

Abschlussbericht

zum Verbundprojekt:

Entwicklung eines Konzepts zur Auslegung von energetisch optimierten Plastifiziereinheiten – Teilvorhaben 4 – Förderkennzeichen 01 RC 0046

Arenz GmbH, Meckenheim

I.1 Aufgabenstellung

Die Erhöhung der Wirtschaftlichkeit bei gleichbleibender Maschinengröße und möglichst kleiner Motorgröße ist eines der Kernziele der Firma Arenz im Rahmen des BMBF-Projektes „Energetische Optimierung von Einschneckenplastifiziereinheiten“.

Die Aufgabe bestand darin, drei unterschiedliche Einschneckenplastifiziereinheiten wirtschaftliche und energetisch zu optimieren. Zu diesem Zweck sollten drei unterschiedliche Einschneckenextruder zum Einsatz kommen. Um bei den experimentellen Untersuchungen eine große Bandbreite abzudecken wurden unterschiedliche Betriebspunkte untersucht.

Eine wirtschaftlich optimierte Plastifiziereinheit führt aufgrund von Ressourceneinsparungen (weniger Ausschuss) und kleinerer zu verwendender Maschinen (geringere notwendige Motorleistung) neben geringeren Kosten zu einer höheren Energieeffizienz.

Die für die Plastifiziereinheit benötigte Leistung bestimmt die Größe der eingesetzten Motorleistung. Dementsprechend sollte für eine Plastifiziereinheit eine optimale Motorgröße verwendet werden und nicht ein zu großer und demnach zu teurer Motor bzw. auch nicht ein zu kleiner Motor, der im Betrieb versagt.

Eine energetische Optimierung lässt sich vielfach durch eine Änderung des Schneckenkonzepts erreichen. Folglich sollen unterschiedliche Plastifiziereinheiten, wie z.B. Glattrohr-/Nutbuchsenextruder in Kombination mit Drei-Zonen-Schnecken und Barriere-

schnecken getestet und deren Auswirkung auf das energetische Verhalten analysiert werden.

Dieses führt zu einer Verbesserung des Umweltschutzes, dementsprechend sollte dieses Vorhaben einen Beitrag zur Sachbeihilfe im Rahmen des Förderprogramms „Forschung für die Umwelt“ im Bereich „Integrierter Umweltschutz in der Kunststoff- und Kautschukindustrie“ leisten.

I.2 Voraussetzung des Vorhabens

Die Arenz GmbH ist ein Unternehmen, welches auf dem Gebiet der Plastifizier- und Verschleißtechnik innerhalb des Kunststoffmaschinenbaus arbeitet und dort ein breites Fachwissen besitzt. Die Firma Arenz besitzt ein eigenes Technikum in dem die für die Projektdurchführung relevanten Untersuchungen stattfanden.

Die Firmenphilosophie wird durch den konsequenten Willen zur Kundenorientierung und Produktqualität geprägt. In den verschiedenen Bereichen, von der Fertigung und Regenerierung von Verschleißteilen bis hin zur kompletten Lieferung von Extrudern, setzt die Arenz GmbH ihr langjähriges Know-how effizient ein. In diesem Fall sind erstklassige Produkte und zufriedenen Kunden der sichtbare Erfolg der Firmenstrategie.

Zum Erreichen der zuvor genannten Ziele ist es notwendig die bestehenden Plastifiziereinheiten zu analysieren und einer Leistungsmessung durchzuführen. Die betrachteten Schnecken lassen sich auf Basis mathematisch-physikalischer Modelle mit Hilfe des weltweit anerkannten Simulationsprogramms **REX** (**Rechnergestützte EXtruderauslegung**) in Zusammenarbeit mit dem Institut für Kunststofftechnik (KTP), nachrechnen. An dieser Stelle sei erwähnt, dass die Firma Arenz seit Beginn (vor ca. 15 Jahren) Mitglied im dem Software Gemeinschaftsforschungsprojekt **REX** ist und diese Software **REX** auch regelmäßig nutzt. In diesem Fall lässt sich das über die Jahre entstandene Know-how hervorragend in das Forschungsprojekt „Energetische Optimierung“ einbringen.

Durch den Einsatz des Simulationsprogramms **REX** können bei der Auslegung der Plastifiziereinheiten zeit- und kostenintensive Experimente weitestgehend vermieden werden. Hierbei besteht die Möglichkeit verschiedenste Schneckengeometrien und

Plastifizierkonzepte auf einen herkömmlichen Computer zu simulieren. Die jeweiligen simulierten Änderungen und Auswirkungen lassen sich sofort interpretieren, ohne jeweils die Plastifiziereinheit zu fertigen und experimentelle Untersuchungen durchzuführen.

Eine solche auf den Einsatz der Simulationsprogramme basierende Optimierung der Verarbeitungsprozesse, hinsichtlich der Leistungsumsetzung, dient der Verbesserung bzw. Verminderung des Energieeintrags und leistet somit einen Beitrag zur angewandten Forschung. Ein weiterer Vorteil einer optimierten Prozessgestaltung ist die Vermeidung von Ausschussteilen, d.h. die Einsparung von Ressourcen.

Die Entwicklung neuer Technologien und Produkte, sowie eine detaillierte Werkstoffkenntnisse sind die Grundlage für Innovationen im Dienste des Kunden.

Um wirtschaftlich und konkurrenzfähig arbeiten zu können, ist eine zuverlässige und effiziente Arbeitsweise unserer Kunststoffanlagen notwendig. Normalerweise sind keine finanziellen Mittel vorhanden, um neben den eigentlichen Firmentätigkeiten solche Projekte zu ermöglichen.

Eine Optimierung der Plastifiziereinheiten ist aus energetischer Sicht reizvoll, jedoch unter ökonomischer Sicht riskant, da die Erfolgsaussichten, wie bei Forschungsprojekten üblich, nicht unbedingt garantiert sind. Insbesondere die Anzahl an Iterationsschritten, bis ein entsprechendes Schneckenkonzept vorliegt, ist eine für uns schwer kalkulierbare Größe.

Im Rahmen dieses BMBF-Forschungsvorhabens ist, vor dem Hintergrund einer finanziellen Unterstützung, eine umfangreiche und systematische Untersuchung der anstehenden Problematik möglich.

I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Im Technikum der Firma Arenz und bei der Firma DSG Canusa wurden verschiedene Plastifiziereinheiten unter energetischen Gesichtspunkten analysiert und einer Leistungsmessung unterzogen. Für die experimentellen Untersuchungen sollten unter-

schiedliche Einschneckenextruder mit einem Schneckendurchmesser von $D=30$ mm, $D=45$ mm und $D=60$ mm zum Einsatz kommen. Eine Analyse beinhaltet die Messung des Massedurchsatzes, der Massetemperatur, verschiedene Drücke entlang der Plastifiziereinheit, die Messung des zum Durchströmen des Werkzeugs notwendigen Drucks sowie die Messung der notwendigen Leistung für den Extrusionsprozess. Diese Daten wurden für alle anfallenden Produktionsbedingungen (z.B. verschiedene Extruderkonzepte, unterschiedliche Schnecken, verschiedene Betriebspunkte) über einen längeren Zeitraum aufgenommen. In diesem Zusammenhang wurden zwei Studienarbeiten in Zusammenarbeit mit dem KTP erstellt.

Im Rahmen dieser Studienarbeiten wurden jeweils an einem Einschneckenextruder experimentelle Untersuchungen zum Druck-/ Durchsatzverhalten und Leistungsverhalten durchgeführt. Auf diese Weise ließen sich grundlegende Informationen über die Vorgänge in den jeweiligen Plastifiziereinheiten gewinnen.

Nach der Auswertung der ermittelten Größen der gewählten Verfahrensparameter hinsichtlich des Optimierungspotentials, wurden die betrachteten Prozesse mit Hilfe der Simulationssoftware **REX** durch das KTP nachgerechnet und untersucht.

Die anschließende Optimierung mit Hilfe von **REX** erfolgte unter Einbeziehung des Erfahrungswissens unserer Mitarbeiter. Hierbei ließen sich maschinentechnische Probleme, die zuvor bei der Verarbeitung auftraten, in die Simulation einbringen und vermeiden. Nach der Prüfung ob eine Optimierung möglich ist, wurde die neue Plastifiziereinheit in unsere hauseigene Fertigung weitergegeben. Ein wesentlicher Vorteil sind hier die kurzen Durchlaufzeiten für die Fertigung der neuen Plastifiziereinheiten.

Nach der Fertigung der optimierten Plastifiziereinheiten sind zur Kontrolle erneut ausführliche experimentelle Untersuchungen durchgeführt worden. Die Messungen wurden analog zu den zuvor beschriebenen Messungen durchgeführt. Abschließend ließen sich die jeweiligen Ergebnisse und Simulation miteinander vergleichen und beurteilen, ob die gewünschten Verbesserungen eingetroffen sind oder ob eine Nachbesserung der Plastifiziereinheiten notwendig ist.

I.4 Anknüpfung an wissenschaftl. und technischen Stand

Wie bereits erwähnt, die Optimierung der Wirtschaftlichkeit von Einschneckenmaschinen steht immer mehr im Vordergrund. Jedoch muss zeitgleich eine Verbesserung der Produktqualität erreicht werden, um den wachsenden Kundenansprüchen gerecht werden zu können. Die Optimierung von Einschneckenplastifiziereinheiten liegt heutzutage in größeren Massendurchsätzen, geringerer Energieeinbringung, besserer Schmelzehomogenität (thermisch und mechanisch) und größeren Verarbeitungsbandbreiten. Dafür müssen zum einen die Extrusionsanlagen und zum anderen die Plastifizierschnecken optimiert werden. Was wiederum zur Folge hat, dass neue Schneckenkonzepte entwickelt werden müssen, die diesen Anforderungen gerecht werden [1].

