

Zeitschrift Kunststofftechnik

Journal of Plastics Technology

archivierte, peer-rezensierte Internetzeitschrift des Wissenschaftlichen Arbeitskreises Kunststofftechnik (WAK)
archival, peer-reviewed online Journal of the Scientific Alliance of Polymer Technology
www.kunststofftech.com; www.plasticseng.com

eingereicht/handed in: 12.03.2009
angenommen/accepted: 22.02.2010

Prof Dr.-Ing. J. Wortberg, Dipl.-Ing. M. Bussmann
Institut für Produkt Engineering, Universität Duisburg-Essen

Ein alternatives Plastifizierkonzept unter Verwendung von Erdgas

Der vorliegende Artikel befasst sich mit einer alternativen Methode zur Plastifizierung von Thermoplasten. Dabei basiert das Konzept auf dem Primärenergieträger Erdgas, aus dem die zur Plastifizierung des Kunststoffgranulates benötigte Energie gewonnen wird. Schlüsseltechnologien für dieses Projekt sind spezielle Wärmetauscher für Schüttgut-Schmelze-Gemische sowie Erdgas betriebene Heizelemente. Von der Konzeptfindungsphase bis hin zur Planung und Konstruktion eines Prototypen wird die Entwicklung und Umsetzung des Konzeptes in diesem Artikel dargestellt.

An alternative plastification system based on natural gas

This paper deals with an alternative method for the plasticizing of polymer materials. The system is based on the primary energy carrier natural gas as main source for the required plasticizing energy. A system containing two special designed heat exchangers as well as natural gas based heaters are the key technologies for this project. In addition to the development of the new plasticizing concept, this paper describes furthermore the layout of a prototype.

Ein alternatives Plastifizierkonzept basierend auf dem Primärenergieträger Erdgas

J. Wortberg, M. Bussmann

1 EINLEITUNG

Um aus Kunststoffgranulat in einem Umformprozess kontinuierlich Produkte herstellen zu können, muss das Polymer in den schmelzeförmigen Zustand überführt werden. Hierzu hat sich die Technik des Plastifizierens mittels Extruder als einziges Verfahren für die industrielle Massenfertigung fest etabliert. Das Prinzip des Aufschmelzens variiert bei den verschiedenen Extruderbauarten nur geringfügig. Die im Betrieb benötigte Plastifizierenergie wird nahezu ausschließlich über Reibleistung bzw. Dissipation in das Granulat eingebracht. Ein vollständiges Umdenken dieser Verfahrenstechnik wurde bisher nie als nötig bzw. sinnvoll erachtet.

Innerhalb der letzten Jahrzehnte sind immer wieder sogenannte alternative Plastifizierkonzepte entwickelt worden, die andere Verfahrensvarianten zur Schmelzeerzeugung aufzeigen. Diese basierten aber ebenfalls fast ausschließlich auf der Energieeinbringung durch Dissipation. In Anbetracht der steigenden Energiekosten sowie vor dem Hintergrund der Ressourcenschonung können alternative Extrusionskonzepte aber die Schlüsseltechnologie bereithalten, um zu einer Kosten- und Emissionsreduzierung beizutragen. Denn gleichgültig welche Maschinen- bzw. Anlagentechnik Anwendung findet, der Energieaufwand, der theoretisch benötigt wird, um einen definierten Massestrom an Kunststoff zu plastifizieren, ist immer derselbe.

Die Zielsetzung war demnach, ein Plastifizierverfahren zu entwickeln, welches es grundsätzlich ermöglicht, Energiekosten bei gleichzeitiger Reduzierung des gesamt CO₂-Ausstoßes zu senken.

Aus Forschungsprojekten am Institut für Produkt Engineering der Universität Duisburg-Essen in Kooperation mit der e.on Ruhrgas AG (Essen), WEMA (Lüdenscheid), Motan (Bünde) sowie Kreyenborg (Münster) sind in den letzten Jahren innovative Konzepte basierend auf dem Primärenergieträger Erdgas hervorgegangen. Zu nennen sind hier z.B. die Erdgas betriebene Zylinderheizzone oder ein IR-Drehrohrtrockner mit Erdgas betriebenen Strahlern. Diese Projekte haben gezeigt, dass der Energieträger Erdgas auch für die Kunststoffindustrie eine alternative Energiequelle darstellt. [7/8]

Basierend auf diesen Vorarbeiten ist das hier vorgestellte Konzept entstanden, welches durch den konsequenten Einsatz von Erdgas die Energiekosten für die Plastifizierung von Kunststoffen senken soll. Bei der herkömmlichen Extrusion betragen diese immerhin 5-10 % der Gesamtkosten des Endprodukts. Durch die direkte Nutzung der im Erdgas enthaltenen Energie in Form von Wärme,

ohne Umwege über die elektrische Energie, lassen sich darüber hinaus Wandlungsverluste nahezu gänzlich einsparen. Der spezifische Energieeinsatz ist zur Verdeutlichung in Bild 1 dargestellt [1].

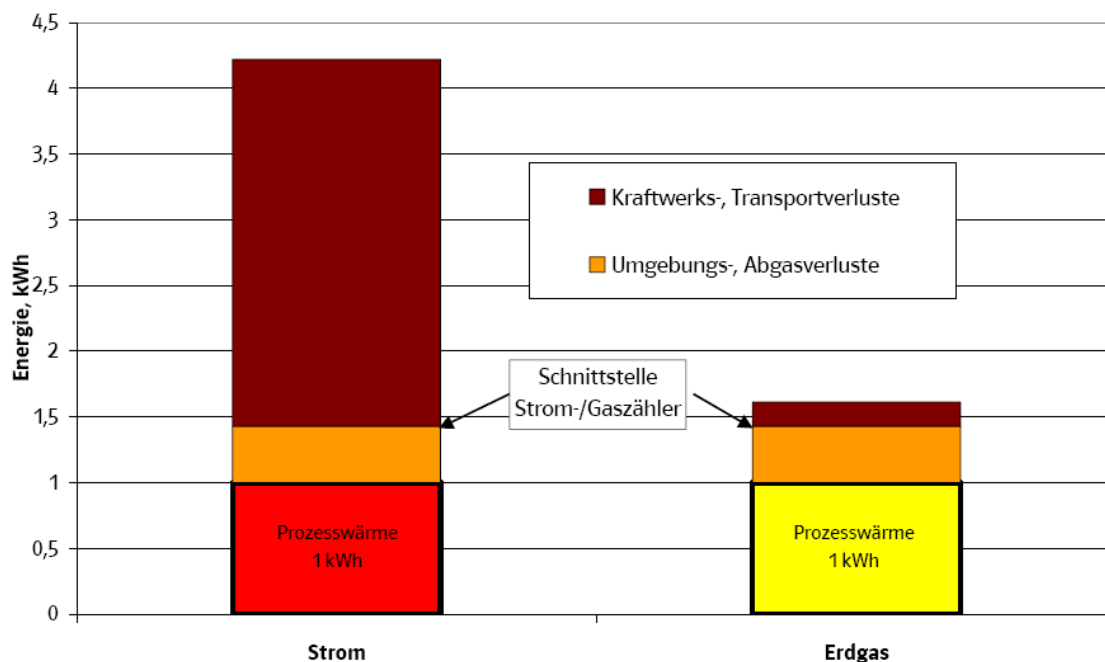


Bild 1: Spezifischer Primärenergieeinsatz pro 1 kWh Prozesswärme netto [1]

Dieser Vorteil wirkt sich direkt auf die Energiekosten aus. Diese betragen nur etwa 30 % der Kosten einer vergleichbaren Energiemenge, die durch elektrischen Strom bereitgestellt wird. Zudem ist Erdgas im Vergleich zu elektrischem Strom ein umweltverträglicherer Energieträger, da die CO₂-Emission bei seiner Verbrennung gering ist. Da auch in Zukunft davon ausgegangen werden kann, dass bei weiter steigenden Energiekosten Erdgas ein wirtschaftlicher Energieträger bleiben wird, ist es naheliegend, die genannten Vorteile für die Plastifizierung von Kunststoffen nutzbar zu machen. Im Zeitalter von Emissionsvorschriften bekommt die Umweltfreundlichkeit von Erdgas als Energieträger zudem einen immer größeren Stellenwert. Dies haben auch Maschinenhersteller erkannt und Konzepte entwickelt, um Erdgas als Energieträger einsetzen zu können [2/6].

