

ENTWICKLUNG EINES KONZEPTS ZUR RESIDUALLAST-ANGEPASSTEN DRUCKLUFTBEREITSTELLUNG

Jan-Niklas Gerdes^{*1}, Ekrem Köse², Christian Dierolf¹, Alexander Sauer^{1,2}

¹ Universität Stuttgart Institut für Energieeffizienz in der Produktion (EEP), Nobelstraße 12 in 70568 Stuttgart, Telefonnr. +49 711 970 1675, jan-niklas.gerdes@eep.uni-stuttgart.de, www.eep.uni-stuttgart.de

² Fraunhofer Institut für Produktions- und Automatisierungstechnik (IPA), Nobelstr. 12 in 70569 Stuttgart, Telefonnr. +49 711 970-3624, ekrem.köse@ipa.fraunhofer.de, www.ipa.fraunhofer.de

* Nachwuchsautor

Kurzfassung: In diesem Artikel werden das Konzept und die Möglichkeiten einer hybriden Betriebsweise eines Druckluftheizkraftwerks (DHKW) mit Strom und Gas vorgestellt. In drei realen Szenarien sollen die situationsabhängigen Vorteile anhand eines Demonstrators gezeigt werden. Die Szenarien unterscheiden sich hinsichtlich ihres Anteils an erneuerbaren Energien, dessen Volatilität in Zukunft einen starken Einfluss auf die Energieversorgung haben wird. Durch die hybride Betriebsweise entsteht ein effizientes, umweltfreundliches, energieflexibles und resilientes Anlagenkonzept.

Keywords: Energieflexibilität, Druckluft, Erneuerbare Energien, Dekarbonisierung, Prozesswärme

1 Einleitung

Eine große Herausforderung für die Substitution von fossiler durch regenerative Stromerzeuger ist ihre Volatilität. Bei kurzzeitiger Über- oder Unterdeckung des aktuellen Strombedarfs muss dieser durch Regelungsmaßnahmen kompensiert werden, etwa dem Zu- oder Abschalten von Verbrauchern oder dem Drosseln oder Erhöhen der Erzeugung [1]. Diese Regelungsmaßnahmen sind in Unternehmen umsetzbar und eröffnen die Möglichkeit, Energieflexibilitätspotenzial auf einem Energiemarkt anzubieten. Neben der Stabilisierung des Netzes können so Energiekosten gesenkt und Erlöse auf dem Markt erwirtschaftet werden [2, 3].

Die industrielle Drucklufterzeugung und Prozesswärme können durch Flexibilisierung zur Stabilisierung des Energiesystems beitragen. Allein in Deutschland macht die Drucklufterzeugung 7% des Strombedarfs aus, was 17 TWh/a entspricht [4]. Wegen des Anteils der fossilen Energieträger an der deutschen Stromproduktion tragen Druckluftanwendungen signifikant zu den industriellen Emissionen bei [5]. Die industrielle Prozesswärme verursacht mit über 60% des industriellen Endenergieverbrauchs ebenfalls signifikante Emissionen, da sie größtenteils durch Verbrennung von fossilen Brennstoffen erzeugt wird [6]. Ein hybrides Druckluftheizkraftwerk kann durch die Flexibilisierung der Druckluft- und Prozesswärmeerzeugung einen wichtigen Beitrag für die Transformation hin zu einer dekarbonisierten Energieerzeugung leisten. Für Branchen mit gleichzeitigem hohen Druckluft- und Wärmebedarf ergeben sich daraus wirtschaftliche und ökologische Potenziale.

2 Stand der Technik

Der Stand der Technik bei der Drucklufterzeugung und der Energieflexibilität in der Industrie wird in den folgenden Abschnitten dargelegt.

2.1 Drucklufterzeugung

Thermodynamisch am günstigsten ist eine isotherme Verdichtung der Luft. Da dies jedoch einen Idealfall darstellt, wird sie über eine mehrstufige, adiabate Verdichtung approximiert. Um die bei der Verdichtung entstehende Aufheizung der Druckluft abzuführen, wird diese zwischen den Verdichterstufen gekühlt. Dabei wird ein Teil der Kompressionsenergie in Wärme umgewandelt und abgeführt. Neben den thermodynamischen Vorteilen wird damit die thermische Beanspruchung und der spezifische Leistungsbedarf verringert, jedoch kommt es auch zu energetischen Verlusten [7]. Aufgrund dieser Verluste stellt Druckluft eine sehr teure Energieform dar und hat einen sehr geringen Wirkungsgrad von 4-10 %. Die restlichen 90-96 % werden in Form von Wärme an die Umgebung weitergegeben [8]. Da die Energiekosten einer Druckluftanlage auf den gesamten Lebenszyklus 70-90 % der Gesamtkosten ausmachen, sind Investitionen in die Effizienz von Druckluftsystemen nicht nur ökologisch, sondern auch wirtschaftlich sinnvoll [9].

Eine Möglichkeit, den Wirkungsgrad einer Druckluftanlage zu verbessern, ist die Wärmerückgewinnung (WRG). Dabei wird die Drucklufterzeugung mit dem Konzept einer KWK-Anlage zu einem Druckluftheizkraftwerk kombiniert. Im Vergleich mit der konventionellen Erzeugung von Druckluft und Wärme durch Kompressoren und Heizkessel können so erhebliche Einsparungen von Energiekosten und CO₂ erreicht sowie eine Wirkungsgradsteigerung der Gesamtanlage auf bis zu 90 % ermöglicht werden [4].

