

II	<u>Inhaltsverzeichnis</u>	Seite
I	Projektkennblatt	
II	Inhaltsverzeichnis	
III	Verzeichnis von Bilder, Zeichnungen und Graphiken	
IV	Verzeichnis von Begriffen	
1	Zusammenfassung	8
2	Einleitung	9
3	Hauptteil	13
3.1	Verfahrensvergleich Anschmelzverfahren - Durchschmelzverfahren	13
3.2	Thermodynamische Beschreibung des Wärmeleitprinzips	14
3.3	Beschreibung der konvektiven Wärmeleitung im Anschmelzreaktor	18
3.4	Beschreibung der durchgeführten Projektschritte	21
3.4.1	Umbau des Anschmelzreaktors zur Einführung einer einstellbaren Schütthöhenregulierung und Anströmgeschwindigkeit	21
3.4.1.1	Schütthöhenregulierung	21
3.4.1.2	Einstellbare Anströmgeschwindigkeit	23
3.4.2	Einbau einer Siebbandbenetzungsvorrichtung	25
3.4.3	Entwicklung und Bau einer Materialübergabestation	27
3.4.4	Anpassung der vorhandenen Bandpressentechnik an die neue Anschmelztechnik	29
3.4.5	Entwicklungs- und Versuchsarbeiten zur Optimierung der Verfahrenseinheit Anschmelzreaktor - Doppelbandpresse einschließlich der Steuerungsgrundlagen	30
3.4.5.1	Steuerungstechnik für die Verfahrenseinheit	33
3.4.6	Entwicklung und Konstruktion eines Anschmelzreaktors für Pressennutzbreiten bis 1200 mm	35
3.4.6.1	Beschreibung der Bauausführung des Anschmelzreaktors	39
3.4.6.2	Beschreibung der Bauausführung der Thermofix-Anlage	41
3.4.6.3	Zusammenfassung der technischen Daten für die Gesamtanlage	43

3.5	Ökologische, technologische und ökonomische Bewertung der Vorhabensergebnisse	46
3.5.1	Ökologische Bewertung des Vorhabens	46
3.5.2	Technologische Bewertung des Vorhabens	48
3.5.3	Ökonomische Bewertung Anschmelzverfahren	49
3.5.3.1	Energieeinsparfaktor EF	49
3.5.3.2	Materialausstoß pro Zeiteinheit	50
3.5.3.3	Bewertung der Maschineninvestition	50
3.5.4	Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse	50
4.0	Fazit	52
5.0	Literaturverzeichnis	53

III Verzeichnis von Bildern, Zeichnungen und Graphiken

		Seite
Abb. 1	Energieeintrag in eine Granulatschüttung nach dem Wärmeleitprinzip	15
Abb. 2	Energieeintrag in die Granulatschüttung nach dem Konvektionsprinzip	19
Abb. 3	Prinzipskizze Schütthöheneinstellbarkeit im Anschmelzreaktor	22
Abb. 4	Baukonzept Reaktoranlage mit MSR-Einrichtung	24
Abb. 5	Siebbandreinigungs- und Benetzungsvorrichtung	26
Abb. 6	Materialübergabestation für Versuchsreaktor	28
Abb. 7	Gesamtanlage zur Herstellung von Kunststoffteilen nach dem Anschmelzverfahren	32
Abb. 8	Düsenrohr für Heizgasverteilung im Anschmelzreaktor	37
Abb. 9	Strömungsungleichverteilung $\frac{\Delta v_L}{v_L}$ am Düsenrohr als Funktion vom mittleren Granulatkorndurchmesser bei fehlender v_L -Regelung	38
Abb. 10	Prinzipskizze Anschmelzreaktor (Querschnittsdarstellung)	40
Abb. 11	Aufbau der Thermofix-Gesamtanlage	42
Abb. 12	Anschmelzreaktor (linke Bildseite hinten) der betriebs- bereiten Gesamtanlage (aus Richtung Produktauslauf)	44
Abb. 13	Anschmelzreaktor der betriebsbereiten Gesamtanlage (Blick aus Richtung Produkteinlauf)	45
Tabelle 1	Vergleich des Energiebedarfs zwischen Extruder- Verfahren und Anschmelzverfahren im diskontinuier- lichen Arbeitsprozess	47

IV Verzeichnis von Begriffen, Abkürzungen und Definitionen

a [m^2s^{-1}]:	Temperaturleitzahl des untersuchten Polymergranulates im untersuchten Temperaturbereich von 20 [$^{\circ}\text{C}$] bis [260 $^{\circ}\text{C}$]
$\frac{a \cdot t}{s^2}$ [-]:	Fouriersche Kenngröße mit t [s] als Kontaktzeit
δ_{index} [kJ kg^{-1}]:	Massebezogene erforderliche Energiemenge bezogen auf 1 kg Polymer
EF [-]:	Energieeinsparfaktor Anschmelzverfahren gegenüber Durchschmelzverfahren
h_k [mm]:	Schütthöhe des Granulates zwischen den Siebbändern
$s \approx \frac{h_k}{2}$ [mm]:	Plattendicke des hergestellten Formteils
δ_L [$^{\circ}\text{C}$]:	Ausgangstemperatur des Heizgases
δ_o [$^{\circ}\text{C}$]:	Ausgangstemperatur der Granulatschüttung
δ_w [$^{\circ}\text{C}$]:	Heizplattentemperatur
δ_m [$^{\circ}\text{C}$]:	Zeitabhängige mittlere Temperatur der Granulatschüttung
v_B [m s^{-1}]:	Transportbandgeschwindigkeit
v_L [m s^{-1}]:	Strömungsgeschwindigkeit des ungestörten Heizgases
V_L [m^3s^{-1}]:	Volumenstrom des Heizgases
$\frac{\Delta v_L}{v_L}$ [-]:	Maximale Strömungsungleichverteilung im Düsenrohr

Weitere Begriffe, Abkürzungen und Definitionen sind jeweils textnah erläutert.

Dr.-Ing. Werner Neu Verfahrenstechnik GmbH
Altstadt-Illereichen

**Integration des Anschmelzverfahrens zur Herstellung
flächiger, stab- oder rohrförmiger dickwandiger
Kunststoffteile im kontinuierlich arbeitenden
Fertigungsprozeß**

Abschlußbericht über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem AZ:23365 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Dr.-Ing. Werner Neu

Altstadt im Februar 2009

1. Zusammenfassung

Das Entwicklungsvorhaben untersucht die mögliche Integration eines neuartigen Anschmelzverfahrens zur kontinuierlichen Herstellung von dickwandigen Kunststoffteilen in einer Doppelbandpresse. Dabei wird das Polymergranulat durch konvektive Wärmezufuhr nicht mehr aufgeschmolzen sondern nur angeschmolzen. Der hierfür notwendige geringere Energieeintrag in den Thermoplasten beschleunigt den Fertigungsprozeß erheblich. Die Versuchsarbeiten wurden in 6 Arbeitsschritten aufgeteilt. Dabei waren folgende Entwicklungsschwerpunkte maßgeblich für die Umsetzung des Verfahrens für eine industrielle Anwendung:

1. Umbau einer kleinen Pilotanlage für das Anschmelzverfahren zur Einführung einer einstellbaren Anströmgeschwindigkeit und Schütthöhenregulierung.
2. Anpassung der vorhandenen Bandpressenauslegung an die neue Anschmelztechnik.
3. Entwicklung, Konstruktion, Herstellung und Integration eines Anschmelzreaktors in eine Doppelbandpressenanlage für Nutzbreiten bis 1200 mm (Nutzbreite der vorhandenen Pilotanlage 150 mm).

Die Auswertung der Entwicklungsarbeiten zeigt, daß die Zusammenführung des Anschmelzverfahrens mit der Doppelbandpressentechnik technisch möglich ist und erhebliche Vorteile in ökologischer und ökonomischer Hinsicht bietet. Danach berechnet sich ein Energieeinsparfaktor von 3,35 gegenüber herkömmlichen Fertigungsverfahren. Ebenfalls konnte die Förderbandgeschwindigkeit und damit die Materialausstoßmenge pro Zeiteinheit erhöht werden bei gleichzeitiger Reduzierung des Material- und Kostenaufwandes für die Anlagentechnik. Als Fazit des Entwicklungsvorhabens ergibt sich die Möglichkeit, auch Schaumstrukturen in Kunststoffplatten nach dem Anschmelzverfahren herzustellen. Die nachhaltige isolierende Wirkung dieser Strukturen besonders für die Wärme- und Schalldämmung wird heute im Markt verlangt. Allerdings muß hierfür das Reaktorprinzip neu gestaltet werden und soll daher einem weiteren Entwicklungsvorhaben vorbehalten bleiben.

Der erfolgreiche Abschluß der Entwicklungsarbeiten basiert auf der guten Zusammenarbeit der Dr. Werner Neu Verfahrenstechnik GmbH, Altenstadt, mit dem Kooperationspartner TPS Technopartner Samtronic GmbH, Göppingen. Das Projekt wurde dankenswerterweise gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Osnabrück, unter dem AZ 23365.

2. Einleitung

Die Grundlage des hier beschriebenen Vorhabens ist ein von der Dr. Werner Neu Verfahrenstechnik GmbH, Altenstadt, im Pilotmaßstab entwickelten und von der DBU geförderten Fertigungsverfahren [Neu 99] zur Herstellung flächiger, stab- oder rohrförmiger Kunststoffteile aus Polymergranulat. Dieses Verfahren ist zwischenzeitlich mehrfach patentiert und kann sowohl für kontinuierliche als auch für diskontinuierlich arbeitende Arbeitsprozesse eingesetzt werden. Der besondere Vorteil dieses sogenannten Anmelzverfahrens besteht in der kurzzeitigen konvektiven Erwärmung der einzelnen Granülen im Granulathaufwerk durch einen z. B. gasförmigen Wärmeträger. Das Haufwerk wird dabei im Sekundenbereich durchströmt, oberflächlich angeschmolzen und anschließend in einem Formwerkzeug unter Druck ausgeformt. Bei Einhaltung der für das Polymer vorgegebenen Einstellparameter wie z. B. Gastemperatur, Strömungsgeschwindigkeit des Energieträgers und Heizzeit ist eine sehr zeitaufwendige Wärmeabfuhr aus dem Formteil nicht mehr erforderlich. Die erforderliche Ausformzeit unter Druck reduziert sich auf die geringe Zeitspanne zur Erreichung eines inneren Temperatenausgleiches in der Anmelzmasse jeweils zwischen der schmelzflüssigen Oberfläche und dem noch kalten Kernbereich der einzelnen Granülen. Danach stellt sich nach kurzer Zeit in der Polymermasse die sog. kalorische Mitteltemperatur ein, die bei genauer Einhaltung der o. a. Einstellparameter z. B. bei Polyolefinen im Bereich der zulässigen Entformungstemperatur liegt, sodaß das Formteil im Freien, also außerhalb der hoch investiven Produktionsanlage auf Umgebungstemperatur abkühlen kann.

Das Verfahren nutzt die vergleichsweise geringe Wärmeleitfähigkeit der Thermoplaste vorteilhaft aus, in dem nur die Granulatoberfläche zur Formgebung angeschmolzen wird. Der erforderliche Energiebedarf reduziert sich daher im Vergleich zum herkömmlichen sog. Aufschmelzverfahren erheblich, da bei diesem die Polymermasse z. B. im Extruder vollständig aufgeschmolzen und anschließend je nach Materialdicke zeit- und energieaufwendig im Formwerkzeug abzukühlen ist.

Das Anschmelzverfahren wird in einer hierfür entwickelten Anschmelzvorrichtung (Anschmelzreaktor) durchgeführt. Die Vorrichtung besteht aus zwei übereinanderliegenden Siebbändern, deren Abstand zueinander einstellbar ist. Zwischen diesen Siebbändern wird über eine Streuvorrichtung das Granulat zugeführt, so daß das Polymer den Siebbandabstand vollkommen ausfüllt. Ober- und Unterband bewegen sich gleichmäßig durch hintereinander angeordnete Heizschächte in denen der Energieträger (i. d. R. ein Heizgas) senkrecht durch die Granulatschüttung strömt. Die wechselnde Strömungsrichtung in benachbarten Schächten ver gleichmäßig die Wärmezufuhr in der Schüttung. An Ende des Reaktors wird das angeschmolzene Polymer zur Weiterverarbeitung kontinuierlich ausgetragen. Die Parameter Bandgeschwindigkeit, Bandabstand (d. h. Granulatschütthöhe), Strömungsgeschwindigkeit des Energieträgers und dessen Temperatur sind produkt- und anwendungsbezogen einstellbar.

Die stetige Arbeitsweise des Anschmelzreaktors erfordert aus ökonomischer Sicht geradezu eine kontinuierliche Weiterverarbeitung der Polymermasse z. B. in einer Doppelbandpresse. Hierzu konnte der Kooperationspartner TPS Technopartner Samtronic GmbH, Göppingen, gefunden werden. Diese Firma stellt Doppelbandpressen in Leichtbauweise her für die Fertigung von Kunststoffplatten in einem weitgestreuten Anwendungsgebiet. Die Plattenherstellung erfolgt bisher konventionell, d. h. in einer Heizzone wird durch plattenähnliche Heizelemente der Kunststoff in Granulatform nach dem Wärmeleitungsprinzip zwischen den Transportbändern vollkommen aufgeschmolzen, anschließend durch eine einstellbare Walzenanordnung unter Druck ausgeformt und danach in einer Kühlzone auf Entformungstemperatur abgekühlt. Je nach Plattendicke zwischen 3 und 15 [mm] und vorgegebener Produktionsgeschwindigkeit oder Ausstoßmenge pro Zeiteinheit sind erhebliche Heizzonen- bzw. Kühlzonenlängen erforderlich. Heizzonen von bis zu 30 [m] Länge und mehr sind dabei notwendig und bereits hergestellt worden.

Die Zielsetzung des Vorhabens besteht darin, die entwickelte Anschmelztechnik in die vorhandene Doppelbandpressentechnologie zu integrieren. Die dabei zu erwartenden Vorteile sind erheblich, beginnend mit der vergleichsweise kurzen Baulänge des Reaktors von ca. 1 [m] statt z. B. 10 bis 30 [m] lange produktabhän-

gige Heizzonenlängen und eines um ca. 50 % bis 75 % geringeren Wärmebedarfs, sowie der möglichen Erhöhung der Bandgeschwindigkeit um den Faktor 3 bis 8, d. h. eine um diesen Betrag erhöhte Produktionsmenge pro Zeiteinheit. Allerdings sind auch Einschränkungen bei der Integration zu beachten. Danach muß die Einhaltung einer engen Korngrößenverteilung von z. B. $4 \pm 1,5$ mm des Granulates berücksichtigt werden, sodaß eine Siebvorrichtung zur Fraktionierung des Schüttgutes erforderlich ist. Staubanteile bzw. Kleinstteile im Schüttgut beeinflussen negativ das Verfahrensprinzip. Allerdings ist es heute möglich, die Feianteile in einem nachgeschalteten Anschmelzprozeß restlos zu verarbeiten.