Um die Vorteile eines Erdgas basierten Konzeptes zu verdeutlichen, sei hier als Beispiel ein Kostenrechnung für eine Extrusionsanlage aufgeführt, welche ganzjährig betrieben wird und einen Masseausstoß von 250 kg/h realisiert. Dies bedeutet einen Jahresdurchsatz von ca. 2.000 t/a. Bei Plastifizierkosten von 0,25 €/kg und den heute anzusetzenden Strompreisen beläuft sich der finanzielle Aufwand, lediglich bezogen auf die Plastifizierarbeit, auf rund 50.000 € pro

Jahr. Der Einsatz eines kostengünstigen Energieträgers kann hier ein Einsparpotenzial bis zu 30.000 € pro Jahr und Anlage bieten.

2 ERDGAS IN DER EXTRUSION

Das hier vorgestellte alternative Plastifizierkonzept, entstanden in Zusammenarbeit mit der e.on Ruhrgas AG, soll den Grundstein legen für einen innovativen Neuansatz im Bereich der Kunststoffplastifizierung und somit eine mögliche Alternative zum herkömmlichen Einschneckenextruder aufzeigen. Ziel dieses Projektes ist es, den Primärenergieträger Erdgas als Hauptenergiequelle für die Plastifizierung vor dem Hintergrund zugänglich zu machen, dass keine Evolution bereits bestehender Extrusionsanlagen erfolgen soll. Es ist vielmehr ein genereller Neuansatz im Bereich der Plastifizierertechnik gemacht worden, basierend auf dem Grundgedanken, Erdgas als Primärenergieträger in einem neuartigen Kunststoffplastifiziersystem zu nutzen.

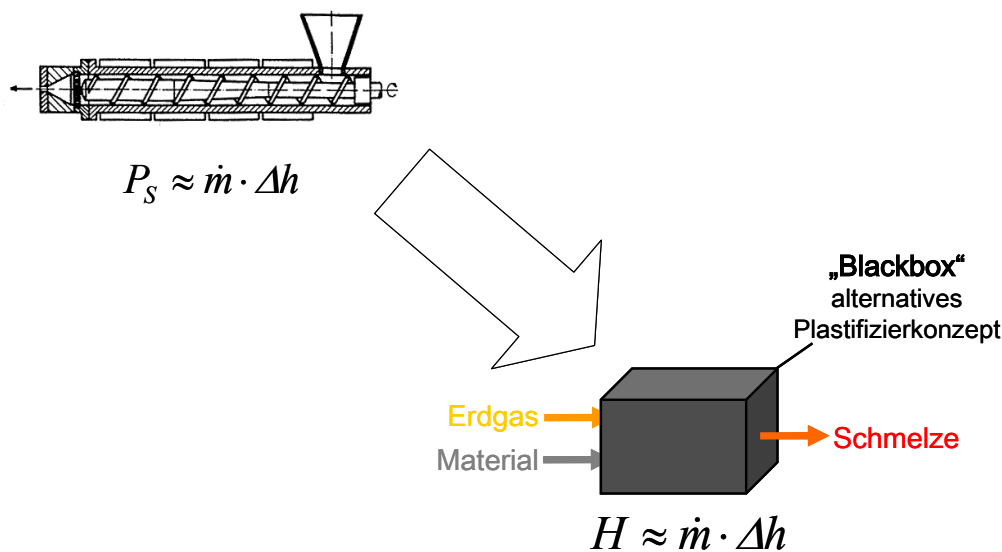


Bild 2: Neuansatz eines alternativen Plastifizierkonzepts

Ein Plastifiziersystem zu substituieren, welches in dieser Form bereits seit Jahrzehnten besteht, ist ohne Zweifel ein ehrgeiziges Vorhaben.

Die Anforderungen an das entwickelte Konzept orientieren sich demnach auch maßgeblich an dem Leistungsvermögen eines Standardextruders. Basierend auf den Anforderungen wurde vor dem Hintergrund der zur Verfügung stehenden Wärmeübertragungsmechanismen eine Konzeptfindung betrieben. In einem ersten Schritt ist mit Hilfe der Konzepte in einer Machbarkeitsstudie ermittelt worden, ob eine generelle Umsetzung der Idee „Erdgas in der Extrusion“ zu realisieren ist.

Ein bedeutendes Zwischenziel für das gesamte Vorhaben war die Identifizierung möglicher Konzepte, die das Potential für eine weiterführende Ausarbeitung und eine spätere Umsetzung in Aussicht stellen.

3 KONZEPTIONIERUNG

Unter Plastifizierextrudern versteht man laut Definition Anlagen, bei denen eine anfänglich feste Masse durch Erwärmung, Scherung und Verdichtung in eine homogene Schmelze umgewandelt wird und anschließend durch eine Düse oder ein Werkzeug gepresst werden kann. Ein herkömmlicher Extruder bewerkstelligt all diese Aufgaben in der Regel fast ausschließlich durch elektrische Antriebsleistung. In Bild 3 ist die Bilanzhülle um einen Extruder mit allen wichtigen eingehenden und austretenden Energieströmen dargestellt. Im laufenden Betrieb sind dies maßgeblich die Antriebsleistung sowie die benötigte Trockenenergie als Eingangsgrößen und die Schmelzeenthalpie sowie die Abwärme als abgegebene Leistungen. Aufgrund der Annahme, dass der Druckeinfluss in dem hier betrachteten Druckbereich von ca. 300 bar auf die Stoffwerte vernachlässigbar gering ist, werden in Anlehnung an [5] die Größen im Bezug auf die Wärmekapazität als gleich angesetzt $c_p = c_v = c$. Da die Schmelze in erster Näherung als inkompressibles Medium angesehen wird, geht die Zunahme der inneren Energie Δu einher mit der Enthalpieerhöhung Δh .

