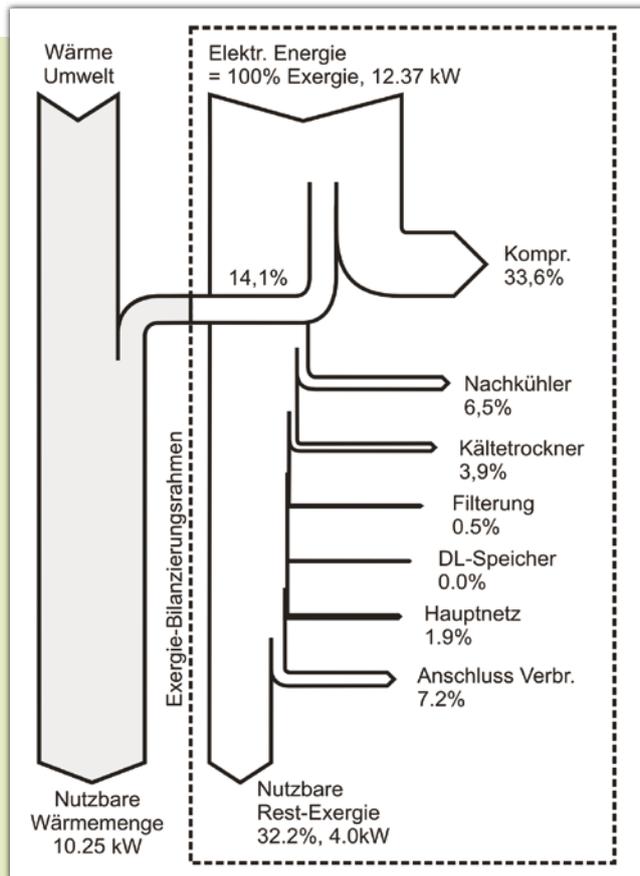


Mehr Klarheit bei der Druckluft

Exergieflussdiagramme als neue Grundlage für Effizienzbetrachtungen bei Druckluftanlagen



Susanne Krichel, Steffen Hülsmann, Simon Hirzel, Rainer Elsland, Oliver Sawodny
 Vor dem Hintergrund der wachsenden Aufmerksamkeit für das Thema Energieeffizienz gewinnt die Darstellung der energetischen Güte von Antriebstechnologien zunehmend an Bedeutung. Im Bereich der Drucklufttechnik werden hierfür häufig Exergieflussdiagramme eingesetzt. Trotz ihrer Anschaulichkeit ist diese Form der Darstellung mit Schwächen behaftet. Es wird eine neue Berechnungs- und Bilanzierungsvorschrift auf Grundlage der Exergie vorgeschlagen. Sie ermöglicht die Erstellung eines Exergieflussdiagramms, das typische in einem Druckluftsystem auftretende Lastfälle veranschaulicht.

Einleitung

Druckluft- und Pneumatikanwendungen werden sowohl national als auch international im industriellen Umfeld großflächig eingesetzt. Der Anteil der Druckluft am Gesamtenergieverbrauch der deutschen Industrie beträgt rund 7 % [Rad01]. Pneumatik gilt als einfache und in der Anschaffung kostengünstige Technologie. Häufig werden der Druckluftherzeugung und -verteilung jedoch geringe Wirkungsgrade nachgesagt. Dies führt in den letzten Jahren durch das wachsende Bewusstsein für das Thema Energieeffizienz zu Diskussionen und der verstärkten Suche nach Alternativtechnologien. Im Bereich der Automatisierungstechnik werden beispielsweise elektrische Spindel- oder Zahnriemenantriebe als direkte Alternative zu pneumatischen Antrieben angesehen, insbesondere da Wirkungsgrade elektrischer Antriebe in der Fachliteratur oft um ein Vielfaches höher angegeben werden als bei vergleichbaren pneumatischen Komponenten. Zur Veranschaulichung der energetischen Güte von Antriebstechnologien dienen dabei häufig so genannte Exergieflussdiagramme. Beispielhafte Anwendungen für den Druckluftbereich finden sich in einer früheren Ausgabe dieser Zeitschrift [Gau06] oder in [Ber06], wo diese Diagramme zur Darstellung der Energieflüsse in elektrischen, hydraulischen und pneumatischen Antriebsketten eingesetzt werden.

