



EnEffAH

Energieeffizienz in der Produktion im
Bereich **Antriebs-** und **Handhabungstechnik**

Grundlagen und Maßnahmen



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Impressum

Herausgeber

EnEffAH – Projektkonsortium

Redaktion

Simon Hirzel

Markus Köpschall

Autoren

Festo AG & Co. KG

Steffen Hülsmann

Markus Köpschall

Dr. Rüdiger Neumann

Michael Ohmer

Kaeser Kompressoren AG

Gerhart Hobusch

Erwin Ruppelt

Institut für Systemdynamik –

Universität Stuttgart

Matthias Doll

Susanne Krichel

Prof. Oliver Sawodny

Fraunhofer Institut für System- und

Innovationsforschung ISI

Rainer Elsland

Simon Hirzel

Dr. Markus Schröter

Ute Weißfloch

Institut für Leistungselektronik und

Elektrische Antriebe – Universität Stuttgart

Frederic Blank

Quoc Khanh Nguyen

Prof. Jörg Roth-Stielow

Layout

ViV Werbeagentur

Wieland & Scheurle GbR

Löwenstraße 26

70597 Stuttgart

Diese Broschüre entstand im Rahmen des Projektes **EnEffAH – „Energieeffizienz in der Produktion im Bereich Antriebs- und Handhabungstechnik“**, welches vom 01.10.2008 bis zum 30.06.2012 durchgeführt wurde.

Entstanden im Rahmen von:



www.eneffah.de

Förderkennzeichen

0327484A-E

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Förderhinweis:

Die vorliegende Broschüre wurde im Rahmen des Verbundvorhabens „EnEffAH“ mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie unter dem Kennzeichen 0327484A-E gefördert. Die inhaltliche Verantwortung liegt bei den Autoren.

© EnEffAH-Projektkonsortium 2012

Nachdruck ist nur nach Genehmigung durch die Herausgeber gestattet.

Vorwort

Klimaschutz, Energieeffizienz und verantwortungsvoller Umgang mit Ressourcen sind seit langer Zeit ein erklärtes Ziel der Politik in der Bundesrepublik Deutschland. Bereits 1995 hatte sich Deutschland auf dem Klimagipfel in Berlin verpflichtet, den Ausstoß von Treibhausgasen bis zum Jahr 2005 um 25 Prozent im Vergleich zu 1990 zu senken.

Neben dem nachhaltigen Umgang mit Ressourcen zum Schutz unserer Umwelt und des Weltklimas, soll durch die Erreichung der Klimaschutzziele auch die Abhängigkeit der Menschheit von begrenzt verfügbaren Energieträgern reduziert werden. Insbesondere Deutschland als ressourcenarmes Land bzgl. der fossilen Energieträger Öl und Gas strebt danach, diese Abhängigkeit zu verringern. Der langfristig aussichtsreichste Weg ist dabei der sparsame und effiziente Umgang mit Energie und die Verwendung regenerativer Energien. Da die Energieversorgung eine Lebensader für die industrielle Produktion ist, ist diese angehalten, energieeffiziente Produktionstechniken und Produkte zu entwickeln, um langfristig bestehen zu können.

Der Anteil der Industrie am gesamten Stromverbrauch in Deutschland betrug im Jahr 2010 rund 43 Prozent. Speziell in der Automatisierungstechnik spielen der Stromverbrauch und der Bedarf an Energie eine große Rolle. Das Forschungsprojekt **„EnEffAH“ (Energieeffizienz in der Produktion im Bereich Antriebs- und Handhabungstechnik)** liefert einen Beitrag zur rationellen Energieanwendung und Einsparung von Energie bei den Endenergiesektoren. Durch den Einsatz der im Projekt entwickelten Lösungen zum energieoptimierten Systembetrieb wird die Energieproduktivität im Industriesektor deutlich erhöht.

Das Forschungs- und Entwicklungsprojekt **EnEffAH** wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) im Rahmen des 5. bzw. 6. Energieforschungsprogramms der Bundesregierung gefördert. Betreut wurde es vom Projektträger Jülich, Bereich Energieeinsparung und Energieeffizienz mit dem Förderschwerpunkt „Energieeffizienz in der Industrie“.

Technik und Methodik spielen bei der Optimierung des Energieeinsatzes eine wichtige Rolle. Die richtige Wahl der Technik (Effektivität), sowie der richtige Betrieb (Effizienz) bestimmen, wie viel Primär- bzw. Endenergie notwendig ist, um die in Produktionsprozessen geforderten Energiedienstleistungen (Wärme, Kraft, Licht und Information) bereitzustellen.

Die effiziente Nutzung von Energie in der Automatisierung durch die Verwendung intelligenter mechatronischer Systeme und Komponenten, des Einsatzes von Low-Power Technologien sowie einer optimalen Systemauslegung ist eine Notwendigkeit und eine Herausforderung zur Erhaltung und Stärkung der durch Automatisierung geprägten Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Wirtschaft und ein wichtiger Beitrag zur Reduzierung des Verbrauchs natürlicher Ressourcen und den damit verbundenen Umweltbelastungen, insbesondere durch die Emission von treibhausrelevanten Spurengasen.

Der Dank der an diesem Fördervorhaben beteiligten Institute und Industrieunternehmen, gilt dem BMWi und dem Projektträger Jülich, mit deren Mitteln und Unterstützung dieses Vorhaben durchgeführt werden konnte (Förderkennzeichen: 0327484A-E).

*Michael Ohmer, Festo AG & Co. KG
Dr. Marcus Schröter, Fraunhofer ISI*

Inhalt

1	Das EnEffAH Projekt	06
1.1	Das Verbundprojekt	06
1.2	Projektpartner	07
1.3	BMWi und Projektträger	10
1.4	Ziele dieser Broschüre	11
2	Energieeffizienz in der Antriebs- und Handhabungstechnik	12
2.1	Bedeutung der Energieeffizienz für Unternehmen	12
2.2	Abgrenzung der Antriebs- und Handhabungstechnik	13
3	Systemübersicht und Vergleich	16
3.1	Überblick Gesamtsystem	16
3.1.1	Elektrisches Gesamtsystem	16
3.1.2	Pneumatisches Gesamtsystem	17
	Optimierungsansatz: Exergieflussdiagramm	20
3.2	Auswahl der geeigneten Technologie	22
4	Energieeffizienz in der Pneumatik	27
4.1	Druckluftbereitstellung /Kompressoren	28
4.1.1	Bedarfsgerechte Kompressorauslegung mit Einsatz einer Verbundsteuerung	28
4.1.2	Zentrale Wärmerückgewinnung	29
4.1.3	Einsatz drehzahl geregelter Kompressoren	29
4.1.4	Absenkung des Netzdrucks	30
	Optimierungsansatz: Auslegung von Kompressorstationen	30
4.2	Druckluftaufbereitung	31
4.2.1	Trocknung der Druckluft	31
4.2.2	Auslegung	32
4.2.3	Regelmäßige Wartung zur Reduktion von Druckverlusten	32
4.3	Druckluftverteilung im Rohrleitungssystem	33
4.3.1	Optimierte Dimensionierung von Rohrleitungen	33
4.3.2	Optimierung der Netzinfrastruktur	33
4.3.3	Robustheit und Platzierung von Zwischenspeichern	34
4.3.4	Reduktion und Beseitigung von Leckagen im Hauptnetz	34
	Optimierungsansatz: Prototypen-Tools zur Netzauslegung	35
4.4	Anwendung	37
4.4.1	Korrekte Auslegung der Antriebe Vermeiden von Überdimensionierung	37
4.4.2	Vermeidung von Totvolumen Reduzierung Schlauchvolumen	37
4.4.3	Leckageortung und Beseitigung	38
4.4.4	Betriebsstrategien	38
4.4.4.1	Einfach wirkender Zylinder	39

4.4.4.2	Verwendung eines Kurzschlussventils	39
4.4.4.3	Zuluftdrosselung und gezieltes Abschalten	40
	Optimierungsansatz:	
	Nutzung der Expansionsenergie durch gezielte Ventilsteuerung	41
4.5	Dienstleistungen	43
	Optimierungsansatz:	
	Bewertung von Geschäftsmodellkonfigurationen fürs Leckagemanagement	44
5	Energieeffizienz elektrischer Antriebe	45
5.1	Energiebereitstellung und -verteilung	45
5.1.1	Niederspannungs-Gleichstromversorgung optimieren	46
5.1.2	Energieaufnahme im Standby reduzieren	46
5.2	Antriebe und Anwendung	47
5.2.1	Reibungsarme mechanische Komponenten einsetzen	47
5.2.2	Bewegte Massen minimieren	47
5.2.3	Überdimensionierungen vermeiden	48
5.2.4	Energieaufnahme in Bewegungspausen optimieren	48
5.2.5	Einsatz effizienter Motoren	49
5.2.6	Einsatz effizienter Servocontroller	49
5.2.7	Motorkabellänge minimieren	50
5.2.8	Nutzung der Bremsenergie	50
	Optimierungsansatz:	
	Zwischenspeichermodul zur Pufferung von Bremsenergie	51
5.2.9	Bewegungsprofil anpassen	52
	Optimierungsansatz:	
	Einfluss des Bewegungsprofils und der Zeit pro Bewegung	53
5.2.10	Schwingungen der Regelung reduzieren	54
	Optimierungsansatz:	
	Vergleich der Energieeffizienz von Antriebssystemen durch Simulation	55
6	Überblick Maßnahmen	56
6.1	Übersicht über die Maßnahmen in der pneumatischen Antriebs- und Handhabungstechnik	57
6.2	Übersicht über die Maßnahmen in der elektrischen Antriebs- und Handhabungstechnik	58
6.3	Der Weg zur energieeffizienten Antriebs- und Handhabungstechnik	59
7	Schlussfolgerungen Weitere Infos	60
7.1	Schlussfolgerungen	60
7.2	Kontakte	61
7.3	Veröffentlichungen aus dem Projekt	62

1.1 Das Verbundprojekt



EnEffAH steht für "**Energieeffizienz in der Produktion im Bereich Antriebs- und Handhabungstechnik**" und ist ein Verbundprojekt im Rahmen des Energieforschungsprogramms der Bundesregierung.

In Kooperation von Firmen und Instituten wurden im EnEffAH-Projekt grundlegende Energiesparkonzepte und Anlagenoptimierungsverfahren erarbeitet, die insbesondere in pneumatisch und elektrisch betriebenen Antriebs- und Handhabungssystemen zum Einsatz kommen können.

Projektziel

Das Ziel des Vorhabens ist die Entwicklung von Methoden, Werkzeugen und Produkten, um eine energieeffiziente Automatisierung zu gewährleisten. Die richtige Wahl der Technik (Effektivität), sowie der richtige Betrieb (Effizienz) sind maßgeblich für die Energieeffizienz und die Funktionalität. Ausgehend von einer Gesamtbetrachtung wurden im Bereich der Anwendung sowohl die pneumatische auch die elektrische Antriebstechnik inkl. Wirkungskette und die Verwendung dieser Technologien im Bereich Handhabung und Robotik betrachtet.

Die **pneumatische Antriebstechnik** nutzt als Antriebsmedium komprimierte Luft und zeichnet sich durch eine umweltschonende und einfache Bauweise aus. Bei der Druckluftherzeugung ist darauf zu achten, effiziente Kompressorstationen mit optimierter Druckluft-Aufbereitung und richtig ausgelegten Druckluftnetzen zur Weiterleitung und Verteilung der Druckluft einzusetzen. Synergien mit anderen Energiesystemen sollen ebenfalls Beachtung finden, z. B. Nutzung der Abwärme durch Wärmerückgewinnungssysteme.

Insbesondere bei Anwendungen, in denen über längere Zeit große Haltekräfte aufgebracht werden müssen, bietet die Pneumatik einen großen Vorteil gegenüber elektrischen Antrieben, da diese hierfür eine konstante Stromaufnahme erfordern und sich stark erwärmen.

Bisherige Optimierungs-Aktivitäten im Bereich der Druckluft sind vorzugsweise im Bereich der Erzeugung und Verteilung anzusiedeln. Die Druckluftan-

wendung selbst stand bisher nicht im Fokus der Betrachtungen. In diesem Projekt soll kein Bestandteil der pneumatischen Wirkungskette ausgeklammert werden. Auch der Bereich der Anwendung stellt einen wichtigen Bestandteil der Optimierungsmaßnahmen dar, gemäß der Überlegung:

Was nicht verbraucht wird, muss nicht erzeugt und verteilt werden.

Im Bereich der **elektrischen Antriebe** konzentrieren sich wirkungsgradoptimierende Maßnahmen bisher hauptsächlich auf Anwendungen mit einer hohen Auslastung der Maschinen, wie z. B. Pumpen mit Konstantlast im Dauerbetrieb, aber nicht auf einen Start-Stopp Betrieb, wie er beim Positionieren oder bei Pick-and-Place Anwendungen auftritt. Durch Verfahren der Energierückspeisung bzw. -zwischen-speicherung ist in diesem Anwendungsbereich ein großes Energieeinsparpotential vorhanden.

Allen energetischen Optimierungsmaßnahmen, die im Rahmen des EnEffAH-Projekts entwickelt wurden, liegt die **Gesamtbetrachtung des Systems** zu Grunde – im Fall der Pneumatik von der Druckluftherzeugung über die Aufbereitung und Verteilung bis hin zur Anwendung. Um die praktische Umsetzbarkeit der gewonnenen Erkenntnisse zu gewährleisten, wurden Methoden und Simulationswerkzeuge für die Unterstützung bei Planung und Anwendung entwickelt.

Durch Verwendung neuester Technologien und Methoden, welche auch die Integration von Systemelementen zu intelligenten mechatronischen Aggregaten erlauben, lassen sich **hochinnovative, flexible Produkte für den energieeffizienten Betrieb** in der Automatisierungstechnik erstellen.

1.2 Projektpartner



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. Einbaufertige Subsysteme gehören ebenso zum Programm wie abgestimmte Branchenlösungen für die Automobil-, Elektronik-, Nahrungsmittel- und Verpackungs-, Biotech-/Pharma- und die Prozessindustrie.

www.festo.com



Kaeser Kompressoren AG

1919 gegründet, ist Kaeser heute einer der weltweit führenden Kompressorenhersteller und Druckluftsystemanbieter mit rund 4000 Mitarbeitern. Das Lieferprogramm umfasst stationäre Schraubenkompressoren, Baukompressoren, Kolbenkompressoren, Druckluft-Managementsysteme, Dentalkompressoren, Vakuumpumpen, Drehkolbengebläse, Filter, Trockner, Druckluftwerkzeuge und -zubehör. Hinzu kommen Dienstleistungen wie Beratung, Planung und Druckluftbedarfsanalysen. Sie zielen auf Druckluftversorgung mit höchstmöglicher Energieeffizienz ab. Geleitet wird das Unternehmen von Dipl.-Wirtsch.-Ing. Thomas Kaeser und Dipl.-Wirtsch.-Ing. Tina-Maria Vlantoussi-Kaeser.

www.kaeser.com



Metronix Meßgeräte und Elektronik GmbH

Metronix ist spezialisiert auf die Entwicklung und Herstellung von digitalen Antriebsreglern für Servomotoren. Seit der Gründung im Jahr 1976 entwickelt und fertigt Metronix intelligente Industrieelektronik für die Bereiche Antriebstechnik und Mess- und Regeltechnik. Metronix hat ein leistungsfähiges Produktspektrum von digitalen Antriebsregelgeräten am Markt platziert. Metronix ist eine 100-prozentige Tochter des US-Unternehmens Cooper Industries und gehört zum Geschäftsbereich Cooper Tools. Cooper Tools hat mehrere Fertigungsstätten in Deutschland, Europa und den USA. Standort für die Entwicklung und Fertigung der Produkte von Metronix ist das Werk in Braunschweig mit 65 Mitarbeitern.

www.metronix.de



Institut für Systemdynamik - Universität Stuttgart

Die Forschung des Instituts konzentriert sich auf die Analyse der Dynamik von Systemen sowie die Möglichkeiten deren Beeinflussung. Dabei werden die Methoden der Systemtheorie, der Modellbildung, der Simulation, der Regelungstechnik und der Optimierung angewendet und weiter entwickelt. Gegenstand der Untersuchung sind Systeme aus sehr unterschiedlichen Gebieten wie der Mechatronik, der Prozesstechnik, dem Verkehr und der Biologie. Die Philosophie des Instituts zielt auf die Umsetzung der theoretischen Ergebnisse in praktischen Anwendungen ab. Der Erfolg basiert dabei auf der Förderung und Unterstützung durch viele öffentliche und industrielle Partner.

www.isys.uni-stuttgart.de



Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung ISI

Das Fraunhofer ISI erforscht die kurz- und langfristigen Entwicklungen von Innovationsprozessen und die gesellschaftlichen Auswirkungen neuer Technologien und Dienstleistungen. Die Arbeiten fußen auf einer breiten wissenschaftlichen Kompetenz sowie einem interdisziplinären und systemischen Forschungsansatz. Themenfelder umfassen unter anderem Fragestellungen zum Einsatz energieeffizienter Technologien und die Analyse und Bewertung innovativer Ansätze in der industriellen Produktion.

www.isi.fraunhofer.de



Institut für Leistungselektronik und Elektrische Antriebe - Universität Stuttgart

Das ILEA beschäftigt sich mit aktuellen Themen der Leistungselektronik, Regelungstechnik und der elektrischen Antriebe. Forschungsgebiete sind neben dem Thema Energieeffizienz unter anderem die Regelung von elektrischen Antrieben, insbesondere von Fahrzeugantrieben und Hochgeschwindigkeits-Drehstromantrieben, Methoden zur gerberlosen Lageerfassung, Verfahren zur hochdynamischen Messung großer Ströme, Schaltungstopologien und Steuerverfahren für Umrichter und Prozessstromquellen sowie die Zuverlässigkeit leistungselektronischer Systeme.

www.ilea.uni-stuttgart.de



Von links nach rechts

obere Reihe:

Steffen Hülsmann, Quoc Khanh Nguyen,
Matthias Doll, Gerhart Hobusch, Michael Ohmer

mittlere Reihe:

Hendrik Vieler, Rainer Elmland, Prof. Jörg Roth-Stielow,
Frederic Blank, Simon Hirzel, Joachim Dietrich

untere Reihe:

Susanne Krichel, Prof. Oliver Sawodny, Ute Weißfloch,
Ludwig Schlichtermann, Erwin Ruppelt

1.3 BMWi und Projektträger

Das **Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi)** definiert im Rahmen des 5. Energieforschungsprogramms „Innovation und neue Energietechnologien“ und im aktuellen 6. Energieforschungsprogramm „Forschung für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung“ die Forschungsförderung der kommenden Jahre.

Mit dem Förderprogramm soll auf die energie-wirtschaftlichen und energietechnischen Herausforderungen der Zukunft in Deutschland dahingehend reagiert werden, dass die Energieversorgung auf eine nachhaltige Basis gestellt wird. Um die Energieversorgung mittel- und langfristig zu sichern, sollen die erneuerbaren Energien gestärkt, der Energiebedarf gesenkt und die Energieeffizienz erhöht werden. Dabei kommt der Entwicklung klimaschonender und effizienter Technologien eine Schlüsselrolle zu.

Der **Projektträger Jülich** betreut im Auftrag mehrerer Bundesministerien wesentliche Teile der Forschungsförderung im Bereich Energie, unter anderem auch das Projekt EnEffAH. Darüber hinaus existieren weitere Förderprogramme zu erneuerbaren Energien, rationeller Energienutzung und Kraftwerkstechnologien.

Schließlich engagiert sich der Projektträger Jülich auch im europäischen und internationalen Forschungsmanagement. So ist er im Bereich Energie an vier ERA-NET-Projekten der Europäischen Kommission beteiligt, bei drei Projekten ist er Koordinator. Auf internationaler Ebene vertritt der Projektträger Jülich seine Auftraggeber in zahlreichen Gremien, darunter in der Internationalen Energieagentur (IEA) und der International Partnership for the Hydrogen Economy (IPHE).



1.4 Ziele dieser Broschüre

Die Steigerung der Energieeffizienz in der Antriebs- und Handhabungstechnik ist ein komplexes Themenfeld und umfasst ein breites Spektrum von technischen und organisatorischen Fragestellungen. In vielen Unternehmen besteht vor allem in Hinblick auf steigende Energiepreise und ein erhöhtes Umweltbewusstsein akuter Handlungsbedarf. Bereits mit einfachen Mitteln lassen sich Energieverbräuche deutlich reduzieren und Energiekosten senken. Allerdings bleiben bestehende Potentiale vielfach ungenutzt.

Diese Broschüre hilft industriellen Anwendern, die Energieeffizienz in eigenen Anwendungen zu hinterfragen und die Möglichkeiten zur Steigerung der Energieeffizienz besser zu verstehen und zu erkennen. **Neben einer Sensibilisierung für das Thema sollen Möglichkeiten zur Ausgestaltung einer energieeffizienten Antriebs- und Handhabungstechnik vermittelt werden.** Zusätzlich zu bekannten Fragestellungen finden gleichzeitig Forschungsergebnisse des EnEffAH-Projekts Eingang in diese Broschüre und geben Hinweise zum besseren Verständnis der Energieeffizienz in der Antriebs- und Handhabungstechnik.

In der Broschüre wird das Thema Energieeffizienz technologieübergreifend unter Einbeziehung sowohl der pneumatischen als auch der elektrischen Antriebs- und Handhabungstechnik behandelt.

Gleichzeitig zielt die Broschüre darauf ab, nicht ausschließlich Teilbereiche wie Energiebereitstellung und Energienutzung zu thematisieren, sondern die **gesamte Wirkungskette** inklusive Aufbereitung und Verteilung mit Blick auf das Gesamtsystems zu betrachten.

Im Rahmen des Projekts hat sich wiederholt gezeigt, dass Fragestellungen zur Steigerung der Energieeffizienz im Gesamtzusammenhang zu sehen sind und Randbedingungen oft im Detail erfasst werden müssen, um abschließende Aussagen zu Effizienzpotentialen, Einsparungen und zur Wirtschaftlichkeit zu erhalten. Deshalb ist diese Broschüre lediglich als **Orientierungshilfe** zu verstehen, wobei Möglichkeiten und Einsparpotentiale im Einzelfall stets vor dem Hintergrund den jeweiligen Gegebenheiten diskutiert werden müssen.

