

Effiziente Druckluftnutzung in der automatisierten Produktion

Kennzahlbasierte Potenzialanalyse im Karosseriebau

Cornelia Gockner¹, Bernd Rosemann¹, Barbara Hansen², Cornelia Kukla²

¹ Lehrstuhl Umweltgerechte Produktionstechnik, Universität Bayreuth, 95447 Bayreuth

² BMW Group Werk München, 80788 München

Die Nutzung von Druckluft in der Automatisierungstechnik bietet eine Reihe von Vorteilen. Druckluft ist vielseitig nutzbar, sauber und speicherbar. Außerdem bewegt sie große Lasten und hilft präzise zu positionieren. Dennoch gibt es einen Nachteil: Die Druckluftherzeugung ist energie- und infolge kostenintensiv. Lediglich circa sieben Prozent der eingesetzten elektrischen Energie sind als mechanische Expansionsarbeit nutzbar.

Anwender sind daher gut beraten Druckluftverluste zu vermeiden und sich auf die Suche nach autonomen und prozesssicheren Überwachungslösungen machen. Der Beitrag beschreibt die Entwicklung und Anwendung einer kennzahlbasierten Analyse zur Erfassung, Auswertung und Überwachung von Druckluftverlusten am Beispiel automatisierter Produktionsprozesse im Karosseriebau.

The use of compressed air in automation technology offers a number of advantages. Compressed air is versatile, clean and storable. It also moves large weights and helps with precise positioning. Nevertheless, there is a disadvantage: The generation of compressed air is energy-intensive and therefore cost-intensive. Only about five percent of the electrical energy used can be used as mechanical expansion work.

Therefore users are well advised to avoid compressed air losses and to look for autonomous and process-safe monitoring solutions. This article describes the development and application of a key figure based analysis for recording, evaluating and monitoring compressed air losses using the example of automated production processes in car body manufacturing.

Schlüsselwörter: Druckluft, Einsparung, Nachhaltigkeit, Energieeffizienz, Karosseriebau, Kennzahl

Ausgangssituation und Zielsetzung

Im BMW Group Werk München werden täglich circa 900 Fahrzeuge unterschiedlicher Karosserievarianten gefertigt. Die Karosserie entsteht durch das Fügen zugelieferter und eigenproduzierter Blechteile. Verwendung finden verschiedene Fügetechniken, wie z.B. Kleben, Schrauben oder Widerstandspunktschweißen. In diesen Fertigungsschritten finden pneumatische Systeme wegen deren Vielseitigkeit breite Anwendung. Beispiele sind: Schweißzangen oder Sauggreifer bzw. Vakuumheber für das Fügen, Handhaben und Fördern der Karosserieteile von Arbeitsstation zu Arbeitsstation. Weiterhin gelangt Druckluft bei der Reinigung von Werkzeugen oder Schweißköpfen zum Einsatz. Der resultierende Gesamtdruckluftbedarf lag im BMW Group Werk München im Jahr 2021 bei circa 19,2 Millionen Nm³. Der angegebene Druckluftverbrauch beinhaltet gleichermaßen die Verbräuche im Werkzeug- und Anlagenbau.

Bei aller Flexibilität der Druckluftanwendung sind deren Erzeugung und Bereitstellung energie- und kostenintensiv. Dies liegt begründet im geringen Wirkungsgrad des Druckluftaufbereitungsprozesses, denn lediglich rund 7 % der eingesetzten elektrischen Energie stehen am Wirkort als mechanische Expansionsarbeit zur Verfügung [1]. Hierbei bildet die Vermeidung bzw. Erkennung von Leckagen in Druckluftleitungen und Anlagen den wesentlichen Ansatz zur effizienten Druckluftnutzung im automatisierten Produktionsbetrieb, was in Abbildung 1 deutlich wird.