Die für den Integrationsprozeß erforderlichen Arbeitsschritte wurden nach Abschluß einer Vielzahl von Vorversuchen gemeinsam formuliert und gliedern sich in 6 Aufgabenbereiche, für beide Kooperationspartner. Dieses sind:

1. Umbau des vorhandenen Anschmelzreaktors zur Einführung einer einstellbaren Anströmgeschwindigkeit und Schütthöhenregulierung.
2. Einbau einer Siebbandbenetzungsvorrichtung zur Vermeidung von Granulat-anhaftungen bei der Übergabe der Anschmelzmasse in die Doppelbandpresse.
3. Entwicklung, Konstruktion und Bau einer Materialübergabestation zwischen Reaktor und Doppelbandpresse mit einstellbarer Schichthöhe für die Anschmelzmasse.
4. Anpassung der vorhandenen Bandpressentechnik an die neue Anschmelztechnik.
5. Entwicklungs- und Versuchsarbeiten zur Optimierung der Bandpresse einschließlich integrierter Steuerungstechnik.
6. Entwicklung und Konstruktion eines Anschmelzreaktors für Bandpressennutzbreiten bis 1200 mm.

Dieser letzte Aufgabenbereich ist zugleich die Basis für die erfolgreiche Integration des Anschmelzverfahrens in den industriellen Fertigungsprozeß zur Herstellung von Plattenware aus Kunststoffgranulat für diverse Anwendungs- und Einsatzbereiche.

Bei der Bearbeitung des Entwicklungsvorhabens ist unter Einbeziehung der Erfahrungswerte des Kooperationspartners zunächst auf die Herstellung flächiger Kunststoffteile geachtet worden.

Der Einsatz des Anschmelzverfahrens für die Produktion von stab- oder rohrförmiger Kunststoffteile im kontinuierlich arbeitenden Fertigungsprozeß sollte grundsätzlich mit dem im Aufgabenbereich Nr. 6 entwickelten Anschmelzreaktor möglich sein, wenn anstelle der Doppelbandpresse ein im Markt angebotenes Förderorgan zwischen Reaktor und Formwerkzeug für Stäbe und Rohre eingesetzt wird. Diese Fördereinrichtungen finden z. B. auch Anwendung in der konventionellen Extrusionstechnik.

3. Hauptteil

3.1 Verfahrensvergleich Anschmelzverfahren - Durchschmelzverfahren

Die Integration des Anschmelzverfahrens z. B. zur Herstellung flächiger Kunststoffteile wie Platten oder Schalen im kontinuierlich arbeitenden Fertigungsprozeß erfordert einen fundierten Verfahrensvergleich, in diesem Falle eine thermodynamische Bilanzierung zur theoretischen Begründung der Praxisergebnisse.

Das herkömmliche Durchschmelzverfahren ohne Extrudereinsatz basiert auf dem Wärmeleitungsprinzip. Hierbei wird eine Granulatmenge bestimmter Höhe in einer Plattenpresse zwischen wärmeführenden Metallplatten dadurch erhitzt, in dem die Wärme von Granulatkorn zu Granulatkorn durch Wärmeleitung bis in die Haufwerksmitte transportiert wird. Damit fällt die Schüttung mit dem Fortgang des Aufschmelzens um den Betrag des zunächst vorhandenen Lückenraumvolumens zwischen den Granülen so weit zusammen, bis die beiden Aufheiz- oder Schmelzfronten sich in der Plattenmitte treffen. Damit ist der Auf- oder Durchschmelzvorgang beendet und die Ausformung unter Druck sorgt während eines ausreichend langen Kühlprozesses für eine homogene Materialstruktur im Formteil.

Beim Anschmelzverfahren hingegen transportiert ein strömender Wärmeträger wie z. B. Heißluft oder Abgas etc. die notwendige Energie in das Granulathaufwerk, wobei die das Haufwerk begrenzenden Ebenen jetzt als Siebbänder ausgerüstet sind. Dabei wird nur so viel Polymermasse an der Oberfläche der Granülen angeschmolzen wie zur Auffüllung des Lückenraumvolumens zwischen den Granülen erforderlich ist. Anschließend werden die angeschmolzenen Granulatkörner unter Druck zusammengeschweißt, wobei die in den Zwischenräumen befindliche Luft aus dem Haufwerk herausgepreßt wird. Der Energiebedarf gegenüber dem Durchschmelzverfahren sinkt daher in erster Näherung mindestens um das Volumenverhältnis Anschmelzmasse zu nicht erhitzter Masse bei diesem Vorgang der instationären Wärmeleitung in ruhenden Haufwerken. Dieses sind mehr als 50 % Einsparpotential beim Anschmelzverfahren. Dieser Anteil reduziert

sich auch nicht, wenn anstelle des Durchschmelzverfahrens ein Extruder als Energiequelle eingesetzt wird, da auch in diesem Falle das Polymer in der Regel vollkommen aufgeschmolzen wird.

Das Anschmelz- und das Durchschmelzverfahren schließen sich in ihrer Anwendung einander aus, da beim herkömmlichen Verfahren der erforderliche Wärmetransport ins Innere des Haufwerkes die einzelnen Granulatschichten vollkommen auf- oder durchschmelzen läßt. Für das Anschmelzverfahren ist ein Durchschmelzen des Haufwerkes kritisch, da hierdurch der Lückenraum reduziert und die Strömung des Wärmeträgers durch das Haufwerk erheblich eingeschränkt wird. Andererseits ist das vollkommene Aufschmelzen der Schüttung auch nicht notwendig, da dadurch die Materialhomogenität und damit die Materialeigenschaften des Polymeren nicht verbessert werden, wie in einem abgeschlossenen Fördervorhaben gezeigt werden konnte [Neu 05]. Der durch das Entwicklungsvorhaben erreichbare ökologische und ökonomische Fortschritt läßt sich anschaulich in Abb. 1 und Abb. 2 im Abschnitt 3.2 darstellen. Dabei wird die Wärmeübertragung in das Haufwerk unter Verwendung thermodynamischer Ansätze nach dem Leitungsprinzip resp. dem Konvektionsprinzip gegenübergestellt.

3.2 Thermodynamische Beschreibung des Wärmeleitungsprinzip

Das Bild 1 in Abb. 1 zeigt eine Granulatschüttung mit der Schütthöhe h_K [m] zwischen zwei Transportbändern. Die Transportbänder wandern mit der Geschwindigkeit v_B [ms^{-1}] durch die Heizzone der Doppelbandpresse. Die oberhalb und unterhalb der Transportbänder angeordneten Heizelemente (Metallplatten) übertragen die notwendige Wärmemenge durch Wärmeleitung in die Granulatschüttung. Die in den Zeitabschnitten $t_1 < t_2 < t_3$ [s] übertragene Wärmemenge ist durch die an den Orten x_1 bis x_3 [m] erfolgte Temperaturerhöhung bzw. Temperaturverteilung in der Schüttung schematisch dargestellt. Der Abstand der Orte x_1 bis x_3 errechnet sich aus konstanter Bandgeschwindigkeit v_B [ms^{-1}] und den angenommenen Zeiten t_1 bis t_3 [s]. Danach zeigt Bild 1 in Abb. 1, daß die Temperatur der Granülen an der oberen und unteren Grenzfläche zwischen Granulat und Heizelementen sehr zügig die gewünschten Endwerte einnimmt, während im Kernbe-

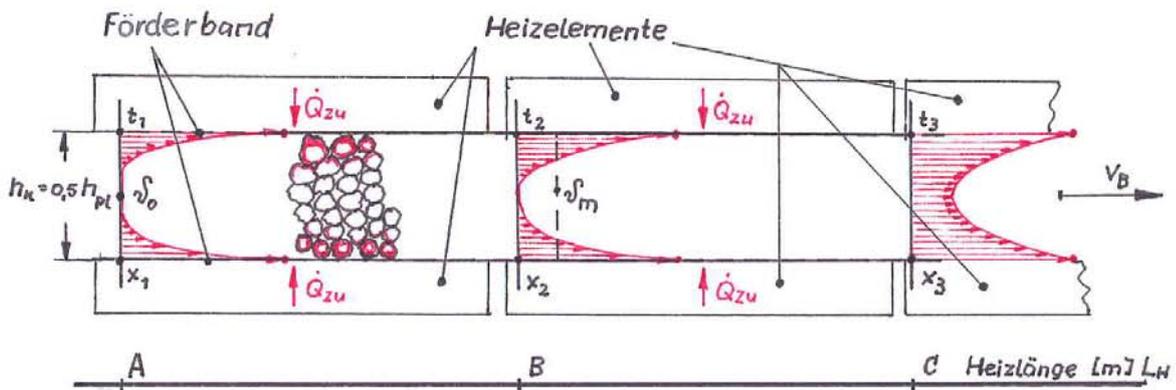


Bild 1 Temperaturverlauf in der Granulatschüttung (Doppelbandpresse)

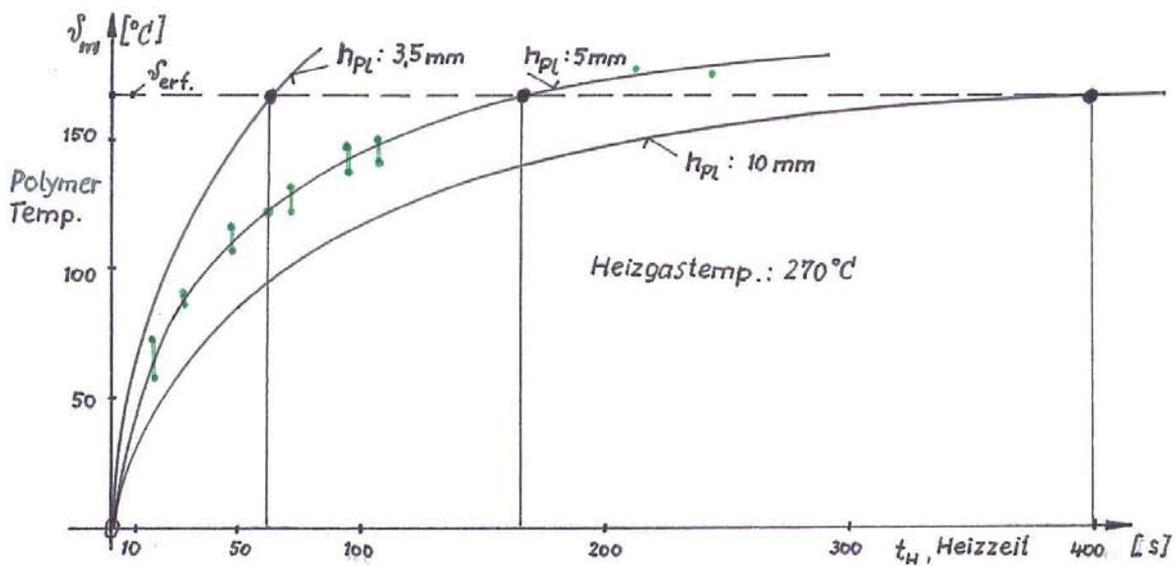


Bild 2 Erforderliche Heizzeit t_H in Abhängigkeit von der Plattendicke h_{pl}

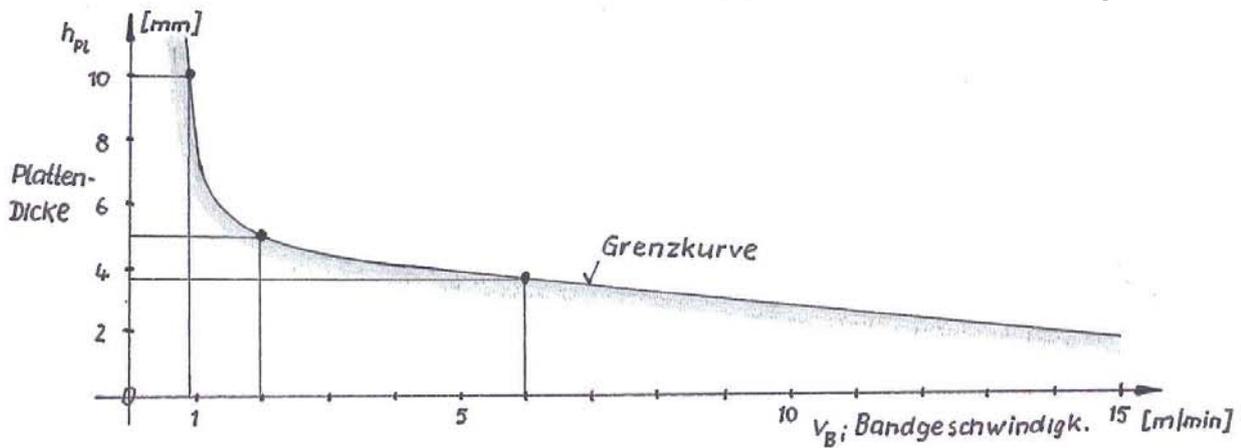


Bild 3 Zulässige Bandgeschwindigkeit v_B in Abhängigkeit von der Plattendicke h_{pl}

Energieeintrag in die Granulatschüttung nach dem Wärmeleitungsprinzip
Abb. 1

reich der Schüttung ($0,5 \times h_K$ [m]) der Temperaturanstieg wegen des hohen Wärmewiderstandes der Polymere und des Lückenraumes sehr langsam erfolgt. Dabei ist zu berücksichtigen, daß beim Start der Wärmeübertragung lediglich ein punktförmiger Kontakt zwischen Granülen und den Metallplatten vorhanden ist. Nach kurzer Zeit entsteht durch den Schmelzvorgang bereits ein flächiger Kontakt mit verbesserter Wärmeleitung. Der tatsächliche, zeitabhängige Temperaturverlauf in der Schüttung läßt sich nach den thermodynamischen Ansätzen der instationären Wärmeleitung in ruhenden Haufwerken berechnen unter Berücksichtigung der vorgegebenen Stoff- und Eigenwerte des Polymeren. Hierzu löst man die partielle Differentialgleichung der Wärmeleitung durch die Fourier-Entwicklung bzw. durch die Laplace-Transformation für instationäre Prozesse auf [VDI 97]. Danach berechnet sich der mittlere Temperaturverlauf ϑ_m [K] im Haufwerk für den kurzfristigen Kontakt nach Laplace:

$$\frac{\vartheta_m - \vartheta_w}{\vartheta_o - \vartheta_w} = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{at}{s^2}} \quad [-] \quad (1)$$

Hierin bedeuten ϑ_w [K] die Oberflächentemperatur des Heizelementes und ϑ_o [K] die Ausgangstemperatur der Schüttung. In dem Zähler-Wurzelausdruck steht a [m^2s^{-1}] für die materialabhängige Temperaturleitzahl in der Schüttung, t [s] ist die Zeit und s [m] die halbe Schütthöhe $\frac{h_k}{2}$ [m]. Die mittlere materialabhängige Temperaturleitzahl a ist im Labormaßstab für einige Korngrößen ermittelt worden und weicht von den Herstellerangaben zu Kontaktbeginn ab. Der Wert weicht im zeitlichen Mittel für eine Granulat Korngröße von 4 ± 1 [mm] um 23 % ab. Dieses ist auf die geringe Kontaktfläche zwischen den Granülen untereinander zu Beginn des Aufschmelzvorganges zurückzuführen. Während die Laplace-Gleichung den mittleren Temperaturverlauf ϑ_m im Polymeren in der Anfangsphase des Kontaktes mit der Heizfläche gut beschreibt, ergeben sich für den längerfristigen Kontakt genauere Werte für den Temperaturverlauf ϑ_m [K] nach Fourier mit:

$$\frac{\vartheta_m - \vartheta_w}{\vartheta_o - \vartheta_m} = \frac{8}{\pi^2} \cdot e^{-\frac{\pi^2 \cdot a \cdot t}{4 \cdot s^2}} \quad [-] \quad (2)$$

Die beiden Kurvenzüge für ϑ_m lassen sich graphisch gut mitteln, sodaß die resultierende Kurve im gesamten untersuchten Zeitbereich für die einzelnen Plattendicken gültig ist. Der Quotient $\frac{a \cdot t}{s^2} [-]$ wird auch Fouriersche Kenngröße genannt und wird tabellarisch z. B. in den Grenzen von 0 bis 1 mit einer Stufung von 0,1 aufgelistet [BRA 71].