2.1 Bedeutung der Energieeffizienz für Unternehmen

2

Die energieeffiziente Ausgestaltung von Produktionssystemen gewinnt nicht nur durch Fragenstellungen aus dem Bereich des Klimawandels, der Verknappung fossiler Energieressourcen oder durch politische Zielesetzungen an Bedeutung. Oft bedeutet die Steigerung der Energieeffizienz eine Verbesserung der eigenen Wettbewerbsfähigkeit: geänderten Kundenanforderungen für energieeffiziente Maschinen- und Anlagentechnik kann Rechnung getragen werden, innerbetriebliche Energieeinsparziele können erreicht werden und oft verspricht die Auseinandersetzung mit dem Thema Energieeffizienz auch deutliche Kosteneinsparungen. Darüber hinaus lassen sich zusätzliche Vorteile erreichen, beispielsweise werden Prozesse transparenter und Verbesserungen auch außerhalb der Energieproduktivität können erzielt werden. Aus unternehmerischer Sicht sind insbesondere vielversprechend:

- » Die Verringerung der Energieverbräuche und Energiekosten,
- » die Verbesserung der Transparenz der Energieströme im eigenen Unternehmen,
- » die Reduzierung der Abhängigkeit von der Energieversorgung und von Energiepreisschwankungen,
- » die Erfüllung von Kundenanforderungen und bessere Kundenbindung sowie
- » die Verbesserung der Außerdarstellung des eigenen Unternehmens.

Effizienzmaßnahmen sind dabei vielschichtig und können sich vom Austausch einer Komponente über die Umgestaltung des Antriebssystems bis hin zur kompletten Prozessumgestaltung erstrecken. Bereits durch einfache organisatorische Maßnahmen wie das Abschalten von Anlagen bzw. Teilen von diesen oder regelmäßige Wartungsintervalle können deutliche Verbesserungen erzielt werden. Dabei sollte das Thema Energieeffizienz bereits frühzeitig in den Planungsprozess einer Anlage einbezogen werden, um die bestmöglichen Ergebnisse zu erreichen.

Die Erfahrung zeigt, dass durch Energieeffizienzmaßnahmen in der Praxis zwar oft erhebliche wirtschaftliche Potenziale existieren, die es zu erschließen gilt, diese jedoch häufig nicht umgesetzt werden können. Die Gründe hierfür sind zahlreich und umfassen Aspekte wie:

- » Einen **Mangel an Bewusstsein zu Ursache und Höhe von Energieverbräuchen und Energiekosten** und auch zu möglichen Maßnahmen für Einsparungen.
- » Eine **Fokussierung auf Teilsysteme**, statt der Betrachtung des Systems in seiner Gesamtheit. Dadurch werden Systemteile oft unabhängig voneinander optimiert, ohne die Gesamteffizienz des Systems im Auge zu behalten.
- » Eine **Abwägung zwischen unterschiedlichen Anlagen und Komponenten** erfolgt oft allein auf der Grundlage der Investitionskosten. Ein günstiger Anschaffungspreis geht jedoch häufig zu Lasten der Effizienz. Ineffiziente Komponenten führen langfristig zu hohen Energiekosten, die über die Lebensdauer der Anlage zu weitaus höheren Gesamtkosten führen können.
- » Eine Festsetzung einer vergleichsweise **kurzen Amortisationszeit** (bis zu 3 Jahre), ohne die tatsächliche Gesamtnutzung zu betrachten. Für eine angemessene Bewertung sollte neben der Amortisationszeit auch die interne Verzinsung berücksichtigt werden, um eine adäquate Aussage zur Wirtschaftlichkeit zu erhalten.
- » Eine **unzureichende Bildung von Anreizen**: Insbesondere im Bereich einer zentralen Druckluftversorgung tritt das Problem auf, dass pauschale Zurechnung von Energiekosten zu einzelnen Kostenstellen falsche Anreize setzt. So setzt beispielsweise der Einkauf oder das Facility Management auf eine möglichst preiswerte Beschaffung der Kompressorstationen, während die Produktion in Form einer Kostenumlage die verhältnismäßig hohen Energiekosten tragen muss.

Zur Überwindung dieser Hemmnisse kommt der Bewusstseinsbildung eine hohe Bedeutung zu. Typische Gegenmaßnahmen können durch Schulung und Weiterbildung von Mitarbeitern, die Visualisierung von Energieverbräuchen einzelner Komponenten oder die Implementierung von betriebsinternen Anreizsystemen erreicht werden. Der Gedanke der Energieeffizienz muss dabei von allen Bereichen in einem Unternehmen (Produktion, Wartung, Beschaffung, etc.) mitgetragen werden. Der Unternehmensleitung kommt dabei eine zentrale Rolle zu, da sie die entsprechenden Rahmenbedingungen für die Auseinandersetzung mit dem Thema und für eine Verankerung der Energieeffizienz in der Unternehmenskultur schaffen muss.

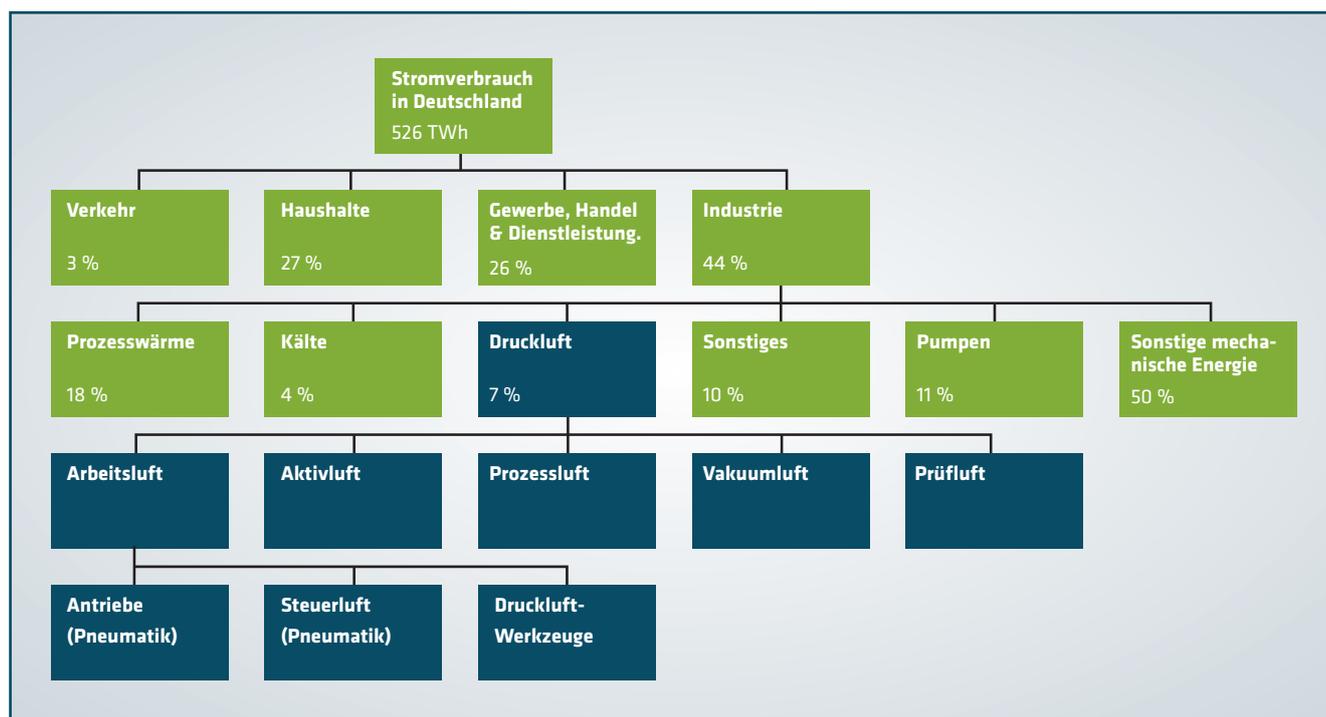
2.2 Abgrenzung der Antriebs- und Handhabungstechnik

Ein Blick auf die Stromverbräuche der Industrie in Deutschland unterstreicht die Rolle der Antriebs- und Handhabungstechnik zur Steigerung der Energieeffizienz. **Im Jahr 2008 entfiel auf die Industrie ein Gesamtstromverbrauch von rund 233 Milliarden Kilowattstunden oder 44 % der deutschen Stromnachfrage.**

Der Antriebstechnik kommt dabei eine hohe Relevanz zu: mehr als zwei Drittel der industriellen Stromnachfrage entfallen auf die Bereitstellung mechanischer Energie, darunter rund 17 Milliarden Kilowattstunden alleine für die Druckluftbereitstellung. Der Begriff „Antriebstechnik“ umfasst dabei unterschiedlichste Anwendungen von Motoren mit Leistungsaufnahmen von mehreren 100 Kilowatt bis hin zu Kleinanwendungen mit niedrigen Wattzahlen oder sehr geringen Druckluftverbräuchen.

Pneumatische Antriebstechnik als Teil der Druckluft

Druckluft kann für eine Vielzahl unterschiedlicher Anwendungen genutzt werden. Sie kann als Arbeitsluft zum Antrieb von Werkzeugen und pneumatischen Maschinen, als Aktivluft zum Materialtransport, als Prozessmedium, zur Vakuumherzeugung oder für Prüfanwendungen eingesetzt werden. Die Bedeutung dieser Verwendungszwecke schwankt je nach Branche und Unternehmen stark und wurde in der Vergangenheit zusammen betrachtet, was bei Technologievergleichen (pneumatische bzw. elektrische Antriebs- und Handhabungstechnik) zu Verzerrungen geführt hat. Der überwiegende Teil der in der Industrie verwendeten Druckluft wird für Druckluft-Werkzeuge, Aktivluft oder Prozessluft eingesetzt. Zwar liegen keine nachgewiesenen Anhaben zum Energieverbrauch 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 Durchschnittswert allerdings stark variieren.



Klassifikation von Druckluft nach ihrem Verwendungszweck	
Drucklufttyp	Beschreibung
Arbeitsluft	Arbeitsluft bezeichnet Luft, die zum Antrieb von Werkzeugen und pneumatischen Maschinen verwendet wird. Hierbei wird die Energie der Druckluft in mechanische Energie überführt. Grundsätzlich lassen sich alle Zylinderanwendungen dieser Kategorie zuordnen. Steuerluft (z. B. Steuerung von Ventilen, Schiebern, Klappen, ...) wird ebenfalls der Arbeitsluft zugerechnet.
Aktivluft	Aktivluft bezeichnet Luft, die für die Weiterführung von Stoffen, Medien o.Ä. verwendet wird. Aktivluft lässt sich ferner 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 Zwecke der Oberflächenbehandlung).
Prozessluft	Prozessluft bezeichnet Luft, die zur Verfahrens-/Prozesseinbindung verwendet wird. Hierunter fällt auch die reine Luftverwendung, wie bspw. zur Trocknung, Kühlung oder Belüftung.
Vakuumluf	Vakuumluf bezeichnet Luft, die zur druckluftgetriebenen Unterdruckerzeugung verwendet wird.
Prüfluf	Prüfluf wird für Prüf- und Kontrollzwecke verwendet.

Über alle Anwendungszwecke der Druckluft hinweg wird im Einzelfall von einem wirtschaftlichen Einsparpotential von bis zu 50 % des Gesamtenergieverbrauchs ausgegangen. Dabei ist die Frage nach dem Energieverbrauch eng mit dem Aspekt der Wirtschaftlichkeit verbunden, da von den Lebenszykluskosten einer Druckluftstation rund 70 % auf den Energieverbrauch entfallen. Allein Leckagen verursachen in Deutschland bis zu 30 % des Druckluftverbrauchs, was sich für einzelne Unternehmen schnell zu Energiekosten von mehreren zehntausend Euro pro Jahr addieren kann.

Ebenso vielfältig sind die Einsatzgebiete von Elektromotoren, die sowohl als Antriebsaggregate für Kompressoren, Zentrifugen, Pumpen, Ventilatoren als auch für Linearachsen in der Automatisierungstechnik zum Einsatz kommen. Auch bei typischen Elektromotoren sind deutliche Einsparungen möglich. Neben der Nutzung von hocheffizienten Motoren wird beispielsweise im Einsatz von frequenzvariablen Elektroantrieben ein signifikantes Verbesserungspotential (bis zu 50 %) gesehen.

Im Rahmen des EnEffAH-Projekts und in dieser Broschüre stehen Antriebe im Zentrum, die für die industrielle Automatisierung im Start-Stopp-Betrieb eingesetzt werden, wie Linearachsen oder Schwenkantriebe sowie deren respektive Wirkungsketten, darunter die Druckluftversorgung, die Verteilung und die Aufbereitung. Typische Anwendungen umfassen Funktionen des Bewegens und Sicherns als typische Handhabungsfunktionen nach der VDI 2860. Sie sind in diesem Sinne von Anwendungen wie beispielsweise handgeführten Werkzeugen oder stationär betriebenen Elektromotoren abzugrenzen.

3.1 Überblick Gesamtsystem

3

Eine Vielzahl von Anwendungen in der Antriebs- und Handhabungstechnik können mittels verschiedener Technologien umgesetzt werden – pneumatisch, elektrisch oder hydraulisch. **Im Projekt EnEffAH liegt der Fokus auf der pneumatischen und elektrischen Antriebstechnik**, d.h. dem Einsatz von Druckluft und elektrischem Strom als Energieträger. Jede Technologie hat einen spezifischen Aufbau, benötigt unterschiedliche Infrastruktur bzw. Ansteuerungskonzepte und hat jeweils unterschiedliche Vorteile bei bestimmten Anwendungen. Ein direkter Vergleich dieser beiden Technologien ist daher immer von dem jeweiligen konkreten Anforderungsfall abhängig und lässt sich nicht verallgemeinern. Im Folgenden werden zunächst die beiden Systeme mit ihren einzelnen Elementen vorgestellt. Anschließend werden spezifische Vorteile der Technologien präsentiert.

3.1.1 Elektrisches Gesamtsystem

Die Struktur des Gesamtsystems elektrischer Antriebe unterscheidet sich wesentlich von der Struktur der Pneumatik. Energiebereitstellung und -verteilung sind – im Vergleich zu pneumatischen Systemen – wesentlich einfacher, wobei der Aufbau des eigentlichen Antriebssystems oft komplexer ist. Daher sind elektrische Antriebssysteme in der Anschaffung oft teurer als das pneumatische Äquivalent mit ähnlicher Funktionalität.

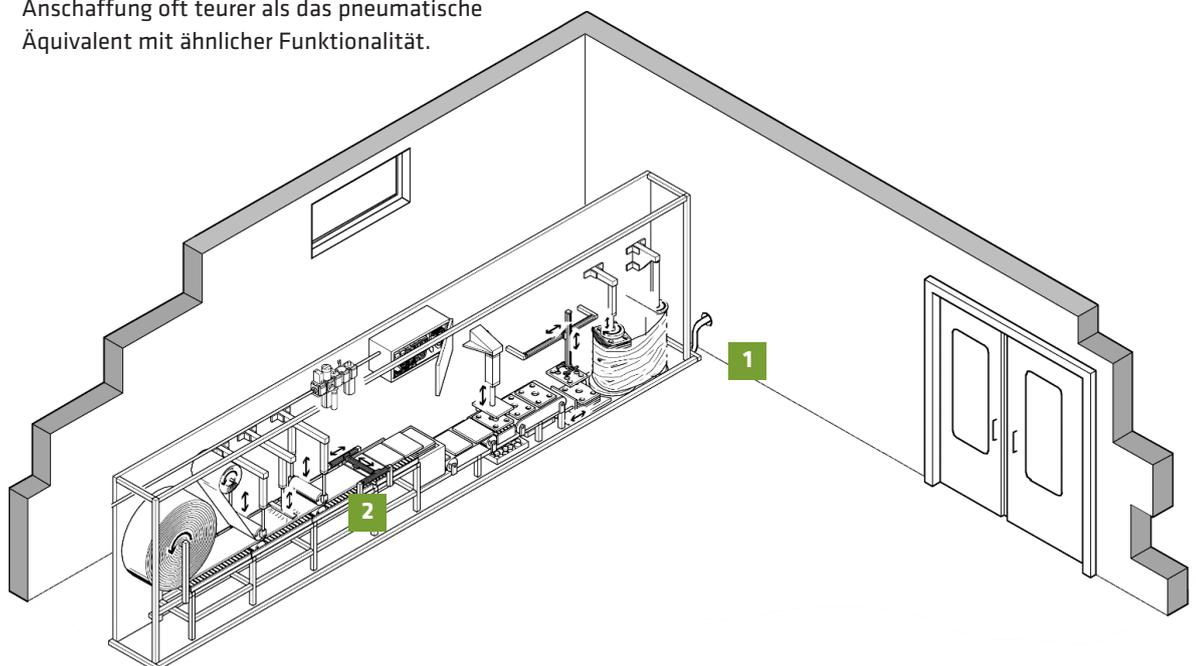
1 Energiebereitstellung und -verteilung

Die elektrische Energie wird meist durch einen externen Energielieferanten bereitgestellt, eine lokale Eigenversorgung ist eher die Ausnahme. Die Energieverteilung innerhalb der Gebäude erfolgt über elektrische Leitungen, wobei geringe Verluste auftreten. Zusätzlich zur Netzspannung benötigt ein Teil der elektrischen Antriebssysteme eine Niedervolt-Gleichspannung, welche dezentral über Netzteile bereitgestellt wird.

Der durchschnittliche Energiebezugspreis für ein Unternehmen in Deutschland liegt aktuell bei etwa 10 Cent/kWh.

2 Anwendung

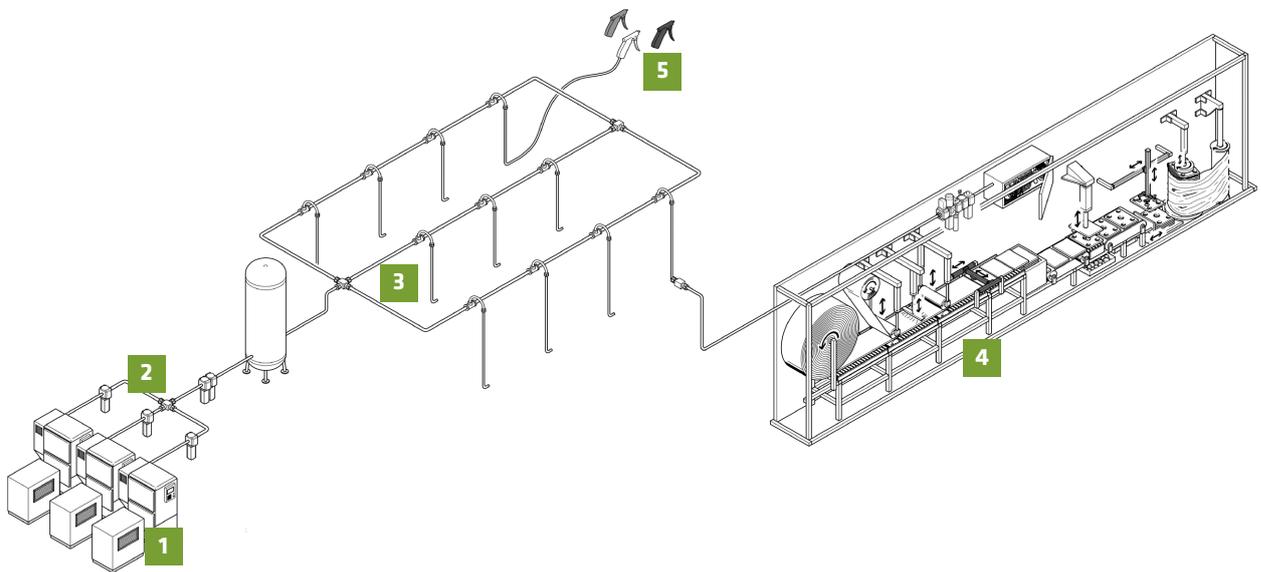
Die Anwendung kann vielfältig sein, jedoch bestehen die meisten Systeme aus drei wesentlichen Komponenten: Ein Servocontroller oder eine Ansteuerung regelt oder steuert das System. Ein elektrischer Aktor, meist ein rotierender oder linearer Elektromotor, wandelt die elektrisch aufgenommene Leistung in mechanische Antriebsleistung um. Als dritte Komponente erzeugt die Mechanik (eine Führung, eine Lagerung oder auch ein Getriebe) daraus die gewünschte Bewegung.



3.1.2 Pneumatisches Gesamtsystem

Pneumatische Systeme benötigen eine – im Vergleich zu elektrischen Systemen – aufwendigere Infrastruktur im Bereich der Erzeugung, Aufbereitung und Verteilung. Für den Betrieb eines Druckluftnetzes werden Kompressoren, Kühler, Trockner,

Filter, Zwischenspeicher und weitere Komponenten benötigt. Im Gegensatz dazu ist der eigentliche Antrieb einfach und robust (hinsichtlich extremer Einsatzbedingungen) aufgebaut. Er hat eine hohe Leistungs-/Kraftdichte und ist daher kleiner bauend.



1 Drucklufterzeugung

Im Kompressor wird Umgebungsluft auf ein gegenüber der Umgebung höheres Druckniveau gebracht. Dabei fallen thermodynamisch bedingt große Wärmemengen an, die über einen geeigneten Wärmetauscher einer sinnvollen Verwendung zugeführt werden können, beispielsweise als Heizwärme oder Prozesswärme. Am eingebauten Nachkühler wird die Druckluft anschließend auf annähernd Umgebungstemperatur abgekühlt.

2 Druckluftaufbereitung

Die erzeugte Druckluft wird getrocknet und gefiltert. Restölanteile sowie Staubpartikel werden entsprechend der gewünschten Druckluftqualitätsklasse entfernt.

3 Druckluft-Verteilung

In einem Hauptnetz wird die Druckluft im gesamten Werk verteilt. Ein Speicher dient als Puffervolumen um kurzfristige Schwankungen im Druckluft-Ver-

brauch ausgleichen zu können. Verschiedene Netztopologien (z. B. Ringleitungen, Sternleitungen) gewährleisten eine möglichst effiziente Verteilung.

4 Anwendung

In der Anwendung wird die Druckluft genutzt um – neben anderen Funktionen – pneumatische Zylinder anzutreiben, die Aufgaben der Antriebs- und Handhabungstechnik verrichten.

5 Aktivluft/Sperrluft und Druckluft-Werkzeuge

Druckluft-Werkzeuge wie beispielsweise Druckluftschrauber verbrauchen große Mengen von Druckluft und sind nur dort einzusetzen, wo es erforderlich ist.

Ein weiterer großer Verbraucher ist die sogenannte Aktiv- oder Prozessluft. Dabei wird Druckluft nicht zum Antrieb oder zur Handhabung genutzt sondern erfüllt andere Funktionen (z. B. Sperrluft, Überdruck in einer Maschine, Aufblasen von Beuteln, Kühlen von Bauteilen).

