



**TU Bergakademie Freiberg, Institut für Maschinenbau
Lehrstuhl für Hütten- Gießerei- und Umformmaschinen**



Abschlußbericht zum Projekt

Substitution von Polystyrol durch Stärkeschäume oder andere alternative Materialien als Modellwerkstoff beim Vollformgießen

Berichtszeitraum: 1. 05. 1997-30. 04. 2000

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. habil. J. Bast

**Bearbeiter: Dr.-Ing. habil. W. Hopf
Dipl.-Ing. (FH) A. Müller**

Gefördert durch die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe

FKZ: 96NR124-F

Freiberg, 29. 04. 2001

Referat

Ausgangspunkt der Projektidee war die Substitution der Polystyrolmodelle durch Schaummodelle aus nachwachsenden Rohstoffen für das Vollformgießverfahren. Im ersten Verarbeitungsjahr wurden Stärkeschäume als Extrusionsstränge erfolgreich im Niederdruckgießverfahren vergossen. Es wurde aber auch klar, daß komplizierte Geometrien für das Vollformgießen aus extrudierten Stärkeschäumen nicht herzustellen sind. Deshalb wurde im zweiten Bearbeitungsjahr eine Technologie zur Erzeugung von Stärkeschaummodellen in Anlehnung an die Produktion der Polystyrolschaummodelle konzipiert. Die wesentlichen Technologieschritte sind:

1. die Herstellung von Stärkegranulaten mit einem ausreichenden Anteil an physikalisch gebundenem Wasser als Treibmittel. Zusätzlich wurden Substanzen zugesetzt, die sich in der Wärme in Wasser und Gase zersetzen. Diese Substanzen sollen als zusätzliche Treibmittel wirken.
2. Vorschäumen unter Einwirkung von Wärme und Druck.
3. Fertigschäumen der Formteile in speziell zu konstruierenden Formen.

Im dritten Bearbeitungsjahr schloß sich die systematische Untersuchung der technologischen Bedingungen zum Vorschäumen im Autoklaven an.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß die konzipierte Technologie geeignet ist, Formteile aus geschäumten Stärkegranulaten herzustellen. Allerdings ist das technologische Fenster zum Aufschäumen der Granulate in einem Autoklaven sehr klein, so daß eine reproduzierbare Erzeugung von Stärkeschaummodellen nicht vollzogen werden konnte. Aus diesem Grund konnten im Bearbeitungszeitraum des Projektes auch keine Gießversuche durchgeführt werden. Außerdem blieb aufgrund fehlender finanzieller Mittel das Problem der Konstruktion und das Bauen einer Vorrichtung für die Formteilherstellung ungelöst. In Weiterführung der Projektarbeiten laufen derzeit Untersuchungen, die von der Industrie finanziert werden, um die noch ungelösten Probleme einer Lösung zuzuführen. Dies betrifft insbesondere die reproduzierbare Fertigung von Stärkeschäumen, wobei neben der Technologie im Autoklaven weitere Verfahren eingesetzt werden.

1.	THEMA UND ZIEL	3
<hr/>		
2.	LÖSUNGSWEG	3
<hr/>		
2.1.	SUBSTITUTIONSWERKSTOFFE UND LIEFERANTEN	3
2.2.	VOLLFORMGIEßVERFAHREN	4
2.2.1.	VERGLEICH DES NIEDERDRUCK- UND SCHWERKRAFT-VOLLFORM- GIEßVERFAHRENS	7
2.3.	DURCHFÜHRUNG DER UNTERSUCHUNGEN UND ERGEBNISSE	10
2.3.1.	SCHÄUME	10
2.3.1.1.	Papierschäume	14
2.3.1.2.	Preßteile aus Kleie	14
2.3.1.3.	Preßteile aus Stärke und Pappe	15
2.3.2.	SCHLICHTEN UND KLEBER	16
3.	AUFGABEN UND ZIELSTELLUNG	19
<hr/>		
3.1.	LÖSUNGSWEG ZUM STÄRKESCHAUMMODELL ANALOG DEM POLSTYROLSCHAUMMODELL	20
3.2.	CHARAKTERISIERUNG DER AUSGANGSPRODUKTE	25
3.2.1.	KARTOFFELSTÄRKE UND WEIZENSTÄRKE	25
3.2.2.	TREIBMITTEL	27
3.3.	VORUNTERSUCHUNGEN ZUR STÄRKEGRANULIERUNG	30
3.4.	WIRBELSCHICHTGRANULIERUNG DER STÄRKE	33
3.4.1.	CHARAKTERISIERUNG STÄRKEGRANULATE MIT ELEKTRONENMIKROSKOPIE	44
3.5.	STÄRKESCHÄUME	47
3.5.1.	AUTOKLAVIERUNG	47
3.5.2.	MODELLHERSTELLUNG	51
3.5.3.	MIKROWELLE	52
4.	ZUSAMMENFASSUNG	57
<hr/>		

1. Thema und Ziel

Das Vollformgießen stellt ein neues innovatives Gießverfahren dar, das in Zukunft zunehmend die klassischen Gießverfahren verdrängen wird. Bei diesem Gießverfahren wird üblicherweise ein Polystyrolschaumstoffmodell durch eine Schmelze vergast. Das flüssige Metall nimmt den Platz des Schaumstoffmodells ein und ist ein originales Ebenbild des Modells. Bei der Modellersetzung entstehen aus dem Polystyrolschaumstoffmodell große Mengen Pyrolyseprodukte.

Da bei der Verbrennung oder Vergasung nachwachsender Rohstoffe keine umweltbelastenden Verbindungen entstehen, sollen Schäume aus Stärke oder anderen nachwachsenden Rohstoffen als Modellwerkstoff für das Vollformgießen untersucht werden.

Im Zeitraum 01.05.97-30.04.98 waren folgende technologisch relevante Schwerpunkte zu untersuchen:

1. Welche Schäume nachwachsender Rohstoffe oder anderer alternativer Materialien sind geeignet, Polystyrolschäume zu ersetzen?
2. Es waren Stärkeschäume unterschiedlicher Materialdichte zu produzieren, die eine hinreichende Formfüllgeschwindigkeit beim Gießen gestatten aber auch das Erstarren der Schmelzen verhindern.
3. Es waren Modelle durch Pressen oder andere Verfahren herzustellen.
4. Da die Modelle aus verschiedenen Komponenten zusammengesetzt sein können, waren Kleber für die alternativen Schäume zu untersuchen.
5. Es waren Schichten zu entwickeln, die auf Grund des hydrophilen Charakters der Schäume diese nicht zerstören.

2. Lösungsweg

2.1. Substitutionswerkstoffe und Lieferanten

Kooperationsvereinbarungen konnten mit nachfolgend aufgeführten Firmen getroffen werden:

Hubert Loick VNR

Stärkeschaumhersteller

PSP Priehs AG

Papierschaumhersteller

TU Chemnitz-Zwickau

Prof. Nendel (Kleieformteile)

Biotec, Biologische Naturverpackungen GmbH Preßteile aus Stärke
Hüttenes-Albertus Schlichtehersteller

Es wurde vereinbart, daß die genannten Firmen ihre Produkte zur Verfügung stellen, um sie auf ihre Eignung zur Vergießbarkeit zu testen.

Stand der Technik ist es, mit Hilfe eines Extruders Stärkeschäume als Chips (Stränge) bzw. Preßteile aus Stärke zu produzieren. Die Zersetzungsprodukte wurden massenspektroskopisch und gaschromatographisch bestimmt.

2.2. Vollformgießverfahren

Für die Eignungsprüfung der Stärkemodelle als vergasbare Komponente des Vollformgießverfahrens mußte am Lehrstuhl für Hütten- und Gießerei- und Umformmaschinen der TU Bergakademie Freiberg eine Schwerkraft- und eine Niederdruckgießanlage konzipiert und aufgebaut werden. Diese beiden Gießverfahren werden bei der Erzeugung von Gußteilen mit Hilfe des Vollformgießens in der Praxis eingesetzt, wobei als Gießgut Aluminium- und Eisenlegierungen zum Einsatz kommen. Beim Schwerkraftgießverfahren war es möglich beide Legierungen zu vergießen. Mit dem Niederdruckgießverfahren konnten nur Aluminiumlegierungen vergossen werden, da mit dem Ofen die Schmelztemperatur von Gußeisen nicht erreicht werden konnte.

Mit den Gießanlagen wurden der Einsatz von

- Klebern,
- Schlichten,
- Modellsubstanzen und die
- Gußstückqualität geprüft.

Schwerkraftvollformgießen

Abbildung 1 zeigt die Versuchsanordnung für das steigende Schwerkraftvollformgießen zur Eignungsprüfung von Stärkemodellen. Der Einguß mit Eingußtrichter 4 wurde mit bentonitgebundenem Sand geformt. Der Querlauf wurde zur besseren Stabilität mit wasserglasgebundenen Sand gestaltet. In den Querlauf hinein ragt das Stärkemodell. Diese

Anordnung befindet sich in einem Formkasten, der mit ungebundenem Sand gefüllt ist. Der Sand wird vibriert. Mit der Verfestigung des Sandbettes wird ein Widerstand gegen penetrierendes Metall aufgebaut.

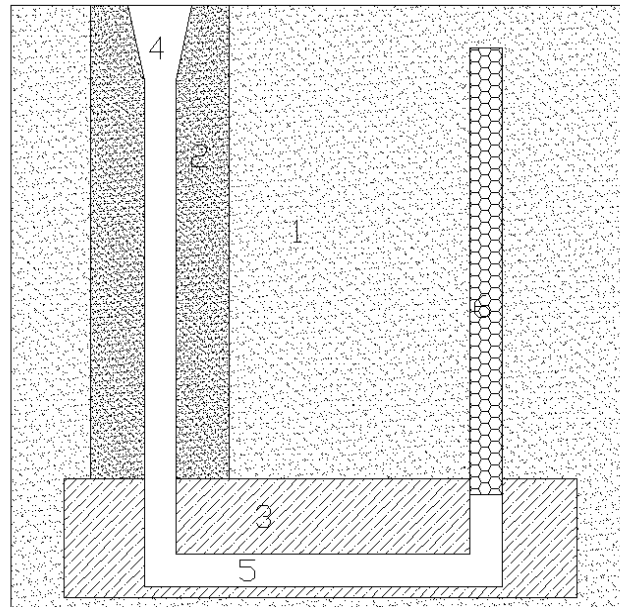


Abbildung 1: Versuchsanordnung Schwerkraftgießen

1=Quazsand, 2=Grünsand, 3=Querlauf aus wasserglasgebundenen Sand, 4=Eingußtrichter, 5=Querlauf, 6=Stärkemodell

Das Gießen erfolgt steigend. Dies soll eine beruhigte Formfüllung bewirken, d. h. gasförmige oder flüssige Zersetzungsprodukte werden nicht durch das turbulente Strömen des Metalls eingeschlossen.

Niederdruckvollformgießen

Abbildung 2 zeigt die verwendete Niederdruckgießanlage. Diese Anlage kann mit verschiedenen Gießdrücken bis maximal 1 bar und mit einer Temperatur bis maximal 900°C betrieben werden. Der Niederdruckgießofen besteht aus einem Druckbehälter, einer Heizung, einem Druckluftanschluß, einem Steigrohr, Isolationsmaterial und einem Tiegel. Die Befestigung der Formen kann über vier Gewindestäbe, die im Deckel befestigt werden erfolgen oder über die Stehbolzen im Flansch. Weiterhin gehören zu der Anlage eine

Temperaturregelung und eine Druckluftsteuerung. Das Heizen des Niederdruckofens erfolgt über vier Heizwendel. Die Heizung hat eine Leistungsaufnahme von 4560 W. Die Temperaturreglung des Ofens erfolgt über einen Fallbügelregler. Die Temperatur wird mit einem NiCr-Ni-Mantelthermoelement ($\varnothing 1$ mm) an der Außenwand des Tiegels gemessen.

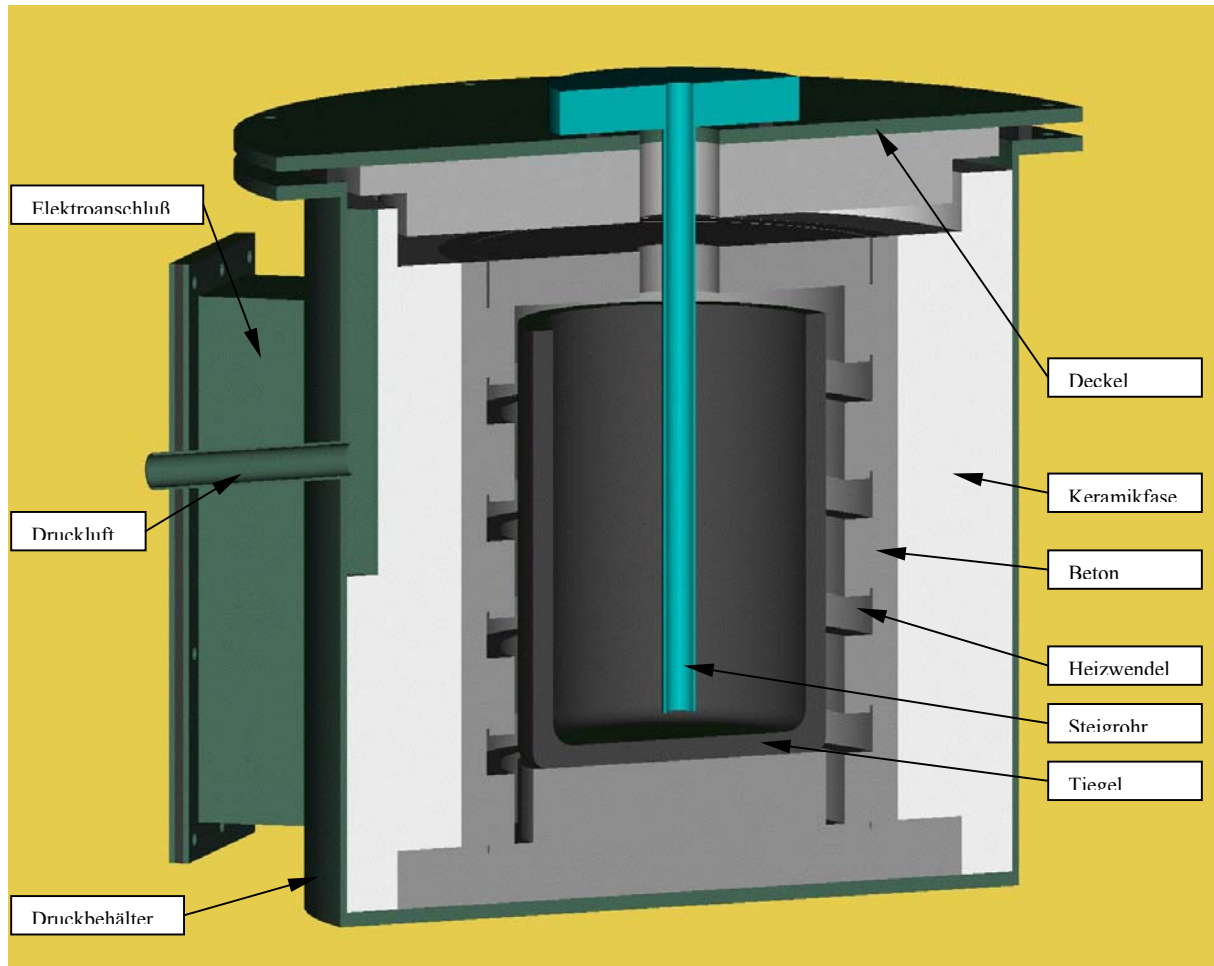


Abbildung 2: Aufbau des Niederdruckofen

Die Steuerung der Druckregelventile VM01 und VM02 erfolgt durch einen PC, unter Verwendung einer PC-AD/DA-Karte mit zwei analogen Ausgängen und der Software „Workbench“ der Firma Strawberry Tree Incorporated.

Aus Sicherheitsgründen wurden zwischen den PC und dem Druckregelventil VM01 zwei Schalter eingebaut. Der erste Schalter ist ein fest installierter Notaus-Schalter. Der zweite ist ein Endschalter, der beim Aufsetzen der abzugießenden Form den Stromkreis schließt. Dadurch wird ein versehentliches Auslösen des Gießvorganges ohne aufgesetzte Form verhindert. Der Gießvorgang wird über die Software „Workbench“ ausgelöst und gesteuert.

