

Energieeffizienz bei der industriellen Druckluftherzeugung

Studie zu Entwicklungen, Trends und alternativen Erzeugungstechnologien

Markus P. Röbler



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	i
1.Einführung	1
1.1. Hintergrund	1
1.2. Eingrenzung und Studiendesign	1
2.Einschätzungen der Gesprächspartner	3
2.1. Generelle Entwicklungen und Trends bei der Druckluftherzeugung	3
2.2. Einschätzung zur alternativen Möglichkeiten der Druckluftherzeugung	4
2.3. Detailbetrachtung ausgewählter Ansätze	6
3.Diskussion und Zusammenfassung	15
Literatur	16

1. Einführung

1.1. Hintergrund

Druckluft wird in der Industrie als weit verbreitete Querschnittstechnologie in vielen Anwendungsfeldern als Arbeits-, Aktiv- oder Prozessluft, zur Vakuumerzeugung oder für Steuer- und Prüfanwendungen eingesetzt. Sie wird als einer der energieintensivsten Energieträger in der Industrie diskutiert, wobei für die Erzeugung industrieller Druckluft in der Regel elektrisch betriebene Druckluftkompressoren eingesetzt werden. In der Europäischen Union entfielen auf diese Kompressoren im Jahr 2001 ca. 10 % des industriellen Strombedarfs und in Deutschland im Jahr 2008 ungefähr 7,3 % (ca. 17 TWh) (Fraunhofer ISI 2010).

Betrachtet man die Energieumwandlungskette vom Primärenergieträger bis hin zur Druckluft, so wird deutlich, dass zunächst ein Primärenergieträger im Kraftwerk in elektrische Energie umgewandelt wird. Diese elektrische Energie wird dann über das Stromnetz einem elektrischen Antrieb zur Verfügung gestellt und wiederum in mechanische Wellenleistung umgewandelt, um letztlich einen Verdichter anzutreiben, der Umgebungsluft auf den erforderlichen Druck verdichtet. Jede der Umwandlungs- bzw. Transferstufen ist mit Verlusten behaftet.

Mit Blick auf diesen Prozess stellt sich die Frage, ob Druckluft auch über einen alternativen Ansatz für industrielle Anwendungen bereitgestellt werden könnte. Da zu dieser Fragestellung nur in eingeschränktem Umfang Literatur zur Verfügung steht, wurde im Anschluss an eine explorative Literaturanalyse eine Reihe von Gesprächen mit Experten aus dem Bereich der Druckluftherzeugung und möglicher alternativer Antriebskonzepte durchgeführt.

Ziel der Gespräche war es, einen Überblick über die Einschätzungen von Experten zu möglichen alternativen Ansätzen zur Druckluftherzeugung zu erlangen und diese Alternativen auf ihre potentielle Anwendbarkeit hin zu diskutieren. Dabei stand nicht die Untersuchung spezifischer Anwendungen im Vordergrund, sondern die prinzipielle Diskussion möglicher alternativer Technologien. Mit dem vorliegenden Dokument wird ein Überblick über die Ergebnisse dieser Gespräche gegeben, die Grundlage dieses Artikels bildet Rößler (Rößler 2011).

1.2. Eingrenzung und Studiendesign

Im Sinne einer Eingrenzung des Betrachtungsgegenstandes wurde ausschließlich die Druckluftbereitstellung analysiert. Die Bilanzgrenze wird dabei um den „Kompressor“ als Kombination von Antrieb und Verdichter gezogen. Druckluftaufbereitung und nachgelagerte Anwendungen sind nicht Gegenstand der Betrachtung.

Mit dem Ziel der breiten Anwendbarkeit der alternativen Ansätze im industriellen Kontext wurde als Orientierung weiterhin davon ausgegangen, dass ein Druck im Bereich von rund 6 bis 12 bar Überdruck und eine Liefermenge äquivalent zu einem konventionellen Kompressor zwischen 10 und 300 kW erreicht werden sollte (vgl. Radgen, Blaustein 2001; Ruppelt 2003). Auf Basis dieser Eingrenzung werden Ansätze nicht vertieft, die die angegebenen Volumenströme oder Druckniveaus nicht erreichen (z.B. Piezoverdichtung, Schallverdichtung oder Drag-Verdichtung). Weiterhin werden ausschließlich Anlagen zur zentralen Druckluftherzeugung betrachtet; Ansätze zur dezentralen Druckluftherzeugung, mobile Kompressoren sowie Ansätze mit starker Abhängigkeit von externen Einflussvariablen, wie die direkte Druckluftherzeugung durch Wind- und Wasserkraft werden nicht betrachtet. Auch Anlagen, die über Strom aus erneuerbaren Energien angetrieben werden, werden hier nicht als alternative Möglichkeiten der Druckluftherzeugung aufgefasst.

Auf Basis einer Literaturanalyse wurden potentielle alternative Ansätze zur Druckluftherzeugung identifiziert, die sich in antriebsseitige und verdichtungsseitige Konzepte untergliedern lassen, wobei die antriebsseitigen Konzepte dem Bereich der Kraft-Wärme-Kopplung zugerechnet werden können. Zu den antriebsseitigen Konzepten zählen der Einsatz von Verbrennungsmotoren (Kolbenmaschinen), Mikrogasturbinen, Wasserdampfturbinen, der Organic Rankine Cycle und der Kalina Prozess sowie der Stirlingmotor. Verdichtungsseitig werden das Konzept der adiabaten Druckluftherzeugung und die flüssigkeitsbasierte Verdichtung betrachtet.

Um eine Gegenüberstellung dieser unterschiedlichen, potentiellen Alternativen aus einem breiten Blickwinkel heraus zu gewährleisten, wurden insgesamt 14 Gespräche mit Experten aus dem Bereich „Drucklufttechnik“ sowie aus dem Bereich der „Kraft-Wärme-Kopplung“ geführt. Davon entfielen sieben Gespräche auf Experten aus dem Bereich der KWK-Technologien und sieben Gespräche auf Experten aus dem Bereich der Drucklufttechnik aus zumeist entwicklungsnahe Umfeld. Weiterhin setzt sich die Gesamtheit der Gesprächspartner zusammen aus neun Vertretern der Industrie, zwei Verbandsvertretern und drei Experten aus Wissenschaft und Forschung.

Die Gespräche wurden entlang eines Gesprächsleitfadens durchgeführt, wobei je nach Expertise der Gesprächspartner entweder der Fokus auf die Druckluftherzeugung oder auf Fragestellungen aus dem Bereich der Kraft-Wärme-Kopplung gelegt wurde. Die Gespräche dauerten zwischen 15 und 50 Minuten und wurden mit zwei Ausnahmefällen (schriftliche Rückmeldung) telefonisch durchgeführt. Gegenstand der Gespräche waren generelle Entwicklungstrends (je nach Gruppe zur Druckluftherzeugung oder zur Kraft-Wärme-Kopplung), allgemeine Einschätzungen zu alternativen Möglichkeiten der Druckluftherzeugung und, je nach Kenntnisstand der Teilnehmer, eine vertiefte Betrachtung ausgewählter alternativer Ansätze.

2. Einschätzungen der Gesprächspartner

2.1. Generelle Entwicklungen und Trends bei der Druckluftherzeugung

Einleitend wurde in den Gesprächen auf Entwicklungstrends im Bereich der Drucklufttechnik eingegangen. Hierzu wurden ausschließlich Gesprächspartner aus dem Bereich Drucklufttechnik befragt.

Als Treiber für die Umsetzung von effizienzsteigernden Maßnahmen wurde von den Gesprächsteilnehmern zumeist das gestiegene Bewusstsein für das Thema Energieeffizienz bei Herstellern und Kunden angeführt. Bei Kunden wird das Motiv der Reduzierung der Energiekosten als in hohem Maße relevant angesehen.

In den vergangenen zehn Jahren (2002-2012) konnte laut der Mehrheit der Gesprächsteilnehmer beim Gesamtsystem „Druckluft“ durchschnittlich ungefähr eine 5-10 prozentige Steigerung der Energieeffizienz erreicht werden, wobei sich diese Einsparungen auf das gesamte Druckluftsystem beziehen. Einige Gesprächsteilnehmer führten an, dass eine Steigerung über 10 % hinaus technisch möglich gewesen wäre, Maßnahmen aufgrund der damit verbundenen Kosten allerdings nicht weiter betrachtet wurden.

Insbesondere gelten der verstärkte Einsatz übergeordneter Steuerungen, die Nutzung frequenz geregelter Antriebsmotoren, getriebeloser Antriebe und der verstärkte Einsatz von Permanentmagnetmotoren anstelle von Asynchronmotoren als sehr relevant für die Steigerung der Energieeffizienz.

Die Einschätzungen der Gesprächspartner zur Relevanz der Optimierung der Verdichtergeometrie streuen deutlich. Unter anderem wurde eine Veränderung zu höheren Verdichtungstemperaturen bei trockenlaufenden Verdichtern genannt, aber ihre Bedeutung für eine Steigerung der Energieeffizienz wird als eher gering eingestuft. Daneben wurde die Reduzierung interner Reibungsverluste als wenig bedeutsam eingestuft. Wirkungsgradverbesserungen an den Verdichterstufen selbst konnten nach Ansicht einzelner Experten nur im moderaten Umfang ($\ll 5\%$) erzielt werden.

