

druckluft-technik Chemnitz GmbH

Entwicklung eines innovativen Pneumatikmoduls zur Reduzierung des Druckluftverbrauchs beim Druckluftformen

Abschlussbericht über ein technisch orientiertes Vorhaben,
gefördert unter dem AZ:24398/02 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Dipl.-Ing. S. Baldauf & Prof. Dr.-Ing. habil. E. Köhler

November 2010

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



AZ	24398/02-22	Referat	Fördersumme	134.842,00 €
Antragstitel		Entwicklung eines innovativen Pneumatikmoduls zur Reduzierung des Druckluftverbrauchs beim Druckluftformen		
Stichworte		Energie, Abluft, Blasformen		
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)	
19 Monate	01.04.09	31.10.10	2	
Zwischenberichte				
Bewilligungsempfänger		druckluft-technik Chemnitz GmbH Goetheweg 20		Tel 0 37 22 / 50 01 23 Fax 0 37 22 / 50 01 58
		09247 Chemnitz-OT Röhrsdorf		Projektleitung Steffen Baldauf
				Bearbeiter
Kooperationspartner				
Steinbeis Transferzentrum für Antriebs- und Handhabungstechnik Chemnitz Annaberger Straße 240 09125 Chemnitz				
 Zielsetzung und Anlass des Vorhabens 				
<p>Nach dem erfolgreichen Abschluss der Experimentalstudie in der ersten Projektphase soll in diesem Vorhaben die technische Umsetzung der entwickelten Einsparmaßnahme für Blasformmaschinen folgen. Die Zielsetzung des Forschungsvorhabens besteht darin, den erfolgreich getesteten Prototypen des Einsparmoduls bis zum vermarktungsfähigen Produkt weiterzuentwickeln und zu optimieren. Das Produkt soll möglichst für alle Blasformverfahren und Anlagen anwendbar sein. Aus diesem Grund wird das Endergebnis eine Produktreihe, welche für die verschiedenen Einsatzfälle jeweils die passende Lösung bietet.</p>				
 Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden 				
<p>In der ersten Phase des Projektes wurden die wissenschaftlichen und technischen Grundlagen geschaffen. Die favorisierte Variante wurde technisch an zwei Pilotanlagen realisiert. Die Funktion der Prototypen des Einsparmoduls wurde nachgewiesen.</p> <p>In der zweiten Phase des Projekts wird der Prototyp zu einem Produkt weiterentwickelt. Besonderer Entwicklungsbedarf besteht in der Umsetzung von variablen Druckspeichern und im Steuerungskonzept. Das Einsparmodul arbeitet am effizientesten, wenn die Volumen von Druckspeicher und herzustellenden Bauteil gleich groß sind. Soll das Einsparmodul für das gesamte Produktspektrum einer Fertigungsanlage anwendbar sein, ist das Volumen des Druckspeichers variabel zu gestalten. Das kann einerseits durch eine Reihenschaltung von Druckspeichern erfolgen. Alternativ ist die Entwicklung eines stufenlos einstellbaren Druckspeichers möglich, der als Kolbenspeicher ausgeführt werden kann. In einem weiteren Arbeitsschritt ist das Zusammenwirken der Blasformanlage mit dem Einsparmodul zu realisieren. Mit den vorhandenen Steuersignalen der Fertigungsmaschine wird ein separater Steuerungsablauf für das Einsparmodul gestartet. Danach erfolgen die Dimensionierung von Druckspeicher sowie von Steuerungs- und Regelungselementen und die Unterbringung in einem Universalgehäuse. Der Test des Einsparmoduls wird unter Praxisbedingungen bei den Projektpartnern durchgeführt. Nach den Prüf- und Messprogrammen erfolgt die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung. Die Erstellung eines Auswahlalgorithmus konfiguriert das Einsparmodul speziell auf die Maschinenteknik des jeweiligen Kunden.</p>				
<small>Deutsche Bundesstiftung Umwelt • An der Bornau 2 • 49090 Osnabrück • Tel 0541/9633-0 • Fax 0541/9633-190 • http://www.dbu.de</small>				

Ergebnisse und Diskussion

Im Rahmen dieses Projektes wurde aufbauend auf den Ergebnissen der vorgelagerten Experimentalstudie (AZ 24398) eine seriennahe Umsetzung der entwickelten Einsparmaßnahme in Form eines nachrüstbaren Einsparmoduls erarbeitet. Durch das Einsparmodul wird die nach dem Formgebungsprozess aus dem Blasformwerkzeug ausströmende Druckluft zwischengespeichert und im Folgezyklus durch einen zusätzlichen Vorformprozess dem System wieder zurückgeführt. Nach einer ausführlichen Analyse bestehender Blasformsysteme sowie deren Produktspektren wurden zusammen mit dem Steinbeis Transferzentrum für Antriebs- und Handhabungstechnik im Maschinenbau und der Technischen Universität Chemnitz zunächst geeignete pneumatische und steuerungstechnische Schnittstellen für eine problemlose Eingliederung des Einsparmoduls sowie ein geeignetes Steuerungskonzept gewählt. Daraus folgte, dass die pneumatische Eingliederung über ein 3/2-Wegeventil erfolgt, welches möglichst nah am Blasformwerkzeug an der Entlüftungsstelle oder als Rohreinbau anzubringen ist. Für die steuerungstechnische Eingliederung wurde eine Kompaktsteuerung als zweckmäßig erachtet, welche die benötigten Signale der Maschinensteuerung einliest und den veränderten Verfahrensablauf regelt. Bei der Entwicklung des Druckspeichers wurde die Annahme, dass bei einem Druckspeichervolumen gleich dem Fassungsvermögen des herzustellenden Bauteils die höchsten Einspareffekte auftreten, widerlegt. Vielmehr führen größere Druckspeicher laut theoretischen Berechnungen zu höheren Einspareffekten von bis zu 50% des herkömmlichen Blasluftaufwands. Diese Tendenz wurde in labortechnischen Untersuchungen nachgewiesen, wobei u.a. durch Leitungsverluste lediglich 75% des theoretisch möglichen Einsparpotenzials erreicht wurden. Größere Druckspeicher benötigen jedoch eine höhere Anzahl an Zyklen, bis sich der optimale Einspareffekt einstellt. Daher gilt es, über das Bauteilspektrums und der Anzahl der Produktionszyklen ein zweckmäßiges Druckspeichervolumen zu bestimmen. Aus den Betrachtungen zur pneumatischen und steuerungstechnischen Eingliederung sowie zur Wahl des Druckspeichers wurde deutlich, dass der Grundaufbau des Einsparmoduls zwar universell gestaltet werden kann, jedoch individuelle Anpassungen auf die umzurüstende Blasformanlage notwendig sind. Für eine schnelle und einfache Konfiguration des Einsparmoduls wurde ein Auswahlalgorithmus entworfen. Bei den durchgeführten Praxistests wurde mit den neuen Erkenntnissen eine Reduzierung des Blasluftaufwands von bis zu 36% nachgewiesen. Durchschnittlich ist bei einer zweckmäßigen Auslegung des Einsparmoduls mit Einsparungen von 30% zu rechnen, wobei sich der Amortisierungszeitraum auf ca. 24 Monate beläuft.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Die erreichten Projektergebnisse werden in naher Zukunft in Fachzeitschriften veröffentlicht, um weitere Interessenten für das Einsparmodul zu werben. Darüber hinaus werden Artikel für die lokale Presse und das Steinbeismagazin „Transfer“ vorbereitet sowie das Einsparmodul auf dem vorhandenen Internetauftritt vorgestellt. Des Weiteren wurde ein Anschauungsobjekt eines Einsparmoduls aufgebaut, welches im Verkaufsraum der Drucklufttechnik Chemnitz GmbH aufgestellt und als Exponat auf Messeauftritten dienen wird. Als Messeauftritt ist die nächste Sächsische Industrie- und Technologiemesse (SIT) vorgesehen, wo bereits dieses Jahr verschiedenen Geschäftspartnern und Interessenten die Projektergebnisse und Entwicklungen präsentiert wurden.

Fazit

Das Ergebnis des Förderprojektes ist ein Einsparmodul, welches einen universellen Grundaufbau besitzt und durch individuelle Abstimmung auf die umzurüstende Blasformanlage eine Reduzierung des Blasluftaufwands von durchschnittlich 30% ermöglicht. Dies entspricht einer möglichen Einsparung an elektrischer Energie von 100 J pro Liter Fassungsvermögen und Bar Umformdruck blasgeformter Bauteile. Das Einsparmodul erfüllt alle im Rahmen der Entwicklungsarbeiten gestellten Anforderungen. Damit ist es möglich, Blasformanlagen energiereduzierter betreiben zu können und somit die Umwelt maßgeblich zu entlasten.

Inhaltsverzeichnis

ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	5
TABELLENVERZEICHNIS	6
KURZZEICHENVERZEICHNIS.....	7
ZUSAMMENFASSUNG	9
EINLEITUNG	10
1 RECHERCHE ZUM STAND DER TECHNIK.....	12
1.1 PATENT- UND LITERATURRECHERCHE ZUR BLASLUFTREDUZIERUNG	12
1.2 ANALYSE EXISTIERENDER MASCHINENSYSTEME ZUM BLASFORMEN	14
1.3 RECHERCHE MÖGLICHER ANWENDER DER EINSPARMAßNAHME	17
2 ANALYSE DES ANWENDUNGSSPEKTRUMS.....	18
2.1 ANALYSE DER PRODUKTIONSTECHNIK	18
2.2 ANALYSE UND KATALOGISIERUNG VON PRODUKTSPEKTREN VERSCHIEDENER MASCHINENTYPEN.....	19
2.3 AUSWAHL GEEIGNETER SCHNITTSTELLEN.....	20
2.4 PRÄZISIERUNG DES PFLICHTENHEFTES	21
3 GRUNDAUFBAU DER PRODUKTREIHE EINES EINSPARMODULS.....	22
3.1 PRODUKTPROGRAMM DES EINSPARMODULS.....	22
3.2 EINTEILUNG DES MODULS IN ANWENDUNGSSPEZIFISCHE BAUGRUPPEN	24
4 ENTWICKLUNG EINES VARIABLEN DRUCKSPEICHERS	26
4.1 ERARBEITUNG VERSCHIEDENER LÖSUNGSKONZEPTE	26
4.2 AUSWIRKUNGEN BEI ABWEICHUNGEN DES ANGESTREBTEN SPEICHERVOLUMENS	31
4.3 GESETZMÄßIGKEITEN ZUM EINFLUSS DER SPEICHERGRÖÙE AUF DEN EINSPAREFFEKT.....	33
4.4 LABORTECHNISCHE UNTERSUCHUNGEN ZUM EINFLUSS DES SPEICHERVOLUMENS AUF DEN EINSPAREFFEKT	39
5 ENTWICKLUNG EINES GEEIGNETEN STEUERUNGSABLAUF.....	41
5.1 ERARBEITUNG VERSCHIEDENER STEUERUNGSKONZEPTE	41
5.2 GEGENÜBERSTELLUNG UND VERGLEICH DER LÖSUNGSKONZEPTE.....	42
5.3 UMSETZUNG AUSGEWÄHLTER STEUERUNGSKONZEPTE – KLEINTECHNISCHE VERSUCHE	42
6 ZUSAMMENFÜHRUNG DER TEILLÖSUNGEN ZUR GESAMTLÖSUNG	45
6.1 ENTWICKLUNG EINES GEEIGNETEN UNIVERSALGEHÄUSES	45
6.2 DIMENSIONIERUNG DER SPEICHEREINHEIT	45
6.3 DIMENSIONIERUNG DER STEUERUNGS- UND REGELUNGSELEMENTE	46
7 ERSTELLUNG EINES AUSWAHLALGORITHMUS	47
8 EINSATZ DER LÖSUNG UNTER PRAXISBEDINGUNGEN.....	48
8.1 UNTERSUCHUNGEN BEIM PROJEKTPARTNER TRASSL-PLASTIK GMBH & CO. KG.....	48
8.2 UNTERSUCHUNGEN BEIM PROJEKTPARTNER ESDA KUNSTSTOFFTECHNIK GMBH.....	51

9	ÖKOLOGISCHE UND ÖKONOMISCHE BETRACHTUNG DER EINSPARMAßNAHME	52
9.1	ERREICHBARE UMWELTENTLASTUNG	52
9.2	WIRTSCHAFTLICHKEIT DES EINSPARMODULS	54
10	ERSTELLUNG EINER BETRIEBSANLEITUNG FÜR DIE PRODUKTREIHE	55
11	MAßNAHMEN ZUR VERBREITUNG DER ERGEBNISSE	55
	FAZIT	57
	LITERATURVERZEICHNIS	59
	ANLAGENVERZEICHNIS	62

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: KHS Corpoplast AIRBACK/AIR RECYCLING	12
Abbildung 2: Verfahrensablauf Extrusionsblasformen.....	15
Abbildung 3: Auszug Pneumatikschaltplan Bekum BM 101D	16
Abbildung 4: Pneumatikschaltplan für Blasformanlagen mit separaten Entlüftungsventil.....	17
Abbildung 5: Verschiedene Bauformen von Ventilsteckern.....	21
Abbildung 6: Modularer Aufbau des Einsparmoduls	24
Abbildung 7: Anordnung der Moduleinheiten	25
Abbildung 8: handelsüblicher Druckluftspeicher mit konstantem Volumen.....	26
Abbildung 9: Funktions- und Wirkprinzipien variabler Druckspeicher.....	27
Abbildung 10: Funktionsschema Verbundspeicher	29
Abbildung 11: Funktionsschema Kolbenspeicher	30
Abbildung 12: Verfahrensablauf der blasluftreduzierten Betriebsweise.....	31
Abbildung 13: Einfluss des Volumenverhältnisses k auf Einsparpotential und Vorformdruck.....	35
Abbildung 14: Gesamteinsparpotenzial verschiedener Volumenverhältnisse	38
Abbildung 15: Vergleich berechneter und labortechnisch erfasster Gesamteinsparpotenziale...	40
Abbildung 16: Schematische Darstellung der Prozessschritte mittels Relaischaltung	43
Abbildung 17: Einfluss der Druckdifferenzen und Volumenverhältnisse auf die Dauer des Druckausgleichs.....	43
Abbildung 18: Prüffristen für einfache Druckbehälter.....	46
Abbildung 19: Einsparmodul in Kompaktbauweise, umgerüstete Referenzblasformanlage	49
Abbildung 20: Druck- und Volumenstromverläufe der Blasformanlage	50
Abbildung 21: Umgerüstete Großblasformanlage der ESDA Kunststofftechnik	51
Abbildung 22: Druck- und Volumenstromverläufe der Großblasformanlage.....	52
Abbildung 23: Anschauungsobjekt des Einsparmoduls.....	56
Abbildung 24: Gesamteinsparpotential $S_{\%_ges}$	69

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Einteilung der Maschinengrößen (Maximalwerte) / Produktspektren	19
Tabelle 2: Übersicht der anlagen-/ produktspezifischen Variationen des Einsparmoduls.....	23
Tabelle 3: Vorformdruck, Einsparpotenzial bei verschiedenen Speichergrößen	33
Tabelle 4: Vorformdrücke / Einsparpotenziale verschiedener Volumenverhältnisse	34
Tabelle 5: Übersicht der Messwerte und ermittelte Einsparung	49
Tabelle 6: Materialkosten für das Einsparmodul	54

KurzzeichenverzeichnisFormelzeichen:

Formelzeichen	Einheit	Bezeichnung
E	J	Energie
i, j	-	Laufvariablen
k	-	Volumenverhältnis
n	-	Anzahl der Gesamtzyklen
p	bar	Druck
Q_N	l/min	Nenndurchfluss, Volumenstrom
\dot{Q}	J/s	abzuführender Wärmestrom
R_S	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	spezifische Gaskonstante
$S_{\%}$	%	prozentuales Einsparpotenzial
T	s	Zeit
T	K	Temperatur
V	l	Volumen
x	-	Druckverhältnis
η	-	Wirkungsgrad

Abkürzungen, Indizes:

ab...	abzuführen
BT...	Bauteil
DA...	Druckausgleich
DS...	Druckspeicher
ges...	Gesamtwert – summierte Einzelwerte
GD...	Gegendruckseite
Komp...	Kompressor
max...	Maximalwert
N...	Normzustand
pneu...	pneumatisch
spar...	einsparbar
SPS...	Speicherprogrammierbare Steuerung
umf...	Umformen
VM...	Verdrängermedium
WKZ...	Werkzeug

Zusammenfassung

Im Rahmen dieses durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt geförderten Projektes (AZ 24398/02) wurde aufbauend auf den Ergebnissen der vorgelagerten Experimentalstudie (AZ 24398) eine seriennahe Umsetzung der entwickelten Einsparmaßnahme in Form eines nachrüstbaren Einsparmoduls erarbeitet. Durch das Einsparmodul wird die nach dem Formgebungsprozess aus dem Blasformwerkzeug ausströmende Druckluft zwischengespeichert und im Folgezyklus durch einen zusätzlichen Vorformprozess dem System wieder zurückgeführt. Für eine möglichst universelle Umsetzung galt es, zusammen mit dem Steinbeis Transferzentrum für Antriebs- und Handhabungstechnik im Maschinenbau und der Technischen Universität Chemnitz, zunächst bestehende Blasformanlagen hinsichtlich der pneumatischen und steuerungstechnischen Umsetzung der verschiedenen Verfahrensabläufe zu analysieren. Für eine problemlose Eingliederung des Einsparmoduls wurden geeignete pneumatische und steuerungstechnische Schnittstellen gewählt und ein entsprechender Steuerungsablauf entwickelt. Für die Dimensionierung des Druckspeichers waren zusätzlich die Produktspektren der einzelnen Blasformanlagen zu ermitteln. Bei den Entwicklungsarbeiten zu einem im Volumen variablen Druckspeichers wurde die Annahme der Experimentalstudie widerlegt, dass ein Druckspeichervolumen gleich dem Fassungsvermögen des Bauteils zu maximalen Einspareffekten führt. Stattdessen wurde in einer Studie zum Einfluss der Druckspeichergröße auf den Einspareffekt über Berechnungen bewiesen, dass durch größere Speichervolumina auch höhere Einsparpotenziale erzielt werden können. Dies wurde anhand von labortechnischen Versuchen bestätigt. In der Folge galt es einen Auswahlalgorithmus zu erarbeiten, mit welchem die Komponenten des Einsparmoduls individuell auf die umzurüstende Blasformanlage zu bestimmen sind. Anhand von Praxisuntersuchungen bei den Projektpartnern Trassl-Plastik GmbH & Co. KG und der ESDA Kunststofftechnik GmbH wurden nach den neuen Erkenntnissen zwei Referenzanlagen umgerüstet und Reduzierungen des Blasluftaufwands von bis zu 36% messtechnisch nachgewiesen. Eine abschließende ökologische und ökonomische Bewertung des Einsparmoduls ergab, dass sich bei einer durchschnittlichen Einsparung von 30% der Blasluft die Investitionskosten des Einsparmoduls nach 24 Monaten amortisieren.

So wird es künftig möglich sein, im großen Umfang vorhandene Blasformanlagen energie-reduziert und umweltfreundlich betreiben zu können. Bereits bei einer Umrüstung von 20% der in Deutschland betriebenen Blasformmaschinen ist mit einer jährlichen Energieeinsparung von 25 Mio. kWh elektrischer Energie und einer Reduzierung des CO₂-Ausstoßes um 9.000 t zu rechnen.

Einleitung

Mit dem Druckluftformverfahren können hohle Kunststoffbauteile mit nahezu beliebiger Gestalt gefertigt werden. Typische Bauteile sind neben Verpackungen von Konsumgütern, wie Getränken, Joghurt oder Reinigungsmitteln, auch immer häufiger technische Produkte. So hat sich dieses Verfahren unter anderem bei der Herstellung von Kraftstoff- und Öltanks, Luftführungskanälen sowie Faltenbälgen durchgesetzt. Neben rein mechanischen Verfahren hat sich für die Herstellung solcher Produkte das Druckluftformen aufgrund seiner vorteilhaften Eigenschaften, wie der hohen Flexibilität hinsichtlich der Umformkräfte und Bauteilgröße, der gleichmäßigen Verteilung der Umformkräfte sowie der hohen erreichbaren Maßhaltigkeit, bewährt.

Der Prozessablauf des Druckluftformens teilt sich im Wesentlichen in die Teilprozesse Vorformerzeugung, Ausformung des Bauteils und Kühlung des Bauteils auf. Derzeit werden zur Ausformung des Bauteils enorme Mengen an Druckluft benötigt, welche nach der Abkühlphase ohne weiteren Nutzen aus dem Werkzeug an die Umgebung entlüftet wird. Druckluft ist jedoch einer der teuersten Energieträger, was vorrangig auf die verlustreiche Erzeugung (typischer Wirkungsgrad $< 30\%$) zurückzuführen ist. Aufgrund dieser Tatsache ist das Druckluftformverfahren ein aus energetischer Sicht äußerst aufwendiger Prozess, den es zu optimieren gilt. Erste Recherchen haben ergeben, dass sich die Hersteller von Druckluftformanlagen der beschriebenen Energieproblematik bewusst sind. Dies belegen einige Patente, die in diesem Bereich Erfindungen aufzeigen. Allerdings finden diese Lösungen nur bedingt und wenn, lediglich bei Neukonstruktionen der Maschinenherstellern Anwendung.

In einer vorgelagerten Experimentalstudie (AZ 24398) wurde daher eine Einsparmaßnahme entwickelt, wobei die bei der Werkzeugentlüftung ausströmende Druckluft zwischengespeichert und über einen Vorformprozess im folgenden Produktionszyklus dem System zurückgeführt wird. Dafür wurde ein zusätzliches Ventil an der Entlüftungsstelle des Blasformwerkzeugs angebracht, welches bei der Werkzeugentlüftung ein Druckausgleich zu einem Druckspeicher ermöglicht. Nach dem abgeschlossenen Druckausgleich, welcher mit Hilfe von Drucksensoren über eine Speicherprogrammierbare Steuerung festgestellt wird, ist der Restdruck im Bauteil an die Umgebung zu entlüften. Im folgenden Zyklus wird zunächst ein erneuter Druckausgleich zwischen dem Druckspeicher und dem Blasformwerkzeug durchgeführt, wodurch sich die Vorform bereits aufgeweitet. Erst im Anschluss wird dem Werkzeug bis zum erforderlichen Umformdruck Druckluft aus der Druckluftquelle zugeführt. Der Funktionsnachweis dieser Verfahrensweise wurde anhand von labortechnischen Versuchen und Praxistest erbracht, wobei eine Reduzierung des Blasluftaufwands von 20% nachge-

wiesen werden konnte. Aus den Ergebnissen der Experimentalstudie wurde geschlussfolgert, dass für hohe Einspareffekte das Druckspeichervolumen gleich dem Fassungsvermögen des zu fertigenden Bauteils zu wählen ist.

Ziel dieses Projektvorhabens war es daher, aufbauenden auf den Ergebnissen der Experimentalstudie eine seriennahe Produktreihe des Einsparmoduls zu entwickeln, welche möglichst auf alle Blasformverfahren und –anlagen sowie deren Bauteilspektren anwendbar ist. Als besondere Schwerpunkte der Entwicklungsarbeiten galten die Realisierung eines im Volumen variablen Druckspeichers sowie Erarbeitung eines geeigneten, universellen und kostengünstigen Steuerungskonzepts. Hierfür wurden zu Beginn des Projektes existierende Maschinensysteme zum Blasformen sowie deren Verfahrensabläufe analysiert und das Anwendungsspektrum des Einsparmoduls hinsichtlich der Produktspektren vorhandener Blasformanlagen und geeigneter pneumatischer und steuerungstechnischer Schnittstellen aufgestellt. Im Anschluss erfolgte die Erarbeitung des Grundaufbaus der geplanten Produktreihe, worin die einzelnen Produkte der Produktreihe in Anwendungsbereiche einzuteilen waren. Für die Entwicklung eines geeigneten Druckspeichers wurden verschiedene Lösungsmöglichkeiten erarbeitet, gegenübergestellt und verglichen. Mit darauf aufbauenden Untersuchungen galt es, eine geeignete Umsetzung des Druckspeichers zu wählen. Für die steuerungstechnische Eingliederung des Einsparmoduls wurden verschiedene Steuerungskonzepte erarbeitet und hinsichtlich der Funktionalität, dem Kostenaspekt und dem erforderlichen Umrüstaufwand bewertet. Die Vorzugslösungen waren durch kleintechnische Versuche einem Funktionsnachweis zu unterziehen. Anschließend waren die Teillösungen zur Gesamtlösung des Einsparmoduls zusammenzuführen und ein Auswahlalgorithmus zur anlagenspezifischen Konfiguration des Einsparmoduls zu erarbeiten. Zum Abschluss der Entwicklungsarbeiten galt es, das Einsparmodul auf jeweils eine Referenzanlage der Projektpartner Trassl-Plastik GmbH & Co. KG und der ESDA Kunststofftechnik GmbH auszulegen und unter Praxisbedingungen zu testen sowie die erreichbare Drucklufteinsparung messtechnisch zu erfassen. Auf Grundlage der Testergebnisse waren eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung durchzuführen und der Amortisierungszeitraum einer Umrüstung mit dem Einsparmodul zu bestimmen. Nachdem die Entwicklungen, die Praxistests und die Wirtschaftlichkeitsrechnung erfolgreich durchgeführt wurden, galt es abschließend für eine korrekte Anwendung des Einsparmoduls eine Betriebsanleitung zu erstellen.

1 Recherche zum Stand der Technik

1.1 Patent- und Literaturrecherche zur Blasluftreduzierung

Die in der Phase I entwickelte Verfahrensweise zur Reduzierung des Druckluftaufwands bei Blasformen wurde zu einem Gebrauchsmuster angemeldet. Im Rahmen dieser Anmeldung wurde ein Rechercheauftrag zu ähnlichen Technologien an das Deutsche Patent- und Markenamt gestellt. Die Ergebnisse der Recherche wurden gründlich analysiert, wobei die aufgeführten Dokumente teilweise den bereits aus der Phase I bekannten Schutzrechten entsprechen. Die bedeutendsten Schriften werden im Folgenden aufgezeigt und bewertet.

