

Aerodynamische Zuführtechnik

Fortschritte und Perspektiven

Torge Kolditz* und
Annika Raatz

Einleitung

Die Zuführtechnik nimmt bei der Automatisierung von Montageprozessen eine Schlüsselrolle ein. Abhängig von der Produktkomplexität ist die Zuführtechnik für 20 bis 50 Prozent der Anschaffungskosten für eine automatisierte Montagezelle verantwortlich [1]. Die zunehmende Flexibilisierung von automatisierten Montagesystemen infolge verkürzter Produktlebenszyklen, engerer Profitmargen und dem Wunsch nach einer erhöhten Ressourcenschonung stellt hohe Anforderungen an die Zuführtechnik [2, 3]. Diesen Anforderungen im Hinblick auf die Variantenflexibilität, Zuverlässigkeit und Wiederverwendbarkeit können konventionelle, aktuell weit verbreitete Systeme, wie z.B. Vibrationswendelförderer, nicht gerecht werden [2, 4, 5]. Um diesen Herausforderungen zu begegnen, wurde daher eine

* Korrespondenzautor

Torge Kolditz, M.Sc.
Institut für Montagetechnik
Produktionstechnisches Zentrum
Hannover
An der Universität 2, 30823 Garbsen
Tel.: +49 (0) 511 762-18291
E-Mail: kolditz@match.uni-hannover.de

Hinweis

Bei diesem Beitrag handelt es sich um einen von den Mitgliedern des ZWF-Advisory Board wissenschaftlich begutachteten Fachaufsatz (Peer-Review).

Um bestehenden Defiziten konventioneller Zuführtechnik hinsichtlich Zuführleistung, Zuverlässigkeit und Variantenflexibilität entgegenzuwirken, wurde eine aerodynamische Zuführanlage entwickelt. Die Anpassung dieser Zuführanlage an unterschiedliche Werkstücke erfolgt autonom über die Konfiguration von fünf Anlagenparametern. In diesem Beitrag werden aktuelle Fortschritte zur Steigerung der Variantenflexibilität, Verkürzung der Rüstzeit sowie Erhöhung der Ausbringung im Batchbetrieb präsentiert und Perspektiven für zukünftige Entwicklungen aufgezeigt.

aerodynamische Zuführanlage entwickelt [6, 7]. Durch die Nutzung eines gerichteten Luftstrahls anstelle mechanischer Schikanen weist die aerodynamische Zuführtechnik eine hohe Variantenflexibilität bei gleichzeitig hoher Zuführleistung und Zuverlässigkeit auf. Im Folgenden werden zunächst die Grundlagen der aerodynamischen Zuführtechnik erläutert, bevor aktuelle Fortschritte präsentiert und Perspektiven für zukünftige Entwicklungen aufgezeigt werden.

Aerodynamische Zuführtechnik

Die Aerodynamische Zuführanlage setzt sich aus mehreren Modulen zusammen. Ein Zentrifugalförderer vereinzelt zunächst die Werkstücke und übergibt diese einem Kleinförderband. Dieses Förderband beschleunigt die Werkstücke auf eine definierte Geschwindigkeit v bevor diese dem eigentlichen aerodynamischen Orientierungsmodul übergeben werden. Das Orientierungsmodul, welches in

Bild 1 schematisch dargestellt ist, ist um die einstellbaren Winkel α und β geneigt. Die Werkstücke gleiten dadurch entlang der Führungsebene über die Luftdüse, aus der ein kontinuierlicher Luftstrahl mit dem Druck p austritt. Um das Werkstückspektrum zu erhöhen, kann zusätzlich die Position der Düse z , orthogonal zur Bewegungsrichtung der Werkstücke, elektronisch verstellt werden [8]. Bei einer günstigen Kombination der fünf Anlagenparameter α , β , p , v und z werden Werkstücke, die die Düse in falscher Orientierung erreichen, umorientiert, während Werkstücke, die bereits die richtige Orientierung haben, die Düse ohne Orientierungsänderung passieren (vgl. Bild 1). Damit dieser Effekt eintreten kann, müssen die Werkstücke einen entlang der Längsachse verschobenen Schwerpunkt oder eine variierende projizierte Anströmfläche aufweisen. Dadurch erzeugt der beim Überschreiten der Luftdüse eingebrachte Impuls ein Drehmoment um den Werkstückschwerpunkt.