Um diese Diagramme interpretieren zu können, ist es erforderlich, die Datenbasis und die Methodik bei der Erstellung transparent und nachvollziehbar zu machen. In den meisten Fällen ist die benötigte Information nicht vorhanden. Zusätzlich zeigen sich Schwächen bei der Interpretation und Darstellung des energetischen Wirkungsgrads. Ziel dieses Beitrages ist es daher, eine thermodynamisch nachvollziehbare und auf messbaren Größen basierende Berechnungs- und Bilanzierungsvorschrift vorzuschlagen, die diese Probleme überwindet. Es wird zunächst erörtert, wo die Schwächen der bisherigen Darstellungsformen in Exergieflussdiagrammen liegen und warum sie eine Beurteilung der energetischen Güte von Druckluftanlagen nur in begrenztem Umfang erlauben.

Basierend auf dem thermodynamischen Begriff der Exergie wird ein Ansatz vorgeschlagen, der dokumentierbare Aussagen

Autoren: Dipl.-Ing. S. Krichel ist wissenschaftliche Angestellte des Instituts für Systemdynamik (ISYS) der Universität Stuttgart; Dipl.-Ing. S. Hülsmann ist Angestellter der Festo AG & Co. KG im Bereich Research Mechatronic Components; Dipl.-Wirtsch.-Ing. S. Hirzel und Dipl.-Wirt.-Ing. R. Elsland sind wissenschaftliche Mitarbeiter im Competence Center Energiepolitik und Energiesysteme am Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI; Prof. Oliver Sawodny ist Leiter des Instituts für Systemdynamik, Universität Stuttgart

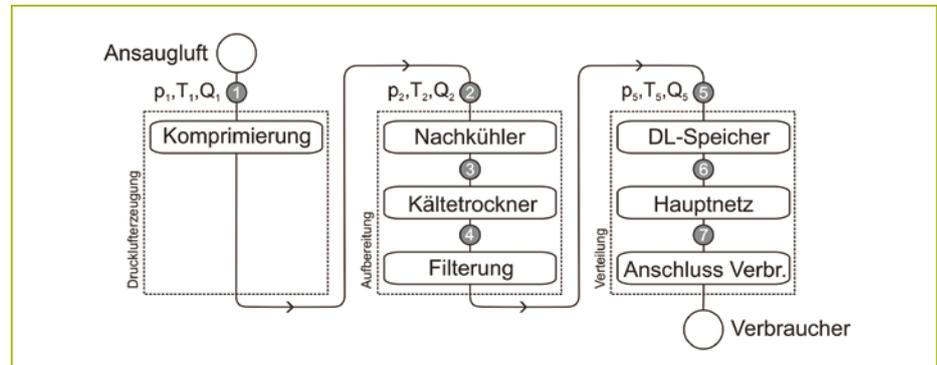
zu Verlusten in Druckluftsystemen erlaubt, z. B. typische Lastfälle wie Druckabfälle, Temperaturänderungen und Leckagen. Anschließend wird das vorgeschlagene Konzept für einen typischen Anwendungsfall entlang der Versorgungskette eines Druckluftsystems (Kompressor, Aufbereitung, Speicher, Verteilung und Anschluss am Verbraucher) anhand eines Beispiels rechnerisch und graphisch dargestellt. Da die Wärmerückgewinnung insbesondere mit Blick auf die Steigerung der Energieeffizienz als besonders wirkungsvolle Maßnahme in Druckluftsystemen angesehen wird, kann ergänzend die Einbindung der Wärmerückgewinnung in das Exergieflussdiagramm durchgeführt werden. Die Vorteile der Nutzung des Exergieflussdiagramms gegenüber einem herkömmlichen Energieflussdiagramm werden in einer vergleichenden Gegenüberstellung zusammenfassend dargestellt.

Energieflussdiagramme in Druckluftanlagen

Energieflussdiagramme veranschaulichen ausgehend von einer Energiequelle die Energieströme entlang verschiedener Stationen innerhalb eines Systems. Je nach Ausgestaltung ist hierfür eine verzweigte und unverzweigte Darstellungsform möglich, wobei letztere im Druckluftbereich zum Einsatz kommt. Die Diagramme zeigen mehrere Stationen, die jeweils für einen Teilabschnitt des Systems stehen und durch ein- und ausgehende Flüsse sowie Verlustflüsse gekennzeichnet sind. Die Breite der Pfeile wird dabei proportional zur Flussmenge gewählt, wodurch eine leichtere Lesbarkeit gewährleistet wird.