2.2.1. Vergleich des Niederdruck- und Schwerkraft-Vollform-Gießverfahrens

Ergebnisse

1. Mit dem Schwerkraftgießen lassen sich Stärkeschäume als Modellwerkstoff für die Erzeugung von Gußteilen aus Aluminium- und Eisenlegierungen nach dem Vollformgießverfahren einsetzen.
2. Beim Schwerkraftgießen ergibt sich aber ein kritisches Modellvolumen, bei dem die freigesetzte Luftmenge so groß wird, daß die Bewegung der Schmelze zum Stillstand kommt und so Kaltlauf entsteht. Dies stellt eine erhebliche Verfahrenseinengung dar.
3. Die Gußstückqualität wird wesentlich durch die Qualität des Stärkeschaumes beeinflusst. Die ungleichmäßige Porenstruktur der Schäume bewirkt eine turbulente Strömung des Metalls. Gasförmige oder flüssige Zersetzungsprodukte werden vom flüssigen Metall aufgenommen und es ergibt sich ein poröses Metallgefüge.
4. Die Oberflächen der extrudierten Stärkestränge ist stark gefurcht und wird als solche auf dem Gußstück abgebildet.
5. Die Porenstruktur der Stärkeschäume ist unregelmäßig und nicht geschlossen. Die Folge davon ist, daß die Schlichte in diese Kanäle eindringen kann. Im extremsten Fall bilden sich Löcher bei dünnwandigen Gußstücken.
6. Beim Niederdruckvollformgießen von Aluminiumlegierungen konnte kein kritisches Modellvolumen gefunden werden. Die maximal mögliche Gießhöhe der vorhandenen Niederdruckgießmaschine bei dem vorgegebenen Durchmesser von 5 cm des Stärkeschaumstranges konnte ausgenutzt werden (Abb.6). Das Niederdruckgießen gewährleistet eine einstellbare Gießgeschwindigkeit. Damit kann die Menge der Zersetzungsprodukte eingestellt werden. Dies bedeutet, daß die Porosität des Metallgefüges geringer ist.



Abbildung 3: Gußstück mit gefurchter Oberfläche als Abbildung der gefurchten Oberfläche des Stärkemodells, Aluminium



Abbildung 4: Gußstück mit gefurchter Oberfläche als Abbildung der gefurchten Oberfläche des Stärkemodells, Eisen



Abbildung 5: Maximales Füllvolumen, Eisen, $V= 70 \text{ cm}^3$



Abbildung 6: Niederdruckguß, Aluminium, $V= 212 \text{ cm}^3$

2.3. Durchführung der Untersuchungen und Ergebnisse

2.3.1. Schäume

Stärkeschäume werden üblicherweise extrudiert. Bekannt ist die Verarbeitung von Biopolymeren zu Verpackungschips. Es werden Extruder verwendet, wie sie auch in der Thermoplast-, Duroplast- und Elastomerverarbeitung benutzt werden. Das Biopolymer wird in Mehl- oder Granulatform zugeführt, plastifiziert und in Strangform kontinuierlich über Lochdüsen ausgetragen. Rotierende Schlagmesser zerschneiden die einzelnen Stränge dann auf das gewünschte Maß der Verpackungschips.

Bekannt ist auch die Verarbeitung von Biopolymeren zu Formteilen mit relativ gleichmäßigen Wandstärken, wie z. B. Einwegtellern und Verpackungen für die Nahrungsmittelindustrie (Preßteile). Hier wird in der Regel auf das sogenannte Backverfahren zurückgegriffen, bei dem das Biopolymer als Granulat, Teig- oder Mehlmischung, in die Form gegeben wird. Dort geschieht dann die Aufschäumung und Aushärtung des Formteiles durch Erhitzen.

Daneben wird an der Herstellung von Formteilen gearbeitet, das die Spritzgießtechnik sowie eine hierfür geeignete Form zur Herstellung von Dämmplatten aus faserverstärkten Biopolymeren beinhaltet. Das Aufschäumen erfolgt unmittelbar nach dem Einspritzen, und das Formteil kann sofort ohne Aushärtung/Trocknungszeit ausgestoßen werden.

In Abbildung 7 ist eine als Beispiel dienende Ausführungsform dargestellt:

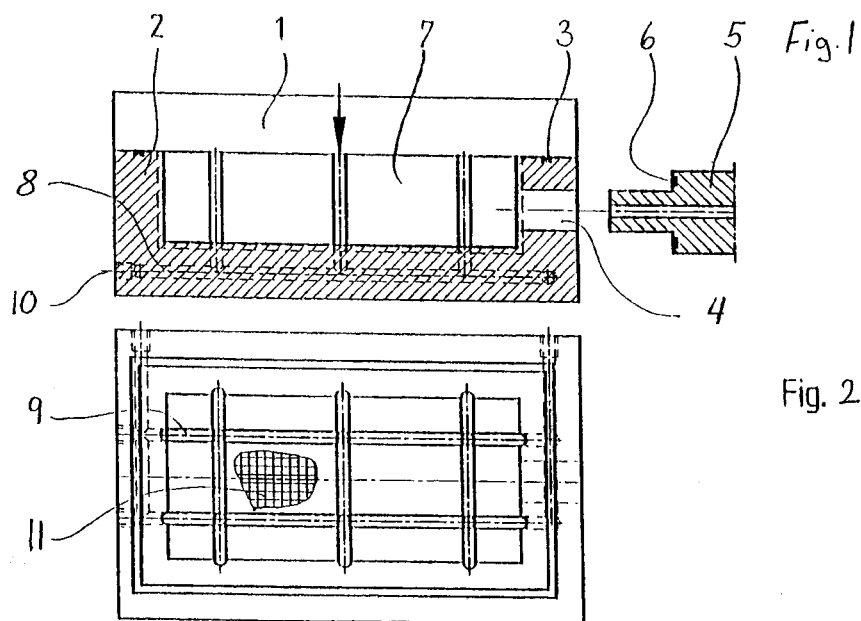


Abbildung 7: Formteil für Spritzguß (Fig. 1: lotrechter Längsschnitt durch eine Form zur Herstellung eines Formteiles im Spritzgießverfahren, In Fig. 2 Formenunterteil in der Draufsicht)

Die extrudierten Stärkestränge wurden hinsichtlich ihrer Einsatzes als vergasbare Komponenten des Vollformgießens untersucht /1/.

Modell- und Gußteilqualität

Ungleichmäßige Porosität: Stärkeschäume zeigen wie die Papierschäume eine stark unterschiedliche Porosität, die zu einer turbulenten Formfüllung und damit zu dem Einschließen von Zersetzungsprodukten führen kann.



Abbildung 8: Porosität

Obgleich die Oberflächen der Stärkeschaummodelle keine starken Furchen aufweisen, wird die Schlichte infolge der sich unter der Oberfläche befindlichen Blasen bei der Formfüllung zerstört. Das Gußstück weist eine stark gefurchte Oberfläche auf.



Abbildung 9: Fehler: Ungleichmäßige Oberfläche



Abbildung 10: Gußstück infolge gebrochener Stärkeschaumstruktur

Befinden sich Bohrungen im Modell, kann dies zur Lochbildung führen.



Abbildung 11: Fehler Lochbildung

2.3.1.1. Papierschäume

Die Zellulosefasern des Holzes sind wesentlichster Ausgangsstoff für die Papierherstellung. Holz besteht zu 40 bis 50% aus Zellulosefasern, zu 20-30% aus Lignin und zu 15-35% aus Hemizellulosen. Weitere Bestandteile sind Öle, Harze, Gerb- und Farbstoffe.

Zellulose ist die Gerüstsubstanz des Holzes und der wichtigste Ausgangsstoff für Papierfasern. Lignin ist ein Bindemittel, der die Zellulosefasern zusammenhält. Hemicellulosen sind begleitende Kohlenhydrate der Zellulose. Papier besteht aus Zellulosefasern, Füllstoffe und Leim. Die Herstellung von Zellstoff läuft auf chemischen Wege, wobei Lignin und Hemizellulosen größtenteils entfernt werden /2/.

Versuche sowohl mit dem Schwerkraft- als auch mit dem Niederdruckvollformgießverfahren zeigten, dass die einströmende Schmelze beim ersten Kontakt mit dem Papierschaummodell erstarrte, so daß eine weitere Formfüllung nicht möglich war. Damit sind die Papierschäume aufgrund ihrer hohen Dichte als Substitutionswerkstoff für Polystyrolschaummodelle nicht geeignet (Abb.12).

2.3.1.2. Preßteile aus Kleie

Es wurden Proben mit folgender Zusammensetzung untersucht /3/:

1. 70 % Kleie
15 % Baumwolle
15 % Korkmehl

2. 80 % Kleie
20 % Baumwolle

Preßteile aus Kleie besitzen trotz der Auflockermittel eine so hohe Dichte, dass ein Abgießen nicht möglich war (analog Abb.12). Die Kleie entzieht der Schmelzefront zuviel Wärme. Die Folge davon ist, daß die Schmelze erstarrt („Schmelze läuft kalt“).

2 <http://www.artis.uni-oldenburg.de/~muh/Dokumente/papier.html>

3 [Die Proben wurden von der TU Chemnitz-Zwickau, Institut für Allgemeinen Maschinenbau und Kunststofftechnik, Lehrstuhl Fördertechnik, Reichenhainer Straße 70, 09126 Chemnitz, Prof. K. Nenedel zur Verfügung gestellt.](#)

2.3.1.3. Preßteile aus Stärke und Pappe

Ausgehend von den negativen Ergebnissen bei den Versuchen mit den Kleiepreßteilen wurden die Wanddicken der Preßteile aus Stärke und Pappe verringert, um so den zu vergasenden Volumenanteil abzusenken.

Ziel der Untersuchungen war es zu prüfen, ob dünnwandige Preßteile aus Stärke geeignet sind, sie zu vergießen⁴.

Gußteilqualität

Trotz Wanddickenverringerung war bei den Preßteilen aus Stärke keine Formfüllung möglich. Die Schmelze läuft kalt. (Abb. 12)

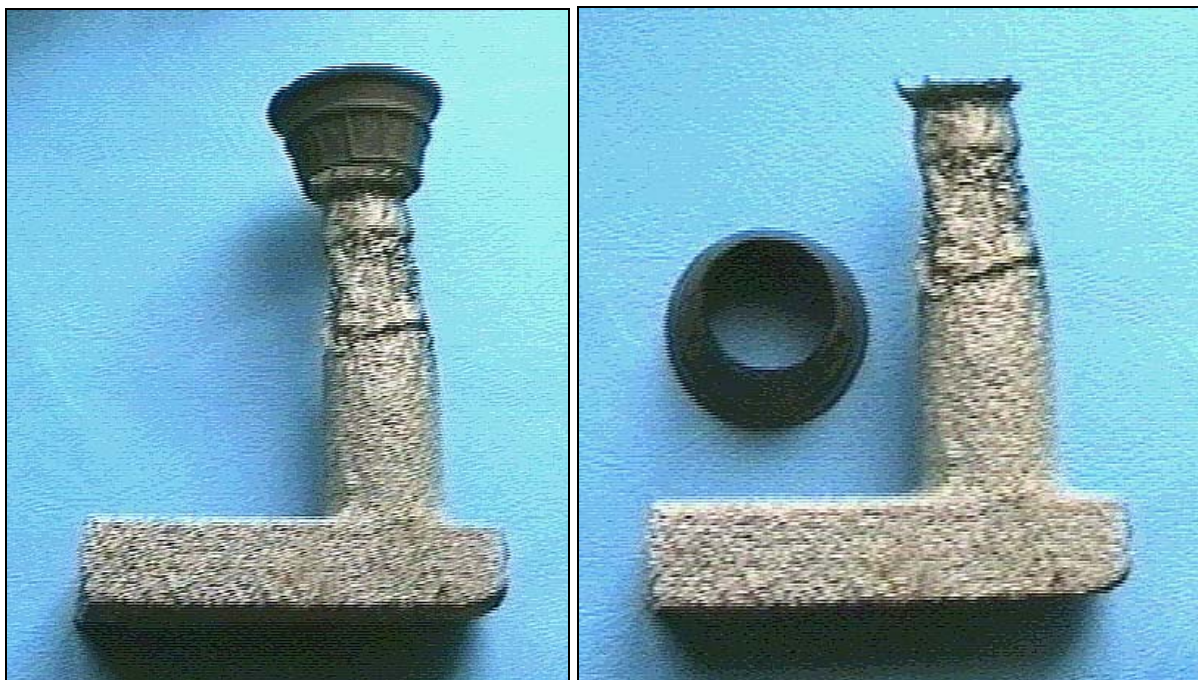


Abbildung 12: Kaltgelaufene Schmelze durch Preßteile aus Stärke

Im Gegensatz zu den Preßteilen aus Stärke können die dünnwandigen Preßteile aus Pappe mit Al-Schmelzen gefüllt werden.

Bei Fe-Schmelzen ist der Gegendruck der eingeschlossenen Luft zu groß und die Schmelze strömt beim Schwerkraftguß durch die Eingußöffnung zurück (Abb. 13).

⁴ Die Proben wurden von Biotec, Biologische Naturverpackungen GmbH, Blinder Weg 30, 46446 Emmerlich zur Verfügung gestellt.

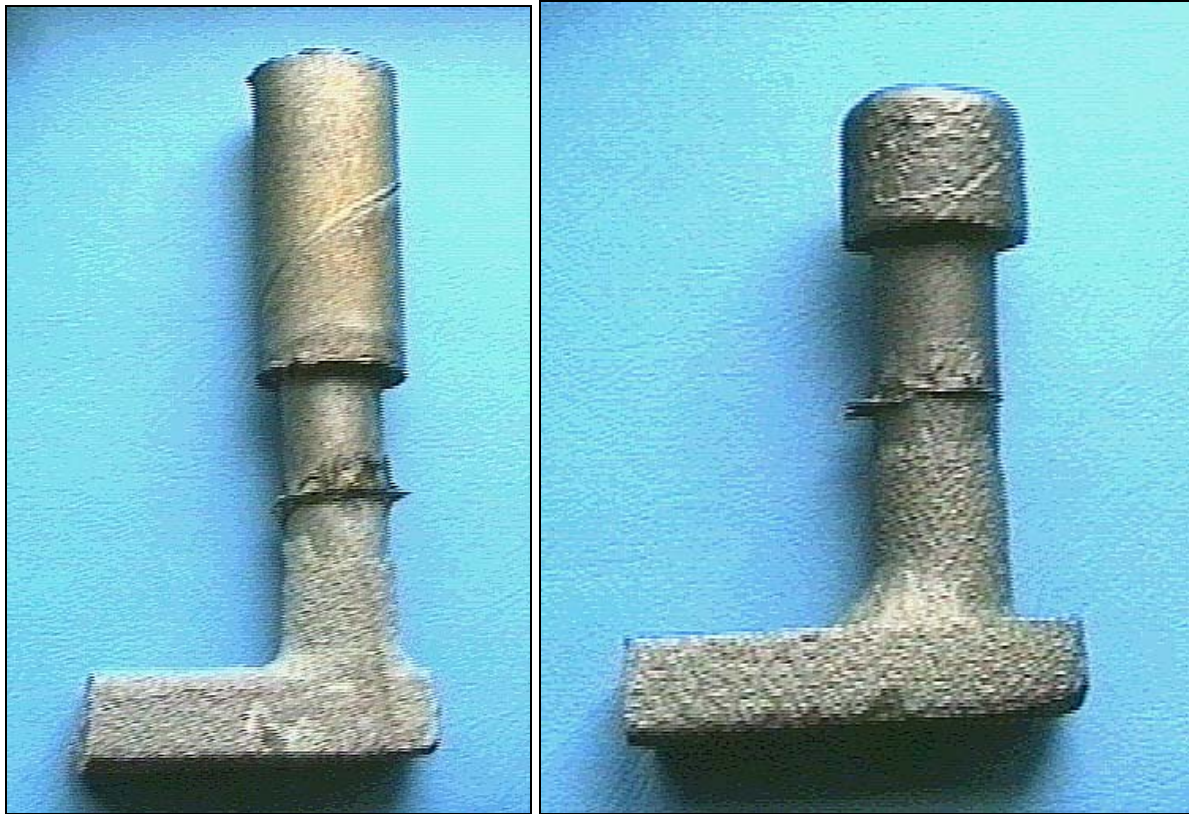


Abbildung 13: Abgegossene Preßteile aus Pappe (links Al, rechts Fe)

2.3.2. Schichten und Kleber

Um die Penetration des Metalles in den umgebenden Sand zu verhindern, muß das Polystyrol-schaummodell beim Vollformgießverfahren mit einer Schichte überzogen werden. Außerdem übt sie die Funktion eines Formwandstabilisators aus. Ausgehend von dieser Arbeitsweise wurden die üblicherweise eingesetzten Schichten auch auf ihre Eignung bei Stärkemodellen überprüft.

Es wurden 3 alkoholische Schichten untersucht:

1. FESKOTE (Propanol-2, Graphit /5/
2. KOALID /6/
3. NEKROFLUID (Isopropanol, Graphit /13/

Hüttenes-Albertus

Aufgrund der offenen Poren auf der Oberfläche der Stärkeschaummodelle dringt bei ihrem Überstreichen mit Schlichte diese in das Modell ein (Abb. 14 u. 15). Beim Abgießen einer Form mit einem derartigen Modell setzen sich diese Schlichtebestandteile im Inneren des Gußteiles ab (Abb.14). Abbildung 16 zeigt eine Gefügeaufnahme mit einen durch Schlichtebestandteile verunreinigtem Gußstück. Man erkennt deutlich das poröse Gußgefüge.

