrie war die Messergeometrie der Funktionsmuster nur eingeschränkt wählbar. Abbildung 13 zeigt den Entwurf.

Abbildung 13: Entwurf Funktionsmodell »Selbstschärfendes Schneidwerkzeug



Die Messer sind zahnförmig ausgestaltet. Die Außenfläche ist im Radius des Flugkreises gebogen, die Innenfläche (Spanfläche) als Keilwinkel abgeschrägt. Die Rotorform wurde entsprechend angepasst. Nur an der Außenseite ist eine tribologisch optimierte Hartstoffschicht angeordnet. Während des Schneidprozesses läuft der Span über die Spanfläche und wirkt dabei schleißend an der inneren Schneidkante. Aufgrund der verbesserten Gleitfähigkeit und Verschleißfestigkeit der äußeren Freifläche werden die angreifenden Reibkräfte an dieser Seite der Schneidkante minimiert. Der Verschleiß wird somit auf die Spanfläche gelenkt. Entsprechend dem biologischen Vorbild soll sich dadurch die Hartstoffschicht als scharfe Kante an der Messerspitze dauerhaft herausarbeiten.

Die werkstoffliche Auslegung der Funktionsmuster erfolgte für die Anwendung »Zerkleinerung hochgefüllter, abrasiver Polymere«. Ziel ist es, durch bereits hohe Härten des Messergrundkörpers die Verschleißraten gegenüber konventionellen Messern zu vermindern, jedoch gleichzeitig zu gewährleisten, dass sich ein Selbstschärfungseffekt einstellt, indem eine Beschichtung mit einer zweifach höheren Härte Verwendung findet.

Als Werkstoff für den »weichen« Messergrundkörper wurde eine Hartmetalllegierung der Sorte BT25 (90% WC, 10 % Co) mit einer Vickershärte von HV30=1130 ausgewählt. In Analogie zum biologischen Vorbild wird als Hartstoffschicht ein 12 µm starker Multilayer-Composite-Beschichtung mit einer Vickershärte von HV30=2200. Abbildung 14 zeigt den Schichtaufbau aus Titannitrid (TiN), Titancarbonitrid (TiCN) und Aluminiumoxid (Al_2O_3) als äußere Schicht, deren Verschleißfestigkeit durch Einarbeitung von Zirkoniumoxid (ZrO_2) und Titanoxid-Nanopartikel (TiO_x) zusätzlich verbessert wurde. Der Schichtaufbau ist durch die Funktionalität der einzelnen Schichten als Haftschicht (TiN), als Bruchsicherung (TiCN) und als Verschleißschutzschicht (Al_2O_3) dem biologischen Vorbild angepasst. Bei der Beschichtung handelt es sich nicht um eine Neuentwicklung im Rahmen des Projekts, sondern um eine Verschleißschutzschicht, welche üblicherweise für den Verschleißschutz von Zerspanungswerkzeugen eingesetzt und mittels CVD-Verfahren (Chemical Vapour Deposition) aufgetragen wird (detaillierte Beschreibung des Multilayers in [Berg-2002]). Abbildung 15 zeigt das von KENNAMETAL WIDIA gefertigte Funktionsmodell. Die Messer wurden komplett beschichtet. Anschießend wurde die Beschichtung an der Spanfläche durch Schleif- und Polierprozesse abgetragen.

Abbildung 14: Hartmetallgefüge BT25 (li.); Multilayer-Composite-Coating (re.) [Berg-2002]

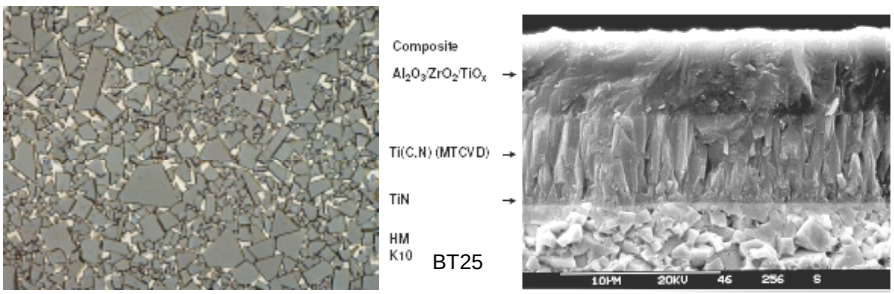
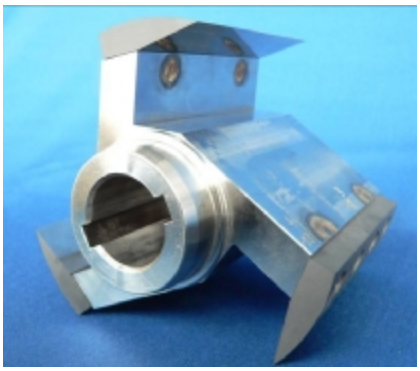
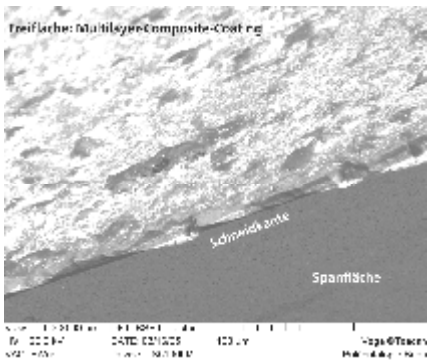