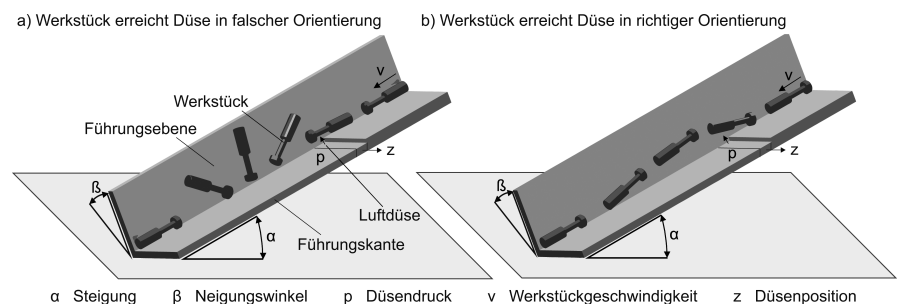
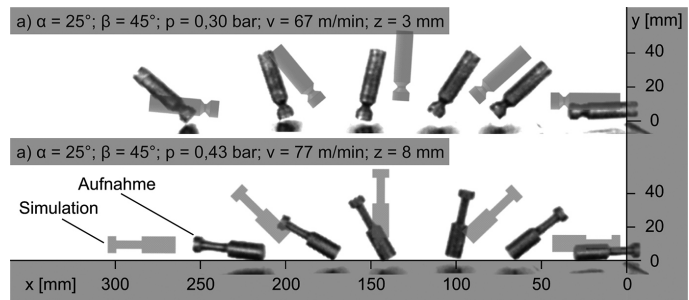


Bild 1. Funktionsprinzip der aerodynamischen Zuführanlage (nach [6])

Das beschriebene Funktionsprinzip (vgl. Bild 1) konnte bereits für zahlreiche Beispielwerkstücke erfolgreich validiert werden. Allerdings müssen dazu für jedes Werkstück individuelle Konfigurationen der fünf Anlagenparameter identifiziert werden. Da eine manuelle Konfiguration der Anlagenparameter sehr zeitaufwändig ist, wurde die aerodynamische Zuführanlage mithilfe eines genetischen Algorithmus dazu befähigt, sich selbstständig auf neue Werkstücke einzustellen [9, 10]. Der Algorithmus erzeugt eine Startpopulation aus vier Individuen, welche zufällige Kombinationen der Anlagenparameter als Chromosomen tragen. Die Parameterkombinationen werden nacheinander auf der Zuführanlage untersucht und das Ergebnis mithilfe einer Zeilenkamera bewertet. Als Kriterium für die Qualität der getesteten Lösungen wird dabei die Orientierungsrate, also der Anteil der richtig orientierten Werkstücke an der Gesamtzahl der Werkstücke, herangezogen. Von den vier getesteten Individuen werden auf Basis der ermittelten Fitness (Orientierungsrate) zwei Individuen ausgewählt (Selektion), vermischt (Rekombination) und zufallsbasiert verändert (Mutation). Diese Individuen bilden dann die nächste Generation von möglichen Parameterkombination, die auf der Anlage eingestellt und bewertet werden. Der beschriebene Prozess wird so lange iteriert, bis eine Lösung mit einer Orientierungsrate von mindestens 95 Prozent gefunden wird.

Im anschließenden Überwachungsbetrieb wird die Orientierungsrate kontinuierlich kontrolliert. Wenn die Orientierungsrate, beispielsweise durch geänderte Umgebungsbedingungen (Luftdruck, Verschmutzung) unter einen vordefinierten Wert sinkt, wird ein Korrekturalgorithmus ausgelöst, welcher analog zum initialen genetischen Algorithmus arbeitet [6]. Der Korrekturalgorithmus nutzt jedoch, statt einer zufälligen Startpopulation, die besten bereits vom initialen genetischen Algorithmus identifizierten Parameterkombinationen als Startwerte. Dadurch lässt sich die Zeit zur Lösungsfindung (Orientierungsrate von mindestens 95 %) im Vergleich zur Ersteinstellung deutlich verringern.