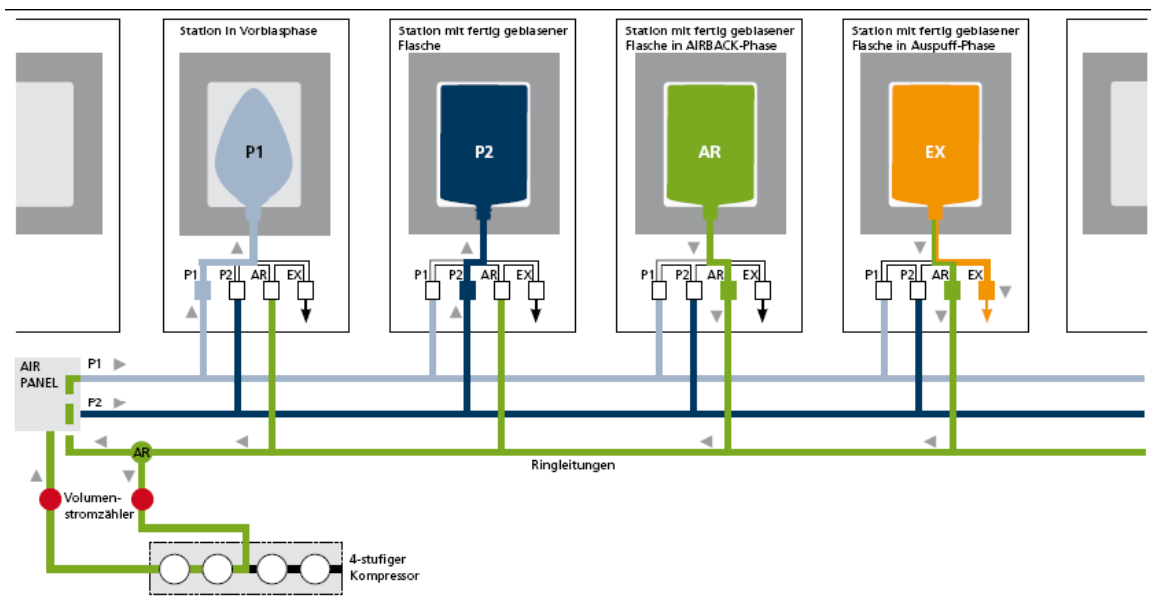


Abbildung 1: KHS Corpoplast AIRBACK/AIR RECYCLING (Blaszyklus einer Station) [3/1]

In den Patentschriften [4/1], [4/2] und [4/3] wird die Mehrfachnutzung von Arbeitsluft für das Streckblasformverfahren zur Herstellung von PET-Flaschen beschrieben. Hierfür werden die Anlagen in zwei Druckluftsysteme aufgeteilt, in Hochdruckblasluft und Niederdruckluft. Die Hochdruckblasluft dient zum Ausformen des Hohlkörpers, die Niederdruckluft für Arbeitsschritte, die parallel zur Formgebung durchgeführt werden. Nach der Expansion des Vorformlings wird die Hochdruckblasluft der Niederdruckversorgung zugeführt und durch eine Drucküberwachung begrenzt. Um Druckschwankungen im Niederdruckkreislauf zu verhindern, wird ein Zwischenspeicher empfohlen.

Basierend auf die Patentschrift [4/3] ist das in Abbildung 1 dargestellte Air Recycling System für Streckblasanlagen entwickelt worden. Laut [3/1] ist über dieses Luftrückführungs-

system eine 100%-ige Wiederverwendung der benötigten Druckluft für das Vorformen möglich.

Die Luftrückgewinnung erfolgt von der Hochdruckluftversorgung P2, die mit einem Kompressor als Druckluftquelle verbunden ist, zur Niederdruckluftversorgung P1 und somit direkt in den Produktionsprozess. Zunächst wird der Vorformling mit einem niedrigeren Luftdruck aus der Niederdruckluftversorgung P1 vorgeblasen. Danach wird der vorgeblasene Behälter mit der Hochdruckluftversorgung P2 verbunden und somit fertig ausgeformt. Hat der Behälter seine Formstabilität erreicht beginnt die Phase der Luftrückführung, indem die Druckluft aus dem Inneren in die Niederdruckluftversorgung P1 entlüftet wird. Nach einem definierten Druckabfall wird die Formgebung des Behälters mit einer Restentlüftung abgeschlossen. Hierbei wird die Restluft im Behälter an Atmosphäre abgelassen. Die Angabe von 100% bezieht sich bei diesem Verfahren ausschließlich auf die für das Vorformen benötigte Druckluft. In der Patentschrift [4/3] wird die erreichbare Einsparung bezogen auf den Blasluftaufwand mit ca. 20% angegeben. Die beschriebenen Erfindungen beziehen sich jeweils auf das Streckblasformen insbesondere von Kunststoffflaschen, welches üblich mit hochverdichteter Druckluft zwischen 10 und 50 bar durchgeführt wird.

Eine weitere Patentschrift [4/4] bezieht sich auf den sich dem Blasformverfahren ähnelnden Thermoformprozess zur Herstellung von becherförmigen Kunststoffverpackungen. Hierbei werden auf Umformtemperatur erwärmte Folien oder Platten in einem der Endform entsprechenden Werkzeug mit Druckluft (6-8 bar) beaufschlagt, sodass sie sich an das Innere des Werkzeugs anlegen. Nach der Abkühlphase und somit dem Erreichen der Formstabilität wird der Luftdruck aus dem Inneren der Form abgelassen und diese kann dem Werkzeug entnommen werden. Um die zum Ausformen benutzte Druckluft nicht komplett an Atmosphäre zu entlüften wird ein Druckluftspeicher zwischengeschaltet, in den zunächst die Druckluft entweichen kann. Dieser Druckluftspeicher ist Teil einer Niederdruckluftversorgung mit der weitere Verbraucher bedient werden können. Um Druckschwankungen in der Niederdruckluftversorgung zu vermeiden, ist zusätzlich eine Druckluftquelle angeschlossen. Die weiteren vom Patent- und Markenamt recherchierten Patentschriften wurden analysiert und für den betrachteten Sachverhalt als nicht relevant eingestuft. Der Vollständigkeit halber sind diese jedoch in der tabellarischen Übersicht (Anlage 1) mit aufgeführt.

Aus den Recherchen geht hervor, dass die dargestellten Systeme zur Wiederverwendung der Druckluft weitgehend Neukonstruktionen vorbehalten sind. Darüber hinaus sind die aufgeführten Lösungen vorrangig für Blasformverfahren bestimmt, welche im Hochdruckluftbereich ($p > 15$ bar) betrieben werden, während beim Extrusionsblasformen mit geringeren

Drücken gearbeitet wird. Demzufolge ist kein Hoch- und Niederdruck-Luftnetz vorhanden, worauf die oben genannten Einsparmaßnahmen basieren.

Neben den aus der Recherche des Patentamts aufgeführten Patenten sind auch die bereits aus der Phase I bekannten geschützten Erfindungen weiterhin in Betracht zu ziehen, welche sich jedoch ebenfalls nicht auf das Extrusionsblasformverfahren oder eine Umrüstung bereits bestehender Anlagensysteme beziehen.

Es kann daher zusammenfassend festgestellt werden, dass die betrachteten Lösungen sowie die bereits bekannten Patentschriften aus [5/1], [5/2] und [5/3] nur bedingt in der Praxis Anwendung finden und bei einer Vielzahl von Anwendern keine Berücksichtigung finden. Demnach gibt es im Bereich der druckluftformenden Verfahren bislang keine oder nur unzureichende technische Lösungen, um den hohen Energiebedarf zu mindern. Diesen Missstand der Technik gilt es, für einen ökologischeren und ökonomischeren Blasformprozess zu beseitigen. Insbesondere Möglichkeiten zum Nachrüsten bestehender Produktionsanlagen zum effizienteren Betreiben dieser sind nicht bekannt. Dies belegt den erforderlichen Handlungsbedarf auf diesem Gebiet der Kunststoffverarbeitung.

Dementsprechend galt es im Rahmen dieses Projektes die Entwicklungen der Phase I fortzuführen, um den Blasformanwendern ein einfach applizierbares und kostengünstiges Einsparmodul für einen druckluftreduzierten Prozessablauf bei bestehenden Blasformanlagen zur Verfügung zu stellen.

1.2 Analyse existierender Maschinensysteme zum Blasformen

Aus den Untersuchungen des vorhergehenden Projektes Phase I (AZ: 24398) sowie im Rahmen dieses Projektes wurden Anlagensysteme unterschiedlicher Blasformanlagenhersteller bei verschiedenen Blasformanwendern analysiert. Dies reichte von Extrusionsblasformanlagen, welche durch Eigenkonstruktion der Blasformanwender erbaut wurden, über ältere Anlagentechnik (80-iger Jahre) bis hin zu neu erwerbbaaren Blasformanlagen. Vom grundsätzlichen Verfahrensablauf unterscheiden sich die verschiedenen Anlagensysteme nur unwesentlich. Demnach wird beim Durchlauf eines Zyklus die in der Abbildung 2 dargestellten Prozessphasen durchlaufen.

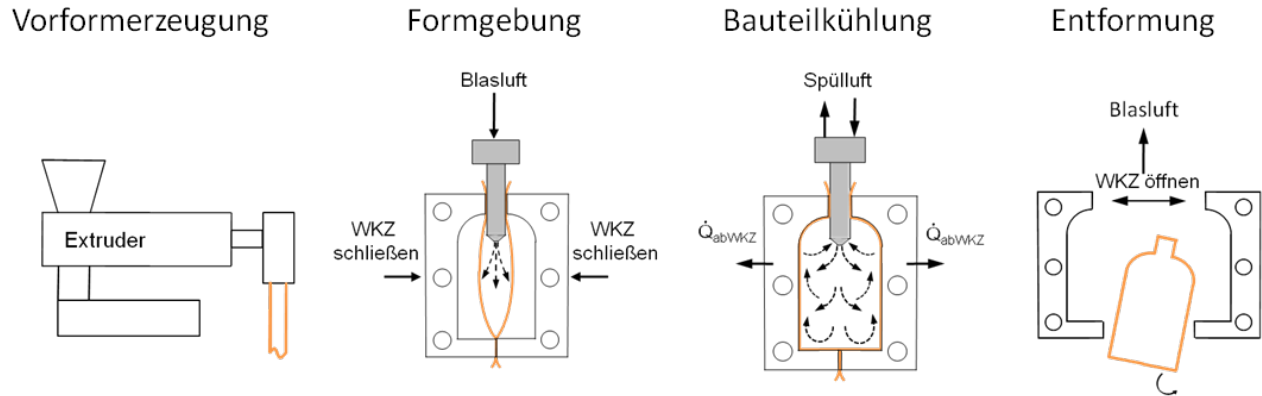


Abbildung 2: Verfahrensablauf Extrusionsblasformen

Bei der Vorformerzeugung wird durch einen Extruder Kunststoffgranulat aufgeschmolzen, homogenisiert und ein Schmelzeschlauch, welcher als Vorform fungiert, ausgestoßen. Im Anschluss wird die Vorform in das Werkzeug eingelegt, das Werkzeug geschlossen und in das Innere der Vorform über einen Blasdorn oder Blasnadeln geleitet. Blasdorne finden im Allgemeinen bei Bauteilen mit mindestens einer funktionell erforderlichen Öffnung wie zum Beispiel Flachen oder Kanister Anwendung. Für ein problemloses Einführen des Dornes wird mittels sogenannter Vorblasluft das Ende des Schmelzeschlauchs aufgehalten. Beim Nadelblasen werden hingegen die Blasnadeln, welche einen deutlich geringeren Durchmesser aufweisen, durch den Schmelzeschlauch gestochen, um die Blasluft in das Vorforminnere zu leiten. Diese Verfahrensart findet bei Bauteilen Anwendung, bei welchen lediglich kleine Öffnungen erwünscht sind. Dem Formprozess schließt sich die Bauteilkühlung an. Dabei wird über die wassergekühlten Werkzeugflächen die Wärme des Kunststoffes bis zur Formstabilität abgeleitet. Für eine zügigere Ableitung der Wärme kann zusätzlich eine interne Kühlung erfolgen. Dies wird durch eine Luftspülung des Bauteilinneren erreicht. Dabei wird gezielt die erwärmte Druckluft aus dem Bauteilinneren bei gleichzeitigem Nachströmen frischer Druckluft abgeführt. In diesem Zusammenhang ist es wichtig den Werkzeugdruck aufrecht zu erhalten, da so ein optimaler Wärmeübergang vom Kunststoff zu den Werkzeugflächen gewährleistet werden kann. Nach ausreichender Abkühlung bis zur Formstabilität des Bauteiles wird das Werkzeug entlüftet und das Bauteil entformt.

Wie erwähnt, entspricht der Verfahrensablauf unabhängig von Maschinentyp grundsätzlich dem dargestellten Schema. Zum Teil erhebliche Unterschiede sind bei der Analyse der verschiedenen Anlagen jedoch in der Umsetzung der Druckluftführung (Pneumatikschaltplan) festgestellt worden. Insbesondere die Zuführung der Druckluft in das Vorforminnere und der Mechanismus zur Entlüftung des Bauteils sind im Zusammenhang einer Zwischenspeiche-

zung und anschließender Prozessrückführung der Blasluft von Bedeutung. An den Beispielen zweier Pneumatikschaltpläne (Abbildung 3, Abbildung 4) werden im Folgenden die möglichen Unterschiede näher erläutert. Bei der in Abbildung 3 dargestellten pneumatischen Umsetzung ist das zentrale Schaltelement das Schnellentlüftungsventil (Pos. 2.6). Über diese Komponente wird dem Werkzeug sowohl die Druckluft zum Einführen des Blasdorns (Vorblasen) in den Schmelzeschlauch, zum Umformen (Blasluft) und für ein evtl. erforderliches Spülen (Spülluft) zugeführt als auch nach Beendigung der Kühlphase das Werkzeug entlüftet. Das Schalten des 5/2-Wegeventils (3.2) führt zum Vorblasen und das Ventil (2.2) nachfolgend um Umformen. Über jeweils vor den Ventilen angebrachte Druckregler können unterschiedliche Drücke der Vorblas- bzw. der Blasluft eingestellt werden. Für eine Luftspülung ist während dem weiter betätigten Ventil (2.2) zusätzlich das 3/2-Wegeventil (4.2) zu schalten. Für die Entlüftung des Werkzeugs gilt es, wiederum die Ventile (2.2) und (3.2) in Grundstellung zu schalten. Dabei wird die Zuluftleitung zum Schnellentlüftungsventil (2.6) entlüftet und das Ventil (2.6) schaltet, so dass die im Werkzeug befindliche Druckluft über den Schalldämpfer an Atmosphäre strömt.

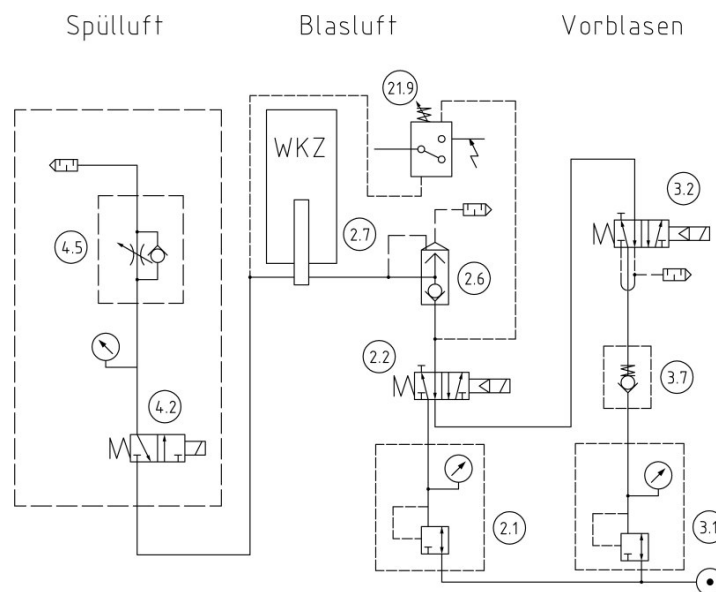


Abbildung 3: Auszug Pneumatikschaltplan Bekum BM 101D [2/1]

Die in Abbildung 4 dargestellte alternative pneumatische Umsetzung beruht auf der Verwendung von 2/2-Wegeventilen (Sperrventile) um die entsprechende Zu- und Abführung der Druckluft zu realisieren. Die Druckluftzuführung erfolgt durch Schalten des Sperrventils (Pos. 46.1), so dass Druckluft über das Proportionalmodul (44.0) direkt zum Blasdorn gelangt. Eine Luftspülung kann durch Betätigung des Ventils (48.1) zugeschaltet werden. Das

Proportionalmodul (44.0) dient zur Steuerung des gewünschten Luftdrucks in der Zuleitung, sowohl beim Vorblasen als auch für die Spülluft. Für die Entlüftung des Werkzeugs ist das Ventil (46.1) zurückzuschalten und das Ventil (45.1) zu schalten.

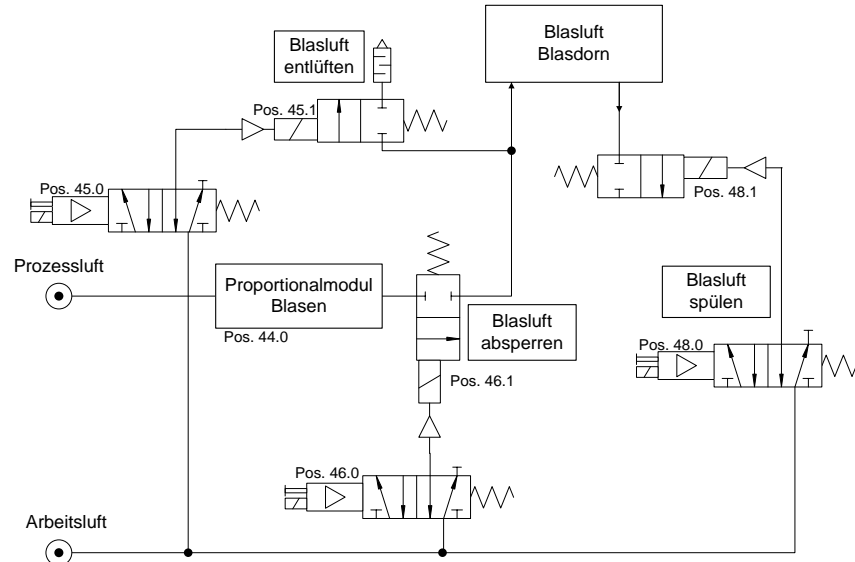


Abbildung 4: Pneumatischartplan für Blasformanlagen mit separaten Entlüftungsventil

Die dargestellten Beispiele zeigen die zwei grundsätzlich zu unterscheidenden Umsetzungsmöglichkeiten zur Druckluftführung auf. Weitere Anlagensysteme wiesen jedoch auch eine Kombination der beschriebenen Druckluftschaltpläne auf. Anhand dieser Beispiele wird deutlich, dass für einen Eingriff in das Pneumatiksystem von Blasformanlagen zur blasluftreduzierten Betriebsweise auf die jeweiligen anlagenspezifischen Gegebenheiten einzugehen ist. Dies betrifft insbesondere den steuerungstechnischen Ablauf der zu betätigenden Ventile sowie die Wahl geeigneter Schnittstellen zur Zwischenspeicherung der aus dem Werkzeug strömenden Blasluft und der Prozessrückführung dieser.

1.3 Recherche möglicher Anwender der Einsparmaßnahme

Neben der Recherche zu bereits bekannten Möglichkeiten zur druckluftreduzierten Betriebsweisen von Blasformanlagen und der Analyse bestehender Anlagensysteme wurde nach möglichen Anwendern der Einsparmaßnahme recherchiert. Bereits während des vorangegangenen Projektes (Phase I, AZ: 24398) wurden sowohl Blasformanwender als auch Maschinenhersteller durch Veröffentlichungen auf die Möglichkeit der blasluftreduzierten Betriebsweise von Blasformanlagen und die Ergebnisse der ersten Projektphase aufmerk-

sam. Als Vertreter der Blasformanwender ist die ESDA Kunststofftechnik GmbH aus Eisenberg/Thüringen zu nennen, welche sich bereits in diesem Projekt durch Bereitstellung von Anlagentechnik mit einbrachte und Interesse an der Umrüstung von Produktionsanlagen zeigte. Auch bei der Trassl-Plastik GmbH & Co. KG, welche seit Beginn der ersten Projektphase die Entwicklungsarbeiten unterstützt, wurde im Rahmen der Projekte eine Blasformanlage umgerüstet und ist damit auch im Nachgang der Entwicklungsarbeiten ein potenzieller Abnehmer und Anwender des Einsparmoduls. Während der Entwicklungsarbeiten interessierte sich der Anlagenbauer BBM Maschinenbau und Vertriebs GmbH für die erreichten Ergebnisse und es kam zur Kontaktaufnahme. Hierbei steht der Grundgedanke, neue Anlagen bereits mit einem Einsparmodul auszustatten. Folglich sind grundsätzlich alle Blasformanwender und Blasformanlagenhersteller mögliche Abnehmer bzw. Anwender des Einsparmoduls. Daher ist es im Nachgang der abschließenden Entwicklungen auch über dieses Förderprojekt hinaus eine Vermarktung der entwickelten Einsparmaßnahme anzustreben, um auf die Möglichkeit der blasluftreduzierten Betriebsweise von Extrusionsblasformanlagen hinzuweisen. Des Weiteren ist es denkbar, das Einsparmodul in das Werkzeug zu integrieren. Mit dieser Maßnahme könnten Form- und Werkzeugbauer als weitere potenzielle Anwender des Einsparmoduls gewonnen werden.

2 Analyse des Anwendungsspektrums

2.1 Analyse der Produktionstechnik

Zur Bestimmung des Anwendungsspektrums des Einsparmoduls wurde die vorhandene Produktionstechnik der Projektpartner Trassl-Plastik und ESDA Kunststofftechnik analysiert. Hauptaspekte waren dabei die Betriebsweisen der einzelnen Anlagen sowie deren Produktspektren. Ziel war es dabei eine Übersicht zu erlangen, welche Variationen durch ein einzelnes Einsparmodul beziehungsweise durch die zu entwickelnde Produktpalette an Einsparmodulen abzudecken sind, um später eine Umrüstung verschiedenster Blasformanlagen ermöglichen zu können. Über die Auswertung von Maschinendatenblättern konnten die Produktspektren der einzelnen Blasformanlagen ermittelt und zusammengefasst werden. Die Pneumatikschaltpläne erlaubten des Weiteren einen Einblick in die verschiedenen Druckluftkreisläufe der Anlagen. Darauf aufbauend waren die geeigneten Schnittstellen zur Eingliederung der notwendigen pneumatischen Komponenten des Einsparmoduls zur bestimmen. Eine Betrachtung der verschiedenen Steuerungsabläufe sowie die Ansteuerung der zu betätigenden Ventile gab Aufschluss auf die Anforderungen an die steuerungstech-

nische Eingliederung des Einsparmoduls. Die aus der Analyse der Produktionstechnik gewonnenen Erkenntnisse waren folgend zu systematisieren und katalogisieren, um später die erforderlichen Komponenten für das Einsparmodul gemäß dem Baukastenprinzip schnell auswählen zu können.

2.2 Analyse und Katalogisierung von Produktspektren verschiedener Maschinentypen

Aus den Ergebnissen der Projektphase I ging die Zielstellung hervor, die Speichergröße des künftigen Einsparmoduls variabel zu gestalten. Hintergrund war die Annahme, dass bei einem gleichgroßen Volumenverhältnis zwischen dem Fassungsvermögen des Bauteils und der Speichergröße das höchste Einsparpotenzial vorherrscht. Folglich galt es den Druckspeicher so zu gestalten, dass das Speichervolumen stets auf das zu produzierende Bauteil angepasst werden kann. Dabei war darauf zu achten, dass der variable Speicher mindestens das Volumenspektrum der Produktpalette der umzurüstenden Blasformanlage abdeckt. Für zweckmäßiger erschien es, das gesamte Bauteilspektrum des Blasformens (Bauteile von wenigen Milliliter bis hin zu 10.000 Liter) in geeignete Volumenbereiche eingeteilt werden, welche jeweils von einem variablen Speicher bedient werden. Für die Einteilung der Maschinen wurden beispielhaft die Produktpaletten von mehreren Herstellern von Extrusionsblasanlagen untersucht [3/2], [3/3], [3/4]. Die Hersteller teilen ihre Maschinen in Kleinblasanlagen (Bauteile bis 30 l Fassungsvermögen) und Großblasformanlagen für Bauteile bis 10.000 l ein. Für die weitere Betrachtung ist es jedoch zweckmäßig die Kleinblasanlagen noch einmal zu unterteilen und eine dritte Maschinengröße einzuführen.

Tabelle 1: Einteilung der Maschinengrößen (Maximalwerte) / Produktspektren

			Mini- blasanlage	Klein- blasanlage	Groß- blasanlage
Bauteilvolumen	V_{BT}	l	2	30	10.000
Ausstoßleistung (Teile je Stunde)	-	i/h	7000	720	170
max. Umformdruck / Blasdruck	p_{umf}	bar	12	12	12
Anzahl d. Stationen	-	-	2	2	1

Somit werden für die Auswahl des passenden Einsparmoduls Anlagentypen in Mini-, Klein- und Großblasformanlagen (Tabelle 1) definiert. Neben dem vom Druckspeicher abzudeckenden Volumenspektrum war für die spätere Speicherentwicklung auch der maximale Umformdruck p_{umf} von Interesse.

2.3 Auswahl geeigneter Schnittstellen

Bei der Auswahl von Schnittstellen war sowohl auf den pneumatischen als auch den steuerungstechnischen Eingriff in vorhandene Blasformanlagen zu achten.

