



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

Fakultät Maschinenwesen Institut für Lebensmittel- und Bioverfahrenstechnik
Professur Lebensmitteltechnik

Vorstudie zum Trennen hochviskoser Massen

Bearbeitungszeitraum:	15.10.2012 bis 31.01.2013
Bearbeiter:	Dipl.-Ing. Stefan Schuldt Dr.-Ing. Yvonne Schneider Prof. Dipl.-Ing. Dr. rer. nat. techn. habil Harald Rohm



**DRESDEN
concept**
Exzellenz aus
Wissenschaft
und Kultur

Inhaltsverzeichnis

	Inhaltsverzeichnis	2
1	Parametrierung existierender Trennprinzipien	3
1.1	Erfassung der Lösungen von Theegarten-Pactec	3
1.2	Berücksichtigung zugänglicher Fremdlösungen	6
2	Formulierung von Zielgrößen	6
2.1	Festlegung von Qualitätskriterien für das Schnittergebnis	6
2.2	Erfassung zwingender technischer Randbedingungen	7
3	Erfassung der den Trennvorgang betreffenden Einflussfaktoren	11
3.1	Beschreibung und Parametrierung der relevanten Schnittgüter	11
3.1.1	Zusammensetzung von Zuckerwaren	11
3.1.2	Textur und Phasenverhalten von Zuckerwaren	13
3.2	Parameterfelder der Verarbeitungsbedingungen	16
3.2.1	Klimatische Parameter	16
3.2.2	Produktgeometrie	17
3.3	Zusammenfassung der Problemstellung	17
4	Potentiale und Grenzen alternativer Trennprinzipie	18
4.1	Trennprinzipie	18
4.1.1	Mechanisches Schneiden	18
4.1.2	Erodierendes Trennen	19
4.1.3	Impulsartige Trennverfahren	20
4.2	Strategien zur Erhöhung der Schneidleistung	22
4.2.1	Serielltes Schneiden mit erhöhter Relativgeschwindigkeit	22
4.2.2	Parallelisiertes Schneiden	23
4.2.3	Sequenzierung des Trennvorganges	24
5	Rahmenkonzept für Forschungsprojekt	24
5.1	Projektziel	24
5.2	Vorgehensweise/Strategischer Ansatz	25
5.3	Beiträge der Projektpartner	26
5.3.1	Verarbeitungstechnik	26
5.3.2	Lebensmitteltechnik	26
5.3.3	Theegarten-Pactec	27
6	Evaluierung von Fördermöglichkeiten	28
	Quellenübersicht	30

Vorbemerkung

Der vorliegende Bericht basiert auf persönlichen Gesprächen mit Thomas Nündel, Design Engineer bei Theegarten-Pactec, Andréa Pernot-Barry, Technische Direktorin der Zentralfachschule der Deutschen Süßwarenwirtschaft (ZDS), auf von Theegarten-Pactec bereit gestellten Unterlagen sowie auf unabhängigen Recherchen des Instituts für Lebensmittel- und Bioverfahrenstechnik.

1 Parametrierung existierender Trennprinzipien

1.1 Erfassung der Lösungen von Theegarten-Pactec

Grundsätzlich werden im cut&wrap-Bereich zwei Arbeitsweisen zum Trennen der Massen angewendet. Zum einen erfolgt eine Trennung durch unter- und oberseitige Zuführung zweier Messer (Guillotinenschnitt; z.B. bei Maschinentypreihe U1 und EW). Zwischen der Schnittauführung muss der Massestrang abgebremst und beschleunigt werden, so dass eine ausreichende Produktzuführung und ein Stillstand der Massen während der Schnittauführung gewährleistet ist. Zum anderen wird das Produkt bei konstantem Strangvorschub durch rotierende Messer (z.B. Maschinentyp WHD, WHF) bzw. mittels Guillotinenschnitt (FPW2) getrennt. Bei dieser Methode bewegt sich das Messer während des Schneidens in Strangrichtung.

Bei allen Trennprinzipien muss gewährleistet werden, dass auch bei sehr langsamen Schneidgeschwindigkeiten während des Anfahrens ein wirksames und störungsfreies Durchtrennen möglich ist.

Im Folgenden werden Schneidvorgänge der Trennung mit intermittierendem Strangvorschub anhand der U1-Typreihe sowie der Trennung bei kontinuierlichem Strangvorschub anhand des Maschinentyps WHD beschrieben und erläutert. Als Schneidtakt wird die gleichzeitige Ausführung eines oder mehrerer Schnitte definiert

Maschinentypreihe U1

Bei diesen Maschinentypen werden Guillotinenschnitte ausgeführt durch ober- und unterseitige Zusammenführung zweier gerader Messer mit einer Versetzung von wenigen μm zueinander. Die Messer einer Maschine des Typs U1-TR werden über jeweils einen Schwinghebel bewegt mit einem Gesamthub von jeweils 12° , wobei der Hub zum Schneiden eines Produktes mit 30 mm Querschnitt jeweils ca. $5,5^\circ$ beträgt, bei einem Schneidweg von 15 mm zum Durchtrennen der halben Produkthöhe. Bei dieser Schneidauführung kann in erster Näherung ein linearer Schneidvorschub und ein drückender Schnitt angenommen und eine Zügigkeit beim Schneiden vernachlässigt werden. Unter der theoretischen Annahme einer sinusgeprägten Messergeschwindigkeit und 1000 Schneidtakten in der Minute, also 60 ms pro Schneidtakt, würde sich an der Mittelposition der Klinge eine maximale Klingengeschwindigkeit von ca. 1,75 m/s ergeben. Während eines Schnittes verringert sich die Schneidgeschwindigkeit bis auf 0 m/s im Wendepunkt des Messervorschubs (Abbildung 1.1). Bezieht man die Zeitdauer auf den zugehörigen Messervorschub von 15 mm erhält man eine mittlere Schneidgeschwindigkeit von 1,1 m/s.

Die Maschinentypreihe U1 wird mit einfacher Schnittauführung (z.B. U1-I) für max. 1000 Schneidtakten/min und doppelter Schnittauführung (durch 2 nacheinander angeordnete Schneidvorrichtungen, also 2 Schnitte pro Schneidtakt; U1-D-CW) für max. 750 - 1000

Schneidtakten/min (1500 - 2000 Schnitte/min) mit entsprechend erhöhtem Strangvorschub, angepasster Produktabnahme und doppelter Verpackungslinie hergestellt.

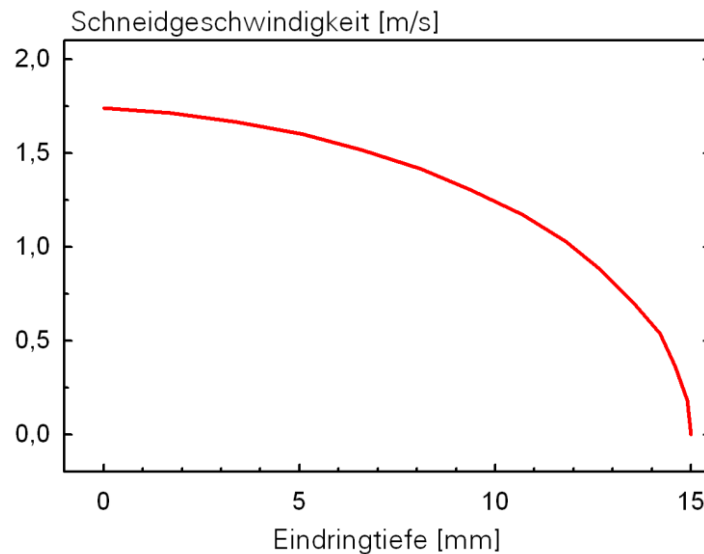


Abbildung 1.1: Schneidgeschwindigkeit einer Klingenseite der U1-TR über der Eindringtiefe bei einer halben Produkthöhe von 15 mm und der theoretischen Annahme von 1000 Schneidtakten/min

Zur Durchführung eines Schnittes ist ein Abbremsen des Massestranges auf Stillstand mit anschließender Strangbeschleunigung und erneuter Abbremsung zur Gewährleistung des Produktvorschubs notwendig. Dabei können für eine Maschine des Typs U1-I bei einer Produktlänge von 16 - 45 mm und 1000 Schneidtakten/min mittlere Stranggeschwindigkeiten (Nettostrangvorschub über der Zeit) von 0,25 - 0,75 m/s angenommen werden. Für eine Maschine des Typs U1-D-CW halbiert sich die mittlere Stranggeschwindigkeit bei gleicher Schneidtaktzahl für die jeweiligen Produktabmaße. Bei gleicher mittlerer Stranggeschwindigkeit verdoppelt sich die Anzahl der geschnittenen Produkte. Dabei wirken aufgrund der größeren Beschleunigungen höhere Belastungen auf den Strang, welche benötigt werden, um die doppelte Stranglänge intermittierend voranzuschieben.

Maschinentyp WHD

Der Maschinentyp WHD arbeitet in einem Bereich bis 1800 Schneidtakten/min. Da die rotierende Messerwelle 2 Klingen auf einer Kreisbahn führt, werden pro Umdrehung 2 Schnitte ausgeführt. Die Klingen sind als gebogenes Messer mit konstantem Krümmungsradius gefertigt und werden über zwei Langlöcher in der Form angestellt, dass der Kreisursprung der Klinge nicht koaxial zur Antriebswelle ausgerichtet ist (Abbildung 1.2). Dadurch wird ein Schneiden mit Zügigkeit realisiert, wobei eine Verringerung der Gesamtschneidkräfte durch Aufteilung in tangential und normale Komponenten (bezogen auf die Schneidrichtung) erfolgt. Aussagen über Gesamtschneidkräfte und daraus resultierende Spannungen im Produkt sind aufgrund der Datenlage nicht möglich. Laut Drut (1992) können die Sichelmesser durch Verringerung der Schneidkräfte schlanker ausgeführt werden, woraus sich geringere Schneidverformungen und Splitterneigung im Produkt ableiten lassen.

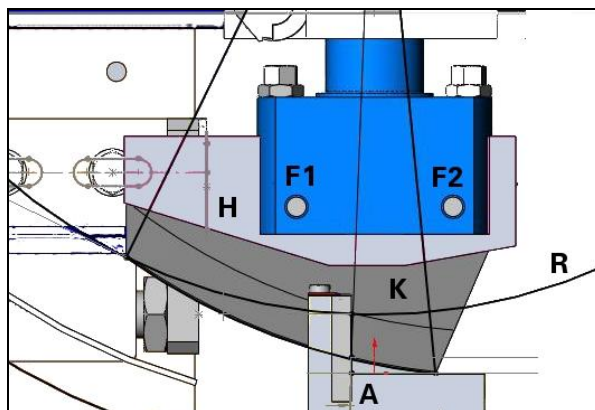


Abbildung 1.2: Darstellung der Ausrichtung des Messers K der WHD beim Schneidvorgang mit der Produktauflagefläche A und der Klingenhalterung H mit den Feststellschrauben F1 und F2; die mit R gekennzeichnete Kreisbahn hat ihren Ursprung in der Rotationachse der Antriebswelle; Antriebswelle rotiert im Uhrzeigersinn

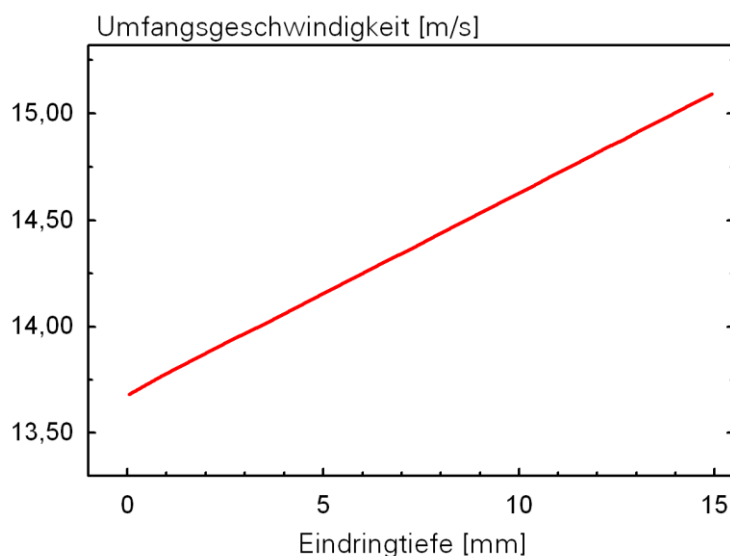


Abbildung 1.3: Näherungsweise Umfangsgeschwindigkeit des Sichelmessers der WHD über der Eindringtiefe bei einer Produkthöhe von 15 mm und einer Drehzahl von 900/min (entspricht 1800 Schneidakte/min)

Abhängig von der Anstellung der Klinge ist es möglich Produkthöhen von bis zu 15 mm zu durchtrennen. Unter Einbeziehung von Baugruppenzeichnung N01.372.188.00, Messerzeichnung N01.372.139.04 und weiterer geometrischer Kenndaten können Umfangsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Entfernung zur Rotationsachse während des Schneidvorgangs berechnet werden (Abbildung 1.3). Dabei zeigt sich, dass die Umfangsgeschwindigkeit, also die Geschwindigkeit mit welcher sich die Klinge relativ zum Massestrang bewegt, um etwa eine Zehnerpotenz über der maximalen Schneidgeschwindigkeit der U1-TR liegt. Dabei muss jedoch beachtet werden, dass die Umfangsgeschwindigkeit nicht der effektiven Schneidgeschwindigkeit entspricht. Überschlägt man die Dauer für einen Winkelfortschritt, welcher nötig ist einen Massestrang mit entsprechender Dicke zu durchtrennen, kann man eine resultierende Schneidgeschwindigkeit berechnen: diese beträgt etwa 3,8 m/s

und liegt somit um das dreieinhalbfache über der mittleren Schneidgeschwindigkeit der U1-TR.