Eng mit der Druckluftaufbereitung verknüpft ist die Wärmerückgewinnung: In den vergangenen zehn Jahren (2002-2012) konnte hier laut der Experten eine verstärkte kundenseitige Aufmerksamkeit und Nutzung der Wärmerückgewinnung beobachtet werden. Neben dem Bereich der Druckluftherzeugung wurden auch weitere, stärker systembezogene Aspekte genannt: Im Bereich der Kompressorstation wurden durch die Verbesserung der Nebenaggregate (wie z. B. Trockner) deutliche Einsparungen erzielt. Mit Blick auf das Gesamtsystem gilt der Bereich der Leckage-Minimierung als sehr relevant. Die Verfügbarkeit verbesserter Messgeräte zum Aufspüren von Leckagen im Rohrleitungssystem trug einen entscheidenden Teil zur Steigerung der Gesamteffizienz bei. Daneben wurde ein optimales, an die Anwendung angepasstes und möglichst niedriges Druckniveau als weitere wichtige Effizienzmaßnahme genannt.

Vom keinem der Gesprächspartner wurden gänzlich neue Antriebs- oder Verdichtungsprinzipien angeführt, die in der Breite der Anwendungen eingesetzt würden. Im Wesentlichen wurden bestehende Systeme weiterentwickelt und optimiert.

Mit Blick auf die Entwicklung in den kommenden zehn Jahren werden keine radikalen Prozessumstellungen im Bereich der Druckluftherzeugung von den befragten Experten erwartet. Der Fokus wird eher auf der Optimierung des Gesamtsystems liegen, wobei vereinzelt das Verbesserungspotential auf bis zu 5 % eingeschätzt wurde.

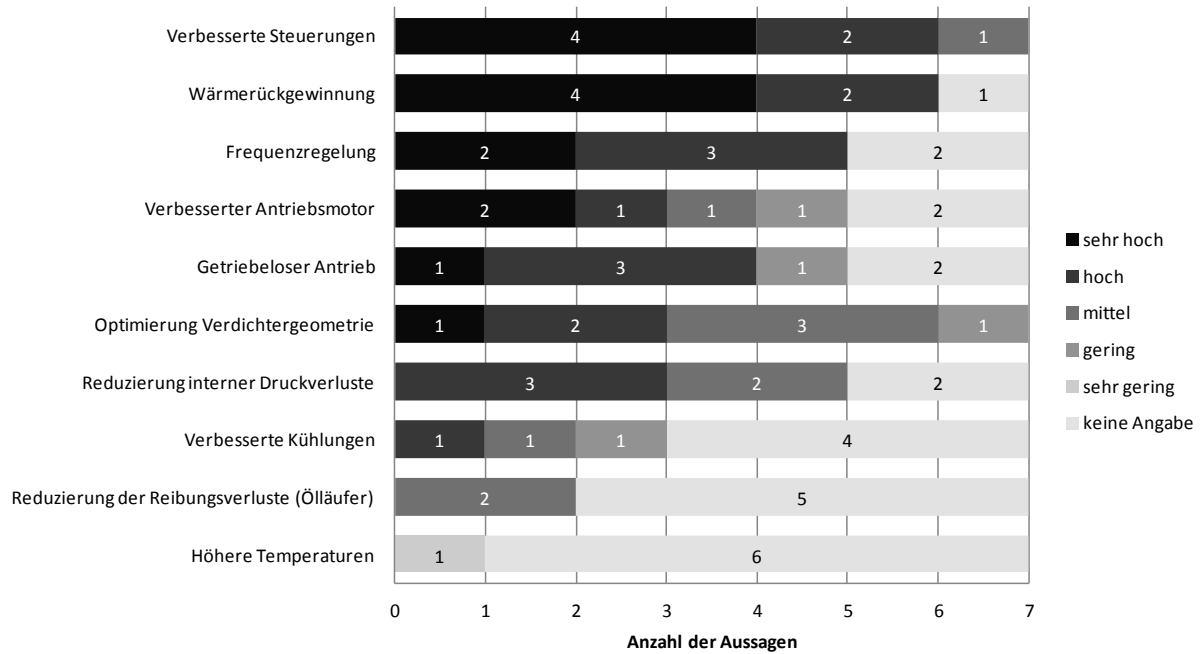


Abbildung 2-1: Einschätzungen zur Relevanz von Energieeffizienzmaßnahmen bei der Druckluftzeugung in den letzten 10 Jahren (2002-2012, 7 Gesprächsteilnehmer)

Antriebsseitig wird erwartet, dass der Einsatz von IE-3-Elektromotoren weitere Effizienzsteigerungen mit sich bringen werde. Speziell bei variablen Druckluftverbräuchen werden schnell reagierende Antriebe mit hohen Lebensdauern benötigt, die auch bei häufigem Anlauf im Start-Stopp-Betrieb zuverlässig arbeiten. Im Bereich verdichtersseitiger Verbesserungen nannten zwei Gesprächsteilnehmer neue Beschichtungen und Materialien zur Spaltreduzierung im Verdichterblock, um die internen Druckverluste im Verdichter zu minimieren und somit eine Wirkungsgradsteigerung zu erzielen.

Zudem wird weiteres Verbesserungspotential durch die Optimierung von Nebenaggregaten gesehen. Beispielsweise werden verbesserte Technologien zur Regeneration von Trocknern verstärkte Aufmerksamkeit erlangen. Auch der Bereich der Wärmerückgewinnung wird in den nächsten zehn Jahren noch mehr an Bedeutung gewinnen, da neuere Kompressoren in der Lage sind, Wärme von bis zu 90 % der eingesetzten elektrischen Energie nutzbar zu machen. Teilweise werden auch ältere Kompressoren mit einer Wärmerückgewinnungsanlage nachgerüstet. Es werden auch in naher Zukunft keine radikalen Weiterentwicklungen im Bereich der Druckluftversorgung erwartet.

2.2. Einschätzung zur alternativen Möglichkeiten der Druckluftzeugung

Einschätzungen der Experten der Drucklufttechnik

Der Großteil (> 90 %) der heute in der Industrie eingesetzten stationären Druckluftkompressoren wird mit Elektromotoren angetrieben. Der Umstand, dass überwiegend diese Antriebsart eingesetzt wird, wird von der Mehrheit der Technologieexperten auf folgende Eigenschaften des Elektromotors zurückgeführt:

- Hoher technologischer Entwicklungsstand,
- hohe Verfügbarkeit von elektrischem Strom (weitverzweigtes Stromnetz vorhanden),
- hohe Wirkungsgrade der Motoren,
- sehr gute Regelbarkeit,
- sehr geringer Verschleiß, daher relativ lange Lebensdauer,
- Einbeziehung von Strom aus erneuerbaren Energien möglich.

Andere Antriebsarten zur Druckluftherzeugung werden nahezu ausschließlich bei Spezialanwendungen eingesetzt, da kein anderes Antriebskonzept eine so große Flexibilität aufweise, wie der Elektromotor. Alternative Verdichtungsprinzipien, wie z. B. die flüssigkeitsbasierte Verdichtung oder die Nutzung adiabater Druckluft würden ebenfalls nur für bei Spezialanwendungen eingesetzt. Ein Verdichterhersteller spricht im Kontext alternativer Möglichkeiten von einer eventuellen „Renaissance“ der Kolbenverdichter, da diese die besten Wirkungsgrade aufweisen würden.

Bezüglich des Einsatzes von Blockheizkraftwerken (BHKW) zur Druckluftherzeugung erwähnten Experten zweier Verdichterhersteller, dass eine solche Kopplung bereits untersucht wurde, dies jedoch aufgrund des Gaspreises (eingesetzt wurden Gas-Kolbenmotoren) und aufgrund des Erfordernisses der relativ großen Wärmesenke nicht wirtschaftlich war. Allerdings berichtete ein weiterer Gesprächspartner, dass dieser Ansatz in der Industrie teilweise praktiziert würde und die anfallende Wärme ebenfalls zur Kühlung (Ab- und Adsorption) eingesetzt würde.

Einschätzungen der Experten des Bereichs KWK-Technologien

Da insbesondere Anlagen aus dem Bereich der Kraft-Wärme-Kopplung als potentielle Antriebstechnologien für die Druckluftherzeugung in Frage kommen, wurden die KWK-Gesprächspartner eingangs zu einer allgemeinen Einschätzung zur Eignung von KWK-Ansätzen für die Druckluftherzeugung befragt. Diese Ansätze zur Druckluftherzeugung unterscheiden sich von der konventionellen Druckluftherzeugung dadurch, dass am BHKW anstatt eines Stromgenerators ein Verdichter angeschlossen wird und damit o. g. Umwandlungsverluste vermieden werden.

Der Großteil der KWK-Experten hält eine gekoppelte Erzeugung von Druckluft und Wärme prinzipiell für umsetzbar und, abhängig vom Vorliegen einer entsprechend dimensionierten Wärmesenke, auch für sinnvoll. Da hier sowohl bei der thermischen Verwertung eines beliebigen Brennstoffs, als auch beim nachfolgenden Verdichtungsprozess erhebliche Wärmemengen anfielen, müsse (im Unternehmen) allerdings ein überdurchschnittlich hoher Bedarf an Wärme bestehen. Allgemein wird von den Experten heute und in zehn Jahren (bis 2022) der Kolbenmotor gefolgt vom Stirlingmotor als relevanteste KWK-Technologie für eine potentielle Kopplung mit einem Verdichter zur Druckluftherzeugung angesehen (Abbildung 2-2).