Durch die Bilanzierung sämtlicher Flüsse kann der Wirkungsgrad des Systems innerhalb des Bilanzraums abgeleitet werden. Er beschreibt den am Ende der Kette noch verbleibenden Anteil an Energie. Das in [Gau06], [Ilm94] (Bild 3 links) gezeigte Diagramm stellt die Energieflüsse in der Druckluftwirkungskette einer Beispielanlage in Form von Wirkungsgraden dar. Für das Gesamtsystem lässt sich eine mechanische Expansionsarbeit von knapp 7 % ablesen.

Es ist oft unklar, ob an jeder Station konsequent die Flussgröße „Energie“ bilanziert wurde. Technisch korrekt muss ein Energieflussdiagramm unter Berücksichtigung der thermodynamischen Definitionsgleichungen für Energie aufgestellt werden. Be-



2: Wirkungskette der Druckluft

trachtet man die Gesamtmenge der in einem System gespeicherten Energie, so muss diese auf einen Referenzzustand bezogen werden, beispielsweise bei Lageenergie das Nullniveau. Zur Bestimmung des gesamten Energiegehalts von Druckluft in einem bestimmten Zustand muss demnach das thermodynamische Energiegefälle gegenüber dem absoluten Nullpunkt betrachtet werden. An jeder Station werden Temperatur T , Volumenstrom Q , Dichte ρ und die spezifische Wärmekapazität c_v benötigt. Die innere Energie U eines abgeschlossenen Systems zur Berechnung des Energiegehaltes in jedem Zustandspunkt der Wirkungskette ergibt sich nach [Hah04] aus:

$$U = Q \cdot \rho \cdot c_v \cdot T \quad (1)$$

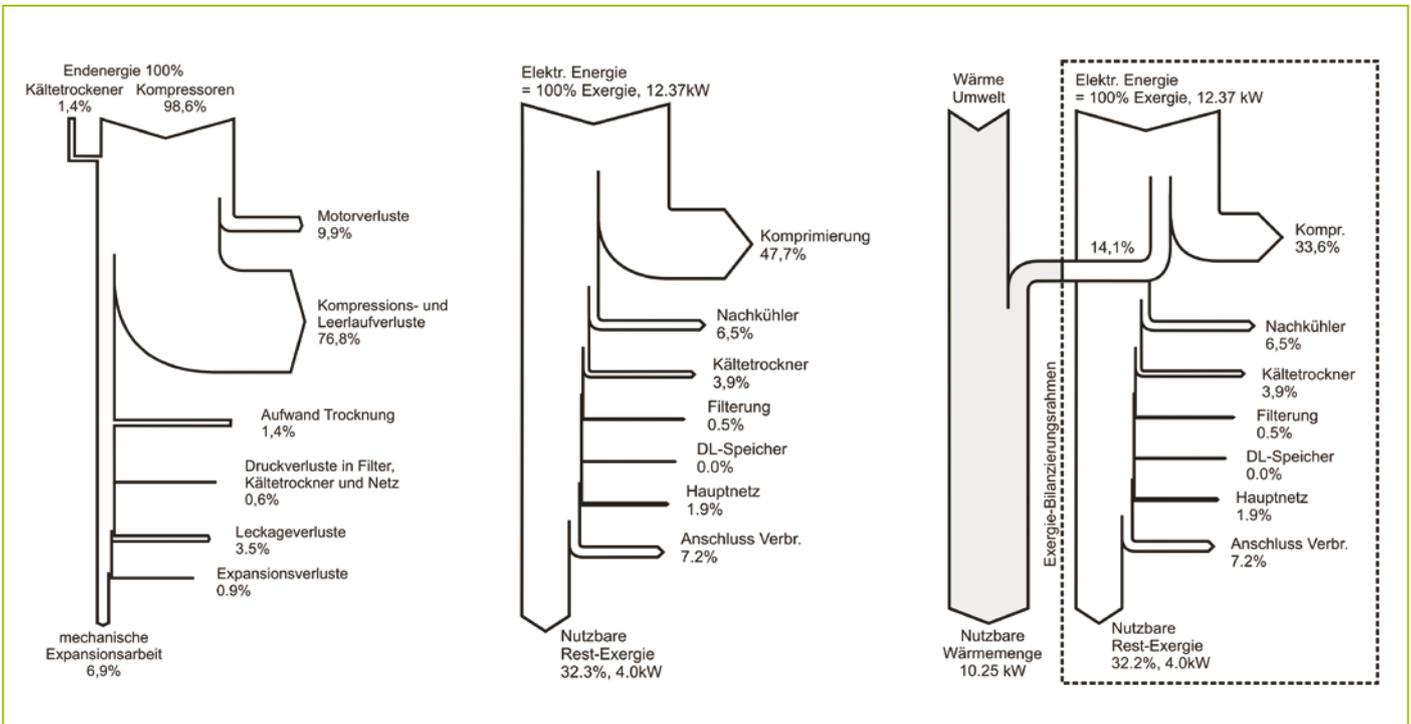
Es fällt auf, dass das aktuelle Druckniveau in der Berechnung des Energiegehalts keinen Einfluss hat. In pneumatischen Anlagen ist insbesondere der Druck als treibende Kraft zur Verrichtung von Arbeit relevant. Über die Nutzbarkeit der gespeicherten Energie ist daher kaum eine Aussage möglich.

