

druckluft-technik Chemnitz GmbH

**Energetische Optimierung des Druckluftformprozesses**  
- Experimentalstudie -

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

von

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

November 2008

**Projektkennblatt der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt**



AZ	<b>24398-22</b>	Referat	Fördersumme	<b>123.495,00 €</b>
<b>Antragstitel</b>		<b>Energetische Optimierung des Blasformprozesses</b>		
<b>Stichworte</b>		Energie, Abluft, Blasformen		
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)	
<b>20</b>	<b>13.03.07</b>	<b>13.11.08</b>	<b>2</b>	
Zwischenberichte	1			
<b>Bewilligungsempfänger</b>	druckluft-technik Chemnitz GmbH		Tel 0 37 22 / 50 01 23	
	Goetheweg 20		Fax 0 37 22 / 50 01 58	
	09247 Chemnitz-OT Röhrsdorf		Projektleitung Steffen Baldauf	
			Bearbeiter	
<b>Kooperationspartner</b>	Steinbeis Transferzentrum für Antriebs- und Handhabungstechnik Chemnitz Albert-Jentzsch-Straße 75 09127 Chemnitz			

### ***Zielsetzung und Anlass des Vorhabens***

Zielsetzung des Forschungsvorhabens ist die Entwicklung eines Produktes, mit dessen Hilfe Energie beim Druckluftumformen eingespart werden kann. Das Produkt soll ohne größeren Aufwand am Druckluftformwerkzeug zu applizieren sein.

Die Dimensionen des Produktes können durch die verschiedenen Parameter variieren. Demnach wird das Endergebnis eine Produktreihe sein, welche für verschiedene Einsatzfälle jeweils die optimale Lösung bietet

### ***Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden***

In der ersten Phase stehen die Verfahrensentwicklung und dessen Erprobung unter Labor- und Praxisbedingungen im Vordergrund.

Es werden die wissenschaftlichen und technischen Grundlagen geschaffen. Mit Hilfe kleintechnischer Versuche soll getestet werden, welche Möglichkeiten und Varianten existieren, die gebrauchte Blasluft zu recyceln. Der Lösungsansatz wird in der Speicherung der zum Formen genutzten Prozessluft und deren Zuführung zum darauf folgenden Formprozess für das Vorformen gesehen. Ein weiterer Lösungsansatz ist die Wiederaufbereitung der Prozessluft und deren Zuführung in das Betriebsnetz. Erfolgversprechende Lösungen werden in einem Versuchsstand realisiert und unter Praxisbedingungen getestet. Auf Basis der gewonnenen Erfahrungswerte kann ein umfassendes Pflichtenheft verfasst werden. Ziel ist es, am Ende der ersten Phase Kenntnisse über die Wirtschaftlichkeit der favorisierten Varianten vorliegen zu haben, sowie diese auch technisch an einer Pilotanlage realisiert und die Funktionsweise bestätigt zu haben.

In der zweiten Phase werden neue Produkte entwickelt. Diese Produkte sollen die Kompatibilität zu den verschiedenen Druckformverfahren und deren Parameter gewährleisten. Dadurch wird die Integration der neuen Produkte in verschiedenste Maschinen- und Anlagentechnik gewährleistet.

Die Dimensionen der Produkte sind abhängig vom Blasvolumen und des realisierten Wirkprinzips.

## ***Ergebnisse und Diskussion***

Zu Beginn des Projektvorhabens erfolgte eine ausführlichen Literatur- und Patentrecherche zum Stand der Technik der Anlagentechnik sowie existierender Einsparmöglichkeiten beim Druckluftformen. Im Anschluss wurde beim Kooperationspartner Trassl-Plastik GmbH & Co. KG eine tiefgründige Prozessanalyse des Blasformverfahrens durchgeführt. Aus den daraus gewonnenen Erkenntnissen konnten Randbedingungen zur Durchführung von Einsparmaßnahmen festgelegt werden. Darauf aufbauend wurden zusammen mit dem Steinbeis-Transferzentrum für Antriebs- und Handhabungstechnik im Maschinenbau und der Technischen Universität Chemnitz verschiedene Lösungsansätze entwickelt. Eine theoretische Betrachtung der möglichen Einsparpotenziale und der technischen Umsetzbarkeit der Lösungsansätze sowie eine anschließende Gegenüberstellung der Ansätze führte zu einer Vorzugslösung. Dabei kristallisierte sich eine Variante heraus, durch welche die im Werkzeug nach dem Formprozess befindliche Blasluft zwischengespeichert und im darauffolgenden Prozesszyklus dem Werkzeug für einen Vorformprozess zugeführt wird. So ist lediglich die Differenz an Druckluft durch die Druckluftquelle für vollständiges Ausformen bereitzustellen. Der Lösungsansatz wurde an einem labortechnischen Versuchsstand umgesetzt und erfolgreich einem Funktionsnachweis unterzogen. Dabei war eine Reduzierung um 28,9% zur herkömmlich notwendigen Blasluftmenge zu verzeichnen. Des Weiteren konnte nachgewiesen werden, dass die entwickelte Einsparmaßnahme den derzeitigen Prozessverlauf bezüglich der Taktzeit nicht beeinflusst. Nach den positiven Labortests galt es, die Vorzugslösung unter Praxisbedingungen zu untersuchen, um mögliche Einflüsse auf die Bauteilqualität zu ermitteln. Hierzu wurde ein Prototyp eines Einsparmoduls konzipiert. Der auf ein Referenzprodukt und eine Referenzmaschine des Projektpartners Trassl-Plastik abgestimmte Prototyp wurde anschließend erfolgreich unter Praxisbedingungen getestet. Dabei konnte eine Einsparung von rund 20% der derzeit notwendigen Blasluftmenge erreicht werden. Weiterhin war bei den ersten Kurzzeittest keine Beeinflussung der Bauteilqualität festzustellen. Um Qualitätseinbußen auch bei einem Dauereinsatz des Einsparproduktes ausschließen zu können, wurde ein Langzeitversuch durchgeführt.

Die erreichten Ergebnisse erfüllen alle gestellten Randbedingungen für die Durchführung der Einsparmaßnahme. Des Weiteren wurden ebenfalls die Auflagen zur Fortführung des Projektvorhabens in einer Projektphase II (technische Umsetzung) erfüllt. Auf Grundlage der erreichbaren Reduzierung des Druckluftverbrauchs beim Druckluftformen und der damit möglichen Umweltentlastung, wird empfohlen, die Entwicklungen zu einem vermarktungsfähigen Produkt fortzusetzen.

## ***Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation***

Die erreichten Projektergebnisse wurden bereits verschiedenen Geschäftspartnern und Interessen zum Messeauftritt bei der Sächsischen Industrie- und Technologiemesse (SIT) vorgestellt. Auf diesem Wege konnte mit der ESDA Kunststofftechnik bereits ein weiterer Interessent für ein Einsparmodul gewonnen werden. Des Weiteren wurde das Projekt in der DBU-Broschüre „Energie effizient – Wie Industrie und Gewerbe Energie sparen können“ vorgestellt. Zusätzlich sind Prospektmaterialien mit detaillierten Informationen sowie eine Vorstellung der Einsparmöglichkeit in dem vorhandenen Internetauftritt angedacht. Nach Abschluss des Projektes sind außerdem Veröffentlichungen in der lokalen Presse sowie in Fachzeitschriften vorgesehen. Eine Veröffentlichung im Steinbeismagazin „Transfer“ derzeit in Vorbereitung.

## ***Fazit***

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurde eine Einsparmaßnahme zur Reduzierung der Blasluft beim Druckluftformen entwickelt. Der Funktionsnachweis konnte anhand von labortechnischen Untersuchungen an einem Versuchsstand sowie in Praxistests mit einem Prototyp eines Einsparmoduls erbracht werden. Es wurde eine Eingliederungsmöglichkeit entwickelt, welche den herkömmlichen Blasformprozess nur unwesentlich beeinflusst und die bisherige Bauteilqualität trotz leichter Veränderungen des Prozessablaufs beibehält. Bei dem Einsatz des Prototypen des Einsparmoduls konnte eine Reduzierung von 20% der herkömmlich benötigten Blasluft festgestellt werden. Dies entspricht je nach Druckluftformverfahren einer möglichen Einsparung von bis zu 66,7 J pro Liter Fassungsvermögen und bar Umformdruck eines blasgeformten Bauteils.

Somit wurden die geforderten Randbedingungen zur Eingliederung des entwickelten Einsparmoduls in den herkömmlichen Blasformprozess sowie die Forderungen zur Fortführung des Forschungsvorhabens erfüllt. Eine Weiterentwicklung des Einsparmoduls zu einem vermarktungsfähigen Produkt ist anstrebenswert und wird beantragt. So ist es möglich, eine Vielzahl von Blasformanlagen energiereduziert betreiben zu können und somit die Umwelt maßgeblich zu entlasten.

## Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis .....	3
Abbildungsverzeichnis .....	4
Kurzzeichenverzeichnis .....	5
Zusammenfassung .....	6
Einleitung .....	7
Hauptteil.....	9
1 Recherche Stand der Technik .....	9
1.1 Verfahrensbeschreibung .....	9
1.2 Patentsituation .....	10
2 Analyse des Blasformprozesses .....	11
2.1 Prozessablauf der Referenzmaschinen .....	11
2.2 Verwendung von Druckluft beim Druckluftformverfahren.....	14
2.3 Randbedingungen für Prozesseingriffe .....	14
3 Ermittlung der derzeitigen Verfahrens- und Anlagenparameter.....	15
4 Erarbeitung von Lösungskonzepten .....	18
5 Lösungsauswahl .....	20
6 Labortechnischer Funktionsnachweis des Lösungsansatzes .....	23
6.1 Versuchsstand zum Funktionsnachweis des Lösungsansatzes .....	23
6.2 Durchführung der labortechnischen Untersuchungen.....	25
7 Umsetzung der Versuchsstandergebnisse beim Praxispartner .....	30
7.1 Entwicklung eines Prototypen des Einsparmoduls .....	30
7.2 Einsatz der Lösung unter Praxisbedingungen.....	31
7.3 Erreichbare Umweltentlastung durch Anwendung eines Sparmoduls .....	39
8 Wirtschaftliche Betrachtungen.....	40
9 Erstellung eines Pflichtenheftes für eine spätere Produktreihe.....	41
10 Maßnahmen zur Verbreitung der Ergebnisse .....	43
Fazit .....	44
Literaturverzeichnis .....	45
Anlagenverzeichnis .....	46

## Abbildungsverzeichnis

### Abbildungen:

Abbildung 1: Referenzmaschine Typ BEKUM BM 303D .....	11
Abbildung 2: Prozessablauf der Referenzmaschinen .....	12
Abbildung 3: Ausschnitt des Pneumatikschaltplans BM 101D [2/1].....	13
Abbildung 4: Referenzprodukte 0,5-Liter-Behälter (links), 2-Liter-Behälter (rechts) .....	15
Abbildung 5: Lösungsansatz direkte Rückführung der Blasluft zum Formprozess.....	18
Abbildung 6: Lösungsansatz indirekte Rückführung der Blasluft zum Formprozess .....	19
Abbildung 7: Pneumatikschaltplan der Versuchseinrichtung .....	23
Abbildung 8: Versuchstand zum Funktionsnachweis der Lösungsvarianten [6/1].....	24
Abbildung 9: Geänderter Pneumatikschaltplan der Referenzmaschine .....	30
Abbildung 10: Prototyp des Sparmoduls zur Prozessrückführung der Blasluft.....	31
Abbildung 11: Umgerüstete Blasformanlage KAUTEX KEB 5-10.....	37

### Diagramme:

Diagramm 1: Werkzeugdruck-/ Volumenstromverlauf 0,5-Liter-Flasche [6/1] .....	16
Diagramm 2: Druckverläufe der Variante 1 über einen Prozesszyklus [6/1].....	26
Diagramm 3 : Druckverläufe der Variante 1 über mehrere Prozesszyklen [6/1].....	27
Diagramm 4: Vergleich der Werkzeugdruckverläufe unterschiedlicher Zyklen (Variante 1) [6/1].....	28
Diagramm 5: Druck- und Volumenstromverläufe Blasformanlage original / umgerüstet .....	32
Diagramm 6: Auszug aus Diagramm 5 – Vorformprozess.....	33
Diagramm 7: Druck- und Volumenstromverläufe Blasformanlage original / umgerüstet (ESDA).....	38

### Tabellen:

Tabelle 1: Übersicht Druckluftverbrauch bei Referenzprodukten.....	17
Tabelle 2: Übersicht der theoretisch möglichen, prozentualen Einsparung der Einsparvarianten .....	21
Tabelle 3: Prozentuale Einsparung .....	35
Tabelle 4: Materialkosten für Einsparmodul vom Stand des Prototypen .....	40
Tabelle 5: geschätzte Materialkosten für das vermarktungsfähige Einsparmodul.....	41
Tabelle 6: Druckverläufe von Werkzeug und Druckspeicher über mehrere Zyklen.....	56
Tabelle 7: Druckverlauf des Druckspeichers ohne zwischenzeitlicher Entlüftung .....	57

**Kurzzeichenverzeichnis**

<b>Kurzzeichen</b>	<b>Maßeinheit</b>	<b>Bezeichnung</b>
$E_{\text{ant}}$	J, kWh	Antriebsenergie
$E_{\text{elktr}}$	J, kWh	elektrische Energie
$E_{\text{pneu}}$	J, kWh	pneumatische Energie, Druckenergie
$E_{\text{spar}}$	J, kWh	eingesparte Energie
$E_{\text{umf}}$	J, kWh	nach dem Umformprozess im Werkzeug vorhandene Energie
$E_{\text{vorf}}$	J, kWh	nach dem Vorformprozess im Werkzeug vorhandene Energie
$i$	-	Laufparameter für die Anzahl der Prozesszyklen
$m$	kg	Masse
$p$	bar	Druck
$p_{\text{ant}}$	bar	Mindestdruck für pneumatischen Antrieb
$p_{\text{DS}}$	bar	Druck des Druckspeichers
$p_{\text{max}}$	Bar	maximaler Werkzeugdruck
$p_{\text{min}}$	bar	Mindestarbeitsdruck eines Druckluftmotors
$p_{\text{umf}}$	bar	Umformdruck
$p_{\text{vorf}}$	bar	Vorformdruck
$p_{\text{WKZ}}$	bar	Werkzeugdruck
$Q$	l/min	Volumenstrom in Normliter pro Minute
$R_s$	J/(kg·K)	Spezifische Gaskonstante
$t$	s	Zeit
$t_1$	s	untere Grenze des Integrals
$t_2$	s	obere Grenze des Integrals
$\Delta t$	s	Zeitdifferenz
$V_B$	l	Bauteilvolumen
$V_{\text{DS}}$	l	Volumen des Druckspeichers
$V_V$	l	Verbrauchtes Druckluftvolumen
$V_{\text{vorf}}$	l	Bauteilvolumen nach Vorformprozess
$V_{\text{VR}}$	l	reduziertes Druckluftvolumen

## Zusammenfassung

Das Blasformen ist ein hochproduktives Verfahren zur Herstellung von Kunststoffhohlkörpern. Bauteile dieser Art sind aus der Verpackungsindustrie von Konsumgütern (z.B. PET-Getränkeflaschen) nicht mehr wegzudenken. Aber auch für technische Produkte finden Kunststoffhohlkörper immer häufiger Anwendung. Von Nachteil ist bei diesem Fertigungsverfahren der hohe Energieaufwand, welcher im Wesentlichen auf den hohen Druckluftverbrauch beim Ausformen (übliche Umformdrücke  $p = 8 - 40$  bar) des Bauteils zurückzuführen ist. Im Rahmen einer durch die Deutschen Bundesstiftung Umwelt geförderte Experimentalstudie (AZ 24398) wurden Maßnahmen entwickelt, die Blasluft beim Formprozess zu reduzieren. Ziel des Forschungsvorhabens war es, vorhandene Blasformanlagen mit Hilfe eines zu entwickelnden Einsparmoduls umzurüsten, um diese energieeffizienter und dadurch umweltfreundlicher betreiben zu können. Nach einer ausführlichen Literatur- und Patentrecherche folgte beim Kooperationspartner Trassl-Plastik GmbH & Co. KG eine tiefgründige Prozessanalyse des Blasformverfahrens. Zusammen mit dem Steinbeis-Transferzentrum für Antriebs- und Handhabungstechnik im Maschinenbau und der Technischen Universität Chemnitz wurde aus den Erkenntnissen der Analyse des Blasformprozesses ein Lösungsansatz entwickelt. Die Grundidee ist, die nach dem Umformvorgang im Bauteil befindliche energiereiche Druckluft dem Prozess zurückzuführen, statt wie derzeit, gegen die Atmosphäre zu entlüften. Aufbauend auf diesem Lösungsansatz wurden verschiedene Varianten zur Umsetzung entwickelt, deren theoretisch möglichen Einsparpotenziale ermittelt sowie die technische Umsetzung geprüft. Eine Gegenüberstellung der Varianten führte zu einer Vorzugslösung, welche mit Hilfe eines labortechnischen Versuchstandes einem ersten Funktionsnachweis unterzogen wurde. Folgend galt es, einen Prototypen eines Einsparmoduls zu konzipieren. Der auf ein Referenzprodukt und eine Referenzmaschine des Projektpartners Trassl-Plastik abgestimmte Prototyp wurde anschließend erfolgreich unter Praxisbedingungen getestet. Dabei konnte eine Einsparung von 20% der herkömmlich benötigten Blasluft festgestellt werden. Des Weiteren gelang es, die geforderten Randbedingungen, wie Beibehaltung von Bauteilqualität und Taktzeit einzuhalten.

Eine Fortführung des Forschungsvorhabens wird aufgrund des erfolgreichen Projektverlaufs für zwingend erforderlich gehalten. Es gilt dabei, die industrielle Nutzung des Einsparmoduls durch die Entwicklung eines serienreifen Produktes zu sichern. Dafür ist das Einsparmodul weiter zu optimieren und zu standardisieren. So wird es künftig möglich sein, im großen Umfang vorhandene Blasformanlagen energieoptimiert und umweltfreundlich betreiben zu können. Bereits bei einer Umrüstung von 20% der in Deutschland betriebenen Blasformmaschinen ist mit einer Energieeinsparung von 20 Mio. kWh elektrischer Energie und einer Reduzierung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes um 7400 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 Vorform-erzeugung, Ausformung des Bauteils und Kühlung des Bauteils auf. Vor allem zur Ausformung des Bauteils werden derzeit enorme Mengen an Druckluft benötigt. 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.

Ziel dieses Projektvorhabens war es daher, Möglichkeiten aufzuzeigen, bestehende Druckluftformanlagen mit einem geringen Umrüstaufwand energieoptimiert betreiben zu können. Damit eine spätere Umrüstung für Anwender attraktiv ist, sind folgende Randbedingungen zu berücksichtigen. Absolute Priorität liegt dabei auf der Beibehaltung der bisherigen Bauteilqualität sowie auf einem möglichst stabilen Herstellungsprozess. Des Weiteren sind Taktzeitverlängerung aufgrund der Umstellung auf einen energieoptimierten Betrieb zu vermeiden. Darüber hinaus sollte durch die zu entwickelnde Einsparmaßnahme eine Reduzierung von mindestens 20% des bisher für den Formprozess notwendigen Druckluftverbrauchs erreicht werden. Ebenso ist es anzustreben, dass die Kosten für die Umrüstmaßnahme nach zwei Jahren durch den verringerten Energieverbrauch amortisiert werden.

Um die aufgeführten Ziele zu erreichen, wurde das Projektvorhaben wie folgt durchgeführt:

Nach einer grundlegenden Patent- und Literaturrecherche wurde der Stand der Technik aufgezeigt. Eine anschließende Analyse des Druckluftformprozesses sowie die Ermittlung von Verfahrens- und Anlagenparameter beim Projektpartner und Anwender des Druckluftformverfahrens Trassl-Plastik GmbH & Co. KG soll mögliche Lösungsansätze aufzeigen. Darauf aufbauend waren verschiedene Lösungskonzepte zu erarbeiten. Diese sind in der Folge auf deren theoretisches Einsparpotential und technische Umsetzbarkeit geprüft worden. Nach einer Gegenüberstellung der entwickelten Lösungsvarianten wurde eine Vorzugslösung festgelegt und anschließend mit Hilfe eines Versuchstandes unter Laborbedingungen einem Funktionsnachweis unterzogen. Dabei galt es, die theoretisch ermittelten Einsparpotentiale zu bestätigen. Nach den erfolgreichen labortechnischen Untersuchungen, wurde das Lösungskonzept durch einen Prototyp des möglichen Einsparmoduls

umgesetzt. An einer Referenzmaschine bei Trassl-Plastik war der Prototyp unter Praxisbedingungen zu testen und die erreichbare Druckluftreduzierung zu ermitteln. In der darauffolgenden Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurde geprüft, ob die anfallenden Kosten für eine Anlagenumrüstung durch die reduzierten Energiekosten nach einem angemessenen Zeitraum amortisiert werden. Nach einem erfolgreichen Projektverlauf galt es abschließend, auf Basis der Ergebnisse und Erkenntnisse ein Pflichtenheft für das Einsparmodul zu erarbeiten. In diesem wurden grundlegende Randbedingungen und Forderungen für eine Produktentwicklung im Rahmen eines weiteren Projektes festgehalten.

## Hauptteil

### 1 Recherche Stand der Technik

#### 1.1 Verfahrensbeschreibung

Das Kunststoffdruckluftformen ist ein weit verbreitetes Fertigungsverfahren zur Herstellung von hohlen Kunststoffbauteilen. Insbesondere aus der Verpackungsindustrie (Getränkeflaschen, Jogurtbecher, etc.) und zunehmend auch bei der Erzeugung technischer Teile, wie z.B. Lüftungskanäle, Tanks oder Faltenbälge, ist das Druckluftformverfahren heutzutage nicht mehr wegzudenken.

Bei diesem Herstellungsverfahren werden mit Hilfe von Druckluft kautschukelastische Kunststoffvorformen in einem Werkzeug aufgeweitet und durch Anpressen des Kunststoffes an die Werkzeuginnenkontur die gewünschte Bauteilgeometrie erzeugt.

Ein Vorteil des Druckluftformens ist die hohe Flexibilität dieses Verfahrens. Die Umformkräfte können sehr einfach über den eingesetzten Druck festgelegt werden. Der Druckbereich bewegt sich dabei zwischen 4 bis 40 bar. Ein weiterer großer Freiheitsgrad besteht in der Größe der hergestellten Formteile. Es sind Bauteilvolumina von 10 ml bis hin zu 13000 l mit diesem Verfahren realisierbar.

Neben dieser Flexibilität besitzt dieses Verfahren weitere Vorteile, durch die es sich von konkurrierenden Verfahren, wie dem mechanische Formen, dem Vakuumformen oder dem Spritzgießen abgrenzt. In diesem Zusammenhang sind

- gleichmäßige Verteilung der Umformkräfte,
- gute mechanische Produkteigenschaften durch biaxiale Orientierung der Makromoleküle,
- qualitativ hochwertige Teile herstellbar,
- geringe Wanddicken möglich (<1 mm),
- höhere Maßhaltigkeit der Formteile,
- Formen von Hinterschnitten vergleichsweise einfach möglich (z.B. Flaschen)

zu nennen.

Einen sehr großen Nachteil besitzt das Druckluftformen jedoch im Bereich der Energieeffizienz. Wie bereits erwähnt, zeichnet sich das Wesen dieses Fertigungsverfahrens darin aus, dass die erforderlichen Umformkräfte durch Druckluft erzeugt werden.

Druckluft gilt als eines der teuersten Energiemedien. Dies beruht hauptsächlich auf deren verlustbehafteten Herstellung (typischer Wirkungsgrad: < 30%). Hinzu kommt, dass nach vollzogenem Formprozess die dazu verwendete Druckluft ungenutzt an die Umgebung abgeleitet wird. Der Nachteil gegenüber konkurrierender Verfahren liegt an dieser Stelle auf der Hand. Die energetischen Vorteile werden allerdings durch deren eingeschränkten Formenvielfalt und anderer Nachteile relativiert.

## 1.2 Patentsituation

Aufgrund der Tatsache, dass Druckluft einer der teuersten Energieträger ist und der Energieverbrauch infolge schwindender Energieressourcen zu einem immer bedeutenderen Faktor in der herstellenden Industrie wird, besteht in den unterschiedlichsten Anwendungsbereichen das Bestreben, Druckluft einzusparen. Auch die Hersteller von Druckluftformmaschinen und deren Anwender haben bereits verschiedene Konzepte zur Reduzierung des Druckluftverbrauchs entwickelt, was folgende Patente belegen.

In [4/1] wird ein Verfahren beschrieben, bei welchem die Prozessluft einer Streckblasmaschine nach dem Formvorgang einem Niederdruckluftnetz zugeführt wird. Die Maschine hat dabei einen Betriebsdruck von 25-40 bar. Die gespeicherte Druckluft mit Drücken von 10-25 bar wird anschließend für die Voraufweitung genutzt. Zudem wird der Vorschlag gemacht, gespeicherte Druckluft mit Drücken von 2-8 bar für die Speisung von pneumatischen Antrieben zu nutzen. Darauf aufbauend wird in der Patentschrift [4/2] eine Technologie beschrieben, welche sich speziell auf die Voraufweitung (Vorblasphase) mit Niedrigdruck von 10-25 bar und anschließender Hauptblasphase mit Hochdruck (25-40 bar) bezieht. Eine mögliche Umsetzung dieser Einsparmöglichkeit wird in [4/3] näher beschrieben. Lösungen für Streckblasmaschinen mit wesentlich geringeren Arbeitsdrücken (z.B. 8 bar) werden hingegen nicht genannt.

Auch in [4/4] wird eine Streckblasmaschine beschrieben, deren Prozessluft in einem Niederdruckluftnetz gespeist wird. Mit dieser gespeicherten Prozessluft sollen Positionierbewegungen und Voraufweitungen realisiert werden. Die Voraufweitung wird dabei mit Hilfe einer Reckstange realisiert. Die Besonderheit dabei ist, dass die Reckstange mit einem Pneumatikzylinder angetrieben wird, welcher die notwendige Druckluft aus dem Niederdruckluftnetz bezieht. Demnach wird auch bei diesem beschriebenen Verfahren die zweite Druckstufe für Antriebsaufgaben genutzt.

Eine weitere Streckblasmaschine wird in [4/5] beschrieben. Auch bei dieser wird vorgeschlagen, die Prozessluft zu speichern und für Antriebsaufgaben zu nutzen.