Abbildung 15: Funktionsmodell Bionischer Schneidrotor, Detailaufnahme (REM) der Schneidkante

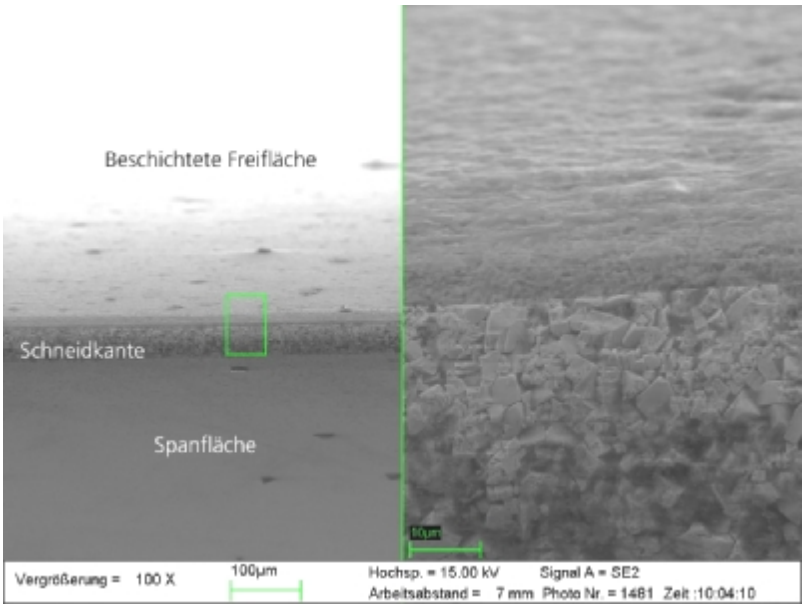




Praktische Versuche zur Zerkleinerung hoch abrasiver Polymere

Erste Zerkleinerungsversuche wurden mit langfaserverstärktem (Glasfasern) Polyamid 6 durchgeführt (Zerkleinerung von 10 mm Pellets auf Korngrößen < 2 mm). Im Verlauf der Versuche kam es zu Mikro-Abplatzungen des Hartmetalls an der Schneidkante, offensichtlich aufgrund zu geringer Zähigkeits des Hartmetalls. Ein weiteres Ablösen der Beschichtung blieb jedoch aus. Abbildung 16 zeigt eine REM-Aufnahme der Schneidkante nach Zerkleinerung von 50 kg Polyamid. Deutlich ist die Verrundung der Schneidkante zu erkennen. Trotz der hohen Härte der Beschichtung wurde diese ebenfalls durch die schleißende Wirkung des Polymers abgerundet. Dieses Verschleißbild ist bemerkenswert, da es sich um mehrere Schichten handelt, wobei die äußerste Aluminiumoxid-Schicht die höchste Härte besitzt und dementsprechend ein Verschleißbild mit klaren Bruchstrukturen an der Oberfläche zu erwarten war.

Abbildung 16: Verschleißerscheinungen an der Schneidkante nach Belastung



Die bereits hohe Härte des Hartmetalls könnte der Grund für dieses Verschleißbild sein. Bei nachfolgenden Versuchen sollte die Härtedifferenz zwischen Messerwerkstoff und Beschichtungswerkstoff vergrößert werden, indem die Härte des Messergrundwerkstoffs herabgesetzt wird. Denkbar wäre der

Einsatz von HSS-Schnellstahl.