Am Beispiel der Station „Kompressor“ wird die Problematik einer thermodynamischen Energiebetrachtung deutlicher: Ein ideal arbeitender Kompressor verdichtet isotherm (geringster Betrag an Verdichtungsarbeit). Der Prozess ist isotherm, wenn während des Verdichtungsvorgangs aus der komprimierten Luft exakt gleich viel Wärme abgeführt wird wie Arbeit zugeführt wird. Der Kompressor „tauscht“ quasi Arbeit gegen Wärme. Die Komprimierung wäre demzufolge für die Druckluft als Energieträger energieneutral und man kann schlussfolgern, dass der Kompressor einen Wirkungs-

grad von 0 % besitzt. Durch Änderung der Bilanzgrenzen und Einbeziehung der entstandenen Wärmemenge ergibt sich hingegen ein theoretischer Wirkungsgrad von 100 %. Da beide Wirkungsgradangaben auf den ersten Blick korrekt sind und lediglich unterschiedliche Betrachtungsweisen zugrunde liegen, wird klar, dass eine thermodynamische Bilanzierung der Energiemengen hier nicht zielführend ist.

Die prozentualen Verlustangaben in den bekannten Energieflussdiagrammen von [Gau06], [Ilm94] (Bild 3 links) folgen anderen Berechnungsvorschriften, da der Wirkungsgrad des Kompressors nicht mit 0 % angegeben ist. Diese werden jedoch nicht spezifiziert. Das gezeigte Diagramm stellt Verluste in der Druckluft-Wirkungskette in Form von Wirkungsgraden dar. Sie werden über Messungen in den einzelnen Teilbereichen der Druckluftkette angenähert und die Verluste bezogen auf die Ausgangsenergie berechnet. Diese Vorgehensweise birgt Schwachpunkte hinsichtlich Interpretierbarkeit und Eindeutigkeit, da sie in vielen Fällen der thermodynamischen Energiedefinition widerspricht.

Weiterhin wird bei der Betrachtung von Energieflussdiagrammen die Anfangsenergie der Luft (Ansaugluft am Kompressor) oft unterschlagen, da diese aus der Umgebung uneingeschränkt zur Verfügung steht. Verluste werden nur basierend auf der aufgewendeten elektrischen Energie berechnet. Energieflussdiagramme, die die Energiemenge der Druckluft nicht mitbetrachten, sind allerdings unvollständig und fehlerbehaftet. Eine konsistente Bilanzierung aller vorhandenen Energieanteile in jedem Zustand ist dann nicht möglich. Daher ist z. B. auch der Energiestrom in Anlagen mit Wärmerückgewinnung nicht eindeutig und wi-



3: Graphische Darstellung des Energieflussdiagramms links sowie der Exergieflussdiagramme rechts mit und in der Mitte ohne Wärmerückgewinnung

derspruchsfrei darstellbar. Selbst bei vollständiger Energiebilanzierung ist keine Aussage über die Verwendbarkeit oder den „Nutzen“ der vorhandenen Energie möglich, da in pneumatischen Anwendungen die Nutzbarkeit hauptsächlich vom aktuellen Druckgefälle gegenüber der Umgebung abhängt, in der Berechnung des Energiegehalts der Druck jedoch keine Rolle spielt.

