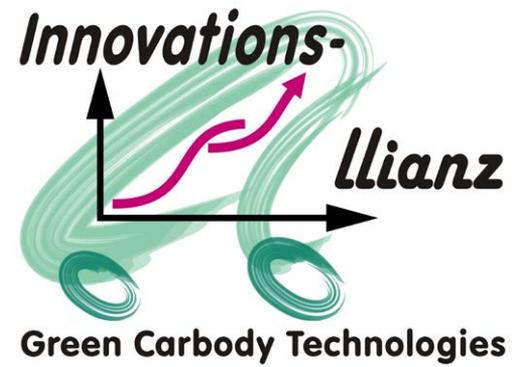


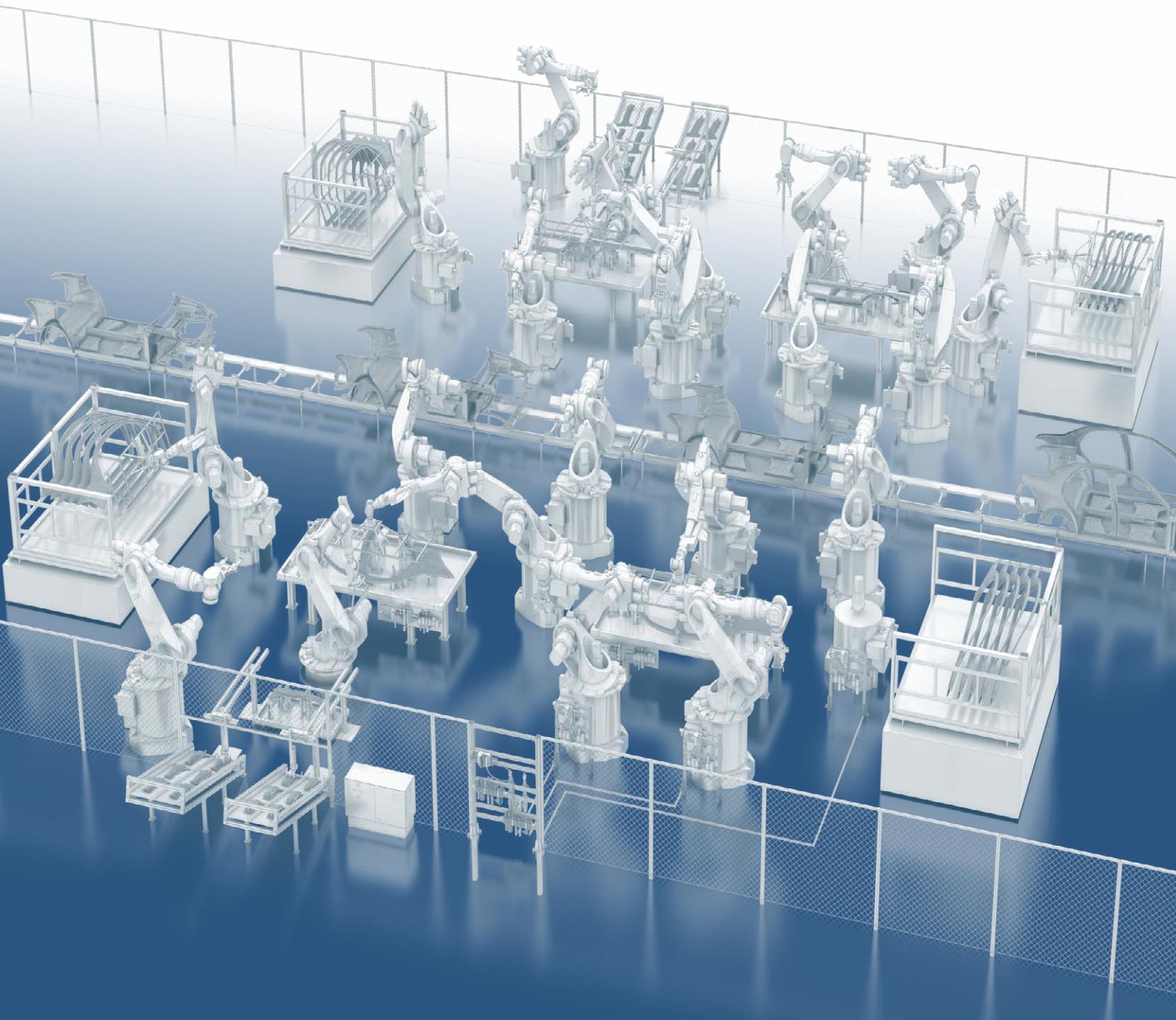
GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung



# Planung des effizienten Einsatzes von Druckluft im Karosseriebau



# Impressum

**Herausgeber**  
**Green Carbody** - Projektkonsortium

**Redaktion**  
Steffen Hülsmann

## Autoren

**Boge Kompressoren GmbH & Co. KG**  
Peter Boldt  
Nico Schikade

**Festo AG & Co. KG**  
Dr. Jan Bredau  
Daniel Ditterich  
Wolfgang Engler  
Steffen Hülsmann  
Jochen Schmidt

**Fraunhofer IWU**  
Sören Lorenz  
Andreas Schlegel

**Volkswagen AG**  
Thomas Rommel

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmenkonzept „Forschung für die Produktion von morgen“ gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den jeweiligen Autoren.

Förderkennzeichen:  
IWU 02 PO 2 700  
Festo 02 PO 2 701  
Boge 02 PO 2 706  
VW 02 PO 2 708

[www.greencarbody.de](http://www.greencarbody.de)

Dieser Leitfaden entstand im Rahmen des Projektes Green Carbody Technologies - InnoCat, das vom 01.02.2010 bis zum 31.12.2012 durchgeführt wurde.

Entstanden im Rahmen von:



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

BETREUT VOM



**PTKA**  
**Projektträger Karlsruhe**  
Karlsruher Institut für Technologie

© Green Carbody Projektkonsortium 2013.  
Nachdruck ist nur mit Genehmigung der Herausgeber gestattet.

# Vorwort

Klimaschutz, Energieeffizienz und der verantwortungsvolle Umgang mit Ressourcen gewinnen in letzter Zeit immer mehr an Bedeutung. In Zukunft werden Kunden die Kaufentscheidung für ein Kraftfahrzeug nicht mehr nur nach den Verbrauchswerten im Betrieb treffen sondern auch den Energiebedarf und die angefallenen Emissionen während der Produktionsphase des Fahrzeugs berücksichtigen. Ein hoher Energieeffizienzstandard in der Automobilfertigung ist folglich nicht nur ein Argument zur Einsparung von Kosten und dem nachhaltigen Umgang mit Ressourcen, sondern auch ein wichtiger Marketingfaktor.

In der Innovationsallianz „Green Carbody“ wurde untersucht, inwieweit sich eine Energieeinsparung um mindestens 30% in der Karosseriefertigung erzielen lässt. Das Teilprojekt „Energieeffizienter Einsatz von Druckluft“ fokussierte sich dabei auf die pneumatischen Anwendungen.

Pneumatik gilt als einfache, robuste und in der Anschaffung kostengünstige Technologie. Häufig werden der Druckluftherzeugung jedoch geringe Wirkungsgrade nachgesagt. Die Praxis zeigt jedoch, dass pneumatische Antriebstechnologie je nach Anwendungsfall bei korrekter Auslegung durchaus wirtschaftlich und effizient ist. Im Karosseriebau sind eine Vielzahl von Spann-, Greif- und Haltefunktionen notwendig. Für solche Einsatzfelder ist die pneumatische Antriebstechnik bei richtiger Anwendung prädestiniert, da sie zum Einen bei geringem Bauraum hohe Kräfte ermöglicht, zum Anderen erfolgt das Halten und Spannen leistungslos.

Eine ganzheitliche und systematische Berücksichtigung der Druckluffeffizienz sowohl bei der Neuplanung von Werken als auch bei der Umrüstung bestehender Anlagen ist hierbei extrem wichtig. Einzelmaßnahmen ohne Langzeitwirkung sind meist nicht ausreichend. Oftmals fehlt es an der durchgängigen Abstimmung zwischen Erzeugung, Verteilung und Nutzung der Druckluft.

Für die Ausarbeitung der Inhalte dieses Planungseleitfadens bestand daher zunächst ein wichtiges Ziel darin, Transparenz in den Verbräuchen und Verlusten zu schaffen. Es wurden umfassende Analysen der Luftverbräuche in Karosseriebauanlagen durchgeführt, die eine bessere Abstimmung zwischen Erzeuger- und Verbraucherseite ermöglichen.

Allerdings darf der Energieverbrauch nicht als einziges Maß zur Bewertung einer Antriebstechnologie interpretiert werden. Sowohl Anschaffungskosten, Wartungskosten und der Aufwand für Entsorgung sind zusätzlich relevant. Es muss daher stets eine Technologiebewertung auf Basis des TCO (Total-Cost-of-Ownership) erfolgen. Wird dies konsequent durchgeführt, so zeigt sich beispielsweise, dass auch Hochdrucknetze durchaus wirtschaftlich sein können, wenn die eingesetzten Verbraucher kostengünstig und wirtschaftlich arbeiten.

Aus den theoretischen und messtechnischen Analysen wurden eine Vielzahl relevanter Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz in Karosseriebauanlagen erarbeitet. In einigen Fällen kann bereits mit sehr geringem Aufwand die Effizienz der pneumatischen Komponenten in Produktionsanlage merklich verbessert werden.

Sowohl die Ergebnisse der durchgeführten Analysen als auch die daraus abgeleiteten Maßnahmen sind in diesem Planungseleitfaden detailliert beschrieben und zusammengefasst. Er kann insbesondere während der Planungsphase neuer Anlagen, aber auch im Rahmen von Wartungs- und Umrüstungsarbeiten als Orientierungshilfe mit Blick auf energieeffiziente und wirtschaftliche Produktionsanlagen dienen.

Der Dank der an diesem Fördervorhaben beteiligten Institute und Industrieunternehmen gilt dem BMBF und dem Projektträger Karlsruhe, mit deren Mitteln und Unterstützung dieses Vorhaben durchgeführt werden konnte.



*Dr. Jan Bredau, Festo AG & Co. KG*

<b>1</b>	<b>Das Green Carbody Projekt</b>	<b>06</b>
1.1	Das Verbundprojekt	06
1.2	Projektpartner	08
<b>2</b>	<b>Systemübersicht, Struktur und Grundlagen</b>	<b>12</b>
2.1	Warum Energieeffizienz?	12
2.2	„Pneumatik“ oder „Druckluft“?	13
2.3	Die Druckluftwirkungskette	14
	2.3.1 Druckluftherzeugung	15
	2.3.2 Druckluftaufbereitung	15
	2.3.3 Druckluftverteilung	16
	2.3.4 Anwendung	16
2.4	Bewertungsgrundlagen	17
	2.4.1 Luft- und Energieverbrauch	17
	2.4.2 Energie und Exergie	18
	2.4.3 Physikalische Größen	20
<b>3</b>	<b>Charakteristik von Karosseriebauanlagen</b>	<b>21</b>
3.1	Karosseriebau in der Automobilproduktion	21
3.2	Druckluft im Karosseriebau	22
	3.2.1 Pneumatische Komponenten	22
	3.2.2 Schweißzangentechnologie	24
3.3	Analyse der Druckluftversorgung	26
	3.3.1 Die Kompressorstation	26
	3.3.2 Netzstruktur	27
	3.3.3 Schlussfolgerungen	27
3.4	Analyse der Verbraucher	28
	3.4.1 Pneumatische Verbraucher	28
<b>4</b>	<b>Fabrikplanung</b>	<b>30</b>
4.1	Fabrikplanung im Karosseriebau	30
	4.1.1 Der Produktentstehungsprozess	30
	4.1.2 Die InnoCaT-Referenzfabrik	32
4.2	Betrachtung möglicher Anlagentopologien	34
4.3	Basis ist die Verbraucherplanung	38
	4.3.1 Automobilproduktion	39

<b>5</b>	<b>Planungshilfen zur Steigerung der Energieeffizienz</b>	<b>40</b>
5.1	Druckluffterzeugung	40
5.1.1	Drehzahlregelung	40
5.1.2	Optimierte Kompressorsteuerung	42
5.1.3	Auslegung des Druckluftspeichers	43
5.1.4	Wärmerückgewinnung	43
5.2	Druckluftaufbereitung	44
5.2.1	Einfluss der Druckluftqualität	44
5.3	Druckluftverteilung	45
5.3.1	Netzstruktur	45
5.3.2	Der Rohrleitungswiderstand	46
5.4	Pneumatische Anwendung	47
5.4.1	Einspeisepunkte	47
	I. Korrekte Dimensionierung	47
	II. Druckreduzierung am Druckregler	48
	III. Abschaltung der Druckluftversorgung	49
5.4.2	Druckluftverteilung	50
	I. Vermeidung von Leckagen	50
	II. Reduziertes Totvolumen	52
5.4.3	Ventilinseln	53
	I. Druckzonen	54
	II. Abschaltung von Anlagenteilen	54
5.4.4	Spanner und Stiftziehzyylinder	55
	I. Korrekte Dimensionierung	55
	II. Reduzierte Rückhubkraft	56
5.4.5	Schweißzangen-Antriebe	57
	I. Abschalten des Ruheverbrauchs	57
	II. Optimiertes Verfahrensprofil	58
<b>6</b>	<b>Tools zur Planungsunterstützung</b>	<b>60</b>
6.1	Ermittlung des Druckluftbedarfs	60
6.2	Planung des Druckluftnetzes	62
6.3	Planung der Kompressorstation	63
6.4	Zusammenführung aller Tools	64
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>65</b>
<b>8</b>	<b>Anhang</b>	<b>66</b>

# 1.1 Das Verbundprojekt

1

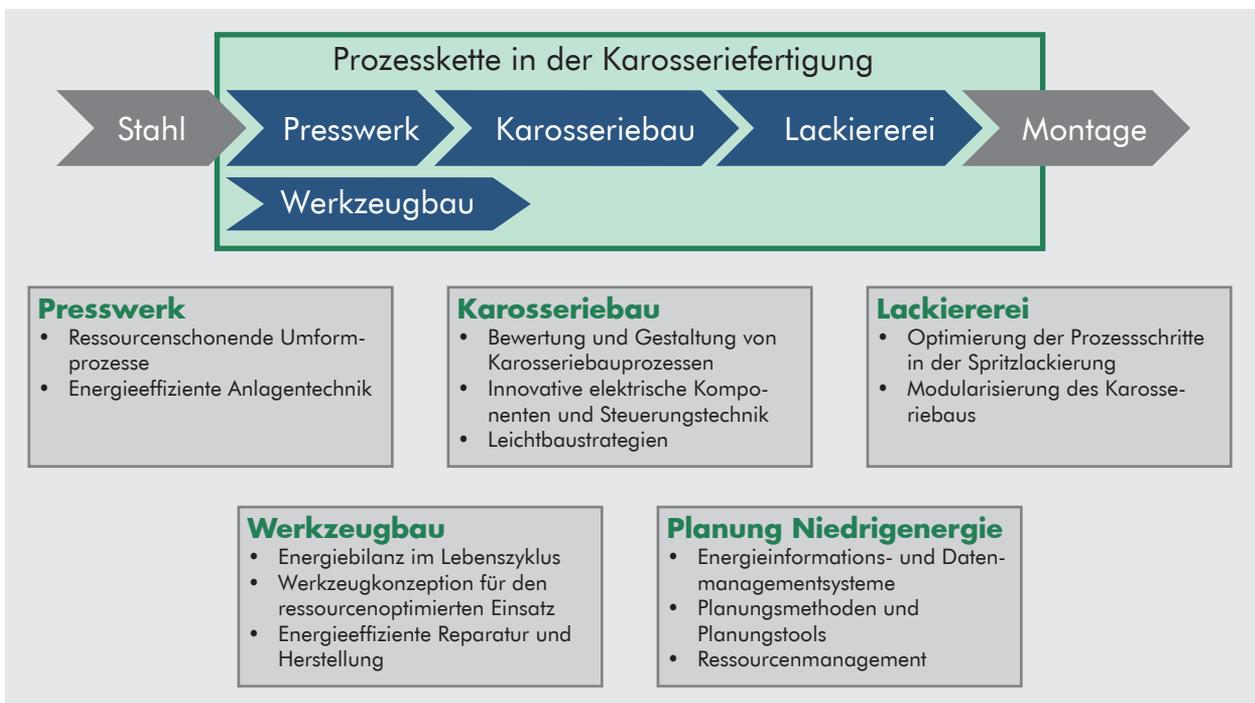
Die **Innovationsallianz „Green Carbody Technologies“** ist eine im Jahr 2008 gestartete Initiative der deutschen Automobil-, Ausrüster- und Zulieferindustrie. Sie verfolgt in ihrer Gesamtheit als Technologieverbund das Ziel einer markt- und anwendungsorientierten Kooperation zur Erreichung signifikanter Innovationen im Bereich der Energie- und Ressourcenschonung bei der Fertigung von Fahrzeugkarosserien.

Die Innovationsallianz kommuniziert die neuesten Forschungsergebnisse aus fünf Verbundprojekten eines BMBF-Förderschwerpunkts. In den Verbänden arbeiten mehr als 60 Unternehmen und Forschungsinstitute zusammen.

Der Fokus der Allianz ist die Karosseriefertigung, welche die Prozesskette von Werkzeugbau, Presswerk, Karosseriebau und Lackiererei umfasst. Grund der Fokussierung ist, dass die Karosserie als funktionsbedingte Masse wesentlich den späteren CO<sub>2</sub>-Ausstoß bestimmt und damit das höchste Einsparpotential besitzt. Die untere Abbildung zeigt die Themenfelder der Innovationsallianz sowie die Bestandteile der Karosseriefertigung in ihrer zeitlichen Abfolge.

Dieser Bericht fasst die Ergebnisse des Teilprojektes „Planung des effizienten Einsatzes der Druckluft“ zusammen, an dem die Firmen Volkswagen AG, Boge Kompressoren GmbH & Co. KG, Festo AG & Co. KG und das Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (IWU) beteiligt sind.

Die pneumatische Antriebstechnik wird in der Fabrikautomatisierung eingesetzt, weil sie gegenüber anderen Technologien Vorteile hinsichtlich Einfachheit, Robustheit der Komponenten in rauer Umgebung, Wartungsfreundlichkeit und Langlebigkeit besitzt. Die Energieeffizienz und der Wirkungsgrad von pneumatischen Anlagen ist ein wichtiges und viel diskutiertes Thema. Drucklufttechnologien werden häufig pauschal geringe Wirkungsgrade nachgesagt. Die Praxis zeigt jedoch, dass je nach Anwendungsfall entschieden werden muss, welche Antriebstechnologie energetisch und wirtschaftlich am günstigsten ist. Pauschale Aussagen ohne Kenntnis der konkreten Anwendung sind in den meisten Fällen nicht möglich. Die Fragestellungen zur Energieeffizienz bedürfen einer differenzierten Untersuchung im Rahmen der Forschung und in der praxisrelevanten Umsetzung.



Themenfelder der Innovationsallianz „Green Carbody“

Dieses Projekt konzentrierte sich auf den **Karosseriebau**, da insbesondere in diesem Bereich viel pneumatische Antriebstechnik im Einsatz ist. Typische Fragestellungen sind:

- Wie groß sind die tatsächlichen Verbrauchswerte der Druckluft im Karosseriebau?
- Wie stellen sich diese Energieverbrauchswerte im Gesamtkontext zu den Anschaffungskosten und den Wartungskosten dar (Total-Cost-of-Ownership; TCO)?
- Wo liegen Vorteile von dezentraler oder zentraler Druckluftversorgung?
- Welches Druckluftnetz ist über die Gesamtfertigung gesehen das günstigste?
- Kann oder soll das Hochdrucknetz (12 bar Netz) eingespart werden?
- Welchen Nutzen erhält man aus der Wärmrückgewinnung?
- Wie groß sind Leckagen? Sind diese kostenrelevant?
- Welchen Einfluss haben dezentrale Druckminderungen?
- Wo machen Abschaltssysteme, Überwachungs- und Diagnosesysteme Sinn?
- Welchen messbaren Einfluss bringen Maßnahmen wie Optimierung der Schlauchlängen, optimale Dimensionierung der Komponenten usw.?
- Welche planungsunterstützenden Tools für die Verbrauchsermittlung und Erzeugerdimensionierung sind wünschenswert und auch praxisrelevant einsetzbar?

Um diese und ähnlich gelagerte Fragen zu beantworten, sind Analysen des Systemverhaltens von repräsentativen Anlagen notwendig. Gesicherte und transparente Messergebnisse sind bislang meist nicht verfügbar. Erst mit ihrer Hilfe lassen sich Einsparpotentiale quantitativ benennen und auch hinsichtlich der Kosten-/Nutzenrechnung auf

Praktikabilität prüfen. Primär gilt es daher, für den Bereich der Karosseriefertigung umfassende Transparenz des tatsächlichen Verbrauchs und der planungs- und betriebsbedingten Verluste zu schaffen.

Im Teilprojekt wurden daher aufbauend auf den genannten Zielen die Voraussetzungen geschaffen, eine bessere Abstimmung zwischen Erzeugerseite und Verbraucherseite bei Druckluftanwendungen zu erreichen, um energetische Aufwände einzusparen. Folgende Schritte wurden durchgeführt:

1. Maßgebliche Druckluftverbraucher wurden identifiziert und lokalisiert und in das Optimierungskonzept einbezogen. Dazu wurde der Istzustand messtechnisch erfasst. Im Betrieb wurden durch Energie- und Condition Monitoring Systeme Abweichungen vom optimalen Zustand erkannt und mit deren Hilfe Schwachstellen detektiert.
2. Die Einflussfaktoren auf die Energieeffizienz des Anlagenbetriebs wurden identifiziert und Optimierungsmaßnahmen abgeleitet, die einen effizienten Betrieb der Anlage gewährleisten können.
3. Als wesentlicher Bestandteil des Projektes wurden Planungstools konzipiert und eingesetzt. Mit diesen Tools lässt sich einerseits der Druckluftverbrauch von Karosseriebauanlagen abschätzen, andererseits die dafür optimierte Druckluffertzeugung- und -verteilung auslegen.

Ein Ergebnis des Projekts ist der hier vorliegende Planungsleitfaden. Er soll sowohl in der Planungsphase einer Anlage die in der Pneumatik relevanten energetischen Zusammenhänge transparent machen, als auch für bereits bestehende Anlagen energieoptimierende Maßnahmen detailliert beschreiben und Handlungsempfehlungen darstellen.

## 1.2 Projektpartner



Projektpartner und Arbeitsfelder

Bei der Auswahl der teilnehmenden Firmen und Institute wurde auf Kompetenz im Themenfeld der Drucklufttechnik Wert gelegt. Die Firmen Boge, Festo und VW verfügen über fundierte Kenntnisse im Bereich der Druckluffeffizienz. Die spezialisierten Erfahrungen der einzelnen Projektteilnehmer garantieren, dass an jeder Stelle entlang der pneu-

matischen Wirkungskette (Druckluftherzeugung, Aufbereitung, Verteilung und Anwendung) hinreichendes Know-How verfügbar ist. Das Fraunhofer-Institut IWU nimmt eine übergreifende Funktion wahr, die dazu dient, die Ergebnisse in den Gesamtkontext der Innovationsallianz einzuordnen und wissenschaftlich zu untermauern.



### Volkswagen AG

Die Volkswagen AG mit Sitz in Wolfsburg ist einer der führenden Automobilhersteller weltweit und der größte Automobilproduzent Europas. Im Jahr 2012 lieferte der Konzern weltweit 9,3 Millionen Fahrzeuge an Kunden, eine Million mehr als im Vorjahr. Das entspricht einem Pkw-Weltmarktanteil von 12,8 Prozent. Die Volkswagen AG ist die Konzern-Muttergesellschaft der Fahrzeugmarken Audi, Bentley, Bugatti, Ducati, Lamborghini, MAN, Porsche, Scania, Seat, Škoda, Volkswagen und Volkswagen Nutzfahrzeuge.

Jede Marke hat einen eigenständigen Charakter und operiert selbstständig im Markt. Dabei reicht das Angebot von verbrauchsoptimalen Kleinwagen bis hin zu Fahrzeugen der Luxusklasse. Im Bereich der Nutzfahrzeuge beginnt das Angebot bei Pick-up-Fahrzeugen und reicht bis zu Bussen und schweren Lastkraftwagen.

Der Konzern betreibt in 19 Ländern Europas und in acht Ländern Amerikas, Asiens und Afrikas 100 Fertigungsstätten mit über einer halben Million Beschäftigten. Jeden Tag werden weltweit ca. 37 700 Fahrzeuge produziert.

Jährlich meldet VW ca. 2 000 Patente an, 60% der Anmeldungen erfolgen auf dem deutschen Markt.

[www.volkswagen.de](http://www.volkswagen.de)



### Festo AG & Co. KG

Festo ist ein weltweit führender Anbieter von pneumatischer und elektrischer Automatisierungstechnik. Das global ausgerichtete unabhängige Familienunternehmen mit Hauptsitz in Esslingen a. N. hat sich in über 50 Jahren durch Innovationen und Problemlösungskompetenz rund um die Pneumatik und die elektrische Antriebstechnik sowie mit einem einzigartigen Angebot an industriellen Aus- und Weiterbildungsprogrammen zum Leistungsführer seiner Branche entwickelt. Festo bietet ein breites Spektrum an Produkten für Aufgabenstellungen sowohl in der industriellen Automatisierung als auch in der Prozessautomatisierung an.

Die Unternehmensgruppe Festo beschäftigt weltweit rund 15 500 Mitarbeiter. Ca. 9% des Umsatzes werden in die Forschung und Entwicklung investiert, vor allem im Bereich der Energieeffizienz. Die Festo AG & Co. KG verfügt über ca. 3 000 Patente weltweit, jährlich erfolgen ca. 100 Neuanmeldungen.

[www.festo.de](http://www.festo.de)



### **BOGE KOMPRESSOREN Otto Boge GmbH & Co. KG**

BOGE ist ein mittelständisches Unternehmen des deutschen Maschinenbaus mit Sitz in Bielefeld, Ostwestfalen-Lippe.

Das Unternehmen gehört im Bereich der Druckluftversorgung und der Fertigung von Kompressoren zu den Marktführern in Deutschland. Mit der Erfahrung von mehr als 100 Jahren ist BOGE einer der ältesten Hersteller von Kompressoren in Deutschland. Rund 550 hochqualifizierte Mitarbeiter sehen sich zusammen mit der Unternehmensführung verantwortlich für Produktentwicklungen nach neuesten wissenschaftlichen Erkenntnissen. Zum aktuellen Produktspektrum gehören neben Kolbenkompressoren und Schraubenkompressoren auch komplette Druckluftsysteme und Anlagen. So werden Kompressoren und Druckluftanlagen von BOGE weltweit in mehr als 120 Ländern eingesetzt. Spezielle Filter und Trockner sowie individuell auf Kundenbedarf abgestimmte Kondensatmanagement-Ausrüstungen gehören ebenfalls zur Produktpalette.

[www.boge.de](http://www.boge.de)



### **Fraunhofer IWU**

Das Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik, kurz Fraunhofer IWU, ist eine Einrichtung der Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V. mit Sitz in Chemnitz und einem Institutsteil in Dresden. Mit einem Budget von 29 Mio. Euro und über 500 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern sowie Laboratorien für Adaptronik/Mechatronik, Werkzeugmaschinen, Umformtechnik, Zerspanungstechnik, Fügetechnik- und Montagetechnik sowie Mikrofertigungstechnik und Virtuelle Realität gehört das Fraunhofer IWU weltweit zu den bedeutendsten Forschungs- und Entwicklungseinrichtungen auf dem Gebiet der Produktionswissenschaft.

Im Fokus steht dabei die anwendungsorientierte Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Produktionstechnik für den Automobil- und Maschinenbausektor.

[www.iwu.fraunhofer.de](http://www.iwu.fraunhofer.de)



obere Reihe:

Jochen Schmidt (Festo)  
Thomas Rommel (VW)  
Wolfgang Engler (Festo)

untere Reihe:

Peter Boldt (Boge)  
Steffen Hülsmann (Festo)  
Daniel Ditterich (Festo)  
Dr. Jan Bredau (Festo)

nicht auf dem Foto:

Nico Schikade (Boge)  
Sören Lorenz (IWU)  
Andreas Schlegel (IWU)

## 2.1 Warum Energieeffizienz?

# 2

**Klimaschutz und Energieeffizienz** sind seit langer Zeit ein Ziel der Politik in der Bundesrepublik Deutschland. Bereits im Jahr 1995 hatte sich Deutschland dazu verpflichtet, den Ausstoß von Treibhausgasen in den nächsten zehn Jahren um 25 Prozent zu senken. Durch die Einhaltung dieser Ziele soll nicht nur ein langfristiger Schutz des Weltklimas gewährleistet werden, zusätzlich soll sichergestellt werden, dass mit den weltweit begrenzten Energie- und Rohstoffressourcen nachhaltig und schonend umgegangen wird.

Für die Industrie ist die verlässliche Energieversorgung eine Grundvoraussetzung. Da der Anteil des industriellen Stromverbrauchs am Gesamtstromverbrauch in Deutschland fast 50% beträgt, ergibt sich die Notwendigkeit, auch im industriellen Umfeld und damit auch in der Automatisierungstechnik, die notwendigen Schritte zum nachhaltigen und sparsamen Umgang mit Energie und Rohstoffen einzuleiten.

In vielen Unternehmen besteht vor allem in Hinblick auf steigende Energiepreise und einem erhöhten Umweltbewusstsein akuter Handlungsbedarf. Oftmals lassen sich bereits mit einfachen Mitteln die Energieverbräuche deutlich reduzieren und Energiekosten senken.

Im industriellen Produktionsprozess muss in der Planungsphase oftmals zwischen verschiedenen Techniken und anwendbaren Betriebsmetho-

den gewählt werden. Nur bei richtiger Wahl der Technik (Effektivität) und gleichzeitigem richtigem Betrieb (Effizienz) lässt sich ein energetischer und wirtschaftlich optimaler Prozess realisieren.

Die systematische Steigerung der Energieeffizienz in industriellen Anlagen ist ein komplexes Themenfeld und umfasst ein breites Spektrum von technischen und organisatorischen Fragestellungen. Zentraler Bestandteil von Produktionsanlagen in der Karosseriefertigung sind pneumatisch betriebene Systeme wie beispielsweise Schweißzangen, Klemmvorrichtungen und Stiftziehzyylinder. Dieser Leitfaden soll daher zunächst einen Eindruck über die grundlegenden Eigenschaften pneumatischer Systeme und Komponenten speziell im Karosseriebau vermitteln und anschließend als Planungs- und Optimierungshilfe zur Verbesserung der Energieeffizienz dienen.

Im Laufe des durchgeführten Projekts hat sich wiederholt gezeigt, dass Fragestellungen zur Steigerung der Energieeffizienz im Gesamtzusammenhang der jeweiligen Anlage zu sehen sind.

Randbedingungen wie zum Beispiel die Größe, Alter und Installationsart einer Anlage müssen oft im Detail erfasst werden. Deshalb kann dieser Leitfaden lediglich als Orientierungshilfe verstanden werden. Möglichkeiten und Einsparpotentiale im Einzelfall müssen stets vor dem Hintergrund der jeweiligen Gegebenheiten diskutiert werden.

## 2.2 „Pneumatik“ oder „Druckluft“?

**Druckluft** kann für eine große Zahl unterschiedlicher Anwendungen genutzt werden, beispielsweise als Antriebsenergie für Werkzeuge (z.B. Dreh- und Impulsschrauber), zur Verwendung in Luftblaspistolen oder als Sperrluft. Im Gegensatz dazu wird unter dem Begriff **„Pneumatik“** meist die druckluftbetriebene Antriebstechnik verstanden (Ventile, Linearantriebe, Greifer, ...).

Die Bedeutung dieser Verwendungszwecke schwankt je nach Branche und Unternehmen stark. Trotzdem wird bei der Beurteilung von Effizienzwerten und im Technologievergleich häufig die Druckluft generell betrachtet und eine Unterscheidung der Verwendungszwecke umgangen. Für den Bereich der pneumatischen Antriebs- und Handhabungstechnik führt dies zwangsläufig zu Verzerrungen und Fehleinschätzungen.

Zur genauen Abgrenzung der verschiedenen Verwendungsarten sind die einzelnen Drucklufttypen in der unteren Tabelle zusammengefasst.

Der überwiegende Teil der in der Industrie verwendeten Druckluft wird für Druckluft-Werkzeuge, Aktivluft oder Prozessluft eingesetzt. Zwar liegen keine nachgewiesenen Angaben zum Verbrauch

von pneumatischen Anwendungen innerhalb der Drucklufttechnik vor, ein durchschnittlicher Wert von ca. 20% des gesamten Druckluftverbrauchs wird aber als realistisch angenommen. Je nach Unternehmen, Anlage und Anwendung kann dieser Wert allerdings auch stark unterschiedlich sein.

