

Bestimmung von Fügekräften und deren Einflussgrößen als Basis zur digitalen Arbeitsprozessbewertung

Michael SPITZHIRN¹, Samuel POLLMER¹, André KAISER²,
Bilel Ben ATITALLAH³, Olfa KANOUN³

¹ *imk Industrial Intelligence GmbH, Amselgrund 30, D-09128 Chemnitz*

² *Institut für Mechatronik e. V., Reichenhainerstraße 88, D-09126 Chemnitz*

³ *Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Technische Universität
Chemnitz, Reichenhainer Str. 70, D-09126 Chemnitz*

Kurzfassung: Bei dem Zusammenbau von Automobilen und Elektrogeräten ist eine starke Zunahme von sogenannten Fügeelementen, wie Clipse oder Stecker zu verzeichnen. Die manuelle Montage erfolgt dabei oft hochfrequent bei gleichzeitig aufzubringenden Fügekräften, wodurch eine erhöhte Gefahr von Muskel-Skelett-Erkrankungen bei ungünstigen Bedingungen hervorgeht. Mit Hilfe von digitalen Planungswerkzeugen, wie dem ema Work Designer, können bereits in der Planungsphase eine ergonomische Bewertung und Gestaltung der Arbeitsprozesse unter Beachtung der zu handhabenden Fügeelemente erfolgen. Dazu bedarf es u.a. der Kenntnis über notwendige Fügekräfte, die aktuell aufwendig (u.a. Messungen) ermittelt oder geschätzt werden. Durch die Entwicklung eines numerischen Berechnungsmodells sollen Fügekräfte einfacher und valide bestimmt werden können. Zur Erfassung der Kräfte und Abschätzung der Einflussgrößen werden u.a. Messungen an einer Zug-Druck-Maschine durchgeführt. Die Fügekraft wurde für verschiedene Fügeelemente unter Variation von bauteil- und fügepartnerbezogenen Einflussgrößen durchgeführt. Einen wichtigen Einfluss nimmt das Fügeelement sowie die Fügetoleranz zwischen Fügeelement und Bohrungsloch ein. Die Beschaffenheit des Fügepartners (Material, Blechdicke) sowie die Verwendung eines Montage-schmiermittels wirken sich ebenso signifikant und relevant auf die Höhe der Fügekraft aus. Die Ergebnisse können Hinweise zur Gestaltung von Fügeelementen sowie der Arbeitsprozesse geben und werden in das numerische Modell neben weiteren an einem Kraftmessstand durchgeführten Messungen eingehen.

Schlüsselwörter: Digitale Arbeitsplanung, ema Work Designer, Fügekräfte, Kraftberechnung, Clipse, Fügeelemente

1. Ergonomische Gestaltung von Fügeprozessen und -elementen

Die Montage von Automobilen oder Bauteilen erfordert viele manuelle Arbeitsschritte. Dabei ist eine starke Zunahme bei der Verwendung von Clips- und Steckverbindungen zu verzeichnen, die gegenüber Verbindungen wie Verschrauben einen schnelleren und gewichtsreduzierten Zusammenbau ermöglichen, was die Wirtschaftlichkeit und Ökologie erhöhen. Die Montage von Fügeelementen wie Clipse erfolgt hochfrequent und erfordert häufig hohe Fügekräfte, woraus sich hohe Belastungen für das Hand-Arm-System ergeben. Diese spiegeln sich in ergonomisch

ungünstigen Bewertungen (z.B. mittels EAWS) wider, die mit gelb oder rot beurteilt werden und damit ein mögliches bzw. hohes Risiko von Muskel-Skelett-Beschwerden anzeigen. (Becker 2016; Walther 2016)

Mit Hilfe von digitalen Planungswerkzeugen, wie dem ema Work Designer, können bereits in der Planungsphase eine ergonomische Bewertung und Gestaltung der Arbeitsprozesse inkl. der zu handhabenden Fügeelemente erfolgen (Ullmann et al 2019). Die für die ergonomische Bewertung notwendigen Fügekräfte sind aktuell manuell auf Basis von Schätzungen, Messungen oder FEM-Simulationen (Finite-Elemente-Methode) einzugeben (Walther 2016). Dies erfordert einerseits hohe Aufwände und kann bei fehlerhaften Schätzwerten zu den vorgenannten Überbeanspruchungen des Menschen führen. Durch die Entwicklung eines numerischen Berechnungsmodells sollen Fügekräfte einfacher und valide bestimmt werden können. Im vorliegenden Beitrag werden erste Ergebnisse zur Ermittlung von Fügekräfte in Abhängigkeit verschiedener Montagebedingungen / -einflussgrößen vorgestellt.