Die genannten Aspekte verdeutlichen, dass eine schlüssige und verlässliche Verwendung von herkömmlichen Energieflussdiagrammen für den Druckluftbereich nicht möglich ist. Eine Methode, mit der die genannten Unzulänglichkeiten überwunden werden können, ist die Bilanzierung über den Exergiegehalt des Systems.

Exergieflussdiagramme als alternative Darstellungsform

Exergie als thermodynamischer Begriff bezeichnet denjenigen Energieanteil eines Systems, der Arbeit verrichten kann, wenn das System in ein Gleichgewicht mit der Umgebung gebracht wird. Die Exergie bildet den nutzbaren Anteil der Gesamtenergie, nicht nutzbare Anteile werden Energie genannt. Die Exergie ist eine Zustandsgröße aber keine Erhaltungsgröße, d. h. Exergie kann in Anergie umgewandelt werden und somit verloren gehen.

Für die Berechnung der Exergie in offenen Systemen nach [Bad00] werden vier Größen im aktuellen Zustand a benötigt: 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

$$E_a = P_a + Q_a \cdot \rho_a \cdot c_p \cdot (T_a - T_{atm}) + Q_a \cdot \rho_a \cdot T_{atm} \cdot \left(R \cdot \ln \left(\frac{p_a}{p_{atm}} \right) - c_p \cdot \ln \left(\frac{T_a}{T_{atm}} \right) \right) \quad (2)$$

Der Index atm kennzeichnet den Umgebungszustand, der Wert c_p die spezifische Wärmekapazität, R die ideale Gaskonstante und ρ_a die Dichte. Ein Zustand ist wie in **Bild 2** veranschaulicht als ein spezifischer Punkt in der Wirkungskette Druckluft definiert, z. B. der Endzustand der Komprimierung.

Durch die Exergie lassen sich vier 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. Alle vier Ereignisse können einzeln oder auch gleichzeitig auftreten. Der Vergleich zweier Zustände erlaubt die Berechnung des Exergieverlustes zwischen zwei Zuständen. Setzt man diesen in prozentualer Relation zur Ausgangsexergie, so erhält man den prozentualen Verlust an jeder Station der Wirkungskette.

Anwendungsbeispiel

Viele Flussdiagramme stellen die Verluste entlang der Wirkungskette bis zum Verbraucher dar. Daher soll im folgenden Beispiel die Wirkungskette vom Umgebungszustand der Ansaugluft bis zur Anwendung dargestellt werden. Insbesondere ist zu überprüfen, wie sich der Gesamtwirkungsgrad am Ende der Kette darstellt. Der Exergiegehalt der Druckluft wird unter Verwendung von Formel (2) für jeden Zustand berechnet und

in **Tabelle 1** dargestellt. Die zur Verfügung stehende elektrische Energie wird als Summe der Aufnahmeleistung des Kompressors und der Leistungsaufnahme des Nachkühlers und des Kältetrockners interpretiert.

Der Kompressor wird im Exergieflussdiagramm nicht im Detail energetisch analysiert. Die Exergie der Luft wird über die angegebene Formel bereits zu Anfang berücksichtigt. Sie ist im Zustand 1 Null, da bei Umgebungsbedingungen gestartet wird. Wie Tabelle 1 entnommen werden kann, werden sowohl Druckabfälle als auch Leckagen und Temperaturveränderungen gleichzeitig berücksichtigt. Die Unterscheidung Hauptnetz und Anschluss Verbraucher gliedert sich nach dem Anteil der Leckage. Dabei wird angenommen, dass ein Großteil der Leckage am Anschluss an die Verbraucher auftritt und nur ein geringerer Teil im Hauptnetz selbst.

Das hier aufgeführte Beispiel beschreibt eine relativ kleine pneumatische Anlage, die im globalen Vergleich einen geringen Leistungsumsatz aufweist. Systembedingt ist die Effizienz kleinerer Kompressoren ebenfalls eher gering. Es ist daher zu erwarten, dass in größeren pneumatischen Anlagen mit einer höheren Ausgangsleistung bessere Wirkungsgrade erzielt werden können. Als einfaches Beispiel ist die hier beschriebene Anlage jedoch zunächst ausreichend.

Bei der Komprimierung werden insgesamt 11,4 kW elektrische Energie benötigt. Die Exergie nimmt bei diesem Vorgang um 6,47 kW ab. Basierend auf den Angaben zum Exergieverlust in Tabelle 1 kann nun die Bilanzierung der Exergie in einem Exergieflussdiagramm dargestellt werden (**Bild 3, Mitte**).