Bild 2. Vergleich der simulierten und realen Trajektorien von zwei Beispielwerkstücken mit unterschiedlicher Geometrie



Modellbasierte Optimierung

Die Einstellung der Anlage auf neue Werkstücke mithilfe des genetischen Algorithmus erfolgt zwar autonom, die Einstellzeit unterliegt jedoch prinzipbedingt hohen Schwankungen. Um die Einstellzeit zu reduzieren, die Vorhersagbarkeit zu erhöhen und somit häufige und planbare Produktwechsel, beispielsweise in der Batchproduktion, zu ermöglichen, wurde ein Simulationsmodell entwickelt, welches die Vorhersage geeigneter Parameterkombinationen in Abhängigkeit der Werkstückeigenschaften ermöglicht. Weiterhin werden zur Optimierung der Zuführleistung im Überwachungsbetrieb aktuelle Prozessdaten genutzt um Entscheidungen zur Auslösung des Korrekturalgorithmus zu treffen.

Parametervorhersage

Ein Hauptproblem der Anlageneinstellung mithilfe des genetischen Algorithmus bildet die schlechte Vorhersagbarkeit der benötigten Zeit zur Lösungsfindung. Der genetische Algorithmus beginnt die Lösungssuche mit einer zufälligen Startpopulation im ca. 440 Mio. Parameterkombinationen umfassenden Lösungsraum. Im günstigsten Fall wird bereits nach wenigen Iterationen eine zufriedenstellende Lösung gefunden. Im schlechtesten Fall kann die Lösungsfindung auch ein Vielfaches an Zeit benötigen. Untersuchungen der Einstellzeit an einer Beispielkomponente zeigten, dass der genetische Algorithmus für eine Lösung zwischen zwei und 84 Individuen untersuchen muss. Dies verdeutlicht die Notwendigkeit, die Planbarkeit der Rekonfiguration zu erhöhen und damit die Umrüstzeit zu reduzieren.

Um diesem Problem entgegenzuwirken, wurde ein Simulationsmodell entwickelt, welches die Bewegung der Werk-

stücke im Orientierungsmodul realitätsnah abbilden kann. So können im Vorfeld Bereiche identifiziert werden, in denen es keine zufriedenstellende Lösung gibt und folglich nicht abgesucht werden müssen. Im Simulationsmodell wird das Werkstück als eindimensionaler, massebehafteter Stab repräsentiert. Die Berechnung der Werkstückbewegung erfolgt schrittweise, indem die Bewegungsdifferentialgleichungen unter Berücksichtigung der auf den Stab wirkenden Kräfte aufgestellt und numerisch in MATLAB/Simulink gelöst werden. Die auf den Stab wirkenden Kräfte sind zum einen die Normal- und Reibkräfte zwischen Stab und Führungskante bzw. -ebene und zum anderen die Luftwiderstandskraft des Stabes im Düsenstrahl. Während die Normal- und Reibkräfte unabhängig von der Bauteilgeometrie zu bestimmen sind, hängt die Luftwiderstandskraft wesentlich von der projizierten Anströmfläche, also der Überschneidung von Düsenstrahl und Werkstück, ab. Für die Berechnung wird eine Finite-Elemente-Methode verwendet, die sich im Vergleich mit anderen Ansätzen durch eine hohe Robustheit und geringe Rechenzeit auszeichnet. Die Validierung des Simulationsmodells erfolgte durch den Vergleich simulierter Werkstücktrajektorien mit den realen Werkstückbewegungen im Orientierungsmodul, die mithilfe einer Hochgeschwindigkeitskamera aufgezeichnet wurden. Die beispielhaften Ergebnisse in Bild 2 zeigen eine hohe Übereinstimmung zwischen simuliertem und realem Werkstückverhalten.