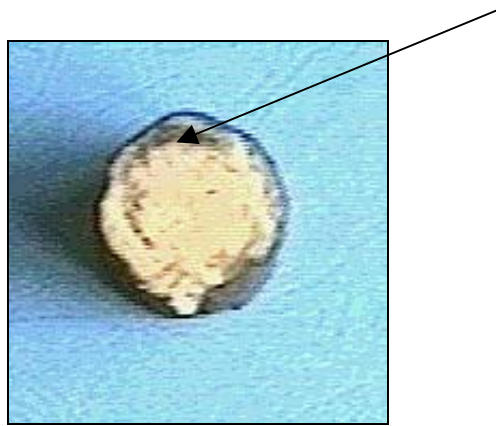


Abbildung 14: Fehler: Schlichte kann durch die offenen Poren in das Innere des Modells eindringen

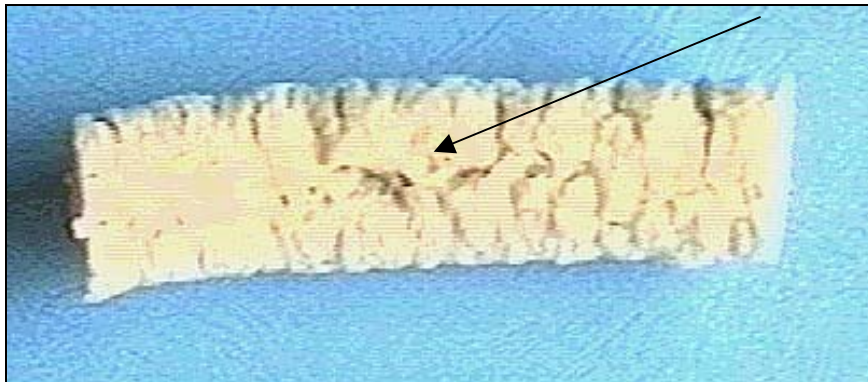
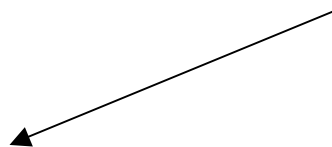


Abbildung 15: Fehler: Schlichte kann durch die offenen Poren in das Innere des Modells eindringen



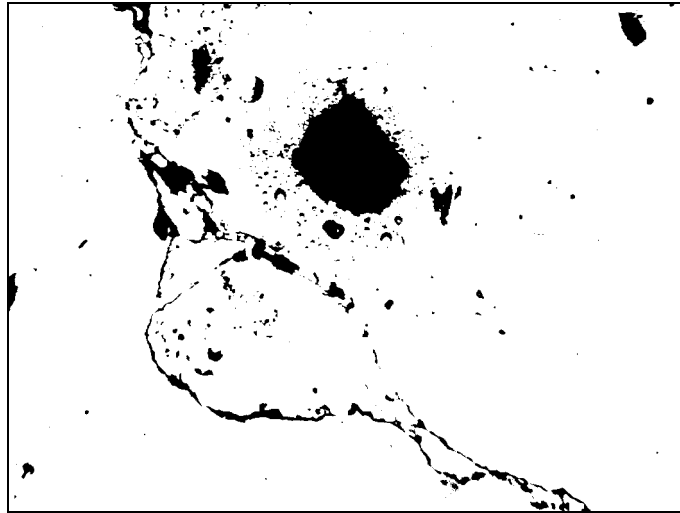


Abbildung 16: Poröses Gefüge eines Gußstückes (147:1)

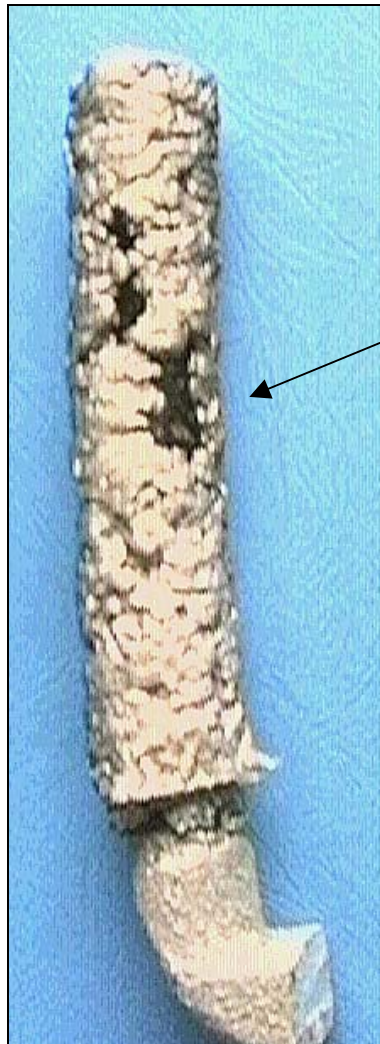


Abbildung 17: Lochbildung durch Penetration der Schichte

Schlußfolgerung:

Da die Stärke von Wasser angegriffen wird, sollten nur wasserfreie alkoholische Schichten angewendet werden.

Für den Zusammenbau großer Modelle aus mehreren Formteilen mit Kleber können problemlos in Azeton gelöste Styopor - Kleber eingesetzt werden

3. Aufgaben und Zielstellung

Das erste Jahr des Projektes diente dazu, grundsätzlich zu entscheiden, ob Stärkeschäume geeignet sind, als Modellwerkstoff beim Vollformgießen zu dienen. Es zeigte sich, daß der Stand der Technik es nicht erlaubte, Modelle oder Formteile aus Stärkeschäumen herzustellen.

Die bestehenden Technologien erlauben es derzeit nur

- Schäume durch Extrusion oder
- Schäume als Sandwichstrukturen durch Verpressen

herzustellen.

Um Formteile für die Verpackungsmittelindustrie oder Modelle für die Gießereiindustrie zu fertigen, mußte ein grundsätzlich neuer Ansatz gesucht werden. Dieser Ansatz orientiert sich an der Herstellungstechnologie von Polystyrolformteilen.

Die grundsätzlichen technologischen Schritte dazu sind:

- Herstellung von Stärkegranulaten, die ein Treibmittel tragen,
- Vorschäumen der Granulate bis zu einer der Anwendung entsprechenden Schüttdichte und
- Fertigschäumen in geeigneten Schäumautomaten.

Aus der Analyse der Herstellung der Polystyrolformteile können folgende Anforderungen an die Herstellungstechnologie der Stärkeschaumformteile abgeleitet werden:

1. Herstellung der Stärkegranulate.

- Die Stärke und das Treibmittel müssen als Suspension homogen mischbar sein.
- Es müssen fluidisierbare Keime für die Wirbelschicht zu gewinnen sein.
- Die Aufbaugranulation muß ein homogenes Aufwachsen der Stärke und des Treibmittels gewährleisten.

2. Vorschäumen der Stärkegranulate

- Das Treibmittel muß durch Erwärmung Wasser und/oder Gase freisetzen. Das Wasser sollte bei Temperaturen $> 100\text{ °C}$ verdampfen und ebenfalls als Treibmittel wirken.
- Die Stärke muß bei Erwärmen thermoplastisch erweichen und darf die freigesetzten Gase nicht entweichen lassen.
- Die aufgeschäumten Stärkegranulate müssen eine zellulare Struktur aufweisen.
- Die Stärkegranulate müssen hinreichend stabil gegen äußere Einflüsse sein, um deren Transport zu gewährleisten.

3. Fertigschäumen

- Es muß eine Restkapazität an Treibmittel vorhanden sein, um ein weiteres Aufschäumen der vorgeschäumten Stärkegranulate zu erreichen.
- Die Stärkegranulate müssen beim Fertigschäumen erneut erweichen.
- Beim Fertigschäumen sollen die Granulate flächenhaft verschweißen, um eine hinreichende Stabilität des Formteils zu gewährleisten.
- Nach dem Fertigschäumen muß das Formteil formstabil bleiben

3.1. Lösungsweg zum Stärkeschaummodell analog dem Polstyrolschaummodell

Herstellung der Stärkegranulate

Unter Anlehnung an die Polstyrolschaummodellherstellung wäre theoretisch folgende Arbeitsweise zu realisieren:

1. Als Treibmittel kommen anorganische Salze mit Kristallwasser in Betracht, die bei Erwärmung das Kristallwasser abspalten. Die Substanzen sollten hinsichtlich der geplanten Kompostierung des Verpackungsmaterials umweltverträglich sein. Als Kationen sind deshalb nur Na^+ , K^+ und Al^{3+} und als Anionen Hydrogencarbonate, Hydrogensulfate, Sulfate und Phosphate auszuwählen. Auch Mischungen verschiedener Substanzen sind denkbar.

Organische Salze bieten die Möglichkeit, daß sie bei Erwärmung vollständig in die Gase CO_2 , NH_3 und $\text{H}_2\text{O(d)}$ zerfallen, die unbedenklich hinsichtlich der Umweltverträglichkeit sind.

Diese Treibmittel setzen Wasser oder die Gase nicht bei einer bestimmten Temperatur, sondern in einem weiten Temperaturbereich frei. Die Differentialthermoanalyse bietet die Möglichkeit, die Temperaturbereich der Gasfreisetzung zu erfassen.

2. Auch vorgekleisterte Stärke kann Wasser tragen, das bei Erwärmung freigesetzt werden kann. Diese Wasserfreisetzung ist an die Gelatinisierungstemperatur gebunden.
3. Es ist eine Rezeptur aus nativer, vorgekleisteter Stärke und Treibmittel zu finden, die bei einem definierten Erwärmungsregime, die Erweichung der Stärkegranulate gewährleistet. Die plastische Natur der Granulate in diesem Zustand muß das Entweichen der Treibgase aus dem Granulat verhindern und dadurch die Ausbildung einer zellularen Struktur befördern.
4. Polysaccharide, wie z. B. Glycerin können als Plastifizier verwendet werden.
5. Für das Aufgranulieren in der Wirbelschicht sind folgende Voraussetzungen zu erfüllen:
 - Die native und die vorgekleisterte Stärke sowie das Treibmittel müssen mischbare Suspensionen ergeben, die für das Versprühen geeignet sind. Die Gelbildung der Suspensionen aus vorgekleisteter Stärke kann das Versprühen der Suspensionen behindern.
 - Voraussetzung für eine durch Klümpchenbildung ungestörte Wirbelschichtgranulierung ist eine homogene Suspension mit geringer Viskosität. Diese Homogenisierung, die zugleich einen weiteren Aufschluss der Stärke bedeutet, wurde in einer Planetenmühle ausgeführt. Die Homogenität der zur Stärkegranulation eingesetzten Stärkesuspensionen wurde in Voruntersuchungen durch die Bestimmung der Viskosität geprüft.
 - Für das Aufgranulieren in der Wirbelschicht müssen fluidisierbare Keime gewonnen werden. Sie sollten in einer geeigneten Partikelgrößenverteilung vorliegen und im besten Falle der Rezeptur des aufzugranulierenden Materials entsprechen.

6. Das Aufgranulieren muß ein homogenes Granulat aus nativer, vorgekleisteter Stärke und Treibmittel ergeben, um ein gleichmäßig vorgeschäumtes Produkt zu gewährleisten. Dies wird vorteilhafterweise durch eine Sprühtrocknung in der Wirbelschicht oder in einem Fließbett realisiert.

Vorschäumen der Stärkegranulate

1. Um ein gleichmäßiges Aufschäumen der Granulate zu gewährleisten, muß die Wärmeenergie gleichmäßig in das Volumen der Granulate eingebracht werden. Möglicherweise muß noch Wasser zugeführt werden, wenn das Kristallwasser des Treibmittels und das physikalisch gebundene Wasser der vorgekleisterten Stärke nicht ausreichen sollten.
2. Das Einbringen der Wärme kann mit einer Mikrowelle oder unter Wirkung eines Druckes im Autoklaven stattfinden. Um den Schäumprozeß reproduzierbar zu gestalten, waren die Prozessparameter Temperatur und Druck zu variieren.
3. Die bei der Granulation der Stärke erhaltenen Produkte zeigten trotz schonender Prozessführung bisher Feuchtigkeitsgehalte um die 12 %. Auch der Zusatz vorgelatisierter Stärke konnte keine wesentliche Zunahme der Feuchtigkeit gewährleisten.
4. Diese Feuchtigkeitsgehalte entsprechen dann Gelatinisierungstemperaturen von 160...170 °C. Um das Wasser bei diesen Temperaturen nicht zu verdampfen ist im Autoklaven mindestens ein Druck von 10 bar (s. Abb. 18) für die Schäumversuche vorzugeben. Die Wärmemenge und der Feuchtegehalt sollte die Einstellung einer definierten Schüttdichte gewährleisten. Diese Schüttdichte kann entsprechend dem Anwendungsfall variieren.

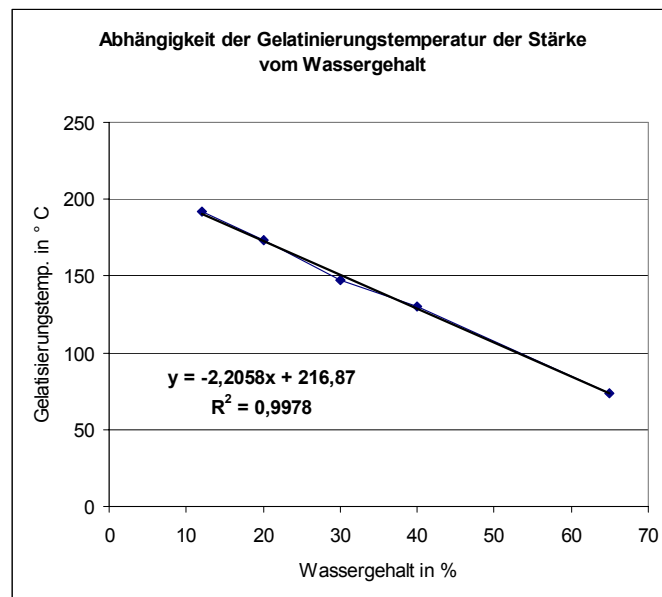


Abbildung 18: Gelatinisierungstemperatur

Fertigschäumen der Formteile

1. Die vorgeschäumten Stärkegranulate sollten auf einen 3-dimensional erregten Vibrationstisch in eine Form eingerüttelt werden. Es sollte sich die dichteste Kugelpackung ergeben.

2. Für die Anwendung einer Mikrowelle für das Fertigschäumen sollte das Formmaterial aus einem für die Mikrowelle transparenten Stoff bestehen. Gleichzeitig wäre es wünschenswert, wenn dieses Material wärmeisolierende Eigenschaften besäße. Diese Eigenschaften gewährleisten ein gleichmäßiges Temperaturfeld im Modell. Das gleichmäßige Temperaturfeld schließt das ungleichmäßige Aufschäumen bzw. das stellenweise Denaturieren der Stärke aus.

3. Die Form sollte aus einem feststehenden Teil und einem oder mehreren Formteilen bestehen, die jeweils einzeln hinsichtlich des Druckes und der Temperatur angesteuert werden sollten. Die Form sollte die vorgeschäumten Stärkegranulate hermetisch abschließen.

4. In die Form können Kraftleitungssysteme eingearbeitet werden, die den Modellen eine zusätzliche Stabilität verleihen. Diese Kraftleitungssysteme können aus nachwachsenden Rohstoffen (Flachs) oder Federstahl bestehen.
5. Gegebenenfalls war zu prüfen, ob ein besseres Vorschäumen der Stärkegranulate als Blockmaterial im Autoklaven gegeben ist. Insofern sollten diese Blöcke durch die Mikrowellenbehandlung in die entsprechende Form gebracht werden.
6. Es wird der Anspruch erhoben, daß alle Substanzen umweltverträglich und biologisch abbaubar sind, d. h. die Verpackungsteile sind im einfachsten Falle kompostierbar. Da die Stärke selbst hydrophil ist, wird der Widerstand gegen das Wasser in der Atmosphäre begrenzt sein. Indem man die Formteile in Lösungen von acetylierten Stärken taucht, könnten diese hydrophobiert werden. Wie lange die Formteile allerdings gegen Umwelteinflüsse stabil bleiben, müssen die Experimente zeigen.

Anmerkungen:

Infolge der Ausstattung mit finanziellen Mitteln konnte die oben angeführte Technologie nur zum Teil überprüft werden; d. h.,

1. Es konnte nur eine begrenzte Auswahl an Rezepturen zur Herstellung der Granulate in der Wirbelschicht untersucht werden,
2. es standen nur geringe Kapazitäten zur Mikrowellen- und Autoklavbehandlung zur Verfügung und
3. ein Schäumautomat konnte infolge der hohen Kosten nicht gebaut werden. Damit entfällt auch die sehr interessante Möglichkeit der Testung der Kraftleitungssysteme und die Testung der Wirkung hydrophobierender Substanzen.

3.2. Charakterisierung der Ausgangsprodukte

3.2.1. Kartoffelstärke und Weizenstärke

Zur Herstellung der Stärkegranulate wurde eine native und eine vorgekleisterte Stärke benutzt.