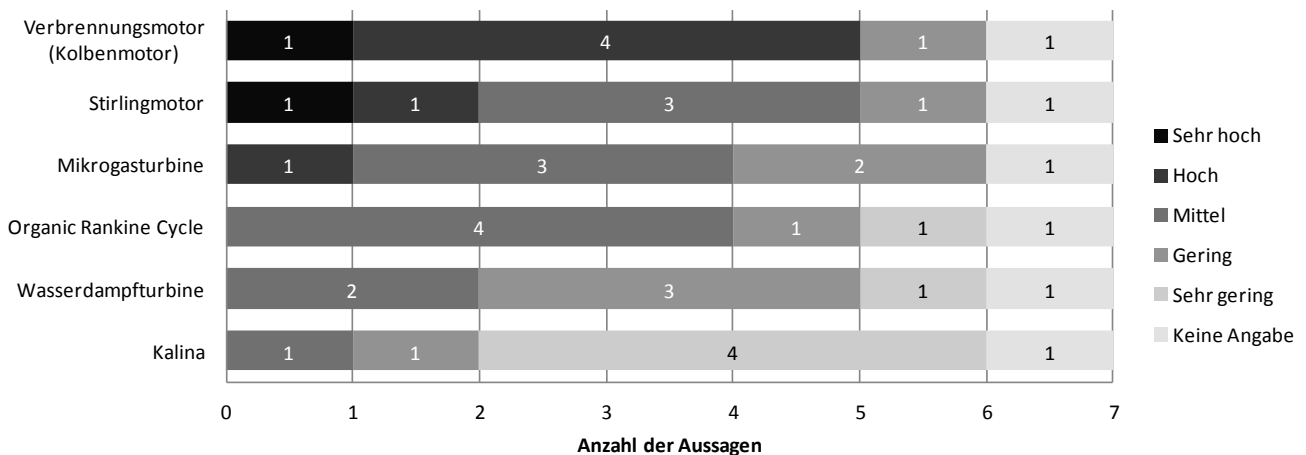


Abbildung 2-2: Relevanz einzelner Antriebstechnologien beim Einsatz in BHKW zur hauptsächlich Druckluftherzeugung (7 Gesprächsteilnehmer)

Allerdings wurde auch angemerkt, dass in den kommenden zehn Jahren die Optimierung des Nutzungsgrads (Verhältnis nutzbarer Strom- und Wärmeabgabe zum Gesamtenergieeinsatz) im Vordergrund stünde; dabei insbesondere die Steigerung des Nutzungsgrades durch die optimale externe Nutzung der anfallenden Wärme. Bei einer sich verstärkenden Tendenz in Richtung dezentraler Energieerzeugung sei der Ausbau eines flächendeckenden Wärmenetzes denkbar, um die bei der Erzeugung von Strom bzw. Druckluft anfallende Wärme verteilen zu können und diese dort, wo Nachfrage besteht, zur Verfügung zu stellen. Darüber hinaus wurden Verbesserungen im Teillastbetrieb der Anlagen genannt.

2.3. Detailbetrachtung ausgewählter Ansätze

Um eine detaillierte Einschätzung der einzelnen Alternativtechnologien zu erhalten, wurde im Rahmen der Expertengespräche vertiefend auf die oben genannten Alternativtechnologien eingegangen. Die Gesprächspartner wurden gebeten, sofern Ihnen bekannt, jeweils eine Einschätzung zu den oben aufgeführten Alternativtechnologien zu geben.

Zur strukturierten Abfrage einzelner Kriterien wurde hierbei auf eine 5-Punkte-Likert-Skala zurückgegriffen. Die Gesprächsteilnehmer wurden gebeten, anhand unterschiedlicher Kriterien die jeweils diskutierte Technologie relativ zu Elektromotor (antriebsseitige Konzepte) bzw. Schraubenverdichter (verdichterseitige Konzepte) einzuordnen. Die dafür zugrunde gelegten Kriterien orientierten sich an einer Delphi-Studie zu „Zukunftstechnologien von Kompressoren und Vakuumpumpen“ (vgl. VDMA 1997) und wurden für die Zwecke der vorliegenden Betrachtung leicht modifiziert, siehe Tabelle 2-1.

Tabelle 2-1: Übersicht der Kriterien zur Bewertung von Alternativtechnologien relativ zum Stand der Technik

Kriterium	Kurzbeschreibung und Leitfrage
Energiebedarf	Energiebedarf maßgeblich determiniert durch den Wirkungsgrad <i>Wie schätzen Sie den Primärenergiebedarf im Vergleich zur herkömmlichen Technologie (Elektromotor/Schraubenverdichter) ein?</i>
Zuverlässigkeit	Funktionale Verfügbarkeit der technischen Anlage <i>Wie schätzen Sie die Standzeit / Zuverlässigkeit der Technologie im Vergleich zur herkömmlichen Technologie (Elektromotor/Schraubenverdichter) ein?</i>
Investitionen	Investitionen in eine Neuanlage <i>Wie schätzen Sie die Investitionen im Vergleich zur herkömmlichen Technologie (Elektromotor/Schraubenverdichter) ein?</i>
Leistungsbereich	Überstimmung des Leistungsbereichs mit definierter Spezifikation <i>Wie schätzen Sie die Übereinstimmung zwischen dem durch die Technologie abgedeckten und dem geforderten Leistungsbereich (entsprechend einem Kompressor mit einer Leistung von 10 bis 300 kW) ein?</i>
Wartungsaufwand	Aufwand für die Wartungen der Technologie <i>Wie schätzen Sie den Aufwand für die Wartung im Vergleich zur herkömmlichen Technologie (Elektromotor/Schraubenverdichter) ein?</i>
Geräuschentwicklung	Geräuschentwicklung beim laufenden Betrieb <i>Wie schätzen Sie die Geräuschentwicklung der Technologie im Vergleich zur herkömmlichen Technologie (Elektromotor /Schraubenverdichter) ein?</i>
Anwendbarkeit heute	Anwendbarkeit zum aktuellen Zeitpunkt <i>Wie schätzen Sie die Nutzbarkeit der Technologie für die Druckluftherzeugung auf dem aktuellen Stand der Technik ein?</i>
Entwicklungschancen	Einschätzung zur Weiterentwicklung der Technologie in der Zukunft <i>Wie schätzen Sie das Potential zur Weiterentwicklung der Technologie für die Druckluftherzeugung ein?</i>

Im den folgenden Betrachtungen ist jeweils zunächst eine Darstellung der jeweiligen alternativen Druckluftherzeugungstechnologien dargestellt ergänzt um einleitende Kurzbeschreibungen. Die nachfolgende Darstellung basiert sowohl auf Aussagen der KWK-Experten als auch der Verdichter-Experten zu den untersuchten Alternativtechnologien.

Verbrennungsmotor (Kolbenmaschine)

Technologiebeschreibung: Ein im Bereich mobiler Anwendungen (z.B. Baustellenkompressoren) etablierter Technologieansatz ist die Kopplung von Verbrennungsmotoren (vor allem Dieselmotoren) mit Verdichtern. Als Verbrennungsmotoren werden zumeist oszillierende Kolbenmaschinen eingesetzt, auf deren Funktionsweise an dieser Stelle nicht näher eingegangen wird. Verbrennungsmotoren sind in unterschiedlichen Leistungsklassen von wenigen Kilowatt bis hin zu einigen Megawatt mechanischer Leistung verfügbar. Sie sind mit einem Anteil von ca. 66 % Hauptenergiewandler in BHKW bis 300 kW (vgl. Schmid 2003, S. 37).

Experteneinschätzungen: Der Verbrennungsmotor im Betrieb mit Gas (auch Biogas) besitzt laut der Expertenmeinungen unter den betrachteten Alternativtechnologien ein vergleichsweise hohes Potential zum Betrieb auch stationärer Kompressoren. Jedoch weisen Verbrennungsmotoren insbesondere gegenüber dem hier etablierten Elektromotor mehrere Nachteile auf:

- Hoher Wartungsaufwand / Verschleiß durch die Vielzahl bewegter Teile und interne Verbrennung,
- Relativ hohe Brennstoffkosten,
- Relativ aufwendiges Handling (z. B. Betankung, ...),
- Relativ niedriger Wirkungsgrad in der betrachteten Leistungsklasse,
- Erzeugung von Vor-Ort-Emissionen (Luftschadstoffe, Treibhausgase, z. B. CO₂)
- Einhaltung von Abgasvorschriften,
- Abfuhr von Mineralölsteuer.

Aufgrund dieser Einschränkungen findet der Verbrennungsmotor derzeit lediglich dort Anwendung, wo kein Stromnetz zur Verfügung steht.

Bei der Diskussion des Verbrennungsmotors hinsichtlich einzelner Kriterien zeigt sich, dass dem Verbrennungsmotor aufgrund seiner hohen technologischen Reife und bedingt durch dessen Verfügbarkeit prinzipiell eine überdurchschnittlich hohe Anwendbarkeit als alternative Technologie zur Druckluftherzeugung zugesprochen wird. Auch der Leistungsbereich wird im Kontext der industriellen Druckluftherzeugung als sehr hoch bis hoch eingestuft. Die Entwicklungschancen des Verbrennungsmotors im Allgemeinen liegen im mittleren bis sehr geringen Bereich, da diese Technologie bereits langjährig erprobt ist und somit keine signifikant innovativen Verbesserungen mehr erwartet werden. Bezüglich des Wartungsaufwands und der Zuverlässigkeit dieses Antriebskonzepts variieren die Aussagen der Experten stark. Dies lässt sich dadurch erklären, dass einige Experten den Grundlastfall betrachteten, bei welchem der Motor im Dauerlauf mit nur wenigen Starts und Stopps eingesetzt wird. In diesem Fall wird dem Konzept eine relativ hohe Zuverlässigkeit zugesprochen. Sind jedoch Lastschwankungen beispielsweise durch häufiges Anfahren des Motors zu kompensieren, senkt dies die Lebensdauer des Verbrennungsmotors signifikant.

