

TPS TechnoPartner Samtronic GmbH
Göppingen

**Auslegung und Herstellung einer energiesparenden
Produktionsanlage für die thermische Behandlung
von Kunststoffen zur kontinuierlichen Herstellung
homogener oder schaumstrukturierter Formteile**

Abschlussbericht über das Entwicklungsprojekt
gefördert unter dem AZ 27952/02-21/2
von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Bernhard H. Voith und Dr.-Ing. Werner Neu

Göppingen im Oktober 2013

II Inhaltsverzeichnis

	Seite
I	Projektkennblatt
II	Inhaltsverzeichnis
III	Verzeichnis von Bildern, Zeichnungen, Graphiken und Tabellen
IV	Verzeichnis von Begriffen
1.	Zusammenfassung 8
2.	Einleitung 9
3.	Hauptteil 12
3.1	Projektierungsarbeiten 12
3.2	Berechnungsarbeiten 14
3.2.1	Ermittlung der erforderlichen Energiemenge, der Heizzeit und des zeitlichen Temperaturanstiegs in einer PVC-Granu- latschüttung, die nach dem Wärmeleitverfahren (WLV) zu einer Platte verarbeitet wird 15
3.2.1.2	Aufheizvorgang 16
3.2.1.3	Temperaturverlauf in der Schüttung 17
3.2.2	Berechnung des Energiebedarfs, der Heizzeit und der notwendigen Heißluftmenge zur Herstellung einer PVC-Platte nach dem Strömungsumkehrverfahren (SUV) 19
3.2.2.1	Berechnung des Massendurchsatzes 20
3.2.2.2	Erforderliche Wärmeleistung 20
3.2.2.3	Heißluftvolumenbedarf 21
3.2.2.4	Ermittlung der Reaktorlänge auf der Grundlage der erforderlichen Heißluftumlaufmenge 21
3.2.2.5	Zeitlicher Temperaturverlauf an der Oberfläche und im Mittelpunkt eines Granulatkorner in der Schüttung 22
3.2.2.6	Berechnung der Wärmeübergangszahl 23
3.2.3	Gegenüberstellung des gesamten Leistungs- bzw. Energie- bedarfs für das Wärmeleitverfahren (WLV) bzw. für das Strömungsumkehrverfahren (SUV) 28
3.2.3.1	Wärmeleitverfahren 28

3.2.3.2	Strömungsumkehrverfahren SUV	29
3.2.4	Ermittlung des Druckverlustes in der Granulatschüttung beim Strömungsumkehrverfahren	30
3.2.5	Einfluss der Bandgeschwindigkeit auf die Anlagenaus- legung für das SUV bzw. WLW	31
3.2.6	Labyrinthströmung	32
3.3	Konstruktionsarbeiten	33
3.4	Versuche und Versuchsauswertungen	39
3.4.1	Bildliche Darstellung der Herstellung einer WPC-Platte	39
3.4.2	Prüfergebnisse: Mechanische Materialeigenschaften von 4 untersuchten Polymeren	43
3.5	Bewertung der Ergebnisse im Hinblick auf die ursprüngliche Zielsetzung	44
3.5.1	Störungsfreier Betrieb	45
3.5.2	Aufteilung der Anschmelzvorrichtung in zwei Einzelstrecken	45
3.5.3	Vergrößerung des mittleren Stromfadens in der Schüttung	46
3.5.4	Beherrschung des Staubanteils im Polymergemisch	46
3.5.5	Systemvergleich Siebbandverfahren (SBV) – Strömungsumkehrverfahren (SUV)	46
3.6	Ökologische, technologische und ökonomische Verfahrensbewertung	47
3.6.1	Ökologische Verfahrensbewertung	47
3.6.1	Technologische Bewertung des Vorhabens	48
3.6.3	Ökonomische Bewertung des Vorhabens	49
4.	Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse	51
5.	Fazit	52
6.	Literaturverzeichnis	54

III Verzeichnis von Bildern, Zeichnungen, Graphiken und Tabellen

		Seite
Abb. 1	Gegenüberstellung der Verfahren zur kontinuierlichen Plattenherstellung aus thermoplastischen Materialien	12
Abb. 2	Seitenansicht der Anschmelzvorrichtung für das Strömungsumkehrverfahren (SUV)	13
Abb. 3	Herstellung einer PVC-Platte in einer Doppelbandpresse nach dem Wärmeleitverfahren (WLV)	15
Abb. 4	Berechnung des zeitlichen Temperaturverlaufes in der Mitte einer Granulatschüttung zur Herstellung einer 4,1 [mm] PVC-Platte nach dem WLV	18
Abb. 5	Prinzipskizze des Strömungsumkehrverfahrens in einer Doppelbandpresse	19
Abb. 6	Instationäre Wärmeleitung in ruhenden Körpern	25
Abb. 7	Zeitlicher Temperaturverlauf an der Oberfläche δ_o [°C] und im Kern δ_m [°C] einer Granüle aus PVC im Heißluftstrom des Strömungsumkehrverfahrens (SUV)	26
Abb. 8	Vergleich der Temperaturverläufe in der Haufwerksmitte einer Granulatschüttung beim Wärmeleitverfahren (WLV) bzw. Strömungsumkehrverfahren (SUV)	27
Abb. 9	Düsenrohr mit Heißgasaustrittsöffnung und Lamellenband	33
Abb. 10	Längsschnitt der Anschmelzvorrichtung SUV mit Lamellenleiste	34
Abb. 11	Querschnitt Anschmelzvorrichtung SUV	35
Abb. 12	Seitenabdichtung des Transportbandes in Anschmelzvorrichtung SUV	36
Abb. 13	Systemvergleich Anlagenaufbau für Wärmeleitverfahren WLV und Strömungsumkehrverfahren SUV	37
Abb. 14	Draufsicht Lamellenband in Anschmelzvorrichtung SUV	38

Abb. 15	Verteilung des WPC-Agglomerates auf dem Transportband	39
Abb. 16	WPC-Schüttgut auf dem Transportband zwischen Streuer und Anschmelzvorrichtung (SUV)	40
Abb. 17	Düsenrohr mit Venturileiste und vertikal verstellbarem Lamellenband	40
Abb. 18	Angeschmolzenes Agglomerat am Ausgang der Anschmelzvorrichtung (SUV)	41
Abb. 19	WPC-Rohplatte nach der Press- und Ausformstufe	42
Abb. 20	Ausform- und Pressverfahren zur Herstellung einer Formplatte	42
Abb. 21	Mechanische Materialeigenschaften von Plattenproben aus der Versuchsanlage (SUV)	43
Tabelle 1	Zeitlicher Temperaturverlauf in der Plattenmitte nach Fourier und Laplace beim Wärmeleitverfahren	17
Tabelle 2	Zeitliche Änderung der Oberflächentemperatur und der Kerntemperatur eines Einzelkornes im Granulathaufwerk	24
Tabelle 3	Vergleich der notwendigen Energiemengen für das WLW und SUV in Abhängigkeit von der Bandgeschwindigkeit	31
Tabelle 4	Gegenüberstellung der Kostenstruktur für WLW und SUV	50

IV

Verzeichnis von Begriffen, Abkürzungen und Definitionen

EF [-]	Energieeinsparfaktor des Strömungsumlenkverfahrens gegenüber dem Wärmeleitverfahren
Δi [kWs kg ⁻¹]	Wärmebedarf für das Wärmeleitverfahren
Δi_A [kws kg ⁻¹]	Wärmebedarf für das Strömungsumkehrverfahren
ρ_P [g cm ³]	Dichte des untersuchten Polymers
c_P [kWs kg ⁻¹ grd ⁻¹]	Spezifische Wärme des Polymers
λ_K [W m ⁻¹ grd ⁻¹]	Wärmeleitfähigkeit des Einzelkorns
h_K [mm]	Granulatschütthöhe
d_K [mm]	Mittlerer Granulatkorndurchmesser
a [m ² h ⁻¹]	Temperaturleitzahl des Polymers
h_B [mm]	Transportbanddicke
v_B [mm min ⁻¹]	Transportbandgeschwindigkeit
α_a [W m ⁻² grd ⁻¹]	Wärmeübergangszahl
$Nu = \frac{\alpha_a \cdot d_\varphi}{\lambda_L}$ [-]	Nusseltzahl
$Re = \frac{v_{L\varphi} \cdot d_\varphi}{\nu_L}$ [-]	Reynoldszahl
$Pe = \frac{v_{L\varphi} \cdot d_\varphi}{a}$ [-]	Pecletzahl
$Pr = \frac{\nu_L}{a_L}$ [-]	Prandtlzahl
$Fo = \frac{a \cdot t}{r_k^2}$ [-]	Fourierkennzahl
$Bi = \frac{\alpha_a \cdot r_k}{\lambda_k}$ [-]	Biotzahl
δ_L [°C]	Temperatur des Heißgases
δ_o [°C]	Ausgangstemperatur der Granulatschüttung
δ_m [°C]	Zeitabhängige mittlere Temperatur der Granulatschüttung

Weitere Begriffe, Abkürzungen oder Definitionen sind jeweils textnah erläutert.

1. Zusammenfassung

Wir fertigen Doppelbandpressen zur kontinuierlichen Herstellung von Kunststoffplatten aus thermoplastischen Polymeren. Dabei wird das als Granulat vorliegende Ausgangsmaterial zwischen Transportbändern gelagert, die ihrerseits an Heizplatten entlang gleiten, so dass die notwendige Wärmemenge zum Aufschmelzen der Granülen nach dem Wärmeleitungsprinzip zugeführt werden kann. Seit mehreren Jahren beschäftigen wir uns gemeinsam mit unserem Kooperationspartner der Dr. Werner Neu Verfahrenstechnik GmbH mit der Vorstellung, anstelle der Wärmeleitung, nur ein oberflächliches Anschmelzen der Granülen durch einen strömenden Wärmeträger zu erreichen. Im nachfolgenden Pressvorgang wird das angeschmolzene Granulat homogen verdichtet und es tritt ein Wärmeaustausch in jedem Einzelkorn ein, so dass das Pressteil schnell entformt werden kann. Dieses energiesparende Verfahren haben wir zunächst durch den Einsatz von Siebbändern eingeführt, zwischen denen das Polymergranulat in der Doppelbandpresse durch einen Heißgasstrom quer zur Bandlaufrichtung beaufschlagt wurde mit dem Nachteil, dass die Siebbänder bei Verwendung von Alt-kunststoffen mit geringer Schmelzviskosität oftmals verschmutzen. Unter Beibehaltung der Anschmelztechnik entwickelten wir jetzt mit dem Strömungsumkehrverfahren eine Methode, die die Verarbeitung aller uns bekannten Thermoplaste als Neuware oder als Recyclat zulässt. Bei diesem Verfahren wird das Granulat auf einem geschlossenen Unterband abgelegt und senkrecht von oben über ein Lamellenband mit einem Heißgas durchströmt, welches beiderseits der Düsenrohre nach oben wieder abgeführt wird. Die Versuchsergebnisse in unserer Versuchs- und Demonstrationsanlage mit 1200 [mm] Nutzbreite zeigen, dass es uns gelungen ist, ein sehr energiesparendes Fertigungsverfahren zur Herstellung von Kunststoffplatten zu erarbeiten. Es ermöglicht dem Anwender auch, den Massendurchsatz infolge des zügigen Temperatúrausgleichs im ausgeformten Polymerhaufwerk in seiner Produktionsanlage zu erhöhen. Mit der Entwicklung des Strömungsumkehrverfahrens streben wir darüberhinaus an, durch die Kopplung einer Heißluft- mit einer Heißdampfstrecke in der Anschmelzvorrichtung chemische Reaktionsprozesse in der Produktzusammensetzung (z. B. Naturfaserstoffe und Bindemittel) einzuleiten, um verbesserte mechanische bzw. physikalische Materialeigenschaften im kontinuierlichen Fertigungsprozeß erreichen zu können. Hierzu sind bereits Kontakte mit Anwendern hergestellt worden, deren Produkte, wie z. B. die Fertigung hochfester Plattenware, für dieses Verfahren geeignet erscheinen.

Die Durchführung der bisher geleisteten Entwicklungsarbeiten wurde uns durch die finanzielle Unterstützung der **Deutschen Bundesstiftung Umwelt, Osnabrück, unter dem AZ 27952/02-21/2** ermöglicht. Hierfür möchten wir uns herzlich bedanken.

2. Einleitung

Auf der Grundlage mehrjähriger Entwicklungstätigkeit im Labor- und Technikumsmaßstab ist es uns gelungen, ein Verfahren zur Herstellung von Platten aus thermoplastischen Kunststoffen zu erarbeiten, das der herkömmlichen Fertigungsweise technisch, ökologisch und ökonomisch überlegen ist. Eine Voraussetzung für unser Vorhaben war die von uns entworfene Doppelbandpressentechnik in Leichtbauweise, die eine kontinuierliche Plattenproduktion erlaubt. Dabei wird auf dem laufenden Unterband der Doppelbandpresse das zu verarbeitende Polymergranulat durch eine von uns entwickelte Streutechnik aufgetragen, anschließend von einem mitlaufenden Oberband abgedeckt und durch eine Heizstrecke geführt. In der Heizstrecke befinden sich auf der Unterseite des Unterbandes und auf der Oberseite des Oberbandes stationär angeordnete Heizplatten, deren Wärmefluss das Granulat zunächst über punktförmigen Kontakt zwischen den Förderbändern vollständig aufschmilzt. Anschließend wird die Schmelzmasse zwischen den Bändern durch Presswalzen ausgeformt und in einer angeschlossenen Kühlstrecke abgekühlt, danach entformt und in einer Trennvorrichtung als Platte abgelenkt und gestapelt. Diese bisherige Fertigungsweise, auch Wärmeleitverfahren genannt, wird heute noch weltweit auch von unseren Mitbewerbern praktiziert.

Zusammen mit unserem Kooperationspartner Dr. Werner Neu Verfahrenstechnik GmbH konnten wir in der Vergangenheit aber zeigen, dass es ausreicht, durch eine konvektive Wärmeübertragung in einem Heißgas- oder Heißdampfstrom nur die Oberflächen des Kunststoffgranulates in der Schüttung anzuschmelzen statt jedes Einzelkorn vollkommen aufzuschmelzen. Dieses setzt voraus, dass die bisher geschlossenen Förderbänder in der Doppelbandpresse durch eine Siebbandkonstruktion ausgetauscht werden müssen, um einen freien Durchgang des strömenden Wärmeträgers im Haufwerk zu ermöglichen. Zwischenzeitlich haben wir mehrere Fertigungsanlagen verkauft, die nach diesem Anschmelzprinzip arbeiten und die Anwender konnten unsere Versuchsergebnisse bestätigen, wonach je nach Plattendicke die Produktionsgeschwindigkeit in der Doppelbandpresse sich um den Faktor 6 bis 10 steigern lässt und im Vergleich zum bisherigen Wärmeleitverfahren ein Energieeinsparfaktor vom 3,35 erreicht wird.

Äußerst nachteilig ist allerdings die Vorgabe, dass nur Neuware als Polymergranulat zu verarbeiten ist, da Recycling-Kunststoffe wegen ihrer je nach Alterung und thermischen Abbaugrades schwankenden Schmelzeviskosität sich schnell bei Erwärmung partiell verflüssigen können und daher eine Verstopfung der Siebbänder nicht auszuschließen ist. Ferner ist die Verarbeitung von Polymerschäumen eingeschränkt, da die unter Zugspannung stehenden

Siebbänder dem Anwachsen der Schaumstruktur senkrecht zur Förderrichtung nicht spannungsfrei folgen können. Die Zielsetzung unseres Vorhabens war daher, eine verfahrenstechnische Lösung zu finden, die auch den Einsatz von Gebrauchtkunststoffen als Plattenmaterial und die Herstellung von schaumstrukturierten Dämmstoffen ermöglicht, ohne die Wirkungsweise der Anschmelztechnik einzuschränken. Dieses bedeutet, dass das Konvektionsprinzip der Wärmezufuhr durch ein strömendes Medium einzuhalten bleibt. In Vorversuchen im Labormaßstab wurde dazu das Strömungsumkehrverfahren (SUV) untersucht [Neu 11] und es zeigte sich, dass dieses bei Einhaltung bestimmter Versuchsparameter wie Granulatschütthöhe, Heißgasströmungsgeschwindigkeit und Heißgasführung im Labormaßstab möglich ist. Dabei werden die beiden Siebbänder in der Doppelbandpresse ersetzt durch ein geschlossenes Unterband zur Aufnahme des Kunststoffgranulates. Anstelle des Oberbandes soll eine feststehende Lamellenkonstruktion das Heißgas aus den oberhalb der Polymerschüttung angeordneten Heizrohren (Venturileisten) senkrecht in das Polymerhaufwerk einführen und den Rückstrom beidseitig an den Venturileisten vorbei nach oben wieder abführen, also umlenken. Das Lamellenband besteht aus senkrecht angeordneten Metallstegen, die in vertikaler Richtung den Heißgasstrom parallel ausrichten und in horizontaler Richtung die Strömungsgeschwindigkeit oberhalb der Haufwerkoberfläche entsprechend einer Labyrinthdichtung auf ein Minimum reduzieren. Am Ende dieser Anschmelzstrecke, in der das Granulat unabhängig von der Schichthöhe, gleichmäßig angeschmolzen werden soll, wird ein geschlossenes Oberband zugeführt, sodass die Anschmelzmasse in einer angeschlossenen Ausformstrecke, entsprechend dem Wärmeleitverfahren, zu einer homogenen Platte gepresst werden kann. Zur Zielsetzung gehört es ebenfalls, dass durch den Zuström eines Heißgases auf die freiliegende Oberfläche der Granulen diese nicht verwirbelt wird, da hierdurch die gewünschte planparallele Plattenstruktur beeinträchtigt werden kann.