Die Trennung der Massestränge erfolgt ohne Abbremsen des Stranges während der Schnittaufführung. Zur Anpassung von Schnitt und Produktvorschub erfolgt eine Schrägstellung der Rotationsachse der Antriebswelle bei orthogonaler Ausrichtung Schneidkante der Klingen zur Produktvorschubrichtung, wodurch ein „Mitfahren“ im Produkt gewährleistet wird. Bei einer Produktlänge von 18 - 40 mm und 1800 Schneidakte/min ergeben sich Stranggeschwindigkeiten von 0,5 - 1,2 m/s.

1.2 Berücksichtigung zugänglicher Fremdlösungen

Gängige Falt-und-Einschlag-Maschinen auf dem Markt nutzen zu Theegarten-Pactec analoge Trennprinzipien. Ein weiteres Trennprinzip ist das Rolling&Scoring, bei welchem die Massen (vorwiegend Kaugummiartikel) vorgerillt und im Anschluss getrennt werden, also die Trennung in zwei Abschnitte unterteilt wird. Ein Beispiel hierfür bildet die Maschinentypreihe GW der Firma LoeschPack für Kaugummiartikel (Tab-Gums). Hierbei wird der zu trennende Massestrang in Einzelsegmente unterteilt, welche einer Rill- und Brechwalze zugeführt werden. Dabei können die Rill- und die Brecheinheit getrennt (GW-05) oder innerhalb einer Maschine (z.B. GW-04) angeordnet sein. Mit einer Rillwalze werden die längeren Produktsegmente auf ca. 1/10 ihrer ursprünglichen Höhe eingeschnitten. Anschließend werden die Segmente ausgerichtet (kalibriert) und einem Brecherkopf zugeführt, der das Produkt an den Kerbungen absichert und somit maßhaltige Einheiten erzeugt, welche einzeln verpackt werden. Laut Bewerbung beschränkt sich das zu trennende Produktsortiment der Maschinentypreihe GW auf Streifenkaugummis oder Tab Gums, also dünne Produkte. Dabei sollen bis zu 3000 Schneidakte/min möglich sein (für GW-05). In Folge der zur Bruchtrennung benötigten spröden Materialeigenschaften ist ein Vorhalten der Produkthalbzeuge zum Abkühlen und Konditionieren erforderlich (bis zu 12 h), was sich einem erhöhten Platzbedarf für dieses Maschinenprinzip äußert (Pernot-Barry, 2012).

Ein Nachteil des Maschinenprinzips gegenüber gängigen cut&wrap-Maschinen ist die örtlich und zeitlich getrennt vollzogene Formgebung der Schnittgüter. Abhängig von den Inhaltsstoffen kann es zu Veränderungen der Abmaße der Produkthalbzeuge während der Lagerung kommen (Fließen, Kontraktion). Die Maschine kann jedoch nur effizient arbeiten, wenn optimale Produktgeometrien zugeführt werden. Zu hohe Halbzeuge, können zu Blockaden im Brecherspalt führen und große Verluste durch Abfall und Standzeiten bewirken.

2 Formulierung von Zielgrößen

2.1 Festlegung von Qualitätskriterien für das Schnittergebnis

Generell existieren keine allgemeinen Bewertungskriterien für die Beschaffenheit des Schnittbildes der zu durchtrennenden Süßwaren. Subjektive Kriterien sind die Einhaltung möglichst glatter, gratfreier und planer Schnittflächen bei größtmöglicher Einhaltung von Form und Abmessung des Produktes. Toleranzangaben von Herstellerseite können nur begrenzt angegeben werden. Für die Höhe von Kaugummiartikeln betragen sie für zwei unterschiedliche Produkte beispielsweise $2,5 \pm 0,015$ mm bzw. $5,5 \pm 0,2$ mm. Weitere Aussagen

zur Einhaltung von Toleranzen beim Einhalten von Schnittmaßen unterliegen Schätzungen und betragen ± 1 mm für lange Produkte bis $\pm 0,2$ mm für kurze Produkte. Bei der Formgebung wird ein Streubereich von max. $\pm 0,5$ mm angestrebt. Am Schneidsystem selber ist eine Verstellung der Messerklinge von ± 1 mm gewährleistet (für WHD). Produktabhängig findet bei einigen Produkten eine Nachformung nach Verpacken der Schneidgüter auf ca. $\pm 0,2$ mm statt und kann das Einhalten strenger Schneidmaßtoleranzen ersetzen. Einige Massen kontrahieren nach dem Verpackungsschritt, was sich erschwerend auf das Einhalten maßgenauer Vorgaben auswirkt. Zur Qualitätsbewertung wäre die Erarbeitung eines Produktkataloges mit verschiedenen Formaten und ihren notwendigen Abmaßtoleranzen sinnvoll.

2.2 Erfassung zwingender technischer Randbedingungen

Bei der Konstruktion von Schneid- und Verpackungsmaschinen für Süßwaren stellen sich diverse Herausforderungen: die Maschinen müssen lebensmittel- und hygienegerecht gefertigt werden und sind aufgrund starker Beschleunigungen und hoher Geschwindigkeiten hohen Belastungen ausgesetzt. Bei meist geringem Bauraum müssen eine Zugänglichkeit für Bedien- und Wartungspersonal innerhalb geltender Sicherheitsvorschriften gewährleistet und Störungen schnell beseitigt werden können. Dabei müssen unterschiedliche teils inhomogene Medien maßhaltig getrennt und verpackt werden, wobei Verschleißbeanspruchungen und Verschmutzungen auftreten.

Als globale Zielsetzung von Theegarten-Pactec kann eine Erhöhung derzeitiger Schneidtaktzahlen bei cut&wrap-Anwendungen auf mindestens 3000 Schneidakte/min bei Minimierung von Verlusten durch Betriebsstörungen und Maximierung der Standzeiten festgehalten werden. Dabei sollten die Verpackungsmaschinen die bisherigen räumlichen Abmessungen einhalten. Eine übergeordnete Zielorientierung ist Einsparung von Lagerraum und Energie. Mögliche Lösungen zum Erreichen höherer Schneidtaktzahlen müssen also unter diesen Rahmenbedingungen wirtschaftlich durchführbar sein. Beim Schneiden mit hoher Taktzahl existieren vielfältige Störgrößen, welche limitierend wirken können. Hauptsächlich sind das Splintern der Produkte während des Schneidens sowie Anhaftungen an den Schneidwerkzeugen zu nennen.

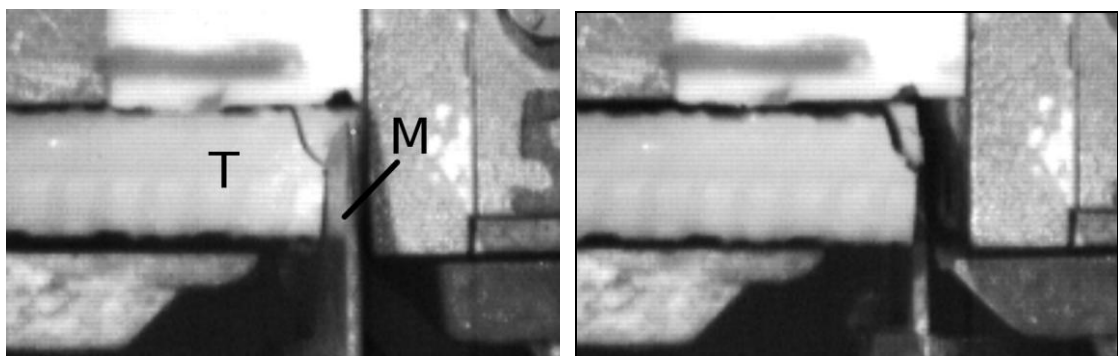


Abbildung 2.1: unkontrollierte Rissausbreitung in einem Toffeestrang *T* bei Schnittauslösung durch ein rotierendes Sichelmesser *M* (bewegt sich effektiv von unten nach oben und in Blickrichtung durch den Strang) (linke Abbildung) und Absplintern von Produkt in Folge des Nachdrängens der Klinge bzw. der Schnittausführung an der gewünschten Position (rechte Abbildung); rechts von der Klinge: Greifer des Beschleunigungsrades, welcher das abgetrennte Produkt zur Packstrecke überführt

Das Splintern von Süßwaren im Bereich der Trennzone hat unsaubere und gratbehaftete Schnittflächen und allgemein einen Produktverlust zur Folge. Die dabei erzeugten Abplatzungen verschmutzen die Maschine bis hin zur Verpackungstrecke, was zu Störungen führen kann. Abbildung 2.1 illustriert die Abfolge von Rissentstehung und Splintern eines Toffeestranges als Bildsequenz aus einer High-Speed-Aufnahme. In dem Video ist zu erkennen, dass der Toffeestrand durch das eingreifende Sichelmesser nach oben gedrückt und ein Riss genau dann ausgelöst wird, wenn der Produktstrang gegen den oberen Anschlag gedrückt wird (linke Aufnahme). Das Nachdrängen der Klinge innerhalb der vorgegebenen Trennebene erzeugt eine weitere Trennfläche und in Folge die Ausbildung einer Abplatzung, welche sich unkontrolliert im Prozessraum bewegt. Eine Abfolge mehrerer Schnitte zeigt, dass sich die Risse zufällig ausrichten; entsteht die Rissfläche innerhalb der vorgesehenen Trennebene, ist kein Abplatzen zu verzeichnen.

Nach Drut (1992) wirkt die Spannungsrelaxation des Produktes dem Spannungsaufbau durch Verformung in Folge eines Schneidvorgangs entgegen. Es kommt dann zur Schnitt- bzw. Bruchauslösung, wenn die Schneidverformungsgeschwindigkeit in der Weise erhöht wird, dass die sich dadurch aufbauende Spannung die Festigkeit des Produktes übersteigt. Abhängig von den stofflichen Eigenschaften des Produktes und der Beanspruchungsgeschwindigkeit kommt es zur Ausbildung eines Zäh- oder eines Sprödbrechens (Drut, 1992). Letzterer ist gekennzeichnet durch eine maximale Rissausbreitungsgeschwindigkeit (Bruchgeschwindigkeit) (Kerkhof, 1963; Dear, 1996) und sollte begünstigt werden durch hohe Schneid- bzw. Verformungsgeschwindigkeiten bei gleichzeitig sprödem bzw. hartem Materialverhalten des Produktes. Der Bruch oder Riss verläuft dabei stets senkrecht zur maximalen Hauptzugspannung (Drut, 1992). Bei instabiler Rissausbreitung breitet sich ein Primärriss mit zunehmender Geschwindigkeit aus. Aufgrund der Spannungsverhältnisse im Vorfeld des Primärrisses erhöht sich die Wahrscheinlichkeit für eine Bruchgabelung bei Erhöhung der Bruchenergie in Folge einer wachsenden Bruchgeschwindigkeit. Die Annäherung bzw. das Erreichen der maximalen Bruchgeschwindigkeit führt demnach zu raueren Bruchflächen sowie Bruchverzweigungen mit Splintern der Produkte (Drut, 1992; Przywara, 1995). Die Bildung von Bruchgabelungen kann durch Inhomogenitäten in der Matrix, wie Lufteinschlüsse oder Partikel begünstigt werden. Diese Inhomogenitäten sind bei Süßwaren prinzipiell zu erwarten.

Die Beobachtungen am Beispiel des Toffeestrangschneidens lassen das Auftreten von Sprödb Brüchen mit instabiler Rissausbreitung vermuten. Interessanterweise splintern die Toffeemassen visuell betrachtet gleich, egal ob mit 750 Schneidtakten/min oder 1500 Schneidtakten/min geschnitten wird. Es scheint also nicht zu einer Zunahme des Effektes zu kommen. Dies legt nahe, dass die kritische Beanspruchungsgeschwindigkeit zur Auslösung eines Sprödbrechens unterhalb der angewendeten Schneidgeschwindigkeit liegt. Im Industriemaßstab kann eine Reduktion der Schneidtaktzahl jedoch auch zu einer Verringerung des Splinterns führen. Maximale Bruchgeschwindigkeiten von erstarrtem Glas oder PMMA bzw. PE bei Raumtemperatur liegen im Bereich von 10^3 m/s bzw. $0,3 \times 10^3$ m/s (Kerkhof, 1963, Dear, 1996). An den High-Speed-Aufnahmen an Toffeemassen ist zu beobachten, dass sich die Rissausbildung plötzlich, also mit sehr hoher Geschwindigkeit vollzieht. Es ist demnach anzunehmen, dass die maximalen Bruchgeschwindigkeiten der zu schneidenden Süßwaren für dieses Beispiel weit oberhalb der Schneidgeschwindigkeit liegt. Laut Drut (1992) müssen die Massen ausreichende viskoelastische Eigenschaften aufweisen, damit eine Sprödbbruchtrennung möglich wird, eine messtechnische Beschreibung der

viskoelastischen Eigenschaften fand jedoch nicht statt. Voraussetzungen für diese Art der Trennung erfüllten demnach nicht alle zu schneidenden Zuckerwaren. Allgemein erhöht sich die Splitterneigung bei Absenkung der Produkttemperaturen.