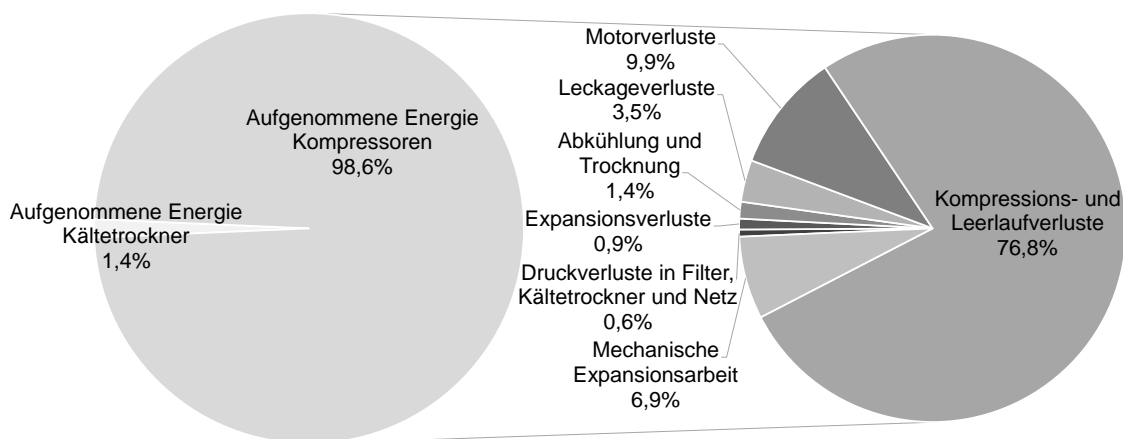


Abbildung 1: Nutzenenergie und Verluste einer beispielhaften Druckluftanlage, i.A. an [1].

Das Ziel ökologische, ökonomische und soziale Nachhaltigkeit ist für Unternehmen heute gesellschaftlicher Auftrag und zunehmend auch bedeutsamer Wettbewerbsfaktor, der den Markenwert von Unternehmen steigert. Die Verringerung der Druckluftverschwendung durch

die effiziente Druckluftnutzung in der automatisierten Produktion leistet über die Senkung des durch die Druckluftaufbereitung bedingten Primärenergieverbrauchs einen Beitrag zur nachhaltigen Produktion, der sich die BMW Group mit dem Ziel der vollständigen Klimaneutralität über die gesamte Wertschöpfungskette verschrieben hat [2].

Für eine effiziente Druckluftnutzung muss in strikter Konsequenz die Transparenz zu den Druckluftverbräuchen in der Produktion geschaffen werden. Bis dato werden die Druckluftverbräuche von Produktionsanlagen oft aufgezeichnet, die Aufzeichnungen werden jedoch meist keiner mitlaufenden Detailanalyse unterzogen.

Ziel der Potenzialanalyse war daher die Entwicklung einer kennzahlbasierten Methode zur Bestimmung von Druckluftleckagen im Karosseriebau. Mit der Methode sollen Abweichungen des realen Druckluftverbrauchs vom optimalen Verbrauchsminimum erkannt werden. Dafür ist der Soll-Druckluftverbrauch als Referenzgröße zu bestimmen um über Unterschiede zum Ist-Druckluftverbrauch Anomalien durch Mehrverbräuche und Leckagen festzustellen.

Die konsequente Behebung dieser Mehrverbräuche dient direkt der Drucklufteinsparung und damit der Senkung des Energieverbrauchs mit Beitrag zur nachhaltigeren Produktion. Die Vorgehensweise soll allgemein anwendbar und übertragbar sein, um an den Standorten der BMW Group Werke zu Effizienzsteigerung beitragen zu können.

Kennzahlbasiertes Analyseverfahren

Zur Bildung eines Kennzahlensystems zur Analyse von Drucklufteinsparpotentialen wurden zunächst die Druckluftverbrauchsdaten untersucht um erste Auffälligkeiten zu erkennen. Danach wurden entsprechende Fertigungsanlagen ausgewählt, um schrittweise Einflussfaktoren auf den Druckluftverbrauch zu identifizieren. Mit den hieraus gewonnen Erkenntnissen wurde das Kennzahlensystem gebildet, welches auf dem Analysebeispiel „Schweißzangen“ basiert.