Die Aufgabenstellung des Entwicklungsvorhabens umfasst daher, wie im Projektkennblatt beschrieben, vier Arbeitsschritte, deren erfolgreiche Lösung es dem Anwender der Anschmelztechnik ermöglicht, durch Einführung des Strömungsumkehrverfahrens die marktgängigen thermoplastischen Polymere, Polymermischungen und als Mahlgut oder Agglomerat vorliegende Gebrauchtkunststoffe oder Bioplaste uneingeschränkt verarbeiten zu können.

In der Projektierungsphase sollen die bisher im Labormaßstab ermittelten Versuchsergebnisse auf eine Versuchs- und Demonstrationsanlage mit einer Arbeitsbreite von 1200 [mm] übertragen werden. Dabei wird die Anschmelzvorrichtung aufgeteilt in eine Fixierstrecke, in der durch das Heißgas mit geringer Strömungsgeschwindigkeit nur die obere Granulat Kornlage angeschmolzen und damit gegenüber dem Gasstrom „fixiert“ wird und eine nachgeschaltete

Heizstrecke mit erhöhter Strömungsgeschwindigkeit des Heißgases zur gleichmäßigen oberflächlichen Aufheizung der gesamten Schüttung. Wesentlich für die Auslegung ist die gute Justierbarkeit der Heißgaszuführung sowie eine leichte Montage und Demontage der Heizgasdüsen und Lamellenelemente im Falle einer Anlageninspektion.

Der zweite Arbeitsplanungsschritt beschreibt die mechanische, strömungstechnische und thermodynamische Auslegung der Versuchsanlage. Hierzu gehört die Auslegung der Ventilatoren, um die erforderliche Heißgasmenge pro Zeiteinheit gleichmäßig durch die Vorrichtung zu transportieren und die Berechnung des Wärmetauschers. Das Heißgas soll zur Vermeidung von Druckverlusten möglichst wirbelfrei der Polymerschüttung zugeführt und auch wieder abgeführt werden. Die thermodynamische Berechnung umfasst den instationären Temperaturverlauf in der Einzelgranüle in der Schüttung unter Berücksichtigung der Fourier- und Laplace-Ansätze für den Wärmefluss in ruhenden Körpern. Gleichzeitig ist vorgesehen, den zeitlichen Wärmeübergang beim herkömmlichen Wärmeleitungsverfahren dem Strömungsumkehrverfahren gegenüberzustellen. Auf diese Weise kann der technische und wirtschaftliche Vorteil der neuen Anschmelztechnik dem Anwender verdeutlicht werden. Eine weitere Berechnung soll die Heißgasmenge ermitteln, die ungenutzt im Spalt zwischen Granulatoberfläche und Labyrinthdichtung entweicht und damit dem Anschmelzprozeß verloren geht.

Ein dritter Planungsarbeitsschritt umfasst die Erstellung der Konstruktionszeichnungen und die Auslegung der erforderlichen Vorrichtungen und Hilfsantriebe für den Anlagenaufbau mit dem Ziel, die Versuchsanlage betriebs- und anwendungssicher zu gestalten.

Der vierte Arbeitsschritt Versuche und Versuchsauswertungen bildet die Basis für die Gestaltung der anwenderbezogenen Produktionsanlage. Hierbei sind die Versuchsparameter Polymerart, die Zusammensetzung der Polymergemische, Treibmittelanteile und der Einfluss der Zusatzstoffe wie z. B. Faseranteile und Füllstoffe sowie der geforderte Massendurchsatz pro Stunde ausschlaggebend für die Anlagenauslegung. Zu den Versuchsarbeiten an der hergestellten Platte gehören ebenfalls die Prüfung der mechanischen und physikalischen Werkstoffeigenschaften wie z. B. Bruchfestigkeit, Dehnungsverhalten und Schlagzähigkeit in Abhängigkeit von der vom Kunden vorgegebenen Materialzusammensetzung.

Neben der Energiebilanz für die thermische Umformung des eingesetzten Materials, sowie eine Gegenüberstellung der Kostenbilanzen für den Einsatz des Strömungsumkehrverfahrens und des herkömmlichen Wärmeleitverfahrens bilden die Grundlage für eine gesicherte Auslegung für die zu vermarktende neue Anschmelzanlagentechnik.

3. Hauptteil

3.1 Projektierungsarbeiten

Die Einführung des Strömungsumlenkverfahrens (SUV) stellt die dritte Entwicklungsstufe im Produktionsprozeß zur kontinuierlichen Herstellung von Plattenware aus thermoplastischen oder bioplastischen Materialien dar. Die Prinzipskizzen in Abb. 1 sollen die Fertigungsmöglichkeiten zur Plattenherstellung verdeutlichen.

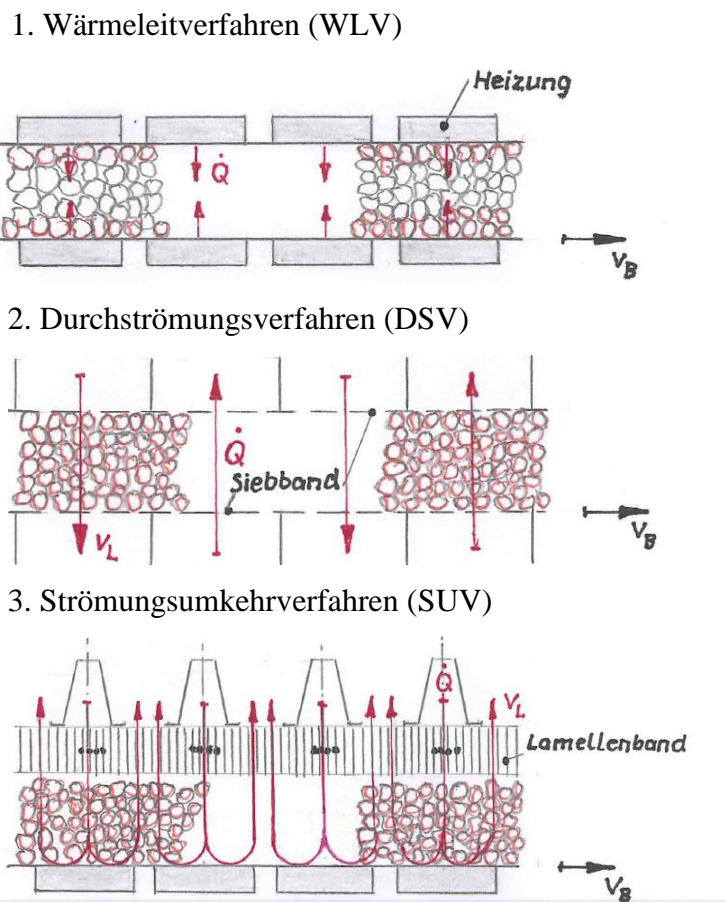


Abb. 1 Gegenüberstellung der Verfahren zur kontinuierlichen Plattenherstellung aus thermoplastischen Materialien

Der Wärmeeintrag im WLV erfolgt durch den zunächst punktförmigen Kontakt zwischen den Granülen in der Polymerschüttung. Während beim DSV ein Wärmeträger, im Regelfalle Heißluft, das Haufwerk wechselweise durchströmt, wird beim SUV das Heißgas vertikal der Schüttung zugeführt, durch das Lamellenband parallel ausgerichtet und anschließend zwi-

schen den Gaseintrittsöffnungen (Venturileisten) senkrecht wieder nach oben abgeführt. Das Lamellenband soll zusätzlich eine horizontale Querströmung oberhalb der Deckschicht der Granulatschüttung verhindern. Es ist vorgesehen, einstellbare Anstellwinkel α [grad] und β [grad] an den Lamellen im Zentraleinlauf einer jeden Eintrittsöffnung anzuordnen, siehe Abb. 9. Diese sollen die gleichmäßige Verteilung des Heißgases in der Schüttung verbessern. Unterhalb des Unterbandes führen Heizplatten dem Transportband und der Grenzschicht des Haufwerkes Wärme zu. In Abb. 2 wird die Heißgaszuführung über die ganze Nutzbreite der Anschmelzvorrichtung gezeigt.

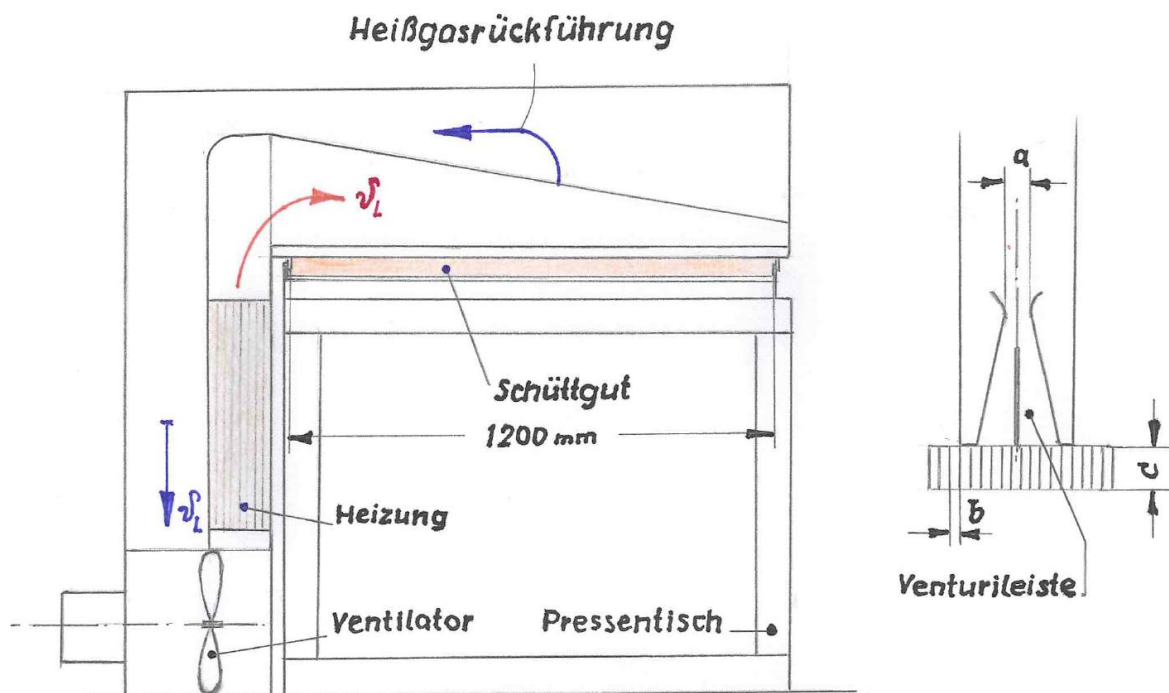


Abb.2 Seitenansicht der Anschmelzvorrichtung für das Strömungsumkehrverfahren (SUV)

Es handelt sich um eine keilförmige Rohrauslegung, die den Gasstrom über die Nutzbreite der Doppelbandpresse gleichmäßig verteilt. Zur Feinjustierung strömt das Heißgas durch eine venturiähnliche Austrittsöffnung (Venturileiste) am Ausgang des Heizrohres. Diese Venturileiste ermöglicht durch die Einstellung des oberen Leistenabstandes a [mm] über die ganze

Nutzbreite der Presse eine sehr genaue Einstellung der gleichmäßigen Heißgasverteilung. Die Überprüfung der örtlichen Gasgeschwindigkeit erfolgt über eine Flügelradmesssonde. In Vorversuchen ist ebenfalls das günstigste Länge/Breite-Verhältnis c/b im Lamellenband zu ermitteln, um eine ausgeprägte Parallelströmung im Heißgas bei geringem Druckverlust zu gewährleisten.

Das Heißgas strömt am Austritt durch die Granulatschüttung und des Lamellenbandes an den Heizrohren nach oben wieder ab, passiert einen Wärmetauscher, thermoölbeheizt, und wird von einem Druckgebläse wieder den Heizrohren (Venturileisten) zugeführt.

Die Projektierung der Arbeitslänge der Anschmelzvorrichtung richtet sich ausschließlich nach dem zeitlichen Massendurchsatz, der vom Anwender festgelegt wird. Für die Versuchs- und Demonstrationanlage wird ein Polymerdurchsatz von max. $5000 \text{ [kg h}^{-1}\text{]}$ vorgesehen. Die Auslegung des umlaufenden Heißgasvolumens $[\text{m}^3 \text{ h}^{-1}]$ und die installierte Heizleistung erfolgt ebenfalls kundenabhängig. In der projektierten Anlage sehen wir ein Gasvolumen von $60.000 \text{ [m}^3 \text{ h}^{-1}\text{]}$ und eine Heizleistung von 350 [kW] vor.

3.2 Berechnungsarbeiten

TPS-Doppelbandpressen werden heute zu einem großen Teil zur Herstellung von Kunststoff-Fußböden eingesetzt. Daher soll an einem konkreten Beispiel die Auslegung einer herkömmlichen, nach dem Wärmeleitungsprinzip (WLV) arbeitenden Anlage für die Produktion einer $1,5 \text{ [m]}$ breiten und $4,1 \text{ [mm]}$ dicken Fußbodenplatte auf PVC-Basis hinsichtlich Energiebedarf und notwendiger Heizzeit berechnet werden, wenn eine Band- oder Produktionsgeschwindigkeit von $6 \text{ [m min}^{-1}\text{]}$ vorgegeben ist. Unter Berücksichtigung derselben technischen Vorgaben sollen die Auslegungsdaten für eine Anschmelzvorrichtung, die nach dem Strömungsumkehrprinzip arbeitet, gegenübergestellt werden. Hierzu gehören die Berechnung des erforderlichen Energiebedarfs, die benötigte Heizzeit und Heißgasmenge sowie die Ermittlung der notwendigen Baulänge der Vorrichtung. Die folgenden Rechnungsgänge sind auf beliebig andere technische Vorgaben der Anwender wie z. B. Materialart, Durchsatzmenge, Plattendicke etc. übertragbar und für die Abwicklung eines Kundenauftrages auch erforderlich.

3.2.1 Ermittlung der erforderlichen Energiemenge, der Heizzeit und des zeitlichen Temperaturanstiegs in einer PVC-Granulatschüttung, die nach dem Wärmeleitverfahren (WLV) zu einer Platte verarbeitet wird.

Am Beispiel zur Herstellung eines Bodenbelages aus PVC-Granulat (4,1 [mm] Materialdicke) werden zur Berechnung der erforderlichen Energiemenge und des zeitlichen Temperaturverlaufs in der Granulatschüttung nach Abb. 1, Bild 1, folgende Ausgangsdaten angenommen:

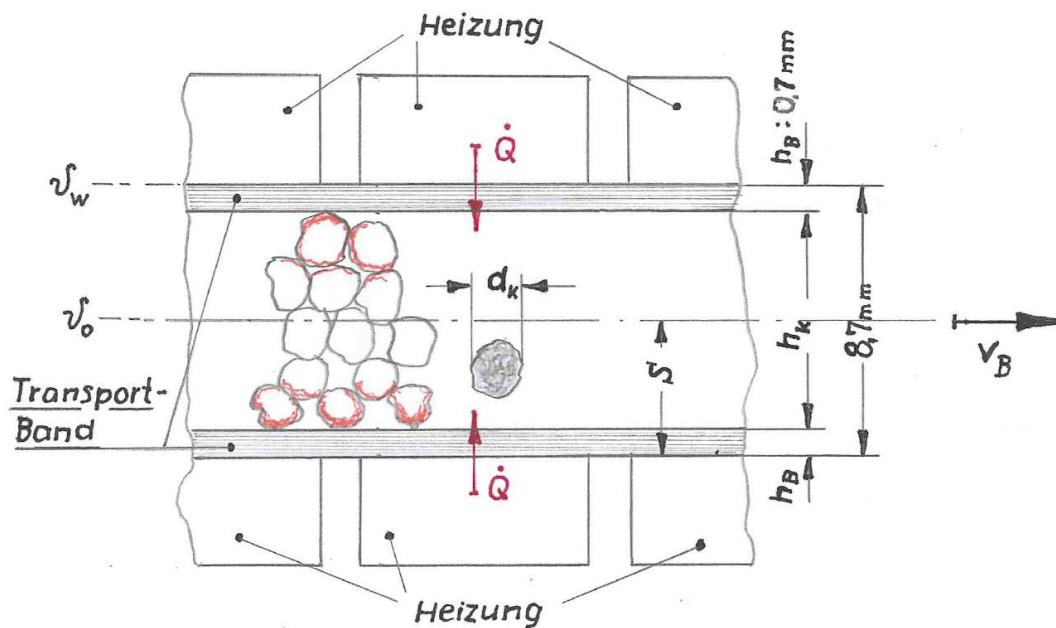


Abb. 3 Herstellung einer PVC-Platte in einer Doppelbandpresse nach dem Wärmeleitverfahren (WLV)

Mittlerer Granulatkorndurchmesser	$d_K : 4$ [mm]
Schütthöhe	$h_K : 7,3$ [mm]
Wärmebedarf für das Aufschmelzen	$\Delta i : 320$ [kWs kg^{-1}] [Ma 13]
Dichte PVC (gefüllt)	$\rho : 1,9$ [g cm^3]
Spezifische Wärme	$c_p : 1,2$ [kWs kg^{-1}]
Wärmeleitfähigkeit in der Schüttung	$\lambda : 0,2$ [W $m^{-1} grad^{-1}$]

Heizplattentemperatur	δ_w : 230 [°C]
Anfangs-Schüttguttemperatur in der Plattenmitte	δ_o : 20[°C]
Endplattendicke	h_p : 4,1 [mm]
Transportbanddicke	h_B : 0,7 [mm]

3.2.1.1 Temperaturleitzahl

Die Temperaturleitzahl a wird berechnet aus den o. a. Angaben:

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} [\text{m}^2 \text{h}^{-1}]$$
$$\mathbf{a = 3,16 \cdot 10^{-4} [\text{m}^2 \text{h}^{-1}]}$$

Hinweis: In erster Näherung werden bei der Berechnung der einzutragenden Energiemenge in das Schüttgut die Stoff- und Eigenwerte der Transportbänder (Glasgewebe, teflonisiert) mit denen von PVC gleichgesetzt.