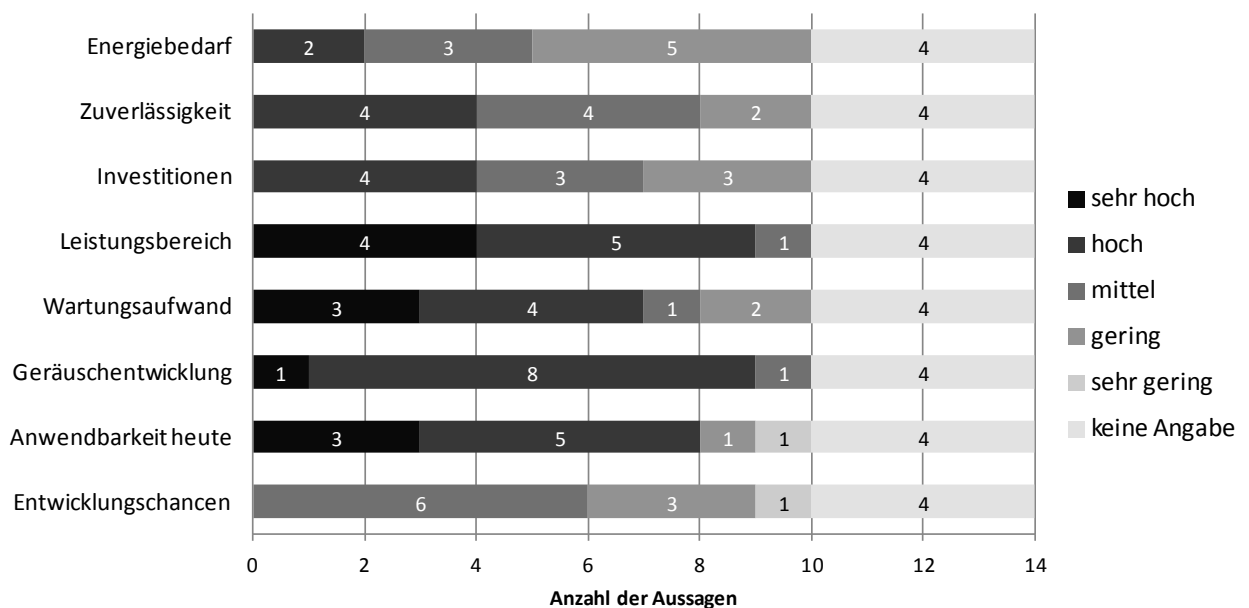


Abbildung 2-3: Detailbetrachtung des Verbrennungsmotors (Kolbenmaschine) hinsichtlich verschiedener Kriterien

Mikrogasturbine

Technologiebeschreibung: Gasturbinen kommen hauptsächlich zum Einsatz, wenn Leistungen von mehreren Megawatt gefordert sind. Die meisten Gasturbinen für mechanische Antriebe sind im Bereich von 30 MW bis maximal 129 MW angesiedelt und erreichen Wirkungsgrade bis zu 38,5 % (vgl. Lechner, Seume 2010). Kompressoren und Pumpen werden in der Öl- und Gasindustrie teilweise von Gasturbinen angetrieben (vgl. Kolev et al. 2000). Im für die Druckluftherzeugung relevanten Leistungsbereich von bis zu 300 kW spricht man von Mikrogasturbinen, welche allerdings von einem vergleichsweise niedrigen Wirkungsgrad von bis zu 30 % gekennzeichnet sind (vgl. Kong et al. 2004; vgl. Lechner, Seume 2010; vgl. Peche et al. 2007). Allerdings erwähnt Thomas (2007) den Einsatz von Mikrogasturbinen als KWK-Technologie in BHKW ab 28 kW elektrischer Leistung.

Experteneinschätzungen: Mikrogasturbinen besitzen im Leistungsbereich zwischen 10 kW und 300 kW durch einen vergleichsweise niedrigen Wirkungsgrad, da laut Experten hohe Spaltverluste auftreten. Je größer die Gasturbine dimensioniert ist, desto weniger fallen diese Spaltverluste relativ ins Gewicht. Als weiterer Grund für den geringen Wirkungsgrad der Mikrogasturbine werden die relativ hohen Abgastemperaturen genannt, welche technologiebedingt anfallen. Der Einsatz dieser Technologie sei aufgrund der Spaltverluste erst ab 500 kW sinnvoll. Des Weiteren wurde angemerkt, dass Gasturbinen im Wechsel zwischen Start- und Stopp-Betrieb einem sehr hohen Verschleiß und somit hohem Wartungsaufwand unterliegen, was deren Wirtschaftlichkeit und Zuverlässigkeit herabsetzt, insofern die Gasturbinen nicht für Grundlast- bzw. Dauerbetrieb eingesetzt werden. Die Verfügbarkeit von Erdgas, die damit verbundenen Steuern und die Entstehung von Luftschadstoffemissionen sowie Treibhausgasen (z. B. Kohlenstoffdioxid) sind weitere Aspekte, die laut verschiedener Experten gegen eine flächendeckende Verwendung dieser Technologie im Bereich der Druckluftherzeugung sprechen. Der Einsatz einer Mikrogasturbine ist in Verbindung mit einem Turboverdichter im Grundlastbetrieb bei Vorliegen einer entsprechend dimensionierten Wärmesenke (KWK) durchaus denkbar, unter anderem da hier die Drehzahlen nicht unteretzt werden müssten. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass Turboverdichter einen im Vergleich zu Schrauben- oder Kolbenkompressoren relativ hohen Volumenstrom ($> 140 \text{ m}^3/\text{min}$ i. N.) liefern. Damit fällt die Liefermenge für die Breite der Unternehmen relativ hoch aus und liegt außerhalb der zuvor definierten Leistungsgrenze. Weiterhin wurde von einem Experten angemerkt, dass sich der Einsatz der Mikrogasturbine zurzeit hauptsächlich auf Bereiche ohne elektrische Versorgungsmöglichkeit beschränke, um beispielsweise dezentrale Generatoren zur Stromerzeugung anzutreiben.

Betrachtet man die einzelnen, bei der Diskussion beleuchteten Kriterien, so fallen insbesondere die mehrfach genannten sehr hohen Investitionen ins Auge. Im Fall einer Kopplung einer Mikrogasturbine zum Antrieb eines Turboverdichters für den Grundlastfall wird von einer sehr hohen bis hohen Anlagenzuverlässigkeit und mittlerem bis geringem Wartungsaufwand (bei Betrieb im Dauerlauf) ausgegangen. Der Leistungsbereich aktuell verfügbarer Mikrogasturbinen liege in einem für die industrielle Druckluftherzeugung relevanten Bereich. Bezüglich der Anwendbarkeit zur Druckluftherzeugung zeigt sich ein stark differenziertes Bild, was auch darauf zurückzuführen ist, dass einige Experten primär die Anwendbarkeit mit Blick auf die Nutzung in Verbindung mit Turbokompressoren betrachtet haben. Diesbezüglich wurden bei den Gesprächen hauptsächlich der geringe mechanische Wirkungsgrad und die signifikant hohen Abgastemperaturen angeführt, was sich in einem mittleren bis hohen Energiebedarf für die eigentliche Druckluftherzeugung widerspiegelt. Das Entwicklungspotential der Technologie an sich wird, auch und vor allem hinsichtlich des Wirkungsgrads, als sehr hoch bis hoch beurteilt.

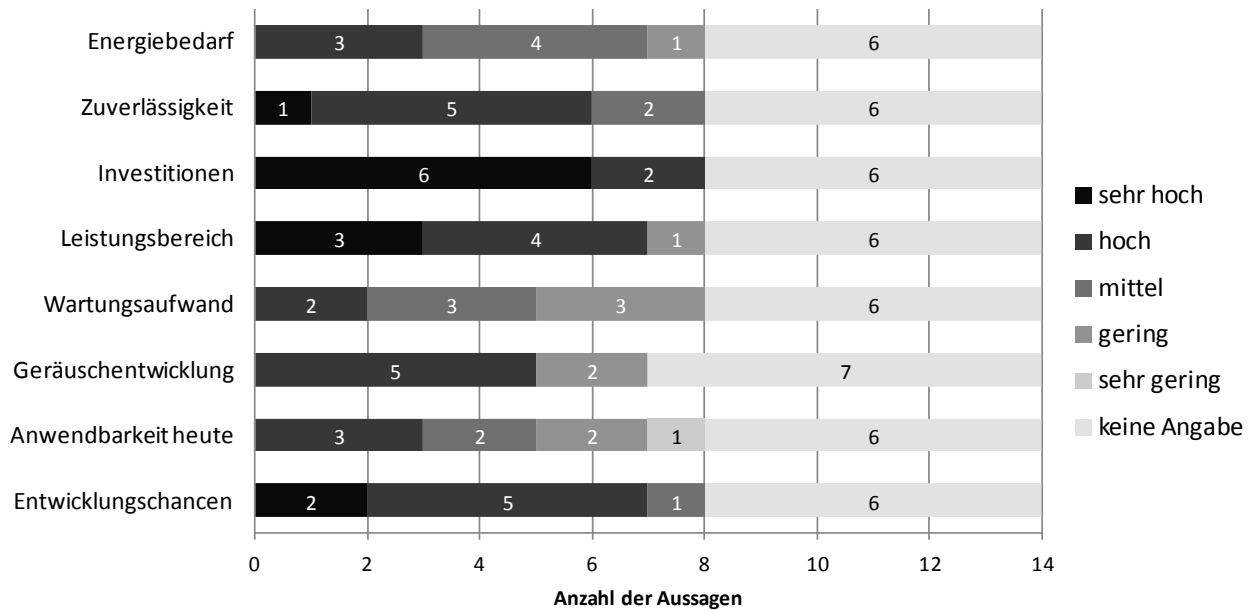


Abbildung 2-4: Detailbetrachtung der Mikrogastrurbine hinsichtlich verschiedener Kriterien

Wasserdampfprozess

Technologiebeschreibung: Beim Wasserdampfprozess werden feste, flüssige oder gasförmige Brennstoffe in einem Kessel verbrannt und die entstehende Wärme zur Erhitzung eines Arbeitsmediums genutzt (Dampferzeuger). Der dadurch entstehende (Wasser)-Dampf treibt eine Dampfturbine an (vgl. Fuchsner et al. 2010; vgl. Strauß 2010), welche zur Druckluftzeugung prinzipiell mit einem Verdichter gekoppelt werden kann. Einen an eine Dampfturbine angeschlossenen Druckluftverdichter findet sich in einer Pilotanlage in Süddeutschland. Die dort stationierte Druckluftanlage liefert einen Volumenstrom von 33 m³/min bei einem Druck von bis zu 8 bar. Realisiert ist der Aufbau durch eine einstufige Gegendruck-Dampfturbine, welche ohne Getriebe direkt an einen Schraubenverdichter gekoppelt ist. Dieser Verdichter dient als Grundlastmaschine, für Spitzenlasten können weitere, konventionell elektrisch angetriebene Verdichter zugeschaltet werden (vgl. Bierbaum 2000).