Um die Ergebnisse der Simulation zur Reduzierung der Einstellzeit nutzbar zu machen, wurde anschließend ein Algorithmus entwickelt, welcher den Parameterraum der Zuführanlage (Lösungsraum des genetischen Algorithmus) systematisch mit einem grid-search Algorithmus ab-

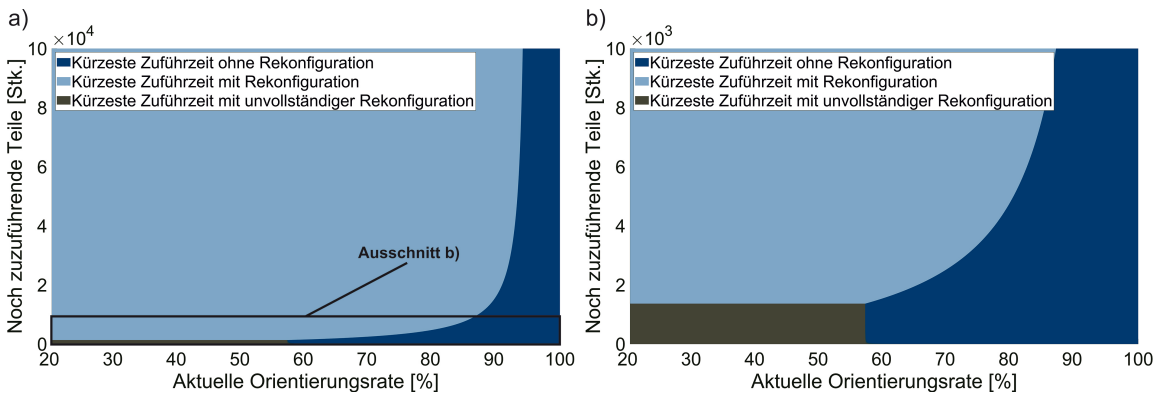


Bild 3. Darstellung der jeweils kürzesten Zuführzeit in Abhängigkeit der aktuellen Orientierungsrate und der Anzahl noch zuzuführender Teile (nach [11])

sucht und Bereiche, in denen eine erfolgreiche aerodynamische Orientierung möglich ist, identifiziert. Dadurch kann der Lösungsraum des genetischen Algorithmus deutlich reduziert werden, indem die Korridore für die Einstellung der Anlagenparameter eingegrenzt werden. Weiterhin werden die Mittelpunkte der identifizierten Bereiche (jeweils auf- und abgerundet) als Startpunkte (erste Generation) für den genetischen Algorithmus verwendet.

Die experimentelle Validierung der simulativen Parametervorhersage lieferte eine deutliche Reduzierung der Einstellzeit sowie der Streuung der Einstellzeit gegenüber der Einstellung ohne Parametervorhersage. Die Ergebnisse zeigen, dass die vollständig offline ablaufende Parametervorhersage die Einstellzeit um mindestens 50 Prozent und bis zu 95 Prozent reduzieren kann. Schwankungen der Einstellzeit konnten um mindestens 60 Prozent verringert werden. Bei häufigen Produktwechseln ergibt sich dadurch ein enormer Vorteil, da Rüstzeiten und Personaleinsatz deutlich reduziert werden können.

Überwachungsbetrieb

Um bei wiederholten Produktwechseln nicht nur die Einstellung der Anlage zu verbessern, sondern auch die benötigte Zeit zum Zuführen einer Charge zu reduzieren, wurde der oben beschriebene Überwachungsbetrieb der Anlage überarbeitet. Das Ziel war es, die Anlage dazu zu befähigen, selbstständig und dynamisch in Abhängigkeit aktueller Prozessgrößen, wie z. B. der verbleibenden Anzahl zuzuführender Teile in einer Charge, eine Entscheidung über die Auslösung eines Korrekturalgorithmus zur Steigerung der Orientierungsrate zu treffen.