Ein sich auf das Thermoformen beziehendes Verfahren wird in [4/6] dargestellt. Darin wird ebenfalls das Lösungsprinzip des Zwischenspeicherns der Prozessluft aufgegriffen, um anschließend die gespeicherte Druckluft weiteren Verbrauchern mit geringerem Druckniveau zuzuführen. Da jedoch Thermoformmaschinen im Vergleich zum Blasformverfahren mit wesentlich niedrigeren Drücken arbeiten, ist die Weiternutzung der zwischengespeicherten Druckluft als kritisch zu sehen, da pneumatische Arbeitsorgane einen gewissen Mindestdruck voraussetzen. Auf diese Problematik wird jedoch in [4/6] nicht näher eingegangen.

Eine Übersicht der beschriebenen Patente kann der folgenden Anlage 1 entnommen werden.

Eine weiterführende Recherche ergab, dass die aufgeführten Möglichkeiten zur Reduzierung von Druckluft bei der Herstellung von hohlen Plastbauteilen ausschließlich den Maschinenherstellern und deren Neukonstruktionen vorbehalten sind. Daher sind die aufgezeigten energiesparenden Maßnahmen nur durch Investitionen in neue Verarbeitungsmaschinen und –anlagen zum tragen. Modernisierungs- und Umrüstungsmöglichkeiten bestehender Maschinen- und Anlagentechnik werden derzeit nicht angeboten.

Es kann daher zusammenfassend festgestellt werden, dass die recherchierten Lösungen 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. Dafür wurden im Rahmen dieses Projektes verschiedene Entwicklungen und Untersuchungen durchgeführt.

## 2 Analyse des Blasformprozesses

### 2.1 Prozessablauf der Referenzmaschinen

Zu Beginn des Forschungsvorhabens, galt es den Blasformprozess genau zu analysieren. Hierfür stellte der Industriepartner Trassl-Plстик GmbH & Co.KG, als möglicher Anwender von nachrüstbaren Einsparmaßnahmen, für Untersuchungen und Tests seine Anlagentechnik zur Verfügung. Als Referenzmaschinen wurden aus dem Maschinenpark des Projektpartners die Extrusionsblasformmaschinen Typ BM 101D und Typ BM 303D (Abbildung 1) der Firma Bekum gewählt. Die Produktspektren der Anlagen umfassen Bauteile mit einem Fassungsvermögen zwischen 0,3 bis 2 Liter (BM 101D) und 0,7 bis 3 Liter (BM 303D).

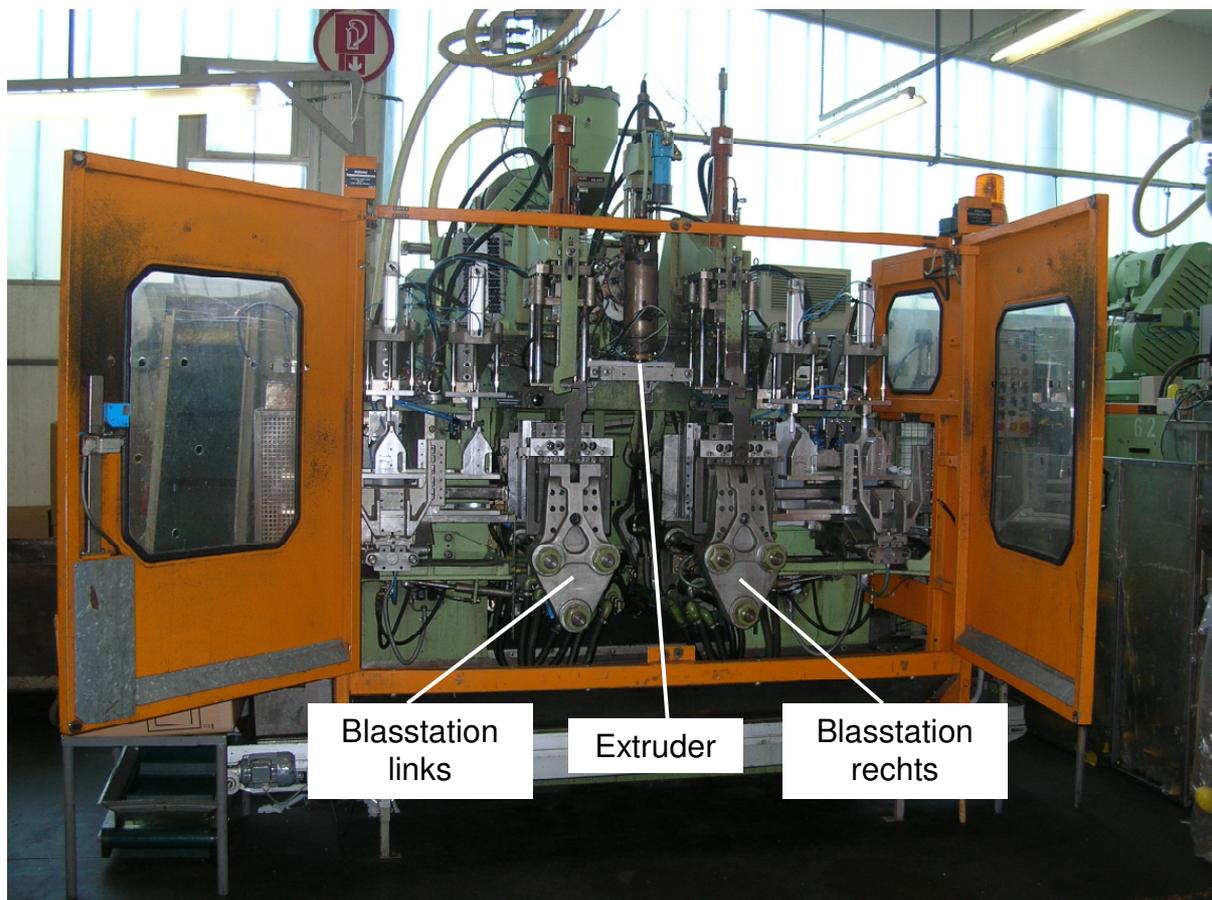
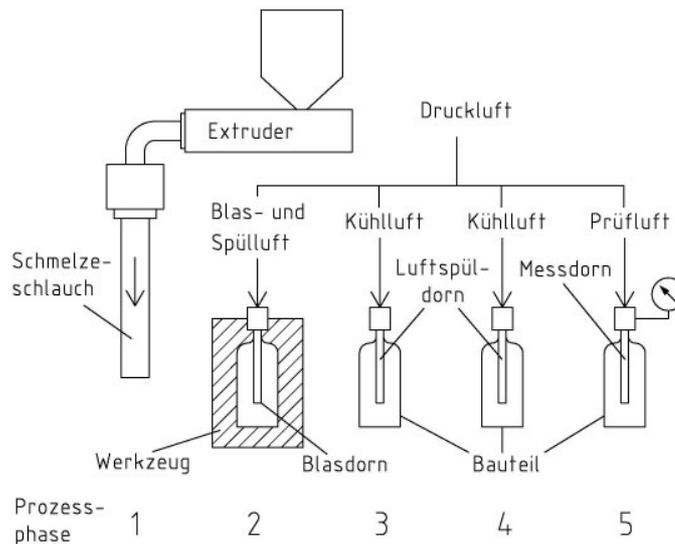


Abbildung 1: Referenzmaschine Typ BEKUM BM 303D

Beide Maschinen sind Zwei-Stationen-Anlagen, welche mit zwei alternierend arbeitenden Blasformeinrichtungen ausgestattet sind und den gleichen Prozessablauf (Abbildung 2) aufweisen.



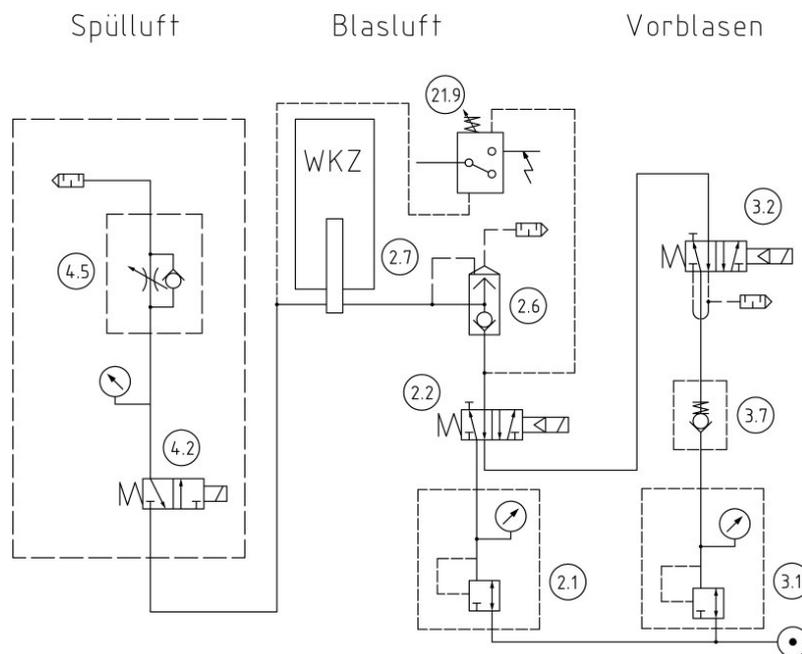
**Abbildung 2: Prozessablauf der Referenzmaschinen**

Demnach erzeugt ein Extruder kontinuierlich einen Schmelzeschlauch (Phase 1), welcher wechselseitig einer der zwei Blasstationen zugeführt wird. Nachdem die Vorform im Werkzeug eingelegt ist, beginnt der Blasprozess, indem ein Blasdorn in das Werkzeug eingeführt wird und den Schmelzeschlauch mit Druckluft, der so genannten Blasluft, bis zum Anlegen an die Innenfläche des Werkzeugs aufweitet (Phase 2). Sobald das Bauteil ausgeformt ist, gilt es den Kunststoff für einen zügigen Fertigungsprozess schnellst möglich abzukühlen. Hierfür sind zum einen die Blasformwerkzeug mit einer Wasserkühlung versehen. Zusätzlich weisen die Referenzmaschinen eine Spülluftoption zur Beschleunigung des Abkühlprozesses auf. Die Spülluft zeichnet sich durch ein Zirkulieren und gleichzeitiges Austauschen der Druckluft innerhalb des Werkzeugs aus. Dabei wird über eine Abluftleitung die erwärmte Druckluft aus dem Werkzeug geleitet, während, um den Werkzeuginnendruck aufrecht zu halten, kalte Frischluft aus der Zuleitung nachströmt. Dies wird durch ein Doppelrohrsystem des Blasdorns realisiert. Nach genügend langer Abkühlzeit, das heißt bei ausreichender Formstabilität, wird das Werkzeug entlüftet, das Bauteil entformt sowie die dabei entfernten Butzen zerkleinert und über den Extruder dem Prozess wieder zugeführt. Anschließend wird das Produkt über ein Handhabesystem an die erste von zwei Kühlstationen weitergereicht. In dieser Prozessphase (Phase 3) kann das Bauteil, wenn nötig, weiter abgekühlt werden. Die Funktionsweise ist hierbei ähnlich dem Spülen während des Blasprozesses. Demnach wird über die Bauteilöffnung ein Luftspüldorn eingeführt, welcher das Bauteil nochmals mit Luft durchströmt, um die restliche Wärme abzuleiten. Zum nächsten Takt wird das Bauteil einer zweiten Kühlstation zugeführt, um bei Bedarf weitere Wärme aus dem Kunststoff abzuführen (Phase 4). Im letzten Prozessschritt (Phase 5) wird das fertige Bauteil einer Dichtheitsprüfung unterzogen. Dafür wird das Werkstück luftdicht abgeschlossen und unter Druck gesetzt. Bleibt der anliegende Druck über den Zeitraum eines Taktes konstant, wird das Produkt für gut befunden, entlüftet und manuell verpackt.

Andererseits zerkleinert ein Schredder das Ausschussteil und führt das Kunststoffgranulat dem Extruder zu, wo es aufgeschmolzen und erneut verarbeitet wird.

Weitere Angaben über die Referenzmaschinen wie Verbrauchs- und Anschlusswerte sowie Informationen bezüglich des Extruders können den technischen Datenblättern in Anlage 2 entnommen werden.

Neben dem Prozessablauf wurde bei der Analyse der Referenzmaschinen ein besonderer Augenmerk auf den Druckluftkreislauf gelegt, da es zur Reduzierung des Druckluftverbrauchs gilt, in diesen geschickt mögliche Einsparkomponenten einzugliedern. Die Abbildung 3 zeigt einen Ausschnitt des Pneumatikschaltplans der Referenzmaschine BEKUM BM 101D.



**Abbildung 3: Ausschnitt des Pneumatikschaltplans BM 101D [2/1]**

Der Druckluftkreislauf für den Formprozess wird in die drei Funktionen: Vorblasen, Blasluft und Spülluft unterteilt. Das Vorblasen garantiert ein problemloses Eindringen des Blasdorns in das Werkzeug. Hierzu wird durch den Blasdorn ein Luftstrom geleitet, um das obere Ende des Schmelzeschlauches offen zu halten. Die Blasluft dient zum Ausformen des Bauteils und die Spülluft zum Abführen der sich im Werkzeug erwärmenden Luft. Anhand der Abbildung 3 wird die Druckluftverwendung näher erläutert. Für die Eindringphase (Vorblasen) des Blasdorns in das Werkzeug wird zunächst das 5/2-Wegeventil 3.2 geschaltet, so dass Druckluft aus der Druckluftquelle durch das 5/2-Wegeventil 2.2 und das Schnellentlüftungsventil 2.6 in den Blasdorn gelangt, um das Ende des Schmelzeschlauches offen zu halten. Sobald der Blasdorn vollständig in das Werkzeug eingedrungen ist, wird das Ventil 3.2 in Grundstellung gebracht und das Ventil 2.2 geschaltet. In der Folge gelangt Druckluft (Blasluft) direkt aus der Druckluftquelle mit dem am Druckregler 2.1 eingestellten Umformdruck in das Werkzeug, so dass der Schmelzeschlauch aufgeweitet wird. Damit das Bauteil später die gewünschte Oberflächenqualität aufweist, ist es zwingend erforderlich, schnellstmöglich das Werkzeug unter den

eingestellten Umformdruck zu setzen. Ansonsten würde der Schmelzeschlauch, bevor dieser vollständig an die Werkzeuginnenwand gepresst wird, soweit abkühlen, dass ein gänzlich Ausformen nicht möglich wäre. Sobald das Bauteil vollständig ausgeformt ist, lässt sich mit Hilfe des 3/2-Wegeventils die Spülluft zusteuern und somit die erwärmte Druckluft durch Frischluft ersetzen. Die erwärmte Druckluft wird durch das Drosselventil 4.5 an die Atmosphäre geleitet. Mit Hilfe des Drosselventils ist es möglich, den Werkzeugdruck während der Luftspülung aufrecht zu halten. Dies gewährleistet, dass ein Ablösen des Kunststoffes von der Werkzeuginnenfläche vermieden wird. Weiterhin wird durch die Drossel der Volumenstrom der Spülluft individuell auf das zu fertigende Bauteil eingestellt. Ist das Bauteil bis zur Formstabilität abgekühlt, kann es entlüftet und entformt werden. Zur Werkzeugentlüftung wird das Ventil 2.2 in Grundstellung geschaltet, um die Zuluftleitung des Ventils 2.6 zu entlüften. In der Folge schaltet das Schnellentlüftungsventil um und das Werkzeug wird schlagartig gegen die Umgebung entlüftet. Anschließend kann das Bauteil aus dem Werkzeug entformt werden.

## **2.2 Verwendung von Druckluft beim Druckluftformverfahren**

Aus den Betrachtungen zur Analyse des Druckluftformprozesses geht hervor, dass beim Blas- bzw. Thermoformen Druckluft vielseitig verwendet wird. Neben Handhabefunktionen und anderen Hilfsprozessen, wie zum Beispiel Dichtheitsprüfungen im Anschluss des Herstellungsprozesses, trägt vor allem die bei der Formgebung notwendige Druckluft zum äußerst hohen Druckluftverbrauch solcher Fertigungsanlagen bei. Gerade zur Durchführung des Formprozesses ist es nötig, zum Teil große Volumina unter hohem Druck zu setzen. Weiterhin wird auch bei Verwendung der Spülluftfunktion zum Abtransport überschüssiger, im Kunststoff gespeicherter Restwärme eine enorme Menge an Druckluft benötigt. Im Vergleich zum Druckluftbedarf für die Prozessluft (Blas- und Spülluft) ist die benötigte Druckluftmenge für die Hilfsprozesse des Blasformverfahrens nahezu verschwindend gering. Da sowohl die Blasluft als auch die Spülluft nach Gebrauch derzeit energiereich an die Atmosphäre abgegeben werden, wird an dieser Stelle ein hohes Einsparpotenzial gesehen. Folglich galt es im Rahmen dieses Forschungsprojektes geeignete Maßnahmen zu entwickeln, den Druckluftverbrauch für die Prozessluft beim Druckluftformen zu reduzieren.

## **2.3 Randbedingungen für Prozesseingriffe**

Um die zu entwickelnden Maßnahmen zum Senken des Energieverbrauchs durch Einsparung von Druckluft beim Kunststoffblasformen für Anwender attraktiv zu gestalten ist es notwendig, einige grundlegende Anforderungen zu definieren. Absolute Priorität sollte dabei auf der Beibehaltung der bisherigen Bauteilqualität liegen. Wie bereits erwähnt, ist es für eine ansprechende Bauteilqualität erforderlich, beim Umformvorgang das Werkzeug möglichst schnell unter Maximaldruck zu setzen, um ein vorzeitiges Abkühlen und unvollständiges Ausformen zu vermeiden. Weiterhin ist über den Abkühlprozess der Werkzeugdruck aufrecht zu halten, um ein Ablösen des Bauteils von der Werkzeugkontur zu vermeiden, was ebenfalls zu Qualitätseinbußen führen würde.

Außerdem ist Wert auf eine geringe Störanfälligkeit der Lösungen zu legen, um einen weiterhin stabilen Herstellungsprozess gewährleisten zu können. Die Einsparmodule sind so zu gestalten, dass eine Eingliederung durch ein unproblematisches Umrüsten der Fertigungsanlagen möglich ist. Darunter ist die Integration der zusätzlich notwendigen Abläufe zu verstehen, ohne dass dabei erhebliche Veränderungen im vorhandenen Herstellungsprozess durchzuführen sind. Das heißt, es sollten grobe Eingriffe in den Prozessablauf vermieden werden, die zu einer Neugestaltung der vorhandenen Prozessabläufe führen würden. In diesem Zusammenhang ist weiter zu beachten, dass die für die Umsetzung der Einsparmaßnahmen eventuell erforderlichen Bauteile sich in ihren Ausmaßen im Rahmen halten und innerhalb beziehungsweise unmittelbar an der Fertigungsanlage platzierbar sind, um die Stellfläche der umzurüstenden Maschinen nicht zu vergrößern. Es ist ebenfalls anzustreben, eine möglichst universell einsetzbare Lösung zu entwickeln. Damit wären Energieeinsparungen unabhängig vom Blasformverfahren und der zu fertigenden Bauteile möglich. Um den Investitionsaufwand zur Umrüstung der Anlagen auf ein Minimum zu beschränken, sind Einsparmaßnahmen, welche mit einfachen Mitteln realisiert werden können, zu bevorzugen. Unter einfachen Mitteln sind in diesem Zusammenhang standardisierte Bauelemente zu verstehen, die im Vergleich zu Spezialanfertigungen günstig zu beschaffen sind.

### 3 Ermittlung der derzeitigen Verfahrens- und Anlagenparameter

Um weitere Einblicke in den Blasformprozess und dessen Druckluftverbrauch zu erlangen, wurden während des Produktionsbetriebs der Referenzmaschinen messtechnische Untersuchungen durchgeführt.

Als Referenzprodukte dienten zwei Kunststoffflaschen aus Polyethylen hoher Dichte (PE-HD) mit einem Fassungsvermögen von 0,5 Litern beziehungsweise 2 Litern aus der Produktpalette von Trassl-Plastik. Die 0,5-Liter-Flasche (Abbildung 4 links) hat bei einer maximalen Wandstärke von 2 mm ein Gewicht von 60 g und wird auf der Referenzmaschine BM101D hergestellt.



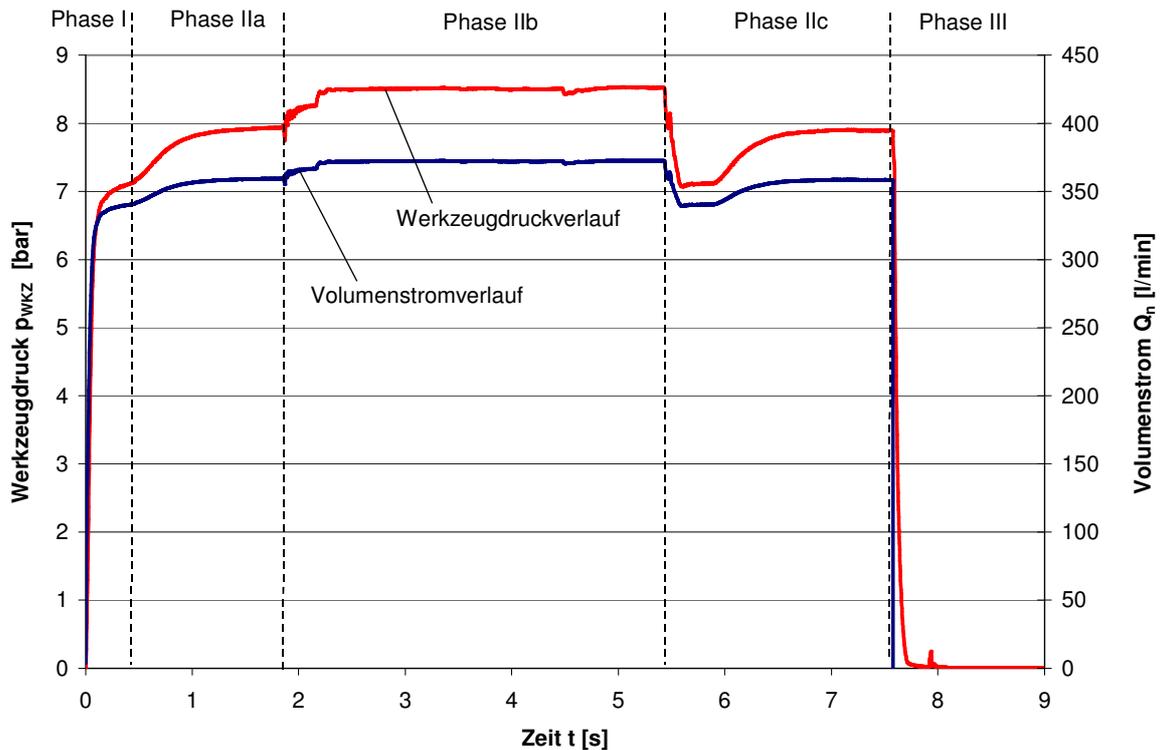
**Abbildung 4: Referenzprodukte 0,5-Liter-Behälter (links), 2-Liter-Behälter (rechts)**

Das zweite Referenzprodukt (Abbildung 4 rechts) wird auf der Extrusionsblasformmaschine BM303D gefertigt und weist bei einem Gewicht von 80 g auch eine maximale Wandstärke von 2 mm auf.

Für die Durchführung der Versuche wurden die Blasformmaschinen mit Messtechnik ausgestattet, um über den Prozessverlauf den Werkzeugdruck, sowie den vorherrschenden Volumenstrom der Spülluft

aufzuzeichnen. Die durchgeführten Messungen ergaben für beide Referenzbauteile ähnliche Kurvenverläufe für den Werkzeugdruck und Volumenstromverbrauch. Im Diagramm 1 sind die Kurvenverläufe über einen Prozessablaufs bei der Herstellung der 0,5-Liter-Flasche dargestellt. Sie lassen sich in drei wesentliche Phasen einteilen.

**Diagramm 1: Werkzeugdruck-/ Volumenstromverlauf 0,5-Liter-Flasche [6/1]**



Mit der Phase I beginnt der Blasformprozess, indem das Werkzeug mit Druckluft beaufschlagt wird. Die Folge ist ein schlagartiges Ansteigen des Werkzeugdrucks, so dass sich der Schmelzeschlauch schnellstmöglich aufweitet und an die Werkzeugkontur anlegt. Der Volumenstrom der Spülluft liegt in direkter Abhängigkeit zum Werkzeugdruck und steigt daher ebenfalls steil an. In der sich anschließenden Phase II ist das Bauteil vollständig ausgeformt und wird durch die Spülluft beziehungsweise durch das wassergekühlte Werkzeug bis zur Formstabilität abgekühlt. Je nach Wanddicke und Volumen des Bauteils kann die Dauer dieser Prozessphase variieren. Ebenfalls in Abhängigkeit der Art des zu fertigenden Bauteils wird der Volumenstrom der Spülluft so eingestellt, dass der Formprozess schnellstmöglich, jedoch mit nicht mehr Drucklufteinsatz wie nötig, durchgeführt werden kann. Wie im Diagramm 1 verdeutlicht, treten während der zweiten Prozessphase deutliche Schwankungen des Werkzeugdrucks und des Volumenstroms der Spülluft auf. Dies ist auf Wechselwirkungen zwischen den zwei alternierend arbeitenden Blasformstationen zurückzuführen. Während der Phase IIa sind beide Blasformstationen unter Druck und es kann von der Druckluftversorgung nicht genügend Druckluft bereitgestellt werden, um in den Werkzeugen den Maximaldruck zu erreichen. Sobald das Werkzeug der zweiten Blasformstation entlüftet wird (Ende der Phase IIa), steigt der Werkzeugdruck der ersten Blasformstation auf das Maximum (Phase IIb). Sobald bei der zweiten Blasformstation (Anfang der Phase IIc) der Formprozess des nächsten

Bauteils beginnt und dieses Werkzeug unter Druck gesetzt wird, fällt der Druck im Werkzeug der ersten Blasformstation wieder ab. Nachdem dem Bauteil genügend Wärme bis zu Formstabilität entzogen wurde, wird das Werkzeug zu Beginn der Prozessphase III schlagartig über ein Schnellentlüftungsventil evakuiert. Um garantieren zu können, dass das Bauteil zum Zeitpunkt der Entformung vollständig druckfrei ist, ist in der Maschinensteuerung zwischen der Entlüftung und der Entformung eine Wartezeit von ca. 1 s vorgesehen.