Während im Bild 1 der Abb. 1 die mittlere Temperatur der Schüttung ϑ_m an den Orten x_1 bis x_3 näherungsweise eingetragen ist, zeigt die Graphik in Bild 2 in Abb. 1 die tatsächliche Temperatur ϑ_m für verschiedene Plattendicken h_k in Abhängigkeit von der Aufheizzeit t nach Formel (1) und (2). Dabei wird eine konstante Oberflächentemperatur der Heizelemente von $\vartheta_w = 270$ [°C] und eine Ausgangstemperatur für das Granulat bei $t = 0$ [s] von $\vartheta_o = 20$ [°C] angenommen. Die aktive Heizelementlänge in Bandlaufrichtung wird mit 6 [m] gewählt. Als Polymere sind diverse Mischungen auf Polyolefinbasis untersucht worden.

Das Bild 2 in Abb. 1 zeigt, daß die Aufheizzeit für eine 3,5 [mm] Platte ca. 60 [s] beträgt, die erforderliche Zeitspanne erreicht für eine 5 [mm] dicke Platte 180 [s] und für eine 10 [mm] Kunststoffplatte bereits ca. 400 [s]. Der mittlere zeitliche Temperaturverlauf für eine 5 [mm] dicke Platte ist in einem Pilotversuch für eine Materialprobe mit einer Kontaktheizfläche von 10 [cm] x 10 [cm] kontrolliert worden. Die ermittelten Meßpunkte stimmen dabei mit den errechneten Werten gut überein.

Die Produktionsmenge an Plattenware pro Zeiteinheit z. B. in [kgs⁻¹] wird durch die Bandgeschwindigkeit der Plattenbandpresse v_B [m min⁻¹] bestimmt. Wie Bild 3 in Abb. 1 zeigt, ist die für den Prozeß zulässige Bandgeschwindigkeit für eine 3,5 [mm] dicke Platte auf $v_B = 6$ [m min⁻¹] bei einer vorgegebenen Heizelementlänge von 6 [m] begrenzt. Die Abzugsgeschwindigkeit reduziert sich für eine

5 [mm] dicke Platte auf 3 [m min⁻¹] und erreicht für eine 10 [mm] dicke Platte gerade noch 1,5 [m min⁻¹].

Die Breite der produzierten Platten ist für die o. a. Betrachtungen in erster Näherung unerheblich. Die Fa. TPS kann Anlagen für Plattenbreiten bis 5 m und mehr herstellen.

3.3 Beschreibung der konvektiven Wärmeleitung im Anschmelzreaktor

Parallel zu dem energetischen Verfahrensvorteil des Anschmelzverfahrens gegenüber herkömmlichen Verfahren verdeutlichen die Bilder 1 und 2 in Abb. 2 den wirtschaftlichen Fortschritt nachhaltig. Die Berechnung des Temperaturverlaufes während des instationären Wärmeleitungsprozesses an den Oberflächen der Granülen im Haufwerk, der Einfluß der Anströmgeschwindigkeit des Heizgases auf den Wärmeübertragungsprozeß, die Ermittlung der erforderlichen Pressung des Heizgases etc. sind in dem vorliegenden Abschlußbericht [Neu 05] ausführlich behandelt worden und bilden die Grundlage des hier beschriebenen Förderprojektes.

Das vergleichsweise geringe Wärmeleitvermögen der Polymere bewirkt den starken partiellen Temperaturanstieg an den Oberflächen der Granülen in der Schüttung, siehe Bild 1 in Abb. 1, während der Aufheizphase. Dabei werden die Oberflächen der Granülen beim Durchströmvorgang des Heizgases durch die Schüttung in guter Näherung fast gleichzeitig, d. h. unabhängig von deren Lage im Haufwerk erwärmt.

Das Bild 2 in Abb. 2 zeigt die erforderliche Mindestheizzeit für Granulate auf Polyolefinbasis. Dabei wird eine mittlere Strömungsgeschwindigkeit des Heizgases vor der Schüttung mit $v_L = 10$ [ms⁻¹] angenommen. Die Heizgastemperatur wird mit $\vartheta_L = 270$ [°C] gewählt. Die Versuche zeigen, daß z. B. für PET oder PVC sich fast identische zeitabhängige Temperaturverläufe ergeben.

Das Bild 2 in Abb. 2 zeigt ferner, daß die Plattenstärken zwischen 3 [mm] und

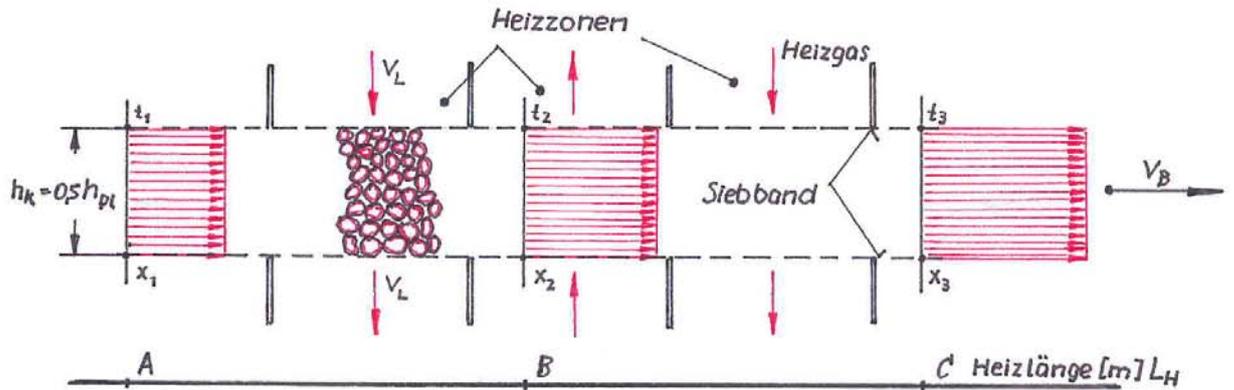


Bild 1 Temperaturverlauf in der Granulatschüttung (Doppelbandpresse)

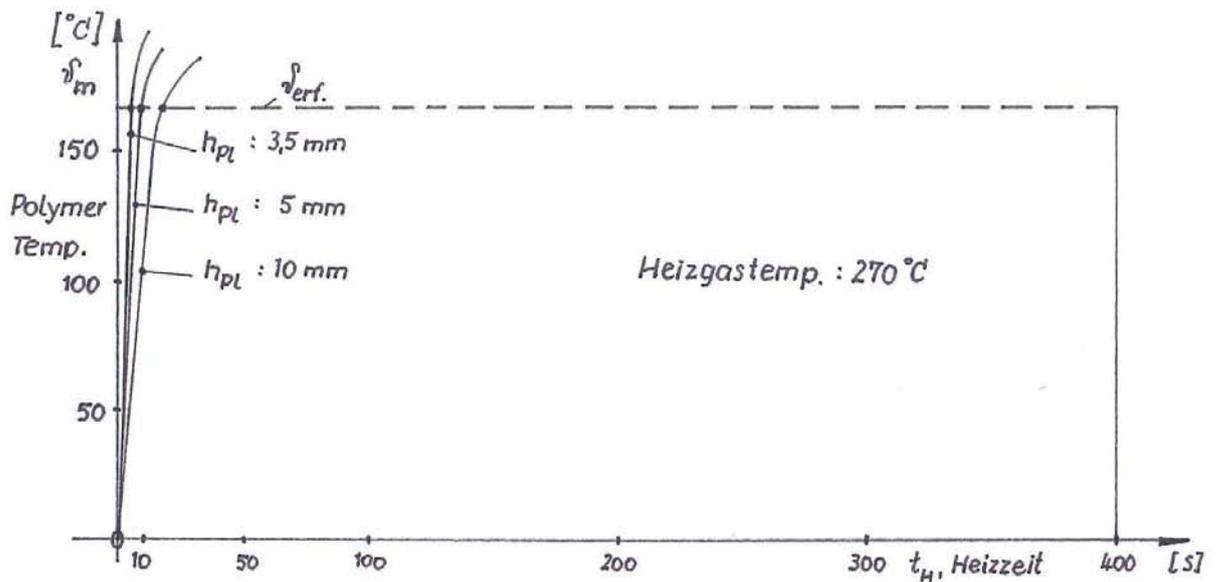


Bild 2 Erforderliche Heizzeit t_H in Abhängigkeit von der Plattendicke h_{p1}

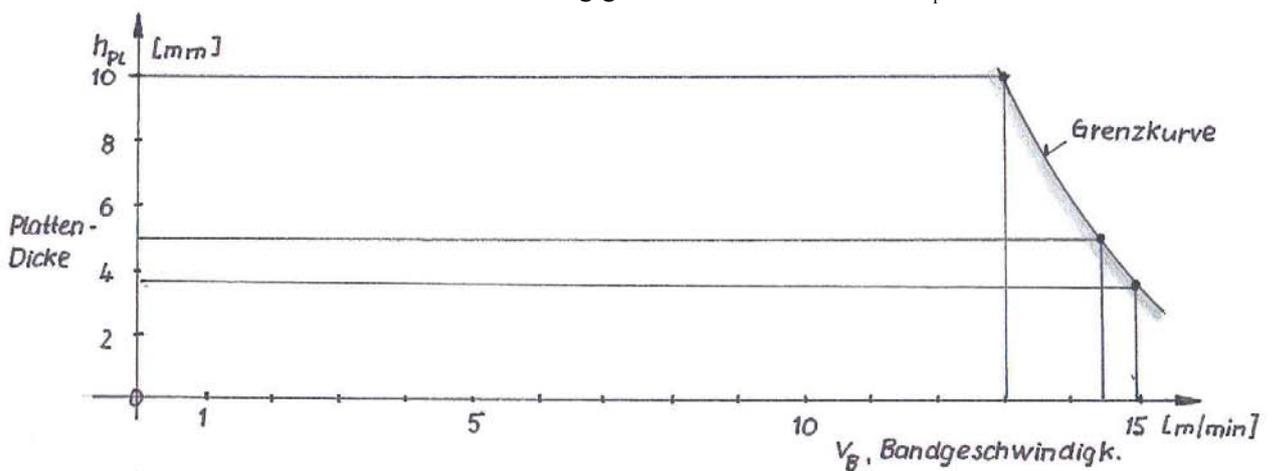


Bild 3 Zulässige Bandgeschwindigkeit v_B in Abhängigkeit von der Plattendicke h_{p1}

Energieeintrag in die Granulatschüttung nach dem Konvektionsprinzip (Durchströmung) Abb. 2

10 [mm] im Vergleich zum Durchschmelzverfahren einen nur geringen Einfluß auf die erforderliche Mindestheizzeit haben, allerdings erhöht sich zwangsläufig der Energiebedarf mit steigendem Massendurchsatz.

Das Bild 3 in Abb. 2 ist im gleichen Maßstab wie Bild 3 in Abb. 1 gezeichnet. Der Bildvergleich sollte den Entwicklungsfortschritt gut dokumentieren. Der Verlauf der Grenzkurve zeigt die zulässige Bandgeschwindigkeit v_B [ms^{-1}] für eine Heizzonenlänge des Anschmelzreaktors in Bandlaufrichtung von $L_{H1} = 1$ [m]. Eine Vergrößerung der Heizzonenlänge auf 2 oder 3 m erlaubt eine Verdoppelung bzw. Verdreifachung der zulässigen Bandgeschwindigkeit v_B . Eine Heizzonenlänge von z. B. 3 [m] erreicht erst 50 % der Heizelementlänge des im Vergleich stehenden Durchschmelzverfahrens, jedoch steigt der Massendurchsatz im Anschmelzverfahren um den Faktor 10 (!) und mehr.

Der Vergleich der in Abb. 1 und Abb. 2 ermittelten thermodynamischen und wirtschaftlichen Kenngrößen zeigt offensichtlich, daß die Integration des Anschmelzverfahrens zur Herstellung dickwandiger Kunststoffteile in den kontinuierlich arbeitenden Fertigungsprozeß in einer Doppelbandpresse erhebliche Vorteile sowohl energetischer als ökonomischer Art erwarten läßt.

Danach ist es jetzt möglich, unabhängig von den den Materialfluß begrenzenden Eigenschaften der eingesetzten Polymere beim Durchschmelzverfahren nunmehr die Plattendicke h_{pl} und die Fördergeschwindigkeit v_B , d. h. Materialausstoß pro Zeiteinheit in weiten Grenzen in der Produktionsanlage frei zu bestimmen oder: Aus den abhängigen Variablen v_B und h_{pl} sind unabhängige Einflußparameter geworden. Diese Erkenntnisse bilden die Grundlage der in diesem Fördervorhaben beschriebenen Arbeitsabfolgen zur Integration des Anschmelzverfahrens in einem wirtschaftlichen und kontinuierlich arbeitenden Fertigungsprozeß. Die hierfür von beiden Kooperationspartnern vereinbarten Arbeitsschritte und Arbeitsergebnisse werden nachfolgend dargestellt.