Das Konzept eines hybriden Druckluftheizkraftwerks ist in Abbildung 1 dargestellt. Ein solches Kraftwerk kann mit Gas und Strom betrieben werden. Im Normalbetrieb wird die Anlage über den Gasmotor angetrieben, wobei Druckluft erzeugt und Wärme aus dem Motor, dem heißen Abgas und dem Verdichter gewonnen wird. Über den zwischengeschalteten Elektromotor kann die Druckluft durch Strom erzeugt werden, wobei jedoch nur die Wärme aus der Zwischenkühlung im Verdichter rückgewonnen wird. Der Elektromotor ermöglicht zusätzlich die Rekuperation eines Anteils der mechanischen Energie in Strom, falls der Druckluftbedarf sinkt. Im Vergleich zu herkömmlichen DHKW-Anlagen hat eine Hybridisierung folgende Vorteile:

- Durch die Rekuperation eines Anteils der mechanischen Energie wird eine längere Betriebsdauer der Anlage erreicht, auch wenn kein Druckluftbedarf vorliegt. Somit wird die Effizienz, der Ausnutzungsgrad und Wirtschaftlichkeit der Anlage gesteigert.
- Die hybride Betriebsweise des DHKWs erhöht die Energieflexibilität drastisch und ermöglicht die Nutzung des Energieflexibilitätspotenzials, um netzdienlich zu interagieren oder zum Peak Shifting des Energieverbrauchs
- Über den eingebauten Elektromotor kann die Anlage negative Strompreise aufgrund der volatilen erneuerbaren Energien nutzen, klimaneutral Druckluft bereitstellen und die Energiekosten senken

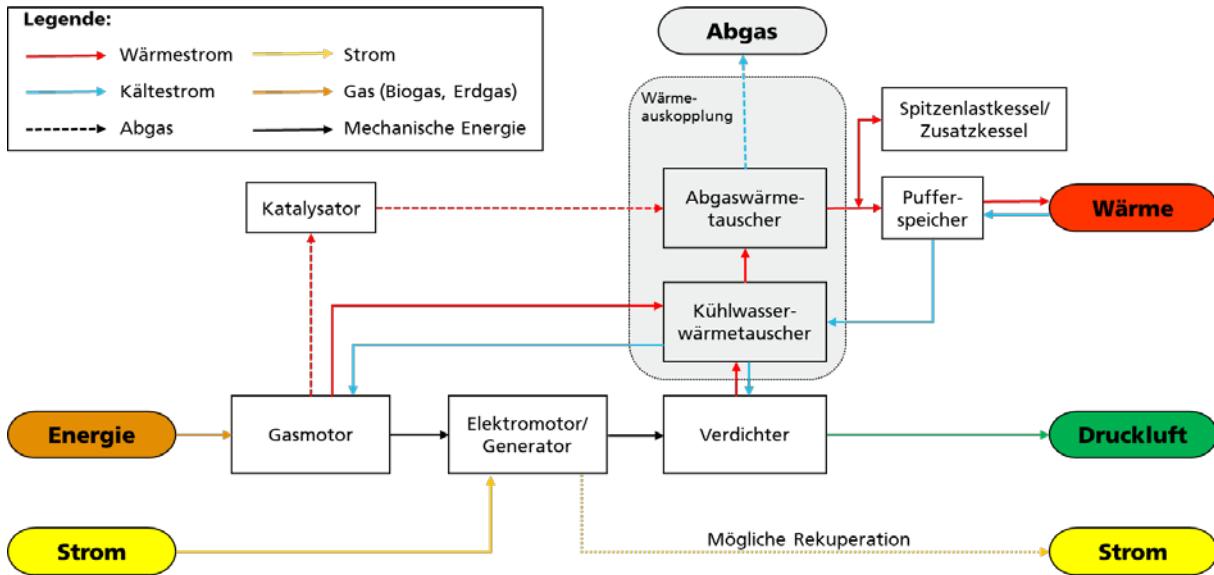


Abbildung 1: Konzeptskizze eines hybriden Druckluftheizkraftwerks

2.2 Energieflexibilität in der Industrie

Durch den Anstieg des Anteils der erneuerbaren Energien im Stromnetz steigt die Volatilität der Stromproduktion und verursacht Schwankungen im Strompreis. Daher werden vermehrt energieflexible Lösungen in die Produktionsprozesse der Zukunft eingebunden, die das Stromnetz durch verschiedene Maßnahmen entlasten können.

Mit dem Begriff Energieflexibilität wird die Fähigkeit beschrieben, sich schnell und mit geringem finanziellen Aufwand an die Veränderungen des Energiemarktes anzupassen [10]. Durch die Einspeisung regenerativer Energien kann sich die Residuallast zwischen erneuerbarer Stromerzeugung und Stromverbrauch sehr schnell ins Positive oder Negative ändern. Diese Abweichungen haben einen starken Einfluss auf den Energiehandel und die Strompreise. So wurden im Day-Ahead-Markt im Jahr 2020 298 Stunden negative Strompreise verzeichnet [11]. Im gleichen Jahr wurden mehrere Stunden mit ca. 100 €/MWh eingepreist. Demnach sind auch die Energiemarktpreise sehr volatile [12]. Um dieser Volatilität entgegenzutreten, muss die Nachfrageseite des Energiesystems flexibler werden.