3.2.1.2 Aufheizvorgang

Der Aufheizvorgang des Schüttgutes in der Plattenmitte wird zu dem Zeitpunkt beendet, in dem δ_2 die Schmelzetemperatur von ca. 210 [°C] erreicht hat. Nach dem mathematischen Ansatz der instationären Wärmeleitung in ruhenden Körpern folgt nach dem Start der Wärmeübertragung, d. h. zur Zeit $t \geq 0$ [s] nach Laplace:

$$\frac{\delta_1 - \delta_w}{\delta_o - \delta_w} = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{\sqrt{a \cdot t}}{s} = \mathbf{\theta_1} [-] \quad (1)$$

Hierin bedeuten δ_1 [°C] die Temperatur in der Schüttgutmitte zur Zeit t [s] und $s = 4,35$ [mm] der Abstand der Schüttgutmitte von den Heizplatten. Für längere Heizzeiten folgt nach der Fournier-Entwicklung für den Verlauf der Temperatur δ_2 [°C]:

$$\frac{\delta_2 - \delta_w}{\delta_o - \delta_w} = \frac{8}{\pi^2} \cdot e^{-A} = \mathbf{\theta_2} [-] \quad \text{mit} \quad A = \frac{\pi^2 \cdot a \cdot t}{4 \cdot s^2} [-] \quad (2)$$

Beide Kurvenzüge nach (1) und (2) lassen sich graphisch einander angleichen und geben für den Anlauf- und Ausgleichvorgang der Wärmeübertragung den tatsächlichen Temperaturverlauf sehr gut an.

Für das Argument $A = \frac{\pi^2 \cdot a \cdot t}{4 s^2}$ [-] werden die Werte für θ_1 und θ_2 in der folgenden Tabelle 1 berechnet:

$\pi^2 \cdot a \cdot t \cdot 4^{-1} \cdot s^{-2}$ [-]	t [s]	θ_1 [-]	θ_2 [-]	δ_1 [°C]	δ_2 [°C]
0	0	0,8106	1	59,8	20
0,04	8,62	0,7344	0,7743	75,8	67,4
0,16	34,48	0,5462	0,54,86	115,3	114,8
0,25	53,88	0,4374	0,4358	138,2	138,5
0,36	77,58	0,3336	0,3229	160	159,6
0,49	105,6	0,2419	0,2101	179,2	179
0,64	137,9	0,1671	0,0972	194,9	-
0,81	196,1	0,1098	-0,0155	206,9	-

Tabelle 1 Zeitlicher Temperaturverlauf in der Plattenmitte nach Fourier und Laplace beim Wärmeleitverfahren

3.2.1.3 Temperaturverlauf in der Schüttung

Die Abb. 4 zeigt den Temperaturverlauf in der Mitte der Granulatschüttung, aus der nach dem Pressvorgang eine 4,1 [mm] dicke PVC-Platte hergestellt wird. Die Messpunkte (in rot) zeigen die mit einer Temperaturmesssonde ermittelten Werte in unserem Technikum, ebenfalls in der Mitte eines Granulathaufwerkes zur Herstellung einer 4,1 [mm] dicken PVC-Platte. Im gesamten Messbereich weichen die Temperaturwerte um max. 10 [grd] ab, dieses zeigt, dass die gewählte Schütthöhe von $h_K = 7,3$ [mm] bei der Temperaturberechnung mit dem tatsächlichen Messwerten gut übereinstimmt.

Die in der Rechnung angenommene Schütthöhe h_K ist um den Faktor 2 größer als die tatsächlich Gemessene, sie berücksichtigt den Einfluss des geringeren Wärmeflusses durch Punktberührung der Granülen in der Schüttung. Diese Annahme hat sich bei der Untersuchung zahlreicher Polymerarten und Korngrößenverteilungen als praxistauglich erwiesen.

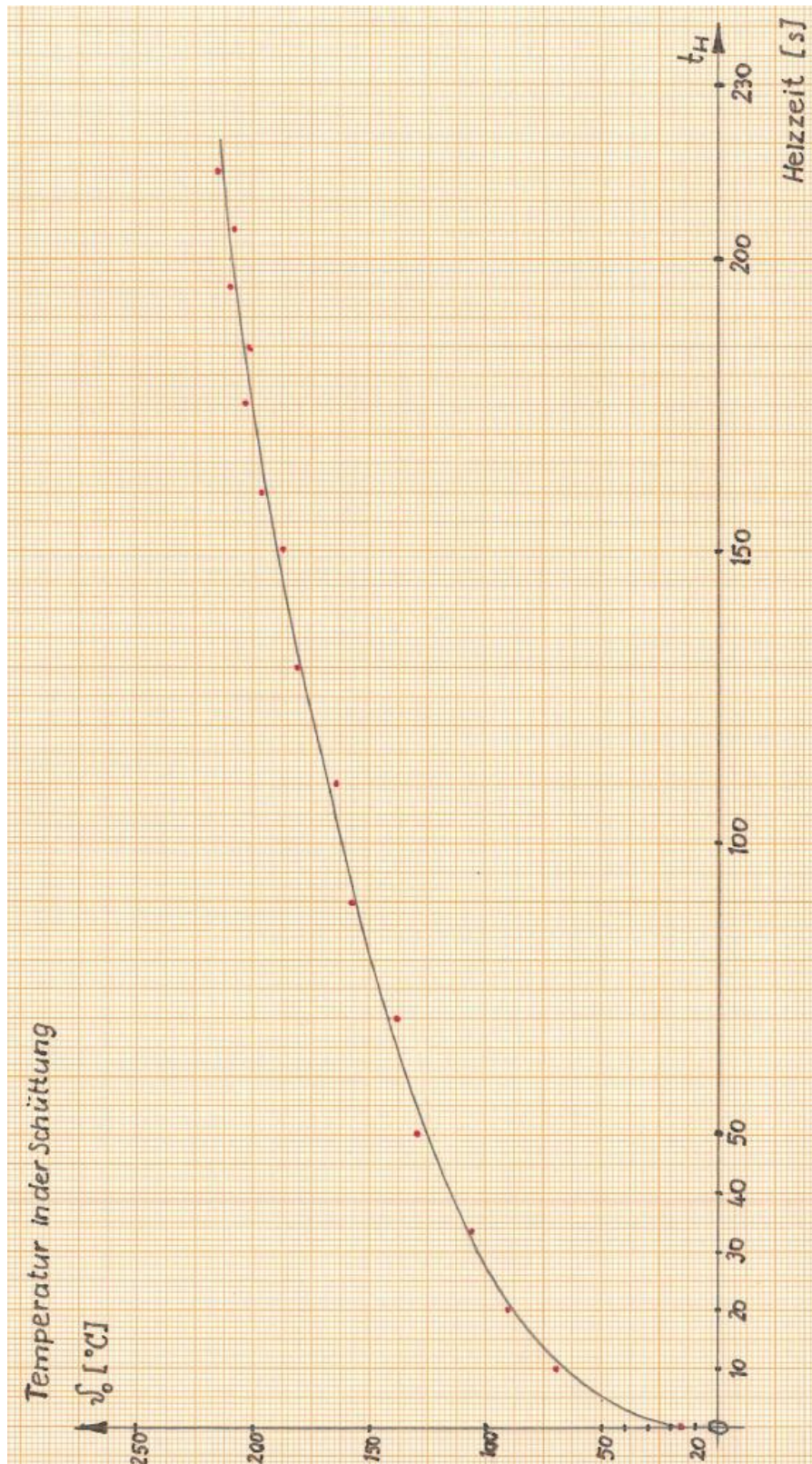


Abb. 4 Berechnung des zeitlichen Temperaturverlaufes in der Mitte einer Granulatschüttung zur Herstellung einer 4,1 [mm] PVC-Platte nach dem WL.V. Rote Messpunkte: Gemessene Werte in der Schüttgutmitte. Heizplattentemperatur 240 [°C]

3.2.2. Berechnung des Energiebedarfs, der Heizzeit und der notwendigen Heißluftmenge zur Herstellung einer PVC-Platte nach dem Strömungsumkehrverfahren (SUV).

Das Strömungsumkehrverfahren zeichnet sich nach Abb. 5 dadurch aus, dass das Heizmedium senkrecht in das anzuschmelzende Schüttgut geleitet wird und seitlich links und rechts vom Einströmkanal (Venturidüsen) durch ein Lamellenband wieder aus dem Schüttgut nach oben herausgeführt wird.

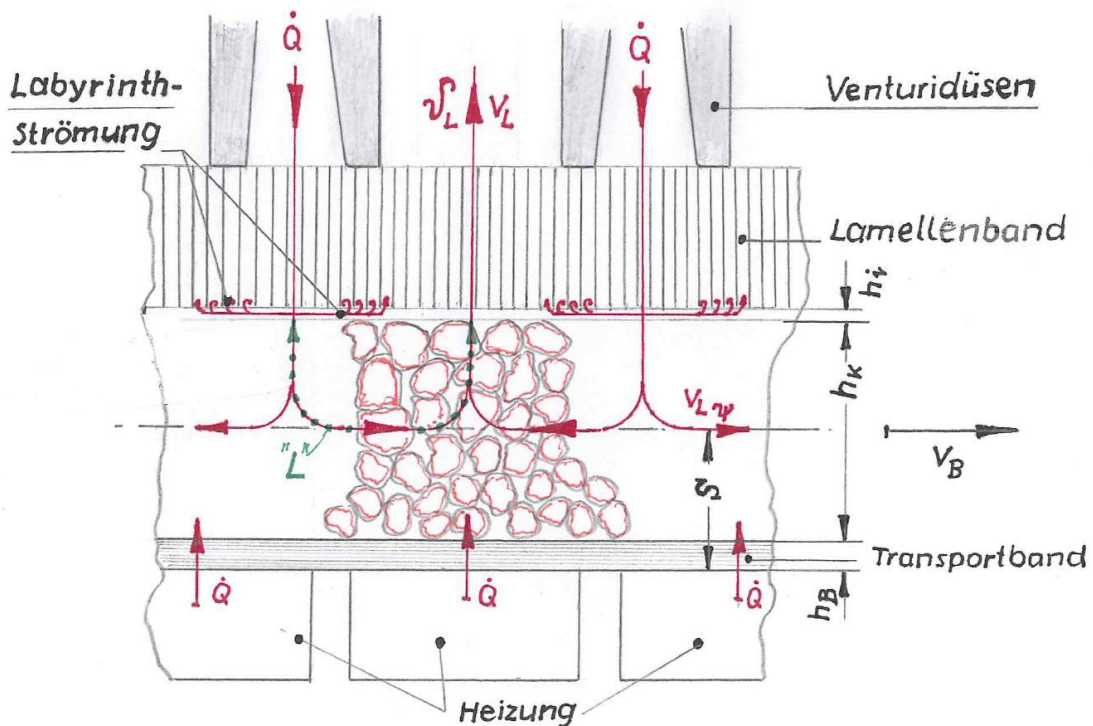


Abb. 5 Prinzipskizze des Strömungsumkehrverfahrens in einer Doppelbandpresse

Die Granulatgrenzschicht am Boden der Polymerschüttung und das geschlossene Transportband werden durch stationär angeordnete Heizplatten auf die Schmelztemperatur des Polymers erhitzt. Als Heizmedium wird Heißluft verwendet.

Die technischen Vorgaben und Stoffdaten entsprechen den Angaben für das Wärmeleitverfahren.

Polymerplattendicke	$h_p : 4,1 \text{ [mm]}$
Plattenbreite	$B : 1,5 \text{ [m]}$
Mittlerer Granulatkorndurchmesser	$d_K : 4 \text{ [mm]}$
Schütthöhe	$h_K : 8,7 \text{ [mm]}$
Wärmebedarf Anschmelzen, auf der Basis von Labormessdaten	$\Delta i_A : 160 \text{ [kWs kg}^{-1}\text{]}$
Dichte PVC (gefüllt)	$\rho_{PVC} : 1,9 \text{ [g cm}^3\text{]}$
Spezifische Wärme	$c_p : 1,2 \text{ [kWs kg}^{-1} \text{ grad}^{-1}\text{]}$
Wärmeleitfähigkeit	$\lambda : 0,2 \text{ [W m}^{-1} \text{ grad}^{-1}\text{]}$
Bandgeschwindigkeit	$v_B : 6 \text{ [m min}^{-1}\text{]}$
Erforderliche Temperaturerhöhung der Heißluft pro Umlauf	$\Delta \delta : 20 \text{ [grad]}$
Heißluftgeschwindigkeit vor der Schüttung	$v_L : 12 \text{ [m s}^{-1}\text{]}$
Heißlufttemperatur	$\delta_L : 240 \text{ [}^\circ\text{C]}$
Spezifische Wärme der Heißluft	$c_L : 1,055 \text{ [kWs kg}^{-1} \text{ grad}^{-1}\text{]}$

3.2.2.1 Berechnung des Massendurchsatzes \dot{m}_{PVC}

Es folgt für

$$\dot{m}_{PVC} = v_B \cdot B \cdot h_p \cdot \rho_{PVC} \text{ [kg s}^{-1}\text{]}$$

$$\dot{m}_{PVC} = 1,17 \text{ [kg s}^{-1}\text{]} \quad \text{oder}$$

$$\dot{m}_{PVC} = \mathbf{4206,6 \text{ [kg h}^{-1}\text{]}}$$

3.2.2.2 Erforderliche Wärmeleistung N_{erf}

$$N_{erf} = \dot{m}_{PVC} \cdot \Delta i_A \text{ [kW]}$$

$$N_{erf} = 1,17 \text{ [kg} \cdot \text{s}^{-1}\text{]} \cdot 160 \text{ [kWs kg}^{-1}\text{]}$$

$$N_{erf} = \mathbf{187,2 \text{ [kW]}}$$

$$\Delta i_A = 160 \text{ [kWs kg}^{-1}\text{]} \text{ oder } 50 \text{ [\%]} \text{ der}$$

benötigten Enthalpie für das Aufschmelzverfahren SLV nach Labormessdaten.

Wie zahlreiche Versuchsauswertungen

zeigen, werden statt 50 [%] der Gesamtenthalpie nur 35 [%] beim SUV benötigt.

Der Differenzbetrag gleicht bei der Reaktor- auslegung Verluste durch Strahlung und Konvektion aus.

Der Wärmeverlust des Transportbandes durch Strahlung und Konvektion bleibt aufgrund der Reaktorbauart hier unberücksichtigt und wird in Abschnitt 3.2.3.2 (Energiebedarfsvergleich) beschrieben.