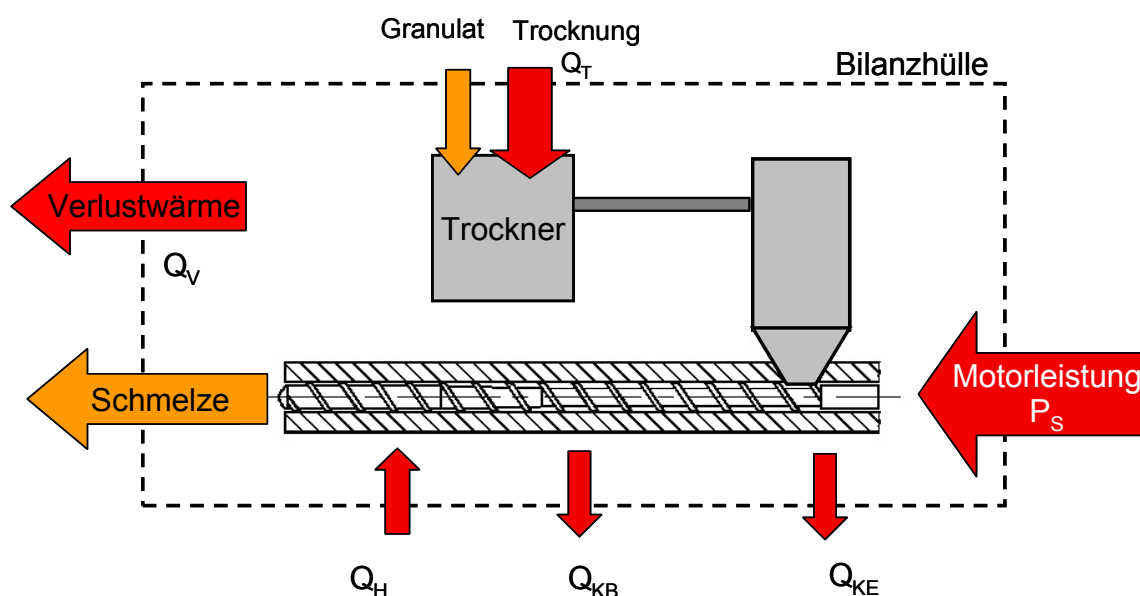


Bild 3: Leistungsbilanz eines herkömmlichen Extruders

Alle bisher veröffentlichten „alternativen Plastifizierkonzepte“ beschränken sich ebenfalls auf die dissipative Erwärmung des Granulatmassenstroms. Sie beschäftigen sich zwar mit der Umlenkung der Schmelze oder mit der Trennung

von Schmelze und Feststoff, doch der Einsatz alternativer Energieträger wurde bisher nicht behandelt.

Um nun den Energieträger Erdgas für die Kunststoffplastifizierung nutzbar zu machen, ist es essentiell zunächst die im Erdgas enthaltene Energie freizusetzen. Die im Erdgas enthaltene Menge Energie kann nur durch Reaktionen freigesetzt werden. Eine Möglichkeit ist es, durch die Verbrennung des Erdgases die gebundene Energie in Wärmeenergie umzuwandeln. So kann die Energie für die Erwärmung des Kunststoffes oder der Beheizung von Anlagenkomponenten, die in direktem Kontakt mit dem Kunststoff stehen, genutzt werden. Des Weiteren ist die Möglichkeit der Erzeugung eines Heißgasstromes durch Verbrennung gegeben. Über diesen Strom wird die Wärme direkt durch erzwungene Konvektion in den Kunststoff eingebracht. Die Erzeugung von Infrarotstrahlung kann über moderne Brennertechnik ebenfalls leicht und effizient realisiert werden, so dass die Möglichkeit gegeben ist, den Kunststoff über Strahlungsabsorption zu erwärmen. Von Beginn der Konzeptfindung an, war eine Vorgabe bei der Lösungsfindung maßgebend, und zwar sollte die Überführung jeglicher Antriebsleistung in eine dissipative Erwärmung des Granulats, die charakteristisch für die konventionelle Extrusion ist, vermieden werden.

Bild 4 stellt im Folgenden die Unterteilung der Hauptaufgabe in die vier essentiellen Teilaufgaben graphisch dar. Sinnvolle Kombinationen der einzelnen Teilkomponenten bilden die Konzeptstudien, aus welchen über ein objektives Bewertungsschema nach mehreren Optimierungsschritten ein favorisiertes Konzept ermittelt wurde.

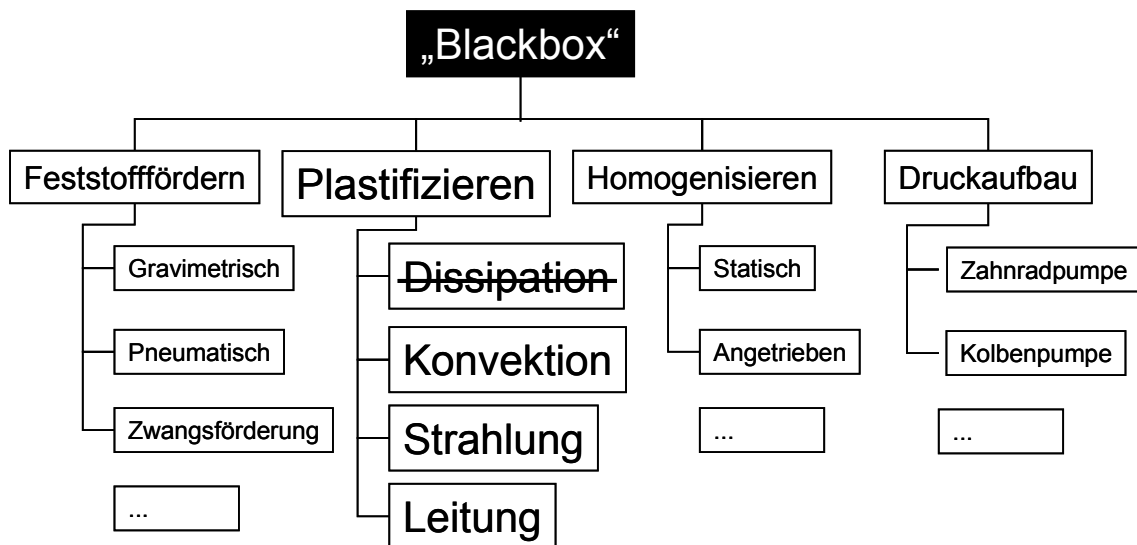


Bild 4: Konzeptfindung anhand der zu bewältigenden Teilaufgaben

4 EIN ALTERNATIVES PLASTIFIZIERKONZEPT

Das Konzept, das aus den Studien als das vielversprechendste hervorgegangen ist, basiert auf dem Verfahren des Wärmeeintrags über Konvektion und im Weiteren über Wärmeleitung im Materialmassenstrom. Charakteristisch für das Konzept ist der Aufbau bestehend aus zwei gekoppelten Wärmetauschersystemen sowie einer Feststofffördereinheit und einer Schmelzepumpe. Abbildung 5 zeigt den prinzipiellen Aufbau des Konzepts.