Damit zeichnet sich im Vergleich zum Energieflussdiagramm ein deutlich anderes Bild. Während dort die Schlussfolgerung nahe liegt, dass in der Drucklufttechnik nur ein geringer Wirkungsgrad im einstelligen Prozentbereich erreicht werden kann, wird über das Exergieflussdiagramm deutlich, dass im dargestellten Beispiel bei idealer Ausnutzung der Exergie ein Wirkungsgrad von über 30 % erreicht werden könnte.

Die Art der Anwendung legt nun allerdings fest, welcher Anteil der Exergie wirklich genutzt wird. Temperaturdifferenzen lassen sich in den meisten technischen Anwendungen nicht nutzen, stellen jedoch einen gewissen Anteil der berechneten Exergie dar. So kann beispielsweise in einer idealen Turbine nur die so genannte technische Arbeit umgesetzt werden, gewisse Anteile der Exergie bleiben systembedingt ungenutzt. Dennoch ist die Exergie stets einfach berechenbar und stellt eine objektive Vergleichsgröße für unterschiedliche Zustände dar. Wie effektiv die vorhandene Exergie in der Applikation genutzt wird, ist für die Vergleichbarkeit der Zustände in der Wirkungskette nicht relevant.

Wärmerückgewinnung

Ein entscheidender Aspekt zur Effizienzsteigerung von Druckluftsystemen ist die Integration eines Wärmerückgewinnungssystems. Bei der Komprimierung der Luft fällt thermodynamisch bedingt ein Großteil der gesamten Wärmeentwicklung innerhalb der Druckluftkette an. Integrierte wasserbasierte Wärmerückgewinnungssysteme bei trockenlaufenden Schraubenkompressoren versprechen eine Rückgewinnungsquote von über 90 % im Verhältnis zur elektrischen Leistungsaufnahme des Kompressors. Die Wärme kann dabei als Raumheizluft oder für die Warmwasseraufbereitung verwendet werden.

Der Begriff „Rückgewinnung“ ist in diesem Zusammenhang allerdings etwas irreführend. Die gewonnene Wärme entsteht nicht vollständig aus der zugeführten elektrischen Energie, sondern sie wird vielmehr zu einem großen Teil der angesaugten Umgebungsluft entzogen, die anderenfalls durch die Verdichtung im Kompressor stark aufgewärmt würde. Dieser Umstand wird nun ebenfalls im Exergieflussdiagramm dargestellt.

Für die Erweiterung des Exergieflussdiagramms wird zunächst angenommen, dass eine Wärmemenge abgeführt werden kann, die durchschnittlich 90 % der Leistungsaufnahme des Kompressors entspricht. Im Beispiel ist die Leistungsaufnahme des Kompressors mit 11,4 kW angegeben. Für die Wärmerückgewinnung stehen also 90 % dieser Leistung, d. h. etwa 10,25 kW zur Verfügung. Um diesen Anteil als Gewinn im Exergieflussdiagramm einzubinden, muss der exergetische Anteil der Wärme berech-

Beschreibung	Zustand	p	T	Q	verwendete Pel	Exergie	Exergieverlust	Restexergie
Einheit		bar rel	°C	m³/min	kW	kW	%	%
Ansaugluft	1	0,0	20	1,51	0	12,37	0,0 %	100,0 %
Komprimierung	2	7,3	80	1,51	-11,4	6,47	-47,7 %	52,3 %
Nachkühler	3	7,0	25	1,51	-0,55	5,66	-6,5 %	45,8 %
Kältetrockner	4	6,8	20	1,51	-0,42	5,18	-3,9 %	41,8 %
Filterung	5	6,6	20	1,51	0	5,11	-0,5 %	41,3 %
DL-Speicher	6	6,6	20	1,51	0	5,11	0,0 %	41,3 %
Hauptnetz	7	6,5	20	1,45	0	4,87	-1,9 %	39,4 %
Anschluss Verbr.	8	6,2	20	1,45	0	3,98	-7,2 %	32,2 %

Tabelle 1: Beispielrechnung basierend auf typischen Kenndaten für die Wirkungskette – Druckluft zwischen Ansaugzustand und dem Anschluss an den Verbraucher. Für die Berechnung der Exergie im Zustand 1 (Startzustand) wird die für den Prozess notwendige elektrische Leistung aufaddiert (hier: Kompressor, Nachkühler und Kältetrockner). Diese Exergie steht dem System folglich für den nachfolgenden Prozess zur Verfügung. Die Exergie der Luft ist 0, da man bei Umgebungsbedingungen startet.