Im Kapitel 1.2 wurden bereits verschiedene existierende Maschinensysteme zum Blasformen analysiert. Dabei wurde festgestellt, dass sich die verschiedenen Blasformanlagen im Wesentlichen bei der Umsetzung der Druckluftführung unterscheiden. Um das Einsparmodul für jedes Blasformsystem applizierbar zu gestalten, galt es geeignete Schnittstellen für die unterschiedlichen Druckluftführungen zu wählen. Für den pneumatischen Eingriff ist im Wesentlichen lediglich ein zusätzliches 3/2-Wegeventil (Einsparventil) in den Druckluftkreislauf anzubringen, welches bei der Werkzeugentlüftung zunächst die Druckluft aus dem Werkzeug in den Druckspeicher leitet und anschließend das Werkzeug restentlüftet. Des Weiteren ist für die Prozessrückführung der gespeicherten Druckluft durch das zusätzliche Ventil Druckluft vom Speicher in das Werkzeug zu führen (Vorformprozess), bevor über die vorhandenen pneumatischen Komponenten der erforderliche Werkzeugdruck aufgebracht wird. Grundsätzlich kann das erwähnte Ventil an die Entlüftungsstelle der Blasformanlage angebracht werden. Dies würde bei den betrachteten Pneumatikschaltplänen die Abluftseite des Schnellentlüftungsventils (Pos 2.6, Abbildung 3) beziehungsweise des Sperrventils (Pos. 45.1 Abbildung 4) entsprechen. Laut den Untersuchungen der Projektphase I sollte sich die Schnittstelle möglichst nah am Blasformwerkzeug befinden, um Leitungsverluste gering und damit den Einspareffekt hoch zu halten [5/1]. Sollten sich die Ventile zur Werkzeugentlüftung nicht entsprechend nah am Blasformwerkzeug installiert sein, ist neben der Applikation des Einsparventils an der Entlüftungsstelle auch ein Rohreinbau möglich, sofern der dafür erforderliche Bauraum an der Blasformanlage zur Verfügung steht. Bei der Variante des Rohreinsbaus würde die Leitung der Druckluft vom Werkzeug zum Druckspeicher und umgekehrt analog zum Einbau an der Entlüftungsstelle erfolgen, während die Restentlüftung des Werkzeugs über den herkömmlichen Entlüftungsmechanismus stattfindet.

Die erforderlichen Änderungen des Steuerungsablaufs sind über die Steuerungstechnische Eingliederung des Einsparmoduls zu realisieren. Hierfür sind Signale der Maschinensteuerung zur Betätigung der Blasluft sowie wenn vorhanden der Vorblasluft und der Spülluft zu kappen und von der Steuerung des Einsparmoduls einzulesen, welche den veränderten Steuerungsablauf regelt. Für ein sauberes und unkompliziertes Abnehmen der Maschinensignale bieten sich als Schnittstelle die Leitungsdosen der Ventile an, welche lediglich zu entfernen sind und über entsprechende Gerätestecker mit der Steuerung des Einsparmoduls verbunden werden. Da auf dem Markt verschiedene Bauformen (Abbildung 5) solcher

Ventilstecker vertrieben werden, ist bei einer Umrüstung auf die richtigen Steckertypen zu achten.

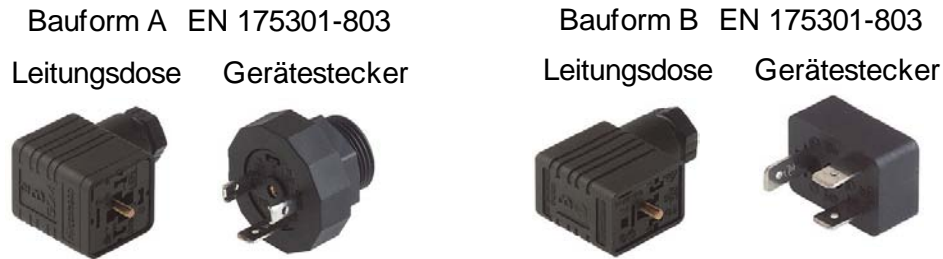


Abbildung 5: Verschiedene Bauformen von Ventilsteckern

Da die Maschinensteuerung Signale sowohl mit einer Spannung von 24 V als auch mit 230 V schalten, ist des Weiteren die Spannung der einzulesenden und der zu schaltenden Signale zu berücksichtigen und die Steuerung des Einsparmoduls mit entsprechenden Komponenten (Netzteil, Koppelrelais, etc.) auszustatten.

2.4 Präzisierung des Pflichtenheftes

Aus den durchgeführten Analysen und Betrachtungen der Anlagentechnik bestehender Blasformsysteme und den Erkenntnissen aus der vorhergehenden Projektphase können folgende Kriterien für die seriennahe Entwicklung des Einsparmoduls aufgestellt werden.

Musskriterien:

- Durch das Sparmodul ist eine Einsparung von mindestens 20% des herkömmlichen Blasluftaufwands hervorzurufen.
- Das Sparmodul ist so variabel für verschiedene Bauteilvolumina zu gestalten, dass das Produktspektrum der umzurüstenden Blasformmaschine abgedeckt wird. Diesbezüglich ist der in der Größe variable Speicher in drei verschiedenen Baugrößen zu entwickeln, damit die gewählten Volumenspektren gemäß Tabelle 1 abgedeckt werden können.
- Das Einsparmodul für Klein- und Großblasanlagen ist aufgrund der Druckluftspeichergröße zusätzlich an erhöhte Sicherheitsrichtlinien für Druckgeräte gebunden, die zu beachten sind.
- Das Einsparmodul muss durch einfache und schnelle Installationsschritte an der Blasformanlage applizierbar sein. Hierfür sind insbesondere zum Einlesen von Signalen

der Maschinensteuerung und zum Schalten der Ventile entsprechende Leitungsdosen und Gerätestecker (Abbildung 5) individuell auf die Umzurüstende Anlagentechnik abzustimmen. Des Weiteren ist eine galvanische Trennung zwischen der Maschinensteuerung und den elektronischen Komponenten des Produkts vorzusehen.

- Das Einsparmodul ist so an der Blasformanlage zu applizieren, dass alltägliche Montagearbeiten wie Werkzeugwechsel nicht erschwert werden.
- Die Leitungsquerschnitte im Einsparmodul und an der Schnittstelle zur Blasformanlage sind mindestens so groß zu gestalten wie die an der ursprünglichen Maschine vorhandenen Leitungsquerschnitte.
- Die Kosten für eine Umrüstung vorhandener Blasformanlagen müssen nach einem angemessenen Zeitraum durch die eingesparten Energiekosten amortisiert sein. Die Zielstellung des Amortisierungszeitraums liegt bei 24-36 Monaten.

Sollkriterien:

- Das Einsparmodul ist möglichst nah an das Werkzeug anzubringen, um unnötige Leitungsverluste zu vermeiden und einen möglichst hohen Einspareffekt zu erzielen. Hierzu kann die Installation des Einsparmoduls sowohl an der Entlüftungsstelle als auch als Rohreinbau erfolgen.
- Das Einsparmodul sollte einen kompakten, Platz sparenden Aufbau aufweisen, um die notwendige Stellfläche der Blasformmaschine beibehalten zu können.
- Für die Abstimmung eines Produktes für eine umzurüstende Blasformanlage sollte die Auswahl der notwendigen Komponenten nach dem Baukastenprinzip erfolgen.

3 Grundaufbau der Produktreihe eines Einsparmoduls

3.1 Produktprogramm des Einsparmoduls

Wie bereits erwähnt, ist es das Ziel der Entwicklungsarbeiten, das Einsparmodul so universell wie möglich zu gestalten, um annähernd jede Extrusionsblasformanlage bedienen zu können. Hierfür wurden die im vorherigen Kapitel beschriebenen Analysen und Untersuchungen verschiedener Produktionssysteme von Blasformanlagen durchgeführt. Das Ergebnis dieser Ausarbeitungen zeigt die grundlegenden Spezifika von Blasformanlagen auf, die durch das Produktprogramm des Einsparmoduls berücksichtigt werden müssen. Die für die Umrüstung zu betrachtenden Aspekte sind daher das Produktspektrum der Anlage bezüglich des Fassungsvermögens der Bauteile, die möglichen Schnittstellen für den pneumatischen

tischen Prozesseingriff sowie die steuerungstechnische Eingliederung. Die verschiedenen zu berücksichtigenden Variationen werden folgend zusammengefasst erläutert und können der Tabelle 2 entnommen werden.

Tabelle 2: Übersicht der anlagen-/ produktspezifischen Variationen des Einsparmoduls

	Volumenspektrum des variablen Druckspeichers	Schnittstelle	Steuerungstechnische Eingliederung
anlagen-/ produktspezifische Variation	<u>Miniblasformanlagen</u> Produktspektrum $V_{BT} \leq 2 \text{ l}$	<u>Anbau an Entlüftungsstelle:</u> bei kurzen Leitungswegen zum Blasformwerkzeug	<u>Blasluftsteuerung</u> - Einlesen des Blassignals - Ansteuern des Blasventils - Ansteuern des Einsparventils
			<u>Vorblassteuerung (wenn benötigt)</u> - Einlesen des Vorblassignals - Ansteuern des Vorblasventils
	<u>Kleinblasformanlagen</u> Produktspektrum $2 \text{ l} < V_{BT} \leq 30 \text{ l}$	<u>Rohreinbau:</u> bei langen Leitungswegen zum Blasformwerkzeug	<u>Spülluftsteuerung (wenn benötigt)</u> - Einlesen des Spülsignals - Ansteuern des Spülventils - Sperren des Spülventils bei Druckausgleich zwischen Werkzeug und Druckspeicher
<u>Großblasformanlagen</u> Produktspektrum $30 \text{ l} < V_{BT} \leq 10.000 \text{ l}$	<u>Separat geschaltetes Entlüftungsventil (Sperrventil):</u> - Einlesen des Entlüftungssignals, - Ansteuern des Entlüftungsventils		

Im Kapitel 2.2 wurde bereits die Analyse der Produktspektren verschiedener Maschinentypen behandelt und die Gesamtheit der Blasformanlagen in die Maschinengrößen Mini- (bis Bauteilgrößen von $V_{BT}=2 \text{ l}$), Klein- ($2 \text{ l} < V_{BT} < 30 \text{ l}$) und Großblasformmaschinen ($30 \text{ l} < V_{BT} < 10.000 \text{ l}$) eingeteilt. Diese Unterteilung gibt zugleich die festgelegten Volumenspektren beziehungsweise die Baugrößen der zu entwickelnden variablen Druckspeicher vor. Die Schnittstelle des pneumatischen Prozesseingriffs wurde ebenfalls bereits diskutiert (Kapitel 2.3). Dabei wurden die Möglichkeiten des Eingriffs an der Entlüftungsstelle oder als Rohreinbau betrachtet. Für die steuerungstechnische Umsetzung muss zunächst die Verfahrensweise der Anlage betrachtet werden. Wie in Kapitel 1.2 erwähnt, werden neben der für den Formgebungsprozess erforderlichen Blasluft je nach Bauteil auch die sogenannte Vorblasluft und die Spülluft zur Blasdorneinführung beziehungsweise zur Beschleunigung des Abkühlprozesses benötigt. Diese Luftströme werden durch zusätzliches Schalten der entsprechenden Ventile (vgl. Abbildung 3, Abbildung 4) gesteuert. Dies ist bei der steuerungstechnischen Eingliederung zu berücksichtigen. So ist grundsätzlich das Steuersignal der Blasluft von der Steuerung des Einsparmoduls einzulesen, welche in der Folge den entsprechenden Steuerungsablauf regelt. Dies beinhaltet sowohl das Betätigen des Einspar-

ventils zur Speicherung und Prozessrückführung der Blasluft als auch das Schalten des Blasventils. Bei Bedarf der Vorblas- bzw. der Spülluftfunktion sind diese Signale ebenfalls von der Steuerung des Einsparmoduls einzulesen und entsprechend im Steuerungsablauf durch Betätigung der jeweiligen Ventile zu verwerten. Des Weiteren ist darauf zu achten, dass bei Blasformanlagen, bei welchen ein separates Ventil zur Werkzeugentlüftung vorgesehen ist (siehe Abbildung 4), neben den genannten Steuersignalen auch das Entlüftungssignal einzulesen und zu verarbeiten ist.

3.2 Einteilung des Moduls in anwendungsspezifische Baugruppen

Für die Umsetzung des erstellten Produktprogramms aus Kapitel 3.1 war es zweckmäßig das Einsparmodul modular aufzubauen. Dies unterstreicht auch die Zielstellung, bei einer späteren Konfiguration des Einsparmoduls die Auswahl der erforderlichen Komponenten nach dem Baukastenprinzip zu ermöglichen. Das Einsparmodul wurde folglich in eine Steuerungs-, eine Ventil- und eine Druckspeichereinheit unterteilt (Abbildung 6). Jede Einheit kann getrennt nach den jeweiligen Bedürfnissen der umzurüstenden Blasformanlage ausgelegt und konfiguriert werden, bevor die Zusammenführung der einzelnen Module das Einsparmodul ergibt. So kann eine große Variabilität des Einsparmoduls bei bleibender Übersichtlichkeit erreicht werden.

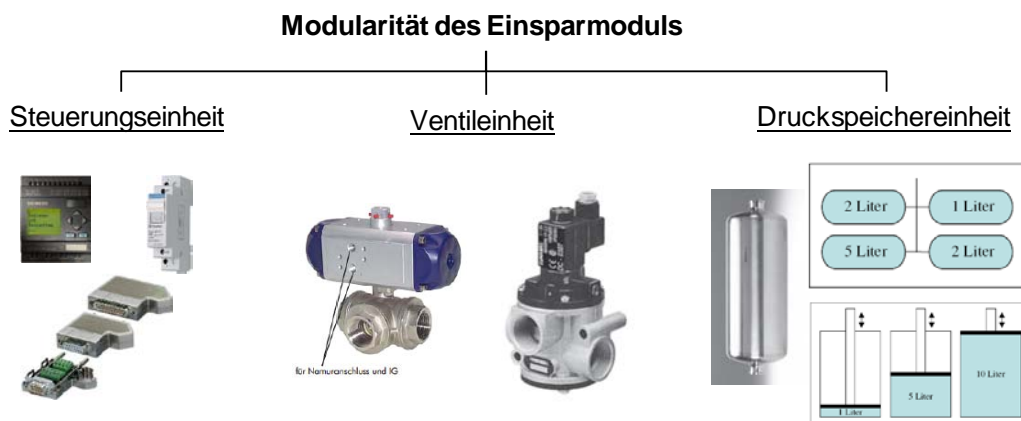


Abbildung 6: Modularer Aufbau des Einsparmoduls

Die Steuerungseinheit beinhaltet alle erforderlichen elektronischen und steuerungstechnischen Komponenten, welche in einem Klemmkasten zusammenzuführen sind. Dies umfasst sowohl die Elemente zur Regelung des erforderlichen Steuerungsablaufs (z.B. SPS, Relais,

pneumatische Logikelemente) als auch die notwendige Sensorik wie Drucksensoren oder Druckschalter. Die benötigten Steuersignale von der Maschinensteuerung, zum Betätigen von Ventilen oder Sensorsignale sind über einen Multipolstecker in beziehungsweise aus den Klemmkasten zu führen. Die Steuerungseinheit ist so auszuführen, dass alle steuerungstechnischen Belange berücksichtigt werden und nur durch geringen Aufwand auf die umzurüstende Anlage abzustimmen ist.

Die Ventileinheit besteht aus einem 3/2-Wegeventil (Einsparventil), welches den pneumatischen Prozesseingriff realisiert. Bei der Wahl des Ventils ist zu beachten, dass die Nennweite der an der Blasformanlage installierten Luftleitungen nicht unterschritten wird, um einen schnellen Luftaustausch zwischen dem Werkzeug und dem Druckspeicher zu gewährleisten. Dies ist für die Beibehaltung der Taktzeiten von wesentlichem Interesse. Darüber hinaus muss das Einsparventil zwingend bidirektionale Durchflussrichtungen aufweisen. Die Wahl der Schnittstelle (Entlüftungsstelle oder Rohreinbau) hat bei der Auswahl des Ventils keinen Einfluss.

Die Druckspeichereinheit ist entsprechend des Produktspektrums der umzurüstenden Blasformanlage zu gestalten. Hierfür wurden in den vorherigen Kapiteln drei zu entwickelnde Standardspeichergrößen für Mini-, Klein- und Großblasformanlagen festgelegt, aus welchen entsprechend des erforderlichen Volumenspektrums zu wählen ist. Dies ermöglicht eine schnelle Konfiguration des Einsparmoduls und vermeidet zusätzliche Entwicklungs- und Konstruktionsarbeiten bei der Speicherauswahl.

Nach der Konfigurierung der Einzelmodule, sind diese zum Einsparmodul zusammenzusetzen. Dabei ist in Abhängigkeit des Bauraumes an der Blasformanlage und der Lage der gewählten Entlüftungsstelle zu entscheiden, ob eine Kompaktbauweise oder eher ein dezentraler Aufbau des Einsparmoduls (Abbildung 7) geeignet ist.

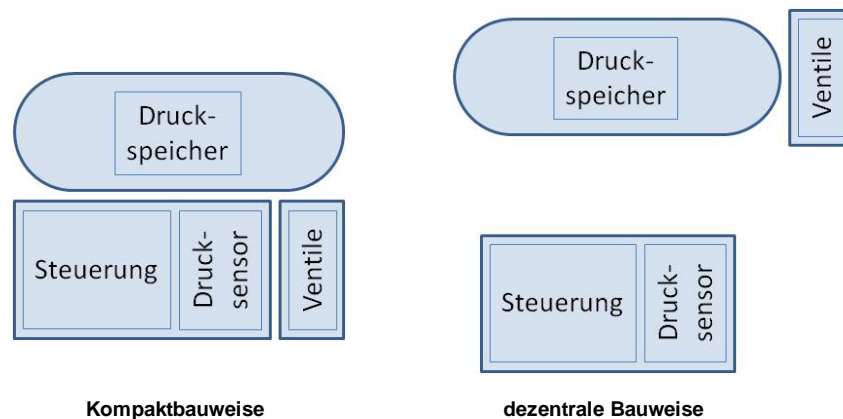


Abbildung 7: Anordnung der Moduleinheiten

In diesem Zusammenhang ist nochmals hervorzuheben, dass das Einsparmodul alltägliche Montagearbeiten wie Werkzeugumrüstungen nicht erschweren darf, die Ventileinheit möglichst nah am Blasformwerkzeug zu applizieren und dass die Steuereinheit gut zugänglich anzubringen sind. Werden diese Kriterien erfüllt, ist die Kompaktbauweise zu bevorzugen. Das für die Kompaktbauweise erforderliche Grundgestell ist so zu konzipieren, dass dieses alle Komponenten des Einsparmoduls aufnimmt und mit dem Maschinengestell der Blasformanlage verbunden werden kann.

4 Entwicklung eines variablen Druckspeichers

4.1 Erarbeitung verschiedener Lösungskonzepte

Ein Schwerpunkt dieses Projektvorhabens war die Entwicklung eines im Volumen variablen Druckspeichers. Hintergrund war die in der Projektphase I getroffene Annahme, für einen hohen Einspareffekt das Speichervolumen möglichst gleich des Fassungsvermögens der zu fertigen Bauteile zu gestalten. Da in der Regel jedoch verschieden große Bauteile auf einer Maschine gefertigt werden, ist bei Werkzeugwechseln zu Bauteilen anderer Volumina entsprechend die Speichergröße zu verändern.

Eine Recherche ergab, dass der Stand der Technik keine im Volumen veränderlichen pneumatischen Druckspeicher vorsieht. Lediglich Druckspeicher mit konstantem Volumen (Abbildung 8) werden in nahezu beliebiger Größe von unterschiedlichsten Herstellern angeboten.



Abbildung 8: handelsüblicher Druckluftspeicher mit konstantem Volumen [3/5]

Um dennoch ein variables Volumen zu realisieren, sind verschiedene Funktions- und Wirkprinzipien erarbeitet worden (Abbildung 9). Die Funktionsprinzipien können in mechanische Volumenänderungen, in Volumenänderungen durch Gegendruck und in Volumenänderungen durch Verdrängung untergliedert werden. Im Folgenden werden die Funktionsprinzipien näher erläutert und mögliche Wirkprinzipien vorgestellt.

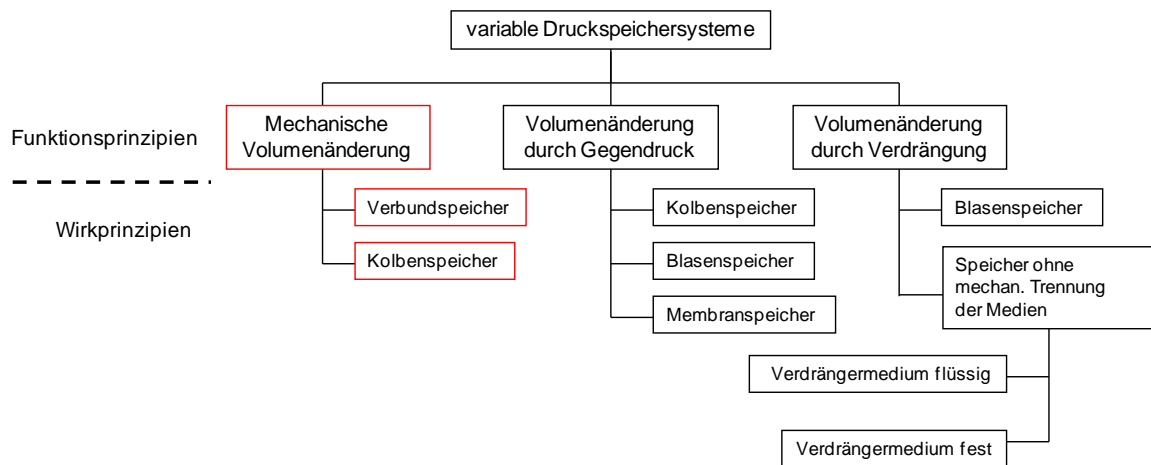


Abbildung 9: Funktions- und Wirkprinzipien variabler Druckspeicher [6/1]

Mechanische Volumenänderung

Das Funktionsprinzip dieser Volumenänderung besteht grundsätzlich in der mechanischen Begrenzung des Volumens. Die Einstellung erfolgt drucklos und ohne Nutzung weiterer Medien. Dafür sind verschiedene Wirkprinzipien möglich. So können mehrere konstante Druckluftspeicher miteinander verbunden und nach Bedarf zugeschaltet werden (Verbundspeicher). Weiterhin besteht die Möglichkeit, das Speichervolumen durch einen in einem Zylinder geführten Kolben (Kolbenspeicher) zu begrenzen, indem dieser an die gewünschte Position bewegt und fixiert wird.

Volumenänderung durch Gegendruck

Der Gegendruckspeicher beruht auf dem thermodynamischen Gesetz der idealen Gasgleichung (1). Für dieses Funktionsprinzip sind ein Speicher- und ein Gegendruckraum erforderlich, welche voneinander abgegrenzt sind. Durch Druckbeaufschlagung (Druckluft) der Gegendruckseite wird der Speicher vorgespannt. Bei Druckbeaufschlagung der Speicherseite vergrößert sich das Speichervolumen während zeitgleich das Gas in der Gegendruckseite verdichtet wird. Das endgültige Speichervolumen stellt sich zum Zeitpunkt des Druckausgleichs zwischen Speicher- und Gegendruckseite ein. Der einzustellende Gegendruck p_{GD} kann bei bekanntem maximalen Volumen der Gegendruckseite V_{GD} , dem angestrebten Speichervolumen V_{DS} und dem erwarteten Speicherdruck p_{DS} über die allgemeine Gasgleichung unter der Annahme isothermer Zustandsänderungen im geschlossenem System wie folgt berechnet werden.

$$p \cdot V = m \cdot R_{sp} \cdot T \quad (1)$$

mit $T = \text{konst.}$; $m = \text{konst.}$

$$p \cdot V = \text{konst.}$$

$$p_{DS} \cdot (V_{GD_max} - V_{DS}) = p_{GD} \cdot V_{GD_max} \quad (2)$$

$$p_{GD} = \frac{p_{DS} \cdot (V_{GD_max} - V_{DS})}{V_{GD_max}} \quad (3)$$

Für eine Umsetzung dieses Funktionsprinzips bieten sich Kolbenspeicher oder aus der Hydraulik bekannte Blasen- bzw. Membranspeicher an. Grundsätzlich ist dieses Funktionsprinzip für eine Umsetzung eher kritisch zu betrachten, da der Gegendruck exakt einzustellen ist, was für den Praxiseinsatz als ungeeignet erscheint.

Volumenänderung durch Verdrängung

Bei diesem Funktionsprinzip wird das Druckspeichervolumen V_{DS_max} mit definierten Volumen eines Verdrängermediums V_{VM} verringert, so dass sich aus der Differenz der beiden Volumina das nutzbare Speichervolumen V_{DS} ergibt.

$$V_{DS} = V_{DS_max} - V_{VM} \quad (4)$$

Als Verdrängermedium kann jedes beliebige inkompressible Medium verwendet werden, wobei ein direkter Kontakt von Flüssigkeiten zur Druckluft durch eine mechanische Trennung zu vermeiden ist (mögl. Aerosolbildung). Für die Umsetzung dieses Funktionsprinzips könnten herkömmliche Druckspeicher verwendet werden, welche durch Feststoffmedien (z.B. Stahlkugeln) gefüllt werden. Hierbei ist darauf zu achten, dass ein einfaches Befüllen und Entnehmen der Verdrängungskörper zu gewährleisten ist. Für flüssige Verdrängungsmedien bieten sich erneut Kolbenspeicher sowie Blasen- bzw. Membranspeicher an. Auch dieses Funktionsprinzip wird für die industrielle Anwendung aufgrund der aufwendigen Handhabung als unzulänglich eingestuft.