Die Auslegung einer Plastifiziereinheit hinsichtlich eines gewünschten Massedurchsatzes, bestimmter Produktqualitäten und hoher Energieeffizienz geschieht durch die Ermittlung einer geeigneten Schnecken- und Zylindergeometrie. Die Verknüpfung der gemessenen Verarbeitungsparameter, mit den zugeordneten Maschinenkenngrößen, ermöglicht die Ermittlung der Leistung und Leistungsgrenzen von Extrusionsanlagen. Das exakte Messen der wichtigsten Betriebs- und Maschinenkenngrößen dient somit im Hinblick auf Konstruktion, Auslegung und Weiterentwicklung.

Im Alltag bedeutet dies in erster Linie bei der Extrusion eine Erhöhung des Durchsatzes. Des Weiteren sollen aber nicht die Maschinen vergrößert, sondern verkleinert werden, um immer größere Fertigteile bzw. Produkte zu produzieren.

In diesem Zusammenhang wurden im Vorfeld und während dieses Projektes Literatur- und Patentrecherchen zu unterschiedlichsten Plastifizierkonzepten durchgeführt, um sich einen Überblick über den Stand der Technik zu verschaffen. Hierbei sind keine signifikanten Schutzrechte bekannt geworden, die als Grundlage für die Entwicklung der neuen Plastifiziereinheiten entgegenstanden.

In Zusammenarbeit mit dem KTP wurden zwei Studienarbeiten in unserem Technikum durchgeführt. Im Rahmen dieser Studienarbeiten wurden an einem Einschneckenextruder experimentelle Untersuchungen zum Druck-/Durchsatzverhalten, Temperaturverhalten und Leistungsverhalten durchgeführt. Auf diese Weise ließen sich grundlegende

Informationen über die Vorgänge in der Plastifiziereinheit gewinnen, welche für einen Vergleich mit der Simulationssoftware **REX** notwendig waren.

I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Aufgrund der Projektleitung und der Koordination der geplanten Arbeiten innerhalb des Projektes durch das Institut für Kunststofftechnik (KTP), bestand während der gesamten Projektlaufzeit eine intensive Zusammenarbeit mit dem KTP. Hierbei sei die glänzende Zusammenarbeit mit Herrn Dipl.-Ing. Dirk Heinrich hervorzuheben, welcher für uns immer ein Ansprechpartner in sämtlichen Belangen war. Das Gemeinschaftsforschungsprojekt wurde ebenfalls mit den Projektpartnern durchgeführt. Hierbei kam es aufgrund keiner abhängigen Projektschritte hauptsächlich zum allgemeinen Erfahrungsaustausch. Des Weiteren bestand eine Kooperation mit der bei uns am Ort ansässigen Firma DSG Canusa, Hersteller von Schrumpfschläuchen, bei denen eine der optimierten Schnecken zum Einsatz kam.

Für das Erstellen optimaler Zwischennachweise und Zahlungsanforderungen fand eine intensive Zusammenarbeit mit dem Deutschen Luft- und Raumfahrtzentrum in Bonn statt.

Weitere Kooperationen mit anderen Unternehmen und Forschungseinrichtungen fanden im Rahmen des Gemeinschaftsforschungsprojektes nicht statt.

II.1 Erzielte Ergebnisse

Das energetische Verhalten von Einschneckenplastifiziereinheiten stellt einen wichtigen wirtschaftlichen und verfahrenstechnischen Gesichtspunkt bei der Auslegung und Projektierung von Einschneckenmaschinen dar. Eine wichtige Zielgröße zur Auslegung ist hierbei die Antriebsleistung der Plastifizierschnecke.

Im Rahmen des Gemeinschaftsforschungsprojekts wurden experimentelle Untersuchungen zum Druck-/Durchsatzverhalten und Leistungsverhalten an drei verschiedene Einschneckenextruder durchgeführt. Auf diese Weise wurden grundlegende Informationen über die Vorgänge in der Plastifiziereinheit gewonnen, die für eine spätere Verfahrensoptimierung notwendig waren.

Hierzu galt es den Einfluss der Einzugszone (Glattrohr bzw. Nutbuchse), verschiedener Schneckenkonzepte und unterschiedlicher zu verarbeitenden Materialien zu untersuchen. Bei den Versuchen verwendeten Extruder handelt es sich um einen Extruder (ML1 1-45-25) der Firma ARENZ. Der Schneckendurchmesser D beträgt 45 mm und die effektive Schneckenlänge $L=25 D$. Die weiteren wichtigen Kenndaten sind in **Tabelle 1** aufgelistet.

Motor	Asynchronmotor
max. Motordrehzahl	2300 min ⁻¹
Motorleistung	29 kW
Getriebe	Stirnradgetriebe mit integrierter Drucklagerung
Getriebeübersetzung	$i= 17,5$
max. Schneckendrehzahl	131 min ⁻¹
Schneckendurchmesser	45 mm
L/D Verhältnis	25
Einzugsbereich	optional Glattrohr oder Nutbuchse
Steuerung	Siemens SPS S7-300
Frequenzumrichter	UNI 3404

Tabelle 1: Technische Daten des eingesetzten Extruders

Die Plastifiziereinheit wird mit Hilfe eines Asynchron-Motors über ein Stirnradgetriebe der Firma Knödler angetrieben. Das Getriebe hat ein Übersetzungsverhältnis von $i=$

17,5. Die Plastifiziereinheit besteht optional aus einem Glattrohr oder einer Nutbuchse im Einzugsbereich. Für die experimentellen Untersuchungen kamen vier verschiedene Schneckenkonzepte und zwei verschiedene Zylinderkonzepte zum Einsatz. Die verwendeten Plastifiziereinheiten lassen sich **Tabelle 2** entnehmen. Die vier Schnecken wurden zum einen auf dem Glattrohrextruder und zum anderen auf den Nutbuchsextruder eingesetzt.

Bezeichnung	Plastifiziereinheit
Schnecke 1	<i>Drei-Zonen-Schnecke mit Rautenmischteil</i>
Schnecke 2	<i>Scher- und Mischteil-Schnecke</i>
Schnecke 3	<i>Optimierte Drei-Zonen-Schnecke</i>
Schnecke 4	<i>Barriere Schnecke</i>

Tabelle 2: Eingesetzte Plastifiziereinheiten

Die experimentellen Untersuchungen fanden im Rahmen zweier Studienarbeiten im Technikum der Firma Arenz statt. Die Aufgabe der ersten Studienarbeit war es zwei vorhandenen Plastifiziereinheiten (Schnecke 1 und Schnecke 2) zu analysieren, zu bewerten und anschließend zu optimieren. Bei den eingesetzten Kunststoffen handelt es sich um ein PE-LLD (Encore LL 1004 YB) und ein PE (I-128). **Tabelle 3** zeigt die Ergebnisse der Vorversuche mit der Schnecke 1 und **Tabelle 4** die Ergebnisse mit Schnecke 2. Auffällig hierbei war, dass sich das PE-LLD nicht auf dem Nutbuchsextruder mit Einsatz von Schnecke 2 verarbeiten ließ. In diesem Fall konnte eine starke Pulsation des Massedurchsatzes und Druckschwankungen beobachtet werden. Dieses Ergebnis lässt auf eine teilgefüllte Schnecke schließen.

Glattrohreextruder, Material PE (I-128), Schnecke 1										
n	p	T _{Mass}	m _{pkt}	m _{pkt, spez}	P _{Antrieb}	P _{spez.}	Δh	P _{Antrieb} /m _{pkt} * Δh	Q _{pkt} /m _{pkt} * Δh	
[1/min]	[bar]	[°C]	[kg/h]	[(kg/h)/(1/min)]	[kW]	[kW/(kg/h)]	[J/g]	[-]	[-]	
10	120	128	4,6	0,460	0,074	0,0160	141,76	0,408	0,592	
70	120	156	35,6	0,509	3,431	0,0964	170,93	2,030	-1,030	
130	120	171	66,3	0,510	9,937	0,1499	186,91	2,887	-1,887	
70	40	149	35,6	0,509	2,828	0,0794	163,56	1,748	-0,748	
70	200	158	34,4	0,491	3,233	0,0940	173,04	1,955	-0,955	
Glattrohreextruder, Material PE-LLD (Escorene LL 1004 YB), Schnecke 1										
n	p	T _{Mass}	m _{pkt}	m _{pkt, spez}	P _{Antrieb}	P _{spez.}	Δh	P _{Antrieb} /m _{pkt} * Δh	Q _{pkt} /m _{pkt} * Δh	
[1/min]	[bar]	[°C]	[kg/h]	[(kg/h)/(1/min)]	[kW]	[kW/(kg/h)]	[J/g]	[-]	[-]	
10	120	218	2,2	0,220	0,050	0,0230	435,95	0,190	0,810	
70	120	240	21,4	0,306	2,346	0,1096	480,06	0,822	0,178	
130	120	250	44,3	0,341	9,642	0,2177	500,38	1,566	-0,566	
70	40	234	21,5	0,307	1,974	0,0918	467,93	0,706	0,294	
70	200	243	20,6	0,294	2,269	0,1102	486,15	0,816	0,184	
Nutbuchsenextruder, Material PE (I-128), Schnecke 1										
n	p	T _{Mass}	m _{pkt}	m _{pkt, spez}	P _{Antrieb}	P _{spez.}	Δh	P _{Antrieb} /m _{pkt} * Δh	Q _{pkt} /m _{pkt} * Δh	
[1/min]	[bar]	[°C]	[kg/h]	[(kg/h)/(1/min)]	[kW]	[kW/(kg/h)]	[J/g]	[-]	[-]	
10	120	126	5,7	0,570	0,133	0,0234	139,64	0,602	0,398	
70	120	158	34,7	0,496	3,315	0,0955	173,04	1,987	-0,987	
130	120	176	65,8	0,506	9,721	0,1477	192,3	2,766	-1,766	
70	40	150	35,7	0,510	2,963	0,0830	164,61	1,815	-0,815	
70	200	159	33	0,471	2,960	0,0897	174,1	1,855	-0,855	
Nutbuchsenextruder, Material PE-LLD (Escorene LL 1004 YB), Schnecke 1										
n	p	T _{Mass}	m _{pkt}	m _{pkt, spez}	P _{Antrieb}	P _{spez.}	Δh	P _{Antrieb} /m _{pkt} * Δh	Q _{pkt} /m _{pkt} * Δh	
[1/min]	[bar]	[°C]	[kg/h]	[(kg/h)/(1/min)]	[kW]	[kW/(kg/h)]	[J/g]	[-]	[-]	
10	120	210	4,2	0,420	0,107	0,0254	420,18	0,218	0,782	
70	120	227	25,4	0,363	3,693	0,1454	453,86	1,153	-0,153	
130	120	242	47,6	0,366	10,429	0,2191	484,12	1,629	-0,629	
70	40	223	25,4	0,363	3,421	0,1347	445,87	1,087	-0,087	
70	200	231	25	0,357	3,452	0,1381	461,89	1,076	-0,076	