3.2.2.3 Heißluftvolumenbedarf \dot{m}_L

Nach Herstellerangaben werden Lufterhitzeranlagen für Umluft für einen Temperaturabfall je Heißluftumlauf von $\Delta\delta = 20$ grad ausgelegt.

$$\dot{m}_L = \frac{N_{\text{erf}}}{C_L \cdot \Delta\delta}$$
$$\dot{m}_L = 8,87 \text{ [kg s}^{-1}\text{]} \quad \text{oder}$$
$$\underline{\dot{m}_L = 49.894 \text{ [m}^3 \text{h}^{-1}\text{]} \text{ bei } 240 \text{ [}^\circ\text{C]}.}$$

3.2.2.4 Ermittlung der Reaktorlänge L_R auf der Grundlage der erforderlichen Heißluftumlaufmenge

Es wird die Strömungsgeschwindigkeit der Heißluft v_L am Ausgang der Venturileisten aufgrund vorliegender Labordaten mit

$$v_L = 12 \text{ [m s}^{-1}\text{]} \text{ gewählt.}$$

Daraus ergibt sich für die Gesamtquerschnittsfläche A_q der Düsen:

$$A_q = \frac{V_L}{v_L} = \frac{49894}{12 \cdot 3600} \text{ [m}^2\text{]}$$
$$\underline{A_q = 1,155 \text{ m}^2}$$

Die Ausgangsbreite der Venturileisten wird mit $b = 45$ [mm] festgelegt, siehe Abb. 9, dass ergibt bei einer Länge von 1,5 [m] eine Querschnittsfläche a_q je Leiste:

$$a_q = B \cdot b \text{ [m}^2\text{]}$$
$$a_q = 1,5 \text{ [m]} \cdot 0,045 \text{ [m]}$$
$$\underline{a_q = 0,0675 \text{ [m}^2\text{]}}$$

Daraus folgt für die Anzahl der erforderlichen Venturileisten n :

$$n = \frac{A_q}{a_q}$$
$$\underline{n \cong 17}$$

Bei einem Düsenmittenabstand von 140 mm folgt für die Reaktorlänge L_R :

$$L_R = 16 \cdot 140 \text{ [mm]}$$
$$\underline{L_R = 2240 \text{ [mm]}}$$

3.2.2.5 Zeitlicher Temperaturverlauf an der Oberfläche und im Mittelpunkt eines Granulatkornes in der Schüttung

Es ist aus Versuchsreihen bekannt, dass beim Anschmelzverfahren bzw. Strömungsumkehrverfahren es ausreicht, nur die äußere Hülle eines Granulatkornes mit dem Durchmesser $d_K = 2r$ [mm] bis zum einem Radius $r_a = 0,8 \cdot r$ [mm] anzuschmelzen [Bra 71], um dennoch bei dem anschließenden Pressvorgang durch das Verfüllen der Lückenräume zwischen den Granülen ein homogenes Materialgefüge zu erhalten. Während der Pressstufe kommt es zu einem zügigen Wärmeaustausch zwischen schmelzflüssiger Oberfläche und „kaltem“ Kern in jedem Granulat Korn, sodass die Entformung nach wenigen Minuten und unabhängig von der Plattendicke erfolgen kann.

Aus dem zeitabhängigen Anstieg der Oberflächentemperatur δ_o [°C] und der Kerntemperatur δ_m [°C], siehe Abb. 7, kann man genau die Zeitspanne ablesen, nach der die Granülen im Bereich r [mm] und $r_a = 0,8 r$ [mm] die Schmelztemperatur erreicht hat. Der zeitliche Temperaturverlauf wird nach den Gesetzen der instationären Wärmeleitung in festen Körpern berechnet.

Danach muss zunächst die Wärmeübergangszahl α_a zwischen der Granülenoberfläche und der Heißluft als Energieträger berechnet werden. Aus der Ähnlichkeitstheorie folgt, dass die Abhängigkeit der Wärmeübergangszahl α_a von den sie beeinflussenden Größen sich durch folgende dimensionslosen Kenngrößen wiedergeben lässt:

Nusselt $Nu = \frac{\alpha_a \cdot d_\varphi}{\lambda_L} \quad [-]$

Hierin ist d_φ [mm] der hydraulische Durchmesser der Granüle im Haufwerk, $v_{L\varphi}$ [m s⁻¹] ist die Heißluftgeschwindigkeit in der Schüttung

Reynolds $Re = \frac{v_{L\varphi} \cdot d_\varphi}{\nu_L} \quad [-]$

Péclet $Pe = \frac{v_{L\varphi} \cdot d_\varphi}{a} \quad [-]$

Hierin bedeutet a [m² h⁻¹] Temperaturleitzahl nach 3.2.1.1

Prandtl (Luft) $Pr_L = \frac{\nu_L}{a_L} = 0,7055 \quad [-]$

3.2.2.6 Berechnung der Wärmeübergangszahl α_a

$$Re = \frac{v_{L\phi} \cdot d_\phi}{\nu_L} \quad [-]$$

Daraus

$$Re = 1296 \quad [-]$$

Danach ist

$$v_{L\phi} = \frac{v_L}{\phi} = 24 \quad [\text{m s}^{-1}]$$

und

$$d_\phi = \frac{d_K}{2} = 0,002 \quad [\text{m}]$$

$v_{L\phi}$ und d_ϕ sind abhängig von der Poro-

sität ϕ einer Granulatschüttung. Für

regellose Schüttung gilt: $\phi = 0,5 \quad [-]$,

$v_{L\phi} \quad [\text{m s}^{-1}]$ ist die mittlere Geschwindig-

keit der Heißluft im Haufwerk und

$d_\phi \quad [\text{mm}]$ der hydraulische Durchmesser des Einzelkorns.

ν_L : kinematische Zähigkeit der Heißluft bei $240 \quad [^\circ\text{C}]$

$\nu_L = 370 \cdot 10^{-7} \quad [\text{m}^2 \text{s}^{-1}]$ (Tabellenwert)

Die Wärmeübergangszahl α_a zwischen strömender Heißluft und Einzelkorn d_ϕ hängt von der Nusseltzahl Nu ab:

$$\alpha_a = \frac{Nu \cdot \lambda_L}{d_\phi} \quad [\text{W m}^{-2} \text{ grad}^{-1}]$$

Die Nusseltzahl setzt sich nach Gnielinski [Gnie 78] zusammen aus:

$$Nu = Nu_{\min} + \sqrt{Nu_{\text{lam}}^2 + Nu_{\text{turb}}^2} \quad [-]$$

Der Wert für Nu_{\min} wird mit $2 \quad [-]$ angenommen

Hierin ist Nu_{lam} :

$$Nu_{\text{lam}} = 0,664 \cdot \sqrt{Re} \cdot \sqrt[3]{Pr} \quad [-]$$

und

$$Nu_{\text{turb}} = \frac{0,037 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr}{1 + 2,443 Re^{-0,1} \cdot (Pr^{0,666} - 1)} \quad [-]$$

Daraus folgt für Nu und α_a :

$$Nu = 25,83 \quad [-]$$

$$\alpha_a = 517 \quad [\text{W m}^{-2} \text{ grad}^{-1}]$$

Mit den weiteren dimensionslosen Kenngrößen Fourierzahl $Fo \quad [-]$ und der Biotzahl $Bi \quad [-]$ für das einzelne Granulat Korn lassen sich die zeitabhängigen Temperaturen $\delta_o \quad [^\circ\text{C}]$ an der Oberfläche und $\delta_m \quad [^\circ\text{C}]$ im Kornmittelpunkt aus den Kurvendarstellungen für die instationäre Wärmeleitung in ruhenden Körpern aus dem VDI-Wärmeatlas [VDI 97] ermitteln, siehe Abb. 6. Danach beträgt die Fo -Kennzahl für das Einzelkorn

$$Fo = \frac{a \cdot t}{r_K^2} \quad [-]$$

mit a [$m^2 h^{-1}$] als Temperaturleitzahl,

siehe Abschnitt 3.2.1.1

t : Heizzeit [s]

$$Fo = 0,02 \cdot t \quad [s]$$

Biotzahl $Bi = \frac{\alpha_a \cdot r_K}{\lambda_K} \quad [-]$

$$Bi = 5,17 \quad [-]$$

In der Tabelle 2 sind für angenommene Fo-Zahlen von 0,001 bis 1,0 die Werte für die Bezugswerte θ_o [-] und θ_m [-] aus den VDI-Diagrammen [VDI 97] ermittelt worden. Daraus ergibt sich die Oberflächentemperatur δ_o nach dem Ansatz:

$$\delta_o = T_\infty - \theta_o (T_\infty - T_A) \quad [^\circ C] \quad T_\infty : \text{Heißlufttemperatur} \quad [^\circ C]$$

und $\delta_m = T_\infty - \theta_m (T_\infty - T_A) \quad [^\circ C] \quad T_\infty = 240 \quad [^\circ C]$

$$T_A : \text{Raumtemperatur} \quad [^\circ C]$$

$$T_A = 20 \quad [^\circ C]$$

$$\delta_m : \text{Kerntemperatur} \quad [^\circ C]$$

Die Kurvenverläufe für θ_o und θ_m sind aus Abb. 6 zuerkennen.

Fo	t [s]	θ_o	δ_o [$^\circ C$]	θ_m	δ_m [$^\circ C$]
0,001	0,04	0,83	57,4	1	20
0,01	0,45	0,58	112,4	1	21
0,05	2,3	0,32	170	0,98	24,4
0,07	3,2	0,28	178	0,95	31
0,10	4,5	0,19	198	0,82	60
0,2	9,1	0,1	218	0,53	130
0,3	13,7	0,05	229	0,3	174
0,4	18,2	0,03	233	0,1	185
0,5	22,7	0,02	235	0,05	215
0,7	31,8	~ 0	257	~ 0	234
1,0	45,5	~ 0	238	~ 0	236

Tabelle 2: Zeitliche Änderung der Oberflächentemperatur δ_o [$^\circ C$] und der Kerntemperatur δ_m [$^\circ C$] eines Einzelkornes im Granulathaufwerk

Der zeitliche Temperaturverlauf für ein Granulat Korn in der Schüttung ist in Abb.7 eingetragen.

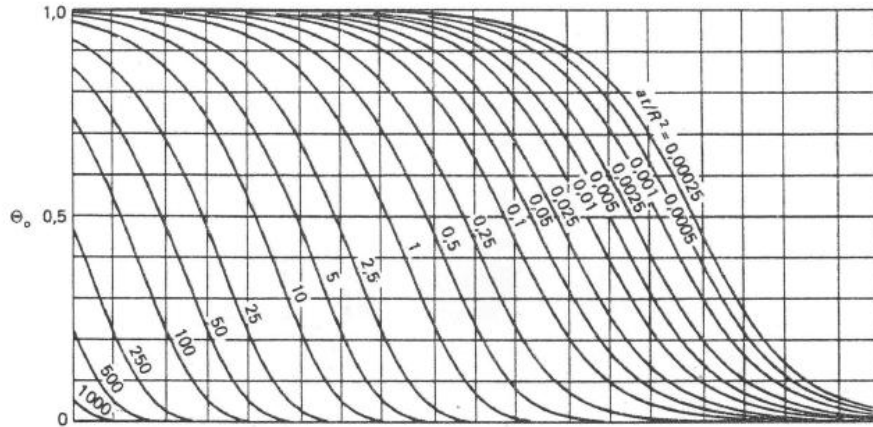


Bild 9. Normierte Temperatur θ_0 der Kugeloberfläche.

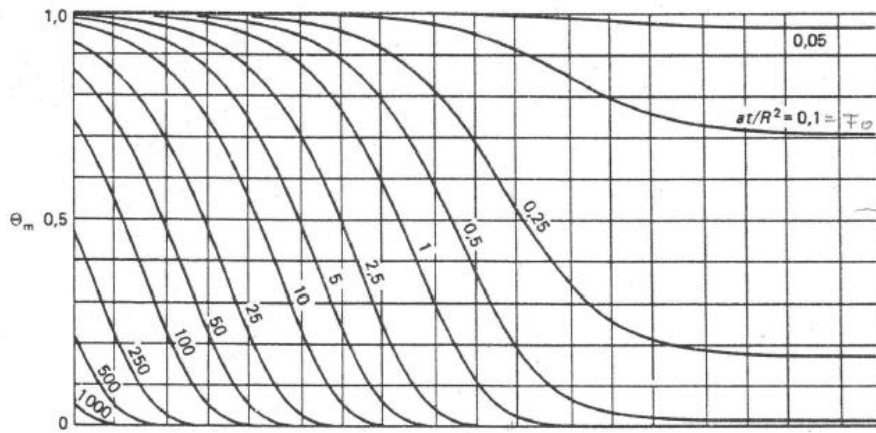


Bild 10. Normierte Temperatur θ_m des Kugelmittelpunktes.

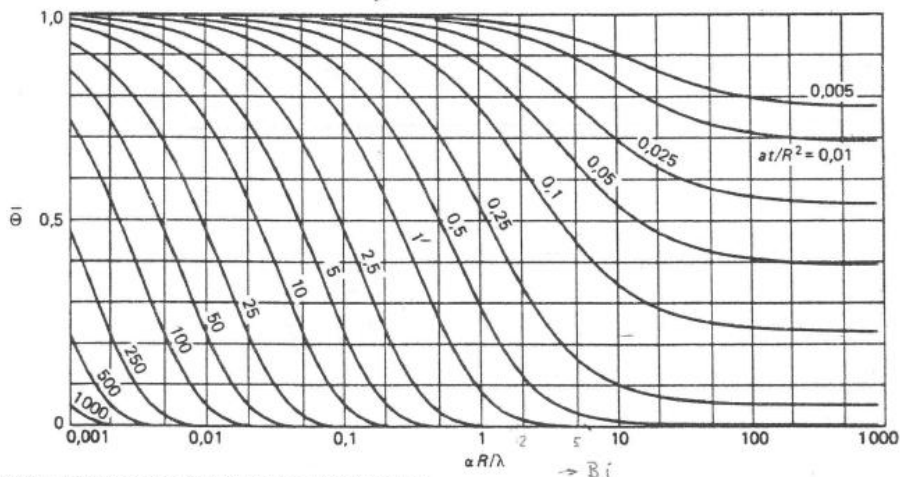


Bild 11. Normierte kalorische Mitteltemperatur $\bar{\theta}$ der Kugel.

Abb. 6 Instationäre Wärmeleitung in ruhenden Körpern

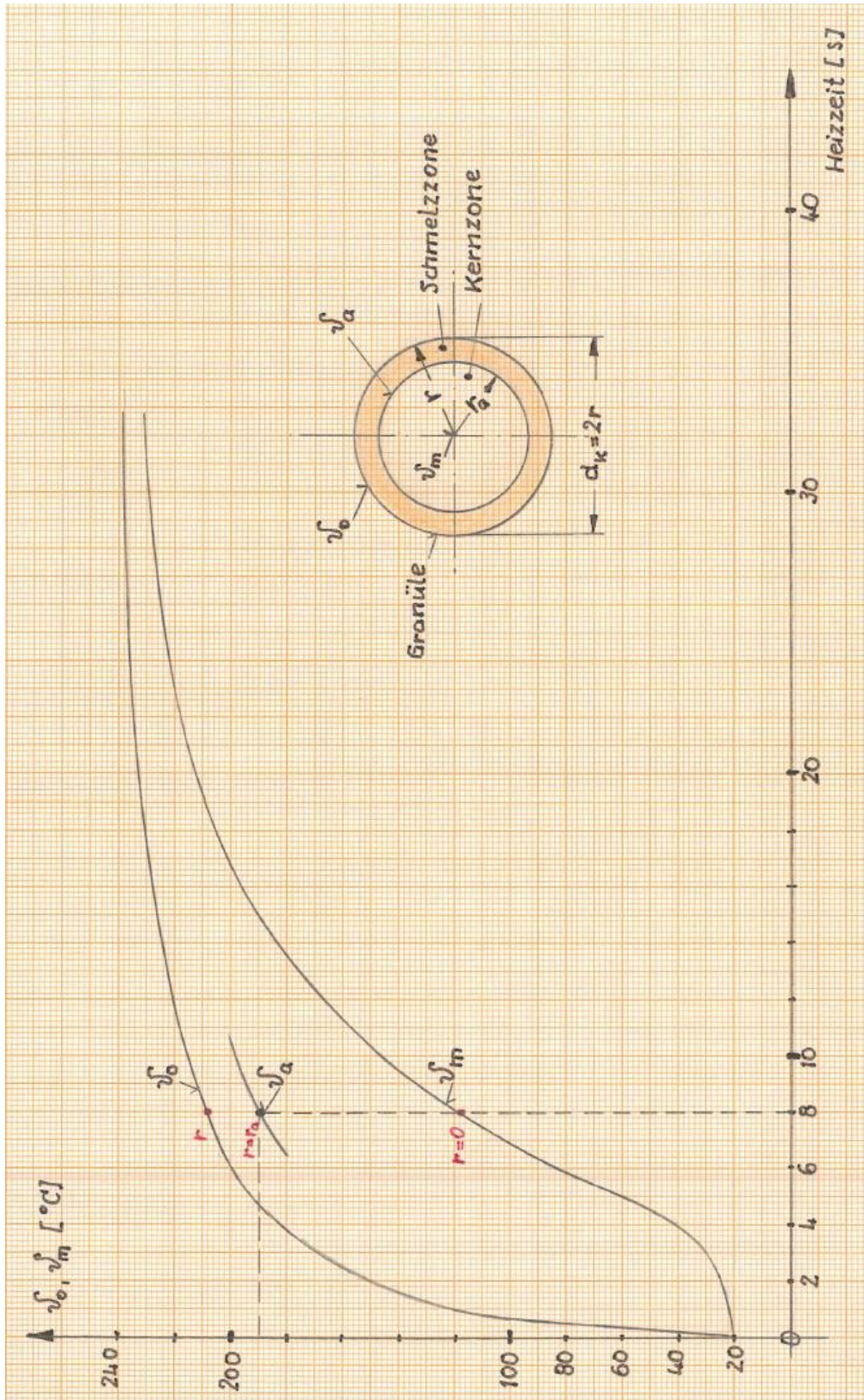


Abb. 7 Zeitlicher Temperaturverlauf an der Oberfläche δ_o [°C] und im Kern δ_m [°C] einer Granüle aus PVC im Heißluftstrom des Strömungsumkehrverfahrens (SUV) mit δ_a als Schmelzetemperatur an der Schmelzzonegrenze bei $r = r_a$ [mm]