Eine nähere Betrachtung der aufgeführten Funktions- und Wirkprinzipien ergab, dass lediglich die Umsetzung des Prinzips der mechanischen Volumenänderungen durch einen Verbundspeicher beziehungsweise einen Kolbenspeicher für den industriellen Einsatz als zweckmäßig einzuschätzen ist. Demnach galt es aus diesen Wirkprinzipien Lösungskonzepte zu entwickeln, welche im Folgenden vorgestellt werden.

Verbundspeicher

Der Verbundspeicher besteht aus mehreren Druckspeichern mit konstanten Volumina, welche über einen Verteilerblock, der ebenfalls als Speicher fungieren kann, miteinander verschaltet sind (Abbildung 10).

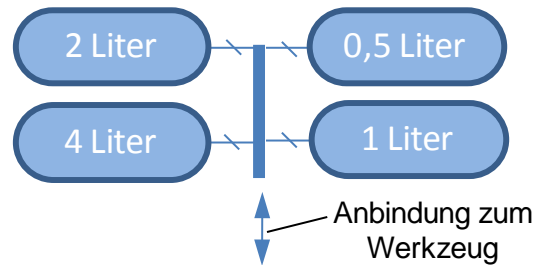


Abbildung 10: Funktionsschema Verbundspeicher

Um mit dieser Anordnung verschiedene Gesamtvolumina zu generieren, ist es nötig, jeden einzelnen Speicher von den restlichen Speichern absperrbar zu machen. So kann das Gesamtspeichervolumen auf das jeweilige zu fertigende Bauteilvolumen abgestimmt werden. Die Wahl der Speichergrößen sollte gemäß dem binären Zahlensystem erfolgen. Demnach sollte ausgehend von dem frei wählbaren kleinsten Volumen der nächst größere Speicher stets doppelt so groß sein wie des Vorgehende (z.B. 1, 2, 4, 8, ...). Durch diese Vorgehensweise kann bei der Speicherauswahl die größtmögliche Vielfalt an verschiedenen Speichergrößen erreicht werden. Es ist anzustreben, bei der Wahl der Druckspeicher auf Standardgrößen zurückzugreifen. Grundsätzlich ist es mit einem Verbundspeicher möglich, jedes beliebige Volumenspektrum abzubilden. Jedoch ist darauf zu achten, dass durch die erforderlichen Verbindungsleitungen und Sperrventile Totraumvolumen entstehen, welche insbesondere bei kleinen Volumenvariationen bereits der nötigen Änderung entsprechen und so zu ungenauen Volumeneinstellungen führen können. Dies trifft insbesondere auf das festgelegte Volumenspektrum von Miniblasformanlagen ($V_{BT} < 2 \text{ l}$) zu. Daher ist für diesen Volumenbereich ein derartiger Verbundspeicher als ungeeignet einzuschätzen. Ein weiterer Nachteil des Verbundspeichers ist die gestufte Volumeneinstellung, welche je nach Produktspektrum der umzurüstenden Blasformanlage ebenfalls zu ungenauen Einstellergebnissen führen kann. Von Vorteil wiederum ist die Möglichkeit, das Volumenspektrum ohne großen Aufwand individuell auf die Produktspektren von Blasformanlagen anpassen zu können.

Kolbenspeicher

Der Kolbenspeicher besteht aus einem Zylinder mit einem luftdicht abschließenden Kolben, der von außen betätigt wird. In der Abbildung 11 ist das Prinzip des Kolbenspeichers schematisch dargestellt. Folglich kann durch Verschieben des Kolbens jegliches Volumen zwischen null und dem maximalen Fassungsvermögen eingestellt werden. Im Beispiel der Abbildung 11 entspricht dies einem Volumenspektrum von null bis fünf Litern. Daraus geht hervor, dass das Auswahlkriterium eines solchen Speichers das maximal erforderliche Speichervolumen ist. Die Stellung des Kolbens ist an der gewünschten Position gegen axiale Verschiebung bei Druckbeaufschlagung entsprechend zu fixieren. Dies ist durch eine lösbare, starre Verbindung des Kolbens bzw. der Kolbenstange am Speichergehäuse möglich.

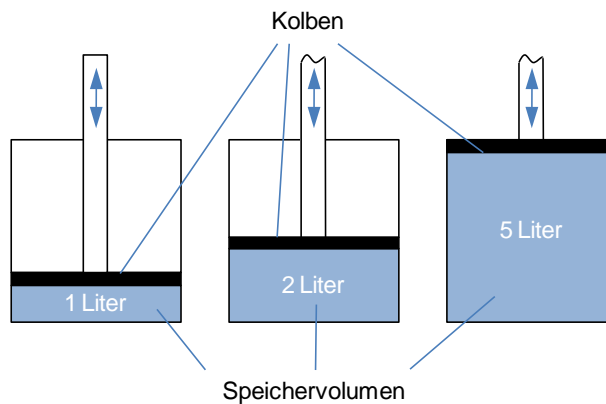


Abbildung 11: Funktionsschema Kolbenspeicher

Als nutzbare Standardkomponenten stehen aus der Pneumatik Kolbenzylinder mit und ohne Kolbenstange zur Verfügung. Aufgrund des Platzbedarfs sind bei der Auswahl kolbenstangenlose Zylinder zu bevorzugen. Des Weiteren ist darauf zu achten, dass der Pneumatikanschluss die Nennweiten der Blasformanlage nicht unterschreitet. Bei der Analyse des Produktsortiments auf dem Markt befindlicher Pneumatikzylinder wird deutlich, dass das Fassungsvermögen von Kolbenspeichern mit derartigen Standardkomponenten auf das festgelegte Volumenspektrum von Miniblasformanlagen begrenzt ist. Für größere Bauformen sind Sonderlösungen bis hin zu Eigenentwicklungen nötig.

Zusammenfassend zur Erarbeitung der Lösungskonzepte für variable Druckspeicher lässt sich feststellen, dass für die Umrüstung von Miniblasformanlagen mit Bauteilspektren bis zwei Liter Kolbenspeicher einzusetzen sind, während bei größeren abzudeckenden Volumenspektren für Klein- und Großblasformanlagen die Anwendung von Verbundspeicher zweckmäßig ist.

Um im Weiteren die gewählten Lösungsansätze konstruktiv umzusetzen, galt es die erforderliche Einstellgenauigkeit der Druckspeicher zu bestimmen beziehungsweise den Einfluss von Abweichungen des angestrebten Speichervolumens auf den Einspareffekt zu untersuchen.

4.2 Auswirkungen bei Abweichungen des angestrebten Speichervolumens

Zur Bestimmung der Auswirkungen von Abweichungen des angestrebten Speichervolumens sind die sich einstellenden Vorformdrücke bei der Prozessrückführung der zwischengespeicherten Blasluft zu berechnen. Dabei galt es bei gleichbleibendem Bauteilvolumen das Volumen des Druckspeichers zu variieren. Die Abbildung 12 stellt den in der Projektphase I entwickelten veränderten Verfahrensablauf mit den für die Berechnungen erforderlichen Parametern dar.

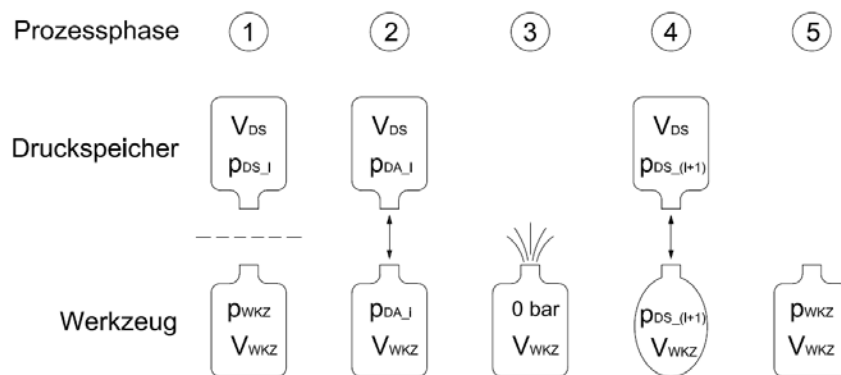


Abbildung 12: Verfahrensablauf der blasluftreduzierten Betriebsweise

In Phase 1 ist das Bauteil im Werkzeug mit dem Blasdruck p_{WKZ} fertig aufgeblasen während im Druckspeicher der Speicherdruck $p_{DS_{(i)}}$ vorherrscht. Die Volumina sind mit V_{WKZ} im Bauteil und V_{DS} im Druckluftspeicher definiert. Nach Erreichen der nötigen Formstabilität des Bauteils, wird in Phase 2 das Werkzeug gegen den Druckspeicher bis zur Druckgleichheit entlüftet. Zur Bestimmung des Ausgleichdrucks $p_{DA_{(i)}}$ sowie bei den nachfolgenden Berechnungen wurden die Annahmen des idealen Gasverhalten und isothermer Zustandsänderungen ($T = \text{konst.}$) der Druckluft getroffen. Der Ausgleichsdruck ergibt sich demnach aus der Gleichung (5).

$$p_{DA_{(i)}} \cdot (V_{WKZ} + V_{DS}) = p_{WKZ} \cdot V_{WKZ} + p_{DS_{(i)}} \cdot V_{DS}$$

$$p_{DA_{(i)}} = \frac{p_{WKZ} \cdot V_{WKZ} + p_{DS_{(i)}} \cdot V_{DS}}{V_{WKZ} + V_{DS}} \quad (5)$$

Anschließend wird in Phase 3 das Werkzeug an die Atmosphäre restentlüftet ($p_{WKZ} = 0$ bar). Danach wird das Bauteil entformt und dem Werkzeug über den Extruder ein neuer Vorformling zur Verfügung gestellt. In Phase 4 erfolgt durch einen erneuten Druckausgleich zwischen Werkzeug und Druckspeicher die Prozessrückführung der Blasluft, was zum Vorformprozess der Vorform führt. Für die Berechnungen wird zu diesem Zeitpunkt bereits von einer nahezu vollständigen Ausformung bis zum Bauteilvolumen V_{WKZ} ausgegangen. Der erreichte Vorformdruck $p_{DS_{(i+1)}}$ ergibt sich über die Gleichung (6).

$$p_{DS_{(i+1)}} = \frac{p_{DA_i} \cdot V_{DS}}{V_{WKZ} + V_{DS}} \quad (6)$$

In der abschließenden Prozessphase 5 wird der Werkzeugdruck durch die Druckluftquelle bis auf den nötigen Umformdruck p_{WKZ} erhöht und das Bauteil vollständig ausgeformt. Zu Beginn des nächsten Zyklus steht demzufolge der Druckspeicher unter dem Druck $p_{DS_{(i+1)}}$ und das Werkzeug unter dem Umformdruck p_{WKZ} .

Der sich beim Vorformprozess (Phase 4) einstellende Druck p_{DS_i} ist ein Maß für die Höhe der Blaslufteinsparung. Die prozentuale Einsparung $S_{\%}$ ergibt sich über die Gleichung (7).

$$S_{\%_i} = \frac{p_{DS_i}}{p_{WKZ}} \cdot 100\% \quad (7)$$

Der Einfluss verschiedener Speichergrößen auf den Einspareffekt wurde anhand folgender Parameter untersucht:

- Bauteilvolumen $V_{WKZ} = 2$ l
- Blasdruck $p_{WKZ} = 8$ bar
- Ausgangsdruck im Druckluftspeicher $p_{DS_{(1)}} = 0$ bar
- Betrachtete Speichergrößen : 1 Liter, 2 Liter, 4 Liter

Zu Beginn des ersten Zyklus ($i = 1$) befindet sich der Druckspeicher im drucklosen Zustand. Dies hat zur Folge, dass sich entsprechend der Gleichungen (5) und (6) der Vorformdruck p_{DS_i} zunächst von Zyklus zu Zyklus erhöht und sich an einen Sättigungspunkt annähert. Daher wurden für jede Speichergröße zehn Zyklen durchgerechnet und der Vorformdruck

$p_{DS_{10}}$ und die sich daraus ergebende prozentuale Einsparung bestimmt sowie zu einer tabellarischen Übersicht zusammengefasst (Tabelle 3).

Tabelle 3: Vorformdruck, Einsparpotenzial bei verschiedenen Speichergrößen

Blasdruck $p_{WKZ} = 8$ bar, Bauteilvolumen $V_{WKZ} = 2$ l, Speicherdruck im ersten Zyklus $p_{DS_1} = 0$ bar			
	Druckspeichervolumen $V_{DS} = 1$ l	Druckspeichervolumen $V_{DS} = 2$ l	Druckspeichervolumen $V_{DS} = 4$ l
Vorformdruck $p_{DS_{10}}$ im 10. Zyklus	2 bar	2,67 bar	3,2 bar
Einsparpotenzial $S_{\%_{10}}$ im 10. Zyklus	25%	33,33%	39,97%

Aus den Berechnungen geht hervor, dass nicht wie bisher angenommen der höchste Einspareffekt bei einem Druckspeichervolumen gleich des Fassungsvermögens der Bauteile vorliegt. Vielmehr wurde aufgezeigt, dass mit einem größeren Druckspeicher ein größerer Anteil der Blasluft dem Prozess zurückgeführt werden kann. Folglich ist das Bestreben der Entwicklung von Druckspeichern, welche möglichst exakt auf das Bauteilvolumen eingestellt werden können als nicht zweckmäßig zu betrachten. Sattdessen gilt es, diese Erkenntnis durch weitere Untersuchungen zu bestätigen. Dabei ist der Einfluss der Speichergröße im Verhältnis zum Bauteilvolumen durch Gesetzmäßigkeiten herzuleiten sowie mögliche Grenzen des Einsparpotenzials aufzuzeigen. Darüber hinaus ist zu prüfen, inwiefern optimale Druckspeichergrößen bei bestimmten Anwendungsfällen definiert werden können.

4.3 Gesetzmäßigkeiten zum Einfluss der Speichergröße auf den Einspareffekt

Die Ergebnisse der vorhergehenden Betrachtungen lassen darauf schließen, dass weniger die Speichergröße allein, sondern das Verhältnis zwischen dem Speichervolumen und dem Fassungsvermögen des Bauteils das Einsparpotenzial beeinflusst. Entsprechend wird für die folgenden Berechnungen das Volumenverhältnis k eingeführt (Gleichung 8).

$$k = \frac{V_{DS}}{V_{WKZ}} \quad \text{mit } k \geq 1 \quad (8)$$

Für die Berechnung des Vorformdrucks p_{DS_i} ergibt sich durch Einsetzen der Gleichungen (5) und (8) in Gleichung (6) die folgende Gesetzmäßigkeit.

$$p_{DS_i} = \frac{p_{WKZ} \cdot k + p_{DS_ (i-1)} \cdot k^2}{(1+k)^2} \quad (9)$$

Zusammen mit der Gleichung (7) folgt die prozentuale Einsparung $S_{\%_i}$ des jeweiligen Zyklus i .

$$S_{\%_i} = \frac{p_{WKZ} \cdot k + p_{DS_ (i-1)} \cdot k^2}{p_{WKZ} \cdot (1+k)^2} \cdot 100\% \quad (10)$$

Mit Hilfe der aufgeführten Gesetzmäßigkeiten wurde der Einfluss des Volumenverhältnisses untersucht. Wie in den vorangegangenen Berechnungen wurde der Blasdruck mit $p_{WKZ} = 8$ bar und der Ausgangsdruck des Druckspeichers mit $p_{DS_0} = 0$ bar festgelegt. Es wurden die sich bei den Volumenverhältnissen $k = 1; 2; 10; 100; 1000$ über 1000 Zyklen einstellenden Vorformdrücke und die daraus ableitbaren Einsparpotenziale berechnet und ausgewertet.

Tabelle 4: Vorformdrücke / Einsparpotenziale verschiedener Volumenverhältnisse nach 1000 Zyklen

Blasdruck $p_{WKZ} = 8$ bar, Anfangsdruck Speicher $p_{DS_0} = 0$ bar, betrachtete Zyklenanzahl $n = 1000$							
Volumenverhältnis	k	-	1	2	10	100	1000
maximaler Vorformdruck	p_{DS_max}	bar	2,67	3,20	3,81	3,98	3,46
maximales Einsparpotenzial	$S_{\%_max}$	%	33,33	40,00	47,62	49,75	43,19
Gesamteinsparpotenzial	$S_{\%_ges}$	%	33,29	39,93	47,34	47,23	28,34

Die in der Tabelle 4 aufgeführten Werte bestätigen die Vermutung, bei höheren Volumenverhältnissen entsprechend höhere Einspareffekte zu erzielen. Während bei dem bisher angestrebten Volumenverhältnis $k = 1$ laut den Berechnungen der Blasluftesatz um 33,33% reduziert werden kann, weisen die Volumenverhältnisse $k = 2; 10; 100$ deutlich höhere Vorformdrücke und Einsparpotenziale auf. Bei dem Volumenverhältnis $k = 1000$ ist auffällig, dass das Einsparpotenzial nicht wie erwartet höher ist als bei $k = 10; 100$. Dies ist auf die Gegebenheit zurückzuführen, dass sich der Druck des Druckspeichers bei jedem weiteren Zyklus bis zur Drucksättigung erhöht. Je nach Volumenverhältnis ist die Anzahl der Zyklen bis zur annähernden Sättigung verschieden. Die in der Abbildung 13 dargestellten Verläufe des Einsparpotenzials beziehungsweise des Vorformdrucks verdeutlichen dieses Verhalten. So erreichen die Kurven der kleineren Volumenverhältnisse ($k = 1; 2$) bereits nach wenigen Zyklen den Bereich der Sättigung, während beim Volumenverhältnis $k = 1000$

selbst nach $i = 1000$ Zyklen keine Sättigung eintritt, was sich durch eine geringer ausfallenden Einsparung als erwartet widerspiegelt.

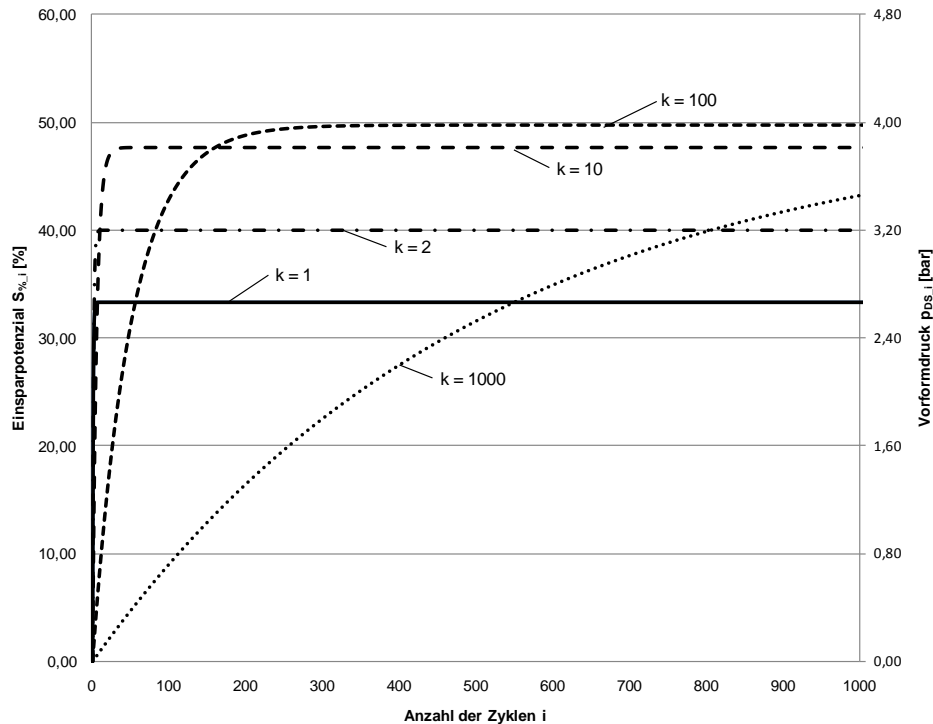


Abbildung 13: Einfluss des Volumenverhältnisses k auf Einsparpotenzial und Vorformdruck [6/1]

Neben dem maximalen Einsparpotenzial $S_{\%_i}$ des einzelnen Zyklus wurde in Tabelle 4 auch das Gesamteinsparpotenzial $S_{\%_{ges}}$ aufgeführt, welches die Summe der über alle Zyklen eingesparten Blasluft im Vergleich zur herkömmlichen Verfahrensweise angibt. Daraus wird ersichtlich, dass sich der Vorteil größerer Volumenverhältnisse erst nach Erreichen des maximalen Vorformdrucks einstellt. Der Vergleich der berechneten Werte der Volumenverhältnisse $k = 10$ und $k = 100$ verdeutlicht diesen Sachverhalt. Während beim Verhältnis $k = 100$ nach $i = 1000$ Zyklen der Vorformdruck bereits einen höheren Wert aufweist als bei $k = 10$, verhält sich das Gesamteinsparpotenzial umgekehrt. Dies ist auf die in den ersten Zyklen geringere Einsparung bei größeren Volumenverhältnissen zurückzuführen, was erst nach entsprechender Anzahl durchlaufener Prozesszyklen mit maximalem Vorformdrücken ausgeglichen wird. Dementsprechend fließt bei der Auswahl der idealen Druckspeichergröße nunmehr nicht nur das Volumenverhältnis zwischen Druckspeicher und dem zu fertigenden Bauteil sondern auch die Anzahl der Prozesszyklen mit ein.

Im Folgenden gilt es, für die Auswahl geeigneter Druckspeichergrößen allgemeingültige Gesetzmäßigkeiten zu entwickeln, aus welchen das maximal mögliche Einsparpotenzial in Abhängigkeit des Volumenverhältnis und der Anzahl der Prozesszyklen beschrieben wird.

Hierfür wurde zunächst der Grenzwert des theoretisch erreichbaren Einsparpotenzials eines einzelnen Zyklus ermittelt. Als Grundlage der Berechnungen wird die Gleichung (9) herangezogen, welche die Parameter k (Volumenverhältnis Druckspeichervolumen zu Bauteilvolumen) den erforderlichen Werkzeugdruck p_{WKZ} und den Druckspeicherdruck p_{DS_i} zum Zeitpunkt des Vorformprozesses im i -ten Zyklus beinhaltet. Für eine dimensionslose Form der Gleichung (9) wird zusätzlich das Druckverhältnis x_i (Gleichung 11) aus dem Werkzeugdruck p_{WKZ} und dem Vorformdruck p_{DS_i} eingeführt.

$$x_i = \frac{p_{DS_i}}{p_{WKZ}} \quad (11)$$

Die Gleichung (11) in die Gleichung (9) eingesetzt ergibt die folgende Funktion.

$$x_i = f(x_{(i-1)}) = \frac{k + x_{(i-1)} \cdot k^2}{(1+k)^2} \quad (12)$$

Die erste Ableitung der Funktion $f(x_{(i-1)})$ beschreibt das Verhalten als streng monoton wachsend, d.h. das Druckverhältnis steigt mit jedem weiteren Zyklus.

$$f'(x_{(i-1)}) = \left(\frac{k}{1+k} \right)^2 > 0 \quad \text{für } k \geq 1 \quad (13)$$

Dementsprechend ist das maximale Druckverhältnis, was zugleich ein Maß für das Einsparpotenzial darstellt, im Grenzwert bei $i \rightarrow \infty$ zu erwarten.

$$\lim_{i \rightarrow \infty} x_i = x_{\max} = f(x_{\max}) \quad (14)$$

(14) in Gleichung (12) eingesetzt und umgestellt

$$x_{\max} = f(k) = \frac{k}{1+2k} \quad (15)$$

Aus der Gleichung (15) ergibt sich, dass das maximale Druckverhältnis und damit das maximale Einsparpotenzial lediglich eine Abhängigkeit zum Volumenverhältnis aufweisen. Die Betrachtung des Verhaltens der Funktion $f(k)$ über die erste Ableitung $f'(k)$ zeigt erneut ein strengt monotones wachsendes Verhalten, was zur Schlussfolgerung führt, dass sich das maximale Druckverhältnis im Grenzwert $k \rightarrow \infty$ einstellt.

$$\lim_{k \rightarrow \infty} f(k) = \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{k}{1+2k} = \frac{1}{2} = x_{\max} \quad (16)$$

Daraus ergeben sich mit der Gleichung (11) der maximal erreichbare Vorformdruck p_{DS_max} und mit der Gleichung (7) das maximal mögliche Einsparpotenzial $S_{\%_max}$.

$$p_{DS_max} = x_{\max} \cdot p_{WKZ} = \frac{p_{WKZ}}{2} \quad (17)$$

$$S_{\%_max} = x_{\max} \cdot 100\% = 50\% \quad (18)$$

Aus der Gleichung (18) geht hervor, dass der theoretisch maximal erreichbare Einspareffekt bei einer Reduzierung des Blasluftaufwands um 50% liegt.

Die Berechnungen ergaben, dass größere Druckspeicher einen entsprechend höheren Einspareffekt hervorrufen. Aus den vorhergehenden Betrachtungen wurde jedoch deutlich, dass sich bei größeren Volumenverhältnissen der maximal mögliche Einspareffekt sich erst nach einer entsprechend großen Anzahl an durchlaufenen Prozesszyklen einstellt (vgl. Abbildung 13). Dies hat wiederum Einfluss auf das Gesamteinsparpotenzial, was folgend betrachtet wird.