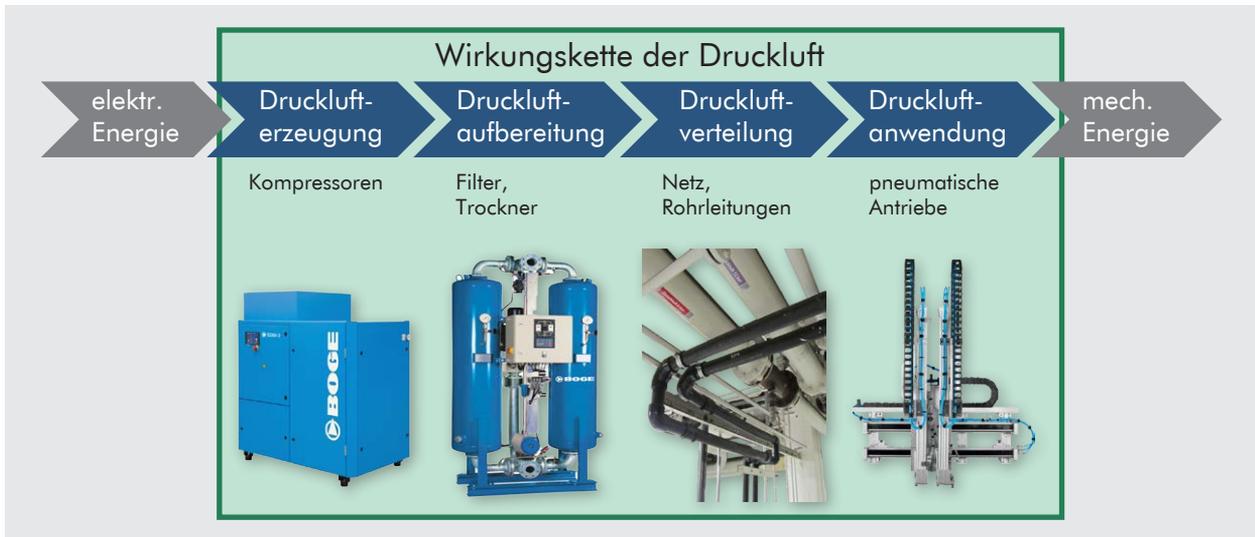
Auch in der Automobilfertigung müssen die unterschiedlichen Verwendungsarten klar voneinander getrennt werden. Im Karosseriebau wird ein großer Teil der erzeugten Druckluft als Prozessluft verwendet, beispielsweise zum Betrieb von Cross-Jets oder für Reinigungszwecke (Entfernen von Spänen, Rauch oder sonstigem Schmutz). Ein weiterer großer Anteil der Druckluft findet als Aktivluft in der Lackiererei Verwendung. Im Karosseriebau wird nur ein relativ geringer Anteil der Druckluft als Arbeitsluft verwendet, meist zum Betrieb von Spannern, Schweißzangen, Stiftziehzylindern oder Greifern.

Im hier vorliegenden Projekt wurde lediglich das Optimierungspotential der Arbeitsluft in pneumatischen Komponenten und Systemen betrachtet, da nur in diesem Fall die Luft als „Energieträger“ verwendet wird und in diesem Kontext Energiesparmaßnahmen zum Einsatz kommen können.

### Klassifikation von Druckluft nach ihrem Verwendungszweck

<b>Arbeitsluft</b>	Arbeitsluft bezeichnet Luft, die als Energieträger zum Verrichten mechanischer Arbeit eingesetzt wird, zum Beispiel zum Antrieb von Werkzeugen und pneumatischen Maschinen. Steuerluft (z. B. Steuerung von Ventilen, Schiebern, Klappen, ...) wird ebenfalls der Arbeitsluft zugerechnet. Wird die Arbeitsluft nicht in Werkzeugen, sondern zum Betrieb von Ventilen und Zylindern verwendet, spricht man von <b>„Pneumatik“</b> .
<b>Aktivluft</b>	Aktivluft bezeichnet Luft, die für die Weiterführung von Stoffen verwendet wird. Aktivluft lässt sich weiter untergliedern in Förderluft, die den eigentlichen Transport von Materialien beschreibt, und Aktivluft im weiteren Sinne, bei der Stoffe mit der Luft aus einem Werkzeug bzw. einer Maschine herausgeblasen werden (z.B. zum Zweck der Oberflächenbehandlung).
<b>Prozessluft</b>	Prozessluft bezeichnet Luft, die zur Verfahrens-/Prozesseinbindung verwendet wird. Hierunter fällt auch die reine Luftverwendung, wie z.B. zur Trocknung, Kühlung oder Belüftung.
<b>Vakuumluf</b>	Vakuumluf bezeichnet Luft, die zur druckluftgetriebenen Unterdruckerzeugung verwendet wird, z.B. in Saugdüsen.
<b>Prüfluf</b>	Prüfluf wird für Prüf- und Kontrollzwecke verwendet.

## 2.3 Die Druckluftwirkungskette



Die Wirkungskette der Druckluft

Der Stoff- und Energiefluss in Druckluftanlagen kann in vier Bereiche unterteilt werden:

Zunächst wird die benötigte Druckluft in einem Kompressor erzeugt, meist unter Verwendung eines elektrisch angetriebenen Motors. Eine erste Stufe der Luftaufbereitung (Kühlung, Filterung und Trocknung) sorgt dafür, dass die erzeugte Druckluft mit ausreichender Qualität in das Netz eingespeist wird. Im nachgeschalteten Druckluftnetz erfolgt die Verteilung und Bereitstellung der Druckluft an die pneumatisch betriebenen Applikationen. Bevor die Druckluft in der Anwendung verwendet werden kann, wird sie meist in einer Wartungseinheit derart aufbereitet, dass sie den Anforderungen der nachgeschalteten pneumatischen Komponenten genügt. Eine Wartungseinheit besteht häufig aus

Ölabscheider, Trockner, diversen Filtern und einem einstellbaren Druckregler. In der Anwendung selbst wird schließlich die Druckluft als Energieträger für mechanische Bewegungsaufgaben verwendet (Bewegen, Halten, Klemmen, Schwenken, ...).

In der Planungs- und Dimensionierungsphase einer pneumatischen Anlage muss stets eine gesamthafte Betrachtung des Systems erfolgen. Kompressor, Luftaufbereitung, Verteilungsnetz und Applikation müssen sorgfältig aufeinander abgestimmt sein. Kein Bereich der sogenannten „Druckluftwirkungskette“ darf ausgespart und vernachlässigt werden (Abbildung oben). Nur dann kann ein energieeffizienter Betrieb der Gesamtanlage gewährleistet werden.

### 2.3.1 Druckluftherzeugung

Die zum Betrieb pneumatischer Systeme notwendige Druckluft wird von einem Verdichter (Kompressor) bereitgestellt. Meist erzeugt ein elektrisch angetriebener Motor eine mechanische Bewegung, die auf Hubkolben oder Verdichterschrauben übertragen wird. Über Ansaug- und Auslassventil wird atmosphärische Luft zunächst komprimiert und anschließend in das Druckluftnetz oder einen vorgeschalteten Luftspeicher ausgeschoben.

Je nach benötigtem Druck und der gewünschten Fördermenge können unterschiedliche Kompressorbauarten eingesetzt werden. Beispielsweise eignen sich mehrstufige Hubkolbenverdichter insbesondere für die Erzeugung hoher Ausgangsdrücke bei eher geringen Fördermengen. Schraubenverdichter erzeugen hingegen eher einen geringeren Ausgangsdruck bei größerer Fördermenge.

Aufgrund von mechanischen und thermodynamischen Vorgängen entsteht während der Verdichtung der Druckluft eine große Wärmemenge, die aus der Druckluft abgeführt werden muss. In vielen älteren Anlagen bleibt diese Abwärme ungenutzt. Der Gesamtwirkungsgrad der pneumatischen Anlage lässt sich jedoch wesentlich steigern, wenn die anfallende Wärme einer sinnvollen Verwendung zugeführt wird, beispielsweise als Heizwärme, Prozesswärme (zur Warmwassergewinnung) oder je nach Bedarf zur Erzeugung von Kälte für die Raumklimatisierung (Adsorptionskälteanlagen).



### 2.3.2 Druckluftaufbereitung

Die vom Verdichter angesaugte Luft enthält diverse Arten von Verunreinigungen, beispielsweise Feststoffpartikel oder kleine Anteile an Öl, das durch die Schmierung der Kompressorbauteile in die Druckluft eingebracht wird. Über verschiedene Filterstufen können diese Verunreinigungen wieder beseitigt und die Luftqualität an den geforderten Standard angepasst werden. Mit Feinfiltern und Feinstfiltern können Partikel bis zu einer Größe von  $0,01\ \mu\text{m}$  weitgehend beseitigt werden.

Zusätzlich zur Filterung besteht die Möglichkeit, in einem Kondensatabscheider und Lufttrockner den Wasserdampfgehalt der Druckluft zu verringern und somit den Drucktaupunkt zu senken. Dadurch wird verhindert, dass sich in der nachgeschalteten pneumatischen Anwendung durch Druck- und Temperaturänderungen in der Druckluft Wassertropfen bilden, denn dies könnte zum Ausschwemmen von Schmierstoffen und ggf. zur Beschädigung einzelner Komponenten durch Korrosion führen.

Filter und Trockner stellen in der pneumatischen Anlage einen pneumatischen Widerstand dar und verursachen folglich einen Druckabfall, der wiederum einem Energieverlust gleichkommt. Bei der Auslegung und Dimensionierung der Anlage muss dieser Umstand berücksichtigt werden. Generell gilt der Grundsatz: „Filtern und Trocknen nur so viel wie nötig.“



### 2.3.3 Druckluftverteilung

Die Verteilung der Druckluft erfolgt über Rohrnetzwerke mit unterschiedlichen Topologien. Je nach Anordnung der Gebäude und unterschiedlichen Bedarfsprofilen empfiehlt sich die Verwendung einer Ringstruktur oder eine vermaschte Topologie.

In allen Fällen ist darauf zu achten, dass die Rohrleitungen einen ausreichenden Durchmesser aufweisen, so dass der Strömungswiderstand möglichst gering gehalten werden kann. Wird der Durchmesser einer Rohrleitung halbiert, so steigt ihr Strömungswiderstand ca. um den Faktor 32. Das heißt, der Widerstand einer Rohrleitung steigt bei reduziertem Durchmesser mit der 5ten Potenz.

Änderungen der Rohrrichtung müssen gesondert betrachtet werden, insbesondere wenn enge und nicht verrundete Winkelstücke verwendet werden sollen. Der Strömungswiderstand in derartigen Rohrelementen kann weitaus größer sein als bei vergleichbaren geradlinigen Rohrstücken.

Besondere Aufmerksamkeit bei Aufbau und Wartung von Leitungsnetzen kommt der Lokalisierung und Beseitigung von Leckagen zu. Da Leckagestellen in pneumatischen Systemen lediglich Druckluft in die Umgebung abfließen lassen, besteht durch die Leckage meist kein Sicherheits- oder Umweltrisiko. Dennoch sollten Leckagen stets gewissenhaft beseitigt werden, da sie mitunter einen großen Anteil des gesamten Energieverbrauchs verursachen.



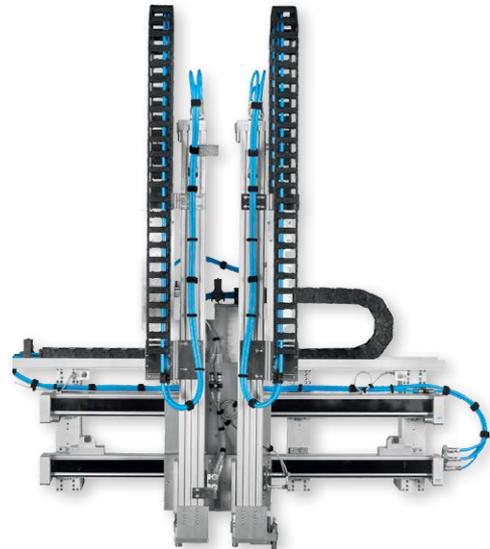
### 2.3.4 Anwendung

In der Anwendung erfolgt die eigentliche Nutzung der pneumatischen Energie. Der Betriebsdruck wird hierbei in der Wartungseinheit vorgewählt und ist in der gesamten Anwendung gleichermaßen verfügbar.

Herkömmliche pneumatische Verbraucher sind meist Linearantriebe (Pneumatikzylinder), in denen sich ein Antriebskolben mit oder ohne Kolbenstange befindet, der durch Druckluft in einer Antriebskammer in Bewegung gesetzt wird und Kraft ausüben kann.

Für die meisten pneumatischen Anwendungen ist ein Betriebsdruck von 6bar rel. ausreichend. Das hierfür eingesetzte Verteilungsnetz wird Niederdrucknetz (ND) genannt. Im Gegensatz dazu können je nach Anforderung auch höhere Drücke notwendig sein, insbesondere wenn sehr hohe Anpresskräfte verlangt werden. In solchen Fällen wird ein Hochdrucknetz (HD) mit einem Druckniveau von meist 12 bar verwendet.

Im Karosseriebau kommen vorrangig pneumatische Spanner, Klemmvorrichtungen und Stiftziehzyylinder zum Einsatz, diese werden meist am Niederdrucknetz betrieben. Pneumatische Schweißzangen, die während des Schweißvorgangs eine hohe Anpresskraft erzeugen sollen, verwenden im Gegensatz dazu oft Druckluft aus dem Hochdrucknetz.



## 2.4 Bewertungsgrundlagen

### 2.4.1 Luft- und Energieverbrauch

Der Energieverbrauch in pneumatischen Komponenten wird hauptsächlich durch den Luftverbrauch bestimmt. In den meisten Fällen wird der Luftverbrauch in Normkubikmetern (Nm<sup>3</sup>) oder Normlitern (NI) pro Zeiteinheit oder pro Bewegungszyklus angegeben. Ein Normliter bezeichnet hierbei das Volumen, das eine bestimmte Luftmasse bei Normbedingungen einnimmt. Als Normbedingung wird meist Umgebungsdruck und Umgebungstemperatur nach ISO 6358 angenommen (Luftfeuchte 65%; Luftdruck abs. 1 000 mbar; Temperatur 20°C). Es existieren allerdings weitere Normen, die in der Drucklufttechnik Verwendung finden. Eine Übersicht ist in der unteren Tabelle dargestellt.

Das Normvolumen ist proportional zur Luftmasse und unabhängig vom aktuellen Druck. Im Gegensatz dazu gibt das „Betriebsvolumen“ das reale physikalische Volumen der Druckluft im aktuellen Druckzustand an. Wird beispielsweise ein Pneumatikzylinder mit einem Durchmesser von 32 mm und einer Länge von 0,25 m bei 6 bar rel. mit Druckluft befüllt, so enthält er anschließend ca. 0,21 Druckluft bei Betriebsvolumen. Bei Normbedingungen entspricht dies 1,4 Normlitern.

Ist der Luftverbrauch einer Anlage bekannt, so kann über Kennwerte der Kompressoranlage der elektrische Energieverbrauch der pneumatischen Komponenten abgeschätzt werden. In der Automobilindustrie werden meist große Kompressoranlagen eingesetzt, die eine kostengünstige Druckluffertzeugung ermöglichen. Je nach Effektivität der verwendeten Kompressoren wird im Regelfall für die Erzeugung eines Normkubikmeters Druckluft

für das 6 bar Netz eine Energiemenge von 0,1 kWh bis 0,15 kWh benötigt. Bei einem mittleren industriellen Strompreis von 10 ct/kWh ergeben sich daraus Kosten für die Bereitstellung von Druckluft von 1,0 ct bis 1,5 ct pro Normkubikmeter. In den folgenden Kapiteln werden die Druckluftkosten auf 1,33 ct/Nm<sup>3</sup> im 6 bar-Netz bzw. 1,80 ct/Nm<sup>3</sup> im 12 bar-Netz festgelegt, wobei dieser Wert neben den Energiekosten einen gewissen Anteil an Nebenkosten für den Betrieb des Kompressors enthält (z.B. Wartung, Abschreibung und Service).

Für die Erzeugung eines Normkubikmeters bei höheren Versorgungsdrücken ist der energetische und finanzielle Aufwand größer. Daher sollte stets darauf geachtet werden, dass das verwendete Druckniveau in Erzeugung und Verteilung den Anforderungen der Anwendung entspricht und nicht zu hoch gewählt wird.

Pneumatische Energie hat allgemein den Ruf, eine relativ teure Energieform zu sein, deren Effizienz im Vergleich zu alternativen Antriebstechnologien kritisch bewertet werden muss. Der Grund für diese Einschätzung liegt häufig in der unzureichenden Auslegung und Wartung pneumatischer Anlagen, jedoch nicht im eigentlichen Wirkprinzip der Pneumatik selbst. Die Funktionalität pneumatischer Komponenten ist in vielen Fällen auch bei fehlerhafter Auslegung, Überdimensionierung, auch bei starker Leckage und bei Defekten in den Komponenten noch gewährleistet, was die Pneumatik zwar zu einer sehr robusten Technologie macht, der Luftverbrauch kann in solchen Fällen jedoch stark ansteigen. Deswegen sind sowohl eine korrekte Planung und Auslegung, als auch eine Fehlerüberwachung (z.B. mit Leckagedetektion) unerlässlich.

Norm	Druck	Temp.	Feuchte	Dichte	Anmerkung
<b>DIN 1343-1990-01</b>	1013,25 mbar	0°C 273,15 K	0%	1,292 kg/m <sup>3</sup>	Oft als „Standardbedingungen“ bezeichnet. Für Durchflusssensoren, z.B. bei Festo.
<b>DIN 1871-1999-05</b>	1013,25 mbar	0°C 273,15 K	keine Angabe	1,292 kg/m <sup>3</sup>	Verwendung für gasförmige Brennstoffe, aber auch andere Gase.
<b>ISO 2533</b>	1013,25 mbar	15°C 288,15 K	0%	1,225 kg/m <sup>3</sup>	Festlegung der „Internationalen Standardatmosphäre“ - Troposphäre.
<b>ISO 6358</b>	1000,00 mbar	20°C 293,15 K	65%	1,185 kg/m <sup>3</sup>	Testbedingungen für pneumatische Komponenten.

### 2.4.2 Energie und Exergie

Neben der Entwicklung und Umsetzung energieeffizienzsteigernder Maßnahmen gewinnt die Darstellung der energetischen Güte von Anlagen zunehmend an Bedeutung. Nur wenn eine konsistente und einheitlich anwendbare Beschreibungsform der energetischen Wechselwirkungen innerhalb eines Prozesses verfügbar ist, lassen sich bestimmte Anlagenteile vergleichen, bewerten oder z.B. über Wirkungsgradangaben klassifizieren.

Im Bereich der Drucklufttechnik werden hierfür häufig sogenannte Energieflussdiagramme eingesetzt. Sie veranschaulichen ausgehend von einer Energiequelle die Energieströme entlang verschiedener Stationen innerhalb eines Systems, die jeweils für einen Teilabschnitt des Systems stehen (z.B. Kompressor, Kühler, Trockner, Netz). Die Breite der Pfeile wird proportional zur Flussmenge gewählt, wodurch eine gute Lesbarkeit gewährleistet wird. Trotz ihrer Anschaulichkeit ist dieser Ansatz mit Schwächen behaftet. Die thermodynamische Größe „Energie“ erlaubt in der Pneumatik bei genauerer Betrachtung keine Aussage über die nutzbare Arbeit, die ein pneumatisches System verrichten kann. Dies liegt insbesondere daran, dass der Energiegehalt in einem bestimmten pneumatischen Zustand eine Funktion der Lufttemperatur ist, nicht jedoch des Drucks. Sowohl die Enthalpie (für offene Systeme) als auch die innere Energie  $U$  (geschlossene Systeme) sind vom Druck unabhängig. Die innere Energie  $U$  ergibt sich beispielsweise mit dem Normvolumenstrom  $Q$ , der Normdichte  $\rho$ , der Wärmekapazität  $c_v$  und der Temperatur  $T$  aus:

$$U = Q \cdot \rho \cdot c_v \cdot T$$

Dass der Druck  $p$  für die Berechnung nicht benötigt wird zeigt, dass die Verwendung dieser Größen zur Darstellung des Nutzens nicht zielführend ist. In pneumatischen Systemen ist insbesondere der Druck die treibende Größe zur Verrichtung von Arbeit. Hohe Temperaturen führen zwar zu ei-

nem hohen Energiegehalt im System, die Energie kann jedoch pneumatisch nicht genutzt werden. Dies zeigt, dass es nicht möglich ist, mithilfe von Energiebetrachtungen eine sinnvolle Aussage über die pneumatische Nutzbarkeit eines Zustands zu treffen.

Eine Methode, mit der diese Unzulänglichkeit überwunden werden kann, ist die Verwendung einer anderen thermodynamischen Größe, der sogenannten „**Exergie**“. Sie bezeichnet denjenigen Energieanteil eines Systems, der Arbeit verrichten kann, wenn das System in ein Gleichgewicht mit der Umgebung gebracht wird. Die Exergie bildet also den als Arbeit nutzbaren Anteil der Gesamtenergie, nicht nutzbare Anteile werden „Anergie“ genannt. Die Exergie ist eine Zustandsgröße aber keine Erhaltungsgröße, d.h. Exergie kann in Anergie gewandelt werden und somit verloren gehen.

Da für die Nutzbarkeit von Energie stets ein Energiegefälle in Relation zur Umgebung vorhanden sein muss und dieser Umstand bei der Exergieberechnung berücksichtigt wird, werden für die Bestimmung der Exergie im aktuellen Zustand der Umgebungsdruck  $p_{\text{atm}}$  und die Umgebungstemperatur  $T_{\text{atm}}$  benötigt sowie insgesamt vier Größen, die den aktuellen Zustand  $a$  beschreiben: die zugeführte elektrische Energie  $P_a$  (= reine Exergie), der Absolutdruck  $p_a$ , die Temperatur  $T_a$  und der zugehörige Volumenstrom  $Q_a$ . Mit diesen Angaben berechnet sich die Exergie wie unten angegeben.

Durch die Exergie lassen sich alle Zustandsänderungen erfassen: Verbrauch von elektrischer Energie durch einen Prozess, auftretende Druckänderung, Temperaturänderung und Veränderung des Massenstroms, z.B. durch Leckage. Der Vergleich zweier Zustände erlaubt die Berechnung des Exergieverlusts zwischen zwei Zuständen. Setzt man diesen in prozentualer Relation zur Ausgangsexergie, so erhält man den prozentualen Verlust an jeder Station der Wirkungskette. Die Exergieabbildung zeigt auf der linken Seite beispielhaft ein Exergie-

$$E_a = P_a + Q_a \rho_a c_p \cdot (T_a - T_{\text{atm}}) + Q_a \rho_a T_{\text{atm}} \cdot \left( R \ln \left( \frac{p_a}{p_{\text{atm}}} \right) - c_p \ln \left( \frac{T_a}{T_{\text{atm}}} \right) \right)$$

Berechnung der „Exergie“

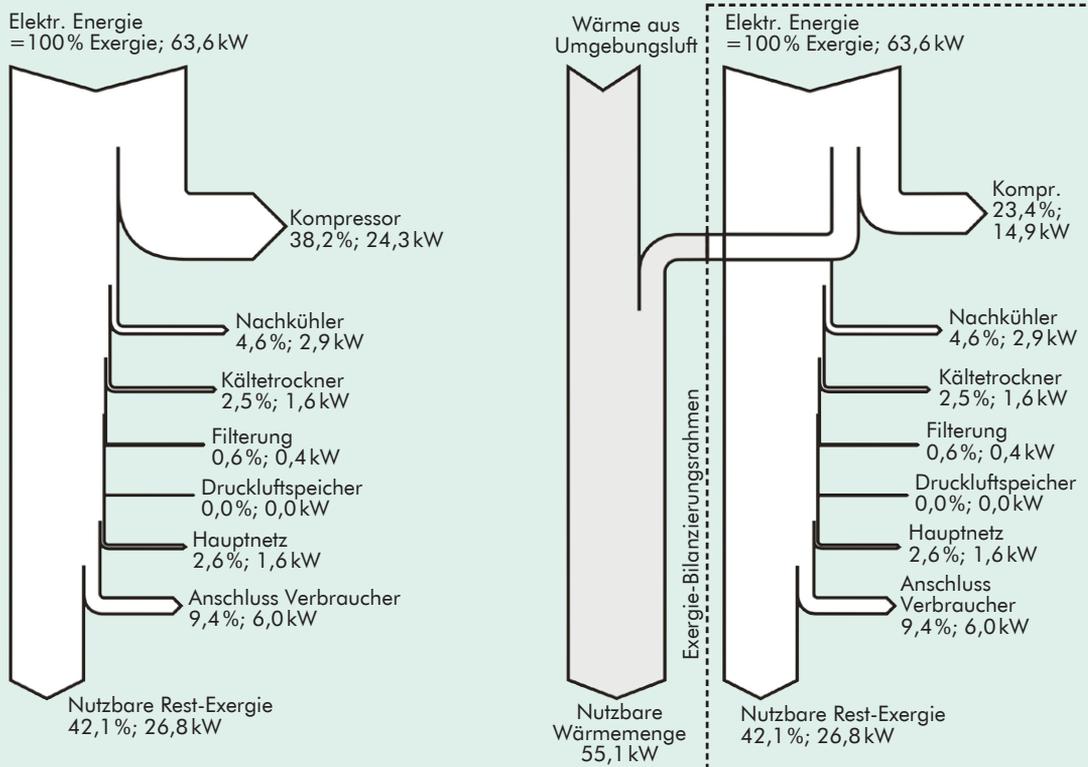
flussdiagramm einer pneumatischen Anlage. Der größte Anteil der Exergie geht demzufolge bei der Komprimierung verloren – im hier aufgeführten Beispiel 38,2%. Am Ende der Wirkungskette steht für die Anwendung eine nutzbare Restexergie von 42,1% der Anfangsexergie zur Verfügung.

Bei der Komprimierung der Luft fällt thermodynamisch bedingt ein Großteil der gesamten Wärmeentwicklung innerhalb der Druckluftkette an. Ein entscheidender Aspekt zur Effizienzsteigerung von Druckluftsystemen ist die Integration eines Wärmerückgewinnungssystems. Eine gemeinsame Darstellung von Exergie und Wärme innerhalb eines Diagramms wird möglich, wenn der Exergieanteil der Wärmerückgewinnung als nutzbarer Anteil nach links geführt wird. Er wird dazu verwendet, um einen Wärmestrom aus der komprimierten Umgebungsluft nutzbar zu machen. Physikalisch entspricht dieser Vorgang dem einer Wärmepumpe (Abbildung rechts). Im hier gezeigten Beispiel

ergibt sich damit neben der nutzbaren Exergie am Ende der Wirkungskette eine nutzbare Wärmemenge von 55,1 kW.

Die Summe aus nutzbarer Wärmemenge und Rest-Exergie am Ende der Wirkungskette (hier: 81,9 kW) kann größer sein als die aufgewendete elektrische Energie am Kompressor (hier: 63,6 kW). Dies ist jedoch nur scheinbar ein Widerspruch, da während des Komprimierungsvorgangs der angesaugten Umgebungsluft Wärme entnommen wird, welche in der Bilanzierung ebenfalls berücksichtigt werden muss (grauer Pfeil oben).

Mit Exergieflussdiagrammen wie sie in der hier gezeigten Abbildung dargestellt sind, kann ein wichtiger Beitrag zur besseren Nachvollziehbarkeit und Vergleichbarkeit der Effizienz von Pneumatik- bzw. Druckluftanwendungen geleistet werden, auch zur Gegenüberstellung mit anderen Technologien.



Exergieflussdiagramme - ohne und mit Wärmerückgewinnung

Das hier vorgestellte Exergieflussdiagramm ist ein Ergebnis des Verbundprojekts „EnEffAH“, welches im Zeitraum von 10/2008 bis 6/2012 durchgeführt und vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie gefördert wurde. Weitere Infos: [www.eneffah.de](http://www.eneffah.de)

### 2.4.3 Physikalische Größen

Die verwendeten Rechengrößen und Begriffe sind zur besseren Übersicht hier tabellarisch zusammengefasst:

Bezeichnung	Formel	Einheit	Anmerkung
<b>Normvolumen</b>	$V_n$	Nm <sup>3</sup>	Luftvolumen bei definierten Zustandsbedingungen der Luft (z.B. nach ISO 6358 oder wie bei Festo nach DIN1343: T=273,15 K; p=1,01325 bar abs.)
<b>Normvolumenstrom Nenn durchfluss</b>	$Q_n$	Nl/min	Luftvolumenstrom, bezogen auf das Normvolumen. Durchfluss-Sensoren zeigen meist den Normvolumenstrom.
<b>Normalnenn durchfluss</b>	$Q_{nN}$	Nl/min	Luftvolumenstrom bei definierten Druckrandbedingungen: p <sub>1</sub> =6 bar rel. und p <sub>2</sub> =5 bar rel.
<b>Betriebsvolumen</b>	$V$	m <sup>3</sup>	Reales physikalisches Volumen, Verwendung in der Thermodynamik
<b>Absolutdruck</b>	$p$	bar	Differenzdruck zu absolutem Vakuum, Verwendung in der Thermodynamik
<b>Relativdruck</b>	$p$	bar	Differenzdruck zur Atmosphäre, Manometer-Signal
<b>Energie</b>	$U$	kJ	Innere Energie, keine Aussage über praktischen Nutzen möglich, Verwendung in der Thermodynamik
<b>Enthalpie</b>	$H$	kJ	Energiegröße für offene Systeme, Nutzbarkeit ebenfalls fraglich, Verwendung in der Thermodynamik
<b>Exergie</b>	$E$	kJ	Maximale Arbeitsfähigkeit, Aussage über den praktischen Nutzen möglich

Aus der Analyse der Kosten und Aufwendungen in einem repräsentativen Automobilwerk wurden die unten aufgeführten Parameter ermittelt, die im Folgenden für Kostenabschätzungen und Hochrechnungen verwendet werden. Es handelt sich hierbei um Mittelwerte. In großen Produktionswerken mit hocheffizienten Kompressorstationen sind die anfallenden Druckluftkosten teilweise sogar noch niedriger.

Bezeichnung	Einheit	Anmerkung
<b>Kompressorkennzahl</b>	kWh/Nm <sup>3</sup>	Energiebedarf für Druckluftherzeugung (ohne Invest für Verdichter) bezogen auf eine Luftmenge (1 Nm <sup>3</sup> ). Hier: 0,11 kWh/Nm <sup>3</sup> (Niederdrucknetz 6 bar) 0,15 kWh/Nm <sup>3</sup> (Hochdrucknetz 12 bar)
<b>Druckluftkosten</b>	ct/Nm <sup>3</sup>	Kosten für Druckluftherzeugung (inkl. Invest für Verdichter und Nebenkosten wie z.B. Wartung) bezogen auf eine Luftmenge (1 Nm <sup>3</sup> ) (Es wird ein Strompreis von 10 ct/kWh angenommen) Hier: 1,33 ct/Nm <sup>3</sup> (Niederdrucknetz 6 bar) 1,80 ct/Nm <sup>3</sup> (Hochdrucknetz 12 bar) 1,50 ct/Nm <sup>3</sup> („mittlere“ Kosten)
<b>Produktionszeit</b>	h/a	Anzahl der Produktionsstunden pro Jahr. Hier: Vollzeitbetrieb: 24 h/Tag und 350Tage/Jahr: 8 400 h/a Dreischichtbetrieb: 24 h/Tag; 250Tage/Jahr: 6 000 h/a Zweischichtbetrieb: 16 h/Tag; 250Tage/Jahr: 4 000 h/a

## 3.1 Karosseriebau in der Automobilproduktion

# 3

Automobilwerke sind im Allgemeinen in vier große Fertigungsbereiche gegliedert, auch „Gewerke“ genannt: Das Presswerk, der Karosseriebau, die Lackiererei und die Montage.

Im Presswerk werden Blechteile durch Pressen in die gewünschte Form gebracht. Die mechanisch oder hydraulisch angetriebenen Maschinen können Presskräfte von mehreren tausend Tonnen entwickeln. Im Karosseriebau werden die für den Aufbau eines Fahrzeugs relevanten Bauteile (Aufnahmebleche, Profile, Verstärkungen, ...) mit Punktschweiß-, Laserschweiß-, Klebe- oder Lötverfahren unlösbar miteinander verbunden. In der Lackiererei werden mehrere Schichten Lack auf die Karosserie aufgebracht, bevor im letzten Bereich, der Montage, alle Bauelemente des Fahrzeugs angebracht werden.

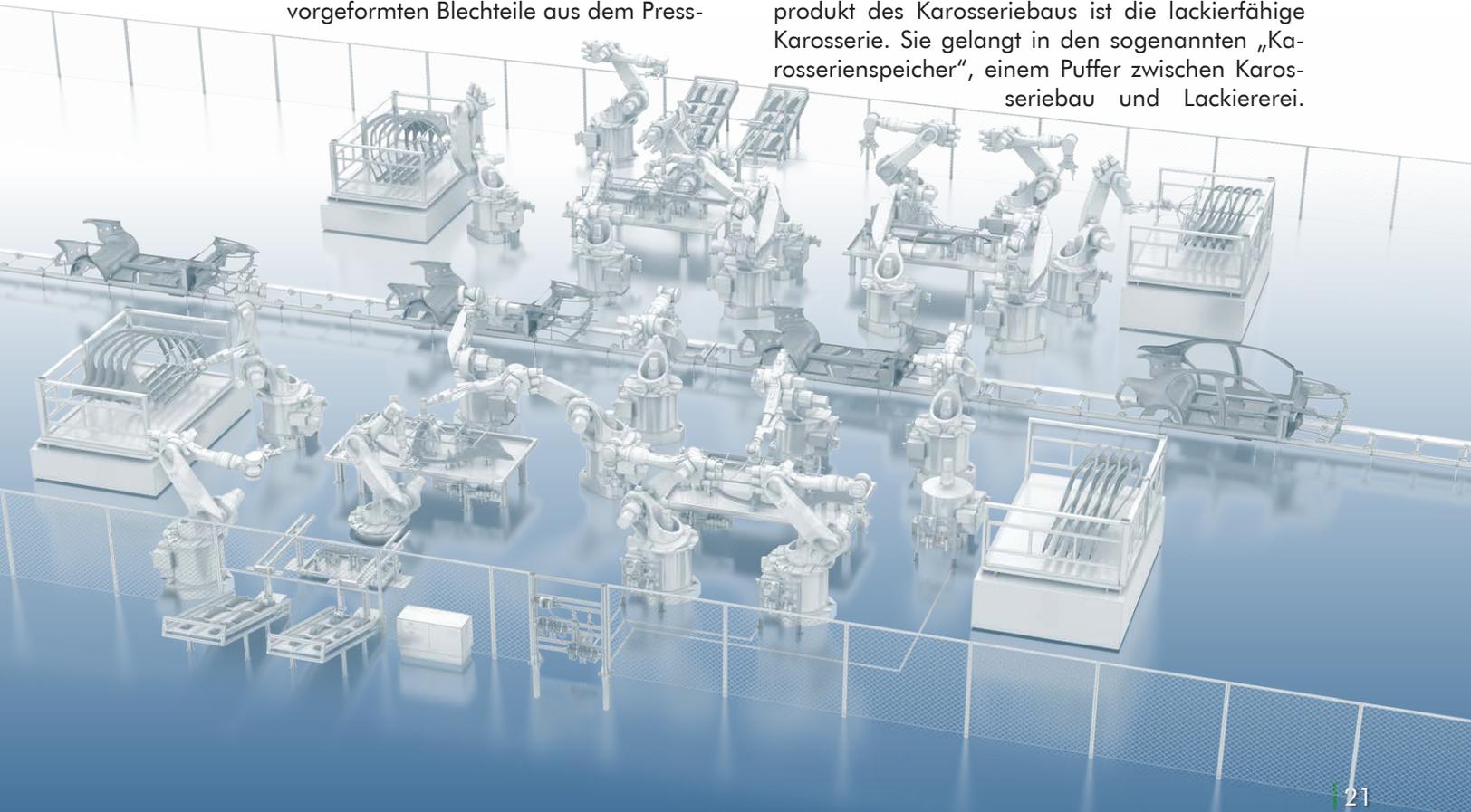
Zwischen den Bereichen des Automobilwerks sind meist Puffer vorgesehen, die den Materialfluss unterbrechen. Deshalb können die Bereiche bei vielen planerischen Fragestellungen getrennt betrachtet werden.