Im Rahmen des Kopernikus-Projekts „SynEnergie“ wurden unterschiedliche Maßnahmen zur Steigerung der Energieflexibilität analysiert, um die industrielle Nachfrageflexibilität zu erhöhen. Die Hybridisierung des Anlagenbetriebs, also die Nutzung von mehreren Energieträgern im Betrieb, generiert dabei eines der größten Potenziale. Die Befähigung einer Druckluftanlage, hybrid betrieben zu werden, kann daher einen wichtigen Beitrag zum Gelingen der Energiewende leisten [13].

3 Aufbau

Im letzten Kapitel wurde der Bedarf an Langzeit-Energieflexibilität und die Relevanz der Drucklufterzeugung in der Industrie aufgezeigt. Das folgende Kapitel beschreibt den mechanischen Aufbau der bivalenten Drucklufterzeugung, die integrierte Sensortechnik und die Szenarien, anhand derer die Vorteile eines hybriden Anlagenkonzepts demonstriert

werden sollen. In Abbildung 2 sind die grundlegenden Komponenten des Antriebsstrangs dargestellt.

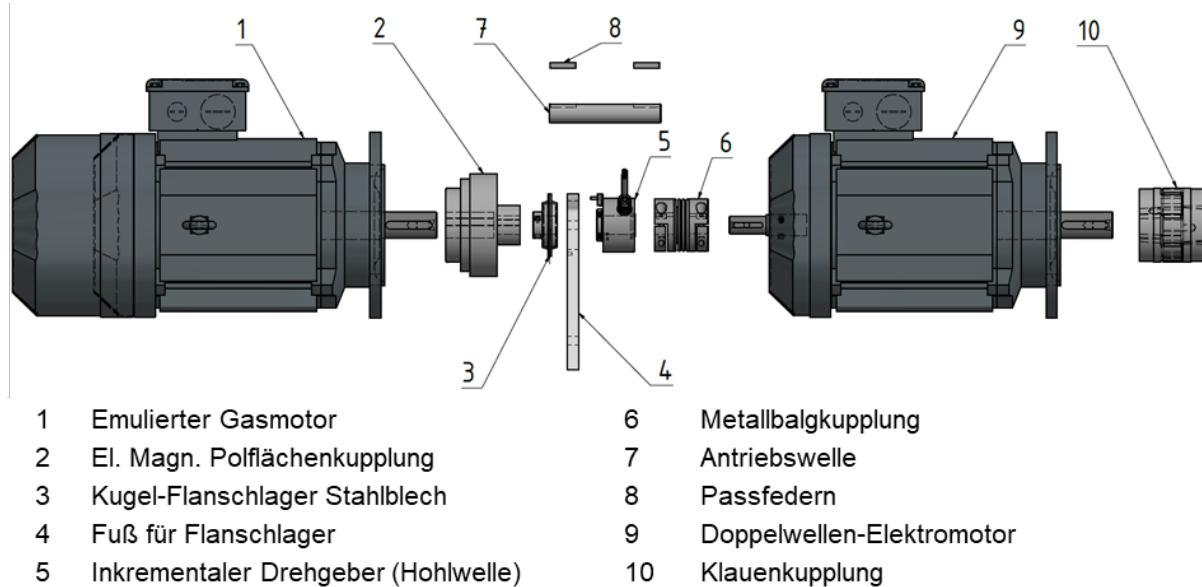


Abbildung 2: Mechanischer Antriebsstrang

3.1 Mechanischer Aufbau

Der Verdichter zur Drucklufterzeugung wird durch zwei Elektromotoren (Asynchronmotoren) angetrieben. Der erste Elektromotor (1) wird mit der Anfahrcharakteristik und den Restriktionen eines Gasmotors betrieben. Generell könnte der Aufbau eines hybriden Druckluftdemonstrators durch Kupplungen, Getriebe oder Aneinanderreihung der Elemente „emulierter Gasmotor“, „Elektromotor“ und Verdichter“ erfolgen. Aufgrund der kostengünstigen Bauweise, des modularen Aufbaus, der reduzierten Komplexität und – dem Efficiency-first Gedanken folgend – der geringsten Energieverluste ist die Entscheidung zum Aufbau auf den gemeinsamen Antriebsstrang gefallen. In Abbildung 2 ist der Demonstrator ohne die Verbindungselemente wie Schrauben und Motorbefestigungen dargestellt.

Die wichtigsten Komponenten sind dabei die elektromagnetische Polflächenkupplung (2), mit der der Asynchronmotor ein- bzw. ausgekuppelt werden kann. Der Hohlwellengeber misst die Drehzahl des zweiten Asynchronmotors. Um einen axialen Versatz und die unterschiedlichen Durchmesser auszugleichen, werden abschließend die zwei Wellen mit einer Metallbalgkupplung (6) verbunden. Auf Verdichterseite wird mit Hilfe einer Klauenkupplung (10) ein Formschluss mit dem Verdichter hergestellt.

3.2 Sensorik

Die Steuerungskomponenten und die installierte Sensorik im Demonstrator besteht im Wesentlichen aus Sensoren zur Erfassung relevanter Prozessgrößen zur Sicherstellung des Ablaufs und aus zusätzlichen Sensoren zur Analyse. Abbildung 1 umfasst für die Analyse zwei elektrische Leistungsmesser M3PRO 80 MID [14] und zur Erfassung der Druckluftmenge einen Durchflusssensor VA 520 [15]. Der Druck ermittelt der Drucksensor CS16 [16]. Dieser ist über eine analoge Schnittstelle mit einem Frequenzumrichter (FU) [17] verbunden, wohingegen die anderen Analyse-Sensoren mit dem Modbus-Protokoll die Daten an eine

speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) [18] übermitteln. Dieses Kommunikationsprotokoll basiert auf einer Client-/Server-Architektur. Die drei Ventile erzeugen einen kontinuierlichen Druckluftverbrauch. Die Ventile schaltet die SPS über eine digitale Ausgangskarte stufenweise zu.