Ausgehend von der Gleichung (12) kann eine geometrische Reihe entwickelt und in eine explizite Form (19) überführt werden, mit welcher es möglich ist, das jeweilige Druckverhältnis x_i bei einem beliebigen Zyklus i direkt zu berechnen. Über das Druckverhältnis x_i wiederum ergibt sich mit Gleichung (20) das im i -ten Zyklus erreichbare prozentuale Einsparpotenzial $S_{\%_i}$.

$$x_i = a \sum_{j=1}^{i-2} b^j = a \frac{1-b^{(i-1)}}{1-b} \quad (19)$$

$$\text{mit } a = \frac{k}{(1+k)^2} ; b = \left(\frac{k}{1+k} \right)^2 ; i, j \in \mathbb{N}$$

$$S_{\%_i} = x_i \cdot 100\% = a \frac{1-b^{(i-1)}}{1-b} \cdot 100\% \quad (20)$$

Das Gesamteinsparpotenzial $S_{\%_ges}$ ergibt sich aus dem Mittelwert aller Einzeleinsparpotenziale $S_{\%_i}$ über alle Zyklen n mit der Gleichung (21).

$$S_{\%_ges} = \frac{a}{n} \sum_{i=2}^n \left(\sum_{j=1}^{i-2} b^j \right) \cdot 100\% \quad \text{mit } n \in \mathbb{N} \quad (21)$$

In Abbildung 14 sind die Verläufe des Gesamteinsparpotenzials verschiedener Volumenverhältnisse über die Anzahl der Zyklen dargestellt. Darin wird deutlich, dass sich der Vorteil einer höheren Gesamteinsparung bei großen Volumenverhältnissen erst nach einer zum Teil sehr hohen Zyklusanzahl einstellt. Am Beispiel des Volumenverhältnis $k = 100$ wird die Notwendigkeit der Betrachtung des Gesamteinsparpotenzials deutlich. Während in Abbildung 13 im Vergleich zum Volumenverhältnis $k = 10$ das Verhältnis $k = 100$ bereits nach ca. 150 Zyklen ein höheres Einsparpotenzial des einzelnen Zyklus aufweist, zeigt die Abbildung 14 auf, dass des Gesamteinsparpotenzials erst ab dem 1000-sten Zyklus den Wert des Volumenverhältnisses $k = 10$ übersteigt.

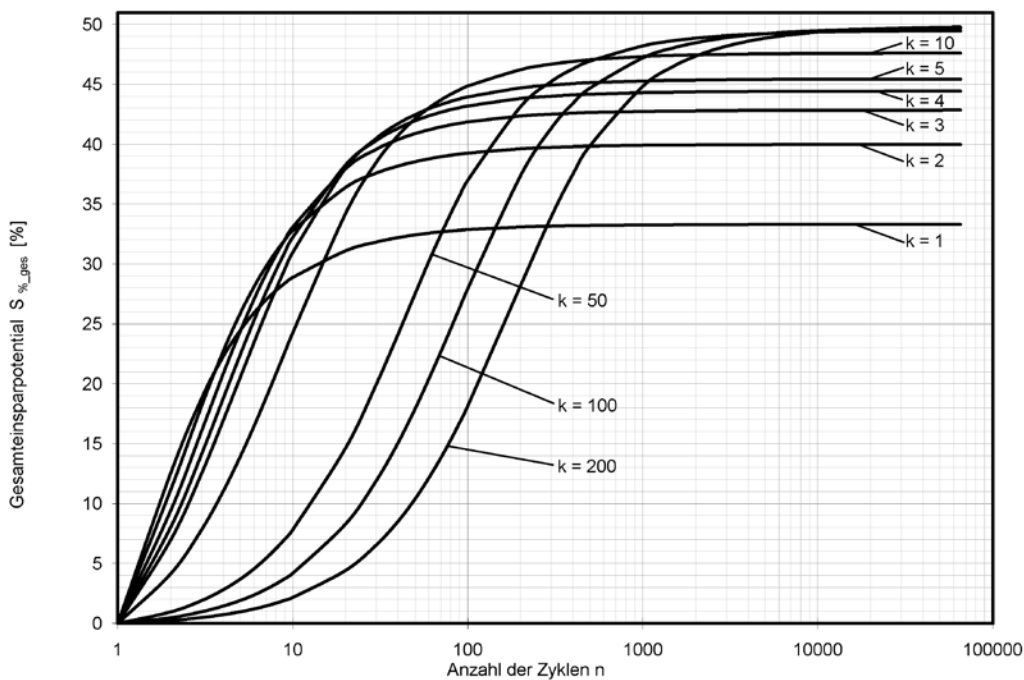


Abbildung 14: Gesamteinsparpotenzial über Anzahl der Zyklen verschiedener Volumenverhältnisse [6/1]

Aus den Untersuchungen zum Einfluss der Speichergröße und der Anzahl der Prozesszyklen auf den erreichbaren Einspareffekt wird deutlich, dass größere Volumenverhältnisse grundsätzlich höhere Einsparpotenziale aufweisen, diese jedoch erst ab einer entsprechenden Mindestanzahl an Prozesszyklen zum Tragen kommen. Folglich ist bei der Auswahl geeigneter Speichergrößen gemäß der Abbildung 14 über die Anzahl der herzustellenden Bauteile je Produktionsauftrag ein geeignetes Volumenverhältnis zu wählen.

Im Folgenden waren die theoretischen Gesetzmäßigkeiten anhand von labortechnischen Untersuchungen zu bestätigen.

4.4 Labortechnische Untersuchungen zum Einfluss des Speichervolumens auf den Einspareffekt

Die mathematisch hergeleiteten Erkenntnisse zum Einfluss der Speichergröße auf das Einsparpotenzial waren anhand von labortechnischen Versuchen zu verifizieren. Hierfür wurden stellvertretend die Volumenverhältnisse $k = 1; 2,5; 5; 50$ an dem in der Projektphase I aufgebauten Versuchsstand appliziert und durch Messreihen mit den idealisierten Berechnungen verglichen. Der Versuchstand stellt einen vereinfachten pneumatischen Aufbau einer Blasformanlage mit den wesentlichen Bauteilen wie das Blasventil, ein entsprechendes Entlüftungselement sowie das Werkzeug in Form eines Speichers dar. Mittels einer SPS wurde sowohl der herkömmliche als auch der veränderte Verfahrensablauf nachgebildet. Der jeweilige Druckspeicher ist mit dem erforderlichen zusätzlichen 3/2-Wegeventil (VSpar) direkt an die Entlüftungsstelle angeschlossen worden, um die Leitungsverluste gering zu halten. Über Drucksensoren wurden die Druckausgleiche zum Zwischenspeichern und zur Rückführung der Blasluft detektiert sowie die Druckverläufe von Werkzeug und Druckspeicher messtechnisch erfasst. Über die zum Zeitpunkt des Druckausgleiches zur Prozessrückführung der zwischengespeicherten Druckluft erfassten Drücke konnte mit dem maximalen Druck des Werkzeugs das Druckverhältnis $x_{(i)}$ und somit die Einsparpotenziale $S_{\%_i}$ für jeden Zyklus sowie die Gesamteinsparpotenziale $S_{\%_{ges}}$ ermittelt werden. In Abbildung 15 ist der Vergleich zwischen den berechneten und labortechnisch ermittelten Gesamteinsparpotenzialen für die untersuchten Volumenverhältnisse graphisch dargestellt.

Grundsätzlich lässt sich im Vergleich zu den Berechnungen die gleiche Grundtendenz zum Einfluss der Speichergröße auf das Einsparpotenzial feststellen, so dass ein höheres Volumenverhältnis nach entsprechender Anzahl an Prozesszyklen eine höhere Einsparung hervorruft. Auffällig ist jedoch die deutliche Abweichung zwischen den labortechnisch erreichten und den berechneten der Einsparungen. Dies ist im Wesentlichen auf die idealisierten Berechnungen und den steuerungstechnischen Gegebenheiten bei den Druckausgleichen zurückzuführen. Die aufgeführten Berechnungen basieren auf idealen Annahmen wie isotherme Zustandsänderungen bei den Druckausgleichen. Tatsächlich treten aber durch die Kompressions- und Expansionsvorgängen bei den Druckausgleichen zum Teil erhebliche Temperaturschwankungen auf, welche zu Druckverlusten führen. Darüber hinaus entsprechen die Leistungsverluste und Leckagen beim Schalten des zusätzlich angebrachten 3/2-Wegeventil (VSpar) nicht der Annahme eines geschlossenen Systems. Eine weitere Ursache der Unterschiede ist die steuerungstechnische Erkennung des Druckausgleichs. Dies geschieht durch den Vergleich der Analogsignale der Drucksensoren. Um schnell und vor

allem sicher den Druckausgleich festzustellen, wird dem Analogkomparator ein Schwellwert zugewiesen, welcher einer Druckdifferenz von $\Delta p = 0,1$ bar entspricht. Dies hat zur Folge, dass bei der Werkzeugentlüftung nicht das höchstmögliche Druckniveau im Druckspeicher erreicht wird. Im Umkehrschluss kann bei der Rückführung der Druckluft ebenfalls nicht der optimale Vorformdruck im Werkzeug aufgebaut werden.

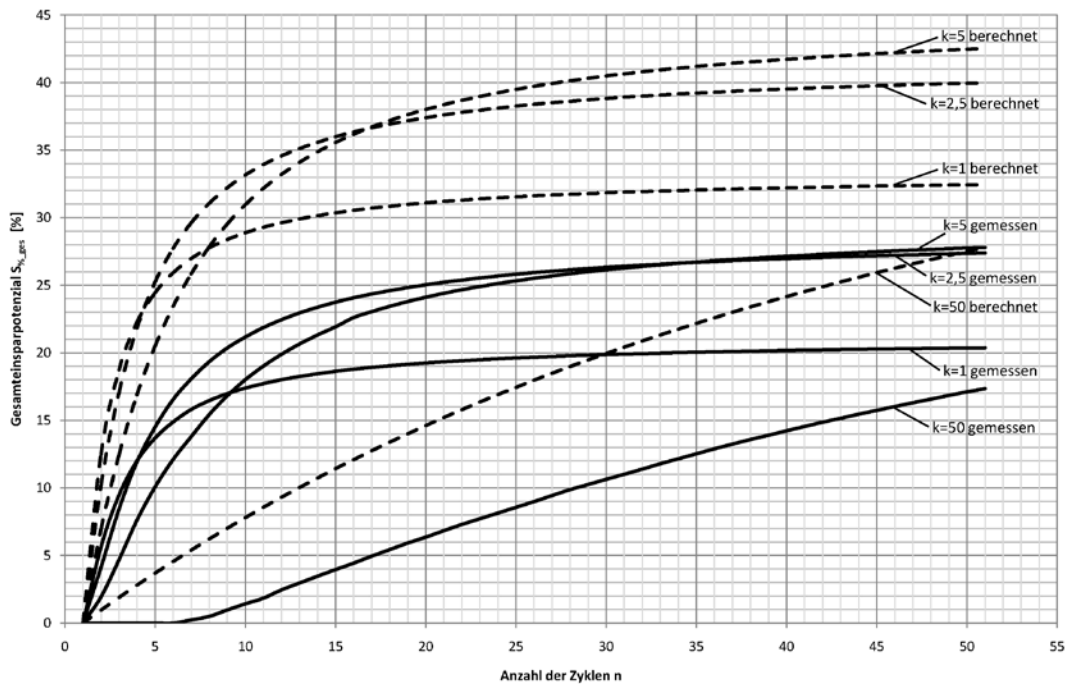


Abbildung 15: Vergleich berechneter und labortechnisch erfasster Gesamteinsparpotenziale

Die aufgezeigten Ergebnisse beziehen sich auf das Gesamteinsparpotenzial E_{gesamt} als Summe der durchschnittlich erzielten Einsparpotenziale $E_{(i)}$. Dies macht deutlich, dass ein größeres Volumenverhältnis lediglich bei einer entsprechend höheren Anzahl an Prozesszyklen zweckmäßig ist. Die labortechnischen Untersuchungen ergaben, dass sich das Gesamteinsparpotenzial stets an das maximal mögliche Einsparpotenzial je Zyklus nach Erreichen des Sättigungspunkts annähert. Die maximalen Einsparpotenziale $S_{\%_i}$ bei den jeweiligen Volumenverhältnissen wurden bei den Labortests mit 21,1% bei $k=1$, 28,9% bei $k=2,5$, 34,5% bei $k=5$ und 39,5% bei $k=50$ ermittelt. Diese Werte spiegeln somit das maximal erreichbare Gesamteinsparpotenzial $S_{\%_{\text{ges}}}$ wider. Aus den labortechnischen Versuchen geht hervor, dass die tatsächlich erreichbaren Einsparpotenziale bei ca. 75% der theoretisch hergeleiteten Werte zu erwarten sind.

5 Entwicklung eines geeigneten Steuerungsablauf

5.1 Erarbeitung verschiedener Steuerungskonzepte

Für die Umsetzung der entwickelten Einsparmaßnahme in vorhandene Anlagensysteme bedarf es einer steuerungstechnischen Eingliederung. In der Projektphase I wurde dazu eine Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) als Kernstück der Steuereinheit eingesetzt, durch welche erforderliche Signale der Maschinensteuerung eingelesen und der entwickelte Verfahrensablauf gesteuert wurde. Neben der SPS fanden zwei Drucksensoren Einsatz, welche die Drücke im Werkzeug und im Druckspeicher aufnahmen und die entsprechenden Analogsignale der SPS zur Verfügung stellten. Mit Hilfe dieser Drucksignale konnten die Druckausgleiche sowie erforderliche Druckgrenzen (z.B. beim Vorblasen) über die SPS ermittelt werden. Kritisch war bei dieser steuerungstechnischen Umsetzung der Kostenaspekt der erforderlichen Komponenten. So galt es in diesem Projektvorhaben alternative, kostengünstigere Steuerungskonzepte zu entwickeln. Die grundlegenden erforderlichen Eigenschaften der Steuerungskonzepte sind gemäß dem Verfahrensablauf entsprechende pneumatische Ventile betätigen sowie Druckausgleiche und Druckgrenzwerte detektieren zu können. Diesen Anforderungen genügen sowohl pneumatische als auch elektrische Steuerungen. Zuletzt genannte können weiter in Hardware- und Speicherprogrammierbare Steuerungen untergliedert werden.

Pneumatische Steuerungen bedienen sich vorrangig an pneumatischen Logik-Elementen (UND, ODER) um mit Hilfe von Steuerluftleitungen entsprechende Ventile zu schalten. Die Detektion von Druckausgleichen ist durch das UND-Element ausreichend genau umsetzbar.

Bei einer *Hardwaresteuerung* finden Relais unterschiedlicher Bauart Anwendung, welche starr mit einander verschaltet sind. Relais sind Schaltorgane, die mit geringer Steuerleistung relativ hohe Arbeitsleistungen schalten können. Dabei dienen die Steuersignale der Maschinensteuerung zur Ansteuerung der Relais, welche wiederum zur Betätigung von Ventilen verwendet werden können. Anstelle kostenintensiver Drucksensoren ist der Einsatz von Zeitrelais vorstellbar, welche auf die notwendige Dauer des Druckausgleichs eingestellt sind und somit nach abgeschlossenem Druckausgleich zwischen Werkzeug und Druckluftspeicher durch ein Steuersignal den Prozess fortführen.

Mit einer *Speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS)* sind Steuerungsabläufe durch Anwenderprogramme in Form von Anweisungslisten, Kontaktplänen oder Logikplänen umsetzbar. Über analoge und digitale Eingänge kann eine SPS Prozesssignale (z.B. Drucksignale, Steuersignale) verarbeiten. Über die Signalausgänge können zum Beispiel pneumati-

sche Ventile betätigt werden. Die Druckausgleiche können wie bei der Hardwaresteuerung über Zeitglieder oder durch Verarbeitung von analogen Signalen von Drucksensoren verarbeitet werden.

5.2 Gegenüberstellung und Vergleich der Lösungskonzepte

Im vorherigen Kapitel wurden mögliche Steuerungsarten zur Eingliederung des Einsparmoduls vorgestellt und hinsichtlich der Umsetzung der grundsätzlichen Anforderungen zum Schalten von pneumatischen Ventilen und die Erkennung beziehungsweise die Steuerung der Druckausgleiche betrachtet.

Eine Gegenüberstellung der Steuerprinzipien zur Anwendbarkeit bei der Umrüstung bestehender Blasformanlagen und den damit erforderlichen prozess- und anlagentechnischen Eingriffen ergab, dass die alle Steuerkonzepte durchaus funktionell umsetzbar sind. Jedoch zeigte die pneumatische Steuerung über Logikelemente und Steuerluftleitungen bei der steuerungstechnischen Umsetzung am Beispiel der Referenzmaschine Bekum BM 101D einen enormen Eingriff in den vorhandenen Pneumatikschaltplan (Anlage 2) auf, was in diesem Maße in der Praxis nicht durchführbar ist. So sind sämtliche betroffene elektromechanisch betätigte Ventile durch pneumatisch betätigte Ventile zu ersetzen sowie die bestehende Verschlauchung/Verrohrung zu entfernen und nach der veränderten Druckluftführung neu aufzubauen. Daher wird der Lösungsansatz der pneumatischen Steuerung als nicht zweckmäßig eingeschätzt und im Folgenden nicht weiter betrachtet.

Die Prinzipie der elektronischen Steuerung weisen hingegen nur geringe Eingriffe auf. Hierbei sind lediglich Signale der Maschinensteuerung von den betreffenden Ventilen zu Kapfen und von der Steuerung einzulesen sowie die herkömmlichen und zusätzlich angebrachten Ventile gemäß dem veränderten Steuerungsablauf zu betätigen. Dies ist im Allgemeinen durch Verlegung elektrischer Steuerleitungen mit geringem Montageaufwand durchführbar. Die Möglichkeit die Druckausgleiche über Zeitglieder zu realisieren war in der labortechnischen Umsetzung mit kleintechnischen Versuchen zu überprüfen.

5.3 Umsetzung ausgewählter Steuerungskonzepte – Kleintechnische Versuche

Die Umsetzung der gewählten Steuerungskonzepte bezog sich im Wesentlichen auf die Hardwaresteuerung, da der Funktionsnachweis der Steuerung mittels SPS bereits in der Projektphase I [5/1] ausführlich behandelt wurde.

Für den Funktionsnachweis wurde der Verfahrensablauf und die für die Eingliederung des Einsparmoduls erforderlichen Änderungen am Beispiel der Referenzmaschine Bekum BM 101D eine Relaisschaltung gemäß der Abbildung 16 entwickelt.

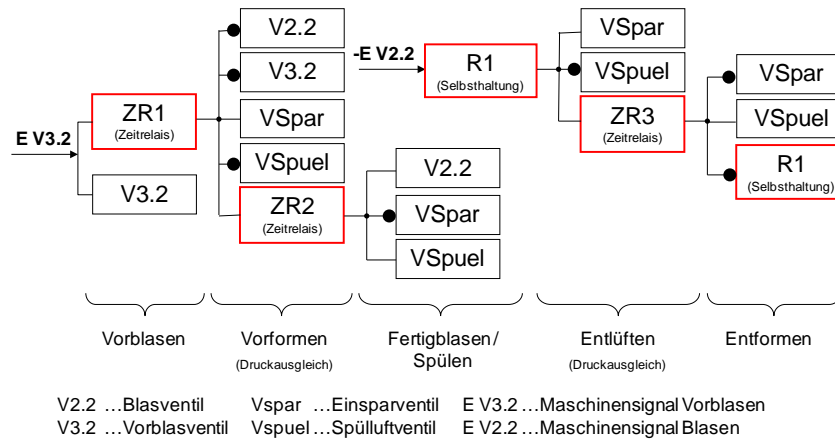


Abbildung 16: Schematische Darstellung der Prozessschritte mittels Relaisschaltung

Für eine zweckmäßige Umsetzung dieses Steuerungskonzeptes galt es, die Problematik der zeitgesteuerten Druckausgleiche zu untersuchen. Hierfür wurden im Rahmen der Tests zur Untersuchung der Druckspeichergrößen die Zeiten der Druckausgleiche bei verschiedenen Druckdifferenzen und verschiedenen Volumenverhältnissen ermittelt. In Abbildung 17 sind die Verläufe der Druckausgleichsdauer in Abhängigkeit der Differenzdrücke für die unterschiedlichen Volumenverhältnisse dargestellt.

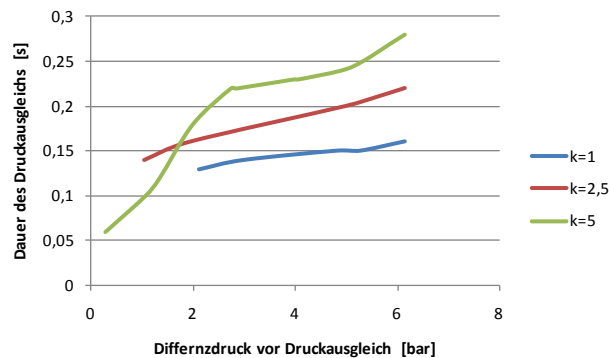


Abbildung 17: Einfluss der Druckdifferenzen und Volumenverhältnisse auf die Dauer des Druckausgleichs

Die Verläufe der Druckausgleichsdauer verdeutlichen, dass sich sowohl bei größeren Volumenverhältnissen als auch bei steigenden Differenzdrücken die erforderliche Zeit für den

vollständigen Druckausgleich erhöht. Dies ist auf die entsprechend größere Luftmenge, welche während des Druckausgleichs durch die gleichbleibenden Leitungsquerschnitte strömt, zurückzuführen. Zwar stellt sich bei höheren Differenzdrücken zu Beginn des Druckausgleichs ein höher Volumenstrom ein, welcher sich jedoch mit der Abnahme der Druckdifferenz beim Druckausgleich ebenfalls reduziert, so dass sich in der Summe dennoch die Dauer bis zur Druckgleichheit verlängert.

Aufgrund der Tatsache, dass sich die Druckdifferenzen insbesondere der ersten Prozesszyklen zum Teil stark unterscheiden, muss bei der Einstellung der Zeitglieder ein Kompromiss zwischen vorzeitigem Abbruch des Druckausgleiches und zu langer Wartezeiten nach dem Druckausgleich gefunden werden. Während ein vorzeitiger Abbruch zu Einbußen des Einspareffekts führt, sind bei zu lang eingestellten Druckausgleichsdauern mit Taktzeitverlängerungen zu rechnen.

Neben dem erforderlichen Kompromiss bei der Durchführung der Druckausgleiche ist die Variante der Steuerung durch Relais zusätzlich mit einem hohen Fertigungsaufwand hinsichtlich der Verdrahtung verbunden. Weiterhin ist die Lebensdauer der Relais auf einen Bruchteil der Lebensdauer einer SPS beschränkt, was höhere Wartungskosten und entsprechende Ausfallzeiten des Einsparmoduls nach sich zieht. Insgesamt ist die Steuerung des Einsparmoduls durch Relais möglich, jedoch weder optimal, noch zeitgemäß und wird somit für den Anwendungsfall des Einsparmoduls als nicht zweckmäßig eingestuft.

Dementsprechend ist für die steuerungstechnische Eingliederung des Einsparmoduls lediglich eine SPS in Betracht zu ziehen. Um dennoch die Investitionskosten für die Steuerungseinheit zu im Vergleich zum Prototypen der Projektphase I zu reduzieren wurde nach alternativen Speicherprogrammierbaren Steuerungen recherchiert, welche ein zweckmäßiges Leistungsvermögen an die vergleichsweise geringen steuerungstechnischen Anforderungen beim Einsparmodul aufweist. Das Ergebnis der Recherche war eine kompakte Logiksteuerung, welche inklusive Netzteil mit rund 150,- € lediglich ein Drittel der Anschaffungskosten der bisherigen SPS aufweist. Zusammen mit den erforderlichen Drucksensoren, einem Gehäuse sowie Installationsmaterial (Verbindungsstecker/-buchsen, Kabel, Klemmen, etc.) sind für die Steuerungseinheit Materialkosten von ca. 650,- € zu berücksichtigen.

Für die ausgewählte Kompaktsteuerung wurde entsprechend der in der Tabelle 2 (Kapitel 3.1) aufgeführten Anforderungen an die steuerungstechnische Eingliederung ein universeller Logikplan (Anlage 3) entwickelt, welcher individuell auf die Bedürfnisse der umzurüstenen Blasformanlage angepasst werden kann und im Wesentlichen mit dem der Projektphase I übereinstimmt.

6 Zusammenführung der Teillösungen zur Gesamtlösung

6.1 Entwicklung eines geeigneten Universalgehäuses

Im Kapitel 3 wurde bereits der Grundaufbau des Einsparmoduls behandelt und in die drei Einzelmodule Druckspeichereinheit, Ventileinheit und Steuerungseinheit unterteilt. Darüber hinaus ist angemerkt worden, dass je nach vorhandenem Bauraum das Einsparmodul in einer kompakten Form oder mit einem dezentralen Aufbau an der umzurüstenden Blasformanlage angebracht werden kann. Dementsprechend ist für die Kompaktbauweise ein Gestell zur Verfügung zu stellen, welches die Komponenten des Einsparmoduls aufnimmt und für einen festen Stand mit dem Maschinengestell verbindet. Da jedoch sowohl die Komponenten als auch der Aufstellort des Einsparmoduls anlagenspezifisch zum Teil sehr stark variieren können, ist die Entwicklung eines universellen Gehäuses bzw. Gestells nicht zweckmäßig. Vielmehr war eine Lösung aufzuzeigen, welche es ermöglicht, das Gestell für einen kompakten Aufbau aber auch für die Montage einzelner Moduleinheiten individuell ohne aufwendige Konstruktions- und Fertigungsarbeiten auf die örtlichen Gegebenheiten abzustimmen. Da auf die Gestelle keine hochdynamischen Lasten wirken, werden in diesem Zusammenhang Montageprofile als zweckmäßig gesehen. Diese können zusammen mit der dazugehörigen Verbindungstechnik spezifisch auf die zu Komponenten des Einsparmoduls und den Aufstellort abgestimmt werden.

6.2 Dimensionierung der Speichereinheit

Aus den Ergebnissen des Kapitel 4.3 geht hervor, dass für einen hohen Einspareffekt die Auswahl des Druckspeichers nach dem Bauteilvolumen und der Anzahl zu fertigender Bauteile je angefahrter Blasformanlage zu erfolgen ist. Der Bezug auf die Anzahl der Bauteile je angefahrter Anlage ist darin zu begründen, dass durch Anfahrprobleme wie zu kurze Schmelzeschlauchlängen, fehlerhaftes Abdichten des Blasdorns, u. ä. zu einer nahezu vollständigen Entlüftung des Druckspeichers führen können und somit davon auszugehen ist, dass der Druckspeicher im ersten Zyklus sich stets im drucklosen Zustand befindet. Als Bauteilvolumen ist das Fassungsvermögen des größten Bauteils des Volumenspektrums zu wählen, da sich bei allen weiteren Bauteilen folglich ein höheres Volumenverhältnis ergibt und somit ein höherer Einspareffekt erzielt werden kann.