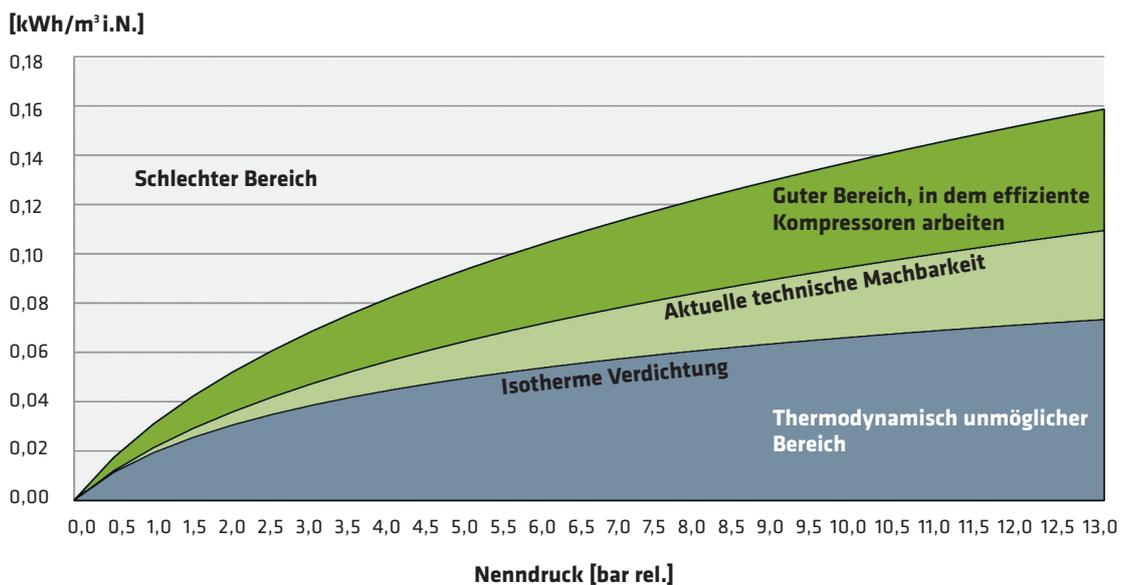
Kosten für Druckluft

Untersuchungen der Europäischen Kommission aus dem Jahr 2009 zeigen eine Preisspanne von 0,6 - 10 Cent pro Norm-Kubikmeter in Europa (1000 Liter bei 0 bar relativ (=1 bar absolut) verdichtet auf 7 bar relativ). Die hohen Schwankungen hängen von vielen Faktoren ab, die wichtigsten darunter sind:

- » Energieeffizienz des Systems – gut ausgelegte große Kompressorstationen benötigen nur rund 0,1 bis 0,12 kWh/m³ im Normzustand bei 7 bar relativ (Überdruck).
- » Art der eingesetzten Kompressoren und der Kompressorsteuerung
- » Größe des Unternehmens bzw. die Größe der Kompressoren
- » Kosten für Energie

Erfahrungen zeigen, dass aktuell bei einer Verdichtung auf 8 bar absolut ein Wert von 1,5 bis 2 Cent je Kubikmeter im Normzustand bei effizient ausgelegten größeren Anlagen eine gute durchschnittliche Grundlage für Beispielrechnungen darstellt. Umwandlungs-, Strom- und Wärmeverluste im Kompressor sowie die Anschaffungs- (~13 %) und Wartungskosten (~12 %) für die Kompressoren und die Druckluftaufbereitung sind in diesem Wert bereits berücksichtigt. Er kann somit allgemeingültig verwendet werden und bietet eine Vergleichsgrundlage der Kosten von pneumatischer und elektrischer Energie.

Spezifische Leistungsaufnahme bei der Druckluftkompression



Druckangaben – absolut oder relativ?

Bei der Angabe eines Druckniveaus in der Drucklufttechnik wird in vielen Fällen nicht explizit erwähnt, ob es sich hierbei um den absoluten Druck (bezogen auf Vakuum) oder einen relativen Druck (bezogen auf Umgebungsdruck) handelt. In der Regel werden relative Druckangaben genutzt. Die zusätzliche Angabe des verwendeten Bezugsniveaus schafft hier Klarheit.

Einheiten von Druckluft

Druckluftmengen werden in Litern (l) bzw. Kubikmetern (m³) angegeben. Bei dem am häufigsten gebrauchten und deswegen auch in dieser Broschüre verwendeten Ansatz wird die Druckluftmenge immer in Normkubikmetern (m³ i.N. (im Normzustand)) angegeben. Dabei handelt es sich um einen Kubikmeter Luft bei Normbedingungen (0°C, 1,01325 bar, 0 % Luftfeuchte nach DIN 1343) der dann vom Kompressor auf den Betriebsdruck (meist 7 bar relativ – also Überdruck) verdichtet wird. Das Luftvolumen (Betriebsvolumen) reduziert sich entsprechend während der Verdichtung.

Ein Luftvolumenstrom (z. B. ein Luftverbrauch) kann angegeben werden, wenn eine Druckluftmenge pro Zeiteinheit beschrieben wird. Die Einheit beträgt meist Normkubikmetern (oder Normliter) pro Minute (m³/min i.N oder l/min i.N.).

Neben dem Normvolumen nach DIN 1343 existieren weitere Normen, die zur Beschreibung des Luftzustands verwendet werden und die sich in den Bezugspunkten unterscheiden. Dies führt oft zu Verwechslungen, welche zu Fehlinterpretationen führen können. So existiert neben DIN 1343 das Normvolumen nach DIN/ISO 2533 oder auch nach ISO 6358 (jeweils leicht andere Bezugspunkte bzgl. Temperatur und Druck). Zudem werden Fördervolumen von Kompressoren in Normalvolumen nach ISO 1217 bezogen auf den Ansaugzustand angegeben. Die Norm definiert diesen als 1 bar, 20°C, 0 % Luftfeuchte.

Eine Umrechnung der verschiedenen Volumenangaben ist in der DIN 1343 definiert.

Optimierungsansatz

Exergieflussdiagramm

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 dabei verwendeten 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. In pneumatischen Systemen ist jedoch insbesondere der Druck die treibende Kraft zur Verrichtung von Arbeit. Hohe Temperaturen führen zwar zu einem hohen Energiegehalt im System, die Energie kann jedoch pneumatisch nicht genutzt werden.

Dies zeigt, dass es nicht möglich ist, mithilfe von Energiebetrachtungen eine fundierte Aussage über die pneumatische Nutzbarkeit eines Zustands zu treffen.

Eine Methode, mit der die genannten Unzulänglichkeiten überwunden werden können, ist die Verwendung einer anderen thermodynamischen Größe, der sogenannten „**Exergie**“.

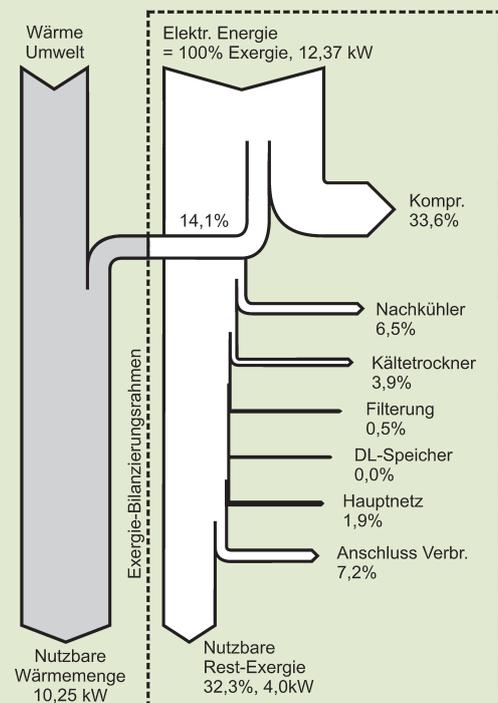
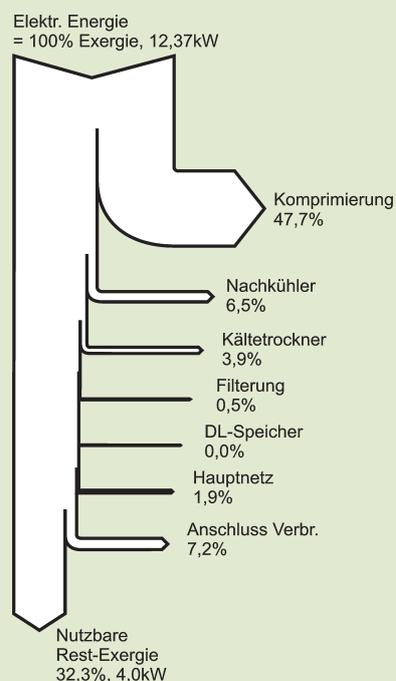
Sie bezeichnet denjenigen Energieanteil eines Systems, der Arbeit verrichten kann, wenn das System in ein Gleichgewicht mit der Umgebung gebracht wird. Die Exergie bildet also den nutzbaren Anteil der Gesamtenergie, nicht nutzbare Anteile werden Anergie genannt. Die Exergie ist eine Zustandsgröße aber keine Erhaltungsgröße, d.h. Exergie kann in Anergie umgewandelt 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_{atm} und die Umgebungstemperatur T_{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 zu

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

Durch die Exergie lassen sich wichtige Ereignisse in der Wirkungskette erfassen: Verbrauch von elektrischer Energie durch einen Prozess, auftretende Druckänderung, Temperaturänderung und Veränderung des Massenstroms, z. B. verursacht durch Leckage. Der Vergleich zweier Zustände erlaubt die Berechnung des Exergieverlustes zwischen zwei Zuständen. Setzt man diesen in prozentualer Relation zur Ausgangsexergie, so erhält man den prozen-

tualen Verlust an jeder Station der Wirkungskette. Die Abbildung zeigt auf der linken Seite beispielhaft ein Exergieflussdiagramm einer pneumatischen Anlage. Der größte Anteil der Exergie geht demzufolge bei der Komprimierung verloren – im hier aufgeführten Beispiel 47,7 %. Am Ende der Wirkungskette steht für die Anwendung eine nutzbare Restexergie von 32,3 % 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 daher die Integration eines Wärmerückgewinnungssystems. Die Wärme kann dann z. B. als Raumheizluft oder als Prozesswärme verwendet werden.

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 oben). Im hier gezeigten Beispiel ergibt sich damit neben der nutzbaren Exergie am Ende der Wirkungskette eine nutzbare Wärmemenge von 10.25kW.

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

3.2 Auswahl der geeigneten Technologie

Die Auswahl der für eine Applikation eingesetzten Technologie ist ein wichtiger Entscheidungspunkt.

Prinzipiell können die meisten Applikationen in der Antriebs- und Handhabungstechnik sowohl pneumatisch als auch elektrisch realisiert werden. Eine zunehmende Standardisierung einzelner Komponenten macht dabei den Austausch der Technologien möglich. Die Auswahl der für eine spezifische Applikation geeigneten Technologie spielt für die

gesamte Effizienz der Anlage eine wichtige Rolle. Beide Technologien haben dabei spezifische Vor- und Nachteile, weswegen keine generelle Aussage über die Vorteilhaftigkeit einer Technologie möglich ist. Neben der eigentlichen Funktion sind Faktoren wie benötigte Kraft, Beschleunigung, Zykluszeit, Genauigkeit, Haltedauer und viele weitere für die richtige Auswahl der effizienteren Technologie bzw. Antriebslösung notwendig.

	Pneumatik	Elektrik
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> · Robustheit und einfacher konstruktiver Aufbau · Belastbarkeit und Überlastfähigkeit · Niedriges Leistungsgewicht und hohe Leistungsdichte · Kontinuierliche Spitzenkraft · Leistungsloses Halten · Zentrale Wärmeproduktion, die zu großen Teilen nutzbar ist 	<ul style="list-style-type: none"> · Effiziente Umwandlung von elektrischer in kinetische Energie · Nutzung von Bremsenergie möglich (Energierückgewinnung und Speicherung) · Hohe Dynamik durch schnellen Kraftaufbau · Hohe Positioniergenauigkeit · Gute Regelbarkeit · Hohe Flexibilität durch Vorgabe der genauen Bewegung · Hohe Laststeifigkeit · Unempfindlichkeit der Regelung gegenüber Störeinflüssen
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> · Lauteres Geräusch (Abluftfassung) · Kondensat (Trocknung) · Luftverbrauchskosten der Komplettanlage mit Aktivluft und Prozessluft und Druckluftwerkzeugen. 	<ul style="list-style-type: none"> · Dezentrale Erwärmung der Komponenten, fast keine Nutzung möglich, teilweise Kühlung von Schaltschränken notwendig

Anhand dieser Vor- und Nachteile, sowie unter Berücksichtigung der Betriebsweisen (geregelt/gesteuert), ist ersichtlich, dass die beiden Technologien nur schwer direkt miteinander verglichen werden können. Aus diesem Grund werden die beiden Technologien auch als Komplementärtechnologien bezeichnet. Unter Berücksichtigung aller oben

genannten Punkte kann die Auswahl einer Technologie nicht nur anhand einer energetischen Betrachtung erfolgen, sondern es spielen auch weitere Eigenschaften der Technologien eine wichtige Rolle, welche bei der Entscheidung berücksichtigt werden müssen:

Technische Anforderungen	Hubbereich, Geschwindigkeit, Kraft, Überlastfähigkeit, Belastbarkeit, Leistungsgewicht, Genauigkeit, Regelverhalten / dynamisches Verhalten, Laststeifigkeit
Umgebung	Staub, Feuchtigkeit, elektromagnetische Verträglichkeit, Robustheit / Empfindlichkeit, Explosionsschutz
Anschaffungskosten	Preis, Inbetriebnahme, Montage, Stromversorgung, Netzteil/Transformator Kompressor, Druckluftnetz, Luftaufbereitung, Lebensdauer
Betriebskosten	Energiekosten, Wartung, Bedienung

Gegenüberstellung der Technologien anhand energetischer Gesichtspunkte

Bezüglich des Energieverbrauchs kann keine allgemeingültige Aussage getroffen werden. Der Energieverbrauch hängt immer direkt von den verwendeten Komponenten ab, welche in einem vorgelagerten Auslegungsprozess bestimmt wurden. Obwohl sich die Antriebscharakteristiken der beiden Technologien deutlich unterscheiden, gibt es zahlreiche Versuche die beiden Technologien direkt miteinander zu vergleichen. Diese Vergleiche fallen sehr unterschiedlich aus, in Abhängigkeit der für den Vergleich gewählten Randbedingungen. Dabei gibt es im Wesentlichen zwei Aspekte, weshalb die Vergleiche oft nicht korrekt durchgeführt wurden:

- » Vergleich bei nicht praxisgerechten Voraussetzungen
- » Nicht vergleichbare Auslegung der Antriebskomponenten, was für den Vergleich eine entscheidende Rolle spielt.

So wird z. B. für Elektromotoren ein Wirkungsgrad von 80 % – 90 % angesetzt, während für die Druckluft oft von einem Wirkungsgrad von ca. 6 % - 10 % ausgegangen wird. Aus diesen Angaben wird fälschlicherweise der Schluss gezogen, dass Pneumatik-Applikationen um das 8 bis 15-fache mehr an Energie als die korrespondierende elektrische Lösung benötigen. Hierbei wird jedoch vergessen, dass die für elektrische Antriebe getroffenen Annahmen nur für stationär betriebene Motoren (z. B. Pumpen, Lüfter, etc.) Gültigkeit besitzen. Für den Start-Stopp-Betrieb, wie er in der Handhabungstechnik üblich ist, sind die Wirkungsgrade elektrischer Komponenten wesentlich geringer. Daher ist ein Vergleich mit der Pneumatik auf genannter Datenbasis nicht zulässig. Zusätzlich sei erwähnt, dass die Berechnung des Wirkungsgrads der pneumatischen Anwendung mit einem Ergebnis von 6-10% oft ebenfalls sehr fragwürdig ist (siehe „Energieflussdiagramm“ – Seite 20).

Weitere Herausforderungen bei einer vergleichenden Betrachtung der beiden Technologien sind sowohl die Betriebsweise als auch die getroffenen Randbedingungen.

Betriebsweise

Während elektrische Antriebe stets geregelt betrieben werden, werden pneumatische Antriebe hauptsächlich gesteuert betrieben. Hier gibt es auf beiden Seiten viele Einflussfaktoren, welche die Energieaufnahme beeinflussen.

Randbedingungen

Wenn es genaue Anforderungen an die Trajektorie (d.h. an das Bewegungsverhalten) des Antriebs gibt, wie eine maximale Geschwindigkeit oder eine maximale Beschleunigung, ist dies mit einem geregelten elektrischen Antrieb einfach umsetzbar. Bei gesteuerten Pneumatikantrieben kann dies teilweise nur über die Auslegung erreicht werden, was u.U. zu einem unverhältnismäßig hohen Luftverbrauch führt. Hier ist zu untersuchen, ob gewisse Anforderungen wirklich relevant sind oder nicht.

Der Hauptunterschied zwischen elektrischen und pneumatischen Antrieben besteht jedoch darin, dass die Pneumatik im Standardbetrieb sehr hohe Endlagenkräfte aufweist. Diese Endlagenkraft ist bei elektrischen Antrieben aufgrund des geregelten Betriebs nicht vorhanden, so dass das Bewegungsverhalten nicht vergleichbar ist. Eine Vergleichbarkeit wird nur dann erreicht, wenn beide Antriebe dieselbe Endlagenkraft aufweisen (z. B. keine Endlagenkraft oder volle Endlagenkraft).

Aufteilung eines Positioniervorgangs in die Handhabungsfunktionen „Bewegen“ und „Halten“

Ein Positioniervorgang besteht grundsätzlich aus der Handhabungsfunktion „Bewegen“. Falls in der Endlage zusätzlich eine Kraft aufgebracht werden muss, kommt die Handhabungsfunktion „Halten“ hinzu. Bei dem Vergleich des Energieverbrauchs für einen Positioniervorgang müssen daher beide Handhabungsfunktionen berücksichtigt werden.

Handhabungsfunktion „Bewegen“

Die Aufgabenstellung besteht darin, eine Masse innerhalb einer vorgegebenen Zeit über eine gewisse Distanz zu bewegen. Die Randbedingungen (geforderte Bewegungszeit, Geschwindigkeit, Beschleunigung, ...) beeinflussen die Energieaufnahme elektrischer und pneumatischer Antriebssysteme auf unterschiedliche Weise. Daher sind keine allgemeinen Aussagen über die Energieeffizienz möglich.

Für das „Bewegen“ benötigt ein elektrisches Antriebssystem eine gewisse Energiemenge, welche von mehreren Faktoren abhängt. Es gehen die zu bewegende Masse und die Verluste der Komponenten ein, aber auch die Parameter der Bewegung an sich, wie z. B. die Bewegungsdauer. Durch die geregelte Betriebsart ist die Bewegung direkt beeinflussbar und damit auch die Energieaufnahme.

Ein pneumatisches Antriebssystem benötigt im Gegensatz dazu eine gewisse Druckluftmenge für die Bewegung, welche in eine Energiemenge umgerechnet werden kann. Die zu bewegende Masse und Reibung der Komponenten spielen hier nur eine untergeordnete Rolle. Die Bewegung ist nicht genau beeinflussbar, da sie von der Auslegung und der Einstellung von Drosselungen abhängt. Im üblichen gesteuerten Betrieb wird der Zylinder stets komplett gefüllt, was im Vergleich zu elektrischen Antriebssystemen zu einem verzerrten Ergebnis führen kann, da der Hauptteil der für den Zylinder verwendeten Druckluft für den Endlagendruck (Funktion „Halten“) verwendet wird. Wenn das reine „Bewegen“ untersucht und verglichen werden soll, könnte der Zylinder derart angesteuert werden, dass er am Hubende kraftlos geschaltet ist. Unter diesen Voraussetzungen kann sich der Luftverbrauch eines Pneumatikzylinders um bis zu 85 % reduzieren. Praktisch kann dies erreicht werden, indem während der Bewegung des Kolbens die Zylinderkammern gezielt be- und entlüftet werden. Dies erfordert geeignete Schaltstrategien, ermöglicht jedoch eine bessere Ausnutzung der in der Druckluft vorhandenen Energie, insbesondere der Expansionsenergie (s. Kap. 4.4.4 und Abschnitt 4.4.4.3). Diese Schaltstrategien werden in der Praxis jedoch bisher nicht eingesetzt.

Handhabungsfunktion „Halten“

Die Aufgabenstellung besteht darin, im ausgefahrenen Zustand eine gewünschte Kraft über eine bestimmte Zeitdauer aufzubringen, um z. B. eine Masse zu halten oder eine Störkraft auszugleichen. Während die Pneumatik aufgrund der gesteuerten Betriebsweise stets eine maximale Kraft in der Endlage aufweist, ist dort der elektrische Antrieb meist kraftlos (sofern keine Störkräfte wirken). Die Pneumatik liefert dementsprechend zusätzlich zu einer Bewegung eine in die Endlage gerichtete maximale Kraft. Diese Kraft ist immer vorhanden – egal ob sie benötigt wird (z. B. zum Halten einer Masse) oder nicht. Der elektrische Antrieb liefert diese Kraft hingegen nur wenn sie auch benötigt wird, da er sich im geregelten Betrieb befindet.

Für die Haltefunktion kann anhand weniger Gleichungen der Energiebedarf des elektrischen Motors und der Energiebedarf des pneumatischen Antriebs berechnet werden. Die Abhängigkeiten des Energieverbrauchs von den Applikationsparametern (Kraft, Haltedauer, Hublänge) wird im Folgenden erläutert.

Die Energieaufnahme des **elektrischen Antriebs** hängt im Wesentlichen quadratisch von der gewünschten Kraft ab und steigt linear mit der Haltedauer an. Die Hublänge des Antriebs spielt hierbei keine Rolle.