Die Programmabfolgen in der SPS sind mit strukturierterem Text in der Softwareumgebung e!COCKPIT [19] als Schrittfolge programmiert. Die Benutzerschnittstelle HMI [20] ermöglicht die Bedienung für den Anwender und stellt einzelne Prozessgrößen und Stati während des Betriebs direkt dar. Die beiden Elektromotoren werden von jeweils einem Frequenzumrichter gespeist, welche sowohl aus Sicht des Energieflusses in Form des Zwischenkreises, als auch durch einen eigenen Bus informationstechnisch miteinander gekoppelt sind. Die SPS übermittelt bis zu vier unterschiedliche Steuerwörter zu Ausführung vordefinierter Lastverteilungen innerhalb der Frequenzumrichtersteuerung. Hierdurch ist das planmäßige Zusammenwirken beider Motoren während der gewählten Szenarien sichergestellt. Die Daten der Frequenzumrichter, Motoren und Drehzahlgeber werden mit dem Echtzeitethernet der Automatisierungstechnik EtherCAT (Ethernet for Control Automation Technology) an die SPS übermittelt und dort gespeichert.

Jegliche Sensorinformation, die an die SPS übermittelt wird, sowie weitere Ein- und Ausgänge der SPS werden durch eine OPC-UA-Server semantisch beschrieben und durch die plattformunabhängige, serviceorientierte Architektur veröffentlicht. Dies ermöglicht es, in der Entwicklung befindliche Analyseservices zukünftig während des Betriebs auszuführen. Die verwendete Sensorik und Steuerung im Demonstrator ermöglichen die Ausführung definierter Abfolgen in Form von Szenarien. Diese sind im folgenden Kapitel vorgestellt.

3.3 Szenarien

Wie bereits erwähnt, soll der Druckluftdemonstrator eine möglichst hohe Energieflexibilität vorweisen. In Abbildung 3 sind die drei Szenarien definiert, mit denen die Energieflexibilität und eine mögliche Interaktion mit dem Energiemarkt demonstriert wird.

Der erste Asynchronmotor 1 stellt den emulierten Gasmotor und der Asynchronmotor 2 den Elektromotor dar, der auch als Generator verwendet werden kann. Im Betriebszustand 1 treibt der Elektromotor den Verdichter vollumfänglich eigenständig an. Dies soll das Szenario einer hohen Stromerzeugung durch regenerative Energien simulieren. Dadurch kann das Netz durch Entnahme von Strom gestützt und CO₂-armer und ggf. kostengünstiger Strom bezogen werden. Durch die eingebaute Polflächenkupplung wird die Kraftübertragung auf den emulierten Gasmotor unterbrochen und dieser ruht im Stillstand.

Im zweiten Szenario wird der Verdichter durch den emulierten Gasmotor angetrieben, während der Elektromotor verlustarm im Leerlauf mitläuft. Durch die Polflächenkupplung kann die Verbindung zwischen dem emulierten Gasmotor dem restlichen System sicher getrennt werden. Im gleichen Betriebsszenario ist es auch möglich, dass beide Motoren den Verdichter antreiben. Dies ist allerdings in der Realität nicht zwingend notwendig. Die genaue Lastaufteilung könnte dabei frei eingestellt werden.

Für das Szenario 3 wird der Elektromotor als Generator betrieben und rekuperiert anteilig die Antriebsleistung vom emulierten Gasmotor (20-50 %). Die Dunkelflaute beschreibt einen längeren Zeitraum ohne regenerative Stromerzeugung. Um hier das Netz zu unterstützen,

kann der emulierte Gasmotor Strom einspeisen und darüber hinaus den Verdichter antreiben. Durch die Möglichkeit der Nutzung von Biogas, Holzgas oder perspektivisch auch grünen Wasserstoff wird darüber hinaus auch der Emissionsfaktor des Netzes reduziert. Der emulierte Gasmotor erzeugte in Szenario 2 und 3 Wärme. Um die Energieeffizienz des gesamten Systems zu gewährleisten, wird die erzeugte Wärme entweder direkt genutzt oder zwischengespeichert.

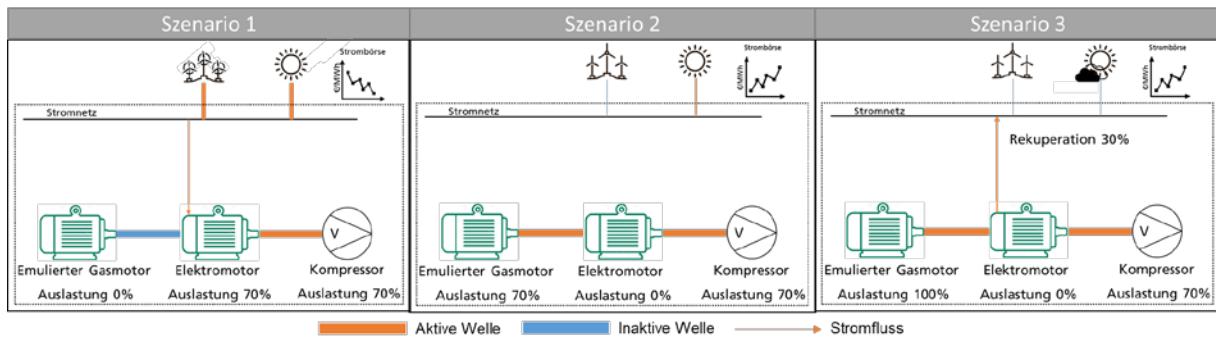


Abbildung 3: Definition der Szenarien 1-3

4 Inbetriebnahme

Die Inbetriebnahme des im letzten Kapitel beschriebenen Demonstrators erfolgt anhand der Durchführung von Messungen der bereits beschriebenen Szenarien. Mithilfe der Ergebnisse können Aussagen zur Umsetzbarkeit und den Vorteilen des Anlagenkonzepts getroffen werden.