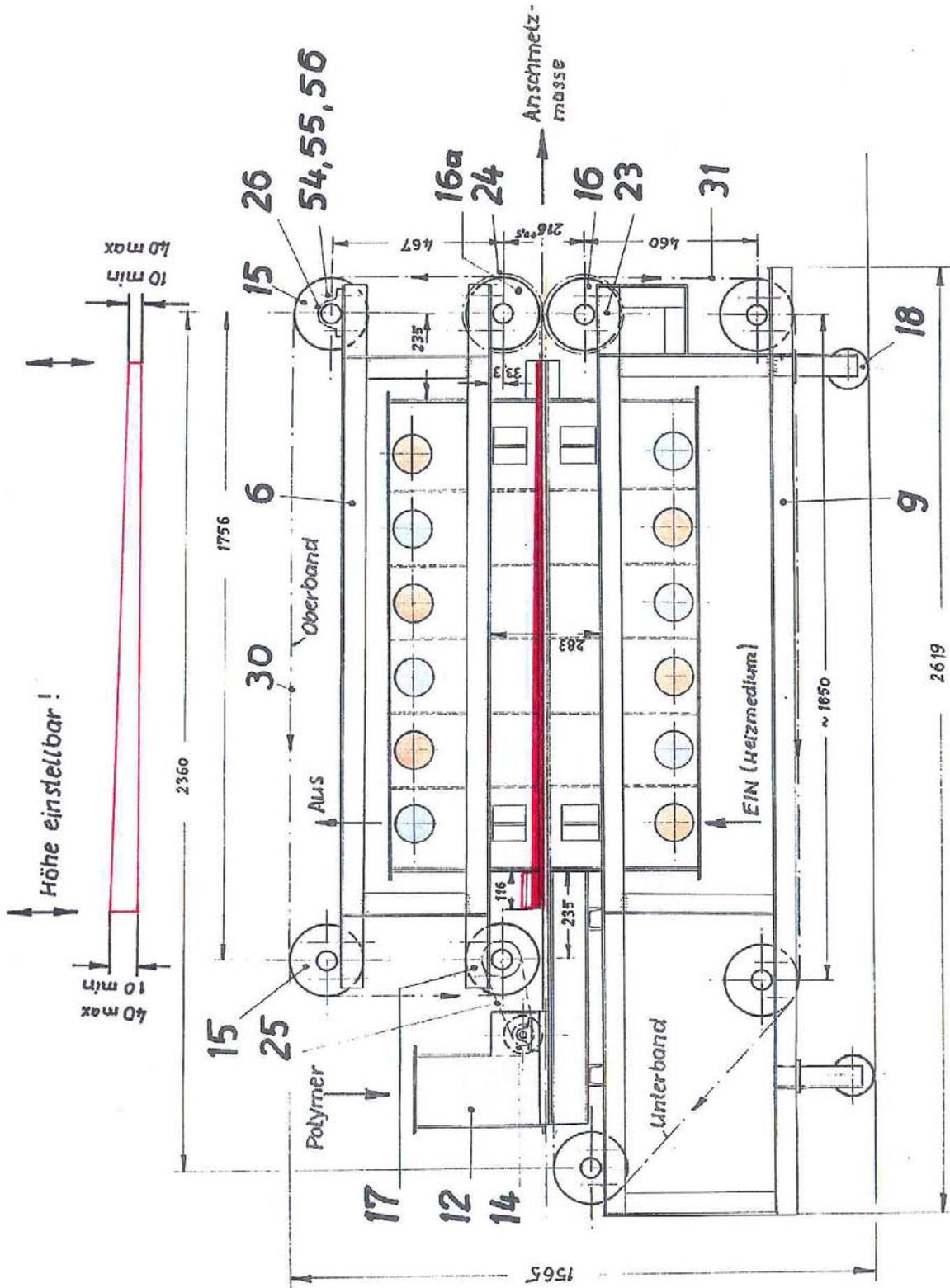
3.4 Beschreibung der durchgeführten Projektarbeitsschritte

3.4.1 Umbau des Anschmelzreaktors zur Einführung einer einstellbaren Schütthöhenregulierung und Anströmgeschwindigkeit

3.4.1.1 Schütthöhenregulierung

Die in Abb. 3 skizzierte Anschmelzvorrichtung, die bisher für Grundsatzversuche eingesetzt wurde, ist hinsichtlich ihrer Anwendungsmöglichkeiten überarbeitet worden. Die Anlage war bisher für eine maximale und konstante Schichthöhe des Granulates von $h_K = 12$ [mm] ausgelegt. Besonders für Granulatfraktionen mit einem mittleren Korndurchmesser von z. B. 6 [mm] darf die Nutzhöhe auf 25 [mm] erweitert werden, ohne daß Nachteile für eine gleichmäßige Anschmelzung im Haufwerk zu erwarten sind. Während des kurzzeitigen Anschmelzvorganges reduziert sich die Schütthöhe infolge der fortschreitenden Plastifizierung der Granulatoberfläche. Das Schüttgut fällt in sich zusammen, wobei die Leerräume zwischen den Granülen sich verkleinern. Es ist je nach mittlerer Korngröße eine Höhenreduzierung des Haufwerkes um bis zu 20 % bezogen auf die Ausgangshöhe zu erwarten. Daher laufen die beiden Siebbänder im Anschmelzreaktor nicht mehr parallel, sondern sie werden über eine einstellbare stufenlose Hubvorrichtung keilförmig in Bandlaufrichtung zusammengeführt.

Diese Anordnung der Siebbänder ist vor allem vorteilhaft für eine geordnete Heizgasführung durch das Schüttgut. In dem Falle, wo auf die Höhenanpassung verzichtet wird, verursacht der anwachsende Freiraum zwischen Schüttung und Heizgasdüsen unkontrollierte Luftverwirbelungen zwischen benachbarten Strömungskanälen zum Nachteil einer geordneten Wärmezufuhr in das Haufwerk. Die erforderliche keilförmige Einstellung der Siebbänder ist produktabhängig und wird nach Messung der Schütthöhe am Ausgang des Anschmelzreaktors vorgenommen. Es sind für insgesamt 5 Polymerarten (PE, EPDM, PP, PS und PVC) im Korngrößenbereich zwischen 3 mm und 6 mm Einstellparameter durch Versuchsreihen im Versuchsanschmelzreaktor ermittelt worden und dienen dem Anwender als Einstellhilfen bei der Verfahrensanwendung.



Prinzipskizze Schütthöheneinstellbarkeit im Anschmelzreaktor
Abb. 3

3.4.1.2 Einstellbare Anströmgeschwindigkeit

Das Heizgas im Anschmelzreaktor wird im Kreislauf geführt. Wie Abb. 4 zeigt, saugt der Ventilator das Heizgas aus dem Heizraum und fördert es zur Einstellung der Strömungsgeschwindigkeit und Druckrückgewinnung durch einen Diffusor in den Lufterhitzer. Von hier gelangt das Heizgas zu den Heizschächten. Durch eine geeignete Anschlußtechnik in den Zuleitungen wird eine Wechselströmung in benachbarten Kammern erzeugt, sodaß das Schüttgut während seines Transportes durch den Anschmelzreaktor einmal von oben nach unten und im nächsten benachbarten Heizschacht von unten nach oben durchströmt wird.

Die Anströmgeschwindigkeit wird durch die einstellbare Drehzahl des Ventilators geregelt. Dieses ist erforderlich wegen der unterschiedlichen Korngrößenverteilungen in den zu verarbeitenden Schüttgütern. Bekanntlich soll das erforderliche Anschmelzvolumen der Granülen dem Leerraumvolumen in der Schüttung entsprechen. Die Anströmgeschwindigkeit des Heizgases in Verbindung mit der Gastemperatur sind hierfür geeignete Regelgrößen. Eine weitere Einstellgröße ist die Leckagegasmenge am Ein- und Austritt der Siebbänder im Reaktor. Es muß daher ein einstellbares Druckverhältnis an den Grenzflächen zwischen Reaktorinnenraum und Umgebung herrschen. Im Falle einer zu großen Leckagegasmenge aus dem Reaktorraum wird der Wärmeverlust im System erhöht und es kann zu Verwirbelungen des Schüttgutes im Einlaufbereich der Siebbänder führen. Bei zu hohem Unterdruck im Heizraum verursacht die eintretende Falschluff ebenfalls vermeidbare Wärmeverluste. Im Idealfall erreicht die Leckagegasmenge ein Minimum. Auf diese Weise fällt auch der Sauerstoffanteil des Heizgases auf einen Minimalwert für den Fall, daß Luft als Heizgas eingesetzt wird. Der thermooxydative Abbau des Polymeren wird dadurch bei einer mittleren Heizzeit von ca. 15 Sekunden vernachlässigbar klein. Die Leckagegasmenge wird ebenso wie die Gesamtgasmenge Q_L und die Gastemperatur ϑ_L über die MSR-Anlage geregelt, siehe Abb. 4.

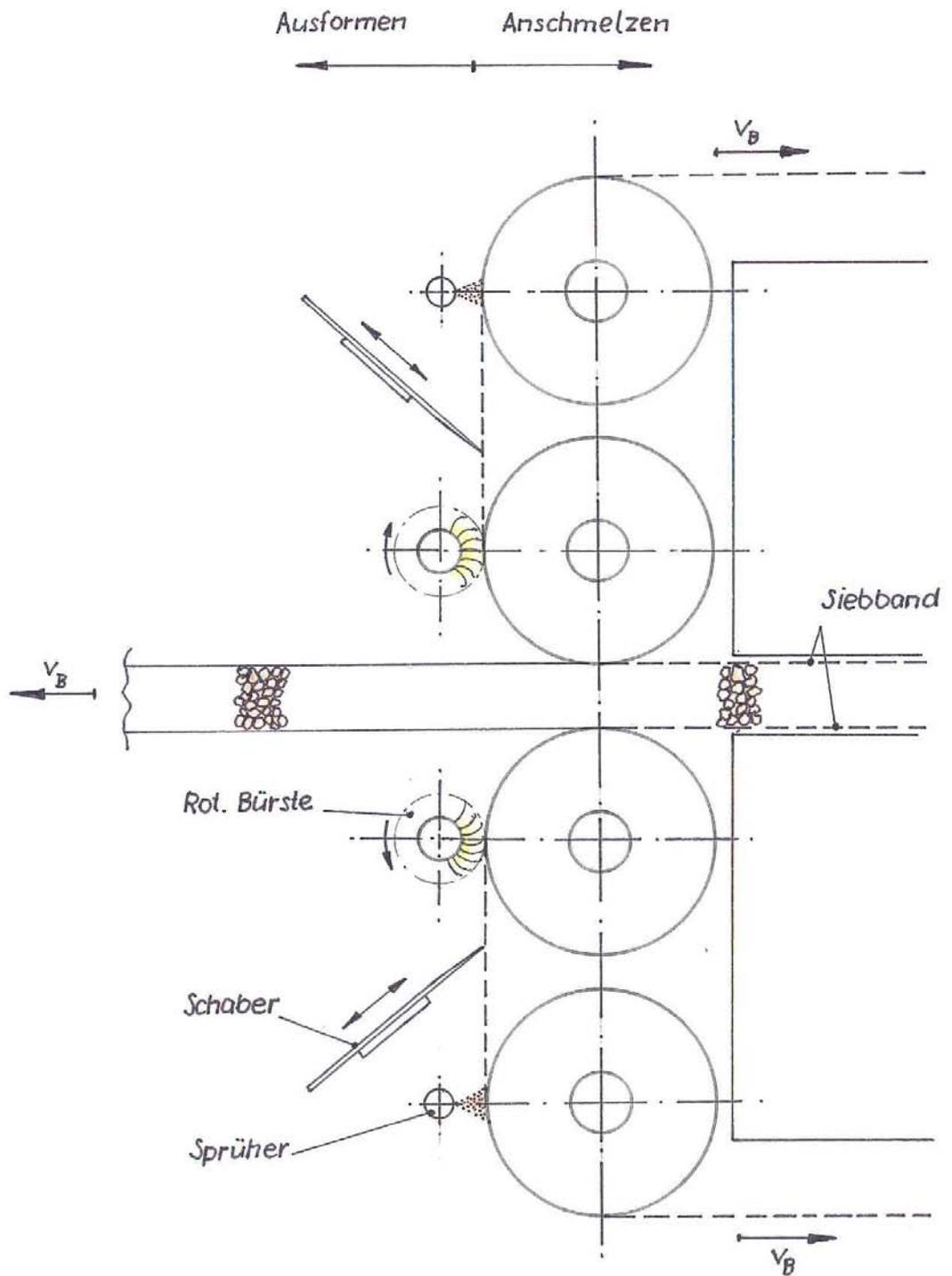
Die Einstellbarkeit der Schütthöhe, die keilförmige stufenlose Anpassung des oberen Siebbandes an die tatsächliche Haufwerkshöhe sowie die Einstellung der Strömungsgeschwindigkeit und die Regelung der Leckagegasmenge über das Abluft-

ventil V_A , siehe Abb. 4, sind wesentliche Voraussetzungen für die Verfahrensoptimierung.

3.4.2 Einbau einer Siebbandenbenetzungsvorrichtung

Wie Abb. 3 zeigt, haben die beiden Siebbänder eine Transportfunktion für das anzuschmelzende Polymer, gleichzeitig muß das Heizgas störungsfrei das Granulathaufwerk in orthologaler Richtung passieren. Es ist daher sicherzustellen, daß beim Verlassen des Anmelzreaktors keine Polymeranhaftungen an den Transportbändern verbleiben. Dieses ist schwierig zu beherrschen bei unbekanntem Polymermischungen im Versuchsreaktor, zumal bei Recyclaten, deren Schmelztemperatur und auch deren Schmelzflußindices in weiten Grenzen schwanken können. Es kann daher passieren, daß bei nicht an das Polymer angepaßter Heizmedietemperatur die Polymermischung so dünnflüssig wird, sodaß die Siebbänder regelrecht durchtränkt werden. Dieses stellt die angewendete Verfahrenstechnik infrage, da eine Reinigung im Arbeitsprozeß sehr zeitaufwendig ist. Abgesehen von diesem erheblichen Störfall ist auch bei korrekter Temperatureinstellung nicht immer auszuschließen, daß örtliche Sieblochverstopfungen möglich sind. Daher muß bei der Verfahrensanwendung nachhaltig sichergestellt sein, daß Anhaftungen nicht auftreten können.