Tabelle 3: Versuchsergebnisse mit Einsatz von Schnecke 1

Glattrohretruder, Material PE (I-128), Schnecke 2										
n	p	T _{Mass}	m _{pkt}	m _{pkt, spez}	P _{Antrieb}	P _{spez.}	Δh	P _{Antrieb} /m _{pkt} * Δh	Q _{pkt} /m _{pkt} * Δh	
[1/min]	[bar]	[°C]	[kg/h]	[(kg/h)/(1/min)]	[kW]	[kW/(kg/h)]	[J/g]	[-]	[-]	
10	120	133	5,2	0,520	0,120	0,0231	146,96	0,565	0,435	
70	120	162	29,1	0,416	3,444	0,1184	177,29	2,404	-1,404	
130	120	193	53,4	0,411	9,962	0,1865	210,88	3,185	-2,185	
70	40	158	30,7	0,439	3,206	0,1044	173,04	2,173	-1,173	
70	200	164	28,4	0,406	3,275	0,1153	179,42	2,314	-1,314	
Glattrohretruder, Material PE-LLD (Escorene LL 1004 YB), Schnecke 2										
n	p	T _{Mass}	m _{pkt}	m _{pkt, spez}	P _{Antrieb}	P _{spez.}	Δh	P _{Antrieb} /m _{pkt} * Δh	Q _{pkt} /m _{pkt} * Δh	
[1/min]	[bar]	[°C]	[kg/h]	[(kg/h)/(1/min)]	[kW]	[kW/(kg/h)]	[J/g]	[-]	[-]	
10	120	209	2,7	0,270	0,062	0,0230	418,72	0,198	0,802	
70	120	233	19,3	0,276	3,720	0,1927	465,92	1,489	-0,489	
130	120	255	38,3	0,295	11,909	0,3109	510,61	2,192	-1,192	
70	120	230	18,2	0,260	3,595	0,1975	459,87	1,546	-0,546	
70	200	233	17,4	0,249	3,376	0,1940	465,92	1,499	-0,499	
Nutbuchsenextruder, Material PE (I-128), Schnecke 2										
n	p	T _{Mass}	m _{pkt}	m _{pkt, spez}	P _{Antrieb}	P _{spez.}	Δh	P _{Antrieb} /m _{pkt} * Δh	Q _{pkt} /m _{pkt} * Δh	
[1/min]	[bar]	[°C]	[kg/h]	[(kg/h)/(1/min)]	[kW]	[kW/(kg/h)]	[J/g]	[-]	[-]	
10	120	134	5,1	0,510	0,129	0,0252	147,99	0,613	0,387	
70	120	162	26,9	0,384	3,124	0,1161	177,29	2,358	-1,358	
130	120	190	52,1	0,401	9,475	0,1819	207,58	3,154	-2,154	
70	40	159	28,7	0,410	2,907	0,1013	174,1	2,094	-1,094	
70	200	162	26,4	0,377	2,960	0,1121	177,29	2,277	-1,277	

Tabelle 4: Versuchsergebnisse mit Einsatz von Schnecke 2

Vergleicht man Schnecke 1 mit Schnecke 2 (Glattrohretruder, Material I-128), so ist zu erkennen, dass sich mit Einsatz von Schnecke 2 ein bis 20 % niedrigerer spezifischer Massedurchsatz einstellt. Wiederum stellt sich eine höhere spezifische Antriebsleistung ein (Schnecke 2). Dies liegt am niedrigeren Massedurchsatz aber wiederum erhöhten Energiebedarf (**Tabelle 3 und 4**). Bei der energetischen Betrachtung fällt auf, dass sich alle Betriebspunkte (außer $n=10 \text{ min}^{-1}$ und $p=120 \text{ bar}$) im Bereich der Wärmeabfuhr befinden, d.h. die Energie wird vom Material auf das Heizband geleitet und dass das Heizband an dieser Stelle nicht notwendig ist. In diesem Fall wird über das Heizband nicht geheizt, sondern die Heizbänder werden über die vorhandenen Gebläse gekühlt. Mit Einsatz des Nutbuchsenextruders (Material I-128) stellte sich ein ähnlicher Trend ein, d.h. auch hier lagen ein niedriger spezifischer Massedurchsatz und eine erhöhte spezifische Antriebsleistung vor.

Betrachtet man anschließend das zweite Material (LL 1004 YB) und vergleicht dabei die beiden Schnecken- und Zylinderkonzepte, so ist mit Einsatz des Glattrohretruders derselbe Trend wie schon zuvor bei der Verarbeitung des I-128 erkennbar. Auffällig bei den experimentellen Untersuchungen war, dass sich das LL 1004 YB nicht mit Schnecke 2 auf dem Nutbuchsenextruder verarbeiten ließ. Dies wurde bei der Optimierung berücksichtigt.

Die experimentellen Untersuchungen haben gezeigt, dass eine energetische Optimierung der Schneckenkonzepte notwendig und auch möglich ist. Basierend auf die gewonnen Erkenntnisse aus den experimentellen Untersuchungen wurden mit Hilfe der Simulationssoftware (**REX**) zwei neue Plastifiziereinheiten (Schnecke 3 u. Schnecke 4) ausgelegt, welche im Rahmen einer zweiten Studienarbeit analysiert und bewertet wurden. Im Folgenden werden nun die vier Schneckenkonzepte miteinander verglichen. In **Bild 1** ist der spezifische Durchsatz mit Einsatz der vier Schneckenkonzepte, der zwei Zylinderkonzepte und dem PE (I-128) dargestellt.

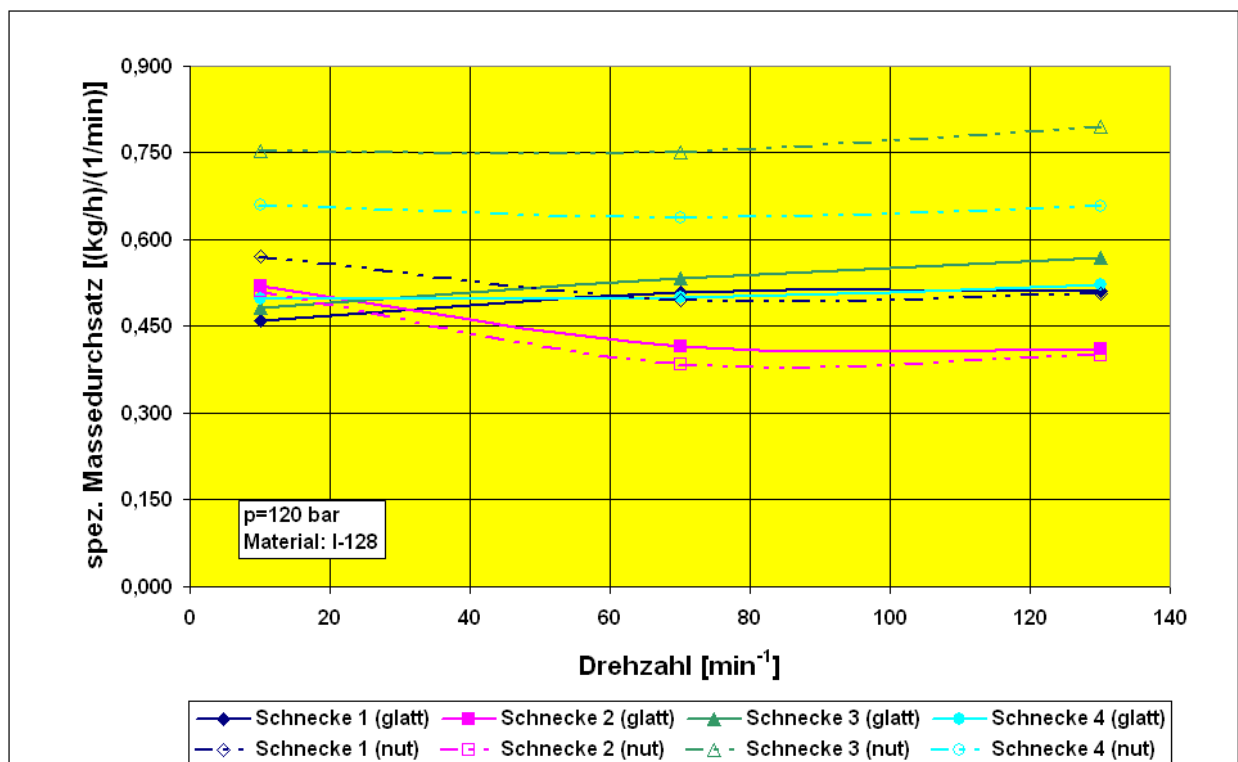


Bild 1: Vergleich der spez. Massedurchsätze mit Einsatz der 4 Schnecken, I-128 p=120 bar

Vergleicht man nun den spezifischen Massedurchsatz des Glattrohretruders mit dem des Nutbuchsenextruders, so zeigt sich mit Einsatz von Schnecke 2 ein nicht erhöhter

spezifischer Massedurchsatz. Ansonsten stellt sich ein erhöhter spezifischer Massedurchsatz mit Einsatz der Nutbuchse um bis zu 50 % ein (Vergleich von Schnecke 3). Schnecke 3, d.h. die optimierte Drei-Zonen-Schnecke, liefert bei beiden Zylinderkonzepten die besten Ergebnisse bezüglich des spezifischen Massedurchsatzes.