Produktspezifikation von vorgekleisterter Stärke (Weizenquellstärke) /7/:

- Hersteller: AVEBE, Nijmegen, Holland
- Handelsname: Wheatex C.B.
- Qualität: Nahrungszwecke
- Additive: keine
- Nährwert pro 100g: 1426 kJ/100 g
- Stärke: 86,0 g/100 g
- Eiweiß: 1,5 g/ 100g
- Fett: 0,05 g/100 g
- Mineralstoffe: 0,50 g/100 g
- Haltbarkeit: mindestens 1 Jahr in gut verschlossenen und unbeschädigten Säcken
- Lagerbedingungen: Im trockenen Lager unter normalen Bedingungen

Die folgende Tabelle enthält Produktspezifikationen nativer Stärken:

	Kartoffelstärke	Weizenstärke
Feuchtigkeitsgehalt in %	18	12
Korngröße D ₅₀ in µm	38	20
Gelatinisierungstemperatur in °C	60-65	80-85
Schüttdichte g/cm ³	0,7-0,85	0,8

Tabelle 1: Eigenschaften nativer Stärken der Fa. Avebe

Weizenquellstärke

Die Weizenquellstärke wurde vom IKTS Dresden bezogen (Produktbeschreibung lt. Avebe Niederlande). Vorgelatinisierte Stärken werden durch die Gelatinisierung und Trocknung von Stärkesuspensionen (Walzentrocknung) oder Extrusionskochung von halbtrockenen Stärken gewonnen. Vorgelatinisierte Stärken haben die Eigenschaft, bei Kontakt mit kaltem Wasser stark zu quellen und eine kolloidale Lösung zu bilden. Während der Vorgelatinisierung wird die körnige Struktur der Stärke zerstört.

Kartoffelsubstrat

Das Kartoffelsubstrat ist ein Stärke-Faser-Gemisch und wird mit einer Kartoffelsubstrat-Erntemaschine auf dem Feld gewonnen. Die Feuchtigkeit des Stärke-Faser-Gemischs beträgt etwa 60 %. Der Anteil an Stärke liegt bei ca. 35 %. Dieses feuchte Stärke-Faser-Gemisch mit Konservierungsstoffen versetzt, wird direkt zur weiteren Verwertung genutzt oder zur Langzeitstabilisierung getrocknet. Es werden Konservierungsstoffe ausgewählt, welche die spätere Verwendung nicht beeinträchtigen.

An der Technischen Universität Dresden wurden hinsichtlich der Verwendbarkeit und der besonderen Vorzüge des Kartoffelsubstrats bereits Untersuchungen durchgeführt:

Bisher bekannte Eignungen:

Kartoffelsubstrat eignet sich besonders zur Herstellung von Formkörpern wie Schalen, Becher und Boxen. Die in der Kartoffel enthaltenen Eiweiß- und Rohfaserkomponenten gehen somit direkt in das Produkt ein. Die Herstellung ist preisgünstiger als die Produktion mit reiner Stärke.

Wirksamer Einsatz als Bindemittel in Dämm- und Verpackungstoffen. Es ist möglich, mit dieser Produktgruppe am Markt Preise zu erzielen, welche auch mit mineralischen Produkten in dieser Kategorie konkurrieren können.

3.2.2. Treibmittel

Die Zersetzung der ausgewählten vier anorganischen und 3 organischen Salze wurden wie folgt ermittelt (Versuchsbedingungen):

Derivatograph:

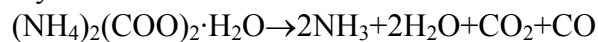
- Thermoanalysengerät: MOM Budapest
- Aufheizgeschwindigkeit: bis 250 °C: 5 °C/min
- Pt-Tiegel: offen
- Substanzen wurden vor der Messung im Mörser intensiv vermischt

Die Zersetzung läuft formal nach den folgenden Mechanismen ab:

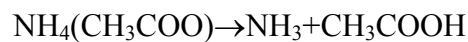
Ammoniumoxalat



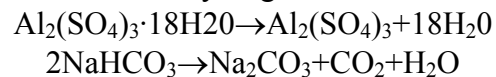
Ammoniumoxalat-Monohydrat



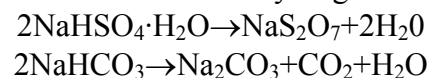
Ammoniumacetat



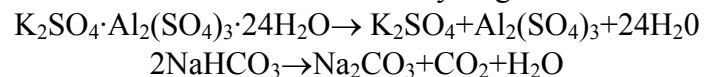
Gemisch aus Aluminiumsulfat u. Natriumhydrogencarbonat



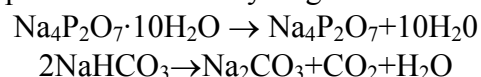
Gemisch aus Natriumhydrogensulfat und Natriumhydrogencarbonat



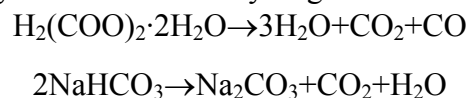
Gemisch aus Kalium-Aluminiumsulfat und Natriumhydrogencarbonat



Gemisch aus Natriumdiphosphat und Natriumhydrogencarbonat



Gemisch aus Oxalsäure-Dihydrat und Natriumhydrogencarbonat



Die Gasfreisetzung ist durch Anfangs- und Endtemperatur einer Zersetzungsreaktion gekennzeichnet. Diese können thermogravimetrisch ermittelt werden. In der nachfolgenden

Tabelle sind diese Temperaturen, insofern diese $< 200\text{ °C}$ sind, aufgeführt. Aus der Summenformel kann stöchiometrisch die Gesamtgasmenge abgeschätzt werden, die aus einem Mol Ausgangssubstanz entwickelt werden kann.

Verbindung	Stöchiometrische Gesamtgasfreisetzung in l/g	T Beginn der Zersetzung in °C	T Ende der Zersetzung in °C
Ammoniumoxalat	0,848	67	120
Ammoniumoxalat-Monohydrat	0,896	78	133
Ammoniumacetat	0,553	53	
NaHCO_3	0,605		
$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \times 18\text{H}_2\text{O} + \text{NaHCO}_3$	0,267	24	
$\text{NaHSO}_4 \times \text{H}_2\text{O} + \text{NaHCO}_3$	0,162	23	94
$\text{K}_2\text{SO}_4 \times \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \times 24\text{H}_2\text{O} + \text{NaHCO}_3$	0,567	62	178
$\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 \times 10\text{H}_2\text{O} + \text{NaHCO}_3$	0,560	53	163
Oxalsäure-Dihydrat + NaHCO_3	1,000	18	

Tabelle 2: Gasfreisetzung und Temperaturen für verschiedene organische und anorganische Substanzen

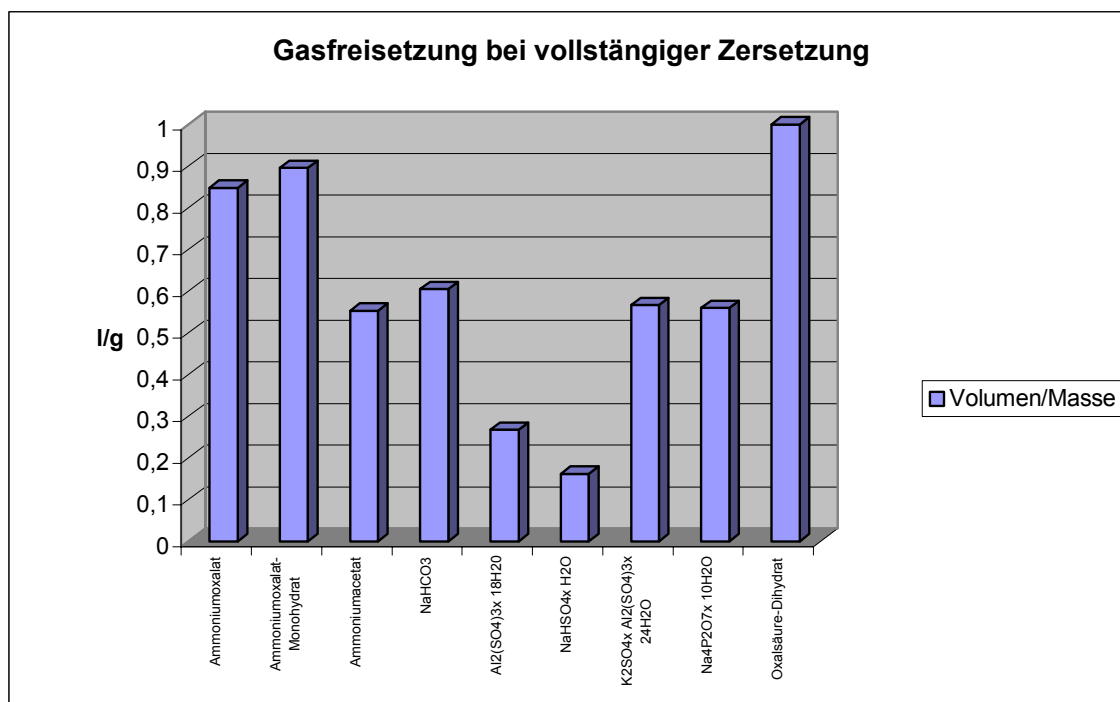


Abbildung 19: Stöchiometrische Gasfreisetzung

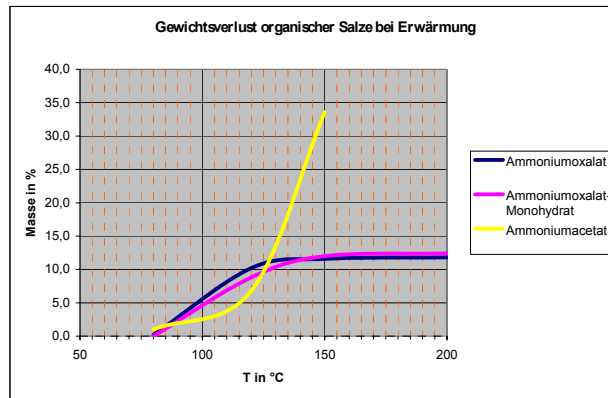


Abbildung 20: Gewichtsverlust organischer Salze bei Erwärmung

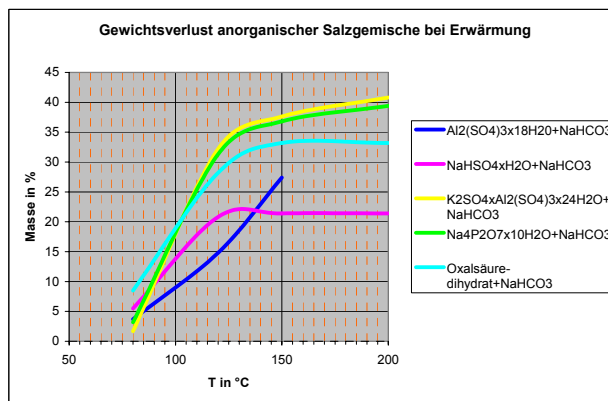


Abbildung 21: Gewichtsverlust anorganischer Salzgemische bei Erwärmung

Zusammenfassung der Treibmittelcharakterisierung

1. Die organischen Salze zersetzen sich bei Temperaturen, die im Bereich der Gelatinisierungstemperatur sind. Obgleich die organischen Salze stöchiometrisch mehr Gase freisetzen sollten, endet im betrachteten Temperaturbereich die Zersetzung bei $T < 140\text{ °C}$ (Ausnahme: Ammoniumacetat). Die freigesetzte Gasmenge ist in diesem Bereich geringer als bei den anorganischen Salzen.
2. Die anorganischen Salze zersetzen sich schon bei Temperaturen, die geringer als die Gelatinisierungstemperatur sind. Die Gasfreisetzung steigt mit wachsender Temperatur bis $T = 130\text{ °C}$ an und nimmt dann nicht mehr oder nur noch schwach zu ($\text{K}_2\text{SO}_4 \times \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \times 24\text{H}_2\text{O} + \text{NaHCO}_3$, $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 \times 10\text{H}_2\text{O} + \text{NaHCO}_3$).
3. Obgleich die anorganischen Salze umweltverträglich sind, wären die organischen Salze zu bevorzugen. Sie zersetzen sich vollständig, ohne Rückstände zu hinterlassen. Diese

Zersetzung kann aber bis $T = 140\text{ °C}$ nicht vollständig sein. Es muß also geprüft werden, welche Rückstände im Stärkegranulat zurückbleiben können.

3.3. Voruntersuchungen zur Stärkegranulierung

Homogenisierung der Stärkesuspension durch Mahlung

Es wurden folgende Versuchsbedingungen gewählt:

- Planetenmühle: Typ „pulverisette“ (P-5), Fritsch Laborgerätebau GmbH
- Mahltöpfe aus Porzellan
- Mahlkugeln: 10 mm / 50 Stück
- Drehzahl Stufe 5, ca. 200 U/min
- Variation der Mahldauer: 5 Min, 10 Min, 15 Min
- Einwaage: 40 g Stärke und 160 ml Wasser.
- Zumischungen von Weizenquellstärke in Konzentrationen von 10 % – 30 % bezogen auf den Gehalt an Kartoffelstärke.

Viskositätsmessung (Rheotest)

Zur Beurteilung der Homogenität der Suspensionen wurden nach der Mahlung Viskositätsmessungen mit dem Rotationsviskosimeter Rheotest 2 durchgeführt.

Mit zunehmender Mahldauer in der Planetenmühle nimmt die Viskosität der Suspensionen unabhängig von der Stärkeart zu. Höhere Konzentration der Weizenquellstärke bewirkt ebenfalls eine Erhöhung der Viskosität. Bei einem Gehalt von 20 % Weizenquellstärke ist ab einer Mahldauer von 10 Minuten die Suspension bereits gelartig. Bei einem Gehalt von 30 % Weizenquellstärke wird die Suspension bereits nach 5 Minuten Mahlung hochviskos und ab 10 Minuten fest. Die Ergebnisse der Viskositätsmessungen sind in folgenden Abbildungen dargestellt.

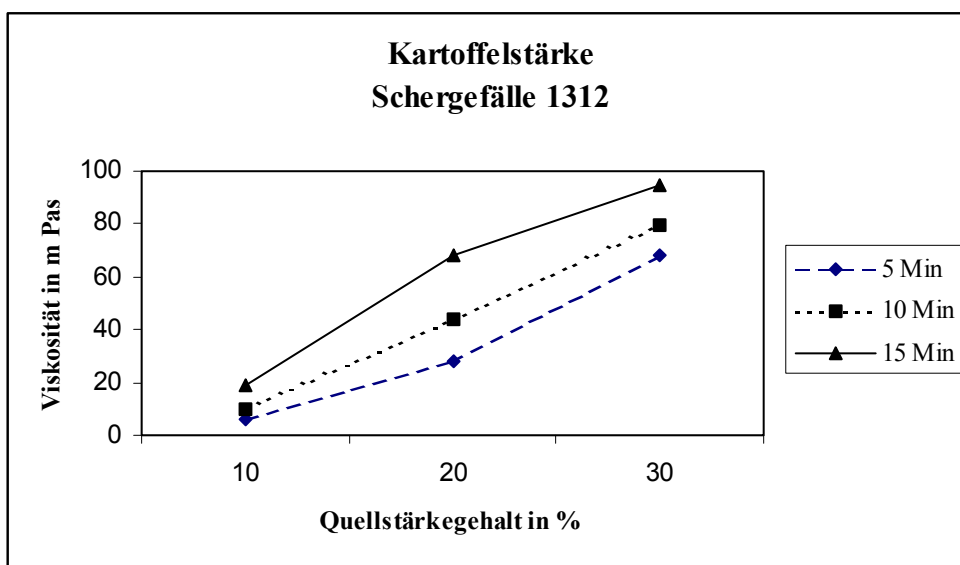
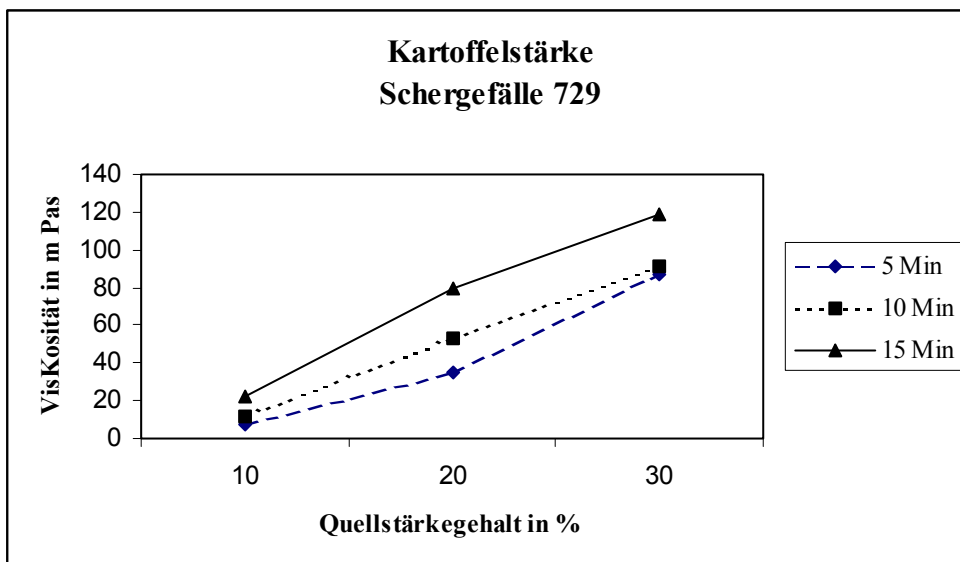
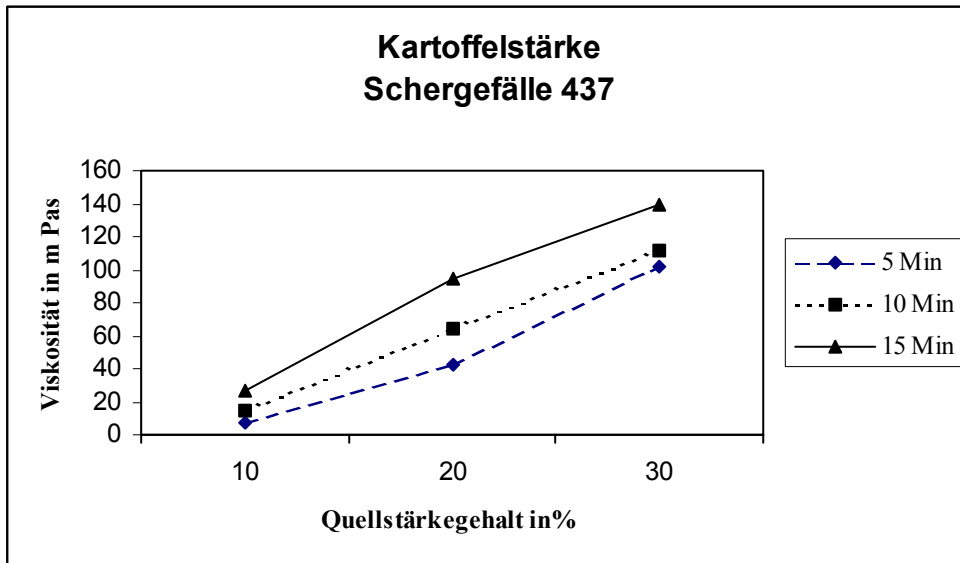