Wie bereits erwähnt, weisen die Parameter Werkzeugdruck und Volumenstrom der Spülluft bei den Referenzprodukten gleichen Verlauf auf. Lediglich in der Dauer der Phase II und im durchschnittlichen Volumenstrom der Spülluft sind Unterschiede in den Kurvenverläufen festgestellt worden.

Für die Herstellung der Referenzprodukte auf den Referenzmaschinen konnten demnach folgende wesentliche Parameter bestimmt werden (Tabelle 1).

**Tabelle 1: Übersicht Druckluftverbrauch bei Referenzprodukten**

	0,5-Liter-Flasche	2-Liter-Flasche
Umformdruck [bar]	8,5	8,5
Blasluftverbrauch pro Flasche [NI]	4,25	17
Durchschnittlicher Spülluftverbrauch [NI/min]	360	300
Notwendige Spülzeit [s]	7,5	10
Spülluftverbrauch pro Flasche [NI]	45	50

Aus der Übersicht geht hervor, dass bei den Referenzprodukten im Verhältnis ein wesentlich höherer Drucklufteinsatz zum Spülen des fertig ausgeformten Bauteil (Spülluft) als für den eigentlichen Umformprozess (Blasluft) notwendig ist. Trotz dieser Feststellung, wurde im restlichen Projektverlauf der Schwerpunkt auf die Reduzierung des Druckluftverbrauchs bei Verwendung der Blasluft gesetzt. Begründet wird diese Vorgehensweise mit der Tatsache, dass nur vereinzelte Blasformmaschinen die Option der Bauteilspülung aufweisen. Die Blasluft hingegen ist für den Blasformprozess unabkömmlich. Daher kann eine Einsparmaßnahme zur Reduzierung des Drucklufteinsatzes bei der Blasluft bei annähernd allen Blasformmaschinen Anwendung finden. Aufgrund des hohen Druckluftverbrauchs bei der Nutzung der Spülluft und dem damit verbundenen hohen Einsparpotenzial wäre es zweckmäßig, im Rahmen eines weiteren Forschungsprojektes Möglichkeiten zur Reduzierung beziehungsweise zur Weiternutzung der Spülluft zu entwickeln.

## 4 Erarbeitung von Lösungskonzepten

Aus der Analyse des Fertigungsprozesses der Referenzmaschinen wurde deutlich, dass der Drucklufteinsatz bei der Blasluft ausschließlich vom Volumen des herzustellenden Bauteils und dem notwendigen Umformdruck abhängt und somit bei dem reinen Formprozess der Blasluftverbrauch nicht reduziert werden kann. Daher wurde im Weiteren angestrebt, die nach dem Formprozess nicht mehr benötigte Blasluft dem Blasformprozess zurückzuführen oder anderweitig zu nutzen. Aus den vorherigen Betrachtungen ist in diesem Zusammenhang bekannt, dass die Blasluft nach hinreichender Bauteilkühlung über ein Schnellentlüftungsventil vollständig an die Umgebung abgeleitet wird. Demnach ist die Schnittstelle für eine mögliche Einsparmaßnahme an dieser Stelle des Druckluftkreislaufs einer Blasformmaschine gegeben. Für die Weiterverwendung der aus dem Werkzeug strömenden Blasluft ist eine Rückführung dieser zum Formprozess, eine Speisung pneumatischer Antriebe zu Realisierung von Handhabeaufgaben oder eine Nutzung der Blasluft als Druckvorstufe zur Druckluftherzeugung denkbar. Für eine effektive Weiternutzung der Blasluft ist es zweckmäßig, die ausströmende Druckluft direkt von dem Schnellentlüftungsventil weiteren Verbrauchern zuzuführen.

Der Grundgedanke bei einer Rückführung der Blasluft in den Formprozess (Abbildung 5) ist, die bereits genutzte Blasluft teilweise erneut für einen nächsten Formvorgang zu nutzen. Dabei wird, nachdem das Bauteil im ersten Werkzeug bis zur Formstabilität abgekühlt wurde (1), die Blasluft in die zweite Blasformstation geleitet und durch einen Druckausgleich ein Vorformprozess vollzogen (2). Nachdem sich Druckgleichheit eingestellt hat, wird das Werkzeug der ersten Blasformstation restentlüftet (3) und das Bauteil im zweiten Werkzeug durch Zuführung von Frischluft aus der Druckluftquelle vollständig ausgeformt (4). Die Einsparung dieses Lösungsprinzips liegt darin, dass nach dem Druckausgleich zwischen dem fertigen Bauteil und dem noch zu formenden Vorformling im zweiten Werkzeug bereits ein Teil der für den Umformprozess benötigten pneumatischen Energie vorhanden ist, und lediglich die Restenergie von der Druckluftquelle bereitgestellt werden muss.

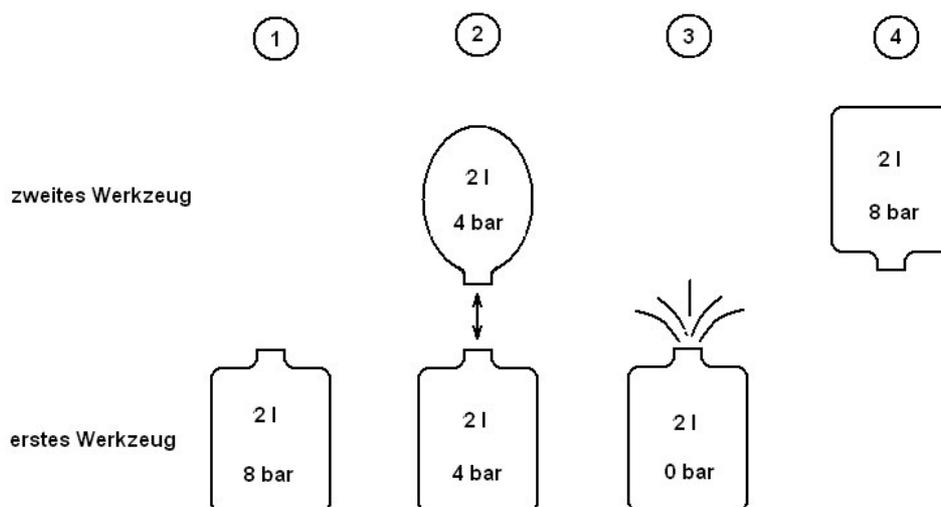


Abbildung 5: Lösungsansatz direkte Rückführung der Blasluft zum Formprozess

Problematisch scheint an dieser Stelle die Tatsache, dass für dieses Lösungskonzept die umzurüstende Blasformmaschine mindestens zwei Formwerkzeuge im Umlauf haben muss, welche zeitlich so abgestimmt sind, dass zum Zeitpunkt der Entlüftung des einen Werkzeugs ein anderes mit dem Umformvorgang gerade beginnt.

Ein ähnlicher Prozessablauf ist bei der Verwendung der Blasluft zur Durchführung von Handhabeaufgaben denkbar. Hierbei findet bei der Werkzeugentlüftung ein Druckausgleich mit einem pneumatischen Antrieb statt. Sobald die Bewegung abgeschlossen ist, kann das Werkzeug restentlüftet und das Bauteil entformt werden. Bei der Umsetzung dieses Konzeptes würde der Drucklufteinsatz für die Handhabebewegungen reduziert. Kritisch ist bei dieser Lösungsvariante der Arbeitsdruck der pneumatischen Antriebe zu sehen, welcher üblicherweise bei 6 bar liegt. Demnach kann bei Bauteilen, welche mit niedrigen Drücken (bis 8 bar) hergestellt werden, nur ein geringer Teil der im Werkzeug vorhandenen Blasluft für Antriebszwecke genutzt werden. Hinzu kommt, dass auch bei diesem Lösungskonzept eine zeitliche Abstimmung zwischen Werkzeugentlüftung und Handhabebewegung unerlässlich ist. Denkbar ist auch, mit der Blasluft einen Druckluftmotor zu speisen, welcher wiederum einen Generator antreibt und so elektrische Energie erzeugt. Vorteilhaft ist dabei, dass keine zeitliche Anpassung zwischen der Werkzeugentlüftung und anderen in der Blasformmaschine befindlichen Abläufen erforderlich ist. Von Nachteil ist das impulsartige Antreiben des Druckluftmotors sowie dessen schlechter Wirkungsgrad ( $\eta = 0,2$ ).

Ein weiterer untersuchter Ansatz (indirekte Weiterverwendung) war, die Blasluft in einem Druckspeicher zwischenspeichern und anschließend weiter zu nutzen. Dies hat den Vorteil zeitlicher Unabhängigkeit zur Werkzeugentlüftung, ist jedoch mit einem geringeren Einsparpotenzial verbunden. Aber gerade bei den Lösungsvarianten der Prozessrückführung der Blasluft und der Speisung von pneumatischen Antrieben mit der Blasluft spielt dieser Lösungsansatz seine Stärken aus, da so eine zeitliche Abstimmung zwischen dem Blasformprozess und der Wiederverwendung der Blasluft nicht notwendig ist. In Abbildung 6 ist am Beispiel der Prozessrückführung der Blasluft der Ablauf bei dem indirekten Lösungsansatz dargestellt.

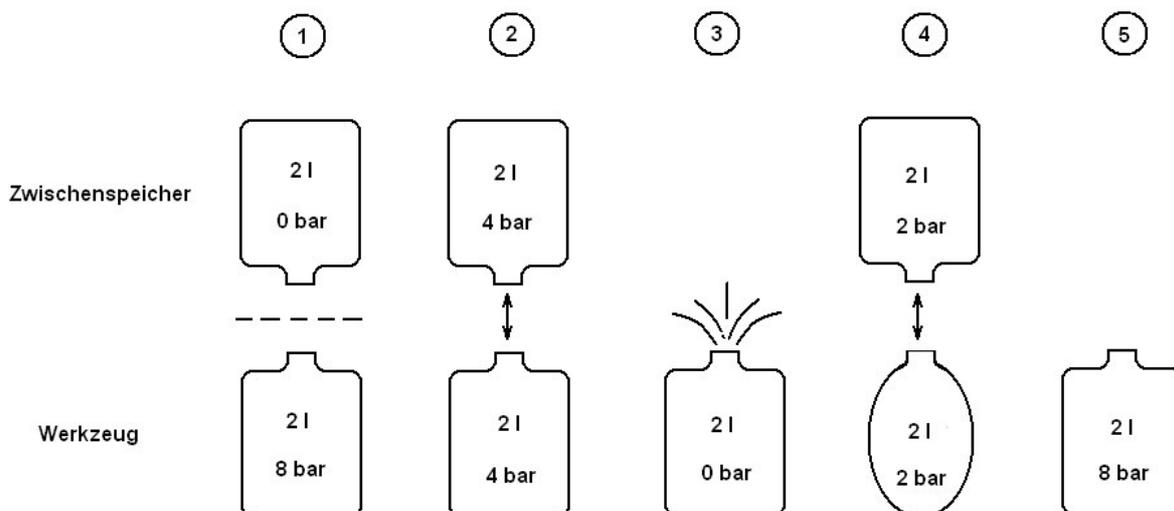


Abbildung 6: Lösungsansatz indirekte Rückführung der Blasluft zum Formprozess

Wie in Abbildung 6 aufgezeigt, wird nach ausreichender Bauteilkühlung (1) ein Druckausgleich zwischen Werkzeug und einem Druckspeicher durchgeführt (2). Im Anschluss kann das Werkzeug restentlüftet (3) und das Bauteil entformt werden. Die im Druckspeicher vorhandene Druckluft kann im Folgenden für einen Vorformprozess verwendet werden (4). Dabei ist es gleichgültig ob ein Druckausgleich mit dem selben oder einem zweiten Werkzeug durchgeführt wird, da nun die Weiterverwendung der im Druckspeicher befindlichen Druckluft vom Prozessablauf des Blasformens losgelöst ist. Nach dem Vorformprozess wird der Druckspeicher vom Werkzeug getrennt und das Bauteil mit Frischluft vollständig ausgeformt (5).

Anstelle des im Schritt 4 durchgeführten Vorformens ist es auch möglich, die zwischengespeicherte Druckluft einem pneumatischen Verbraucher zuzuführen. Auch in diesem Anwendungsfall ist durch den zwischengeschalteten Druckluftspeicher keine gesonderte Abstimmung der Werkzeugentlüftung mit weiteren pneumatischen Verbrauchern nötig.

Der angesprochene Lösungsansatz, die aus dem Werkzeug strömende Blasluft als Druckvorstufe zur Druckluftherzeugung zu nutzen, wurde in den Untersuchungen nicht weiter berücksichtigt. Dies ist hauptsächlich in den dafür notwendigen massiven und aufwendigen Eingriff in das Druckluftnetz begründet, was gegen die Grundidee der Entwicklung eines einfach integrierbaren Einsparmoduls steht.

## 5 Lösungsauswahl

Nachdem im Arbeitspunkt 4 verschiedene Lösungsansätze entwickelt wurden, galt es im Anschluss, diese näher bezüglich des erreichbaren Einsparpotenzials, der technischen Umsetzbarkeit und des möglichen Anwendungsspektrums zu untersuchen.

### Mögliche Einsparpotenziale

Für die Ermittlung der theoretisch erreichbaren Einsparungen der einzelnen Lösungskonzepte wurde die allgemeine Gasgleichung (1) zugrunde gelegt.

$$p \cdot V = m \cdot R_s \cdot T \quad (1)$$

Für den Variantenvergleich ist es ausreichend, die Berechnung der einzelnen Zustände nach einem Druckausgleich im Werkzeug beziehungsweise im Druckspeicher unter den Annahmen der konstanten Luftmasse und einer gleichbleibenden Temperatur innerhalb des Systems durchzuführen. Dies zugrundeliegend vereinfacht sich die allgemeine Gasgleichung zu dem Gesetz von BOYLE und MARIOTTE der isothermen Zustandsänderung (2).

$$p \cdot V = \text{konst.} \quad (2)$$

Des Weiteren wurde davon ausgegangen, dass bei den Druckausgleichen keinerlei Leitungsverluste vorherrschen sowie beim Vorformprozess das Bauteil annähernd vollständig ausgeformt wird.

Mit diesen getroffenen Annahmen und der daraus folgenden Gleichung 2 wurden die theoretisch möglichen, prozentualen Druckluft einsparungen der verschiedenen Einsparvarianten im Verhältnis zum derzeitigen Prozessablauf berechnet (Anlage 3). Die Ergebnisse sind in der Tabelle 2 aufgeführt. Aus dieser Übersicht wird deutlich, dass mit der direkten im Vergleich zur indirekten Weiterverwendung der Blasluft deutlich höhere Einsparungen erreichbar sind. Des Weiteren ist ersichtlich, dass die Rückführung der Blasluft zum Formprozess gegenüber der Verwendung der Blasluft zur Speisung von pneumatischen Verbrauchern zu bevorzugen ist.

**Tabelle 2: Übersicht der theoretisch möglichen, prozentualen Einsparung der Einsparvarianten**

		direkte Weiterverwendung	indirekte Weiterverwendung
Rückführung der Blasluft zum Formprozess		50%	33,3%
Blasluft zur Speisung von pneumatischen Verbrauchern	für Handhabeaufgaben	25%	12,5%
	Druckluftmotor-Generator-System	14,6%	---

### Technische Umsetzbarkeit

Aus theoretischer Sicht sind prinzipiell alle im vorherigen Kapitel aufgeführten Lösungskonzepte als ausführbar einzuschätzen. Jedoch lassen sich Unterschiede im Aufwand der Eingliederung der verschiedenen Einsparvarianten in den Blasformprozess ausmachen. So ist es unerlässlich, bei dem Lösungsansatz der direkten Weiterverwendung der Blasluft das zeitliche Zusammenwirken der Blasformmaschine und des Einsparmoduls abzustimmen. Nur so kann gewährleistet werden, dass zum Zeitpunkt der Werkzeugentlüftung ein zweites Werkzeug zum Vorformen des Bauteils zur Verfügung steht beziehungsweise ein pneumatischer Antrieb für Handhabeaufgaben betätigt werden kann. Dies verlangt Eingriffe in den Ablauf der Maschinensteuerung und wäre bei jeder umzurüstenden Blasformanlage von einem Steuerungstechniker durchzuführen.

Des Weiteren werfen die Lösungskonzepte zur Speisung der Blasluft in pneumatische Antriebe für Handhabeaufgaben Probleme auf. Für die Eingliederung dieser Lösungsvariante in den Prozessablauf ist es unvermeidlich, deutliche Eingriffe im bisherigen Maschinensystem durchzuführen. Grundsätzlich ist ein geeigneter, bereits vorhandener pneumatischer Verbraucher zu wählen, welcher ein Großteil der ausströmenden Blasluft nutzen kann. Diesbezüglich ist vor allem das wechselnde Volumen der auf einer Fertigungsanlage herzustellenden Bauteile als kritisch zu betrachten. So kann bei Bauteilen geringer Volumina der Fall eintreten, dass die vor der Entlüftung im Werkzeug befindliche Blasluft von

der Menge und vom Druck zum Antrieb eines zum Beispiel für Handhabeaufgaben erforderlichen pneumatischen Arbeitszylinders nicht ausreicht. Sollte der entgegengesetzte Fall eines Bauteils mit sehr hohem Volumen eintreten, besteht das Risiko, dass nur eine geringe Menge an Blasluft wiederverwendet werden kann.

Ebenso kritisch ist die Lösungsvariante des Zuführens der Blasluft zu einem Druckluftmotor-Generator-System zu betrachten. So kann ein solches System nur mit einem äußerst geringen Wirkungsgrad betrieben werden, da aus dem Entlüftungsvorgang des Werkzeugs kein kontinuierlicher Volumenstrom vorliegt. Darüber hinaus würde eine diskontinuierliche Arbeitsweise des Systems folglich auch zu stark schwankenden Spannungen führen, welche nur mit zusätzlichem Aufwand dem Elektrizitätsnetz zugeführt werden können.

### Mögliche Anwendungsspektren

Ein weiterer überaus wichtiger Aspekt zur Auswahl eines zu bevorzugenden Lösungskonzepts ist die Breite der möglichen Anwendungen. Hierbei ist es anzustreben, dass die Lösung sowohl für verschiedene Typen von Blasformanlagen einsetzbar als auch flexibel in dem Volumen der herzustellenden Bauteile ist.

Das Lösungskonzept „Nutzung der Blasluft zur Versorgung pneumatischer Antriebe für Handhabeaufgaben“ ist in dieser Hinsicht als besonders kritisch einzuschätzen. Wie bereits erwähnt, ist die Effektivität dieser Lösungsvarianten von der Abstimmung des Bauteilvolumens und dem Druckluftverbrauch des mit der Blasluft zu versorgenden pneumatischen Antriebs abhängig. Das heißt, dass für eine annähernd optimale Arbeitsweise dieser Einsparvarianten nur geringe Volumenabweichungen der herzustellenden Bauteile zulässig sind. Dies schränkt folglich das Anwendungsspektrum dieser Variante extrem ein und wäre demnach lediglich für Anlagen geeignet, mit welchen ausschließlich Produkte gleichen Volumens erzeugt werden. Auch die direkte Weiterverwendung der Blasluft für einen Vorformprozess ist als bedenklich zu betrachten. Wie im Kapitel 4 beschrieben, wird bei dieser Variante die Blasluft direkt in ein zweites Werkzeug geleitet und ein Vorformprozess durchgeführt. Folglich ist mindestens ein weiteres Werkzeug notwendig, welches sich zum Zeitpunkt der Werkzeugentlüftung des ersten Werkzeugs am Beginn des Formprozesses befindet. Daher ist dieses Lösungskonzept ausschließlich für Blasformanlagen mit zwei oder mehr Werkzeugen sowie eben beschriebenen zeitlichen Ablauf anwendbar.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass trotz des etwas geringeren Einsparpotenzials die indirekte Wiederverwendung der Blasluft aufgrund der nicht notwendigen zeitlichen Anpassung der Werkzeugentlüftung und der Weiternutzung der Blasluft zu bevorzugen ist. Weiterhin ist dieser Lösungsansatz unabhängig von der Anzahl der vorhandenen Blasformwerkzeuge und daher prinzipiell bei jedem Anlagentypen anwendbar. Im Vergleich der zwei Varianten des indirekten Lösungsansatzes ist die Rückführung der Blasluft zum Formprozess zu bevorzugen. Dies ist sowohl im höheren Einsparpotenzial als auch in der Flexibilität bezüglich des Produktvolumens begründet.

Im Anschluss galt es die Variante der indirekten Weiterverwendung der Blasluft für einen Vorformprozess in einem Versuchsstand umzusetzen. Ziel ist es, damit das theoretisch berechnete

Einsparpotenzial der Vorzugslösung unter Laborbedingungen zu bestätigen und mögliche Einflüsse auf den Herstellungsprozess aufzuzeigen.

## 6 Labortechnischer Funktionsnachweis des Lösungsansatzes

### 6.1 Versuchsstand zum Funktionsnachweis des Lösungsansatzes

Bei der entwickelten Vorzugslösung ist es vorgesehen, nachdem der Formprozess und die sich anschließende Bauteilkühlung abgeschlossen sind, die bei der Werkzeugentlüftung ausströmende Druckluft mit Hilfe eines Druckbehälters zwischenzuspeichern. Anschließend soll die in dem Speicher befindliche Druckluft für einen Vorformprozess im darauffolgenden Prozesszyklus zur Verfügung gestellt werden. Mit dem Versuchsstand ist folglich zunächst der derzeitige Blasformprozess nachzubilden sowie durch ergänzende Komponenten die Lösungsvariante umzusetzen. Die Hauptbestandteile der Versuchsvorrichtung sind daher im Wesentlichen das Werkzeug, ein Druckspeicher zur Aufnahme der Blasluft, Ventile zum Steuern der Blasluft sowie eine Druckluftquelle. Das Werkzeug, welches den sich während des Formprozesses im Volumen ändernde Vorform beinhaltet, wurde in vereinfachter Form durch einen Druckspeicher verkörpert. Der Pneumatikschaltplan des Versuchsstands (Abbildung 7) wurde in Anlehnung an den der Referenzmaschinen realisiert, wobei nur die wesentlichen Bestandteile in die Versuchseinrichtung übernommen worden sind.

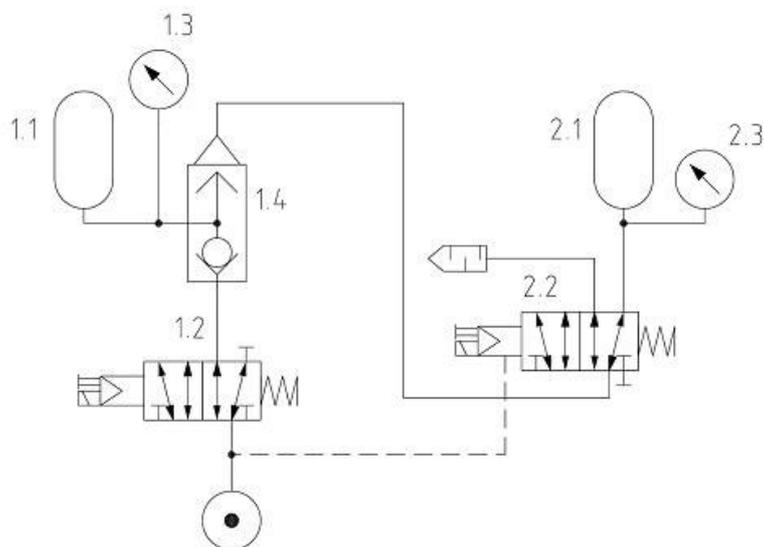
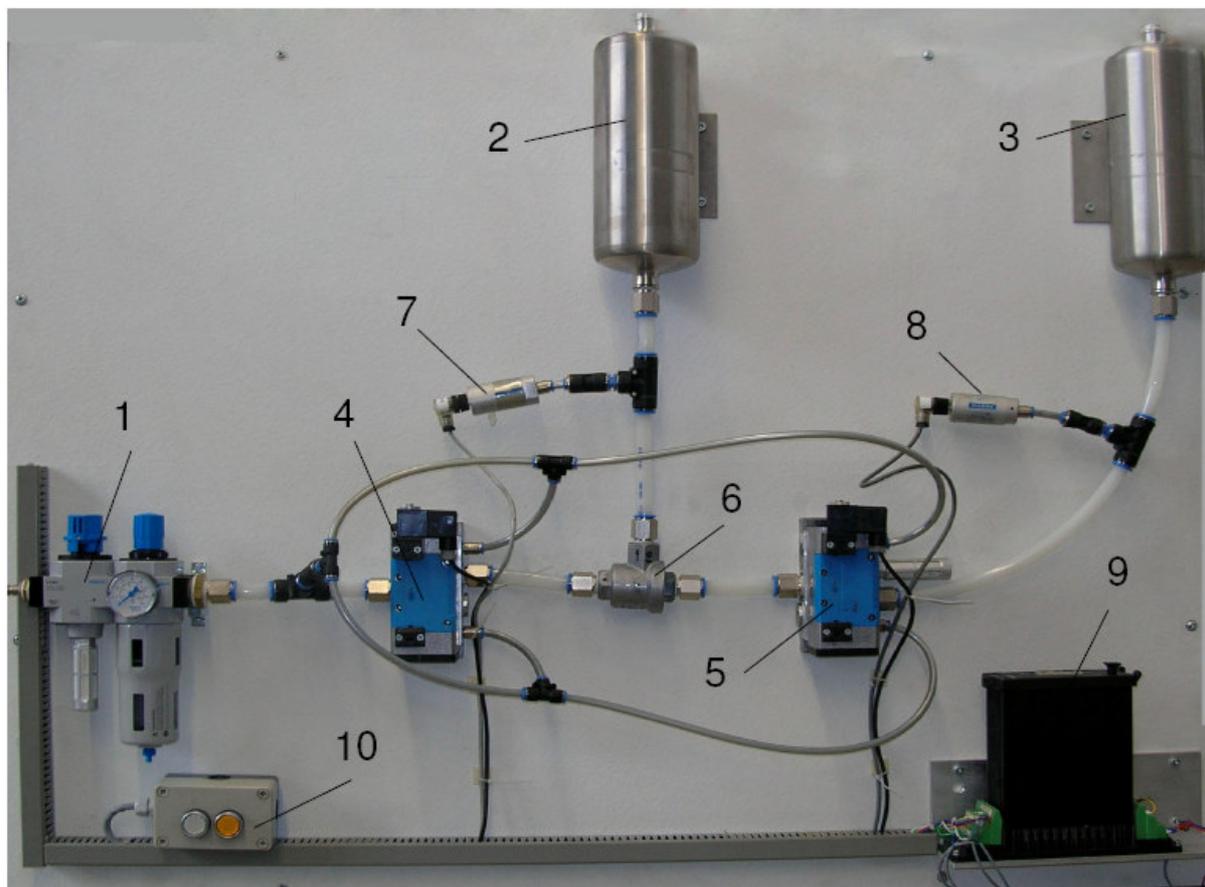


Abbildung 7: Pneumatikschaltplan der Versuchseinrichtung

In der Abbildung 8 ist der verwirklichte Versuchstand dargestellt. Demnach gelangt beim Schalten des 5/2-Wegeventils (4) Druckluft von der Druckluftquelle (1) durch das geschaltete Ventil und das Schnellentlüftungsventil (6) direkt in das Werkzeug (2). Dieser Vorgang stellt das Ausformen der Vorform dar. Mit dem Drucksensor (7) kann dabei der Druckverlauf im Werkzeug aufgenommen werden. Ist der maximale Druck erreicht, kann nach kurzen Halten des Druckes (Kühlphase) der

Entlüftungsvorgang simuliert werden. Hierzu wird das 5/2-Wegeventil (4) in Grundstellung geschaltet und dadurch die Leitung zwischen diesem und dem Schnellentlüftungsventil an die Atmosphäre entlüftet. In der Folge schaltet das Schnellentlüftungsventil um und es findet ein Druckausgleich über das 5/2-Wegeventil (5) zwischen dem Werkzeug und dem Druckspeicher (3) statt. Der Drucksensor (8) zeichnet dabei den Druckverlauf des Druckspeichers auf. Ist der Druckausgleich beendet, das heißt, herrscht Druckgleichheit im Werkzeug und im Druckspeicher, wird das Werkzeug restentlüftet. Dies wird durch Schalten des Ventils (5) erreicht, so dass die restliche im Werkzeug vorhandene Druckluft an die Umgebung geleitet wird, aber der Druck des Druckspeichers (3) aufrechterhalten bleibt. Damit ist der nachgestellte Blasformprozess beendet und ein neuer Prozesszyklus kann begonnen werden.