Ausgangsprodukte für den Karosseriebau sind die vorgeformten Blechteile aus dem Press-

werk, Fügeelemente als Normteile sowie Hilfsstoffe wie Kleber oder Lot. Insgesamt besteht das Rohmaterial für eine Karosserie aus etwa zehn großen Außenhautteilen und stellenweise mehreren Hundert Strukturteilen. Wesentliche Prozessschritte sind das Fügen der Baugruppen Boden, Dach, Seitenteile, Türen und Klappen. In der sogenannten Aufbaulinie werden die Baugruppen zur Karosserie gefügt. Nachdem die Teile geometrisch fixiert sind, werden die für die Steifigkeit erforderlichen mehreren Tausend Schweißpunkte angebracht.

Das vorherrschende Fügeverfahren ist das Punktschweißen. Die Anlagen dafür lassen sich in sogenannte Geometrie- und Ausschweißstationen einteilen, je nachdem ob Teile maßgenau positioniert werden müssen oder bereits zusammen geheftet sind. Die anderen eingesetzten Fügeverfahren bedingen einen an ihre spezifischen Werkzeuge angepassten Anlagenaufbau. Das Führen der Werkzeuge und der Materialfluss werden zu einem großen Anteil mit Industrierobotern realisiert.

Nach der Montage der Türen und Klappen erfolgen im Finish-Bereich die Qualitätskontrolle und eventuell notwendige Nacharbeiten. Das Endprodukt des Karosseriebaus ist die lackierfähige Karosserie. Sie gelangt in den sogenannten „Karosserienspeicher“, einem Puffer zwischen Karosseriebau und Lackiererei.



## 3.2 Druckluft im Karosseriebau

### 3.2.1 Pneumatische Komponenten

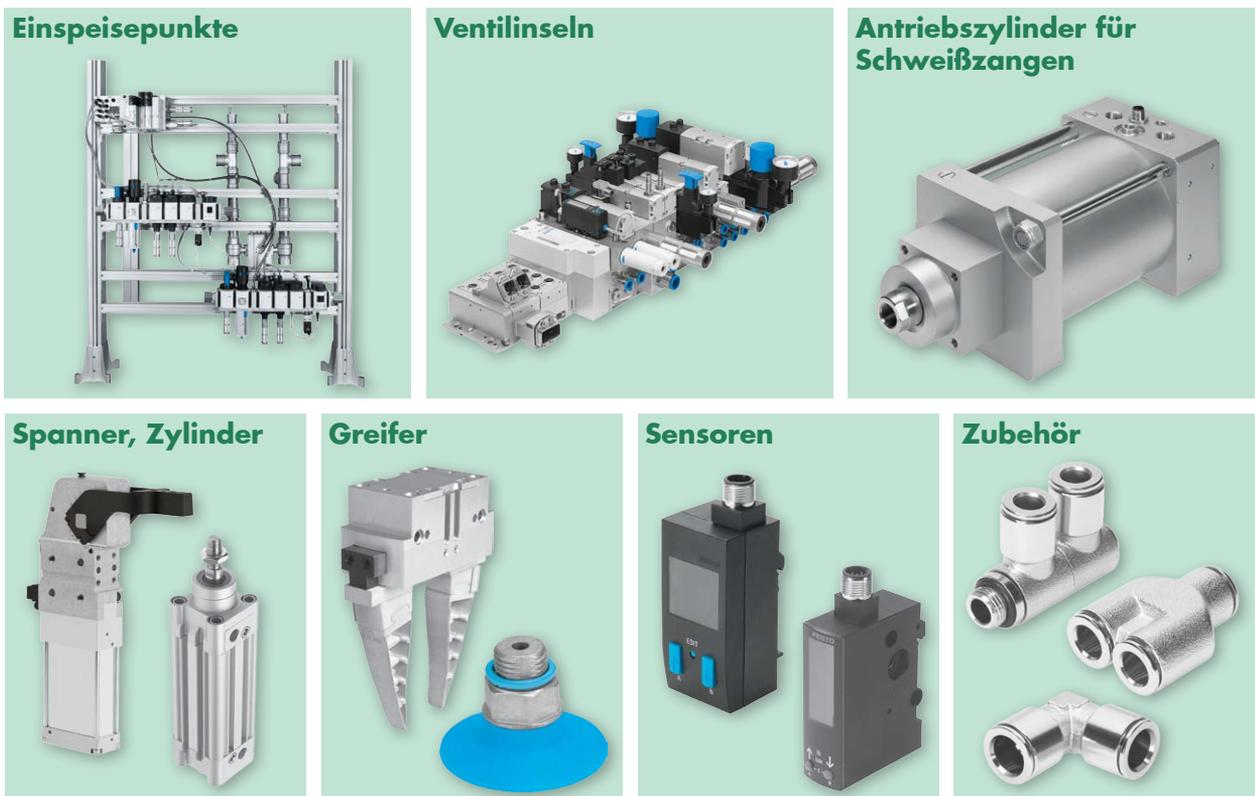
Ein Standardwerk im Karosseriebau zeichnet sich durch den intensiven Einsatz von Robotertechnik aus. In einem großen Werk können über 1 000 bis 2 000 Roboter im Einsatz sein. Ein Standardwerk besitzt in der Regel 1-2 Karosseriehallen, 500 bis 1 000 Roboter mit beweglichen Schweißzangen sind üblich. Weitere Roboter werden in Verbindung mit Handling und Greiftechnik verwendet. Da deren Energieverbrauch einen wesentlichen Anteil am Gesamtverbrauch des Werks ausmacht, ist ein Trend zur Leichtbautechnik festzustellen, beispielsweise Leichtbauzangen, bei deren Verwendung weniger Lastgewicht anfällt und daher kleinere und sparsamere Roboter eingesetzt werden können.

Die pneumatische Antriebstechnik ist auf der Ebene der einzelnen Aktoren flächendeckend etabliert. Als Standard kommt ein Druckluftnetz mit einem Betriebsdruck von 6 bar zum Einsatz, mit dem herkömmliche pneumatische Komponenten

wie Ventile, Spanner, Stiftziehzylinder, Greifer, Schweißzangenantriebe und weitere pneumatische Komponenten betrieben werden. Einen besonders hohen Anteil bei den pneumatischen Komponenten nehmen die pneumatischen Spanner ein. In einem großen Werk können mitunter bis zu 20 000 Spanner eingesetzt sein.

Zusätzlich zum herkömmlichen 6 bar Druckluftnetz existiert häufig ein zweites Druckluftnetz, welches einen höheren Betriebsdruck zur Verfügung stellt, meist im Bereich von ca. 12 bar. Über das Hochdrucknetz werden Komponenten versorgt, deren Funktion eine besonders hohe Anpresskraft notwendig macht, z.B. Schweißzangen für das Widerstandspunktschweißen. Die beiden Netze werden als „Niederdrucknetz“ (ND) und „Hochdrucknetz“ (HD) bezeichnet.

In der unteren Abbildung sind die am häufigsten eingesetzten pneumatischen Komponenten im Karosseriebau dargestellt. Grundsätzlich zeichnet sich der Karosseriebau durch eine Vielzahl an-



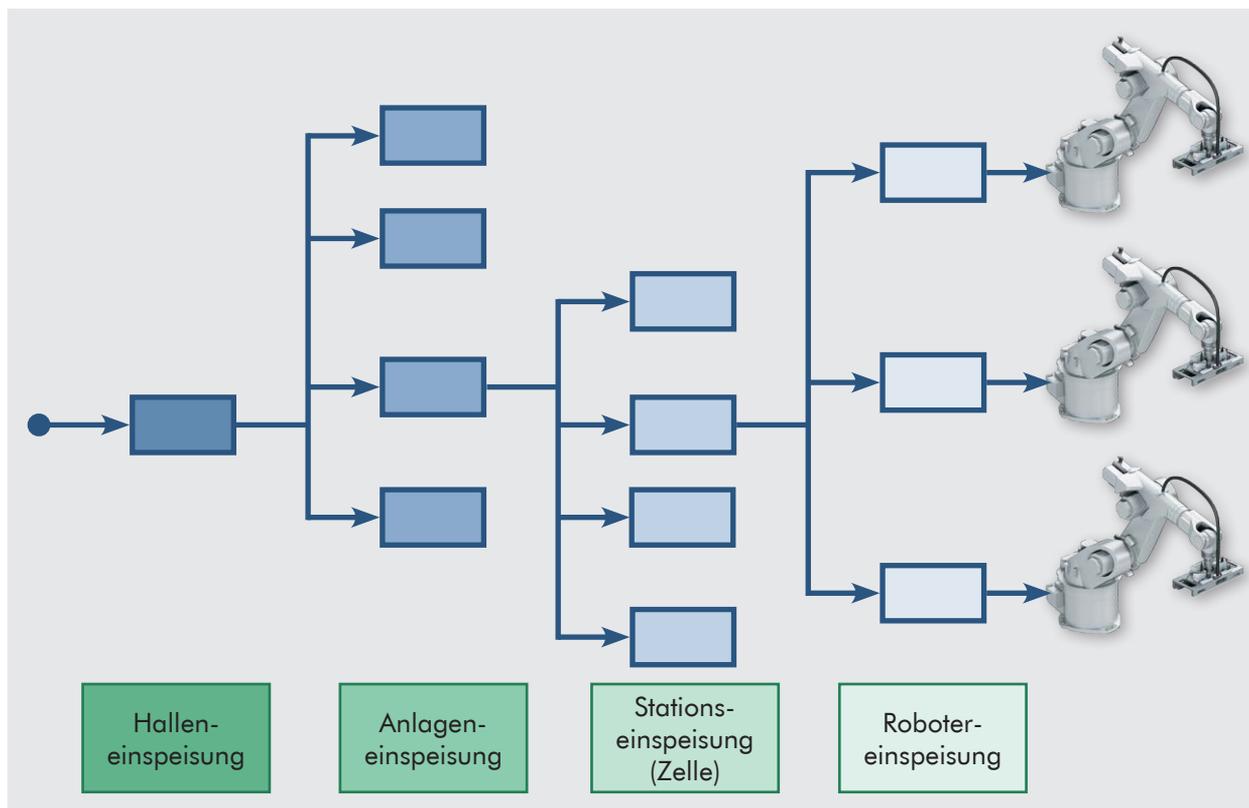
Typische Komponenten im Karosseriebau

triebstechnischer Komponenten aus, deren Funktion hauptsächlich in der Bereitstellung einer gewissen Kraft besteht (z.B. Spanner und Greifer). Positionierbewegungen über einen großen Hub sind selten. Daher nutzt der Karosseriebau eine Domäne der Pneumatik, denn mit pneumatischen Antrieben kann (abgesehen von Leckagen) eine Kraft leistungslos über einen unbegrenzten Zeitraum gehalten werden.

Zusätzlich wird Druckluft im Karosseriebau nicht nur für den Betrieb pneumatischer Komponenten eingesetzt. Sie kommt auch als Prozessluft zum Einsatz, z.B. bei Laserschweißanlagen als Cross-Jet oder beim Kappenfräser zum Ausblasen der Späne. Diese Prozessluft darf bei Betrachtungen der Energieeffizienz nicht in Kombination mit dem Verbrauch der pneumatischen Komponenten betrachtet werden. Es muss stets zwischen pneumatischer Antriebstechnologie (Druckluft als „Energieträger“) und Prozessluft (Druckluft als strömendes Medium) unterschieden werden.

Die verwendeten Bauteile in der Karosseriefertigung sind aufgrund des intensiven Auftretens von Funkenflug hohen Belastungen ausgesetzt. Zwar lässt sich durch den Einsatz servopneumatischer Schweißzangen die Anpresskraft genauer justieren was die Entstehung von Funken und Schweißspritzern stark verringert, trotzdem kann die Karosseriefertigung als raue Umgebung mit hohen Belastungen klassifiziert werden. Dennoch wird eine hohe Lebensdauer vorausgesetzt. Für Schweißzangenantriebe wird ein Lebenszyklus von 10-15 Mio. Schweißpunkten erwartet.

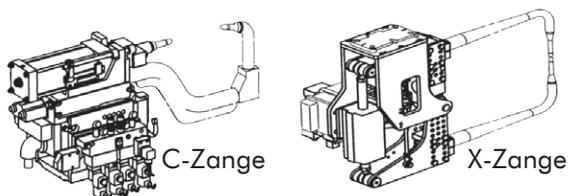
Die Abbildung unten zeigt eine charakteristische Installationshierarchie über Einspeisepunkte im Karosseriebau. Die Druckluft wird dabei über eine sogenannte Hallen- und Anlageneinspeisung den einzelnen Stationen (Zellen) zugeführt. Pro Zelle können mehrere Einspeisepunkte im Einsatz sein. An jeder Robotereinheit befindet sich zusätzlich eine Robotereinspeisung, die die Druckluftverbraucher über Filter und Druckregler mit Luft versorgt.



Einspeisepunkte - Transport von Druckluft und Kühlwasser (inflow & outflow)

### 3.2.2 Schweißzangentechnologie

Die einzelnen Karosseriebauteile werden in verschiedenen Anlagen durch das Setzen von Schweißpunkten miteinander verbunden. Hierfür kommen Schweißzangen zum Einsatz. Je nach konstruktivem Aufbau wird zwischen C-Zangen und X-Zangen unterschieden. Bei C-Zangen wird die Elektrode direkt durch einen Linearantrieb bewegt, in X-Zangen wird die Bewegung über eine Hebelmechanik auf die Elektroden übertragen.

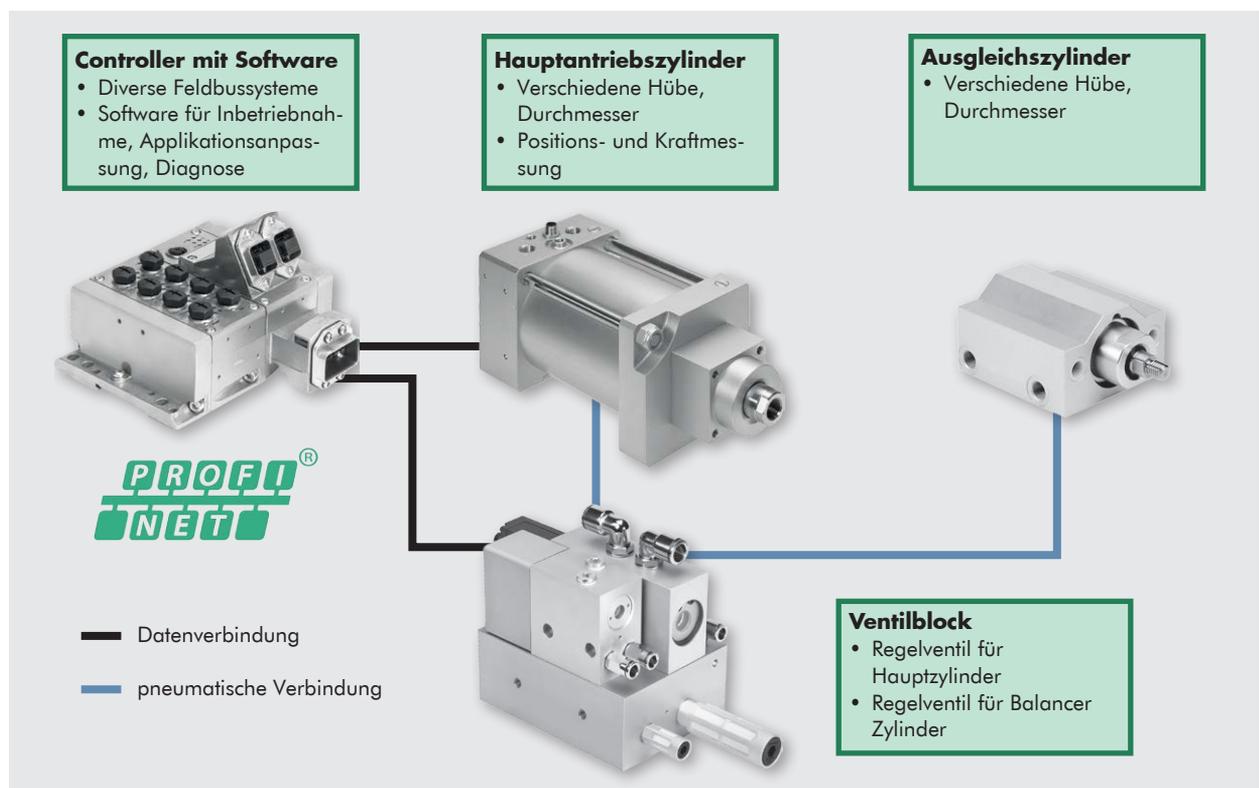


Konstruktiver Aufbau von Schweißzangen

Im Bereich der Antriebstechnik können grundsätzlich zwei verschiedene Technologien unterschieden werden: Herkömmliche Standardantriebs-

technik (gesteuerte Punkt-zu-Punkt-Bewegung) und Servotechnologie mit Positions- und Kraftregelung. Der aktuelle Trend zeigt, dass die Bedeutung der Servotechnologie zunimmt. Mit Servoantrieben lassen sich Position und Kraft gezielt regeln, z.B. auch kleinere Positioniervorgänge ausführen, was wiederum zu einem geringeren Energieverbrauch führt. Zusätzlich hat der geregelte Kraftaufbau eine höhere Qualität der Schweißpunkte zur Folge, führt zu besserer Prozessbeherrschung und geringerem Geräuschpegel.

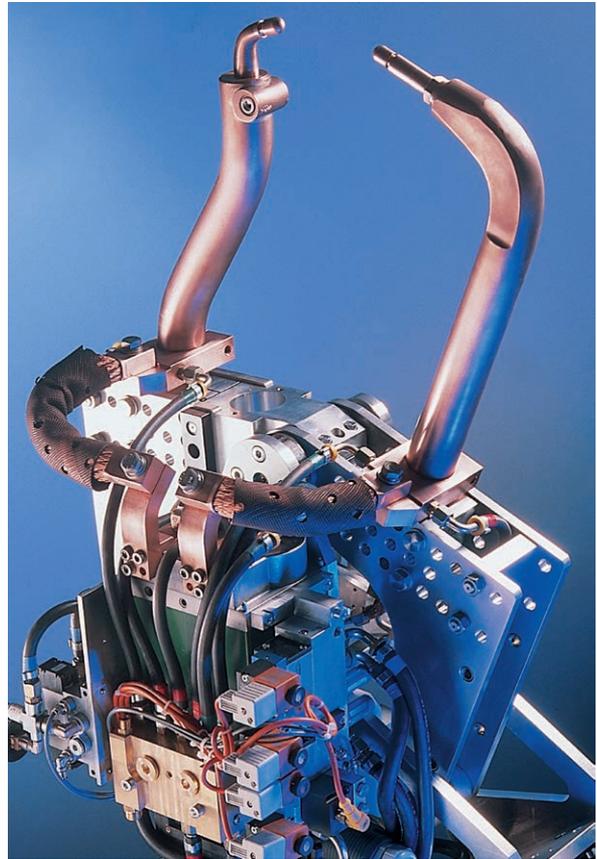
Im Bereich der Servotechnologie sind sowohl elektrische als auch pneumatisch betriebene Schweißzangen verfügbar. Beide Antriebstechnologien haben ihre spezifischen Vor- und Nachteile. Die Tabelle auf der folgenden Seite zeigt eine qualitative Gegenüberstellung der jeweiligen technologischen und wirtschaftlichen Eigenschaften. Generell gilt: Die elektrischen Antriebe haben den geringsten Energieverbrauch, die Servopneumatik hat Performancevorteile, ist kompakter und in den Gesamtkosten günstiger.



Aufbau eines servopneumatischen Antriebssystems

Da in diesem Projekt der Fokus auf der Effizienzanalyse und Optimierung pneumatischer Komponenten liegt, werden im Folgenden vorrangig pneumatisch betriebene Schweißzangen betrachtet.

Während des Schweißvorgangs sind hohe Anpresskräfte erforderlich, daher werden die Schweißzangen meist an einem Hochdrucknetz bei 12 bar betrieben, das zusätzlich zum herkömmlichen Druckluftnetz (in der Regel 6 bar) installiert wurde. Der Aufwand zum Betrieb eines zweiten Druckluftnetzes erscheint groß. Es wird daher oftmals angedacht, alternative Konzepte einzusetzen, beispielsweise die Verwendung elektrischer Schweißzangen bei gleichzeitigem Verzicht auf das Hochdrucknetz oder der Betrieb eines einzigen Druckluftnetzes mit einem Zwischendruckniveau als Kompromiss (z.B. 8 bar). Soll bei niedrigerem Druck eine ähnlich hohe Kraft erzeugt werden wie mit einem Hochdrucknetz, so ist dies technisch zwar möglich, es müssen dann jedoch pneumatische Antriebe mit großem Zylinderdurchmesser eingesetzt werden wodurch das Gewicht der Komponenten steigt und die Performance sinkt. In diesem Fall verliert die Servopneumatik eine ihrer wesentlichen Stärken. Welche Varianten möglich und wirtschaftlich sinnvoll sind, wird in Kapitel 4.2 erläutert.



Pneumatische X-Schweißzange

Eigenschaft	Standard Pneum.	Servo Pneum.	Servo Elektr.
Preis	++	+	0
Gewicht, Größe	+	+	-
Aufwand Inbetriebnahme	++	+	0
Performance, Geschw.	+	++	+
Erreichbare Kraft	+	+	++
Energiekosten	0	0	+
Geräusch	-	+	++
Safety, Diagnose	0	+	+
Zuverlässigkeit	-	+	+
Instandhaltungsaufwand	+	+	0
Notwendige Qualifikation	++	+	+

## 3.3 Analyse der Druckluftversorgung

### 3.3.1 Die Kompressorstation

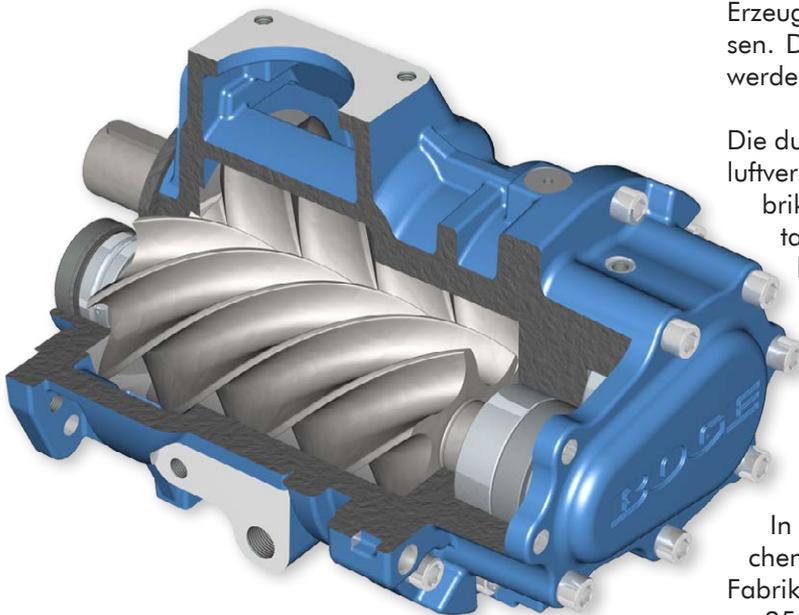
Die Kompressorstation bildet das Kernstück eines Druckluftsystems. Etwa 80% der Gesamtkosten einer Kompressorenanlage entfallen auf die Energiekosten. Sie haben daher einen wesentlichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der Anlage.

Je nach Anforderungen an das Druckniveau und die gewünschte Liefermenge kommen unterschiedliche Kompressorenbauarten zum Einsatz. In der Regel werden vorzugsweise Turbokompressoren oder ölfreie Schraubenkompressoren verwendet. Diese sind insbesondere für hohen Druckluftbedarf und kontinuierlichen Verbrauch geeignet. Turbokompressoren gehören zu den dynamischen Verdichtern, bei denen mit Schaufeln versehene Laufräder das zu verdichtende Gas beschleunigen. Feststehende Leitapparate an den Schaufeln wandeln Geschwindigkeitsenergie in Druckenergie um. Sie werden bei großen Fördermengen bevorzugt eingesetzt. Höhere Druckstufen werden durch mehrstufige Verdichtung realisiert.

Schraubenkompressoren gehören zu den rotierend arbeitenden Verdrängerverdichtern. Zwei parallele mit unterschiedlichem Profil versehene Drehkolben arbeiten gegenläufig in einem Gehäuse wie in der unteren Abbildung dargestellt. Die von der Kom-

pressorstufe angesaugte Luft wird während des Transports zum Druckstutzen bis auf den Enddruck verdichtet und anschließend ausgeschoben. Bei ölfrei verdichtenden Schraubenkompressoren, bei denen die zu verdichtende Luft im Druckraum nicht mit Öl in Berührung kommt, sind die beiden Rotoren durch ein Gleichlaufgetriebe verbunden, so dass sich die Profiloberflächen nicht berühren. In Werken mit einem hohen Bedarf an Druckluft werden teilweise mehrstufig verdichtende Turbokompressoren mit sehr großen Antriebsleistungen eingesetzt. Stellenweise kann die Leistungsaufnahme einer einzelnen Station bis zu 2,8 MW betragen.

Dabei arbeiten die eingesetzten Kompressoren häufig bei konstanter Drehzahl. Die Fördermenge ist demnach nicht variabel einstellbar. Aufgrund des trägen Anlauf- und Abschaltverhaltens sowie aufgrund von Belastungsgrenzen können Kompressoren nicht beliebig oft an- und ausgeschaltet werden. Lediglich über Querschnittsveränderungen an der Einlassöffnung kann eine geringfügige Anpassung der Liefermenge erfolgen. Eine Start-Stop-Regelung zur Anpassung der Liefermenge an den Luftverbrauch ist daher mit herkömmlichen Kompressoren nicht möglich. Werden mehrere kleine Kompressoren eingesetzt und die Spitzenlast durch mindestens einen drehzahlregulierten Kompressor abgedeckt, so lässt sich die Erzeugung flexibel an den aktuellen Bedarf anpassen. Das Druckband der Station kann verkleinert werden und die Station arbeitet effizienter.



Schnittbild eines Schraubenkompressors

Die durchgeführten Messungen zeigen den Druckluftverbrauch der Produktionsanlagen in einer Fabrikhalle, die für den Karosseriebau repräsentativ ist. Der Verbrauch im Hochdrucknetz liegt bei ca. 4800 Nm<sup>3</sup>/h, im Niederdrucknetz ist er mit ca. 3900 Nm<sup>3</sup>/h etwas geringer. Geht man von Dreischichtbetrieb aus, so ergeben sich während der produktiven Zeit Erzeugungskosten von ca. 830 000 Euro pro Jahr und Produktionshalle (siehe hierzu auch Anhang 8.2 auf Seite 66).

In Zeiten mit ruhender Produktion (z.B. an Wochenenden) lässt sich der Ruheverbrauch einer Fabrikhalle bestimmen. Er kann im Bereich von bis zu 35% des Druckluftverbrauchs in der Produkti-

onsphase liegen. Dieser Wert erscheint zwar relativ hoch, ist bei älteren Installationen mit komplexer Netzstruktur aber durchaus realistisch. Ohne entsprechende Gegenmaßnahmen entsteht so im ungünstigsten Fall ein Ruheluftverbrauch, der pro Halle und Jahr zu Kosten von über 100 000 Euro führen kann.

Geht man davon aus, dass in modernen und gut gewarteten Netzen der Ruheverbrauch bei ca. 15% liegt, so ließe sich der Gesamtluftverbrauch um ca. 20% reduzieren, wenn auch mit hohem technischen Aufwand. Da diese Maßnahme den Luftverbrauch sowohl in Ruhephasen als auch in Produktionsphasen reduziert, würde dies bezogen auf eine repräsentative Produktionshalle zu einer Kostenersparnis von ca. 200 000 Euro pro Jahr führen.

Thermodynamisch bedingt entsteht während des Komprimierungsvorgangs eine große Menge Wärme. Diese kann zentral an der Kompressorstation über Wärmetauscher nutzbar gemacht und einer sinnvollen Verwendung zugeführt werden. Denkbar ist die Verwendung der Abwärme beispielsweise zur Raumheizung oder zur Warmwasseraufbereitung, wodurch Heizenergie an anderer Stelle eingespart und die Energieeffizienz des gesamten Produktionssystems gesteigert werden kann.

In älteren Produktionsanlagen ist ein System zur Wärmerückgewinnung häufig noch nicht integriert. Die Wärme wird lediglich über eine Wasserkühlung abgeführt und ungenutzt an die Umgebung abgegeben. Die durchgeführten Messungen haben gezeigt, dass in einem typischen Werk die anfallende Wärmemenge ca. 40 000 kWh pro Tag betragen kann. Wird angenommen, dass diese Wärmemenge zu 90% in einem Rückgewinnungssystem genutzt werden kann, so beträgt das Einsparpotential selbst im Vergleich zu einer sehr günstig angenommenen Fernwärme (3 ct/kWh) immer noch ca. 350 000 Euro pro Jahr. Zudem würden sich durch die geringere Belastung der Wasserkühlung weitere Einsparungen ergeben.

### 3.3.2 Netzstruktur

Die Netzstruktur hängt sehr stark von dem Aufbau eines Werks ab. Insbesondere bei älteren Werken, die über lange Zeit stetig erweitert wurden, ist die Netzstruktur selten optimal, denn häufig ist die gegebene Netzstruktur historisch gewachsen und nur schwer zu überblicken, was durch die zum Teil unterirdische Verlegung noch erschwert wird.

In großen Werken sind häufig mehrere Erzeugerstationen im Einsatz, die räumlich weit voneinander getrennt sein können. Dadurch wird zwar die Zuverlässigkeit der Druckluftversorgung erhöht, eine bedarfsgerechte und energetisch optimierte Koordination der einzelnen Kompressoren wird jedoch komplizierter. Die erzeugte Luftmenge kann außerdem nicht eindeutig bestimmten Verbrauchern zugeordnet werden. Es empfiehlt sich daher, beispielsweise am Einspeisepunkt einer Produktionshalle einen Durchflusssensor anzubringen.

### 3.3.3 Schlussfolgerungen

Anlagen mit unzureichender Volumenstromregelung, ungenutzter Wärmemenge und einem relativ hohen Ruheluftverbrauch müssen leider durchaus als typisch eingestuft werden. Mangelhafte Betriebszustände und hohe Energieverluste sind meistens die Folge fehlender Transparenz, da im Allgemeinen keine Messdaten vorhanden sind. Druckluffterzeugung und Verteilung darf hingegen nicht pauschal als ineffizient bezeichnet werden. Durch entsprechende Maßnahmen wären Energieverluste weitgehend vermeidbar.

Der Einsatz eines Wärmerückgewinnungssystems bietet ein sehr großes Optimierungspotential. Daneben sind die bedarfsorientierte Erzeugung von Druckluft, also die Vermeidung von Leerlaufzeiten, die Vermeidung von Leckagen und eine professionelle Wartung weitere vielversprechende Maßnahmen, welche nicht nur für das analysierte Werk, sondern für die meisten Stationen angesetzt werden können.

## 3.4 Analyse der Verbraucher

Die Analyse der Druckluftanwendungen in der Automobilindustrie zeigt, dass der Bedarf an Druckluft einen merklichen Anteil am Energieumsatz eines Werks einnehmen kann. Ein repräsentatives Automobilwerk kann in der Produktionszeit einen Druckluftbedarf von ca. 15 000 Nm<sup>3</sup>/h haben. Bei Dreischichtbetrieb und unter Berücksichtigung des Ruheverbrauchs ergibt sich so ein jährlicher Verbrauch von 100 Mio. Nm<sup>3</sup>.

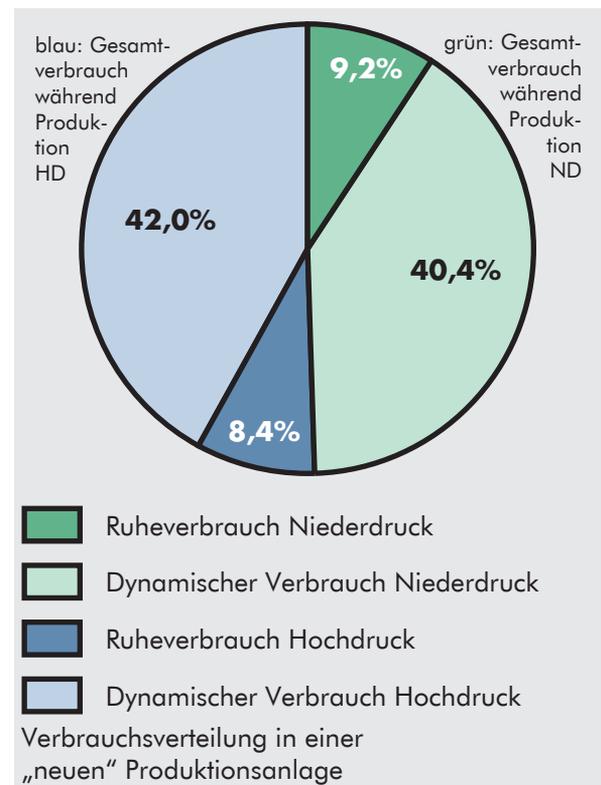
Mit durchschnittlichen Erzeugungskosten von 1,5 ct/Nm<sup>3</sup> ergeben sich jährliche Kosten für die Erzeugung der benötigten Druckluft von 1,6 Millionen Euro.