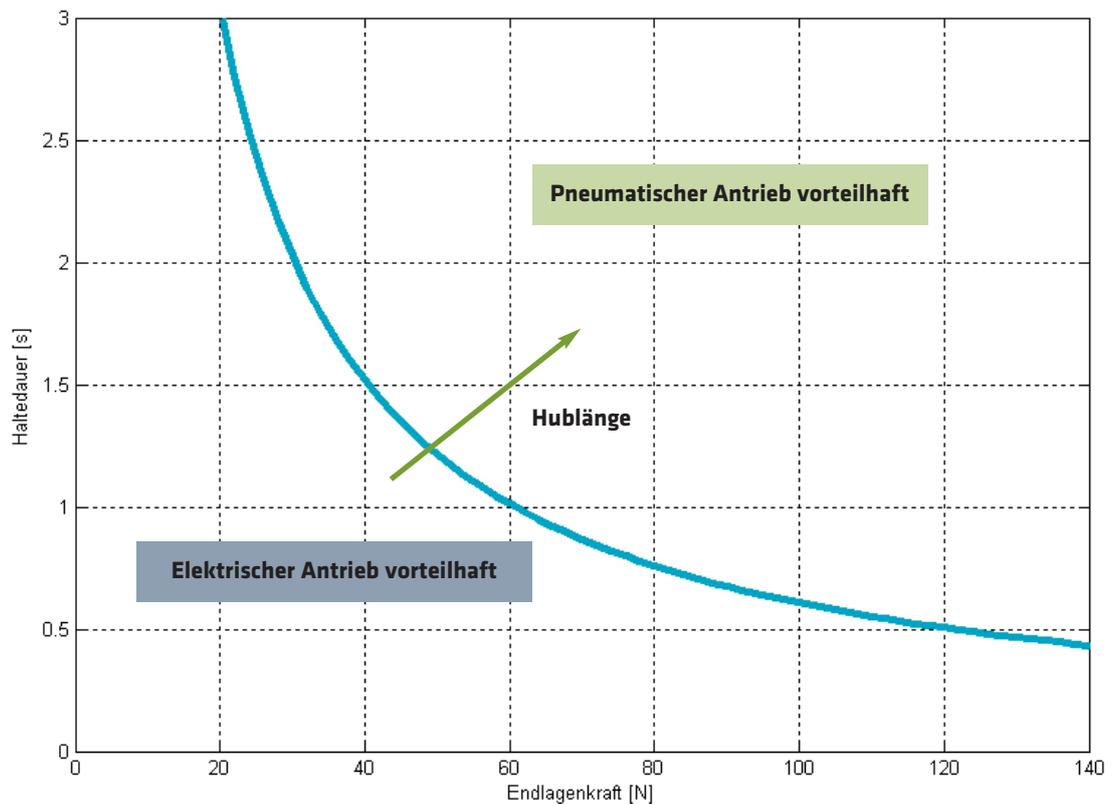
Beim **pneumatischen Antrieb** hingegen hängt die Energieaufnahme nicht von der Haltedauer ab. Dies spiegelt die Funktionalität des leistungslosen Haltens wieder. Sie hängt auch nur linear von der gewünschten Kraft ab. Hinzu kommt jedoch eine Abhängigkeit der Hublänge, da diese das befüllte Volumen beeinflusst. Der Energieverbrauch des pneumatischen Antriebs wird hierbei mit Hilfe der Druckluftkennzahl und dem Luftverbrauch auf die Energieaufnahme am Kompressor zurückgerechnet.

Um die in Bezug auf die Energieaufnahme günstigere Technologie auszuwählen, kann eine Entscheidungsgrenze ermittelt werden. Dafür werden die beiden Energieverbräuche **gegenübergestellt**. Die Entscheidungsgrenze hängt dabei von der gewünschten Endlagenkraft, der Hublänge und der Haltedauer ab und stellt eine Ebenengleichung im dreidimensionalen Raum dar. Bei einem festgelegten Hub vereinfacht sich die Gleichung auf ein zweidimensionales Problem, welches in der folgenden Abbildung dargestellt ist. Die blaue Linie zeigt die Entscheidungsgrenze, unterhalb derer der elektrische Antrieb effizienter ist und darüber der pneumatische Antrieb. Mit steigender Hublänge verschiebt sich diese Kurve nach oben.

Dementsprechend lassen sich die folgenden **Faustformeln** formulieren:

Je kleiner die Hublänge,
je größer die Endlagenkraft und
je länger die Haltedauer,
desto effizienter ist pneumatische Antriebstechnologie.

Je größer die Hublänge,
je geringer die Endlagenkraft und
je kürzer die Haltedauer,
desto effizienter ist elektrische Antriebstechnologie.



Applikationsspezifische Effizienzbereiche für die Handhabungsfunktion „Halten“ beider Technologien.

Die beiden unterschiedlichen Handhabungsfunktionen zeigen, dass keine generell gültigen Aussagen zur Vorteilhaftigkeit einer Technologie möglich sind. Aus diesem Grund muss für jede Anwendung immer im Einzelfall geprüft werden, welche Technologie unter Berücksichtigung aller relevanter Faktoren die effizientere Wahl ist. Pneumatikzylinder liefern im gesteuerten Betrieb sowohl die Handhabungsfunktion „Bewegen“ als auch die Handhabungsfunktion „Halten“, auch wenn diese nicht benötigt wird. Ein elektrischer Antrieb liefert im Gegensatz dazu die Handhabungsfunktion „Halten“ nur, wenn dies notwendig ist, benötigt hierfür aber zusätzliche Energie. Sollen die beiden Antriebskonzepte sinnvoll miteinander verglichen werden, müssen diese dieselbe Funktion bei denselben Randbedingungen liefern.

4 Energieeffizienz in der Pneumatik

4

Nachfolgend werden Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz sowohl für die pneumatische als auch für die elektrische Wirkungskette vorgestellt. In Druckluftanlagen besteht die Wirkungskette aus Druckluft-Erzeugung, Druckluftaufbereitung, Druckluft-Verteilung sowie der Anwendung. Im Kapitel 6 findet sich eine Übersicht über alle beschriebenen Maßnahmen.

Jede Maßnahme wird in diesem Kapitel kurz beschrieben und anschließend bewertet. Die Bewertung erfolgt in einer einheitlichen Darstellung, die im Folgenden vorgestellt wird.

Bewertung der Maßnahmen

Maßnahme 	
Relevanz Relevanz in Branchen oder bestimmten Bereichen	Aufwand Beschreibung des Aufwands zur Durchführung der Maßnahme
Anwendbarkeit X %	Einsparung bis zu X %

Die **Relevanz** nennt Bereiche, Branchen oder typische Anwendungen bei denen die Maßnahme häufig besonders sinnvoll angewendet werden kann, bzw. in denen sie eine besonders hohe Wirkung zeigt.

Der **Aufwand** bezieht sich immer auf eine bestehende Anlage. Bei einer Neuinstallation sind alle vorgestellten Maßnahmen mit einem wesentlich geringeren Aufwand durchführbar.

Die **Anwendbarkeit** gibt einen Erfahrungswert an, in wie viel Prozent der Fälle die Maßnahme im Unternehmen wirtschaftlich sinnvoll angewendet werden kann.

Die **Einsparungen** zeigen an, bis zu wie viel Prozent des Energieverbrauchs durch die Maßnahme eingespart werden kann. Der Wert bezieht sich immer auf

den tatsächlichen Luftverbrauch an dem jeweiligen Betrachtungsgegenstand und lässt sich deswegen nicht auf den Gesamtenergieverbrauch der Anlage übertragen bzw. mit anderen Maßnahmen addieren.

Die **Sterne** setzen den Nutzen in ein Verhältnis zum Aufwand und geben eine zusammenfassende Bewertung für die Maßnahme an.

Alle Zahlen und Berechnungen der vorgestellten Maßnahmen sind entweder an Studien angelehnt, oder spiegeln die Erfahrungen der Projektpartner wider. Keine dieser Werte lässt sich direkt auf ein Unternehmen übertragen, da in dieser Broschüre von einem Durchschnittsunternehmen ausgegangen werden muss. Eine Prüfung im Einzelfall ist immer erforderlich.

Die prozentualen Einsparungen bei den vorgestellten Maßnahmen in der Pneumatik und der elektrischen Antriebs- und Handhabungstechnik können nach wie vor nicht direkt miteinander verglichen werden, da sie sich auf eine unterschiedliche Basis beziehen.

Die Bewertung fokussiert auf bestehende Anlagen. Bei Neuinstallationen ist der Aufwand meist wesentlich geringer und die Anwendbarkeit höher, so dass sich Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz bei Neuanlagen in den meisten Fällen sehr schnell amortisieren.

Alle vorgestellten Maßnahmen sind für sich sinnvoll. Allerdings ist immer das Gesamtsystem zu betrachten. Einige Maßnahmen können sich z. B. gegenseitig ausschließen. So führt zum Beispiel bei effizient dimensionierten Antrieben eine generelle Absenkung des Betriebsdrucks zu Störungen im Betrieb. Bei überdimensionierten Antrieben kann eine Druckabsenkung dagegen eine einfache und sinnvolle Maßnahme sein. Auch wenn der Druck/ das Druckband aus z. B. übertriebenem Sicherheitsbedenken zu hoch gewählt wird, kann eine generelle Druckabsenkung Energie sparen ohne Leistungseinbußen mit sich zu bringen. Es muss also immer das Gesamtsystem von der Druckluftherzeugung bis zur Anwendung betrachtet werden.

4.1 Druckluftbereitstellung | Kompressoren

Kompressoren werden mit elektrischer Energie betrieben und erzeugen Druckluft. Sie bilden das Kernstück eines Druckluftsystems. 70 % der Gesamtkosten einer Kompressoranlage entfallen auf die Energiekosten. Sie haben daher einen wesentlichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der Anlage. Es gibt unterschiedliche Bauarten von Kompressoren, deren Einsatz sich aus Anforderungen an Druckniveau, Liefermenge, Schalthäufigkeit und Auslastungsgrad ergibt. Durch eine umfassende Planung (Auslegung und Auswahl) der Kompressorstation sowie durch den Einsatz einer modernen und intelligenten Verbundsteuerung lässt sich ein bedeutender Anteil der aufgewendeten Energie sparen. Thermodynamisch bedingt entsteht während des Kompressionsvorgangs 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.

4.1.1 Bedarfsgerechte Kompressor- auslegung mit Einsatz einer Verbundsteuerung

In Industrieanlagen mit hohem Automatisierungsgrad ist der Verbrauch an Druckluft relativ hoch und schwankt zyklisch mit dem Produktionsablauf. Die Einteilung des Verbrauchs in Grund-, Mittel- und Spitzenlastverbrauch ist ein erster Schritt zur Auswahl von geeigneten Kompressoren. Die Effektivität einer Verbundsteuerung ist abhängig von der Staffelung der Kompressoren hinsichtlich ihrer Liefermenge. Mehrere kleine Kompressoren können im Gegensatz zu bspw. zwei großen Maschinen flexibel kombiniert werden, um dem dynamischen Verbrauchsprofil zu folgen. Dadurch werden Leerlaufzeiten bei den häufig eingesetzten drehzahlun- geregelten Schraubenkompressoren minimiert und Energie auf einfache Art und Weise eingespart. Das Druckband der Station kann verkleinert und der Regeldruck der Station abgesenkt werden.

Kompressorauslegung und Verbundsteuerung ★ ★ ★	
Relevanz In Unternehmen mit dynamischem Verbrauchsprofil (Aufteilung in Grund-, Mittel- und Spitzenlast möglich)	Aufwand Gesonderte Installation der Verbundsteuerung
Anwendbarkeit 20 %	Einsparung bis zu 20 %

4.1.2 Zentrale Wärmerückgewinnung

Bei der Komprimierung der angesaugten Umgebungsluft wird diese auf ein höheres Druckniveau verdichtet. Gleichzeitig steigt bei diesem Vorgang die Temperatur. Ähnlich wie bei einer Wärmepumpe wird somit durch die Verdichtung Wärme aus der angesaugten Druckluft nutzbar gemacht. Sie kann über einen Wärmetauscher abgeführt und einer sinnvollen Verwendung zugeführt werden.

Die Kompressorstation ist eine zentrale Anlage, die anfallende Abwärme entsteht folglich zu einem großen Teil ebenfalls zentral. Der Geräteaufwand zur effizienten Rückgewinnung der Wärme ist relativ gering. Die Wärme kann in Form von Heizluft, zur Warmwasseraufbereitung oder zur Kälteerzeugung in der Produktionshalle weiterverwendet werden, wodurch anderweitig eingesetzte Energie zur Wärmeerzeugung eingespart werden kann. Bei Wärmetauschern besteht die Möglichkeit des nachträglichen Anbaus an Kompressoren. Bei zweckmäßiger Nutzung des hohen Einsparpotentials ist bei einer Neuplanung oder Neuauslegung von Kompressorstationen unter energetischen Gesichtspunkten immer über eine Wärmerückgewinnung nachzudenken. Bei trockenlaufenden Kompressoren können bis zu 96 %, bei ölgeschmierten Kompressoren bis zu 76 % der Wärme als Warmwassernutzung zurückgewonnen werden (bis zu 96 % bei Abluftnutzung).

Zentrale Wärmerückgewinnung ★★	
Relevanz In allen Unternehmen, in denen die erzeugte Wärme genutzt werden kann	Aufwand Die Wärmerückgewinnung wird an der Kompressorstation installiert. Die Wärme muss anderen Prozessen zugeführt werden
Anwendbarkeit 50 %	Zusatznutzen bis zu 96 %

Kommentar und Wertung:

Bis zu 96% der Wärme, die während der Komprimierung der angesaugten Umgebungsluft entsteht, lassen sich zurückgewinnen. Hierdurch sinkt der Energieverbrauch für den Kompressor nicht, allerdings kann die zurückgewonnene Energie in Form von Wärme in anderen Bereichen genutzt und dadurch dort Energie gespart werden.

4.1.3 Einsatz drehzahl geregelter Kompressoren

In der Praxis wird vielfach die These vertreten, dass der Einsatz drehzahl geregelter Kompressoren das Mittel zum Zweck hinsichtlich Energieeinsparung ist. Drehzahl geregelte Kompressoren passen sich in einem Drehzahlbereich von 20–100 % der geforderten Energiemenge an; der optimale Arbeitspunkt mit minimaler Leistungsaufnahme liegt bei 40–70 %. Beim Betrieb außerhalb dieses Arbeitspunktes steigt die Leistungsaufnahme quadratisch, weswegen drehzahl geregelte Maschinen als Spitzenlastkompressoren am Arbeitspunkt eingesetzt werden sollten. Hierzu genügt in der Regel ein einziger drehzahl geregelter Kompressor im Verbund.

Drehzahl geregelte Kompressoren ★★	
Relevanz Bei allen Unternehmen mit schwankendem Spitzenlastverbrauch	Aufwand Drehzahlregelung wird bei der Anlagenplanung berücksichtigt. Nachträgliche Installation ist nicht zu empfehlen
Anwendbarkeit 25 %	Einsparung bis zu 15 %

4.1.4 Absenkung des Netzdrucks

Überschlägige Berechnungen zeigen, dass durch eine Absenkung des Regeldrucks am Kompressor – insofern dies möglich ist – eine Energieeinsparung von bis zu 10 % pro 1 bar Druckabsenkung erzielt werden kann. Im Zusammenhang mit einer Absenkung des Netzdrucks sind auch die Auswirkungen auf den Rest des Druckluftsystems mit zu berücksichtigen, die nachfolgenden erläutert werden.

In den meisten Fällen wird der Druck vor der Anwendung über einen Druckregler auf ein niedrigeres Niveau geregelt. Ist dies an jeder Anlage der Fall, sollte der gesamte Netzdruck bereits am Kompressor abgesenkt und die Druckregler nachgeregelt werden. Ein konstanter Netzdruck auf dem tatsächlich benötigten Druckniveau kann über eine intelligente Kompressorstation erreicht werden und vermeidet eine Überkomprimierung.

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. Der mindestens erforderliche Druck muss an jeder Maschine individuell erprobt werden. 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 verursachen kann. Eine intelligente Kompressorsteuerung in Kombination mit effizient ausgelegten Antrieben ist einer generellen Druckabsenkung vorzuziehen.

Optimierungsansatz

Auslegung von Kompressorstationen

Im EnEffAH Projekt wurde ein Tool zur idealen Auslegung von Kompressorstationen entwickelt. Aus einer Menge an Kompressoren (Druckniveau und Liefermengenbereich) wird über ein heuristisches Suchverfahren die idealisierte Zusammensetzung der Kompressorstation ermittelt. Ausgangspunkt ist ein Verbrauchsprofil der Druckluftanlage, das über eine Clusteranalyse in Grund-, Mittel- und Spitzenlast mehrstufig unterteilt wird. Die durch den Algorithmus ermittelten Kompressoren passen sich unterschiedlichen Verbrauchsniveaus durch hohe kombinatorische Flexibilität mit gleichzeitiger minimaler Leistungsaufnahme an. Der Algorithmus unterstreicht den derzeitigen Trend in der Praxis zum gestaffelten Einsatz mehrerer kleiner Kompressoren.

Absenkung des Netzdrucks



Relevanz

In Anlagen, in denen alle pneumatischen Antriebe überdimensioniert sind

Aufwand

Druckreduzierung am Kompressor

Anwendbarkeit
50 %

Einsparung bis zu
15 %

4.2 Druckluftaufbereitung

Zwischen Kompressor und zentralem Druckbehälter befindet sich in modernen Druckluftanlagen die Aufbereitungseinheit. Die Druckluft-Qualitätsklassen nach DIN ISO 8573-1 (2010) erleichtern dem Anwender die Definition seiner Anforderungen und die Auswahl der Aufbereitungskomponenten. Das VDMA Einheitsblatt 15390 schlägt für unterschiedliche Anwendungsbereiche geeignete Druckluft-Qualitäten vor. Druckluftqualität hängt vom Restölgehalt in der Luft, der Größe der Schmutzpartikel, der Dichte an Feststoffteilchen und dem Wassergehalt bzw. dem Drucktaupunkt in Abhängigkeit des Luftdrucks ab.

4.2.1 Trocknung der Druckluft

Zur Trocknung der Druckluft ist dem Kompressor ein Trockner nachgeschaltet. Es stehen grundsätzlich verschiedene Arten der Trocknung zur Verfügung. Die gebräuchlichsten Verfahren sind die Kondensation, Diffusion, Absorption, und die Adsorption. Jede Trocknungsart hat ihre speziellen Vorteile bei verschiedenen Anwendungen. Durch moderne und effiziente Trockner, die zum Teil die Vorteile unterschiedlicher Trocknungsarten in einem Hybriden vereinen, lassen sich bis zu 70 % der zum Trocknen eingesetzten Energie einsparen. Verschiedene Anwendungen und Branchen erfordern spezifische Trocknungstechnologien, die stark unterschiedliche Energieaufwände erfordern. Während Kältetrockner nur ca. 2 % der gesamten benötigten Energie zur Bereitstellung der Druckluft benötigen, sind es bei Adsorptionstrocknern (spezielle Anwendungen) bis zu 30 %. Die möglichen Einsparungen sind dementsprechend von der verwendeten Technologie abhängig.

Trocknung von Druckluft (Kältetrocknung) ★

Relevanz In allen Anlagen, in denen Kältetrockner eingesetzt werden	Aufwand Ein bestehender Trockner muss durch einen effizienteren Trockner ersetzt werden
Anwendbarkeit 60 %	Einsparung bis zu 2 %

Trocknung von Druckluft (Adsorptionstrocknung) ★★

Relevanz In allen Anlagen, in denen Adsorptionskältetrockner eingesetzt werden	Aufwand Ein bestehender Trockner muss durch einen effizienteren Trockner ersetzt werden
Anwendbarkeit 10 %	Einsparung bis zu 20 %

4.2.2 Auslegung der Druckluft Aufbereitung

Speziell in medizinischen Anwendungen und im Lebensmittelbereich werden hohe Qualitätsanforderungen an die Druckluft gestellt. Für einzelne Komponenten geben die Hersteller geforderte Druckluftqualitäten an. Der Einsatzbereich der Komponenten entscheidet dann, ob eine höhere Klasse und somit eine erweiterte Aufbereitung notwendig ist. Der Druckabfall über den Filtern steigt mit zunehmender Reinheitsanforderung.

Sind die Qualitätsanforderungen an die Druckluftaufbereitungen zu hoch definiert, so führt dies häufig zu Überdimensionierungen bei Trocknung und Filterung. Jede Komponente in der Druckluftaufbereitung stellt einen Widerstand dar, der in der Strömung einen gewissen Druckabfall verursacht. Daher sollte die Filterung nach dem Grundsatz ausgelegt werden: Filterung so viel wie nötig, so wenig wie möglich. Richtig gewartete Filter haben einen Druckabfall von 0,1 bis 0,2 bar. In verschmutzten Filteranlagen kann dieser Wert wesentlich höher liegen, daher müssen regelmäßige Wartungsintervalle konsequent eingehalten werden.

Auslegung der Druckluft-Aufbereitung ★★	
Relevanz In allen Anlagen mit Druckluft-Aufbereitung. Die Druckluftqualität wird oft zu hoch gewählt	Aufwand Korrekte Wahl der Druckluftqualität über eine passende Druckluft-Aufbereitung
Anwendbarkeit 20 %	Einsparung bis zu 10 %

4.2.3 Regelmäßige Wartung zur Reduktion von Druck- verlusten

Eine regelmäßige Wartung der Aufbereitungskomponenten ist wesentlich zur Sicherstellung einer hohen Effizienz des Gesamtsystems. Filter nutzen sich ab oder verstopfen, was einen stark erhöhten Druckabfall zur Folge hat (oft bis zu 0,5 bar). In der Praxis treten häufig mehrere verstopfte Filter und Aufbereitungskomponenten hintereinander auf. Als Ausgleich wird der Druck am Kompressor erhöht, ohne die wirkliche Ursache zu beseitigen. Bei einer 10 %-igen Energieeinsparung pro 1 bar Druck am Kompressor kann durch eine regelmäßige Wartung (stetige Wartung und Austausch der Komponenten) ein hohes Effizienzpotential erschlossen werden.

Regelmäßige Wartung der Druckluft-Aufbereitung ★★★	
Relevanz Viele Systeme arbeiten aufgrund mangelnder Auslegung nicht ordnungsgemäß. Die Druckluftqualität wird oft zu hoch gewählt	Aufwand Wartung der Druckluft-Aufbereitung entsprechend den Vorgaben der Aufbereitungseinheit
Anwendbarkeit 80 %	Einsparung bis zu 20 %

Kommentar und Wertung:

In der Praxis kann es bei selten oder falsch gewarteten oder sogar verstopften Druckluft-Aufbereitungsanlagen zu einem um bis zu 2 bar überhöhtem Druckabfall kommen. Wird dieser reduziert, können bis zu 20 % Energie eingespart werden.