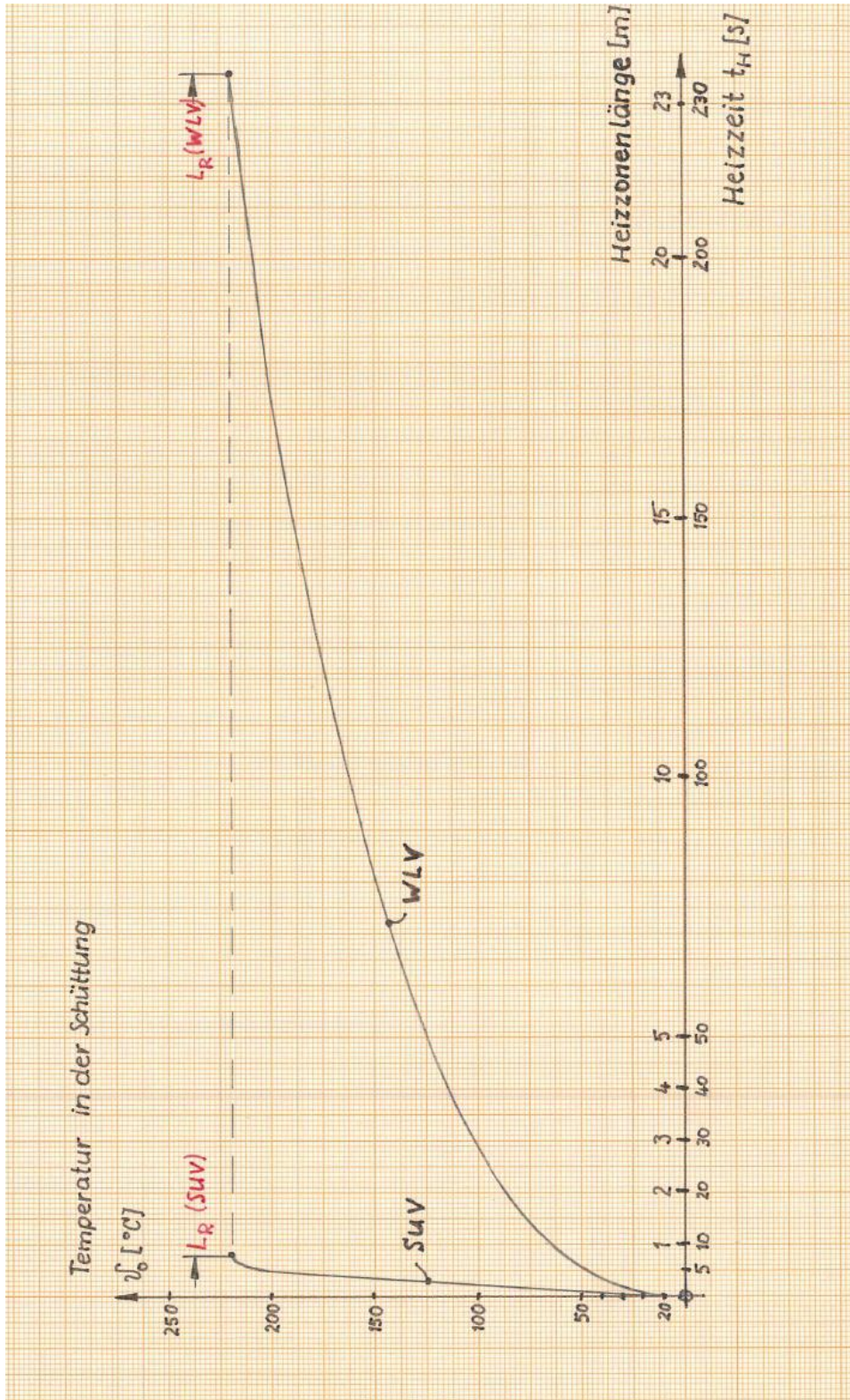


Abb. 8 Vergleich der Temperaturverläufe in der Haufwerkmitte einer Granulatschüttung beim Wärmeleitverfahren (WLW) bzw. Strömungsumkehrverfahren (SUV) zur Herstellung einer 4,1 [mm] dicken PVC-Platte in Abhängigkeit von der Heizzonenlänge L_R [m] bei einer Bandgeschwindigkeit von $v_B = 6$ [m/min⁻¹] und dem Einzelkorndurchmesser $d_K = 4$ [mm]

In der Abb. 8 sind die zeitlichen Temperaturverläufe für das Strömungsumkehrverfahren SUV und des Wärmeleitverfahrens WLV nach Abb. 7 bzw. Abb. 4 für eine Bandgeschwindigkeit $v_B = 6 \text{ [m/min}^{-1}\text{]}$ gegenübergestellt worden. Hierbei wird der Verfahrensvorteil des SUV gegenüber dem WLV sehr deutlich erkennbar.

3.2.3 Gegenüberstellung des gesamten Leistungs- bzw. Energiebedarfs für das Wärmeleitverfahren (WLV) bzw. für das Strömungsumkehrverfahren (SUV)

Bei der Berechnung des Gesamtleistungsbedarfes sind neben der Heizleistung für das Polymere auch die Erwärmung der Transportbänder und der Energieverlust durch Konvektion und Strahlung in der Anlage für beide Verfahren zu berücksichtigen.

3.2.3.1 Wärmeleitungsverfahren

Der Wärmebedarf Δi_1 für das Aufschmelzen des PVC-Granulates beträgt für 1 kg:

$$\Delta i_1 = 320 \text{ [kWs kg}^{-1}\text{]}$$

Der Massendurchsatz an PVC bei einer Bandgeschwindigkeit von $v_B = 6 \text{ [m/min}^{-1}\text{]}$ berechnet sich nach Abschnitt 3.2.2.1:

$$\dot{m}_{\text{PVC}} = 4206,6 \text{ [kg h}^{-1}\text{]}$$

Danach beträgt die Heizleistung N_1 :

$$N_1 = \dot{m}_{\text{PVC}} \cdot \Delta i_1 \text{ [kW]}$$

$$N_1 = 374 \text{ [kW]}$$

Neben der Heizleistung für das Granulat müssen auch die Transportbänder der Doppelbandpresse auf 240°C aufgeheizt werden.

$$N_2 = 2 \cdot B \cdot h_B \cdot v_B \cdot c_B \cdot \rho_B \cdot \Delta \delta \text{ [kW]}$$

$$N_2 = 132,3 \text{ [kW]}$$

Hierin bedeuten:

h_B : Bandstärke

h_B : 0,7 [mm]

c_B : spez. Wärme (mit PVC gleichgesetzt)

c_B : 1,2 [kJkg⁻¹ grd⁻¹]

ρ_B : spez. Gewicht des Bandes

ρ_B : 2,5 [g cm³]

Der Leistungsverlust N_3 durch Konvektion und Strahlung an den Transportbändern wird mit 15 [%] von N_1 angenommen (Erfahrungswert).

$$N_3 = 0,15 \cdot N_1 \text{ [kW]}$$

$$N_3 = \mathbf{56,1 \text{ [kW]}}$$

Daraus folgt für den Gesamt-Leistungsbedarf N_{ges} für das Wärmeleitungsverfahren zur Herstellung einer 4,1 [mm] PVC-Platte mit $v_B = 6 \text{ [m/min}^{-1}\text{]}$:

$$N_{\text{ges}} = N_1 + N_2 + N_3 \text{ [kW]}$$

$$N_{\text{ges}} = \mathbf{562,4 \text{ [kW] (WLV)}}$$

Der für 1 [kg] PVC-Granulat benötigte Energiebedarf Q_{ges} beträgt:

$$Q_{\text{ges}} = \frac{N_{\text{ges}}}{\dot{m}_{\text{PVC}}} = \frac{562,4}{4206,5} \text{ [kWh kg}^{-1}\text{]}$$

$$Q_{\text{ges}} = \mathbf{0,134 \text{ [kWh kg}^{-1}\text{] (WLV)}}$$

3.2.3.2 Strömungsumkehrverfahren SUV

Die notwendige Energiemenge für das Anschmelzen des Granulathaufwerkes erreicht nach Auswertung vorliegender Versuchsdaten nur 50 [%] des WLV-Bedarfs.

$$N_3 = 0,5 \cdot 320 \text{ [kW]}$$

$$N_3 = \mathbf{160 \text{ [kW]}}$$

Da beim SUV nur ein Transportband als Unterband in der Anschmelzvorrichtung benötigt wird, folgt für die Aufheizung des Bandes N_4 [kW]

$$N_4 = 0,5 \cdot N_2 \text{ [kW]}$$

$$N_4 = \mathbf{66,15 \text{ [kW]}}$$

Der Leistungsverlust durch Konvektion und Strahlung ist nach Abschnitt 3.2.2.2 bereits berücksichtigt. Danach beträgt der Leistungsbedarf

N_{ges} [kW]:

$$N_{\text{ges}} = \mathbf{226,15 \text{ [kW] (SUV)}}$$

Es folgt für den Energiebedarf Q_{ges} [kWh kg⁻¹]:

$$Q_{\text{ges}} = \mathbf{0,054 \text{ [kWh kg}^{-1}\text{] (SUV)}}$$

Danach errechnet sich der Einsparfaktor EF für das SUV gegenüber dem WLW:

$$EF = \frac{0,134}{0,054} = 2,5 \quad [-]$$

Das Strömungsumkehrverfahren SUV benötigt daher gegenüber dem Wärmeleitungsverfahren ein um den Faktor 2,5 geringeren Wärmebedarf. Bei der Verarbeitung von Polyolefinen (Polyethylen, Polypropylen oder deren Gemischen) erhöht sich der Faktor auf 3,35, wie die Versuchsauswertungen zeigen.

3.2.4 Ermittlung des Druckverlustes in der Granulatschüttung beim Strömungsumkehrverfahren

Die mittlere Weglänge L [mm] des Wärmeträgers Heißluft durch die Granulatschüttung zeigt Abb.5. Danach beträgt die mittlere Weglänge des Stromfadens L = 50 [mm].

Der Druckverlust ΔP [Pa] der laminaren Strömung in der Schüttung beträgt nach Schlünder [Schlü 82]:

$$\Delta P = \xi_{\text{lam}} \cdot \mu_{\text{lam}} \cdot \frac{L \cdot v_{\varphi}^2 \cdot \rho_L}{d_{\varphi} \cdot 2} \quad \text{in } [\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-2}]$$

Es bedeuten:

$v_{\varphi} = 24$ [m/s]	Heißluftgeschwindigkeit (Schüttung)
$\rho_L = 0,64$ [kg/m ³]	Heißluftdichte bei 240 [°C]
$d_{\varphi} = 0,002$ [m]	Hydraulischer Korndurchmesser
$\xi_{\text{lam}} = \frac{64}{\text{Re}} = 0,05$ [-]	Strömungsbeiwert
$\mu_{\text{lam}} = 2,76$ [-]	Bewegungsbeiwert regellose Schüttung

Daraus folgt für ΔP :

$$\begin{aligned} \Delta P &= 635 \text{ [kg m}^{-1} \text{s}^{-2}] \quad \text{oder} \\ \Delta P &= 0,0063 \text{ [bar]} \quad \text{oder} \\ \Delta P &= \mathbf{640 \text{ [Pa]}} \end{aligned}$$

Hinweis:

Das Heißluftgebläse in der TTC-Versuchsanlage erreicht eine Druckhöhe von 3000 [Pa].

3.2.5 Einfluss der Bandgeschwindigkeit v_B [$m \text{ min}^{-1}$] auf den Energiebedarf für das SUV bzw. WLW bei $h_P = 4,1$ [mm] und $h_B = 0,7$ [mm].

Die nachstehende Tabelle zeigt beispielsweise für die Herstellung einer 4,1 [mm] dicken PVC-Platte (1,5 [m] breit) einige Auslegungsdaten für beide Verfahren.

Grundsätzlich lassen sich für alle eingesetzten Materialien, Bandgeschwindigkeiten, Transportbandauslegungen und Plattendicken etc. Kennfelder berechnen und grafisch darstellen, um Basisdaten für eine erste Anlagenauslegung zu erhalten. In der Tabelle 3 sind für drei unterschiedliche Produktionsgeschwindigkeiten oder Bandgeschwindigkeiten für das WLW und SUV zusammengestellt.

Bandgeschwindigkeit [m/min]	4		6		8	
PVC-Plattendicke [mm]	4,1		4,1		4,1	
Massendurchsatz [t/h]	2,8		4,2		5,6	
Verfahrensart	WLW	SUV	WLW	SUV	WLW	SUV
Schmelzleistung [kW]	249	107	374	160	498	213
Bandverlust [kW]	88	44	132	66	176	88
Konvektionsverlust [kW]	56	--	56	--	56	--
Gesamtleistung [kW]	393	151	562	226	730	302
Heizlänge L_R [m]	15	1,50	22,5	2,24	30	3
Energiebedarf [kWh/kg]	0,125	0,054	0,134	0,054	0,14	0,054

Tabelle 3 Vergleich der notwendigen Energiemengen für das WLW und SUV in Abhängigkeit von der Bandgeschwindigkeit

Die Tabellenwerte zeigen für das Wärmeleitverfahren einen Anstieg des auf 1 [kg] Polymermaterial bezogenen Energiebedarfs. Dieses ist auf den Konvektionsverlust in der Anlage zurückzuführen, da die erforderliche Heizlänge L_R [m] von 15 [m] auf 30 [m] bei der Erhöhung der Bandgeschwindigkeit von 4 [$m \text{ min}^{-1}$] auf 8 [$m \text{ min}^{-1}$] ansteigt.

3.2.6 Labyrinthströmung

Das Lamellenband führt das Heißgas auf die Oberfläche der Granulatschicht in vertikaler Richtung und verhindert gleichzeitig einen Querstrom V_{Sp} [$m^3 h^{-1}$] des Wärmeträgers, der für das übrige Haufwerk ungenutzt bleibt. Die Abb. 5 zeigt den vertikalen und horizontalen Strömungsverlauf.

Nach Haas (Hs 06) und Traupel (Tr 01) folgt für die Spaltverlustgasmenge \dot{m}_{Sp} [$kg s^{-1}$]:

$$\dot{m}_{Sp} = A \sqrt{\frac{\Delta p \cdot \rho_L}{z}} \quad [kg s^{-1}] \quad A : \text{Freie Spaltquerschnittsfläche}$$
$$\dot{m}_{Sp} = 0,021 \quad [kg s^{-1}] \quad A = h_1 \cdot B \quad [m^2]$$

oder $\dot{m}_{Sp} = 37,8 \quad [kg h^{-1}] \quad h_1 : \text{Spalthöhe}$

oder $V_{Sp} = 59,1 \quad [m^3 h^{-1}] \quad h_1 = 1 \quad [mm]$

$$A = 0,015 \quad [m^2]$$

Δp : Gemessener Druckverlust zwischen
Düsenrohraustritt und Gasrückführ-
öffnung

$$\Delta p = 640 \quad [Pa]$$

Z : Lamellenanzahl (Versuchsanlage)

$$Z = 8$$

ρ_L : Gasdichte (Heißluft)

$$\rho_L = 0,64 \quad [kg m^{-3}]$$

In der Anschmelzvorrichtung sind 17 Venturileisten eingebaut. Daraus folgt für den Gesamtspaltverlust V_{ges} [$m^3 h^{-1}$]:

$$V_{ges} = V_{Sp} \cdot 34$$
$$V_{ges} = 2010 \quad [m^3 h^{-1}]$$

Bezogen auf die stündliche Gasumlaufmenge von $V_L \approx 50.000 \quad [m^3 h^{-1}]$ beträgt die Verlustrate 4 [%]. Eine Erhöhung der Lamellenzahl z würde den Verluststrom weiter reduzieren. In Laborversuchen konnten wir die Verlustströmung auf unter 3 [%] einstellen.

Die im Abschnitt 3.2 berechneten Basisdaten bilden die Grundlage für die in Abschnitt 3.3 beschriebene konstruktive Gestaltung der Versuchs- und Demonstrationsanlage.

3.3 Konstruktionsarbeiten

In diesem Abschnitt zeigen die Abb. 9 bis Abb. 14 Konstruktionsdetails über den technischen Aufbau der Strömungsumkehranlage.

Die Abb. 9 zeigt die rechte Seite des Düsenrohres, siehe Abb. 11, im Querschnitt. Dabei ist die Gestaltung der Austrittsöffnung für das Heißgas in der Form einer Venturidüse, in unserem Fall Venturileiste genannt, sehr wesentlich. Über die ganze Düsenrohrbreite ist der Düseneinlauf stufenlos einstellbar und ermöglicht somit eine sehr gleichmäßige Ausströmgeschwindigkeit für das Heißgas mit einer max. Abweichung von $0,05 \text{ [m s}^{-1}\text{]}$. Der Mittelsteg des Diffusors halbiert den Ausströmwinkel und verhindert somit eine Verwirbelung des Gases durch Strömungsabriss. Das Lamellenband ist entsprechend der Düsenrohranzahl aufgeteilt in einzelne Segmente, die mit jedem Rohr mechanisch verbunden sind und während der Inspektion mit den einzelnen Venturileisten leicht zu demontieren sind. Im Bereich des Heißgasaustrittes können die einzelnen Lamellenstege mit einer Justiervorrichtung über einem bestimmten Winkel $\alpha \text{ [grad]}$ bzw. $\beta \text{ [grad]}$ aus der Vertikalen ausgelenkt werden und damit die Austrittsgeschwindigkeit des Heißgases aus dem Düsenrohr vergrößern. Hierdurch verbessert sich die Verteilung des Wärmeträgers in der Schüttung, wie wir es in der Versuchsauswertung unserer Laborversuche zeigen konnten.