Der Großteil des Druckluftbedarfs in der Automobilindustrie wird jedoch nicht von pneumatischen Anwendungen zur Verrichtung mechanischer Arbeit benötigt, sondern als Aktivluft, z.B. in der Lackiererei oder für andere Zwecke. Zwar liegen keine fundierten Untersuchungen vor, es wird jedoch davon ausgegangen, dass ein Anteil von etwa 30% der gesamten Druckluft dazu verwendet wird, um pneumatische Aktoren zu betreiben (Ventile, Antriebe, Spanner, Schweißzangen, Stiftzylinder, ...). Der finanzielle Aufwand für diesen Teil des Druckluftverbrauchs liegt daher in einem repräsentativen Werk bei ca. 480 000 Euro.

### 3.4.1 Pneumatische Verbraucher

Um eine Aussage über den Energieverbrauch von einzelnen Produktionsanlagen im Karosseriebau zu erhalten, wurden an mehreren ausgewählten Anlagen umfangreiche Messungen durchgeführt. Die Zielsetzung aus der Auswertung der Messungen ist die Identifikation der Hauptverbraucher und abgeleitet hieraus die entsprechenden Maßnahmen zur Reduzierung des Verbrauchs an zukünftigen Anlagen. Dabei wurde zunächst der Luftverbrauch der gesamten Anlage (Niederdruck und Hochdruck) an der Anlageneinspeisung untersucht und anschließend detaillierte Messungen an einzelnen Anlagenkomponenten durchgeführt, um die Ergebnisse zu verfeinern. Die Analyse der Anlagen erlaubt es, Informationen über die Verbräuche während der Produktionsphasen und im Ruhezustand sowohl für den Hochdruck- als auch für den Niederdruckteil zu erhalten.

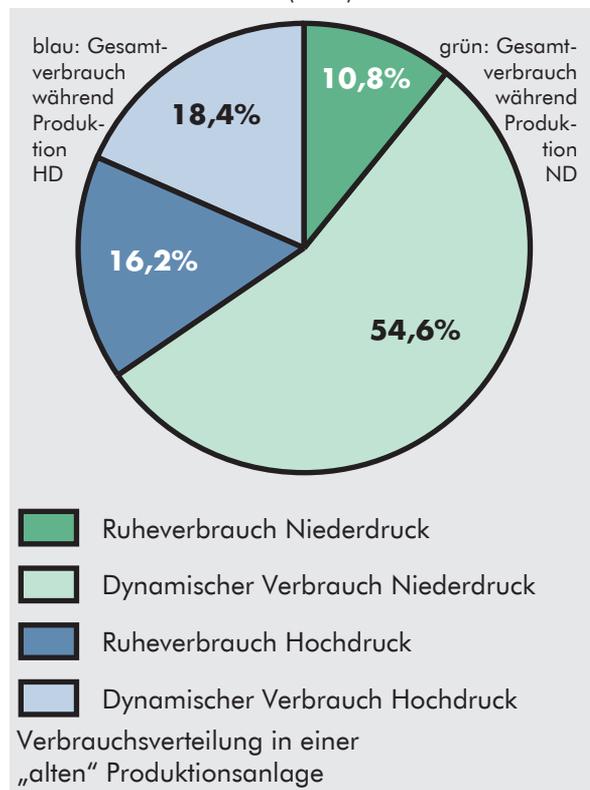
Zunächst wurde eine moderne Produktionsanlage untersucht, die erst vor kurzer Zeit in Betrieb genommen wurde und daher relativ neu ist. Sie besteht aus 345 Aktoren. Es sind keine konventionellen Schweißzangen verbaut, sondern lediglich servopneumatisch betriebene Schweißzangen. Eine grafische Übersicht der Verbrauchsverteilung ist im unteren Diagramm dargestellt. Es zeigte sich, dass etwa die Hälfte des Luftverbrauchs während der Produktionsphasen durch Komponenten im Niederdrucknetz (grün) und die andere Hälfte durch Hochdruck-Komponenten (blau) verursacht wird. Im Stillstand der Anlage sinkt der Luftverbrauch auf etwa ein Fünftel des Verbrauchs während der Produktionsphasen. Dieser Ruheverbrauch entsteht durch Leckagen, aber auch durch nicht abgeschaltete Verbraucher wie Blasluftdüsen.



Der Gesamt-Ruheverbrauch liegt bei 17,6%. Dies ist für eine typische Anlage ein relativ geringer Wert. Daher kann festgestellt werden, dass offensichtlich nur wenige Leckagen in der Anlage vorhanden sind, was auf einen hohen Qualitätsstandard der pneumatischen Installation schließen lässt.

Die Erfahrung zeigt jedoch, dass die Ergebnisse nicht pauschal auf alle Anlagen übertragen werden können. Eine zweite etwas ältere Anlage wurde ebenfalls auf ihre Verbrauchscharakteristik untersucht. Sie besteht aus 72 Aktoren im Niederdrucknetz und 8 konventionellen Schweißzangen im Hochdrucknetz. In dieser Anlage sind keine servopneumatischen Schweißzangen vorhanden.

Die Verteilung des Luftverbrauchs ist im unteren Diagramm dargestellt. Der Anteil an Niederdruckverbrauch ist in dieser Anlage größer, er beträgt ca. 65% (grün), die verbleibenden 35% entfallen auf das Hochdrucknetz (blau).



Im Anlagenstillstand beträgt der Luftverbrauch ca. 27% des Gesamtluftverbrauchs. Es fällt auf, dass der Anteil des Ruheverbrauchs im Bereich der Hochdruckverbraucher relativ hoch ist, beinahe halb so groß wie während der Produktionsphasen. Dies deutet auf einen hohen Leckageanteil in diesem Anlagenbereich hin. In diesem konkreten Fall konnte durch eine Begehung der Anlage und einfaches Suchen und Beseitigen von Leckagestellen in kürzester Zeit der Luftverbrauch der Anlage um 12% gesenkt werden.

Zusätzlich zur Untersuchung des Druckluftverbrauchs von Karosseriebau-Anlagen kann die Analyse einzelner pneumatischer Komponenten detaillierte Informationen über das Verbrauchverhalten liefern. Dies ermöglicht eine Verifizierung der Anlagenverbrauchswerte, sowie eine Datenbasis für die gezielte Hochrechnung des Verbrauchs anderer vergleichbarer Anlagen.

Typischerweise sind die meisten pneumatischen Komponenten Spannzylinder, Stiftziehzylinder und Schweißzangen. Der gesamte Verbrauch im Hochdrucknetz wird ausschließlich von pneumatischen Schweißzangen verursacht.

Der dynamische Hochdruckverbrauch der Anlage kann als Berechnungsgrundlage für den Druckluftbedarf pro Schweißpunkt dienen, wenn die Anzahl der Schweißpunkte pro Teil und die Ausbringung der Anlage pro Stunde bekannt ist. Im Fall der untersuchten Anlage konnte festgestellt werden, dass eine herkömmliche Schweißzange je nach Typ, Größe und Zangenkraft einen Luftverbrauch von 20NI bis 35NI pro Schweißpunkt verursacht. Die Energiekosten für 1 000 Schweißpunkte liegen somit zwischen 36 ct und 63 ct.

Mit servopneumatische Schweißzangen können bedarfsgerecht kürzere Hübe ausgeführt werden, was sich positiv auf den Luftverbrauch auswirkt. Er liegt je nach Zangentyp zwischen 7NI und 20NI pro Schweißpunkt. Die Energiekosten für 1000 Schweißpunkte liegen zwischen 13ct und 36ct. Einzelmessungen direkt an den Servo-Schweißzangen bestätigen diese Ergebnisse.

Es muss allerdings erwähnt werden, dass servopneumatische Schweißzangen einen gewissen Ruheverbrauch aufweisen, der in langen Stillstandszeiten einen erheblichen Anteil des Luftverbrauchs beitragen kann. Er liegt je nach Zangentyp bei 10NI/min bis 20NI/min. In Anlagen mit langem Stillstand ist folglich insbesondere bei Verwendung servopneumatischer Schweißzangen die Abschaltung der Luftversorgung eine sinnvolle Energie-sparmaßnahme.

Eine detaillierte Zusammenfassung der hier vorgestellten Daten ist im Anhang 8.3 und 8.4 auf Seite 66 aufgelistet.

## 4.1 Fabrikplanung im Karosseriebau

# 4

In der VDI Richtlinie 5200 wird die Fabrikplanung als „systematischer, zielorientierter, in aufeinander aufbauende Phasen strukturierter und unter Zuhilfenahme von Methoden und Werkzeugen durchgeführter Prozess zur Planung einer Fabrik von der Zielfestlegung bis zum Hochlauf der Produktion“ beschrieben. Über den Fabriklebenszyklus hinweg werden die Planungsfälle Neuplanung, Umpassung, Rückbau und Revitalisierung definiert. Dies lässt sich sinngemäß auch auf den spezialisierteren Kontext der Anlagenplanung übertragen. Aufgrund des hohen Automatisierungsgrades im Karosseriebau ist sie der Kern der Tätigkeiten zur Fabrikplanung für diesen Fertigungsbereich. Der Anstoß zu Planungsprojekten ergibt sich für den Karosseriebau meist aus Änderungen am Produkt.

### 4.1.1 Der Produktentstehungsprozess

In der Automobilproduktion ist die Fabrikplanung eng verknüpft mit dem Produktentstehungsprozess. Sie wird unterstützt durch die bereits umfassend realisierte rechnergestützte Produktentwicklung mit ihren digitalen Modellen. So können bereits frühzeitig Fragen zur Herstellbarkeit untersucht und Teile der Planung des Produktionssystems parallel zur Produktentwicklung durchgeführt werden.

Einen wichtigen Bestandteil der Planung einer Karosseriebauanlage bildet die Gestaltung der automatisierten Anlagen für die benötigten Fügeprozesse. Hier sind insbesondere Lösungen zu entwickeln für:

- die Materialbereitstellung der Einzelteile und die Fördertechnik der Zwischenprodukte
- die genaue geometrische Positionierung zu fügender Teile
- die Erreichbarkeit der Fügestellen mit den vorgesehenen Werkzeugen
- die enge zeitliche Koordinierung dieser Prozesse in den meist kurzen Taktzyklen

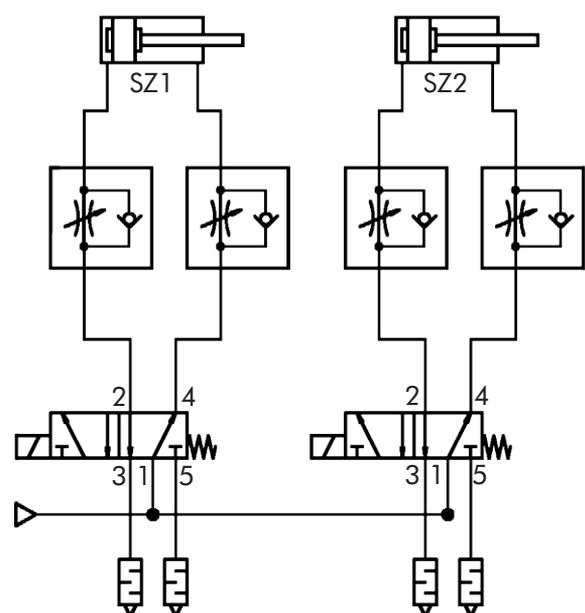
Dabei auftretende Probleme, die durch Änderungen am Produkt vermieden werden könnten, sind gemeinsam mit der Produktentwicklung lösbar.

Ausgangspunkte der Anlagenplanung sind die Stücklisten des zu fertigenden Produkts, die Geometrien seiner Einzelteile und das Fertigungsgrub-

konzept. Die Stückliste wird von Konstrukteuren meist nach funktionalen Gesichtspunkten gegliedert. Wichtiger ist für die Produktion jedoch die Reihenfolge, in der die Teile am günstigsten gefügt werden können. Deshalb wird die Stückliste in einem ersten Planungsschritt zu einer Fügefolge umgeordnet. Danach erfolgt die Planung der erforderlichen Prozessschritte und des zeitlichen Ablaufs sowie das Erstellen von Spann- und Punktplänen. Randbedingungen sind hier die geforderte Taktzeit, technische Anforderungen beispielsweise zur maßhaltigen Positionierung der Teile zueinander sowie betriebswirtschaftliche Zielgrößen.

Den Prozessschritten werden die erforderlichen Ressourcen zugeordnet. Im Karosseriebau sind das im Wesentlichen die Werker, Industrieroboter, Werkzeuge, Vorrichtungen, Förderanlagen und die für deren Betrieb notwendige Peripherie. Die Vorrichtungen und ein Teil der Werkzeuge müssen angepasst an die Geometrie der Bauteile entworfen, konstruiert und gebaut werden. Für die benötigten Aktuatoren werden passende Komponenten bei darauf spezialisierten Herstellern gekauft.

Die Drucklufttechnik ist ein typisches Feld solcher Fachexpertise. Eine Vielzahl von Anbietern stellt die im Karosseriebau eingesetzten spezifische Produkte als Standardartikel bereit, wie Spann- und



Ausschnitt eines Pneumatikplans

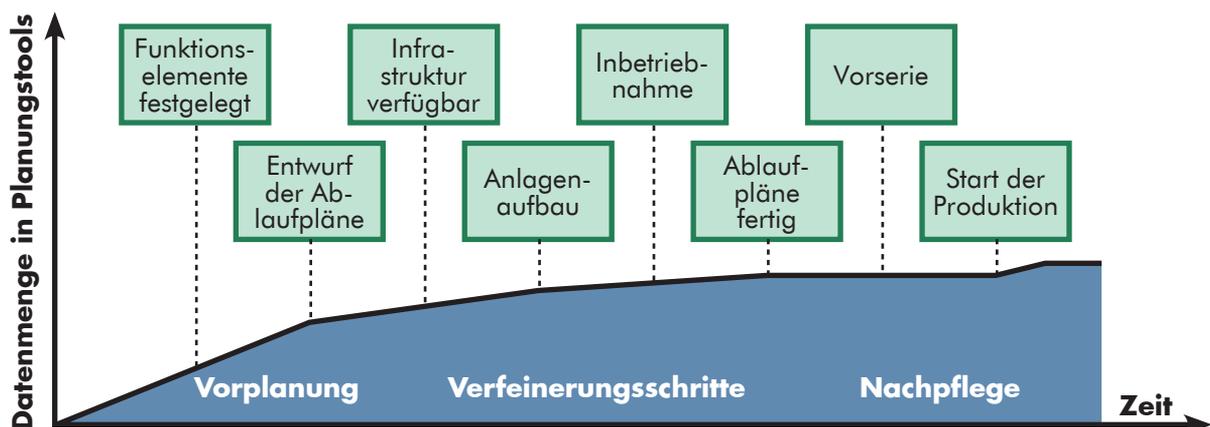
Positioniereinheiten, Schläuche und Ventile. Parallel zu den Konstruktionszeichnungen entstehen die Betriebsmittelstücklisten mit diesen Kaufteilen und Pläne zu ihrem Verbau. Für die Drucklufttechnik sind das sogenannte Pneumatikpläne. Sie sind gleichzeitig das Bindeglied zur Steuerungstechnik, da sie genau dokumentieren, mit welchen Signalen die Pneumatikventile zu schalten sind (Abbildung auf Seite 30 unten).

Sind Prozesse und Betriebsmittel bekannt, kann das Anlagenlayout entwickelt werden. Im Layout wird die Positionierung der Betriebsmittel zueinander festgelegt und damit Form und Größe der benötigten Stellfläche bestimmt. Natürlich soll möglichst wenig Hallenfläche belegt werden, die Bestückung mit Teilen logistisch optimal erfolgen und die relevanten Sicherheitsanforderungen müssen eingehalten werden. Der vorgesehene Aufbauort in der realen Fabrikhalle liefert weitere Restriktionen wie das zu berücksichtigende Säulengitter, vorhandene Anschlussmöglichkeiten zur Versorgung mit Betriebsmedien und Logistikwege. Zusätzlich müssen anlageninterne Versorgungskanäle und Roboterwechselkonzepte im Anlagenlayout betrachtet werden. Die Druckluftkomponenten der Anlage werden in der Regel aus wenigen Anschlussterminals versorgt, die zusätzlich Druckminderer und Filter enthalten können. Die Drucklufttechnik vor diesem Punkt wird der Fabrikinfrastruktur zugeordnet. Sogenannte Halleninstallationsplatten bilden die Verbindungspunkte zwischen Fabrik und Anlage. Sie sind somit Gegenstand intensiver Abstimmungen zwischen Infrastruktur- und Anlagenplanern.

Die wesentlichen zu dokumentierenden Arbeitsergebnisse der Anlagenplanung sind:

- Prozesspläne
- Betriebsmittelstückliste
- Konstruktionsdaten der Vorrichtungen und Werkzeuge
- Konzept zur Steuerungstechnik
- Anlagenlayout
- Anschlusspläne zur Anbindung an die betriebliche Infrastruktur.

Für das Erstellen dieser Dokumente wird spezielle Software verwendet. Das Finden passender Lösungen ist dagegen ein stark kreativer und erfahrungsbasierter Prozess. Dafür ist bisher keine umfassende Softwareunterstützung verfügbar. Im Rahmen der Digitalen Fabrik wird daran gearbeitet, die Infrastruktur- und Verbraucherplanung für Drucklufttechnik in den Produkt-Prozess-Ressource-Kontext zu integrieren. Doch auch diese Entwicklungen haben einen eher dokumentierenden Charakter. Eine strukturiertere und möglicherweise auch besser durch Software unterstützte Vorgehensweise bereits während der Dimensionierung der erforderlichen Technik wäre aber wichtig, da dann beispielsweise die unnötige Akkumulation von Sicherheitsfaktoren durch Anlagen- und Infrastrukturplaner erkannt und vermieden werden könnte. Im Folgenden werden Ansätze dazu vorgestellt, wie anhand von Szenarien systematischer dimensioniert werden kann und Software auch beim Finden der optimalen technischen Lösung unterstützen kann.



Vorgehensweise und Datenmenge im Fabrikplanungsprozess

### 4.1.2 Die InnoCaT-Referenzfabrik

Im Konsortium der InnoCaT-Allianz wurden Daten und Parameter einer typischen Automobilfabrik gesammelt und zwischen den Partnern aus den verschiedenen Bereichen abgestimmt. Daraus wurde eine fiktive InnoCaT-Referenzfabrik erstellt, die als Benchmark-Modell die typische Charakteristik von Automobilfabriken wiedergeben kann.

Bezogen auf die Gesamtfabrik kann sowohl der „wertschöpfende“ als auch der unterstützende sowie der nichtproduktive Energieeinsatz (d.h. beispielsweise inkl. Beleuchtung, Lüftung, Ruheverbrauch, Stand-by etc.) ausgewiesen werden. Der Verbrauch wird jeweils hochgerechnet auf den Umfang einer typischen Karosserie sowie das Produktionsvolumen eines Standardwerks. Dies erfolgt über die Verknüpfung operations- oder teilespezifischer Energiebedarfe mit Produktmerkmalen.

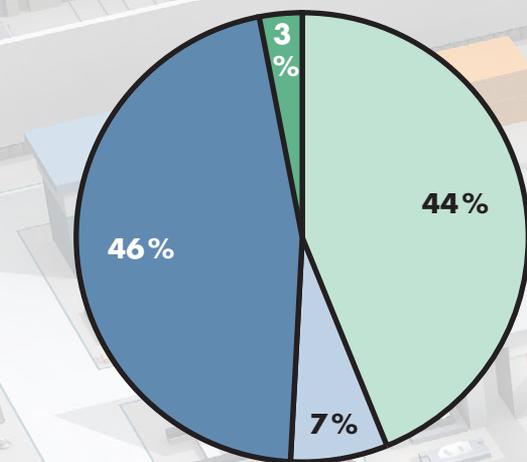
Die Ermittlung des Energiebedarfs dient zunächst dazu, die prozentuale Verteilung der Energieverbraucher in einem Standardwerk zu identifizieren und einen Eindruck über den anteiligen Verbrauch unterschiedlicher Energieformen zu erhalten. Zu-

sätzlich lassen sich Einsparungen durch Anlagensoptimierung und effiziente Prozesssteuerung ausweisen, z.B. durch Reduzierung der Leistungsaufnahme im Standby-Betrieb oder durch energieeffiziente Fahrweise der Anlagen.

Das jährliche Produktionsvolumen der Referenzfabrik wird mit 250 000 lackierten Karosserien beziffert. Zusätzlich besitzt diese Referenzfabrik einen Vollwerkzeugbau, dessen jährliche Produktionskapazität die Fertigung der Werkzeuge aller Außenhautteile und kompetenztragenden Strukturteile von 1,5 Fahrzeugmodellen gestattet.

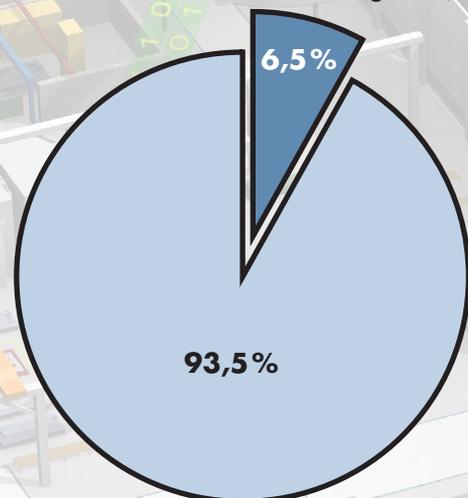
Die Analyse des Gesamtenergieverbrauchs erlaubt eine Aussage über den anteiligen Energiebedarf der einzelnen Gewerke, wie im Diagramm unten links dargestellt. Es zeigt sich, dass der größte Energieverbrauch in Karosseriebau (44%) und Lackiererei (46%) anfällt. Presswerk und Werkzeugbau spielen eine untergeordnete Rolle. Da insbesondere im Karosseriebau ein großer Anteil pneumatischer Antriebstechnik zum Einsatz kommt, ist besonders in diesem Bereich das Potential für energiesparende Maßnahmen relativ groß.

Es konnte jedoch auch festgestellt werden, dass der Anteil der Druckluftherzeugung am gesamten Energieverbrauch des Referenzwerks lediglich 6,5% be-



- Karosseriebau
- Lackiererei
- Presswerk
- Werkzeugbau

Gesamtenergieverbrauch im Referenzwerk; Verteilung auf einzelne Gewerke

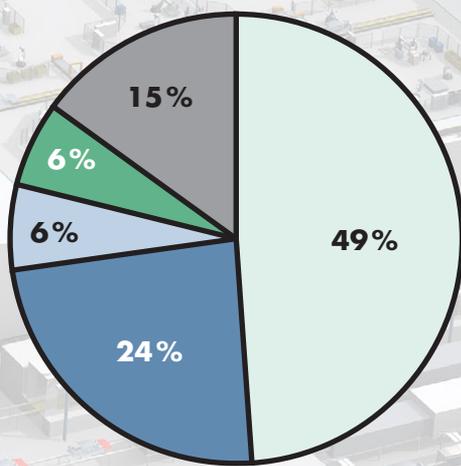


- Energieanteil der Druckluft
- Andere Energieformen

Etwa 6,5% des gesamten Energieverbrauchs im Referenzwerk entfallen auf die Druckluft

trägt (zweites Diagramm auf der linken Seite). Der Großteil des Energieverbrauchs entfällt auf den Elektroenergiebedarf in den produzierenden Gewerken - hauptsächlich für den Betrieb elektrischer Motoren, z.B. in Industrierobotern.

Im Zuge dieser Analysen wurde für die Druckluft ein Gesamtaufwand von ca. 100Mio.Nm<sup>3</sup> oder



- Karosseriebau
- Lackiererei
- Presswerk
- Werkzeugbau
- Andere Bereiche

Anteiliger Druckluftverbrauch verschiedener Gewerke in der Referenzfabrik

400Nm<sup>3</sup> pro hergestellter Karosserie ermittelt. Dieser resultiert zum ganz überwiegenden Teil aus dem Einsatz der Druckluft im Karosseriebau (49% oder 196Nm<sup>3</sup>). Circa ein Viertel (24%) der Druckluft konnte der Lackiererei zugeordnet werden, Presswerk und Werkzeugbau zeichnen für jeweils 6% des Druckluftaufwands verantwortlich, der restliche Druckluftverbrauch (15%) entfällt auf andere Bereiche der Produktion (siehe Diagramm links).

Setzt man übliche energetische Aufwände zur Erzeugung der Druckluft an, ergibt sich für das Gesamtwerk ein Elektroenergiebedarf zur Druckluftherzeugung von ca. 13Mio.kWh pro Jahr oder 52kWh pro Karosserie.

Speziell im Karosseriebau entstehen pro Karosserie ca. 26kWh Energiebedarf durch den lokalen Druckluftbedarf. Insgesamt werden für die Erzeugung der Druckluft im Karosseriebau ca. 6,4Mio.kWh elektrische Energie jährlich eingesetzt. Dem gegenüber stehen 7,2Mio.kWh/a weitere indirekte Prozessaufwände (z.B. zur zentralen Kühlwasserversorgung), 26,3Mio.kWh/a direkte Prozessaufwände (Elektroenergiebedarf der Roboter und anderer Anlagen) sowie 34,0Mio.kWh/a Elektroenergiebedarf zur Versorgung peripherer Systeme, wie z.B. der Lüftung, Beleuchtung und Logistik.

Eine Zusammenfassung der relevanten Daten aus der Referenzfabrik ist in der unteren Tabelle und im Anhang 8.1 auf Seite 66 dargestellt.

	Referenzfabrik	Referenzkarosserie
<b>Ausbringung</b>	<b>250 000 Fahrzeuge/a</b>	
<b>Anzahl der Schweißpunkte</b>	<b>1 037 Mio./a</b>	<b>4 150</b>
<b>Elektroenergiebedarf in den produzierenden Gewerken</b>	<b>131,4 Mio. kWh/a</b>	<b>512 kWh</b>
<b>Gesamter Elektroenergiebedarf inkl. Infrastruktur</b>	<b>206,5 Mio. kWh/a</b>	<b>810 kWh</b>
<b>Druckluftbedarf</b>	<b>100,1 Mio. Nm<sup>3</sup>/a</b>	<b>400 Nm<sup>3</sup></b>
<b>Druckluftbedarf nur Karosseriebau</b>	<b>49 Mio. Nm<sup>3</sup>/a</b>	<b>196 Nm<sup>3</sup></b>
<b>Bedarf an elektrischer Energie für Druckluft im Karosseriebau</b>	<b>6,4 Mio. kWh/a</b>	<b>26 kWh</b>

## 4.2 Betrachtung möglicher Anlagentopologien

Ein wesentlicher Einflussfaktor auf die Energieeffizienz im Karosseriebau ist die Beschaffenheit der Infrastruktur auf Werks- und Hallenebene. Wird ein neues Werk geplant, so stellt sich beispielsweise die Frage, ob ein Hochdruck- und ein Niederdrucknetz benötigt werden oder ob ein einziges Netz ausreichend ist. Derartige Fragen müssen bereits in einer frühen Planungsphase beantwortet werden, lang bevor Details der Fertigungsanlagen und deren Komponenten bekannt sind.

Bei der Planung eines Produktionsstandorts und dessen Infrastruktur sind verschiedene Szenarien denkbar, die im Folgenden systematisch untersucht und bewertet werden. Es wird dabei bewusst auf das Thema „Hochdrucknetz“ und die damit versorgten Schweißzangen eingegangen. Die vorgestellten Szenarien wurden mit verschiedenen Automobilherstellern auch außerhalb der Innovationsallianz Green Carbody verifiziert. Sie sind daher zwar repräsentativ, es handelt sich dennoch um Beispielrechnungen. Für den konkreten Einsatzfall sind die Szenarien und die verwendeten Werte auf die jeweiligen Gegebenheiten anzupassen.

Durch den Vergleich verschiedener Szenarien soll vorrangig die Frage beantwortet werden, wie bei einem neuen Werk die Druckluffterzeugung, Verteilung und der Verbrauch aus Sicht der Energie- und Gesamtkosten (TCO) am besten aufeinander abgestimmt werden können.

**Szenario 1:** Neben dem Niederdrucknetz (6 bar) ist ein zweites Druckluftnetz mit einem hohen Druckniveau (12 bar) vorgesehen. Herkömmliche pneumatische Antriebe (Spanner, Stiftziehzyylinder), werden aus dem Niederdrucknetz versorgt, die Schweißzangenantriebe werden komplett aus dem Hochdrucknetz versorgt.

**Szenario 2:** Es wird nur ein Druckluftnetz vorgesehen, dessen Druckniveau einen Kompromiss aus Niederdruck und Hochdruck darstellt (8 bar). Alle pneumatischen Komponenten (Schweißzangenantriebe und Standardverbraucher) werden aus diesem Netz versorgt. Ist das Druckniveau für einige Schweißzangenantriebe nicht ausreichend, so werden diese modifiziert (z.B. durch Antriebe mit größerem Zylinderdurchmesser). Die Investkosten für diese Komponenten sind ggf. höher.

**Szenario 3:** Es wird nur ein Niederdrucknetz mit einem Druckniveau von 6 bar eingesetzt. Alle Komponenten werden aus diesem Netz versorgt. Ist die Druckkraft für den Betrieb der Schweißzangenantriebe nicht ausreichend, so müssen diese größer dimensioniert werden.

**Szenario 4:** Es wird wie in Szenario 3 nur ein Niederdrucknetz mit einem Druckniveau von 6 bar eingesetzt. Alle herkömmlichen pneumatischen Komponenten werden aus diesem Netz versorgt. Die Schweißzangen, deren Druckkraft im pneumatischen Betrieb nicht ausreichend wären, werden durch elektrische Antriebstechnik ersetzt.

**Szenario 5:** Es wird wie in Szenario 4 nur ein Niederdrucknetz mit einem Druckniveau von 6 bar eingesetzt. Alle herkömmlichen pneumatischen Komponenten werden aus diesem Netz versorgt. Die Schweißzangen werden komplett elektrisch betrieben.

Bei den folgenden Berechnungen wird von einer Neuplanung ausgegangen, nicht von Nachrüstung oder Umbau. Folgende Randbedingungen sind für die Bewertung der Szenarien relevant:

1. Ein typisches neues Werk hat 2 bis 3 Karosseriebauhallen, in denen insgesamt ca. 500 Schweißzangen aktiv sind. Größere Werke können bis zu 1000 Schweißzangen enthalten.
2. Dabei werden zu gleichen Anteilen sowohl X- und C-Zangen eingesetzt. Es wird davon ausgegangen, dass 60% der pneumatischen Schweißzangen mit einem Standarddruck von 6 bar betrieben werden könnten, für 20% ist ein höherer Druck von 8 bar notwendig, die restlichen 20% benötigen einen Versorgungsdruck von 10 bar.
3. Bei den C-Zangen und X-Zangen sind die Antriebe unterschiedlich groß und auch die Verfahrenzyklen sind unterschiedlich. Aus diesem Grund wurden detaillierte Verbrauchsmessungen an unterschiedlichen C- und X-Zangen bei unterschiedlichen Referenzzyklen durchgeführt und die Daten entsprechend gemittelt.
4. Schweißzangenantriebe haben eine Lebensdauer von ca. 10-15 Mio. Schweißpunkten.
5. Typisch ist der Einsatz im 3 Schichtbetrieb.

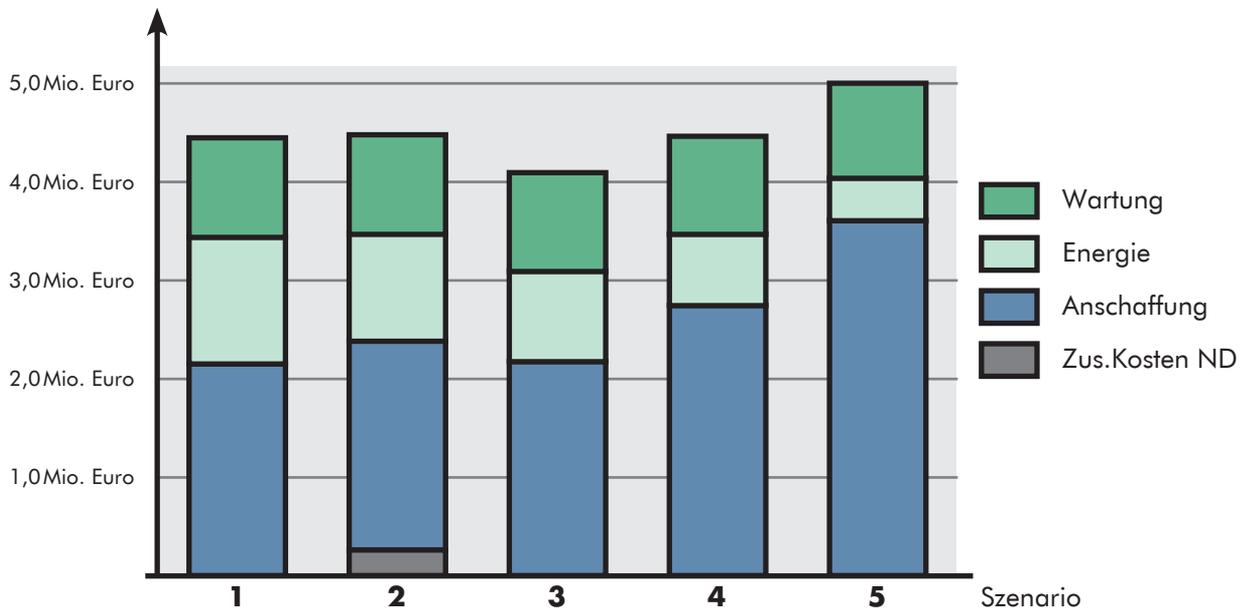
6. Eine Schweißzange setzt ca. 500 Schweißpunkte pro Stunde. Im Dreischichtbetrieb entspricht dies 12 000 Schweißpunkten pro Tag.
7. In einem typischen Automobil werden 4 150 Schweißpunkte gesetzt.
8. Bei den Vollkostenrechnungen müssen Wartungskosten berücksichtigt werden, auch Kosten für Investition in Ersatzzangen, die heute typischerweise im Bereich bei 20% bis 40% des Gesamtbedarfs liegen.
9. Die Wartungskosten enthalten sowohl die Aufwendungen, die zur Pflege und Instandhaltung der Infrastruktur notwendig sind (z.B. Kompressoren) als auch eine Abschätzung der Wartungsaufwände für die Antriebe selbst.
10. Für die Energiekosten und Druckluftkosten (in Form von elektr. Energiebedarf) wurden Werte verwendet, die für den Industriestandort Deutschland typisch sind. Da viele Investitionen deutscher Automobilisten im asiatischen und amerikanischen Raum stattfinden, sind die Energiekosten in solchen Fällen den regionalen Bedingungen anzupassen.
11. Die Kosten für den Betrieb des Niederdrucknetzes sind in allen Szenarien gleich, es wird daher lediglich derjenige Anteil der Installation betrachtet, der für den Betrieb der Schweißzangenteknologie benötigt wird.