Bei der Verarbeitung des zweiten Kunststoffmaterials fiel auf, dass sich mit Einsatz der Nutbuchse ein erhöhter spezifischer Massedurchsatz einstellte (**Bild 2**). An dieser Stelle sei aber noch einmal darauf hingewiesen, dass die Kombination Schnecke 2 mit Nutbuchse zu keinem Ergebnisse führte.

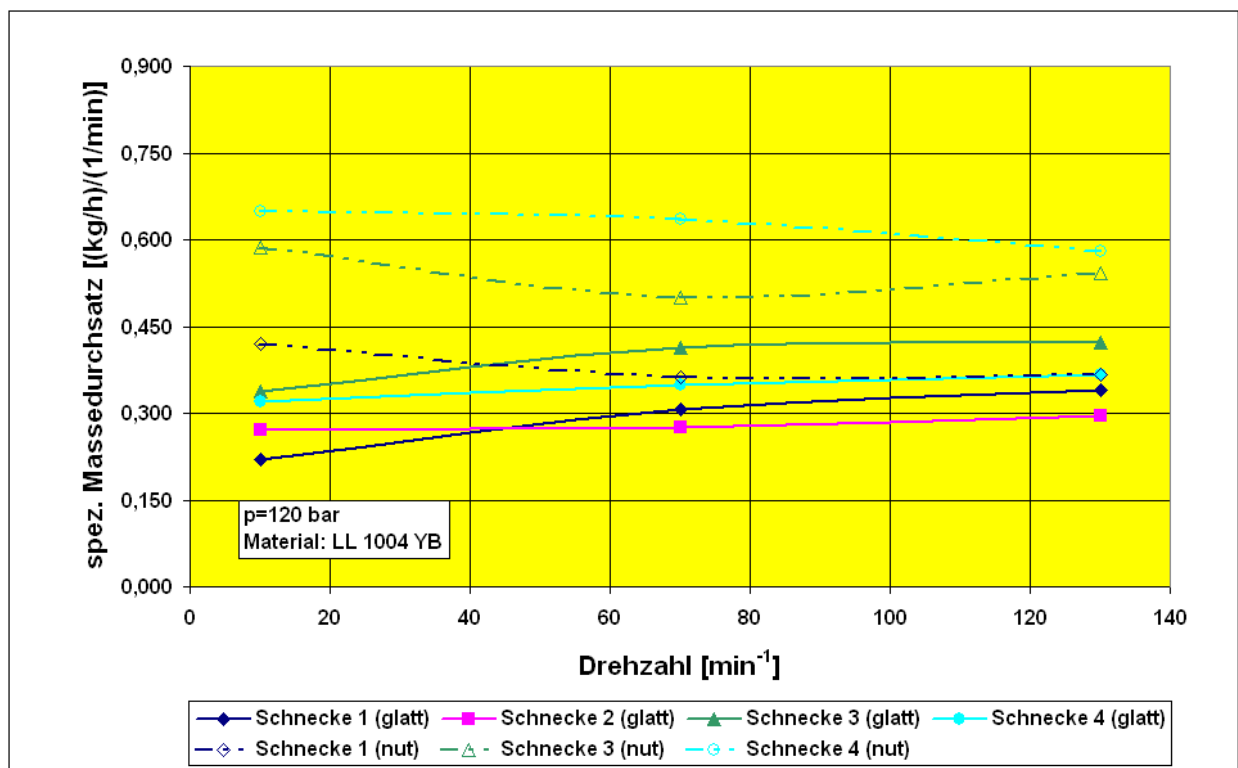


Bild 2: Vergleich der spez. Massedurchsätze mit Einsatz der 4 Schnecken, LL 1004 YB, p=120 bar

Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen mit Einsatz von Schnecke 3 und Schnecke 4 lassen sich den Tabellen 5 und 6 entnehmen.

Glattrohretruder, Material PE (I-128), Schnecke 3									
n	p	T _{Mass}	m _{pkt}	m _{pkt, spez}	P _{Antrieb}	P _{spez.}	Δh	P _{Antrieb} /m _{pkt} *Δh	Q _{pkt} /m _{pkt} *Δh
[1/min]	[bar]	[°C]	[kg/h]	[(kg/h)/(1/min)]	[kW]	[kW/(kg/h)]	[J/g]	[-]	[-]
10	120	135	4,82	0,482	0,044	0,0092	149,02	0,22	0,78
70	40	149	40,30	0,576	1,369	0,0340	163,56	0,75	0,25
70	200	154	38,53	0,550	1,763	0,0458	168,81	0,98	0,02
70	120	151	37,26	0,532	1,456	0,0391	165,56	0,85	0,15
130	120	158	74,10	0,570	5,409	0,0730	173,04	1,52	-0,52
Glattrohretruder, Material PE-LLD (Escorene LL 1004 YB), Schnecke 3									
n	p	T _{Mass}	m _{pkt}	m _{pkt, spez}	P _{Antrieb}	P _{spez.}	Δh	P _{Antrieb} /m _{pkt} *Δh	Q _{pkt} /m _{pkt} *Δh
[1/min]	[bar]	[°C]	[kg/h]	[(kg/h)/(1/min)]	[kW]	[kW/(kg/h)]	[J/g]	[-]	[-]
130	120	229	54,80	0,422	5,753	0,1050	457,86	0,83	0,17
70	40	226	29,68	0,424	1,346	0,0454	451,85	0,36	0,64
70	200	234,5	29,31	0,419	1,782	0,0608	467,93	0,47	0,53
10	120	220,5	3,38	0,338	0,046	0,0138	439,91	0,11	0,89
70	120	230	28,99	0,414	1,533	0,0529	459,87	0,41	0,59
Nutbuchsenextruder, Material PE (I-128), Schnecke 3									
n	p	T _{Mass}	m _{pkt}	m _{pkt, spez}	P _{Antrieb}	P _{spez.}	Δh	P _{Antrieb} /m _{pkt} *Δh	Q _{pkt} /m _{pkt} *Δh
[1/min]	[bar]	[°C]	[kg/h]	[(kg/h)/(1/min)]	[kW]	[kW/(kg/h)]	[J/g]	[-]	[-]
130	120	160,5	103,38	0,795	10,522	0,1018	175,69	2,09	-1,09
70	40	146,3	57,56	0,822	3,124	0,0543	160,50	1,22	-0,22
70	200	157,5	49,83	0,712	3,124	0,0627	172,51	1,31	-0,31
10	120	135,5	7,54	0,754	0,082	0,0108	150,00	0,26	0,74
70	120	155,2	52,62	0,752	3,014	0,0573	169,86	1,21	-0,21
Nutbuchsenextruder, Material PE-LLD (Escorene LL 1004 YB), Schnecke 3									
n	p	T _{Mass}	m _{pkt}	m _{pkt, spez}	P _{Antrieb}	P _{spez.}	Δh	P _{Antrieb} /m _{pkt} *Δh	Q _{pkt} /m _{pkt} *Δh
[1/min]	[bar]	[°C]	[kg/h]	[(kg/h)/(1/min)]	[kW]	[kW/(kg/h)]	[J/g]	[-]	[-]
70	120	223,1	34,99	0,500	2,515	0,0719	445,88	0,58	0,42
10	120	212,2	5,87	0,587	0,060	0,0103	424,11	0,09	0,91
130	120	229,6	70,55	0,543	9,566	0,1356	458,87	1,06	-0,06