Abbildung 22: Viskositäten der Kartoffelstärke mit Weizenquellstärke

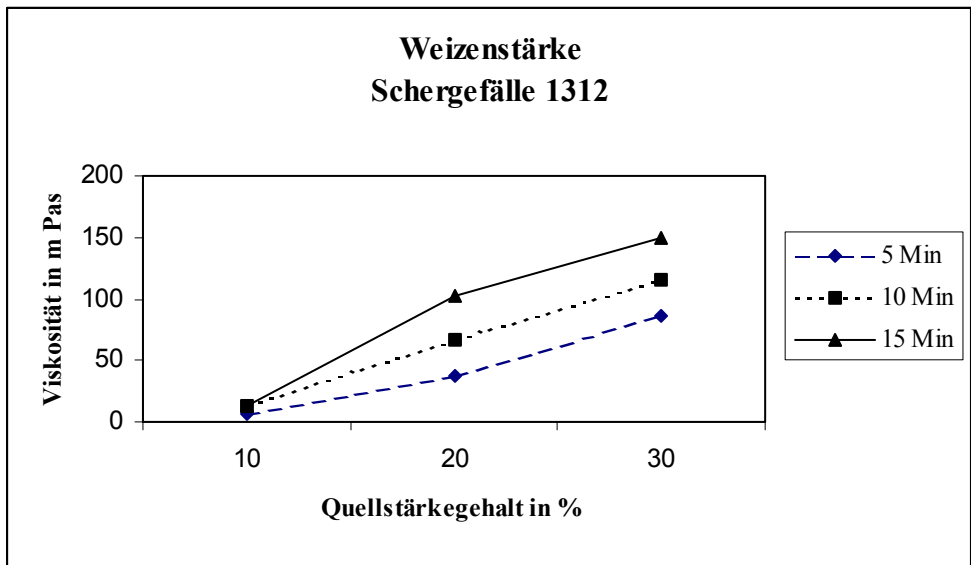
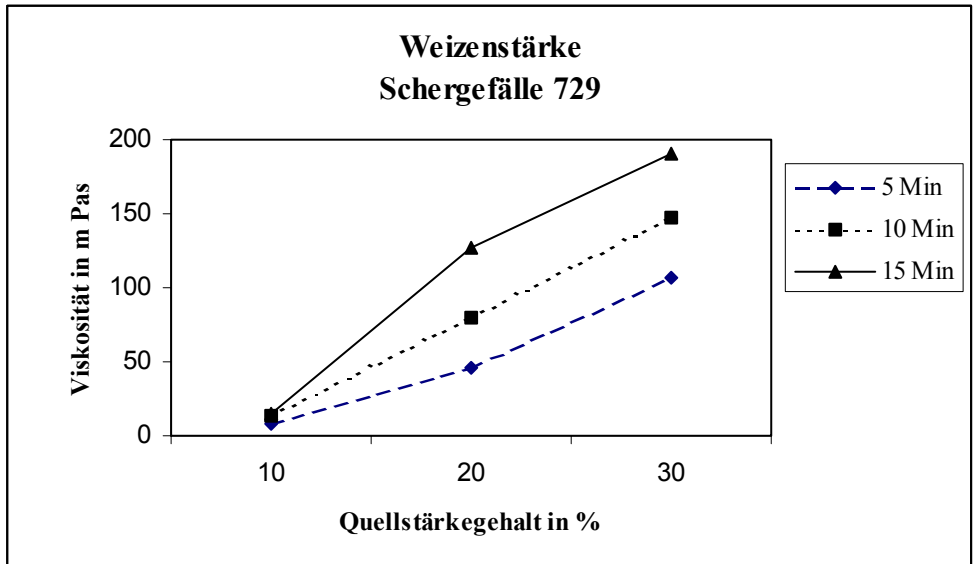
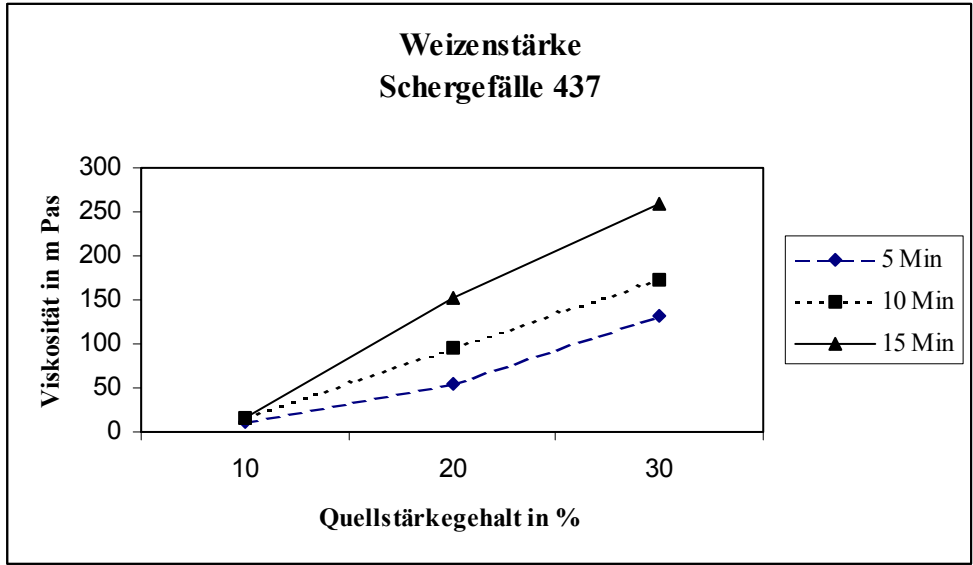


Abbildung 23: Viskosität von Weizenstärke mit Weizenquellstärke

Herstellung der Keime

Für die Herstellung der Keime wurde folgende Prozedur gewählt:

- 600 g Kartoffelstärke wurden in 1 l Wasser suspendiert, 3 Masse-% Glyzerin und 0,5 Masse-% PVA zugeben und anschließend die Suspension im Rotationsverdampfer getrocknet.
- Nachtrocknen des Produktes aus dem Rotationsverdampfer im Trockenschrank ergab ein stückiges und steinhartes Produkt, welches sich nur mühsam im Mörser bzw. durch Mahlung mit ZrO_2 - Kugeln zerkleinern ließ. Es wurden aus den 600 g Kartoffelstärke nur 160 g Keime zwischen 100 μm und 400 μm gewonnen.

Schlußfolgerung:

Die Keimgewinnung für weitere Versuche kann nur durch Aufgranulieren nativer Stärke im Wirbelschichtgranulator erfolgen. Für die Keimherstellung durch Aufgranulieren ist nur die rieselfähige Weizenstärke geeignet. Mit der nicht rieselfähigen Kartoffelstärke kann man keine Wirbelschicht in der Apparatur erzeugen. Neue Keime für die weiteren Versuche werden durch Aussieben aus den Fertigprodukten gewonnen.

3.4. Wirbelschichtgranulierung der Stärke

Um die Herstellung von Polystyrolmodellen nachzuempfinden, wurde der Versuch gemacht, fließfähige Stärkegranulate mit geringer Schüttdichte zu erzeugen, die ein Treibmittel enthalten /8/. Beide Komponenten sollen im fertigen Granulat aktivierbar sein und bei Zugabe eines weiteren Reaktionspartners zu einem Schaum aufgetrieben werden können. Für die Zielfraktion wurde ein Größenbereich von 500 - 1000 μm angestrebt.

8 Die Experimente wurden zusammen mit dem Fraunhofer Institut Keramische Technologien und Sinterwerkstoffe, Winterbergstraße 28, 01277 Dresden, Dr. Nebelung, Gruppelleiter Pulverprocessing durchgeführt.

Wirbelschichtgranulator

Den prinzipiellen Aufbau von Wirbelschichtgranulationsanlagen zeigt Abbildung 24: Aufbau eines Wirbelschichtgranulators . Mit dem am Boden einströmenden Heizgas konstanter Temperatur werden die Feststoffe fluidisiert und gleichzeitig getrocknet. Die Suspension / Binderlösung wird im Gegenstrom (oder Gleichstrom) mit einer Zweistoffdüse in die Wirbelschicht zerstäubt. Größenverteilung und Masse der Tropfen lassen sich unabhängig voneinander durch Variation von Suspensionsdurchsatz und Düsendruck einstellen. Das Gas wird in einem meist integrierten Staubfilter gereinigt und verläßt die Anlage. Der abgeschiedene Feinanteil wird zyklisch in die Wirbelschicht zurückgeblasen und dort gebunden. Die Granulationskinetik und die Größenverteilung des Produktes wird wesentlich von der Größenverteilung der eingesetzten Keime, der Verweilzeit des Produktes und den Sprühbedingungen beeinflusst.

Der hier dargestellte diskontinuierliche Labor - Apparat könnte durch Reihenschaltung kontinuierlich gestaltet werden

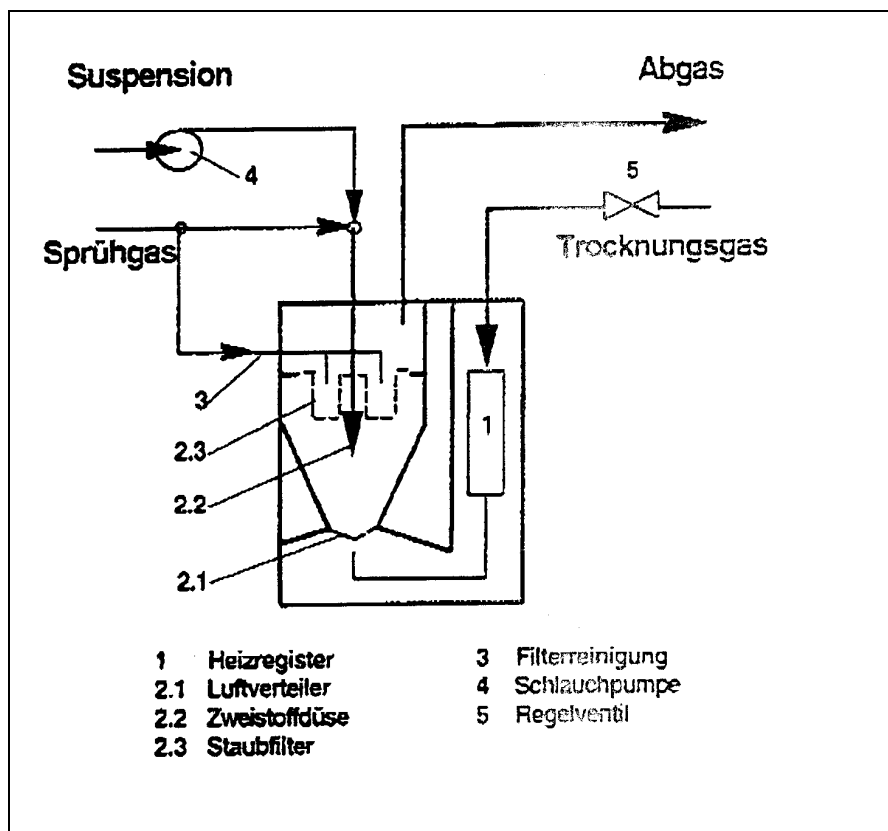


Abbildung 24: Aufbau eines Wirbelschichtgranulators

Testversuche zur Granulierung von Stärke ohne Binder, Variation des Feststoffgehaltes der Suspension

Ergebnis:

- Feststoffgehalt: 40 Masseprozent
- Ammoniumoxalat: 10 Masseprozent
- Schüttdichte: 0.51 g/cm³

Am IKTS Dresden wurde die Stärkegranulierung in den Wirbelschichtgranulatoren Aeromatic – Strea und Alpine 100 FSG getestet

Zunächst erfolgte eine Vorgranulierung (Keimbildung) aus dem Pulvergemisch im Wirbelschicht-Granulator (AEROMATC - STREA).

In einem zweiten Schritt wurden die erhaltenen Keime der Fraktion 315-500 µm im Granulator (Alpine 100 FSG) weiter aufgranuliert und in den Größenbereich der Zielfraktion gebracht..

Das erhaltene Produkt (Hauptprodukt) zeichnet sich durch folgende Eigenschaften aus:

- Größenbereich: 315 - 500 µm
- Schüttdichte: 480 kg/m³
- Granalienform: unregelmäßig (Abb.25)
- Aktivität: Nachweis durch Schaumbildung bei Säurezugabe

Das Produkt kann als fließfähig charakterisiert werden. Eine weitere Vergrößerung der Partikelgröße im vorliegenden Stoffsystem in der gewählten Anlage ist nicht zu empfehlen, da größere Granalien als unregelmäßige Agglomerate vorliegen und das Fließverhalten beeinträchtigen.

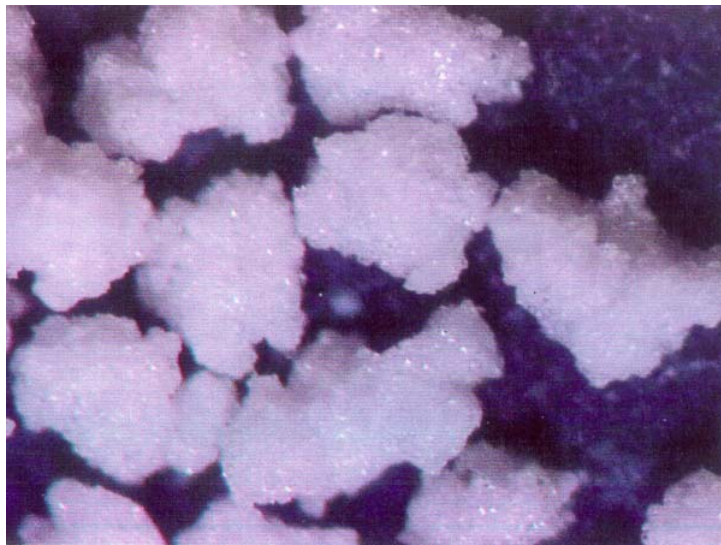


Abbildung 25: Stärkegranulat (Aeromatic Strea)

Die Partikelgrößenverteilung wurde mit Hilfe eines Lasergranulometers (Fa. Sympatec) /9/ bestimmt. Die nichtgranulierte Stärke ist $< 125 \mu\text{m}$ mit einem geringen Grobkornanteil. Die Partikelgrößenverteilung wird charakterisiert durch $x_{10}=5,46 \mu\text{m}$, $x_{50}=16,56 \mu\text{m}$ und $x_{90}=35,30 \mu\text{m}$. Die Partikelgrößenverteilung der Siebfraction $315\text{-}500 \mu\text{m}$ ist nahezu gleich verteilt (leicht linksschief). Sie ist charakterisiert durch $x_{10}=267,72 \mu\text{m}$, $x_{50}=377,46 \mu\text{m}$ und $x_{90}=507,34 \mu\text{m}$.