Eine Übersicht der untersuchten Szenarien ist in der unten stehenden Tabelle dargestellt.

Im Folgenden werden für die verschiedenen Szenarien die Vollkosten (TCO) gegenübergestellt, die sich über eine typische Einsatzdauer von 5 Jahren ergeben. Die TCO-Kosten setzen sich aus den Investkosten, den Energiekosten und den Wartungskosten zusammen. Alle Kosten beziehen sich zur besseren Vergleichbarkeit nur auf die Antriebstechnik. Die Investkosten für Mechanik, Peripherie der Schweißzange, Schweißsteuerungstechnik werden als antriebsunabhängig angenommen. Auch Energiekosten für den Schweißvorgang, Wasserkühlung etc. sind unabhängig von der Antriebstechnik und daher nicht aufgeführt.

In der Abbildung auf der nächsten Seite sind die Gesamtkosten in Abhängigkeit der jeweiligen Szenarien gegenübergestellt. In allen 5 Szenarien wird ein herkömmliches Niederdrucknetz verwendet, dieses wird daher nicht explizit betrachtet. Da in Szenario 2 das Druckniveau des Niederdrucknetzes unterschiedlich ist (8 bar statt 6 bar) und sich diese Anpassung auch auf herkömmliche Niederdruckkomponenten auswirkt (z.B. Spanner und Stiftziehzylinder), beginnt diese Kalkulation mit einem Anteil „Zusatzkosten Niederdruck“.

Szenario	Struktur Druckluftnetz	Komponenten
1	12 bar Netz 6 bar Netz	100% pneumatische Schweißzangenantriebe (12 bar) Niederdruck-Komponenten im 6 bar Netz
2	8 bar Netz	80% pneumatische Schweißzangenantriebe (8 bar) 20% modifizierte pneumatische Schweißzangen (8 bar) Niederdruck-Komponenten im 8 bar Netz
3	6 bar Netz	60% pneumatische Schweißzangenantriebe (6 bar) 40% modifizierte pneumatische Schweißzangen (6 bar) Niederdruck-Komponenten im 6 bar Netz
4	6 bar Netz	60% pneumatische Schweißzangenantriebe (6 bar) 40% elektrische Schweißzangen Niederdruck-Komponenten im 6 bar Netz
5	6 bar Netz	100% elektrische Schweißzangenantriebe Niederdruck-Komponenten im 6 bar Netz



Gesamtkosten für das Schweißen in einem Standardwerk nach 5 Jahren

Es zeigt sich, dass der Energieanteil des Hochdrucknetzes (Szenario 1) bei pneumatischen Antrieben ca. 3 mal höher ist als bei servoelektrischen Antrieben (Szenario 5). In Summe sind aber die Invest- und Energiekosten für die servopneumatischen Antriebe selbst nach 5 Jahren geringer als für die servoelektrischen Antriebe.

Die Energiekosten für den Betrieb der Schweißzangen sind in Szenario 2, 3 und 4 relativ gering, allerdings erhöhen sich in Szenario 2 die Kosten für den Betrieb des Niederdrucknetzes (8 bar statt 6 bar), sodass die Gesamtkosten nach 5 Jahren verhältnismäßig hoch ausfallen.

Insgesamt erscheint Szenario 3 als günstigste Variante, da lediglich Niederdruckkomponenten auf einem Druckniveau von 6 bar eingesetzt werden und deswegen sowohl Energiekosten als auch Anschaffungskosten auf einem niedrigen Niveau liegen. Diese Variante ist jedoch nur dann praktikabel, wenn durch die Verwendung eines reinen Niederdrucknetzes keine technischen Probleme bei dem Betrieb aller pneumatischer Schweißzangenantriebe entstehen. Diejenigen Antriebe mit einem hohen Kraftbedarf müssen so modifiziert werden, dass auch bei 6 bar ein zuverlässiger Betrieb möglich ist, z.B. indem Antriebe mit einem größeren Durchmesser eingesetzt werden. Dies führt jedoch

zu einem höheren Platzbedarf und einem größeren Gewicht der verwendeten Komponenten, was an den verwendeten Robotern das Lastgewicht und damit die elektrische Energieaufnahme und die Dynamik negativ beeinflussen kann. Es muss demnach im Einzelfall untersucht werden, ob ein bestimmtes Szenario praktikabel umgesetzt werden kann.

Grundsätzlich ist zu erkennen, dass die Unterschiede in den Kosten der Szenarien 1 bis 4 mit maximal 400 000 Euro über 5 Jahre relativ gering sind. Auch die Verwendung von zwei Drucknetzen (Szenario 1) zeigt keine auffallend hohen Kosten. Es kann daher nicht generell festgestellt werden, dass der einfache Verzicht auf das Hochdrucknetz in allen Fällen zu einem dauerhaft kostengünstigen und optimalen Betrieb führt.

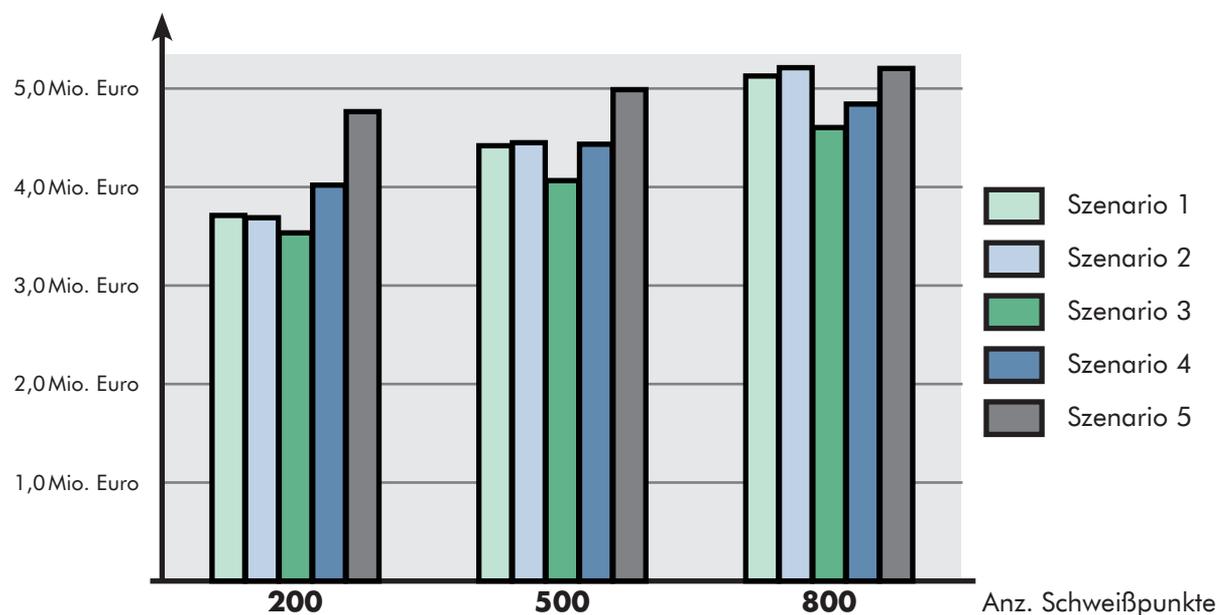
Das Ergebnis des Szenario-Vergleichs ist abhängig von der Auslastung der verwendeten Komponenten. Bisher wurde davon ausgegangen, dass eine Schweißzange eine typische Taktrate von 500 Schweißpunkten pro Stunde aufweist. Die Abbildung rechts zeigt wie sich die Gesamtkosten verändern, wenn die Anzahl der Schweißpunkte variiert. Verringert sich der Wert auf 200 werden die Unterschiede in den Gesamtkosten zwischen Szenario 1 und 4 noch größer, da die Investkosten

dominieren. Das bedeutet, das servoelektrische System ist hier nicht wirtschaftlich. Erhöht sich die Zahl auf 800 verbessert sich die Wirtschaftlichkeit des servoelektrischen Systems.

Die hier dargestellten Szenarien zeigen, dass energetisch betrachtet das servoelektrische System zu bevorzugen ist. Unter Betrachtungen der Vollkosten ist aber die pneumatische Lösung selbst unter Berücksichtigung einer Investition in ein Hochdrucknetz wirtschaftlicher. Hierbei sind Ruheverbräuche der pneumatischen Antriebe bereits eingerechnet (die durch Energiesparschaltungen vermindert werden können). Voraussetzung ist, dass das Hochdrucknetz ausschließlich für die Schweißzangenantriebe verwendet und nicht für andere Verbraucher zweckentfremdet wird. Zudem ist eine regelmäßige Wartung erforderlich, um Leckagen zu vermeiden.

Die Anschaffungskosten für die Kompressorstation fallen gegenüber den Investitionen in die pneumatischen Antriebe kaum ins Gewicht. Dies wird bei den geringen Unterschieden zwischen den Anschaffungskosten in den Szenarien 1 bis 4 deutlich. Grundsätzlich gilt, dass die Effizienz einer Druckluftanlage mit steigendem Druckniveau abnimmt und mit steigender Anlagengröße etwas zunimmt.

Eine alternative Möglichkeit zur Verwendung von zwei Druckluftnetzen wäre der Einsatz eines einzelnen Niederdrucknetzes und die Installation von lokalen Druckboostern zur selektiven Anhebung des Druckniveaus bei Bedarf in bestimmten Anlagen. Ein Druckbooster fungiert in diesem Fall als eine Art Nachverdichter, der elektrisch angetrieben wird und Druckluft aus dem Niederdrucknetz auf ein höheres Druckniveau komprimiert. Die spezifische Leistungsaufnahme von lokalen Druckboostern (inkl. dem Energieaufwand zur Erzeugung der benötigten Niederdruckluft) ist vergleichbar mit der Leistungsaufnahme eines zentralen Hochdruckkompressors. Energetisch ergibt sich also kein Einsparpotential durch den Einsatz von dezentraler Druckluffterzeugung. Nachteilig sind jedoch zum einen die steigenden Investitionskosten (viele Einzelanlagen), zum anderen ist es fortan nicht mehr möglich, die Druckluffterzeugung mit einer zentralen Wärmerückgewinnung zu koppeln. Wird die Druckluft in einer zentralen Kompressorstation erzeugt, so können in einer Wärmerückgewinnungsanlage bis zu 94% der aufgewendeten elektrischen Energie als nutzbare Prozesswärme rückgewonnen werden. Dies kann einen Großteil der im Werk anfallenden Heizkosten kompensieren. Diese Möglichkeit entfällt durch den Einsatz dezentraler Kompressoren, wodurch die Effizienz der gesamten Installation negativ beeinflusst wird.



Kostenentwicklung in Abhängigkeit der Anzahl der Schweißpunkte pro Stunde

## 4.3 Basis ist die Verbraucherplanung

Die Planung von Druckluftanlagen erscheint auf den ersten Blick relativ einfach. Anhand eines geschätzten Luftverbrauchs der Anwendung wird eine geeignete Kompressorstation identifiziert und ein passendes Verteilungsnetz installiert.

Während die Anforderungen an den Netzdruck und die Druckluftqualität häufig einfach aus den Betriebsdaten der Produktionsanlagen ermittelt werden können, wird der Druckluftbedarf meist nicht detailliert bestimmt, sondern lediglich aufgrund von groben Erfahrungswerten geschätzt. Häufig wird hierzu der Bedarf bestehender Anlagen hochgerechnet.

Fehlende Erfahrung oder nicht berücksichtigte Einflüsse können bei dieser Methode jedoch zu einem nicht zu unterschätzenden Planungsrisiko werden. Im schlimmsten Fall übersteigt der reale Bedarf die Planungswerte und es muss mit großem finanziellen Aufwand nachgebessert werden.

Aus diesem Grund werden an den verschiedensten Stellen häufig sehr große Sicherheitsfaktoren

aufgeschlagen. Dies hat zwar zur Folge, dass das Risiko einer Unterversorgung verringert wird, allerdings führt dies zwangsläufig zu überdimensionierten Anlagen, die oftmals sehr ineffizient betrieben werden. Es wird also schon in frühen Phasen durch die fehlende Abstimmung zwischen Erzeugung und Verbrauch viel Potential einer effizienten Druckluftanlage verschenkt.

Optimalerweise erfolgt die Planung einer Druckluftanlage entgegen der eigentlichen Druckluftwirkungskette. D.h. es sollte ein Bottom-Up Ansatz gewählt werden, um ausgehend von der detaillierten Verbraucherplanung das zu installierende Verteilnetz und die Druckluffertzeugung auszulegen.

Als Basis für eine effiziente Druckluftanlage sollte also eine ausreichend genaue Verbraucherplanung dienen. D.h. es muss vorab eine Untersuchung der benötigten Produktionsmittel durchgeführt werden und dabei auf Komponenten- bzw. Anlagenebene eine Medienbedarfsplanung stattfinden. Nur auf dieser Basis können alle Bereiche der Druckluftwirkungskette optimal ausgelegt werden.



Planungsreihenfolge

Durch diese Bedarfsplanung ist es möglich, den Medienbedarf innerhalb der Fabrik zu lokalisieren und die benötigte Infrastruktur optimal an den Bedarf anzupassen. Dies hat zur Folge, dass Unterversorgungen und unzulässige Druckverluste in Bereichen mit hohem Luftbedarf vermieden werden können. Die frühe Abstimmung des Verteilnetzes und der örtlichen Medienbedarfe bietet zudem den Vorteil, dass Rohrleitungen und Armaturen in vielen Bereichen angepasst dimensioniert werden können und somit auch direkt Investitionskosten eingespart werden.

Auch bei der Planung der Kompressorstation selbst ist es unabdingbar, den Druckluftbedarf ausreichend genau zu kennen. Nur so kann eine optimale Konfiguration der Kompressoren (Anzahl, Leistungsabstufung, Typ) und der dazugehörigen Druckluftaufbereitung erreicht werden. Ziel ist es hierbei, die Lastlaufzeiten zu maximieren und die Leerlaufzeiten zu minimieren. Gut abgestimmte Steuerungssysteme sowie Druckluftspeicher ermöglichen hier die Anpassung der benötigten Liefermenge an den schwankenden Druckluftbedarf.

Außerdem kann durch die bereits bestehende Planung der Druckluftverteilung die Kompressorstation günstig platziert und optimal an das Druckluftnetz angebunden werden. An dieser Stelle eröffnet sich die Chance, die entstehende Wärme weiter zu nutzen (Wärmerückgewinnung) und diese z.B. in das Warmluftheizsystem oder das Warmwassersystem einzuspeisen oder aber als Prozesswärme zu verwenden. Sollte die Verwendung einer Wärmerückgewinnung nicht möglich oder gewünscht sein, so muss auf entsprechende Belüftung geachtet werden, um die entstehende Wärme zuverlässig abzuführen.

Die Auslegung der Kompressorstation stellt zwar das Ende des Planungsvorgangs dar, allerdings beginnt hier die eigentliche Wirkungskette der Druckluft. Somit wirken sich Optimierungen an der Druckluftherzeugung direkt auf das gesamte Druckluftsystem aus. Es werden also bereits hier die Weichen für ein effizientes Druckluftsystem gestellt. Nur auf Basis genauer Planung können alle Bereiche der Druckluftwirkungskette optimal ausgelegt und aufeinander abgestimmt werden.

### 4.3.1 Automobilproduktion

Der Verbrauch an Druckluft ist in der Automobilproduktion im Vergleich zu anderen Branchen relativ hoch. Ein Großteil der Druckluft wird als Aktivluft verwendet, beispielsweise in der Lackiererei, in der die Druckluft das Trägermedium für die zu verteilenden Farbpartikel darstellt.

Auch der Verbrauch an Prozessluft stellt einen großen Anteil des Luftverbrauchs, beispielsweise als Sperrluft zum Schutz vor Verschmutzung oder bei der Verwendung von Cross-Jets zum Schutz der Fokussieroptik beim Laserschweißen. Der Druckluftstrahl wird dabei durch eine Düse derart auf den Schweißpunkt gerichtet, dass die Strömungsrichtung senkrecht zum Laserstrahl steht und Metallspritzer oder andere Partikel, die während des Schweißvorgangs entstehen, wirkungsvoll abtransportiert werden können.

Der Automatisierungsgrad in der Automobilproduktion ist relativ hoch. Daher entfällt ein ebenfalls hoher Anteil des Druckluftverbrauchs auf pneumatische Antriebskomponenten, Greif- und Spanntechnik. Neben der automatisierten Produktion sind teilweise Handarbeitsplätze mit Druckluftwerkzeugen vorhanden, deren Verbrauch nur bedingt bekannt ist und schwer geplant werden kann.

Da einige Systeme während der Produktionsphasen einen sehr hohen Verbrauch aufweisen können, unterliegt der Luftverbrauch stellenweise großen Schwankungen. Die Einteilung des Verbrauchs in Grund-, Mittel-, und Spitzenlast ist daher ein sinnvoller Schritt zur Auswahl von geeigneten Kompressoren und zur Planung von Kompressorstation und Verbundsteuerung.

## 5.1 Druckluftherzeugung

# 5

In diesem Kapitel werden Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz für die gesamte Wirkungskette der Druckluft vorgestellt, über die Druckluftherzeugung, die Druckluftaufbereitung, die Verteilung bis hin zur Anwendung. Den Beginn der Wirkungskette bildet die Druckluftherzeugung, deren optimale Planung die Grundlage für eine effiziente Gesamtinstallation darstellt. Es werden die Kompressor- und Trocknertypen, ihre Steuerung und Verschaltung untereinander, sowie die komplette Installation definiert. Da fast jede Druckluftstation anderen Bedingungen unterliegt, sind alle Vorgaben und Einflüsse zu beachten, deshalb ist dies eine sehr komplexe Aufgabe für einen Druckluftexperten.

Zuerst sind einige Rahmenbedingungen zu ermitteln, um dann über die Auswahl von geeigneten Kompressoren, Druckluftaufbereitung und Speicherung zu entscheiden. Ist die Anforderung an die Druckluftherzeugung geklärt (z.B. Fördermenge, Druckniveau, Druckluftqualität und Verbrauchsprofil), stehen weitere Fragen im Raum. Wie hoch ist die gewünschte Verfügbarkeit der Kompressoren und Trockner? Kommt ölfreie oder ölgeschmierte Erzeugung in Betracht? Ist Wärmerückgewinnung möglich, wenn ja, mit welchen Temperaturanforderungen? Gibt es Bereiche, die zeitweise keine Druckluft benötigen und somit abgesperrt werden können? Wie realistisch sind die Lastprofile? Selbst erfahrenen Druckluftexperten können aufgrund der Fülle an Informationen Fehler unterlaufen, daher existieren diverse Checklisten, Expertenprogramme und Leitfäden, die es ermöglichen, alle Einflussfaktoren in die Überlegungen und Planungen mit aufzunehmen.

Der Grundgedanke dabei ist stets das Ziel höchster Verfügbarkeit bei geringstem Energieverbrauch pro erzeugter Druckluftmenge, verknüpft mit der bestmöglichen Wärmerückgewinnung.

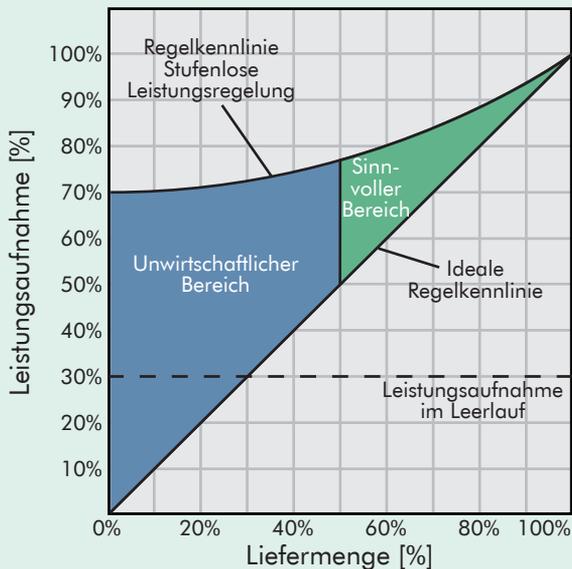
### 5.1.1 Drehzahlregelung

Herkömmliche Kompressoren werden mit einer festen Drehzahl betrieben. Die Fördermenge an Druckluft ist daher weitgehend vorgegeben. Bei Schwankungen im Luftverbrauch werden die Kompressoren zunächst in den Leerlaufbetrieb geschaltet und nach einer gewissen Zeit komplett abgeschaltet. Hierfür gibt es zwei Gründe: Ähnlich wie in einem Kraftwerksverbund muss auch eine Kompressoranlage schnell auf schwankenden Energiekonsum im Druckluftnetzwerk reagieren, um so ein Absinken des Systemdrucks zu verhindern. Dies kann besser realisiert werden, wenn der Kompressor aus dem Leerlauf schnell wieder zugeschaltet werden kann und keine langen Anlaufzeiten abgewartet werden müssen. Zusätzlich muss ein zu häufiges An- und Abschalten vermieden werden, da insbesondere große Elektromotoren sich aufgrund der Überhitzungsgefahr nicht beliebig oft an- und abschalten lassen. Während des Leerlaufs wird jedoch eine relativ große Menge elektrischer Energie benötigt, die ohne die entsprechende Erzeugung von Druckluft ungenutzt verloren geht. Dies wirkt sich negativ auf die Energiebilanz und den Wirkungsgrad der Kompressorstation aus.

Die Regelung der Motordrehzahl im Kompressor erlaubt eine verbrauchsgerechte Druckluftherzeugung. Leerlaufphasen, können weitgehend vermieden werden. Je kleiner ein Kompressor, desto wirtschaftlicher ist der Einsatz einer Drehzahlregelung tendenziell. Der Netzdruck kann im Idealfall bis auf 0,1 bar konstant auf dem benötigten Druckniveau gehalten werden. Die bei unregelmäßigem Kompressoren durch die Differenz zwischen Ein- und Ausschaltendruck vorgegebene Überverdichtung wird vermieden. Pauschal lässt sich so pro vermiedenem 1 bar Höherverdichtung ca. 10% Energie einsparen.

Die Drehzahlregelung erfolgt üblicherweise mittels Frequenzumrichter. Durch die Verluste an dieser Komponente ist ein frequenzgeregelter Kompressor bei Vollast ca. 3 bis 5% weniger effizient als ein vergleichbarer starrer Kompressor. Daher sollten geregelte Kompressoren insbesondere zur Abdeckung des schwankenden Lastbereiches eingesetzt werden, während starre Maschinen die Grundlast decken.

## Zahlen und Daten

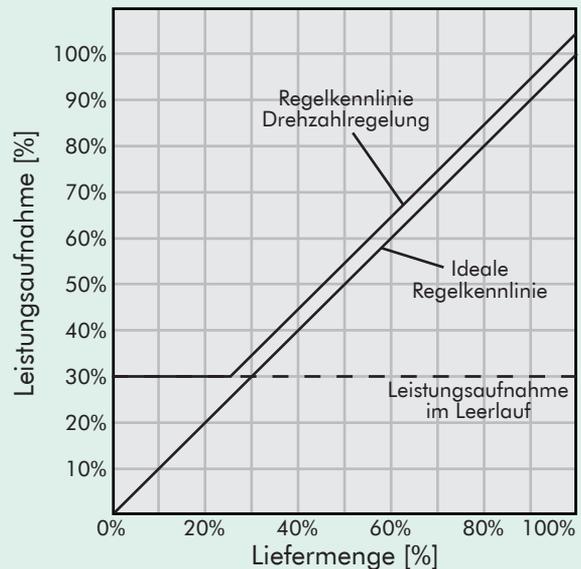


### Stufenlose Leistungsregelung

Einige Kompressoren sind mit einer sogenannten **stufenlosen Leistungsregelung** ausgestattet. Diese Regelung ändert nicht die Drehzahl des Elektromotors im Kompressor, sondern greift in die Vorgänge des Ansaugreglers ein und arbeitet nach dem Saugdrosselprinzip. Die tatsächliche Liefermenge lässt sich so an den aktuellen Druckbedarf anpassen (Abbildung oben links).

Ein sinnvoller Betrieb dieser Kompressoren ist in einem Bereich von 50% bis 100% der maximalen Liefermenge möglich. Bei kleineren Liefermengen ist die relative Leistungsaufnahme zu groß, daher wird der Kompressor in diesen Fällen abgeschaltet oder arbeitet für eine gewisse Zeit im Leerlaufbetrieb weiter.

Der Netzdruck kann durch eine derartige Regelung relativ konstant gehalten werden, da immer nur so viel gefördert wird wie gebraucht wird. Diese Art der Liefermengenregulierung ist relativ preiswert in der Anschaffung und wird eher für kleine Druckluftbehälter bzw. bei stark schwankendem Druckluftbedarf eingesetzt. Für die Regelung der Spitzenlast in einem Kompressorverbund ist jedoch der Einsatz drehzahl geregelter Kompressoren vorzuziehen.



### Drehzahlregelung

Die **Drehzahlregelung** ermöglicht eine sehr breite Liefermengenregelung im Bereich von 25% bis 100% der maximalen Liefermenge (Abbildung oben rechts). Das Ideal einer Kennlinie als Ursprungsgerade wird jedoch auch hier nicht ganz erfüllt. Durch den Verbrauch des Umrichters entsteht ein Verlust von 3% bis 5%, um den die Leistungsaufnahme größer ist als die Liefermenge. Die Untergrenze einer sinnvollen Regelung liegt bei einer Leistungsaufnahme von ca. 30%, da auch im Leerlauf (ohne Liefermenge) eine gewisse elektrische Leistung benötigt wird.

Es ist wichtig, alle Bereiche der Kennlinie bei der Stationsplanung zu berücksichtigen, sodass sich insgesamt während des Betriebs der Station keine Zustände ergeben können, in denen der Betriebszustand stark vom Ideal abweicht.

Die Energieeinsparungen, die sich durch Nutzung einer Drehzahlregelung ergeben können, sind je nach Ausgangssituation sehr groß. Einsparpotentiale ergeben sich durch Minimierung der Leerlaufzeiten, Verringerung der Verluste durch Schaltspiele und Anpassung der Leistungsaufnahme an die tatsächlich benötigte und gelieferte Liefermenge.

### 5.1.2 Optimierte Kompressorsteuerung

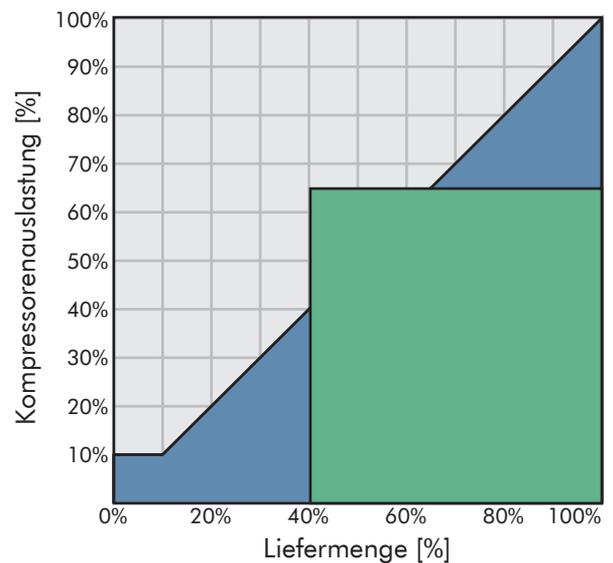
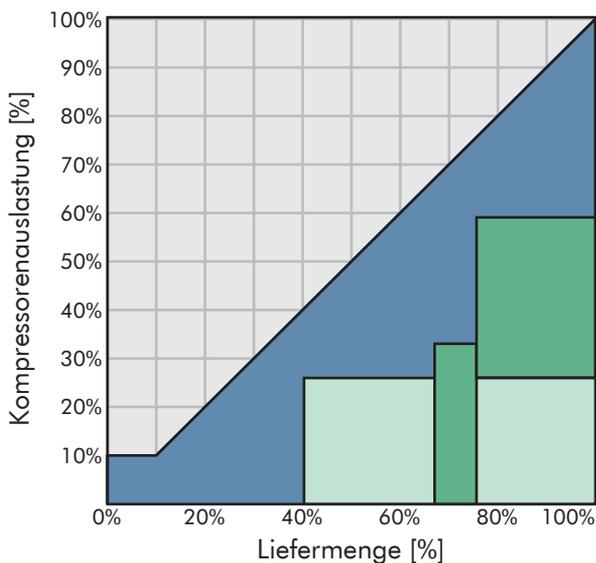
Durch eine bedarfsgerechte Auslegung der Kompressorstation können unnötige Energieverbräuche vermieden werden. Eine Kompressorstation sollte so gestaltet sein, dass verschiedene Kompressoren Grundlast und Spitzenlast bedienen können. Dabei muss die Anlage so aufgebaut sein, dass keine Regellücke zwischen den Kompressoren entsteht. Durch Zuschalten von drehzahlregulierten Spitzenlastanlagen können Verbräuche durch den energetisch ungünstigen Einsatz von größeren Anlagen im Teillastbereich vermieden werden. Die Lastverteilung in der Kompressorstation kann über eine energieoptimierende Steuerung erfolgen. Ihr kommt dabei die Aufgabe zu, zum richtigen Zeitpunkt die optimalen Kompressoren zu- oder wegzuschalten und dafür zu sorgen, dass immer die passenden Maschinen in Betrieb sind. Dies reduziert die Zahl der Schaltungen und Leerlaufverluste erheblich. Zur optimalen Konstellationsauswahl empfiehlt sich die Verwendung eines Stationsplanungstools, denn die Voraussetzung für eine gut funktionierende Steuerung ist eine optimal ausgelegte Station.

In der unteren Abbildung sind die grafischen Ergebnisse der Auslegung einer Kompressorstation dargestellt. Auf der x-Achse ist eine gewünschte Fördermenge dargestellt, die y-Achse zeigt jeweils farblich die hierfür zu aktivierenden Kompresso-

ren und deren anteilige Auslastung an. Die links gezeigte Station besteht aus einem geregelten Kompressor (blau) und zwei kleineren starren Kompressoren (grün). Es ist offensichtlich, dass die übergeordnete Steuerung in der Lage ist, ohne Regellücke immer eine optimale Konstellation auszuwählen. Die geregelte Maschine (blau) deckt jeweils die Spitzenlast ab. Im Vergleich dazu ist rechts eine Kombination aus einer geregelten (blau) und einer starren Maschine (grün) dargestellt. Im mittleren Lastbereich kann keine Kombination gefunden werden, mit welcher die gewünschte Fördermenge exakt abgedeckt wäre. Es kommt zur Regellücke und damit zu energetisch ungünstigem Ein- und Ausschalten sowie zu Überverdichtung.

Ein weiterer Vorteil der übergeordneten Steuerung besteht darin, dass sie ein deutlich verbessertes Monitoring erlaubt. Durch Verbrauchsermittlung und Verbrauchsanzeige lassen sich zum Beispiel die Größenordnungen und damit das Einsparpotenzial von durch Leckagen verursachten Ruheverbräuchen erkennen und frühzeitig beheben.

Die Installation einer übergeordneten Steuerung sollte im besten Fall immer schon dann erfolgen, wenn mehr als 2 Kompressoren in einer Station vorhanden sind. Dabei ist die Station bereits in der Planungsphase optimal mittels Planungssoftware auszulegen, um ein optimales Eingreifen der Steuerung zu ermöglichen.



Zwei Auslegungsvarianten mit unterschiedlichen Kompressoren

### 5.1.3 Auslegung des Druckluftspeichers

Der Druckluftbedarf in den verschiedenen Anlagen einer Produktionshalle kann stark schwanken. Sind mehrere Verbraucher gleichzeitig aktiv, so kann bei ungünstigen Verhältnissen der Netzdruck kurzzeitig stark einbrechen und die Funktion anderer Komponenten negativ beeinflussen.

Wird zum Ausgleich derartiger Effekte der Erzeugungsdruck an der Kompressorstation erhöht oder durch Anschaffung weiterer Kompressoren die Liefermenge angepasst, so steigt der Energiebedarf und die Anlage wird ineffizient.

Eine alternative Maßnahme zum Ausgleich von Druckschwankungen kann die Verwendung eines ausreichend dimensionierten Druckluftbehälters sein, der zwischen Kompressorstation und Verteilungsnetz eine Speicherfunktion übernimmt. Kurzzeitige Verbrauchsspitzen werden aus dem Behälter abgedeckt und geglättet. Je nach Struktur des Verteilungsnetzes kann es sinnvoll sein, in der Umgebung von Anwendungen mit stark schwankendem Luftverbrauch ebenfalls einen Behälter vorzusehen, um lokale Druckschwankungen zu glätten.