Eine erste Analyse der aufgezeichneten Druckluftverbräuche ergab, dass auch an produktionsfreien Tagen, bei Anlagenstillstand, teils bedeutsame Druckluftverbräuche auftreten. Im nächsten Schritt wurde das Druckluftsystem im Karosseriebau bei Anlagenstillstand mithilfe eines Ultraschallmessgerätes auf Auffälligkeiten überprüft. Es wurde erwartet, dass es vor allem an den Rohren und Schläuchen, welche zur Druckluftverteilung dienen, zu hohen Druckluftverlusten bei Anlagenstillstand kommt. Entgegen dieser Vermutung zeigte sich, dass hauptsächlich die Druckluftverbraucher hohe Verbräuche aufwiesen. Auffällig waren vor allem Schweißzangen, die mit Druckluft von 12 bar betrieben werden. Im BMW Group Werk München werden C-Typ- und X-Typ-Schweißzangen unterschiedlicher Größe mit pneumatischem Antrieb eingesetzt. Abbildung 2 zeigt eine C-Typ-Schweißzange. Im Standard

sollte die Druckluftzufuhr an produktionsfreien Tagen an dem jeweiligen Einspeisepunkt automatisiert abgeschaltet werden, in erster Linie kann also von einer fehlerhaften Abschaltung gesprochen werden.

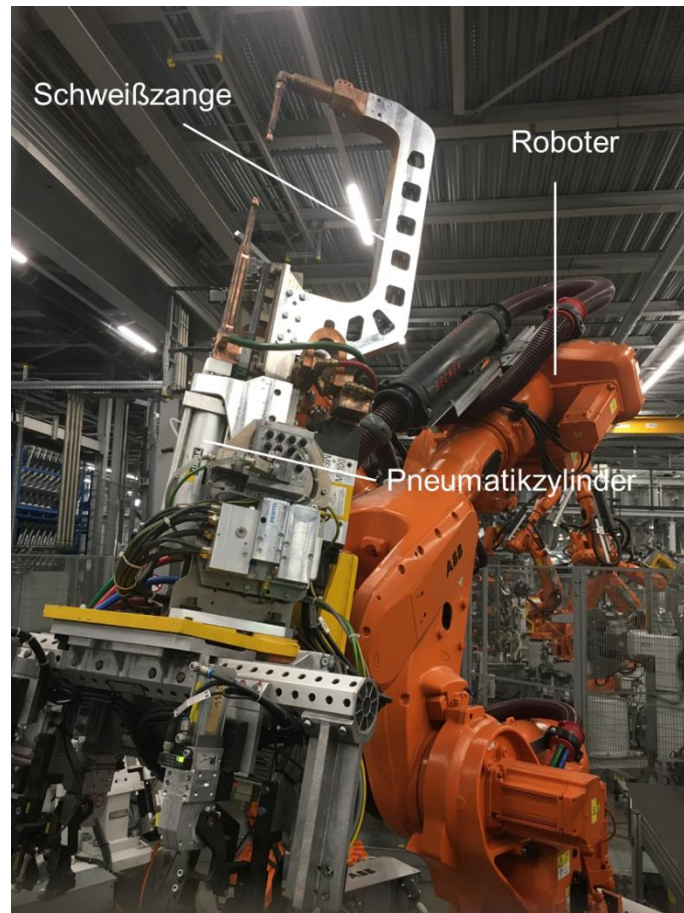


Abbildung 2: Druckluftbetriebene C-Typ-Schweißzange im Karosseriebau zur Fertigung der Karosserie.

Die Erarbeitung der Kennzahl erfolgte exemplarisch für das 12 bar Druckluftnetz, welche zunächst an zwei ausgewählte Produktionsanlagen erprobt wurde. Hierfür wurden die Anlage für die Produktion des Seitenrahmens Mitte links und die Anlage für die Produktion des Seitenrahmens Mitte rechts ausgewählt. Beide Anlagen sind im Aufbau nahezu identisch und bestehen jeweils aus drei Arbeitsstationen, die jeweils von einer Speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) gesteuert werden. Beide Anlagen produzieren eine annähernd identische Stückzahl an Seitenrahmen bei gleicher Anzahl an Druckluftverbrauchern, wodurch die Anlagen gut vergleichbar sind.