Grundsätzlich sind daher die Siebbänder mit einem Antihafmittel wie z. B. mit einem PTFE-Film versehen, das im Temperaturarbeitsbereich von 130 [°C] bis 270 [°C] nicht thermisch geschädigt wird und eine gute mechanische Festigkeit aufweist. Darüberhinaus zeigt Abb. 5 eine Bandreinigungs- und Benetzungsvorrichtung, die sich in der Praxis der Pilotanlage bei vielen Versuchsmischungen bewährt hat. Danach entfernt zunächst eine gegenläufig zur Bandlaufrichtung rotierende Bürste mit PTFE-Borsten das aus dem Anmelzreaktor auslaufende und von der Anmelzmasse befreite Siebband von Rückständen. Ein einstellbarer Schaber mit einer aus PTFE bestehenden Abstreiferleiste entfernt mechanisch weitere Anhaftungen, während eine Sprühhvorrichtung mit Breitschlitzdüse mit feindosierbarer Sprühmenge die Adhäsionskräfte des Siebbandes reduzieren. Die Wahl des Sprühmittels ist abhängig von der Weiterverarbeitungsmethode der erzeugten Plattenware. Nachfolgende Beschichtungsarbeitsgänge auf der Produkt-



Siebbandreinigungs- und Benetzungsvorrichtung

Abb. 5

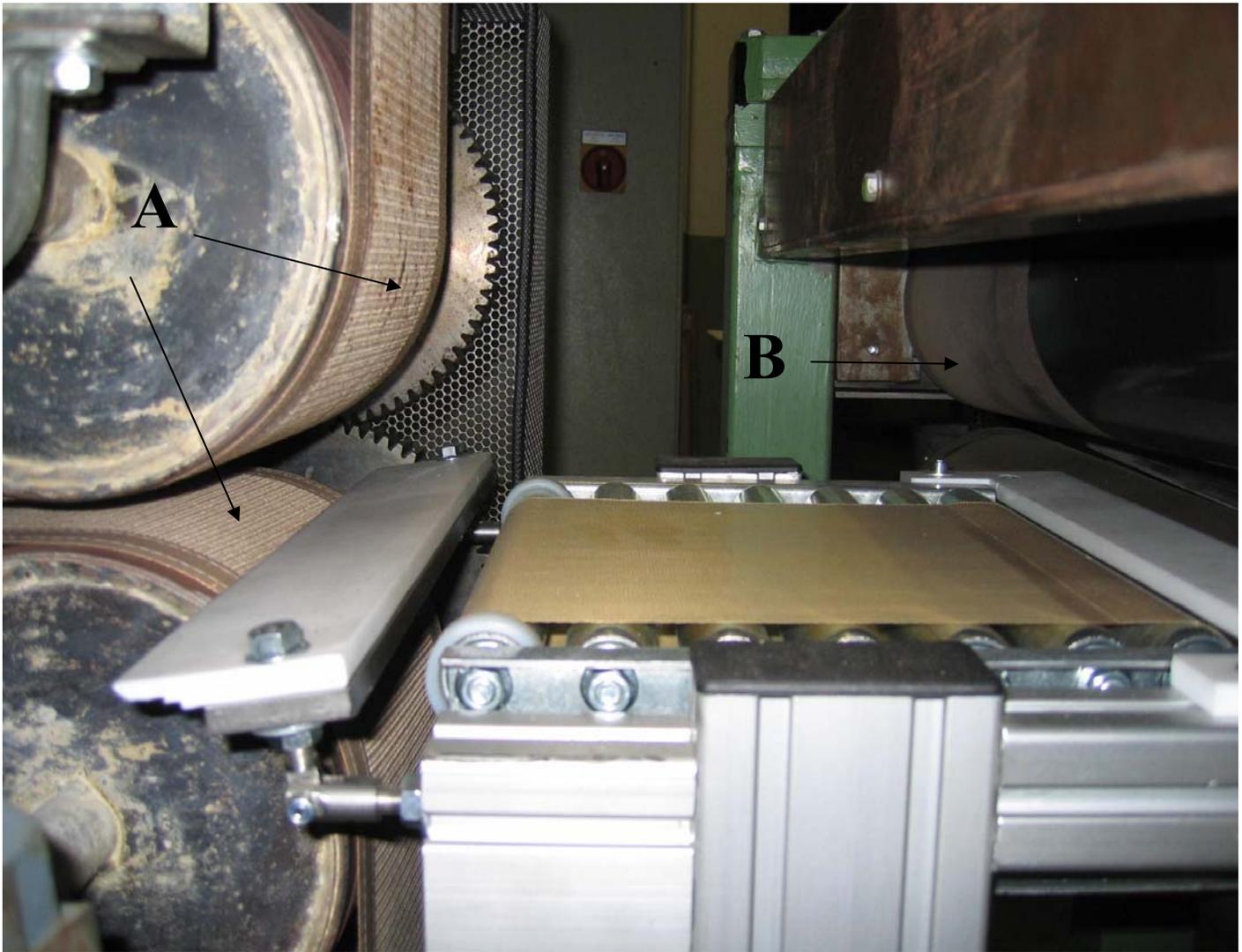
oberfläche dürfen allerdings von dem aufgespritzten Antihafmittel nicht behindert werden. Die zahlreichen Bandbenetzungsversuche ergeben für die meisten Anwendungsfälle auch für extreme Polymermischungen, d. h. stark schwankende Schmelzeindices in den eingesetzten Polymeren ausreichend gute Ergebnisse.

3.4.3 Entwicklung und Bau einer Materialübergabestation

Die Aufgabe des Anschmelzreaktors umfaßt die gleichmäßige Anschmelzung der Granülen im Haufwerk, das zwischen zwei Siebbändern der Anlage zugeführt wird. Gleichmäßig bedeutet, daß jede Granüle an beliebiger Stelle in der Schüttung am Ausgang des Reaktors eine vorgegebene Anschmelztiefe aufweist.

Die Weiterverarbeitung der strukturlosen Anschmelzmasse zu einer homogenen Plattenware erfolgt in der angeschlossenen Doppelbandpresse mit einstellbarem Flächendruck der Preßwalzen und dem Einbau von plattenförmigen Kühlelementen, die die Überschuwärmemenge über die Plattenoberfläche abführen. Dabei kann die Gestaltung einer sog. Übergabestation zwischen Anschmelzreaktor und Doppelbandpresse als Transportstrecke, siehe Abb. 6, einen störungsfreien Materialtransport bewirken.

In dieser Übergabestation, siehe Abb. 6, sind auf der Reaktorseite ein oberer und ein unterer Materialabstreifer aus PTFE angeordnet, die das Material übernehmen und einer doppelbandähnlichen Transportvorrichtung zuführen. Am Ende der Vorrichtung wird die Anschmelzmasse über PTFE-Leisten an die Doppelbandpresse weitergeleitet. Die Transportbänder in der Vorrichtung sind wie in der Doppelbandpresse als geschlossene Bänder ausgeführt. Die Bandspannung sowie der Abstand zwischen Ober- und Unterband sind in der Vorrichtung einstellbar. Anzumerken bleibt, daß aus baulichen Gründen (Geometrie der Bandumlenkwalzen) die Anschmelzmasse im Aufnahme- und Abgabebereich der Station gleitend transportiert werden muß und nicht ruhend. Die technische Ausführung der Übergabestation zeigt Abb. 6, wobei das Oberteil der Anlage zur besseren Darstellung des unteren Transportbandes entfernt wurde. Auf der rechten Bildseite ist die obere Einlaufwalze der Doppelbandpresse B zu erkennen. Die Siebbänder des



A: Siebbänder des Ansmelzreaktors
B: Oberes Transportband der Doppelbandpresse

**Materialübergabestation für Versuchsreaktor
(Oberteil demontiert)**

Abb. 6

Anschmelzreaktors sind mit A bezeichnet. Die Vorrichtung ist bei insgesamt über 25 marktgängigen Polymermischungen ohne Beanstandung eingesetzt worden.

3.4.4 Anpassung der vorhandenen Bandpressentechnik an die neue Anschmelztechnik

Der von der Fa. TPS entwickelte Fertigungsprozeß zur kontinuierlichen Herstellung von Kunststoffplatten für diverse Einsatzgebiete läßt sich durch die Aufzählung der einzelnen Arbeitsstufen gut beschreiben, abgesehen von TPS-Sondermaschinen für spezielle Einsatzgebiete. Danach besteht die Anlage aus einer Doppelbandpresse, deren lichter Abstand zwischen Oberband und Unterband zur Aufnahme des komplett aufzuschmelzenden Granulathaufwerkes dient. Die Transportbänder sind im Gegensatz zum Anschmelzreaktor geschlossen, besitzen daher keine Siebstruktur. Im Einlaufbereich der Bandpresse ist ein Streugerät installiert, das das Granulat sehr gleichmäßig auf die Bandbreite höhengenauflegt. Es folgt jetzt in der Doppelbandpresse die Aufheiz- bzw. Durchschmelzzone, daran schließt sich eine Verdichtungszone (ein oder mehrere hintereinander angeordnete und einzeln einstellbare Walzenpaare) an und danach laufen die Transportbänder mit dem Polymeren durch eine Kühlzone. Am Ende der Doppelbandpresse ist eine Abläng- bzw. Stapelstation aufgestellt, die die Plattenware auf Paletten automatisch deponiert.

Die Wärmezu- bzw. Abfuhr erfolgt über Wärme- bzw. Kühlplatten, die auf der Rückseite des Ober- und Unterbandes angeordnet sind. Diese Wärmeübertragungsplatten sind gleitend mit einstellbarem Gegendruck auf der Bandoberfläche montiert, um Übertragungsverluste durch Lufteinschlüsse zwischen den Transportbändern und der Plattenware zu verhindern.

Die geforderte Ausstoßmenge pro Zeiteinheit bzw. die gewünschte Plattendicke bestimmen die Länge der Heiz- und Kühlzonen. Dabei sind Heizzonenlängen von 5 [m] bis 30 [m] erforderlich, entsprechende Baulängen ergeben sich für die Ausform- und Kühlzonen.

Die Integration des Anschmelzverfahrens in die vorhandene Pressentechnik verändert den Anlagenaufbau bzw. die Einsatzbreite grundlegend. Anstelle einer Heizzonlänge von z. B. 30 [m] reicht jetzt eine aktive Reaktorlänge von z. B. 1 [m] oder 1,5 [m]. Wie ein Vergleich der Bilder 3 in Abb. 1 und Abb. 2 zeigen, ist die neue Plattenherstellung weitgehend unabhängig von der gewünschten Dicke des Fertigproduktes. Darüberhinaus sind jetzt erheblich höhere Bandgeschwindigkeiten (z. B. Faktor 5 - 8) möglich. Am grundsätzlichen Pressenaufbau mit den Arbeitsgängen Streuen, Heizen, Pressen, Kühlen und Ablängen bzw. Stapeln hat sich nichts geändert. Da beim Anschmelzprozeß weniger Wärmemenge in das Polymeren geleitet wird, folgt auch gleichzeitig daraus eine Reduzierung der Kühlzonlänge.

Allerdings sind bei der Anwendung des neuen Verfahrens auch Einschränkungen zu berücksichtigen. Danach ist es nicht möglich, staubähnliches Feinstgut zu verarbeiten, da das Heizmedium dieses sofort aus dem Granulatstrom herausblasen würde. Das Feingut wird aber oftmals zur Erzielung bestimmter Oberflächen- bzw. Farbeffekte an der Kunststoffplatte eingesetzt. Deshalb ist in diesen Fällen ein nachgeschalteter Arbeitsschritt notwendig, um die Oberflächenveredlung durchführen zu können. Dieser Mehraufwand steht aber in keinem Verhältnis zu den erheblichen ökologischen bzw. ökonomischen Vorteilen des Anschmelzverfahrens.

3.4.5 Entwicklungs- und Versuchsarbeiten zur Optimierung der Verfahrenseinheit Anschmelzreaktor - Doppelbandpresse einschließlich der Steuerungsgrundlagen

Die Optimierungsarbeiten an der Verfahrenseinheit unterteilen sich in zwei Arbeitsfelder:

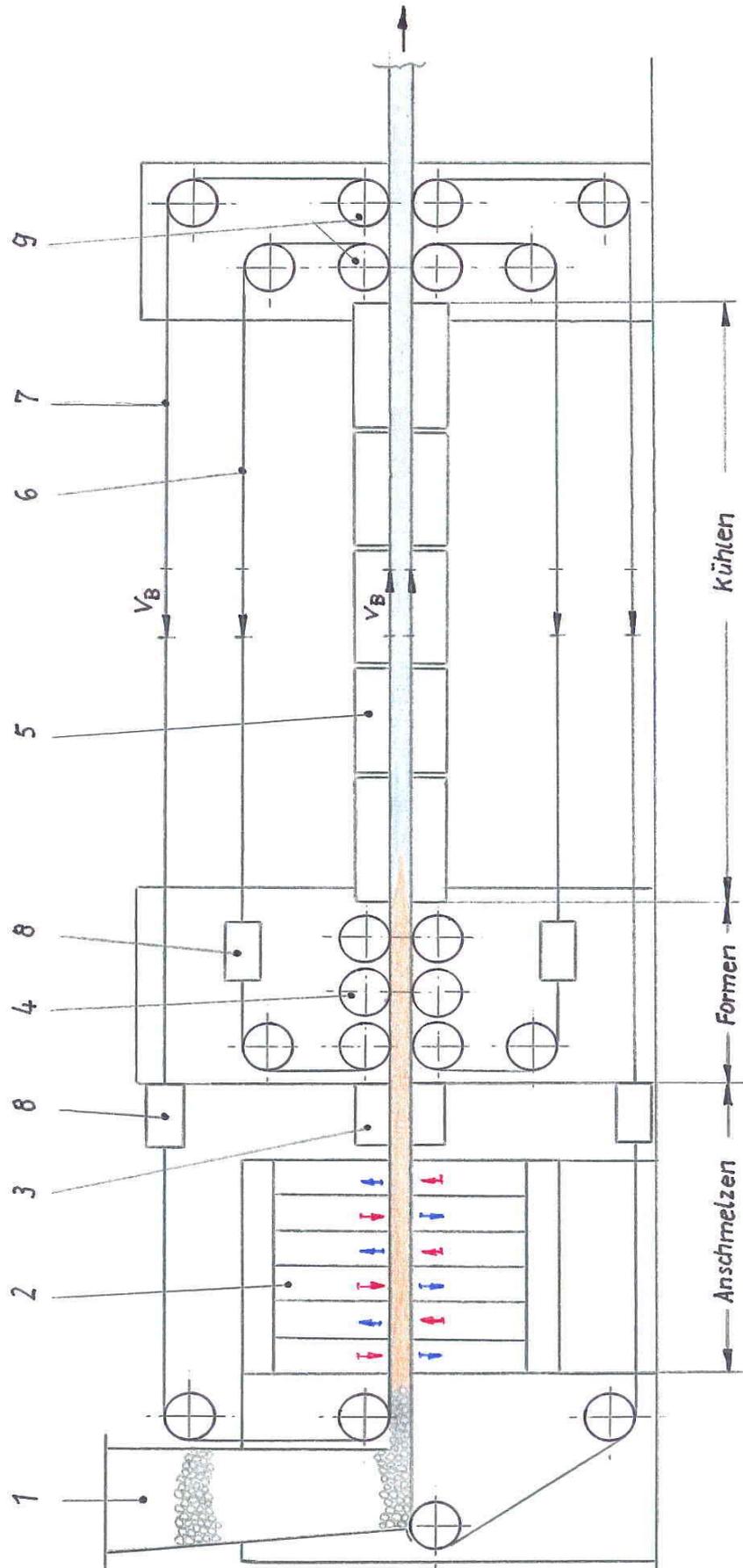
1. Ermittlung eines optimalen Betriebspunktes mit anzugebender Toleranzbreite bezüglich der Einstellparameter für die Anlage, in dem die physikalischen und thermodynamischen Einstellgrößen materialabhängig variiert werden dürfen, ohne das die Qualität der hergestellten Kunststoffplatten negativ beeinflusst wird.

2. Festlegung des Anlagenaufbaues zur Erzielung eines störungsfreien Betriebsablaufes in der Praxis und Zusammenstellung der Basisdaten für die Ausarbeitung der Steuerungstechnik der Anlage.

Zu 1: Es gibt 5 sich gegenseitig beeinflussende Variable. Dieses ist die mittlere Anströmgeschwindigkeit v_L [ms^{-1}] des ungestörten Heizmediums vor Eintritt in das Schüttgut, die Temperatur δ_L [K] des Heizmediums, die Geschwindigkeit der Siebbänder v_B [ms^{-1}], die Höhe der Schüttung h_K [m] im Einlaufbereich des Anschmelzreaktors und d_k [m] als mittlerer Korndurchmesser der Granülen.

Die optimale Einstellung dieser Variablen wird allein festgelegt durch mechanisch-physikalische Prüfmethode am Produkt. Wesentliche Prüfwerte sind z. B. die Zugfestigkeit, das Dehnungsverhalten der Probe unter Last, das Kerbschlagverhalten und der Kristallaufbau im Polymeren. Die gegenseitige Abhängigkeit der Variablen sind in zahlreichen Versuchsreihen ermittelt worden und im vorliegenden Abschlußbericht [Neu 05] aufgelistet. Die damaligen Ergebnisse sind, wie Testreihen zeigen, auf das neue Fertigungsverfahren für alle untersuchten Polymere übertragbar.