Die Berechnung des dynamischen Verhaltens von Netzdruck und Verbrauch ist eine komplexe Aufgabe, die sich in den meisten Fällen nicht durch einfache Berechnungsvorschriften oder Faustformeln lösen lässt. Die Planung der Größe eines geeigneten Behälters und der Platzierung von Zwischenspeichern kann daher bei bekannter Netzstruktur und bekanntem Verbraucherverhalten am besten durch geeignete Softwaretools erfolgen.

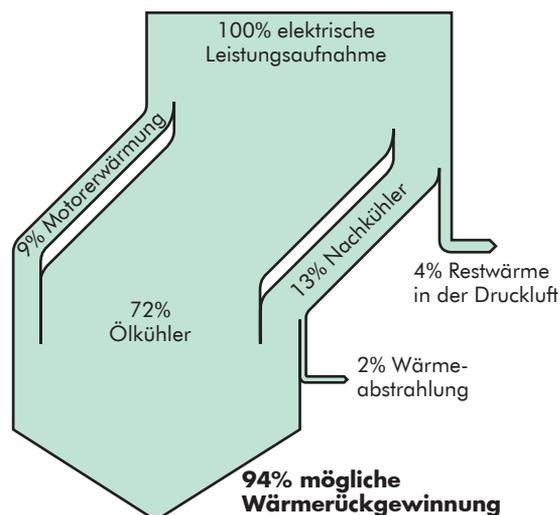


### 5.1.4 Wärmerückgewinnung

Bei der Komprimierung der Luft fällt thermodynamisch bedingt ein Großteil der gesamten Wärmeentwicklung innerhalb der Druckluftkette an. Ein entscheidender Aspekt zur Effizienzsteigerung von Druckluftsystemen ist daher die Integration eines Wärmerückgewinnungssystems. Wie das unten stehende Diagramm zeigt, können bis zu 94% der aufgewendeten elektrischen Energie als Wärme rückgewonnen und sinnvoll genutzt werden.

Insbesondere in größeren Anlagen kann die anfallende Abwärme als Nutzwärme verwendet werden, beispielsweise zur Beheizung von Räumen, Brauchwassererwärmung oder als Prozesswärme. In Adsorptionskältemaschinen kann die anfallende Wärme zur Erzeugung von Kälte eingesetzt werden, beispielsweise zur Raum-Klimatisierung im Sommer. Die konsequente Nutzung der Abwärme ist ein wesentlicher Aspekt zur Verbesserung des Gesamtwirkungsgrads.

In der Szenarienberechnung aus Kapitel 4.2 wurde die Möglichkeit einer Wärmerückgewinnung bewusst nicht betrachtet, da die anfallende Wärme nicht in jedem Werk sinnvoll genutzt werden kann. Dennoch sollte sie bei jeder Planung einer neuen Produktionsanlage in Betracht gezogen werden. Die Investitionskosten liegen bei Zugrundelegung der oben genannten Rahmenbedingungen bei 40 000 bis 60 000 Euro, die mögliche Einsparung liegt bei ca. 35 000 Euro. Damit liegt die Amortisationszeit bei 1 bis 2 Jahren.



## 5.2 Druckluftaufbereitung

### 5.2.1 Einfluss der Druckluftqualität

Die korrekte Auslegung und Auswahl der Aufbereitungskomponenten wird häufig vernachlässigt, was dazu führt, dass gerade hier ein enormes Einsparpotential ungenutzt bleibt. Entscheidend hierfür ist die erforderliche Druckluftqualität.

Die Druckluftqualität wird nach ISO 8573-1:2010 in neun Qualitätsklassen eingeteilt. Eine niedrigere Qualitätsziffer bedeutet hierbei jeweils eine höhere Qualität. Es werden drei Arten von Verunreinigungen unterschieden: Partikel, Feuchtigkeit und Ölgehalt. Der maximal zulässige Grad der Verunreinigung für die einzelnen Qualitätsklassen ist in der unteren Tabelle dargestellt.

Die Gewährleistung der Druckluftqualität ist wichtig, da Verunreinigungen der Luft in der Anwendung die Funktion der pneumatischen Komponenten beeinflussen oder sogar zu dauerhaften Beschädigungen führen können. Die Aufbereitung der Druckluft erfolgt in den meisten Anlagen an zwei unterschiedlichen Stellen. Die zentrale Aufbereitung geschieht in der Nähe der Kompressorstation, bevor die Druckluft in das Verteilungsnetz

geleitet wird. Im Gegensatz dazu erfolgt die dezentrale Aufbereitung direkt vor der Anwendung in sogenannten Wartungsgeräten, um die jeweils von den Komponenten benötigte Luftqualität zu gewährleisten.

Zur Beseitigung von Feststoff-Verunreinigungen werden geeignete Filteranlagen eingesetzt. Kältetrockner oder Membrantrockner entziehen der Druckluft Wasser und senken so den Taupunkt. Damit kann sichergestellt werden, dass sich bei schnellen Strömungen und sinkenden Temperaturen in den Komponenten kein Wasserdampf abschlägt und die Oberflächen beschädigt werden.

Filter, Trockner und Druckregler stellen in der pneumatischen Anlage einen Strömungswiderstand dar. Sie erzeugen folglich beim Durchströmen einen Druckabfall, der insbesondere dann sehr hoch sein kann, wenn Filter nicht regelmäßig gereinigt werden. Ein Druckverlust wirkt sich stets negativ auf die Energiebilanz des Druckluftsystems aus und sollte daher nach Möglichkeit vermieden werden. Deswegen gilt der Grundsatz „Filtern nur so viel wie nötig“.

Klasse	Feststoffpartikel			Feuchtigkeit		Öl	
	Max. Partikelanzahl pro m <sup>3</sup>			Menge	DTP *)	Menge	
	0,1-0,5 µm	0,5-1,0 µm	1,0-5,0 µm	[mg/m <sup>3</sup> ]	[°C]	[g/m <sup>3</sup> ]	[mg/m <sup>3</sup> ]
1	<20 000	<400	<10	-	-70	-	0,01
2	<400 000	<6 000	<100	-	-40	-	0,1
3	-	-	<1 000	-	-20	-	1,0
4	-	-	<10 000	-	+3	-	5,0
5	-	-	<100 000	-	+7	-	-
6	-	-	-	5,0	+10	-	-
7	-	-	-	10,0	-	0,5	-
8	-	-	-	-	-	5,0	-
9	-	-	-	-	-	10,0	-

Druckluftqualitätsklassen nach ISO 8573-1:2010

\*) Drucktaupunkt

## 5.3 Druckluftverteilung

Ein Rohrleitungsnetz besteht aus einzelnen Abschnitten. Durch eine ideale Auslegung jedes einzelnen Leitungsbereichs kann die Verbindung zwischen Kompressor und den Verbrauchern optimal realisiert werden.

Normalerweise erfolgt die Luftverteilung in einem geschweißten oder geklemmten Leitungsnetz aus Edelstahl, Kunststoff, Kupfer oder Aluminium. Da im Gegensatz zur Druckluftanwendung im Netz nur wenige Verbindungselemente vorhanden sind, weist das Verteilungsnetz meist nur geringe Leckagen auf.

Bestimmte Teile des Netzes sollten absperrbar sein, beispielsweise durch strategisch günstig platzierte Ventile. So lassen sich Wartungsarbeiten einfach durchführen oder auch bei unterschiedlichem Schichtbetrieb der Leckageverlust in momentan ungenutzten Anlagenteilen minimieren.

Weiter ist zu überlegen, ob und an welchen Stellen eines Druckluftnetzes Druck- und Durchflusssensoren vorgesehen werden können, um ein Monitoring des Netzes und der Leistungsflüsse durchführen zu können.

### 5.3.1 Netzstruktur

Druckluftnetze können sternförmige, ringförmige und busartige Strukturen aufweisen. Je nach Anwendung und damit verbundenem Verbrauchsprofil sind unterschiedliche Strukturen sinnvoll. In allen Fällen wird zwischen drei Leitungsbereichen unterschieden:

Die **Hauptleitung** verbindet die Kompressorstation mit der Druckluftaufbereitung und dem Druckluftbehälter. An die Hauptleitung werden die Verteilerleitungen angeschlossen. Sie ist so zu dimensionieren, dass sie die gesamte Liefermenge der Kompressorstation bei minimalem Druckabfall weiterleiten kann. Der Druckabfall  $\Delta p$  in der Hauptleitung sollte 0,04 bar nicht überschreiten.

Die **Verteilerleitungen** werden durch den gesamten Betrieb verlegt und bringen die Druckluft in die Nähe der Verbraucher. Grundsätzlich sind zwei verschiedene Topologien denkbar – die Verwendung einer Ringleitung oder eines Netzes mit

Stichleitungen. Werden vorzugsweise Stichleitungen verwendet, so hat dies zwar den Vorteil, dass relativ wenig Material benötigt wird, allerdings ergibt sich der Nachteil, dass sie größer als Ringleitungen dimensioniert werden müssen, um keinen zu großen Druckabfall zu verursachen. Zusätzlich ist die Betriebssicherheit eher gering, da bei Ausfall eines Leitungsbereichs keine alternativen Versorgungswege zur Verfügung stehen.

Wird statt einem Netz mit Stichleitungen eine Ringleitungsstruktur verwendet, lässt sich die Wirtschaftlichkeit und die Betriebssicherheit des Rohrleitungsnetzes erhöhen. Es ist möglich, einzelne Abschnitte des Rohrleitungsnetzes abzusperrern, ohne dabei die Druckluftversorgung anderer Bereiche zu unterbrechen. Dadurch ist die Druckluftversorgung der meisten Verbraucher auch bei Wartungs-, Reparatur- und Erweiterungsarbeiten immer gewährleistet. Ein zusätzlicher Vorteil besteht darin, dass in einem Verteilungsring die Druckluft meist einen kürzeren Weg zurücklegen muss als bei Stichleitungen. Das bedingt einen geringeren Druckabfall  $\Delta p$ .

Die **Anschlussleitungen** gehen von den Verteilerleitungen ab. Sie versorgen die Druckluftverbraucher mit Druckluft. Da die Verbraucher mit unterschiedlichen Drücken betrieben werden, ist im Normalfall eine Wartungseinheit mit Druckregler vor dem Verbraucher zu installieren. Mit Hilfe des Druckreglers wird der Netzdruck auf den Arbeitsdruck des Verbrauchers reduziert. Wartungseinheiten, bestehend aus Filter, Abscheider, Regler und Öler können stellenweise bei ausreichend aufbereiteter Druckluft entfallen.

Im industriellen Bereich wird für Anschlussleitungen die Rohrgröße DN 25 (1“) empfohlen. Diese Rohrgröße hat gegenüber kleineren Abmessungen kaum Kostennachteile und gewährleistet fast immer eine sichere Druckluftversorgung. Verbraucher mit einem Druckluftbedarf bis zu 1 800 NI/min können bei einer Leitungslänge bis 10 m ohne nennenswerte Druckverluste versorgt werden.

Bei der Neuplanung eines Druckluftnetzes ist darauf zu achten, dass alle Leitungsbereiche aufeinander abgestimmt sind, sodass an keiner Stelle Druck- und Energieverluste auftreten.

### 5.3.2 Der Rohrleitungswiderstand

Für strömende Druckluft ist jede luftführende Rohrleitung ein Widerstand. Er entsteht durch innere Reibung, die bei der Strömung aller flüssigen und gasförmigen Medien auftritt, sowohl zwischen den Molekülen als auch zwischen den Molekülen des strömenden Mediums und der Wand der Rohrleitung. Dies ist der Grund für den Druckabfall in Rohrleitungen, der wiederum zu Verlust von pneumatisch nutzbarer Energie führt. Es muss daher dafür gesorgt werden, dass sämtliche Leitungen ausreichend dimensioniert sind, sodass auch bei großem Durchsatz der Druckabfall auf einem minimalen Niveau gehalten wird.

#### Zahlen und Daten

Die Dimensionierung des Rohrinneindurchmessers  $d_i$  kann mit Hilfe der folgenden Näherungsformel erfolgen. Dabei wird der maximale Betriebsdruck  $p_{max}$  (d.h. der Kompressor-Ausschaltdruck), der höchste Volumenstrom  $Q_n$  (d.h. die benötigte Liefermenge in  $Nm^3/s$ ) und die strömungstechnische Rohrlänge  $L$  (in m) zugrunde gelegt. Der angestrebte Druckverlust wird durch  $\Delta p$  festgelegt. Der Innendurchmesser  $d_i$  ergibt sich ebenfalls in Metern.

$$d_i = \sqrt[5]{\frac{1,6 \cdot 10^3 \cdot Q_n^{1,85} \cdot L}{10^{10} \cdot \Delta p \cdot p_{max}}}$$

Soll zu einem gegebenen Innendurchmesser der Druckabfall bestimmt werden, so kann dies ebenfalls über die angegebene Näherungsformel erfolgen.

$$\Delta p = \frac{1,6 \cdot 10^3 \cdot Q_n^{1,85} \cdot L}{10^{10} \cdot d_i^5 \cdot p_{max}}$$

Es fällt auf, dass der Druckabfall eine lineare Funktion der Rohrleitungslänge ist, jedoch in 5ter Potenz vom Innendurchmesser abhängt. Wird der Durchmesser halbiert, so steigt demnach der Druckabfall um den Faktor 32. Dies zeigt, wie wichtig eine korrekte Dimensionierung der Rohrquerschnitte ist.

Rohrleitungen bestehen nicht nur aus geraden Rohrstücken, deren Strömungswiderstand schnell ermittelt werden kann. Eingebaute Rohrkrümmer, Ventile und andere Armaturen erhöhen den Strömungswiderstand in den Rohrleitungen erheblich. Aus diesem Grund muss für Armaturen und Rohrkrümmer die strömungstechnische Rohrlänge  $L$  ermittelt werden. Zur Vereinfachung werden die Strömungswiderstände verschiedener Armaturen und Rohrkrümmer in die gleichwertige Rohrlängen umgerechnet. In der folgenden Tabelle ist die gleichwertige Rohrlänge (in m) einiger Armaturen in Abhängigkeit von der Rohrnennweite aufgeführt:

	DN 25	DN 40	DN 80
Absperrventil	8,0	10	25
Membranventil	1,2	2,0	4,5
Absperrschieber	0,3	0,5	1,0
Kniebogen	1,5	2,5	5,0
90° Bogen	0,3	0,5	1,0

Diese Werte müssen der realen Rohrlänge zugeschlagen werden, um die strömungstechnische Rohrleitungslänge  $L$  zu erhalten. In der Regel liegen bei Planungsbeginn eines Rohrleitungsnetzes noch keine kompletten Angaben über Armaturen und Rohrkrümmer vor. Aus diesem Grund berechnet man die strömungstechnische Rohrlänge  $L$  oft pauschal durch Multiplizieren der geraden Rohrlänge mit 1,6.

Der Druckabfall  $\Delta p$  in einer Rohrleitung mit einem Höchstdruck von 8bar (6bar Netz) sollte einen bestimmten Gesamtdruckverlust bis zum Verbraucher nicht überschreiten. Für das gesamte Rohrleitungsnetz sollte  $\Delta p$  weniger als 0,1bar betragen, für die einzelnen Abschnitte des Rohrleitungsnetzes werden folgende Werte empfohlen:

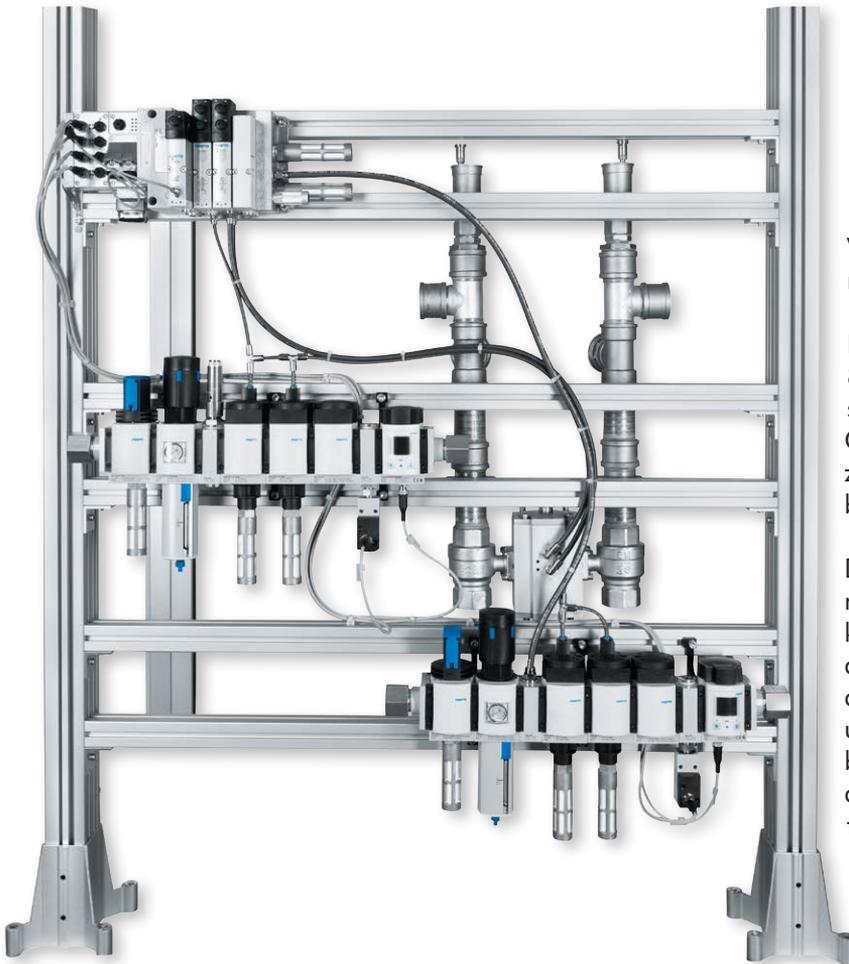
Hauptleitung	$\Delta p < 0,04\text{bar}$
Verteilerleitung	$\Delta p < 0,04\text{bar}$
Anschlussleitung	$\Delta p < 0,03\text{bar}$

Durch Verwendung von geeigneter Planungssoftware kann sichergestellt werden, dass in keinem Rohrabschnitt der Druckverlust zu hoch ausfällt.

## 5.4 Pneumatische Anwendung

Die Anwendung umfasst den letzten Bereich der Druckluftwirkungskette. Sie beginnt mit einer lokalen Luftaufbereitung (dezentrale Filterung, Druckregelung, usw.), die meist an einem Einspeisepunkt liegt. Es folgt eine lokale Druckluftverteilung (meist über Schlauchleitungen), Ventile, und diverse pneumatische Antriebe oder anderen Komponenten in der Applikation.

Der Schwerpunkt der Untersuchungen liegt auf der pneumatischen Antriebs- und Handhabungstechnik. Weitere Druckluftanwendungen wie z.B. Druckluftpistolen, Prozessluft (wie Sperrluft) oder auch Druckluftwerkzeuge, die ebenfalls einen gewissen Anteil der Druckluft nutzen, werden nicht näher betrachtet. Da sie aber dennoch für einen wesentlichen Teil des Druckluftverbrauchs verantwortlich sein können, sollten auch sie stets in Effizienzüberlegungen mit einbezogen werden.



### 5.4.1 Einspeisepunkte

An den Einspeisepunkten, manchmal auch Haleninstallationsplatte und Roboterinstallationsplatte genannt, wird die Druckluft der Produktionsanlage zugeführt. Die Einspeisepunkte stellen somit die Schnittstelle zwischen der Druckluftverteilung und der Anlage dar.

Über Filter und Druckregler werden die in der Anlage gewünschte Luftqualität und der benötigte Druck vorgewählt. Da jede der verwendeten Komponenten einen Strömungswiderstand darstellt und der Druckabfall einen Energieverlust verursacht, muss die Dimensionierung auf die Anforderungen der Applikation abgestimmt sein.

### I. Korrekte Dimensionierung

Die im Kompressor erzeugte Druckluft wurde bereits in einer zentralen Filteranlage gefiltert. Aufgrund von Beschädigungen an den Leitungen und Rohren im Verteilungsnetz, kann an der Innenseite der Rohrwände Korrosion und Abrieb entstehen, der die Druckluft erneut verunreinigt. Daher wird die Verwendung eines zusätzlichen Filters nahe am Verbraucher empfohlen.

Die Druckluftqualität wird nach ISO 8573-1:2010 in neun Qualitätsklassen eingeteilt. Der maximal zulässige Grad der Verunreinigung für die einzelnen Qualitätsklassen ist in der Tabelle auf Seite 44 dargestellt.

Die Druckluftqualität wird als Kombination aus den drei Ziffern für Partikelanzahl, Feuchtigkeit und Ölgehalt angegeben. Für verschiedene Anwendungsbereiche werden in der Regel unterschiedliche Druckluftqualitäten benötigt. In pneumatischen Anwendungen ist meist eine mittlere Qualitätsklasse ausreichend, beispielsweise (7:4:4). Servopneumatische Komponenten sind empfindlicher und definieren daher einen höheren Anspruch an die zulässige Verun-

reinigung an Partikeln (6:4:4). Falls im Kompressor Bioöle eingesetzt werden, also Öle, die auf Basis synthetischer Ester oder nativer Ester (z.B. Rapsölmethylester) aufgebaut sind, sollte der Restölgehalt von  $0,1 \text{ mg/m}^3$  nicht überschritten werden. Dies entspricht der Qualitätsklasse 2. Die Anforderungen der pneumatischen Komponenten ergeben sich dann zu (7:4:2) bzw. (6:4:2).

Die Luftqualität sollte nur so gut wie unbedingt nötig sein. Eine Erhöhung der Druckluftklasse führt aufgrund des Druckabfalls am Strömungswiderstand der Filterkomponenten zu höheren Energieverlusten. Sollte eine Aufbereitung an der Wartungseinheit am Verbraucherort erfolgen, so müssen nicht zwingend alle pneumatischen Komponenten mit qualitativ hochwertig aufbereiteter Luft betrieben werden. Komponenten, für die eine niedrigere Luftqualität ausreichend ist (z.B. Blasluft), können mit Luft versorgt werden, die bereits vor der Aufbereitung abgezweigt wird.

Zusätzlich ist darauf zu achten, dass insbesondere Fein- und Feinfilterkomponenten in regelmäßigen Abständen gewartet und gereinigt werden. Verschmutzte Filter können einen Druckabfall im Bereich von 0,5 bar verursachen und einen wesentlichen Anteil zu den vermeidbaren Druckverlusten beitragen.

So müssen z.B. Aktivkohlefilter nach ca. 1 000 Betriebsstunden ausgewechselt werden. In modernen Filterkomponenten ist ein Monitoring des Druckabfalls über eine Farbskala oder über das Signal zweier Drucksensoren möglich, sodass bei Bedarf die Wartung eingeleitet werden kann.

### Automobilindustrie

In der Automobilindustrie ist eine Druckluftqualität von (7:4:4) zum Betrieb von Spannern, Stiftziehzylindern und herkömmlichen Schweißzangen ausreichend. Servopneumatische Schweißzangen müssen mit einer Druckluftqualität von (6:4:4) betrieben werden.

## II. Druckreduzierung am Druckregler



Der Druck im Verteilungsnetz liegt meist höher als der benötigte Druck in der Anwendung, da Druckschwankungen und Versorgungsengpässe sich in der Anwendung nicht negativ auswirken sollen. Zur Reduzierung des Drucks wird daher am Einspeisepunkt ein Druckregler eingesetzt, der das Versorgungsdruckniveau herkömmlicher pneumatischer Komponenten beispielsweise auf 6 bar begrenzt.

Bei bestehenden Anlagen sind die pneumatischen Antriebe häufig überdimensioniert und verbrauchen mehr Energie als für ihre Aufgabe notwendig ist. In diesem Fall kann das Druckniveau ohne Funktionsbeeinträchtigung gesenkt werden. Anschließend wird von den verwendeten Komponenten weniger Druckluft verbraucht, da die Luftmasse zur Befüllung eines bestimmten Volumens proportional ist zum Versorgungsdruck. Es können demnach je nach Druckniveau pro 1 bar Druckabsenkung ca. 10% Energieeinsparung erzielt werden.

Ein positiver Nebeneffekt der Druckreduzierung besteht darin, dass bei niedrigerem Versorgungsdruck die Leckageverluste ebenfalls abnehmen, denn das Druckgefälle an den Leckagestellen sinkt wodurch die treibende Kraft des Leckagestroms schwächer wird.

Es ist jedoch darauf zu achten, dass bei einer Anlage mit energieeffizient ausgelegten Antrieben eine generelle Druckabsenkung zu Leistungseinbußen führt und somit Störungen im Betrieb verursacht werden können. Der minimal erforderliche Druck muss daher an jeder Maschine individuell und vorsichtig erprobt werden.

Einige pneumatische Zylinder sind mit einer pneumatischen Pufferung versehen, die vor Erreichen der Endlage die Geschwindigkeit der bewegten Masse derart abbremst, dass Beschädigungen am

Zylinder vermieden werden. Dies geschieht durch ein Druckpolster, das sich kurz vor Erreichen der Endlage in der Entlüftungskammer aufbaut und eine Bremskraft erzeugt. Bei stark reduziertem Systemdruck besteht die Gefahr, dass diese Pufferung nicht mehr ordnungsgemäß funktioniert. Es sollte also zunächst geprüft werden, in welchem Druckbereich die pneumatischen Antriebe betrieben werden dürfen, da ansonsten mit Beschädigungen der Komponenten gerechnet werden muss.

### Automobilindustrie

Je nach gewünschter Dynamik und Last der einzelnen pneumatischen Komponenten in einer Produktionsanlage kann der Versorgungsdruck häufig von 6 bar auf 5 bar reduziert werden, ohne dass die Funktion beeinträchtigt wird. In einigen Anlagen wird der Druck bereits erfolgreich auf unter 5 bar abgesenkt.

### III. Abschaltung der Druckluftversorgung

Während Stillstandszeiten, beispielsweise an Wochenenden oder in der Nacht, erfolgt häufig keine automatische Abschaltung der Druckluftversorgung. Weist die Anlage einen gewissen Ruheverbrauch auf, erzeugt dieser über einen langen Zeitraum einen hohen Energieverlust, meist aufgrund von Leckagen, die je nach Qualität der Installation bis zu 35% des Gesamtverbrauchs einer pneumatischen Anlage ausmachen können. Um diese Energieverluste zu verhindern, kann am Einspeisepunkt der Druckluft ein Absperrventil installiert werden, welches die Luftversorgung der Anlage in Stillstandszeiten unterbricht.

Die zunehmende Integration von intelligenten Funktionen und entsprechender Sensorik in Komponenten ermöglicht es, solche Abschaltfunktionen relativ einfach zu realisieren. Sind Druck- und Durchflusssensoren vorhanden, kann ein eigenständiges Monitoring des Anlagenverhaltens erfolgen.

Der Stand-by-Zustand einer Anlage lässt sich dann aufgrund des Verbrauchsprofils erkennen. Im Idealfall wird die Druckluftzufuhr unterbrochen, um den unnötigen Luftverbrauch zu unterbinden. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, auch während des laufenden Betriebs das Verhalten der Anlage zu überwachen. Wird während der Produktionsphase ein ungewöhnlich hoher Luftverbrauch erkannt, so kann eine Servicemeldung generiert werden, die eine Unregelmäßigkeit in der Anlage aufzeigt und bei Bedarf eine Anlagenwartung einleitet.

Bei der Abschaltung der Luftversorgung im Stand-by muss jedoch gewährleistet sein, dass sämtliche pneumatische Komponenten problemlos druckfrei geschaltet werden können und sich ohne Druckluftversorgung keine unkontrollierbaren Bewegungen ergeben. Zusätzlich muss eine kontrollierte Einschalt-Prozedur definiert sein, sodass die Anlage aus dem drucklosen Ruhezustand schnell und zuverlässig wieder in den Produktionsbetrieb überführt werden kann.

### Automobilindustrie

Im Rahmen des durchgeführten Projekts wurden mehrere Produktionsanlagen auf ihre Ruheverbräuche hin untersucht. Es zeigte sich, dass je nach Alter der Anlage und je nach Anlagenstruktur ein unterschiedlich hoher Ruheverbrauch gemessen werden kann. Dieser kann durch Leckagen, aber auch durch nichtabgeschaltete Verbraucher verursacht werden, wie z.B. Blasluftdüsen. Im Durchschnitt liegt der Ruheluftverbrauch bei ca. 25% des Gesamtverbrauchs. In einer „mittelgroßen Anlage“ mit einem Luftverbrauch von ca. 100 Nm<sup>3</sup>/h entfallen somit 25 Nm<sup>3</sup>/h auf den Ruheverbrauch.

Durch gezieltes Abschalten der Luftversorgung bei Anlagenstillstand könnten diese Verbräuche zumindest in Stillstandszeiten vermieden werden. Ausgehend von Dreischichtbetrieb und Stillstand am Wochenende ergeben sich 2 400 Stillstands-Stunden im Jahr. Würde in diesen Zeiten der Luftverbrauch der Anlage komplett unterbunden werden, ließen sich finanzielle Einsparungen von ca. 1 000 Euro pro Jahr und Anlage erzielen.

### 5.4.2 Druckluftverteilung

Innerhalb der Anlage wird die Druckluft meist über Schlauchleitungen und Verbindungsstücke an die einzelnen pneumatischen Komponenten verteilt. Je nach Komplexität der Anwendung, können eine Vielzahl von Schraub- und Steckverbindungen zum Einsatz kommen.

#### I. Vermeidung von Leckagen

Leckagen sind praktisch in jeder Anlage vorhanden, eine perfekt abgedichtete Anlage ist nicht realisierbar. Ein einigermaßen gut gewartetes Druckluftsystem weist Leckageanteile zwischen 8% und 10% des Gesamtluftverbrauchs auf. Die Praxis zeigt, dass in durchschnittlichen Systemen bis zu 30% der Druckluft durch Leckagen verloren gehen können. Daher bietet die Beseitigung von Leckagen einen wichtigen Ansatzpunkt, um die Energieeffizienz eines Druckluftsystems zu steigern.

Jedes Verbindungselement stellt eine potentielle Leckagestelle dar, an der Druckluft ungenutzt in die Umgebung entweichen kann. Große Leckagen lassen sich meist leicht erkennen und beseitigen. Jedoch für die Vielzahl an kleinen Leckagen, die insgesamt für die größten Verluste verantwortlich sind, werden Experten mit speziellen Geräten benötigt, die die Leckagen orten und Maßnahmen zu deren Beseitigung definieren.

Verluste durch Leckagen finden sich häufig in älteren Anlagen mit hohem Verschleiß an den Komponenten. Die Funktion der pneumatischen Komponenten ist meistens dennoch gewährleistet, daher besteht oftmals keine direkte Veranlassung, eine gezielte Beseitigung von Leckagestellen einzuleiten. Um die Energieeffizienz der Anlage jedoch stets auf einem zufriedenstellenden Niveau zu erhalten, darf nicht erst bei Funktionsausfall nach Leckagen gesucht werden. Durch die Installation eines Condition Monitoring Systems kann der Luftverbrauch kontinuierlich überwacht werden. Veränderungen des Verbrauchs aufgrund zunehmender Leckage können so frühzeitig erkannt und behoben werden. Zusätzlich sind weitere Funktionen möglich, die weit über die Leckageerkennung hinausgehen, z.B. Anlagendiagnose, schnelle Fehlerortung und sogar Prozessüberwachung.

Um Leckagen in pneumatischen Anlagen möglichst gezielt zu beseitigen, sind diverse Maßnahmen denkbar:

#### In der Planungsphase

Häufige Quelle für Leckagen sind mangelhaft angebrachte Verbindungsstücke (Verschraubungen oder Steckverbindungen). Es sollte darauf geachtet werden, die Anzahl der Verbindungsstücke als mögliche Fehlerquelle möglichst gering zu halten.



#### Während des Betriebs

Die gezielte Abschaltung der Luftversorgung in Stillstandsphasen eliminiert zumindest zu diesen Zeiten die Leckageverluste (schnelles und sicheres Wiederaufstarten muss gewährleistet sein).



#### Service & Wartung

Die Maßnahmen zur gezielten Leckageminimierung und zum Erhalt eines niedrigen Leckageniveaus können entweder von geschultem Personal durchgeführt oder als Dienstleistung von externen Serviceanbietern zugekauft werden. Zunächst sollte dabei das mögliche Einsparpotential ermittelt werden, indem der durch Leckagen verursachte Luftverbrauch gemessen wird. Anschließend folgt die Identifikation und gezielte Beseitigung von Leckagestellen und schließlich sollte durch eine abschließende Messung die Erfolgskontrolle erfolgen. Danach kann durch Installation eines Monitoringsystems und regelmäßige Kontrollen die Erhaltung der Anlagenqualität gewährleistet werden.

Die konsequente Ortung und Beseitigung von Leckagen bietet ein hohes Optimierungspotential, insbesondere in älteren Anlagen, in Systemen mit vielen Steck- und Schraubverbindungen und bei Verwendung hoher Systemdrücke.



## Zahlen und Daten

Da an Leckagestellen in den meisten Fällen ein hohes Druckgefälle vorhanden ist, wird davon ausgegangen, dass die Strömungsverhältnisse über die Drosselgleichung bei überkritischer Strömung abgebildet werden können. Der Leckagevolumenstrom ergibt sich daher aus:

$$Q_n = p_1 \cdot C \cdot \sqrt{\frac{T_n}{T_1}}$$

- Q<sub>n</sub> - Leckagestrom [NI/s]
- p<sub>1</sub> - Versorgungsdruck [bar abs.]
- C - Leitwert der Leckagestelle [l/(s bar)]
- T<sub>n</sub> - Normtemperatur [K]
- T<sub>1</sub> - Versorgungstemperatur [K]

In Abhängigkeit des Versorgungsdrucks kann der **Leckagevolumenstrom in [NI/min]** aus folgender Tabelle entnommen werden.

p Vers. [bar rel.]	Leckagedurchmesser [mm]				
	0,50	1,00	1,50	2,00	3,00
4	11,7	46,8	105	187	421
6	16,4	65,5	147	262	590
8	21,1	84,3	189	337	758
10	25,7	103	232	412	927
12	30,4	122	274	487	1095

Der Leckagevolumenstrom ist damit proportional zum Absolutwert des Versorgungsdrucks, d.h. insbesondere in Anlagen mit hohem Druck haben Leckagen einen besonders großen Einfluss.