Umsetzungsstrategie & Anwendungspotenzial

Die konsequente Erarbeitung einer Methode zur Gestaltung von Maschinenmessern mit Selbstschärfeffekt ist eine experimentell umfassende Aufgabe. Die große Zahl freier und anpassbarer Parameter macht eine ausschließliche experimentelle Vorgehensweise aber fast unmöglich. Neben der Inspiration durch biologische Lösungen und deren Transformationen in technische Analogien kann die Simulation einen wesentlichen Ansatz darstellen, indem die Mikroprozesse des Verschleißes ausschnittsweise physikalisch exakt modelliert werden, um ein vertieftes Verständnis der zugrunde liegenden Mechanismen zu erarbeiten. Werkzeugverschleiß ist ein komplexer Vorgang, der mehr als nur mechanische Überlastung ist: Temperaturbelastung (etliche 100°C), chemische Auflösung, Diffusion, Einschlüsse von Hartmaterial in den Spänen [Wong-2004], Adhäsion, Abrasion, Ermüdung, tribochemische Reaktion, Ablation und Oberflächenzerrüttung tragen zum Werkzeugverschleiß bei. Viele dieser Prozesse laufen auf atomarer Ebene und müssen durch (semi-)empirische Funktionen abgebildet werden. Weiterhin erfolgt der Werkzeugverschleiß in gänzlich anderen Zeit- und Längenskalen als das Schneiden (etliche 1 000m Spanlänge stehen wenigen µm Verschleiß gegenüber). Deshalb muss die physikalische Modellierung zur Berechnung der Belastungsgrößen auf den Schneidenwerkstoff mit empirischen Korrelationen für den daraus resultierenden Werkzeugverschleiß kombiniert werden.

Auf diesem Wege kann eine alternative maschinentechnologische Lösung entwickelt werden, bei der die klassischen Messer durch hochmoderne selbstschärfende Schneiden ersetzt werden. Ziel muss es sein, dass ein Schneidrotor, bestückt mit bionischen Schneiden, permanent eine optimale Qualität der Granulate Späne bei nahezu konstantem Durchsatz liefert, gleichzeitig aber vom Anfang bis zum Ende der Messerlebensdauer nicht ausgebaut und nachgeschärft werden muss, was eine Potenzierung ihrer Schnitthaltigkeit bedeuten würde. Zeitersparnis, konstante Produktqualität und eine hohe Gesamtproduktionsleistung verbessern die Wirtschaftlichkeit der gesamten Anlage. Große

Bedeutung haben in diesem Zusammenhang konstruktive Konzepte, die bei Messer-Gegenmesser-Konstruktionen mit Schneidspalt trotz Verschleiß die permanente Beibehaltung des Messerabstandes gewährleisten. Hieraus ergeben sich neue Ansätze für die Maschinenkonstruktion: Es gilt zu klären, ob anstelle des berührungslosen Zusammenspiels von Statoren und Rotormessern ein kontrolliertes Ineinanderlaufen von Schneidwerkzeugen mit dem Ziel der gegenseitigen Attrition und Schärfung technisch und werkstofftechnisch realisierbar ist. Moderne Steuerungstechniken und Servomotoren bieten diesbezüglich günstige Voraussetzungen.

Der bionische Ansatz des kontrollierten Verschleißes lässt sich prinzipiell auf unterschiedlichste Schneidverfahren übertragen. Zu den wirtschaftlich bedeutendsten Anwendungen zählen das Zerspanen von Holz, die spanende Bearbeitung von Metallen und Kunststoffen, das Schneiden von Papier, das Abläng en von Kunststoffprofilen und das Feinzerkleinern und Dispergieren von Pasten in Kolloidmühlen. Für die Kolloidmühlentechnik können neben Schneidzähnen auch permanent wachsende Backenzähne, z.B. der Wühlmaus, als Vorbild für weitere Werkzeugentwicklungen dienen.

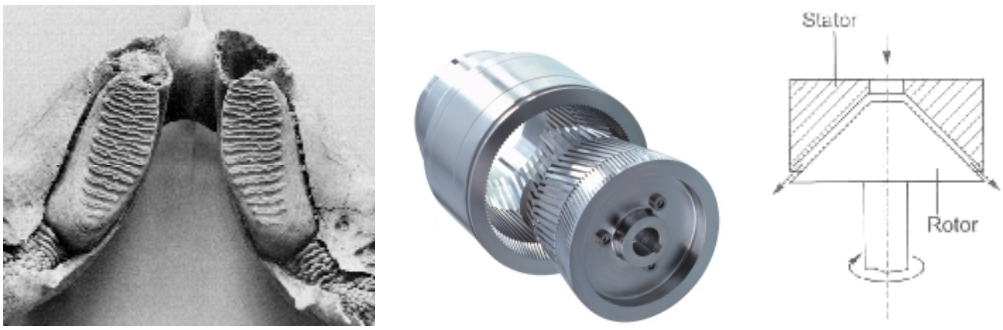


Abbildung 17: Selbstschärfende Backenzähne von Säugetieren (hier: Mammutzahn) als Vorbild zur Optimierung von Zahnkranzkolloidmühlen [Quelle: Institut für Paläontologie der Universität Bonn; IKA-Werke]