Experteneinschätzungen: Die spezielle Erzeugung von Wasserdampf zum Antrieb eines Verdichters wird aufgrund des relativ niedrigen Wirkungsgrads im Leistungsbereich zwischen 10 kW und 300 kW sowie der technologieseitig hohen Komplexität von den Experten als unwirtschaftlich eingestuft. Ist jedoch, beispielsweise in der chemischen Industrie, ein bestehendes Dampfnetz vorhanden, so wird diese Form des Antriebs als durchaus wirtschaftlich und praktikabel eingeschätzt. Laut einzelner Gesprächspartner existieren hierzu bereits mehrere Pilotanlagen. Da die Dampfturbine durch eine im Vergleich zum Elektromotor komplexe Ansteuerung charakterisiert ist und relativ lange Anfahrzeiten aufweist, wird ausschließlich der Betrieb im Grundlastfall als praktikabel angesehen.

Bei der hier bewerteten Technologie ist – wie bei allen betrachteten Antriebsarten – die Erzeugung der mechanischen Antriebsleistung (speziell des Wasserdampfs) unter Zuhilfenahme eines relativ beliebigen Brennstoffs inbegriffen. Bei der Betrachtung des Kriteriums Energiebedarf zeigt sich ein stark differenziertes Bild, dies könnte darin begründet sein, dass einige Experten die Erzeugung der Antriebsenergie aus einem Primärenergieträger nicht in ihre Überlegungen mit einbezogen haben. Diese Annahme würde auch die relativ starken Abweichungen in den Bewertungen zum Kriterium „Anwendbarkeit heute“ erklären. Da bereits mehrere Pilotanlagen existieren, wird der Leistungsbereich als sehr hoch bis hoch eingeschätzt, der Wartungsaufwand sei bei dieser Technologie wegen des geringen Verschleißes besonders niedrig. Die Investitionen werden als sehr hoch bis hoch angesehen.

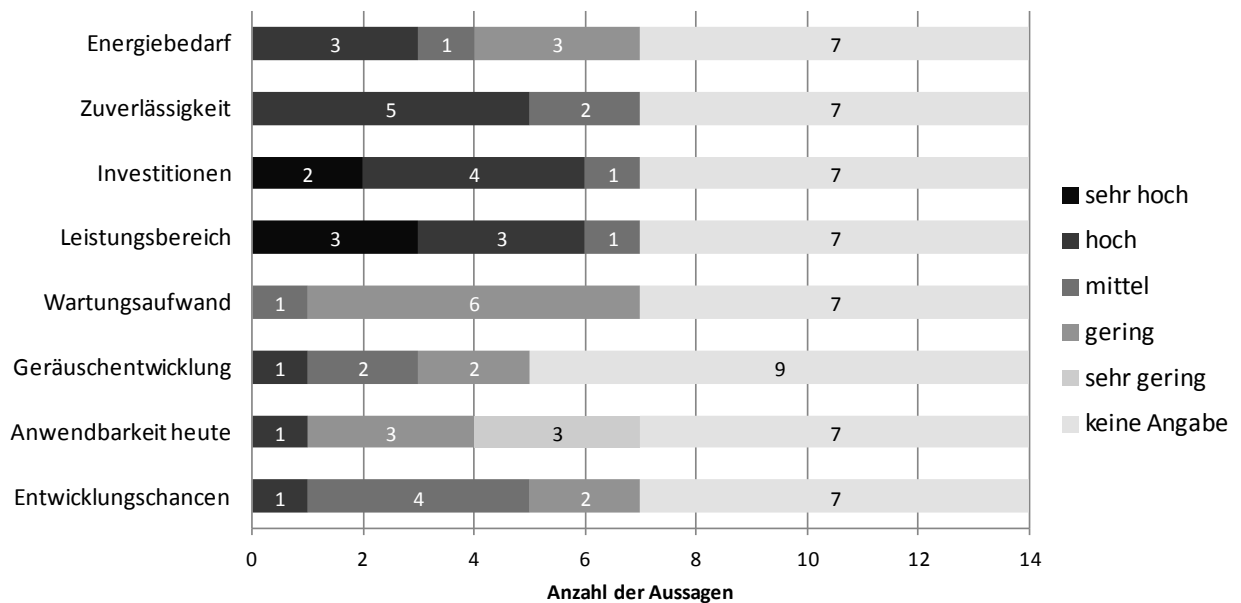


Abbildung 2-5: Detailbetrachtung des Wasserdampfprozesses hinsichtlich verschiedener Kriterien

Organic Rankine Cycle

Technologiebeschreibung: Der Organic Rankine Cycle ist ein Dampfprozess ähnlich des zuvor beschriebenen Wasserdampfprozesses. Beim Organic Rankine Cycle zirkuliert jedoch kein Wasser, sondern ein organischer Stoff, zumeist ein sogenanntes Kältemittel (R-12, R-123, R-134a oder R-717) als Arbeitsmedium (vgl. Roy et al. 2011). Dieses siedet bereits bei wesentlich niedrigeren Temperaturen und Drücken als Wasser. Dampfturbinen auf dem Prinzip des Organic Rankine Cycle werden teilweise in BHKW-Systemen eingesetzt, bei welchen ca. 120-2.000 kW Gesamtleistung erzielt wird (vgl. Thomas 2005).

Experteneinschätzungen: Hervorgehoben wurde von den Experten, dass der ORC-Prozess im betrachteten Leistungsbereich einen sehr geringen Wirkungsgrad (< 15 %) aufweist und durch eine sehr hohe technologische Komplexität charakterisiert ist. Die im Kreisprozess verwendeten Kältemittel sind zumeist Fluorchlorkohlenwasserstoffe, deren Einsatz von den Experten jedoch als unbedenklich eingestuft wird. Im Bereich der Stromerzeugung gewinnt der ORC-Prozess an Bedeutung, vor allem bei der Verstromung von Biomasse im Niedertemperaturbereich. Er kann im Vergleich zum konventionellen Clausius-Rankine-Kreisprozess schon bei einem wesentlich geringeren Temperaturniveau (je nach Phasenwandelmateriale zwischen 100 °C und 350 °C) eingesetzt werden.

Hingewiesen wurde seitens der Experten auf den relativ hohen Energiebedarf zur Erzeugung mechanischer Antriebsenergie aufgrund des geringen Wirkungsgrads des zugrundeliegenden thermodynamischen Kreisprozesses. Da auch bei dieser Technologie keine interne Verbrennung stattfindet, wird Anlagen mit diesem Wirkprinzip eine hohe Zuverlässigkeit und ein relativ geringer Wartungsaufwand zugeschrieben. Die Investitionen werden durchgängig als hoch eingeschätzt. Dies wird einerseits determiniert durch die sehr hohe technologische Komplexität der Anlagen und die aktuell eher als gering beschriebene Marktdiffusion. Die Anwendbarkeit im Bereich zwischen 10 und 300 kW wird im Druckluftkontext als sehr gering angesehen, da u. a. keine Erfahrungswerte vorliegen. Dies zeigt sich zudem an der relativ geringen Anzahl der Expertenaussagen. Allerdings wird gleichzeitig von hohen Entwicklungschancen ausgegangen.

Bei der Analyse gilt es zu beachten, dass nur wenige Teilnehmer auf diesen Ansatz eingehen konnten.