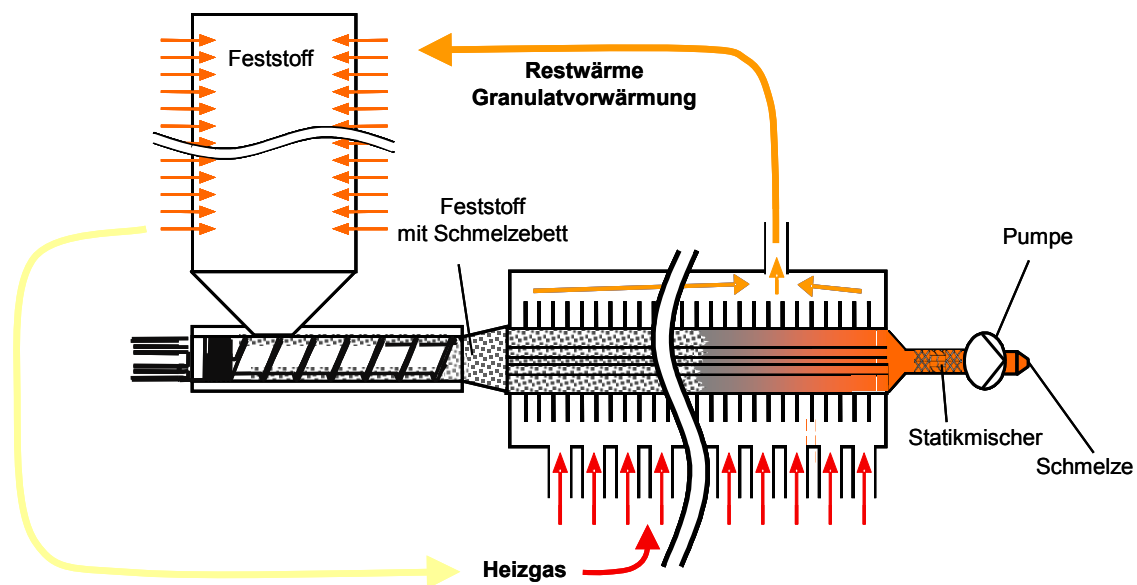


Bild 5: Schematische Darstellung des alternativen Konzepts

Zu Beginn des Prozesses wird das Kunststoffgranulat in einem ersten Feststoffwärmetauscher gespeichert, in dem die Vorwärmung des Granulates stattfindet. Während der Ausarbeitung der neuen Konzepte ist der Punkt der Granulatvorwärmung immer mehr zu einem nicht vernachlässigbaren Thema geworden. So ist die Bedeutung der definierten Vorwärmung für das hier vorgestellte System zu einem essentiellen Aufgabenteil geworden. Eine Vorwärmung des Materials ist aus zwei Gründen sinnvoll. - Zum einen kann der eigentliche Plastifizierprozess erheblich verkürzt werden, da es möglich ist, durch eine Vorwärmung bereits einen bedeutenden Teil der benötigten Enthalpieerhöhung in das Material einzubringen, ohne dass dieses schon aufschmilzt. - Zum anderen fällt bei der Temperierung des zweiten Prozessschritts, des Plastifizierens, ein nicht unbedeutender Abgasstrom an. Dieser besitzt immer noch eine ausreichend hohe Temperatur um das Granulat direkt vorzuwärmen, wodurch die Verluste des Gesamtsystems deutlich reduziert werden. Es ist jedoch zwingend notwendig, dass das Kunststoffgranulat den Wärmetauscher in einem rieselfähigen Zustand verlässt. Es darf lediglich definiert vortemperiert werden. Der Warmgasstrom sowie die Verweilzeit der Granulatkörner sind dementsprechend so gewählt, dass kein Aufschmelzen der Körner an den Oberflächen eintritt und somit kein Agglomerieren der Partikel auftritt. Nur so wird sichergestellt, dass

das Granulat aus dem Wärmetauscher in die Fördereinheit des Systems gelangen kann und eine Brückenbildung weitestgehend vermieden wird.

Wie in Abbildung 5 schematisch dargestellt, basiert die Einzugszone und Fördereinheit des Konzeptes auf einer Feststoffförderschnecke, welche aus dem Schüttgutwärmetauscher gespeist wird. An diese Einheit ist der Plastifizierwärmetauscher über eine Verteilerzone direkt angeschlossen.

Die Schnecke in der Einzugszone wird systembedingt zwar Reibung und somit Energie in das Granulat einbringen, dient aber ausschließlich der Förderung des Granulates sowie dem Druckaufbau zur Überwindung des anschließenden Wärmetauschers. Eine vollständige Plastifizierung des Granulates geschieht hier nicht. Die Einzugszone ist in Anlehnung an einen fördersteifen Extruder als Nutbuchseneinzug ausgelegt [3]. So wird eine möglichst effiziente Materialförderung erzielt. Eine besonders kurze Schneckenbauweise ermöglichte einen minimalen Energieeintrag durch Dissipation bei ausreichender Fördermenge [4,11].

Grundlegend für die Entwicklung dieses Konzeptes war die Überlegung, dass ein definiertes Schmelzebett schon nach dem Schneckenförderteil vorhanden sein muss bzw. zugelassen wird. Dieses Schmelzebett stellt Gleitebenen zwischen den noch zahlreich vorhandenen Feststoffpartikeln dar. So kann eine druckreduzierte homogene Verteilung des Materials auf einzelne Kanäle des Wärmetauschers realisiert werden [12]. Konzeptbedingt ist ein Energieeintrag, welcher über Scherung im Schneckenförderteil eingebracht wird, unvermeidbar. Wie bereits erwähnt, ist jedoch ein gewisser Anteil an Schmelze im Materialstrom erwünscht bzw. sogar Voraussetzung. Somit kommt der Granulatvorwärmung eine weitere wesentlich bedeutendere Aufgabe zu, nämlich die Masstemperatur gezielt vor dem Einzugsteil einzustellen.

Das Granulat ist materialspezifisch im Feststoffwärmetauscher so zu temperieren, dass ein Schmelzeanteil nach der Förderschnecke gewährleistet werden kann. Da dieser Anteil garantiert werden muss, ist eine elektrische Beheizung in der Förderzone angebracht worden. Der so entstehende Schmelzefilm ist entscheidend für die anschließende Verteilung des Granulates in dem Plastifizierwärmetauscher.

Wie im Prinzipbild 6 gezeigt, ist es sinnvoll, den Wärmestrom gezielt zwischen den einzelnen Teilsystemen aufzuteilen. So können materialabhängig die Temperaturen im Plastifiziersystem gesteuert werden, und der benötigte Schmelzeanteil vor dem Plastifizierwärmetauscher lässt sich definiert herbeiführen. Um eine vollständige Plastifizierung des Kunststoffstromes unter Verwendung von Erdgas als Primärenergieträger sicherzustellen, muss eine möglichst große Oberfläche für die Wärmeübertragung geschaffen werden. In der Verteilerzone wird hierzu der Zylinderdurchmesser nach der Förderzone stark erweitert. Der anschließende Wärmetauscher ist so ausgeführt, dass das Material auf einzelne Bohrungen bzw. Kanäle aufgeteilt wird, um eine effiziente Plastifizierung zu ermöglichen. Die Länge des Plastifizierwärmetauschers ergibt sich aus dem Massedurchsatz und der Aufschmelzgeschwindigkeit.