4.3 Druckluftverteilung im Rohrleitungssystem

Nach der Druckluftaufbereitung erfolgt die Verteilung im gesamten Produktionsbereich bis hin zur Wartungseinheit am Verbraucher. Die Luftverteilung erfolgt normalerweise in einem geschweißten oder geklemmten Leitungsnetz (Edelstahl, Kunststoff, Kupfer oder Aluminium), das im Idealzustand keine Leckagen aufweist. Dabei ist darauf zu achten, dass das Rohrmaterial keinen negativen Einfluss auf die Druckluftqualität am Verbraucher hat. Durchschnittlich fallen im Verteilungsnetz nur 10 % der Leckage der gesamten Wirkungskette an. Verschiedene Auslegungsarten von Ringleitungen über Sternleitungen gewährleisten eine effiziente und effektive Verteilung der Luft. Die Planung eines Druckluftnetzes umfasst mehrere Aspekte, z. B. die Ausdehnung des Netzes, die maximale Belastbarkeit hinsichtlich Druckniveau und Durchfluss, zukünftige Kapazitäten und Installationskosten. Da das Netz nur selten nachträglich verändert wird, beziehen sich die Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz vorwiegend auf die Planung und Auslegung des Netzes. Sind im Netz Leckagen vorhanden, müssen diese schnell beseitigt werden, da große Druckluftmengen entweichen können.

4.3.1 Optimierte Dimensionierung von Rohrleitungen

Physikalisch betrachtet existiert kein Druckluftnetz ohne Druckabfall, da erst durch eine Druckdifferenz Luft durch Leitungen strömen kann. Die Höhe des Druckabfalls über dem Rohrleitungsnetz ist in der Realität aber weitaus höher als theoretisch notwendig. Der Grund hierfür sind die nicht fachgerechte Installationen und zu enge Strömungsquerschnitte bzw. häufige Querschnittswchsel. Druckluftleitungen werden oft analog zu Wasser- und Stromleitungen ohne Verständnis für den Energieträger Druckluft verlegt. Eine einfache Lösung ist die Überdimensionierung der Leitungen mit minimalem Druckabfall. Dadurch befindet sich eine große Luftmenge im Netz, die keine erhöhten Kosten (bis auf eine einmalige Befüllung) erzeugt und gleichzeitig Verbrauchsspitzen zu einem gewissen Grad dämpfen kann. Wird das Druckluftnetz gezielt so ausge-

legt, dass die Rohrleitungen nicht nur zum Transport der Luft sondern zusätzlich als Speicherelement verwendet werden, spricht man von einem „Speichernetz“. Aufgrund verschiedener Nachteile ist von der Auslegung eines Netzes als Speichernetz jedoch abzuraten.

(siehe folgende „Optimierungsansatz-Box“)

Optimierte Dimensionierung von Leitungen ★ ★	
Relevanz In allen Anlagen, die erweitert oder neu installiert werden	Aufwand Optimierte Auslegung der Leitungen durch Verwendung von Auslegungstools vor der Installation des Netzes
Anwendbarkeit 20 %	Einsparung bis zu 10 %

4.3.2 Optimierung der Netzinfrastruktur

Neben der Dimensionierung der Leitungen spielt die Wahl der Netzinfrastruktur, sowohl bei Ring- als auch bei Sticleitungen, eine wichtige Rolle. Über Sticleitungen fällt ein kontinuierlicher Druckabfall vom Erzeuger zum Verteiler an, und das Netz ergibt eine Art Baumstruktur. Ringleitungen bieten den Vorteil, dass sich der Druck durch geschlossene Leitungskreisläufe gleichmäßig verteilen kann. Oftmals wird die Verteilerleitung in einem Netz als Ringleitung und die Haupt- und Anschlussleitungen als Sticleitungen ausgeführt. Wie sieht jedoch ein theoretisch ideales Netzwerk aus und welche Aussagen lassen sich daraus ableiten? Um diese Frage zu beantworten, wurde im EnEffAH Projekt ein Prototyp eines Tools entwickelt, mit dem die ideale Netzinfrastruktur simuliert und optimiert wird. (siehe folgende „Optimierungsansatz-Box“)

Optimierung der Netzinfrastruktur 	
Relevanz In allen Anlagen, die erneuert oder erweitert werden bzw. bei Neuinstallation	Aufwand Erfassung der Verbrauchsdaten, Erstellung Netzplan, Kostenanalyse, Berechnung der Druckabfälle
Anwendbarkeit 40 %	Einsparung bis zu 5 %

4.3.3 Robustheit und Platzierung von Zwischenspeichern

Wird ein Druckluftnetz als reines Verteilungsnetz ausgelegt, so bietet sich die Möglichkeit an, an gezielten Stellen dezentrale Zwischenspeicher einzusetzen. Insbesondere in naher Umgebung von Anlagen mit stark schwankendem Verbrauch oder hohen Verbrauchs-Spitzen, kann sich ein Zwischenspeicher glättend auf den Verbrauch auswirken. Im besten Fall kann dadurch die Kompressorstation auf niedrigeren Spitzenverbrauch ausgelegt werden. Es muss weniger Leistung vorgehalten werden was sich positiv auf die Energieeffizienz auswirkt. (siehe folgende „Optimierungsansatz-Box“)

Robustheit und Platzierung von Zwischenspeichern 	
Relevanz In allen Betrieben, in denen sporadisch große Verbräuche zu Druckeinbrüchen führen	Aufwand Installation von Zwischenspeichern im Druckluftnetz
Anwendbarkeit 40 %	Einsparung bis zu 10 %

4.3.4 Reduktion und Beseitigung von Leckagen im Hauptnetz

In einer Druckluftanlage gehen häufig insgesamt bis zu 30 % der Druckluft durch Leckagen verloren. Leckagen treten in der Druckluftverteilung (Hauptnetz) und an der Anwendung (s. Kapitel 4.4) auf. Im Hauptnetz sind Leckagen selten und nur für einen geringen Teil der Gesamtleckagen verantwortlich. Das Hauptnetz lässt sich im Normalfall nahezu leckagefrei halten. Präventive Maßnahmen hierzu beinhalten die Auswahl des richtigen Rohrleitungsmaterials, eine fachgerechte Installation und die Schulung der Mitarbeiter im Umgang mit Druckluft und Leckagen.

Eine vorhandene Leckage im Druckluftnetz wird entweder über ein Druckluftaudit, das Schaltverhalten der Kompressoren oder den Druckabfall im Behälter unter Abschaltung aller Druckluftverbraucher bestimmt. Liegt die Leckagemenge über einem Schwellwert, werden die Leckagen geortet und – wenn wirtschaftlich – beseitigt.

Beseitigung von Leckagen im Netz 	
Relevanz In allen Betrieben, in denen sich das Druckluft-Netz nicht im leckagefreien Zustand befindet	Aufwand Ein Expertenteam untersucht die Anlage und legt Maßnahmen fest. => Regelmäßige Maßnahme um den Erfolg zu sichern
Anwendbarkeit 80 %	Einsparung bis zu 5 %

Optimierungsansatz

Prototypen-Tools zur Netzauslegung

Im EnEffAH Projekt wurden Prototypen von verschiedenen Tools zur Auslegung, Dimensionierung und Optimierung sowie zur Analyse der Robustheit von Druckluft-Rohrleitungssystemen entwickelt. Die Ansätze werden im Folgenden vorgestellt.

Optimierte Leitungsdimensionierung

Ein entwickeltes und implementiertes Tool unterstützt den Planer eines Druckluftnetzes bei der Bestimmung des optimalen Leitungsdurchmessers. Der Planer gibt die feste vordefinierte Struktur des Netzes ein und definiert für jeden Verbraucher die maximal notwendige Luftmenge. Die Dynamik der Kompressorstation wird dabei nicht betrachtet und als Quelle mit konstantem Druck angenommen. Das Tool berechnet im Hintergrund über eine modellbasierte Optimierung die Durchmesser der einzelnen Leitungen. Aus praktischen Gründen ist die Menge der auswählbaren Leitungsdurchmesser begrenzt, da es nur abgestufte und genormte Durchmesser im Fachhandel zu kaufen gibt. „Modellbasiert“ bedeutet, dass das Druckluftnetz auf einem abstrahierten Niveau über mathematische Beziehungen beschrieben wird. Beispielsweise werden Rohrarmaturen über gleichwertige Ersatzlängen zu den einzelnen Rohrleitungen hinzugerechnet und nicht gesondert betrachtet. Mit Hilfe des statischen Netzwerkmodells werden die Druckabfälle vom Erzeuger bis zu den jeweiligen Verbrauchern berechnet. Der Optimierer aus der Klasse der genetischen Algorithmen iteriert die Netzwerkkonfiguration solange, bis er die gestellten Anforderungen an das Druckluftnetz erfüllt. Zu den Anforderungen zählt in erster Linie die Einhaltung des maximal zulässigen Druckabfalls zwischen Erzeugung und Verbraucher.

Oftmals wünscht man sich einen minimalen Druckabfall über dem gesamten Netz. Ohne weitere Anforderungen führt dies zur Auswahl des maximal zulässigen Durchmessers. Daher werden neben den Druckanforderungen auch die Installationskosten berücksichtigt. Eine geschickte Kombination dieser beiden Kriterien führt zur Auslegung eines optimalen Verteilungsnetzes ohne unnötige Speicherkapazitäten. Es sei hier abschließend angemerkt, dass die Wahl der Rohrleitungsdurchmesser abhängig ist von der Platzierung der einzelnen Verbraucher. Somit ist die örtliche Verbrauchsverteilung eng gekoppelt mit dem Optimierungsergebnis.

Optimierung der Netzinfrastruktur

Um die Optimierung der Netzinfrastruktur rechnergestützt durchführen zu können, wird das Tool zur Leitungsdimensionierung erweitert. Ausgehend von einem statischen Netzwerkmodell wird ein zusätzlicher Freiheitsgrad für die Optimierung eingeführt. Die Liste der zulässigen Leitungsdurchmesser wird um den Durchmesser 0, d.h. den Fall „keine Leitung“ erweitert. Ausgehend von einer maximal möglichen Netzwerkkonfiguration (wo können überall Leitungen liegen?), ist es dem Optimierer freigestellt, welche Rohrleitungen er als wichtig betrachtet und welchen Durchmesser er wählt. Da das Optimierungsverfahren als rein mathematischer Algorithmus mit begrenzter „Intelligenz“ ausgestattet ist, müssen die Anforderungen so gewählt werden, dass sich praktisch realisierbare Netzkonfigurationen ergeben. Aus den theoretisch zulässigen Netzkonfigurationen lassen sich jedoch bereits Aussagen über z. B. mögliche Engpässe ableiten. Neben der Anforderung eines minimalen Druckabfalls über dem Netz wird hier auch die Ausgewogenheit des Drucks über dem Netz betrachtet.

...

Robustheitsanalyse des Netzes und Platzierung von Zwischenspeichern

Die optimierte Platzierung von dezentralen Zwischenspeichern dient dazu, die Robustheit eines Druckluftnetzes zu erhöhen. Ein Druckluftnetz ist dann nicht robust, bzw. sensitiv, wenn sporadisch auftretende Verbraucher mit hohen Luftmengen Einfluss auf den Druckverlauf im gesamten Netz haben und somit auch das Schaltverhalten der Kompressorstation negativ beeinflussen.

Sind Verbraucher mit stark schwankendem Bedarfsprofil über Stichleitungen an das Druckluftnetz angeschlossen, so werden bereits heutzutage Zwischenspeicher vor diese Verbraucher platziert. Bei stark vermaschten Netzen mit Ringleitungen wird die Platzierung der Speicher durch den neu entworfenen Auslegungsalgorithmus unterstützt. Über ein dynamisches Netzmodell und das systemtheoretische Konzept der Sensitivitätsanalyse wird die Robustheit untersucht. Die Netzstruktur und die Rohrleitungsdurchmesser werden fest vorgegeben. Es wird ein genetischer Algorithmus als Optimierungsverfahren eingesetzt, der die Möglichkeiten hat, vor jeden Verbraucher ein Volumen zu setzen (die Menge der zulässigen Volumina ist fest vorgegeben mit dem Freiheitsgrad "kein Volumen").

Die Ergebnisse der Optimierung zeigen deutlich die "Schwachstellen" im Netz auf. Es sei hier darauf hingewiesen, dass analog zur Leitungsdimensionierung die Platzierung der Zwischenspeicher abhängig von der Lage der Verbraucher im Netz ist.

4.4 Anwendung

Die Anwendung umfasst den letzten Bereich der pneumatischen Wirkungskette ab den Druckluft-Verteilungsleitungen. Sie besteht aus einer lokalen Luftaufbereitung (dezentrale Filterung, Druckregelung, usw.), einer Druckluftverteilung (meist über Schlauchleitungen), Ventilen, pneumatischen Antrieben oder anderen Komponenten in der Applikation.

In dieser Broschüre wird nur der für die Antriebs- und Handhabungstechnik relevante Bereich der Druckluft betrachtet. Druckluftpistolen, Funktionsluft (wie Sperrluft) oder auch Druckluftwerkzeuge, die ebenfalls einen großen Anteil der Druckluft nutzen, werden nicht näher betrachtet. Da sie aber dennoch für einen beträchtlichen Teil des Druckluft-Verbrauchs verantwortlich sind, sollten auch sie stets in Effizienzüberlegungen mit einbezogen werden.

4.4.1 Korrekte Auslegung der Antriebe | Vermeiden von Überdimensionierung

Pneumatische Antriebe werden häufig überdimensioniert. Die Antriebskraft ist meist um ein Vielfaches größer als es in der Anwendung tatsächlich notwendig wäre. Gründe hierfür können sein, dass aus „Sicherheit“ ein größerer Zylinder eingesetzt obwohl eine kleinere Baugröße auch die notwendige Funktionalität bieten würde. Ein weiterer Grund kann die Reduktion auf wenige Baugrößen sein, um durch wenige Teilenummern Kosten zu sparen. Erfahrungen zeigen, dass durch eine anwendungsbezogene energieeffiziente Auslegung sich durchschnittlich die Hälfte aller Antriebe um eine Baugröße kleiner auslegen lassen.

Korrekte Auslegung von Antrieben und Komponenten



Relevanz

In allen Branchen & Bereichen, vor allem wenn auf Grund von Lagerhaltungskosten nur wenige Zylindergrößen eingesetzt werden

Aufwand

Richtige Auslegung der Komponenten ohne übertriebene Sicherheitsfaktoren

Anwendbarkeit
80 %

Einsparung bis zu
40 %

Kommentar und Wertung:

Die Einsparung kann nicht auf den gesamten Druckluftverbrauch des Werks übertragen werden, da nur ca. 20 % der gesamten Druckluft von pneumatischen Antrieben verwendet wird. Einsparungen beziehen sich immer nur auf den tatsächlichen Luftverbrauch an der jeweiligen Anwendung.

4.4.2 Vermeidung von Totvolumen | Reduzierung Schlauchvolumen

Insbesondere in größeren Anlagen, in denen z. B. Ventile und Ventilinseln zentral im Schaltschrank installiert sind, liegen häufig große Distanzen zwischen Ventil und Zylinder. Die hierfür verwendeten Verbindungsschläuche stellen bei jedem Schaltvorgang ein Totvolumen dar, das befüllt und wieder entleert wird. Die verwendete Druckluft geht ungenutzt verloren. Daher ist es zwingend notwendig, Totvolumina zwischen Zylinder und Ventil möglichst klein zu halten, z. B. indem kürzere Distanzen vorgesehen werden oder Schläuche mit geringerem Durchmesser verwendet werden. Der Schlauchdurchmesser darf allerdings ein gewisses Maß nicht unterschreiten, da ansonsten Strömungswiderstände zunehmen und die Dynamik der Antriebe leidet. Das Optimum muss im Einzelfall bei der Auslegung der Anlage bestimmt werden.

Vermeidung von Totvolumen ★★	
Relevanz In Bereichen, in denen viele zentrale Ventilinseln eingesetzt werden, v.a. bei vielen kleinen Zylindern und hoher Schaltfrequenz	Aufwand Ventile müssen möglichst nahe beim Zylinder positioniert werden
Anwendbarkeit 30 %	Einsparung bis zu 20 %

Kommentar und Wertung:

Im Allgemeinen wird von der Druckluft, die zum Betrieb pneumatischer Antriebe eingesetzt wird 30 % dazu verwendet, um das Totvolumen im Schlauch zu befüllen. Die restlichen 70 % erreichen den pneumatischen Zylinder. Das Totvolumen lässt sich im Durchschnitt um ca. 60 % reduzieren. Daher ergibt sich eine Einsparung von ca. 20 %. Einsparungen beziehen sich immer nur auf den tatsächlichen Luftverbrauch an der jeweiligen Anwendung.

4.4.3 Leckageortung und Beseitigung

Leckagen finden sich auch in dem am besten gewarteten Druckluftsystem und lassen sich niemals ganz vermeiden (ein gut gewartetes Druckluftsystem weist Leckageanteile zwischen 8 % und 10 % auf). Dennoch bieten Leckagen einen wichtigen Ansatzpunkt, um die Energieeffizienz eines Druckluftsystems zu steigern. In einem durchschnittlichen System gehen bis zu 30 % der Druckluft durch Leckagen verloren. Neben den Leckagen im Hauptnetz (s. Kapitel 4.3.4) ist der Hauptteil der Leckagen in der Anlage selbst zu finden. Große Leckagen lassen sich meist leicht erkennen und beseitigen, für die Vielzahl an kleinen Leckagen (vor allem in den Anlagen), die insgesamt für die größten Verluste verantwortlich sind, werden Experten mit speziellen Geräten benötigt, die die Leckagen orten und Maßnahmen zu deren Beseitigung definieren.

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.

Leckageortung und Beseitigung (Anlage / Anwendung) ★★★	
Relevanz In allen Branchen & Bereichen	Aufwand Ein Expertenteam untersucht die Anlage und legt Maßnahmen fest. Evtl. Condition Monitoring System zur dauerhaften Überwachung
Anwendbarkeit 70 %	Einsparung bis zu 20 %

Kommentar und Wertung:

Eine durchschnittliche Anlage weist einen Leckagewert von 30 % auf. Wirtschaftlich sinnvoll lässt sich dieser auf ca. 10 % reduzieren. Es lassen sich also bis zu 20 % Einsparungen realisieren.

4.4.4 Betriebsstrategien

In der herkömmlichen Schalt pneumatik werden die jeweils aktiven Antriebskammern von Pneumatikzylindern meist direkt über Schaltventile mit Versorgungsdruck beaufschlagt und bei jedem Bewegungsvorgang komplett auf Versorgungsdruckniveau gefüllt bzw. anschließend wieder entleert. Die gewünschte Dynamik lässt sich über Abluftdrosselung individuell einstellen. Der Luftverbrauch ist in den meisten Fällen relativ hoch und weitgehend unabhängig von Last oder Dynamik, denn die Antriebskammer wird stets komplett mit Versorgungsdruck beaufschlagt. Somit werden die beiden Funktionen „Bewegen“ der Last und das anschließende „Halten“ mit großer Kraft in der Endlage (siehe hierzu auch Kapitel 3.2) parallel erfüllt, obwohl in vielen Fällen gar nicht beide Funktionen benötigt werden. Geeignete Ansteuerungs- und Betriebsstrategien ermöglichen hier je nach Lastfall und gewünschter Funktion einen wesentlich geringeren Verbrauch als im herkömmlichen Schaltbetrieb.

4.4.4.1 Einfach wirkender Zylinder

In vielen Applikationen ist nur eine Bewegungsrichtung (z. B. der Ausfahrhub) des Zylinders zeitkritisch bzw. produktiv, während der Hub in die andere Bewegungsrichtung auch länger dauern kann und mit wenig Antriebskraft ausgeführt werden könnte. Die einfachste Möglichkeit zur Erschließung dieser Potentiale ist die Verwendung von einfach wirkenden Zylindern, welche über eine Rückstellfeder wieder in die Ausgangsposition gebracht werden. Dabei muss nur der Ausfahrvorgang unter Druck erfolgen, so dass der Einfahrvorgang ohne Druckluftverbrauch erfolgt. Allerdings ist hierbei die maximale Hublänge beschränkt. Neben der Einsparung der Druckluft kann zudem ein einfacheres Ventil verwendet werden bzw. auf ein zweites Ventil verzichtet werden.

Einfach wirkender Zylinder ★ ★	
Relevanz Bei zeitunkritischen Prozessen, geringem Hub und wenn hohe Antriebskräfte nur in eine Richtung benötigt werden	Aufwand Einsatz entsprechender Komponenten
Anwendbarkeit 10 %	Einsparung bis zu 50 %

Kommentar und Wertung:

Durch einen einfach wirkenden Zylinder lassen sich knapp 50 % der verwendeten Druckluft einsparen. Einsparungen beziehen sich immer nur auf den tatsächlichen Luftverbrauch an der jeweiligen Anwendung.

4.4.4.2 Verwendung eines Kurzschlussventils

Über ein zusätzlich zu Be- und Entlüftungsventilen in das System integrierte 2/2-Kurzschlussventil lassen sich die beiden Zylinderkammern bei Bedarf so miteinander verbinden, dass ein Teil der Druckluft aus einer Kammer in die andere Kammer zurückgespeist wird. Je nach Anwendung kann das Kurzschlussventil strategisch unterschiedlich eingesetzt werden.

Wird ein Kolbenstangenzyylinder verwendet, kann zumindest für die Ausfahrbewegung des Zylinders das Kurzschlussventil auch während der kompletten Bewegung geöffnet werden. Über das Ventil wird ein Druckausgleich zwischen beiden Zylinderkammern geschaffen. Durch die Kolbenstange auf der Abluftkammerseite ist dort jedoch die wirksame Kolbenfläche geringer, trotz gleichem Druck in beiden Kammern entsteht eine resultierende Antriebskraft in Ausfahrrichtung des Zylinders. Zusätzlich zu dem Kurzschlussventil, kann während der Bewegung auch das Belüftungsventil geöffnet werden, dann wird vom Versorgungsnetz nur dasjenige Betriebsvolumen benötigt, das dem Volumen der Kolbenstange entspricht. Dabei wird keine Sperrstellung des Ventils benötigt, so dass hier ein herkömmliches 5/2-Ventil ausreichend ist. Bei dieser Art der Ansteuerung können bei einem Doppelhub bis zu 43 % an Druckluft eingespart werden, allerdings muss aufgrund der geringen resultierenden Antriebskraft mit Einbußen in der Dynamik gerechnet werden.

Eine andere Variante verwendet das Kurzschlussventil bei vertikal eingebauten Zylindern. Dabei wird während des Bewegungsvorgangs von oben nach unten das Kurzschlussventil aktiviert, und die Luftzufuhr gleichzeitig abgeschaltet, so dass der Bewegungsvorgang aufgrund der Schwerkraft stattfindet und keinerlei Druckluft benötigt wird.

Kurzschlussventil ★ ★	
Relevanz Bei zeitunkritischen Prozessen oder bei vertikal betriebenen Antrieben	Aufwand Das zusätzliche Ventil muss in den Steuerungsablauf integriert werden
Anwendbarkeit 10 %	Einsparung bis zu 43 %

Kommentar und Wertung:

Durch ein Kurzschlussventil lassen sich bis zu 43 % Energie einsparen. Einsparungen beziehen sich immer nur auf den tatsächlichen Luftverbrauch an der jeweiligen Anwendung.