Da Druckspeicher der Betriebssicherheitsverordnung [1/1] unterliegen, sind im Rahmen der Speicherauswahl auch die für den Betrieb erforderlichen Richtlinien zu beachten. So sind für Druckspeicher je nach Größe und zulässigem Betriebsdruck Prüfzeiten gemäß der Ab-

bildung 18 einzuhalten. Für die Anwendung beim Einsparmodul sind gemäß den durchgeführten Untersuchungen Druckspeicher mit einem zulässigen Betriebsdruck von 11 bar (Standartwert der Druckspeicherhersteller) ausreichend. Zusammen mit dem Speichervolumen können die entsprechenden Prüffristen ermittelt werden.

Die dargestellten Prüffristen ziehen Ausfallzeiten und zusätzliche Kosten für den Kunden des Einsparmoduls nach sich. Demzufolge ist es zweckmäßig diese Prüffristen in die Auswahl der geeigneten Druckluftspeichergröße zu integrieren und wenn möglich wiederkehrende Prüfungen zu vermeiden. Die Vorgehensweise zur Ermittlung geeigneter Speichergrößen unter der Berücksichtigung der erwähnten Sachverhalte kann der Anlage 4 entnommen werden.

Klasse	PS * V [bar*l]	Prüfung vor Inbetriebnahme ¹	Wiederkehrende Prüfung		
			Äußere Prüfung ² (≤ 2 Jahre)	Innere Prüfung (≤ 5 Jahre)	Festigkeitsprüfung (≤ 10 Jahre)
Art. 3 Abs. 2 der Druckgeräte- Richtlinie	$PS * V \leq 50$	Keine überwachungsbedürftige Anlage → Prüfung nach Montage und ggf. wiederkehrend durch bP nach § 10 BetrSichV			
3	$50 < PS * V \leq 200$	bP	bP	bP	bP
2	$200 < PS * V \leq 1000$	zÜwst	bP	bP	bP
	$1000 < PS * V \leq 3000$		zÜwst	zÜwst	zÜwst
1	$PS * V > 3000$	zÜwst	zÜwst	zÜwst	zÜwst

V = Volumen; PS = maximal zulässiger Druck; bP = befähigte Person; zÜwst = zugelassene Überwachungsstelle

¹⁾ gilt auch für die Prüfung vor Wiederinbetriebnahme nach Änderung

²⁾ nur bei feuer-, abgas- oder elektrisch beheizten Druckgeräten (§ 15 Abs. 6 BetrSichV)

Abbildung 18: Prüffristen für einfache Druckbehälter [1/1]

6.3 Dimensionierung der Steuerungs- und Regelungselemente

Bei der Auswahl der Steuerungs- und Regelungselemente stehen das erforderliche pneumatische 3/2-Wegeventil (Einsparventil) sowie die Steuerungseinheit im Mittelpunkt. Die Anforderungen an das Einsparventil sind ein bidirektionaler Durchfluss sowie eine Nennweite entsprechend des Leitungssystems der umzurüstenden Blasformanlage. Aufgrund des robusten Aufbaus, Ausführungen mit Nenndurchflüssen von bis zu $Q_N = 9700 \text{ NI/min}$ und der geringen Anschaffungskosten [3/6] wurden 3/2-Wege-Kolbensteuerventile als zu bevorzugender Ventiltyp festgelegt.

Bei der Steuerungseinheit findet gemäß Kapitel 5 eine kompakte Logiksteuerung Anwendung, welche in Verbindung mit Drucksensoren den steuerungstechnischen Eingriff realisiert. Die Steuerung muss dafür fünf digitale Ein- und vier Ausgänge sowie zwei analoge Eingangssignale verarbeiten können, um der Maximalanforderung bei Blasformanlagen,

welche mit Vorblas-, Blas-, und Spülluft arbeiten und über ein separates 2/2-Wegeventil entlüften, nachzukommen. Die Steuerungseingänge für die erforderlichen Signale der Maschinensteuerung sind über Koppelrelais galvanisch von der Blasformanlage trennen. Die Signalleitungen werden über einen Multipolstecker in beziehungsweise aus den Klemmkasten geführt. Zur Gewährleistung einer sicheren Signalübertragung sind entsprechende Leitungsdosen und Gerätestecker zu wählen (vgl. Kapitel 2.3).

7 Erstellung eines Auswahlalgorithmus

Für eine Umrüstung vorhandener Blasformanlagen zur blasluftreduzierten Betriebsweise, gilt es das Einsparmodul individuell auf die Anlagentechnik abzustimmen. Eine Grundkonfiguration des Moduls wurde durch den modularen Aufbau sowie die im vorhergehenden Kapitel beschriebenen Dimensionierungen vorgegeben.

Aus den vom späteren Anwender einzuholenden Daten zur Anlagentechnik und zur Betriebsweise sind die Ventil-, die Steuer- und die Speichereinheit speziell anzupassen und zum Einsparmodul zusammenzufügen.

Folgende Daten sind für die Anpassungsaufgaben erforderlich:

Ventileinheit:

- Nennweiten des vorhandenen Leitungssystems bzw. benötigte Nenn-Durchflüsse
→ Wahl der Ventilgröße des Einsparventils
- nutzbarer Bauraum an der Entlüftungsstelle, Lage der Entlüftungsstelle, Anschlussmaße
→ Wahl der Bauform des Einsparventils (kompakt / dezentral)
→ Wahl der pneumatischen Schnittstelle (Rohreinbau / Anschluss an Entlüftungsstelle)

Steuereinheit:

- Pneumatikschaltplan / Verfahrensablauf der Anlage (Vorblasluft, Spülluft vorgesehen?)
→ erforderliche Anzahl an Ein- und Ausgängen der Steuerung
→ Anpassung des Steuerprogramms des Einsparmoduls (Anlage 3)
→ Messstelle für den Werkzeugdruck
- Spannung der Steuersignale der Maschinensteuerung
→ Wahl der Koppelrelais für Steuerungseingänge des Einsparmoduls
- Bauform der Ventilstecker der vorhandenen pneumatischen Ventile
→ Wahl geeigneter Leitungsdosen und Gerätestecker

Speichereinheit:

- Volumenspektrum und Losgrößen der auf der Blasformanlage zu fertigenden Bauteile
 - maximaler Blasdruck p_{WKZ}
 - nutzbarer Bauraum zur Aufstellung des Druckspeichers
- Wahl geeigneter Druckspeicher gemäß Anlage 4

8 Einsatz der Lösung unter Praxisbedingungen

8.1 Untersuchungen beim Projektpartner Trassl-Plastik GmbH & Co. KG

Bei dem Projektpartner Trassl-Plastik wurde im Rahmen der Praxisuntersuchungen für die Referenzmaschine Bekum BM 101D, welche bereits in der Projektphase I für den Funktionsnachweis der Einsparmaßnahme diente, ein Einsparmodul ausgelegt und durch messtechnische Aufnahme des Volumenstroms, des Werkzeug- und des Druckspeicherdrucks die erreichbare Blasluftreduzierung gegenüber der herkömmlichen Verfahrensweise ermittelt. Der Projektpartner fertigt auf dieser Maschine Bauteile mit einem Fassungsvermögen zwischen 125 ml und 1 Liter in Losgrößen von 1000 bis 20.000 Stück. Weiterhin kommen bei dieser Anlage neben der Blasluft die Vorblas- und die Spülluft zum Einsatz. Die Entlüftung des Werkzeugs erfolgt durch Rückschalten des Blasluftventils über ein Schnellentlüftungsventil (vgl. Pneumatikschaltplan Abbildung 3). Der Druckspeicher wurde entsprechend des entwickelten Auswahlalgorithmus und des verfügbaren Bauraums auf ein Volumen von $V_{DS} = 5 \text{ l}$ bestimmt. Aufgrund der baulichen Gegebenheiten konnte das Einsparmodul als Kompaktbauweise umgesetzt und direkt an die Entlüftungsstelle der Blasformanlage angebracht werden (Abbildung 19).

Nach dem Anbau des Einsparmoduls wurden an zwei Referenzbauteilen Versuchsreihen nach herkömmlicher und umgerüsteter Betriebsweise durchgeführt, um die erreichbare Blasluftreduzierung nachzuweisen. Dabei handelte es sich um flaschenförmige Bauteile mit den Fassungsvermögen $V_{BT} = 1 \text{ l}$ und $V_{BT} = 0,5 \text{ l}$. Folglich ergeben sich Volumenverhältnisse von $k = 5$ und $k = 10$, welche laut den Berechnungen zu einer theoretisch maximal erzielbaren Blasluftreduzierung von 45,5% ($k = 5$) und 47,6% ($k = 10$) führen.

Da durch die Zuluftleitung, in welcher der Volumenstrom gemessen wurde, alle Luftströme (Vorblas-, Blas-, Spülluft) fließen, jedoch durch das Einsparmodul lediglich der Blasluftanteil reduziert wird, wurde für die Ermittlung der Druckluftreduzierung zunächst die Differenz der Druckluftmengen (ΔV_N) bis zum maximalen Werkzeugdruck (p_{max}) ermittelt. Diese Druck-

luftmenge in das Verhältnis zur Druckluftmenge $V_{N_{max}}$ gesetzt, welche sich bei maximalem Werkzeugdruck im Bauteil befindet, ergibt die erreichte Einsparung. Durch diese Vorgehensweise konnte der Einfluss der Vorblas- und der Spülluft auf die Ergebnisse auf ein Minimum reduziert werden.

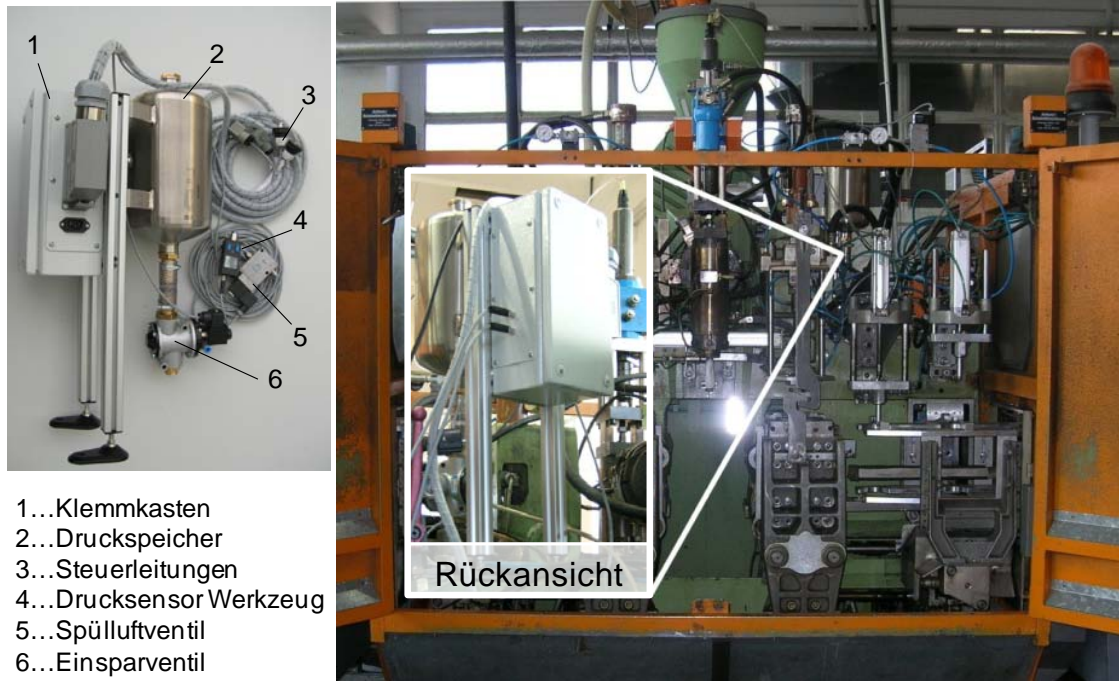


Abbildung 19: Einsparmodul in Kompaktbauweise (links), umgerüstete Referenzblasformanlage (rechts)

In der Abbildung 20 sind die Druck- sowie die Volumenstromverläufe der herkömmlichen und umgerüsteten Referenzanlage für die 1-Liter Flasche aufgeführt. Daraus geht zu Beginn des Zyklus, während des Vorformens und des anschließenden Ausformens ($t = 5,8 - 7,2$ s), ein deutlich verringerter Volumenstrom hervor, was sich auch in den Werten der ermittelten Einsparung (Tabelle 5) widerspiegelt. Einen ähnlichen Verlauf wiesen die Messungen zum zweiten Referenzbauteil (0,5-Liter Flasche) auf.

Tabelle 5: Übersicht der Messwerte und ermittelte Einsparung

Bauteil	max. Blasdruck p_{max}	Druckluftmenge $V_{N_{max}}$ im Werkzeug bei p_{max}	Gemessene Differenz der Druckluftmenge ΔV_N	Prozentuale Einsparung
1-Liter Flasche	7,87 bar	7,87 NI	2,56 NI	32,5%
0,5- Liter Flasche	8,25 bar	4,125 NI	1,49 NI	36,12%

Die Abweichungen der ermittelten zu den theoretisch berechneten prozentualen Einsparungen entsprechen in etwa der aus den labortechnischen Untersuchungen getroffenen Abschätzung von 25% (vgl. Kapitel 4.4).

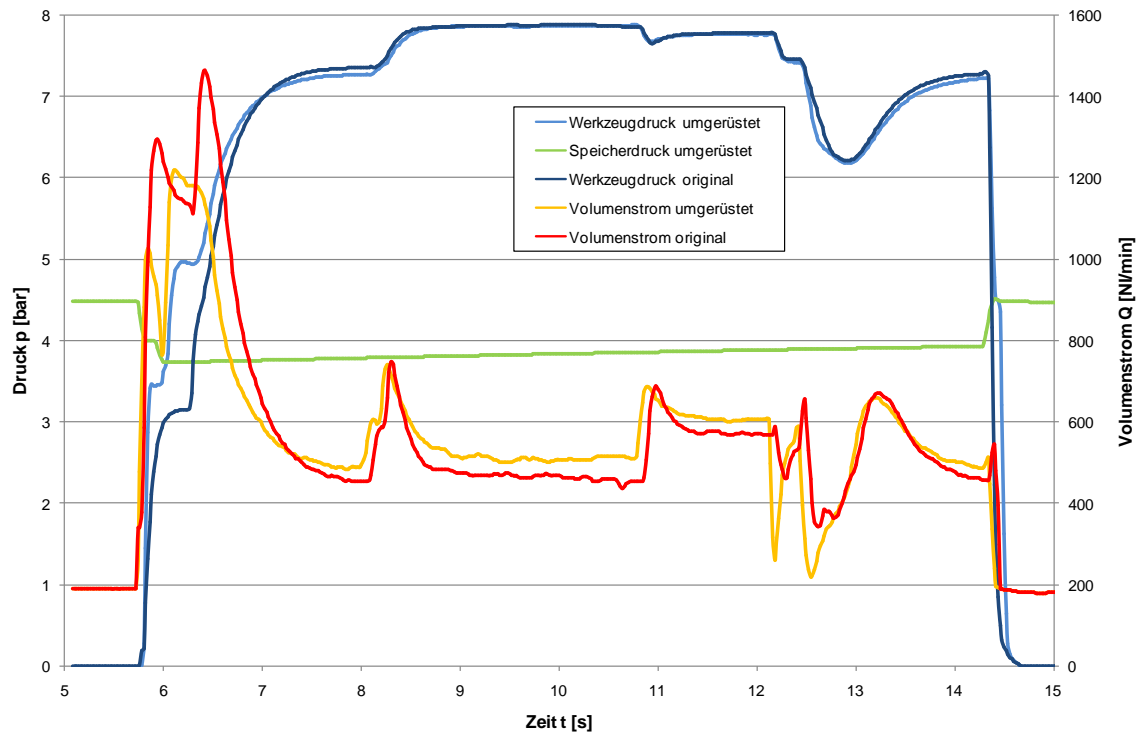


Abbildung 20: Druck- und Volumenstromverläufe der Blasformanlage original / umgerüstet 1-Liter Flasche

Neben den Untersuchungen zur erreichbaren Blasluftreduzierung wurde ein Filter an die Entlüftungsstelle der zweiten Blasformstation der Referenzanlage installiert. Mit diesem war zu prüfen, ob die Prozessabluft schadhafte Bestandteile aufweist. Eine anschließende chemische Untersuchung mittels thermogravimetrischer Analyse wurden Rückstände von Paraffinen nachgewiesen (Analyseprotokoll siehe Anlage 5), welche bei der Vorformerzeugung dem Extruder für bessere Fließeigenschaften der Kunststoffschmelze zugegeben werden. Paraffine werden im Allgemeinen für die Umwelt als unbedenklich eingeschätzt. So ist eine Rückführung der paraffinhaltigen Luft bedenkenlos möglich. Darüber hinaus wurden seitens der Qualitätskontrolle bei Trassl-Plastik keine Beanstandungen angezeigt. Hinsichtlich von Paraffinrückständen an den verwendeten Komponenten wurden ebenfalls keine Beeinträchtigungen oder Funktionsstörungen festgestellt. Somit ist eine zusätzliche Filterung der aus dem Blasformwerkzeug strömenden Luft aus dem derzeitigen Stand nicht erforderlich.

8.2 Untersuchungen beim Projektpartner ESDA Kunststofftechnik GmbH

Beim Projektpartner ESDA Kunststofftechnik wurde eine Großblasformanlage mit dem Einsparmodul ausgestattet (Abbildung 21) und messtechnisch untersucht. Diese Anlage dient vorrangig zur Herstellung von Bauschuttrutschen mit einem Hohlraumvolumen von ca. $V_{BT} = 200 \text{ l}$. Die Verfahrensweise dieser Anlage entspricht im Wesentlichen der bereits bei Trassl-Plastik untersuchten. Lediglich die Option der Spülluft wird in diesem Fall nicht angewandt. Die Speichergröße wurde auf 360 Liter gewählt, was vorwiegend auf die örtlichen Gegebenheiten zurückzuführen ist und zu einem Volumenverhältnis von $k = 1,8$ führt. Zur Vermeidung von Prüffristen gemäß der Druckbehälterverordnung wurde die Speichergröße in Form von vier Speichern á 90 Liter mit einem zulässigen Betriebsdruck von $p_{zul} = 11 \text{ bar}$ in einem Speichersystem umgesetzt. Die Anordnung der Moduleinheiten des Einsparmoduls erfolgte aufgrund des vorhandenen Bauraums dezentral. Für das Einsparventil wurde aufgrund des großen Abstands der Entlüftungsstelle zum Blasformwerkzeug im Rohreinbau appliziert, um unnötige Leitungsverluste zu vermeiden.



Abbildung 21: Umgerüstete Großblasformanlage der ESDA Kunststofftechnik

Da diese Blasformanlage eine separate Druckluftleitung für die Blasluft ausweist, konnte über den Volumenstromsensor ausschließlich der Blasluftverbrauch messtechnisch erfasst werden, was die anschließende Ermittlung des erreichten Einsparpotenzials deutlich vereinfachte. Der restliche Versuchsaufbau sowie die Versuchsdurchführung wurden analog der Versuchsreihen bei Trassl-Plastik gestaltet. Der u.a. in der Abbildung 22 dargestellte Volumenstromverlauf der umgerüsteten Großblasformanlage zeigt einen deutlich späteren An-

stieg der Blasluftzuführung und dadurch einen deutlich schmaleren Bereich großer Volumenströme gegenüber der herkömmlichen Verfahrensweise auf. In diesem Bereich findet die Prozessrückführung der zwischengespeicherten Blasluft statt. Zum Zeitpunkt $t = 55$ s ist der Formgebungsprozess durch Erreichen des maximalen Werkzeugdrucks beendet. Die Auswertung der Volumenströme im Bereich des Volumenstromanstiegs bis $t = 55$ s ergab eine Differenz der Druckluftmenge von $\Delta V_N = 240$ NI, was bei einem gemessenen Druckluftaufwand von rund $V_N = 852$ NI bei der herkömmlichen Verfahrensweise zu einer prozentualen Einsparung von $S_{\%} = 28,2\%$ entspricht.

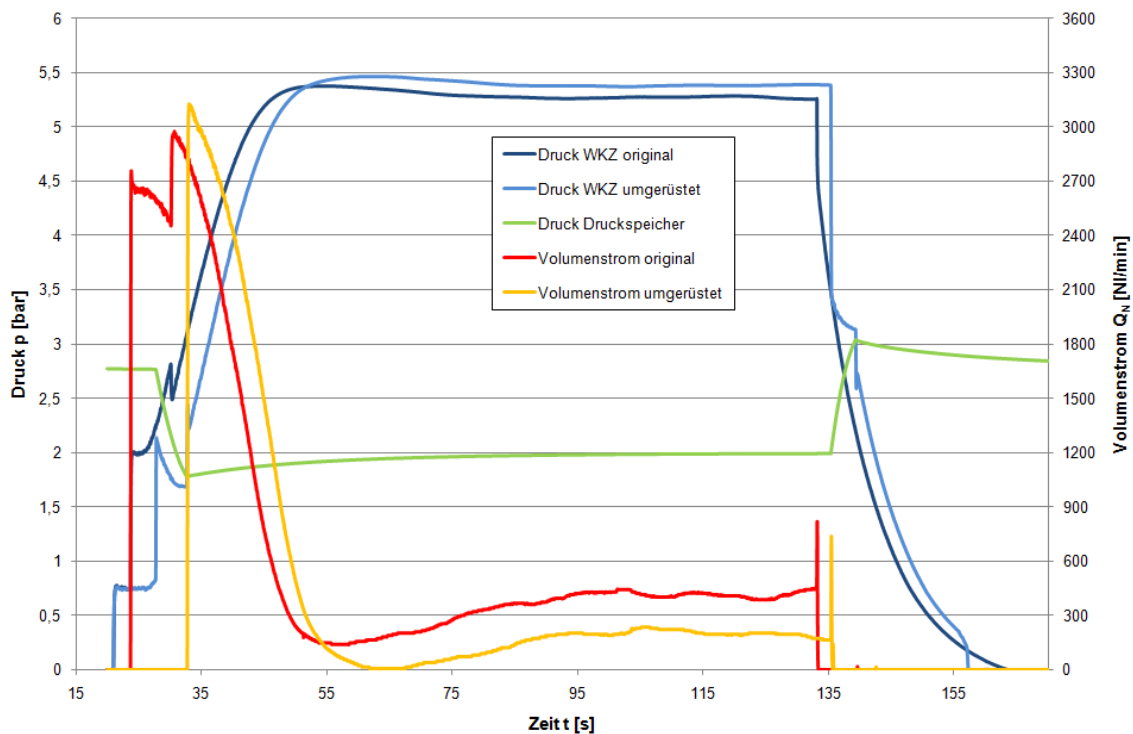


Abbildung 22: Druck- und Volumenstromverläufe der Großblasformanlage original / umgerüstet

9 Ökologische und ökonomische Betrachtung der Einsparmaßnahme

9.1 Erreichbare Umweltentlastung

In den Untersuchungen zur blasluftreduzierten Betriebsweise von Blasformmaschinen wurden mögliche Einsparungen von bis zu 36% anhand von Praxistest nachgewiesen. Weiterhin konnte festgestellt werden, dass die erreichbaren Einsparpotenziale zirka 75% der theoretisch berechneten betragen. Folglich kann mit der berechneten maximal möglichen Einsparung von 50% bei einem Volumenverhältnis $k \rightarrow \infty$ mit einer Einsparung von 37,5% ge-

rechnet werden. Für eine praktische Umsetzung wird das Bestreben nach einer derartigen Konstellation jedoch aufgrund der dafür nötigen hohen Anzahl an Prozesszyklen und erforderlichen Speichergrößen als nicht zweckmäßig erachtet. Vielmehr wird wegen der verhältnismäßig geringen Anzahl an Prozesszyklen bis zum Erreichen des Sättigungsdrucks und der geringen Abweichung zum maximalen Einsparpotenzial (bei $k \rightarrow \infty$) das Volumenverhältnis $k = 10$ als anzustreben gesehen (vgl. Abbildung 14). Da jedoch auch dieses Verhältnis nicht bei jeder Blasformanlage bzw. bei jedem Bauteilvolumen und Produktionsauftrag umsetzbar sein wird, kann eine durchschnittlich erreichbare Einsparung von rund 30% angenommen werden.

Die absolute Einsparung an Druckluft ist jedoch maßgeblich vom jeweilig notwendigen Umformdruck sowie vom Volumen des herzustellenden Bauteils abhängig. Daher ist es zweckmäßig, die quantitative Menge an einzusparender Energie in Abhängigkeit des nötigen Umformdrucks und des Bauteilvolumens anzugeben. Aus Anlage 6 geht hervor, dass eine 30%-ige Einsparung der Blasluft einer spezifischen Einsparung von 100 J pro Bar Umformdruck und je Liter Bauteilvolumen an elektrischer Energie entspricht. Daraus ergibt sich, dass insbesondere bei Bauteilen großer Volumina und hohen Umformdrücken sowie bei hohen Ausstoßleistungen entsprechend hohe absolute Einsparungen ergeben.

Am Beispiel der Projektpartner Trassl-Plastik und ESDA Kunststofftechnik werden im Folgenden die möglichen Energieeinsparungen und die daraus resultierende Umweltentlastung dargestellt.

Der Projektpartner Trassl-Plastik GmbH, als Anwender des Extrusionsblasformverfahrens, benötigt jährlich 1,43 Mio. kWh für die gesamte Druckluftaufbereitung (Anlage 7). Von der erzeugten Druckluftmenge werden schätzungsweise 30% als Blasluft verwendet. Würden alle Anlagen des Projektpartners mit einem Einsparmodul ausgestattet werden, wären eine Energiereduzierung um 128.700 kWh sowie ein um 46 t reduzierter CO₂-Ausstoß pro Jahr erreichbar (Anlage 8).