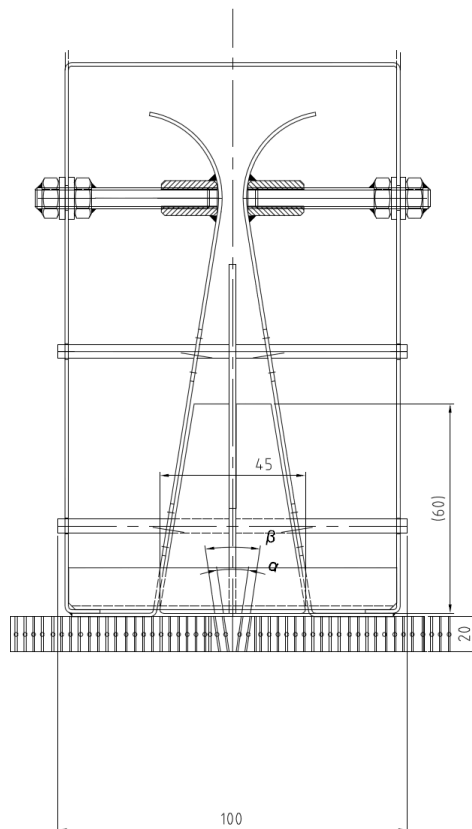


Abb. 9 Düsenrohr mit Heißgasaustrittsöffnung und Lamellenband

Unterhalb der oberen Düsenrohrreihe ist das Lamellenband in der Abb. 10 zu erkennen. Anstelle von Heizplatten auf der Unterseite des Transportbandes sind ebenfalls Düsenrohre angeordnet, um dem Anwender auch das Durchströmverfahren unter Verwendung von zwei parallel laufenden Siebbändern zeigen zu können. Für das Strömungsumkehrverfahren wird eine Metallplatte im Abstand von 20 [mm] oberhalb der Gasaustrittsöffnung der Düsenrohre montiert, siehe auch Abb. 12. Hierdurch wird das Transportband erhitzt und fördert die Wärme in die untere Grenzschicht der Polymerschüttung.

Anstelle der 17 errechneten Düsenrohre im Rechenbeispiel, Abschnitt 3.2.2.4, haben wir die Versuchs- und Demonstrationsanlage nur mit 12 Heißgaszuführungen ausgelegt. Wir können von dieser Rohranzahl auf die Auslegung größerer Anlagen bei von Kunden vorgegebener Produktionsmenge pro Zeiteinheit extrapolieren.

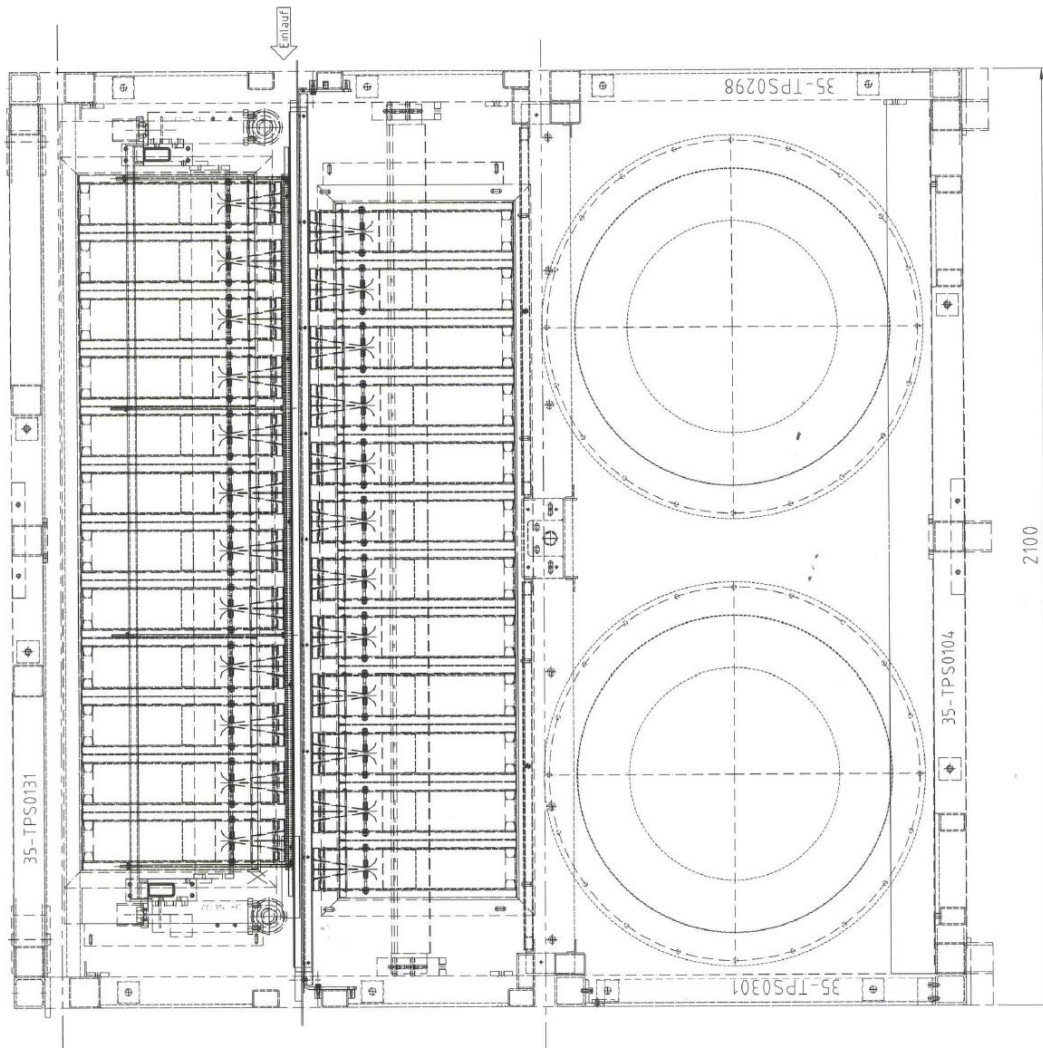


Abb. 10 Längsschnitt der Anschmelzvorrichtung SUV mit Lamellenleiste
(um 90° gedreht)

Die Abb. 11 zeigt den Anlagenquerschnitt mit der keilförmigen Düsenrohrkontur. Die Keilform errechnet sich aus der Vorgabe einer möglichst gleichmäßigen Strömungsgeschwindigkeit im gesamten Rohrquerschnitt und wurde in Strömungsversuchen von uns optimiert. Die vertikalen Strömungsrichter am Austritt der Düsenrohre tragen noch einmal zur Vergleichmäßigung der Geschwindigkeitsverteilung für das Heißgas bei.

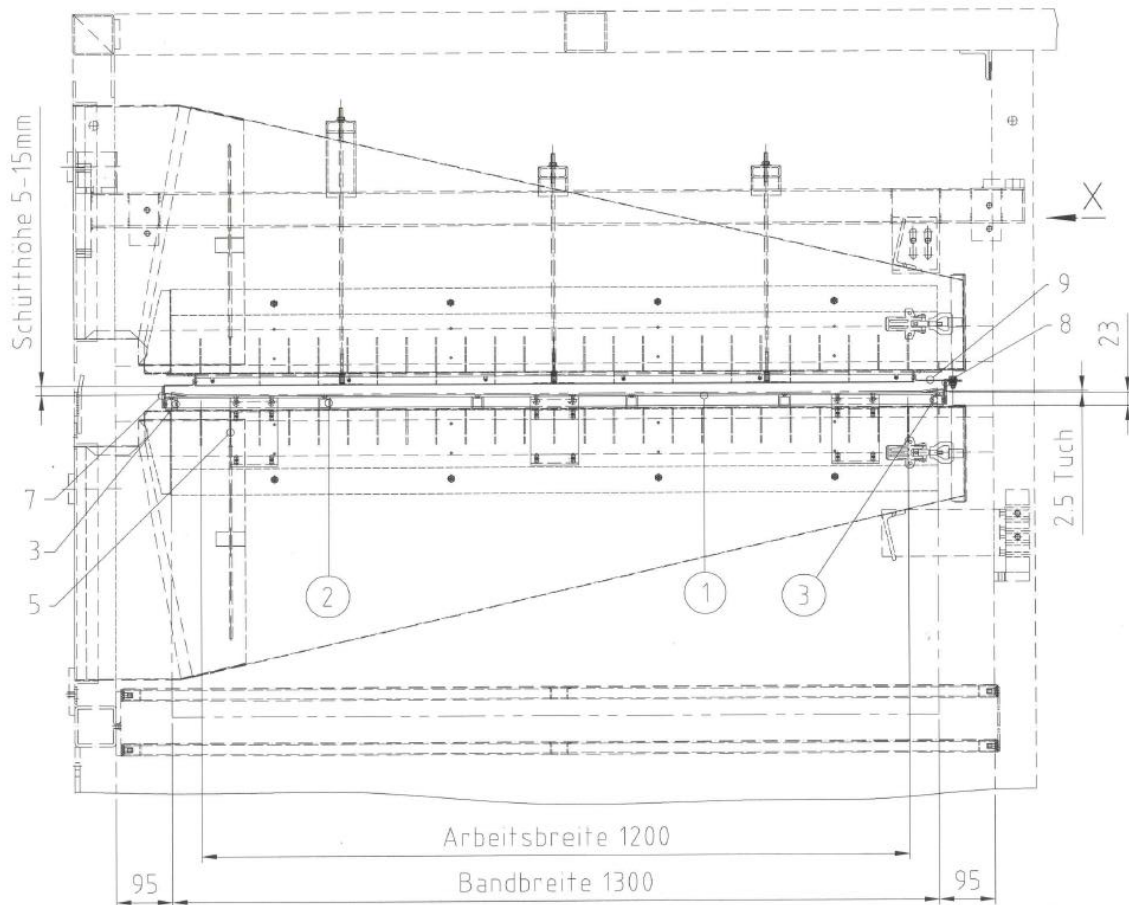


Abb. 11 Querschnitt Anschmelzvorrichtung SUV

Für das Strömungsumkehrverfahren ist zur Vermeidung von Querströmungen des Heißgases eine Seitenabdichtung erforderlich, siehe Abb. 12. Die konstruktive Einzelheit zeigt die Möglichkeit auf, durch Höhenverstellung der Abdichtungsleisten, (Teile 1 und 2), die Schütthöhen je nach Vorgabe zwischen 5 [mm] und 30 [mm] einstellen zu können. Für Schaumstrukturen sind durch Auswechseln der Seitenstege Schütthöhe bis 100 [mm] möglich. Auf der Bodenplatte zur Fixierung des Transportbandes befinden sich seitliche Anlaufbleche, Teil 3, die zur Stabilisierung des Bandlaufes beitragen.

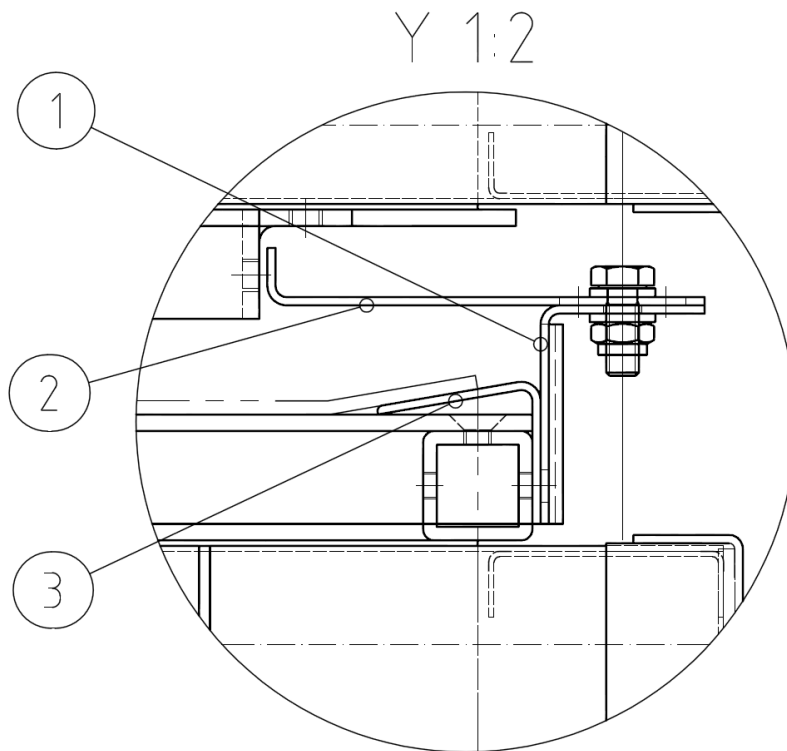


Abb. 12 Seitenabdichtung des Transportbandes in Anschmelzvorrichtung SUV

Es sind sämtliche Anschmelzversuche für die verschiedenen Materialzusammensetzungen und Plattendicken mit der Versuchs- und Demonstrationsanlage entsprechend Abb. 13 durchgeführt worden (untere Bildskizze). Zur Einhaltung gleicher Betriebsvorgaben wie z. B. Plattendicke [mm] oder Produktionsgeschwindigkeit [m min^{-1}] bzw. Massendurchsatz in [t h^{-1}] wird eine Produktionsanlage, die nach dem herkömmlichen Wärmeleitungsverfahren arbeitet, benötigt, wie sie im oberen Bild der Abb. 13 skizziert ist.

3.4 Versuche und Versuchsauswertungen

3.4.1 Bildliche Darstellung der Herstellung einer WPC-Platte

Die durchgeführten Versuchsarbeiten hatten zunächst das Ziel, festzustellen, ob die im Labormaßstab erzielten Ergebnisse der neuen Anschmelztechnik sich auf eine Anlage im Produktionsmaßstab mit 1200 [mm] Arbeitsbreite übertragen lassen. Aus der Vielzahl der durchgeführten Materialtests zeigen die Abb. 15 bis Abb. 19 die Verarbeitung eines Holz-Kunststoff-Gemisches WPC (Wood Plastic Composites), welches für das Strömungsumkehrverfahren zunächst als schwierig zu handhaben galt, da mehr als 30 [%] der Agglomeratoberfläche aus Holzanteilen besteht.



Abb. 15 Verteilung des WPC-Agglomerates auf dem Transportband

Die Abb. 15 zeigt die Ablage des Agglomerates durch die TPS-Streuvorrichtung. Der Streuer ist eine Eigenentwicklung und gehört zu unserem Verkaufsprogramm. Die Korngröße schwankt zwischen 0,8 [mm] und 6 [mm]. Abb. 16 zeigt einen Ausschnitt der WPC-Schüttung zwischen Streuer und der Anschmelzvorrichtung. Einzelkörner, die links und rechts außen auf dem Transportband zu sehen sind, werden in Produktionsanlagen durch einen Seitenschieber ausgetragen und vom Band abgesaugt. TPS-Streuer sind gut regelbar und können Plattendickentoleranzen von $\pm 0,1$ [mm] einhalten.



Abb. 17 Düsenrohr mit Venturileiste und vertikal verstellbarem Lamellenband



Abb. 16 WPC-Schüttgut auf dem Transportband zwischen Streuer und Anschmelzvorrichtung (SUV)

In der Abb. 17 ist die Anordnung der Venturileisten in den Düsenrohren bei demontierter Frontabdeckung zu erkennen. Zwischen den Düsenrohren ist das in vertikaler Richtung verstellbare Lamellenband zu sehen. Das WPC-Agglomerat wird in der Anschmelzvorrichtung mit Heißluft als Wärmeträger oberflächlich angeschmolzen und befindet sich, siehe Abb. 18, zwischen der Anschmelzvorrichtung und der Pressstufe. Die Pressstufe besteht aus zwei übereinander angeordneten Walzen mit PTFE beschichteten Oberflächen, deren Liniendruck auf die Anschmelzmasse stufenlos einstellbar ist.



Abb. 18 Angeschmolzenes Agglomerat am Ausgang der Anschmelzvorrichtung (SUV)

Nach dem Ausform- und Verdichtungsvorgang ist in Abb. 19 die WPC-Rohplatte zu erkennen. Wegen eines fehlenden Seitenabstreifers wird der Seitenrand der Platte später begradigt. Die Abb.19 zeigt aber auch, dass das WPC-Material sich problemlos nach dem Strömungsumkehrverfahren verarbeiten lässt.

Im späteren Produktionsprozess wird anstelle einer Liniendruckbeaufschlagung eine Druckfläche durch das 4-Walzenprinzip erzeugt, wie in Abb. 20 skizziert. Entsprechend dem in der Bildfolge Abb. 15 bis Abb. 19 gezeigten Versuchsablauf sind in den letzten Monaten bisher über 185 Anschmelzversuche nach dem Strömungsumkehrverfahren erfolgreich mit diversen Polymeren abgeschlossen worden. Hierzu gehören Polypropylen und Polyethylen als Neuwa-

re und Recyclate mit und ohne Faseranteile als Festigkeitsträger, PVC-Polymere, zum Teil bis 83 [%] Füllstoffanteile auf Kreidebasis, Bioplaste auf Maisbasis, fertiggeschäumte PO-Mischungen und WPC-Mischungen auf Polyethylen-Holzbasis. Die Herstellung von schaumstrukturierten Polymerplatten konzentriert sich in unserem Kundenkreis auf vorgeschäumtes Granulat, da die Anordnung des Lamellenbandes einen Aufschäumvorgang im Granulathaufwerk in der Senkrechten, über Sensoren gesteuert, folgen kann.