Mithilfe des Korrekturalgorithmus wurde die Zuführanlage dazu befähigt, sich bei einer Verschlechterung der Zuführleistung unter einen Schwellwert – zum Beispiel durch variierende Umgebungsbedingungen – selbstständig zu rekonfigurieren. Der Schwellwert der Orientierungsrate zur Auslösung des Korrekturalgorithmus musste dabei von der anlagenbedienenden Person manuell gewählt werden. Eine Berücksichtigung aktueller Prozessgrößen war nicht vorgesehen. Um die Autonomie der Zuführanlage weiter zu erhöhen und gleichzeitig die Produktivität zu steigern, wurde ein mathematisches Modell entwickelt, auf dessen Basis die Anlage unter Berücksichtigung aktueller Prozessgrößen selbstständig den Schwellwert für die Auslösung der Rekonfiguration bestimmen kann. Mithilfe der aktuellen Orientierungsrate und der Anzahl noch zuzuführender Teile in der aktuellen Charge prognostiziert die Anlage, wie lange die Zuführung bis zum Ende der Charge ohne Korrektur dauern würde. Zum Vergleich wird mithilfe eines mathematischen Modells die erwartete Zuführzeit mit Auslösung des Korrekturalgorithmus berechnet. Die Parametrierung des Modells erfolgte dabei mithilfe von ca. 650 experimentell bestimmten Kombinationen aus Anlagenparametern und gemessener Orientierungsrate.

Das resultierende Kennlinienfeld ist in Bild 3 dargestellt. Anhand des exponentiellen Verlaufes der Grenze zwischen dem hellblauen und dunkelblauen Bereich ist klar zu erkennen, dass sich bei einer hohen Anzahl noch zuzuführender Bauteile eine Rekonfiguration bereits bei einer geringen Absenkung der Orientierungsrate lohnt. Gleichzeitig zeigt sich, dass insbesondere gegen Ende einer Charge

bei einem nur geringen Absinken der Orientierungsrate der Verzicht auf eine Rekonfiguration zu einer schnelleren Fertigstellung führen kann. Eine unvollständige Rekonfiguration (vgl. Bild 3) bedeutet, dass die Charge fertig zugeführt wird, bevor die Rekonfiguration abgeschlossen ist und diese mit Ende der Charge abgebrochen wird. Dies tritt nur auf, wenn die Orientierungsrate während der Rekonfiguration (57 %) fällt.

Eine simulationsbasierte Validierung demonstrierte, dass insbesondere bei kleineren Chargengrößen von 10.000 Teilen die Zuführzeit um bis zu 7 Prozent und die Anzahl an Rekonfigurationen sogar um bis zu 50 Prozent reduziert werden konnte [11]. Folglich steht eine Methode zur Verfügung, die eine Verkürzung der Zuführzeit sowie eine Vermeidung unwirtschaftlicher Rekonfigurationen ermöglicht.

Perspektiven

Mit den beschriebenen Fortschritten bietet das aerodynamische Prinzip ein hohes Potential, aktuellen Herausforderungen im Hinblick auf die Bauteilvielfalt, verkürzte Produktlebenszyklen und steigende Unsicherheiten in der Produktion durch eine bauteilunabhängige Zufühhlösung zu begegnen. Mit der aktuell eingesetzten Forschungsanlage können jedoch aufgrund des einfachen Aufbaus mit nur einem Ordnungselement (Luftdüse) nur rotations- oder flächensymmetrische Bauteile orientiert werden. Zusätzlich müssen die zugeführten Werkstücke spezifische Eigenschaften (variierende Anströmfläche, exzentrischer Schwerpunkt) aufweisen, damit der in Bild 1 dargestellte Effekt eintritt.