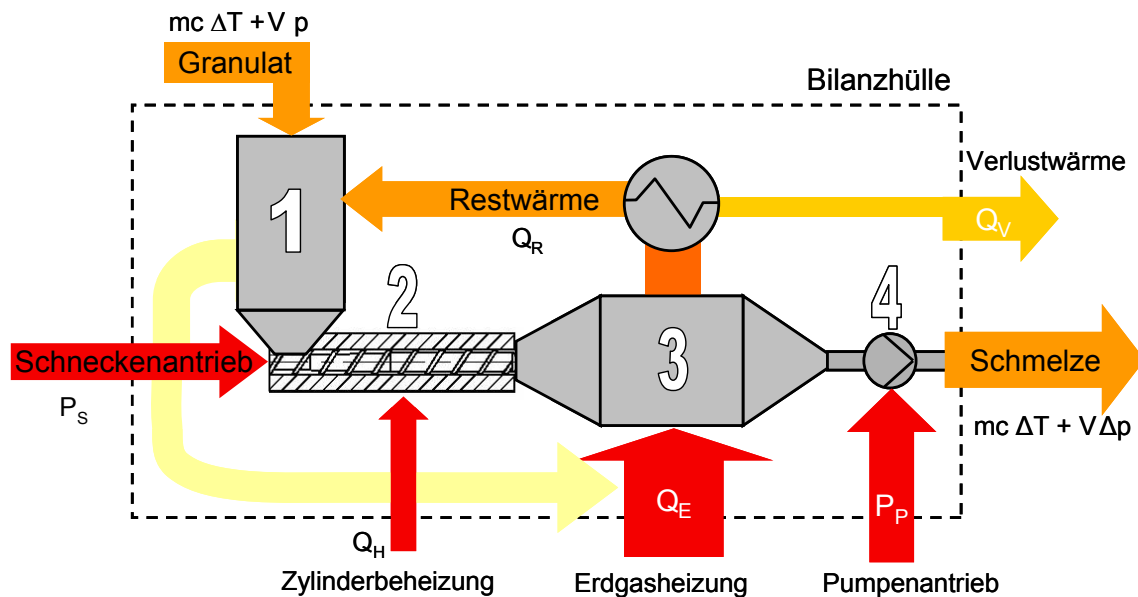


Bild 6: Leistungsbilanz des neuen Konzeptes

Die Einlaufseite des Wärmetauschers ist mit Einlaufsenkungen versehen, um Totzonen und Prallflächen bei der Verteilung des Granulates auf die Bohrungen zu vermeiden. Somit wird das gesamte Gegendruckverhalten des Systems lediglich über die Wandreibung in den Bauteilen bestimmt. Dieser Umstand wirkt sich wiederum positiv auf die benötigte elektrische Leistung der Einzugs- und Förderzone aus.

Von außen wird der Plastifizierwärmetauscher über eine Erdgas betriebene Zylinderheizung beheizt, die eine definierte Temperierung des Wärmetauschers ermöglicht. Durch den Kontakt des Kunststoffes mit der Rohrrinnenwand wird dieser über Wärmeleitvorgänge erwärmt und im weiteren Verlauf vollständig aufgeschmolzen. Grundvoraussetzung ist, dass das Material während des gesamten Prozesses nicht thermisch geschädigt wird, was den Wärmetauscher materialspezifisch an eine maximale Wandtemperatur bindet.

Am Ende des Wärmetauschers werden die Einzelströme aus den Bohrungen wieder zusammengeführt. In der letzten Zone kann mit Hilfe einer gängigen Schmelzpumpe der benötigte Druck für eine Verarbeitung aufgebaut werden. Ein Statikmischteil sorgt für eine zusätzliche Homogenisierung des Schmelzestroms.

Dieses hier vorgestellte Konzept stellt ein vielseitiges, variables und auch druckstabiles Plastifiziersystem dar, welches in seinem zu erwartenden Bauvolumen ebenfalls die Baugröße eines vergleichbaren Standardextruders nicht überschreiten wird. Ein großer Vorteil ist die Nutzung der gewählten Teilkomponenten wie z. B. der Nutbuchseinzug oder der Wärmetauscher. Diese Komponenten sind am Markt erhältlich und werden in der Industrie erfolgreich eingesetzt, sie müssen nur noch an die gestellten Anforderungen angepasst und

für das neue Konzept ausgelegt werden [9]. Ebenso ist die Beheizung der Wärmetauscher so gewählt worden, dass die bereits entwickelte Erdgas-Zylinderbeheizung Verwendung finden kann [10].

5 ENERGETISCHE AUSLEGUNG DES KONZEPTE

Von entscheidender Bedeutung für ein wirtschaftlich einsetzbares alternatives Konzept ist die Art der Energieeinbringung in den Kunststoff. Es gilt sicherzustellen, dass ein Großteil der Energie aus Erdgas gewonnen wird. Für die Auslegung eines solchen Erdgas basierten Plastifiziersystems ist eine Aufteilung der Energieströme von max. 30 % elektrischer Leistung zu min. 70 % Erdgas basierter Energie erforderlich. Insgesamt ergeben sich vier wichtige Teilzonen, in denen Energie in das System eingebracht bzw. umgesetzt werden muss. In Abbildung 6 ist eine Leistungsbilanz für das System dargestellt.

Durch die Verbrennung des Erdgases wird ein Heißgasstrom erzeugt, der durch den Plastifizierwärmetauscher (3) geleitet wird. Durch die Vorwärmung (1) hat das Granulat am Eintritt zum Plastifizierwärmetauscher eine Temperatur unterhalb der Schmelztemperatur und muss durch den Erdgasstrom auf die materialspezifische Schmelzetemperatur gebracht werden. Dieser Energieanteil, um eine konstante Wandtemperatur von bis zu 350 °C zu realisieren, wird vollständig aus Erdgas gewonnen. Innerhalb dieses Wärmetauschers findet der Hauptanteil der Plastifizierung statt, das Granulat wird vollständig aufgeschmolzen. Die Restwärme, die der Heißgasstrom nach dem Wärmetauscher noch trägt, wird zum Schüttgutwärmetauscher (1) geleitet. Da sich ein nicht unbedeutender Feuchtigkeitsgehalt im Abgasstrom befindet, welcher nicht in den Extrusionsprozess gelangen darf, darf das Reaktionsgas nicht direkt durch das Granulat geleitet werden. Aus diesem Grund wird in einem zwischengeschalteten Abgas-Luft-Wärmetauscher der Restwärmestrom das Schüttgut übergeben. Die Temperatur des Restwärmestroms ist ausreichend hoch, um das Granulat zu gut vorzuwärmen.

Um ein effizientes Konzept aufzustellen, muss laut Vorgabe der Energieanteil für die Förderleistung möglichst gering ausfallen. Aus diesem Grund wurde die Schnecke für die Einzugs- und Förderzone (2) so ausgelegt, dass sie klein und vor allem kurz ausfallen kann. Um mit ihr ausreichende Förderleistung zu erzielen, müssen hohe Drehzahlen gefahren werden. Die hohen Drehzahlen ermöglichen den Antriebsmotor der Förderschnecke in der Nähe seiner Nenndrehzahl zu betreiben und damit im Bereich guter Wirkungsgrade. Über diese Parameter lässt sich ein energetisch günstiges und mit dem Hauptanteil von 70 % auf dem Primärenergieträger basierendes Plastifiziersystem realisieren. Die Gleichung für die Energiebilanz des gesamten Systems lässt sich wie folgt aufstellen:

$$P_S + P_{\Delta p} + \dot{Q} = \dot{m} \cdot \Delta h + \dot{Q}_V + \dot{V} \cdot \Delta p$$

Die Förderleistung P_S und die Leistung für den Druckaufbau $P_{\Delta p}$ werden aus elektrischer Energie gewonnen und in Massedurchsatz m und Gegendrucküberwindung Δp umgesetzt. Der Anteil der Antriebsenergie, der zur dissipativen Erhöhung der Kunststoffenthalpie beiträgt, ist in der Gesamtenthalpieerhöhung Δh des Kunststoffes mitberücksichtigt. Der Hauptanteil der zur Plastifizierung des Kunststoffstroms und zum Betrieb der Anlage benötigten Leistung wird durch den kontinuierlichen Wärmestrom über die Wärmetauschertemperaturerhöhung eingebracht.

Geht man von sehr geringen Verlusten an die Umgebung Q_V aus, was dieses Konzept durch gute Isolationsmöglichkeiten zulässt, kann man in erster Näherung voraussetzen, dass die im Erdgas vorhandene Energiemenge fast vollständig für die Plastifizierung des Kunststoffes genutzt wird. Durch die „mehrfache“ Verwendung des Heißgasstroms können sehr gute Wirkungsgrade bei der aus Erdgas gewonnenen Energie erreicht werden. Somit wirkt sich nicht nur der Kostenvorteil von Erdgas gegenüber Strom, sondern auch die effiziente Energieumsetzung positiv bei einer Bilanzierung der Anlage aus. Verluste an die Umgebung können nicht vollkommen vernachlässigt werden und sind daher der Vollständigkeit halber bei der Bilanzierung mit in die Berechnung eingeflossen.