So genannte Zahnkranzkolloidmühlen werden für höchste Anforderungen bzw. zur Herstellung kleinste Partikelgrößen eingesetzt (vgl. Abb. 17). Im Gegensatz zu den Schneidmühlen findet hier die Zerkleinerung zumeist in Flüssigkeiten statt (Nasszerkleinerung, Dispergierung). Einsatzschwerpunkte liegen in der pharmazeutischen und kosmetischen Industrie, die strenge Anforderungen an die Korngrößenverteilung der in einer Salbe oder Paste dispergierten Feststoffe stellt. Das Prinzip beruht auf der kombinierten Scher-, Prall- und

Schneidwirkung, der ein Partikel beim Durchgang durch den Mahlspalt der Kolloidmühle ausgesetzt ist. Dieser Ringspalt wird von einem feststehenden Stator, in dem ein Rotor umläuft, gebildet. Rotor und Stator sind verzahnt und weisen zahlreiche Schneidflächen und Scherpunkte auf. Die Art dieser Verzahnung wird im Hinblick auf die beabsichtigte Zerkleinerungswirkung variiert. Durch die alternierende Anordnung weicher und harter Werkstoffe und Hartschichten kann die Standzeit der Verzahnung erhöht und dadurch die Schnitthaltigkeit deutlich verbessert werden. Eine Herausforderung stellt bei diesen Systemen das Verfahren zur Herstellung bzw. selektiven Beschichtung der komplexen Rotor-/ Statorkonstruktion dar.

Veröffentlichungen

Die Ergebnisse der Machbarkeitsstudie wurden bereits mehrfach präsentiert und veröffentlicht. Weitere Veröffentlichungen sind in Planung.

Art d. Veröf.	Veranstaltung/Ort/Datum	Titel
Vortrag, Fachkongress	»Bionik – Innovationsimpulse aus der Natur«. Fachkongress der Hochschule Bremen, 29.–30. Oktober 2004	»Nagetierzähne als Vorbild für selbstschärfende, schnitthaltige Zerkleinerungswerkzeuge«
Pressemeldung	Fraunhofer Mediendienst Nr.1 - 2005	»Stets rattenscharfte Messer«
Vortrag, Fachmesse	»EXTRUMA« Fachmesse für den Extrusionsbedarf, Aussteller Vortragsforum, Frankfurt 23.02. – 25.02.2005	»Nagetierzähne als Vorbild für selbstschärfende, schnitthaltige Zerkleinerungswerkzeuge«
TV-Bericht	3-Sat-Wissenschaftsmagazin »NANO« 02.05.2005	»Rattenscharfe Klingen«

Vortrag, Workshop	»UMSICHT: Zur Sache! Technik gegen Natur - 0:1 nach der ersten Halbzeit (Bionik in prozesstechnischen Anwendungen)«. Workshop Fraunhofer UMSICHT, Oberhausen, 02.06.2005	»Nagetierzähne als Vorbild für selbstschärfende, schnitthaltige Zerkleinerungswerkzeuge«
Poster- und Exponat-präsentation, Messe	Hannover-Messe, Themenstand Bionik, 11.-15.04.2005	»Stets rattenscharfte Messer«
Übersichts-beitrag	Fachzeitschrift »Chemie-Ingenieur-Technik«. Von Redaktion angenommen, Datum der Veröffentlichung noch unbekannt	»Bionik und Zerkleinerungs-technik«

Als Resonanz auf die aufgelisteten Veröffentlichungen sind zahlreiche berichte und Meldungen in Rundfunk und Presse erschienen. Dazu zählen u.a.:

Financial Times Deutschland, Wissenschaft-Wirtschaft-Politik, Welt am Sonntag, Stuttgarter Zeitung, Hamburger Abendblatt, Mitteldeutsche Zeitung, WAZ, Industrieanzeiger, Deutschland-Radio Köln, Die Zahnarzt Woche DZW, WDR 2, WDR 5.

Zusammenfassung

Wie lang kann ein Messer ununterbrochen scharf bleiben? In der Fertigungs- und Verfahrenstechnik wird die typische Antwort auf diese Frage selten mehr als »einige Stunden, Tage, Wochen« sein. Die Natur hingegen hat eine andere Antwort: Ein Leben lang!