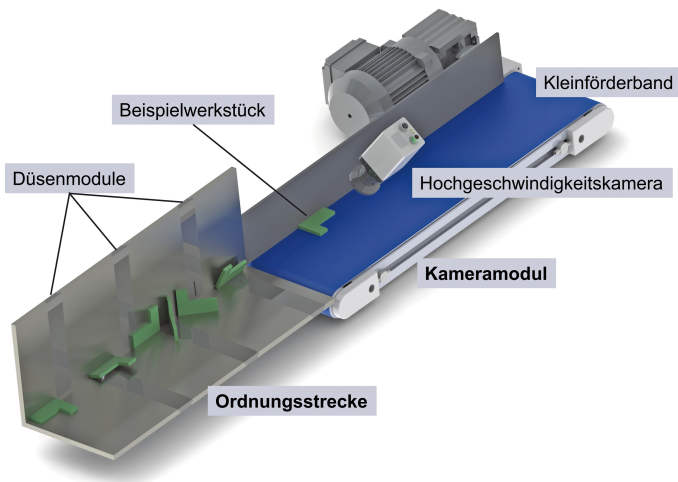


Bild 4. Konzept für eine neuartige aerodynamische Zuführanlage

Im Rahmen zukünftiger Forschungstätigkeiten soll eine neuartige Zuführmethode erforscht werden, welche die bekannten Vorteile aerodynamischer Zuführtechnik ausnutzt, um eine bauteilunabhängige aktive Orientierung von Bauteilen zu ermöglichen. Das Ziel ist es, durch die Anordnung verschiedener, dynamisch angesteuerter Luftdüsen hintereinander entlang der Ordnungsstrecke (Bild 4) bestehende Beschränkungen auszuräumen, die Flexibilität im Hinblick auf das Bauteilspektrum und die Zuführleistung zu steigern und somit die Grundlage für ein universelles Orientierungsmodul zu schaffen.

Die gesamte Planung des Zuführprozesses erfolgt dabei offline und beeinflusst somit nicht den operativen Betrieb des Zuführsystems. Die Rüstzeit soll möglichst auf null reduziert werden. Dazu wird das Werkstückverhalten in der Ordnungsstrecke vollständig simulativ abgebildet, sodass alle Steuerungsparameter für die Luftdüsen vor Beginn des eigentlichen Zuführprozesses bestimmt werden können. Da die Orientierung der

Werkstücke vor der Ordnungsstrecke bekannt sein muss, um die korrekten Orientierungsschritte durchführen zu können, wird der Ordnungsstrecke ein Kameramodul vorgelagert. Ein manuelles Einlernen der unterschiedlichen möglichen Bauteillagen (z. B. mit einer Zeilenkamera) bringt jedoch unweigerlich einen zusätzlichen Zeit- und Personalaufwand (Rüstzeit) mit sich. Um auch hier Einlern- und damit Rüstzeiten zu vermeiden soll die Bildverarbeitung mithilfe künstlich erzeugter, synthetischer Bilddaten trainiert werden.

Zusammenfassung

Um bestehenden Defiziten konventioneller Zuführtechnik entgegenzuwirken, wurde eine aerodynamische Zuführanlage entwickelt, welche sich autonom, mithilfe eines genetischen Algorithmus auf unterschiedliche Werkstücke einstellen kann. Um die Einstellzeit der Anlage zu reduzieren und damit Produktwechsel besser planbar zu machen, wurde durch eine simulationsbasierte

Methode zur Vorhersage der Anlagenparameter entwickelt und erfolgreich validiert. Für eine möglichst effiziente und unterbrechungsfreie Zuführung im Chargenbetrieb wurde außerdem eine Methode für das wirtschaftliche Auslösen einer Reparametrierung bei variierenden Umgebungsbedingungen entwickelt. In zukünftigen Forschungsarbeiten soll das Konzept der aerodynamischen Zuführung durch Ausnutzung moderner Bildverarbeitung und umfangreicher Prozesssimulationen weiterentwickelt werden, um die aerodynamische Zuführtechnik perspektivisch als Alternative zu konventionellen Zuführsystemen in hochflexiblen Produktionsumgebungen zu positionieren.

Literatur

- Hofmann, D.; Huang, H.; Reinhart, G.: Automated Shape Optimization of Orienting Devices for Vibratory Bowl Feeders. *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 135 (2013) 5, 051017 (8 Seiten)
DOI: 10.1115/1.4025089
- Hofmann, D.: Simulationsgestützte Auslegung von Ordnungsschikanen in Vibrationswendelförderern. Technische Universität München, München 2015
- Boothroyd, G.: *Assembly Automation and Product Design*. CRC Press, Taylor & Francis, New York 2005
DOI: 10.1201/9781420027358
- Lee, K.-M.: Flexible Part-feeding System for Machine Loading and Assembly – Part I. A State-of-the-Art Survey. *International Journal of Production Economics* 25 (1991) 1, S. 141 – 153
DOI: 10.1016/0925-5273(91)90140-0
- Hofmann, D.; Reinhart, G.: Simulationsgestützte Auslegungsmethode für Ordnungsschikanen. *ZWF* 108 (2013) 3, S. 148 – 153
DOI: 10.3139/104.110909
- Busch, J.: Entwicklung einer intelligenten aerodynamischen Zuführanlage für die Hochleistungsmontage. PZH-Verlag, Hannover 2016
- Busch, J.; Quirico, M.; Richter, L.; Schmidt, M.; Raatz, A.; Nyhuis, P.: A Genetic Algorithm for a Self-learning Parameterization of an Aerodynamic Part Feeding System for High-speed Assembly. *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 64 (2015) 1, S. 5 – 8
DOI: 10.1016/j.cirp.2015.04.044
- Kolditz, T.; Ince, C.-V.; Raatz, A.: Investigation on the Convergence of the Genetic Algorithm of an Aerodynamic Feeding System due to the Enlargement of the Solution Space. *Smart Technologies for Precision Assembly* (2021), S. 63 – 77