Zur Erarbeitung des Kennzahlensystems wurden die von den SPS aufgezeichneten Daten (Druckluftverbrauch, Stückzahl, etc.) der ausgewählten Produktionsanlagen analysiert und abgeglichen, um Einflussfaktoren auf den Druckluftverbrauch zu bestimmen. Die Kennzahl

wurde speziell aus den Daten der Speicherprogrammierbaren Steuerung der ersten Station (SPS 1) der Produktionsanlage Seitenrahmen Mitte links gebildet, unter der Annahme, dass in dieser Station keine Leckagen vorhanden sind.

Abbildung 3 zeigt entsprechend einen 14-tägigen Verlauf des Druckluftverbrauchs, sowie der produzierten Stückzahl der Anlage Seitenrahmen Mitte links. Dargestellt in Abbildung 4 kann hierbei eine direkte Proportionalität zwischen der produzierten Stückzahl an Produktionsteilen und dem Druckluftverbrauch interpretiert werden. Die produzierte Stückzahl ist somit wesentlicher Einflussfaktor. An den ausgewählten Produktionsanlagen werden Seitenrahmen fünf unterschiedlicher Karosserievarianten (Derivate) gefertigt, deren Stückzahl je Produktionstag variiert. Ebenfalls variiert die Anzahl an Schweißpunkten einzelner Derivate. Infolge werden jeden Produktionstag eine unterschiedliche Anzahl von Schweißpunkten in einer Station einer Anlage gesetzt. Weiterer wichtiger Einflussfaktor ist daher die jeweilige Stückzahl produzierter Karosserievarianten. Für das Setzen der Schweißpunkte werden X-Typ- und C-Typ-Schweißzangen eingesetzt. Die Pneumatikzylinder, welche die Schweißzangen antreiben sind je nach Schweißzangentyp von unterschiedlicher Größe, was ebenfalls einen Einfluss auf den Druckluftverbrauch nimmt.

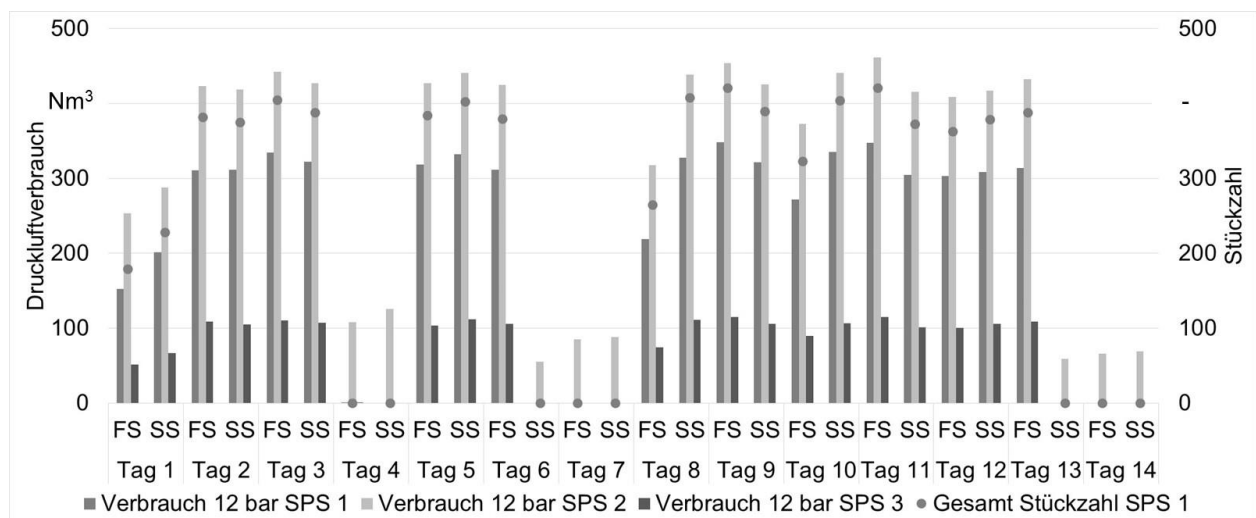


Abbildung 3: Verlauf des Druckluftverbrauchs und der Stückzahl der Anlage Seitenrahmen Mitte links der Frühschicht (FS) und Spätschicht (SS).