Abb. 19 WPC-Rohplatte nach der Press- und Ausformstufe

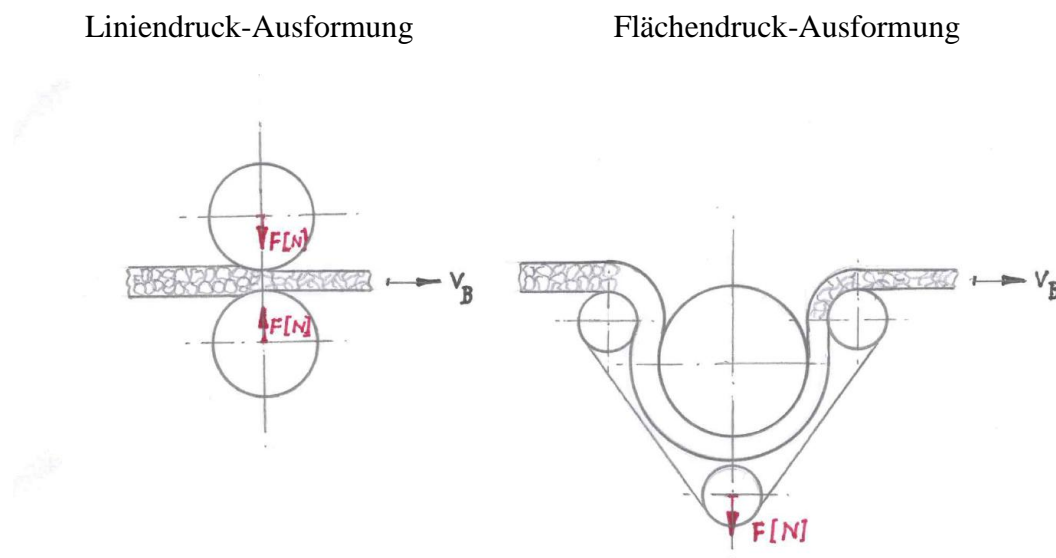


Abb. 20 Ausform- und Pressverfahren zur Herstellung einer Formplatte

Die eingesetzten Polymere in Granulatform besaßen eine mittlere Korngröße zwischen

2 [mm] und 7 [mm] und wir konnten im Heißluftstrom Schütthöhen zwischen 2 [mm] und 20 [mm] verarbeiten. Die Grundlage der erfolgreichen Versuchsabläufe basiert auf umfangreichen Labor- und Technikumsarbeiten. In dieser Zeit haben wir für diverse gängige Polymerarten in Abhängigkeit z. B. von der Partikelgröße, der Schütthöhe, der Heißgastemperatur und Heißgasströmungsgeschwindigkeit Kennfelder erarbeitet und in anwenderbezogenen Betriebshandbüchern gesammelt. Obwohl das Strömungsumkehrverfahren vertriebstechnisch erst aufbereitet wird, hat ein wichtiger Kunde nach Abschluss einer dreistündigen Versuchsfahrt zur Herstellung von Fußbodenplatten aus hochgefülltem PVC einen Auftrag zur Herstellung von Plattenware an uns vergeben. Die Plattenbreite beträgt 2,5 [m] und die Produktionsgeschwindigkeit soll je nach Plattendicke 10 [m] bis 15 [m] pro Minute betragen. Die Auslieferung erfolgt im Februar 2014.

3.4.2 Prüfergebnisse: Mechanische Materialeigenschaften von 4 untersuchten Polymeren

Die Prüfergebnisse von 4 untersuchten Polymeren sind in Abb. 21 als Kurvenzüge dargestellt. Die gemessenen Zugfestigkeiten für die Polymere Polypropylen (Copolymer), treibmittelhaltiges PP, WPC und ein Bioplast auf Maisbasis entsprechen sehr gut den ermittelten Werten an Probekörpern, die seinerzeit in einer Laborvorrichtung hergestellt worden sind. Zur besseren Übersicht sind neben den Werten für die Zugfestigkeit σ_z [N mm⁻²] nur für Polypropylen die Reißdehnungswerte ϵ_B [%] und die Kerbschlagzähigkeit a_K [kJ m⁻²] eingezeichnet.

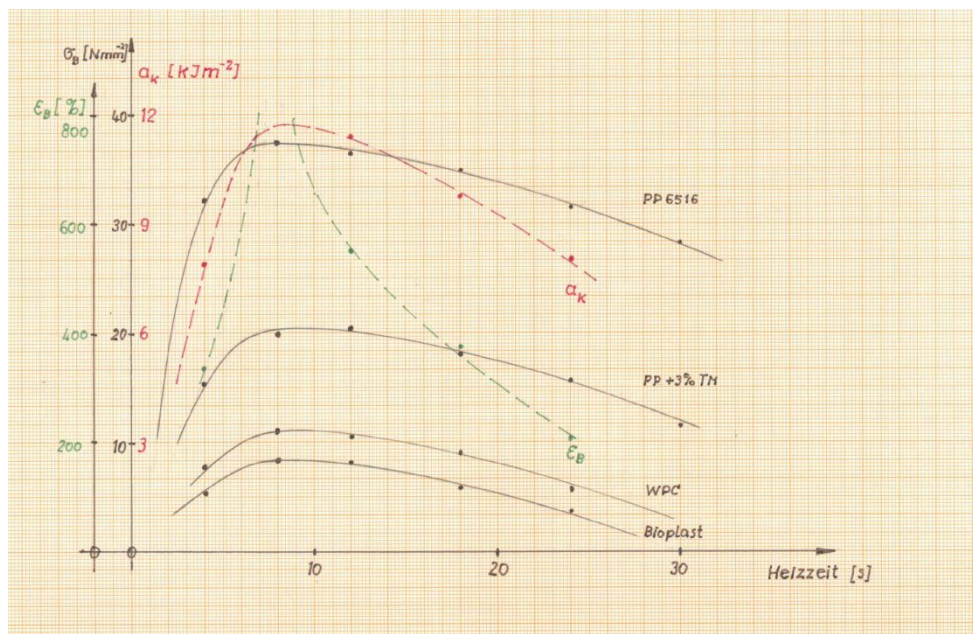


Abb. 21 Mechanische Materialeigenschaften (σ_z , ϵ_B , a_K) von Plattenproben aus der Versuchsanlage SUV

Die Probekörper wurden jeweils aus einer 4 [mm] dicken Platte entnommen, die mittlere Korngröße beträgt 4 ± 1 [mm]. Die Verläufe der Kurvenzüge weisen in Abhängigkeit von der Heizzeit im Heißluftstrom ein Maximum auf, das bei längerer Heizzeit wieder abfällt. In einer ersten Bewertung ist davon auszugehen, dass bei einer zu geringen Heizzeit der Schmelzradius von $r_s = 0,8 r$ [mm] noch nicht erreicht wurde, während bei zu langer Heizzeit der thermooxydative Abbau der Polymerstruktur infolge der großen Oberfläche in der Schüttung eintritt. Die Labormesswerte von Prüfkörpern für die Wärmeleitfähigkeit λ [$\text{Wm}^{-1} \text{K}^{-1}$] sind nur für geschäumtes PP mit 3 % Treibmittel gemessen worden. Danach beträgt $\lambda = 0,028$ [$\text{Wm}^{-1} \text{K}^{-1}$] bei einem Ausformpressdruck von $p_D = 0,15$ [bar], mit steigendem Pressdruck $p_D = 0,3$ [bar] steigt die Wärmeleitfähigkeit infolge der Verdichtung der Schaumstruktur bereits auf den Wert $\lambda = 0,058$ [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$]. Im Mittel liegen die Messwerte bei optimaler Heizzeit für die Zugfestigkeit σ_z , der Reißdehnung und der Kerbschlagzähigkeit um ca. 12 [%] oberhalb der Herstellerangaben. Dieses ist auf die minimale thermische Belastungszeit von wenigen Sekunden beim Anschmelzverfahren zurückzuführen.

3.5 Bewertung der Ergebnisse im Hinblick auf die ursprüngliche Zielsetzung

Das Entwicklungsvorhaben umfasst die Auslegung und Herstellung einer Versuchsanlage im Produktionsmaßstab, in der das energiesparende Anschmelzverfahren für die Verarbeitung thermoplastischer Polymere oder Bioplaste zu dickwandigen Kunststoffplatten eingesetzt wird. Dabei kann das als Granulat vorliegende Ausgangsmaterial eine homogene oder schaumstrukturierte Form aufweisen. Als Ergebnis mehrjähriger Grundlagenarbeit, die seinerzeit im dankenswerter Weise von der DBU mitfinanziert wurde, konnten wir ein kontinuierlich arbeitendes Fertigungsverfahren vorstellen, bei dem das Granulat, zwischen zwei Siebbändern gelagert, durch einen Heißluftstrom geführt wurde. Die Oberflächen der Granulen wurden gleichmäßig angeschmolzen, anschließend in einer Pressstufe der Doppelbandpresse ausgeformt und in einer Kühlstrecke auf Raumtemperatur abgekühlt. Bei der Verarbeitung von Recyclaten zeigte sich aber, dass je nach vorangegangener Verwendung und Einsatzdauer des Polymeren oftmals eine thermische Schädigung vorhanden ist, die zu einer Veränderung der Molekularstruktur und damit zu einer Verringerung der Schmelzeviskosität bei erneuter Wärmezufuhr führt. Siebbänder sind aber zum Transport von Polymergemischen mit unterschiedlichen Schmelzeviskositäten in der Anschmelzvorrichtung nicht geeignet. Es kommt zu einer Verschmutzung der Siebbänder durch niedrigviskose Schmelzmasse und damit wird ein störungsfreier Fertigungsablauf verhindert.

Die Weiterentwicklung des Anschmelzverfahrens führte jetzt zum Strömungsumkehrverfahren, welches im Labor- und Technikumsmaßstab bereits unseren Zielsetzungen entsprach. Dabei wird auf den Siebbandeinsatz verzichtet. Durch die Verwendung eines geschlossenen Unterbandes und anstelle des oberen Siebbandes haben wir in geringem Abstand oberhalb der ebenen Granulatschüttung und unterhalb der Heißluftdüsen ein Lamellenband, siehe Abb. 5, angeordnet, welches das Heißgas gleichmäßig dem Haufwerk zuführt und zwischen den benachbarten Düsenrohren wieder abführt, ohne dass oberhalb der Polymerschüttung ein wesentlicher Heißgasanteil ungenutzt entweichen kann. Das Lamellenband dient daher in vertikaler Strömungsrichtung des Wärmeträgers als Leitelement, in horizontaler Richtung aber als Labyrinthdichtung. Zur Bewertung der Versuchsergebnisse insbesondere im Hinblick auf die ursprüngliche Zielsetzung dienen vor allem die bisher gesammelten Betriebserfahrungen:

3.5.1 Störungsfreier Betrieb

Die auf der Basis der vorliegenden Laborergebnisse durchgeführten strömungstechnischen, thermodynamischen und mechanischen Auslegungsarbeiten für die Versuchsanlage mit einer Nutzbreite von 1200 [mm] haben ausgereicht, einen störungsfreien Betrieb der Demonstrationsanlage an über 185 Versuchstagen mit unterschiedlichen Polymergemischen zu ermöglichen.

3.5.2 Aufteilung der Anschmelzvorrichtung in zwei Einzelstrecken

Voraussetzung für den störungsfreien Betrieb ist die Aufteilung der Anschmelzvorrichtung in eine Fixierstrecke und der eigentlichen Durchströmstrecke. In der kurzen Fixierstrecke wird die Deckschicht der Polymerschüttung bei hoher Heißgastemperatur (250 [°C] und geringer Strömungsgeschwindigkeit $4 \text{ [m s}^{-1}\text{]}$) angeschmolzen oder fixiert, danach bei Gastemperaturen zwischen 210 [°C] und 240 [°C] und hoher Strömungsgeschwindigkeit bis $15 \text{ [m s}^{-1}\text{]}$, je nach Polymerart gleichmäßig über die gesamte Schütthöhe oberflächlich angeteigt.

In der gesamten Anschmelzvorrichtung konnten wir in Längs- und Querrichtung des Transportbandes sehr genau die Geschwindigkeit des Wärmeträgers einstellen auf $\pm 0,05 \text{ [m s}^{-1}\text{]}$. In der Fixierstrecke ist zu beobachten, dass selbst eine "Einkorn"-Granulatschicht seine Lage nicht auf dem Transportband verändert, da das Heißgas seine Strömungsrichtung, zwischen benachbarten Heißdüsen ständig wechselt und damit das Schüttgut in seiner momentanen Lage stabilisiert. Der ständige Richtungswechsel des Heißgasstromes ist Voraussetzung für eine sehr gleichmäßige Temperaturverteilung im Schüttgut.

3.5.3 Vergrößerung des mittleren Stromfadens in der Schüttung

Im Gegensatz zum Siebbandverfahren verdoppelt sich die mittlere Länge des Stromfadens "L", siehe Abb. 5, durch die Strömungsumkehr im Schüttgut und damit auch der Druckverlust. Dieser Nachteil wird durch die Einstellung der Ventilatordruckhöhe kompensiert. Bei der Verarbeitung von Polypropylen mit einer Granulatgröße von $4,5 \pm 0,8$ [mm] haben wir bei einer Heißgasgeschwindigkeit von 4 [m s^{-1}] in der Fixierstrecke und 12 [m s^{-1}] in der Durchströmstrecke bei 235 [$^{\circ}\text{C}$] Gastemperatur Schütthöhen von 40 [mm] untersucht und eine gleichmäßige und homogene Materialstruktur in der fertigen Platte feststellen können. Gängige Schütthöhen für die Plattenproduktion in unserem Kundenkreis liegen bei 3 [mm] bis 20 [mm].

3.5.4 Beherrschung des Staubanteils im Polymergemisch

Je nach Materialart, wie z. B. Regranulat, Agglomerat oder Mahlgut, enthält das Polymer oder Polymergemisch einen Staub- oder Feingutanteil von bis zu 3 [Gewichts-%]. Gegenüber dem Siebbandverfahren, bei dem der Staubanteil herausgeblasen wird und die Heißluftführungskanäle mit einer Polymerschicht belegt, beobachten wir beim Strömungsumkehrverfahren diesen Nachteil nicht. Offensichtlich verbleibt der Feingutanteil in der Schüttung, hervorgerufen durch die Strömungsumlenkung des Wärmeträgers (Zyklonprinzip) auf dem beheizten Unterband. Für den Dauerbetrieb ist daher die Beherrschung des Staub- und Feingutanteils im Polymergemisch vorteilhaft.

3.5.5 Systemvergleich Siebbandverfahren (SBV) - Strömungsumkehrverfahren (SUV)

Das Strömungsumkehrverfahren ist die anwendungstechnische Antwort auf das Siebbandverfahren. Wenn auch kurzfristig zu Beginn unseres Entwicklungsvorhabens das Strömungsumkehrverfahren als Rettungsanker für das im Recyclatbetrieb nur bedingt einsetzbare Siebbandverfahren galt, können wir heute den verfahrenstechnischen Vorteil des SUV beweisen.

Dazu gehört:

- Die konvektive Wärmezufuhr in das Schüttgut wird bei beiden Verfahren eingehalten.
- Die Siebbänder führen das Schüttgut zwar sicher durch die Anschmelzvorrichtung, verbleiben aber in der Ausform- und Kühlzone mit dem Polymer verbunden, so dass die Abdrücke der Bandstruktur auf dem Produkt erhalten bleiben.
- Für den Anwender entstehen bei der Umstellung vom Wärmeleitungsverfahren auf das SUV keinerlei Handhabungsänderungen in der Plattenfertigung. Das Polymergranulat

wird über einen Streuer auf das Unterband der Doppelbandpresse abgelegt. Nach dem Ansmelzprozeß wird ein Oberband zugeführt, so dass am Pressenende eine vom Anwender gewünschte strukturfreie, glatte Plattenoberfläche entsteht.

Wir können daher nach Abschluss des Entwicklungsvorhabens feststellen, dass die Arbeitsergebnisse der vorgegebenen Zielsetzung für die von uns untersuchten Ausgangsmaterialien hinsichtlich Produktqualität, Energieeinsparung und Produktionsgeschwindigkeit voll entsprechen.

3.6 Ökologische, technologische und ökonomische Verfahrensbewertung

3.6.1 Ökologische Verfahrensbewertung

In guter Näherung ist der Energiebedarf für das Durchströmungsverfahren und das Strömungsumkehrverfahren gleichzusetzen. In beiden Fällen können wir zeigen, dass ein oberflächliches Ansmelzen der Granulatoberfläche ausreicht, um im anschließenden Formprozess eine homogene Materialstruktur in der Platte zu erzeugen, die den gängigen physikalischen und mechanischen Bedingungen der Materialprüfung genügt. Die auf das Wärmeleitverfahren bezogene erhebliche Energieeinsparung bei der Plattenfertigung wirkt sich auch vorteilhaft auf den Kühlprozeß nach dem Ausformen aus. Bei exakter Einhaltung der Heißgastemperatur und Heizzeit stellt sich nach dem Ausformen eine sog. kalorische Mitteltemperatur im Polymer ein, die nach kurzer Zeit eine Entformung der fertigen Kunststoffplatte zulässt, wobei die Entformungstemperatur ca. 85 [°C] beträgt. Dabei ist eine Kühlstufe für die Wärmeabfuhr nicht erforderlich mit dem Vorteil, den notwendigen Energiebedarf für den Kühlwassereinlauf und den Ventilatorbetrieb im Kühlturm ebenfalls einsparen zu können.