4.4.4.3 Zuluftdrosselung und gezieltes Abschalten

Liegt der Fokus in der Anwendung auf der Funktion „Bewegen“, so kann nach abgeschlossener Bewegung der Zuluftstrom in die Antriebskammer unterbrochen werden. Das in diesem Fall unnötige zusätzliche Belüften der Antriebskammer nach abgeschlossener Bewegung wird so unterbunden.

In den meisten Anwendungsfällen wird der Zylinder über ein 5/2-Ventil betrieben. Die Bewegung erfolgt somit nicht vorentlüftet. Werden zur Regulierung der Bewegungsdynamik Abluftdrosseln eingesetzt, ergibt sich während der Bewegung ein relativ hoher Durchschnittsdruck in beiden Zylinderkammern. Der Spar-Effekt durch das gezielte Abschalten ist daher relativ gering. Lässt sich die Bewegung des Zylinders stattdessen über Zuluftdrosseln regulieren, so sinkt der Durchschnittsdruck während der Bewegung stark ab. Wird nun das 5/2-Ventil durch ein 5/3-Ventil ersetzt, welches in Mittelstellung geschlossen ist, so lässt sich nach erfolgter Bewegung ein relativ geringes Druckniveau in der Antriebskammer des Zylinders einschließen und das ungewollte Nachbelüften der Antriebskammer verhindern. Simulative Untersuchungen der Bewegungsdynamik des Zylinders zeigen, dass mit dieser Maßnahme je nach Lastfall bei gleicher Bewegungszeit gegenüber

dem herkömmlichen Betrieb bis zu 70 % des Luftverbrauchs eingespart werden können. Laborversuche belegen diese Ergebnisse. Je nach Lastfall und Grad der Überdimensionierung kann von einer durchschnittlichen Ersparnis von 50 % ausgegangen werden.

Ein großer Vorteil dieser Methode wird darin gesehen, dass das System bei Lastwechseln nicht neu justiert werden muss, denn der luftsparende Eingriff erfolgt erst nachdem die Bewegung abgeschlossen ist. Verändert sich die Last des Systems, so stellt sich in der Antriebskammer während der Bewegung ein höheres Druckniveau ein, lediglich der Einspareffekt wird folglich geringer. Die Applikation funktioniert ohne weitere Maßnahmen weiterhin.

Nachteilig auf das Bewegungsverhalten wirkt die Verwendung von Zuluftdrosseln derart, dass je nach Lastfall während der Bewegung der Stick-Slip-Effekt eine ungleichmäßige Bewegung verursachen kann. In Einzelfällen kann es zu merklich ruckelnder Bewegung kommen. Ist dies in der Applikation störend, muss ein Kompromiss zwischen Zuluft- und Abluftdrosselung gefunden werden.

Zuluftdrosselung und gezieltes Abschalten ★ ★	
Relevanz Bei stark überdimensionierten, großen Antrieben oder in Anwendungen mit wechselnder Last	Aufwand Verwendung eines 5/3-Wegeventils, Zuluftdrosselung statt Abluftdrosselung
Anwendbarkeit 30 %	Einsparung bis zu 50 %

Kommentar und Wertung:

Durch diese Maßnahme lässt in einem normalen Betriebsfall bis zu 50 % der tatsächlichen verwendeten Druckluft an der jeweiligen Anwendung einsparen. Die Einsparung kann nicht auf den gesamten Druckluftverbrauch des Werks übertragen werden, da nur ca. 20 % der gesamten Druckluft von pneumatischen Antrieben verwendet wird.

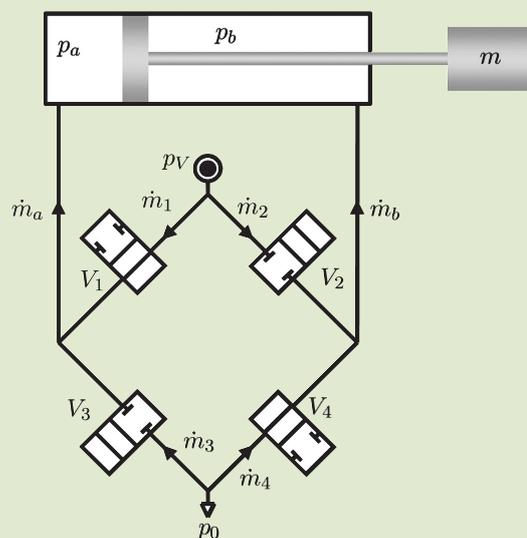
Optimierungsansatz

Nutzung der Expansionsenergie durch optimierte Ventilansteuerung

Zur energieeffizienten Bewegung sind im EnEffAH Projekt Betriebsstrategien entwickelt worden, welche die in der Druckluft vorhandene Expansionsenergie nutzen können. Bei diesem Betriebsmodus liegt der Fokus auf der Bewegungsfunktionalität. Im Unterschied zu den bisher betrachteten Strategien kommt diese Art der Beschaltung jedoch gänzlich ohne Drosseln aus. Die gewünschte Geschwindigkeit wird über eine gezielte An- und Abschaltung der einzelnen Ventile während des Bewegungsvorganges erreicht. Hierzu wird eine Brückenschaltung verwendet, welche aus vier 2/2-Ventilen aufgebaut ist. Dabei wird der volle Versorgungsdruck für höchstmögliche Bewegungsdynamik ausgenutzt und so die Stick-Slip-Problematik (siehe 4.4.4.3) umgangen. Wird das Belüftungsventil während der Bewegung abgeschaltet, so dass sich die in der Antriebskammer eingeschlossene Druckluft entspannt, so wird im Unterschied zu den anderen Strategien auch die in der Druckluft gespeicherte Expansionsenergie ausgenutzt.

Je nach den vorgegebenen Randbedingungen (insbesondere der Endlagenkraft) können so bis zu 85 % der Druckluft – im Vergleich zur Standardpneumatik – eingespart werden. Damit ist jedoch die Funktion „Halten“ in der Endlage komplett nicht mehr vorhanden. Somit stellt dies einen theoretischen Grenzwert dar, da das System anfällig gegenüber Störungen wird (z. B. äußere Kräfte oder Änderungen der Reibung). Wird die Funktion „Halten“ benötigt, ist diese z. B. über eine Klemmpatrone oder einen Klemmblock mit Endlock realisierbar. Verändert man die Ansteuerung der Ventile so, dass ein höherer Endlagendruck erreicht wird, so verringert sich der Spareffekt, jedoch wird damit die Robustheit des Systems erhöht.

Bei einem Endlagendruck von 2,5 bar ist immerhin noch ein Einspareffekt von ca. 65 % vorhanden. Dieser Endlagendruck ist in Abhängigkeit des Zylinders bei den meisten Applikationen jedoch ausreichend. Damit ist dann ebenfalls die Funktion „Halten“ realisiert.



Die Ansteuerung der einzelnen Ventile erfolgt hierbei optimierungsbasiert. Die Verwendung eines mathematischen Systemmodells in Verbindung mit Methoden der numerischen Optimierung ermöglicht eine energieeffiziente Ansteuerung bei gleichzeitiger Reduktion der Endlagengeschwindigkeit. Die maximal zulässige Geschwindigkeit beim Aufprall in der Endlage kann in dem Optimierungsalgorithmus berücksichtigt werden. Damit muss die überschüssige Energie in der Endlage nicht über teure Stoßdämpfer absorbiert werden. Da die Endlagenge-

schwindigkeit ein wesentlicher Punkt bei der Auslegung pneumatischer Antriebe darstellt, wirkt sich dies auch auf die Dimensionierung des Zylinders aus und kann so einen weiteren Einspareffekt nach sich ziehen, der durch die geänderte Auslegung begründet ist. Nachteil dieser Methode ist jedoch eine erweiterte Ventilstruktur.

Zusammengefasst ergeben sich die folgenden Vor- und Nachteile:

Vorteile

- Hohes Einsparpotential (Nutzung der Expansionsenergie)
- Reduzierter einstellbarer Endlagendruck
- Ausnutzung des vollen Versorgungsdrucks für hohe Bewegungsdynamik
- Reduzierte der Endlagengeschwindigkeit
- Verzicht auf Stoßdämpfer

Nachteile

- Erhöhter Hardwareaufwand
- Steuerungstechnischer Aufwand
- Anfälligkeit gegenüber äußeren Einwirkungen

Optimierte Ventilansteuerung

Relevanz

Bei großen Antrieben ohne oder mit wenig Haltekraftbedarf

Aufwand

Anpassung der Ventilstruktur, Steuerung

Anwendbarkeit
30 %

Einsparung bis zu
65 %

Kommentar und Wertung:

Durch die Nutzung der Expansionsenergie lassen sich bis zu 65 % der von der Anwendung verwendeten Druckluft einsparen. Die Einsparung kann nicht auf den gesamten Druckluftverbrauch des Werks übertragen werden, da nur ca. 20 % der gesamten Druckluft von pneumatischen Antrieben verwendet wird.

4.5 Dienstleistungen

Nutzer von Druckluftanlagen haben durch den Trend der ansteigenden Energiepreise neue Herausforderungen zu meistern. Um die langfristige Wirtschaftlichkeit der Druckluftanlagen sicher zu stellen, ist es sinnvoll, einen Experten – in Form eines Herstellers oder Dienstleisters – in die Nutzungsphase mit einzubinden. Der Fokus darf dabei nicht nur auf den Energiekosten liegen. Es muss stets eine Kostenbetrachtung über den kompletten Lebenszyklus durchgeführt werden. Durch das Expertenwissen ist es möglich, Effizienzpotenziale zu erschließen und dadurch die Total Cost of Ownership TCO bzw. die Lebenszykluskosten zu reduzieren.

In den vorhergehenden Abschnitten wurden technische Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz in allen Bereichen des Druckluftsystems vorgestellt. Doch häufig werden solche Maßnahmen aufgrund von Hemmnissen nicht umgesetzt. Für die Umsetzung der Maßnahmen ist es nicht erforderlich, diese im Unternehmen eigenständig durchzuführen, da viele der beschriebenen Effizienzmaßnahmen auch als externe Dienstleistungen angeboten werden. Wichtig ist vor allem ein Bewusstsein für die hohen Energieeinsparpotenziale im Druckluftsystem zu schaffen und die Erkenntnis, dass Energieeinsparmaßnahmen zweckmäßig sind. Ist dies der Fall, kann in vier Schritten das passende Angebot gefunden werden.

Systemanalyse

Vor der Auswahl bestimmter Effizienzmaßnahmen kann es sinnvoll sein, sich durch ein Druckluftaudit einen Überblick über den Zustand des Druckluftsystems zu verschaffen. Dabei werden Aspekte wie Systemauslegung, Wartungszustand, Druckniveau und Leckageraten in den verschiedenen Bereichen des Systems analysiert.

Identifizierung von Einsparpotenzialen

Ziel dieses Schrittes ist es, auf Basis der Systemanalyse wirtschaftliche Potenziale zu identifizieren, die durch Dienstleistungen erschlossen werden können. Sind die Zielsetzungen klar definiert, kann auf den Ergebnissen des Druckluftaudits aufbauend eine Auswahl der durchzuführenden Maßnahmen getroffen werden. Häufig ist es sinnvoll verschiedene Einsparkonzepte miteinander zu kombinieren, um ein möglichst großes Potenzial auszuschöpfen. Die vorgeschlagenen Effizienzmaßnahmen führen häufig nicht nur zu einer Energieeinsparung, sondern auch zu weiteren positiven „Nebeneffekten“. Dieses können beispielsweise ein gut gewartetes System, eine zuverlässige Druckluftversorgung oder ein modernisiertes System sein.

Identifizierung von Geschäftsmodellalternativen und Bewertung

Wurden die Maßnahmen identifiziert, stellt sich die Frage nach der Art der Durchführung. Soll die Maßnahme komplett in Eigenregie durchgeführt werden oder einem externen Dienstleister in Auftrag gegeben werden? Auch Zwischenstufen, in denen einzelne Prozessschritte selbst übernommen und andere an einen Experten ausgelagert werden, sind denkbar. Die konkrete Vorgehensweise kann davon abhängig sein, ob das für die Durchführung der Maßnahme bzw. des Teilschrittes benötigte Know-how und genügend Budget für erforderliche Investitionen im Unternehmen vorhanden sind.

Umsetzung

Prinzipiell stehen verschiedene Akteure als Anbieter für Dienstleistungen zur Energieeinsparung zur Verfügung. Im Bereich der Antriebs- und Handhabungstechnik kann dies von Herstellern von Pneumatikkomponenten oder Maschinenherstellern übernommen werden, aber auch von spezialisierten Dienstleistern, die keine Produkte selbst herstellen und somit unabhängige Lösungen anbieten können. Vorgelagert im Bereich der Druckluftherzeugung kommen noch Kompressorenhersteller und Energieversorgungsunternehmen als Dienstleistungsanbieter in Betracht. Diese Angebote sind auch unter dem Stichwort Druckluftcontracting bekannt.

Wirtschaftliche Bewertung

Basis für die Nutzung von Dienstleistungen zur Reduzierung von Energieverbräuchen ist eine Einschätzung der Wirtschaftlichkeit. Im Rahmen einer lebenszyklusorientierten Wirtschaftlichkeitsberechnung ist zu kalkulieren, welche Kostenreduzierungen durch die Energieeinsparmaßnahmen erreicht werden können und ob diese ausreichend sind, um die entstehenden zusätzlichen Kosten mindestens auszugleichen. Eine Bewertung unter Zuhilfenahme verschiedener Szenarien kann dazu beitragen, die Vorabbewertung auf eine möglichst breite Basis zu stellen.

Optimierungsansatz

Bewertung von Geschäftsmodellkonfigurationen für das Leckagemanagement

Im EnEffAH Projekt wurden verschiedene Konfigurationen des Leckagemanagements hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit, der erzielbaren Energieeinsparung sowie zusätzlichen Risiken und Marktauswirkungen bewertet: Ohne Sensoren, mit Sensoren, alleiniges Angebot des Dienstleisters, Zusammenarbeit zwischen Dienstleister und Kunde, Bezahlung nach Aufwand, nach erzielter Energieeinsparung oder einer festen Rate.

Alle Varianten haben sich – bei einem Unternehmen mit großem System und durchschnittlicher Leckagerate – im Vergleich zur Nichtbeachtung der Leckagen als vorteilhaft erwiesen.

5 Energieeffizienz elektrischer Antriebe

5

In diesem Kapitel werden Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz von elektrischen Antriebssystemen vorgestellt. Die Maßnahmen sind in zwei Abschnitte aufgeteilt. Im ersten Abschnitt wird auf die Energiebereitstellung und -verteilung eingegangen, diese bietet im Vergleich zu der Pneumatik jedoch wenig Optimierungspotential. Im zweiten Abschnitt werden Maßnahmen für die Antriebe und Anwendungen vorgestellt. Hierbei kommt der Planung und Auslegung eine zentrale Rolle zu, da sich die Maßnahmen dort besonders stark auf die Energieaufnahme auswirken. Abschließend werden Maßnahmen vorgestellt, die bei der Inbetriebnahme von neuen Antrieben oder bei der Optimierung von bestehenden Anwendungen angewendet werden können.

Die Anwendbarkeit und die Einsparpotentiale jeder Maßnahme sind nicht auf beliebige Antriebe übertragbar, da die Einflussfaktoren und Voraussetzungen vielfältig sind. Desweiteren können die Komponenten und Maßnahmen nicht getrennt voneinander betrachtet werden, da oft Abhängigkeiten bestehen. Es bietet sich daher bei allen Maßnahmen die Auslegung mithilfe von Softwaretools zur Simulation der kompletten Antriebssysteme an. Damit lassen sich Verluste lokalisieren und die Potentiale der Maßnahmen bestimmen. Voraussetzung sind exakte Simulationsmodelle, welche das Systemverhalten und die Verluste korrekt abbilden.

5.1 Energiebereitstellung und -verteilung

Im Vergleich zur Pneumatik ist Energiebereitstellung bedeutend einfacher. Die Erzeugung findet in der Regel durch einen externen Energieversorger statt, und der Industriebetrieb muss sich lediglich um die Verteilung im Gebäude ab dem Stromzähler kümmern. Die Energieverteilung im Betrieb erfolgt über die Niederspannungs-Elektroinstallation (400/230 V). Bis zur Steckdose bzw. den Anschlussklemmen treten im elektrischen Verteilnetz Verluste auf, bedingt durch den Widerstand der Leitungen. Diese Widerstände bewirken einen Spannungsabfall entlang der Leitungen. Nach den geltenden DIN- bzw. VDE-Vorschriften werden die Installationen auf einen maximalen Spannungsabfall von 3 % bei maximaler Belastung des Netzes dimensioniert. Die Verluste in der Verteilung elektrischer Energie sind daher gering. Als Richtwert kann mit einem Wirkungsgrad des elektrischen Verteilnetzes von über 97 % gerechnet werden.

Elektrische Antriebssysteme benötigen teilweise zusätzlich oder ausschließlich eine Niederspannung-Gleichstromversorgung mit beispielsweise 24 V. Diese wird aus kleinen Netzteilen dezentral erzeugt. Aktuelle Schaltnetzteile für diese Anwendungen haben Wirkungsgrade im Bereich von 70 % bis 95 %.

5.1 Energiebereitstellung und -verteilung

5.1.1 Niederspannungs-Gleichstromversorgung optimieren

Wenn mehrere Antriebssysteme eine Niederspannungs-Gleichstromversorgung benötigen, sollten diese über ein gemeinsames Netzteil versorgt werden, da die verwendeten Netzteile mit höherer Nenn-Leistung in der Regel effizienter sind. Der Einsatz von modernen Schaltnetzteilen bringt weitere Effizienzgewinne. Eine auf das Watt genaue Dimensionierung der Netzteile ist nicht notwendig, da der Wirkungsgrad üblicherweise auch im Teillastbereich sehr hoch ist.

Niederspannungs-Gleichstromversorgung optimieren

Relevanz

Wenn viele Antriebssysteme die gleiche Stromversorgung verwenden können und ineffiziente Netzteile eingesetzt werden

Aufwand

Austausch eines vorhandenen Netzteils oder Wahl besonders effizienter Netzteile bei neuen Anlagen

Anwendbarkeit
10 %

Einsparung bis zu
2 %

5.1.2 Energieaufnahme im Standby reduzieren

Elektrische Antriebssysteme nehmen auch im Standby-Betrieb elektrische Leistung auf. Dies ist besonders während Produktionspausen relevant, deren Dauer zwischen mehreren Minuten und einigen Tagen liegen kann. Am meisten Energie kann gespart werden, wenn die Spannungsversorgung in Pausen komplett abgeschaltet wird. Alternativ können Komponenten in Energiesparzustände versetzt werden, sofern solche von der Software und der Hardware unterstützt werden. In Feldbussystemen sind entsprechende Befehle für die Nutzung von Energiesparzuständen teilweise bereits implementiert. Häufig wird aufgrund von möglichen Einschalt Schwierigkeiten beim Hochfahren der Anlage auf eine Abschaltung oder die Nutzung von Energiesparzuständen verzichtet. Aus diesem Grund sollte der Einschaltvorgang möglichst automatisiert werden, um ihn möglichst reproduzierbar und mit hoher Zuverlässigkeit ausführen zu können.

Energieaufnahme im Standby reduzieren

Relevanz

Überall, wo in Pausen die elektrischen Antriebssysteme nicht abgeschaltet werden

Aufwand

Vorhandene Anlagen um Abschaltmöglichkeiten erweitern; bei neuen Anlagen entsprechende Komponenten einsetzen

Anwendbarkeit
20 %

Einsparung bis zu
5 %

5.2 Antriebe und Anwendung

Planung und Auslegung

Der Planung und Auslegung elektrischer Antriebssysteme kommt eine entscheidende Bedeutung zu, da sich dadurch die meiste Energie einsparen lässt. Voraussetzung für eine energieeffiziente Auslegung ist die genaue Kenntnis der Anwendung und der Randbedingungen. Je genauer die geforderte Bewegung, die zu bewegende Masse, externe Kräfte und sonstige Bedingungen bekannt sind, umso besser kann das optimale Antriebssystem gefunden werden.

5.2.1 Reibungsarme mechanische Komponenten einsetzen

Die Verluste der mechanischen Komponenten entstehen zum Großteil durch Reibung. Daher sollten möglichst reibungsarme Komponenten eingesetzt werden. Dies gilt sowohl für Linearachsen, Führungen als auch für eventuelle Getriebe.

Beispiel:

Eine lineare Bewegung um 0,4 m mit einer Masse von 5 kg innerhalb von einer Sekunde kann mit einer Vielzahl von Antriebssystemen realisiert werden. Im Projekt wurden drei Antriebssysteme für diese Bewegung verglichen. Eine Zahnriemenachse, die direkt von einem Motor angetrieben wurde, nahm dabei eine mittlere elektrische Leistung von 35,5 W auf. Dieselbe Zahnriemenachse, angetrieben durch einen Motor mit Getriebe nahm 44,4 W auf (+25 %) und eine vergleichbare Spindelachse benötigte 91,61 W (+158 %). Den größten Einfluss auf die so unterschiedliche Energieeffizienz hat dabei die Reibung der mechanischen Komponenten. Es wird deutlich, dass der Auswahl der mechanischen Komponenten eine entscheidende Bedeutung zukommt.

Reibungsarme mechanische Komponenten einsetzen ★ ★ ★	
Relevanz Für alle Anwendungen, bei denen unterschiedliche Realisierungsmöglichkeiten bestehen	Aufwand Vergleich der Reibung bei der Auslegung
Anwendbarkeit 10 %	Einsparung bis zu 20 %

5.2.2 Bewegte Massen minimieren

Neben der Nutzlast, also der Masse, die von der Anwendung bewegt werden muss, müssen Teile der Mechanik des Antriebssystems mit beschleunigt und abgebremst werden. Jedes Beschleunigen und Abbremsen benötigt Energie. Je größer die bewegte Masse ist, desto größer ist die ungesetzte Energiemenge. Daher ist es sinnvoll, diese bewegten Massen zu minimieren. Dies kann einerseits durch die Verwendung von Leichtbaukomponenten geschehen, andererseits sollte die Baugröße der Achsen nur so groß gewählt werden, wie es notwendig ist. Jede Überdimensionierung schlägt sich in vergrößerten bewegten Massen nieder und verursacht unnötige Verluste.