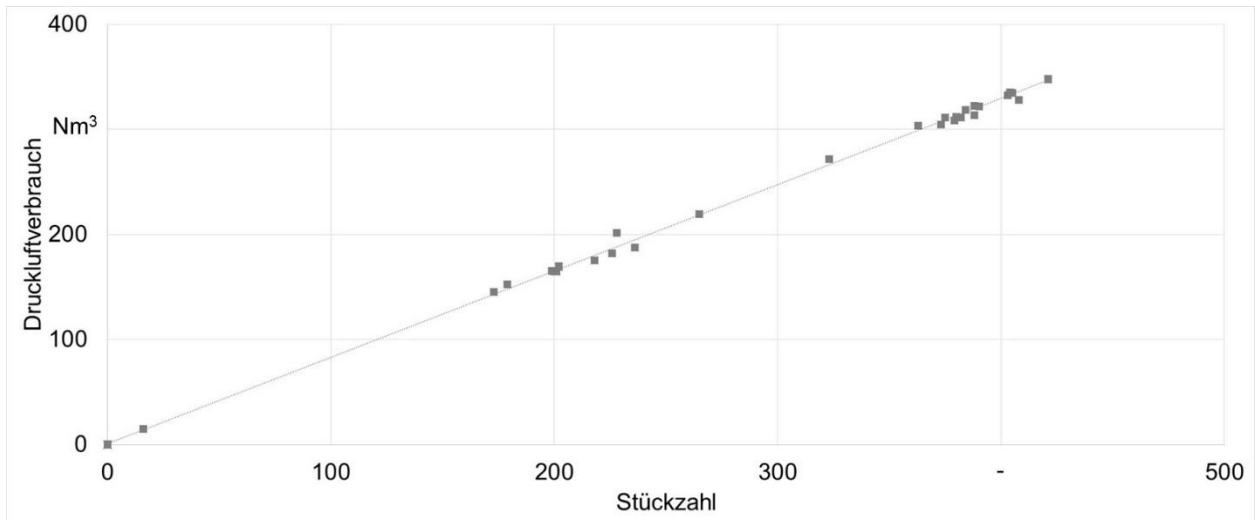


Abbildung 4: Direkte Proportionalität des Druckluftverbrauchs und der produzierten Stückzahl der SPS 1 der Anlage Seitenrahmen Mitte links.

Aus den erlangten Kenntnissen zu den Einflussfaktoren und den vorhandenen Messdaten wurde schrittweise das Kennzahlensystem erarbeitet, das aus zwei Kennzahlen W_X und W_C gebildet wird. Diese geben den Druckluftverbrauch des jeweiligen Schweißzangentyps je gesetztem Schweißpunkt an. Mit den beiden Kennzahlen und folgender Formel kann der Soll-Druckluftverbrauch der Produktionsanlagen Seitenrahmen Mitte links und Seitenrahmen Mitte rechts berechnet werden.

$$V_{\text{ges, Soll}} = \sum_{i=1}^5 (W_X \cdot P_{iX} + W_C \cdot P_{iC}) \cdot A_i = W_X \sum_{i=1}^5 P_{iX} \cdot A_i + W_C \sum_{i=1}^5 P_{iC} \cdot A_i$$

$$= W_X \cdot P_{\text{gesX}} + W_C \cdot P_{\text{gesC}}$$

| | | |
|-----|-------------------------|--|
| mit | $V_{\text{ges Soll}}$: | Soll-Druckluftverbrauch |
| | W_X : | Druckluftbedarf je Schweißpunkt der X-Typ Schweißzange |
| | W_C : | Druckluftbedarf je Schweißpunkt der C-Typ Schweißzange |
| | P_{iX} : | Anzahl Schweißpunkte der X-Typ Schweißzange je Derivat |
| | P_{iC} : | Anzahl Schweißpunkte der C-Typ Schweißzange je Derivat |
| | A_i : | Produzierte Anzahl eines Derivates |
| | i : | Derivate |