Anhaftungs- oder Adhäsionsphänomene unterliegen komplexen Vorgängen und werden durch chemische und physikalische Wechselwirkungen sowie die kohäsiven Eigenschaften der Stoffsysteme bestimmt. Eine genaue Beschreibung der Ursachen von Anhaftungen die zu einer Verschmutzung führen können, sind aufgrund simultan ablaufender Adhäsionsmechanismen nicht ohne weiteres möglich (Müller et al., 2006; Schultz & Nardin, 2003). Am Beispiel des Schneidens von Süßwaren führt das Anhaften von Produkt am Schneidwerkzeug praktisch zu einer Verbreiterung der Klinge (Abbildung 2.2). In Folge kommt es zu unsauberen Schnitten bei beeinträchtigter Maßhaltigkeit und Produktverlusten. Der zu schneidende Strang kann verschoben werden und Anhaftungen platzen in unregelmäßigen Abständen ab. In Summe steigt die Wahrscheinlichkeit für Störungen (auch Packmittelstörungen). Gehandhabt wird das Problem, indem die Verarbeitung in subjektiv gewählten Intervallen angehalten und die Klinge gereinigt wird. Eine Erhöhung der Schneidgeschwindigkeit scheint nicht zu einer Verstärkung der Anhaftung zu führen. Generell erhöht sich die Klebrigkeit bzw. Produktanhaftung mit erhöhter Temperatur oder höherer Luftfeuchte.

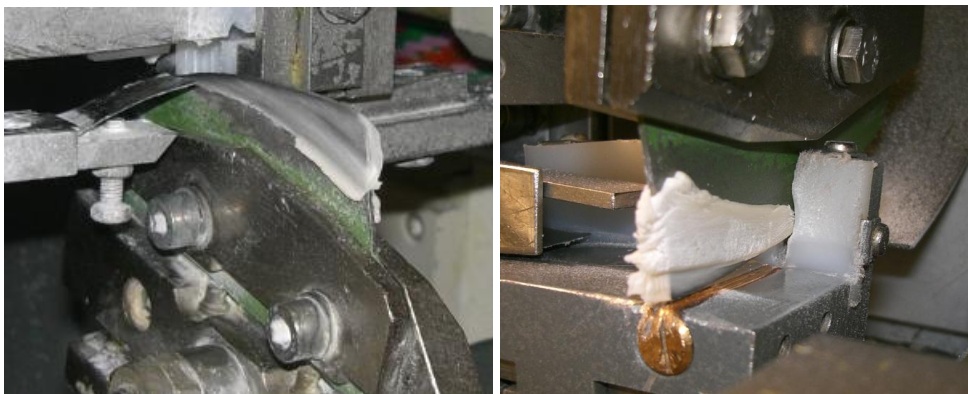


Abbildung 2.2: *Produktanhaftung am Sichelmesser einer WHD mit Verschleiß an der PTFE-Beschichtung (grün); Drehrichtung jeweils gegen den Uhrzeigersinn*

Im industriellen Maßstab wird dem Phänomen mit unterschiedlichen Maßnahmen begegnet. So kommen Klingenbeschichtungen zum Einsatz, welche die Anhaftungsneigung der Oberfläche verringern sollen, in Abbildung 2.2 als grüne PTFE-Beschichtung zu erkennen. Am konkreten Beispiel wird deutlich, dass die Verschleißbeständigkeit der Beschichtung nicht optimal an die Nutzungsdauer der Klinge angepasst ist, da im Bereich der beanspruchten Klingenflanken keine Beschichtung mehr vorhanden ist. Bei einem weiteren Lösungsansatz werden lebensmittelöhlhaltige Aerosole (meist mittelkettige Öle) oder Pulver (zumeist Talkum) auf die Produktstränge aufgebracht, um die Anhaftung an den Schneidwerkzeugen zu verringern. Letztere können aufgrund ihrer abrasiven Wirkung Verschleiß an Maschinenteilen hervorrufen bzw. verstärken.

Eine weitere potentielle Störgröße stellt das „Strangpeitschen“ dar. Dieses entsteht beim Schneidprinzip mittels Guillotinschnitt durch die intermittierende Zuführung der vorgeformten Massestränge, wobei Trägheitseffekte zu einem „Rückstauchen“ der Stränge führen. Das Strangpeitschen kann durch Niederhalter (Walzen) unterdrückt werden und wird nicht als begrenzend für die Schneidleistung angesehen. Bei einer Erhöhung der Strangge-

schwindigkeit in Folge höherer Schneidtaktzahl kommt es prinzipiell zu einer stärkeren mechanischen Strangbelastung, da die Masse innerhalb kürzerer Zeit umgeformt werden muss. Generell ist davon auszugehen, dass die mechanische Vorgeschichte des Stranges einen Einfluss auf das Schneidergebnis ausübt, wobei eine starke bzw. schnelle Strangumformung zu Spannungen im Material führen und somit ein Splintern während des Trennvorgangs begünstigen kann. Eine Steigerung der Stranggeschwindigkeit hätte außerdem ein verstärktes Strangpeitschen (bei intermittierender Strangzuführung) zur Folge. In letzter Konsequenz wären mehr Formwalzen als derzeit nötig, um eine Umformung zu realisieren. Prinzipiell erhöht sich durch eine Erhöhung der Stranggeschwindigkeit also die Gefahr potentieller Störungen.

Schneiden ist gekennzeichnet durch eine erzwungene Relativbewegung zwischen Produkt und Messer, bei welcher mechanische Beanspruchungen durch Bruch-, Dehnungs- und Reibungsphänomene einen Verschleiß an der Messerklinge verursachen. Dabei haben die Produkteigenschaften maßgeblichen Anteil an der Verschleißintensität. Beim industriellen Schneiden laufen Klingen über einen längeren Zeitraum, ohne zwischendurch geschärft zu werden. Prinzipiell besteht eine stärkere Verschleißbeanspruchung beim Schneiden von Produkten mit erhöhter Zähigkeit und Festigkeit. Neben dem Verschleiß an der Schneidenflanke und damit einhergehendem Potential höherer Anhaftungsneigung (Abbildung 2.2) wirkt der Verschleiß vor allem an der Messerkante (Schneidenwate). Eine Abnahme der Schneidenschärfe führt demnach zu einer Erhöhung der erforderlichen Schneidenergien zur Durchtrennung der Produkte (Schuldt et al., 2013). Zu den Auswirkungen einer breiteren Schneidenwate auf das Bruchverhalten kann an dieser Stelle keine differenzierte Aussage getroffen werden, jedoch sind eine Abnahme der Schneidpräzision und Veränderungen des Spannungszustandes vor der Schneidenwate zu erwarten. Eine Zunahme des Splinterns der Produkte wird vermutet. Entsprechende Beeinträchtigungen des Trennergebnisses durch Verschleiß an den Klingen sollte deshalb nicht vernachlässigt werden.

In extremen Belastungssituationen können Verschleißbeanspruchungen auftreten, die zu Gewaltbrüchen im Bereich der Klingenschneide führen (Nündel, 2001). Beim konkreten Beispiel aus einem internen Protokoll der Firma Theegarten-Pactec zeigten sich außerdem Gefügeänderungen in Folge starker Erwärmung. Als mögliche Ursache für Gewaltbruch und Gefügeänderung wird das Anschlagen der Messer gegen die Greifer des Beschleunigungsrades genannt, hervorgerufen durch fehlerhafte Einstellung, aber auch eine mögliche Verschiebung der Messers durch zu harte bzw. kalte Massestränge. Auch eine Erhitzung durch Reibung am Produkt kann nicht ausgeschlossen werden.

Laut Fleischhauer (2012) sollte eine Klinge eine ausreichende Härte (hohe Steifigkeit) im Bereich der Schneide besitzen (Verschleißbeständigkeit), jedoch ansonsten möglichst zäh sein, um bei hohen Beanspruchungsgeschwindigkeiten nicht zu brechen. Diese Eigenschaft kann durch Teilhärtung nur im Bereich der Schneidkante gewährleistet werden. Hohe Schneidgeschwindigkeiten könnten generell zu Verformungen an der Klinge führen, welche die Gefahr bergen die Schneidpräzision zu beeinflussen (Fleischhauer, 2012).

3 Erfassung der den Trennvorgang betreffenden Einflussfaktoren

3.1 Beschreibung und Parametrierung der relevanten Schnittgüter

3.1.1 Zusammensetzung von Zuckerwaren

Die Bezeichnung Zuckerwaren umfasst Artikel welchen einen bedeutenden Anteil an Sacchariden in Form von Saccharose, Glucosesirup oder anderen kohlenhydratbasierten Inhaltsstoffen aufweisen. Sie grenzt sich vom Oberbegriff Süßwaren ab, dem unter anderem auch Backwaren oder Speiseeiserzeugnisse angehören (Hoffmann et al., 2002). Schneidgutrelevante Zuckerwaren können durch die Produktgruppen Hartkaramellen, Weichkaramellen und Kaugummiartikel zusammengefasst werden. Diese Produktgruppen sind in Koch- und Knetmassen zu unterscheiden.

Tabelle 3.1: Zusammensetzung von Hart- und Weichkaramellen nach Hoffmann et al. (2002)

Stoff	Hartkaramellen [%]	Milchhaltige Weich- karamellen [%]	Milchfreie Weich- karamellen [%]
Wasser	1 - 3	4 - 8	4 - 8
Asche	0,1 - 0,2	1 - 1,5	1
Glukosesirup (TM)	30 - 60	20 - 50	20 - 50
Saccharose	40 - 70	30 - 60	30 - 60
Lactose	k. A.	4 - 6	-
Invertzucker	1 - 8	1 - 10	1 - 10
Fett	k. A.	3 - 15	2 - 15
Gelatine	k. A.	0,05 - 0,5	0,05 - 0,5
Milcheiweiß	k. A.	3 - 5	-

TM – Trockenmasse; k.A. – keine Angabe

Zu den Kochmassen zählen Hart und Weichkaramellen. Hier werden Saccharose und Glucosesirup mit Wasser bei Temperaturen von ca. 120 °C (Weichkaramellen) bzw. ca. 140 °C (Hartkaramellen) auf den gewünschten Trockenmassegehalt eingekocht. Anschließend werden die weiteren Zutaten zugesetzt, die Massen homogenisiert und auf Ausformungstemperaturen von 30 - 40 °C bzw. 70 - 80 °C abgekühlt (Hoffmann et al., 2002). Hartkaramellen unterscheiden sich zu Weichkaramellen in ihrem Feuchtegehalt und enthalten meist keine Gelatine und kein bzw. wenig Fett. Weichkaramellen können in milchhaltige bzw. milchfreie Produkte unterschieden werden. In Tabelle 3.1 sind typische Zusammensetzungen von Hart- und Weichkaramellen aufgeführt.

Kaugummi zählen zu den Knetmassen, deren Inhaltstoffe bei ca. 60 °C vermischt werden. Die nachfolgenden Verarbeitungstemperaturen liegen bei ca. 40 °C. Kaugummi bestehen aus einem wasserlöslichen und einem wasserunlöslichen Anteil (Kaubase), welcher den eigentlichen Kaugummi ausmacht. Diese unverdauliche thermoplastische Kaumasse besteht zu einem Teil aus einem synthetischen (z.B. Polyvinylacetat) oder natürlichen Gummi. Den

größten Teil machen mineralische Füllstoffe (v. a. Calciumcarbonat, Talkum bei sauren Produkten) aus, welche die Kau- und Verarbeitungseigenschaften beeinflussen. Als Weichmacher werden Wachse oder Fette hinzugegeben. Tabelle 3.2 zeigt die Zusammensetzung von Kaugummi. Der wasserlösliche Anteil besteht hauptsächlich aus Süßungsmitteln, welche in der initialen Kauphase im Mund aufgebraucht werden. Saccharose als Süßungsmittel wird in Pulverform als kristalline Phase hinzugegeben. Glucosesirup wird als Feuchtigkeitsträger zugefügt. Ohne ihn wäre die Kaumasse bröcklig. Der Endwassergehalt der Kaugummimasse liegt zwischen 2 und 4 %.

Tabelle 3.2: *Zusammensetzung von Kaugummi nach Pernot-Barry (2012)*

Inhaltsstoff	Gesamtanteil [%]
Kaubaase	30 - 40
Süßungsmittel	40 - 60
Glucosesirup	bis 15
Aromen	2 - 3
Wasser	2 - 4
Süßstoffe	< 0,5
Weitere Zutaten	1 - 2

Nach ihren sensorischen Eigenschaften können Weichkaramellen nach Anonymus (1999) in gut kaubare, klebrige Toffees, weiche und gut beißbare Fudges, sowie elastische und kaugummiähnliche Kaubonbons unterteilt werden. Diese Eigenschaften werden teilweise über die kristallinen Anteile des Zuckers im Endprodukt gesteuert. Weichkaramellen mit kristalliner Phase werden mit Fondant beimpft, einer gesättigten Saccharoselösung mit fein verteilten Zuckerkristallen mit engem Korngrößenspektrum. Dies führt zu einer Rekristallisation gelöster Zuckerbestandteile mit einem homogenen Kristallwachstum und kleinen Kristallen in der gesamten Weichkaramelle (Reifung). Folge der Rekristallisation bzw. kristalliner Anteile in den Massen ist eine leicht brechende Weichkaramelle mit geringerer Klebrigkeit im Mund und verbesserten Verarbeitungseigenschaften (weniger Anhaftung an Verarbeitungswerkzeugen). Glucosesirup agiert als Kristallisationshemmer und erhöht die Sättigungskonzentration in der Lösung. Die Rekristallisation ist ein zeitabhängiger Prozess, wobei ein Großteil der Reifung erst nach der Einzelverpackung der Verarbeitungsgüter vollzogen wird (Hoffmann et al., 2002; Pernot-Barry, 2012).