Zu 2: Die Festlegung des Anlagenaufbaus einer ersten Versuchs- und Demonstrationsanlage in Produktionsmaßstab mit einer Nutzbreite von 1200 mm wurde geleitet von der Einhaltung der optimalen Betriebssicherheit. In Abb. 7 ist der Aufbau der Gesamtanlage skizziert. Wesentliches Baumerkmal ist, daß für die erste Anlage auf eine Materialübergabestation zwischen Anschmelzreaktor und Doppelbandpresse zunächst verzichtet wurde, um eine mögliche Behinderung der Polymerablösung von den Siebbändern am Ausgang des Anschmelzreaktors sicher zu vermeiden. Für künftige Kundenversuche ist nicht auszuschließen, daß Polymere oder Polymermischungen mit extrem niedrig schmelzenden Polymeren eingesetzt werden. Auch in diesen Fällen muß die Anlage störungsfrei arbeiten. Daraus folgt, daß das obere und untere Siebband durch die ganze Fertigungsanlage hindurchlaufen werden mit dem Nachteil, daß die Bandstruktur sich auf der fertigen Kunststoffplatte ab-



Gesamtanlage zur Herstellung von Kunststoffteilen nach dem Anschmelzverfahren **Abb. 7**

zeichnen kann, aber mit dem erheblichen Vorteil, daß die Ablösung der Siebbänder vom Produkt bei Umgebungstemperatur erfolgt. Die Bandablösung bei Raumtemperatur wurde sehr oft bei mindestens 30 Materialtypen geprobt, ohne das Rückstände auf dem Band unlösbar verblieben. Anzumerken bleibt, daß die Anlage auch mit einer Übergabestation später ausgerüstet werden kann.

Es kann im Extremfall, d. h. bei mangelhafter Einstellung der Betriebsparameter ein Kunststoffgemisch bei Überhitzung sehr dünnflüssig werden, sodaß eine vollkommene Benetzung des Siebtuches eintritt. Aus diesem Grunde erfolgte allein aus Sicherheitsgründen der Einbau einer Übergabestation nicht.

Die Abb. 7 ist die Grundlage einer Patentanmeldung beider Kooperationspartner. Im einzelnen bedeuten Teil 1 die Materialvorlage mit der eingebauten Streuvorrichtung, Teil 2 stellt den Anschmelzreaktor dar mit parallel angeordneten Strömungskammern, in denen das Heizmedium gegenläufig strömt. Teil 3 ist wahlweise als Nachheiz- oder Kühlzone vorgesehen, während Teil 4 die Preß- und Formgebungseinheiten skizziert. Die erforderliche Plattenkühlstrecke ist mit Teil 5 gekennzeichnet. Teil 6 bedeutet ein mitlaufendes oberes und unteres geschlossenes Förderband und Teil 7 zeigt das obere und untere Siebband. Teil 8 skizziert die Bandreinigungsanlage oben und unten für die Siebbänder Teil 6 und für die beiden Siebbänder Teil 7.

Da die Schüttung durch Wärmeeinfluß nicht nur in der Höhe schrumpft sondern auch in der Auslegungsbreite im Millimeterbereich, ist eine keilförmige Anstellung der Seitenbegrenzungsleisten einzurichten. Einstellbereich ca. 20 mm. Die in Abb. 7 skizzierte Demonstrationsanlage ist mit allen aus heutiger Sicht erforderlichen Zusatzeinrichtungen ausgerüstet, um den Kundenansprüchen im Testbetrieb zu genügen.

3.4.5.1 Steuerungstechnik für die Verfahreseinheit

Die Verfahreseinheit Anschmelzreaktor - Doppelbandpresse wird von einer gemeinsamen Meß-, Steuer- und Regelungseinheit überwacht. Diese MSR-Anlage

ist von der Fa. TPS entwickelt, gebaut und zwischenzeitlich installiert worden. Die MSR-Anlage regelt und überwacht und koordiniert folgende Einrichtungen:

1. Heizmedium-Temperatur

Die Temperaturregelung erfolgt über einen Thyristorsteller mit Phasenüberwachung. Die Temperatur ist auf 1 [K] einstellbar, die max. Abweichung vom Sollwert beträgt $\pm 0,5$ [K]. Es sind 8 Temperaturmeßstellen installiert.

2. Heizmedium-Volumenstrom

Die Ventilatoren sind drehzahlgesteuert. Der Volumenstrom wird durch die Beschaffenheit des Schüttgutes vorgegeben. Über ein eingebautes Prandtl-Meßrohr wird der Istwert ständig überwacht.

3. Heizgerät

Für die Demonstrationsanlage ist ein Elektro-Heizgerät vorgesehen. Es sind 12 Temperaturbegrenzer im Heizgerät vorgesehen, um Überhitzungen an den Heizstäben zu vermeiden. Bei Ausfall der Ventilatoren oder Abnahme des Volumenstromes auf einen vorgebbaren Mindestwert wird das Heizgerät ausgeschaltet.

4. Bandgeschwindigkeit

Die Bandgeschwindigkeit ist stufenlos einstellbar. Im Falle eines Bandstillstandes werden Heizgerät und Ventilatoren sofort ausgeschaltet. Die Antriebsmotoren werden drehmomentüberwacht.

5. Ausformstation

Die Preßwalzenanordnung, siehe Abb. 7, kann stufenlos für den erforderlichen Preßdruck eingestellt werden.

6. Kühlung

Die Kühlung der ausgeformten Plattenware erfolgt über Kühlplatten, deren Einstelldruck auf das Produkt stufenlos über einen Hydraulikantrieb gewählt werden kann. Die Kühlleistung wird über die benötigte Kühlmittelmenge pro Zeiteinheit und über die mittlere Temperaturdifferenz zwischen Eintritt und Austritt

kontrolliert. Die vergleichsweise kurze Kühlstrecke ist erforderlich, um die eventuelle Überschußwärmemenge durch zu hohen Energieeintrag im Reaktor wieder abzuführen.

7. Störfallanzeige

Die o. a. Einrichtungen der Gesamtanlage sind über einen Logikplan miteinander verknüpft, sodaß im Störfall über Ton- und Lichtsignale der Anlagenbediener sofort informiert ist. Darüberhinaus führt jeder Störfall zu einer automatischen Sofortabschaltung der Anlage. Die Meß- und Steuerungseinrichtungen für die Heizmediumführung, Temperaturüberwachung, Bandgeschwindigkeit, Preßdruck und Kühlleistung sind schreibend ausgeführt.

3.4.6 Entwicklung und Konstruktion eines Anschmelzreaktors für Pressenutzbreiten bis 1200 mm

Die Anforderungen des Marktes veranlaßten die Kooperationspartner statt der im Projektantrag vorgesehene Nutzbreite von 2500 mm zunächst die Anlage für 1200 mm auszulegen. Nutzbreiten von 2500 mm und größer sind auf der Basis des jetzt gefundenen Baukonzeptes technisch jederzeit möglich.

Die Entwicklungs- und Konstruktionsarbeiten für den Reaktor mit 1200 mm Nutzbreite basieren grundsätzlich auf dem Baukonzept der Pilotanlage mit 150 mm Nutzbreite. Das bedeutet: Transport des Schüttgutes zwischen zwei Förderbändern, die als Siebbänder ausgerüstet sind und eine orthogonale Durchströmung der Granülen mit Heizgas erlauben. Ein Richtungswechsel des Heizmediums in benachbarten Strömungskanälen des Reaktors ermöglicht einen gleichmäßigen Energieeintrag an allen Stellen des Schüttgutes. Darüberhinaus soll das Polymergranulat seiten- und höhenbegrenzt im Reaktor geführt werden. Ein geschlossenes Umlaufsystem für das Heizgas soll Wärmeverluste und Schallemissionen an die Umgebung vermeiden.

Allerdings war eine Änderung der in der Pilotanlage vorgesehenen Strömungskanalauslegung notwendig. Wie in Abb. 3 skizziert, beträgt die Bauhöhe eines Strömungskanals für 150 [mm] Bandnutzbreite ca. 950 [mm]. Das ergibt für eine

Bandnutzbreite von 1200 [mm] eine Schachthöhe von ca. 7,5 [m]. Anlagen dieses Ausmaßes erfordern Hallenbauten, die der Großteil der für dieses Verfahren infrage kommenden Anwender nicht akzeptieren würde.

Es wurden daher anstelle der ausladenden Strömungskanalhöhe geeignete Düsenrohre entwickelt, gebaut und geprüft, die nur eine Gesamtbauhöhe von ca. 850 [mm] erreichen. Auf diese Weise konnte die Gesamtbauhöhe des Anmelzreaktors von 7,5 [m] auf ca. 2,5 [m] reduziert werden.

Das Bild 1 in Abb. 8, zeigt das Düsenrohr, dessen Länge der Nutzbreite des Siebbandes entspricht. Dabei soll das Heizmedium über die ganze Breite des Düsenrohres sehr gleichmäßig ausströmen, wobei nur eine maximale Abweichung der Strömungsgeschwindigkeit v_L [ms^{-1}] von 0,5 % vom Mittelwert zulässig ist, denn die Schwankungen des Wärmeeintrags in die Polymerschüttung entsprechen der örtlichen Abweichung der zugeführten Menge an Heizmedium in das Polymerhaufwerk. Eine unterschiedliche Wärmebeaufschlagung führt in der entstehenden Kunststoffplatte zu Eigenspannungen, die eine unerwünschte Unebenheit oder Welligkeit im Produkt hervorrufen können. Nun erreicht der Strömungswiderstand des Systems oberes Siebband, Granulatschüttung und unteres Siebband mit Abstand den Hauptanteil am Gesamtwiderstand im Anmelzreaktor. Das System hat daher eine ausgleichende Wirkung auf eine mögliche Strömungsgleichverteilung im Haufwerk.

Es sind für eine mittlere Korngrößenverteilung von 2,5 [mm] bis 6 [mm] mit einem Korngrößenprung von jeweils 0,5 [mm] Strömungsversuche entsprechend Bild 1 in Abb. 8 durchgeführt worden. Dabei zeigte sich, wie zu erwarten, daß mit ansteigendem Korndurchmesser sich die Strömungsgleichverteilung exponentiell verschlechterte. Die Meßwerte sind in Abb. 9 graphisch für eine Schütthöhe von $h_k = 25$ [mm] aufgetragen. Danach wird der $\frac{\Delta v_L}{v_L}$ – Grenzwert bei einem mittleren Korndurchmesser von $d_k = 4,8$ [mm] überschritten. Als Schlußfolgerung wurde zur Sicherung der Strömungsgleichverteilung neben eingebauten Leitblechen eine justierbare Venturipröfilleiste am Ausgang des Düsenrohres eingesetzt.

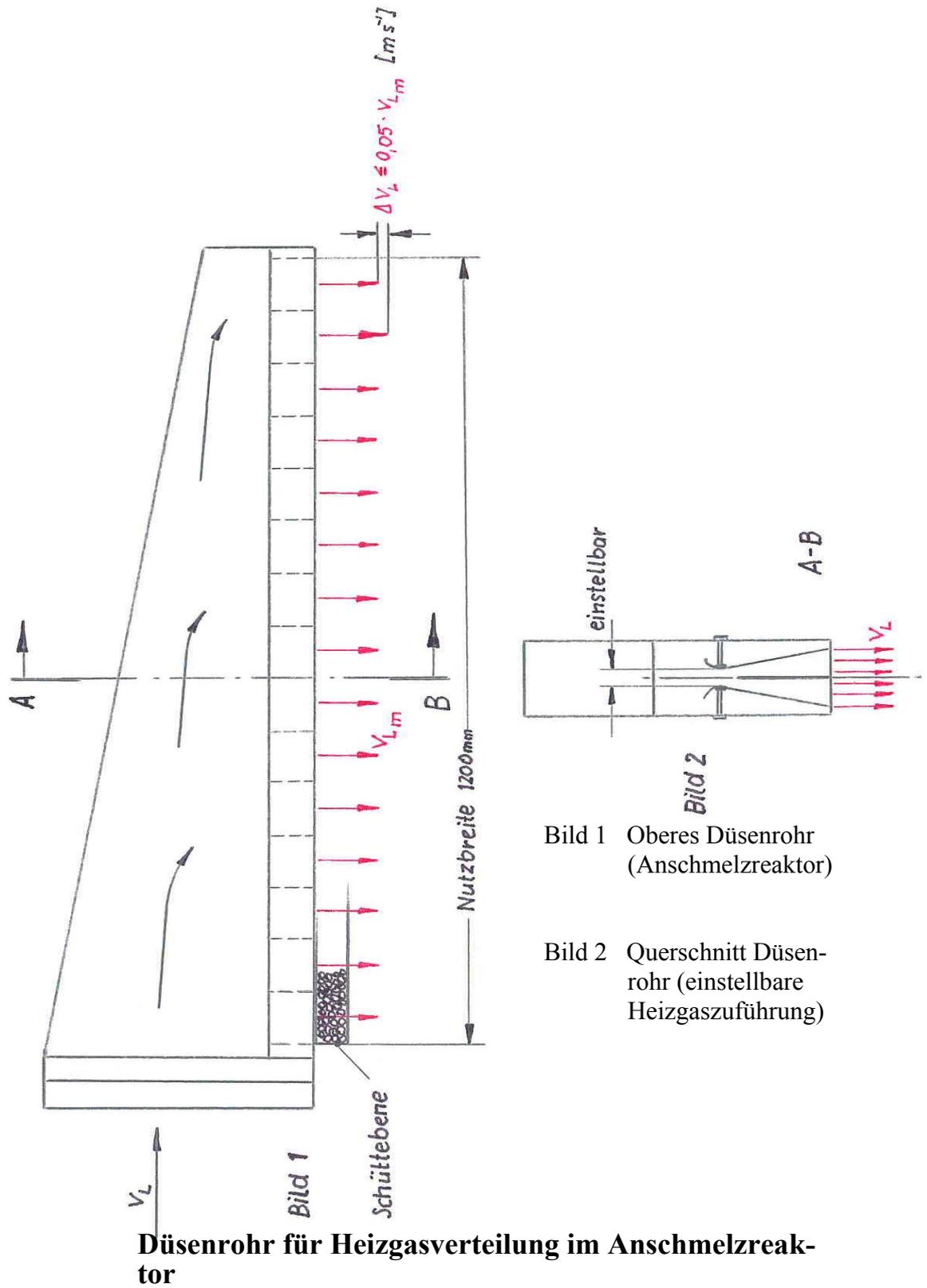
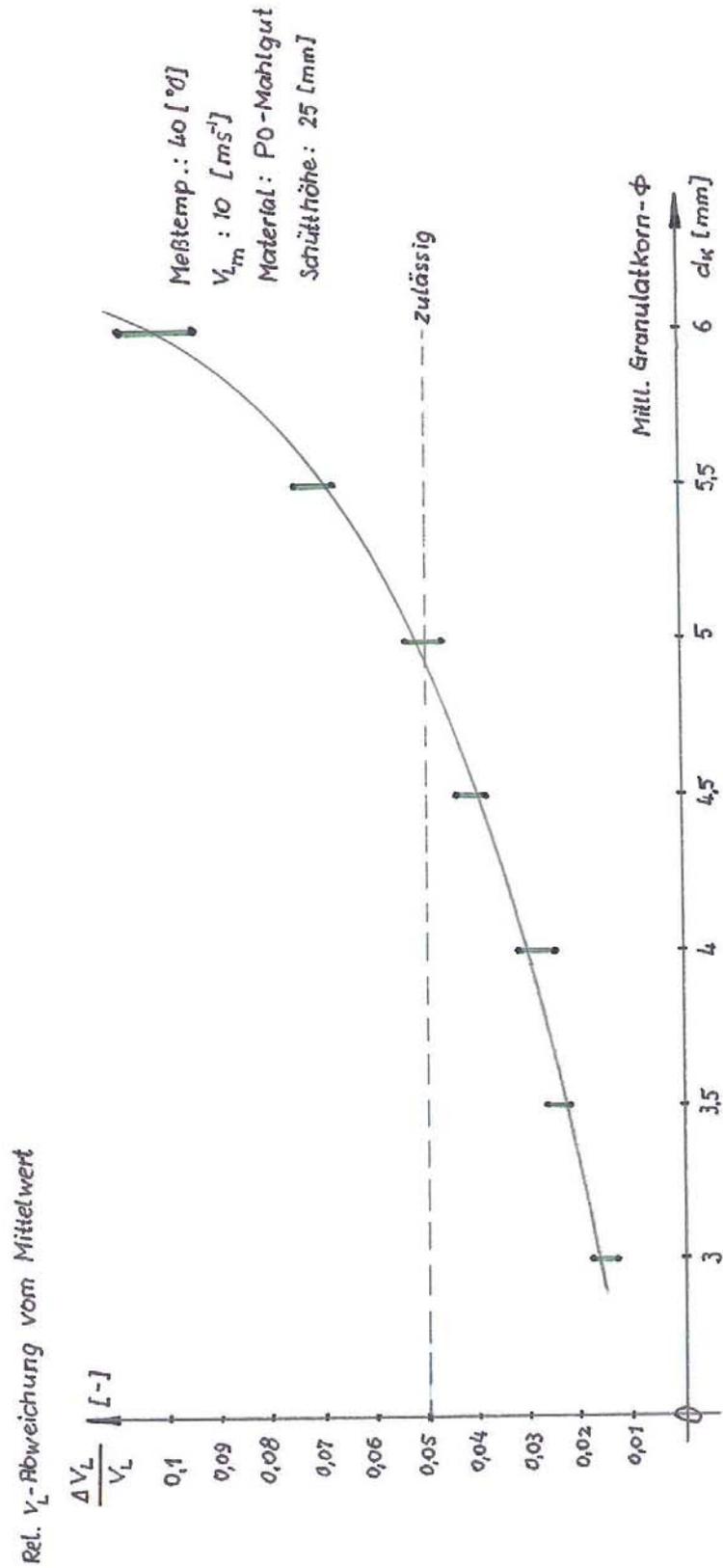