Tabelle 5: Versuchsergebnisse mit Einsatz von Schnecke 3

Glattrohreextruder, Material PE (I-128), Schnecke 4										
n	p	T _{Mass}	m _{pkt}	m _{pkt, spez}	P _{Antrieb}	P _{spez.}	Δh	P _{Antrieb} /m _{pkt} * Δh	Q _{pkt} /m _{pkt} * Δh	
[1/min]	[bar]	[°C]	[kg/h]	[(kg/h)/(1/min)]	[kW]	[kW/(kg/h)]	[J/g]	[-]	[-]	
130	120	180	67,97	0,523	8,113	0,1194	196,64	2,185	-1,185	
70	120	164	34,98	0,500	2,272	0,0649	179,42	1,303	-0,303	
10	120	136	4,97	0,497	0,057	0,0114	150,05	0,274	0,726	
70	40	156	31,71	0,453	1,898	0,0599	170,93	1,261	-0,261	
70	200	165	33,78	0,483	2,401	0,0711	180,48	1,418	-0,418	
Glattrohreextruder, Material PE-LLD (Escorene LL 1004 YB), Schnecke 4										
n	p	T _{Mass}	m _{pkt}	m _{pkt, spez}	P _{Antrieb}	P _{spez.}	Δh	P _{Antrieb} /m _{pkt} * Δh	Q _{pkt} /m _{pkt} * Δh	
[1/min]	[bar]	[°C]	[kg/h]	[(kg/h)/(1/min)]	[kW]	[kW/(kg/h)]	[J/g]	[-]	[-]	
130	120	234	47,57	0,366	6,638	0,1395	467,93	1,074	-0,074	
70	40	223	24,78	0,354	1,355	0,0547	445,85	0,442	0,558	
70	200	234	21,84	0,312	1,742	0,0798	467,93	0,614	0,386	
10	120	210	3,21	0,321	0,046	0,0144	420,18	0,123	0,877	
70	120	227	24,45	0,349	1,634	0,0668	453,85	0,530	0,470	
Nutbuchsenextruder, Material PE (I-128), Schnecke 4										
n	p	T _{Mass}	m _{pkt}	m _{pkt, spez}	P _{Antrieb}	P _{spez.}	Δh	P _{Antrieb} /m _{pkt} * Δh	Q _{pkt} /m _{pkt} * Δh	
[1/min]	[bar]	[°C]	[kg/h]	[(kg/h)/(1/min)]	[kW]	[kW/(kg/h)]	[J/g]	[-]	[-]	
130	120	177	85,53	0,658	8,936	0,1045	193,38	1,945	-0,945	
70	40	157	46,98	0,671	2,433	0,0518	171,98	1,084	-0,084	
70	200	163	45,7	0,653	2,780	0,0608	178,35	1,228	-0,228	
10	120	135	6,59	0,659	0,064	0,0098	149,02	0,236	0,764	
70	120	159	44,72	0,639	2,542	0,0568	174,1	1,175	-0,175	
Nutbuchsenextruder, Material PE-LLD (Escorene LL 1004 YB), Schnecke 4										
n	p	T _{Mass}	m _{pkt}	m _{pkt, spez}	P _{Antrieb}	P _{spez.}	Δh	P _{Antrieb} /m _{pkt} * Δh	Q _{pkt} /m _{pkt} * Δh	
[1/min]	[bar]	[°C]	[kg/h]	[(kg/h)/(1/min)]	[kW]	[kW/(kg/h)]	[J/g]	[-]	[-]	
130	120	222	75,38	0,580	11,439	0,1517	443,88	1,231	-0,231	
70	40	215	46,99	0,671	2,939	0,0625	429,02	0,525	0,475	
70	200	223	44,9	0,641	3,309	0,0737	445,87	0,595	0,405	
10	120	211	6,49	0,649	0,055	0,0085	422,14	0,073	0,927	
70	120	218	44,43	0,635	3,013	0,0678	435,95	0,560	0,440	

Tabelle 6: Versuchsergebnisse mit Einsatz von Schnecke 4

Im Folgenden soll nun näher auf die spezifischen Antriebsleistung und die energetische Betrachtung eingegangen werden. **Bild 3** zeigt die spezifische Antriebsleistung mit Einsatz der unterschiedlichen Schnecken- und Zylinderkonzepte bei einem konstanten Gegendruck von 120 bar und dem I-128. Hierbei ist auffällig, dass mit Einsatz von Schnecke 1 und Schnecke 2 sich annähernd die gleiche spezifische Antriebsleistung (Ver-

gleich Nutbuchse und Glattrohr) einstellte. Mit Einsatz von Schnecke 3 und der Nutbuchse wird zur Verarbeitung des Materials eine höhere und mit Schnecke 4 eine niedrigere spezifische Antriebsleistung benötigt.

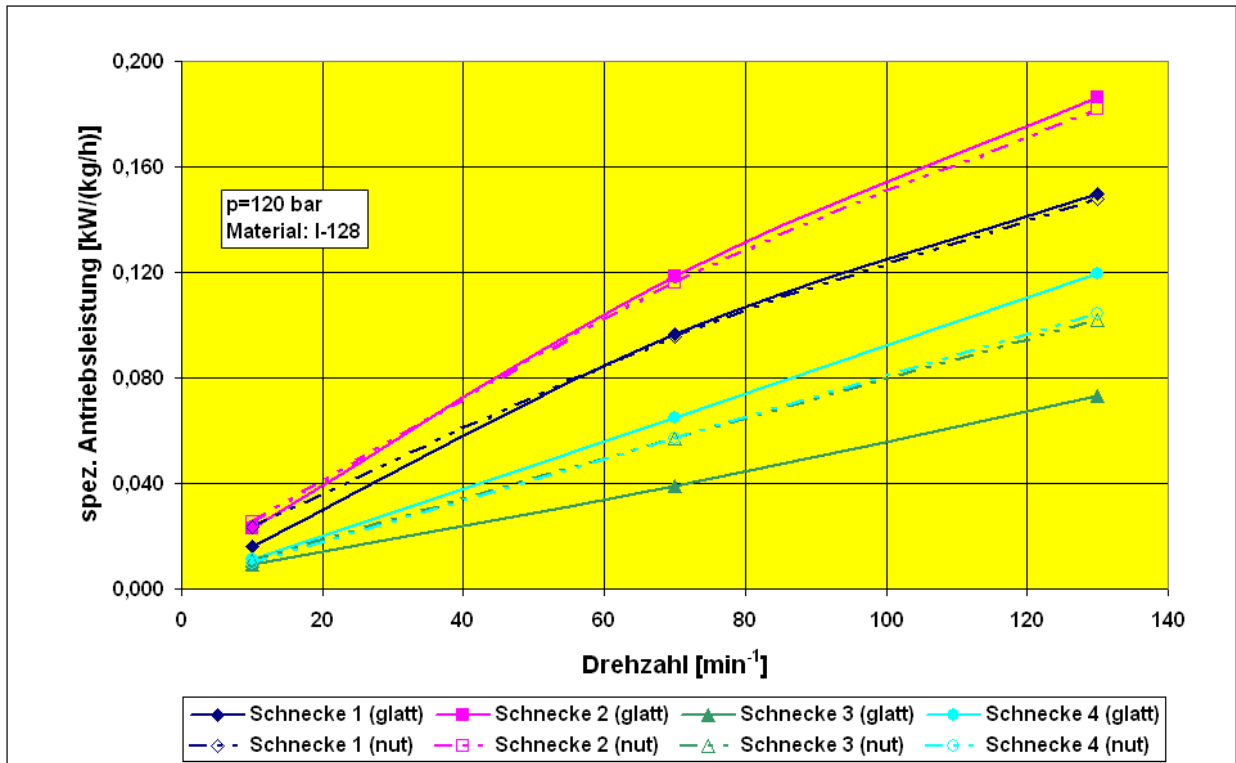


Bild 3: Vergleich der spez. Antriebsleistung mit Einsatz der 4 Schnecken, I-128

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass mit Einsatz der beiden neuen Schnecken (Schnecke 3 und 4) bei der Verarbeitung des I-128 eine deutliche Reduzierung der spez. Antriebsleistung erreicht wurde. Die Einsparung liegt mit Einsatz beider Zylinderkonzepten bei maximal 60 % (Vergleich Schnecke 1 mit Schnecke 3).

Anschließend wird die spezifische Antriebsleistung mit Einsatz der unterschiedlichen Schnecken- und Zylinderkonzepte bei einem konstanten Gegendruck von 120 bar und dem LL 1004 YB betrachtet (**Bild 4**). Bei der Verarbeitung des PE-LLD wird mit Einsatz des Nutbuchsenextruders eine höhere spezifische Antriebsleistung als mit Einsatz des Glattrohrextruders benötigt (Schnecke 1 und Schnecke 3).