Die Vorteile der hybriden Betriebsweise des Drucklufttheizkraftwerks sollen anhand von Messungen am Demonstrator veranschaulicht werden. Dafür werden die in Kapitel 3.3 beschriebenen Szenarien in Form von Lastprofilen von der Anlage eingelesen und ausgeführt. Dieses Lastprofil resultiert in vorgegebenen Leistungsverläufen mit einer kurzzeitigen Spitze nach ungefähr 40 Sekunden. Die daraus resultierenden Messdaten werden im folgenden Abschnitt beschrieben und bewertet.

In Abbildung 4 sind die Messergebnisse der Szenarien A und B dargestellt, in der jeweils Druckluft über den emulierten Gas- oder Elektromotor erzeugt wird. Aufgrund der Abweichung zwischen den Druckniveaus der jeweiligen Szenarien von 0,2 bar besteht ein Unterschied zwischen den Leistungen der verwendeten Motoren, die im elektrischen Betrieb geringer ist. Die Senkung des Drucks während des Betriebs erfolgt durch eine Druckluftentnahme. Die daraus resultierenden Verläufe des Systemdrucks sind qualitativ identisch und weichen aufgrund der Unterschiede im Druckniveau zu Szenariobeginn voneinander ab. Dieser Unterschied im Druckniveau wirkt sich zusätzlich auf die benötigte Leistung aus, die im Szenario B ebenfalls geringer ist. Es ist daher davon auszugehen, dass eine Drucklufterzeugung durch beide Motoren adäquat möglich ist, sodass ein Energieträgerwechsel keine Effizienzeinbußen verursacht und dieser vor allem durch das Druckniveau des Systems bedingt ist. Die Abweichungen des Systemdrucks zwischen Versuchen und Szenarien sind auf Verluste in Folge von Leckagen zurückzuführen, sodass es zwischen den Messergebnissen Unterschiede im Druckniveau des Systems in Abhängigkeit von der Zeit zwischen Messungen kommt.

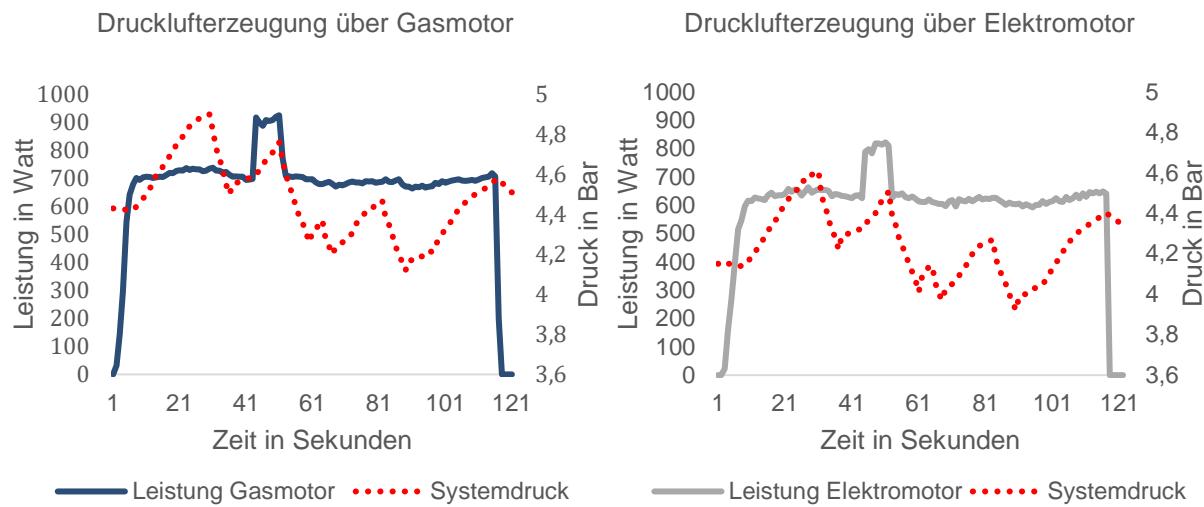


Abbildung 4: Messergebnisse der Drucklufterzeugung über den Gas- (links) und Elektromotor (rechts)

Neben der Drucklufterzeugung über Gas- und Elektromotor ist auch ein kombinierter Betrieb der Anlage möglich. Somit können unter anderem lokale Stromüberschüsse sinnvoll verwertet oder die Drucklufterzeugung aufrechterhalten werden – bei mangelndem Wärmebedarf. Die kombinierte Drucklufterzeugung ist in Abbildung 5 visualisiert. Die Leistungen der jeweiligen Motoren variieren dabei ergänzend, sodass mit Ausnahme der Lastspitze die zu erwartende Gesamtleistung von 650-750 Watt erreicht wird. Effizienzverluste aufgrund der reduzierten Auslastung der Motoren sind dabei nicht zu erkennen. Auch das Systemdruckprofil entspricht dem erwarteten Verlauf. Eine kombinierte Drucklufterzeugung über Gas- und Elektromotor ist daher ebenfalls effizient möglich.