Da die Verarbeitungstemperatur eine vorgegebene Größe darstellt, ist die zu bewerkstellende Enthalpieerhöhung bekannt. Sie teilt sich in die Enthalpieerhöhung durch Reibung im Fördersystem und die Summe beider Temperaturerhöhungen der Wärmetauscher auf.

$$\Delta h = \Delta h_{fri} + \Delta h_{WT1} + \Delta h_{WT2}$$

Für den Granulatwärmetauscher errechnet sich die maximal zulässige Enthalpieerhöhung anhand der zulässigen Temperaturerhöhung vom Ausgangszustand T_0 zur Einzugstemperatur T_1 . Zur Gewährleistung einer gesicherten Förderung liegt diese Temperatur unter der Anschmelzgrenze des Polymers. Da noch kein Übergang zur Schmelze erfolgt, kann die Wärmekapazität für den Feststoff als konstant angenommen werden.

Die Forderung nach einem minimalen Energieeintrag durch elektrische Leistung bestimmt ihre Auslegung des genutzten Einzugssystems und der erforderlichen Schnecke. Die Dimensionierung ist in Anlehnung an die Berechnungsgrundlagen für Einschneckenextruder erfolgt. Anhand der gegebenen Geometriedaten werden Kennzahlen wie der Volumendurchsatz und der mögliche Druckaufbau berechnet und auf die dafür benötigte Leistung bezogen. Es wird der Druck zum Überwinden des Plastifizierwärmetauschers sowie der Pumpenvordruck aufgebracht. Der Druckaufbau des Wärmetauschers ist nicht trivial zu bestimmen, da in ihm ein Übergang vom Feststoff zur Schmelze erfolgt. Überschlägig wurde der Druckverbrauch für eine laminare Rohrströmung eines schmelzeförmigen Polymers unter quasi isothermen Bedingungen berechnet, da maßgeblich die temperaturabhängige Viskosität in Wandnähe für den Strömungswiderstand verantwortlich ist. Der zu überwindende Widerstand errechnet sich anhand der Theorie der Widerstandsnetzwerke mit Bezug auf die Anzahl der benötigten

Kanäle im Plastifizierwärmetauscher auf einen Maximalwert von 50 bar. Da der Pumpenvordruck zur Speisung der Zahnradpumpe ebenfalls durch den Schneckenantrieb realisiert wird, ergibt sich die benötigte elektrische Antriebsleistung für die Förderzone zu:

$$P_S = P_{fri} + P_{\Delta p_P} = \dot{m} \cdot \Delta h_{fri} + \dot{V} \cdot \Delta p_P$$

Hierbei teilt sich die Antriebsleistung in dissipative Erwärmung sowie den Druckaufbau bis zum Eintritt in die Schmelzepumpe auf. Die Temperatur vor Eintritt in den Wärmetauscher, bestimmt sich aus der Forderung nach einem bereits vorhandenen Schmelzebett im Massestrom zu einer Temperatur oberhalb der Kristallitschmelztemperatur. Basierend dieser erforderlichen Temperatur ist die Länge des Plastifizierwärmetauschers bestimmt worden, um dort die zur Plastifizierung nötige Temperaturerhöhung vollständige zu gewährleisten.

Zur Sicherstellung der erforderlichen Eintrittstemperatur sind in Förderzone elektrische Beheizungen angebracht worden. Des Weiteren erfordert die Schneckenpumpe eine Temperierung die ebenfalls elektrisch betrieben ist. Somit teilt sich der erforderliche Wärmestrom wie folgt auf.

$$\dot{Q} = \dot{Q}_E + \dot{Q}_H$$

Die Leistung zur Druckerhöhung von Pumpenvordruck auf benötigten Verarbeitungsdruck wird durch die Schmelzpumpe geleistet.

$$P_P = P_{\Delta p} - P_{\Delta p_P}$$

Während der so durchgeführten Auslegung hat sich gezeigt, dass der Forderung von minimal 70 % Energieeintrag aus Erdgas theoretisch nachgekommen werden kann.

Bei der Betrachtung der Gesamtanlage fällt auf, dass immer noch ein nicht unbedeutender Anteil an Leistung aus elektrischer Energie gewonnen wird. Denkbar wäre auch hier eine Umrüstung des Schneckenantriebs von einem Elektromotor auf einen Erdgas betriebenen Verbrennungsmotor. Dies ist allerdings bisher nicht sinnvoll, da gängige, am Markt erhältliche Erdgasmotoren nur in einem sehr hohen Lastbereich weit über 10 kW effizient einsetzbar sind. Um der Effizienz der Anlage Rechnung zu tragen und den Anteil der nötigen elektrischen Leistung gering zu halten, kann der Antriebsmotor bei hohen Drehzahlen nahe der Nenndrehzahl des Motors betrieben und so der maximal mögliche Wirkungsgrad des Motors optimal ausgenutzt werden.

Ein weiterer Vorteil des Konzeptes ist die kompakte Komponentenbauweise. Wie bereits aus der Schemaansicht in Abbildung 5 ersichtlich, ist das Konzept aus verschiedenen Komponenten zusammengesetzt, die alle individuell ausgelegt und angepasst werden können. So kann für jede Anlagenanforderung das optimale System konfiguriert und an die gewünschten Durchsätze adaptiert werden.

6 PROTOTYPENTWICKLUNG

Basierend auf diesen Vorarbeiten ist eine Konstruktion eines Prototyps erfolgt, der für einen Durchsatz von 100 Kilogramm pro Stunde ausgelegt wurde. Als Bezugsmaterial wurde ein Polyolefin gewählt, da es sich bei den meisten Extrusionsanwendungen um Massenprodukte eben dieser Kunststofftypen handelt. Die vollständige Auslegung und Erprobung des Prototypen sowie dessen Teilkomponenten stellen nicht den Inhalt dieses Artikels dar, dies wird vielmehr Gegenstand einer weiterführenden Veröffentlichung sein.

In den folgenden Abbildungen ist der Prototyp als Baugruppenkonstruktion dargestellt. Das Bild zeigt das dimensionierte Plastifizierkonzept. Es verdeutlicht die mögliche kompakte Bauweise, die in ihren Abmaßen einen herkömmlichen Extruder gleichen Leistungsvermögens nicht überschreitet.