Besonders bei Mehrachssystemen für mehrdimensionale Bewegungen ist auf möglichst geringe bewegte Massen zu achten. Bei kartesischen Raumportalen müssen bis zu zwei Lineareinheiten von einer dritten bewegt werden. Diese Massen können bei Pick&Place-Anwendungen ein Vielfaches der eigentlich zu bewegenden Nutzlast sein. Hier stecken große Einsparpotentiale, da durch den Einsatz von Leichtbaukomponenten oder optimierten Anordnungen wie Delta-Kinematiken/Tripods oder H-Portalen mit umlaufendem Riemen die bewegten Massen deutlich reduziert werden können.

Bewegte Massen minimieren ★ ★ ★	
Relevanz Bei dynamischen Bewegungen, insbesondere bei mehrdimensionalen Antriebssystemen	Aufwand Vergleich der bewegten Massen in der Auslegung
Anwendbarkeit 10 %	Einsparung bis zu 15 %

5.2.3 Überdimensionierungen vermeiden

Die Überdimensionierung von Antriebskomponenten aller Art führt in der Regel zu unnötig hohen Leistungsaufnahmen. Wenn die Auslegungskette von der Mechanik über den Motor bis zum Servocontroller durchgeführt wird, werden oft bei jedem Schritt Sicherheitsfaktoren eingerechnet, was zur Folge hat, dass der Motor und der Servocontroller insgesamt stark überdimensioniert sind. Überdimensionierungen von 50 bis 100 % sind keine Seltenheit. Dadurch arbeiten diese Komponenten oftmals in Betriebspunkten, für die sie nicht optimiert wurden und benötigen mehr Energie als eigentlich nötig. Zusätzlich ergibt sich durch die Auswahl überdimensionierter Komponenten eine unverhältnismäßig große bewegte Masse was zu weiterer Zunahme des Energieverbrauchs führt.

Die Auslegung aller Komponenten muss in einer gemeinsamen Auslegungssoftware vorgenommen werden. Wenn die Anforderung der Bewegung genau bekannt sind, können alle Komponenten passend ausgewählt werden und Überdimensionierungen vermieden werden.

Überdimensionierungen vermeiden ★ ★	
Relevanz Antriebsauslegung, bei der zu große Sicherheitsfaktoren eingerechnet sind	Aufwand Auslegung aller Komponenten mit geeigneten Softwaretools
Anwendbarkeit 50 %	Einsparung bis zu 10 %

5.2.4 Energieaufnahme in Bewegungspausen optimieren

Die beim Start-Stopp-Betrieb von Antriebssystemen zyklisch auftretenden Bewegungspausen sind getrennt von der Bewegung zu betrachten. Wenn in den Bewegungspausen eine Kraft aufgebracht werden muss oder die Position aktiv gehalten werden soll, muss auch die Energieaufnahme in diesen Pausen untersucht werden. Möglich ist das Halten der Position über den Motor, den Einsatz einer Haltebremse oder die Verwendung einer selbsthemmenden Mechanik. Allgemeine Aussagen, welche Option das Optimum darstellt, sind nicht möglich. Es muss individuell untersucht werden, wie die Randbedingungen sind und welche Möglichkeit die geringste Energieaufnahme zur Folge hat. Je länger die Bewegungspausen im Vergleich zu der Bewegung sind und je größer die aufzubringenden Kräfte sind, umso sinnvoller ist eine Optimierung. Der Einsatz selbsthemmender Mechaniken kann einen Konflikt zu der Maßnahme des Einsatzes reibungsarmer Komponenten sein. Auch hier muss individuell abgewogen werden.

Energieaufnahme in Bewegungspausen optimieren ★ ★	
Relevanz Bei langen Bewegungspausen im Vergleich zu den Bewegungszeiten und wenn in der Endlage eine Haltekraft nötig ist	Aufwand Vergleich der Energieaufnahme in Bewegungspausen
Anwendbarkeit 10 %	Einsparung bis zu 4 %

5.2.5 Einsatz effizienter Motoren

Durch die Wahl des richtigen Motors kann die Energieeffizienz erhöht werden. Eine Bewertung und Auswahl aufgrund von Datenblattangaben ist jedoch oft nicht möglich, da Angaben zum energetischen Verhalten der Komponenten nicht verfügbar sind. Die Dimensionierung stützt sich meist auf Drehmoment- und Drehzahlenforderungen, doch die Verluste, die sich im Betrieb ergeben, sind nicht einfach bestimmbar. Ein objektiver Vergleich der Energieeffizienz von Motoren mit Wirkungsgraden ist nur bei stationärem kontinuierlichem Betrieb möglich. Für instationäre Bewegungen (Start-Stopp-Betrieb) wie sie in der Handhabungstechnik üblich sind, kann ein allgemein gültiger Wirkungsgrad nicht angegeben werden. In diesem Fall darf ein Wirkungsgrad aus dem Datenblatt lediglich als Anhaltspunkt für den Vergleich der Energieeffizienz ähnlicher Motoren verstanden werden.

Permanenterregte Synchronmaschinen stellen in einer Vielzahl von Anwendungen das Optimum dar, da sie über einen weiten Betriebsbereich geringe Verluste aufweisen. Wenn es möglich ist, einen Motor als Direktantrieb anstatt einer Motor-Getriebe-Kombination einzusetzen, kann dies durch geringere Reibung oft energetisch günstig sein. Allerdings kann unter Energieeffizienzgesichtspunkten auch der Einsatz eines Linear-Direktantriebs, von Schrittmotoren oder Gleichstrommotoren sinnvoll sein. Es gibt keinen Motor, der in jedem Fall das Optimum darstellt. Welche Verluste bei der Anwendung auftreten, kann dabei durch Messungen oder Simulationen ermittelt werden, sofern detaillierte Simulationsmodelle vorhanden sind.

Einsatz effizienter Motoren 	
Relevanz Wenn zwischen unterschiedlichen Motoren gewählt werden kann	Aufwand Vergleich der Motorverluste bei der Auslegung
Anwendbarkeit 30 %	Einsparung bis zu 3 %

5.2.6 Einsatz effizienter Servocontroller

Neben der Auswahl der richtigen Baugröße des Servocontrollers spielen auch die Verluste in der Elektronik eine entscheidende Rolle. Daher sollten möglichst effiziente Servocontroller eingesetzt werden. Es sind hierbei zwei Auswahlkriterien wichtig. Dies sind einerseits die belastungsabhängigen Verluste, welche möglichst gering sein sollten. Ein Anhaltspunkt hierfür ist ein hoher Nennwirkungsgrad, auch wenn man mit ihm die Verluste lediglich grob abschätzen kann, sofern nicht überdimensioniert wurde. Das zweite Kriterium ist die Leistungsaufnahme im Stillstand des Motors oder im Standby. Servocontroller nehmen auch hier in der Regel elektrische Leistung auf, diese kann insbesondere bei kleinen Antriebsleistungen und langen Stillstandzeiten die gesamte Energieaufnahme maßgeblich beeinflussen. Wie auch bei anderen Komponenten, können die auftretenden Verluste nur mit detaillierten Angaben oder Simulationsmodellen bestimmt werden.

Einsatz effizienter Servocontroller 	
Relevanz Wenn zwischen unterschiedlichen Servocontrollern gewählt werden kann	Aufwand Vergleich der Elektronikverluste bei der Auslegung
Anwendbarkeit 20 %	Einsparung bis zu 3 %

5.2.7 Motorkabellänge minimieren

Die Motoren werden über ein vieladriges Motorkabel mit dem Servocontroller verbunden. Die Leitungswiderstände der Kabel sorgen für Verluste, dadurch erhöhen sich die Verluste bei langen Kabeln. Desweiteren beeinflussen die in der Regel geschirmten Kabel das Schaltverhalten der Servocontroller negativ und können zusätzliche Verluste im Servocontroller verursachen. Dies ist besonders bei Antriebssystemen kleiner Leistung relevant. Es kann daher sinnvoll sein, bei größeren Automatisierungssystemen nicht alle Servocontroller an einem Ort zu installieren, sondern sie dezentral in der Nähe der Motoren anzubringen.

Motorkabellänge minimieren

Relevanz

Bei Antriebssystemen kleiner Leistung mit sehr langen Motorkabeln und Freiheiten in der Anordnung

Aufwand

Berücksichtigung in der Planung

Anwendbarkeit
5 %

Einsparung bis zu
2 %

5.2.8 Nutzung der Bremsenergie

Bei typischen Positioniervorgängen wird zyklisch beschleunigt und gebremst. Während der Beschleunigungsphasen wird dem Antriebsmotor elektrische Energie zugeführt, die anschließend zum Teil in die kinetische Energie der bewegten Massen umgewandelt wird und zum Teil durch Verluste verloren geht. Während den Bremsphasen wird diese kinetische Energie durch den Antriebsmotor wieder in elektrische Energie umgewandelt, wobei auch hier Verluste entstehen. Je nach Antriebssystem kann ein Teil der zurückgewonnenen Bremsenergie in den vorhandenen Kondensatoren gespeichert werden. Falls deren Speicherkapazität nicht ausreicht, werden Widerstände zugeschaltet, welche die Bremsenergie in Wärme umwandeln. Sobald diese Widerstände zugeschaltet werden, geht elektrische Energie verloren. Bei der Auslegung eines Antriebssystem muss ermittelt werden, ob und wie viel Bremsenergie auftritt und ob diese im Zwischenkreis gespeichert werden kann. Falls die Speicherkapazität nicht ausreicht kann sie durch mehrere Maßnahmen vergrößert werden:

1. Durch Parallelschaltung zusätzlicher Kondensatoren kann die Zwischenkreiskapazität vergrößert werden. Sofern der Servocontroller dies unterstützt, ist dies durch Verbinden mit einem passiven Zusatzspeichermodul möglich. Diese Module bestehen lediglich aus passiv verschalteten Kondensatoren.
2. Sofern mehrere Antriebe nebeneinander betrieben werden, kann überprüft werden, ob sie sich mit einem gemeinsamen Gleichspannungszwischenkreis betreiben lassen. Dies kann entweder durch einen Mehrachs-Servocontroller geschehen oder durch elektrisches Verbinden der Zwischenkreise, sofern dies technisch möglich ist. Dadurch wird die Zwischenkreiskapazität vergrößert, was jedoch nur hilfreich ist, sofern nicht mehrere Antriebe zur gleichen Zeit bremsen. Zusätzlich ist eine direkte Verwendung der Energie möglich, sofern gleichzeitig ein Antrieb Energie zur Beschleunigung benötigt während sich ein anderer in der Bremsphase befindet.

3. Sofern diese beiden Möglichkeiten nicht realisierbar sind oder die Speicherkapazität nicht ausreicht, kann ein aktives Zusatzspeichermodul verwendet werden. Weitere Informationen dazu finden Sie im anschließenden Optimierungsansätze-Block .

In jedem Fall müssen jedoch zuvor die Energieflüsse analysiert werden, was bei Kenntnis der Anwendung in Berechnungen und Simulationen möglich ist.

Nutzung der Bremsenergie



Relevanz

Bei hochdynamischen Antrieben, bei denen die Speicherkapazität des Servocontrollers nicht ausreicht

Aufwand

Gemeinsamer Zwischenkreis oder Ergänzung eines Speichermoduls

Anwendbarkeit
10 %

Einsparung bis zu
5 %

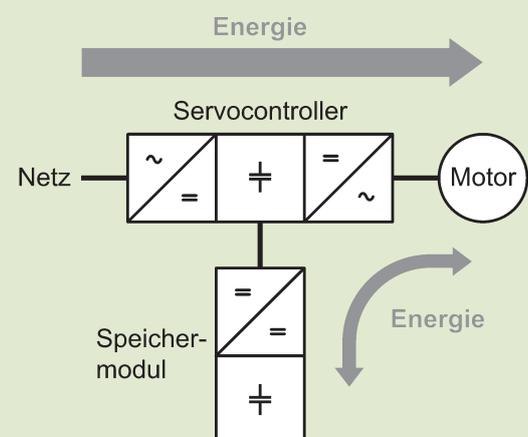
Optimierungsansatz

Zwischenspeichermodul zur Pufferung von Bremsenergie

In der Regel ist die Zwischenkreis-Speicherkapazität eines Motorcontrollers aus Kostengründen eher klein dimensioniert. Bei Anwendungen mit sehr dynamischen Bewegungen kann dieser Energiespeicher oft nicht die komplette Bremsenergie aufnehmen, daher wird sie in Wärme umgesetzt. Im Projekt wurde ein variables Zwischenspeichermodul entwickelt, welches mit dem Gleichspannungszwischenkreis des Servocontrollers verbunden wird und dann größere Mengen von Bremsenergie verlustarm zwischenspeichern kann.

Das Zwischenspeichermodul besteht aus einer leistungselektronischen Schaltung und einem Speicherkondensator. Bei der Schaltung handelt es sich um einen bidirektionalen Gleichspannungssteller, welcher den Speicherkondensator dynamisch laden und entladen kann. Dadurch kann in dem Kondensator eine deutlich größere Energiemenge gespeichert werden, als wenn er rein passiv mit dem Zwischenkreis verbunden werden würde. Bei einer Bremsphase wird die Bremsenergie in den Speicherkondensator übertragen. Diese gespeicherte Energie

wird während einer nachfolgenden Beschleunigungsphase in den Zwischenkreis zurück gespeist und für die Beschleunigung des Motors wiederverwendet. Nachteil der Anordnung sind höhere Verluste als bei einem passiven Zusatzspeichermodul. Im Probebetrieb mit einem Portal-Antrieb konnte die Funktion getestet werden und im Vergleich zum herkömmlichen Betrieb 17 % der Energie eingespart werden. Das Einsparpotential hängt jedoch stark von der individuellen Anwendung ab.



Inbetriebnahme und Optimierung im Betrieb

Die folgenden Maßnahmen können einerseits bei der Inbetriebnahme von neuen Anlagen und andererseits zur Optimierung bestehenden Anlagen angewendet werden. Sie erfordern keine Änderungen im Aufbau, sondern setzen bei der Regelung an.

5.2.9 Bewegungsprofil anpassen

Die Wahl des Bewegungsprofils hat einen großen Einfluss auf die Energieaufnahme. Als Bewegungsprofil wird die Form der zeitlichen Verläufe von Beschleunigung, Geschwindigkeit und Weg bezeichnet. Es ist eine Vielzahl von Bewegungsprofilen in der Praxis im Einsatz. Sofern es die Randbedingungen zulassen, sollten möglichst energieoptimierte Bewegungsprofile eingesetzt werden. So hat beispielsweise die Zeit pro Bewegung einen großen Einfluss auf die Energieaufnahme, daher sollte die Bewegung nur so schnell ausgeführt werden, wie es von der Anwendung her notwendig ist.

Bewegungsprofil anpassen ★ ★ ★	
Relevanz Wenn die Anwendung Freiheitsgrade der Bewegung zulässt oder noch Zeitreserven vorhanden sind	Aufwand Änderung der Bewegungsvorgabe in der Ansteuerung
Anwendbarkeit 20 %	Einsparung bis zu 8 %

Optimierungsansatz

Einfluss des Bewegungsprofils und der Zeit pro Bewegung

Im Rahmen des Projekts wurden fünf Bewegungsprofile verglichen. Sie sind alle so gewählt, dass das bewegte Objekt innerhalb der gleichen Zeit dieselbe Strecke zurücklegt. Der Verlauf des Wegs (s) unterscheidet sich nur minimal, obwohl sich die zeitlichen Verläufe von Geschwindigkeit (v) und Beschleunigung (a) deutlich unterscheiden.

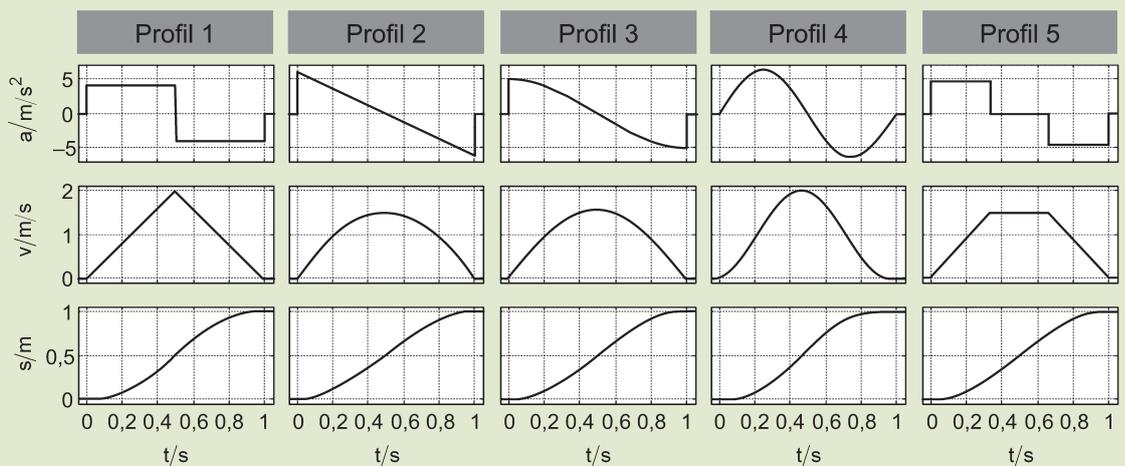
Profil 1 wird auch zeitoptimales Profil genannt, da es für eine gegebene maximale Beschleunigung

die Zeit pro Bewegung minimiert. Aus der Beschleunigungsphase wird direkt in die Bremsphase gewechselt.

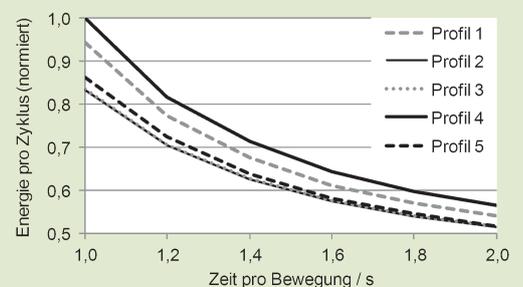
Im Gegensatz dazu wird das **Profil 2** energieoptimales Profil genannt, es kann durch eine Minimierung des Effektivwerts der Beschleunigung hergeleitet werden, welcher in einer einfachen Näherung als Maß für die Verluste dient.

Profil 3 hat eine große Ähnlichkeit mit Profil 2, hat jedoch einen Cosinus-förmigen Beschleunigungsverlauf.

Profil 4 ist ein ruckfreies Bewegungsprofil und **Profil 5** ist eine Abwandlung von Profil 1, mit einem Zeitabschnitt mit konstanter Geschwindigkeit.



Im folgenden Diagramm ist die notwendige elektrische Energie eines Elektromotors pro Bewegungszyklus normiert dargestellt. Wie sich zeigt hängt der Energiebedarf stark vom Bewegungsprofil ab. Bei gleichen Randbedingungen unterscheidet er sich hier um bis zu 17 %. Das energieoptimale Profil 2 benötigt stets am wenigsten Energie und durch die große Ähnlichkeit benötigt Profil 3 nur minimal mehr Energie. Desweiteren steigt der Energiebedarf bei Verkürzung der Zeit pro Bewegung stark an, was einer Erhöhung von der Geschwindigkeit und Beschleunigung entspricht.



5.2.10 Schwingungen der Regelung reduzieren

Eine energieeffiziente Regelung wird erreicht, wenn das Einschwingverhalten möglichst schwingungsarm eingestellt wird. Jede auftretende Schwingung hat einen Ausgleichsvorgang zur Folge, welcher Leistung benötigt. Falls in der Applikation Schwingungen auftreten, sollten diese mit den gängigen Optimierungsverfahren der Regelungstechnik beseitigt werden. Gut eingestellte Regler bieten kein Optimierungspotential, da durch Optimierung des Führungsverhaltens die Energieaufnahme bereits indirekt minimiert wurde.

Schwingungen der Regelung reduzieren 	
Relevanz Bei schwingungsfähigen Regelstrecken und schlecht eingestellten Reglern	Aufwand Optimierung der Reglereinstellungen oder Änderung der Reglerstruktur
Anwendbarkeit 10 %	Einsparung bis zu 10 %

Optimierungsansatz

Vergleich der Energieeffizienz von Antriebssystemen durch Simulation

Bewertung der Energieeffizienz

Mithilfe von Wirkungsgraden lässt sich die elektrische Energieaufnahme in stationären Betriebspunkten berechnen und somit die Energieeffizienz und das Energieeinsparpotential bewerten. Im Bereich der Automatisierungs- und Handhabungstechnik befinden sich viele Antriebssysteme im nicht-stationären Betrieb, sie beschleunigen und bremsen zyklisch. Wirkungsgrade sind in hohem Maße vom jeweiligen Betriebspunkt abhängig und zudem nicht für jeden Punkt bekannt. Daher lässt sich mithilfe der Wirkungsgrade nicht objektiv bewerten, welches Antriebssystem für ein und dieselbe Anwendung die geringste Energieaufnahme haben wird. Der Energiebedarf wird durch das Zusammenspiel aller Komponenten und nicht zuletzt auch durch die Regelung beeinflusst. Für eine objektive Bewertung der Energieeffizienz muss daher das Antriebssystem als Ganzes untersucht werden.

Bewertungsgröße

Für die Bewertung der Energieeffizienz elektrischer Antriebssysteme im nicht-stationären Betrieb wird die elektrische Energieaufnahme pro Bewegungszyklus als Vergleichsgröße vorgeschlagen; diese ist als Integral der gesamten aufgenommenen elektrischen Leistung über einen Bewegungszyklus definiert.

$$E_{\text{Zyklus}} = \int_{\text{Zyklus}} P_{\text{ges}}(t) dt$$

Mit dieser Größe ist eine objektive Bewertung möglich, da alle Verluste des Systems darin enthalten sind, wie z. B. die Verluste der Mechanik, des Motors aber auch Verluste der Leistungs- und Signalelektronik. Letztere sind insbesondere bei Antrieben kleiner Leistung (<1 kW) mit langen Bewegungspausen nicht vernachlässigbar.

Bestimmung der Bewertungsgröße durch Simulation

Die Vergleichsgröße „Energie“ soll bei der Systemauslegung zur Verfügung stehen. Messungen mit unterschiedlichen Komponentenkombinationen sind in der Planungsphase nicht mit vertretbarem Aufwand durchführbar. Daher sollte die benötigte Energiemenge durch Simulation mit einem Modell des Antriebssystems bestimmt werden. Hierzu sind energieexakte Modelle aller Komponenten notwendig. Diese Modelle umfassen nicht nur die mechanischen Komponenten, die Motoren und die Regelung, sondern elektrischer Komponenten wie Pulswechselrichter, Gleichspannungszwischenkreis und Netzeinspeisung. Beim Aufbau der Modelle wird zwischen einer sehr genauen Modellierung und einfacher Parametrierung abgewogen, um einerseits das Systemverhalten und die Verluste genau genug zu modellieren – andererseits soll die Modellerstellung nicht zu aufwendig sein und die Simulation einfach und schnell durchführbar sein.