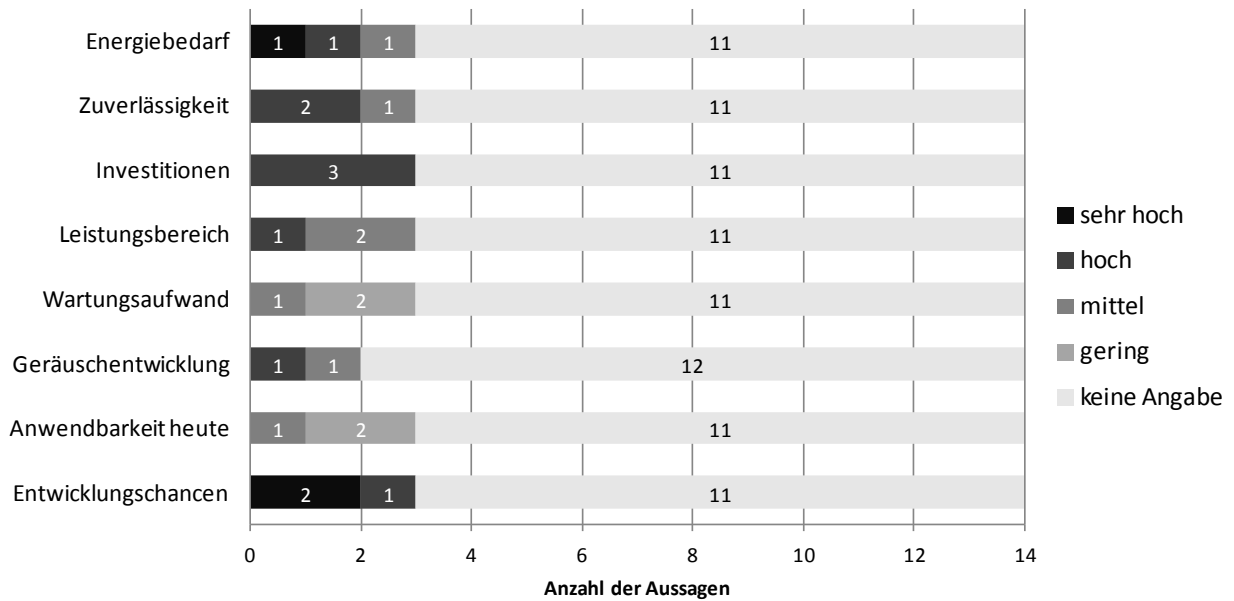


Abbildung 2-6: Detailbetrachtung des Organic Rankine Cycle hinsichtlich verschiedener Kriterien

Kalina

Technologiebeschreibung: Der Kalina-Kreisprozess ist ebenfalls ein Dampfprozess ähnlich des oben beschriebenen Wasserdampfprozesses. Hierbei wird jedoch als Arbeitsmedium ein Gemisch aus Ammoniak und Wasser ($\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O}$) genutzt. Beim Kalina-Kreisprozess besitzt das Arbeitsmedium keinen festen Siedepunkt, eine Anpassung an die thermischen Gegebenheiten am Einsatzort kann durch Variieren des Ammoniak/Wasser-Verhältnisses bewerkstelligt werden (vgl. Piacentini 2005). Der Kalina-Kreisprozess ist nach El-Sayed und Tribus (1985) in der Lage, im selben Temperaturbereich eine 10-20 % höhere thermodynamische Effizienz als der klassische Rankine-Kreisprozess zu liefern. Kalinaanlagen werden aufgrund ihres niedrigeren Temperaturniveaus hauptsächlich in der Geothermie und zur Abwärmenutzung eingesetzt (vgl. Fuchsner et al. 2010). Laut einer Studie würden Wirkungsgrade zwischen 12,3 % und 17,1 % bei einer thermischen Eingangsleistung von 2,3 MW erzielt (Ogriseck 2009).

Experteneinschätzungen: Aufgrund der geringen Verbreitung des Prozesses konnte keine der Experten Einschätzungen zum Kalina-Kreisprozesses als Antriebsprozess zur Druckluftherzeugung abgeben.

Stirlingmotor

Technologiebeschreibung: Eine thermische Verfahrenskombination zur Erzeugung von Druckluft und Wärme ist die Kopplung des Stirlingmotors mit einem Verdichter. Hierbei kann ebenfalls ein (relativ beliebiger) Brennstoff thermisch verwertet oder eine Abwärmequelle genutzt werden, und diese Wärme zur Druckluftherzeugung genutzt werden. Der Stirlingmotor ist eine Wärmekraftmaschine auf Basis des Stirling-Kreisprozesses und wird durch zwei sich in einem Zylinder bewegende Kolben realisiert, die einem Temperaturgradienten ausgesetzt sind. Der Stirlingmotor wandelt thermische Energie ohne interne Verbrennung direkt in mechanische Energie um und besitzt daher einen relativ einfachen, kompakten Aufbau.

Experteneinschätzungen: Der Stirlingmotor ist nach Einschätzung der einzelner KWK-Experten die relevanteste Antriebsalternative nach dem Verbrennungsmotor, insbesondere aufgrund der Vielzahl unterschiedlicher Brennstoffe, die zum Antriebs eingesetzt werden können (z. B. Holzhackschnitzel, Biogas). Weiterhin ist dieses Antriebskonzept aufgrund seiner Einfachheit durch einen vergleichsweise geringen Wartungsaufwand und eine hohe Zuverlässigkeit gekennzeichnet. Allerdings ist der mechanische Wirkungsgrad im betrachteten Leistungsbereich vergleichsweise gering, daher müsse bei Verwendung im KWK-Betrieb ebenso eine ausreichend dimensionierte Wärmesenke vorhanden sein. Steht diese Wärmesenke zur Verfügung, wird laut Aussagen einiger KWK-Experten der Einsatz des Stirlingmotors zur Druckluftherzeugung als durchaus realistisch eingeschätzt. Ein weiterer Nachteil dieses Antriebskonzepts sind

die aktuell noch relativ hohen Investitionen, diese würden aber in einigen Jahren wegen des relativ einfachen Aufbaus des Motors stark sinken.

Besonders auffällig bei der Bewertung sind die hohe Zuverlässigkeit und der geringe Wartungsaufwand des Stirlingmotors. Dies geht auf den relativ einfachen Aufbau des Motors und die lediglich äußere Verbrennung zurück. Diese Technologie weist, verglichen mit den anderen Konzepten, das höchste Weiterentwicklungspotential auf. Insbesondere sei die Steigerung des Wirkungsgrads durch eine weitere Annäherung an das thermodynamische Optimum möglich. Stirlingmotoren könnten laut Aussage eines Experten in zehn Jahren höhere Wirkungsgrade aufweisen als vergleichbar dimensionierte Dieselmotoren. Bei Leistungen über 10 kW läge der mechanische Wirkungsgrad dann bei ca. 50 %. Anzumerken ist, dass Einschätzungen von Herstellern dieser Technologie deutlich optimistischer ausfallen als die Aussagen von Experten aus anderen Bereichen (Forschung, Verbände).

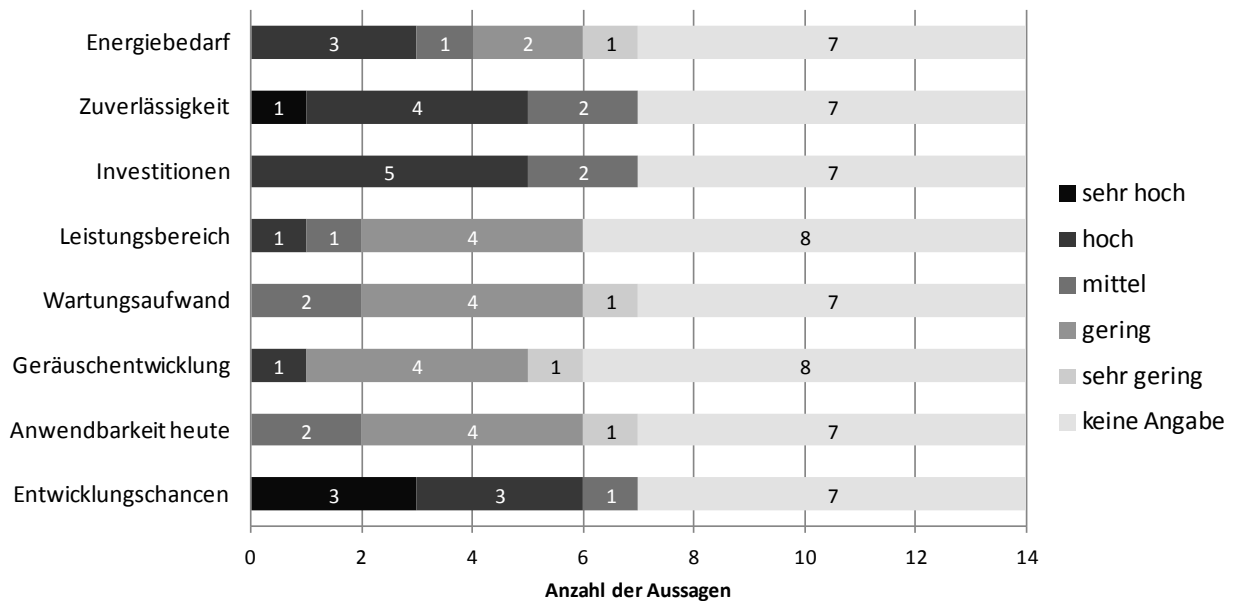


Abbildung 2-7: Detailbetrachtung des Stirlingmotors hinsichtlich verschiedener Kriterien

Adiabate Druckluft

Technologiebeschreibung: Bei der adiabaten Druckluft handelt es sich streng genommen um keinen alternativen Erzeugungsansatz für Druckluft. Sie steht allerdings in engem Zusammenhang mit der Druckluftherzeugung und wird daher hier ebenfalls betrachtet. Der Ansatz fußt auf der Ausnutzung der bei der Verdichtung entstehenden Wärme in Form einer Druckerhöhung der verdichteten Luft. Um diese adiabate Druckluft nutzen zu können, darf bei der Verdichtung nicht (bzw. nur an kritischen Stellen) gekühlt werden. Hierbei besitzt die verdichtete Luft bedingt durch deren höheres Energieniveau einen höheren Druck, was die Effizienz der Druckluftversorgung theoretisch steigert. Bei der adiabaten Verdichtung weist die aus dem Verdichter ausströmende Luft je nach Verdichtungsverhältnis und eingebrachter Leistung sehr hohe Temperaturen auf; Bloch (2006) spricht bei typischen Schraubenkompressoren von Temperaturen bis zu 250 °C. Barth (2000) erwähnt eine resultierende Temperatur bei adiabater Verdichtung von 1 bar auf 10 bar von ca. 300 °C. Der höhere Druck ist jedoch nur in dem Zeitfenster nutzbar, in welchem die erhöhte Temperatur der Druckluft besteht. Sie sollte daher umgehend, am besten in isolierten Rohrleitungen, naheliegenden Anwendungen zur Verfügung gestellt werden, um ein Abkühlen und damit eine Druckminderung zu vermeiden (vgl. Barth 2000).