Während Hartkaramellen als einphasig zu betrachten sind, bilden Weichkaramellen disperse Systeme mit einer kontinuierlichen wässrigen Phase (Saccharidlösung) in welchen Öltröpfchen, Luftbläschen und Zuckerkristalle enthalten sein können. Kaugummis sind ebenfalls aus ein mehrphasiges Stoffgemisch mit dispers verteiltem Feststoffanteil (Zuckerkristalle). Eine wichtige Aufgabe kommt der Homogenisierung der dispersen Systeme während des Kochens, Knetens und Aufschlagens zu, da Texturinhomogenitäten veränderbare mechanische Eigenschaften der Masse zur Folge haben und das Trennverhalten der Massen beeinflussen können (Pernot-Barry, 2012). Laut Hoffmann et al. (2002) verringert die Feinverteilung der Fettphase die Neigung der Massen an den Schneidwerkzeugen zu kleben.

Sollen Produkte hergestellt werden, die insulinunabhängig verstoffwechselt werden oder nicht kariogen sein sollen, werden Zuckeraustauschstoffe als Pulver oder Sirup eingesetzt. Zuckeraustauschstoffe sind hauptsächlich Zuckeralkohole, vermehrt werden jedoch auch Oligo- und Polysaccharide wie Isomaltit oder Inulin eingesetzt, welche weniger abführend

wirken. Aufgrund ihrer teilweise geringen Süßkraft können sie als Füllstoff für Süßstoffprodukte agieren. Abhängig vom Zuckeraustauschstoff können unterschiedliche Eigenschaften der Massen in Bezug auf Referenzprodukte mit Saccharose auftreten. Xylitol oder Sorbitol sind eher hygroskopisch und erhöhen beispielsweise die Klebrigkeit der Massen, während Massen mit Mannitol diesbezüglich gute Eigenschaften aufweisen. Entscheidend sei hier nach Einschätzung von Pernot-Barry (2012) die Hygroskopizität, also die Neigung der einzelnen Bestandteile Wasser zu adsorbieren.

3.1.2 Textur und Phasenverhalten von Zuckerwaren

Bei der Herstellung von Zuckerwaren werden die Zutaten in der Regel bei erhöhter Temperatur verflüssigt und vermischt und anschließend durch Abkühlung in einen viskosen bis festen Zustand überführt. Beim Übergang zwischen flüssiger und fester Phase können Stoffe oder Stoffgemische unterschiedliche thermodynamisch stabile oder instabile morphologische Zustände durchlaufen. Thermodynamisch stabile Zustände in der Flüssigphase sind Schmelzen und Lösungen und im festen Zustand Kristalle. Instabile amorphe Zucker können in verschiedenen instabilen, nicht kristallinen Zuständen vorkommen: in einem hochviskosen glasartigen Zustand mit niedriger molekularer Mobilität oder als viskose Flüssigkeit in einem gummi oder lederartigen Zustand (Roos, 2010). Die Transformation von einem Glas zum gummiartigen Zustand durch Erwärmung oder der umgekehrte Vorgang durch Kühlung nennt man Glasübergang (Le Meste et al., 2002). Die Temperaturregion, bei der die Transformation eintritt, bezeichnet man als Glasübergangstemperatur T_g . Mit Unterschreitung der Glasübergangstemperatur wird der Glaszustand erreicht; das Material wird fest und spröde und neigt zum Splintern beim der Trennung (Drut, 1992). Tabelle 3.3 zeigt Glasübergangstemperaturen von Zuckern und Zuckeralkoholen, welche in Zuckerwaren Verwendung finden. Für Polymere wie sie Kaubasen Verwendung finden, existieren ebenfalls morphologische Übergangsbereiche. Die Glasübergangstemperatur von Polyvinylacetat beträgt beispielsweise 38 °C (Beiner et al., 1996; Burfield & Lim, 1983).

Tabelle 3.3: Glasübergangstemperaturen T_g von verschiedenen Zuckern und Zuckeralkoholen ohne Feuchteanteil nach Ergun et. al (2010)

Stoff	T_g [°C]
Fructose	5
Glucose	31
Lactose	101
Maltose	87
Saccharose	62-70
Sorbitol	-9
Xylitol	-29
Maltitol	39
Isomalt	63,6
Mannitol*	13

*nach Kim et al (1998)

Die Glasübergangstemperatur ist bei gleicher Temperatur und Druck abhängig von der Zusammensetzung der Mischung sowie den T_g der jeweiligen Einzelkomponenten. Allgemein führt eine Erhöhung des Feuchtegehalts zur Senkung der Glasübergangstemperatur (Nowakowski & Hartel, 2002). Generell besteht bei Zuckerwaren ein Zusammenhang zwischen der Zusammensetzung der wasserfreien Zutaten und der Glasübergangstemperatur (Achmed et al., 2005). Als Richtwert der Glasübergangstemperatur für Hartkaramellen können Temperaturen über 30 °C herangezogen werden (Reinheimer et al., 2010). Für Weichkaramellen liegen die Werte abhängig vom Wassergehalt und der Zusammensetzung darunter.

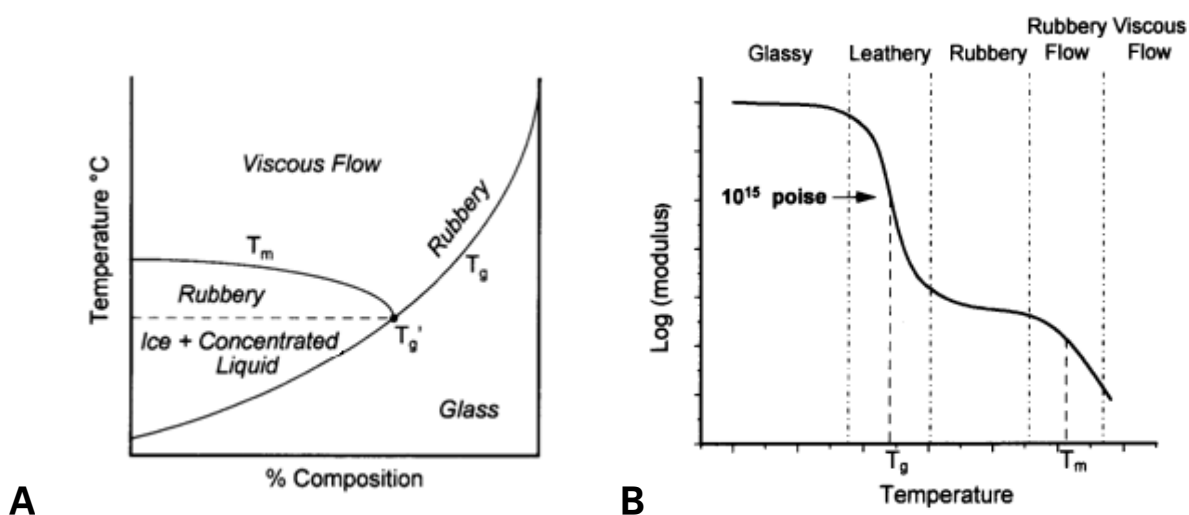


Abbildung 3.1: A: schematisches Zustandsdiagramm mit Gleichgewichtskurven für typische Lebensmittelsysteme, Auftrag von Temperatur über der Zusammensetzung [links: 100 % Wasser; rechts: 0 % Wasser] (modifiziert aus Schenz, 1995); B: Schematisches Diagramm mit mechanischen Eigenschaften von Lebensmittelsystemen über der Temperatur mit einzelnen Zustandsbereichen, der Glasübergangstemperatur T_g sowie der Schmelztemperatur T_m (aus Schenz, 1995)

Abbildung 3.1A zeigt ein Zustandsdiagramm für typische Lebensmittelsysteme mit charakteristischen Gleichgewichtskurven (Schmelzkurve T_m und Glasübergangskurve T_g) und charakteristischen Eigenschaften (viscous flow, rubbery) innerhalb der einzelnen Zustände Flüssigkeit oberhalb der Gefrierpunktskurve, Glaszustand (Glass) und Eis + Konzentrierte Flüssigkeit (Ice + Concentrated Liquid). Die Übergangsbereiche vom flüssigen zu einem festen Aggregatzustand werden beschrieben durch gummi- oder lederartige Zustände und sind gekennzeichnet durch eine fundamentale Änderung der mechanischen Eigenschaften bei Änderung von Druck oder Temperatur (Abbildung 3.1B) (Schenz, 1995). Die sich dabei verändernde molekulare Mobilität führt zu einer allgemeinen Erhöhung der Reaktivität und bewirkt somit Änderungen der adhäsiven Eigenschaften mit Verstärkung von Anhaftungen und Klebrigkeit der Stoffsysteme (Abbildung 3.2) (Wang & Langrish, 2007).

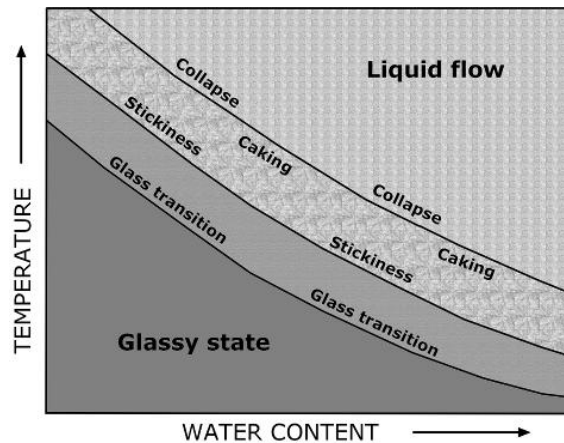


Abbildung 3.2: Zustandsdiagramm eines Saccharose-Wasser-Gemisches mit dem Glaszustand (Glassy State) und Zonen des Glasübergangs (Glass transition) und gummiartigen Zustands mit auftretender Klebrigkeit (Stickiness, Caking) und anschließendem strukturellen Kollaps (Collapse) beim Übergang in einen fließfähigen Zustand (Liquid flow) bei Erhöhung von Temperatur und/oder Wassergehalt (reproduziert nach Roos, 1995)

Bei konstantem Umgebungsdruck sind demnach die Temperatur und der Wassergehalt eigenschaftsbestimmende Parameter der Systeme. Eine besondere Bedeutung kommt in diesem Zusammenhang der umgebenden relativen Luftfeuchte [-] (entspricht dem Verhältnis des Wasserdampfdrucks in der Luft zum Sattedampfdruck reinen Wassers) und der Wasseraktivität a_w [-] des Lebensmittelsystems (entspricht dem Verhältnis des Wasserdampfdrucks im Lebensmittel zum Sattedampfdruck reinen Wassers) zu. Ein System mit geringerem a_w als die relative Feuchte der Umgebungsluft wird so lange Wasser aufnehmen (Adsorption) bis sich die Partialdampfdrücke beider Systeme angeglichen haben. Dabei gilt: Je größer der Gradient zwischen relativer Luftfeuchte und a_w , desto größer ist auch die Triebkraft zur Angleichung der Zustände.

Bedeutsam ist, dass die vorliegenden Stoffsysteme in genau diesen Bereichen verarbeitet werden, wo morphologische Übergänge stattfinden. Deshalb zeigen Erfahrungen eine Abhängigkeit der Schneidqualität von den Umgebungsbedingungen. So führen niedrige Temperaturen bei einigen Massen zu vermehrtem Splintern, während bei feuchtwarmem Wetter eine Erhöhung der Klebrigkeit der relevanten Zuckerwaren auftritt und Anhaftungen an den Schneidwerkzeugen zunehmen. Da die Änderung der stofflichen Eigenschaften im Bereich thermodynamisch instabiler Zustände zeitabhängig sind (Roos, 2010), können Eigenschaftsänderungen im schneidrelevanten Zeitraum nur partiell vollzogen worden sein. So berichtet Drut (1992) von einem inhomogenen Bruchverhalten von Weichkaramellmassen aufgrund unterschiedlicher morphologischer Eigenschaften zwischen Kern und Außenschicht der Zuckerware. Eine Bruchtrennung fand dabei nur in der Außenschicht um den noch weichen Kern herum statt.

Tabelle 3.4 zeigt typische a_w und die kristallinen Anteile für unterschiedliche Zuckerwaren. Dabei wird ersichtlich, dass die beim Schneiden von Zuckerwaren relevanten Stoffsysteme größtenteils durch amorphe Zustände charakterisiert sind. Der kristalline Anteil der Zuckerwaren hat einen direkten Einfluss auf den Trennvorgang bei der Verarbeitung. Mit zunehmender Rekristallisation des Zuckers der Massen verringern sich die elastischen Eigenschaften und die Plastizität nimmt zu (Drut, 1992; Pernot-Barry, 2012). Dadurch sinkt

die Fähigkeit der Massen spröde zu brechen (Drut, 1992). Mit Zunahme des Verhältnisses Saccharose/Glucosesirup und damit einhergehender Verringerung des Wasseranteils sinkt die Klebrigkeit der Stoffsysteme. Außerdem steigt die Rekristallisationsneigung. Amorpher Zucker ist gegenüber kristallinem Zucker stark hygroskopisch (Bronlund & Paterson, 2004). Eine Erhöhung des Anteils an Saccharosekristallen verringert die Anhaftungsneigung und Klebrigkeit der Massen (Hoffmann et al., 2002).