Im Rahmen des EnEffAH-Projekts wurden Simulationsmodelle entwickelt, mit denen die Energieeffizienz von beispielhaften Antriebssystemen verglichen werden kann. Um diese Bewertungsmethode in der Praxis einzusetzen, müssen Modelle aller möglichen Antriebssysteme verfügbar sein, um diese miteinander vergleichen zu können. Denkbar wäre, dass die Simulationsmodelle standardisiert werden und Antriebshersteller diese Modelle oder deren Parameter für Vergleiche zur Verfügung stellen.

6 Überblick Maßnahmen

6

Im Folgenden sind die in der Broschüre vorgestellten Maßnahmen zur besseren Übersicht in zwei Tabellen zusammengefasst.

Mit jeder einzelnen der vorgestellten Maßnahmen können Effizienzpotentiale erschlossen werden. Die Maßnahmen beeinflussen sich allerdings gegenseitig, so dass eine Umsetzung immer im Gesamtzusammenhang geprüft werden muss. Einzelne Maßnahmen schließen sich sogar gegenseitig aus (Bsp.: generelle Druckabsenkung und effiziente Auslegung von Antrieben).

Hinweis zur Addition der Effizienzsteigerungen

Durch eine gegenseitige Beeinflussung ist keine Aussage einer Steigerung der Gesamteffizienz einer Anlage auf Basis der hier vorgestellten Werte möglich. Die prozentualen Effizienzsteigerungen lassen sich nicht einfach addieren um eine gesamte Energieeinsparung zu ermitteln!

Auch die prozentualen Einsparungen der vorgestellten Maßnahmen in der pneumatischen und elektrischen Antriebs- und Handhabungstechnik können nicht mit einander verglichen werden, da sie sich auf eine andere Basis beziehen.

6.1 Übersicht über die Maßnahmen in der pneumatischen Antriebs und Handhabungstechnik

	Kap.	Maßnahme	Anwendbarkeit	Einsparung bis zu	Wertung
Bereitstellung	4.1.1	Kompressorauslegung und Verbundsteuerung	20 %	20 %	★★★
	4.1.2	Zentrale Wärmerückgewinnung	50 %	96 %*	★★★
	4.1.3	Drehzahlgeregelte Kompressoren	25 %	15 %	★★
	4.1.4	Absenkung des Netzdrucks	50 %	15 %	★★
Aufbereitung	4.2.1	Trocknung von Druckluft Kältetrockner	60 %	2 %	★
		Adsorptionstrockner	10 %	20 %	★★
	4.2.2	Auslegung der DL-Aufbereitung	20 %	10 %	★★
	4.2.3	Regelmäßige Wartung der DL-Aufbereitung	80 %	20 %	★★★
Verteilung	4.3.1	Optimierte Dimensionierung von Leitungen	20 %	10 %	★★
	4.3.2	Optimierung der Netzinfrastruktur	40 %	5 %	★
	4.3.3	Robustheit und Platzierung von Zwischenspeichern	40 %	10 %	★★
	4.3.4	Beseitigung von Leckagen im Netz	80 %	5 %	★★★
Anwendung	4.4.1	Korrekte Auslegung von Antrieben und Komponenten	80 %	40 %	★★★
	4.4.2	Vermeidung von Totvolumen	30 %	20 %	★★
	4.4.3	Leckageortung und Beseitigung (Anlage/Anwendung)	70 %	20 %	★★★
	4.4.4.1	Einfach wirkender Zylinder	10 %	50 %	★★
	4.4.4.2	Kurzschlussventil	10 %	43 %	★★
	4.4.4.3	Zuluftdrosselung & gezieltes Abschalten Optimierte Ventilansteuerung	30 %	50 %	★★
			30 %	65 %	★★

* Die zentrale Wärmerückgewinnung nimmt unter den Maßnahmen eine Sonderstellung an. Die hier gezeigten Einsparungen sind keine Einsparungen im eigentlichen Sinn. Die durch Wärmerückgewinnung gewonnene Energie stellt einen Zusatznutzen dar, der in anderen Unternehmensbereichen realisiert werden kann.

Die diskutierten Energieeinsparungen beziehen sich bei allen Maßnahmen auf den Energieverbrauch des aktuell betrachteten Teils der Anlage. Prozentuale Einsparungen in der Tabelle dürfen nicht miteinander verglichen werden, da die Ausgangsbasis stets eine andere ist. Die pneumatischen Anwendungen im Bereich der Antriebs- und Handhabungstechnik stellen z. B. nur einen geringen Anteil des gesamten Druckluftverbrauchs im Unternehmen (Annahme: ca. 20 %). Bezogen auf den gesamten Druckluftumsatz des Unternehmens fallen die prozentualen Einsparungen bei Maßnahmen in der pneumatischen Anwendung daher geringer aus als in der Tabelle angegeben. Aus diesem Grund sind die Angaben um die Wertung ergänzt (ein bis drei Sterne), welche den Nutzen ins Verhältnis zum Aufwand setzt.

6.2 Übersicht über die Maßnahmen in der elektrischen Antriebs und Handhabungstechnik

	Kap.	Maßnahme	Anwendbarkeit	Einsparung bis zu	Wertung
Bereitstellung	5.1.1	Niederspannungs-Gleichstromversorgung optimieren	10 %	2 %	★
	5.1.2	Energieaufnahme im Standby reduzieren	20 %	5 %	★★
Planung	5.2.1	Reibungsarme mechanische Komponenten einsetzen	10 %	20 %	★★★★
	5.2.2	Bewegte Massen minimieren	10 %	15 %	★★★★
	5.2.3	Überdimensionierungen vermeiden	50 %	10 %	★★
	5.2.4	Energieaufnahme in Bewegungspausen optimieren	10 %	4 %	★★
	5.2.5	Einsatz effizienter Motoren	30 %	3 %	★
	5.2.6	Einsatz effizienter Servocontroller	20 %	3 %	★★
	5.2.7	Motorkabellänge minimieren	5 %	2 %	★
	5.2.8	Nutzung der Bremsenergie	10 %	5 %	★★
Antriebe & Anwendung	5.2.9	Bewegungsprofil anpassen	20 %	8 %	★★★★
	5.2.10	Schwingungen der Regelung reduzieren	10 %	10 %	★★

Die vorgestellten Maßnahmen und deren Energieeffizienzpotentiale beziehen sich immer auf den Gesamtenergieverbrauch für die elektrische Antriebs- und Handhabungstechnik im Unternehmen. Aus diesem Grund sind sie nicht direkt mit den Einsparungen der pneumatischen Maßnahmen vergleichbar.

6.3 Der Weg zur energieeffizienten Antriebs- und Handhabungstechnik

Schritt 1 - Erste Hilfe

Geringer Aufwand - Hoher Nutzen

Pneumatische Antriebs und Handhabungstechnik:

Die bedeutendste und erfreulicherweise auch an nahezu allen Anlagen umsetzbare Maßnahme zur Steigerung der Energieeffizienz ist die Suche und Beseitigung von Leckagen. Diese kann entweder von den eigenen Mitarbeitern oder - wenn keine freien Kapazitäten oder das benötigte Know-How bzw. die Gerätschaften nicht vorhanden sind – als Dienstleistung eingekauft werden. Auch die regelmäßige Wartung der Komponenten der Druckluftaufbereitung führt bei gerechtfertigtem Aufwand sofort zu Energieeinsparungen.

Elektrische Antriebs- und Handhabungstechnik:

In bestehenden Systemen lassen sich ohne großen Eingriff in das System Energieeffizienzpotentiale erschließen indem die Bewegungsprofile der Antriebe energieoptimiert werden und Schwingungen der Regelung reduziert werden.

Schritt 2 – Bewusstsein schaffen

Voraussetzungen, damit Energieeffizienz gelebt und dauerhaft angewandt wird

In einem zweiten Schritt sollte ein Bewusstsein für das Thema Energieeffizienz bei allen Mitarbeitern gesteigert werden. Hemmnisse müssen abgebaut werden. Dies ist die Voraussetzung dafür, dass umgesetzte Maßnahmen auch einen dauerhaften Erfolg aufweisen können. Das gewonnene Bewusstsein sollte dann auch auf Lieferanten (z. B. in Lastenheften) und Kunden (z. B. über das Marketing) übertragen werden.

Schritt 3 – Werden Sie Energieeffizienz Champion!

Maßnahmen mit sinnvollem Nutzen/ Aufwand-Verhältnis

Alle in dieser Broschüre vorgestellten Maßnahmen sind wichtige Schritte hin zu einer energieeffizienten Produktion. In einem durchschnittlichen Unternehmen sind sie alle wirtschaftlich. Jedoch muss in jedem Unternehmen einzeln geprüft werden, welche Maßnahmen das beste Nutzen/Aufwand-Verhältnis versprechen und vorrangig angegangen werden sollten.

- Effiziente Auslegung von Komponenten
- Bewegte Massen reduzieren
- Reibung im System reduzieren
- Nutzung von Betriebsstrategien (Pneumatik): einfach wirkende Zylinder, Kurzschlussventile, gezieltes Abschalten der Druckluftzufuhr, ...
- Vermeidung von Totvolumen (Pneumatik)
- Effiziente Kompressorsteuerung mit Splitting Systemen oder drehzahlgeregeltem Kompressor (Pneumatik)
- Wärmerückgewinnung am Kompressor (Pneumatik – bis zu 96 % der eingesetzten Energie zusätzlich als Wärme nutzbar)
- Energieaufnahme im Standby reduzieren (Elektrische Antriebe)

7.1 Schlussfolgerungen

7

Mit dieser Broschüre soll dem Anwender eine Orientierungshilfe zur energieeffizienten Ausgestaltung seiner Antriebs- und Handhabungstechnik an die Hand geben werden.

Es wurde gezeigt, dass zahlreiche Ansatzpunkte für eine Verbesserung der Energieeffizienz existieren. In der Regel können zwar unter technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten nicht alle aufgeführten Maßnahmen in vollem Umfang ausgeschöpft werden, dennoch können durch die passende Auswahl und die richtige Nutzung der Antriebs- und Handhabungstechnik in fast jedem Unternehmen spürbare Energie- und Kosteneinsparungen erreicht werden, ohne Leistungsverluste hinnehmen zu müssen.

Die Höhe der erzielbaren Einsparungen hängt in der Regel von den konkreten Rahmenbedingungen vor Ort ab. Aber auch die Maßnahmen selbst spielen eine Rolle: Einige der aufgeführten Maßnahmen sind bereits mit sehr wenig Aufwand umsetzbar, während andere sich eher im Rahmen einer Anlagenmodernisierung oder Neuplanung anbieten. Es ist dabei wichtig, das Thema Energieeffizienz stets ganzheitlich zu denken, und nicht ausschließlich auf einzelne Komponenten bezogen zu sehen. Eine kontinuierliche Auseinandersetzung mit der Thematik bringt in der Regel mehr, als Energieeffizienz nur sporadisch zu betrachten. Dabei bildet die organisatorische Verankerung der Energieeffizienz eine wichtige Grundlage, um neben energieeffizienten technischen Lösungen auch dauerhaft ein breites Bewusstsein für den sinnvollen Umgang mit Energie im eigenen Betrieb zu schaffen.

Es bleibt festzustellen, dass mit Blick auf eine optimale Anlagenausgestaltung stets technologieübergreifend gedacht werden sollte. Die hier dargestellten elektrischen und pneumatischen Antriebstechnologien haben jeweils spezifische Vor- und Nachteile, sowohl mit Blick auf den Energieverbrauch, aber auch mit Blick auf andere Aspekte wie Flexibilität oder Kosten. Die Ausgestaltung einer optimalen Anwendung kann in der Regel nur nach einer sorgfältigen Analyse und Abwägung dieser Aspekte erfolgen. Ist dies nicht in Eigenregie möglich, so können hier Technologielieferanten hilfreich zur Seite stehen. Darüber hinaus werden in den letzten Jahren immer mehr energieorientierte Dienstleistungen angeboten, um den Anwender vor Ort mit der Thematik zu unterstützen.

**Es existieren
also zahlreiche
Möglichkeiten,
energieeffizient
zu sein!
Man sollte sie
ergreifen!**

Weitere Infos über das Projekt gibt es auf der Website www.eneffah.de.

7.2 Kontakte

Kompetente Hilfe bei allen in dieser Broschüre behandelten Themen bekommen Sie bei allen Industrie- und Forschungs-Partnern des EnEffAH Projektes.

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI)	Breslauer Straße 48 76139 Karlsruhe Tel. +49 (0)721 6809-0 Fax +49 (0)721 689152 info@isi.fraunhofer.de www.isi.fraunhofer.de
Institut für Leistungselektronik und Elektrische Antriebe (ILEA)	Pfaffenwaldring 47 70569 Stuttgart Universität Stuttgart Tel. +49 (0)711 685 67401 Fax +49 (0)711 685 67378 ilea@ilea.uni-stuttgart.de www.ilea.uni-stuttgart.de
Institut für Systemdynamik (ISYS) Universität Stuttgart	Pfaffenwaldring 9 70569 Stuttgart Postfach 80 11 40 D-70511 Stuttgart Tel. +49 (0)711 685-66302 Fax +49 (0)711 685-66371 sekisys@isys.uni-stuttgart.de www.isys.uni-stuttgart.de
Festo AG & Co. KG	Rüter Str. 82 73734 Esslingen Postfach 73726 Esslingen Tel. +49 (0)711 347-0 Fax +49 (0)711 347-3613 energieeffizienz@de.festo.com www.festo.de
Kaeser Kompressoren AG	Carl-Kaeser-Straße 26 96450 Coburg Postfach 2143 96410 Coburg Tel. +49 (0)9561 640-0 Fax +49 (0)9561 640-130 info@kaeser.com www.kaeser.de
Metronix Meßgeräte und Elektronik GmbH	Kocherstr. 3 38120 Braunschweig Tel. +49 (0)531 8668-0 Fax +49 (0)531 8668-555 vertrieb@metronix.de www.metronix.de

7.3 Veröffentlichungen aus dem Projekt

Die folgenden Veröffentlichungen entstanden im Rahmen des Projekts:

F. Blank, J. Roth-Stielow: **Bewertungsmethode für die Energieeffizienz eines elektrischen Antriebssystems**, Tagungsband zur SPS/IPC/Drives 2010 (23. - 25.11.2010, Nürnberg), S. 321-329.

F. Blank, J. Roth-Stielow: **Energieexakte Simulationsmodelle zur Bewertung der Energieeffizienz**, Tagungsband zum Internationaler ETG-Kongress 2011 (08.-09.11.2011, Würzburg).

F. Blank, J. Roth-Stielow: **Vergleich der Energieeffizienz von Antriebssystemen durch Simulation**, Tagungsband zur SPS/IPC/Drives 2011 (22. - 24.11.2011, Nürnberg), S. 481-489.

M. Doll, O. Sawodny: **Energy Optimal Open Loop Control of Standard Pneumatic Cylinders**, *Proceedings of the 7th International Fluid Power Conference (IFK)*, Aachen, April 2010, pp. 259-270.

M. Doll, O. Sawodny: **Modellbasierte, adaptive Steuerung für energieoptimale Bewegungsvorgänge in schaltpneumatischen Antrieben**, In: Tagungsband des GMA-Fachausschuss 1.30 – Modellbildung, Identifikation und Simulation in der Automatisierungstechnik, Salzburg, 21.-23.09.2011, S. 9-22

M. Doll, R. Neumann, O. Sawodny: **Energy efficient adaptive control of pneumatic drives with switching valves**, submitted for oral presentation at IFK 2012, Dresden, 2012

M. Doll, R. Neumann, O. Sawodny: **Energy efficient use of compressed air in pneumatic drive systems for motion tasks**, International Conference on Fluid Power and Mechatronics (FPM), Beijing, August 17-20, 2011, pp. 340-345.

S. Hirzel, R. Elsland, M. Schroeter, U. Weissfloch: **Energy efficiency improvements in compressed air systems: A techno-economic evaluation approach**, Proceedings of the ICMC 2010 - Sustainable Production for Resource Efficiency and Ecomobility (29. / 30. September 2010, Chemnitz), pp. 695-703.

J. Kefer, S. V. Krichel, O. Sawodny: **Modeling and simulation of pneumatic systems with focus on tubes**, submitted for oral presentation at IFK 2012, Dresden, 2012.

S. V. Krichel, O. Sawodny: **Modellierung von Druckluftleitungen - Ansätze und Ergebnisse**. In: Tagungsband GMA-Fachausschuss 1.30 - Modellbildung, Identifikation und Simulation in der Automatisierungstechnik, Anif/Österreich, 22.-24.09.2010, S. 184-194.

S. V. Krichel, O. Sawodny: **Modelling and Optimization in Pressurized-Air Networks – A first Approach with Respect to Energy-Efficiency**, Proceedings of the 7th International Fluid Power Conference (IFK), Aachen, April 2010, pp. 317-328.

S. V. Krichel, O. Sawodny: **Analysis and optimization of compressed air networks with model-based approaches**, Ventil 17(2011)4, 2011, S. 334-341

S. V. Krichel, O. Sawodny: **Dynamic modeling of compressors illustrated by an oil-flooded twin helical screw compressor**, Mechatronics, 2011, 21, pp. 77 - 84.

S. V. Krichel and O. Sawodny, **Dynamic Modeling of Pneumatic Transmission Lines in Matlab/Simulink**, Proceedings of the International Fluid Power and Mechatronics Conference, Beijing/China, August 17-20th, 2011, S. 24-29 (Best conference paper finalist).

S. V. Krichel, O. Sawodny: **Model-based analysis of pneumatic networks - prospects and challenges**, Proceedings of the Twelfth Scandinavian International Conference on Fluid Power (SICFP'11), Tampere (Finland), May 18-20th, 2011, pp. 471-483.

S. V. Krichel, O. Sawodny: **Non-linear friction modeling and simulation of long pneumatic transmission lines**, submitted to IFAC Mechatronics (under review), 2011.

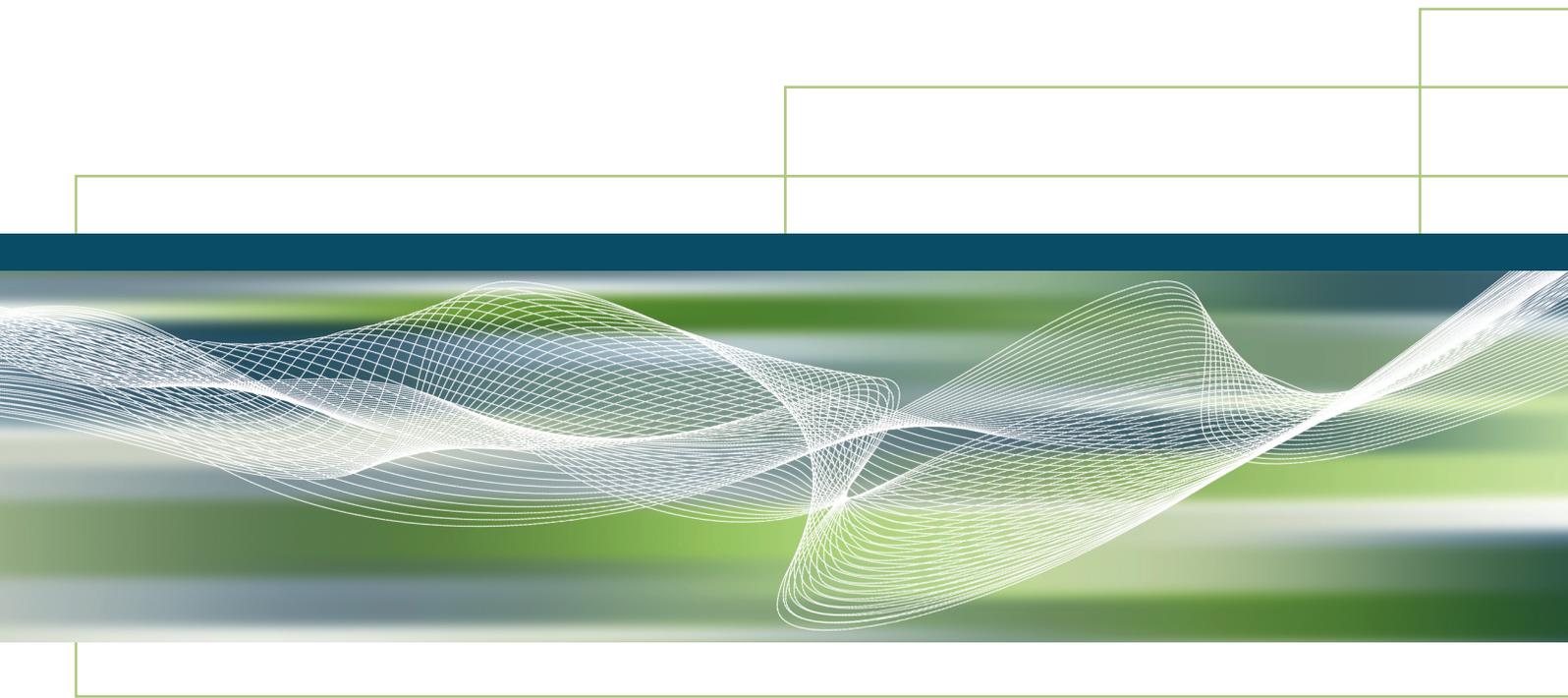
S. Krichel, S. Hülsmann, S. Hirzel, R. Elsland, O. Sawodny: **Mehr Klarheit bei der Druckluft: Exergieflussdiagramme als neue Grundlage für Effizienzbetrachtungen bei Druckluftanlagen**, O+P, Nr. 01-02, 2012.

S. V. Krichel, S. Hülsmann, S. Hirzel, O. Sawodny, R. Elsland: **Exergy flow diagrams as a novel approach to discuss the efficiency of compressed air systems**, submitted for oral presentation at IFK 2012, Dresden, 2012.

Q.-K. Nguyen, J. Roth-Stielow: **Rückgewinnung der Bremsenergie bei Antrieben in der Automatisierungs- und Handhabungstechnik**, Tagungsband zur SPS/IPC/Drives 2011 (22. - 24.11.2011, Nürnberg), S. 511-519.

U. Weissfloch, K. Mattes, M. Schroeter: **Identifizierung aussichtsreicher Geschäftsmodelle für die Druckluftversorgung**, Vortrag GOR-Workshop Vector Optimization of Complex Structures, (17. - 19.03.2010).

U. Weissfloch, K. Mattes, M. Schroeter: **Multi-criteria evaluation of service-based new business concepts to increase energy efficiency in compressed air systems**, i-SUP 2010, Innovation for sustainable production, Conference 1. Sustainable Production, Proceedings, pp. 61-65.



www.eneffah.de