- |                          |                                    |                          |
|--------------------------|------------------------------------|--------------------------|
| 1...Wartungseinheit      | 5...5/2-Wegeventil (2.2)           | 9...Steuerung            |
| 2...Werkzeug (1.1)       | 6...Schnellentlüftungsventil (1.4) | 10...Start-/Stopp-Taster |
| 3...Druckspeicher (2.1)  | 7...Drucksensor (1.3)              |                          |
| 4...5/2-Wegeventil (1.2) | 8...Drucksensor (2.3)              |                          |

**Abbildung 8: Versuchstand zum Funktionsnachweis der Lösungsvarianten [6/1]**

Zu Beginn des nächsten Zyklus wird ein erneuter Druckausgleich zwischen dem drucklosen Werkzeug und dem druckbeaufschlagten Speicher durchgeführt, indem das Ventil (5) in Grundstellung schaltet. Dieser Vorgang kann als Vorformprozess angesehen werden. Sobald die Drucksensoren (7) und (8) Druckgleichheit feststellen, wird das Werkzeug durch Schalten des Ventils (4) mit Frischluft aus der Druckluftquelle bis auf Maximaldruck gebracht, was wiederum das vollkommene Ausformen

widerspiegelt. Dabei verhindert das Schnellentlüftungsventil ein weiteres Füllen des Speichers (3). Darauf folgen die bereits beschriebenen Vorgänge des bei der Werkzeugentlüftung durchzuführenden Druckausgleichs und der Restentlüftung des Werkzeugs. Da bei dem vorhergehenden Vorformprozess der Druckspeicher noch einen Restdruck vorweist, wird sich bei einem erneuten, während der Werkzeugentlüftung durchgeführten Druckausgleich ein höherer Druck einstellen. So kann davon ausgegangen werden, dass bei dem folgenden Vorformprozess ebenfalls ein höherer Druck zur Verfügung steht. Es galt daher, bei den durchzuführenden Versuchen zu untersuchen, welcher Druck während des Vorformens auf längere Sicht erreicht werden kann und wie viel Druck somit für den sich anschließenden restlichen Ausformvorgang nötig ist. Des Weiteren ist zu prüfen, ob die zusätzlichen Druckausgleiche zwischen Werkzeug und Druckbehälter den Prozessablauf des Blasformens beeinträchtigen.

Um die anschließenden Versuchsreihen durchführen zu können, war es notwendig die einzelnen Komponenten anzusteuern und zu regeln. Hierzu wurde eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) verwendet. Weiterhin wurden die Druckverläufe des Werkzeug- und Druckspeicherdrucks während der Versuchsreihen aufgenommen, um im Nachgang diese auszuwerten.

## 6.2 Durchführung der labortechnischen Untersuchungen

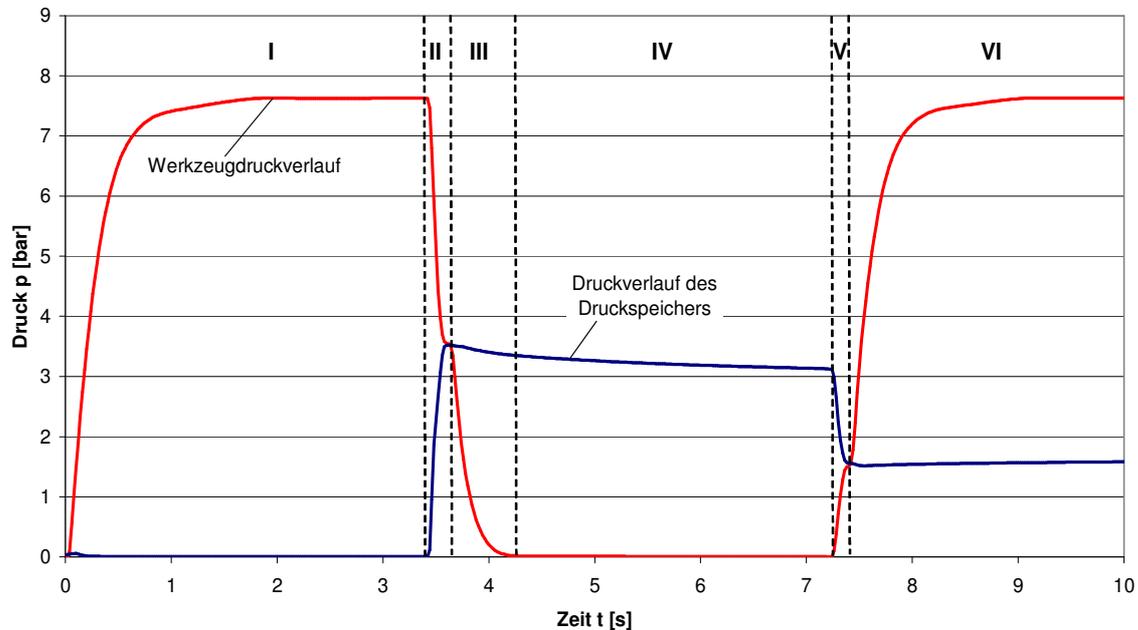
Nach der Umsetzung der Versuchseinrichtung war es für die Versuchsdurchführung erforderlich, einen geeigneten Steuerungsablauf zu entwickeln, welcher die schrittweise Abarbeitung des im vorhergehenden Kapitel 6.1 beschriebenen Prozessablauf realisiert. Dabei wurden die Zeitpunkte zum Schalten der Ventile entweder von Zeitgliedern oder eingelesenen Druckwerten bestimmt. Durch die Zeitglieder konnte die Dauer zwischen Beginn der Werkzeugbefüllung und der Werkzeugentlüftung beziehungsweise zwischen restloser Entlüftung des Werkzeugs und dessen Neubefüllung vorgegeben werden. Da die Einsparvarianten diese Prozessphasen nicht beeinflussen und die labortechnischen Messungen nicht mit den bei der Kennwertermittlung aufgenommenen Messreihen direkt verglichen werden können, ist es unbedenklich, den Prozessablauf an dieser Stelle zu verkürzen. Zur Erkennung des beendeten Druckausgleichs bei der Werkzeugentlüftung beziehungsweise beim Vorformen wurden die Signale der Drucksensoren von der SPS eingelesen, miteinander verglichen und bei einem Druckunterschied von  $\Delta p = 0,1$  bar der Druckausgleich als vollzogen angesehen. Die ausführliche Anweisungsliste der bevorzugten Einsparmaßnahme kann der Anlage 4 entnommen werden.

Bei der Durchführung der Versuche wurden die Druckverläufe über mehrere Prozesszyklen aufgenommen. So war es möglich, den sich einstellenden Druck, welcher für das Vorformen zur Verfügung steht, zu ermitteln. Mit den während der Versuche aufgenommenen Messreihen konnten die Druckverläufe des Werkzeugs und des Druckspeichers für die Vorzugslösung ausgewertet und Aussagen zu deren Eignung getroffen werden.

Anhand der in Diagramm 2 dargestellten Druckverläufe des ersten und den Anfang des zweiten Prozesszyklus kann der Prozessablauf dieser Einsparmaßnahme, welcher sich in sechs Phasen unterteilen lässt, näher erläutert werden. So wird in Phase I das Werkzeug komplett mit Druckluft aus der Druckluftquelle bis auf Maximaldruck  $p_{WKZ} = 7,6$  bar gefüllt. Dieser Vorgang stellt den Formprozess

des Bauteils dar. Die sich anschließende Prozessphase II beginnt mit dem Entlüftungsvorgang des Werkzeugs. Dabei wird ein Druckausgleich zwischen Werkzeug und Druckspeicher vollzogen. Dabei nähern sich die Drücke beider Behälter bis zur Gleichheit ( $p_{WKZ} = p_{DS} = 3,6 \text{ bar}$ ) an.

**Diagramm 2: Druckverläufe der Variante 1 über einen Prozesszyklus [6/1]**



Die Restentlüftung des Werkzeugs auf Atmosphärendruck geschieht in Phase III, wobei der Druck des Druckspeichers erhalten bleibt. Die sich anschließende Phase IV repräsentiert die Bauteilentnahme und die Aufnahme der nächsten Vorform. Es ist ersichtlich, dass über diesen Zeitraum entgegen der Erwartungen der Speicherdruck nicht konstant verläuft, sondern leicht abfällt. Die Ursache liegt bei der während des Druckausgleiches im Druckspeicher auftretenden Kompression und dem damit verbundenen Temperaturanstieg der Luftmasse. Nach dem vollzogenen Druckausgleich kühlt die Druckluft wieder ab. Das heißt, es wird Wärme vom Druckspeicher an die Umgebung abgegeben. Dieser Abkühlprozess kann mit dem Gesetz von Amontons (Gleichung 16) beschrieben werden, welches besagt, dass der Druck idealer Gase bei gleich bleibendem Volumen und gleich bleibender Stoffmenge, wovon an dieser Stelle ausgegangen werden kann, direkt proportional zur Temperatur ist [1/1].

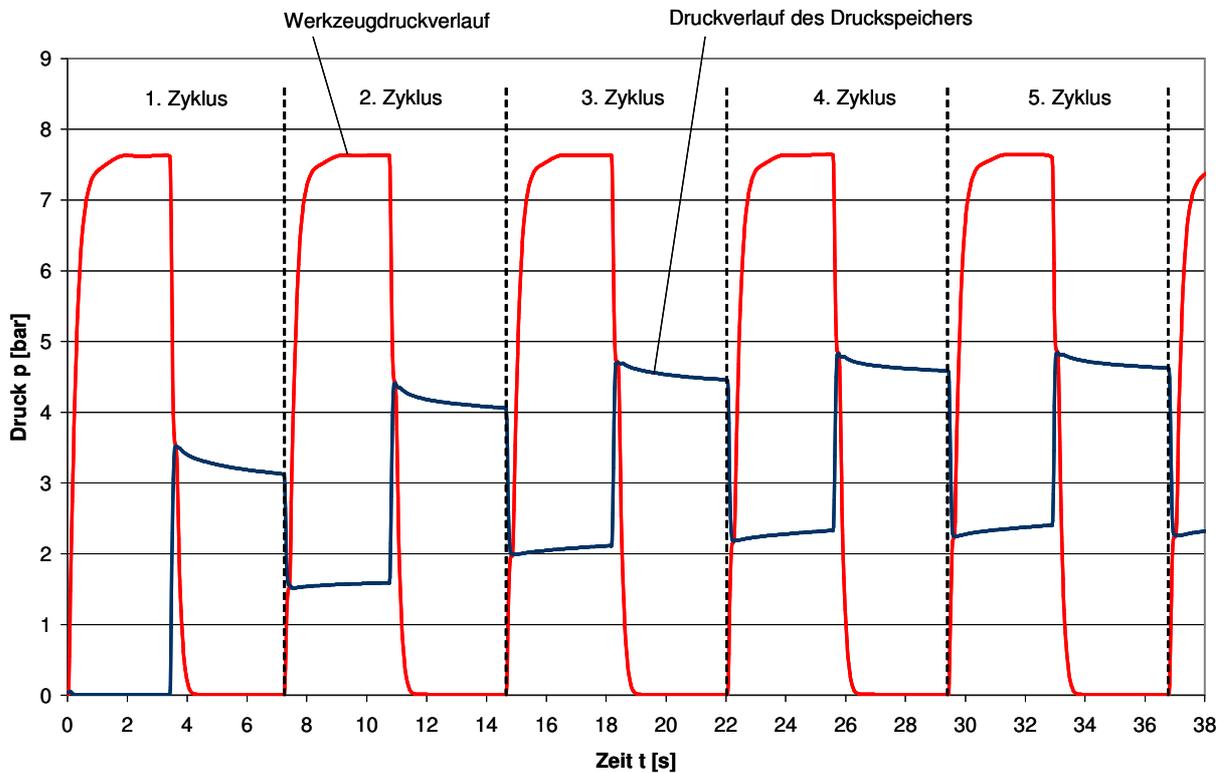
$$\frac{p}{T} = \text{konst.} \quad (16)$$

Demnach fällt der Druck bei einer Temperaturverringerung, wie bei Prozessphase IV leicht ab. Mit Ende dieser Phase ist der erste Prozesszyklus abgeschlossen und es beginnt der zweite Zyklus, welcher wie jeder weitere abläuft. Am Anfang der Phase I des zweiten Zyklus, welche im Diagramm 2 mit der Phase V gekennzeichnet ist, findet ein erneuter Druckausgleich statt. Dieser stellt den Vorformprozess dar. Nachdem der Druckausgleich abgeschlossen ist, wird das Werkzeug durch die Druckluftquelle in Phase VI mit Maximaldruck beaufschlagt und damit das Bauteil zur Endform

ausgeformt. Der weitere Verlauf entspricht den bereits beschriebenen Phasen II, III und IV des ersten Zyklus.

Im Weiteren war zu prüfen, wie sich der Druck des Druckspeichers über mehrere Prozesszyklen entwickelt. Im Diagramm 3 sind daher die Druckverläufe über einen längeren Zeitraum dargestellt.

**Diagramm 3 : Druckverläufe der Variante 1 über mehrere Prozesszyklen [6/1]**



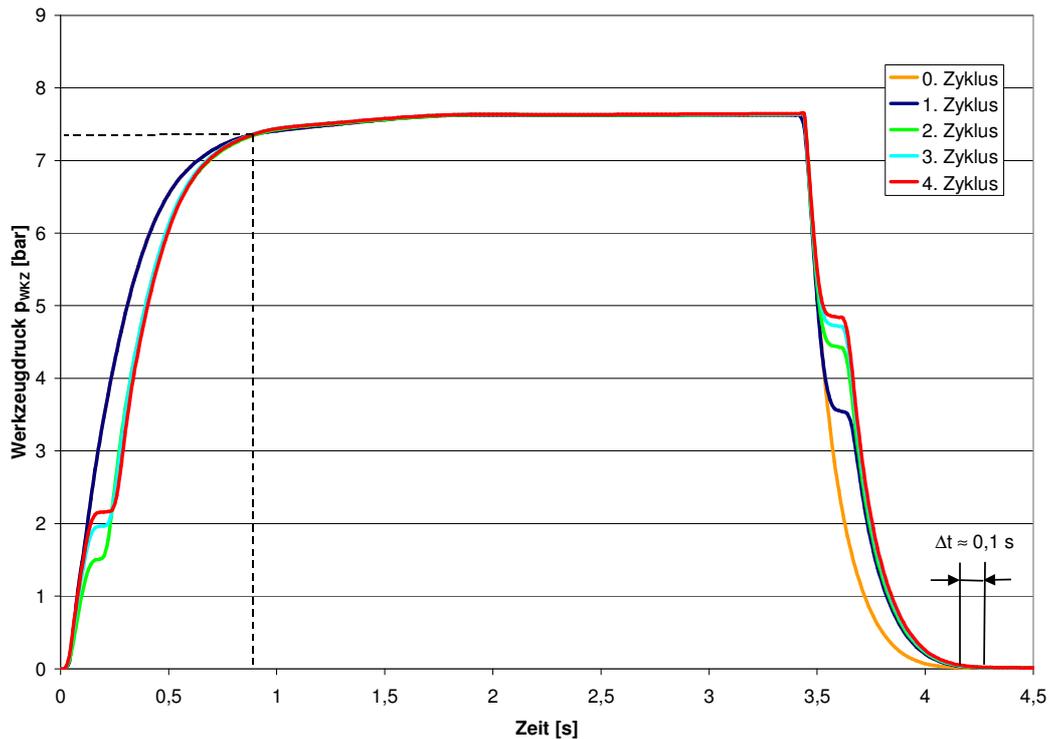
Das Diagramm 3 verdeutlicht, dass sich der Druck des Druckspeichers bis zum vierten Prozesszyklus von Zyklus zu Zyklus erhöht. Ab dem vierten Zyklus stellt sich nach der Werkzeugentleerung im Druckspeicher stets ein Druck von  $p_{DS} = 4,6$  bar ein (vgl. 5. Zyklus). Dementsprechend kann ab dem fünften Zyklus und für alle nachfolgenden Zyklen davon ausgegangen werden, dass am Ende des Vorformprozesses im Werkzeug ein Vorformdruck von  $p_{vorf} = 2,2$  bar anliegt. Des Weiteren zeigt dieses Diagramm einen ähnlichen Effekt des Speicherdruckverlaufs wie im Diagramm 2 auf. So steigt der Druck des Druckbehälters nach dem Vorformprozess zu Beginn eines Zyklus bis zum Zeitpunkt des Druckausgleichs bei der Werkzeugentleerung leicht an. Dies ist auf die beim Vorformprozess im Druckspeicher auftretende Expansion der Druckluft zurückzuführen. Durch die Expansion kühlt sich die Druckluft schlagartig ab. In der Folge wird die gespeicherte Druckluft nach dem Druckausgleich von der Umgebung wieder aufgewärmt. Dies führt zu einer Druckerhöhung im Speicher, was mit dem Gesetz von Amontons (3) begründet werden kann.

Neben dem sich einstellenden Druck, welcher für das Vorformen zur Verfügung steht, zeigt diese Versuchsreihe weiterhin, inwiefern durch diese Einsparvariante der bisherige Prozess beeinflusst werden wird. Als kritisch waren dabei die Druckausgleiche zwischen Werkzeug und Druckspeicher zu sehen. Besonders bei dem Vorformprozess ist zu prüfen, dass der Werkzeugdruck schnellstmöglich

den Maximalwert erreicht, da ein verzögerter Druckaufbau zu Qualitätseinbußen führen kann. Bei dem zweiten Druckausgleich ist hingegen lediglich eine Verlängerung der Taktzeit zu befürchten.

Das Diagramm 4 zeigt die Änderungen der Druckverläufe zwischen den Zyklen auf. Dabei sind die einzelnen Zyklen übereinander gelegt worden, um so die zeitlichen Unterschiede darstellen zu können.

**Diagramm 4: Vergleich der Werkzeugdruckverläufe unterschiedlicher Zyklen (Variante 1) [6/1]**



Im Diagramm 4 sind fünf verschiedene Zyklen aufgeführt. Dabei repräsentiert der nullte Zyklus den bisherigen Druckverlauf ohne Verwendung einer Einsparmaßnahme und wurde ebenfalls mit dem entwickelten Versuchsstand aufgenommen. Mit diesem Zyklus können im Folgenden die Zyklen mit eingesetzter Energieeinsparvariante direkt verglichen werden. Das Diagramm 4 verdeutlicht die unterschiedlichen Druckverläufe bei Beginn der verschiedenen Zyklen. Während sich der Druckanstieg des ersten Zyklus aufgrund der vollständigen Befüllung des Werkzeugs mit Frischluft mit dem des nullten überdeckt, ist bei den Zyklen zwei, drei und vier eine Zeitverzögerung festzustellen. Dies ist auf die während des Druckausgleichs geringer werdende Druckdifferenz zurückzuführen, was wiederum einen Abfall des Volumenstroms zwischen Werkzeug und Druckspeicher verursacht. Nachdem der Druckausgleich vollzogen ist und Frischluft aus der Druckluftquelle in das Werkzeug geleitet wird, steigt der Werkzeugdruck im weiteren Verlauf steil an. Dabei sind die Druckverläufe der verschiedenen Zyklen ab dem zweiten Zyklus untereinander nur unwesentlich anders und im Vergleich zum bisherigen Prozesszyklus (nullter Zyklus) leicht zeitversetzt. Jedoch treffen die einzelnen Druckkurven noch vor dem sich einstellenden Maximaldruck zusammen. Wie im Diagramm 4 gekennzeichnet, geschieht dies bei  $t=0,9$  s nach Zyklusbeginn bei einem Druck von  $p_{WKZ}=7,4$  bar. Da der Werkzeugdruck annähernd so schnell den Maximalwert erreicht wie bei dem herkömmlichen

Prozessablauf (vgl. Diagramm 1), kann davon ausgegangen werden, dass durch den Vorformprozess keine Qualitätseinbußen zu erwarten sind. Der zweite Druckausgleich zwischen dem gefüllten Werkzeug und dem teilgefüllten Druckspeicher ist ebenfalls kritisch zu betrachten. Bei einer durch diesen Druckausgleich hervorgerufene Verzögerung des Prozesses sind zwar keine Beeinträchtigungen des Blasformprozesses in Form von Qualitätseinbußen des Produktes sondern lediglich eine Taktzeitverlängerung zu vermuten, was eine Eingliederung der Einsparmaßnahme in den derzeit vorhandenen Prozessablauf jedoch erschweren würde. Aus dem Diagramm 4 geht hervor, dass bei allen Zyklen (der nullte Zyklus ausgenommen) die Werkzeugentlüftung und damit verbunden der Druckausgleich zeitgleich stattfindet. Zu Beginn des Druckausgleichs fällt der Druck bei allen Zyklen gleichermaßen, bis die Druckdifferenz zwischen Werkzeug und Druckspeicher so gering ist, dass der Volumenstrom deutlich kleiner wird und es zur Stagnation des Drucks kommt. Nachdem der Druckausgleich beendet ist, fallen die Drücke leicht zeitversetzt jedoch zunächst mit gleichem Verlauf ab. Zum Ende des Entlüftungsvorgangs nähern sich die Druckverläufe an und erreichen leicht zeitversetzt den atmosphärischen Druck. Im Vergleich zum herkömmlichen Prozess (nullter Zyklus) ist festzustellen, dass bei dem ersten, zweiten, dritten, vierten und folglich jedem weiteren Zyklus bei der Anwendung dieser Einsparvariante das Werkzeug um  $\Delta t \approx 0,1$  s verzögert entlüftet ist. Demnach verlängert sich die Taktzeit des Blasformprozesses um ca.  $t \approx 0,1$  s Da jedoch bei dem derzeitigen Prozessablauf, wie bereits in Kapitel 3 erwähnt, für den Entlüftungsvorgang in der Steuerung zur Sicherheit eine längere Zeit als notwendig vorgesehen ist, ist es sicher, dass diese Einsparvariante ohne Taktzeitverlängerung in den Blasformprozess eingegliedert werden kann.

Anhand der durchgeführten labortechnischen Untersuchungen wird deutlich, dass nach einer kurzen Anlaufphase (bis zum vierten Zyklus) stets nach dem Vorformprozess ein Druck von  $p_{\text{vorf}} = 2,2$  bar im Werkzeug herrscht. Dementsprechend ist von der Druckluftquelle lediglich die Differenz bis zum Maximaldruck aufzubringen. Die mit dieser Einsparvariante erreichbare Druckluftreduzierung ergibt sich mittels Gleichung 17 demnach wie folgt:

$$\frac{p_{\text{vorf}}}{p_{\text{max}}} \cdot 100\% = \frac{2,2 \text{ bar}}{7,6 \text{ bar}} \cdot 100\% = 28,9\% \quad (17)$$

Im Vergleich zu der theoretisch ermittelten Einsparung dieser Variante von 33% (vgl. Tabelle 2) zeigen die labortechnischen Untersuchungen ein geringeres Einsparpotenzial auf. Dies ist in den Leitungsverlusten begründet, welche bei der theoretischen Anschätzung nicht berücksichtigt wurden. Im Praxiseinsatz dieses Lösungskonzepts ist eine weitere Reduzierung der möglichen Einsparung zu erwarten, da bei den labortechnischen Untersuchungen die Aufweitung der Vorform beim Vorformprozess mit dem entwickelten Versuchsstand nicht simuliert werden konnte und eine annähernd vollständige Ausformung angenommen wurde.

## 7 Umsetzung der Versuchsergebnisse beim Praxispartner

### 7.1 Entwicklung eines Prototypen des Einsparmoduls

Auf Grundlage der erfolgreich verlaufenen Labortests galt es folgend, das Lösungsprinzip beim Praxispartner Trassl Plastik unter Produktionsbedingungen umzusetzen und zu testen. Mit Hilfe der Praxisuntersuchungen sollten noch offene Fragen, wie mögliche Einflüsse der Einsparvorrichtung auf die Bauteilqualität, tatsächliche Leitungsverluste an der Blasformanlage sowie der real einzusparenden Menge an Blasluft, beantwortet werden. Aufgrund des günstigeren Einsparpotenzials und dem geringeren Eingliederungsaufwand der im vorangegangenen Kapitel 6 beschriebenen Vorzugslösung „Indirekten Weiterverwendung der Blasluft für einen Vorformprozess“ wurde speziell für diesen Prozessablauf ein Prototyp eines Sparmoduls entwickelt.