9 Die Messungen wurden an der TU Bergakademie Freiberg, Institut für Metallurgie und Reinstoffe durchgeführt.

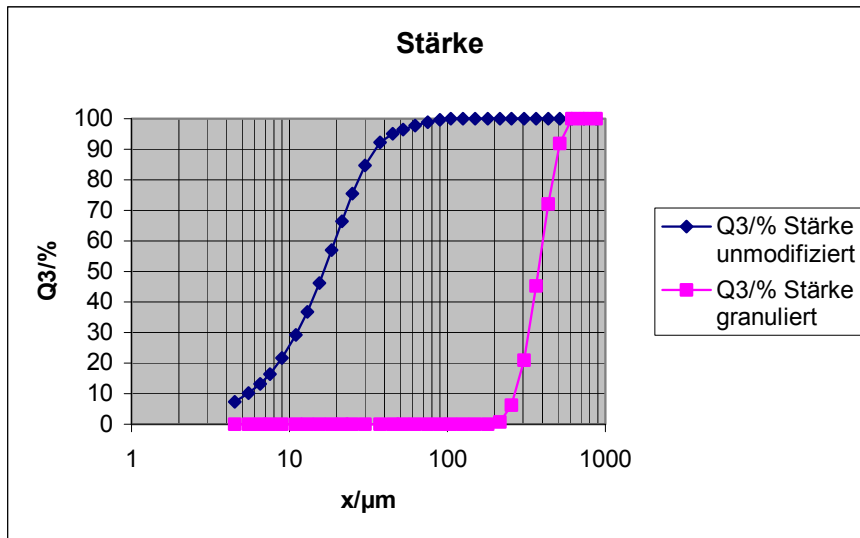


Abbildung 26: Verteilungssumme und Verteilungsdichte der Stärke und des Granulates

Fließbettgranulator – Alpine 100 FSG

Das Produkt dieses Verarbeitungsschrittes wird durch folgende Eigenschaften charakterisiert:

- Größenbereich: 500 ...800 μm (Hauptanteil: 630 ...800 μm)
- Schüttdichte: 576 kg/m³
- Granalienform: regelmäßiger, (jedoch noch nicht kugelförmig)





Abbildung 27: Stärkegranulat (Alpine100 FSG)

Das Granulat zeichnet sich durch ein verbessertes Fließverhalten gegenüber dem ersten Verfahrensschritt aus. Mit diesem Verfahren ist eine weitere Anhebung der Granulatgröße aus dem vorliegenden Stoffsystem als möglich anzusehen. Eine weitere Vergrößerung der Granalien könnte zudem eine weitere Annäherung an die Kugelform mit sich bringen und somit die Fließfähigkeit weiter verbessern.

Nachdem im Ergebnis der vorherigen Untersuchungen der Fließbettgranulator Alpine 100 FSG sich als geeignet für die Granulierung von Stärke erwiesen hat, wurde in weiteren Versuchen an der Granulatoptimierung gearbeitet. Es mußten die optimale Zusammensetzung und Konzentration für die Stärkesuspension und die optimalen Versuchsparameter gefunden werden, um Granulate = oder > 1 mm in runder Form zu erhalten.

Granulate aus nativer Kartoffelstärke

130 g Kartoffelstärkekeime wurden in den Wirbelschichtgranulator Alpine 100 FSG eingesetzt. Der Versuch schlug fehl, da der Luftvolumenstrom zu hoch eingestellt war und damit die Wirbelschicht sich im oberen Teil des Reaktors befand. Unter diesen Bedingungen erfolgte eine Sprühtrocknung. Der Feinanteil wurde sofort im Filter bzw. im Zyklon abgeschieden. Außerdem wuchsen die Stärketeilchen nicht auf die Keime auf, weil diese mit einer Ausgangskorngröße $D_{50} = 56 \mu\text{m}$ zu groß für eine Sprühgranulierung waren.

Deshalb wurde für weitere Granuliersversuche die Stärkesuspension 1 h Stunde in der Planetenmühle homogenisiert und zerkleinert. Die so erhaltene Suspension war stabil und bereits gelartig. Die Granulate waren jedoch nicht rund sondern kantig (Abbildung 28: Stärkegranulat.) Die sphärischen Körner sollen die Rieselfähigkeit der Granulate gewährleisten.



Abbildung 28: Stärkegranulat (kantige Form)

Zur weiteren Granulatoptimierung wurde als Weichmacher Glycerin und zur besseren Benetzung das Tensid KV 5088 der Suspension vor der Mahlung zugegeben. Der Feststoffgehalt der Suspension variierte zwischen 10, 15 und 20 %. Die erhaltenen Granulate weisen bereits eine annähernd runde Form auf. Der Wassergehalt der Granulate betrug 4 %.

Als weitere Suspensionszusätze wurden Glycerin und PVA (Polyvinylalkohol) getestet. Die Zugabe erfolgte nach der Homogenisierung in der Planetenmühle. Es wurden erstmals runde duktile Granulate erhalten. Der Wassergehalt der so gewonnenen Granulate lag bei ca. 10 %.

Diese Versuche ergaben ein optimales Granulat in runder Form und mit ausreichender Weichheit.



Abbildung 29: Stärkegranulat (runde Form)

Schlußfolgerung:

Versuchsbedingungen für Granulate aus Kartoffelstärke hergestellt durch Wirbelschichtgranulierung im Alpine 100 FSG:

- Suspension ca. 15 % ig - Vorbehandlung in der Planetenmühle 1 h,
- nach Mahlung Zugabe von 0,5 % Polyvinylalkohol und 5 % Glycerin, bezogen auf den Feststoffgehalt in der Suspension,
- Temperatur_{Eingang}/Temperatur_{Ausgang}: 110°C/32°C-35°C- (Temperatur über Suspensionszugabe regulieren),
- Wirbelschicht über Luftdruckregelung und Bypaßregelung ziemlich weit unten positionieren

Granulate aus Kartoffelstärke und 10 % Weizenquellstärke

Die Granulierung von Kartoffelstärke mit 10 % Quellstärke ergab zunächst unregelmäßig geformte Agglomerate. Bei den weiteren Versuchen wurde zur Suspension Glycerin als Weichmacher zugesetzt. Mit Gehalten von 5 % Glycerin in der Suspension war die Wirbelschicht schwer zu beherrschen, d. h. es kam zum Verkleben und Anbacken der Stärke in der Apparatur. Mit einem Gehalt von 3 % Glycerin wurde ein verwendbares Produkt in runder Form erhalten. Die Granulate mit Glycerinzusatz sind außerdem plastisch.

Schlußfolgerung:

Bedingungen für Granulate aus Kartoffelstärke mit 10 % Quellstärkegehalt:

- Suspension: Feststoffgehalt max. 15 % mit Zusatz von 3 % Glycerin,
- T_E/T_A : 110°C/31°-35 °C, ansonsten wie bei Granulaten aus Kartoffelstärke

Granulate mit Treibmittel

Kartoffelstärke mit 10 % Quellstärke, 3 % Glycerin und 5% Ammoniumoxalat bzw. Oxalsäure:

Das Treibmittel und das Glycerin wurden jeweils nach der Mahlung zugesetzt. Die Mahlung in der Planetenmühle erfolgte ebenfalls 1 h.

Glycerin und Oxalsäure reagieren unter Abspaltung von CO_2 und H_2O zu Allylalkohol, was die Wirksamkeit des Glycerin als Plastifizier herabsetzt.

Coating der Granulate mit Zucker

200 g Granulat aus dem Versuch 654.9/3 wurden mit einer Zuckerlösung beschichtet. Mit einer 30 %igen Zuckerlösung war die Beschichtung nicht möglich. Das Produkt verklebte und die Wirbelschicht brach zusammen. Mit einer 15 %igen Zuckerlösung gelang es bei höheren Temperaturen (ca. 50 °C) das Granulat mit 45 g Zucker zu beschichten.

Coating der Granulate mit Polyvinylalkohol (PVA)

200 g Granulat aus dem Versuch 654.3 wurden mit einer 2,5 %igen Polyvinylalkohollösung beschichtet. Unter diesen Bedingungen war die Wirbelschicht schlecht einstellbar, da die Granulate verklebten und die Wirbelschicht sich in der Apparatur absetzte. Der Versuch mußte mit ca. 50 °C gefahren werden. Es wurden ca. 10 g PVA aufgetragen.

Folgende Stärkegranulate wurden im Projektzeitraum hergestellt:

1. Testprodukte

Testversuche zur Granulierung von Stärke ohne Binder, Variation des Feststoffgehaltes der Suspension

Ergebnis:

- Feststoffgehalt: 40 Masseprozent
- Ammoniumoxalat: 10 Masseprozent
- Schüttdichte: 0.51 g/cm³

T575 Testprodukt 01/99, Lieferung vom 21.1.99

Herstellung von Granulat zum Test der Verarbeitbarkeit durch Verschäumen

Ergebnis Charge 1:

- Feststoffgehalt: 40 Masseprozent
- Ammoniumoxalat: 10 Masseprozent
- Polyvinylalkohol: 0,8 Masseprozent (bez. auf Feststoffgehalt)
- Glyzerin: 3.0 Masseprozent
- Schüttdichte: 0.55 g/cm³

Ergebnis Charge 2:

Beschichtung von Produkt Charge 1 mit Zuckerlösung
Zucker: 30 Masseprozent

T 588 Vorversuche 02/99

Testversuche zur Verarbeitung vorgekleisteter Stärke (Weizenquellstärke WHEATEX C.B., Lieferant AVEBE, Deutschland GmbH, Mollsfeld 3, 40670 Meersbusch)

- Verarbeitung unterschiedlicher Mischungsverhältnisse von verkleisterter und nativer Stärke (Anteil verkleisterte Stärke: 100 % – 50 % – 16 % – 9 %)
- Prüfung der Sprühtrocknung und der Wirbelschichtgranulierung
- Prüfung des Einflusses der Vorzerkleinerung
- Homogenisierung in Planetenkugelmühle
- Kein Binder

Ergebnis: Schüttdichte: 0.40 g/cm³)

T 594 Testprodukt 03/99, Lieferung vom 29.3.99

Herstellung von Granulat zum Test der Verarbeitbarkeit durch Verschäumen (2 kg Produkt, 0.8 - 1.2 mm)

2. Stärkegranulate = 1 mm

Versuchsnummer.	Versatz	Suspension	Schüttdichte in g/cm ³	Produkt >1 mm
654.8	Kartoffelstärke	Zusatz von Glycerin und PVA nach Mahlung	0,44	1,2 kg
654.8/5	Kartoffelstärke	s.o.	0,48	3,1g
654.8/6	Kartoffelstärke			
654.9/3	Kartoffelstärke mit Quellstärke und Glycerin	Kartoffelstärke mit 10% Weizenquellstärke, Zusatz von Glycerin	0,34	1,2 kg
654.9/4	Kartoffelstärke mit Quellstärke	Kartoffelstärke mit 10 % Quellstärke	0,58	1,4 kg Probe zum heißisostat. Pressen in Dresden
654.10	Kartoffelstärke mit Ammoniumoxalat	Kartoffelstärke mit 10 % QS, Zusatz von Glycerin und Ammoniumoxalat	0,43	1,3 kg Probe zum heißisostat. pressen in Dresden
654.11	Kartoffelstärke mit Oxalsäure	Kartoffelstärke mit 10% QS, Glycerin und Oxalsäure	0,47	1,27 kg
654.12	Probe 654.9/3 mit Zucker	Zuckerlösung, T _E /T _A : 110°/58°		200 g
654.13	Probe 654.9/3 mit PVA	PVA-Lsg., T _E /T _A : 110°/50°		200 g

Tabelle 3: Zusammenstellung der Endprodukte >1mm aus der Stärkegranulierung in der Wirbelschichtanlage Alpine 100 FSG des IKTS Dresden

3.4.1. Charakterisierung Stärkegranulate mit Elektronenmikroskopie

Im folgenden sind elektronische Mikroskopaufnahmen dargestellt, die den submikroskopischen Aufbau der Stärkegranulate beschreiben. Es sind dargestellt:

- Partikelkollektiv
- Einzelkorn
- Aufbaugranulation
- Schnitt durch ein Granulat mit dem Keim