Tabelle 3.4: Feuchtegehalt, Wasseraktivität a_W und kristalline Anteile einiger Zuckerwaren (nach Er-
gun et al., 2010)

Artikel	Kristalliner Anteil [%]	a_W [-]
Hartkaramell	0 – 2	0,25 - 0,40
Karamell, Fudge, Toffee	0 - 30	0,45 - 0,60
Kaubonbon	0 - 10	0,45 - 0,60
Kaugummi	30 - 40	0,40 - 0,65

3.2 Parameterfelder der Verarbeitungsbedingungen

3.2.1 Klimatische Parameter

Die Koch- bzw. Knettemperaturen betragen für Hartkaramellmassen bei Normaldruck zwischen 130 und 150 °C, für Weichkaramellen 120 - 130 °C und für Kaugummimassen ca. 50 - 60 °C (Anonymus, 1999; Hoffmann et al., 2002). Nach Temperierung auf Kühltischen geben Hoffmann et al. (2002) als Prägetemperaturen für Hartkaramellen 70 - 80 °C sowie Verarbeitungstemperaturen für Weichkaramellen und Kaugummimassen zwischen 30 °C und 40 °C an. Dabei herrschen in den Verarbeitungsräumen Umgebungstemperaturen. Daten zur relativen Luftfeuchte liegen nicht vor. Eine Produktverarbeitung unter klimatischer Konditionierung wird in Ländern mit feuchtwarmem Klima sowie im mitteleuropäischen Raum mit gemäßigten klimatischen Bedingungen nur teilweise angewendet. Prinzipiell besteht bei den derzeitigen Lösungen die Möglichkeit der einseitigen Strangtemperierung bei der Strangzuführung über temperierte Egalisierrollen und Zuführbahnen sowie einer ganzseitigen Temperierung in Kühl- bzw. Wärmetunneln.

Unter für Mitarbeiter erträglichen und ökonomischen Gesichtspunkten wäre eine Klimatisierung von 20 °C bei einer relativen Luftfeuchte von 60 % zu empfehlen (Pernot-Barry, 2012). Da die Umgebungsbedingungen Temperatur und Luftfeuchte einen Einfluss auf die Schneidgutmorphologie haben und damit Änderungen der mechanischen und adhäsiven Eigenschaften bewirken können, wäre es notwendig diese Umgebungsbedingungen konstant zu halten und gegebenenfalls auf die zu schneidenden Stoffsysteme anzupassen. Dabei ist zu beachten, dass es, abhängig von der Temperatur der Schneidgüter und den klimatischen Bedingungen, nicht zur Wasserkondensatbildung auf den Massesträngen kommt (Taupunktberechnung).

3.2.2 Produktgeometrie

Die Abmaße der relevanten Süßwaren bei Verpackungsmaschinen von Theegarten-Pactec betragen bei streifen- und quaderförmigen Produkten sowie Produkten mit runden Querschnitten Längen von ca. 16 - 200 mm, Breiten von ca. 8 - 30 mm sowie Höhen von ca. 4 - 16 mm und Durchmesser von 9 - 30 mm, wobei Querschnitte von max. 16 x 30 mm oder die den Durchmessern entsprechenden Kreisquerschnitte durchtrennt werden. Unabhängig davon existieren auch andere Handelmaße (z.B. dünnere Produkte). Allgemeines Ziel bei der Produktdurchtrennung ist die möglichst kleinste Querschnittsfläche zu schneiden, um Anhaftungsvorgänge einzuschränken.

3.3 Zusammenfassung der Problemstellung

Die hauptsächlichen Störgrößen beim Schneiden von Zuckerwaren wie Hart- und Weichkaramellen sowie Kaugummis sind das Splintern der Massen und das Anhaften der Massen an den Verarbeitungswerkzeugen. Beide Vorgänge scheinen in gewisser Hinsicht gegenläufig aufzutreten. Eine Verringerung der Temperatur erhöht die Splitterneigung, während eine Erhöhung der Temperatur Anhaftungen begünstigt. Übergeordnet werden die stofflichen Eigenschaften der Produkte über Ihre Zusammensetzung bestimmt, welche produkt- und zielgruppenabhängig nur bedingt auf den Schneidvorgang ausrichtbar ist. Eine besondere Rolle kommt dem Wassergehalt zu, welcher über die Rezeptur, Herstellungstechnologie und klimatische Bedingungen (relative Feuchte, Temperatur) beeinflusst wird und eine direkte Wirkung auf die morphologischen Eigenschaften der Massen hat. Diese wiederum beeinflussen die genannten Störgrößen. Des Weiteren sind Verfahrensparameter wie das Trennprinzip, die Schneid- bzw. Beanspruchungsgeschwindigkeit, die Klingeneigenschaften als auch die mechanische Vorgeschichte der Massestränge (Strangumformung) als Einflussgrößen in Betracht zu ziehen. Zusammenfassend ergibt sich eine komplexe Problemstellung mit sich gegenseitig überschneidenden und bedingenden Einflussfaktoren. Abbildung 3.3 fasst die Problemstellung schematisch zusammen.

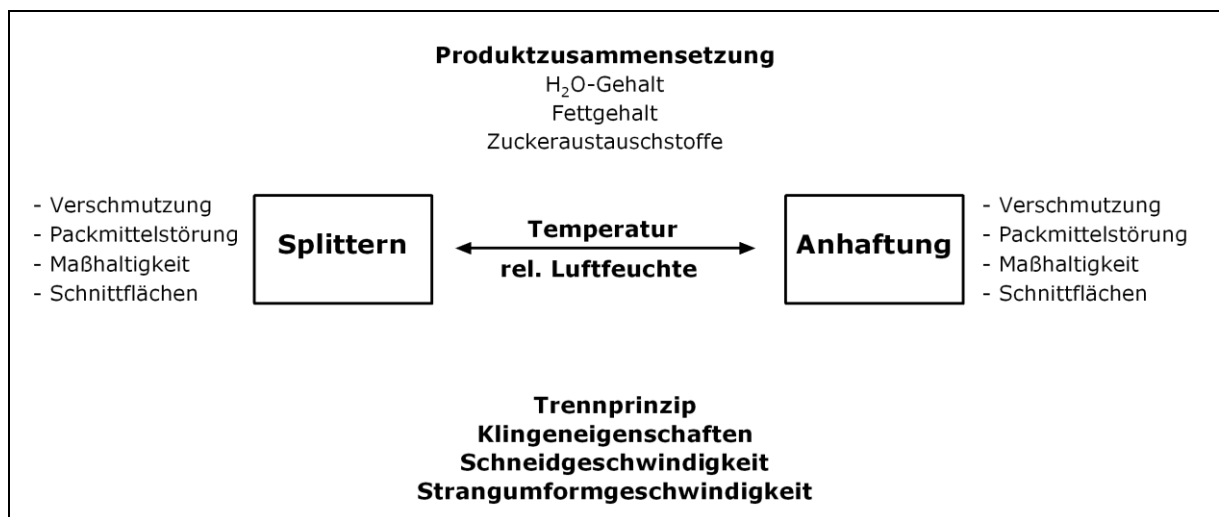


Abbildung 3.3: Schematische Darstellung der Wirkzusammenhänge beim Auftreten der Störgrößen Splintern und Anhaftung mit aufgeführten Folgeerscheinungen; in vertikaler Mittelachse Auftrag der Einflussfaktoren

4 Potentiale und Grenzen alternativer Trennprinzipie

4.1 Trennprinzipie

4.1.1 Mechanisches Schneiden

Ein weiteres Beispiel im Lebensmittelbereich für Schneiden mit hohen Taktzahlen bildet die Slicertechnologie, also das Abtrennen dünner Scheiben aus geometrisch definierten Massesträngen wie Käseleibe oder Fleisch- und Wurstwaren. Dabei werden produktabhängig mehr als 1000 Schneidakte/min erreicht, wobei das Schneidgut unter seinem Eigengewicht und zusätzlicher Krallenführung vorgeschoben wird. Geschnitten wird zum einen mit auf Planetenbahnen rotierenden Kreismessern ($\varnothing = 400$ mm) oder rotierenden Sichelklingen ($r = 90$ mm) zum Schneiden mit verstärkter Zügigkeit. Bei der Verarbeitung, vor allem von Käse, treten verstärkt Verschmutzungen der Klinge und der Aufbau eines Produktfilms auf. Man begegnet diesem Problem durch Verwendung von Antihafbeschichtungen (PTFE), deren geringe Beständigkeit zum Austausch bzw. Nachbeschichten der Klinge zwingt. Optimal wäre eine Klingenbeschichtung mit antiadhäsiven Eigenschaften sowie hoher Verschleißbeständigkeit. Derzeit forscht das Institut für Lebensmittel- und Bioverfahrenstechnik an kohlenstoffbasierten diamantähnlichen Beschichtungen, welche beide Eigenschaften vereinen sollen. Eine weitere Möglichkeit zur Einstellung antiadhäsiver Eigenschaften könnte die Schaffung nanostrukturierter Oberflächen bieten (surface patterning), wobei eine Verringerung der effektiven Kontaktfläche ähnlich wie beim Lotuseffekt zur Abnahme von Reibungs- und Anhaftungskräften führen kann (Zhang et al., 2012). Dabei sind keine Aussagen über die mechanische Stabilität der Strukturen sowie die Eigenschaften dieser Oberflächen bei hohen Relativgeschwindigkeiten möglich. Eine weitere Strategie zur Vermeidung von Anhaftungen bei der Slicertechnologie ist die Verringerung der Kontaktfläche zwischen Produkt und Klinge durch eine entsprechende konstruktive Ausführung der Messerflanke, zum einen durch Versenkung einzelner Bereiche (Kullen) oder der gesamten Schneidenflanke durch Freistellen der Klinge zur Trennebene.

Generell sind konstruktive Veränderungen an den eingesetzten Schneidklingen bei der Trennung von Süßwaren in Betracht zu ziehen. Nach Drut (1992) verringert eine schlanke Klingenausführung Schneidverformung und Splitterneigung. Dies könnte evtl. durch entsprechende Teilhärtung der Klingen oder Zügigkeit und damit geringere Belastungen der Klinge beim Schneiden gewährleistet werden. Änderungen der Zügigkeit durch Variation der Klingengeometrie oder Schnittführung könnten sich günstig auf das Trennergebnis auswirken. Gezahnte Ausführungen der Schneidkante können zur Verhinderung ungerichteter Bruchbildung beitragen.

Eine zusätzliche Möglichkeit der mechanischen Trennung bietet das Drahtschneiden. Ein Vorteil für die Trennung von Zuckerwaren wäre die stark verringerte Kontaktfläche zwischen Trennorgan und Schneidgut, was Anhaftungen bzw. Verschmutzungen verringern könnte. Es können jedoch keine Aussagen zur Schneidgeschwindigkeit getroffen werden. Probleme werden in der Belastungsgrenze bis zum Riss der Drähte gesehen, welche bei zu hoher Festigkeit und Zähigkeit der zu verarbeitenden Massen erreicht werden könnte.

4.1.2 Erodierendes Trennen

Erodierende Trennverfahren der Metallverarbeitung beinhalten unter anderem das Laserstrahl- und das Wasserstrahlschneiden. Die Trennung der Massestränge bei der Zuckerwarenverarbeitung mittels dieser Verfahren erscheint deshalb vielversprechend, da kein Trennwerkzeug im eigentlichen Sinne vorhanden ist und somit Anhaftungsphänomene ausgeschlossen werden. Über die erzeugten Spannungsverhältnisse im Schneidgut mittels dieser Trenntechniken ist keine qualifizierte Aussage zu treffen.

Laserstrahlschneiden

Ein Lasereinsatz bei der Lebensmittelverarbeitung ist prinzipiell denkbar, derzeit aber nicht üblich und erfolgt lediglich bei der Lasergravur bzw. -beschriftung (z.B. <http://www.alltec-laser.com> oder <http://www.ido24.de/>). Es bestehen also keine Erfahrungen beim Schneiden von Lebensmitteln und mögliche physikalische und chemische Veränderungen an der Trennzone in Folge des hohen Energieeintrags. Denkbar ist eine lokale Amorphisierung der Zuckerbestandteile an der Trennschicht, welche zur Erhöhung der Hygroskopizität in diesem Bereich führen würde, oder farbliche Veränderungen an der Schnittkante und somit Beeinträchtigungen der optischen Qualität. Eine typische Laserstrahlschneidanlage mit 2 Schneidköpfen durchtrennt 5 mm starkes Blech mit einer Geschwindigkeit von 0,3 m/s. Abhängig von der Leistung des Lasers und den Produkteigenschaften sind mit einer praxisüblichen Laserschneidanlage im Simultanmodus (2 Schneidköpfe arbeiten zusammen) Vorschubgeschwindigkeiten von 3 m/s und mehr möglich (Schilb, 2012). Welche Vorschubgeschwindigkeiten zum Durchtrennen von Zuckerwaren möglich wären, ist unklar. Negativ zu bewerten wären die erforderlichen Investitionskosten für die Laserschneidköpfe im höheren fünfstelligen Bereich. Außerdem ist zu beachten, dass bei Anwendung eines Lasers erhöhtes Gefahrenpotential für den Maschinenführer besteht. Hier müsste die Zugänglichkeit zur Trenneinrichtung der Maschine bei erhöhten Sicherheitsbestimmungen gewährleistet bleiben.

Wasserstrahlschneiden

Beim Wasserstrahlschneiden wird das Schneidgut mittels Hochdruckwasserstrahl durchtrennt. Abhängig davon, ob zusätzlich ein Abrasivmittel (z.B. Korund) im Wasser eingesetzt wird, unterscheidet man zwischen Purwasserschneiden und Abrasivschneiden. Der Zusatz von Abrasivstoffen erhöht die abrasive Wirkung und im Allgemeinen auch die mögliche Vorschubgeschwindigkeit (Simon, 2013). Purwasserschneiden wird im Lebensmittelbereich angewendet für Pizza, Gemüse, Fisch und Fleisch (<http://www.kmt-waterjet.de/food.aspx>). Wang & Shanmugam (2008) stellten ein Verfahren zum Abrasivschneiden von Fleisch mit Knochen vor, wobei Salzkristalle als Abrasivmittel verwendet wurden. Wollte man mit der Technik Süßwaren durchtrennen, wäre es vorteilhaft ein flüssiges Trennmedium zu nutzen, welches nicht als Lösungsmittel der hauptsächlichen Lebensmittelinhaltsstoffe agiert. Demnach wäre Wasser ungeeignet und könnte gegebenenfalls durch ein Lebensmittelöl ersetzt werden, welches unter den herrschenden Bedingungen (hoher Druck) chemisch stabil bleiben müsste. Beim Wasserstrahlschneiden wird das flüssige Trennmedium mit ca. 200 MPa verdichtet (Simon, 2013). Dabei bestünde das Risiko der Selbstentzündung bzw. Brandgefahr bei Austritt des Öls aus der Düse. Gegebenenfalls wären hier geringere Drücke erforderlich, was die Trennwirkung verringern würde. Als zusätzliches Abrasivmittel in der Ölphase wären Zuckerkrystalle denkbar. Eine hygienegerechte Herausforderung bei einem Abrasivschneiden mit Ölstrahl wäre das Auffangen und die Aufbereitung der Trennmittel.