Experteneinschätzungen: Bei der Verwendung ungekühlter Druckluft besteht die Möglichkeit des Bauteilversagens, da einige Systemkomponenten nicht für Temperaturen von ca. 250 °C (teilweise auch höher) ausgelegt sind. Der Wartungsaufwand für das gesamte Druckluftsystem und die damit verbundenen Kosten würden in diesem Fall wesentlich steigen, was sich auch negativ auf die Anlagenzuverlässigkeit auswirken würde. Diese Form der Druckluft wird in der Praxis nur in Sonderfällen verwendet, wenn die Temperatur der Druckluft von nachrangigem Interesse ist. Der Einsatz in Bereichen, in welchen Druckluft für verschiedene

Prozesse benötigt wird, z. B. in der chemische Industrie oder in der Stahlindustrie sei denkbar, da hier keine Menschen mit der heißen Druckluft in Berührung kämen. Die Verwendung heißer Druckluft im gesamtindustriellen Kontext wird wegen der zuvor genannten Einschränkungen als nicht praktikabel angesehen.

Als Besonderheit kann bei der adiabaten Druckluft angeführt werden, dass lediglich zwei Experten eine detailliertere Einschätzung zu diesem Betriebskonzept abgegeben haben. Dem Großteil der KWK-Experten war dieses Konzept unbekannt, da hier relativ wenige Überschneidungen mit der Kraft-Wärme-Kopplung vorliegen. Betrachtet man dennoch diese zwei Bewertungen, so zeigt sich hier ein relativ homogenes Bild: Der Energiebedarf gilt als gering, ebenso die Zuverlässigkeit, da hier die oben genannte bauteilschädigende Wirkung der heißen Luft im Fokus steht. Die Anwendbarkeit ist weiterhin stark eingeschränkt, da dieses Betriebskonzept nur beschränkt bzw. nicht eingesetzt werden kann, wenn Personen mit der erzeugten Druckluft arbeiten. Dieser Ansatz weist im gesamtindustriellen Kontext die geringsten Entwicklungschancen auf, da die genannten Nachteile die Anwendbarkeit auch in Zukunft bedeutend einschränken werden. Investitionen werden allerdings als gering eingeschätzt, da der einzige Unterschied zur herkömmlichen Kompressorbauweise im Weglassen des Kühlers besteht.

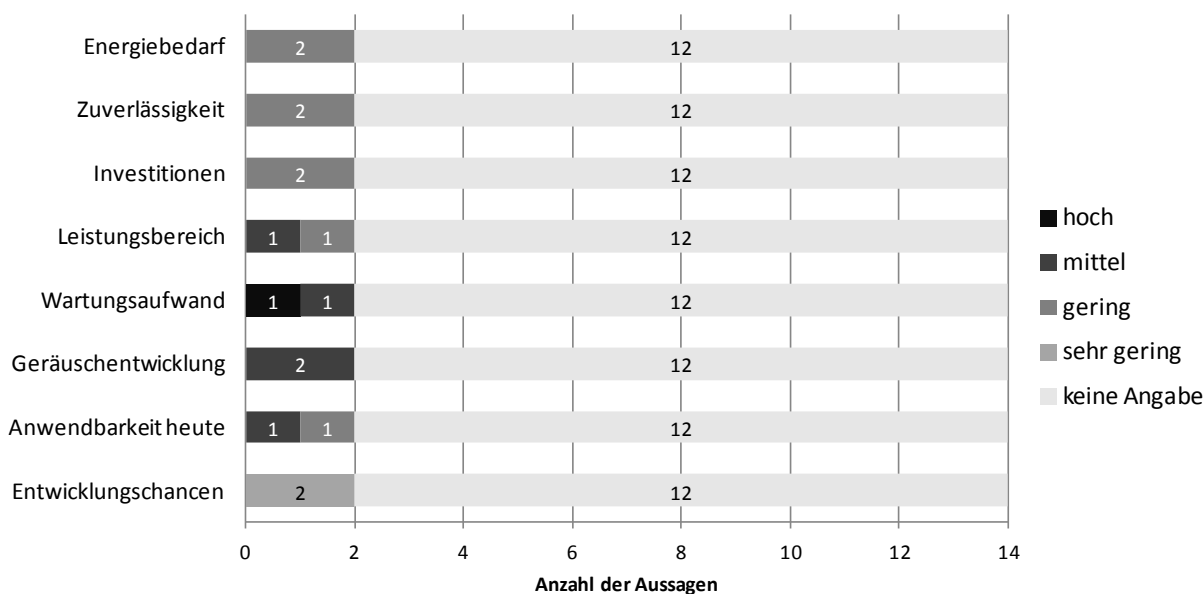


Abbildung 2-8: Detailbetrachtung der Verwendung adiabater Druckluft hinsichtlich verschiedener Kriterien

Flüssigkeitsbasierte Verdichtung

Technologiebeschreibung: Um einen an die isotherme Kompression angenäherten Prozess zu erreichen ist es denkbar, einen Kolbenverdichter zu realisieren, der statt des metallischen Hubkolbens eine Flüssigkeitssäule (ionische Flüssigkeit) nutzt und durch eine Hydraulikpumpe betrieben wird (Linde AG 2006, Brückmann und Cyphelly 2007), Van de Ven und Li 2009). Der Kompressionsvorgang wird durch verschiedene ventilgesteuerte Flüssigkeitszylinder bewerkstelligt, die abwechselnd mit der ionischen Flüssigkeit gefüllt und geleert werden. Der zur Verdichtung nötige Volumenstrom der Arbeitsflüssigkeit wird durch eine elektrisch angetriebene Hydraulikpumpe zur Verfügung gestellt. Auf dieser Bauart basierende Kompressoren werden auch als Ionische Verdichter bezeichnet.

Experteneinschätzungen: Dieser Ansatz zeichnet sich besonders durch den sehr geringen Wartungsaufwand und die hohe Zuverlässigkeit der Anlagen aus, da die Anzahl bewegter Teile minimal ist. Jedoch unterliegt die im Verdichter zirkulierende ionische Flüssigkeit einem gewissen Alterungseffekt, bedingt durch die Tatsache, dass diese bei der Verdichtung u. a. Schmutzpartikel aus dem zu verdichtenden Gas aufnimmt. Ionische Verdichter werden im Hochdruckbereich (> 250 bar) eingesetzt, um Gase, vor allem Wasserstoff und Erdgas zu verflüssigen. Im Druckbereich ab 250 bar bis ca. 1000 bar wird mit Energieeinsparungen von bis zu 20 % bezogen auf die herkömmliche Verdichtung ausgegangen, unter anderem durch bessere Wärmeabfuhr, Dichtigkeit des Verdichters und durch geringe Reibung der „hydraulischen Kolbenstangen“. Für den

Standarddruckbereich wird die Nutzung der ionischen Verdichtung jedoch als derzeit ungeeignet eingeschätzt.

Bedeutsam ist die geringe bis sehr geringe Eignung für die Druckluftherzeugung bezüglich des Kriteriums „Leistungsbereich“ und die geringe bzw. sehr geringe Anwendbarkeit für die Zwecke der Druckluftherzeugung. Die Entwicklungschancen wurden im Durchschnitt als hoch eingeschätzt, da diese Technologie im Bezug zur industriellen Druckluftherzeugung weiteren Forschungsbedarf aufweist und laut Aussage der befragten Experten aus der Wissenschaft technologiseitiges Verbesserungspotential besteht. Da bei dieser Verdichterbauweise die Anzahl der bewegten Teile im Verdichter im Vergleich zu herkömmlichen Kolbenverdichtern sehr niedrig ist, wurde dieser Ansatz mit einer sehr hohen bzw. hohen Zuverlässigkeit und sehr geringem Wartungsaufwand bewertet. Die Zuverlässigkeit solcher Anlagen ist maßgeblich durch die Qualität der eingesetzten Hydraulikpumpe determiniert. Der Energiebedarf wurde als mittel bis hoch eingestuft, da die energetischen Vorteile dieser Technologie lediglich im Hochdruckbereich zum tragen kommen. Anzumerken ist, dass zu diesem verdichterseitigen Ansatz insbesondere die Experten auf dem Gebiet der KWK-Antriebstechnologien keine Einschätzung abgeben konnten.