Ein weiterer Vorteil des Anlagenkonzepts ist die Möglichkeit der Rekuperation vom Strom am Elektromotor, indem dieser als Generator genutzt wird. Dadurch wird unter anderem die Effizienz des Gasmotors verbessert, der bei abfallendem Druckluftbedarf weiterhin am optimalen Betriebspunkt betrieben werden kann. Zusätzlich kann durch die Betriebsweise Strom ins Netz eingespeist werden, wodurch im Fall einer Dunkelflaute finanzielle Gewinne erzielt werden können. Die Messdaten des Szenarios sind in Abbildung 6 dargestellt.

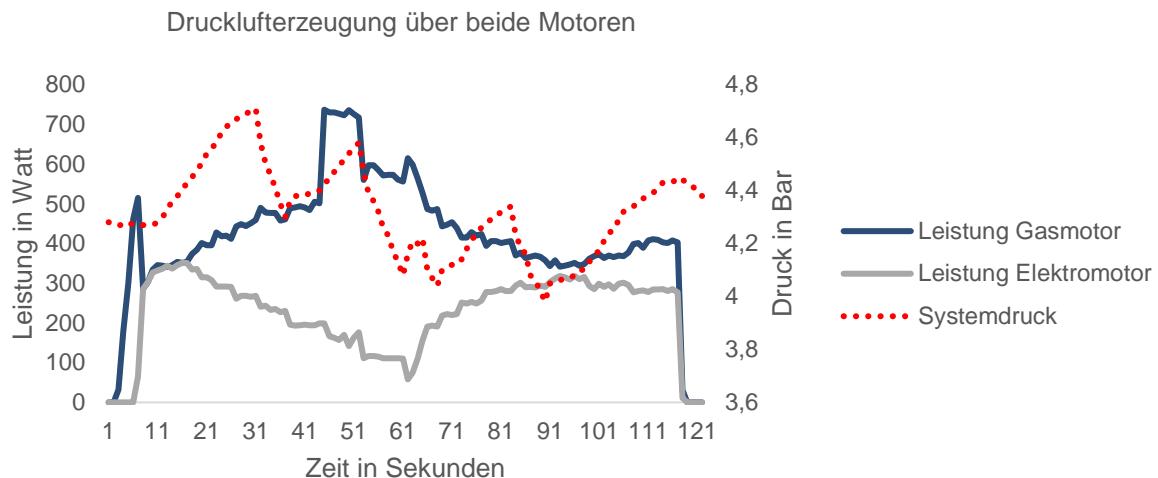


Abbildung 6: Messergebnisse der Drucklufterzeugung mit beiden Motoren

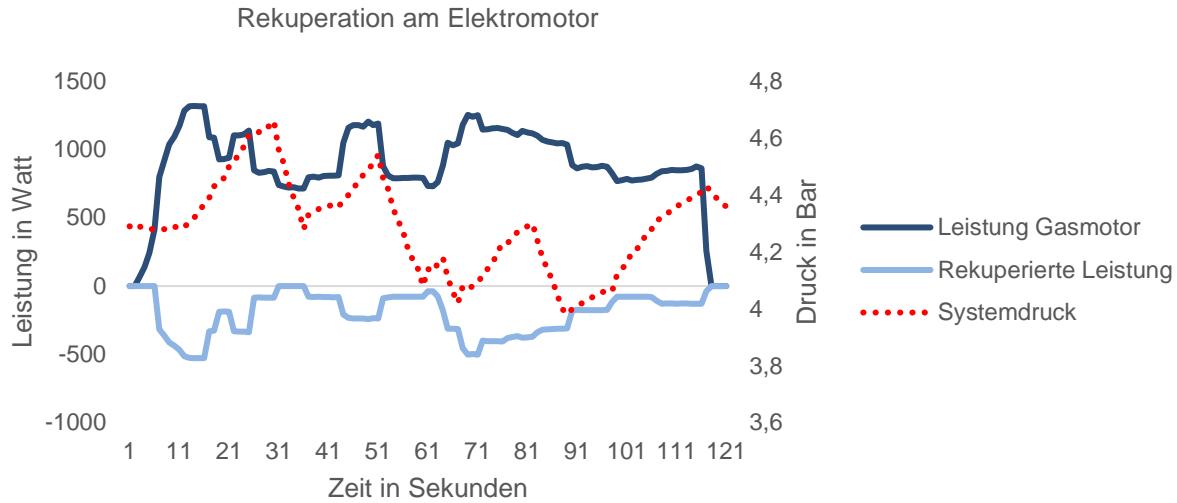


Abbildung 6: Messergebnisse der Drucklufterzeugung mit Rekuperation am Elektromotor

Auch hier ist der zu erwartende Verlauf des Systemdrucks zu erkennen. Eine Druckluftbereitstellung über diese Betriebsart ist daher ebenfalls möglich. Allerdings resultiert die Rekuperation in einer höheren Gesamtleistung der Anlage, da sich bei einer rekuperierten Leistung zwischen 300 und 500 Watt eine Leistung von 800 bis 900 Watt des Gesamtsystems einstellt. Im Vergleich zu den vorherigen Messungen zeigt sich daher ein Effizienzverlust in Abhängigkeit der rekuperierten Leistung am Elektromotor und muss bei der Wahl des Betriebs mit einbezogen werden. Bei gleichem Druckluftbedarf kommt es hier zu zusätzlicher Wärmeerzeugung aufgrund der Lastspitzen am Gasmotor, die im Produktionsbetrieb sinnvoll verwertet werden muss. Die Rekuperation von Strom bei sinkendem Druckluftbedarf ist jedoch hinsichtlich von Effizienzverlusten bei sinkender Gasmotorauslastung weiterhin sinnvoll.