Für die Praxistests wurden zusammen mit dem Projektpartner Trassl Plastik als Referenzprodukt eine 1-Liter-Flasche und als umzurüstende Anlage die bereits im Kapitel 2 beschriebene Referenzmaschine BM 101D festgelegt. Für die Umsetzung des Lösungsprinzips im Praxiseinsatz waren im Wesentlichen ein Druckspeicher mit einem auf das Referenzbauteil abgestimmten Volumen, ein 3/2-Wegeventil zur Realisierung der Druckausgleiche zwischen Werkzeug und Druckspeicher, ein 3/2-Wegeventil zum Absperrn der Spülluft, Drucksensoren zur Prüfung des Werkzeug- und des Druckspeicherdrucks sowie eine geeignete Steuerung zur Realisierung und Eingliederung des gewünschten Prozessablaufes in die vorhandene Steuerung der Fertigungsanlage notwendig. Die Abbildung 9 zeigt die Eingliederung der einzelnen Komponenten (rot) in den bisherigen Pneumatikkreislauf (schwarz) der Referenzmaschine auf.

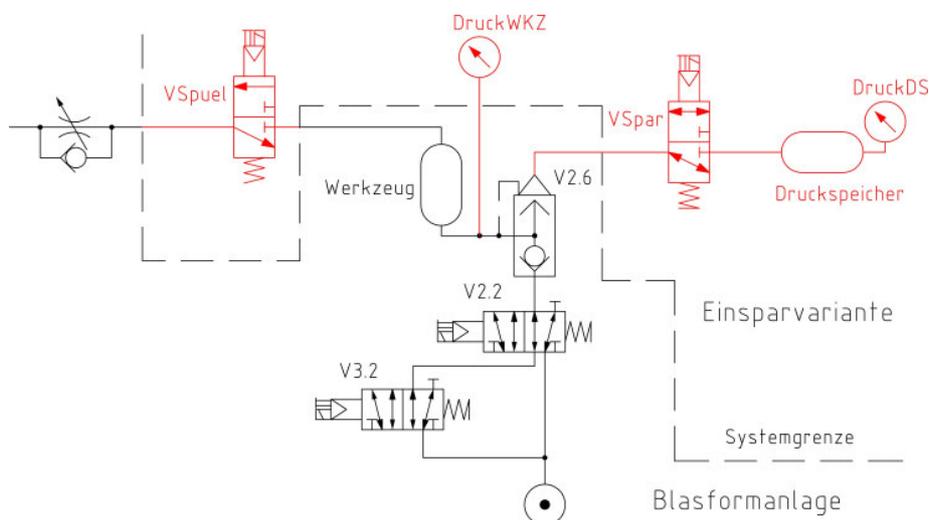
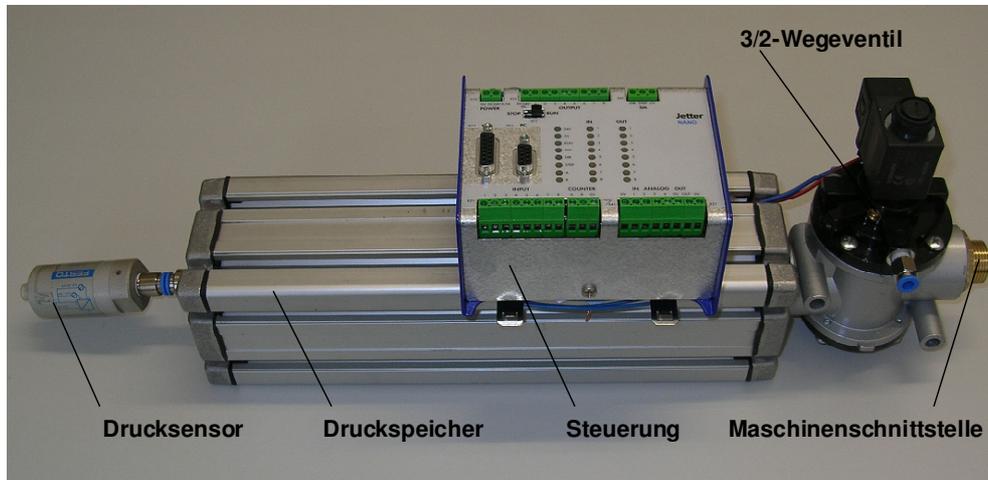


Abbildung 9: Geänderter Pneumatikschaltplan der Referenzmaschine

Wie abgebildet, wurde das Schnellentlüftungsventil (V2.6) als Schnittstelle zwischen der Blasformanlage und dem Einsparmodul gewählt, so dass zum Zeitpunkt der Werkzeugentlüftung die Blasluft zunächst direkt in den Druckspeicher geleitet wird und anschließend durch Schalten des 3/2-Wegeventils (VSpur) das Werkzeug restentlüftet werden kann. Das zusätzlich zwischen dem

Werkzeug und der Spülluftdrossel angebrachte 3/2-Wegeventil (VSpül) gewährleistet, dass die Prozessluft ausschließlich durch das Schnellentlüftungsventil aus dem Werkzeug entweicht.

Schon bei dem entwickelten Prototypen wurde besonders auf eine kompakte Anordnung der nötigen Komponenten geachtet, was die Abbildung 10 verdeutlicht.



**Abbildung 10: Prototyp des Sparmoduls zur Prozessrückführung der Blasluft**

Neben den bereits beschriebenen Komponenten ist in Abbildung 10 zusätzlich ein Drucksensor angebracht, welcher permanent den Druckspeicherdruck überwacht und ein analoges Signal der Steuerung zur Verfügung stellt. Ein weiterer Drucksensor war am Werkzeug der Blasformanlage anzubringen, welcher den vorherrschenden Werkzeugdruck der Steuerung übergibt. Mit Hilfe dieser Drucksignale konnte über die Steuerung der Moment der Druckgleichheit zwischen Druckspeicher und Werkzeug bei einem Druckausgleich genau bestimmt werden, so dass zum optimalen Zeitpunkt der Prozessablauf weitergeführt werden kann.

Für die nachfolgende Testreihe war es erforderlich, einen geeigneten Steuerungsablauf zur Eingliederung der Einsparvorrichtung in die Blasformanlage beziehungsweise deren Steuerung zu entwickeln. Dies geschah in Anlehnung an den im Kapitel 6.2 beschriebenen Prozessablauf dieser Einsparvariante. Die vollständige Anweisungsliste kann der Anlage 5 entnommen werden.

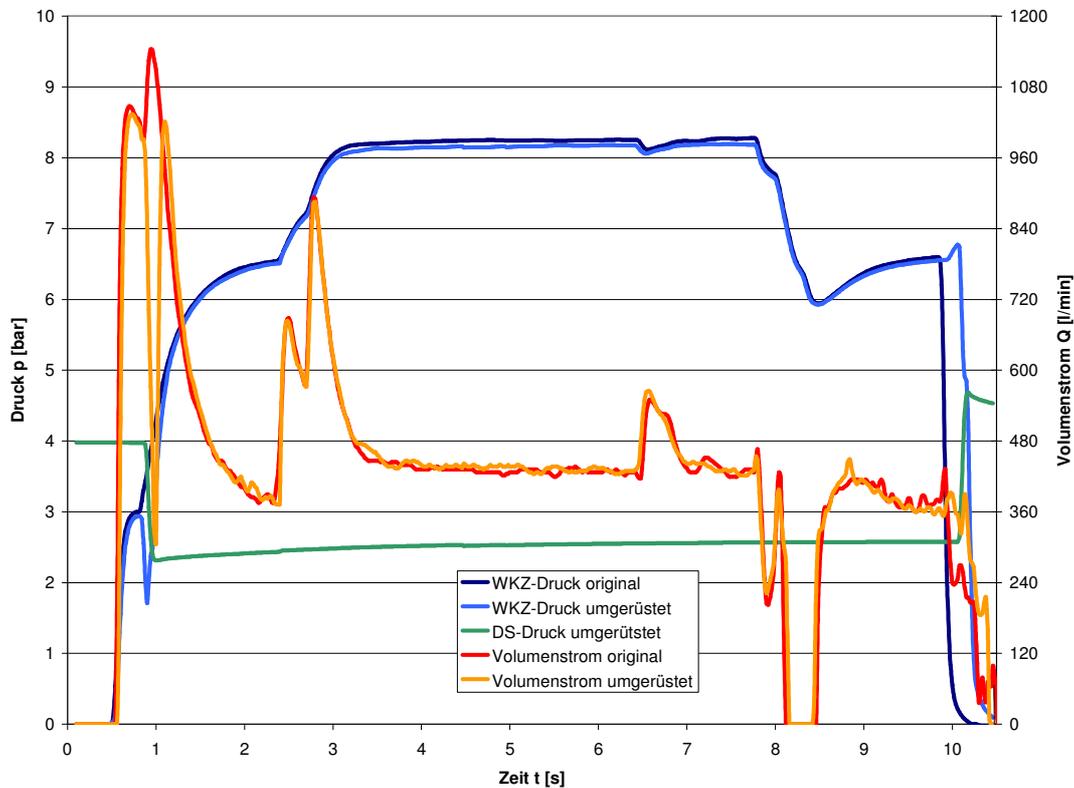
## 7.2 Einsatz der Lösung unter Praxisbedingungen

Nachdem die Einsparvariante umgesetzt und am Versuchsstand getestet wurde, galt es beim Projektpartner Trassl Plastik die Referenzmaschine umzurüsten. Zuvor ist der Produktionsprozess jedoch im ursprünglichen Zustand erneut vollständig messtechnisch erfasst worden, um so im Anschluss der Erprobung des Prototypen die Ergebnisse gegenüberstellen zu können. Dabei wurden der Werkzeugdruck- und der Gesamtvolumenstromverlauf einer Blasformstation messtechnisch aufgenommen.

Nach den abgeschlossen Referenzmessungen und der vollständigen Umrüstung der Blasformanlage wurde der Steuerungsablauf zur Eingliederung des Einsparmoduls in den Prozessablauf auf dessen Funktionalität getestet. Während der Untersuchungen wurden zum Vergleich der Werkzeugdruck-, der

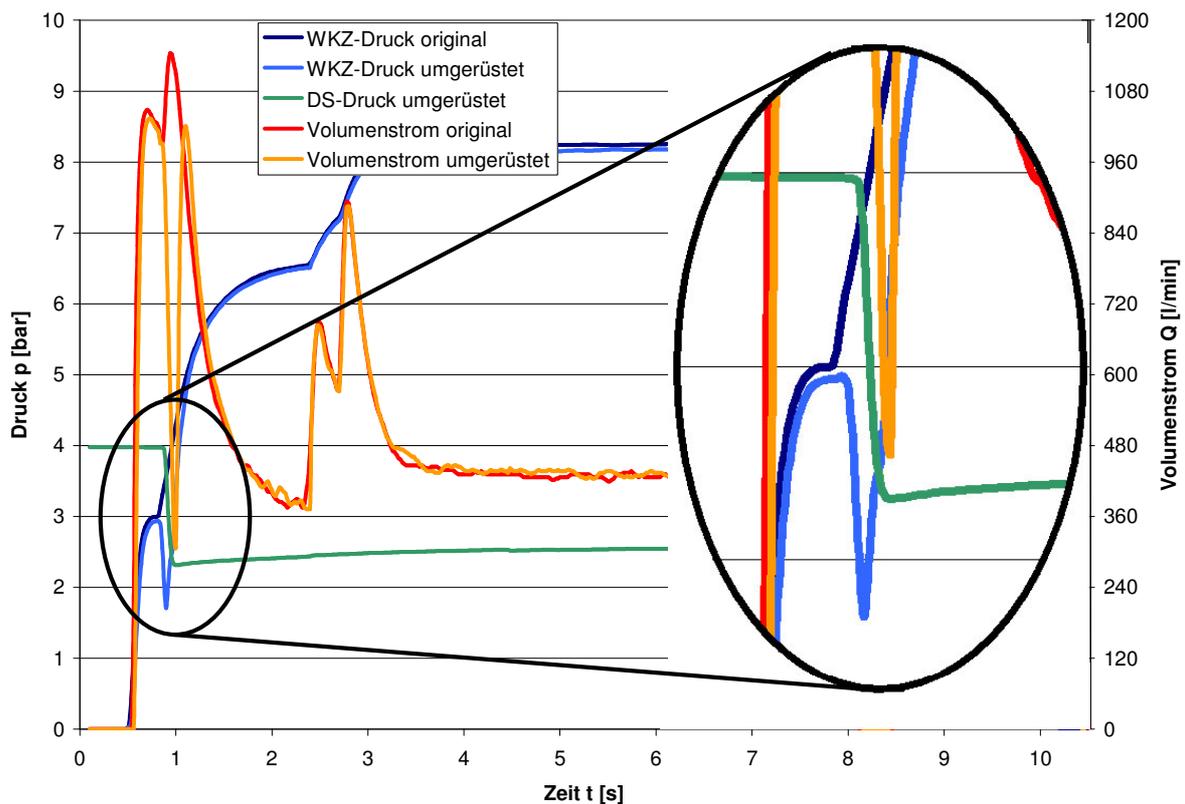
Druckspeicherdruck- und der Volumenstromverlauf der umgerüsteten Blasformstation ermittelt. Im Diagramm 5 sind die aufgenommenen Druck- und Volumenstromverläufe der Blasformmaschine im Originalzustand und im umgerüsteten Zustand aufgeführt und werden im Weiteren näher erläutert.

**Diagramm 5: Druck- und Volumenstromverläufe Blasformanlage original / umgerüstet (Trassl-Plastik)**



Aus dem Diagramm 5 geht hervor, dass die Werkzeugdruckverläufe der herkömmlichen Blasformanlage (WKZ-Druck original) und der umgerüsteten Anlage (WKZ-Druck umgerüstet) zu Beginn eines Prozesszyklus bis zum Zeitpunkt  $t = 0,8$  s gleich ansteigen. Dieser Anstieg wird durch die Vorblasluft beim Eindringen des Blasdorns in den Schmelzeschlauch hervorgerufen und hat außer dem bereits zum Teil mit Druckluft gefüllten Werkzeug keinen Einfluss auf die Einsparmaßnahme. Die Volumenstromverläufe verhalten sich im Vergleich identisch. Zum Zeitpunkt  $t = 0,8$  s wird von der Maschinensteuerung das Blasluftsignal gesetzt, was zum Schalten des Blasluftventils und somit zum Anstieg des Werkzeugdrucks beim ursprünglichen Prozessablauf führt. Beim Prozessablauf der umgerüsteten Anlage wird hingegen zunächst die Spülluftleitung durch das Spülluftventil (VSpuel vgl. Abbildung 9) gesperrt und das Einsparventil (Vspar) geschaltet, so dass zwischen dem unter Druck stehenden Druckspeicher und dem Werkzeug ein Druckausgleich stattfindet. Aufgrund der Schaltzeiten der Ventile kommt es zu einer Verzögerung des Prozessablaufs, so dass Druckluft aus dem Werkzeug über die Abluftseite des Sparventils VSpaer (vgl. Abbildung 9) entweichen kann. In der Folge fällt der Werkzeugdruck bis zum Schalten des Sparventils ab, wie das Diagramm 6 genauer verdeutlicht.

Diagramm 6: Auszug aus Diagramm 5 – Vorformprozess



Aus Diagramm 6 geht des Weiteren hervor, dass sobald das Sparventil VSpar geschaltet ist, ein Druckausgleich zwischen Werkzeug und Druckspeicher stattfindet. Verdeutlicht wird dies durch den Druckabfall im Druckspeicher (DS-Druck umgerüstet) und den Anstieg des Werkzeugdrucks (WKZ-Druck umgerüstet). Auffällig ist, dass im Vergleich der Druckspeicherdruck mehr abfällt als der Werkzeugdruck steigt, was mit einer konstruktionsbedingten Leckage beim Schalten des Einsparventils sowie auftretenden Leitungsverlusten zu begründen ist. Nach vollendetem Druckausgleich und zeitgleich abgeschlossenen Vorformprozess wird über die Steuerung des Einsparmoduls das Blasluftventil der Blasformanlage geschaltet, so dass ungenutzte Druckluft aus der Druckluftquelle in das Werkzeug strömt. Infolgedessen steigt der Werkzeugdruck weiter und gleicht sich dem Werkzeugdruckverlauf der Blasformanlage im Ursprungszustand an. Bei Betrachtung der Volumenstromverläufe wird an dieser Stelle die durch den veränderten Prozessablauf resultierende Einsparung deutlich. Während zum Zeitpunkt  $t = 1$  s bei geschaltetem Blasluftventil der Volumenstrom des derzeitigen Prozessablaufs sein Maximum ( $Q = 1150$  l/min) erreicht, fällt der Druckluftverbrauch durch die Einsparmaßnahme steil bis auf  $Q = 310$  l/min ab. Folglich benötigt die umgerüstete Blasformmaschine an dieser Stelle des Prozessablaufs und somit für den Gesamtprozess weit weniger Druckluft als die herkömmliche Anlage. Eine quantitative Betrachtung der möglichen Reduzierung des Druckluftverbrauchs folgt im Anschluss.

Nach Abschluss des Vorformens gleicht sich der Volumenstrom der umgerüsteten Blasformstation dem ursprünglichen Volumenstromverlauf an, ohne ihn zu überschreiten und verläuft im Weiteren synchron zu diesem (vgl. Diagramm 5). Der weitere Werkzeugdruck- und Volumenstromverlauf der umgerüsteten Anlage ist bis zum Zeitpunkt der Werkzeugentlüftung analog zu denen des

ursprünglichen Maschinenaufbaus. Nach ausreichend langer Kühlung des Bauteils wird das Werkzeug durch Zurücksetzen des Blasluftventils derzeit schlagartig entlüftet. Dies ist im Diagramm 5 zur Zeit  $t = 9,9$  s mit einem steil abfallenden Werkzeugdruck gekennzeichnet. Das Zurücksetzen des Steuerungssignals des Blasluftventils seitens der Maschinensteuerung löst im Steuerungsablauf des Einsparmoduls zunächst das Sperren des Spülluftventils aus. Erst im Anschluss wird das Blasluftventil zurückgesetzt und somit das Werkzeug gegen den Druckspeicher entlüftet. Im Druckverlauf spiegelt sich dies durch einen zunächst kurzzeitigen, leichten Anstieg des Werkzeugdruckes, sowie den sich anschließenden zeitversetzten steilen Druckabfall beim Druckausgleich gegen den Druckspeicher wieder. Nach vollzogenem Druckausgleich wird das Werkzeug über das Einsparventil (VSpar) restentlüftet und das Bauteil kann entformt werden. Die Ursache der angesprochenen Zeitverzögerung im Prozessablauf des Sparmoduls liegt, wie schon zu Beginn des Prozesszyklus, auch an dieser Stelle in der Schaltzeit der Ventile begründet.

Ein Vergleich zwischen den mit dem ursprünglichen Prozessablauf und unter Einsatz der Einsparvariante erzeugten Bauteilen ergab keine Qualitätsunterschiede. Daher kann davon ausgegangen werden, dass die Durchführung der Einsparmaßnahme trotz des mehrstufigen Formprozesses und der daraus resultierenden zeitlichen Verzögerung keinen Einfluss auf die Bauteilqualität hat. Somit ist die Bedingung, das Erreichen der derzeitigen Bauteilqualität, zur Fortführung der Entwicklungsarbeiten in einer zweiten Projektphase erfüllt.

Ein weiteres Kriterium zur Beurteilung des Erfolgs der Phase I ist die mit dem entwickelten Prototypen erreichbare Reduzierung der bisher eingesetzten Blasluft. Laut Projektantrag sollte mittels der Einsparvorrichtung mindestens 20% der aktuell benötigten Druckluft für den Formprozess eingespart werden, um eine Entwicklung einer Produktpalette zu gerechtfertigen. Zur Ermittlung der bei den Praxistests erreichten Blasluftreduzierung wurden die Volumenstromverläufe des derzeitigen und des veränderten Prozessablaufes herangezogen und miteinander verglichen. Über das Integral der jeweiligen Volumenstromkurve (Gleichung 18) kann die Fläche unterhalb dieser bestimmt werden, welche den Druckluftverbrauch innerhalb der festzulegenden Grenzen widerspiegelt.

$$V_V = \int_{t_1}^{t_2} Q \cdot dt = \int_{t_1}^{t_2} \dot{V} \cdot dt \quad (18)$$

Bei der Herstellung des Referenzbauteils wurde zur Kühlung die Spülluftfunktion der Referenzmaschine verwendet und somit in den aufgenommenen Volumenstrom sowohl die Blasluft als auch die Spülluft einbezogen. Daher galt es, den Einfluss der Spülluft auf den Druckluftverbrauch für die folgenden Berechnungen auf ein vertretbares Maß zu reduzieren. Besonderes Augenmerk der Kurvenverläufe liegt folglich bei dem zu Beginn des Prozesszyklus stattgefundenen Vorformen, da an dieser Stelle die hauptsächliche Einsparung entsprechend der Volumenstromverläufe (Diagramm 5) zu erwarten und der Einfluss der Spülluft noch verhältnismäßig gering ist. Im weiteren Prozessablauf sind aufgrund der analog verlaufenden Volumenstromkurven keine Unterschiede bezüglich des Druckluftverbrauchs vorhanden. Demzufolge wurden die Grenzen des Integrals der Gleichung (18) zu Beginn des Prozessablaufs (untere Grenze  $t_1 = 0,5$  s vgl. Diagramm 5) und beim Erreichen des

maximalen Werkzeugdrucks (obere Grenze  $t_2 = 3,2$  s) gewählt. Die durchgeführte Berechnung ergab einen um  $\Delta V_V = 1,26$  NI reduzierten Druckluftverbrauch der mit dem Sparmodul umgerüsteten Blasformanlage zur Anlage im Originalzustand. In der Tabelle 3 sind im Vergleich der Verbrauch an Druckluft aus der Druckluftquelle, die Menge aus dem Druckspeicher rückgeführter Druckluft und die daraus resultierende Einsparung von Druckluft aufgeführt. Als benötigte Druckluftmenge zum Ausformen des Bauteils wurde ein Normvolumen von  $V_V = 8,25$  NI zugrunde gelegt, was sich aus dem maximalen Werkzeugdruck von  $p_{WKZ} = 8,25$  bar (vgl. Diagramm 5) und dem Bauteilvolumen  $V_B = 1$  l ergibt. Ausgegangen von diesen Grundwerten und mit der ermittelten Druckluftreduzierung von 1,26 NI, konnte der nun notwendige Bedarf an frischer Druckluft aus der Druckluftquelle  $V_{VR} = 6,99$  NI und die erreichte prozentuale Einsparung von 15,27% ermittelt werden.

**Tabelle 3: Prozentuale Einsparung**

Behältervolumen: 1l  
 Blasdruck: 8,25 bar  
 benötigtes Normvolumen: 8,25 NI

	original	umgerüstet
<b>Rückgeführte Druckluft</b>	-	1,26 NI
<b>Frischlufft aus Druckluftquelle</b>	8,25 NI	6,99 NI
<b>Ersparnis</b>	-	<b>15,27%</b>

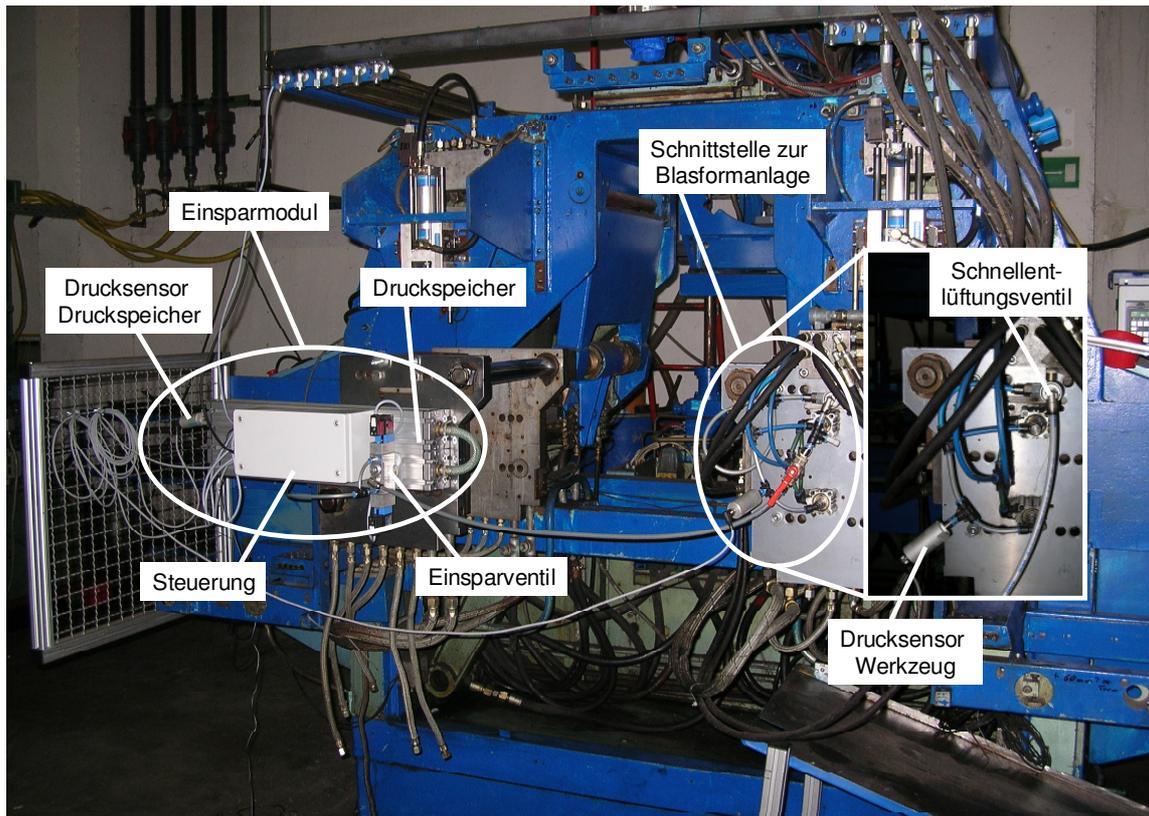
Anhand der ermittelten Einsparung wird deutlich, dass die im Projektantrag festgelegte Einsparung von 20% noch nicht erreicht wurde. Dies hat verschiedene Ursachen, welche folgend näher erläutert und mögliche Maßnahmen zum Erreichen der angestrebten prozentualen Einsparung aufgezeigt werden.