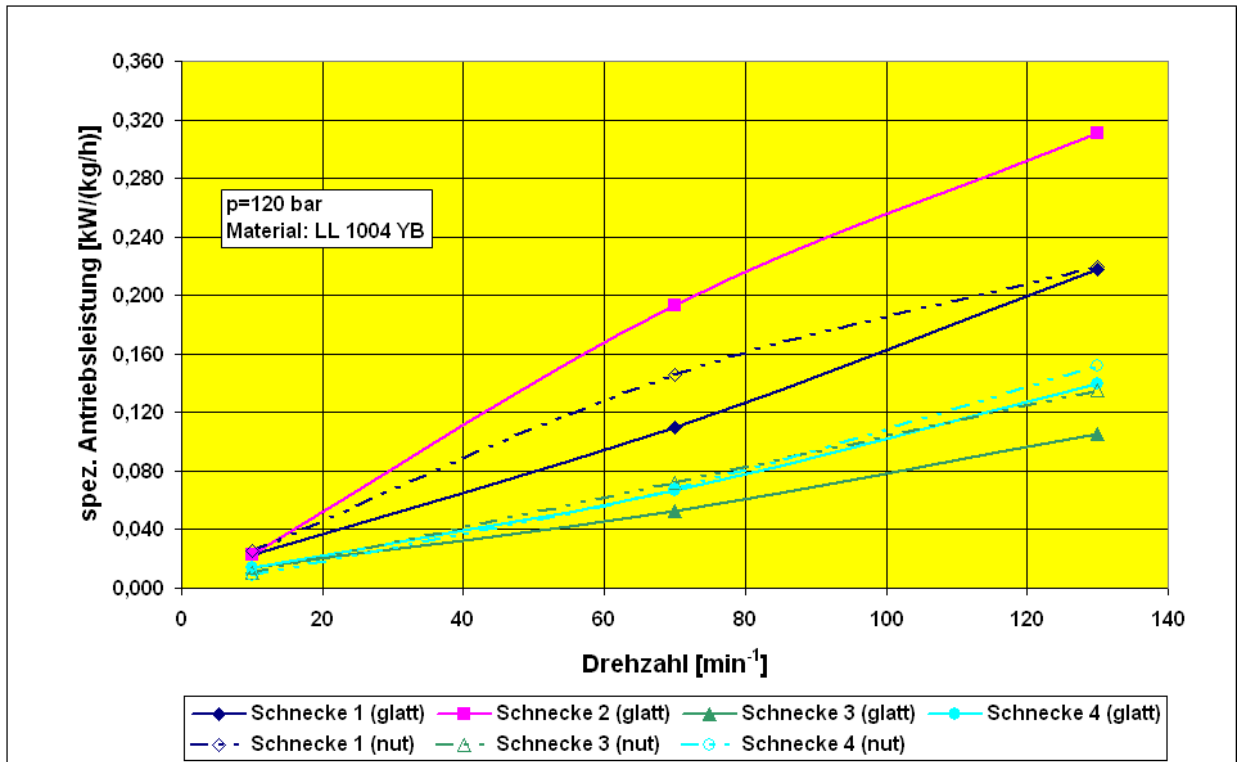


Bild 4: Vergleich der spez. Antriebsleistung mit Einsatz der 4 Schnecken, LL 1004 YB

Auch hier lässt sich zusammenfassend sagen, dass mit Einsatz der beiden neuen Schnecken (Schnecke 3 und 4) bei der Verarbeitung des LL 1004 YB eine deutliche Reduzierung der spez. Antriebsleistung erreicht wurde. Die Einsparung beträgt bis zu 50 % mit Einsatz des Glattrohretruders und bis zu 40 % mit Einsatz des Nutbuchsenextruders (Vergleich Schnecke 1 mit Schnecke 3).

Für die gesamtenergetische Betrachtung sei zu Beginn auf den Abschlussbericht des Instituts für Kunststofftechnik verwiesen. Dort wird auf die detaillierte Herleitung der Leistungsbilanz näher eingegangen. Die Gleichung für den Bilanzraum Plastifiziereinheit lautet wie folgt:

$$P_{\pm} \dot{Q} = \dot{m} \cdot \Delta h \quad \text{Gl. (1)}$$

Zur besseren Betrachtung kann zusammenfassend der energetische Betriebspunkt in dimensionsloser Form dargestellt werden. Dazu werden die einzelnen Leistungen auf den jeweiligen Enthalpiestrom bezogen. Hieraus resultiert folgende Gleichung:

$$\frac{P_{\text{Antrieb}}}{\dot{m} \cdot \Delta h} = 1 - \frac{\dot{Q}}{\dot{m} \cdot \Delta h} \quad \text{Gl. (2)}$$

Die **Tabellen 1-4** zeigen die Ergebnisse der berechneten Wärmeströme mit Einsatz aller vier Schnecken und den beiden Zylinderkonzepten. Dabei stehen die negativen Werte des Wärmestroms für die von der Schmelze abgegebene Wärme und die positiven Werte für den von der Schmelze aufgenommenen Wärmestrom.

Die energetischen Betriebspunkte der eingesetzten Schnecken- und Zylinderkombinationen und den verarbeiteten PE (I-128) sind im **Bild 5** dargestellt. Es zeigt sich, dass sich ein Großteil der Werte im Bereich der Wärmeabfuhr befindet. Bei diesen Versuchspunkten wird die Wärme vom Prozess abgeführt. Das bedeutet, dass in dem Prozess die Energie vom Material auf das Heizband geleitet wird und dass das Heizband an dieser Stelle nicht notwendig ist. In diesem Fall wird über das Heizband nicht geheizt, sondern die Heizbänder werden über die Gebläse gekühlt. Des Weiteren zeigt sich, dass die Versuchspunkte sehr breit gestreut sind, d.h. nicht eng beieinander liegen.

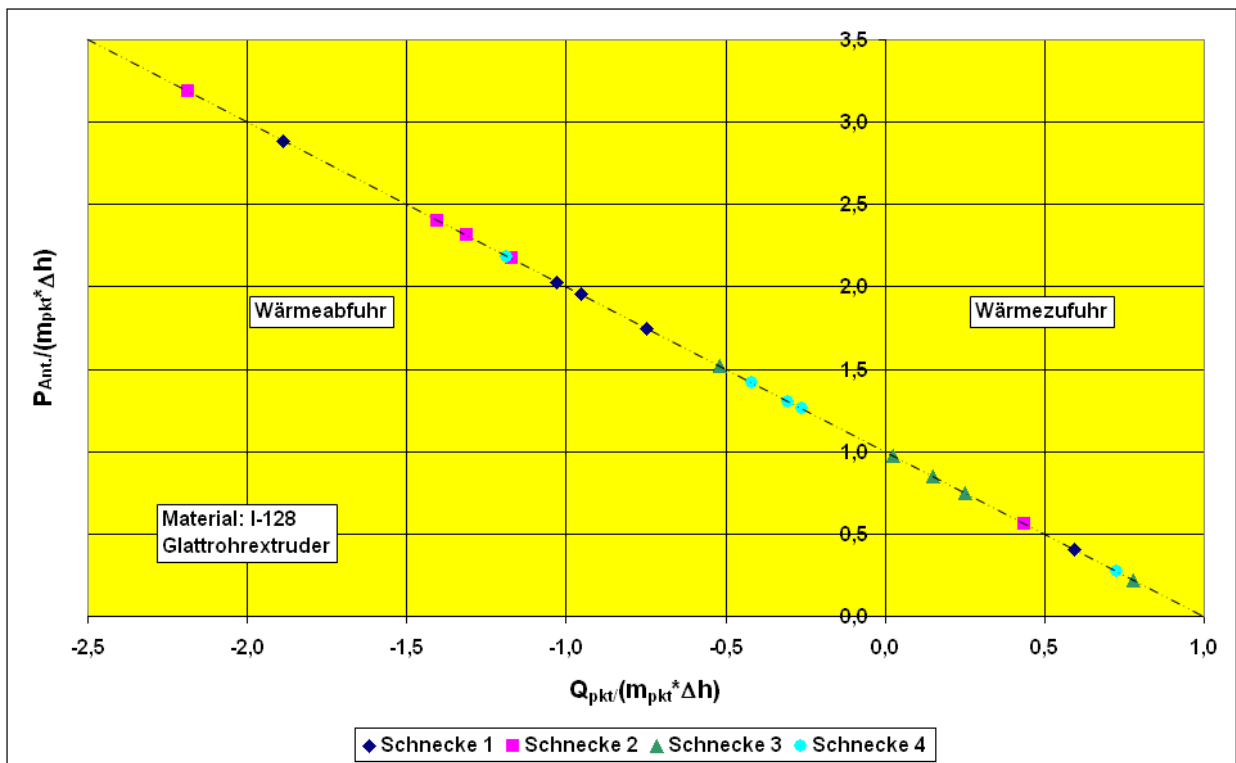


Bild 5: Energetische Betrachtung, alle Schnecken, Material: I-128, Glattrohretruder

Bei der Verarbeitung des PE-LLD (LL 1004 YB) befinden sich deutlich weniger Versuchspunkte im Bereich der Wärmezufuhr (**Bild 6**).

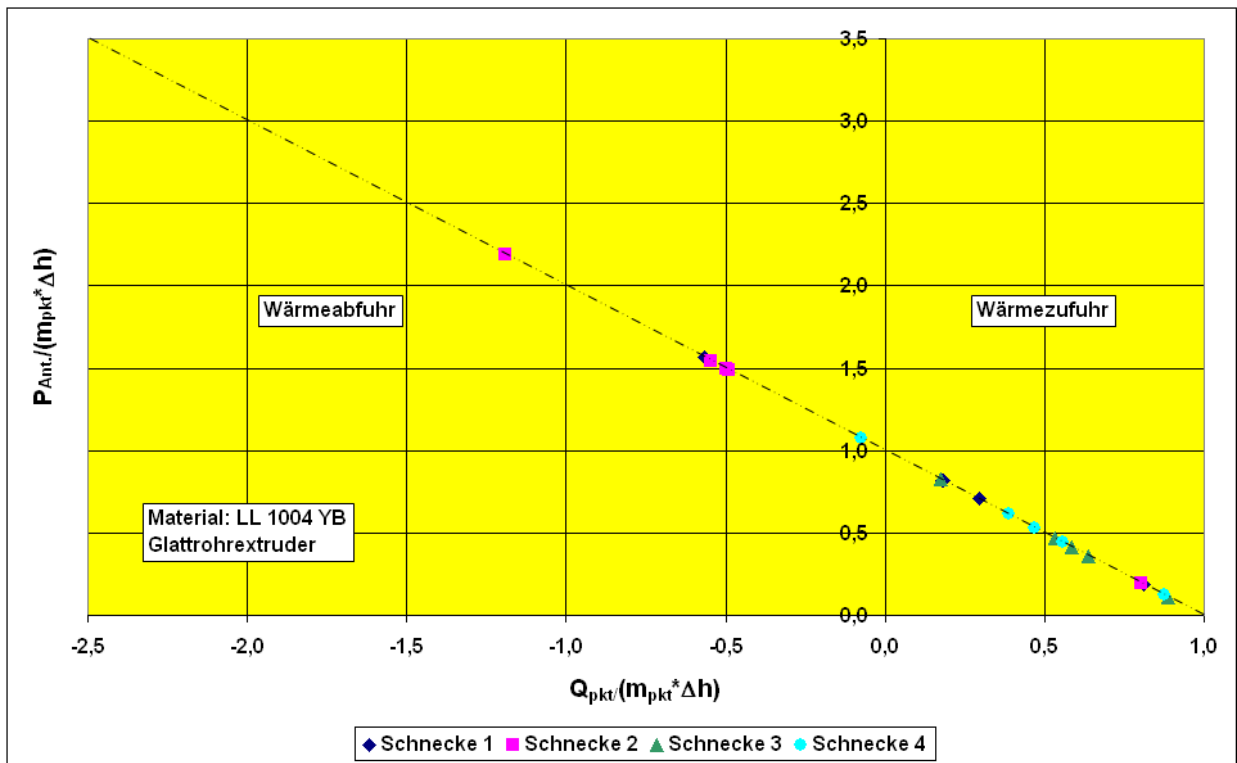


Bild 6: Energetische Betrachtung alle Schnecken, Material: LL 1004 YB, Glattrohretruder