5 Energieflexibilitätspotenzial

Wichtig für den ökonomischen Betrieb eines hybriden DHKWs sind eine lange Betriebslaufzeit innerhalb eines Jahres sowie die Nutzung der erzeugten Wärme. Idealerweise wird die Anlage in einem Unternehmen mit einem konstanten Wärme- und Druckluftbedarf eingesetzt. In den Branchen Ernährung, Tabak, chemische Industrie, Metallerzeugung und -verarbeitung, Glas und Keramik, Gummi- und Kunststoffe und Kraftwagen liegt ganzjährig ein erhöhter Bedarf an Prozesswärme vor, sodass eine lange Laufzeit der Anlage gewährleistet werden kann.

In der Tabelle 1 sind die installierten Druckluftkompressoren der jeweiligen Leistungsklassen und der Wärmebedarf für ausgewählte Wirtschaftszweige aufgelistet. Allein in Deutschland gibt es daher 31.000 Kompressoren mit einer relevanten Leistung von >50 kW [21] und erhöhtem Wärmebedarf, die durch ein hybrides DHKW substituiert werden können. Mit einer solchen hybriden DHKW-Anlage lassen sich dabei pro Jahr bis zu 213 tCO₂ pro Anlage einsparen. Aus ökonomischer und ökologischer Sicht ist jedoch nur die Grundlastanwendung sinnvoll, um die Verwertung der erzeugten Wärme sicherzustellen. Basierend darauf wird das Energieflexibilitätspotenzial auf 580 MW geschätzt. Diese Leistung könnte sinnvoll durch hybride DHKWs substituiert werden. Dadurch wird eine Energieflexibilität von 3,5 TWh/a durch die hybride Drucklufterzeugung ermöglicht, was 21 % des Druckluftstrombedarfs in Deutschland ausmacht.

Tabelle 1 Anzahl der installierten Kompressoren und Prozesswärmeverbrauch von ausgewählten Branchen in Deutschland

Branche	Anzahl Kompressoren [x1000]*			Temperaturniveau Prozesswärme [PJ/a]**	
	<15 kW	15-50 kW	>50 kW	<100°C	100-500°C
Ernährungsgewerbe, Tabakverarbeitung	27,5	2,6	3,1	34,1	41,8
Chemische Industrie	2,3	1,9	2,5	55,5	86,3
Metallerzeugung und -verarbeitung	14,3	4,1	2,8	3,3	10,4
Papierherstellung	3,4	0,3	0,4	10,8	39,8
Glasgewerbe, Keramik, Gewinnung und Verar- beitung von Steinen	29,8	8,7	6,2	4,6	7,1
Gummi- und Kunststoffe	16,8	6,6	4,5	3,6	13,6
Herstellung von Kraftwagen und -teilen	4,7	8,6	3,0	10,9	8,2
Maschinenbau	74,2	3,3	0,8	6,0	4,5

* [21], **[22]

6 Fazit und Ausblick

Die Messungen haben gezeigt, dass das Anlagenkonzept für die definierten Szenarien angewendet werden kann. Anhand der Szenarien konnten die Vorteile eines hybriden Betriebs hinsichtlich der Flexibilität der Anlage aufgezeigt und demonstriert werden. Zusätzlich konnten das Flexibilitätspotenzial des Konzepts in der deutschen Industrie dargelegt werden sowie die CO₂-Einsparungen einer solchen Anlage aufgezeigt werden.

Damit die wirtschaftlichen und ökologischen Vorteile des Anlagenkonzepts quantitativ dargestellt werden können, ist eine produktionsnahe Anwendung zur Demonstration notwendig. Im Rahmen eines Nachfolgeprojekts soll nun das Anlagenkonzept weiterentwickelt werden und eine produktionsnahe Demonstration im realen Maßstab erfolgen. Darüber hinaus sollen Konzepte entwickelt werden, um das Prinzip der hybriden Drucklufterzeugung auch in kleineren Aggregaten wirtschaftlich zu ermöglichen.

7 Literatur

- [1] T. Langrock, „Potentiale regelbarer Lasten in einem Energieversorgungssystem mit wachsendem Anteil Erneuerbarer Energien“, Aachen, Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit UBA-FB-002178, 2015. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/potentiale-regelbarer-lasten-in-einem>. Zugriff am: 11.01.22.
- [2] E. Köse und A. Sauer, „Reduction of energy costs and grid instability with energy flexible furnaces“, *Procedia CIRP*, Jg. 72, S. 832–838, 2018. [Online]. Verfügbar unter: <http://publica.fraunhofer.de/documents/N-497603.html>
- [3] E. Köse, A. Sauer, B. Thomas, T. Müller, S. Kölle und P. Schwanzer, „Stromoptimierte KWK in der Galvanikbranche*/Power-optimized combined heat and power in the electroplating industry - Responding to increasing energy flexibility by residual energy