Wie Tabelle 3 zeigt, fällt beim Wärmeleitverfahren der Hauptenergiebedarf beim Auf- bzw. Durchschmelzen des Polymergranulates an, gefolgt von der notwendigen Wärmemenge für das Aufheizen der Transportbänder und dem Konvektionsverlust in der oft 20 [m] langen Heizzone. Im Falle der PVC-Verarbeitung beträgt der Energiebedarf beim Wärmeleitverfahren im Mittel 0,135 [kWh kg⁻¹] und beim Strömungsumkehrverfahren 0,054 [kWh kg⁻¹], also ein um den Faktor EF = 2,5 geringerer Wärmebedarf. Bei der Verarbeitung von Polyolefinen (Polypropylen bzw. Polyethylen) oder Polyolefingemischen beträgt der Einsparfaktor sogar 3,35, wie zahlreiche Eigenmessungen und Berechnungen unserer Kunden zeigen. Wenn bei vorsichtiger Schätzung in unserem weltweiten Kundenkreis ca. 1200000 [t] PVC bzw. PVC-

Gemische verarbeitet werden, folgt daraus für die Umstellung des Wärmeleitverfahrens auf das Strömungsumkehrverfahren eine Energiebedarfsreduzierung (oder Einsparpotential EP) von:

$$EP = 1200000 \text{ [t a}^{-1}\text{]} \cdot 1000 \text{ [kg t}^{-1}\text{]} \cdot 0,08 \text{ [kWh kg}^{-1}\text{]} = 9,6 \cdot 10^7 \text{ [kWh a}^{-1}\text{]}$$

Dieses entspricht dem jährlichen Bedarf von 24.000 Haushaltungen, wenn der Eigenverbrauch mit $4000 \text{ [kWh a}^{-1}\text{]}$ angenommen wird.

Das Energieeinsparpotential EP für die Verarbeitung von PVC, verbunden mit der sehr kurzen thermischen Belastung des Polymers in der Aufheizphase von ca. 8 [s] bis 12 [s] gegenüber 2 [min] bis 3 [min] für das Wärmeleitverfahren, verdeutlicht den ökologischen Nutzen der neuen Verarbeitungstechnik.

3.6.2 Technologische Bewertung des Vorhabens

Der Maßstab für die technologische Bewertung des Vorhabens beinhaltet den Vergleich zwischen der neuen Technologie und der bisherigen Fertigungsmethode. Die Abb. 13 demonstriert dem Fachmann offensichtlich, dass bei gleichen Materialdurchsatzmengen pro Zeiteinheit die Baulänge der neuentwickelten Anlage für das Strömungsumkehrverfahren um den Faktor 2,76 [-] gegenüber der Produktionsanlage, die nach dem Wärmeleitungsverfahren arbeitet, geringer ausfällt. Dieses gilt in guter Näherung auch für den Materialbedarf, da die Anschmelzvorrichtung eine einfache Blechkonstruktion darstellt.

Während für das Siebbandverfahren als erste Stufe der technischen Umsetzung der Anschmelztechnik der Anwender bestimmte Randbedingungen wie Materialzusammensetzung, Einhaltung der Toleranzgrenze für die Schmelzviskosität, Obergrenze der Staub- und Fein- gutanteile etc. sorgfältig einzuhalten hatte, gestattet das Strömungsumkehrverfahren dem Plattenproduzenten die gleiche Fahrweise wie beim Wärmeleitverfahren. Die vorhandene Produktionsanlage muss der Anwender lediglich in Teilen durch Einbau der Anschmelzanlage ergänzen. Zwischenzeitlich konnte die Firma Sandvik, Fellbach, für die Lieferung einer Ausformstrecke in Form einer Doppelbandpressentechnik gewonnen werden, die Preßdrücke bis 20 [bar] zulässt und für beide Firmen neue Geschäftsfelder in der Anwendungstechnik zur Herstellung hochfester Platten ermöglicht.

Die Erprobung der neuen Demonstrations- und Fertigungsanlage zur Umsetzung des Strömungsumkehrprinzips zeigt, dass es uns gelungen ist, die gesteckten Verfahrensziele bei der Formulierung der Vorhabensdurchführung dank einer gründlichen Entwicklungsarbeit im

Labor- und Technikumsmaßstab, erfolgreich abschließen zu können. Der erste Verkaufsabschluss zur Herstellung einer PVC-Plattenanlage mit einem Materialdurchsatz von $2620 \text{ [kg h}^{-1}\text{]}$ oder einer Jahreskapazität von $12000 \text{ [t a}^{-1}\text{]}$ ist erfolgt, die Auslieferung der Anlage ist für Februar 2014 festgelegt.

3.6.3 Ökonomische Bewertung des Vorhabens

Bei der Einführung einer neuen Fertigungsmethode ist die ökologische Bewertung wesentlich, allerdings überwiegt mit Abstand die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung bei der Kaufentscheidung in unserem Kundenkreis. Für die Einführung des Strömungsumkehrverfahrens zur Herstellung von Kunststoffplatten setzt der Anwender eine Verbesserung der Produktqualität voraus und gleichzeitig ist die Steigerung der Produktivität, in diesem Falle der Massendurchsatz pro Zeiteinheit, von ausschlaggebender Bedeutung. Wir sind mit der vorliegenden Verfahrenstechnik in der Lage, sowohl technische, ökologische und vor allem ökonomische Vorteile vorstellen zu können, die den Betreibern herkömmlicher und nach dem Wärmeleitungssystem arbeitender Produktionsanlagen überzeugen, das Strömungsumkehrverfahren einzuführen. Bei der ökonomischen Bewertung unseres Vorhabens ist der Verfahrensvorteil des Strömungsumkehrverfahrens in Abb. 8 graphisch angezeigt. Während beim Wärmeleitungsverfahren insgesamt 225 [s] benötigt werden, um einer Granulatschüttung (PVC) zur Herstellung einer Kunststoffplatte die erforderliche Schmelzwärme zuzuführen, sind beim Strömungsumkehrverfahren nur 8 [s] notwendig. Das neue Verfahren (SUV) erlaubt eine vergleichsweise leichte und gedrungene Anlagenbauweise und damit eine Reduzierung des erforderlichen Raumbedarfs. Neben der Einsparung an Energiekosten trägt die Reduzierung der Materialkosten zur Herstellung der Fertigungsanlage bei der ökonomischen Bewertung ebenfalls zum Ausbau des Marktvorteils bei.

In der Tabelle 4 zeigt eine Gegenüberstellung der Herstellungskosten (ohne Materialkosten) und Energiekosten für das TPS-Wärmeleitverfahren und das Strömungsumkehrverfahren am konkreten Beispiel einer Plattenproduktionsanlage für Fußbodenware für jeweils 1 [kg] Polymerware an. In der Tabellenangabe für die Energiekosten ist der Kostenanteil für die erforderliche Kühlstrecke für das Wärmeleitverfahren mit 8 [%] und für das Strömungsumkehrverfahren mit 4 [%] eingearbeitet. Unsere Firma stellt nur für den Einzelkunden ausgelegte Fertigungsanlagen her und wir verfügen daher über keine Listenpreise. Der Materialdurchsatz (in diesem Falle PVC) beträgt $2800 \text{ [kg h}^{-1}\text{]}$. Es ist daher ein direkter Preisvergleich der Investitionskosten für beide Verfahren z. B. infolge kundenspezifischer Sonderausstattungen der Anlagen nicht möglich.

Verfahren	Wärmeleitverfahren WLV	Strömungsumkehrverfahren SUV
Investitionsbedarf	1.850 [T €]	980 [T €]
AfA (7,5 Jahre)	247 [T €]	131 [T €]
Zinsen (6,5 % von 50 % der Investsumme)	60 [T € a ⁻¹]	32 [T € a ⁻¹]
Personalkosten (1 Pers/Schicht x 2 Schichten pro Tag x 50 [T €] pro Pers. und Jahr x Faktor 1,2	120 [T € a ⁻¹]	120 [T € a ⁻¹]
Energiekosten WLW 0,145 [kWh kg ⁻¹] x 0,21 [€ kWh ⁻¹] x 3600 [h a ⁻¹] x 2800 [kg h ⁻¹]	307 [T € a ⁻¹]	
Energiekosten SUV 0,056 [kWh kg ⁻¹] x 0,21 [€ kWh ⁻¹] x 3600[h a ⁻¹] x 2800 [kg h ⁻¹]		119 [T € a ⁻¹]
Instandhaltung (5 [%] der Investsumme)	92,5 [T € a ⁻¹]	49 [T € a ⁻¹]
Verwaltung, Versicherun- gen	130 [T € a ⁻¹]	130 [T € a ⁻¹]
Summe:	956,5 [T € a ⁻¹]	581 [T € a ⁻¹]
Materialdurchsatz	2800 [kg h ⁻¹]	2800 [kg h ⁻¹]
Herstellungskosten (ohne Materialkosten)	0,0949 [€ kg ⁻¹]	0,0576 [€ kg ⁻¹]
Energiekosten	0,0305 [€ kg ⁻¹]	0,0118 [€ kg ⁻¹]

Tabelle 4 Gegenüberstellung der Kostenstruktur für WLW und SUV

Nach dieser Tabelle werden die Energiekosten für das Strömungsumkehrverfahren von 3,05 [cent] auf 1,18 [cent] pro kg Polymer oder um den Faktor 2,58 gesenkt. Bei der Verarbeitung von Polyolefinen beträgt der Einsparfaktor auf der Basis unserer Energiebedarfsbilanzen sogar 3,35.

4. Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse

Die Verleihung des vom Umweltministerium und dem BDI vergebenen Innovationspreises für Klima und Umwelt (IKU) im Jahre 2010 hat wesentlich dazu beigetragen, das Anschmelzverfahren in Fachkreisen der Kunststoffverarbeitung einzuführen. Als Hersteller von Doppelbandpressen sind wir weltweit aktiv und arbeiten mit den führenden Herstellern von Kunststoffplatten eng zusammen, darüberhinaus sind wir Aussteller auf Fachmessen, wie z. B. der Composite Europa (September 2013), der Intermob Istanbul (Oktober 2013), der K-Messe in Düsseldorf (Oktober 2013), der Domotex in Hannover (Januar 2014), der Surfaces in Las Vegas (Januar 2014) und der JEC in Paris (März 2014).

Das Europäische Patentamt hat uns in einer Vorabmitteilung die Erteilung eines Europapatentes für das Strömungsumkehrverfahren in Aussicht gestellt. Die Fa. Sandvik in Fellbach hat unser Verfahren in das Lieferprogramm ihres „Kombipress“-Programms aufgenommen, wonach Pressdrücke in einer Doppelbandpressentechnik von über 20 [bar] erreicht werden. Bei diesen Drücken werden besonders hohe Oberflächengüten für Thermoplaste erreicht. Es laufen Vorbereitungsarbeiten für die Veröffentlichung von Fachbeiträgen in der Fachzeitschrift JEC und dem Magazin Boden/Wand/Decke.

Als Maschinenbauer beschäftigen wir uns mit der Aquisition, der Auslegung und Fertigung von Plattenproduktionsanlagen einschließlich Versuchsarbeiten in unserem Technikum. Die Versuchsergebnisse in unserem Technikum sind im Regelfalle die Voraussetzung für die Auftragsvergabe aus unserem Kundenkreis. Unser Kooperationspartner beschäftigt sich mit der thermodynamischen und strömungsmechanischen Auslegung unserer Anlagen und fördert die Verbreitung der neuen Technik in Fachzeitschriften und Fachtagungen der Kunststoffverarbeiter.

5. Fazit

Das von uns durchgeführte Entwicklungsvorhaben zur Umsetzung einer energiesparenden Fertigungsmethode für die Verarbeitung thermoplastischer Polymere im Produktionsmaßstab ist aus unserer Sicht erfolgreich abgeschlossen worden. Die Versuchsergebnisse zeigen, dass das in mehrjähriger Vorarbeit entwickelte Anschmelzverfahren zur kontinuierlichen Herstellung platten- oder schalenförmiger Thermoplaste im Fertigungsbetrieb unter Verwendung unserer Doppelbandpressen eingesetzt werden kann. Das Verfahren beruht auf der Erkenntnis, dass es bei Verarbeitung von thermoplastischen Kunststoffen in Granulatform ausreicht, nur ein Drittel des Volumens der in erster Näherung als kugelförmig angenommenen Granülen im Heißgasstrom konvektiv anzuschmelzen. Im anschließenden Ausformvorgang werden die Granülen zu einer homogenen Materialstruktur zusammengepresst und es folgt ein quasiadiabatischer Wärmeaustausch zwischen schmelzflüssiger Oberfläche und dem "kalten" Kern einer jeden Granüle. Es stellt sich nach wenigen Sekunden eine sog. kalorische Mitteltemperatur im Polymerverbund ein, so dass das Formteil kurzfristig entformt werden kann. Die mechanischen und physikalischen Materialprüfungen zeigen sogar positive Abweichungen von den vom Polymerhersteller zugesicherten Materialeigenschaften, vorausgesetzt, dass der Anwender z. B. die vorgegebenen Verarbeitungsvorschriften wie Einhaltung der Heißgastemperatur, Länge der Heizzeit oder die gleichmäßige Schüttung des Granulates auf dem Förderband einhält. Das entwickelte Strömungsumkehrverfahren zeichnet sich dadurch aus, dass neben der Verarbeitung von Originalware (virgin materials) auch Gebrauchtkunststoffe bzw. Kunststoffgemische, Bioplaste, Thermoplaste mit Textilfaseranteilen bzw. Glasfasern oder Metallfasern einschließlich Schaumstrukturen verarbeitbar sind. Für die Anwendung dieses Fertigungsverfahrens benötigt der Anwender, der bisher z. B. das von uns angebotene Wärmeleitverfahren zur Herstellung plattenförmiger Kunststoffteile einsetzt, keine Betriebsumstellung bei der Materialaufbereitung. Ein wesentliches Argument für die Einführung des Strömungsumkehrverfahrens für den Anwender ist neben der Energieersparnis die Tatsache, dass die Bandgeschwindigkeit und damit der Produktionsausstoß gegenüber bisher eingesetzten Technologien erhöht werden kann, da die erforderliche Heizzeit nur wenige Sekunden beansprucht. Neben der Herstellung von Polymerplatten mit homogener, geschlossener Materialstruktur ist die Fertigung strukturierter Plattenprofile z. B. für die Dämmstofftechnik im Markt gefragt.

Dabei wird gefordert, dass feste Verbindungsstellen in den schaum- oder naturfaserstrukturierten Grundmaterialien geschaffen werden, um eine mechanische Bearbeitung dieser Dämmplatten zu ermöglichen. Dieses bedeutet, dass die Anschmelzvorrichtung zu einem Reaktor umgerüstet wird, in dem z. B. Heißdampf in der Folgestufe nach der Heißluftstrecke eine chemische Reaktion im zugeführten Bindemittel auslöst, die zu einer dauerhaften Verbindung in der Dämmstoffplatte führt. Diese Reaktortechnik soll einem weiteren Entwicklungsprogramm vorbehalten bleiben.

Abschließend danken wir sehr herzlich für die großzügige Unterstützung der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) bei der Durchführung des nunmehr marktreifen Entwicklungsprojektes.

6. Literaturverzeichnis

- [Bra 71] Brauer, H.: *Grundlagen zur Ein- und Mehrphasenströmungen*
Verlag Sauerländer, Aarau und Frankfurt am Main, 1971
- [EP 07] *Verfahren und Vorrichtung zur Herstellung von
Formteilen aus Kunststoff*
Europapatent-Nr. EP 150 486 8 A1, Oktober 2007
- [Gnie 78] Gnielinski, V.: *Berechnung der Nusseltzahl für Heißgase*
Vt „Verfahrenstechnik“ Nr. 1, S. 36 – 39, 16/1978
- [Hs 06] Haas, W.: *Grundlagen Dichtungstechnik*
Vorlesungsskript der Universität Stuttgart, 2008
- [Ma 13] Mauk, M.: *Datensammlung Polymerwerkstoffe*
Wissenschaftlicher Mitarbeiter der Fa. TPS TechnoPartner
Samtronic GmbH, 2013
- [Neu 11] Neu, W.: *Erweiterung des Einsatzgebietes für das
Anschmelzverfahren zur Herstellung von Kunststoffplatten,
die eine Schaumstruktur aufweisen*
DBU-Abschlussbericht, April 2011, AZ 27952/01-21/2
- [Schlü 82] Schlünder E. U.: *Verfahrenstechnik.*
Vorlesungsskript, Institut für Thermodynamik, TU Hannover, 1982
- [TR 01] Traupel, W.: *Thermische Turbomaschinen.*
Springer-Verlag, 2001
- [VDI 97] VDI-Wärmeatlas: *Instationäre Wärmeleitung in ruhenden Körpern,*
VDI-Verlag Düsseldorf, 8. Auflage, 1997