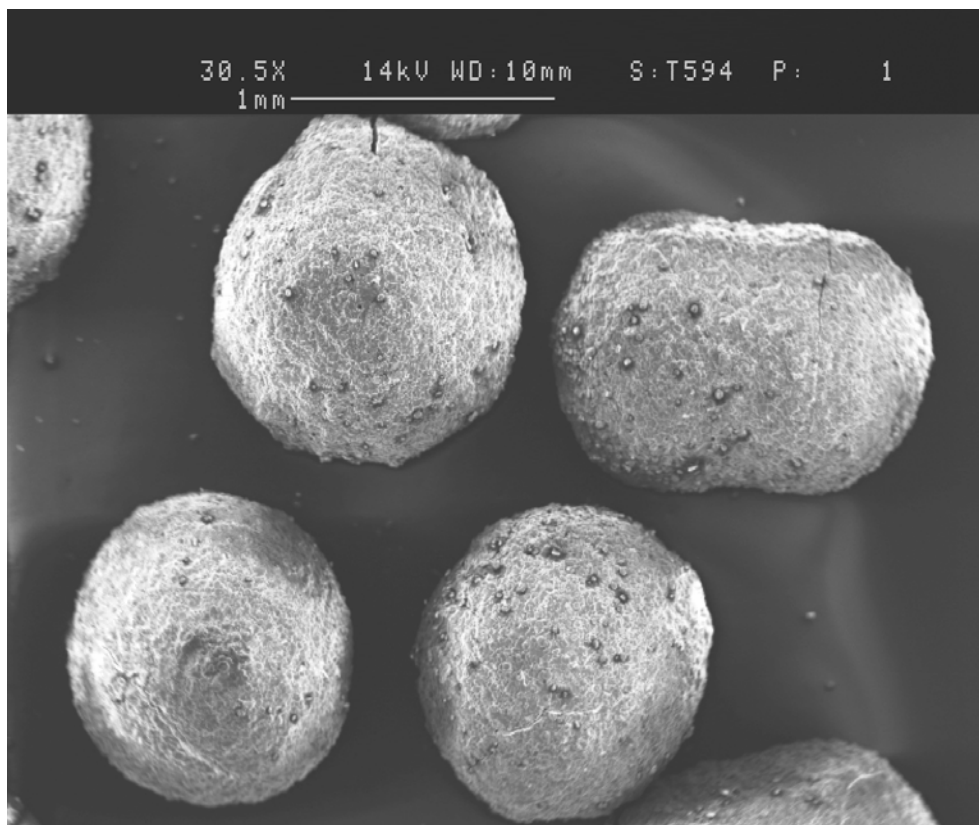


Abbildung 30: Partikelkollektiv

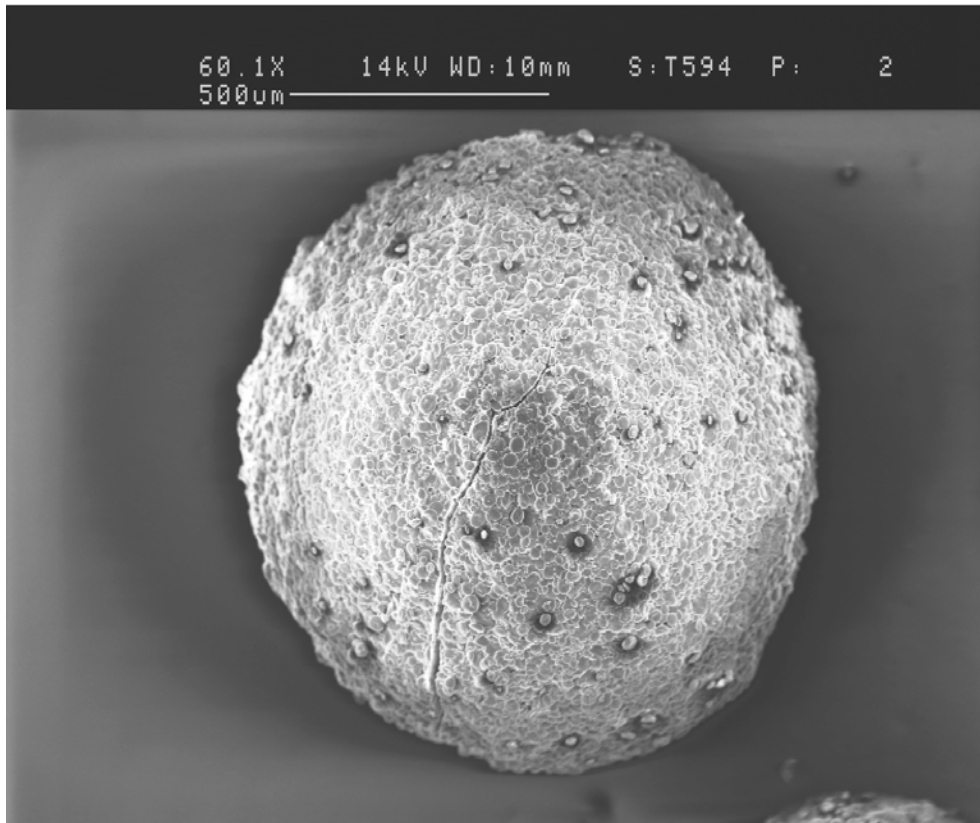


Abbildung 31: Einzelkorn mit Spannungsriß

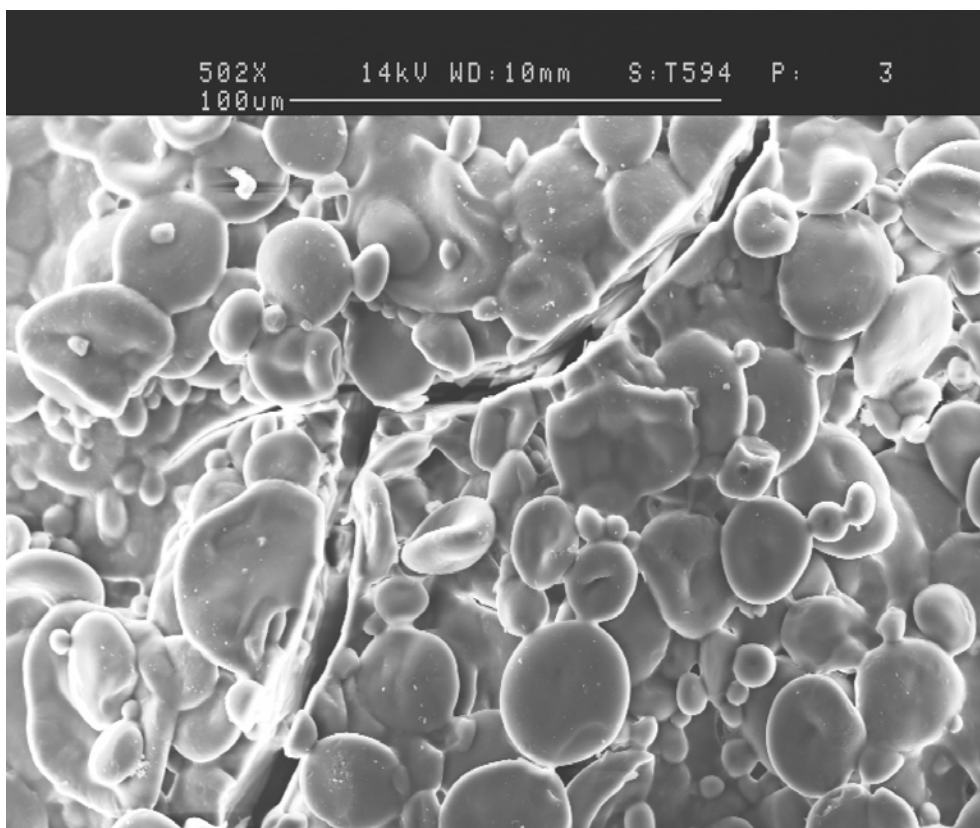


Abbildung 32: Aufbaugranulation mit vergrößertem Spannungsriß

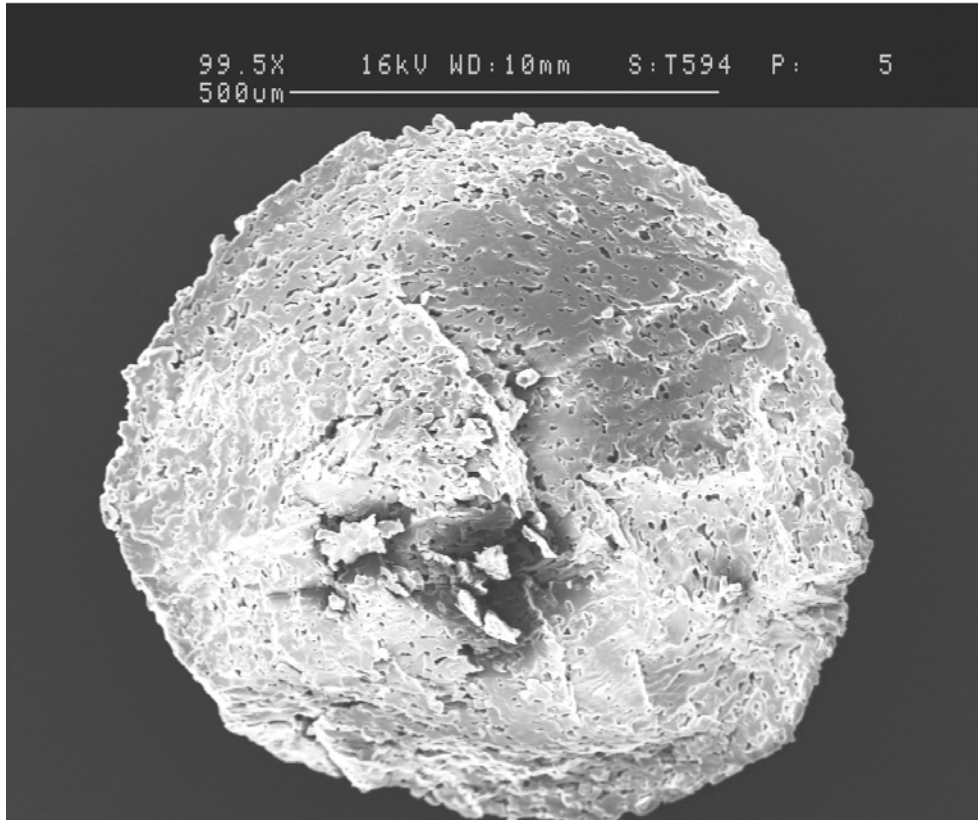


Abbildung 33: Schnitt durch eine Granalie mit dem Keim im Zentrum

Zusammenfassung:

1. Es entstehen nach der Aufbaugranulation im Fließbett nahezu kugelförmige Stärkegranulate. Durch Spannungen in der Granalie können Risse entstehen, die bis tief in das Volumen hinein reichen können. Die Spannungsrisse sind zu verhindern, da diese die Stabilität des Granulates herabsetzen.
2. Die aufgewachsenen Suspensionströpfchen ergeben eine poröse Struktur. Sie sollte vermieden werden, da diese ein Entweichen des Treibmittels während des Vorschäumens begünstigen kann.
3. Der Keim sollte aus dem Suspensionsmaterial bestehen, da dieses Material sonst nicht entsprechend am Aufschäumen der Stärke teilnehmen kann.

3.5. Stärkeschäume

3.5.1. Autoklavierung

Fa. Heckmannwerk KG, Pirna

Für die Autoklavversuche wurde folgende Anlage benutzt:

- Fa. Heckmannwerk KG, Pirna, 1968, Typ VA 10 EMG, 50 TR
- Höchster Betriebsdruck: 50 bar
- Höchste Temperatur: 263 °C
- Inhalt: 10 l
-

Die Stärkegranulate wurden in einen Behälter eingefüllt und auf einem Gestell oberhalb des Wasserreservoir fixiert. Nach dem Verschließen des Autoklaven erhitzt eine elektrische Heizung des Wasser. Das Wasser verdunstet und ergibt entsprechend einer voreingestellten Temperatur einen entsprechenden Druck. Die Autoklavbehandlung der Stärkegranulate hat den Vorteil, daß sich eine wasserdampfgesättigte Atmosphäre bildet. Dieses Wasser steht dem Aufschäumen der Granulate zur Verfügung.

Als Ausgangsmaterial wurden Stärkegranulate aus 91 % nativer Stärke und 9 % vorgekleisterter Stärke ausgewählt. Die Partikelgrößenverteilung wurde vor und nach der Autoklavbehandlung bestimmt (Siebung).

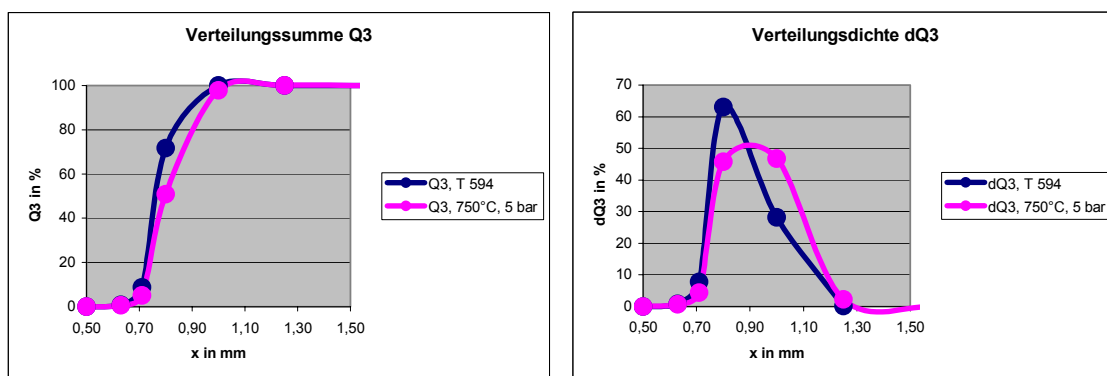


Abbildung 34: Verteilungssumme und Verteilungsdichte von Stärkegranulaten (Ausgangsmaterial) und im Autoklaven geschäumter Stärkegranulate (150 °C, 5 bar), Siebanalyse

Autoklav LA 200 des Institutes für Silikattechnik der TU BAF

In dem an der TU BAF genutzten Autoklav baut sich der Druck im Behälter über den Dampfdruck des Wassers in Abhängigkeit von der Temperatur auf. Die Abhängigkeit zwischen Siedetemperatur des Wassers und Druck ist in nachfolgender Abbildung dargestellt.

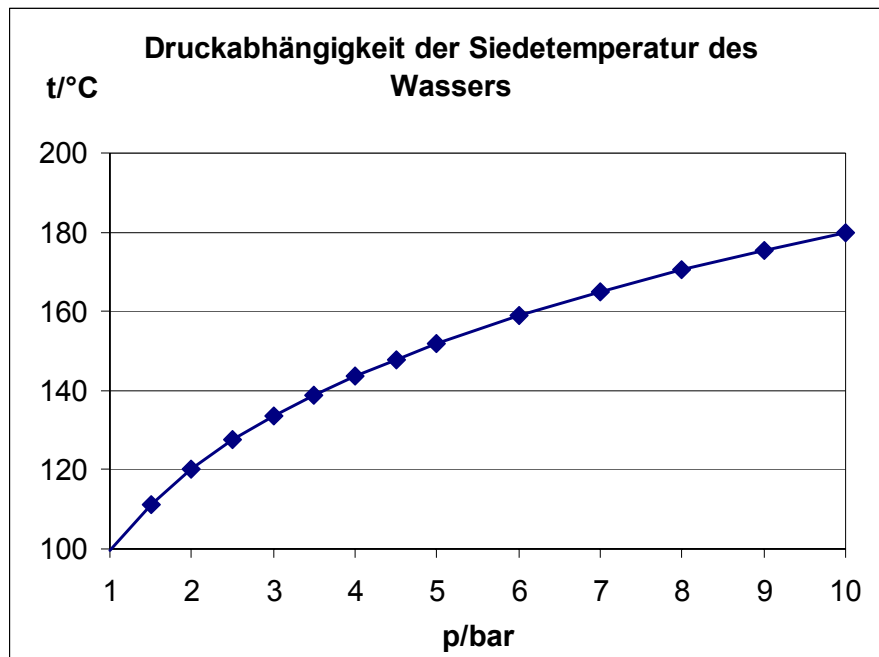


Abbildung 35: Druck-Temperatur-Kurve

Versuchsbedingungen:

- Aufheizzeit: 1,5 h
- Temperatur: 190° C / 12 bar für Versuch 1 und 2; 170° C / 8 bar für Versuche 3 – 6, bei Erreichen der Solltemperatur keine Haltezeit; sondern sofortiges schnelles Entspannen
- Probe 654.8 (Kartoffelstärke mit 5 % Glycerin und 0,5 % PVA)

Versuch 1: (190 °C)

Probe im Becherglas nicht abgedeckt. Nach dem Entspannen war die Probe bis zu 2/3 mit Wasser bedeckt und dadurch war die Stärke teilweise aufgelöst.

Versuch 2: (190 °C)

Becherglas mit Al-Folie abgedeckt, Probe nach dem Entspannen ergab großporigen festen Schaum .

Versuch 3: (170 °C)

Rechteckige Kastenform mit Deckel, nach dem Entspannen lag die Probe als Rechteck und nur mäßig aufgeschäumt vor.

Versuch 4: (170 C°)

Einzelformen nur mit Platte abgedeckt, dadurch beim schnellen Entspannen wieder gewässert und somit unbrauchbar.

Versuch 5: (170 °)

Einzelformen in rechteckiger Kastenform mit Deckel, zu langsames Entspannen dadurch sind die Granulate nicht aufgeschäumt, sondern verbacken bzw. verklebt, bleiben aber in Form.

Versuch 6: (170 °C)

Formen in rechteckiger Kastenform mit Deckel, schnelles Entspannen ergibt gleiches Ergebnis wie in Versuch 5.

Bei weiteren Versuchen bei 170°C sollte eine Haltezeit von 15-30 min bzw. eine höhere Temperatur eingestellt werden, um ein Aufschäumen der Granulate zu erreichen.

Versuch 7: 190 °C/ 5 min Haltezeit; Probegefäß ein mit Aluminiumfolie abgedecktes Becherglas.

Produkt 654.8 war stark braun verfärbt, aber kein Vorschäumen. Temperatur war während der Haltezeit auf 197 °C gestiegen.

Versuch 8: 190 °C/ keine Haltezeit / schnelles Entspannen

Produkt 654.8 war wiederum leicht braun verfärbt und leicht aufgeschäumt.

Produkt 654.9/4 hatte sich unter diesen Bedingungen verflüssigt.

Produkt 654/11 war unter diesen Bedingungen zersetzt und schwarz verfärbt, Zersetzung der Oxalsäure erfolgt bereits bei diesen Temperaturen, daher die Verfärbung.

Sämtliche eingesetzte Produkte waren unter diesen Bedingungen nicht vorgeschäumt. Die Granulate lagen noch in ihrer ursprünglichen Form vor, jedoch untereinander punktförmig verklebt. Durch die gesättigte Wasserdampf-atmosphäre hat eine oberflächliche Verkleisterung der Granulate eingesetzt und somit deren Verkleben. Die Braunfärbung wird durch die hohen Temperaturen hervorgerufen. Die Zersetzung der Stärke verläuft über mehrere Stufen, so kommt es bei Stärke als Polysaccharid auch zu einer Karamelisierung.

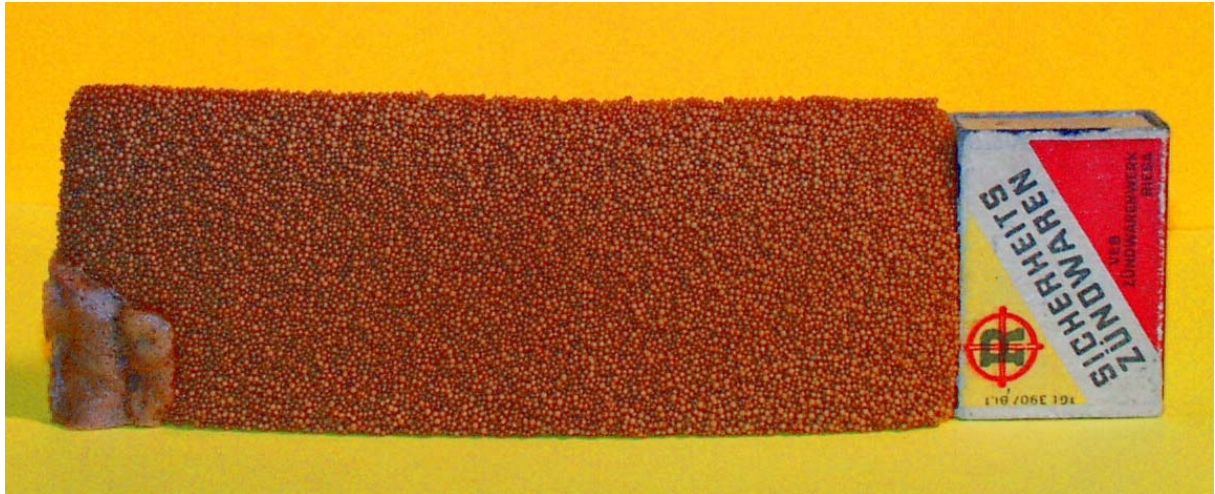


Abbildung 36: Stärkeschaumformteil (Autoklav, 170 °C, 10 bar, s. a. Vers.5 u. 6)

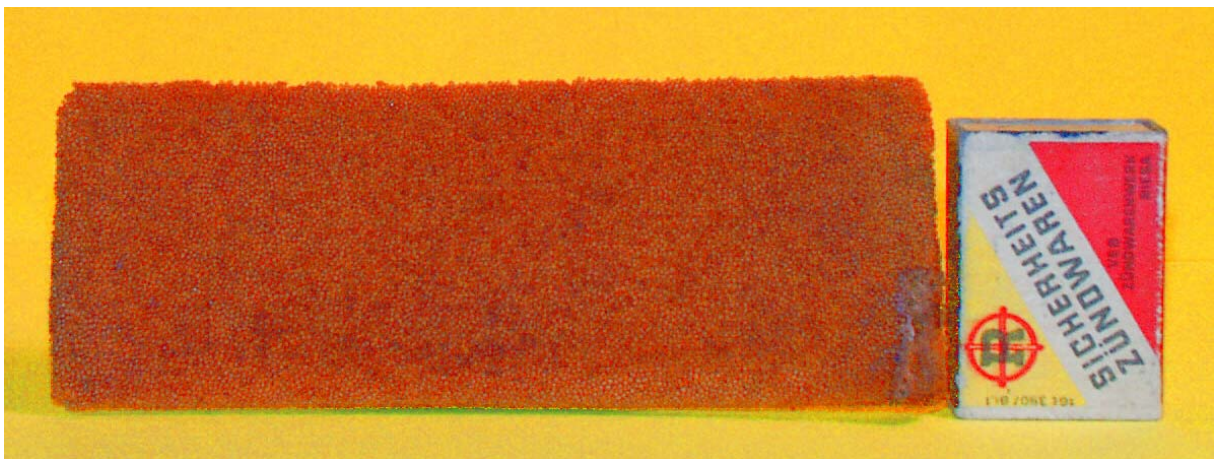


Abbildung 37: Stärkeschaumformteil (Autoklav, 170 °C, 10 bar, s. a. Vers.5 u. 6)

Sämtliche eingesetzte Produkte waren unter diesen Bedingungen nicht vorgeschäumt. Die Granulate lagen noch in ihrer ursprünglichen Form vor, jedoch untereinander punktförmig verklebt. Durch die gesättigte Wasserdampfatosphäre hat eine oberflächliche Verkleisterung der Granulate eingesetzt und somit deren Verkleben.