	Energieflussdiagramm	Exergieflussdiagramm
Einbindung der in der Ansaugluft vorhandenen Energie	Die Luftenergie am Anfangszustand bleibt meist unberücksichtigt. Sie kann aber als Energiegefälle gegen den absoluten Nullpunkt mit in die Berechnung eingebunden werden. In der Praxis wird dies nicht gemacht.	Der arbeitsfähige Energieanteil der Luft wird zu jedem Zeitpunkt über das Druck- oder Temperaturgefälle gegenüber der Umgebung berücksichtigt. Bei Ansaugbedingungen beträgt der Exergieanteil der Luft Null, da kein Temperatur- oder Druckgefälle vorhanden ist.
Einbindung der Wärmerückgewinnung	Die Wärmerückgewinnung kann nur dann berücksichtigt werden, wenn auch die Energie der Luft am Anfang mit eingebunden wird.	In einem konsistenten Exergieflussdiagramm wird nur der exergetische Anteil der gewonnenen Wärme betrachtet. Der praktische Nutzen der gewonnenen Wärme in Form von Heizenergie kann nicht direkt in die Bilanzierung integriert werden*).
Einbindung elektrischer Energie	Die elektrische Leistungsaufnahme dient als Eingangsstrom für die Darstellung des Diagramms.	Elektrische Energie ist reine Exergie und daher direkt in die Bilanzierung integrierbar.
Aussage über Nutzbarkeit	Eine Aussage über die tatsächliche Nutzbarkeit der berechneten Energie ist nicht möglich, da das tatsächliche Energiegefälle gegen die Umgebung nicht berücksichtigt wird.	Die Exergie drückt die Arbeitsfähigkeit eines Systems aus. Daher ist eine Aussage hier möglich. Inwieweit ein System diese Arbeitsfähigkeit nutzt, hängt von der jeweiligen Applikation ab.

***) Erweiterung des Exergieflussdiagramms möglich: Es bietet sich die vorgeschlagene Erweiterung mit Bilanzrahmen und separater Darstellung des Wärmenutzens an.**

Tabelle 2: Vergleich von Energie- und Exergieflussdiagrammen

net werden, also derjenige Anteil der Wärme, der nachträglich erneut in Arbeit umgewandelt werden könnte (z. B. über eine Wärmekraftmaschine in mechanische Energie). Dieser Anteil wird über den Carnot-Wirkungsgrad bestimmt. Er ergibt sich aus:

$$\eta = 1 - \frac{T_{atm}}{T_2} \tag{3}$$

Bei einer Temperatur von 80 °C im Zustand (2) ergibt sich ein Carnot-Wirkungsgrad von 17 %. Der Exergieanteil der rückgewonnenen Wärme ist damit relativ gering. Er liegt im gezeigten Beispiel bei etwa 1,75 kW, die restlichen 87 % sind Anergie.

Während dieser Zahlenwert zwar die exergetischen Verhältnisse korrekt ausdrückt, spiegelt er nicht den praktischen Nutzen der Wärme wieder. Für Heizzwecke ist die Umwandelbarkeit in Arbeit nachran-

gig, denn als Heizleistung stehen tatsächlich 10,25 kW zur Verfügung.

Eine gemeinsame Bilanzierung von Exergie und Wärme innerhalb eines in sich konsistenten Flussdiagramms ist ohne Weiteres leider nicht möglich, da es sich um unterschiedliche physikalische Größen handelt. Es bietet sich daher an, das Exergieflussdiagramm entsprechend **Bild 3** (rechts) anzupassen, indem um den exergetischen Bereich des Diagramms ein Bilanzierungsrahmen gezogen wird. Der Exergieanteil der Wärmerückgewinnung kann als nutzbarer Anteil der Gesamtbilanz durch den Bilanzierungsrahmen nach links geführt werden. Außerhalb dieses Rahmens kann dieser Exergieanteil dazu verwendet werden, um einen Wärmestrom aus der komprimierten Umgebungsluft nutzbar zu machen. Der daraus resultierende verbreiterte Wär-

mepfeil stellt den eigentlichen Nutzen der Wärmerückgewinnung bildlich dar.