Vorteile der aerodynamischen Zuführung

Die aerodynamische Zuführtechnik bietet die Möglichkeit, Kleinteile mit großer Geschwindigkeit und Zuverlässigkeit zuzuführen. Durch die Nutzung von Luft anstelle mechanischer Schikanen wird eine hohe Flexibilität erreicht. Dank der Fähigkeit der Anlage, sich selbstständig auf neue Werkstücke einzustellen, fallen bei einem Produktwechsel deutlich geringere Rüstzeiten und ein minimaler Personalaufwand an. Zukünftig angestrebte Entwicklungen setzen darauf, die Vorteile der aerodynamischen Zuführung stärker auszunutzen und die Einsetzbarkeit deutlich zu steigern.

9. Busch, J.; Schmidt, M.; Richter, L.; Nyhuis, P.: Eine selbsteinstellende Zuführeinrichtung. ZWF 109 (2014) 7–8, S. 512–515
DOI: 10.3139/104.111171
10. Busch, J.; Knüppel, K.: Development of a Self-learning, Automatic Parameterisation of an Aerodynamic Part Feeding System. Advanced Materials Research 769 (2013), S. 34–41
DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.769.34
11. Kolditz, T.; Rochow, N.; Nyhuis, P.; Raatz, A.: Batch Time Optimization for an Aerodynamic Feeding System under changing Ambient Conditions. Procedia CIRP 97 (2021), S. 278–283
DOI: 10.1016/j.procir.2020.05.238

■ Die Autor:innen dieses Beitrags

Torge Kolditz schloss sein Studium des Maschinenbaus an der Leibniz Universität Hannover im Jahr 2018 ab und ist seitdem als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Montagetechnik tätig. Sein Forschungsschwerpunkt liegt im Bereich der Handhabungstechnik, wo er sich insbesondere mit der Thematik der aerodynamischen Zuführtechnik auseinandersetzt.

Prof. Dr.-Ing. Annika Raatz leitet seit 2013 das neu an der Leibniz Universität gegründete Institut für Montagetechnik. Annika Raatz ist Mitglied der wissenschaftlichen Gesellschaft für Montage, Handhabung und Industrierobotik (MHI) sowie der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Produktionstechnik (WGP). Ihre Forschungsschwerpunkte sind robotergestützte Handhabungsprozesse, Maschinenkonzepte für die Automatisierung von Handhabungs- und Montageprozessen sowie Soft Material Robotics.

■ Abstract

Aerodynamic Part Feeding – Advances and Perspectives. To counteract existing deficits of conventional feeding technology with regard to feeding performance, reliability and flexibility, an aerodynamic part feeding system was developed. This feeding system can adapt to different workpieces autonomously by configuring five system parameters. In this article, current advances with regard to an increased flexibility, shortened retooling times and increased output in batch production are presented and perspectives for future developments are given.

■ Schlüsselwörter

Zuführtechnik, Aerodynamische Zuführtechnik, Flexible Automatisierung, Montage, Handhabung, Flexible Produktionssysteme

■ Keywords

Part Feeding Technology, Aerodynamic Part Feeding, Flexible Automation, Assembly, Handling, Flexible Manufacturing Systems

Bibliography

DOI 10.1515/zwf-2021-0198
ZWF 116 (2021) 11; page 810–814
© 2021 Walter de Gruyter GmbH,
Berlin/Boston, Germany
ISSN 0947-0085 · e-ISSN 2511-0896

Die Verlagsveröffentlichung ist
verfügbar unter www.degruyter.com