Zusammenfassung:

1. Ein Vorschäumen der Granulate findet im Autoklaven statt. Die Partikelgröße wächst um ca. 20 % bei 5 bar und 150 °C. Es bildet sich ein Formteil aus, bei den die Granulate nur gering verbacken sind.
2. Bei 10 bar und 170 °C erhält man Formteile, die wesentlich stärker verbacken sind als solche bei niedrigeren Temperaturen und niedrigeren Drucken.
3. Das Vorschäumen ist noch nicht ausreichend. Durch andere Rezepturen ist noch mehr Wasser im Stärkegranulat zu binden, um einen stärkeres Aufschäumen zu realisieren. Dies bedarf weiterer, systematischer Untersuchungen. Gleichzeitig sind die experimentellen Bedingungen so zu wählen, daß ein vorzeitiges Verbacken der Granulate und damit eine Agglomeration verhindert wird.

3.5.2. Modellherstellung

Ziel der Untersuchungen war es, die Stärkegranulate so aufzuschäumen und in einer Mikrowelle zu backen, um vergießbare Modelle zu erhalten. Das Aufschäumen der Stärkegranulate sollte durch das Durchströmen eines Granulatbettes mit Wasserdampf bewirkt werden. Dazu wurde folgende einfache Versuchsanordnung verwendet:

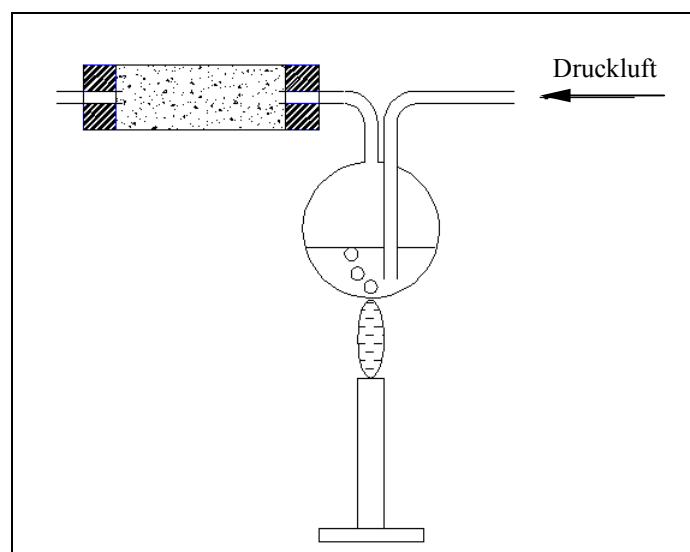


Abbildung 38: Versuchsanordnung für das Aufschäumen von Stärkegranulaten.

Die Experimente zeigten, daß trotz Variation des Überdrucks der Druckluft kein vollständiges Aufschäumen des Granulatbettes erreicht werden konnte. Die Erklärung für dieses Verhalten ist die unvollständige Benetzung der Granalien. Dies ist insofern erstaunlich, da die Stärke von Natur aus hydrophil ist. Die Hydrophobierung der Stärkegranulate kann während der Granulierung durch Bestandteile der Laborluft erfolgen.

Schlußfolgerungen

1. Wie oben vorgeschlagen, werden treibmittelhaltige Stärkegranalien in ein Modell eingefüllt verdichtet und mit Wasserdampf durchströmt. Es sollte sich ein Schaum mit den Grenzflächen Flüssigkeit/Gas bilden. Die Stärke in den Lamellen des Schaums wird gebacken und es entsteht ein Schaum mit den Grenzflächen Fest/Gas. Wie aber schon gezeigt wurde, ist die Schaumbildung infolge der unvollständigen Benetzung der Granalien begrenzt. Diese unvollständige Benetzung kann durch die Zugabe von Netzmitteln in der Endphase des Granulierens im Fließbettgranulator vorgebeugt werden.
2. Ein zweiter Weg besteht darin, die Stärkegranalien im Fließbettgranulator unter geeigneten Bedingungen aufzuschäumen und danach auszubacken. Durch Variation der Treibmittelkonzentration ist zugleich die Schüttdichte und damit die Modelldichte einstellbar. Nach dem Vorschäumen sind die Granalien mit einem geeigneten Coating zu versehen, das es gestattet, beim nachfolgenden Fertigschäumen die Granalien dauerhaft miteinander zu verschweißen. Der Vorschäumprozeß ist so zu gestalten, daß die Treibmittelkapazität noch nicht vollständig ausgeschöpft wird, um das Verschweißen der Granalien beim Fertigschäumen zu gewährleisten. Die Art des Harzes ist durch geeignete Experimente zu prüfen, um ein umweltverträgliches Verhalten zu erreichen.

3.5.3. Mikrowelle

Es wurden 2 Mikrowellen getestet. Folgende Untersuchungen wurden mit der Mikrowelle 2 vorgenommen (Stärkegranulate aus ungekleisterter Stärke mit Zucker):

Standort der Anlage: TU Bergakademie Freiberg, Institut für Wärmetechnik und Thermodynamik, Lehrstuhl für Hochtemperaturanlagen.

Technische Parameter der Mikrowellenanlage:

- Mikrowellengenerator
- Dauerstrichmagnetron Leistung 6 kW
- Frequenz 2.45 GHz
- kontinuierliche Leistungssteuerung 12% - 100%, manuell, über Temperaturregler bzw. externen Rechner
- Elektrische Anpassung
- Messung der einfallenden und reflektierten Mikrowellenleistung nach verschiedenen Methoden: Richtkoppler und direktionale Koppler (System Homer)
- Anpassung mit 3-Stift-Tuner
- zwei Multimodenkammern mit Feldvergleichmäßigung,
- pyrometrische Temperaturmessung 0 - 2000 °C
- Begasungs- und Abfackeleinrichtung für eine Vielzahl von Schutz- und Reaktionsgasen
- Erzeugung von Grobvakua mit Totaldrücken größer 50 mbar

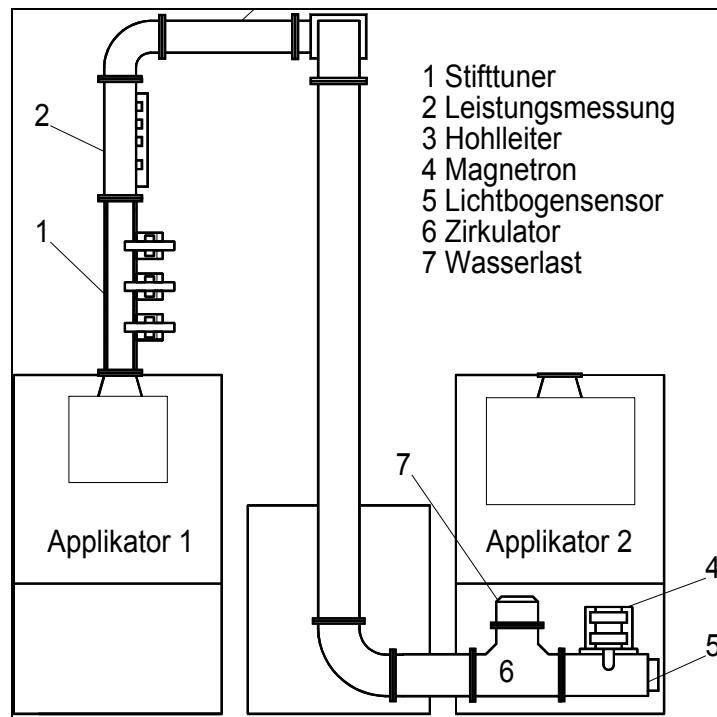


Abbildung 39: Aufbau der Mikrowellenanlage:

Folgende Untersuchungen wurden mit der Mikrowelle 2 vorgenommen:

Probe	Form	Mikrowellenenergie	Erreichte Temperatur
1	Keine (Partikel)	1,50	85 °C
2	Keine (Partikel)	1,00	75 °C
3	Keine (Partikel)	0,65	90 °C
4	Teflon (h=5 cm)	0,65	175 °C
5	Teflon (h=5 cm)	0,65	175 °C
6	Teflon (h=5 cm)	2,00	175 °C

Im folgenden ist ein Formteil dargestellt, das durch eine Mikrowellenbehandlung erhalten wurde:

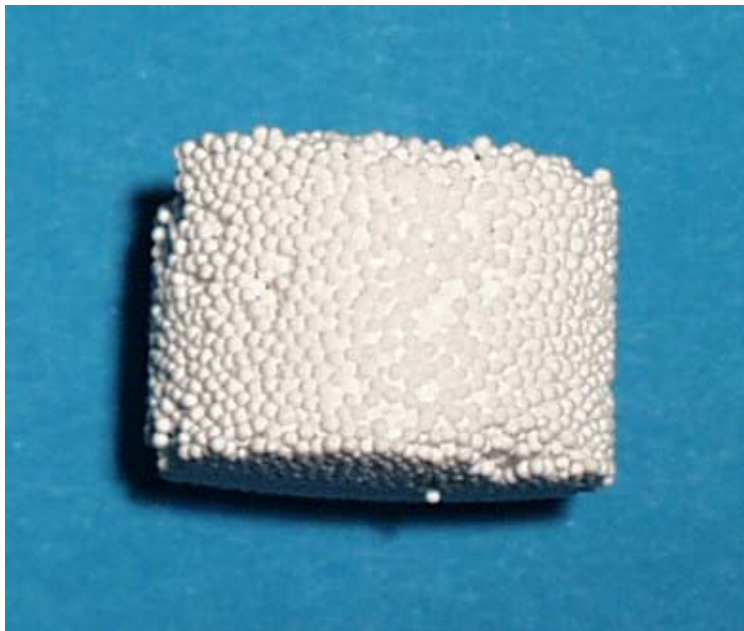


Abbildung 40: Formteil aus Stärkegranulaten ungekleisterter Stärke mit Zucker (Mikrowelle 1)

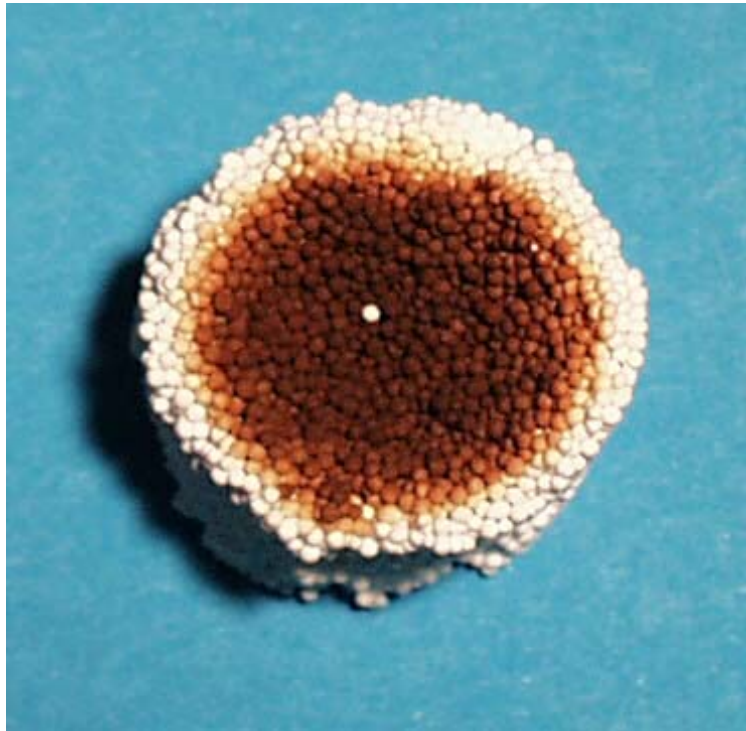


Abbildung 41: Formteil aus Stärkegranulaten ungekleisterter Stärke mit Zucker (Mikrowelle 1.) Denaturierung der Stärke infolge eines Wärmestaus (zu großer Eintrag der Mikrowellenenergie)



Abbildung 42: Formteil aus Stärkegranulaten ungekleisterter Stärke mit Zucker (Mikrowelle 2) gleichmäßigere Energieverteilung ermöglicht größere Formen

Schlußfolgerung

1. Die Mikrowelle 1 besitzt 2 Einleitungen der Mikrowellen über Hohlleiter. Es bildet sich ein ungleichmäßiges Energiefeld aus. Dieses ungleichmäßige Energiefeld kann folgende Fehler im Formteil bewirken:
 - Ist die Energiedichte lokal zu hoch, denaturiert die Stärke in diesem Gebiet.
 - Ist die Energiedichte lokal zu gering, wird in diesem Bereich das Formteil nicht ausgebildet. Das Formteil ist unvollständig.
 - Es werden nur kleine gleichmäßige Formteile erhalten.
2. Die Mikrowelle 2 verfügt über einen Feldrührer, das zu einer Vereinheitlichung der Energieverteilung führt. Deshalb sind größere Formteile zu erhalten.
3. Die Stärkegranulate aus ungekleisteter Stärke ohne Zucker und gekleisterter Stärke schäumen in der Mikrowelle (1 und 2) nicht auf und verbacken nicht.
4. Die eingesetzten Stärkegranulate aus ungekleisteter Stärke mit Zucker schäumen in der Mikrowelle (1 und 2) nicht auf, sondern verbacken nur mit Punktkontakten. Deshalb sind diese Formteile mechanisch nicht beständig.
5. Die Mikrowelle 2 registriert die eingebrachte, die absorbierte und die reflektierte Mikrowellenenergie neben der Temperatur an der Oberfläche des Formteils. Diese Größen charakterisieren die Ausbildung der Form. Bei Temperaturen um 175 °C beginnt die Denaturierung der Stärke (Mikrowelle 2).

4. Zusammenfassung

1. Aus dem Stand der Technik entsprechenden extrudierten Stärkesträngen können keine Formteile für das Vollformgießen hergestellt werden.
2. Grundsätzlich lassen sich aber Stärkeschäume als Ausgangsprodukte für Modelle verwenden, die im Vollformgießverfahren sowohl mittels Schwerkraftguß als auch mittels Niederdruckguß verarbeitet werden können. Beim Niederdruckgießverfahren kann aufgrund der steuerbaren Formfüllung wesentlich besser auf Schwankungen der Modellqualität reagiert werden.
3. Die Untersuchungen haben gezeigt, daß in Anlehnung an die Technologie der Polystyrolschaumerzeugung Stärkegranulate in einem Autoklaven produziert werden können, wobei die Reproduzierbarkeit der Herstellungsbedingungen aufgrund des sehr kleinen technologischen Fensters noch unzureichend ist.
4. Aus den vorgeschäumten Stärkegranulaten konnten prinzipiell Formteile hergestellt werden, die aber hinsichtlich ihrer Dichte noch nicht für das Abgießen nach dem Vollformgießverfahren geeignet sind.
5. Diese Problematik konnte aufgrund fehlender finanzieller Mittel zur Konstruktion und zum Bau einer Vorrichtung zur Erzeugung von qualitätsgerechten Formteilen aus Stärkeschäumen nicht gelöst werden.
6. In weiterführenden Untersuchungen, die derzeit von der Industrie finanziert werden, soll eine Komplexlösung zur Substitution der Polystyrolschaummodelle durch Stärkeschaummodelle erarbeitet werden.

Freiberg, den 29.04.01

(Prof. J. Bast)

(Lehrstuhl Hütten-, Gießerei- und Umformmaschinen und Projektleiter)