Abb. 8



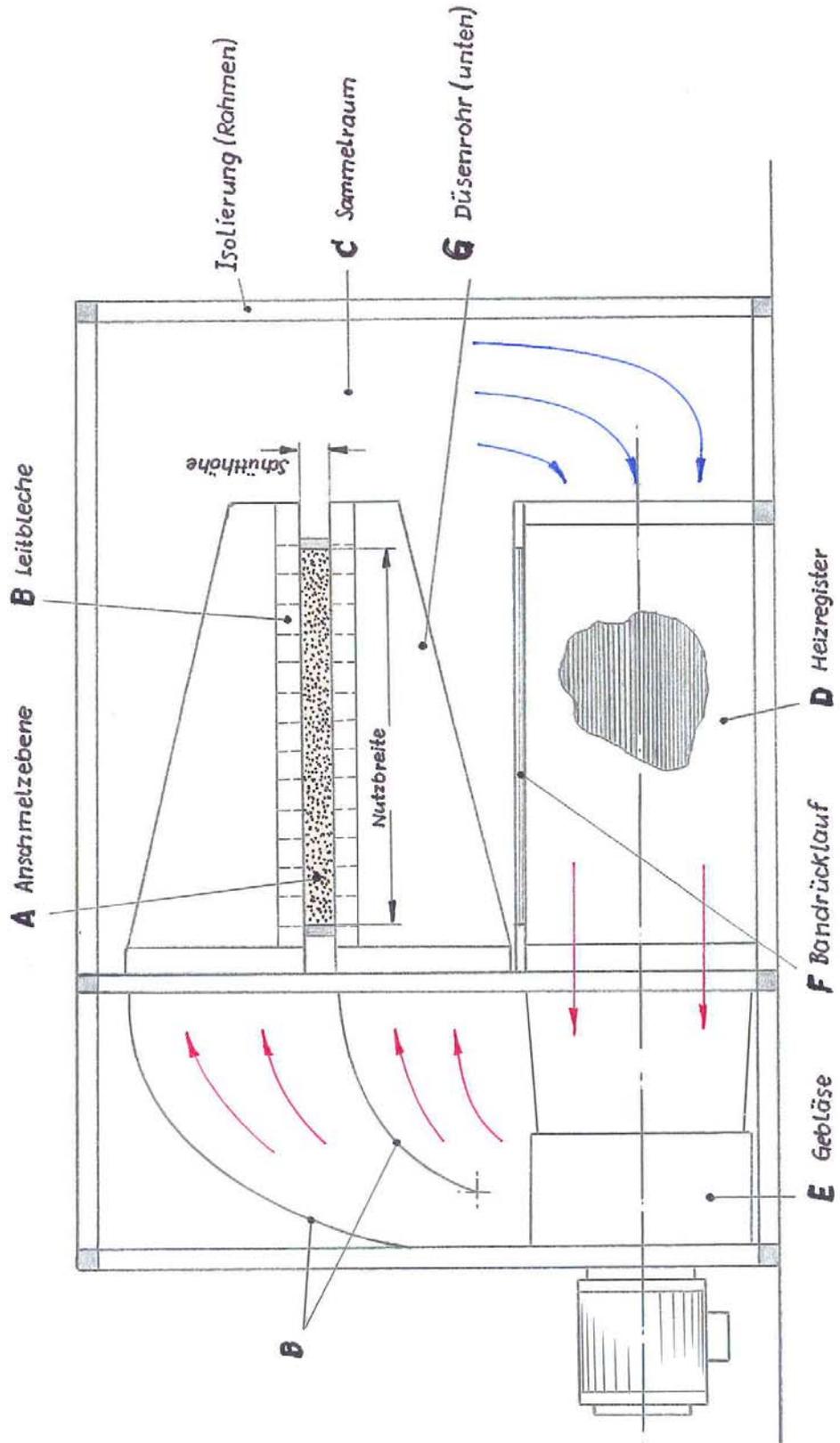
Strömungsungleichverteilung $\Delta v_L/v_L$ am Düsenrohr als Funktion vom mittleren Granulatkorndurchmesser bei fehlender v_L -Regelung Abb. 9

Bild 2 in Abb. 8 zeigt die Anordnung der Einbauten im strömungsaustritt. Die Länge entspricht der Nutzbreite der Siebbänder. Die Stellschrauben sind über die gesamte Leistenlänge verteilt und können einzeln über eine Gewindestange von außen, d. h. außerhalb des Reaktors, eingestellt werden. Es ist zukünftig vorgesehen, daß die Venturiprofilleisteneinstellung in Abhängigkeit von der jeweiligen Korngrößenverteilung automatisch erfolgen kann. Dieses ist dann eine sichere Grundlage für eine sehr gleichmäßige Heizmediumverteilung im gesamten Wärmeübertragungsraum. Der Patentschutz für diese Venturiprofilleiste ist zwischenzeitlich angemeldet.

3.4.6.1 Beschreibung der Bauausführung des Anschmelzreaktors

Auf der Grundlage der strömungsmechanischen und thermodynamischen Berechnungen für die Bauausführung eines Anschmelzreaktors mit einer Nutzbreite von 1200 [mm] zeigt Abb. 10 einen Querschnitt der Anlage (Granulatschüttung zwischen dem unteren und oberen Siebband ist rot gekennzeichnet).

Auf die eigentliche Aktionsebene im Reaktor weist Pfeil A hin. Hier wird das Granulat geführt und durch ein Heizgas oberflächlich angeschmolzen. Das Heizmedium wird durch das Gebläse E druckerhöht und über justierbare Leitbleche B einer oberen und einer unteren Düsenrohrreihe zugeführt. Die unteren und oberen Düsenrohrreihen sind senkrecht zur Bildebene zueinander versetzt, sodaß das Heizmedium nach Verlassen der Granulatschüttung frei in den Sammelraum zurückströmen kann. Nach dem Durchgang durch die Schüttung gelangt das Heizgas in den Sammelraum C von wo es durch ein Heizregister D strömt und vom Gebläse wieder angesaugt wird. Die Heizung erfolgt in dieser Versuchsanlage elektrisch und wird für den industriellen Einsatz durch eine Erdgasheizung ersetzt. Bei der Gasheizung handelt es sich um eine Direktbeheizung mit dem Vorteil eines sehr geringen Sauerstoffanteils im Heizmedium. Dadurch wird der thermooxydative Polymerabbau nochmals abgesenkt. Die Reaktoranlage ist thermisch durch eine 100 mm starke Steinwolle-Dämmschicht wärme- und schallisoliert. Die Anlage ist mit großen Montagetüren versehen, um Störungen im Bandlauf oder evtl. Materialablagerungen schnell beheben zu können. Die Anlage wird, siehe Kapitel



Prinzipskizze Anschmelzreaktor (Querschnittsdarstellung)

Abb. 10

3.4.5.1 durch Prüf- Meß- und Regelungseinrichtungen automatisch überwacht. Ein Abluftventilator auf der Oberseite des Reaktors steuert den Innendruck des Heizgasraumes, dabei verhindert eine minimale Druckabsenkung im Reaktor gegenüber dem Umgebungsraum mögliche Materialverwirbelungen im Einzugsbereich der Siebbänder.

3.4.6.2 Beschreibung der Bauausführung der Thermofix-Anlage

In Abb. 11 ist der Aufbau der Thermofix-Anlage zu erkennen. Diese Anlage dient zur Weiterverarbeitung, auch Thermofixierung genannt, der im Anmelzreaktor aufbereiteten Granulatmenge.

Danach befinden sich die Arbeitsstufen der Anlage in fünf Ebenen A bis E. In der Stufe A ist ein Walzenpaar angeordnet, das das angeschmolzene aber noch strukturelose Granulat vorpreßt und damit entlüftet. Im Anschluß an die erste Preßstufe können auf der Ober- und Unterseite der Siebbänder Heizstrahler angeordnet werden, die in extremen Maschineneinstellungen, z. B. sehr geringe Bandgeschwindigkeit, die Oberfläche der vorgeformten Platte nachheizen können. Die Stufe B zeigt eine Drei-Walzen-Paar-Anordnung, die Flächendrucke von 15 bar und mehr zuläßt und dadurch eine sehr homogene Materialstruktur ermöglicht. Dabei bilden die Siebbänder auf der mittleren Walze einen Umschlingungswinkel von 180°, sodaß bei entsprechender Zugspannung auf die Siebbänder ein Flächendruck auf die Anmelzmasse ausgeübt werden kann. Prüfergebnisse zeigen, daß die hierdurch erzielten mechanischen und physikalischen Stoffeigenschaften mindestens den Stoff- und Eigenwerten gleichen, wie sie bei herkömmlichen Fertigungsmethoden unter Anwendung eines Extruders mit einer hydraulischen Formenpresse zu erwarten sind.

Hierzu ist anzumerken, daß der Kooperationspartner Doppelbandpressen in Leichtbauweise herstellt, die Flächendrucke zwischen den Druckplatten von ca. 0,3 bar nur zulassen. Höhere Flächendrucke von z. B. 15 bar erfordern eine sehr schwere, teure Bauausführung, die eine um den Faktor 10 - 20 höhere Investitionssumme für die Bandpresse erfordert. Die 3-Walzen-Anordnung, bei der der hohe Flächendruck von biegesteifen Walzen aufgefangen wird bei günstiger Kraftver-

verteilung auf die Transportbänder und beherrschbaren Achsdrücken, stellt eine sehr wirtschaftliche Alternative zur Schwermaschinenausführung dar.

In der Stufe C befindet sich die Kühlzone, in der überschüssige Wärme aus der ausgeformten Kunststoffmasse abgeführt werden kann. Die Siebbänder gleiten dabei zwischen den Kühlplatten entlang, wobei die oberen Kühlplatten mit einem stufenlos einstellbaren Flächendruck auf die unteren fest eingebauten Kühlelemente einwirken. Die dabei entstehenden Reibkräfte zur Überwindung der Plattenkräfte werden von den Bandantriebsmotoren aufgebracht. Die Stufe D zeigt den oberen und unteren Bandantriebsmotor mit den Untersetzungsgetrieben. In der Stufe E wird die fertiggepreßte Platte abgelenkt und auf Paletten gestapelt. Die Abbildungen 12 und 13 zeigen die betriebsbereite Gesamtanlage, wobei in Abb. 12 die Produktauslaufseite und in Abb. 13 der Einlaufteil des Reaktors zu erkennen ist.

3.4.6.3 Zusammenfassung der technischen Daten für die Gesamtanlage

Die geometrische und energetische Ausgestaltung der Demonstrationsanlage basiert auf der Markterfahrung des Kooperationspartners. Dabei wird erwartet, daß die Anlage den größten Teil des technischen Anforderungsprofils der Anwender erfüllen kann.

Die technischen Daten der Gesamtanlage, bestehend aus Anschmelzreaktor und Thermofix-Anlage sind nachstehend aufgelistet. Dabei ist anzumerken, daß die Leistungsangaben nur Mittelwerte sind und anwendungsbedingt in großen Größen schwanken können:

Nutzbreite B_N :	1200 [mm] Kleinere Nutzbreiten sind durch einfache technische Umbauten möglich
Anströmlänge Reaktor L_R :	1040 [mm]
Heizmediumtemperatur δ_L :	130 [°C] bis 270 [°C]
Mittlere Heizzeit t_H :	15 [s]
Materialschütthöhe h_K :	5 [mm] bis 15 [mm]



Anschmelzreaktor (linke Bildseite hinten) der betriebsbereiten Gesamtanlage (Blick aus Richtung Produktauslauf)

Abb. 12



**Anschmelzreaktor der betriebsbereiten
Gesamtanlage (Blick aus Richtung Produkteinlauf)**

Abb. 13

Mittlere Anströmgeschwindigkeit des gasförmigen Wärmeträgers v_L :	10 - 40 [m s ⁻¹]
Bandgeschwindigkeit v_B :	2 - 40 [m min ⁻¹]
Materialdurchsatz m :	bis 5000 [kg/h ⁻¹]
Heiz-Gasvolumen V_L :	30.000 [m ³ h ⁻¹]
Heizleistung N_R :	220 [kW]
Heizgaspression:	ca. 5000 [Pa]
Baulänge Anschmelzreaktor mit Streuvorrichtung:	4.390 [mm]
Gesamtlänge der Anlage:	10.700 [mm]
Bauhöhe:	2.680 [mm]
Gesamtbreite:	3.170 [mm]

3.5 Ökologische, technologische und ökonomische Bewertung der Vorhabensergebnisse

3.5.1 Ökologische Bewertung des Vorhabens

Bei der ökologischen Bewertung des Vorhabens soll zunächst ein Vergleich zwischen dem erforderlichen Energiebedarf für das Anschmelzverfahren und dem herkömmlichen Aufschmelzverfahren im diskontinuierlich arbeitenden Pressenbetrieb aufgezeigt werden:

1. Aufschmelzen des Granulates im Extruder mit anschließender Formgebung in der Plattenpresse.
2. Anschmelzen des Granulates im Reaktor, Pressenbefüllung und Formgebung.