Ein Reinwasserstrahlschneider der Firma KMT GmbH schneidet mit einem Vorschub von 0,2 m/s bzw. 0,5 m/s durch 10 mm bzw. 2 mm starkes Elastomer (nicht näher spezifiziert) (Anonymus, 2013). Generell sinkt die Qualität der Schnittflächen bei einer Erhöhung der Trenngeschwindigkeit (Simon, 2013). Auch bei dieser Methode ist unklar, welche Schneidgeschwindigkeiten beim Durchtrennen von schneidgutrelevanten Zuckerwaren möglich wären.

4.1.3 Impulsartige Trennverfahren

Bei diesen Verfahren wird impulsartig Energie in das zu trennende Stoffsystem eingetragen, welche zu einer Rissbildung und -ausbreitung führt. Dieser Riss soll gerichtet sein und zu einem Trennergebnis führen, der die Kriterien der Maßhaltigkeit als auch der Schnittflächenqualität erfüllt.

Bruchtrennen

Drut (1992) beschreibt eine Methode zur Bruchtrennung an Hart- und Weichkaramellsträngen. Dabei schlägt ein Messer mit hoher Geschwindigkeit auf den Karamellstrang und erzeugt einen durchgehenden Riss, dessen Trennebene senkrecht zur Strangachse verlaufen soll. Dafür sei eine Dimensionierung der Schlagenergie in der Form nötig, dass ein „vollständiges Durchbrechen des Stranges gewährleistet (untere Grenze) und Bruchverzweigung sowie zusätzliche Verformungen der Trennstelle vermieden werden (obere Grenze)“. Durch Zurücknehmen des Trennorgans (über eine massenträgheitsabhängige Klappvorrichtung) nach einem Eindringweg von 0,5 - 3 mm wird die zugeführte Trennenergie gesteuert und ein Splintern verringert. Als Gegenlager zum Trennorgan genügt eine gerade Auflage der entsprechenden Trenngüter (Drut, 1992). Die Fähigkeit eines Stoffes spröde zu brechen wird über seine stofflichen Eigenschaften im Zusammenspiel mit äußeren Einflussfaktoren, wie Temperatur und Beanspruchungsgeschwindigkeit bestimmt. Für Zuckerwaren müsste eine für den Beanspruchungsgeschwindigkeitsbereich geeignete Sprödeheit gewährleistet werden, welche am einfachsten über eine Temperierung zu realisieren wäre. Drut (1992) beschreibt diese „Bruchfähigkeit“ als eine abhängige Größe von der Viskosität der zu durchtrennenden Massestränge und nennt bei der gering gewählten Eindringtiefe des Schlagmessers als untere Grenze Viskositäten von $10^3 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ um einen durchgehenden Bruch zu gewährleisten. Mit zunehmender Viskosität sinke außerdem die erforderliche Trennorgangeschwindigkeit von 40 m/s für $\eta = 10^5 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ auf 17 m/s für $\eta = 10^{7\ldots 8} \text{ Pa}\cdot\text{s}$. Als Voraussetzung nannte er eine homogene Temperatur über den gesamten Querschnitt des Weichkaramellstranges, um eine partielle Trennung nur in den kälteren, spröderen Außenschichten zu vermeiden.

Generalisierende Aussagen über das Bruchverhalten schneidgutrelevanter Schneidwaren, vor allem solchen mit relevanten kristallinen Anteilen, in Abhängigkeit der Umgebungsbedingungen, können ohne weitere Untersuchungen nicht getroffen werden. Ob überhaupt alle betreffenden Zuckerwaren innerhalb anwendbarer Bearbeitungstemperaturen spröde brechen können, ist unklar. Hierzu liegen keine standardisierten Prüfmethoden vor. Genormte Verfahren zur Bewertung der Schlagzähigkeit von weichen Stoffen sind jedoch aus dem Kunststoffbereich bekannt (Anonymus, 2010).

Adiabatisches Trennen

Ein ähnliches Verfahren ist das „adiabatische Trennen“ (oder HSIC – High-Speed-Impact-Cutting), ein spanloses Trennverfahren aus der Metallverarbeitung zum Trennen von Stäben, Rohren und komplexeren Querschnitten, bei welchem ein Impuls mit hoher Beanspruchungsgeschwindigkeit auf das Schneidgut übertragen wird. Dieses wird durch 2 möglichst formschlüssige Matrizen geführt, von denen eine beweglich gelagert und über eine Schlageinrichtung beschleunigt wird (Abbildung 4.1). Bei Änderung des Produktquerschnitts sind die Matrizen auszuwechseln. Als Trenngeschwindigkeiten werden Richtwerte von etwa 10 m/s genannt. Im Bereich der Trennzone kommt es dabei zu einer starken Erwärmung und Gefügeauflösung, wobei die kurze Beanspruchungsdauer eine Ableitung der Wärme verhindert (Rauschnabel et al., 2012). Laut Bewerbung der Firma Coprotec Systeme GmbH (<http://www.coprotec.de>) sind werkstoffabhängig bis zu 800 Takte/min realisierbar. Bei schneidgutrelevanten Zuckerwaren müsste das Anhaften der Massestränge innerhalb der Matrize verhindert werden, um Störungen im Betriebsablauf auszuschließen.

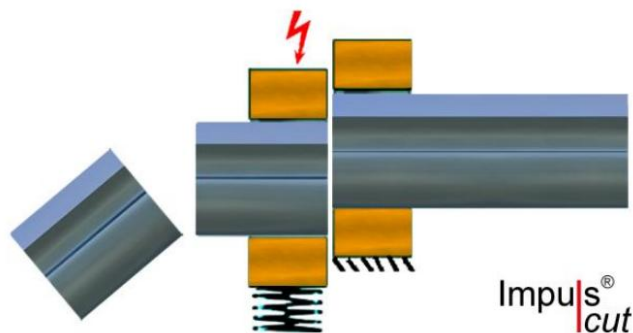


Abbildung 4.1: Wirkprinzip beim HSIC-Trennen (nach Rauschnabel et al., 2012)

Ultraschall unterstütztes Schneiden

Ultraschall unterstütztes Schneiden wird im Wesentlichen aus zwei Gründen eingesetzt:

- (a) Durch eine Ultraschall-Anregung des Messers kommt es zu einer hochfrequenten Wechselbewegung der Schneidkante (Abbildung 4.2). Insbesondere dann, wenn die Schwingbewegung in der Vorschubebene verläuft, erfährt das zu trennende Material Beanspruchungsimpulse. Die Geschwindigkeit der Energieeinleitung unterbindet dissipative Effekte wie Spannungsrelaxation und Fließen, so dass wegen Energiekonzentration in der Trennzone die Bruchspannung rasch und ohne nennenswerte Deformationen der Umgebungszonen erreicht wird. Dadurch sinken insgesamt die wirksamen Schnittkräfte und die Trennflächenqualität (Maßhaltigkeit, Glätte) kann gesteigert werden.
- (b) Neben der Wechselbewegung an der Schneidkante stellen sich an allen Ultraschall angeregten Messern Oberflächenwellen ein, die zu Wechselbewegungen im Flankenbereich des Messers führen (Abbildung 4.2). Diese wirken sich bei Kontakt mit dem Verarbeitungsgut auf die Kontaktmechanik und damit direkt auf die Reibwechselwirkung und Adhäsion aus. Je nach Anregungsart und Verarbeitungseigenschaften kann die Reibungskraft zum Teil deutlich reduziert und ein Anhaften von Verarbeitungsgut unterbunden werden. Insbesondere der Anhaftungsaspekt muss dann eingeschränkt werden, wenn das Verarbeitungsgut durch Absorption von Ultraschallenergie thermische Veränderungen durchläuft, so dass es prinzipiell zu einer erhöhten Anhaftungsneigung kommt.

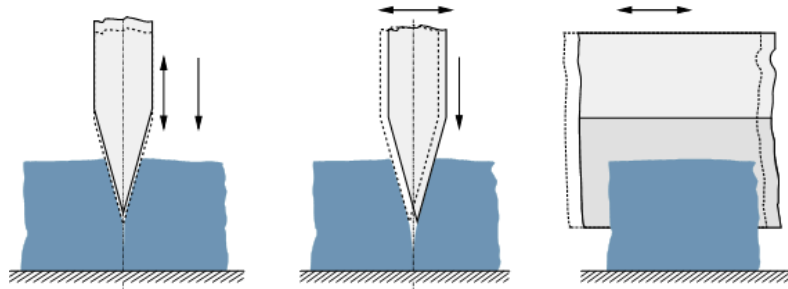


Abbildung 4.2: Wechselwirkungen zwischen Verarbeitungsgut und Ultraschall angeregtem Schneidwerkzeug (Doppelpfeile: Hauptschwingrichtung, einfacher Pfeil: Vorschubrichtung)

Kommerziell verfügbar sind verschiedene Ultraschallschneid-Anordnungen. Dominierend sind nach wie vor sogenannte Longitudinalschwinger, bei denen der mechanische Resonator – die Sonotrode – direkt als Schneidwerkzeug dient. Aufgrund ihres Aufbaus eignen sie sich fast ausschließlich für den intermittierenden Druckschnitt. Außerdem existieren verschiedenen Lösungen, bei denen gerade oder gebogene Klingen und Kreismesser an den Wellenbauchpunkt einer Sonotrode angekoppelt werden. Ruhende Anordnungen mit Vorbeiführung des Verarbeitungsgutes oder intermittierende Bewegungen dominieren. Antriebe zur Überlagerung von Ultraschallbewegung und Messerrotation sind wegen der peripheren Komponenten der Schwingeinheit schwierig, werden aber von einzelnen Ausrüstern angeboten. Anpassungsmöglichkeiten an die Verarbeitungseigenschaften ergeben sich über die Verfahrensparameter Schneidgeschwindigkeit, Ultraschall-Amplitude und Ultraschall-Frequenz. Insbesondere die Schneidgeschwindigkeit stellt bisher einen begrenzenden Faktor dar, da die unter (a) genannten Vorteile mit steigenden Schneidgeschwindigkeiten rückläufig sind und bereits bei mittleren Schneidgeschwindigkeiten vernachlässigbar werden. Daher ist diese Technologie Anwendungen mit höchsten Qualitäts- aber geringen bzw. untergeordneten Durchsatzansprüchen vorbehalten (Zahn et al, 2006; Schneider et al., 2001).

4.2 Strategien zur Erhöhung der Schneidleistung

4.2.1 Serielles Schneiden mit erhöhter Relativgeschwindigkeit

Eine naheliegende Strategie zur Erhöhung der Schneidleistung wäre ein beschleunigtes Fahren der bestehenden Anlagen. Es gibt keine Informationen über die praktischen Auswirkungen einer solchen Strategie sowie mögliche Leistungsgrenzen. Aus theoretischer Sicht ergeben sich unabhängig von den Stoffeigenschaften der unterschiedlichen Trenngüter drei Störfelder: der Trennvorgang selbst sowie die Produktzuführung und die Produktabführung vor bzw. nach dem Trennschritt. Bei einer Erhöhung der Drehzahl der Antriebseinheit muss außerdem beachtet werden, dass die gewählte Frequenz nicht die Eigenfrequenz der gesamten Maschine verstärken darf, was schlimmstenfalls zu Schäden und Zerstörungen an Schneidwerkzeug und Maschine führen kann.

Während der Trennung könnten einerseits verstärkte Anhaftungsphänomene auftreten, und zwar als Folge einer erhöhten Reibung durch größere Relativgeschwindigkeiten der zueinander gescherten Ebenen. Infolge der erhöhten Beanspruchung, welche auf die Messerklinge wirkten, würde sich der Verschleiß an der Schneidenwate sowie an den Schneidenflanken erhöhen, was eine geringere Laufzeit der Klingen bzw. kürzere Wirkdauer von Antihafte-

schichtungen zur Folge haben könnte. Aufgrund der beanspruchungsgeschwindigkeitsabhängigen Brucheigenschaften von Stoffen ist die Zunahme von Splitterphänomenen wahrscheinlich.

Die Auswirkungen der seriellen Erhöhung der Schneidakte auf die Produktabnahme und die nachfolgende Verpackung wird hauptsächlich als maschinenbautechnisches Problem erachtet. Generell ist davon auszugehen, dass konstruktive Anpassungen vonnöten sind. In der Praxis gibt es Bestrebungen dem Trennschritt mehrere Verpackungslinien nachzustellen (z.B. LoeschPack). Bei einer solchen Lösung muss darauf geachtet werden die Zugänglich- bzw. Bedienbarkeit der Maschinen zu gewährleisten unter der Maßgabe möglichst gleichbleibender Maschinenabmessungen.