Die Firma ESDA Kunststofftechnik GmbH erzeugt die erforderliche Druckluft mittels eines Kompressors mit einer Anschlussleistung von 35 kW und benötigt für die Druckluftaufbereitung jährlich 277.200 kWh an elektrischer Energie. Unter der Annahme, dass alle Blasformmaschinen umgerüstet werden würden, könnte ESDA jährlich ca. 83.160 kWh elektrische Energie sparen und dabei den CO₂-Ausstoß um 29,9 t reduzieren (Anlage 9).

Wird der Mittelwert der bei den Projektpartnern möglichen Einsparung gebildet (≈ 106.000 kWh) und als Grundlage für die erreichbare Energiereduzierung je Betrieb an-

genommen, wäre bei den restlichen 1200 deutschen Betrieben [5/2], welche das Druckluftformen anwenden, mit Hilfe der entwickelten Einsparmaßnahme deutschlandweit jährlich eine Reduzierung von rund 127 Mio. kWh elektrischer Energie möglich. Dies würde zu einer Umweltentlastung um 45.700 t CO₂ pro Jahr führen.

9.2 Wirtschaftlichkeit des Einsparmoduls

Um das Einsparmodul als Nachrüstatz auf dem Markt bei Anwendern des Blasformverfahrens zu etablieren, muss sich die Anlagenumrüstung wirtschaftlich rechnen. Dass heißt die Investitionskosten sollten nach einer vertretbaren Zeit durch die Druckluft- und daraus folgend die Energieeinsparung amortisiert werden. Bei den im Kapitel 2.4 aufgestellten Anforderungen wurde ein Amortisierungszeitraum von maximal 36 Monaten als angemessen festgelegt.

Im Rahmen der Entwicklungsarbeiten wurden die erforderlichen Komponenten für das Einsparmodul ermittelt und katalogisiert. Dabei wurde das Einsparmodul in die Steuerung-, die Ventil- und die Druckspeichereinheit unterteilt. Bei der Dimensionierung der jeweiligen Einheiten wurde deutlich, dass die Steuerungseinheit und die Ventileinheit unabhängig von der umzurüstenden Blasformanlage im Wesentlichen stets den gleichen Aufbau aufweisen. Eine Aufstellung der erforderlichen Komponenten dieser Einheiten ergab einen abgeschätzten Investitionsaufwand von 800,- € (vgl. Tabelle 6). Die Druckspeichergrößen können sich hingegen je nach umzurüstender Anlage erheblich unterscheiden, was sich entsprechend auf die Anschaffungskosten niederschlägt. Für die Amortisationsrechnung des Einsparmoduls wurde der Kostenaufwand der Speichereinheit mit 500,- € angesetzt. In der Summe ist folglich mit einem Kostenaufwand von zirka 1.300,- € für ein Einsparmodul zu rechnen.

Tabelle 6: Materialkosten für das Einsparmodul

Komponente		Preis
Steuereinheit	→	≈ 650,- €
Ventileinheit - Sparventil (3/2-Wegeventil)	→	150,- €
Druckspeichereinheit	→	≈ 500,- €
Gesamtkosten		≈ 1300,- €

Am Beispiel des Projektpartners Trassl-Plastik wurde bei einer angenommenen Umrüstung aller vorhandenen Blasformanlagen eine jährliche Reduzierung von 128.700 kWh elektri-

scher Energie ermittelt. Nach Auskunft von Trassl-Plastik produziert das Unternehmen mit 25 Blasformmaschinen. Daraus ergibt sich eine durchschnittliche Energiereduzierung von 5.148 kWh pro Blasformmaschine und Jahr. Bei einem Strompreis von 0,13 €/kWh, errechnet sich ein jährlicher finanzieller Vorteil von 670,- €. Dies würde bei Trassl-Plastik einer durchschnittlichen Amortisierungszeit von rund 24 Monaten pro umgerüstete Anlage entsprechen.

Im Allgemeinen kann gesagt werden, dass die Wirtschaftlichkeit des Einsparmoduls von den Betriebsdaten der umzurüstenden Blasformanlage abhängig ist. Besonders das Bauteilvolumen, der Umformdruck und die Ausstoßleistung der Anlage beeinflussen im hohen Maße die Rentabilität des Einsparmoduls. Demnach ist maschinenspezifisch zu entscheiden, ob sich eine Umrüstung durch ein Einsparmodul sich rechnen wird.

10 Erstellung einer Betriebsanleitung für die Produktreihe

Für eine korrekte Anwendung des Einsparmoduls wurde eine Betriebsanleitung entworfen. In dieser wurden im Wesentlichen grundlegende Sicherheitshinweise, die Produktbeschreibung, die Inbetriebnahme sowie Hinweise zur Instandsetzung und Wartung näher aufgeführt. Mit den Sicherheitshinweisen war insbesondere auf die Beachtung der Druckbehälterordnung und der darin enthaltenen Prüffristen der verbauten Druckbehälter hinzuweisen. In der Produktbeschreibung wurden der Aufbau und die Betriebsweise des Einsparmoduls dargestellt. Die korrekte Installation des Einsparmoduls wird im Abschnitt Inbetriebnahme beschrieben. Im Kapitel Instandsetzung und Wartung werden in einer Stückliste die verbauten Komponenten des Einsparmoduls aufgeführt, um bei einem Defekt entsprechende Austauschteile besorgen zu können. Darüber hinaus beinhaltet die Betriebsanleitung den Elektro- und den Pneumatikschaltplan des Einsparmoduls.

Die Bedienungsanleitung ist aufgrund der unterschiedlich möglichen pneumatischen und steuerungstechnischen Eingliederung sowie für die jeweils zutreffenden Prüffristen der verbauten Druckspeichergroße anlagenspezifisch anzupassen.

11 Maßnahmen zur Verbreitung der Ergebnisse

Die erreichten Projektergebnisse werden in naher Zukunft in Fachzeitschriften veröffentlicht, um weitere Interessenten für das Einsparmodul zu werben. Darüber hinaus werden Artikel für die lokale Presse und das Steinbeismagazin „Transfer“ vorbereitet sowie das

Einsparmodul auf dem vorhandenen Internetauftritt vorgestellt. Des Weiteren wurde ein Anschauungsobjekt eines Einsparmoduls (Abbildung 23) aufgebaut, welches im Verkaufsraum der Drucklufttechnik Chemnitz GmbH aufgestellt und als Exponat auf Messeauftritten dienen wird. Als Messeauftritt ist die nächste Sächsische Industrie- und Technologiemesse (SIT) vorgesehen, wo bereits dieses Jahr verschiedenen Geschäftspartnern und Interessenten die Projekteergebnisse und Entwicklungen präsentiert wurden.

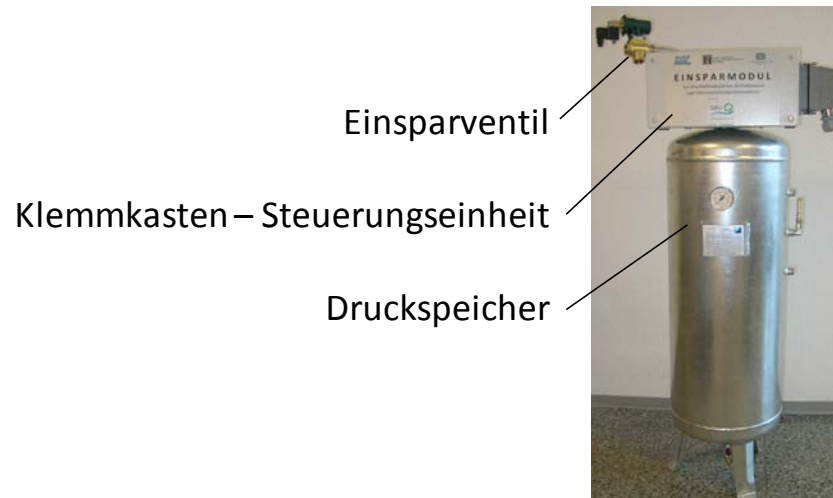


Abbildung 23: Anschauungsobjekt des Einsparmoduls

Fazit

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurde auf Grundlage der in der vorangegangenen Machbarkeitsstudie (AZ 24398-22) erarbeiteten Einsparmaßnahme zur Reduzierung des Blasluftaufwands beim Druckluftformen und des entwickelten Prototypen eines Einsparmoduls Optimierungs- und Standardisierungsarbeiten durchgeführt. Ziel war es dabei eine seriennahe Produktreihe zu entwickeln, welche als Umrüstsatz ein möglichst breites Spektrum an Blasformanlagen bedienen kann.

Dafür wurden die Verfahrensabläufe der verschiedenen auf dem Markt befindlichen Blasformanlagen analysiert. Nach der Betrachtung der unterschiedlichen pneumatischen und steuerungstechnischen Umsetzung dieser Verfahrensweisen wurden Kriterien zur universellen Eingliederung des künftigen Einsparmoduls erarbeitet.

Bei der Entwicklung eines im Volumen variablen Druckspeichers wurde die Annahme widerlegt, für einen möglichst hohen Einspareffekt das Speichervolumen gleich dem Fassungsvermögen des Bauteils zu gestalten. Vielmehr konnte festgestellt werden, dass mit größeren Druckspeichern höhere Einsparpotenziale erreicht werden können. Da jedoch die entsprechend hohen Einspareffekte erst nach einer bestimmten Zyklusanzahl erreicht werden, wurde ein Auswahlalgorithmus für die ideale Druckspeichergröße entwickelt. Der Einfluss der Druckspeichergröße wurde über Berechnungen bewiesen sowie anhand von labortechnischen Versuchen und unter Praxisbedingungen an zwei Referenzanlagen bestätigt. So ist theoretisch eine Reduzierung des Blasluftaufwands von bis zu 50% möglich. Aus den Praxisuntersuchungen ging jedoch bei einer zweckmäßigen Auslegung der Druckspeichergröße eine durchschnittlich zu erwartende Einsparung von 30% hervor.

Für eine möglichst universelle Anwendung des Nachrüstsatzes wurde das Einsparmodul in eine Steuerungs-, eine Ventil- und eine Speichereinheit unterteilt, welche nach einem Auswahlalgorithmus individuell auf die umzurüstende Blasformanlage zu konfigurieren sind.

Das entwickelte Einsparmodul erfüllt alle gestellten Anforderungen, wobei die nachgewiesene Blasluftreduzierung von mehr als 30% und eine ermittelte durchschnittliche Amortisierungszeit von 24 Monaten als die Bedeutendsten hervorzuheben sind.

Im Folgenden gilt es, die Anwender des Blasformverfahrens über Publikationen, bei Messeauftritten aber auch durch direkte Kontaktaufnahme auf die Möglichkeit der druckluftreduzierten Betriebsweise von Blasformanlagen hinzuweisen und Umrüstungen anzubieten.

So wird es möglich sein, eine Vielzahl von Blasformanlagen energiereduziert betreiben zu können und dadurch die Umwelt maßgeblich zu entlasten. Schon bei einer Umrüstung von

20% der deutschlandweit betriebenen Blasformanlagen könnten jährlich 25 Mio. kWh elektrische Energie eingespart und der CO₂-Ausstoß um 9.000 t reduziert werden.

Literaturverzeichnis

Monographien

- [1/1] Bundesministerium der Justiz: Betriebssicherheitsverordnung, BetrSichV, in Kraft getreten am 03.10.2002.

Firmenschriften

- [2/1] N.N.: Handbücher BEKUM BM 101D / BM 303D. Berlin: BEKUM Maschinenfabriken GmbH

Daten aus dem Internet

- [3/1] KHS Corpoplast GmbH & Co. KG: Verpackungslösungen und Streckblastechnologie für Kunststoffflaschen, <http://www.khscorpoplast.de/publikationen/publikationen.php>, September 2009.
- [3/2] Kautex Maschinenbau GmbH: *Blasformmaschinen*
<http://www.kautexgroup.com/de/produkte/blasformmaschinen.html>, Februar 2010.
- [3/3] BEKUM Maschinenfabriken GmbH: *Unsere Produktlinie*
<http://www.bekum.de/de/produkte.html>, Februar 2010.
- [3/4] BBM Maschinenbau und Vertriebs GmbH: *BBM Großblasanlagen*
<http://www.bbm-germany.de/cms/picture/upload/file/BBM-Grossmaschinen.pdf>, Februar 2010.
- [3/5] Festo AG & Co. KG: *Druckluftspeicher*
http://www.festo.com/cat/de_de/data/doc_de/PDF/DE/AIRRESERVOIRS_DE.PDF, September 2009.

- [3/6] AVS Ing. J.C. Römer GmbH: Produktkatalog
http://katalog.avs-roemer.e-ventis.eu/de/katalog/attachment/00024__avs-roemer-automatik-ventile-zubehoer.pdf, September 2010

Patente

- [4/1] DE 2742693 C2: Maschinen zum Blasformen von Hohlkörpern, insbesondere von Flaschen, aus thermoplastischem Kunststoff / Krupp Corpoplast Maschinenbau GmbH.
[Erf.:] N.N. (1983-08-11).
- [4/2] DE 4340290 A1: Mehrfachnutzung von Arbeitsluft / Krupp Corpoplast Maschinenbau GmbH. [Erf.:] Weiß, R. (1995-06-01).
- [4/3] DE 4340291 A1: Mehrfachnutzung von Blasluft / Krupp Corpoplast Maschinenbau GmbH. [Erf.:] Weiß, R. (1995-06-01).
- [4/4] DE 3111925 A1: Verfahren und Vorrichtung zum Einsparen von Druckluft, insbesondere bei Thermoformmaschinen / Robert Bosch GmbH.
[Erf.:] Rebmann, M.; Maier, A.; Andrä, R. (1981-03-26).
- [4/5] EP 0 754 537 B1: Weiterverwendung von Blasgas für verschiedene Antriebseinheiten in einer Streckblasformmaschine / A.K. Technical Laboratory Inc.
[Erf.:] Ikeda, M. (1995-07-18).
- [4/6] DE 195 45 024 B4: Verfahren zur Herstellung von Behältern / SIG Corpoplast GmbH & Co. KG
[Erf.:] Koch, M. (1995-12-2).

- [4/7] DE 20 2005 020 967 U1: Vorrichtung zum Blasformen von Behältern / SIG Technology AG
[Erf.:] N.N. (2005-07-26).
- [4/8] DE 69723707 T2: Blasformverfahren / Kao Corp.
[Erf.:] Nonomura, A.; Ichinohe, K.; Ootani, K. (1997-02-25).
- [4/9] WO 2006/096460 A1: Blow Air Control System / Graham Packaging Company, L.P.
[Erf.:] Crider, M.; Kelly, M. J. (2006-03-03).

DBU-Dokumente

- [5/1] AZ 24398: Energetische Optimierung des Druckluftformprozesses, Abschlussbericht drucklufttechnik Chemnitz GmbH, Steinbeis Transferzentrum für Antriebs- und Handhabungstechnik im Maschinenbau, Chemnitz 2008
- [5/2] AZ: 24398-02: Projektantrag, Energetische Optimierung des Druckluftformprozesses; 2008

Hochschulschriften

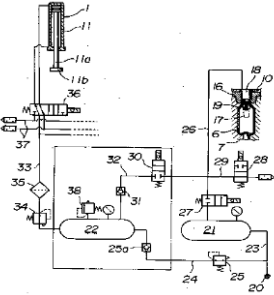
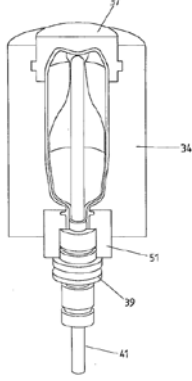
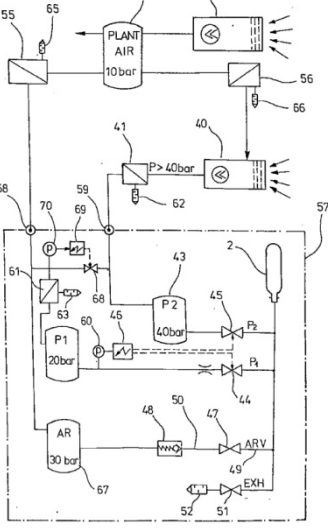
- [6/1] Schwalbe, K.: Untersuchungen und Entwicklungen zu einem im Volumen variablen Druckspeicher zum energieeffizienten Extrusionsblasformen. Chemnitz, TU Chemnitz, Fachbereich Maschinenbau, unveröffentlichte Diplomarbeit, 2010

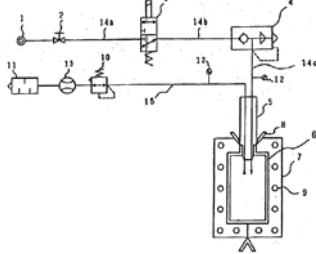
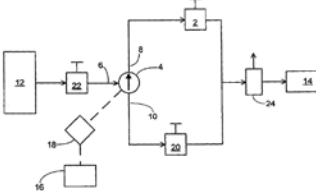
Anlagenverzeichnis

Anlage 1:	Patenttabelle.....	63
Anlage 2:	Möglichkeit zur Umsetzung einer pneumatischen Steuerung.....	66
Anlage 3:	Universeller Logikplan des Einsparmoduls.....	67
Anlage 4:	Auswahlalgorithmus für die ideale Speichergröße.....	68
Anlage 5:	Protokoll der thermogravimetrischen Analyse des Abluftfilters.....	70
Anlage 6:	Berechnung der spezifischen Energieeinsparung bei einer durchschnittlich erreichbaren 30%-igen Blasluftreduzierung.....	74
Anlage 7:	Verbrauchsdaten der Trassl-Plastik GmbH & Co. KG.....	75
Anlage 8:	Berechnung der Druckluft-, Energie- und CO ₂ -Ausstoßreduzierung bei Trassl-Plastik GmbH & Co. KG.....	76
Anlage 9:	Berechnung der Druckluft-, Energie- und CO ₂ -Ausstoßreduzierung bei ESDA Kunststofftechnik GmbH.....	77

Anlage 1: Patenttabelle

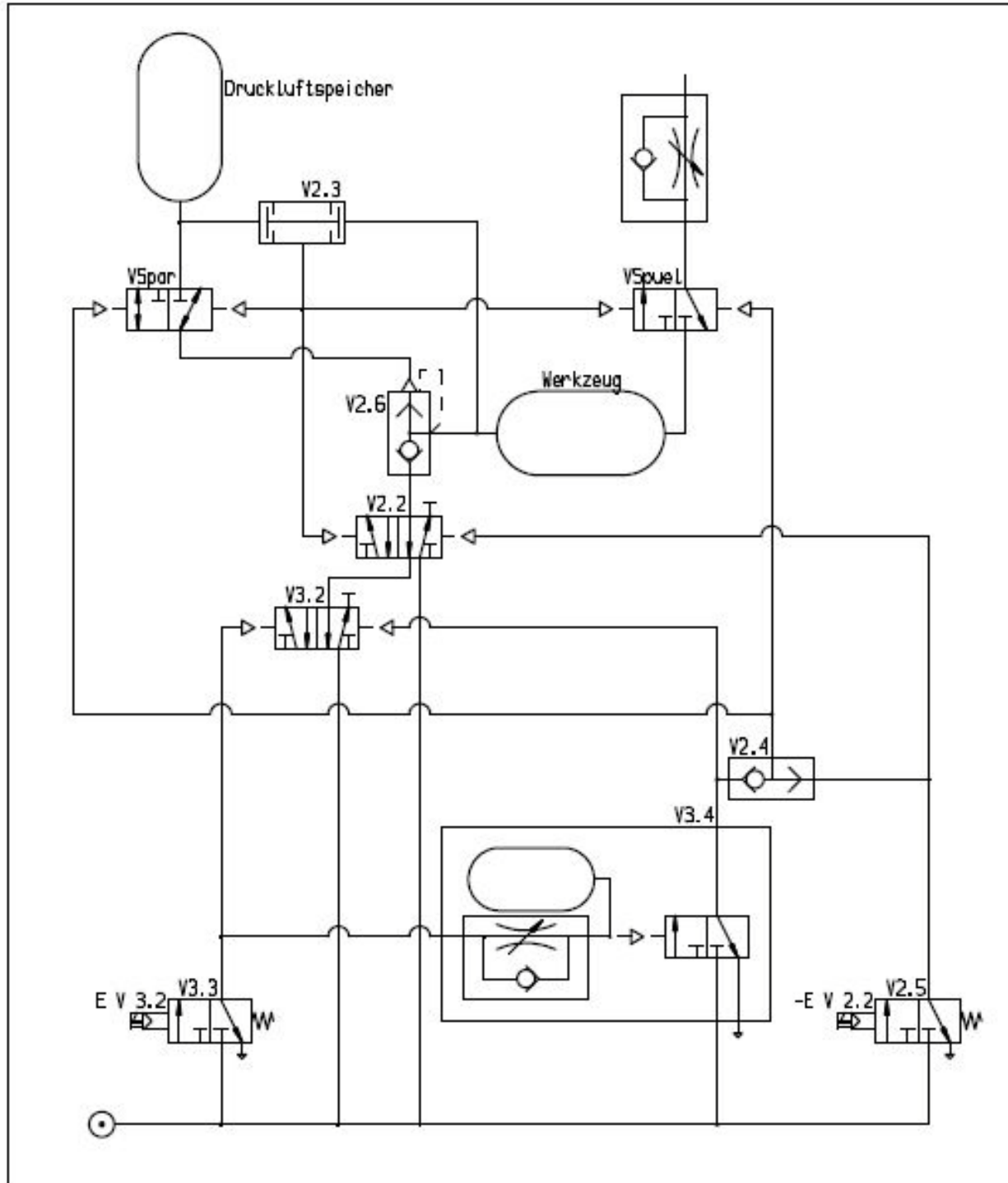
Patentnummer; Titel; Erscheinungsjahr	Abbildung	Wesentliche Merkmale
<p>DE 2742693 C2; Maschinen zum Blasformen von Hohlkörpern; 1983 [4/1]</p> <p>Aus Recherche des Patent- und Markenamtes</p>		<ul style="list-style-type: none"> • Bezogen auf Streckblasformen • Vor- und Fertigblasen mit unterschiedlich hohem Druck • Nach Aufblasen Zuführung der Hochdruckblasluft in Niederdruckluftversorgung
<p>DE 4340290 A1; Mehrfachnutzung von Arbeitsluft; 1995 [4/2]</p> <p>Aus Recherche des Patent- und Markenamtes bzw. Projektberichts Phase I (AZ: 24398)</p>		<ul style="list-style-type: none"> • Bezogen auf allg. Arbeitsprozesse am Bsp. Streckblsformen • Aufbau einer Arbeitsluftnebenversorgung • Zuführung nicht weiter benötigter Arbeitshauptluft in die Arbeitsluftnebenversorgung
<p>DE 4340291 A1; Mehrfachnutzung von Blasluft; 1995 [4/3]</p> <p>Aus Recherche des Patent- und Markenamtes bzw. Projektberichts Phase I (AZ: 24398)</p>		<ul style="list-style-type: none"> • Bezogen auf Streckblasformprozess • Aufbau einer Niederdruckluftversorgung • Zuführung der Hochdruckblasluft in Niederdruckluftversorgung • Aus Niederdruckversorgung Voraufweitung des Vorformlings • Einsparpotenzial: bis 20%
<p>DE 3111925 A1; Verfahren und Vorrichtung zum Einsparen von Druckluft, insbesondere bei Thermoblasmaschinen; 1982 [4/4]</p> <p>Aus Recherche des Patent- und Markenamtes bzw. Projektberichts Phase I (AZ: 24398)</p>		<ul style="list-style-type: none"> • Bezogen auf Thermofomprozess • Speicherung der nach dem Formvorgang noch vorhandenen Druckluft • Versorgung von Antriebseinheiten durch gespeicherte Druckluft

Patentnummer; Titel; Erscheinungsjahr	Abbildung	Wesentliche Merkmale
<p>EP 0 754 537 B1; Weiterverwendung von Blasgas für verschiedene Antriebseinheiten in einer Streckblasformmaschine; 1995 [4/5]</p> <p>Aus Recherche des Projektberichts Phase I (AZ: 24398)</p>		<ul style="list-style-type: none"> • Bezogen auf Streckblasformprozess • Zuführung der Restluft aus Blasformprozess in Niederdruck-lufttank • Versorgung von Antriebseinheiten durch gespeicherte Restluft • Druckschwankungen im Niederdrucklufttank mit Kompressor ausgleichen • Einsparpotenzial: bis 25%
<p>DE 195 45 024 B4; Verfahren zur Herstellung von Behältern; 1995 [4/6]</p> <p>Aus Recherche des Projektberichts Phase I (AZ: 24398)</p>		<ul style="list-style-type: none"> • Bezogen auf Blasformprozess • Zuführung der Prozessluft in eine Niederdruckversorgung • Nutzung der gespeicherten Druckluft für Vorform- und Hilfsprozesse • Druckbereiche: Hochdruckversorgung: 25-40 bar Niederdruckversorgung: 10-25 bar
<p>DE 20 2005 020 967 U1; Vorrichtung zum Blasformen von Behältern; 2005 [4/7]</p> <p>Aus Recherche des Projektberichts Phase I (AZ: 24398)</p>		<ul style="list-style-type: none"> • Bezogen auf Blasformprozess • Zuführung der Prozessluft in eine Niederdruckversorgung • Nutzung der gespeicherten Druckluft für Vorform- und Hilfsprozesse • Druckbereiche: Hochdruckversorgung: 25-40 bar Niederdruckversorgung: 10-25 bar • Technische Umsetzung aufgezeigt