Der Leitwert C ergibt sich mit der Leckagefläche A in [mm<sup>2</sup>] empirisch aus:

$$C = 0,19864 \cdot A \cdot \left[ \frac{l}{s \cdot \text{bar} \cdot \text{mm}^2} \right]$$

Der Leckagevolumenstrom ist proportional zur Leckagefläche. Der wirksame Durchmesser der Leckage geht quadratisch in den Leckagevolumenstrom ein.

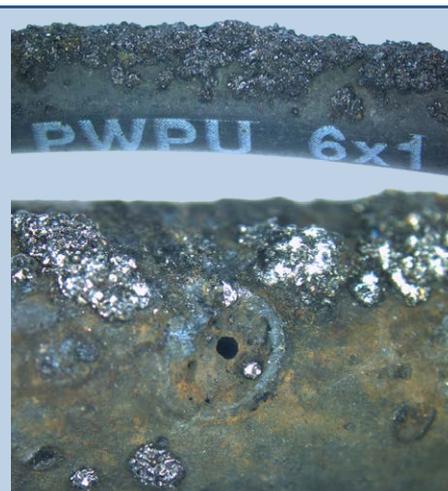
Die damit verbundenen **Kosten pro Jahr in [€]** sind in der folgenden Tabelle aufgeführt.

p Vers. [bar rel.]	Leckagedurchmesser [mm]				
	0,50	1,00	1,50	2,00	3,00
4	70,-	278,-	626,-	1 113	2505
6	110,-	439,-	988,-	1 757	3953
8	157,-	628,-	1 414	2 513	5 656
10	213,-	851,-	1 915	3 404	7 660
12	276,-	1 104	2 484	4 416	9 936

## Automobilindustrie

In der Automobilproduktion werden häufig Schweißzangen eingesetzt, die während des Schweißvorgangs einen starken Funkenflug verursachen können. Obwohl geeignete Pneumatikschläuche verwendet werden, verursachen Spritzer von flüssigem Metall oft Beschädigungen, die lange unentdeckt bleiben können.

In der Abbildung rechts ist beispielhaft ein Pneumatikschlauch mit einer typischen Beschädigung abgebildet. Das Loch erzeugt bei 6 bar Versorgungsdruck einen permanenten Leckagevolumenstrom von ca. 20 NI/min. Das ist zwar relativ wenig, über ein Jahr ergibt sich jedoch ein stattlicher Luftverbrauch von ca. 10000 Nm<sup>3</sup> und Kosten von 150 Euro.



## II. Reduziertes Totvolumen

Insbesondere in größeren Anlagen, in denen Ventilinseln verwendet werden, liegen häufig große Distanzen zwischen Ventil und Zylinder. Die hierfür verwendeten Verbindungsschläuche stellen bei jedem Schaltvorgang ein Totvolumen dar, das befüllt und wieder geleert wird. Die verwendete Druckluft geht ungenutzt verloren. Daher ist es für die Optimierung der Energieeffizienz zwingend notwendig, Totvolumina zwischen Zylinder und Ventil möglichst klein zu halten. Das Totvolumen zwischen Ventil und Zylinder kann reduziert werden durch:

### Verwendung dünnerer Schläuche

Ein reduzierter Schlauchdurchmesser reduziert das Totvolumen und damit die Verluste. Allerdings ist zu beachten, dass bei geringerem Schlauchdurchmesser der Strömungswiderstand steigt. Wie auf Seite 46 (grüner Kasten) beschrieben, hängt der Strömungswiderstand von der 5ten Potenz des Leitungsdurchmessers ab. Durch einen zu klein gewählten Schlauchdurchmesser kann die Dynamik der nachgeschalteten Applikation leiden. Der Durchmesser muss daher mit Vorsicht reduziert werden.

### Verwendung kürzerer Schläuche

Gemäß dem Motto „Ventil möglichst nahe zum Zylinder“ sollte das Ventil im besten Fall direkt am Zylinder angebracht werden, wie in der unteren Abbildung dargestellt. Das Totvolumen wird dadurch sehr gering. Allerdings verursacht auch diese Maßnahme einen Nachteil, denn der Wartungskomfort sinkt. Es ist nicht mehr möglich, alle verwendeten Ventile zentral zugänglich an einer Stelle in der Anlage anzuordnen.

Die Reduzierung des Totvolumens zwischen Ventilen und Zylindern bietet insbesondere bei kurzen Zylindern, langen Schlauchleitungen und hohen Taktraten ein erhebliches Einsparpotential.



Ventil direkt am Antrieb montiert

### Zahlen und Daten

Der Luftverbrauch einer pneumatischen Komponente in [NI] berechnet sich für einen Doppelhub aus:

Pneumatikzylinder:

$$V_{N\_Zyl} = \frac{p_{abs}}{p_{atm}} \cdot \frac{\pi}{4} (2d_{Zyl}^2 - d_{St}^2) \cdot l_{Zyl}$$

Schlauchvolumen:

$$V_{N\_Schl} = \frac{p_{rel}}{p_{atm}} \cdot \frac{\pi}{4} (2d_{Schl}^2) \cdot l_{Schl}$$

$V_{N\_Zyl}$	- Luftverbrauch Zylinder
$p_{abs}$	- Absolutdruck
$p_{rel}$	- Relativdruck
$p_{atm}$	- Atmosphärendruck
$d_{Zyl}$	- Zylinderdurchmesser
$d_{St}$	- Stangendurchmesser
$l_{Zyl}$	- Zylinderlänge
$d_{Schl}$	- Schlauchdurchmesser
$l_{Schl}$	- Schlauchlänge

Dabei ist zu beachten, dass der Normverbrauch eines Schlauchvolumens systembedingt aus dem Verhältnis von Relativdruck zu Atmosphärendruck berechnet wird. Im Pneumatikzylinder ist hingegen das Verhältnis von Absolutdruck und Atmosphärendruck relevant. Dies liegt daran, dass im Schlauch nach der Entlüftung noch eine gewisse Luftmenge verbleibt, in der Zylinderkammer hingegen nicht, da diese ihr Volumen auf ein Minimum reduziert.

Für ein geringes Totvolumen sollte das Schlauchvolumen im Verhältnis zum Zylindervolumen möglichst gering sein.

### Automobilindustrie

Wird beispielsweise ein Zylinder mit einem Durchmesser von 32 mm und einer Länge von 100 mm bei 6 bar Versorgungsdruck ein- und ausgefahren und befindet sich zwischen Ventil und Zylinder eine Strecke von 4 Metern (Schlauchinnendurchmesser 8,4 mm), so benötigt der Zylinder für einen Doppelhub ein Luftvolumen von 1,07 NI. Das Befüllen der Schlauchleitung benötigt für einen Doppelhub 2,66 NI.

Insgesamt wird für einen Doppelhub folglich eine Luftmenge von 3,73 NI benötigt. Aber nur knapp 30% der aufgewendeten Luft wird für die Zylinderbewegung verwendet. Der Rest geht im Totvolumen verloren. Bei einem Doppelhub pro 5 Sekunden verursacht das Totvolumen einen Luftverbrauch von 32 NI/min und ca. 170 Euro Druckluftkosten im Jahr (bei Dreischichtbetrieb).

Zur Analyse der Totvolumenverhältnisse im Karosseriebau wurden diverse Produktionsanlagen herangezogen. Das durchschnittliche Zylindervolumen in den untersuchten Anlagenbereich beträgt ca. 0,25 NI, das durchschnittliche Schlauchvolumen 0,1 NI. Der Verbrauchsanteil des Totvolumens liegt demnach bei ca. 30%.

Ursache für ein großes Totvolumen ist meist die verwendete Anlagentopologie. Sind die Ventile zentral außerhalb der Anlage angebracht und über relativ lange Schläuche mit den Pneumatikzylindern verbunden, so ist zwar eine komfortable Wartbarkeit gewährleistet, es müssen jedoch große Distanzen zwischen Ventil und Zylinder überwunden werden. Durch Anpassungen der Topologie lässt sich der Verbrauchsanteil des Totvolumens auf ca. 10% reduzieren. Es ist also möglich, ca. 20% des Luftverbrauchs der entsprechenden pneumatischen Komponenten einzusparen.



### 5.4.3 Ventilinseln

Werden in einer Anwendung mehrere Ventile benötigt, so bietet sich die Verwendung von Ventilinseln an, bei denen die Ventile an einem Ort auf einer gemeinsamen Platte zusammengefasst werden. Dies sorgt für eine platzsparende Installation sowie eine komfortable Wartbarkeit der Anlage, da alle Ventile zentral an einem Ort zugänglich gemacht werden können.

Die Luftversorgung erfolgt über eine gemeinsame Zuluflleitung, was den Installationsaufwand an Schlauchleitungen auf ein Minimum reduziert. Auch die Abluft aller Ventile wird zu einer Abluftleitung kombiniert und über einen gemeinsamen Schalldämpfer in die Umgebung entlassen. Die elektrische Ansteuerung erfolgt über einen gemeinsamen Strang oder über ein Bus-Signal.

Einige Ventilinseln bieten zusätzliche Funktionen an, über die ein energieeffizienter Betrieb der pneumatischen Anwendung unterstützt werden kann, beispielsweise integrierte Druckregler zur bedarfsgerechten Anpassung des Druckniveaus oder die Möglichkeit zur Abschaltung einzelner Anlagenteile in Stillstandszeiten.



Ventilinsel

## I. Druckzonen

Mit Hilfe von Trennplatten bzw. Ventilen mit integrierter Kanaltrennung können bei modular aufgebauten Ventilinseln mehrere Druckzonen realisiert werden. Das Ergebnis ist eine regional begrenzte Druckminderung. Die erzeugte Niederdruck-Luft kann gezielt an den Stellen eingesetzt werden, an denen kein hohes Druckpotential benötigt wird, z.B. für den kraftreduzierten Rückhub eines Pneumatikzylinders. Somit kann für jedes Ventil und für jeden Aktuator der tatsächlich benötigte Betriebsdruck bereit gestellt werden. Dies gewährleistet einen bedarfsgerechten Luftverbrauch, da dieser proportional vom Druck abhängt.

Die untere Abbildung zeigt eine Ventilinsel mit mehreren Ventilen, bei denen der gewünschte Ausgangsdruck manuell eingestellt und über ein Manometer angezeigt werden kann.

### Automobilindustrie

Spannzylinder werden zum Fixieren von Bauteilen eingesetzt. In einer der beiden Bewegungsrichtungen des Antriebs muss daher eine hohe Kraft aufgebracht werden. Ebenso müssen Einpresszylinder in Ausfahrrichtung hohe Kräfte erzeugen. Die herkömmlichen 6 bar Versorgungsdruck werden in beiden Anwendungsfällen nur in eine Bewegungsrichtung benötigt. Der Rückhub kann energiesparend mit geringem Druck erfolgen.

## II. Abschaltung von Anlagenteilen

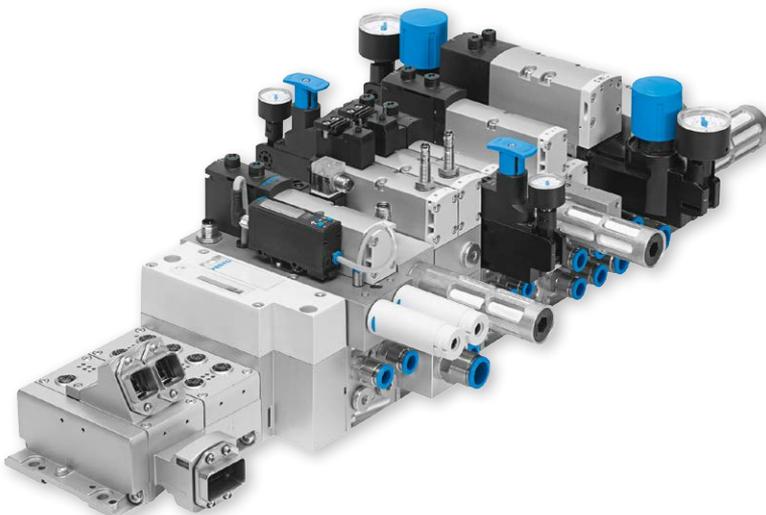
In Ergänzung zu dem auf S.49 erwähnten Energieeffizienzmodul und dem manuellen Abschalten einer gesamten Anlage in Stillstandszeiten, besteht die Möglichkeit, dezentrale Einheiten (z.B. Ventilinseln, Schweißzangen) in Pausenzeiten abzuschalten. Dieser Vorgang kann manuell oder automatisch erfolgen. Hierfür wurden diverse Standards entwickelt. Ein Beispiel ist das PROFlenergy-Protokoll.

Dieser sogenannte PROFlenergy-Standard setzt auf dem Profinet Kommunikationsprotokoll auf und kann die angesprochenen Komponenten flexibel abschalten, bzw. in spezielle Energiespar- oder Standby-Modi versetzen. In einer Gerätebeschreibungdatei (GSDML) wird standardisiert beschrieben, welche Modi die jeweilige Komponente unterstützt und welche Zeit benötigt wird, um den betriebsbereiten Zustand aus dem Standby wieder zu erreichen. Somit kann sowohl für geplante als auch für ungeplante Stillstandszeiten steuerungsseitig flexibel reagiert werden. Je nach Zeitdauer und Funktionsumfang der Komponenten sind tiefergehende Abschaltungen von ganzen Anlagenteilen möglich, wobei sicherheitsrelevante Funktionen entsprechend den Sicherheitsvorschriften behandelt werden. Bei Reaktivierung der Komponenten wird dann eine bestimmte Einschaltreihenfolge eingehalten, sodass eine sichere Wiederaufnahme des Betriebs gewährleistet ist.



### Automobilindustrie

Eine modulare Ventilinsel mit Profinet-Feldbusknoten und PROFlenergy-Standard kann die Start-/Stopbefehle einer Produktionspause auswerten und entsprechend konfiguriert werden, sodass für jeden Ausgang (digital oder analog) und jede Ventilsule die sogenannte „FailSafe“ Stellung eingenommen wird. Dies ist auch bei servopneumatischen Schweißzangen anwendbar, wenn sie im Pausenmodus (d.h. außerhalb des Eingriffsbereiches) sind.



### 5.4.4 Spanner und Stiftziehzyylinder

Der Großteil der herkömmlich betriebenen pneumatischen Antriebe im Karosseriebau wird zur Fixierung der zu bearbeitenden Bleche verwendet. Stiftziehzyylinder dienen hierbei zum exakten Ausrichten des Bauteils, Spannzylinder klemmen das Blech mit hoher Kraft fest, sodass während der Bearbeitung eine ungewollte Bewegung ausgeschlossen werden kann.

Werden herkömmliche Schweißzangen verwendet, die nicht im geregelten Servobetrieb eingesetzt werden, so sind auch diese den herkömmlichen pneumatischen Antrieben zuzurechnen.

Pneumatische Antriebe erzeugen die gewünschte mechanische Bewegung bzw. die geforderte Kraft, in ihnen wird die pneumatische Energie in mechanische Energie umgewandelt, daher entsteht an dieser Stelle der Großteil des Luftverbrauchs. Energiesparmaßnahmen im Bereich der pneumatischen Antriebe bieten somit ein hohes Einsparpotential, denn „Was nicht verbraucht wird muss auch nicht erzeugt und verteilt werden“.

#### I. Korrekte Dimensionierung

Pneumatische Antriebe werden in der Planungsphase häufig überdimensioniert. Die Antriebskraft ist meist um ein Vielfaches größer als es in der Anwendung tatsächlich notwendig wäre. Erfahrungen zeigen, dass durch eine anwendungsbezogene energieeffiziente Auslegung sich durchschnittlich die Hälfte aller pneumatischen Verbraucher um eine Baugröße kleiner auslegen lassen.

Als Gründe für mögliche Überdimensionierung sind folgende Aspekte zu nennen:

- Übertriebene Sicherheitsfaktoren für die Funktionssicherheit
- Keine oder unzureichende Anforderungsdaten vorhanden
- Auslegung aufgrund zulässiger Führungsbelastungen – die Antriebskräfte und der Luftverbrauch sind nicht mehr wählbar
- Einsatz der Antriebe, die momentan auf Lager sind



Wird im Antrieb eine unnötig hohe Antriebskraft zur Verfügung gestellt (der Zylinderdurchmesser wird zu groß gewählt), so ist der Luftverbrauch der Komponente ebenfalls unnötig hoch. Bereitgestellte pneumatische Energie geht ungenutzt verloren.

Während der Planungsphase ist es mit relativ geringem Aufwand möglich, eine pneumatische Anwendung korrekt und damit energieeffizient auszulegen. Das Einsparpotential ist im Vergleich zum Aufwand relativ hoch.

Werden zur Auslegung bewährte Simulationstools verwendet, so sind die Risiken einer reduzierten Betriebssicherheit sehr gering. Zwar sollten weiterhin gewisse Sicherheitsfaktoren berücksichtigt werden, da z.B. über die Zeit die Reibung in einem Antrieb steigen kann und er dennoch zuverlässig betrieben werden muss, mit geeigneten Tools kann jedoch auch dieser Aspekt abgebildet und hinreichend genau berücksichtigt werden.

#### Automobilindustrie

Wird davon ausgegangen, dass 50% der eingesetzten pneumatischen Antriebe um eine Baugröße zu groß ausgelegt werden, so ließe sich durch die Verwendung der nächstkleineren Baugrößen ca. 15% der verwendeten Druckluft einsparen.

In einer typischen Produktionsanlage mit einem Luftverbrauch von 100 Nm<sup>3</sup>/h kann davon ausgegangen werden, dass ca. 50% der Druckluft zum Betrieb pneumatischer Antriebe verwendet wird. Ließen sich von diesen nun durch korrekte Dimensionierung 15% Luftverbrauch einsparen, so ergibt sich eine Einsparung von 7,5 Nm<sup>3</sup>/h. Die damit verbundene Kostenersparnis beläuft sich im Dreischichtbetrieb auf 675 Euro pro Jahr.

### Zahlen und Daten

Das Bewegungsverhalten eines pneumatischen Antriebs ist abhängig von Last, Baulage, Ventilen, Verschlauchung und verwendeten Drossel-Bauteilen. Eine Optimierung des dynamischen Bewegungsverhaltens und eine korrekte Auslegung sind folglich nur mit Simulationstools möglich. Ist das Bewegungsverhalten des Antriebs nicht relevant, spielt also die Dynamik eine untergeordnete Rolle, so kann über Druck und Zylinderdurchmesser die zur Verfügung stehende Kraft  $F_{Zyl}$  berechnet werden. Mit dieser Information lässt sich eine statische Auslegung des Antriebs realisieren:

#### Zylinder bekannt, Lastmasse gesucht:

$$F_{Zyl} = d^2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot p_{rel}$$

Aufgrund von Erfahrungswerten wurde ermittelt, dass bei horizontaler Bewegung die Lastmasse bis zum 1,5-fachen von ( $F_{Zyl}/g$ ) betragen darf. Im vertikalen Betrieb darf die Lastmasse das 0,75-fache betragen.

$$\text{Horizontal: } m_{last} \leq 1,5 \cdot \frac{F_{Zyl}}{g}$$

$$\text{Vertikal: } m_{last} \leq 0,75 \cdot \frac{F_{Zyl}}{g}$$

Ist die Lastmasse  $m_{last}$  wesentlich kleiner, ist der Antrieb überdimensioniert.

#### Lastmasse bekannt, Zylinder gesucht:

$$d_{last} = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot \frac{m_{last} \cdot g}{p_{rel}}}$$

Auch hier zeigen Erfahrungswerte, dass der zu verwendende Zylinderdurchmesser sich über einen festen Faktor aus dem Lastdurchmesser ergeben kann. Bei horizontaler Bewegung muss der Zylinderdurchmesser mindestens das 0,82-fache des Lastdurchmessers betragen. Im vertikalen Betrieb liegt der Faktor bei 1,16.

$$\text{Horizontal: } d_{Zyl} \geq 0,82 \cdot d_{last}$$

$$\text{Vertikal: } d_{Zyl} \geq 1,16 \cdot d_{last}$$

Ist der Durchmesser  $d_{Zyl}$  wesentlich größer, ist der Antrieb überdimensioniert.

## II. Reduzierte Rückhubkraft

In vielen pneumatischen Anwendungen wird nur in eine der beiden Bewegungsrichtungen eine hohe Antriebskraft benötigt. In die andere Richtung wird eine quasi kraftlose Bewegung ausgeführt. Dies ist z.B. auch bei Spannzylindern der Fall, die im geschlossenen Zustand ein Bauteil mit hoher Kraft fixieren aber sich nahezu kraftlos öffnen.

Wird in einer der beiden Bewegungsrichtungen eine geringere Antriebskraft benötigt, so kann die zugehörige Ventilkammer mit Druckluft versorgt werden, die sich auf einem geringeren Druckniveau befindet (z.B. 3 bar statt der herkömmlichen 6 bar). Die hierfür benötigte Druckluft kann entweder mit einem zusätzlichen Druckregler am Einspeisepunkt oder in der Ventilinsel erzeugt werden.

### Automobilindustrie

In einer typische Produktionsanlage werden ca. 30% des Luftverbrauchs zum Betrieb von Spannzylindern eingesetzt. Es wird angenommen, dass sämtliche dieser Komponenten mit einer reduzierten Rückhubkraft betrieben werden können, für deren Erzeugung ein Druckniveau von 3 bar ausreichend ist. Der Luftverbrauch dieser Komponenten ließe sich daher um 25% reduzieren.

Bei einem Gesamtluftverbrauch der Anlage von  $100 \text{ Nm}^3/\text{h}$  sind daher Einsparungen von  $7,5 \text{ Nm}^3/\text{h}$  möglich. Die damit verbundene Kostenersparnis beläuft sich auf 675 Euro pro Jahr (bei Dreischichtbetrieb).

### 5.4.5 Schweißzangen-Antriebe

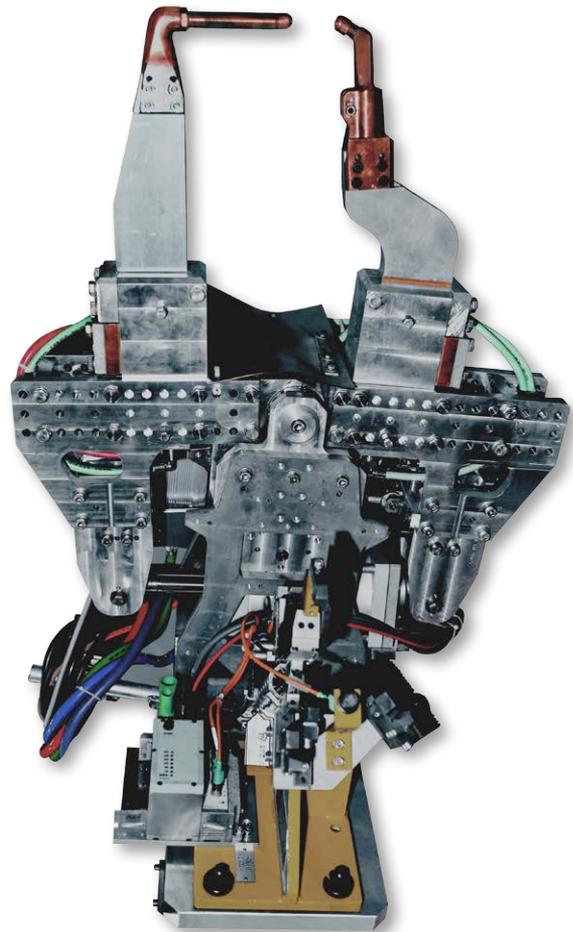
Schweißzangen müssen während des Schweißvorgangs eine große Anpresskraft erzeugen. Sie werden daher meist mit Druckluft aus dem Hochdrucknetz versorgt. Das Druckniveau liegt im Bereich von ca. 12 bar.

Im Vergleich zum herkömmlichen Niederdrucknetz ist der Energiegehalt der Druckluft höher, der Aufwand und die Kosten für die Erzeugung der Druckluft sind daher ebenfalls relativ hoch. Es ist folglich insbesondere im Bereich der Schweißzangen-Antriebe sinnvoll, ein energiesparendes Antriebskonzept zu verfolgen.

#### I. Abschalten des Ruheverbrauchs

Aufgrund des konstruktiven Aufbaus der Proportionalventile, die in servopneumatischen Schweißzangen verwendet werden, ergibt sich auch im Stillstand ein gewisser Luftverbrauch, vergleichbar mit einer dauerhaften Leckage. Durch das Abschalten der Luftversorgung in Stillstandszeiten an dem entsprechenden Einspeisepunkt ließe sich dieser Verlust eindämmen.

Messungen zeigen, dass der Luftverbrauch servopneumatischer Schweißzangen im Stillstand bei etwa  $1,6 \text{ Nm}^3/\text{h}$  liegt.



#### Automobilindustrie

In einer typischen Produktionsanlage mit einem Gesamtluftverbrauch von ca.  $100 \text{ Nm}^3/\text{h}$  werden ca. 10 servopneumatische Schweißzangen eingesetzt. Ausgehend von Dreischichtbetrieb und Stillstand am Wochenende ergeben sich 2400 Stillstands-Stunden im Jahr.

Würde in diesen Zeiten der Luftverbrauch der Schweißzangen komplett unterbunden, ließen sich finanzielle Einsparungen von ca. 700 Euro pro Jahr erzielen.

## II. Optimiertes Verfahrenprofil

Einen großen Einfluss auf den Energieverbrauch von Schweißzangen hat das verwendete Verfahrenprofil. In vielen Anwendungen ist es beispielsweise nicht notwendig, die Schweißzange nach jedem Schweißpunkt komplett zu öffnen, neu zu positionieren und wieder zu schließen. Liegen die Schweißpunkte günstig auf einer Linie, so genügt es, für den Positionswechsel der Schweißzange einen geringen Öffnungshub von wenigen Millimetern umzusetzen, was zu signifikant reduziertem Luftverbrauch führen kann und zusätzlich die Bearbeitungszeit verkürzt. Konventionelle Schweißzangensysteme können keine Zwischenposition anfahren und verbrauchen bei Schweißpunkt-Serien viel Energie, weil die Zange jedes Mal komplett geöffnet wird.

Mit servopneumatischen Schweißzangen ist die Realisierung eines alternativen Verfahrenprofils möglich, der Öffnungshub nach jedem Schweißvorgang kann individuell gewählt werden. Daher ermöglicht die Verwendung servopneumatischer Schweißzangen einen relativ energieeffizienten Betrieb.

Servopneumatische Schweißzangen weisen allerdings im Stillstand einen gewissen Ruheverbrauch auf. Bei gelegentlichen Schweißvorgängen (Einzelpunkten) und langen Stillstandsphasen hat die konventionelle pneumatische Antriebstechnik da-

her ihre Vorteile, da sie keinen nennenswerten Ruheverbrauch verursacht.

Im Vergleich zu pneumatischen Systemen hat ein servoelektrisches System geringere Energiekosten, was insbesondere bei großen Hublängen einen starken Einfluss haben kann, jedoch liegen die Investitionskosten weit höher (siehe Kapitel 4.2). Generell ist es von der Art des Einsatzes abhängig, welches Schweißzangensystem energetisch und wirtschaftlich am besten ist.

Energetisch betrachtet ist nicht nur der Luftverbrauch relevant. Ein wichtiges ebenfalls anwendungsspezifisches Kriterium in Punkto Energieverbrauch ist das Zangengewicht (Schweißzange und Antriebstechnik). Bei mobilen Schweißzangen, die z.B. an einem Roboter montiert sind, muss dieses Gewicht stets mit bewegt, bzw. gehalten werden und verursacht hierdurch einen mitunter hohen elektrischen Energieverbrauch in der Antriebstechnik des Roboters. Ein geringes Eigengewicht der eingesetzten Komponenten wirkt sich folglich ebenfalls positiv auf den Energieverbrauch des Systems aus. Die pneumatische Antriebstechnik zeichnet sich durch eine hohe Energiedichte aus. Pneumatische Komponenten mit vergleichbaren Leistungsdaten sind demnach meist kleiner und leichter als elektrische Antriebe. Insbesondere bei mobilen Anwendungen empfiehlt sich daher der Einsatz pneumatischer Schweißzangen, um die bewegte Masse möglichst gering zu halten.

### Automobilindustrie

Bei jeweils komplettem Öffnen und Schließen der Schweißzangen ergibt sich ein Luftverbrauch von ca. 20 NI bis 35 NI pro Schweißpunkt, abhängig von der Art der verwendeten Zange und dem Durchmesser des Antriebs. Wird ein Verfahrenprofil eingesetzt, das die Schweißzange nach jedem Schweißpunkt nur um 20% öffnet und erst nach 10 Punkten eine komplette Öffnung vollziehen muss, so liegt der Verbrauch pro Schweißpunkt bei ca. 7 NI bis 13 NI. Der Luftverbrauch pro Schweißpunkt sinkt also um 60%.

Je nach bearbeitetem Bauteil und je nach Anordnung der Schweißpunkte, muss ein Verfahrenprofil verwendet werden, das zwischen diesen beiden Extremen einen Kompromiss darstellt. Geht man von einer durchschnittlichen Öffnung von ca. 50% aus, ergibt sich ein mittlerer Luftverbrauch von ca. 15 NI pro Schweißpunkt. Die Druckluftkosten für einen Schweißpunkt liegen somit bei ca. 0,03 Cent. Durchschnittlich werden bei der Herstellung einer Automobil-Karosserie ca. 4 150 Schweißpunkte gesetzt. Der Betrieb der Schweißzangen erzeugt daher einen Luftverbrauch von 62 Nm<sup>3</sup> pro Karosserie. Dies entspricht einem finanziellen Aufwand von ca. 1,10 Euro.

## 6. Tools zur Planungsunterstützung

Um in einem neu entstehenden Werk oder in einer Anlage ein ganzheitlich energieoptimales Konzept durchzusetzen, muss bereits in der Planungsphase auf korrekte Dimensionierung und Auslegung Wert gelegt werden. Wird erst im Nachhinein im Bestand nach technischen Lösungen zur Steigerung der Effizienz gesucht, so ist dies meist mit wesentlich höherem Aufwand verbunden.

Untersuchungen zeigen, dass beim Entwurf eines großen Druckluftnetzes häufig keine systematische Herangehensweise angewendet wird und man auf vermeintlich bewährte Erfahrungswerte zurückgreift. In den meisten Fällen resultiert daraus jedoch eine starke Überdimensionierung der verwendeten Komponenten. Die Gründe hierfür liegen in einer übertriebenen Tendenz zu Betriebssicherheit, frei nach dem Motto „lieber zwei Nummern größer als eine zu klein“. Teilweise liegt die Ursache für fehlerhafte Planungen auch darin begründet, dass für korrekte Berechnungen nicht genügend Zeit zur Verfügung steht. An dieser Stelle können Planungstools wertvolle Beiträge leisten.

Im Rahmen der Innovationsallianz „Green Carbody Technologies“ wurden bei der Planung von Druckluftnetzen drei Schlüsselbereiche identifiziert, in denen Softwarewerkzeuge zum Einsatz kommen können:

1. Die **Ermittlung des Druckluftbedarfs** zur Abschätzung der benötigten Liefermenge und zur Berechnung der „Total cost of ownership“ (TCO) oder auch der „Life Cycle Costs“ über den kompletten Lebenszyklus der Anlage.
2. Die **Planung des Druckluftnetzes** selbst, inklusive Rohrdurchmessern und Rohrlängen, sowie die Platzierung von Kompressorstationen und Druckluftspeichern, um Druckverluste aufgrund langer Distanzen, Leckagen und unterdimensionierten Rohren zu vermeiden. Mit den

aus (1.) bekannten Verbrauchswerten kommt man zu einer optimalen Netztopologie, um die Verluste zu minimieren. Aspekte der Infrastruktur können dabei berücksichtigt werden.

3. Die **Dimensionierung der Kompressoren**, um eine optimal auf den Verbrauch abgestimmte Maschinenkonstellation zusammenzustellen.

Das Zusammenspiel der Tools ermöglicht eine optimale Planung der gesamten Wirkungskette der Druckluft. Im Optimalfall weisen die Softwaretools geeignete Schnittstellen auf, sodass in einem übergeordneten Datenmodell der Datenaustausch zwischen den einzelnen Tools erfolgen kann.

Der Ermittlung des Druckluftbedarfs (1.) in der Anwendung, inklusive der Betrachtung von Lebenszykluskosten, wird durch ein Tool der Firma Festo namens „Life Cycle Cost Calculator - (L3C)“ ermöglicht. Es kann damit die benötigte Liefermenge einer Anlage ermittelt und über eine definierte Schnittstelle zur Verfügung gestellt werden. Dies ermöglicht die Planung des Druckluftnetzes und die Dimensionierung der Kompressoren, welche zum Betrieb der Anlage notwendig sind.

Die Firma Boge stellt zwei Module zur Verfügung, die sich jeweils mit den beschriebenen Aufgabenstellungen aus (2.) und (3.) befassen. Diese Bereiche sind gekoppelt, so können die bei der Netzauslegung ermittelten Parameter direkt an das Modul zur Auslegung einer Kompressorstation übergeben werden.

Die jeweils optimale Auslegung der einzelnen Automatisierungsfunktionen wird nicht betrachtet. Es wird auf die Auslegungstools der verschiedenen Hersteller verwiesen, die Auswahl- oder Simulationstools für Ihre Lösungen anbieten oder die Auslegung für Kunden durchführen.