»Selbstschärfung durch gelenkten Verschleiß« ist das biologische Prinzip, das dauerhafte Schneidhaltigkeit ermöglicht. Bei den Nagetieren ist es bis zur Perfektion herausgebildet. Eine bis auf die Vorderkante des Zahns reduzierte Schmelzschicht ist durch eine hochstrukturierte Membran und interpenetrierende Netzwerke aus organischer und keramischer Phase mit dem Dentinkern

verbunden. Dabei verfeinerte sich das Mikrogefüge des Schmelzes durch die Evolution in Millionen von Jahren. Es erlaubt optimale Kraftableitung und Bruchsicherung.

Im Bereich der Maschinenmesser und Zerspanungswerkzeuge hat der technische Entwicklungsprozess in den letzten Jahrzehnten zahlreiche neue Beschichtungssysteme zur Verbesserung der Standzeit und Schneidhaltigkeit von Werkzeugen hervorgebracht. Bei den Entwicklungen ging es um verringerte Verschleißraten, nicht um Selbstschärfung. Weitere Fortschritte im Hinblick auf Produktionsleistung, Schnittkantenqualität, erreichbare Feinheiten, Energieeffizienz und neue Anwendungen sind auf diese Weise kaum zu erwarten.

In der vorliegenden Machbarkeitsstudie wurde das Potenzial der biologischen Lösung und Wege für ihre technische Verwertung aufgezeigt. Selbstschärfende Werkzeuge sind durch gezielt eingesetzte Verschleißvorgänge darstellbar. Lokale Verschleißraten als Ergebnis einer komplexen Interaktion von Werkstoffen, Werkzeuggeometrien, Maschinendesign und Betriebsparametern müssen dabei in einem integralen Entwicklungs-Prozess aufeinander abgestimmt werden.

Literatur

Wong-2004 T. Wong, W. Kim, P. Kwon: Experimental support for a model-based prediction of tool wear; *Wear 257* (2004) 790-798

Bauer-2001 Bauer, W.: Untersuchung des Einzelzerkleinerungsvorganges in Schneidmühlen am Beispiel von Polypropylen. Fortschritt-Bericht VDI, Reihe 3, Nr. 694, VDI Verlag 2001

Powitz-2004 Powitz, H.: Untersuchung der Zerkleinerung von Kunststoffen mit einem Pendelschneidwerk. Dissertation. Fakultät für Bergbau, Hüttenwesen und Maschinenwesen der TU Clausthal. Clausthal 2004

Keldenich-2000 Keldenich, K. et al: Feinteiliger Brennstoff aus Müll (Micromelt). In: Urban, A. I.; Bilitewski, B.; Faulstich, M.: Thermische Abfallbehandlung. Schriftenreihe des Fachgebietes Abfalltechnik. Universität GH Kassel, 2000

Owen-1840 Owen R.: Odontography; or, A Treatise on the Comparative Anatomy of the Teeth. Vol I. Bailliere, London, 1840/1845

Schröder-1987 H.E. Schröder: Orale Strukturbiologie. Thieme, Stuttgart 1987

Tülp-1997 J. Türp; K. Alt: Grundwissen der Odontologie: Topographie, Terminologie, Klassifikation. In: J. Türp; K. Alt (Hrsg.): Die Evolution der Zähne. Quintessenz-Verlag, Berlin 1997

Pfretzschner-1997 H.-U. Pfretzschner: Anpassung der Zahnmorphologie an die Ernährung bei rezenten und fossilen Säugetieren. In: J. Türp; K. Alt (Hrsg.): Die Evolution der Zähne. Quintessenz-Verlag, Berlin 1997

Martin-1997 T. Martin: Schmelzmikrostrukturen bei Säugetieren. In: J. Türp; K. Alt (Hrsg.): Die Evolution der Zähne. Quintessenz-Verlag, Berlin 1997

Pflumm-1997 W. Pflumm: Biologie der Säugetiere. Pareys Studientexte, Nr 66. Berlin 1989

Koenigswald-1999 W. v. Koenigswald: Funktionsmorphologische Anpassung im Zahnschmelz. In: U. Gansloßer (Hrsg.): Spitzenleistungen – Die unglaublichen Fähigkeiten der Tiere. Filander-Verlag, Fürth 1999

Berg-2002 H. van den Berg; H. Westphal; V. Sottke; R. Tabersky: Development and Applications of new Composite and Multilayer Composite

Coatings. Vortrag. Euro PM2002 Conference in Lausanne/Schweiz, 7.-9.10.2002

Rechenberg-2004 Rechenberg, I.: Ausgewählte Kurzfassungen zu den Vorlesungen Bionik I. Lehrstuhl für Bionik & Evolutionstechnik an der TU Berlin, Berlin 2004