Ein wesentlicher Grund der etwas geringeren Einsparung ist der schon beschriebene Effekt des Druckanstieges beim Vorblasen. Dabei wird durch den Blasdorn bereits zum Eindringen in den Schmelzeschlauch Druckluft eingeführt, um das Vorformende offen zu halten. Bis kurz vor der Endlage des Blasdorns kann die Luft durch die Schlauchöffnung entweichen. Sobald jedoch der Dorn mit dem Werkzeug die Vorform abdichtet, baut sich zwangsläufig im Werkzeug ein Druck auf. Im Fall des Referenzproduktes stieg der Werkzeugdruck bis auf  $p_{WKZ} = 3$  bar an. So konnte lediglich ein Druckgefälle zwischen  $p_{WKZ} = 3$  bar Werkzeugdruck und  $p_{DS} = 4$  bar Speicherdruck ausgeglichen und dementsprechend weniger Druckluft aus dem Druckspeicher in das Werkzeug eingebracht werden. Um diesem Effekt entgegen zu wirken, ist es denkbar, dass Steuersignal der Blasformanlage zum Beginn des Ausformvorgangs (Schalten des Blasluftventils) schon eher zu setzen. Das Werkzeug hätte dadurch zum Zeitpunkt es beginnenden Druckausgleiches einen geringeren Druck, so dass mehr Druckluft aus dem Speicher in das Werkzeug strömt. Dies würde zu einer weiteren Reduzierung des Verbrauchs ungebrauchter Druckluft führen.

Weiterhin ist Verbesserungspotenzial beim Steuerungsablauf der Einsparvorrichtung vorhanden. Bei den Druckverläufen der umgerüsteten Blasformanlage (Diagramm 5) ist ersichtlich, dass es beim Betätigen des Einsparventils und des Spülluftventils zu Schaltverzögerungen kommt, welche die

Druckverläufe im Werkzeug und Druckspeicher maßgeblich beeinflussen. Sowohl bei dem ersten Druckausgleich zum Vorformen als auch beim Druckausgleich am Ende des Prozesszyklus geht Druckluft verloren. Beim Vorformprozess wird dies durch den bereits beschriebenen Abfall des Werkzeugdruck bei  $t = 0,8$  s deutlich. Beim zweiten Druckausgleich des Prozessablaufs hat die Schaltverzögerung zur Folge, dass das Blasluftventil länger geschaltet ist und so bis zum Sperren des Spülluftventils Druckluft über die Spülluftschaltung aus dem Werkzeug entweicht. Anschließend gelangt bis zum Zurücksetzen des Blasluftventils weiterhin Druckluft in das Werkzeug, was durch den leichten Druckanstieg verdeutlicht wird. Sowohl beim Vorblasprozess als auch bei der Zuführung der Blasluft in den Druckspeicher ist es durch einen verbesserten Steuerungsablauf des Sparmoduls möglich, die Einflüsse der Schaltverzögerungen der Ventile zu reduzieren beziehungsweise vollständig zu beseitigen und so eine höhere prozentuale Einsparung zu erzielen.

Parallel zur Entwicklung und den Untersuchungen des Sparmoduls konnte mit der Firma ESDA Kunststofftechnik GmbH ein weiterer Anwender des Blasformverfahrens als Interessent für mögliche Maßnahmen zur energetischen Optimierung dieses Fertigungsverfahrens gewonnen werden. Schon bei ersten Gesprächen stellte sich heraus, dass die ESDA Kunststofftechnik GmbH bereit ist, ihre Anlagentechnik für weiterführende Untersuchungen zur Verfügung zu stellen. Von Vorteil sind die Gegebenheiten, dass dieser Industriepartner über einen ähnlichen Maschinenpark wie die Trassl-Plastik GmbH verfügt und hauptsächlich ihre Produkte in Großserien fertigt. Dies ermöglichte eine mit geringem Aufwand durchzuführende Anpassung der Einsparvorrichtung auf die dort vorhandene Anlagentechnik, sowie die Durchführung eines Dauerversuchs. Weiterhin werden die Blasformmaschinen der Firma ESDA ausschließlich mit Blasluft betrieben, so dass in der sich anschließenden Auswertung die erreichte Einsparung ohne Einfluss der Spülluft ermittelt werden kann. Darüber hinaus konnten die Erkenntnisse und Verbesserungsvorschläge aus dem Praxistest bei Trassl-Plastik mit einfließen. Es wurde mit der Firma ESDA als Pilotanlage die Extrusionsblasformmaschine Kautex KEB 5-10 gewählt. Diese Anlage fertigt ausschließlich Kunststoffspielbausteine mit den Abmaßen  $300 \times 150 \times 75$  mm. Die Kunststoffbauteile weisen ein Blasformvolumen von rund  $2,4$  l auf und werden mit einem Umformdruck von ca. 6 bar hergestellt. Folglich wurde ein zweites Einsparmodul mit einem auf das Blasvolumen des Spielbausteins abgestimmten Druckspeicher aufgebaut und die Blasformanlage umgerüstet (Abbildung 11). Gegenüber zur Trassl-Plastik GmbH & Co. KG wendet die Firma ESDA eine andere Technologie des Extrusionsblasformen, das Nadelblasen an. Dabei wird die Druckluft für den Umformprozess nicht über einen Blasdorn, sondern über so genannte Blasnadeln in die Vorform geleitet. Nachdem die Vorform in das Werkzeug eingelegt ist, werden die hohlen Blasnadeln durch den Schmelzeschlauch gestoßen, so dass Druckluft durch die Nadeln in das Werkzeug gelangt. Da die Durchbruchstelle der Blasnadeln sich beim Umformprozess ebenfalls aufweitet, kommt es an dieser Stelle zur Leckage. Dies hatte zunächst Auswirkungen auf die Arbeitsweise des Sparmoduls. So konnte bei den Druckausgleichen durch die Sensoren zunächst keine Druckgleichheit detektiert werden. Dies hatte wiederum zur Folge, dass der Prozessablauf des Sparmoduls nicht fortgesetzt werden konnte. Dadurch entwischt die im Werkzeug und im Druckspeicher vorhandene Druckluft über die Leckagestellen an den Blasnadeln. Es kam daher nicht zu einer vollständigen Ausformung und es konnte kein intaktes Bauteil erzeugt werden.

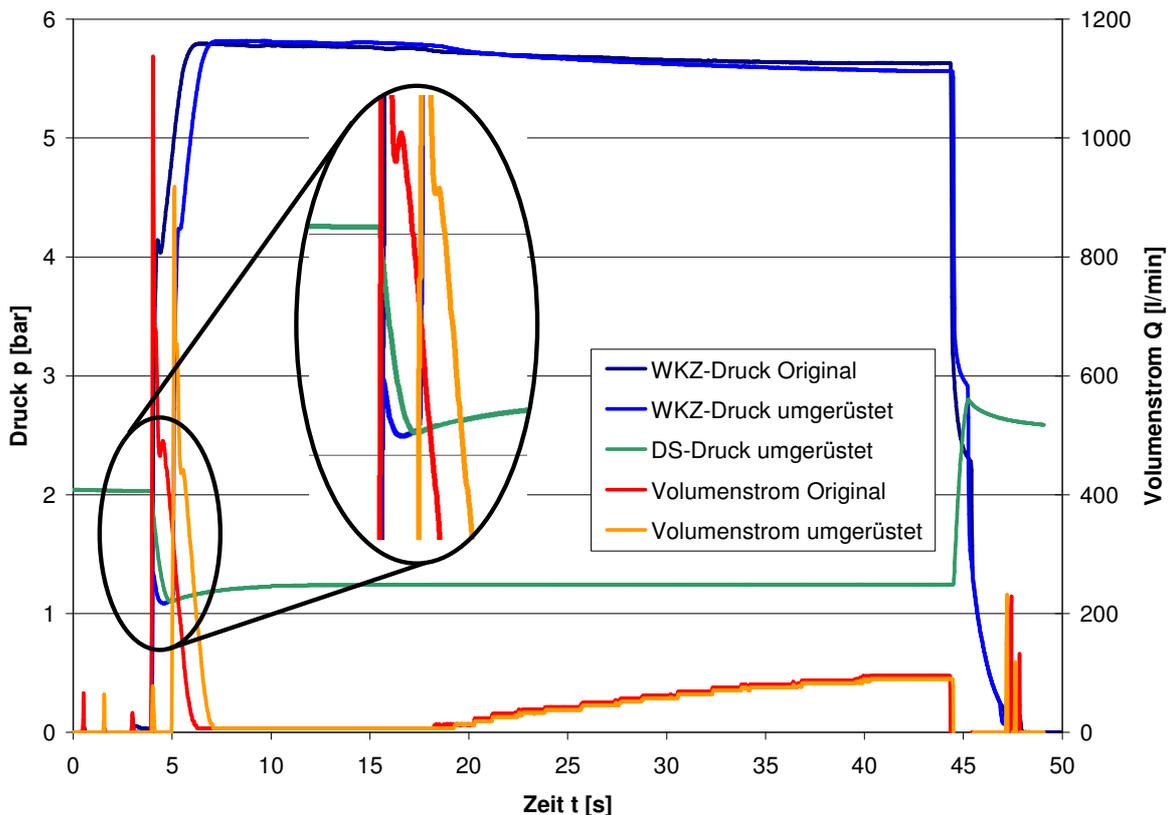


**Abbildung 11: Umgerüstete Blasformanlage KAUTEX KEB 5-10**

Durch eine Anpassung des Steuerungsablaufs gelang es, dem fehlerhaften Prozessablauf entgegenzuwirken, einen stabilen Blasformprozess zu gewährleisten und somit die umgerüstete Anlage in Betrieb zu nehmen.

Im Anschluss wurden die Druckverläufe des Werkzeugs und des Druckspeichers sowie der Druckluftverbrauch der umgerüsteten Blasformanlage im Produktionsbetrieb aufgenommen (Diagramm 7).

Diagramm 7: Druck- und Volumenstromverläufe Blasformanlage original / umgerüstet (ESDA)



Das Diagramm 7 zeigt die Kurvenverläufe des Werkzeug- und Druckspeicherdrucks sowie die Volumenstromverläufe der ursprünglichen und der umgerüsteten Blasformanlage auf. Es wird deutlich, dass bei dieser Anlage ohne Spülluftkühlung gearbeitet wird, da der Volumenstrom bei dem Umformprozess nach Erreichen des maximalen Werkzeugdrucks wieder auf null abfällt. Lediglich ab Mitte des Zyklus ( $t \approx 17$  s) ist ein leichter Anstieg des Volumenstroms zu verzeichnen, was auf die Leckage an den Einstoßstellen der Blasnadeln zurückzuführen ist. Es ist auffällig, dass zu Beginn des Zyklus ein zeitlicher Unterschied zwischen dem ursprünglichen und dem umgerüsteten Prozessverlauf vorherrscht. Dies ist die Folge des verhältnismäßig späten Eintritts von Druckgleichheit zwischen dem Druckspeicher und dem Werkzeug beim Vorformprozess, was wiederum in der Aufweitung und der damit verbundenen Volumenerhöhung der Vorform begründet werden kann. Da jedoch der Prozessablauf der Blasformanlage zeitgesteuert durchgeführt wird, hat die Verzögerung zu Beginn keinen Einfluss auf die Taktzeit des Zyklus. Demnach wird bei beiden Betriebsarten der Blasformmaschine das Werkzeug zeitgleich entlüftet ( $t = 44,5$  s). Wie schon bei den vorhergehenden Untersuchungen konnte bei der Werkzeugentlüftung aufgrund des zusätzlichen Druckausgleichs bei dem geänderten Prozessablauf eine leichte Verzögerung festgestellt werden, welche sich allerdings nicht auf den Gesamtprozess auswirkt.

Die Auswertung der Messkurven erfolgte nach dem gleichen Prinzip wie bei den Untersuchungen beim Projektpartner Trassl-Plastik. Es wurde ein Blasluftverbrauch von 13,92 Normlitern bei der herkömmlichen Arbeitsweise der Blasformmaschine und 11,12 Normlitern nach der Anlagenumrüstung nachgewiesen. Dies entspricht einer Reduzierung des Druckluftverbrauchs beim Umformprozess von 20,11%. Die aufgenommenen Messkurven zeigen auch bei diesem Prozessablauf

noch weiteren Optimierungsbedarf auf. Speziell beim Druckausgleich des Vorformprozesses ist noch Verbesserungspotenzial vorhanden.

Nach der Inbetriebnahme und den messtechnischen Untersuchungen wurde das Einsparmodul einem vierwöchigen Dauerversuch unterzogen. Diese Langzeituntersuchung war aufgrund der sich während des Umformprozess erwärmenden Blasluft zwingend notwendig. So konnte festgestellt werden, inwiefern die erwärmte, zwischengespeicherte Druckluft in Verbindung mit dem Vorformprozess die Bauteilqualität beeinflusst. Zeitgleich zu den Versuchen bei der ESDA-Kunststofftechnik wurden bei dem Projektpartner Trassl-Plastik ebenfalls Dauertests durchgeführt. Über den Zeitraum der Versuche fanden regelmäßig Qualitätskontrollen statt. Es konnte nachgewiesen werden, dass es weder bei Trassl-Plastik noch bei der ESDA-Kunststofftechnik durch die Verwendung des Einsparmoduls zu Qualitätseinbußen kam. Somit konnte bestätigt werden, dass durch das Einsparmodul die geforderter Mindesteinsparung (Projektantrag) von 20% erreicht und die Qualität der Bauteile durch den veränderten Prozessablauf nicht beeinträchtigt wird.

### 7.3 Erreichbare Umweltentlastung durch Anwendung eines Sparmoduls

Die Ergebnisse der Praxisuntersuchungen ergaben, dass durch Umrüstung herkömmlicher Blasformanlagen eine Reduzierung der Blasluft von rund 20% möglich ist. Die einzusparende Menge 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 20%-ige Einsparung der Blasluft einer spezifischen Einsparung von 66,7 J pro bar Umformdruck und je Liter Bauteilvolumen entspricht.

Am Beispiel der PET-Getränkeflaschenproduktion wird die erreichbare Umweltentlastung deutlich. Im Jahr 2006 wurden deutschlandweit 13 Mrd. PET-Getränkeflaschen mit einem durchschnittlichen Fassungsvermögen von ca. 1 Liter mit dem Streckblasformen produziert [3/1]. Bei diesem Blasformverfahren sind Umformdrücke von  $p_{\text{umf}} = 40$  bar üblich [1/2]. Durch eine Umrüstung aller Streckblasformmaschinen zur PET-Flaschenherstellung würde daher der jährliche Druckluftverbrauch um 104 Mrd. Normliter reduziert werden können. Dies entspricht einer Energieeinsparung von 9,6 Mio. kWh und einer Verringerung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes um 3.500 t pro Jahr allein bei der PET-Getränkeflaschenproduktion (Anlage 7).

Der Projektpartner Trassl-Plastik GmbH, als Anwender des Extrusionsblasformverfahrens, benötigt jährlich 1,43 Mio. kWh für die gesamte Druckluftaufbereitung (Anlage 8). Von der erzeugten Druckluftmenge werden schätzungsweise 30% als Blasluft verwendet. Würden alle Anlagen des Projektpartners mit einem Einsparmodul ausgestattet werden, wären eine Energiereduzierung um 85.800 kWh sowie ein um 30,9 t reduzierter CO<sub>2</sub>-Ausstoß pro Jahr erreichbar (Anlage 9). Unter der Annahme, dass die restlichen 1200 deutschen Betriebe [5/1], welche das Druckluftformverfahren anwenden, einen ähnlichen Druckluftverbrauch ausweisen, kann mit Hilfe der entwickelten Einsparmaßnahme deutschlandweit eine Reduzierung der Energie von rund 103 Mio. kWh erreicht werden. Dies würde zu einer Umweltentlastung um 37.000 t CO<sub>2</sub> pro Jahr führen.

Auch bei der Firma ESDA Kunststofftechnik GmbH kann Energie eingespart werden. Das Unternehmen benötigt für die Druckluftaufbereitung jährlich 277.200 kWh. Unter der Annahme, dass alle Blasformmaschinen umgerüstet werden würden, könnte ESDA jährlich ca. 55.440 kWh elektrische Energie sparen und dabei den CO<sub>2</sub>-Ausstoß um 19,95 t reduzieren (Anlage 10).

## 8 Wirtschaftliche Betrachtungen

In den beschriebenen Untersuchungen wurde festgestellt, dass eine 20%-ige Reduzierung des herkömmlich notwendigen Blasluftverbrauchs durch die entwickelte Einsparmaßnahme erreicht wird. Damit die Einsparmaßnahme in Form eines nachrüstbaren Moduls von den Anwendern des Blasformverfahrens akzeptiert und angewandt wird, 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.

Am Beispiel des Projektpartners Trassl-Plastik wurde im Kapitel 7.3 bei einer angenommenen Umrüstung aller vorhandener Blasformanlagen eine jährliche Reduzierung von 85.800 kWh elektrischer Energie ermittelt. Nach Auskunft von Trassl-Plastik produziert das Unternehmen mit 25 Blasformmaschinen. Daraus ergibt sich eine durchschnittliche Energiereduzierung von 3432 kWh pro Blasformmaschine und Jahr. Bei einem Strompreis von 0,13 €/kWh, errechnet sich ein jährlicher finanzieller Vorteil von 446,- €.

Das entwickelte Einsparmodul besteht derzeit als Prototyp aus folgenden Komponenten.

**Tabelle 4: Materialkosten für Einsparmodul vom Stand des Prototypen**

<b>Komponente</b>		<b>Preis</b>
Druckspeicher	→	≈ 50,- €
Sparventil (3/2-Wegeventil)	→	100,- €
Spülluftventil (3/2-Wegeventil), optional	→	50,- €
Steuerung (Jetter Nano B)	→	450,- €
2 Drucksensoren (0-10 bar)	→	140,- €
Gehäuse, Installationszubehör	→	≈ 50,- €
<b>Gesamtkosten</b>		<b>≈ 840,- €</b>

Aus Tabelle 4 geht hervor, dass sich Materialkosten für den Prototypen auf 840,- € belaufen. Dies würde am Beispiel von Trassl-Plastik zu einer durchschnittlichen Amortisierungszeit von 23 Monaten pro umgerüstete Blasformanlage führen.

Bei der Aufstellung der Materialkosten wird deutlich, dass die Steuerung in Verbindung mit den Drucksensoren den größten Kostenanteil stellt. Die SPS-Steuerung ist derzeit notwendig, um die Druckausgleiche zwischen dem Werkzeug und dem Druckspeicher zu detektieren. Dabei wertet die Steuerung die von den Drucksensoren gelieferten Messwerte aus. Bei der Weiterentwicklung des Prototypen des Einsparmoduls zu einem vermarktungsfähigen Produkt wird daher unter anderen

angestrebt, den Steuerungsablauf der Einsparmaßnahme umzugestalten. Ziel ist es, aus den druckgesteuerten einen zeitgesteuerten Prozessablauf zu realisieren. Dies hätte zur Folge, dass die Notwendigkeit der Drucksensoren und damit verbunden die der SPS-Steuerung nicht mehr bestehen würde. Stattdessen könnte eine wesentlich günstigere Hardwaresteuerung mit Zeitrelais Anwendung finden. Neben den Änderungen bezüglich des Steuerungsablaufes ist weiterhin ein variabler Druckspeicher vorgesehen. Es ist daher zu beachten, die Kosten für den zukünftigen Druckspeicher höher angesetzt werden müssen wie beim Prototyp.

Dies berücksichtigend können in Tabelle 5 folgende Kosten für die Komponenten des späteren Produktes abgeschätzt werden.

**Tabelle 5: geschätzte Materialkosten für das vermarktungsfähige Einsparmodul**

<b>Komponente</b>		<b>Preis</b>
Druckspeicher	→	≈ 150,- €
Sparventil (3/2-Wegeventil)	→	100,- €
Spülluftventil (3/2-Wegeventil), optional	→	50,- €
Hardwaresteuerung (Zeitrelais)	→	≈ 150,- €
Gehäuse, Installationszubehör	→	≈ 50,- €
<b>Gesamtkosten</b>		<b>≈ 500,- €</b>

Laut Tabelle 5 kann für die Umrüstung auf einen druckluftreduzierten Betrieb einer Blasformanlage derzeit mit Materialkosten von ca. 500,- € gerechnet werden. Bei einer erfolgreichen Umsetzung des druckgesteuerten auf einen zeitgesteuerten Prozessablauf würde aufgrund der Kostenreduzierung des Einsparmoduls die durchschnittliche Amortisierungszeit bei Trassl-Plastik auf 13 Monate sinken, was als ein durchaus akzeptables Ergebnis eingeschätzt wird.

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.

## **9 Erstellung eines Pflichtenheftes für eine spätere Produktreihe**

Aus den durch die Entwicklungsarbeit und die Praxisuntersuchungen gewonnen Erkenntnissen, wurden Bedingungen aufgestellt, welche für einen erfolgreichen Einsatz (Reduzierung des Blasluftverbrauchs um 20%, Beibehaltung der Bauteilqualität) des Einsparmoduls einzuhalten sind. Diese Bedingungen werden im Folgenden in Muss-, Soll- und Kannkriterien unterteilt. Dabei sind die Musskriterien unter allen Umständen einzuhalten. Die Erfüllung der Sollkriterien ist bei der Produktentwicklung anzustreben. Die Umsetzung der Kannkriterien ist wünschenswert, sie stehen jedoch nicht im Vordergrund der Entwicklungen und sind nicht zwingend erforderlich.

**Musskriterien:**

- Das Sparmodul ist so variabel für verschiedene Bauteilvolumina zu gestalten, dass das Produktspektrum der umzurüstenden Blasformmaschine abgedeckt wird. Dazu gilt es, die Produktreihe in verschiedene Volumenbereiche (z.B. 10 ml – 500 ml, 500 ml – 3 l, ..., 1000 l – 13000 l) zu unterteilen, um das Gesamtspektrum (10 ml – 13 000 l) des Blasformverfahrens zu erfassen.
- Das Einsparmodul muss durch einfache und schnelle Installationsschritte an der Blasformanlage applizierbar sein. Insbesondere ist eine galvanische Trennung zwischen der Maschinensteuerung und den elektronischen Komponenten des Produkts vorzusehen.
- 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 die Schnittstelle zur Blasformmaschinen (Schnellenlüftungsventil) anzubringen, um unnötige Leitungsverluste zu vermeiden und einen möglichst hohen Einspareffekt zu erzielen.
- Der Druckspeicher des Produktes sollte im Volumen mit dem Fassungsvermögen des Bauteils übereinstimmen, um einen möglichst hohen Einspareffekt zu erzielen.
- Es ist anzustreben, die Prozessabläufe des Einsparmoduls über Zeitrelais zu steuern, um eine zusätzliche, kostenintensive speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) zu vermeiden.
- 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 gemäß eines Baukastenprinzips erfolgen

**Kannkriterien**

- Wenn möglich ist die Produktreihe in verschiedenen Automatisierungsstufen für die Einstellung auf ein anderes Bauteilvolumen bei einem Produktwechsel anzubieten.

## 10 Maßnahmen zur Verbreitung der Ergebnisse

Die erreichten Projektergebnisse wurden bereits verschiedenen Geschäftspartnern und Interessen zum Messeauftritt bei der Sächsischen Industrie- und Technologiemesse (SIT) 2008 präsentiert. Auf diesem Wege konnte mit der ESDA Kunststofftechnik GmbH ein weiterer Interessent für ein Einsparmodul gewonnen werden. Zur SIT 2009 werden die Ergebnisse detailliert auf einem Messestand ausgestellt, um für weitere Interessenten zu werben. Hierzu sind Prospektmaterialien mit detaillierten Informationen anzufertigen. Zusätzlich wird das Einsparmodul auf dem vorhandenen Internetauftritt vorgestellt. Des Weiteren wurde das Projekt in der DBU- Broschüre „Energie effizient – Wie Industrie und Gewerbe Energie sparen können“ vorgestellt. Darüber hinaus werden derzeit weitere Artikel für die lokale Presse, das Steinbeismagazin „Transfer“ sowie für die Fachzeitschriften „Kunststoffe“ und „Kunststoffmagazin“ vorbereitet und im ersten Halbjahr 2009 veröffentlicht. Ferner wird ein Beitrag bei der Technomer 2009 – Fachtagung über Verarbeitung und Anwendung von Polymeren an der TU Chemnitz geleistet.

## Fazit

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wurde eine Einsparmaßnahme zur Reduzierung der Blasluft beim Druckluftformen entwickelt. Der Funktionsnachweis konnte anhand von labortechnischen Untersuchungen an einem Versuchstand sowie in Praxistests mit einem Prototyp eines Einsparmoduls erbracht werden. Es wurde eine Eingliederungsmöglichkeit entwickelt, welche den herkömmlichen Blasformprozess nur unwesentlich beeinflusst und die bisherige Bauteilqualität und Taktzeit trotz leichten Veränderungen des Prozessablaufs beibehält.

Aus den Erkenntnissen wurde ein Prototyp eines Einsparmoduls entwickelt, mit welchem unter Produktionsbedingungen die Ergebnisse aus den labortechnischen Versuchen nachgewiesen worden sind. Im Wesentlichen besteht der Prototyp aus einem Druckspeicher mit einem auf ein Referenzbauteil abgestimmten Volumen, einem 3/2-Wegeventil zur Realisierung der Druckausgleichs zwischen Werkzeug und Druckspeicher, Drucksensoren zur Prüfung des Werkzeug- und des Druckspeicherdrucks sowie einer Steuerung zur Realisierung und Eingliederung des gewünschten Prozessverlaufs in die vorhandene Maschinensteuerung.

Bei dem Einsatz des Prototypen des Einsparmoduls konnte eine Reduzierung von 20% der herkömmlich benötigten Blasluft nachgewiesen werden. Dies entspricht je nach Druckluftformverfahren einer möglichen Einsparung von 66,7 J pro bar Umformdruck und je Liter Bauteilvolumen. Dabei konnten sowohl Extrusionsblasformanlagen, welche die Blasluft über einen Blasdorn in das Werkzeug führen, als auch mit der Extrusionsblasformtechnologie des Nadelblasens arbeitende Anlagen erfolgreich umgerüstet werden.

Somit wurden die geforderten Randbedingungen zur Eingliederung des entwickelten Einsparmoduls in den herkömmlichen Blasformprozess sowie die Voraussetzungen zur Fortführung des Forschungsvorhabens erfüllt. Eine Weiterentwicklung des Einsparmoduls zu einem vermarktungsfähigen Produkt ist anstrengenswert. So wird es möglich sein, eine Vielzahl von Blasformanlagen energiereduziert betreiben zu können und somit die Umwelt maßgeblich zu entlasten. Schon bei einer Umrüstung von 20% der deutschlandweit betriebenen Blasformanlagen könnten 20 Mio. kWh elektrische Energie eingespart und der CO<sub>2</sub>-Ausstoß um 7400 t reduziert werden.