In beiden Verfahren wird das Polymere unter Druck ausgeformt und abgekühlt, wobei die Randbereiche der entstehenden Platte beim Aufschmelzverfahren beheizt bleiben müssen, um eine freie Schwindung des Formteiles außerhalb des Randbereiches zu vermeiden.

Beide Fertigungsmethoden arbeiten bei diesem Vergleich diskontinuierlich, sodaß bei jedem Arbeitszyklus das schwere Formwerkzeug selbst aufgeheizt und anschließend mit der Polymermasse wieder abgekühlt werden muß.

Im folgenden konkreten Rechenbeispiel werden folgende realistische technische und energetische Werte angenommen:

Masse des Formwerkzeuges:	1.800 [kg]
Maße Fertigteil (Polymer):	1200 x 1200 x 45 [mm ³]
Masse Fertigteil (Polymer):	60 [kg]
Energiebedarf Polymer (Extruder):	720 [kJ kg ⁻¹]
Energiebedarf Polymer (Anschmelzen):	264 [kJ kg ⁻¹]
Extruderdurchsatz:	200 [kg h ⁻¹]

Danach errechnet sich der Energiebedarf für beide Verfahren, wie in Tabelle 1 angegeben:

Aufschmelzverfahren	Energiebedarf Polymer (Polypropylen)		Formpresse		Energiebedarf Formpresse	
	pro kg	gesamt	Kühlzeit	Temperaturbereich	pro kg Form u. grd	gesamt
Aufschmelzzeit im Extruder 1080 sec für 60 kg	720 kJ	43200kJ	100 min	20°C-220°C	0.461 kJ	165960kJ
Anschmelzverfahren Anschmelzzeit: 40 sec für 60 kg	264 kJ	15840kJ	15 min	100-130°C	0,461 kJ	24894 kJ

Tabelle 1

Der Gesamtenergiebedarf beträgt danach zur Herstellung einer 1200x1200x45 [mm³] Polymerplatte nach dem Aufschmelzverfahren 209.160 [kJ] und nach dem Anschmelzverfahren 40734 [kJ]. Dieses ergibt einen Energieeinsparfaktor EF_d im diskontinuierlich arbeitenden Betrieb von $EF_d = 5,13$.

Eine zusätzliche Umweltbelastung des Anschmelzverfahrens durch Wärmeemissionen, Gas oder Dämpfe sind nicht zu erwarten. Der geringere Energiebedarf für das neue Verfahren reduziert auch wesentlich die Emission von Oligomeren, wie sie beim Durchschmelzverfahren bei Thermoplasten zu beobachten ist. Als Ergebnis bleibt, daß der reduzierte Energiebedarf eine Umweltentlastung bewirkt, ganz abgesehen vom geringeren Material- und Energieaufwand zur Herstellung der Kunststoffplatten nach dem Anschmelzverfahren.

3.5.2 Technologische Bewertung des Vorhabens

Ein Vorteil des Anschmelzverfahrens gegenüber herkömmlichen Fertigungsmethoden zeichnet sich ab in der Leichtbauweise für die Doppelbandpressentechnik, da die erforderlichen Verformungskräfte zur Herstellung homogener Materialstrukturen durch Einführung der 3-Walzentechnik, siehe Abschnitt 3.4.6.2, gut aufzufangen sind.

Jede Krafteinleitung über Druckplatten auf die Transportbänder bzw. auf die auszuformende Polymerplatte in einer Doppelbandpresse erfordert eine hohe Zugkraft auf die Bänder zur Überwindung der Reibungskräfte und ein robustes Pressengestell, um diese Kräfte abzufangen. Bei dem 3-Walzenbetrieb hingegen werden die Druckkräfte durch eine resultierende Lagerkraft kompensiert. Diese Lagerkraft ist durch den Einbau eines stabilen Lagergerüsts gut beherrschbar.

Der wesentliche Vorteil der in diesem Vorhaben gewählten Technologie des Energieeintrages gegenüber dem Wärmeleitungsprinzip wird deutlich bei der Gegenüberstellung der zulässigen Bandgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Plattendicke, siehe Bilder 3 in Abb. 1 und Abb. 2. Bei der Wärmeübertragung nach dem Leitungsprinzip ist der Anwender gezwungen, für bestimmte Plattendicken die zugehörige geringe Bandgeschwindigkeit einzuhalten und nicht zu überschreiten. Gesetze der Thermodynamik für die Wärmeleitung schreiben den Zusammenhang zwischen Plattendicke und Abzugsgeschwindigkeit vor. In Bild 3, Abb. 2, ist der Anwender von dieser Einschränkung praktisch befreit, da für das Durchströmungsverfahren im zulässigen Schütthöhenbereich zwischen 5 mm und

25 mm die erforderlichen Heizzeiten sich nur geringfügig ändern. Es ändert sich zwar mit zunehmender Plattendicke bzw. Massendurchsatz pro Zeiteinheit die erforderliche Wärmemenge für den Ansmelzvorgang, allerdings bei vernachlässigbarem zeitlichen Mehraufwand.

Allerdings ist die maximale bei diesem Verfahren herzustellende Plattendicke auf 15 mm begrenzt wegen des anwachsenden Strömungswiderstandes des Heizgases in der Schüttung. Diese Einschränkung kann durch ein Tandemverfahren, in dem zwei oder mehrere Reaktoren parallel arbeiten, überwunden werden. Der in der Praxis inzwischen bestätigte Verfahrensvorteil eröffnet für den Anwender neue Anwendungsmöglichkeiten.

3.5.3 Ökonomische Bewertung Ansmelzverfahren

Für die ökonomische Bewertung sollen die folgenden Merkmalbeschreibungen die vergleichweisen Vorteile des Ansmelzverfahrens gegenüber dem herkömmlichen kontinuierlichen Fertigungsverfahren in der Doppelbandpresse dokumentieren:

3.5.3.1. Energieeinsparfaktor EF

Wie bei der ökologischen Bewertung des Vorhabens nach Abschnitt 3.5.1, in dem die vergleichsweise Energieeinsparung für diskontinuierlich arbeitende Anlagen gezeigt werden konnte, so läßt sich auch eine Energieersparnis des Vorhabens gegenüber der herkömmlichen Aufschmelztechnik in der Doppelbandpresse nachweisen. Danach beträgt die erforderliche Ansmelzenergiemenge im Ansmelzreaktor $\delta_i = 264 \text{ [kJ kg}^{-1}\text{]}$. Für die Aufschmelzzone einer Bandpresse werden von Pressenherstellern ein Energiebedarf, auch unter Berücksichtigung der Wärmeverluste im Bereich der Heizplatten $\delta_{iD} = 890 \text{ [kJ kg}^{-1}\text{]}$ angegeben. Der Energieaufwand für die schnell abzuführende Wärmemenge beim Durchschmelzverfahren beträgt für die erforderlichen Kühl- und Pumpeneinrichtungen $\delta_{iab} = 330 \text{ [kJ kg}^{-1}\text{]}$ nach Herstellerangaben. Wenn in erster Näherung beim Ansmelzverfahren von einer kalorischen Mitteltemperatur im Werkstück von $100 \text{ [}^\circ\text{C]}$ ausgegangen wird, dann beträgt die abzuführende Wärmemenge auf eine Endtemperatur von $50 \text{ [}^\circ\text{C]}$

jetzt $\delta_{iB} = 100 \text{ [kJ kg}^{-1}\text{]}$. Danach läßt sich im Vergleich der beiden kontinuierlich arbeitenden Fertigungsverfahren ein Energiesparfaktor **EF** definieren in der Form

$$\mathbf{EF} = \frac{\delta_{iD} + \delta_{iab}}{\delta_i + \delta_{iB}} = \frac{890 + 330}{264 + 100} = \mathbf{3,35} \quad (3)$$

3.5.3.2. Materialausstoß pro Zeiteinheit

Neben der Energieeinsparung zeigt für das Verfahren ein Vergleich der Bilder 3 in Abb. 1 und Abb. 2, daß der Anwender des neuen Anschmelzverfahrens im Vergleich zu herkömmlichen Techniken im Plattendickenbereich zwischen 2 mm und 12 mm bei der Wahl der Bandgeschwindigkeit, d. h. Materialaustragsmenge pro Zeiteinheit, bei einer vorhandenen neuen Anschmelzanlage nicht mehr von der Materialdicke der Kunststoffplatte abhängig ist. Dadurch ist der Anwender der neuen Technik befreit von technologischen Einschränkungen seiner Produktionsanlage und kann damit schneller auf Marktanforderungen reagieren und die Wirtschaftlichkeit seines Betriebes verbessern.

3.5.3.3. Bewertung der Maschineninvestition

Die gemeinsam mit dem Kooperationspartner entwickelte Bandpressentechnik für den Anschmelzreaktor läßt eine vergleichsweise kurze und leichte Bauweise der Anlagentechnik zu, die zu einer erheblichen Einsparung des Investbedarfs führt.

Die Höhe des Investitionsbedarfes hängt von der jeweiligen Leistungsvorgabe des Investors ab und soll hier nicht näher quantifiziert werden. Vergleichszahlen mit Konkurrenzangeboten, die auf Basis des Durchschmelzverfahrens arbeiten, belegen allerdings die Aussage über eine spürbare Reduktion des Investbedarfes mindestens um den Faktor 2 bis 3.

3.5.4 Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse

Es besteht zwischen dem Bewilligungsempfänger und dem Kooperationspartner Fa. TPS in Göppingen eine Vertragsvereinbarung, wonach die Fa. TPS das Nutzungsrecht für die Verwertung des Anschmelzverfahrens in der Doppelbandpres-

senttechnik erhält. Beide Partner entscheiden gemeinsam für die Vergabe der Nutzungsrechte an Dritte. Es sei dazu angemerkt, daß für das Anschmelzverfahren inzwischen ein Europapatent angemeldet und auch erteilt wurde. Für den Fall, daß der Kooperationspartner als Verfahrensanwender ausfallen sollte, geht das Nutzungsrecht uneingeschränkt an den Erfinder (Dr. Werner Neu Verfahrenstechnik GmbH) zurück. Die Fa. TPS ist vertriebstechnisch weltweit aktiv als Fachfirma zur Herstellung von Produktionsanlagen für Kunststoffplattenware anerkannt, sodaß eine breite Anwendung der neuen Verfahrenstechnik im Markt erwartet wird. Messe- und Vortragspräsentationen sowie Informationsblätter werden für potente Anwender in der Fa. TPS zur Zeit vorbereitet. Erste Kundenkontakte sind bereits auf dem TPS-Messestand auf der DOMOTEX 2009 in Hannover eingeleitet worden.

Die Entwicklungsarbeiten beider Vertragspartner reduzierten sich bisher auf die kontinuierliche Plattenherstellung und nicht auf die Fertigung stab- und rohrförmiger Kunststoffteile, wie es im Titel der Vorhabensbeschreibung angegeben ist. Die bisherigen Arbeitsergebnisse ermöglichen aber eine Übertragung auf die Fertigung von stab- bzw. rohrförmigen Produkten. Diese kann durch Einbau eines Rohrfördererelementes am Ausgang des Reaktors technisch umgesetzt werden. In einer Hausmesse soll bereits im Frühjahr dieses Jahres die fertiggestellte Versuchsanlage dem Anwenderpublikum vorgestellt werden.

4.0 Fazit

Die im Hauptteil zusammengefaßten Entwicklungsergebnisse zeigen, daß die neue Fertigungstechnik für die industrielle Anwendung aufbereitet ist und gegenüber herkömmlichen Produktionsverfahren erhebliche Vorteile in ökologischer, technologischer und ökonomischer Sicht bietet.

Aus thermodynamischer Sicht nutzt das neue Verfahren lediglich die Tatsache aus, daß die meisten industriell eingesetzten Polymere schlechte Wärmeleitungseigenschaften haben. Dieses läßt in einem kurzen Zeitfenster die Möglichkeit zu, die Granülen oberflächlich anzuschmelzen ohne daß der Kernbereich sich dabei wesentlich erwärmt. Bei der Ausformung des Granulathaufwerkes kommt es dann zu einem inneren Temperatenausgleich, wobei die dabei erreichte kalorische Mitteltemperatur nach kurzer Standzeit eine Entformung des Werkstückes zuläßt. Das Anschmelzverfahren eignet sich besonders für kontinuierlich ablaufende Arbeitsprozesse in der Herstellung von Kunststoffteilen, insofern ist die Kooperation mit einem Doppelbandpressenhersteller eine gute Voraussetzung für die Verfahrensanwendung. Das Verfahren wird aber eingeschränkt durch die Vorgabe, daß die Granülen ein bestimmtes Korngrößenspektrum aufweisen müssen. Staub- oder Kleinstanteile im Polymeren stören den Prozeß und müssen durch Absiebung vor der Verarbeitung entfernt werden. Aus heutiger Sicht ist es möglich, auch Schaumstrukturen in Kunststoffplatten herzustellen, deren nachhaltige isolierende Wirkung in vielen Anwendungsbereichen, besonders bei der Wärme- und Schalldämmung, heute sehr vorteilhaft eingesetzt werden können. Hierzu muß allerdings das Reaktorprinzip neu gestaltet werden, was einem möglichen weiteren Förderprojek vorbehalten bleiben soll.

5.0 Literaturverzeichnis

- [BRA 71] Brauer, H. Grundlagen der Einphasen- und Mehrphasenströmungen, Verlag Sauerländer, Aarau und Frankfurt (M), 1971
- [DP 98] Vorrichtung zur Herstellung von plattenförmigen Kunststoffteilen, Deutsche Patent-Nr.: P 4022 582; Januar 1998
- [EP 07] Verfahren und Vorrichtung zur Herstellung von Formteilen aus Kunststoff, Europapaten-Nr.: EP 1504868 A1, Oktober 2007
- [Neu 99] Neu, W. Verfahren zur Herstellung von Kunststoff-Formteilen aus oberflächlich angeschmolzenen Kunststoffgranulat (Vorstudie), DBU-Bericht, Juni 1999; AZ 04881
- [Neu 05] Neu, W. Verfahren zur Herstellung von Kunststoff-Formteilen aus oberflächlich angeschmolzenem Kunststoffgranulat - Bau einer mobilen Versuchs- und Demonstrationsanlage, DBU-Bericht, Mai 2005, AZ 21331
- [VDI 97] VDI-Wärmeatlas: Instationäre Wärmeleitung in ruhenden Körpern, VDI-Verlag, Düsseldorf, 8. Auflage 1997