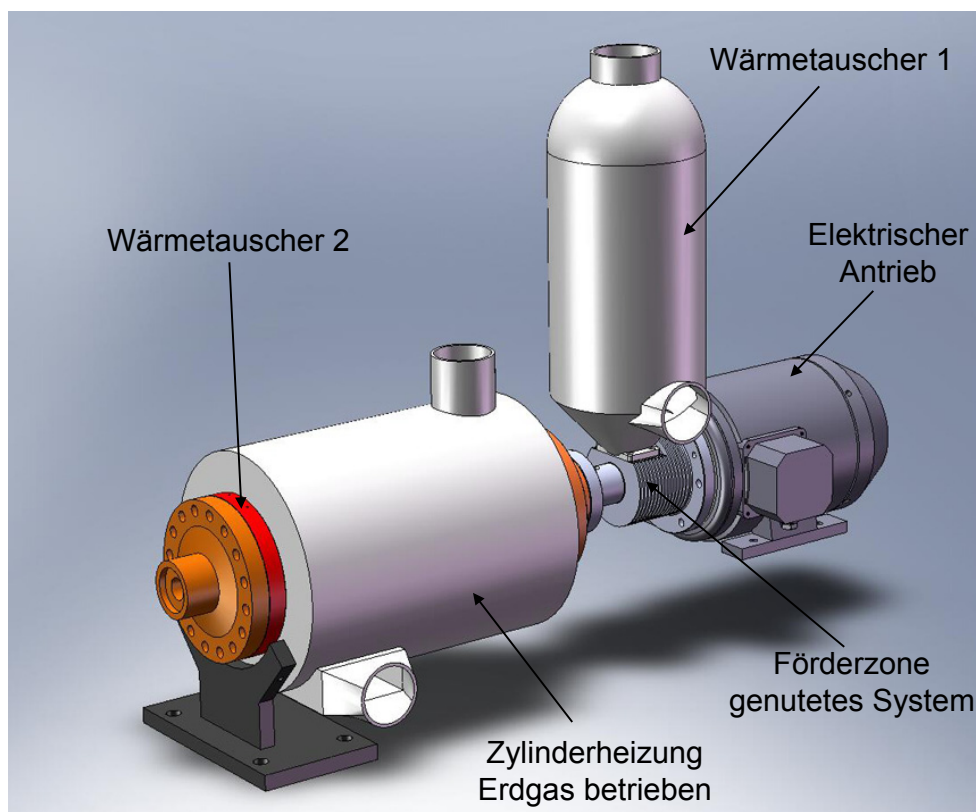


Bild 7: Prototyp als Baugruppenkonstruktion

Mit dargestellt ist die Erdgas basierte Zylinderheizzone der Firma WEMA im montierten Zustand auf dem Plastifizierwärmetauscher. Das Heizelement entspricht in seiner Dimensionierung dem erhältlichen Standardmodell.

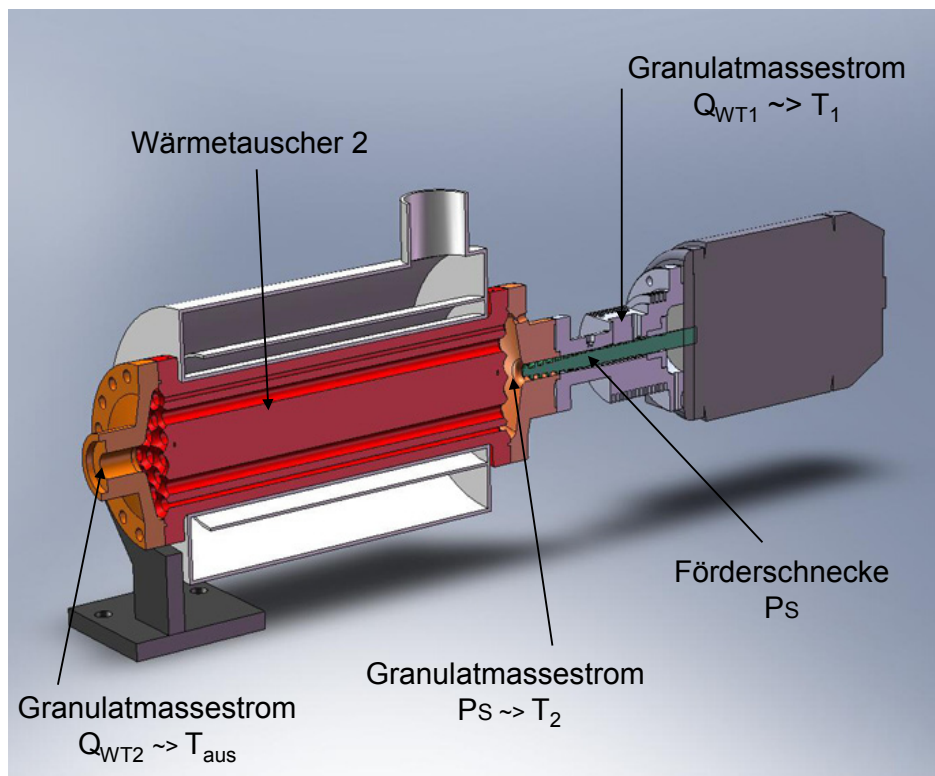


Bild 8: Baugruppenkonstruktion Schnittdarstellung

Die Darstellung 8 zeigt schematisch den Aufbau des Konzepts in Kombination mit den erforderlichen Energieeinträgen bezogen auf die jeweilige Zone und die daraus resultierenden lokalen Massetemperaturen. Basierend auf der Restwärme aus dem Abgasvolumenstrom (Q_{WT1}) erfolgt die Granulattemperaturerhöhung im Schüttgutwärmetauscher auf die Temperatur T_1 . Im Förderteil und der Einzugszone wird die Antriebsenergie (P_s) prinzipbedingt in Wärme umgesetzt. Zu erkennen ist die aus energetischen Gründen im Vergleich sehr kurz gehaltene Förderzone. Die Länge der Fördereinheit liegt im Bereich von $8 D$ bei einem Schneckendurchmesser von 25 mm . Dabei entfallen $4 D$ auf eine genuetete Einzugszone und weitere $4 D$ auf die Förderzone mit Druckaufbau bei axial auslaufenden Nuten. Eine zusätzliche Zonenbeheizung bewerkstelligt bei Bedarf die Erwärmung auf die Eintrittstemperatur (T_2). Bei Verlassen dieser Zone führt der Massenstrom nunmehr einen definierten Anteil an aufgeschmolzenem Polymer. Ermöglicht wird hierdurch die homogene Verteilung des Massenstroms auf den Plastifizierwärmetauscher. Dieser besitzt auf einem Zylinderdurchmesser von 180 mm dreißig konzentrisch verteilte Bohrungen, die auf einer Länge von 500 mm den Kunststoff durch den Wärmetauscher leiten. In ihm erfolgt die benötigte Temperaturerhöhung des Massenstroms über der Wärmestrom Q_{WT2} bis zur Austrittstemperatur T_{aus} .

Die Teilkomponenten des Konzepts sind bereits am Lehrstuhl für Konstruktion und Kunststoffmaschinen der Universität Duisburg-Essen gefertigt worden. In Kombination mit einem Steuersystem wurde ein erster funktionsfähiger Prototyp

dieses Konzepts aufgestellt (Abbildung 9). Versuchsreihen hinsichtlich der maximalen Plastifizierleistung und der Optimierung der gekoppelten Wärmetauscher befinden sich in der Durchführung.



Bild 9: Prototyp eines Erdgas betriebenen Plastifizierkonzepts

Abschließend lässt sich festhalten, dass das hier vorgestellte Konzept durchaus das Potenzial besitzt, Erdgas für die Plastifizierung nutzbar zu machen. Nicht zuletzt aufgrund der vielen konstruktiven Freiheitsgrade, die dieses Konzept mit sich bringt, bietet es ein deutliches Entwicklungspotenzial. Mit diesem Konzept ist grob der Rahmen für ein mögliches alternatives Plastifizierkonzept der Zukunft festgesetzt. Es bietet jedoch immer noch viel Raum für grundlegende Forschung und Untersuchungen auf dessen einzelnen Teilgebieten.

Es sei angemerkt, dass der Einsatz alternativer Energiekonzepte in der Kunststofftechnik noch ein sehr junges Forschungsgebiet ist. Bestätigen sich die theoretischen Modelle und Berechnungen, so kann dieses Konzept der erste Schritt in die Richtung eines kostengünstigen alternativen Extrusionskonzeptes sein, ohne Qualitäts- oder Leistungseinbußen hinnehmen zu müssen.