## 6.1 Ermittlung des Druckluftbedarfs

Die Ermittlung des Druckluftbedarfs spielt eine entscheidende Rolle während der Planung neuer Produktionsanlagen, denn aufgrund des ermittelten Bedarfs wird auch die Medienversorgung geplant und installiert. Bisher wurden solche Bedarfsgrößen lediglich geschätzt, was in der Regel zu einer deutlich überdimensionierten Druckluffterzeugung und Verteilung führt. Im ungünstigsten Fall kann aus einer schlechten Schätzung sogar eine Unterversorgung resultieren, was zu Nachbesserungen mit hohen Mehraufwänden führen kann.

Zeitlich erfolgt die Ermittlung des Medienbedarfs bis zu 18 Monate vor dem Produktionsstart einer Anlage, so dass die Anlagenplanung zu diesem Zeitpunkt noch nicht in finaler Detailtiefe vorliegt. Aus diesem Grund wurde von der Firma Festo ein Planungstool entwickelt und die Software so gestaltet, dass ohne großen Modellierungsaufwand und herstellerunabhängig eine Abschätzung des Druckluftbedarfs bereits in frühen Planungsphasen möglich ist. Es trägt den Namen „Life Cycle Cost Calculator“ und kann eine komplette Anlage über

drei Hierarchieebenen abbilden. Die Verbraucher werden über sogenannte Automatisierungsfunktionen in einem Plug-In abgebildet. Das Tool wurde so konzipiert, das eine Erweiterung um zusätzliche Funktionen sehr einfach möglich ist.

Die Abbildung unten zeigt beispielhaft die Modellierung einer Fertigungszelle aus dem Karosseriebau, bei der auf der linken Seite der Projektbaum mit den drei Hierarchieebenen zu sehen ist und auf der rechten Seite die Beschreibung eines Spannzylinders, eines typischen pneumatischen Antriebs aus dem Karosseriebau.

Als Ergebnis ermöglicht das Tool eine Abschätzung der Kosten über den gesamten Lebenszyklus bestehend aus den Anschaffungskosten, Energiekosten (Betriebskosten) und Instandhaltungskosten. Entsorgungskosten werden nicht betrachtet.

Zur Abbildung der Funktionen werden einige Informationen benötigt, z.B. für die Funktion „pneumatisch bewegen“:

**Karosseriebau**

- Fertigungszelle 1
  - Roboter A
    - Spanner 50 / 135°
    - Spanner 50 / 135°
  - Roboter B
    - Spanner 40 / 135°
    - Spanner 40 / 135°
- Fertigungszelle 2
- Fertigungszelle 3
- Fertigungszelle 4
- Fertigungszelle 5
- Fertigungszelle 6

**Referenz** Spanner 40 / 135° 1x

Funktionszyklen / Roboterzyklus: 2 (1x)  
 Dauer Funktionszyklus: 20 s (1x)  
 Zelle  Roboter  Funktion

**Doppelwirkender Zylinder**

Kolben-Ø: 40 mm (32 mm) mehr ...  
 Max. Hub: x 75.6 mm =  = ausgeführt 75.6 mm

**Schlauch**

**1**  =  
 Innen-Ø: x 6 mm  
 Länge: 20 mm

**2**  =  
 Innen-Ø: x 6 mm  
 Länge: 1500 mm

**3**  
 Innen-Ø: x 6 mm  
 Länge: 20 mm

**4**  
 Innen-Ø: x 6 mm  
 Länge: 1500 mm

Zusätzl. Leckage: 0 l/h  
 Betriebsdruck: 6 bar  
 Druckverstärkerverhältnis: 1:1

**Pneumatisch Bewegen**

**Beschaffungskosten Automatisierungsfunktion** 200 Euro

	Funktionszyklus	Roboterzyklus	Zellzyklus	Beobachtungsperiode
Verbrauch	1.94	3.87	3.87	12548 m³
Energiekosten [Euro]	3.49E-5	6.97E-5	6.97E-5	226

Ermittlung des Druckluftbedarfs mit dem „Life Cycle Cost Calculator“

- Antriebsdurchmesser und Hub
- Schlauchinnendurchmesser und Länge
- Anzahl der Funktionsbetätigungen pro übergeordnetem Zyklus

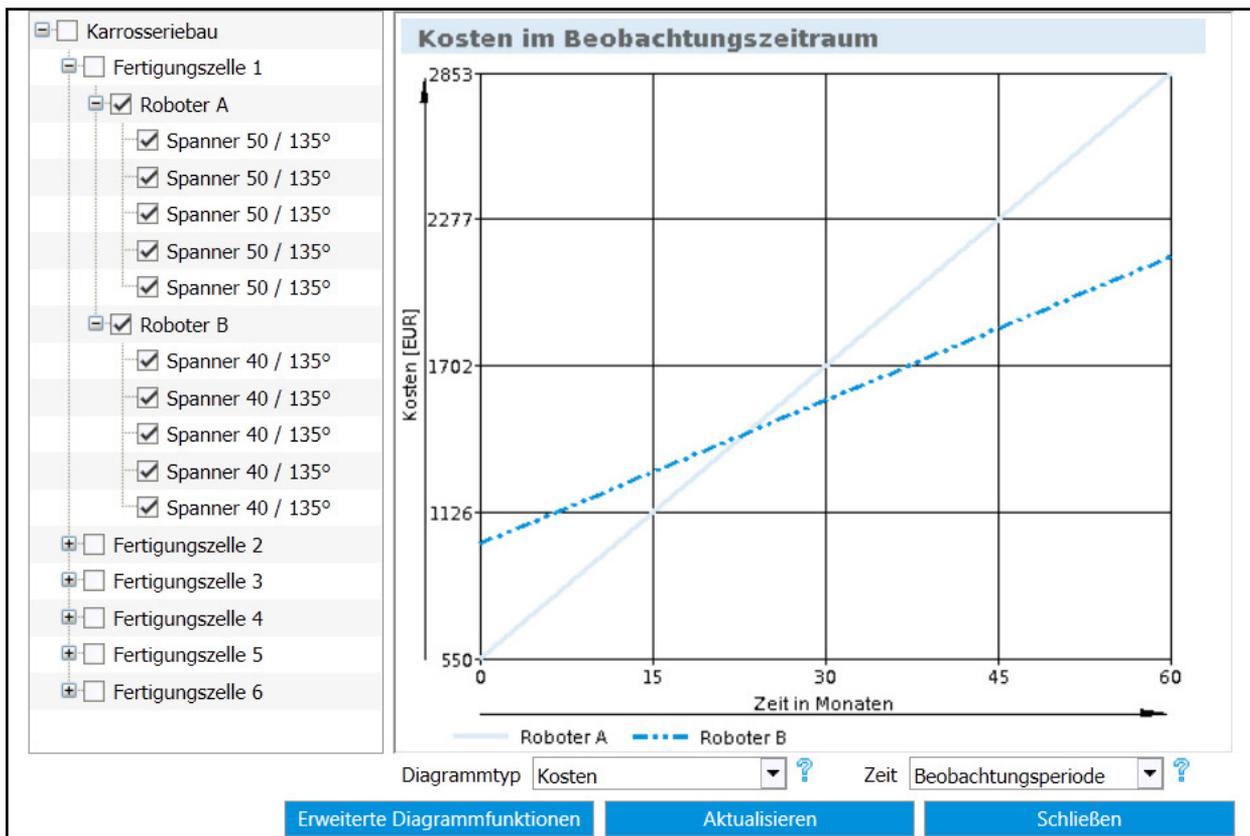
Anhand der eingegebenen Randbedingungen (Betriebsdruck, Druckluftherzeugungskosten, Betrachtungszeitraum) werden die Verbräuche der einzelnen Komponenten automatisch aggregiert und über dem Betrachtungszeitraum ausgewertet. Dabei können neben den Energiekosten der Komponenten ebenfalls Anschaffungs- und Instandhaltungskosten berücksichtigt werden.

Nach dem Vorgang der Modellierung kann der Energiebedarf der Anlage sowohl numerisch als auch graphisch ausgewertet werden. Dabei bietet das Tool die Möglichkeit, verschiedene Varianten zu modellieren, die sich beispielsweise in der Bauart und Größe einzelner Antriebe unterscheiden können. Die Varianten können dann gezielt analysiert und gegenübergestellt werden, um die über

den Betrachtungszeitraum wirtschaftlichste Lösung zu ermitteln.

Die Abbildung unten zeigt zwei unterschiedlich ausgelegte Varianten eines Handlingsroboters mit gleicher Funktionalität. Für den energieoptimierten Roboter B wurden Spezialspanner eingesetzt, die aufgrund einer speziellen Kinematik den gleichen Anpressdruck bei geringerem Antriebsdurchmesser erzeugen, in der Anschaffung jedoch deutlich teurer sind. Mit Hilfe eines Break-Even-Point Diagramms kann sich der Planer ohne zeitaufwendige Berechnung für die langfristig wirtschaftlichste Variante entscheiden.

Ist eine Anlage im vorgestellten Tool komplett abgebildet, so lässt sich aus dem aufgestellten Modell direkt eine Aussage über den Druckluftbedarf generieren. Diese Information kann über eine Schnittstelle zur weiteren Verwendung zu Verfügung gestellt werden.



Break-Even-Point Darstellung zweier Robotervarianten

## 6.2 Planung des Druckluftnetzes

Komplexe Strömungssimulationsprogramme gibt es bereits seit Jahrzehnten. Sie benötigen jedoch umfangreiche Computer-Hardware, trainiertes Personal und sind relativ teuer. In den meisten Fällen ist es sehr aufwendig, Druckluft-Netzmodelle mit derartiger Software zu realisieren. Aufgrund der Komplexität der Berechnungen kann ein Simulationsdurchgang zwischen einigen Minuten über Stunden bis hin zu Tagen dauern. Alle diese Faktoren machen Strömungssimulationsprogramme ungeeignet für die Planung von Druckluftnetzen.

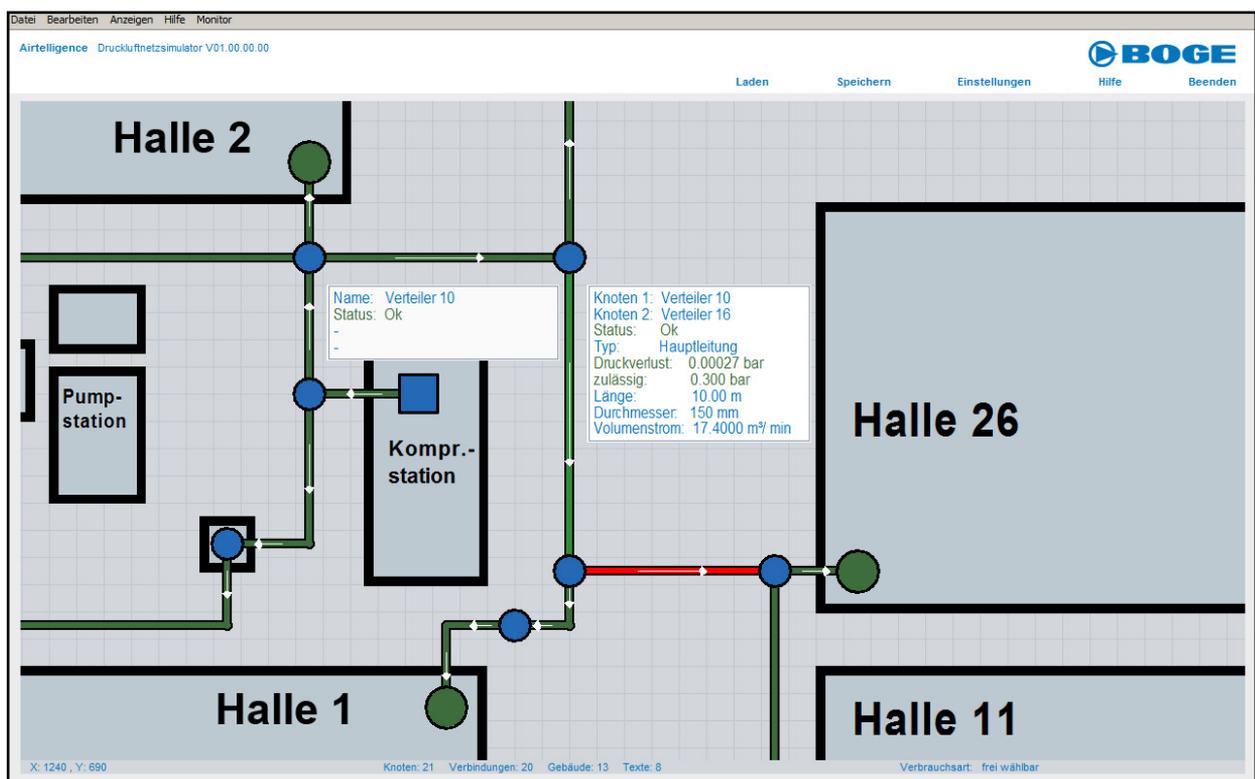
Daher wurde das Ziel definiert, ein leichtgewichtiges Tool zu entwickeln, welches auf einem herkömmlichen Desktop-PC laufen kann und trotzdem Engstellen oder überdimensionierte Rohrleitungen identifizieren und anzeigen kann. Anders als in Strömungssimulationen ist eine Berechnung mit konzentrierten Parametern hierfür ausreichend, denn es ist nicht zwingend notwendig, Turbulenzen und Strömungsverhältnisse detailliert abzubilden.

Die Abbildung zeigt ein Anwendungsbeispiel für das entwickelte Modul. Die Simulation besteht aus

Knoten und Verbindungen, wobei Verbindungen in der Regel Rohre sind und Knoten Verbraucher, Erzeuger oder Verteiler sein können. Die Darstellung orientiert sich an realen Rohrleitungsplänen, wie sie beim Fabrikentwurf verwendet werden.

Das Tool gibt ein direktes Feedback über den strömungstechnischen Zustand in den Rohrsegmenten und Verbrauchern/Erzeugern und erlaubt Änderungen in Echtzeit. Zum Beispiel wird in der aktuellen Konstellation ein Rohrsegment als nicht ausreichend dimensioniert erkannt und farblich rot markiert. Der Durchmesser des betreffenden Rohres könnte nun entweder angepasst werden, oder es könnte ein kleiner dezentraler Erzeuger neben dem Verbraucher platziert werden. Die Auswirkungen der Maßnahmen lassen sich direkt beobachten und bewerten.

Dies ermöglicht das Design eines optimalen Netzes und vermeidet zu große oder zu kleine Rohrsegmente sowie die Verwendung von Rohren, die sowieso kaum Einfluss auf das Strömungsverhalten haben.



Planung eines Druckluftnetzes

## 6.3 Planung der Kompressorstation

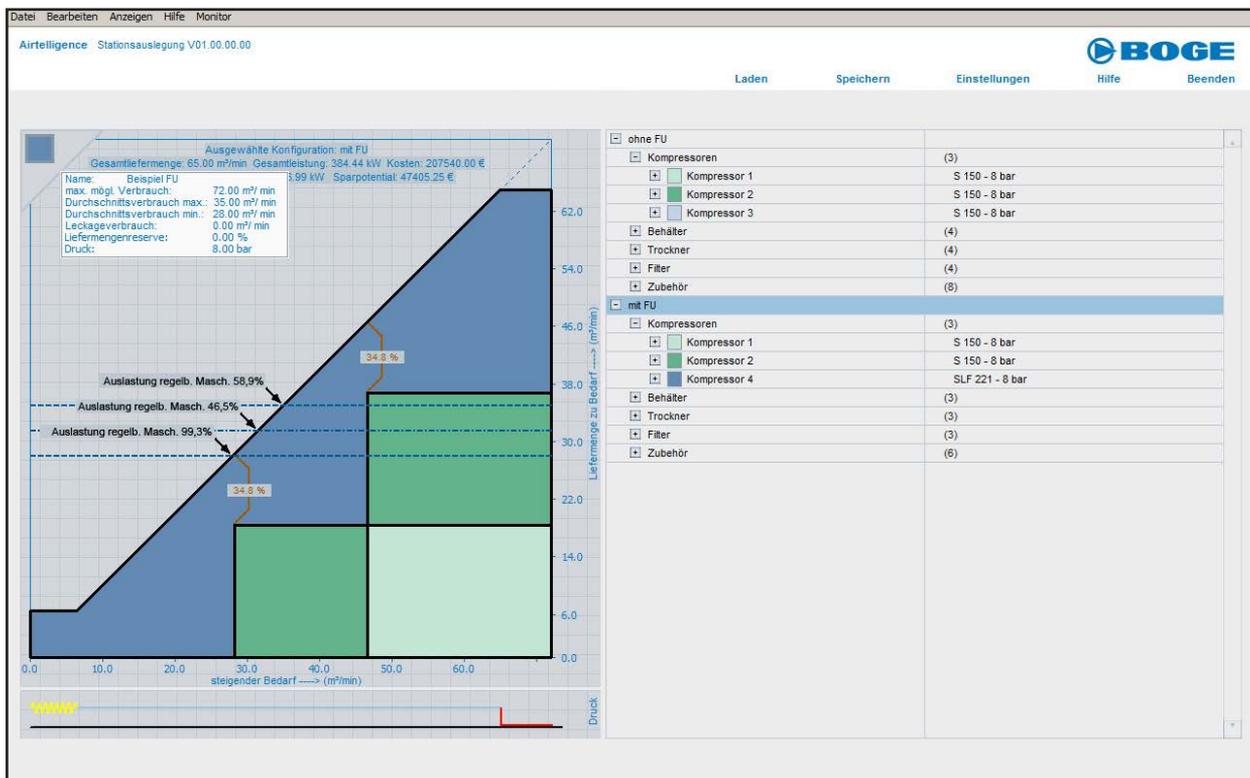
Die Stationsauslegung erfolgte in der Vergangenheit häufig anhand von Datenblättern, mit denen Kompressoren mit passender Liefermenge ausgewählt werden. Ohne tiefgehendes Wissen kann dies zu ungünstigen Maschinenkombinationen führen. Teilweise erfolgt die Auslegung der Kompressorstation auch durch externe Dienstleister, z.B. von den Kompressorenherstellern selbst. Diese Methode führt meist zu deutlich besseren Ergebnissen, häufig dauert es jedoch mehrere Tage, bis der Dienstleister eine Lösung anbieten kann. Bis zur endgültigen Umsetzung benötigt der anschließende Optimierungsprozess oftmals mehrere Iterationen, was zu zusätzlichen Verzögerungen des Zeitplans führen kann.

Um dies zu verbessern, wurde ein Tool entwickelt, welches dem Benutzer eine komplette Kompressorstation auslegt - inklusive aller Kompressoren und Zubehörkomponenten, die für hocheffiziente Druckluftproduktion nötig sind. Die Eingabe der Parameter wird dabei so einfach wie möglich gehalten, sodass bereits nach wenigen Minuten ein Ergebnis vorliegt.

Als Eingabeparameter wird der Durchschnittsverbrauch der Druckluftanlage angegeben. Anschließend zeigt das Tool die Effizienz an Schlüsselpunkten mit intuitiver Grafik wie in der unteren Abbildung dargestellt. Dies erlaubt es auf einen Blick, eine „schlechte“ Station von einer „guten“ Station zu unterscheiden. Entfernen oder Hinzufügen von Komponenten führt sofort zu einer Änderung des Ergebnisses.

Im einfachsten Falle werden zur Berechnung nur der Durchschnitts- und Maximalverbrauch sowie der gewünschte Druck benötigt, um eine komplette Station mit allem Zubehör (Trockner, Filter, Behälter...) auszulegen. Selbstverständlich werden weitere Parameter unterstützt wie z.B. Druckluftqualität, Umgebungstemperatur und Leckage.

Das Tool enthält eine umfassende Datenbank, welche herstellerunabhängig eine große Zahl Kompressoren und Zubehör unterstützt. So kann das Tool jede existierende Station untersuchen und visualisieren, um zu ergründen welchen Einfluss einzelne Komponenten auf das Ergebnis haben.



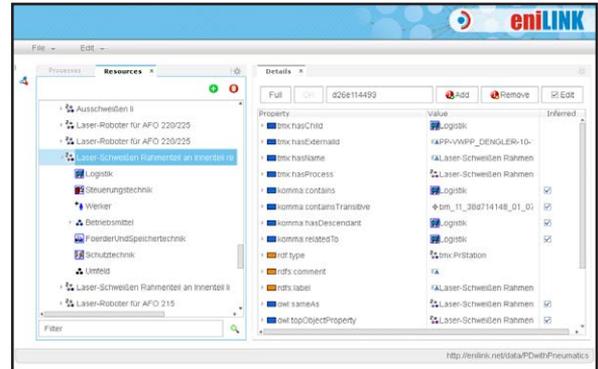
Planung einer Kompressorstation

## 6.4 Zusammenführung aller Tools

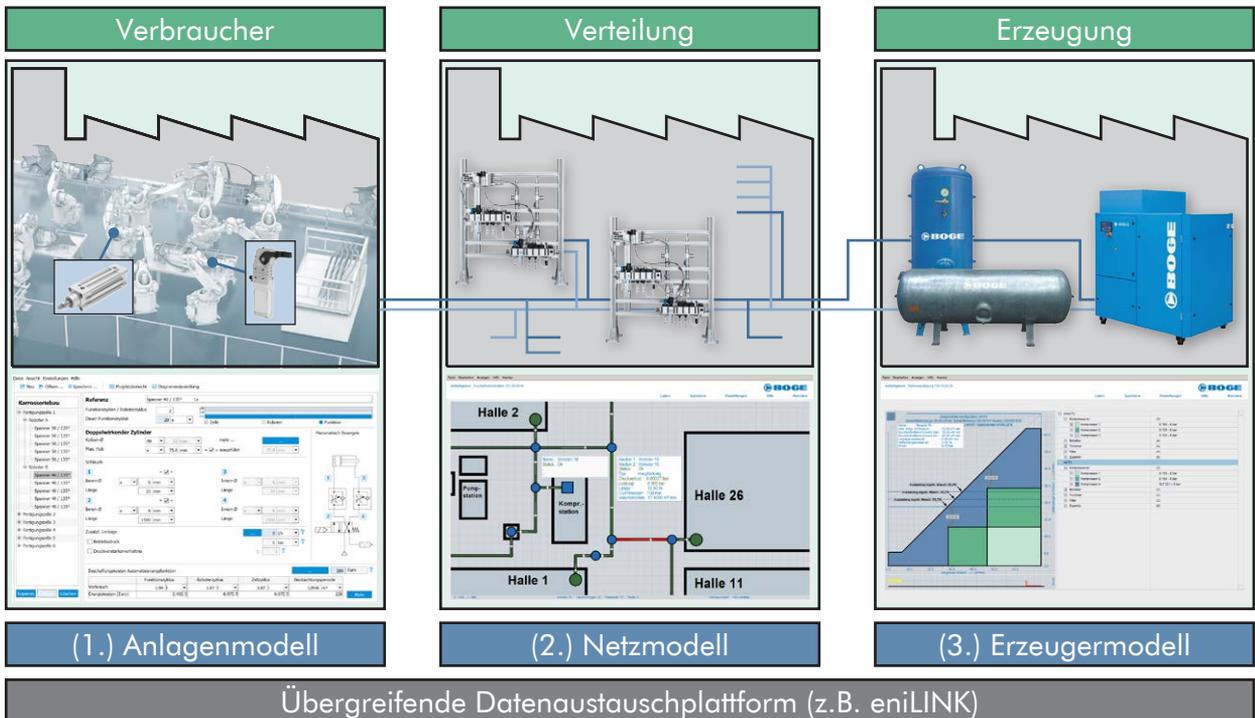
Die Abbildung unten zeigt den ganzheitlichen Ansatz, der bei der Bereitstellung der Planungstools verfolgt wird. Das Anlagenmodell (links) erlaubt eine umfassende und übersichtliche Planung des Druckluftverbrauchs. Ist dieser bekannt, lässt sich über ein weiteres Tool ein Netzmodell (mitte) generieren, um eine geeignete und angepasste Netztopologie zu erhalten. Schließlich kann mit einem Erzeugermodell (rechts) die Struktur der Kompressorstation geplant werden.

Um einen reibungslosen Ablauf des Planungsprozesses zu ermöglichen, ist ein Datenaustausch zwischen den einzelnen Softwaremodulen notwendig. Nur so ist es möglich, dass mehrere Personen gleichzeitig am Planungsprozess teilnehmen, bei Bedarf Fachexperten hinzugezogen werden können und der Planungsaufwand trotzdem begrenzt ist. Dafür ist ein Ordnungsrahmen notwendig, der als Konsens für den Datenaustausch zwischen Planungspartnern und über die verschiedenen Planungsphasen hinweg akzeptiert ist.

Im Rahmen des durchgeführten Projekts wurde zu diesem Zweck der Prototyp einer webbasierten Planungssoftware entwickelt. Zum Einsatz kam hier-



bei eine Softwareplattform namens „eniLINK“, die es ermöglicht, auf Basis von Linked-Data-Technologien Anwendungen zu erstellen. Aus einer typischen Planungssoftware wurde das Modell einer Produktionsanlage exportiert und so aufbereitet, dass über eniLINK Druckluftkomponenten hinzugefügt werden können. So wurde beispielsweise der Druckluftbedarf von pneumatischen Kraftspannern in Abhängigkeit vom benötigten Öffnungswinkel berechnet. Für zukünftige Versionen der Software ist auch die Einbindung von Katalogdaten von weiteren Komponenten geplant, sodass automatisiert Berechnungen und Auswertungen durchführbar sind.



Toolkette zur Planung von Druckluffterzeugung, Verteilung und Verbrauch

## 7. Zusammenfassung

### 7. Zusammenfassung

Der hier vorliegende Leitfaden zeigt ausgewählte Ergebnisse aus dem Projekt „Planung des Effizienten Einsatzes von Druckluft im Karosseriebau“ der Innovationsallianz Green Carbody. Gesamtziel der Allianz ist es, ca. 30% Energie in der gesamten Wertschöpfungskette der Karosseriefertigung zu sparen. Von diesem übergeordneten Ziel ausgehend, wurden im Projekt die Pneumatik im Karosseriebau detailliert untersucht, die Antriebstechnik analysiert und aktuelle Fragestellungen der Planung aufgegriffen.

Derzeit werden besonders im Karosseriebau häufig **emotionale Diskussionen** zur Energieeffizienz verschiedener Technologien geführt. Dies betrifft auch die Druckluft. Ständige Treiber der Diskussionen sind zum Einen die bekannten Verluste wie z.B. Leckagen, zum Anderen aber auch Intransparenz und fehlende Daten über tatsächlich anfallende Kosten. In den meisten Fällen liegen keine gesicherten und verallgemeinerbaren Messungen des Druckluftverbrauchs von Produktionsanlagen im Karosseriebau vor. So wird beispielsweise der Wegfall von Hochdrucknetzen bei der Neuplanung von Produktionsanlagen angedacht oder sogar über eine komplett druckluftfreie Produktion diskutiert, ohne dass verlässliche Informationen über Energiekosten und Gesamtkosten vorhanden sind. Technische Vorteile wie z.B. eine hohe Leistungsdichte, hohe Lebensdauer und Robustheit der pneumatischen Antriebstechnologie werden häufig unterbewertet.

Ein maßgebliches Ziel des Projekts bestand darin, zu diesen Fragestellungen **Transparenz** durch Messungen zu erhalten, Technologie- und Szenariovergleiche mit realen Werten durchzuführen und pragmatische, kurzfristig umsetzbare Maßnahmen zur Energieeinsparung darzustellen.

Die Ergebnisse der Messungen haben gezeigt, dass Pneumatik im Karosseriebau **kosten- und energieeffizient** ist. Die Messungen an diversen repräsentativen Produktionsanlagen zeigen reale Verbrauchskosten mit teilweise überraschenden Ergebnissen: Zu Projektbeginn wurden sehr hohe Verbräuche und Verluste befürchtet, die sich im Lauf der durchgeführten Analysen als wesentlich

geringer herausgestellt haben. Der Grund hierfür liegt darin, dass in der eingesetzten Spann-, Greif- und Schweißtechnik zwar große pneumatische Antriebskomponenten verwendet werden, deren Luftverbrauch hält sich aber aufgrund der relativ geringen Anzahl an Bewegungszyklen in Grenzen.

Für Planer liegen nun **transparente Zahlen** auf Hallen-, Zellen- und Komponentenebene vor. Die Zahlenwerte und Aussagen wurden mit den Erfahrungen diverser Automobilhersteller verglichen und verifiziert. So kostet z.B. ein Schweißpunkt einer servopneumatisch angetriebenen C-Zange ca. 0,013 ct (7NI Luftverbrauch). Eine komplette Anlage mit einem Durchsatz von 80 Bauteilen/h verbraucht je nach Größe ca. 50 bis 200 Nm<sup>3</sup>/h (70 ct/h bis 300 ct/h). Die Kosten für den Druckluftanteil, der energetisch bei der Produktion einer Karosserie benötigt wird, liegen bei ca. 6 Euro (alle Gewerke, inkl. Lackiererei). Der Anteil des mit viel Antriebstechnik versehenen Karosseriebaus beläuft sich auf ca. 3 Euro. Etwa die Hälfte entfällt auf das Hochdrucknetz, das bei einer Referenzfabrik mit ca. 350 000 bis 500 000 Euro als Investition zu Buche schlägt. Die im Leitfaden dargestellten Szenarien und TCO-Betrachtungen zeigen, dass sich Hochdrucknetze durchaus lohnen.

Es sind **30% Energieeinsparung** möglich. Die relevanten Maßnahmen zur Energieeinsparung, von Abschaltssystemen über Leckagebeseitigung bis hin zu Diagnosesystemen, sind in diesem Leitfaden erläutert. Großes Potential liegt in der effizienten Auslegung der Erzeugung, der Nutzung von Wärmerückgewinnung und der korrekten Auslegung der pneumatischen Antriebstechnologie.

Mit den konzipierten **Softwaretools** wurde erstmals gezeigt, wie die komplette Wirkungskette von der Drucklufterzeugung bis zur Anwendung erschlossen und unter Berücksichtigung von TCO Aspekten untersucht werden kann. Zukünftig müssen diese Ansätze in übergeordnete Planungstools der Automobilhersteller integrieren werden, um eine ganzheitliche Betrachtung zu gewährleisten.

Das Projekt hat gezeigt, dass die im Karosseriebau eingesetzte Pneumatik bei korrekter Auslegung als Antriebstechnik prädestiniert ist und auch in Zukunft eine wirtschaftliche Technologie ist.

7

## 8. Anhang

# 8

### 8.1 Daten aus der InnoCaT-Referenzfabrik

	Referenzfabrik	Referenzkarosserie
Ausbringung	250000 Fahrzeuge/a	
Anzahl der Schweißpunkte	1 036 Mio./a	4150
Elektroenergiebedarf in den produzierenden Gewerken	131,4 Mio. kWh/a	512 kWh
Gesamter Elektroenergiebedarf inkl. Infrastruktur	206,5 Mio. kWh/a	810 kWh
Druckluftbedarf Werk	100,1 Mio. Nm <sup>3</sup> /a	400 Nm <sup>3</sup>
Bedarf an elektrischer Energie für Druckluft im Werk	13,0 Mio. kWh/a	52 kWh
Kosten für Druckluft im Werk	1,6 Mio. Euro/a	6,36 Euro
Druckluftbedarf nur im Karosseriebau	49,0 Mio. Nm <sup>3</sup> /a	196 Nm <sup>3</sup>
Bedarf an elektr. Energie für Druckluft im Karosseriebau	6,4 Mio. kWh/a	26 kWh
Kosten für Druckluft im Karosseriebau	780000 Euro/a	3,11 Euro

### 8.2 Messdaten aus einer untersuchten Karosseriebauhalle

	pro Stunde	pro Jahr
Verbrauch während der Produktionsphase (im Dreischichtbetrieb 6000 h/a)	4800 Nm <sup>3</sup> /h HD 3900 Nm <sup>3</sup> /h ND 8700 Nm <sup>3</sup> /h Sum.	28,8 Mio. Nm <sup>3</sup> /a HD 23,4 Mio. Nm <sup>3</sup> /a ND 52,2 Mio. Nm <sup>3</sup> /a Sum.
Verbrauch während der Ruhephase (im Dreischichtbetrieb 2400 h/a)	1680 Nm <sup>3</sup> /h HD 1365 Nm <sup>3</sup> /h ND 3045 Nm <sup>3</sup> /h Sum.	4,0 Mio. Nm <sup>3</sup> /a HD 3,3 Mio. Nm <sup>3</sup> /a ND 7,3 Mio. Nm <sup>3</sup> /a Sum.

### 8.3 Messdaten von zwei repräsentativen Karosseriebauanlagen

	„alte“ Anlage	„neue“ Anlage
Anzahl der Aktoren	72	345
Anzahl herkömmliche Schweißzangen	8	0
Anzahl servopneumatische Schweißzangen	0	22
Ausbringung Bauteile	78 Stck./h	80 Stck./h
Ruheverbrauch Niederdruck	5,1 Nm <sup>3</sup> /h	18 Nm <sup>3</sup> /h
Dynamischer Verbrauch Niederdruck	25,7 Nm <sup>3</sup> /h	79 Nm <sup>3</sup> /h
Ruheverbrauch Hochdruck	7,6 Nm <sup>3</sup> /h	16 Nm <sup>3</sup> /h
Dynamischer Verbrauch Hochdruck	8,7 Nm <sup>3</sup> /h	82 Nm <sup>3</sup> /h
Summe Luftverbrauch	47,1 Nm <sup>3</sup> /h	195 Nm <sup>3</sup> /h
Druckluftkosten	70 cent/h	3,05 Euro/h

### 8.4 Luftverbrauch und Energiekosten pneumatischer Komponenten

	Luft für 1000 Zyklen	Kosten für 1000 Zyklen
Kniehebelspanner	6 Nm <sup>3</sup> bis 10 Nm <sup>3</sup>	8 cent bis 13 cent
Herkömmliche Schweißzange	20 Nm <sup>3</sup> bis 35 Nm <sup>3</sup>	36 cent bis 63 cent
Servopneumatische Schweißzange	7 Nm <sup>3</sup> bis 20 Nm <sup>3</sup>	13 cent bis 36 cent