Wie in Abschnitt 2.2 erläutert, erforderte eine Erhöhung der Stranggeschwindigkeit eine größere Strangumformgeschwindigkeit, was aufgrund größerer mechanischer Belastungen im Strang die Wahrscheinlichkeit von Störungen erhöhen würde. Vor allem bei der intermittierenden Strangzuführung der Maschinenreihen U und EW (Guillotinenschnittprinzip) wäre eine erhöhte Strangstauchung beim Abbremsen der Masse die Folge. Die Rückstauchung könnte verringert werden durch die Erzeugung kürzerer Strangabschnitte. Dies würde eine komplexere Prozesssteuerung zur Folge haben (Vereinzelung und Ausrichtung der Strangabschnitte). Um ein Strangstauchen zu verhindern und damit eine Störgröße auszuschließen, wäre die Wahl eines Schneidprinzips mit kontinuierlichem Strangvorschub (WHD/WHF, FPW2) von Vorteil.

Ein Ansatz zur Erhöhung der Schneidtaktzahl ohne Erhöhung der Strangumformgeschwindigkeit wäre eine Änderung der Schnittführung in den Massesträngen für quaderförmige Produkte. Bisher werden diese so durchtrennt, dass die Trennfläche möglichst klein gehalten wird, um Anhaftungen am Schneidwerkzeug zu minimieren. Würde man die Zuckerwaren breiter bzw. höher ausformen und dann in kürzere Abschnitte trennen, bräuchte man eine erhöhte Schneidtaktzahl bei gleichem Strangvorschub bzw. gleicher Strangumformgeschwindigkeit. Probleme könnten sich aufgrund der größeren Kontaktfläche zur Klinge mit den erläuterten Phänomenen ergeben.

4.2.2 Parallelisiertes Schneiden

Im Bereich des Hochgeschwindigkeitsschneidens sind prinzipiell vier- oder mehrbahnige Verpackungsmaschinen im Einsatz, z.B. bei der Slicertechnologie, bisher jedoch nicht bei der Verpackung von Süßwaren. Ansätze zur Parallelisierung des Schneidprozesses existieren bei der Firma Theegarten-Pactec für die Anlage U1-D-CW mit doppelter Guillotinenschnittausführung und doppelter anschließender Verpackungslinie. Das Prinzip wäre theoretisch auf eine beliebig Anzahl an simultanen Trennvorgängen zu steigern. Bei gleicher mittlerer Stranggeschwindigkeit erhöhte sich dabei die Anzahl der geschnittenen Produkte bei gleichzeitig höheren mechanischen Belastungen im Strang. Diese erhöhen sich aufgrund der größeren Beschleunigungen, welche benötigt werden, um größere Strangabschnitte intermittierend voranzuschieben. Denkbar wäre auch hier die Erzeugung kürzerer Strangabschnitte, welche in Folge vereinzelt und gegebenenfalls unterschiedlichen Schneideinheiten parallel zugeführt würde (sowohl mit kontinuierlicher als auch intermittierender Strangzuführung). Die simultane in Reihe geschaltete Schnittaufführung (mehrere Klingen) oder das gleichzeitige Durchtrennen parallel angeordneter Stränge mit einer Klinge bei kontinuierlichem Strangvorschub (WHD/WHF, FPW2) wären weitere Möglichkeiten die Produkttrennung zu parallelisieren.

Eine große Herausforderung dieser Trennvarianten wäre die Entwicklung einer geeigneten Produktabführung und paralleler Verpackungstrecken mit komplizierter und aufwendiger Steuer- und Regelungstechnik. Vor allem die Anpassung an die produktgeometrischen Vorgaben mit entsprechender Feinjustierung muss relativ einfach vor Ort von Technikern ausführbar sein. Weiterhin müsste die Zugänglichkeit für Bedien- und Wartungspersonal gewährleistet bleiben. Begrenzter Bauraum in der industriellen Produktion für Schneid- und Verpackungsanlagen schränken die Möglichkeiten weiter ein.

4.2.3 Sequenzierung des Trennvorganges

Die Aufteilung des Trennvorgangs in Teilschritte ist aus der Rolling&Scoring-Technologie bekannt (siehe Abschnitt 1.2). Diese beschreibt im Wesentlichen das Vorkerben und nachträgliche Abtrennen von Einzelsegmenten aus einem Produktstrang bzw.- Produktstrangsegment. Das Prinzip wird hauptsächlich bei Kaugummi mit flachen Formen angewendet. Für hohe Produktabmessungen könnten Beschränkungen bei der Ansteuerung des Brecherkopfes bestehen, so dass alternative impulsartige Trennprinzipie angewendet werden müssten (siehe Abschnitt 4.1.3). Um Anhaftungen beim Vorrillen der Strangabschnitte zu verringern, wäre eine Ultraschallanregung der Rillwalze denkbar. Laut Drut (1992) ist die Aufteilung des Schneidvorganges in mehrere Arbeitstakte für Hochleistungsmaschinen technisch aufwendig und unflexibel bei der Anpassung an unterschiedliche Produktabmessungen.

5 Rahmenkonzept für Forschungsprojekt

5.1 Projektziel

Fernziel des Unternehmens ist es, eine Maschine zu entwickeln, die die Arbeitsschritte Strangausformung, Strangteilung und Verpackung von hochviskosem Gut mit einem gegenüber den existierenden Lösungen deutlich erhöhten Durchsatz von 3000 Trennzyklen/min realisiert. Das Erreichen dieser Produktivität ist für eine neue Generation von Süßwarenverpackungsmaschinen von grundlegender Bedeutung. Dies hat Konsequenzen für alle der genannten Teilschritte.

Im angestrebten Projekt soll der Teilschritt des Strangteilens losgelöst von den vor- und nachgelagerten Vorgängen grundlegend analysiert und dabei physikalische Grenzen bei der Erhöhung der Verarbeitungsgeschwindigkeit ausgelotet werden (Abbildung 5.1). Basierend auf den Erkenntnissen erfolgt die Neukonzeption einer Baugruppe zum schnellen Trennen.

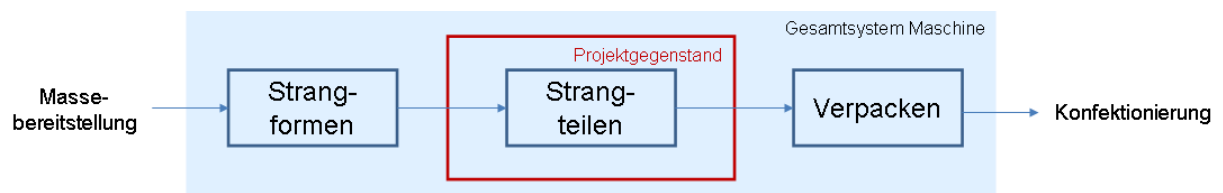


Abbildung 5.1: Fokus des Projektes auf den Verfahrensschritt Strangteilen mit Schnittstellen zu vor- und nachgelagerten Verarbeitungsschritten und System- bzw. Übergabegrenzen

5.2 Vorgehensweise/Strategischer Ansatz

Im Ergebnis der Vorstudie werden folgende Fragestellungen für das geplante Forschungsvorhaben abgeleitet:

1. Welche Trenn-/Bruchmechanismen und Störphänomene treten beim Zerteilen hochviskoser Verarbeitungsgüter mit hohen Geschwindigkeiten auf?
2. Welche Reaktionskräfte treten auf?
3. Welchen Einfluss haben stoffliche und physikalische Materialparameter auf das Zerteilverhalten?
4. Wie hoch ist der Einfluss der Umgebungsbedingungen (Luftfeuchte, Temperatur, Produkttemperatur) auf das Zerteilverhalten? Treten Zustandsänderungen des Produktes während des Zerteilens auf?
5. Welchen Einfluss haben die Parameter der Zerteilvorrichtung (Werkzeuggeometrie, -führung, -oberflächeneigenschaften) auf das Zerteilverhalten/-ergebnis?
6. Wo sind die physikalischen Grenzen für einen definierten Zerteilvorgang und hinsichtlich Ausbringung pro Zeiteinheit?

Zum Hochgeschwindigkeits-Schneiden von hochviskosem Material (hier Kaugummi- oder Weichkaramellmassen) existiert derzeit kein systematisches Wissen. Da bestehende Maschinen einerseits in diesem hohen Geschwindigkeitsbereich nicht sicher betrieben werden können und andererseits aufgrund der konkreten Bauweise auch kaum Aufschluss über die während des Trennvorganges tatsächlich auftretenden Effekte geben können, ist die Entwicklung und Realisierung einer neuartigen Prüfmaschine notwendig, die die phänomenologische und energetische Analyse von Einzelschnittvorgängen ermöglicht. Um auch unter praxisnahen Bedingungen, also innerhalb des Produktionsprozesses Untersuchungen vornehmen zu können, muss die Prüfmaschine transportabel sein.

Da Produktwechsel sich direkt auf das Betriebsverhalten auswirken, werden parallel relevante Produktparameter analysiert und mit experimentell bestimmten Effekten in Zusammenhang gebracht. Für das Unternehmen Theegarten-Pactec ermöglichen diese Erkenntnisse die wissensbasierte Anpassung der Baugruppe bzw. der Betriebsbedingungen bei unterschiedlichsten Verarbeitungsgütern.

Zur Umsetzung dieses Ansatzes bringt die Professur Verarbeitungsmaschinen und Verarbeitungstechnik Kompetenzen zur konzeptionellen und konstruktiven Auslegung der Prüfmaschine und peripherer Messeinrichtungen ein. Mit Projektfortschritt werden vom Projektpartner notwendige Anpassungen der Prüfmaschine realisiert.

Die Kernkompetenzen der Professur Lebensmitteltechnik liegen in der physikalischen und chemischen Charakterisierung der Verarbeitungsgüter im Verlauf von Verarbeitung, Lagerung und Konsum von Lebensmitteln und assoziierten Naturstoffen sowie in der Analyse des Wechselspiels zwischen Verarbeitungseinheit und Verarbeitungsgut. In verschiedenen Projekten wurden Erfahrungen zur kleintechnischen Herstellung gekochter Süßwarenmassen (Gelee- und Schaumzuckermassen) gesammelt. Auf dem Gebiet des Zerteilens von Lebensmitteln liegen umfangreiche Erfahrungen zum mechanischen Schneiden mit niedrigen Geschwindigkeiten sowie zum Ultraschall unterstützten Schneiden vor. Diese methodischen Erfahrungen werden ins Projekt eingebracht, um produktbezogene Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge im Hochgeschwindigkeitsbereich aufzuklären.

5.3 Beiträge der Projektpartner

5.3.1 Verarbeitungstechnik

Entsprechend dem strategischen Ansatz umfasst das Teilprojekt für die Professur Verarbeitungsmaschinen/Verarbeitungstechnik folgende Abschnitte:

VAT-1 Konzeption/Entwicklung (mobile) Prüfmaschine "Einzelschnitt"

- Erarbeitung Anforderungsliste
- Festlegung nötiger Funktionen
- Suche nach Teilprinzipien, Bewertung und Zusammenstellung des Gesamtkonzepts / Lastenheft für Konstruktion
- Grobgestaltung, Antriebsauslegung
- Suche und Auswahl der Videotechnik sowie Messtechnik
- Maschinensicherheit (CE), ggf. Abstimmung mit Zertifizierungsstelle nötig
- Steuerungskonzept, Softwareentwurf
- Konstruktion, Erstellung der Fertigungsunterlagen

VAT-2 Inbetriebnahme Prüfmaschine

- Installation der Antriebs- und Steuerungstechnik
- Installation Videotechnik
- Programmierung der Steuerung und Inbetriebnahme
- Überprüfung der Funktionen

VAT-3 Versuchsbegleitung

- Durchführung erster Laborversuche gemeinsam mit Professur Lebensmitteltechnik sowie Theegarten Pactec
- Auswertung der Videos und Weiterentwicklung des Versuchsplanes

VAT-4 Versuchsbegleitende Simulation

- Systemmodellierung und Identifikation relevanter Parameter

5.3.2 Lebensmitteltechnik

Die materialbezogenen Fragestellungen werden von der Professur Lebensmitteltechnik in folgenden Schwerpunkten behandelt:

LT-1 Auswahl Modellmassen

Im Sinne eines flexiblen Einsatzes der zu entwickelnden Schneideinheit sind repräsentative Vertreter aus dem Produktsegment gekochter (Weichkaramellen u.ä.) und gekneteter (Kaugummi u.ä.), hochviskoser Süßwarenmassen auszuwählen, so dass die Eckpunkte des Produktbereiches abgebildet werden können.

LT-2 Erfassung extrinsischer Parameter

An einer oder mehreren Musteranlagen erfolgt eine Langzeiterfassung der Umgebungsparameter (Temperatur, Luftfeuchte), um jahreszeitliche/klimatische und produktionsbedingte Schwankungen zu erfassen. Die gewonnenen Daten liefern Eckpunkte für die in den Arbeitspunkten LT-3, LT-4 und LT-5 einzustellenden extrinsischen Parameter.