- adapted combined heat and power plants“, *wt*, Jg. 108, 07-08, S. 561–566, 2018, doi: 10.37544/1436-4980-2018-07-08-79.
- [4] M. Dehli, „Energieeffiziente Drucklufttechnik“ in *Energieeffizienz in Industrie, Dienstleistung und Gewerbe: Energietechnische Optimierungskonzepte für Unternehmen*, M. Dehli, Hg., 1 Aufl., Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden; Imprint: Springer Vieweg, 2020, S. 387–432, doi: 10.1007/978-3-658-23204-7_12.
- [5] Umwelt Bundesamt, *Entwicklung des CO₂-Emissionsfaktors für den Strommix in Deutschland in den Jahren 1990 bis 2019*. [Online]. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/38897/umfrage/co2-emissionsfaktor-fuer-den-strommix-in-deutschland-seit-1990/>.
- [6] bdew, „Entwicklung des Wärmeverbrauchs in Deutschland“, 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bdew.de/service/publikationen/die-waermeverbrauchsanalyse-des-bdew/>. Zugriff am: 11.01.22.
- [7] M. Nitsche, *Nitsche-Planungs-Atlas*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2020, doi: 10.1007/978-3-662-58955-7.
- [8] Deutsche Energie-Agentur GmbH, *Druckluftsysteme - Mehr Energieeffizienz, weniger Kosten*. [Online]. Verfügbar unter: <https://docplayer.org/8942175-Druckluftsysteme-mehr-energieeffizienz-weniger-kosten.html> (Zugriff am: 14. Juli 2021).
- [9] dena, „Energieeffizienz in kleinen und mittleren Unternehmen. Energiekosten senken. Wettbewerbsvorteile sichern.“, 2013. [Online]. Verfügbar unter: https://ruoff-solar.de/wp-content/uploads/2018/12/handbuch_energieeffizienz_optimieren_unternehmen.pdf. Zugriff am: 11.01.22.
- [10] M. Graßl und G. Reinhart, „Evaluating Measures for Adapting the Energy Demand of a Production System to Volatile Energy Prices“, *Procedia CIRP*, Jg. 15, S. 129–134, 2014, doi: 10.1016/j.procir.2014.06.081.
- [11] A. Breitkopf, *Anzahl der Stunden mit negativen Strompreisen in Deutschland in den Jahren 2010 bis 2020*. [Online]. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/618751/umfrage/anzahl-der-stunden-mit-negativen-strompreisen-in-deutschland/> (Zugriff am: 11. Januar 2022).
- [12] Tennet, „Annual Market Update 2020“, Apr. 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.tennet.eu/company/publications/technical-publications/>. Zugriff am: 11.01.22.
- [13] A. Sauer, E. Abele und H. U. Buhl, „Energieflexibilität in der deutschen Industrie: Ergebnisse aus dem Kopernikus-Projekt - Synchronisierte und energieadaptive Produktionstechnik zur flexiblen Ausrichtung von Industrieprozessen auf eine fluktuierende Energieversorgung - SynErgie“, 2019.
- [14] econ solutions GmbH, *M3PRO 80 MID: Digitaler 3-Phasen Energiezähler Direktanschluss, 80 A-Anschluss*. Datenblatt. [Online]. Verfügbar unter: https://www.econ-solutions.de/wp-content/uploads/2017/01/PRO-Mnl_ECSM3-PRO80_3L_IIST256-01.pdf (Zugriff am: 15. September 2021).
- [15] CS Instruments GmbH, *Datenblatt VA 520 - Inline-Durchfluss-Sensor: Produktinformation*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.cs-instruments.com/fileadmin/cs-data/Datenblaetter/Datenbl%C3%A4tter%20-%20DE/Technisches_Datenblatt_VA520_DE.pdf (Zugriff am: 8. September 2020).
- [16] CS Instruments GmbH, *Datenblatt Drucksensoren CS: CS16 Produktionformation*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.cs-instruments.com/fileadmin/cs->

- data/Datenblaetter/Datenbl%C3%A4tter%20-%20DE/Technisches_Datenblatt_Drucksensoren_DE.pdf (Zugriff am: 8. September 2020).
- [17] SEW-EURODRIVE GmbH & Co KG, *MOVIDRIVE MDX60B/61B*. Betriebsanleitung. [Online]. Verfügbar unter: <https://download.sew-eurodrive.com/download/pdf/11483407.pdf> (Zugriff am: 14. September 2021).
- [18] WAGO Kontakttechnik GmbH & Co. KG, *WAGO I/O System 750: 750-8212(/xxx-xxx) PFC200; G2; 2ETH RS Controller PFC200; 2. Generation; 2 x ETHERNET, RS-232-/485*. Handbuch. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.wago.com/de/sps/controller-pfc200/p/750-8212#downloads> (Zugriff am: 14. September 2021).
- [19] WAGO Kontakttechnik GmbH & Co. KG, *e!COCKPIT: Software 2759-0101*. Handbuch. [Online]. Verfügbar unter: https://www.wago.com/de/software/e-cockpit/p/2759-101_1110-2002#downloads (Zugriff am: 14. September 2021).
- [20] WAGO Kontakttechnik GmbH & Co. KG, *Touch Panels Standard Line: 762-4xxx(/xxxx-xxxx) TP 600 WAGO Touch Panels 600*. Handbuch. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.wago.com/de/touch-panel/touch-panel-600/p/762-4104#downloads> (Zugriff am: 14. September 2021).
- [21] M. Blesl und A. Kessler, *Energieeffizienz in der Industrie*. Berlin, Heidelberg: Springer 2017, doi: 10.1007/978-3-662-55999-4.
- [22] S. Frisch, M. Pehnt, P. Otter und M. Nast, *Prozesswärme im Marktanreizprogramm: Zwischenbericht zu Perspektivische Weiterentwicklung des Marktanreizprogramms FKZ 03MAP123*. [Online]. Verfügbar unter: <https://elib.dlr.de/82173/>.