Das Hubvolumen V_H eines Pneumatikzylinders berechnet mit folgender Formel [3].

$$V_H = \frac{d^2 \pi}{4} \cdot s$$

| | | |
|-----|---------|------------------------------|
| mit | V_H : | Hubvolumen Pneumatikzylinder |
| | d : | Kolbendurchmesser |
| | s : | Kolbenhub |

Mit der Annahme, dass der Druckluftverbrauch des jeweiligen Schweißzangentyps pro Schweißpunkt direkt proportional zum Hubvolumen ist, berechnet sich für die in den Anlagen Seitenrahmen Mitte links und Seitenrahmen Mitte rechts eingesetzten Schweißzangen mit den Werten $d_C = 100 \text{ mm}$ und $s_C = 184 \text{ mm}$ der C-Typ-Schweißzangen und $d_X = 125 \text{ mm}$ und $s_X = 150 \text{ mm}$ der X-Typ Schweißzangen:

$$\frac{W_C}{W_X} = \frac{\frac{d_C^2 \cdot \pi}{4} \cdot s_C}{\frac{d_X^2 \cdot \pi}{4} \cdot s_X} = \frac{d_C^2 \cdot s_C}{d_X^2 \cdot s_X} \approx 0,7851$$

Mit den von den SPS aufgezeichneten Messwerten berechnen sich in Abhängigkeit des Schweißzangentyps für die Druckluftbedarfe W_X und W_C Werte von circa $0,0247 \text{ Nm}^3$ bzw. $0,0194 \text{ Nm}^3$. Für die erste Station der Anlage Seitenrahmen Mitte links kann somit für jede Arbeits-Schicht ein Soll-Druckluftverbrauch bestimmt werden. Aufgrund des identischen Aufbaus der Anlage Seitenrahmen Mitte rechts können die Kennzahlen hier ebenso für die erste Station angewendet werden.

Zur Weiterentwicklung und Übertragung des Kennzahlensystems müssen im Weiteren in den Formeln einige Randbedingungen berücksichtigt werden, wobei das Grundkonzept der Kennzahlen auf jede Produktionsanlage mit deren SPS angewendet werden kann. Dabei sind die Berechnungsvorschriften für die Verbrauchskennzahlen von Anlage zu Anlage leicht differierend um individuelle Spezifika von Anlagen und der darauf gefertigten Bauteile zu berücksichtigen. So unterscheidet sich die Größe der Pneumatikzylinder der Schweißzangen von Produktionsanlage zu Produktionsanlage, ebenso wie die Anzahl der in den Anlagen genutzten Schweißzangen. Weiterhin ist bauteilabhängig die Anzahl der in jeder Anlage zu setzenden Schweißpunkte verschieden. So werden auf einigen Produktionsanlagen nicht nur fünf, sondern eine größere Anzahl zu produzierende Derivate unterschieden. Weitere produktionsanlagenspezifische Differenzierungen betreffen beispielsweise Einflüsse durch die Produktion zusätzlicher Derivate aufgrund der Herstellung batterieelektrischer Fahrzeuge, Plug-in-Hybrid- und Verbrenner-Fahrzeuge oder Behördenfahrzeuge. Diese Einflüsse auf den Druckluftverbrauch müssen in der Anpassung der Berechnungsvorschriften entsprechend berücksichtigt werden, um den Soll-Druckluftverbrauch jeder Anlage gezielt zu bestimmen.

Potential im Use-Case Karosseriebau

Für den Use-Case Karosseriebau im BMW Group Werk München als auch darüber hinaus birgt die entwickelte Vorgehensweise zur kennzahlbasierten Analyse von Druckluftverbräuchen im Karosseriebau zwei wesentliche Vorteile. Diese sind

1. die Übertragbarkeit auf alle pneumatisch betriebenen Fertigungsanlagen mit Verbrauchserfassung sowie
2. die anlagenindividuelle Identifikation von Druckluftmehrerbräuchen.