Demnach gilt es, im Rahmen weiterführender Entwicklungen den Prototypen weiter zu optimieren, zu standardisieren und eine Produktreihe zu erstellen. Dabei ist darauf zu achten und zu prüfen, dass alle Komponenten einem dauerhaften Einsatz standhalten werden. Des Weiteren ist es erforderlich, das Sparmodul mit einem im Volumen verstellbaren Druckspeicher auszustatten. So kann das Volumen des Druckspeichers auf das Bauteilvolumen eingestellt und das Einsparmodul bei beliebigen Bauteilvolumina im optimalen Bereich betrieben werden. Weitere durchzuführende Arbeiten sind die Entwicklung einer geeigneten Steuerung sowie einen möglichst einfachen, Platz sparenden Aufbau. Die Steuerung der Einsparmaßnahme ist so zu gestalten, dass ein Eingriff in das Steuerprogramm der vorhandenen Fertigungsanlage nicht notwendig ist. Das Ergebnis der Entwicklungen sollte ein serienreifes Produkt sein, welches als „Black-Box“ zu erwerben und für den Anwender einfach zu bedienen ist. Ziel ist es, flächendeckend den Anwendern des Blasformverfahrens eine Lösung zur Verfügung zu stellen, durch geringe Investitionskosten den Blasluftverbrauch vorhandener Anlagen um 20% senken und somit kosteneffizienter und umweltfreundlicher produzieren zu können.

## Literaturverzeichnis

### Monographien

- [1/1] Becker, F.-M. u.a.: Formeln und Tabellen für die Sekundarstufen I und II. 7. Aufl. Berlin: Paetec Gesellschaft für Bildung und Technik mbH, 1999
- [1/2] Johannaber, F.; Ast, W.: Kunststoff-Maschinenführer. München: Carl Hanser Verlag, 2003

### Firmenschriften

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

### Daten aus dem Internet

- [3/1] N.N.: Daten & Fakten ,[www.forum-pet.de](http://www.forum-pet.de), 2008

### Patente

- [4/1] EP 0 655 313 A1: Mehrfachnutzung von Blasluft / Krupp Corpoplast Maschinenbau GmbH  
[Erf.:] Weiss, R. (1994-11-07)
- [4/2] DE 195 45 024 B4: Verfahren zur Herstellung von Behältern / SIG Corpoplast GmbH & Co. KG  
[Erf.:] Koch, M (1995-12-2)
- [4/3] DE 20 2005 020 967 U1: Vorrichtung zum Blasformen von Behältern / SIG Technology AG  
[Erf.:] N.N. (2005-07-26)
- [4/4] EP 0 655 314 A1: Mehrfachnutzung von Arbeitsluft / Krupp Corpoplast Maschinenbau GmbH  
[Erf.:] Weiss, R. (1994-11-22)
- [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 3111925 A1; Verfahren und Vorrichtung zum Einsparen von Druckluft, insbesondere bei Thermoblasmaschinen; 1982

### DBU-Dokumente

- [5/1] Baldauf, S.; Emmrich, J.: Projektantrag, Energetische Optimierung des Druckluftformprozesses, AZ: 24398; 2007

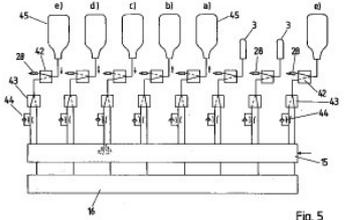
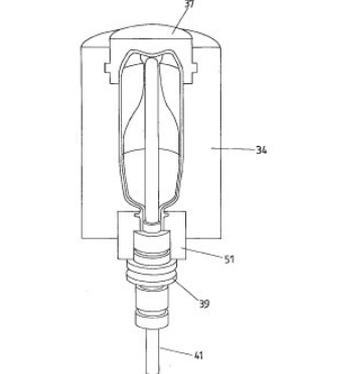
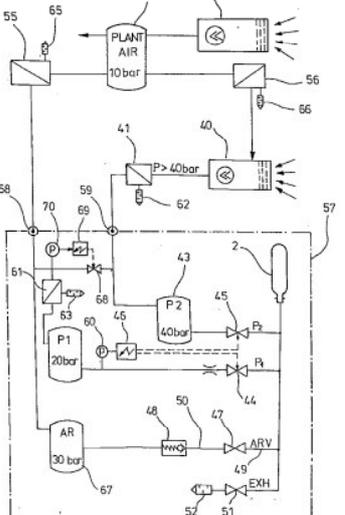
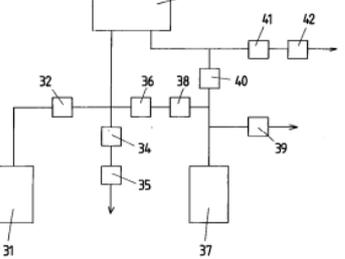
### Hochschulschriften

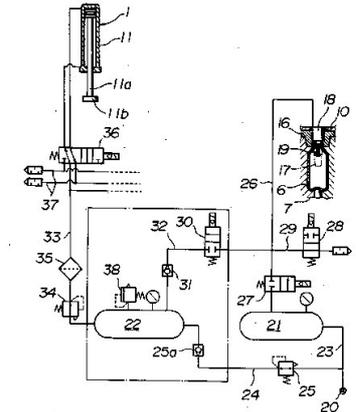
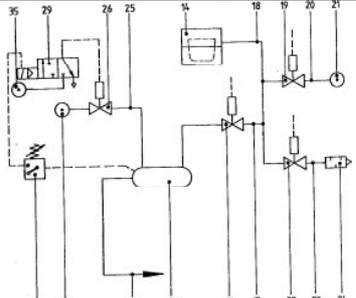
- [6/1] Zipplies, D.: Untersuchungen zu Einsparpotenzialen beim Kunststoffblasformen. Chemnitz, TU Chemnitz, Fachbereich Maschinenbau, Diplomarbeit, 2007

## Anlagenverzeichnis

Anlage 1:	Patenttablelle.....	47
Anlage 2:	Datenblätter Referenzmaschinen BEKUM BM 101D und BM 303D [2/1].....	49
Anlage 3:	Berechnung der theoretischen Einsparpotenziale.....	53
Anlage 4:	Anweisungsliste für Versuchsstand - Blasluftrückführung zu Formprozess.....	59
Anlage 5:	Anweisungsliste für Eingliederung des Einsparmoduls in die Maschinensteuerung..._	62
Anlage 6:	Berechnung der spezifischen Einsparung bei einer 20%-igen Blasluftreduzierung.....	64
Anlage 7:	Berechnung der Druckluft-, Energie- und CO <sub>2</sub> -Ausstoßreduzierung bei der PET- Getränkeflaschenherstellung.....	65
Anlage 8:	Verbrauchsdaten der Trassl-Plastik GmbH.....	66
Anlage 9:	Berechnung der Druckluft-, Energie- und CO <sub>2</sub> -Ausstoßreduzierung bei der Trassl-Plastik GmbH.....	67
Anlage 10:	Berechnung der Druckluft-, Energie- und CO <sub>2</sub> -Ausstoßreduzierung bei der ESDA Kunststofftechnik GmbH.....	68

### Anlage 1: Patentübersicht

Patentnummer; Titel; Erscheinungsjahr	Abbildung	Wesentliche Merkmale
EP 0655 313 A1; Mehrfachnutzung von Blasluft; 1994 [4/1]		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bezogen auf Blasformprozess</li> <li>• Aufbau einer Niederdruckluftversorgung</li> <li>• Zuführung der Hochdruckblasluft in Niederdruckluftversorgung</li> <li>• Einsparpotenzial: bis 20%</li> </ul>
DE 195 45 024 B4; Verfahren zur Herstellung von Behältern; 1995 [4/2]		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bezogen auf Blasformprozess</li> <li>• Zuführung der Prozessluft in eine Niederdruckversorgung</li> <li>• Nutzung der gespeicherten Druckluft für Vorform- und Hilfsprozesse</li> <li>• Druckbereiche: Hochdruckversorgung: 25-40 bar Niederdruckversorgung: 10-25 bar</li> </ul>
DE 20 2005 020 967 U1 ; Vorrichtung zum Blas- formen von Behältern; 2005 [4/3]		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bezogen auf Blasformprozess</li> <li>• Zuführung der Prozessluft in eine Niederdruckversorgung</li> <li>• Nutzung der gespeicherten Druckluft für Vorform- und Hilfsprozesse</li> <li>• Druckbereiche: Hochdruckversorgung: 25-40 bar Niederdruckversorgung: 10-25 bar</li> <li>• Technische Umsetzung aufgezeigt</li> </ul>
EP 0655 314 A1; Mehrfachnutzung von Arbeitsluft; 1994 [4/4]		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bezogen auf allg. Arbeitsprozesse</li> <li>• Aufbau einer Arbeitsluftnebenversorgung</li> <li>• Zuführung nicht weiter benötigter Arbeitshauptluft in die Arbeitsluftnebenversorgung</li> <li>• Einsparpotenzial: bis 20%</li> </ul>

<p>EP 0 754 537 B1; Weiterverwendung von Blasgas für verschiedene Antriebseinheiten in einer Streckblasformmaschine; 1995 [4/5]</p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bezogen auf Streckblasformprozess</li> <li>• Zuführung der Restluft aus Blasformprozess in Niederdrucklufttank</li> <li>• Versorgung von Antriebseinheiten durch gespeicherte Restluft</li> <li>• Druckschwankungen im Niederdrucklufttank mit Kompressor ausgleichen</li> <li>• Einsparpotenzial: bis 25%</li> </ul>
<p>DE 3111925 A1; Verfahren und Vorrichtung zum Einsparen von Druckluft, insbesondere bei Thermoblasmaschinen; 1982 [4/6]</p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bezogen auf Thermoformmaschinen</li> <li>• Speicherung der nach dem Formvorgang noch vorhandenen Druckluft</li> <li>• Versorgung von Antriebseinheiten durch gespeicherte Druckluft</li> </ul>

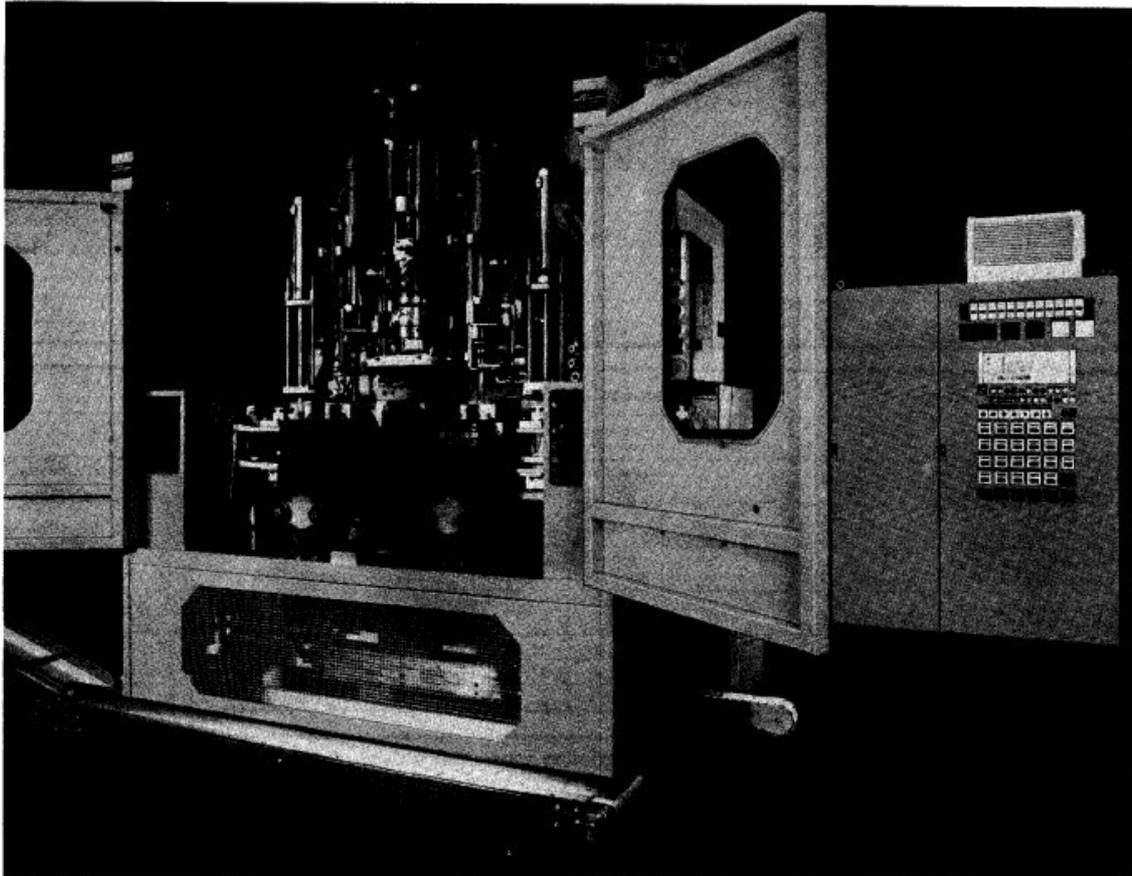
Anlage 2: Datenblätter der Referenzmaschinen BEKUM BM 101D und BM 303D [2/1]

# BEKUM

# BM-101 D

Zweistationen-  
Blasanlage

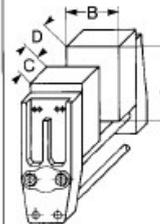
Twin-station  
Blow Moulder



Die abgebildete Maschine enthält Extras zum Mehrpreis.  
The machine picture shows special equipment at extra prices.

03.92 Produktionsmöglichkeiten production possibilities	Stichabstand centerline distance																
		L mm	Da mm	Liter litres	L mm	D mm	B mm	Liter litres	L mm	D mm	B mm	Liter litres	L mm	D mm	B mm	Liter litres	
L bei max. 50 mm Formenüberstand with mould max. 50 mm higher than platens																	
<b>2 Einfachformen</b> <b>2 single moulds</b>	—	280	120	2	270	120	160	2	270	120	160	1.5	270	120	160	2	
<b>2 Doppelformen</b> <b>2 double moulds</b>	85	270	75	0.7	270	75	75	0.7	—	—	—	—	270	65	65	0.7	
	100	255	90	1	255	90	90	1	—	—	—	—	255	80	80	1	
<b>2 Dreifachformen</b> <b>2 triple moulds</b>	60	260	50	0.3	260	50	50	0.5	—	—	—	—	260	40	40	0.3	

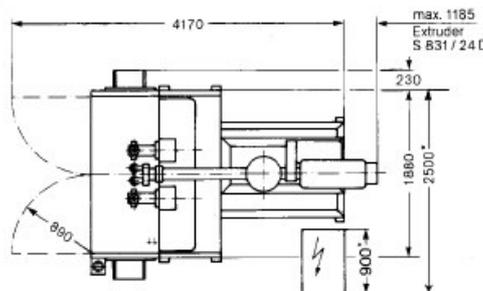
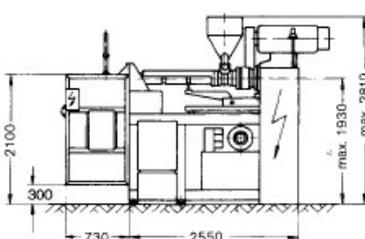
Änderungen vorbehalten  
Alterations reserved

BLASAUTOMAT / BLOW MOULDER			Blasformen / blow moulds				
<h1>BM-101 D</h1> <h2>Technische Daten</h2> <h3>technical data</h3> 			Formlänge max. mould length max.	<b>A</b>	mm	350	
			Formbreite max. mould width max.	<b>B</b>	mm	240	
			Formtiefe mould depth	<b>C</b>	mm	80	100
			Formöffnungsweg day light opening	<b>D</b>	mm	180	140
			Formgewicht max. weight of mould max.		kg		80
Trockentaktzeit dry cycle time			sec			1,7	
Maximale Anzahl Zyklen max. number of cycles			$\frac{1}{\text{min}}$			15	
Betriebsdruck, pneumatisch operating pressure, pneumatic			bar			8-10	
Betriebsdruck, Kühlwasser cooling water pressure			bar			4	
Schließkraft mould closing force			kN			30	
Nettogewicht mit Extruder, max. net weight with extruder, max.			kg			5000	
Gewicht Aufnahmewerkzeug, max. weight of pickup tool, max.			kg			25	
Motor Ölpumpe oil pump motor rating			kW			18,5	
			<b>Extrusionsköpfe / extrusion heads</b>				
			Einfachkopf single head	Düsen Ø die dia.	max.	mm	85
			Doppelkopf double head	Düsen Ø die dia.	max.	mm	40
				Stich cl. distance		mm	100
			Dreifachkopf triple head	Düsen Ø die dia.	max.	mm	30
				Stich cl. distance		mm	60
			Vierfachkopf fourfold head	Düsen Ø die dia.	max.	mm	—
				Stich cl. distance		mm	—

Extruder / extruders		Auswahl / selection							
		Glattrohretruder plain barrel extruders				Nutenrohretruder grooved barrel extruders			
Typ / type Arbeitslänge / screw ratio	D	S 633 S/ 24 D	S 701 S/ 24 D	S 831 S/ 24 D	S 601 SN/ 20 D	S 701 SN/ 20 D	S 801 NN/ 20 D		
Schneckendurchmesser screw diameter	mm	60	70	80	60	70	80		
Drehzahlbereich bei 50 Hz screw speed range at 50 cps	Upm rpm	14 ... 62/ 22 ... 98	11 ... 48/ 21 ... 91	9 ... 40/ 17 ... 76	12 ... 54/ 23 ... 102	10 ... 43/ 18 ... 80	15 ... 67		
Antriebsleistung Schnecke screw rating	kW	22	32	38	26	32	55		
Ausstoßleistung output capacity (abhängig vom Materialtyp) (depends on material type)	HDPE ca.	kg/h	15 ... 60	23 ... 82	30 ... 115	HDPE	25 ... 95	35 ... 115	35 ... 145
	PVC Pulver / powder	kg/h	16 ... 60	20 ... 70	25 ... 90	HMPE	27 ... 95	30 ... 115	35 ... 145
	PVC granul. approx.	kg/h	15 ... 70	20 ... 80	25 ... 90	PP	17 ... 70	20 ... 82	25 ... 100

Verbrauchs- und Anschlußwerte / electrical, air and cooling consumption data									
Heizleistung Extruder + Kopf, max. heating capacity extruder + head, max.		kW	16,5	18,8	19,4		12,4	15,8	20,7
Gesamtanschlußwert kompl. Anlage, max. connected load of complete unit, max.		kW	57	69,3	75,9		56,8	66,3	94,2
Form- + Extruder-Eintaufkühlung, max. cooling of mould and extruder feed zone, max.	HMPE	kJ kg/h	720 + 150		Die tatsächlichen Verbrauchswerte für Elektroenergie und Kühlung sind artikelabhängig. Der Luftbedarf ist ein Durchschnittswert, er kann sich je nach Produktionsprogramm, z. B. durch Spülluft, wesentlich erhöhen. Real consumption data for electric energy and cooling depend on the production. Compressed air requirement gives average value, may be remarkably higher for special productions due to cooling air demand etc.				
	PE		590 + 110						
	PVC		420 + 70						
Hydrauliktankkühlung cooling hydraulic tank	ca. approx.	kJ/h	33 000						
Luftbedarf (Ansaugzustand) compt. air requirement (intake)	ca. approx.	NI/min	1 200						

**Hauptabmessungen / main dimensions**



Die Schaltschrankbreite kann sich in Abhängigkeit von der technischen Maschinenausrüstung vergrößern.  
The control cabinet width may be higher depending on technical machine execution.

**ACHTUNG!**  
Alle Angaben dieses Datenblattes sind unverbindlich und beziehen sich auf den technischen Stand der Anlage in Standardausführung bei Drucklegung. Im Bedarfsfall fordern Sie bitte verbindliche Unterlagen an.

**ATTENTION!**  
All informations of this data sheet are not binding and refer to the technical status of the standard machine at printing date. Binding data of a special machine on request.

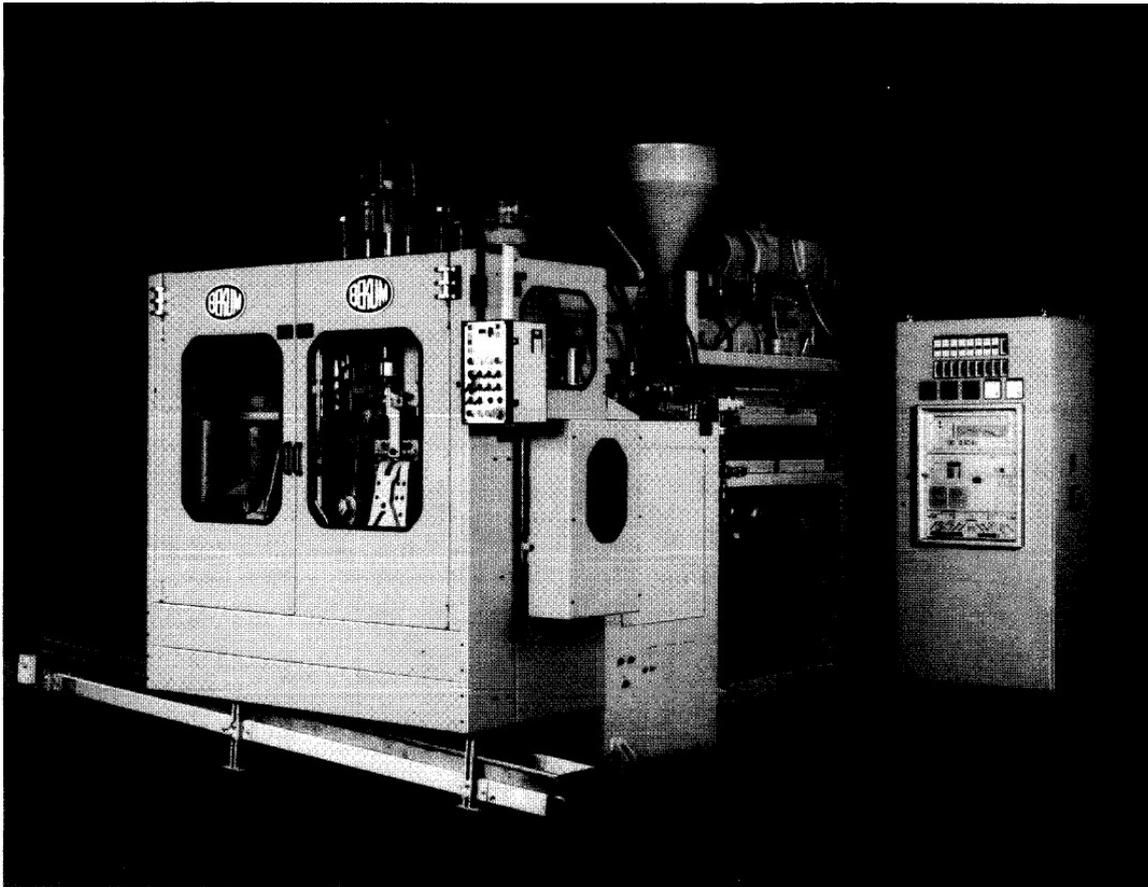
02.83 DE/03.92

# BEKUM

# BM-303 D

Zweistationen-  
Blasanlage

Twin-station  
Blow Moulder



06.88 Produktionsmöglichkeiten production possibilities	Stichabstand centerline distance															
		L mm	DA mm	Liter litres	L mm	D mm	B mm	Liter litres	L mm	D mm	B mm	Liter litres	L mm	D mm	B mm	Liter litres
L: bei max. 50 mm Formenüberstand with mould max. 50 mm higher than platens																
<b>2 Einfachformen</b> <b>2 single moulds</b>	-	345	150	3	335	150	220	3	335	150	220	3	335	150	220	3
<b>2 Doppelformen</b> <b>2 double moulds</b>	100	330	90	1	330	90	90	1	330	90	90	0,7	-	-	-	-
<b>2 Dreifachformen</b> <b>2 triple moulds</b>	125	320	110	1,5	320	110	110	1	320	110	110	1	-	-	-	-
	70	320	60	0,5	320	60	60	0,5	-	-	-	-	-	-	-	-
	85	310	75	0,7	310	75	75	0,7	-	-	-	-	-	-	-	-
																Änderungen vorbehalten Alterations reserved

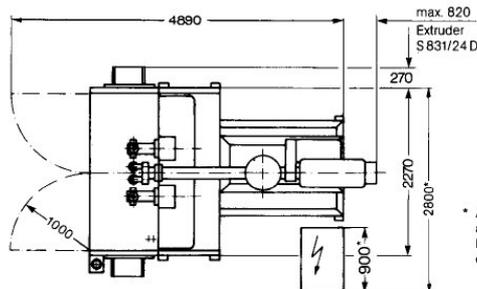
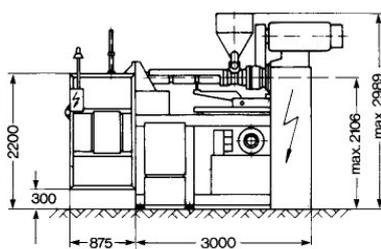
<b>BLASAUTOMAT / BLOW MOULDER</b>  <b>BM-303 D</b>  <b>Technische Daten</b> <b>technical data</b>			<b>Blasformen / blow moulds</b>			
			Formlänge max. mould length max.	<b>A</b>	mm	400
			Formbreite max. mould width max.	<b>B</b>	mm	300
			Formtiefe mould depth	<b>C</b>	mm	2 × 100
			Formöffnungsweg day light opening	<b>D</b>	mm	200
			Formgewicht max. weight of mould max.		kg	150
Trockentaktzeit dry cycle time	sec	1,8	Schließkraft mould closing force	kN	50	
Maximale Anzahl Zyklen max. number of cycles	$\frac{1}{\text{min}}$	12	Nettogewicht mit Extruder, max. net weight with extruder, max.	kg	6000	
Betriebsdruck, pneumatisch operating pressure, pneumatic	bar	8-10	Gewicht Aufnahmewerkzeug, max. weight of pickup tool, max.	kg	25	
Betriebsdruck, Kühlwasser cooling water pressure	bar	4	Motor Ölpumpe oil pump motor rating	kW	18,5	

Extrusionsköpfe / extrusion heads					Auswahl / selection			
Typ type	Material resin	Düsenanzahl no. of dies	Düsen $\phi$ die dia.	Typ type	Material resin	Düsenanzahl no. of dies	Düsen $\phi$ die dia.	Stich mm centerl. distance
BKSV 55	PE/PP	1	55	BKD 130	PE	1	130	-
BKSV 75	PE/PP	1	75	2 BKSV 55/125 V	PE	2	55	125
BKSV 95	PE/PP	1	95	3 BKSV 30/85 V	PE	3	30	2 × 85
BKSV 120	PE/PP	1	120	2 BKD 51/125	PVC	2	47	125
BKD 60	PVC	1	85					

Extruder / extruders		Auswahl / selection							
		Glattrohretruder plain barrel extruders			Nutenrohretruder grooved barrel extruders				
Typ / type	Arbeitslänge / screw ratio	D	S 633 S/ 20 D	S 701 S/ 24 D	S 831 S/ 24 D	S 601 SN/ 20 D	S 701 SN/ 20 D	S 801 NN/ 20 D	
Schneckendurchmesser screw diameter		mm	60	70	80	60	70	80	
Drehzahlbereich bei 50 Hz screw speed range at 50 cps		Upm rpm	14...62/ 22...98	11...48/ 21...91	9...40/ 17...76	12...54/ 23...102	10...43/ 18...80	15...67	
Antriebsleistung Schnecke screw rating		kW	18	32	38	26	32	55	
Ausstoßleistung output capacity	HDPE	kg/h	15...65	23...82	30...115	HDPE	25...95	35...110	35...145
	PVC Pulver / powder	kg/h	13...48	20...70	25...90	HMPE	27...95	30...115	35...145
	PVC granul.	kg/h	15...55	20...80	25...90	PP	17...70	20...82	25...100

Verbrauchs- und Anschlußwerte / electrical, air and cooling consumption data								
Heizleistung Extruder + Kopf, max. heating capacity extruder + head, max.	kW	15,7	21,9	22,5		15,5	18,9	23,8
Gesamtanschlußwert kompl. Anlage, max. connected load of complete unit, max.	kW	52,2	72,4	79		60	69,4	97,3
Form- + Extruder-Einlaufkühlung, max. cooling of mould and extruder feed zone, max.	HMPE	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg/h}}$	720 + 150		Achtung! Die tatsächlichen Verbrauchswerte für Elektroenergie, Kühlung und Luft sind artikelabhängig und liegen im Durchschnitt bei ca. 60% der angegebenen Maximalwerte. Attention! Real consumption data for electric energy, cooling and air depend on the production. They will normally correspond to about 60% of the above maximum data.			
	PE		590 + 110					
	PVC		420 + 70					
Hydrauliktankkühlung, max. cooling hydraulic tank, max.	kJ/h	50000						
Luftbedarf (Ansaugzustand), max. compr. air requirement (intake), max.	NI/min	3000						Anderungen vorbehalten! Alterations reserved!