Dieser Arbeit wurde in Rahmen eines Forschungsprojektes mit der E.ON Ruhrgas AG durchgeführt. Die Bearbeitung erfolgte durch die Unterstützung der Fa. WEMA GmbH Lüdenscheid, der Fa. Sabcin GmbH/Deutschland sowie der Fa.

ETA Kunststofftechnologie GmbH Troisdorf. Wir bedanken uns für die Förderung dieses Projektes.

Des Weiteren gilt besonderer Dank Herrn Cand. Ing. F. Heinzler, der die Erarbeitung dieses Konzeptes im Rahmen seiner Projektarbeit tatkräftig unterstützt hat.

8 LITERATUR

- [1] Adelt, M. Aktuelle Entwicklungsaktivitäten für die Kunststoffindustrie
Fachseminar zur FAKUMA 2008 „Erdgas in der Kunststoffverarbeitung“, Lindau, 2008
- [2] Hungerkamp, T. Erdgasbeheizte Plastifiziersysteme
Vortrag Fachseminar zur K2007 „Erdgas in der Kunststoffverarbeitung, Krauss-Maffei GmbH, Essen/Düsseldorf, 2007
- [3] Koch, M. Berechnung und Auslegung von Nutbuchsenextrudern
Universität –GH- Paderborn, Dissertation, 1987
- [4] Michels, R. Verbesserung der Verarbeitungsbandbreite und der Leistungsfähigkeit von Einschneckenextrudern
Universität Duisburg-Essen, Dissertation, 2005
- [5] Menges, G.
Haberstroh, E.
Michaeli, W.
Schmachtenberg, E. Werkstoffkunde Kunststoffe
Carl Hanser Verlag, München, 2002
- [6] N.N. Gasbetriebene Kunststoffverarbeitungsmaschine
Krauss-Maffai Kunststofftechnik GmbH
Gebrauchsmusterschrift DE 20200500430U1,
Deutsches Patent- und Markenamt, 2005
- [7] N.N. Vorrichtung zum Temperieren von Schüttgut
Coperion Waeschle GmbH & Co. KG
Offenlegungsschrift DE 102004041375A1,
Deutsches Patent- und Markenamt, 2004
- [8] N.N. Innovative Erdgaslösungen für die Kunststoffverarbeitung
E.ON Ruhrgas AG, Essen, 2008
- [9] N.N. URL: www.coperion.com,
Coperion GmbH 2008
- [10] N.N. URL: www.wema-net.com,
WEMA GmbH 2008

- [11] Rahal, H. Entwicklung alternativer Methoden zur Plastifizierung und Feststoffförderung in der Extrusion
Universität Duisburg-Essen, Dissertation, 2008
- [12] Shah, R. K.; Sedulic, D. P. Fundamentals of heat exchanger design
Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons, Inc., 2003

9 FORMELZEICHEN UND ABKÜRZUNGEN

c	kJ/kg K	spezifische Wärmekapazität
c_p	kJ/kg K	spezifische isobare Wärmekapazität
c_v	kJ/kg K	spezifische isochore Wärmekapazität
H	kJ/kg	Enthalpie
Δh	kJ/kg	spezifische Enthalpieerhöhung
Δh_{fri}	kJ/kg	spezifische Enthalpieerhöhung durch Reibung
Δh_{WT1}	kJ/kg	spezifische Enthalpieerhöhung Wärmetauscher 1
Δh_{WT2}	kJ/kg	spezifische Enthalpieerhöhung Wärmetauscher 2
m	kg/s	Massestrom
p	Pa	Umgebungs- bzw. Eingangsdruck
Δp	Pa	Druckerhöhung auf Verarbeitungsdruck
Δp_P	Pa	Druckerhöhung der Schmelzepumpe
Δp_{WT2}	Pa	Druckverbrauch im Wärmetauscher 2
P_{fri}	kW	Dissipativer Leistungsanteil
P_P	kW	Leistung der Schmelzepumpe
$P_{\Delta p}$	kW	Leistung zum Erreichen des Verarbeitungsdrucks
$P_{\Delta pP}$	kW	Leistung zum Erreichen Pumpenvordrucks
P_S	kW	Leistung des Schneckenantriebs
Q	kJ/s	Wärmestrom
Q_E	kJ/s	Wärmestrom Erdgas
Q_H	kJ/s	Wärmestrom Zylinderheizung
Q_{KB}	kJ/s	Wärmestrom Kühlgebläse
Q_{KE}	kJ/s	Wärmestrom Einzugs Kühlung
Q_R	kJ/s	Restwärmestrom
Q_T	kJ/s	Wärmestrom Trocknung

Q_V	kJ/s	<i>Verlustwärmestrom an die Umgebung</i>
Q_{WT1}	kJ/s	<i>Wärmestrom Schüttgutwärmetauscher</i>
Q_{WT2}	kJ/s	<i>Wärmestrom Plastifizierwärmetauscher</i>
ΔT	K	<i>Temperaturerhöhung</i>
T	K	<i>Umgebungs- bzw. Eingangstemperatur</i>
T_1	K	<i>Massetemperatur nach Schüttgutwärmetauscher</i>
T_2	K	<i>Massetemperatur nach Förderzone</i>
T_{aus}	K	<i>Austrittstemperatur</i>
V	m^3/s	<i>Volumenstrom</i>

Stichworte:

Extrusion, Plastifizierung, alternatives Plastifizierkonzept, Erdgasanwendung, Energieeffizienz

Keywords:

extrusion, plastification, alternative plastification concept, natural gas, energy efficiency

Autor/author:

Prof. Dr.-Ing. Johannes Wortberg (Professor)
Dipl.-Ing Markus Bussmann (Autor)
Universität Duisburg - Essen
Institut für Produkt Engineering – Konstruktion und
Kunststoffmaschinen
Lotharstr. 1
47057 Duisburg

E-Mail-Adresse: ipe-kkm@uni-due.de
Webseite: www.uni-due.de/kkm
Tel.: +49(0)203/379-3252
Fax: +49(0)203/379-4379

Herausgeber/Editor:

Europa/Europe
Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Gottfried W. Ehrenstein, verantwortlich
Lehrstuhl für Kunststofftechnik
Universität Erlangen-Nürnberg
Am Weichselgarten 9
91058 Erlangen
Deutschland
Phone: +49/(0)9131/85 - 29703
Fax.: +49/(0)9131/85 - 29709
E-Mail-Adresse: ehrenstein@ikt.uni-erlangen.de

Amerika/The Americas
Prof. Prof. h.c Dr. Tim A. Osswald,
responsible
Polymer Engineering Center, Director
University of Wisconsin-Madison
1513 University Avenue
Madison, WI 53706
USA
Phone: +1/608 263 9538
Fax.: +1/608 265 2316
E-Mail-Adresse: oss-wald@engr.wisc.edu

Verlag/Publisher:

Carl-Hanser-Verlag
Jürgen Harth
Ltg. Online-Services & E-Commerce,
Fachbuchanzeigen und Elektronische Lizenzen
Kolbergerstrasse 22
81679 Muenchen
Tel.: 089/99 830 - 300
Fax: 089/99 830 - 156
E-mail-Adresse: harth@hanser.de

Beirat/Editorial Board:

Professoren des Wissenschaftlichen
Arbeitskreises Kunststofftechnik/
Professors of the Scientific Alliance
of Polymer Technology