Die Anwendbarkeit des an einer Punktschweißstation entwickelten Kennzahlensystems im Karosseriebau wurde im Folgenden auf andere Fertigungsstationen und -anlagen geprüft. Durch die Übertragbarkeit, kann mit den gewonnenen Kennzahlen ein Soll-Druckluftverbrauch für jeden Anlagentyp in der Produktion mit einem anlagenseitig erfassten Verbrauch verglichen werden.

Abweichungen des Ist-Druckluftverbrauchs vom Soll-Druckluftverbrauch machen Druckluftmehrerbräuche und -Leckagen unmittelbar erkenn- und abstellbar. Gleichzeitig kann eine fehlerhafte Abschaltung der Druckluftzufuhr zu den Produktionsanlagen an produktionsfreien Tagen sofort festgestellt werden.

Bei Anwendung des erarbeiteten Kennzahlensystem der SPS 1 der Anlage Seitenrahmen Mitte links auf die SPS 1 der Anlage Seitenrahmen Mitte rechts, können pro Arbeitsschicht durchschnittlich circa 110 Nm³ Mehrerbräuche an Druckluft an lediglich einer Station eingespart werden. Bei rund 260 Produktionstagen im Jahr entspricht dies im 3-Schicht-Betrieb rund 85.800 Nm³ Druckluft.

Zusammenfassung

Die Nutzung von Druckluft in der Automatisierungstechnik bietet eine Reihe von Vorteilen. Druckluft ist vielseitig nutzbar, sauber und speicherbar. Andererseits ist die Druckluftnutzung energieintensiv mit Auswirkung direkt auf Betriebskosten und auf resultierende CO₂-Emissionen. Die Erkennung von Mehrerbräuchen an Druckluft in der Produktion und deren Minimierung auf ein prozessbedingtes Mindestmaß ist daher erstrebenswert für eine nachhaltige und letztlich klimaneutrale Produktion.

Das Ziel der Potenzialanalyse war die Erarbeitung einer methodischen Vorgehensweise, die kennzahlbasiert die automatisierte Identifikation von Druckluftleckagen und Druckluftmehrerbräuchen in der Produktion im Vergleich zu einem jeweils Anlage bedingt möglichen Verbrauchsminimum erlaubt.

Zur Ableitung der kennzahlbasierten Analysemethoden von Drucklufteinsparpotentialen wurden in der Produktionslinie im Karosseriebau des BMW Group Werkes München Druckluft verbrauchende Fertigungsanlagen ausgewählt um schrittweise produkt- sowie verfahrensbedingte Einflussfaktoren auf den Druckluftverbrauch zu identifizieren und für das angestrebte Kennzahlensystem aufzubereiten. Die Detaildatenanalyse erfolgte exemplarisch an automatisierten, SPS-gesteuerten Produktionsanlagen, die mit Hilfe von Universalrobotern

pneumatisch betriebene Aktoren in Form von Hubzylindern an zwei verschiedenen Punktschweißzangenarten zum Einsatz bringen. Zum Abgleich der in den Anlagen aufgezeichneten Druckluft-Ist-Verbräuche mit einem den geringstmöglichen Soll-Druckluftverbrauch ausdrückenden Referenzwert wurde exemplarisch für auf pneumatischen Hubzylindern basierenden Druckluftverbrauchern die Berechnungsvorschrift bestimmt.

Im Ergebnis liegt ein für den untersuchten Punktschweißprozess validierte Vorgehensweise für die kennzahlbasierte Potenzialanalyse in der Druckluftnutzung vor. Sie erschließt eine aussagekräftige Gegenüberstellung von Ist- und Soll-Druckluftbräuchen auf Basis erarbeiteter Kennzahlen. Die automatische Erfassung von Druckluftverbräuchen schafft damit Transparenz für ein stetiges Monitoring von Verbräuchen im Allgemeinen einerseits und andererseits im Speziellen die unmittelbare Sichtbarkeit unnötiger Mehrverbräuche als Basis zügiger Abstellmaßnahmen.