Hauptabmessungen / main dimensions



\* Achtung: Bei Sonderausführung andere Maße.  
Note: Special executions require different dimensions.

**Anlage 3: Berechnung Einsparpotenziale**

**Annahmen:** Bauteilvolumen nach Vorformen annähernd gleich dem Volumen des fertigen Bauteils

$$\rightarrow V_B = V_{\text{vorf}}$$

Keine Leitungsverluste

**Beispielbauteil:**

Bauteilvolumen:  $V_B = 2 \text{ l}$

Umformdruck:  $p_{\text{umf}} = 8 \text{ bar}$

Nach Umformprozess im Werkzeug gespeicherte Energie:

$$E_{\text{umf}} = p_{\text{umf}} \cdot V_B \quad (3)$$

$$E_{\text{umf}} = 8 \text{ bar} \cdot 2 \text{ l} = 8 \times 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot 2 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$E_{\text{umf}} = 1600 \text{ J}$$

**Direkte Weiterverwendung der Blasluft:**

- **Rückführung der Blasluft zum Formprozess:**

→ Werkzeugdruck nach Vorformprozess  $p_{\text{vorf}}$ :

$$p_{\text{umf}} \cdot V_B = p_{\text{vorf}} \cdot (V_B + V_{\text{vorf}}) \quad (4)$$

$$p_{\text{vorf}} = \frac{p_{\text{umf}} \cdot V_B}{(V_B + V_{\text{vorf}})} = \frac{8 \text{ bar} \cdot 2 \text{ l}}{2 \cdot 2 \text{ l}} \quad V_B = V_{\text{vorf}}$$

$$p_{\text{vorf}} = 4 \text{ bar}$$

→ nach dem Vorformen im Werkzeug vorhandene Druckenergie  $E_{\text{vorf}}$ :

$$E_{\text{vorf}} = p_{\text{vorf}} \cdot V_{\text{vorf}} \quad (5)$$

$$E_{\text{vorf}} = 4 \text{ bar} \cdot 2 \text{ l} = 4 \times 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot 2 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$E_{\text{vorf}} = 800 \text{ J}$$

→ erreichbare Einsparung:

$$\frac{E_{\text{vorf}}}{E_{\text{umf}}} \cdot 100\% = \frac{800 \text{ J}}{1600 \text{ J}} \cdot 100\% = 50\% \quad (6)$$

⇒ mögliche Einsparung von 50%

- **Blasluft zur Speisung eines pneumatischen Verbrauchers**

- Pneumatikzylinder für Handhabeaufgaben:

typischer Arbeitsdruck von Pneumatikzylinder  $p_{\text{ant}} = 6 \text{ bar}$

→ maximal für den Antrieb zur Verfügung stehendes Volumen  $V_{\text{ant}}$

$$p_{\text{umf}} \cdot V_B = p_{\text{ant}} \cdot (V_{\text{ant}} + V_B) \quad (7)$$

$$V_{\text{ant}} = \frac{(p_{\text{umf}} - p_{\text{ant}}) \cdot V_B}{p_{\text{ant}}} = \frac{(8 \text{ bar} - 6 \text{ bar}) \cdot 2 \text{ l}}{6 \text{ bar}}$$

$$V_{\text{ant}} = 0,67 \text{ l}$$

→ zur Verfügung stehende Antriebsenergie  $E_{\text{ant}}$ :

$$E_{\text{ant}} = p_{\text{ant}} \cdot V_{\text{ant}} \quad (8)$$

$$E_{\text{ant}} = 6 \text{ bar} \cdot 0,67 \text{ l} = 6 \times 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot 0,67 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$E_{\text{ant}} = 402 \text{ J}$$

→ erreichbare Einsparung

$$\frac{E_{\text{ant}}}{E_{\text{umf}}} \cdot 100\% = \frac{402 \text{ J}}{1600 \text{ J}} \cdot 100\% = 25\% \quad (9)$$

⇒ mögliche Einsparung 25%

- Druckluftmotor-Generator-System → Rückgewinnung elektrischer Energie:

Arbeitsbereich eines Druckluftmotors:  $p_{\text{min}} = 1,5 \text{ bar}$

Wirkungsgrad eines Druckluftmotors:  $\eta_{\text{Motor}} = 0,2$

Wirkungsgrad eines Generators:  $\eta_{\text{Generator}} = 0,9$

→ für Pneumatikmotor verfügbare Energie  $E_{\text{pneu}}$ :

$$E_{\text{pneu}} = (p_{\text{umf}} - p_{\text{min}}) \cdot V_B \quad (10)$$

$$E_{\text{pneu}} = (8 \text{ bar} - 1,5 \text{ bar}) \cdot 2 \text{ l}$$

$$E_{\text{pneu}} = (8 - 1,5) \times 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot 2 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$E_{\text{pneu}} = 1300 \text{ J}$$

→ theoretisch erzeugbare elektrische Energie  $E_{\text{elektr}}$ :

$$E_{\text{elektr}} = E_{\text{pneu}} \cdot \eta_{\text{Motor}} \cdot \eta_{\text{Generator}} \quad (11)$$

$$E_{\text{elektr}} = 1300 \text{ J} \cdot 0,2 \cdot 0,9$$

$$E_{\text{elektr}} = 234 \text{ J}$$

→ erreichbare Einsparung

$$\frac{E_{\text{elektr}}}{E_{\text{umf}}} \cdot 100\% = \frac{234 \text{ J}}{1600 \text{ J}} \cdot 100\% = 14,6\% \quad (12)$$

⇒ mögliche Einsparung 14,6%

### Indirekte Weiterverwendung der Blasluft:

**Annahme:** Druckspeichervolumen entspricht dem Volumen des fertigen ausgeformten Bauteils

- **Rückführung der Blasluft zum Formprozess:**

→ Speicherdruck nach Druckausgleich bei Werkzeugentlüftung  $p_{\text{DS}}$ :

$$\text{allgemein: } p_{\text{umf}} \cdot V_B + p_{\text{DS}_i} \cdot V_{\text{DS}} = p_{\text{DS}_{i+1}} \cdot (V_B + V_{\text{DS}}) \quad (13)$$

$$p_{\text{DS}_{i+1}} = \frac{p_{\text{umf}} \cdot V_B + p_{\text{DS}_i} \cdot V_{\text{DS}}}{(V_B + V_{\text{DS}})}$$

$$1. \text{ Zyklus: } p_{\text{DS}_1} = \frac{p_{\text{umf}} \cdot V_B + p_{\text{DS}_0} \cdot V_{\text{DS}}}{(V_B + V_{\text{DS}})} + \frac{8 \text{ bar} \cdot 2 \text{ l} + 0 \text{ bar} \cdot 2 \text{ l}}{2 \cdot 2 \text{ l}}$$

$$p_{\text{DS}_1} = 4 \text{ bar}$$

→ Werkzeugdruck  $p_{\text{vorf}}$  nach Vorformprozess bei Druckausgleich zwischen Werkzeug und Druckspeicher:

$$\text{allgemein: } p_{\text{DS}_i} \cdot V_{\text{DS}} = p_{\text{vorf}_i} \cdot (V_{\text{DS}} + V_{\text{vorf}}) \quad (14)$$

$$p_{\text{vorf}_i} = \frac{p_{\text{DS}_i} \cdot V_{\text{DS}}}{V_{\text{DS}} + V_{\text{vorf}}}$$

$$1. \text{ Zyklus: } p_{\text{vorf}_1} = \frac{p_{\text{DS}_1} \cdot V_{\text{DS}}}{V_{\text{DS}} + V_{\text{vorf}}} = \frac{4 \text{ bar} \cdot 2 \text{ l}}{2 \text{ l} + 2 \text{ l}}$$

$$p_{\text{vorf}_1} = 2 \text{ bar}$$

Da der Druckspeicher nach dem Vorformprozess nicht gegen die Atmosphäre entlüftet wird, steigt der zur Verfügung stehende Druckspeicherdruck für den Vorformprozess bis zu einem Grenzwert an. Aus Tabelle 6 geht hervor, dass nach dem vierten Prozesszyklus für jeden weiteren Zyklus sich ein Vorformdruck  $p_{\text{vorf}} = 2,66 \text{ bar}$  einstellt.

**Tabelle 6: Druckverläufe von Werkzeug und Druckspeicher über mehrere Zyklen**

Prozess-zyklus		Druck vor Werkzeugentlüftung	Druck nach Werkzeugentlüftung	Druck nach Vorformprozess
1	Werkzeug	8 bar	4 bar	2 bar
	Druckspeicher	0 bar	4 bar	2 bar
2	Werkzeug	8 bar	5 bar	2,5 bar
	Druckspeicher	2 bar	5 bar	2,5 bar
3	Werkzeug	8 bar	5,25 bar	2,63 bar
	Druckspeicher	2,5	5,25 bar	2,63 bar
4	Werkzeug	8 bar	5,31 bar	2,66 bar
	Druckspeicher	2,63 bar	5,31 bar	2,66 bar
5	Werkzeug	8 bar	5,33 bar	2,66 bar
	Druckspeicher	2,66 bar	5,33 bar	2,66 bar

→ nach dem Vorformen im Werkzeug vorhandene pneum. Energie  $E_{\text{vorf}}$ :

$$E_{\text{vorf}} = p_{\text{vorf}} \cdot V_{\text{vorf}} \quad (5)$$

$$E_{\text{vorf}} = 2,66 \text{ bar} \cdot 2 \text{ l} = 2,66 \times 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot 2 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$E_{\text{vorf}} = 532 \text{ J}$$

→ erreichbare Einsparung:

$$\frac{E_{\text{vorf}}}{E_{\text{umf}}} \cdot 100\% = \frac{532 \text{ J}}{1600 \text{ J}} \cdot 100\% = 33,25\% \quad (6)$$

⇒ mögliche Einsparung von 33,3%

- **Blasluft zur Speisung eines pneum. Verbrauchers für Handhabeaufgaben**

typischer Arbeitsdruck von Pneumatikzylinder  $p_{\text{ant}} = 6 \text{ bar}$

→ Voraussetzung für Speisung eines Pneumatikzylinders: Druckspeicherdruck  $p_{\text{DS}} > 6 \text{ bar}$

Da sich nach einmaligen Druckausgleich zwischen gefülltem Werkzeug laut Formel (13) lediglich ein Speicherdruck von  $p_{\text{DS}} = 4 \text{ bar}$  einstellt, dann zu diesem Zeitpunkt noch kein Pneumatikzylinder angetrieben werden. Folglich sind weitere Prozesszyklen ohne Nutzung der im Druckbehälter gespeicherten Druckluft durchzuführen, bis der Speicherdruck über den für pneumatische Verbraucher Mindestdruck  $p_{\text{ant}} = 6 \text{ bar}$  steigt.

**Tabelle 7: Druckverlauf des Druckspeichers ohne zwischenzeitlicher Entlüftung**

Prozess- zyklus		Druck vor Werk- zeugentlüftung	Druck bei Druckausgleich zw. Werkzeug und Druckspeicher	Druck nach Werk- zeugentlüftung
1	Werkzeug	8 bar	4 bar	0 bar
	Druckspeicher	0 bar	4 bar	4 bar
2	Werkzeug	8 bar	6 bar	0 bar
	Druckspeicher	4 bar	6 bar	6 bar
3	Werkzeug	8 bar	7 bar	0 bar
	Druckspeicher	6 bar	7 bar	7 bar

Laut Tabelle 7 herrscht nach dem dritten Prozesszyklus erstmalig ein Speicherdruck über 6 bar. Folglich kann die zwischengespeicherte Druckluft zum Antrieb eines Pneumatikzylinders verwendet werden.

→ maximal für den Antrieb zur Verfügung stehendes Volumen  $V_{\text{ant}}$

$$p_{\text{DS}} \cdot V_{\text{DS}} = p_{\text{ant}} \cdot (V_{\text{ant}} + V_{\text{DS}}) \quad (15)$$

$$V_{\text{ant}} = \frac{(p_{\text{DS}} - p_{\text{ant}}) \cdot V_{\text{DS}}}{p_{\text{ant}}} = \frac{(7 \text{ bar} - 6 \text{ bar}) \cdot 2 \text{ l}}{6 \text{ bar}}$$

$$V_{\text{ant}} = 0,33 \text{ l}$$

→ zur Verfügung stehende Antriebsenergie  $E_{\text{ant}}$ :

$$E_{\text{ant}} = p_{\text{ant}} \cdot V_{\text{ant}} \quad (8)$$

$$E_{\text{ant}} = 6 \text{ bar} \cdot 0,33 \text{ l} = 6 \times 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot 0,33 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$E_{\text{ant}} = 200 \text{ J}$$

→ erreichbare Einsparung

$$\frac{E_{\text{ant}}}{E_{\text{umf}}} \cdot 100\% = \frac{200 \text{ J}}{1600 \text{ J}} \cdot 100\% = 12,5\% \quad (9)$$

⇒ **mögliche Einsparung 12,5%**

Anlage 4: Anweisungsliste für Versuchsstand - Blasluftückführung zu Formprozess

```

          FESTO  Software  Tool  FST

0001 SCHRITT 0
0002 WENN
0003 DANN LADE
0004 NACH SOLLWERT 'Solldruck Werkzeug
0005
0006 WENN
0007 DANN LADE
0008 NACH DRUCKUNTE 'minimaler Druckunterschied
0009
0010 WENN
0011 DANN LADE
0012 NACH ATMOSPHER 'atmosphärischer Druck
0013
0014 WENN
0015 DANN LADE
0016 NACH TV1 'Verzögerungszeit bis
      WKZ-Neubefüllg.

0017
0018 WENN
0019 DANN SETZE
0020 M14.0 'Drucksensor Werkzeug
0021
0022 WENN
0023 DANN SETZE
0024 M14.1 'Drucksensor Auffangbehälter

=====

0025 SCHRITT 1
0026 WENN
0027 DANN
0028 NOP
      'Starttaste

=====

0029 SCHRITT 2
0030 WENN N
0031 DANN SETZE
0032 SONST SP NACH
0033 1 (2)
      'Stoptaster
      'Ventil Blasluft

=====

0034 SCHRITT 3
0035 WENN (
0036 >
0037 SOLLWERT )
0038 DANN SETZE
0039 T1
      'Druck Werkzeug
      'Solldruck Werkzeug
      'TIMER zur WRZ-Befüllung

=====

0040 SCHRITT 4
0041 WENN N
0042 DANN RESET
0043 VENTIL1
      'TIMER zur WRZ-Befüllung
      'Ventil Blasluft

=====

```

FESTO Software Tool FST

```

0044 SCHRITT 5                (6)
0045 WENN                    NOP
0046 DANN LADE                ( MESSWERT1      'Druck Werkzeug
0047      -                    MESSWERT2 ) 'Druck Auffangbehälter
0048      NACH                 DIFFERENZ    'Duckdifferenz WKZ
                                           Auffangbehälter

0049
0050 WENN                    ( DIFFERENZ    'Duckdifferenz WKZ
                                           Auffangbehälter
0051      <                    DRUCKUNTE ) 'minimaler Druckunterschied
0052
0053 DANN SETZE              VENTIL2      'Entlüftungssventil
0054
=====

0055 SCHRITT 6                (7)
0056 WENN                    ( MESSWERT1      'Druck Werkzeug
0057      <                    ATMOSPHÄR ) 'atmosphärischer Druck
0058
0059 DANN SETZE              T1           'TIMER zur WRZ-Befüllung
0060
=====

0061 SCHRITT 7                (8)
0062 WENN                    N           T1           'TIMER zur WRZ-Befüllung
0063 DANN RESET              VENTIL2     'Entlüftungssventil
0064
=====

0065 SCHRITT 8                (9)
0066 WENN                    NOP
0067 DANN LADE                ( MESSWERT2      'Druck Auffangbehälter
0068      -                    MESSWERT1 ) 'Druck Werkzeug
0069      NACH                 DIFFERENZ    'Duckdifferenz WKZ
                                           Auffangbehälter
0070 WENN                    ( DIFFERENZ    'Duckdifferenz WKZ
                                           Auffangbehälter
0071      <                    DRUCKUNTE ) 'minimaler Druckunterschied
0072
0073 DANN SP NACH            2           (3)
0074
0075

```

FESTO Software Tool FST

## Operanden der Belegliste

Absolut	Symbolisch	Kommentar
A0.0	VENTIL1	Ventil Blasluft
A0.1	VENTIL2	Entlüftungssventil
E0.0	START	Starttaste
E0.1	STOP	Stoptaster
M14.0	MESS1	Drucksensor Werkzeug
M14.1	MESS2	Drucksensor Auffangbehälter
R2	SOLLWERT	Solldruck Werkzeug
R4	DIFFERENZ	Duckdifferenz WKZ Auffangbehälter
R5	DRUCKUNTE	minimaler Druckunterschied
R6	ATMOSPHÄR	atmosphärischer Druck
R50	MESSWERT1	Druck Werkzeug
R51	MESSWERT2	Druck Auffangbehälter
T1	TIMER1	TIMER zur WRZ-Befüllung
TV1	TIMER	Verzögerungszeit bis WKZ-Neubefüllg.



NANO-B - Symbollisting von "PROSPVEX" V99, 27.08.2008 10:54 Seite 1

JETTER Steuerungstechnik NANO-B

Kunde/Projekt: Blasluftesparung

Ort: Chemnitz

Datum: 27.08.2008 10:54

Version: 99

[REGISTER]

Druckunter	2	;minimaler Druckunterschied
Anstiegsbegrenz	2920	;Anstiegsbegrenzung AD-Wandlung
DruckWKZ	2903	;Werkzeugdruck analoger Eingang 1
DruckDS	2904	;Druckspeicherdruck analoger Eingang 2
xxx	3	;Ausgleich Drucksensoren
Timer	2300	;Zeitglied Blaszeit

[digitale EINGÄNGE]

EV2_2	102	;Signal Ventil2.2 schalten von Maschinensteuerung
-------	-----	---

[digitale AUSGÄNGE]

AVSpar	102	;Schalten Ventil der Einsparmaßnahme
AV2_2	101	;Schalten Ventil2.2 der Maschine
AVSpuel	103	;Schalten Ventil Spülluftstopp

**Anlage 6:** Berechnung der spezifischen Einsparung bei einer 20%-igen  
Blasluftreduzierung

- Mögliche Einsparung durch das Sparmodul: 20%
- Typischer Wirkungsgrad eines Kompressors: 30%

notwendige pneumatische Energie:  $E_{\text{pneu}} = p_{\text{umf}} \cdot V_B$  (19)

notwendige elektrische Energie:  $E_{\text{elektr}} = \frac{E_{\text{pneu}}}{0,3} = \frac{p_{\text{umf}} \cdot V_B}{0,3}$  (20)

eingesparte elektrische Energie:  $E_{\text{spar}} = E_{\text{elektr}} \cdot 0,2 = \frac{p_{\text{umf}} \cdot V_B}{0,3} \cdot 0,2$  (21)

$$E_{\text{spar}} = \frac{0,2}{0,3} \times 10^5 \times 10^{-3} \frac{\text{J}}{\text{bar} \cdot \text{l}}$$
$$E_{\text{spar}} = 66,7 \frac{\text{J}}{\text{bar} \cdot \text{l}}$$

**Anlage 7:** Berechnung der Druckluft-, Energie- und CO<sub>2</sub>-Ausstoßreduzierung bei der PET-Getränkeflaschenherstellung

- Jährlich in Deutschland produzierte PET-Getränkeflaschen: 13 Mrd. Stück [3/1]
- Durchschnittliches Flaschenvolumen von 1 Liter
- Herstellungsverfahren für PET-Getränkeflaschen: Streckblasformen → typischer Umformdruck von 40 bar

→ benötigte pneumatische Energie für 13 Mrd. Flaschen:

$$E_{\text{pneu}} = p_{\text{umf}} \cdot V_{\text{B}} \cdot n \quad (22)$$

$$E_{\text{pneu}} = 40 \text{ bar} \cdot 1 \text{ l} \cdot 13 \text{ Mrd. Stück} = 40 \times 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot 1 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot 13 \times 10^9 \text{ Stück}$$

$$E_{\text{pneu}} = 52 \text{ TJ} = \underline{14,4 \text{ Mio kWh}}$$

→ benötigte elektrische Energie bei typischen Wirkungsgrad eines Kompressors von 0,3:

$$E_{\text{elctr}} = \frac{E_{\text{pneu}}}{0,3} = \frac{14,4 \text{ Mio kWh}}{0,3} = \underline{48 \text{ Mio kWh}} \quad (23)$$

→ mögliche Einsparung durch das Sparmodul: 20%

$$E_{\text{spar}} = E_{\text{elctr}} \cdot 0,2 = 48 \text{ Mio kWh} \cdot 0,2 = \underline{9,6 \text{ Mio kWh}} \quad (24)$$

→ mögliche Reduzierung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes

$$1 \text{ TJ} = 100 \text{ t CO}_2 \quad [5/1] \quad (25)$$

$$\Rightarrow 9,6 \text{ Mio kWh} = 34,56 \text{ TJ} = \underline{3456 \text{ t CO}_2}$$

Durch einen Einsatz des Sparmoduls würde bei der jährlichen PET-Getränkeflaschenproduktion eine Einsparung von 9,6 Mio. kWh an elektrischer Energie und eine Reduzierung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes von rund 3500 t erreicht werden.

**Anlage 8:** Verbrauchsdaten der Trassl-Plastik GmbH

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  
7

Unsere Zeichen, unsere Nachricht vom  
AS/SL

Telefon, Name  
D/W -0; Axel Sieber

Datum  
13.01.06

**Kompressor-Leistung**

Sehr geehrter Herr Prof. Dr. Köhler,

im Folgenden erhalten Sie die gewünschten Informationen:

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

Die jährliche Nutzung beträgt ca. 5.500 Stunden, wobei sich ein Nutzen von 13 Mio. m<sup>3</sup> ergibt.

Bei Rückfragen stehen wir Ihnen selbstverständlich gerne zur Verfügung.

Mit freundlichen Grüßen  
Trassl-Plastik GmbH & Co. KG

Axel Sieber  
Geschäftsführer

Trassl-Plastik GmbH & Co. KG  
Kulmainer Straße 44  
95505 Immenreuth  
USt-IdNr.: DE 133992193

Kontakt:  
Tel. 09642 9207-0  
Fax 09642 8677  
E-Mail: info@trassl-plastik.de  
Internet: http://www.trassl-plastik.de

Bankverbindung:  
Sparkasse im Landkreis Tirschenreuth  
Konto-Nr. 190  
BLZ 781 510 80

Registergericht: Amtsgericht Weiden HRA 81;  
persönlich haftender Gesellschafter:  
Dr. Sieber Verwaltungsgesellschaft mbH, Immenreuth,  
Amtsgericht Weiden HRB 288;  
Geschäftsführer: Axel Sieber

**Anlage 9:** Berechnung der Druckluft-, Energie- und CO<sub>2</sub>-Ausstoßreduzierung bei der Trassl-Plastik GmbH & Co. KG

- Laut Anlage 8 hat die Firma Trassl-Plastik GmbH & Co. KG einen jährlichen elektrischen Energieverbrauch zur Druckluftherzeugung von 1,43 Mio. kWh
- Schätzungsweise 30% der erzeugten Druckluft wird als Blasluft verwendet  
→ folglich ist für die Bereitstellung der Blasluft eine Energie von 0,43 Mio. kWh notwendig
- Bei Anwendung des Einsparmoduls ist eine Reduzierung der Blasluft von 20% möglich  
→ dies entspricht einer jährlichen Einsparung von 85.800 kWh elektrischer Energie

Somit kann allein bei Trassl-Plastik der CO<sub>2</sub>-Ausstoß um 30,9 t pro Jahr verringert werden

**Anlage 10:** Berechnung der Druckluft-, Energie- und CO<sub>2</sub>-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 ESDA 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 20% reduziert werden  
→ Bei einer Umrüstung aller Blasformanlagen würde die Firma ESDA jährlich 55.440 kWh an elektrischer Energie einsparen.
- Somit kann bei ESDA der CO<sub>2</sub>-Ausstoß um 19,95 t pro Jahr verringert werden