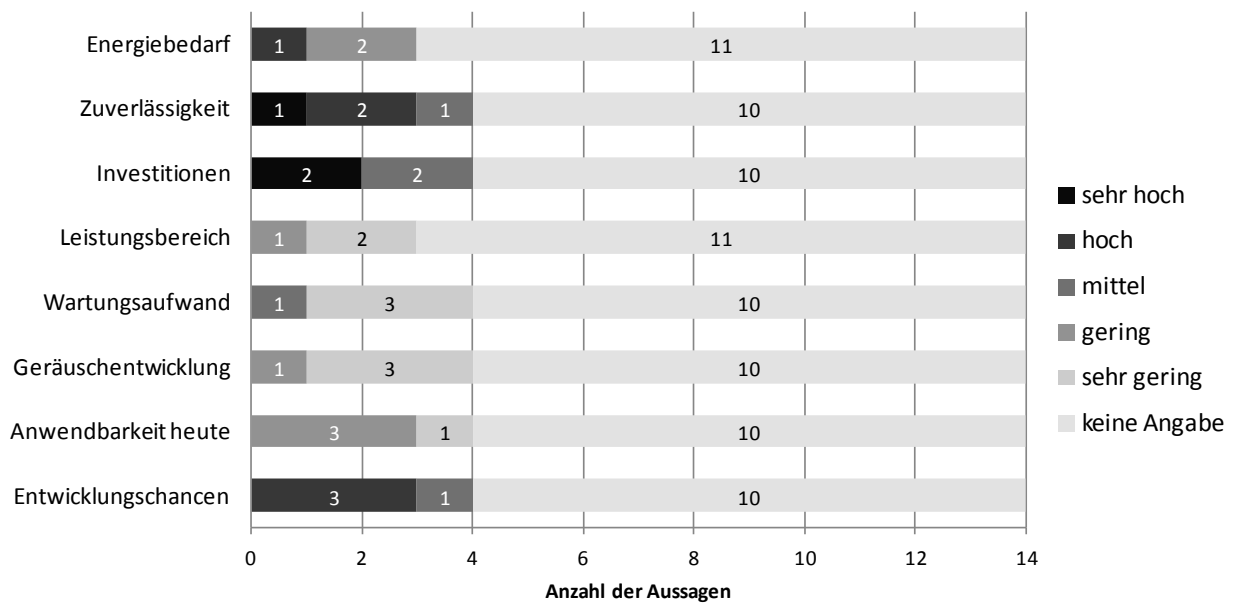


Abbildung 2-9: Detailbetrachtung der flüssigkeitsbasierten Verdichtung hinsichtlich verschiedener Kriterien

3. Diskussion und Zusammenfassung

Ziel der durchgeführten Gespräche war es, vergangene Entwicklungen und zukünftige Trends im Bereich der industriellen Druckluftherzeugung zu identifizieren sowie einen Überblick über die möglichen alternativen Ansätzen zur Erzeugung industrieller Druckluft zu erlangen, um diese Alternativen auf ihre potentielle Anwendbarkeit hin zu diskutieren.

Bei der Interpretation der Aussagen gilt es eine Reihe von Unsicherheiten zu beachten. Neben potentiellen Verzerrungen durch die Auswahl der Gesprächspartner, dem Umfang der Stichprobe und Unschärfe beim Informationsaustausch ist insbesondere anzumerken, dass zu einigen der betrachteten Alternativen nur einzelne Gesprächsteilnehmer eine Aussage treffen konnten und Alternativen von Herstellern der entsprechenden Technologien in einigen Fällen deutlich positiver als vom Rest der Befragten eingeschätzt wurden. Nichtsdestotrotz wurde durch die Wahl der Gesprächspartner versucht, einen möglichst breiten Blickwinkel auf die Thematik zu erhalten.

Die Ergebnisse der Gespräche zeigen, dass aktuell industrielle Druckluft je nach Umfang des unternehmenseigenen Bedarfs hauptsächlich durch elektrisch betriebene Kolben-, Schrauben- und Turbokompressoren erzeugt wird. Insbesondere zeigt sich, dass zukünftige Potentiale im Schwerpunkt in der Optimierung der bestehenden Technologien und beim Aspekt der optimalen Systemintegration gesehen werden. Als Ansatzpunkte für weitere Effizienzverbesserungen mit dem höchsten Anwendungspotential werden eher inkrementelle Verbesserungen durch die Optimierung des Gesamtsystems inklusive aller Komponenten (z. B. Kühler, Trockner, Wärmetauscher, Druckluftspeicher und Verteilnetz) sowie das bedarfsgerechte Ansprechen dieser mit Hilfe übergeordneter Steuerungen und Regelungen genannt.

Auf Basis der Einschätzungen der Experten lässt sich schlussfolgern, dass die konventionelle Form der Druckluftherzeugung mit elektrischem Antrieb und Kolben-, Schrauben- oder Turboverdichter auch in der Zukunft die in diesem Bereich hauptsächlich eingesetzte Technologiekombination für die Druckluftherzeugung repräsentieren wird.

Die detailliertere Betrachtung der einzelnen Alternativtechnologien zeigt, dass sich insbesondere der Verbrennungsmotor auf dem Stand der Technik prinzipiell als Alternativtechnologie zur Reduzierung der Energieumwandlungsstufen auszeichnet, allerdings gegenüber dem Elektromotor einigen Einschränkungen unterliegt (z. B. relativ hoher Wartungsaufwand, Emissionen, relativ hohe Treibstoffkosten, ...). Hohe Entwicklungspotentiale zum alternativen Antrieb von Verdichtern werden von den Experten insbesondere bei Mikrogasturbinen, beim ORC-Prozess und beim Stirlingmotor gesehen.

Weiterhin wurde vielfach darauf verwiesen, dass die Alternativen lediglich in Spezialfällen oder unter besonderen Randbedingungen sinnvoll einsetzbar sind und somit nur eingeschränkt zum breiten industriellen Einsatz geeignet erscheinen. Oft genannt wurde das Argument, dass die Kopplung von KWK-Technologien zur Druckluftherzeugung nur dann sinnvoll ist, wenn der erhebliche Wärmeüberschuss genutzt werden kann, wobei hierfür zumeist in der Praxis kein Bedarf bestünde. Auch die alternativen Verdichtungsprinzipien „Flüssigkeitsbasierte Verdichtung“ und das Betriebsführungskonzept „Adiabate Druckluft“ werden als wenig geeignet für einen breiten Einsatz angesehen.

Literatur

- Barth, H.J. (2000): Ungekühlte Druckluft für optimale Energienutzung in der Pneumatik, S. 304-306.
- Bierbaum, U. (2000): Dampf statt Strom. In: *Plastverarbeiter*, 51. Jahrg. (7), S. 22-23.
- Bloch, H.P. (2006): A practical guide to compressor technology, Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons.
- Brückmann, P.; Cyphelly, I. (2007): Druckluftspeicherung: Optimierung/Ausmessung bestehendes Projektmuster, Bern: Bundesamt für Energie (BFE), Schweizerische Eidgenossenschaft.
- El-Sayed, Y.M.; Tribus, M. (1985): A theoretical comparison of the Rankine and Kalina cycles. In: *ASME Special Publications, AES-1*, S. 97-102.
- Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI (2010): Erstellung von Anwendungsbilanzen für das Verarbeitende Gewerbe - Pilotstudie für die Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V., Karlsruhe.
- Fuchsner, H.; Girbig, P.; Märker, W.; Münz, T.H.; Pohl, C.; Schaumann, G.; Schmitz, K.W.; Zihla, W. (2010): Kraft-Wärme-Kopplung, Schaumann, G.; Schmitz, K.W. (Hrsg.), Heidelberg: Springer Verlag.
- Kolev, N.; Schaber, K.; Kolev, D. (2000): A new type of gas-steam turbine cycle with increased efficiency. In: *Applied Thermal Energy*, 21, S. 391-405.
- Kong, X.Q.; Wang, R.Z.; Huang, X.H. (2004): Energy efficiency and economic feasibility of CCHP driven by stirling engine. In: *Energy Conversion and Management*, 45, S. 1433-1442.
- Lechner, C.; Seume, J. (2010): Stationäre Gasturbinen, Lechner, C.; Seume, J. (Hrsg.), Heidelberg: Springer-Verlag.
- Linde AG (2006): Mobilität unter Hochdruck. In: *Linde Technology - Berichte aus Technik und Wissenschaft*, S. 24-29.
- Ogriseck, S. (2009): Integration of Kalina cycle in a combined heat and power plant, a case study. In: *Applied Thermal Engineering*, 29 (14-15), S. 2843-2848.
- Peche, R.; Tronecker, D.; Rommel, W. (2007): Klimaschutz durch effiziente Energienutzung - Einsatzmöglichkeiten der Mikrogasturbine in Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen, Augsburg: Bayrisches Landesamt für Umwelt (LfU).
- Piacentini, A. (2005): ORC-Prozess vs. Kalina-Prozess - Wirkungsgrad, Aufwand, Kosten, Nutzen. In: *Geothermische Energie. Geeste: Geothermische Vereinigung e.V.*, S. 9-10.
- Radgen, P.; Blaustein, E. (2001): *Compressed Air Systems in the European Union*, Stuttgart: LOG_X Verlag GmbH.
- Rößler, M.P. (2011): Bewertung alternativer Ansätze zur Steigerung der Energieeffizienz bei der industriellen Druckluftherzeugung, Karlsruhe: Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (ISI) und Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Master-Thesis.
- Roy, J.P.; Mishra, M.K.; Misra, A. (2011): Performance analysis of an Organic Rankine Cycle with superheating under different heat source temperature conditions. In: *Applied Energy*, 88 (9), S. 2995-3004.
- Ruppelt, E. (2003): *Druckluft-Handbuch*, Ruppelt, E. (Hrsg.), Essen: Vulkan-Verlag.
- Schmid, C. (2003): Möglichkeiten, Potentiale, Hemmnisse und Instrumente zur Senkung des Energieverbrauchs branchenübergreifender Techniken in den Bereichen Industrie und Kleinverbrauch, Karlsruhe, München: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V.
- Strauß, K. (2010): *Kraftwerkstechnik*, Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.
- Thomas, B. (2005): *Stirling BHKWs - Einsatz von Biomasse*, Saarbrücken: Tagungsband eines Vortrages am Instituts für ZukunftsEnergieSysteme (IZES).
- Thomas, B. (2007): *Strom erzeugende Heizung - kleine Heizsysteme für Ein- und Zweifamilienhäuser*, Augsburg: Tagungsband der Fachtagung RENEXPO 2007.
- Van de Ven, J.D.; Li, P.Y. (2009): Liquid piston gas compression. In: *Applied Energy*, 86 (10), S. 2183-2191.
- Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V. (1997): *Zukunftstechnologien im Fachbereich Kompressoren und Vakuumpumpen*, Frankfurt am Main: Fachverband Kompressoren, Druckluft- und Vakuumtechnik.