Vergleichbarkeit

Die grundsätzliche Struktur von Energie- und Exergieflussdiagrammen ist ähnlich, allerdings sind Unterschiede in den ausgewiesenen Prozentangaben und den zugehörigen Wirkungsgraden festzustellen. Darüber hinaus gibt es weitere Unterschiede, die in **Tabelle 2** mit einer jeweiligen kurzen Erklärung gegenübergestellt sind.

Das Exergieflussdiagramm bietet eine geschlossene Berechnungsvorschrift für alle Last- und Verlustfälle wie Druckabfall, Temperaturveränderung und Leckagen. Herausfordernd ist die Einbindung der Wärmerückgewinnung, da die ausgekoppelte Wärme in der Exergiedarstellung ein unvollständiges Bild des eigentlichen Nutzens bietet. Allerdings ist die gleichzeitige Darstellung der Größen Wärme und Exergie im selben Diagramm innerhalb derselben Bilanzgrenzen nicht möglich, da sonst unterschiedliche Größen gemischt und miteinander bilanziert werden. Daher ist es wichtig, dass in jedem Diagramm Datengrundlage und Abgrenzungen klar gekennzeichnet sind. Trotz der anschaulichen Darstellung der Diagramme

ist ein gewisses Maß an Hintergrundwissen für die Interpretation erforderlich.

Schlussfolgerungen

In diesem Artikel wurden die Schwachstellen von herkömmlichen Energieflussdiagrammen zur Veranschaulichung der Wirkungskette von Druckluftsystemen herausgearbeitet. Als alternative Form der Darstellung wurde ein Ansatz über die thermo-dynamische Größe der Exergie vorgeschlagen. Die zugehörige Berechnungsvorschrift wurde dargestellt und an einem typischen Anwendungsbeispiel veranschaulicht. Insbesondere wurde dabei exemplarisch aufgezeigt, dass der exergetisch erreichbare Wirkungsgrad für die Anwendung im Idealfall deutlich höher liegen kann, als durch die Darstellung in existierenden Energieflussdiagrammen nahegelegt wird.

Daneben wurde eine Möglichkeit aufgezeigt, wie die Wärmerückgewinnung in ein Exergieflussdiagramm integriert werden kann, ohne die Konsistenz des Diagramms zu verletzen. Damit soll ein Beitrag zur besseren Nachvollziehbarkeit und Vergleichbarkeit der Effizienz von Pneumatik- bzw. Druckluftanwendungen geleistet werden, auch zur Gegenüberstellung mit anderen Technologien.

Literaturhinweise:

[Rad01] Radgen, P.; Blaustein, E. (Hrsg.): *Compressed Air Systems in the European Union, Energy, Emissions, Savings Potential and Policy Actions.* Stuttgart, LOG X Verlag, 2001
 [Gau06] Gauchel, W.: *Energiesparende Pneumatik: Konstruktive sowie schaltungs- und regelungstechnische Ansätze, O+P 1/2006, S. 33 bis 39, 2006*
 [Ber06] Berchten, S.; Ritz, C.: *Ersatz von pneumatischen und hydraulischen Antrieben durch Elektroantriebe - Potentialanalyse Schweizerische Eidgenossenschaft (Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK), Schlussbericht, 2006*
 [Ilm94] Ilmberger, F.; Seyfried, F.: *Druckluftversorgungskonzepte für Industriebetriebe BWK, 1994, 46, S. 398-401.*
 [Bad00] Bader, W. T.; Kissock, J. K.: *Exergy analysis of industrial air compression, Proceedings of the Twenty-second National Industrial Energy Technology, Conference, Houston, TX, 2000*
 [Hah04] Hahne, E.: *Technische Thermodynamik - Einführung und Anwendung, Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, 2004*

Entstanden im Rahmen von:



www.eneffah.de
 Förderkennzeichen
 0327484A

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
 des Deutschen Bundestages

Mehr Lager ab Lager



Günstig Technik verbessern und Kosten senken mit 35 schmierfreien iglidur®-Werkstoffen. Online schnell den besten finden und berechnen. Leicht, langlebig und ab 24h geliefert.

plastics for longer life®
igus.de/schmierfrei24h
 Tel. 02203-9649-897 Fax -334 Mo.-Fr. 8 bis 20h Sa. 8 bis 12h

Besuchen Sie uns: LogiMAT - Halle 3 Stand 409; Anuga FoodTec - Halle 6.1 Stand D 026

www.vfmz.net/1034270