Des Weiteren fällt auf, dass die Versuchspunkte, welche sich rechts der Abszisse befinden (Wärmezufuhr), viel enger zusammen liegen. Bei der Verarbeitung des PE-LLD ist die Streuung der Versuchspunkte geringer verglichen mit denen des PE (Vergleich **Bild 5** mit **Bild 6**).

Die energetische Betrachtung mit Einsatz des Nutbuchsenextruders und der beiden Materialien zeigt einen ähnlichen Trend wie die Ergebnisse des Glattrohretruders.

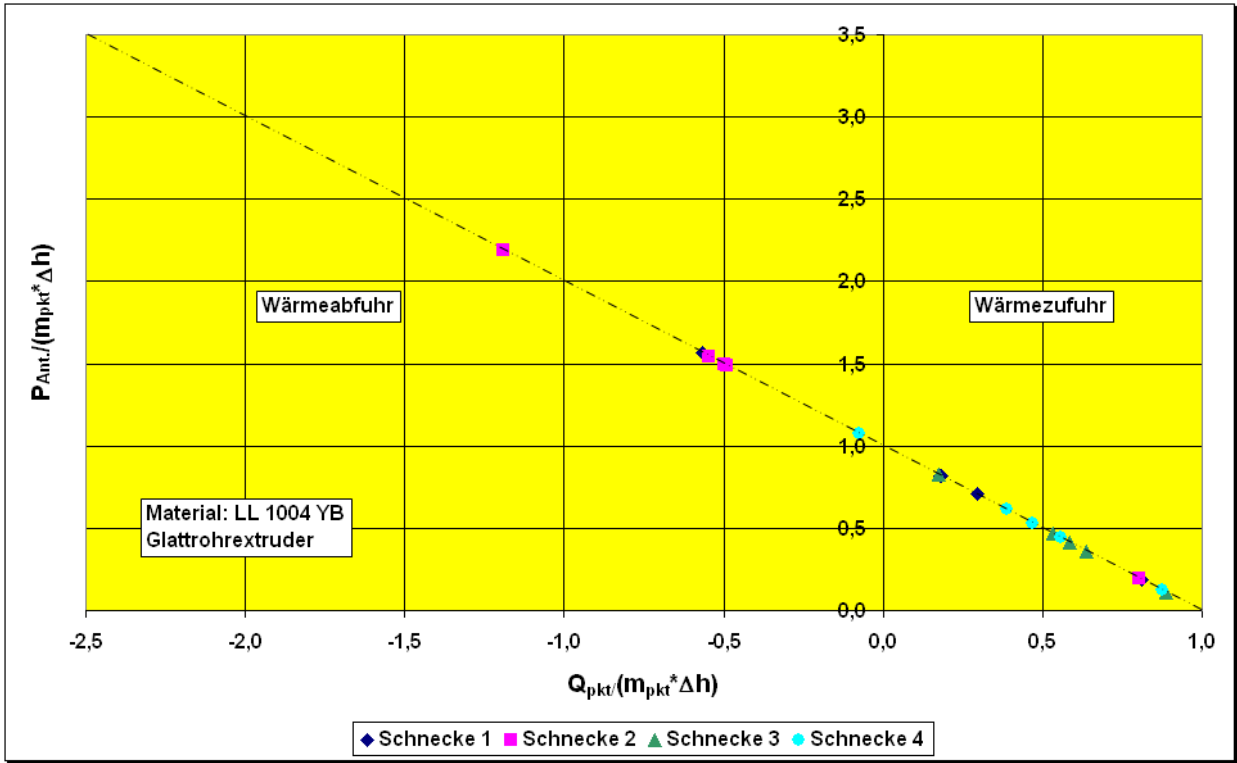


Bild 7: Energetische Betrachtung, alle Schnecken, Material: I-128, Nutbuchsentruder

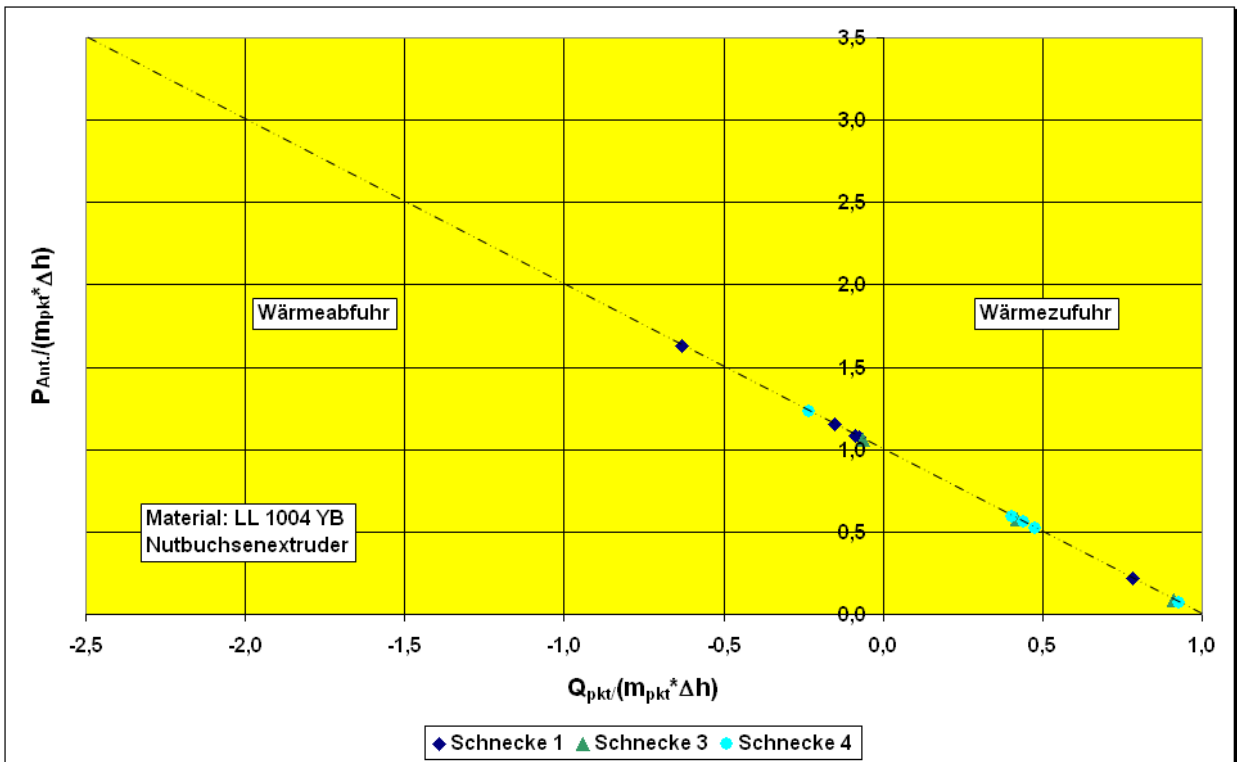


Bild 8: Energetische Betrachtung alle Schnecken, Material: LL 1004 YB, Nutbuchsentruder

Abschließend soll nun ein Betriebspunkt ($n=130 \text{ min}^{-1}$ und $p=120 \text{ bar}$) mit Einsatz der vier Schnecken und den beiden Zylinderkonzepten betrachtet werden. Als Referenzschnecke wird **Schnecke 1** festgelegt. **Tabelle 7** zeigt die berechneten Wärmeströme.