LT-3 Thermophysikalische Charakterisierung der Modellmassen

Die Modellmassen werden hinsichtlich ihrer intrinsischen Parameter analysiert. Dazu werden folgende Untersuchungsansätze vorgeschlagen:

- Rheologische Charakterisierung: Die rheologischen Eigenschaften stehen in direktem Zusammenhang mit dem Trennverhalten. Daher wird in Abhängigkeit von Temperatur und Beanspruchungsgeschwindigkeit das Deformations- und Bruchverhalten untersucht. Insbesondere zeitabhängige Effekte (Kriechen/Retardation, Relaxation, Viskoelastizität) sind mittels Festigkeitsprüfgerät und Dynamisch-mechanischer Analyse zu ermitteln. Damit können Daten für Materialmodelle bereitgestellt und so Grundlagen für die numerische Simulation des Zerteilvorganges geschaffen werden. Die mechanische Vorgeschichte (Spannungszustand nach Strangumformung) ist nach Möglichkeit qualitativ zu berücksichtigen. Ergänzend ist die Entwicklung von Methoden zur Beschreibung der Materialklebrigkeit denkbar.
- Thermische Analyse: Für die relevanten Verarbeitungsgüter besteht eine ausgeprägte Abhängigkeit zwischen mechanischen Eigenschaften und den Umgebungsparametern Temperatur und Luftfeuchte. Sowohl Temperaturschwankungen von wenigen Kelvin als auch Schwankungen der relativen Luftfeuchte können Phasenübergänge 2. Ordnung initiieren, die in der Verarbeitungseinheit zu den Störphänomenen Splintern und Kleben führen. Daher werden die Modellmassen mittels Dynamischer Differenzkalorimetrie (DSC) auf thermische Übergänge (amorph → viskos) untersucht. Die entsprechenden Übergangsbereiche sind wiederum stark an die rezeptur- und klimabedingte Gleichgewichtsfeuchte des Verarbeitungsgutes gekoppelt. Daher wird außerdem das Feuchtesorptionsverhalten mittels Dynamischer Wasserdampfsorption (DVS) untersucht.

LT-4 Phänomenologische Analyse des Schneidvorganges

An einem von den Projektpartnern bereitgestellten Versuchsstand werden die Modellmassen im relevanten Geschwindigkeitsbereich auf ihr Trennverhalten untersucht. Bei der Entwicklung des Versuchsstandes sind notwendige Ausstattungen zur Modifizierung der Trennorgane, zur Konditionierung und zur optischen Analyse (High-Speed-Kamera) vorzusehen (Bezug zu VAT-1). Ziel dieses Schwerpunktes ist die qualitative Zuordnung von Trennphänomenen und intrinsischen und extrinsischen Parametern in der Verarbeitungszone sowie die Ableitung favorisierter Trennanordnungen (Bezug zu VAT-3)

LT-5 Energetische Analyse des Schneidvorganges

Das Ansprechen unterschiedlicher Versagensmechanismen äußert sich in der zur Trennung eines Verarbeitungsgutes aufzuwendenden Energie. Durch entsprechende Ausstattung der Schneidvorrichtung mit Kraft-Verformungs-Sensortechnik können Schneidvorgänge systematisch bilanziert werden (Bezug zu VAT-1).

- Variation des Verarbeitungsgutes
- Variation der Umgebungsbedingungen
- Variation der Schneidgeschwindigkeit

5.3.3 Theegarten-Pactec

- Evaluierung und Definition der Zielgrößen (3000 Schnitte/min, finale Produktabmessungen Breite, Schnittflächenanforderungen, Toleranzen festlegen)
- Kontaktvermittlung und Installation von Messtechnik zur Erfassung von Umgebungsparametern im Produktionsumfeld

- Beschaffung Verarbeitungsmassen → Industriepartner (alternativ → eigene Methode zur reproduzierbaren Herstellung)
- Material- und Komponenteneinkauf für Ausbaustufen der Prüfmaschine
- Fertigung und Montage der Prüfmaschine

6 Evaluierung von Fördermöglichkeiten

Neben einer direkt durch das Unternehmen finanzierten Zusammenarbeit sind vom Gesetzgeber verschiedene Fördermöglichkeiten zur Stärkung der Innovationskraft der Wirtschaft vorgesehen. Dazu gibt Tabelle 6.1 einen kurzen Überblick. Zu unterscheiden sind dabei Förderungen für vorwettbewerbliche Forschungsprojekte (AIF IGF), deren Ergebnisse im Verlaufe der Arbeiten direkt mehreren, das laufende Projekt aktiv unterstützenden Unternehmen zugute kommen, von Forschungsprojekten, die direkt auf die Erzielung von Wettbewerbsvorteilen für ein Unternehmen ausgerichtet sind (AIF ZIM, SAB).

Tragen die zu erzielenden Forschungsergebnisse überwiegend Grundlagencharakter und bilden einen ersten Meilenstein zur Entwicklung eines neuen Produktes, so bietet sich der Zusammenschluss mit anderen Unternehmen, die keine direkten Wettbewerber sind, in einem Projektausschuss an. Unternehmen mit ähnlichen Interessenlagen aber unterschiedlicher Branchenausrichtung sind der Forschungseinrichtung bekannt. Nachteilig ist bei dieser Projektvariante eine lange Vorlaufzeit für Antragsbegutachtung und -bewilligung von 1,5 - 2 Jahren, so dass erste Ergebnisse frühestens nach 3 - 4 Jahren vorliegen.

Eine zügigere Abwicklung ist gegeben, wenn eine Kooperation im Rahmen des AIF ZIM-Programmes favorisiert wird. Dieses Programm richtet sich üblicherweise an KMU mit bis zu 250 Mitarbeitern, ist derzeit aber befristet für Unternehmen bis 500 Mitarbeiter geöffnet (Antragstellung bis Ende 2013 notwendig). Weitere Ausschlusskriterien sind Bilanzsumme und Umsatz und müssen vom Unternehmen geprüft werden. Die Bewilligungsphase dauert in der Regel 3 - 4 Monate. Die Hinzuziehung eines professionellen Beraters für die Antragstellung kann die Abläufe effizient gestalten. Somit wäre ein Projektstart im IV. Quartal 2013 möglich.

Zu den von der SAB aufgelegten Förderprogrammen liegen an der Professur Lebensmitteltechnik keine Erfahrungen (k.E.) vor.

Tabelle 6.1: Übersicht Förderprogramme für die Wirtschaft

Programm	Beschreibung	Beschränkungen	Laufzeit	förderfähige Kosten	Projektträger	Vorlaufzeit
AIF IGF	Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung vorwettbewerbliche FuE-Projekte für Unternehmen einer Branche oder eines Technologiefeldes	Beantragung über Mitglieds- Forschungsvereinigungen der AiF Anteilfinanzierung durch Unternehmen (Personal-/Sach-/Dienstleistungen)	2-3 Jahre	Personal (Fördersatz Forsch.-einrichtung 100 %) Aufträge an Dritte Sachkosten	AiF Projekt GmbH, Tschaikowskistr. 49 13156 Berlin Tel.: + 49 30 48163-451 Zuwendungsgeber:	1,5 Jahre
AIF ZIM KF	Kooperation von KMU und Forschungseinrichtungen	Projektvolumen zuw.-fähige Kosten Unternehmen max. 350 T€ Zuwendung FE max. 175 T€	2-3 Jahre	Personal (Fördersatz Unternehmen 25/35%; Forsch.-einrichtung 100 %) Aufträge an Dritte keine Sachkosten	BMW i	4-6 Monate
SAB	Förderung der beruflichen Weiterbildung und einzelbetriebliche Förderung	50 % der Personalkosten übernimmt Unternehmen	2-3 Jahre	50% Personal	Cofinanzierung Europäischer Sozialfonds (ESF) Pirnaische Straße 9 01069 Dresden Tel.: 0351 4910-4910	k.E.
SAB Innovationsassistentenprogramm	Beschäftigung qualifizierten Personals im Unternehmen	Zukunftstechnologien		Personal		k.E.
SAB FuE-Verbundprojektförderung	Kooperation aus Unternehmen und Forschungsgruppen aus Universitäten bzw. Fachhochschulen. Entwicklung neuer oder neuartiger Produkte und Verfahren	Zukunftstechnologien		Personal	Cofinanzierung Europäischer Fonds für Regionale Entwicklung (EF-RE) s.o.	k.E.

Quellenübersicht

Ahmed, J., Ramaswamy, H.S., Pandey, P.K (2005) Dynamic rheological and thermal characteristics of caramels. LWT - Food Science and Technology 39, 216-224

Anonymus (1999) Die Welt der Zuckerwaren. Bund Deutscher Süßwarenindustrie BDSI e.V.

Anonymus (2010) DIN EN ISO 179-1, Kunststoffe - Bestimmung der Charpy-Schlageigenschaften - Teil 1: Nicht instrumentierte Schlagzähigkeitsprüfung

Anonymus (2013) Datenblatt Purwasserschneidekopf AQUALINE 1, KMT GmbH, Bad Nauheim

Beiner, M., Korus, J., Lockwenz, H., Schröter, K., Donth, E. (1996) Heat Capacity Spectroscopy Compared to Other Linear Response Methods at the Dynamic Glass Transition in Poly(vinyl acetate). Macromolecules 29, 5183-5189

Bronlund, J., Paterson, T. (2004) Moisture sorption isotherms for crystalline, amorphous and predominantly crystalline lactose powders. International Dairy Journal 14, 247-254

Burfield, D.R., Lim, K.-L. (1983) Differential Scanning Calorimetry Analysis of Natural Rubber and Related Polyisoprenes. Measurement of the Glass Transition Temperature. Macromolecules 16, 1170-1175

Dear, J.P. (1996) Comparison of fast fracture properties of thermoplastics. Polymer Engineering & Science 36, 1210-1216

Drut, H. (1992) Bruchtrennen hochviskoser Massen. Dissertation, TU Dresden

Ergun, R., Lietha, R., Hartel, R.W. (2010) Moisture and Shelf Life in Sugar Confections. Critical Reviews in Food Science and Nutrition 50, 162-192

Fleischhauer, M. (2012). Leiter Entwicklung , Astor Schneidwerkzeuge GmbH. Mündliche Mitteilung

Gordon, M., Taylor, J. S. (1952) Ideal copolymers and the second-order transitions of synthetic rubbers. I. Non-crystalline copolymers. Journal of Applied Chemistry 2, 493-500.

Hoffmann, H., Mauch, W. & Untze, W. (2002) Zucker und Zuckerwaren. Behr's Verlag, Hamburg

Kerkhof, F. (1963) Maximale Bruchgeschwindigkeit und spezifische Oberflächenenergie. *Naturwissenschaften* 50, 565-566

Kim, A. I., Akers, M.J., Nail, S. L. (1998) The Physical State of Mannitol after Freeze-Drying: Effects of Mannitol. *Journal of Pharmaceutical Sciences* 87, 931-935

Le Meste, M., Champion, D., Roudaut, G., Blond, G. & Simatos, D. (2002) Glass transition and food technology: a critical appraisal. *Journal of Food Science* 67, 2444-2458

Müller, M., Hrabê, P., Chotêborský, R., Herák, D. (2006) Evaluation of factors influencing adhesive bond strength. *Research in Agricultural Engineering* 52, 30-37

Nowakowski, C.M., Hartel, R.W. (2002) Moisture Sorption of Amorphous Sugar Products. *Journal of Food Science* 67, 1419-1425

Nündel, T. (2001) Interner Bericht. Theegarten-Pactec

Pernot-Barry, A. (2012) Technische Direktorin der Zentralfachschule der Deutschen Süßwarenwirtschaft (ZDS), aus mündlichen Mitteilungen und Schulungsunterlagen der ZDS

Przywara, R. (1995) Drucktrennen sprödharter Werkstoffe. *Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 2: Fertigungstechnik*. VDI-Verlag, Düsseldorf

Rauschnabel, E., Heel, R., Bejnoud, F. (2012) Hochgeschwindigkeitstrennen von Massivstäben und Rohren mittels einer adiabatischen Trennanlage. *Technischer Bericht*, IFUTEC GmbH, Karlsbad

Reinheimer, M.A., Mussati, S., Scenna, N.J., Pérez, G.A. (2010) Influence of the microstructure and composition on the thermal-physical properties of hard candy and cooling process. *Journal of Molecular Structure* 980, 250-256

Roos, Y. (1993) Melting and glass transitions of low molecular weight carbohydrates. *Carbohydrate Research* 238, 39-48

Roos, Y.H. (1995) *Phase transitions in foods*. Academic Press, Elsevier. Waltham, Massachusetts

Roos, Y.H. (2010) Glass transition temperature and its relevance in food processing. *Annual Review of Food Science and Technology* 1, 469-496

Schenz, T. W. (1995) Glass transitions and product stability-an overview. *Food Hydrocolloids* 9, 307-315

Schilb, E. (2012) *Maschinenführer*, Spez GmbH. Schriftliche und mündliche Mitteilung

Schneider, Y., Zahn, S., Linke, L. (2001) Qualitative Prozessevaluierung zum ultraschall-unterstützten Schneiden von Lebensmitteln. Chemie Ingenieur Technik 73, 1224-1228

Schuldt, S., Arnold, G., Roschy, J., Schneider, S., Rohm, H. (2013) Defined abrasion procedures for cutting blades and comparative mechanical and geometrical wear characterization. In Druck bei Zeitschrift Wear.

Schultz, J., Nardin, M. (2003) Theories and mechanisms of adhesion. In: Handbook of adhesive technology (Hrsg. Pizzi, A., Mittal, K. L.). Taylor & Francis Group, Oxford, UK

Simon, S. (2013) Professor für Werkzeugmaschinen an der Hochschule Lausitz, Leiter Forschungsbereich Wasserstrahlschneiden. Mündliche Mitteilung

Wang, S., Langrish, T. (2007) Measurements of the crystallization rates of amorphous sucrose and lactose powders from spray drying. International Journal of Food Engineering 3, art. no. 1

Wang, J., Shanmugam, D.K. (2008) Cutting meat with bone using an ultrahigh pressure abrasive waterjet. Meat Science 81, 671-677

Zahn, S., Schneider, Y., Rohm, H. (2006) Ultrasonic cutting of foods: Effects of excitation magnitude and cutting velocity on the reduction of cutting work. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 7, 288-293

Zhang, X., Lu, Y., Liu, E., Yi, G., JiaJ. (2012) Adhesion and friction studies of microsphere-patterned surfaces in contact with atomic force microscopy colloidal probe. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects 401, 90-96