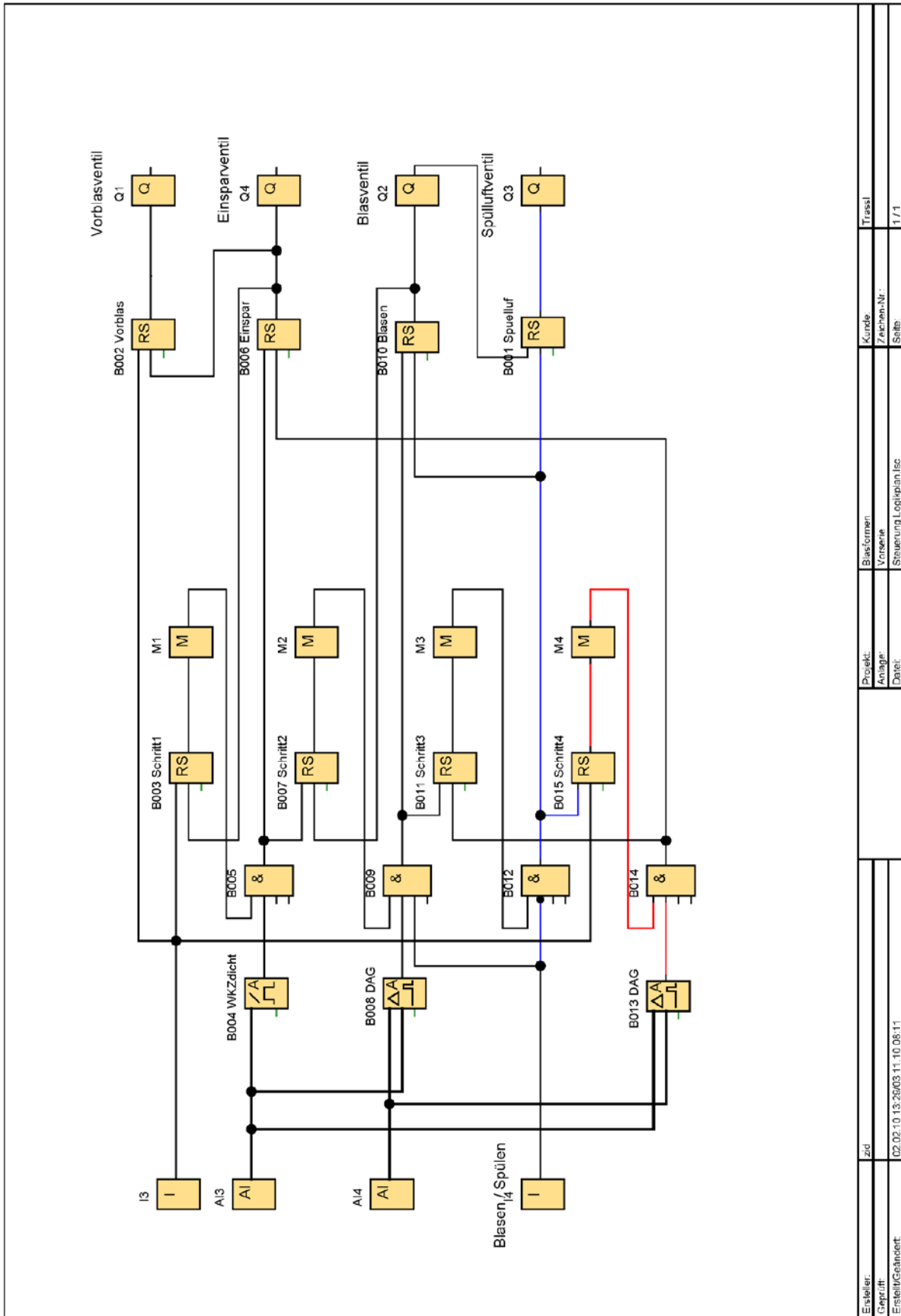
Patentnummer; Titel; Erscheinungsjahr	Abbildung	Wesentliche Merkmale
<p>DE 69723707 T2; Blasformverfahren; 1997 [4/8]</p> <p>Aus Recherche des Patent- und Markenamtes</p>		<ul style="list-style-type: none"> • Für Projektvorhaben nicht relevant • Einfluss des Umformdrucks auf Abkühlverhalten des Bauteils • Einfluss der Spülluft auf das Abkühlverhalten der Innenseiten des Bauteils • Umsetzung zur Beeinflussung der Spülluftmenge, des Werkzeugdruck während der Bauteilkühlung
<p>WO 2006/096460 A1; Blow Air Control System; 2006 [4/9]</p> <p>Aus Recherche des Patent- und Markenamtes</p>		<ul style="list-style-type: none"> • Für Projektvorhaben nicht relevant • Regelung des Umformdruckes für günstiges Umformen des Vorformlings • Regelung des sich einstellenden Werkzeugdruckes für optimalen Wärmeübergang zu den Werkzeugflächen

Anlage 2: Möglichkeit zur Umsetzung einer pneumatischen Steuerung

Als Grundlage dient der Pneumatikschaltplan der Anlage Bekum BM 101D [2/1] (vgl. Abbildung 3).



Anlage 3: Universeller Logikplan des Einsparmoduls



Ersteller: Geprüft:	zid	Projekt: Anlage:	Blasformen Vorbereit.	Kunde Zeichen.Nr.:	Trassl
Erstellt/Geändert:	02.02.10 13:26:03 11-10 08:11	Datell:	Steuerung Logikplan Isc	Seite:	1 / 1

Anlage 4: Auswahlalgorithmus für die ideale Speichergröße

Für die Auswahl des geeigneten Druckluftspeichers für einen bestimmten Anwendungsfall sind nacheinander die Schritte 1 bis 3 abzuarbeiten. Im Vorfeld sind folgende Daten beim Kunden zu erfragen:

- Bauteilspektrum in l
- Blasdruck p_{WKZ} in bar
- Losgrößen n der einzelnen Bauteile
- Zulässige Klasse der Prüfzeiten

Schritt 1:

Zunächst wird anhand der Losgrößen des größten herzustellenden Bauteils das maximale Gesamteinsparpotential ermittelt. Die Auswahl wird in Abbildung 24 getroffen. Am Schnittpunkt der Losgröße und des maximalen Gesamteinsparpotentials ist das Volumenverhältnis abzulesen. Daraus wird nach Gleichung (8) das Volumen des Druckluftspeichers berechnet.

Schritt 2:

Für die Einordnung des gewählten Druckluftspeichers in die Klasse der notwendigen Prüfzeiten wird zunächst ermittelt, welcher maximale Druck im Druckluftspeicher zu erwarten ist. Dies kann rechnerisch durch Gleichung (22) ermittelt werden.

$$p_{DS_max} = p_{WKZ} \cdot \frac{(1+k)^2}{1+4k+2k^2} \quad (22)$$

Entsprechend des maximal zu erwartenden Speicherdrucks p_{DS_max} ist der nächstgrößere Standardwert des zulässigen Speicherdrucks gemäß des Produktionsprogramms von Druckbehälterherstellern auszuwählen. Das Produkt des Speichervolumens und zulässigem Speicherdruck ergibt die Klasse der notwendigen Prüfzeiten nach Abbildung 18. Liegt die so ermittelte Klasse nicht im Bereich des Kundenwunsches, ist der Schritt 1 mit einem kleineren Volumenverhältnis zu wiederholen. Alternativ können mehrere kleinere Druckspeicher zu einem Speichersystem verrohrt werden, um die Prüfzeiten zu umgehen.

Schritt 3:

Die so gewählte Größe des Druckluftspeichers ist nun mit den lieferbaren Größen der Lieferanten für Druckbehälter zu vergleichen und gegebenenfalls an diese anzupassen, um kostenintensive Sondergrößen zu vermeiden.

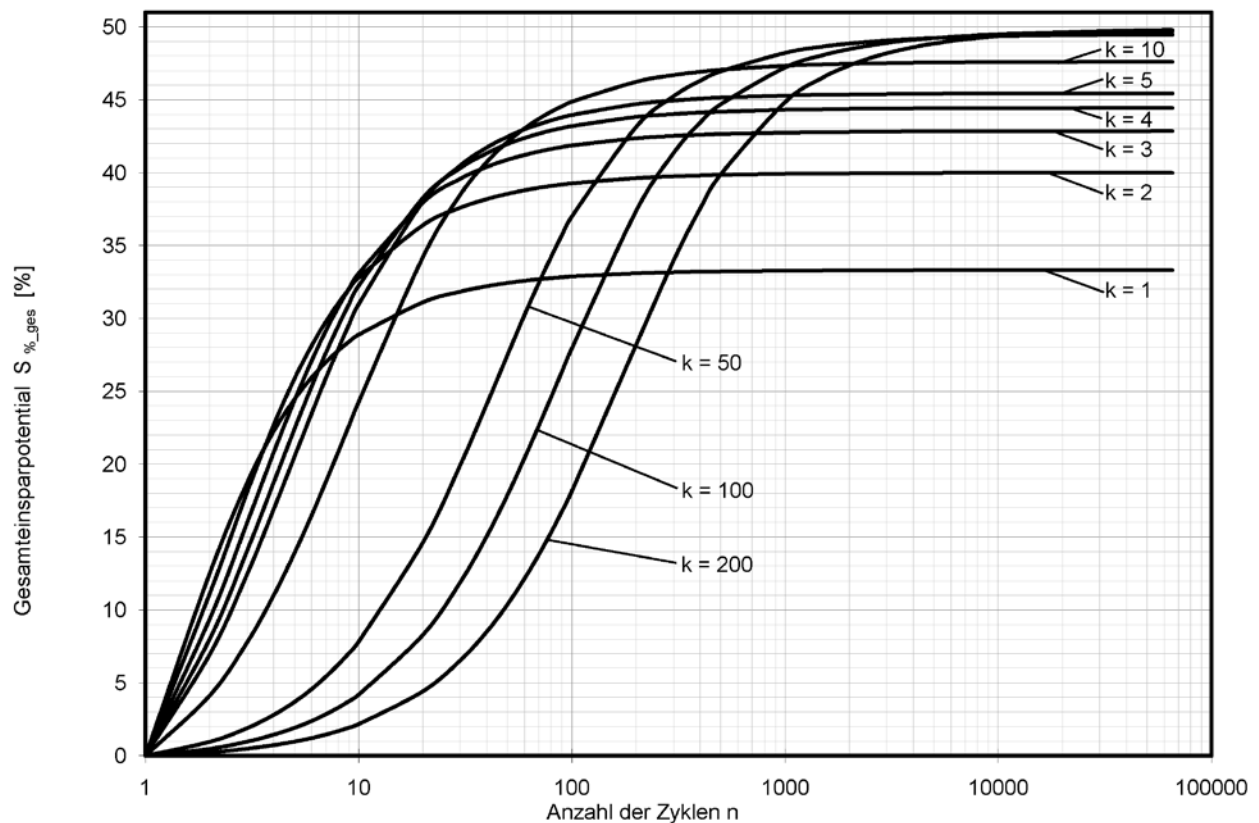


Abbildung 24: Gesamteinsparpotential $S_{\%_ges}$ in Abhängigkeit von Volumenverhältnis k und Losgröße n

Als Hinweis ist zu erwähnen, dass die in Abbildung 24 dargestellten Gesamteinsparpotentiale rechnerisch ermittelt wurden. Der Grund dafür ist, dass in den durchgeführten Versuchsreihen nicht genügend Daten für eine solche Graphik aufgenommen werden konnten. Die tatsächlichen Gesamteinsparpotentiale sind bei geschätzten 75 % der Werte aus der Graphik zu erwarten.

Anlage 5: Protokoll der thermogravimetrischen Analyse des Abluffilters**Thermische Analyse**

Auftraggeber: Dipl.-Ing. D. Zipplies

(DZ01/2010)

Proben: GF-Filter_neu, GF-Filter_gebrochen, Abl_Filterauf



GF-Filter_neu



GF-Filter_gebrochen



Abl_Filterauf

Messgeräte: 1) Thermo Mikrowaage TG 209 F1 Iris® der Firma Netzsch

Messparameter: 25... 800 °C mit einer Heizrate von 20 K min⁻¹/ 25 mL He-Strom/
Al₂O₃-Tiegel/

Probenpräparation: Proben wurden aus den entsprechenden Filtern ausgeschnitten,
die Ablagerung an der Filteraufnahme wurde als Feststoff ent-
nommen

Bei der thermogravimetrischen Analyse wurden die Proben in einem Ofen einem kontrollierten Temperaturprogramm unterworfen und beobachtet, wie sich das Gewicht der Proben in diesem Temperaturfenster verhält. Wenn sich die Probe bei einer bestimmten Temperatur zersetzt, entweichen diese Abbauprodukte als Gas und das Gewicht der Probe nimmt folglich ab. Da unter Schutzgas (hier: Helium) gemessen wurde, findet pyrolytische Zersetzung statt. Der temperaturstabile Anteil der Probe bleibt im Tiegel zurück. Vor jeder Messung wurde jede Probe einem Evakuier- und Helium-Spülzyklus (ca. 15 min) unterworfen, um den Probenraum von Luft zu befreien, damit neben der Pyrolyse keine zusätzliche Verbrennung durch Luftsauerstoff stattfindet.

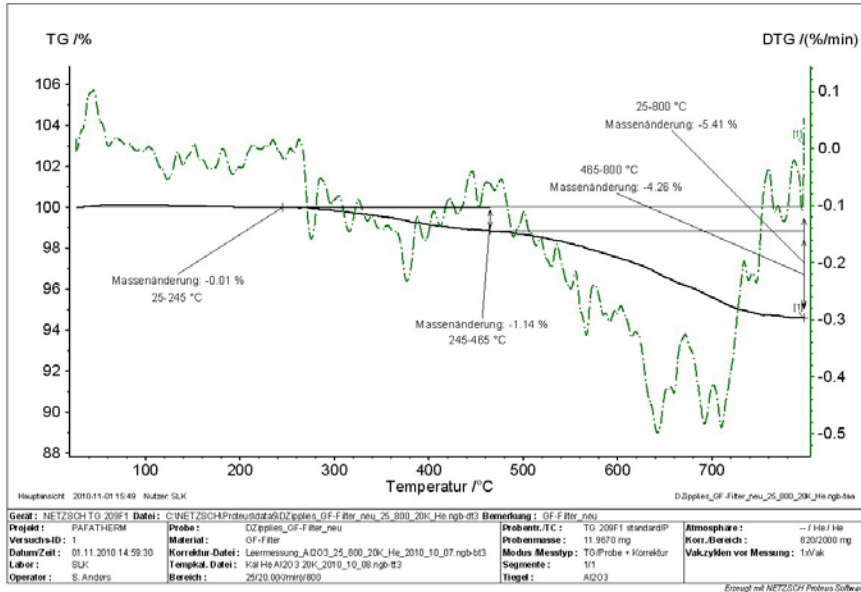
Auswertung:

Die TG-Thermogramme und die entsprechenden Kurven der 1. Ableitung zeigen, dass die Proben im Temperaturbereich von 25–800 °C einen Masseverlust von 5.4 Masse% (GF-Filter_neu), 16.6 Masse% (GF-Filter_gebrochen) und 73.8 Masse% (Abl_Filterauf) aufweisen. Bei der Probe GF-Filter_neu kann die beobachtet Masseabnahme auf die Pyrolyse enthaltener Schlichte- sowie Verarbeitungshilfsmittel zurückgeführt werden. Im Vergleich dazu wird im TG-Thermogramm der Probe GF-Filter_gebrochen ein signifikant höherer Masseverlust verzeichnet, wobei das Maximum der Masseverluststufe bei 245 °C liegt. Dies spricht für das Vorliegen weiterer organischer Komponenten, wobei aufgrund des Anwendungsbereiches der Glasfaser-Filter insbesondere Paraffine bzw. Paraffinöle in Betracht gezogen werden. Eine exakte Zuordnung der Masseverluststufe kann lediglich durch Vergleichsmessungen bekannter Paraffine bzw. Paraffinöle erfolgen.

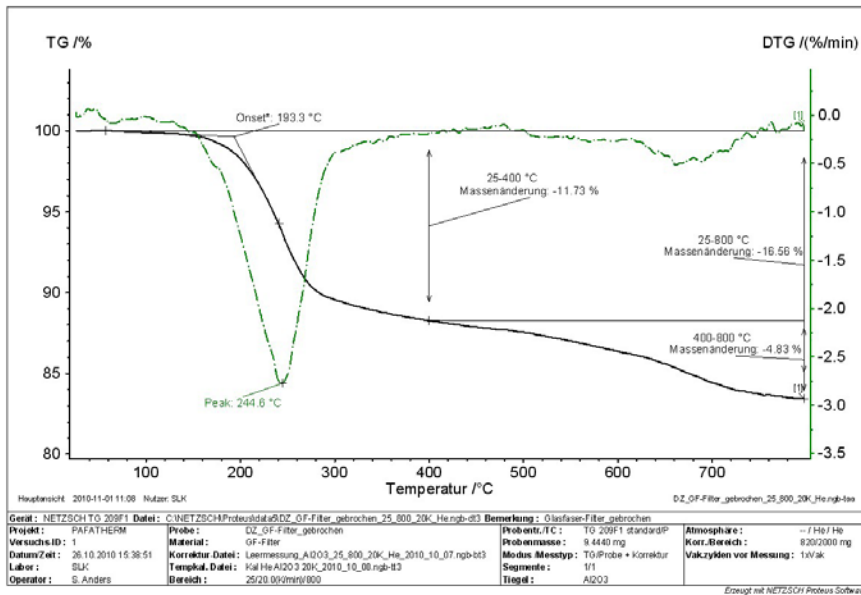
Des Weiteren wurde die schwarze Ablagerung an der Filteraufnahme (siehe Foto) thermogravimetrisch untersucht. Das Maximum der Masseverluststufe ist mit 413 °C, im Vergleich zur Probe GF-Filter_gebrochen, ca. 31 °C niedriger. Dies könnte entweder auf das Vorliegen eines anderen Schmiermittels hinweisen oder auf eine teilweise vorliegende Degradation der Paraffine bzw. Paraffinöle zurückgeführt werden.

Mit Hilfe der TG-Analysen konnte das Vorliegen von Paraffinen bzw. Paraffinölen in den gebrochenen Glasfaser-Filtern festgestellt werden. Aussagen zur Ursache für den beobachteten Verschleiß der Filter (Bruch), können mit Hilfe der Thermogravimetrie nicht getroffen werden. Allerdings werden Paraffine im Allgemeinen als Verarbeitungshilfsmittel bzw. Weichmacher eingesetzt, weshalb eine Versprödung der Filter durch die Paraffinablagerungen eher ausgeschlossen wird. Als Bruchursache könnte auch ein zu hoher Gasdruck in Betracht gezogen werden. Nähere Aussagen dazu könnten mit Hilfe von Testversuchen (Variation des Gasdruckes) erhalten werden.

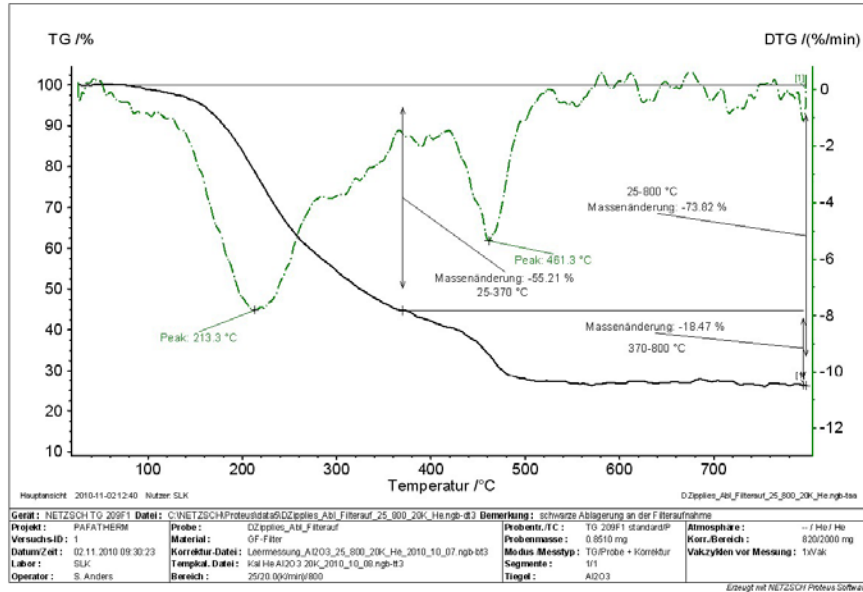
TG-Thermogramm der Probe GF-Filter_neu:



TG-Thermogramm der Probe GF-Filter_gebrochen:



TG-Thermogramm der Probe Abl_Filterauf:



Anlage 6: Berechnung der spezifischen Energieeinsparung bei einer durchschnittlich erreichbaren 30%-igen Blasluftreduzierung

- Mögliche durchschnittlich Einsparung durch das Sparmodul: $S_{\%} = 30\%$
- Typischer Wirkungsgrad eines Kompressors: $\eta_{\text{Komp}} = 30\%$

notwendige pneumatische Energie:

$$E_{\text{pneu}} = p_{\text{WKZ}} \cdot V_{\text{BT}} \quad (23)$$

notwendige elektrische Energie:

$$E_{\text{elektr}} = \frac{E_{\text{pneu}}}{\eta_{\text{Komp}}} = \frac{p_{\text{WKZ}} \cdot V_{\text{BT}}}{30\%} \quad (24)$$

eingesparte elektrische Energie:

$$E_{\text{spar}} = E_{\text{elektr}} \cdot S_{\%} = \frac{p_{\text{WKZ}} \cdot V_{\text{BT}}}{30\%} \cdot S_{\%}$$

$$E_{\text{spar}} = \frac{1}{30\%} \times 10^5 \times 10^{-3} \frac{\text{J}}{\text{bar} \cdot \text{l}} \cdot p_{\text{WKZ}} \cdot V_{\text{BT}} \cdot S_{\%}$$

$$E_{\text{spar}} = \frac{1}{30\%} \frac{\text{J}}{\text{bar} \cdot \text{l}} \cdot p_{\text{WKZ}} \cdot V_{\text{BT}} \cdot S_{\%} = \frac{1}{30\%} \frac{\text{J}}{\text{NI}} \cdot V_{\text{N}} \cdot S_{\%} \quad (25)$$

$$E_{\text{spar}} = 100 \frac{\text{J}}{\text{bar} \cdot \text{l}} \cdot p_{\text{WKZ}} \cdot V_{\text{BT}} = 100 \frac{\text{J}}{\text{NI}} \cdot V_{\text{N}} \quad (26)$$

→ Es können je Bar Umformdruck und Liter Bauteilvolumen bzw. je für den Formgebungsprozess erforderlichen Normliter bei einer Blasluftreduzierung um $S_{\%} = 30\%$ eine elektrische Energie von $E_{\text{spar}} = 100 \text{ J}$ eingespart werden.

Anlage 7: Verbrauchsdaten der Trassl-Plastik GmbH & Co. KG

FLASCHEN • KANISTER • TECHNISCHE PRODUKTE • SIEBDRUCK • WERKZEUGBAU



Trassl-Plastik GmbH & Co. KG, Kulmainer Str. 44, 95505 Immenreuth

Steinbeis-Transferzentrum
Antriebs- und Handhabungstechnik
im Maschinenbau
Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Eberhard Köhler
Annaberger Straße 240
09125 Chemnitz

Ihre Zeichen, Ihre Nachricht vom

Unsere Zeichen, unsere Nachricht vom
AS/SL

Telefon, Name
DW -0; Axel Sieber

Datum
13.01.06

Kompressor-Leistung

Sehr geehrter Herr Prof. Dr. Köhler,

im Folgenden erhalten Sie die gewünschten Informationen:

Kompressor	Leistung	Nutzen
ESB 250	130 kW	21 m ³ /min
CS 90	55 kW	7,8 m ³ /min
CS 110	75 kW	10,2 m ³ /min

Die jährliche Nutzung beträgt ca. 5.500 Stunden, wobei sich ein Nutzen von 13 Mio. m³ ergibt.

Bei Rückfragen stehen wir Ihnen selbstverständlich gerne zur Verfügung.

Mit freundlichen Grüßen
Trassl-Plastik GmbH & Co. KG

Axel Sieber
Geschäftsführer

Anlage 8: Berechnung der Druckluft-, Energie- und CO₂-Ausstoßreduzierung bei Trassl-Plastik GmbH & Co. KG

- Die Firma Trassl-Plastik GmbH & Co. KG hat für die Druckluftversorgung der 25 Blasformanlagen Kompressoren mit einer Anschlussleistung von insgesamt 260 kW im Betrieb.
- Unter der Annahme, dass 30% dieser Leistung für die Erzeugung der Blasluft zur reinen Formgebung des Bauteils genutzt werden und wiederum 30% dieser Leistung eingespart werden können, ist eine Reduzierung der Anschlussleistung um 23,4 kW möglich.
- Bei einer Betriebszeit der Kompressoren von 5500 h pro Jahr ergibt sich eine mögliche Energiereduzierung um 128.700 kWh. Dies entspricht laut Gleichung (27) einer Verminderung des jährlichen CO₂- Ausstoßes um 46 t.

$$1 \text{ TJ} = 100 \text{ t CO}_2 \quad (27)$$

- Durch die Umrüstung aller Anlagen können zudem die jährlichen Produktionskosten um 16.731,- € gesenkt werden, wenn die Kosten für 1 kWh mit 0,13 € angesetzt werden.

Anlage 9: Berechnung der Druckluft-, Energie- und CO₂-Ausstoßreduzierung bei ESDA Kunststofftechnik GmbH

- Die Firma ESDA Kunststofftechnik GmbH betreibt für die Druckluftherzeugung einen Kompressor mit einer Anschlussleistung von 35 kW und produziert in 3 Schichten an rund 330 Tagen im Jahr
- Folglich benötigt EDSA jährlich ca. 277.200 kWh an elektrischer Energie für die Druckluftaufbereitung
- Nahezu die gesamte Druckluft wird bei ESDA als Blasluft für den Umformprozess genutzt
- Durch das Einsparmodul kann der Blasluftverbrauch um 30% reduziert werden
→ Bei einer Umrüstung aller Blasformanlagen würde die Firma ESDA jährlich 83.160 kWh an elektrischer Energie einsparen.
- Somit kann bei ESDA der CO₂-Ausstoß um 29,9 t pro Jahr verringert werden