Glattrohr						
	Material	$P_{\text{Antrieb}}/$ $m_{\text{pkt}} \cdot \Delta h$	$Q_{\text{pkt}}/$ $m_{\text{pkt}} \cdot \Delta h$	Unterschied S1 und S2	Unterschied S1 und S3	Unterschied S1 und S4
		[-]	[-]	[%]	[%]	[%]
Schnecke 1 (S1)	I-128 (PE)	2,89	-1,89			
	LL 1004 YB (PE-LLD)	1,57	-0,57			
Schnecke 2 (S2)	I-128 (PE)	3,18	-2,18	10,3		
	LL 1004 YB (PE-LLD)	2,19	-1,19	40,0		
Schnecke 3 (S3)	I-128 (PE)	1,52	-0,52		-47,4	
	LL 1004 YB (PE-LLD)	0,83	0,17		-47,3	
Schnecke 4 (S4)	I-128 (PE)	2,19	-1,19			-24,3
	LL 1004 YB (PE-LLD)	1,07	-0,07			-31,4
Nutbuchse						
	Material	$P_{\text{Antrieb}}/$ $m_{\text{pkt}} \cdot \Delta h$	$Q_{\text{pkt}}/$ $m_{\text{pkt}} \cdot \Delta h$	Unterschied S1 und S2	Unterschied S1 und S3	Unterschied S1 und S4
		[-]	[-]	[%]	[%]	[%]
Schnecke 1	I-128 (PE)	2,77	-1,77			
	LL 1004 YB (PE-LLD)	1,63	-0,63			
Schnecke 2	I-128 (PE)	3,15	-2,15	14,0		
	LL 1004 YB (PE-LLD)					
Schnecke 3	I-128 (PE)	2,09	-1,09		-24,6	
	LL 1004 YB (PE-LLD)	1,06	-0,06		-34,7	
Schnecke 4	I-128 (PE)	1,95	-0,95			-29,7
	LL 1004 YB (PE-LLD)	1,23	-0,23			-24,5

Tabelle 7: Energetischer Vergleich bei einem Betriebspunkt

Vergleicht man nun **Schnecke 1** mit **Schnecke 2** so ist keine energetische Optimierung zu erkennen. Aus energetischer Sicht ist **Schnecke 2** am schlechtesten von allen untersuchten Schnecken. Die höchste energetische Optimierung ließ sich mit Einsatz von Schnecke 3 erreichen. Die Optimierung lag bei der Verarbeitung beider Materialien bei ca. 47 % mit Einsatz des Glattrohrextruders. Mit Einsatz der Nutbuchse und Schnecke 3 lag Sie bei ca. 35 % (PE-LLD) und ca. 25 % (PE).

Aufgrund der experimentellen Untersuchungen und deren Auswertungen ist die neue Drei-Zonen-Schnecke (Schnecke 3) gegenüber der neuen Barriere-Schnecke (Schnecke 4) hervorzuheben. Schnecke 3 ist für ein breites Spektrum an Materialien bei niedrigen als auch bei hohen Drehzahlen einsetzbar, wobei Sie bei höheren Drehzahlen

bessere Ergebnisse bezüglich des Massedurchsatzes und der spezifischen Antriebsleistung liefert.

Bezüglich der Leistungsbetrachtung benötigt die Drei-Zonen-Schnecke (Schnecke 3) bei den eingesetzten Materialien eine niedrigere spezifische Antriebsleistung als die Barriere Schnecke (Schnecke 4). Dies lässt sich durch einen höheren Massedurchsatz erklären.

Schnecke 3 weist ein insgesamt besseres Verhalten gegenüber Schnecke 4 auf. Der Vergleich der beiden neuen Schnecken mit den vorhandenen zwei Schnecken zeigt, dass die beiden neuen Schnecken einen höheren spezifischen Massedurchsatz gegenüber den vorhandenen Schnecken bei gleichen Betriebsbedingungen (wie Druck, Drehzahl, Material) liefern. Dagegen zeigt sich bei den neuen Schnecken ein geringerer Leistungsverbrauch gegenüber den zuvor untersuchten Schnecken.

Abschließend lässt sich sagen, dass sich das Ziel der energetischen Optimierung erreichen ließ. Die gewonnen Erkenntnisse sollen uns in Zukunft dabei helfen weitere Schnecken energetisch zu optimieren und an unsere Kunden weiterzugeben.

II.2 Voraussichtlicher Nutzen

Um das Potential der neuen Schneckenkonzepte zukünftig noch weiter auszuschöpfen, ist zum einen eine anknüpfende Forschung mit dem KTP angestrebt und zum anderen findet eine Langzeituntersuchung mit Einsatz einer der optimierten Schnecken mit der Fa. DSG Canusa statt.

Durch das Gemeinschaftsforschungsprojekt konnten mehrere Erfahrungen bezüglich der Ermittlung des benötigten Leistungspotentials eines Extruders gewonnen werden. Die für eine Plastifiziereinheit benötigte Leistung bestimmt die Größe der eingesetzten Motorleistung. Dementsprechend soll in Zukunft versucht werden eine optimale Motorgröße bei gleichzeitiger universeller Einsatzmöglichkeit und nicht ein zu großer und demnach zu teurer Motor bzw. auch ein nicht zu kleiner Motor, welcher im Betrieb versagt, einzusetzen. In diesem Bereich erfolgt eine Verzahnung zwischen den For-

schungsaktivitäten an den Hochschulen und den Konstruktionsstrategien bei uns als Maschinenhersteller.

Vom Einsatz solcher optimierter Plastifiziereinheiten sollen in erster Linie unsere Kunden profitieren, die ein wirtschaftlicheres Extruderkonzept in ihre Anlage integrieren können. Letztendlich dient eine solche Maschine auch der Firma Arenz, da Sie gegenüber dem Mitbewerbern ein energetisch günstigeres Anlagenkonzept anbieten kann.

Die weitere Ergebnisverwertung sowie zusätzliche Veröffentlichungen werden in Zusammenarbeit mit dem Institut für Kunststofftechnik (KTP) durchgeführt.

II.3 Während der Durchführung des Projektes bekannt gewordener Fortschritte an anderen Stellen

Im Rahmen des Gemeinschaftsforschungsprojektes sind Fortschritte im Einsatz eines Direktantriebes in der Extrusionstechnik bei der Firma Reifenhäuser bekannt geworden. Serienreife Maschinen mit Direktantrieben (Reitorque) wurden auf der letzten Internationalen Messe Kunststoff und Kautschuk „K2004“ auf dem Stand der Firma Reifenhäuser präsentiert. Die Troisdorfer Extrusionspezialisten konnten den Kunststoffverarbeitern ein bereits erfolgreiches im dreischichtigen Praxisbetrieb getestetes getriebeloses Antriebskonzept präsentieren, mit dem sich die Energiekosten eines Extruders deutlich senken lassen.

Bei Kunststoffmaschinen können getriebelose Extruderantriebe im Vergleich zur herkömmlichen Antriebstechnik einen höheren Wirkungsgrad erzielen und damit für den Kunststoffverarbeiter in Zeiten hoher Energiekosten ein wichtiges Einsparpotenzial erschließen.

Der wesentliche Vorteil der neuen Extruder-Antriebstechnik ist laut Aussage der Fa. Reifenhäuser das konstant hohe Drehmoment (high-torque) über den gesamten, für die Technologie typisch niedrigen Extrusionsdrehzahlbereich. Damit verbunden ist laut Dipl.-Kfm. Ulrich Reifenhäuser ein um 6% höherer Wirkungsgrad gegenüber der herkömmlichen Antriebstechnik. „Alleine auf diese Weise werden die Energiekosten einer

Produktionsanlage um etwa 20% gesenkt“, so der geschäftsführende Gesellschafter des Troisdorfer Kunststoffmaschinenbauers [VDI und Reifenhäuser].

II.4 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

Während der Projektlaufzeit bestand nicht die Notwendigkeit eine Veröffentlichungen ohne gegenwärtige Versuchsergebnisse zu machen. Vereinzelt Versuchsergebnisse wurden durch das Institut für Kunststofftechnik (KTP) auf der KTP-Jahrestagung (Thema: Extrusion) vorgestellt und somit einem breitem Fachpublikum unterbreitet. Die anschließende Diskussion fand ein reges Interesse bei allen Teilnehmern. Dies zeigt, dass an dem Thema der Energieeinsparung gerade in Tagen der hohen Energiekosten ein großes Interesse besteht.

In Zusammenarbeit mit dem KTP soll in nächstmöglicher Zeit beim VM Verlag (Fachzeitschrift „Extrusion“) eine Veröffentlichung zum Thema „Gegendruckunabhängige Plastifiziereinheiten auch mit Einsatz eines Glatthrextruder möglich“ erfolgen. In diesem Fall soll versucht werden, die Veröffentlichung auch auf dem Asiatischen Markt zu platzieren. Hierbei lassen sich die hervorragenden Beziehungen des VM Verlags mit der Zeitschrift „Extrusion Asia Edition“ nutzen.

Danksagung

An dieser Stelle möchten wir allen beteiligten Institutionen und Personen für die erfolgreiche Durchführung des Projektes danken. Ein besonderer Dank gilt dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) für die finanzielle Unterstützung, dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) für die Betreuung und dem Institut für Kunststofftechnik (KTP) für die Projektleitung. In diesem Zusammenhang sind die Personen Herr Bernd Hartmann (DLR) und Dirk Heinrich (KTP) besonders hervorzuheben.

Literaturverzeichnis

[1]	Heinrich, D.	Numerische und experimentelle Untersuchungen zum Prozessverhalten von Einschneckenmaschinen mit Wellenschnecken unveröffentlichte Diplomarbeit, Universität Paderborn, 2002
[2]	Martin, A. G.	Der Einschneckenextruder: Grundlagen und Systemoptimierung, VDI-Verlag, 2. Auflage - Düsseldorf, 2001
[3]	Potente, H. Heinrich, D.	Energetische Optimierung von Einschneckenmaschinen KTP-Jahrestagung Thema Extrusion, Band 7, Shaker Verlag, 07/2004
[4]	Potente, H. et al	Polymerforschung in Paderborn, Tagungsband zum Seminar Einschneckenplastifizierung Shaker Verlag, Aachen, 2001
[5]	Wortberg, J. et al	Effizienzsteigerung durch innovative Maschinenteknik Kunststoffe 89 (1999) 1, S.54-58
[6]	Chung, C. I.Barr, R.	A Novel of Energy Efficient Screw Designs Antec 1983, S. 168 – 169
[7]	Obermann, C.	Theoretische und experimentelle Untersuchungen zum Durchsatz- und Leistungsverhalten von Glattrohr-Plastifiziereinheiten Dissertation, Universität Paderborn, 2000