Mit der aufgezeigten Vorgehensweise konnte eine kennzahlbasierte Systematik zur automatisierten Identifikation von Druckluftmehrerbräuchen erarbeitet und validiert werden. Die Methodik stellt Soll-Druckluftmindestverbräuche mit aufgezeichneten Ist-Druckluftverbräuchen von Produktionsanlagen in Beziehung. Mehrverbräuche werden damit unmittelbar erkennbar, letztlich in Echtzeit. Die entwickelte kennzahlbasierte Systematik zum Erlangen einer effizienten Druckluftnutzung in der Produktion kann analog der validierten Anwendung des Punktschweißprozesses im Karosseriebau auf alle druckluftbasierten Fertigungsprozesse und Produktionsanlagen übertragen werden und somit in der Breite wirksam Anwendung finden.

Autorenbiografien

Cornelia Gockner

ist Studentin der Engineering Science an der Universität Bayreuth. Während ihres Studiums absolvierte sie ein Praktikum im Karosseriebau des Werkes München der BMW Group, in dem sich das Projekt zur Kennzahlbasierten Potenzialanalyse im Karosseriebau begründete.

Bernd Rosemann

ist Akademischer Direktor am Lehrstuhl Umweltgerechte Produktionstechnik der Universität Bayreuth. Nach Ausbildung zum Werkzeugmacher, Studien der Fertigungstechnik und des Maschinenbaus an der GSO Nürnberg sowie an der FAU Erlangen-Nürnberg und Tätigkeiten in der gewerblichen Wirtschaft promovierte er im Themenfeld der Umweltgerechten Produktentwicklung, bevor er vor mehr als zwanzig Jahren dem Ruf der Universität Bayreuth folgte. Seither ist er in den Themenfeldern, Refabrikation, Produkt- und Prozessinnovation sowie Nachhaltigkeit tätig.

Barbara Hansen

ist Qualitätsspezialistin im Bereich Produktion Karosseriebau der BMW Group im Werk München. Im Anschluss an das Maschinenbaustudium mit dem Schwerpunkt Produktionstechnik an der FAU Erlangen-Nürnberg war sie als Doktorandin im Presswerk des Werks Regensburg der BMW Group im Rahmen des Digitalisierungsprojektes „Presswerk 4.0“ tätig.

Cornelia Kukla

ist Leiterin der Produktion des Hinterbau ICE sowie der Bodengruppe der BMW Group im Werk München. Nach Ausbildung zur Werkzeugmechanikerin folgte, neben der Berufstätigkeit, die Ausbildung Technikerin Maschinenbau. Im Anschluss wurde der Berufsweg weiterhin im Werkzeugbau fortgesetzt, über die Fertigungstechnik, Projektleitung bis hin zur Leitung des Werkzeugbaus der ehemaligen Claas Fertigungstechnik GmbH. Es folgte die Leitung der Planung des Werkzeugbaus der BMW Group im Werk Eisenach, bis zum Wechsel in das Werk München der BMW Group.

Literatur

[1] Blesl, M.; Kessler, A.; Energieeffizienz in der Industrie. 2. Aufl., Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2017, S.150-151

[2] BMW: NACHHALTIGKEIT. 2021, In: <https://www.bmwgroup.com/de/nachhaltigkeit.html>, zuletzt aufgerufen am: 06.06.2022.

[3] Watter, H.; Hydraulik und Pneumatik: Grundlagen und Übungen - Anwendungen und Simulation. 5., überarbeitete und erweiterte Auflage. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2017, S.105

Dies ist ein akzeptiertes Manuskript eines bei De Gruyter in der Zeitschrift Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, vol. 117, no. 9, 2022, pp. 528-531 veröffentlichten Artikels, verfügbar unter <https://doi.org/10.1515/zwf-2022-1121>.

Es unterliegt den Nutzungsbedingungen der Lizenz Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>), die die nicht kommerzielle Wiederverwendung, Verbreitung und Vervielfältigung über ein beliebiges Medium erlaubt, sofern das Originalwerk ordnungsgemäß zitiert und in keiner Weise verändert, umgewandelt oder ergänzt wird. Wenn Sie dieses Manuskript für kommerzielle Zwecke verwenden möchten, wenden Sie sich bitte an rights@degruyter.com.