2. Methodik und Versuchsdesign zur Messung von Fügekräften

Die notwendige Fügekraft bei der Montage von Fügeelementen ist von einer Vielzahl von Faktoren abhängig (Walther 2016; Pfeifer, 2010). Wesentliche Einflüsse können bauteil- und fügepartner-, umwelt-, ausführungs- sowie messmethoden-bezogene Einflussgrößen haben, die sich direkt die Fügekraft oder auf deren Genauigkeit auswirken können (Salman Zadeh 2011; Kakade 2019; Würtz 1992).

Zur Entwicklung der numerischen Berechnungsfunktionen ist eine ausreichend große und valide Datenbasis an Fügekräften unter Einbeziehung wesentlicher Einflussgrößen zu erstellen, statistisch zu untersuchen und in ein Modell einzubringen. Dazu werden FEM-Simulation sowie Messungen unter Nutzung verschiedener Messsysteme (siehe Abb. 1) angewendet, die zueinander untersucht werden, um den Einfluss unterschiedlicher Genauigkeiten sowie Unterschiede zwischen Füge- und Griffkraft zu bestimmen.

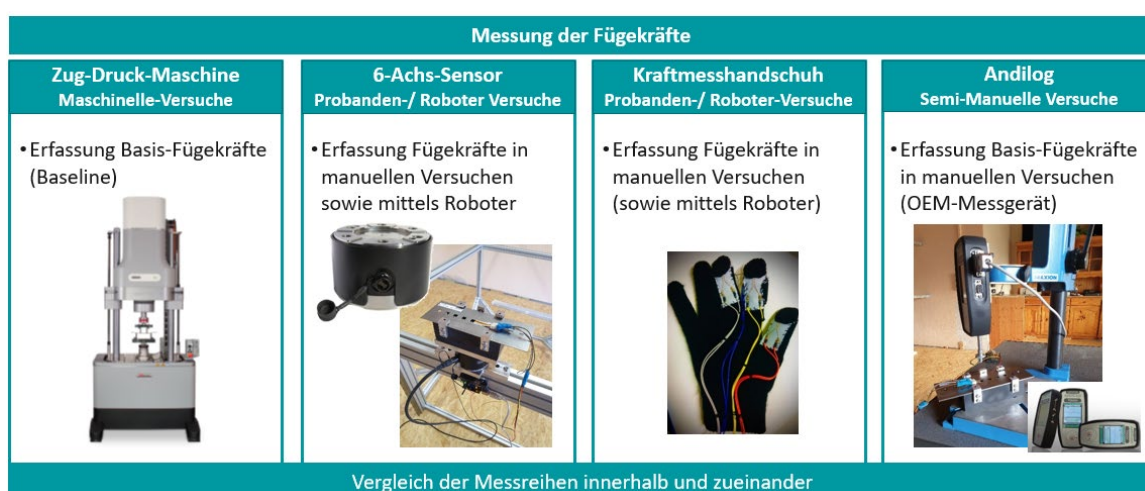


Abbildung 1: Verschiedene Messsysteme im Rahmen der Fügekraftbestimmung

Nachfolgend wird sich auf die Messungen mittels Zug-Druck-Maschine konzentriert, die zur Ermittlung einer „Fügekraft – Baseline“ ohne Einfluss der menschlichen

Zur Untersuchung der Einflussgrößen und Effekte wird sowohl eine mehrfaktorielle wie einfaktorielle ANOVA für einzelne Einflussgrößen (Alpha: 5%) mittels der Software SPSS durchgeführt.

3. Ergebnisse der Zug-Druck-Messungen

Es zeigt sich, dass das Gesamtmodell signifikant ist ($F(71,648) = 237.039, p < .001$, angepasstes $R^2 = 0.963, n = 720$) und zwischen den betrachteten Fügeelemente signifikante Unterschiede bei den Fügekräften vorhanden sind ($F(2,648) = 627.039, p < .001, \eta_p^2 = .659$). In Abbildung 1 sind die Fügekräfte und deren Schwankung in Abhängigkeit der Fügetoleranz für die drei Tannenbaum-Clipse (CLTa49, CLTa167, CLTa212), die Spreizmutter (SpM63) sowie den Stopfen (St7) dargestellt. Es besteht ein signifikanter Zusammenhang zwischen Fügekraft und den Fügetoleranzen ($F(12,648) = 331.220, p < .001, \eta_p^2 = .860$). Bei einer negativen Zunahme der Fügetoleranz, d.h. relevantes Maß (z.B. Schaftdurchmesser) des Elements ist im Verhältnis zum Loch größer) nimmt die Fügekraft bei der Mehrzahl der Elemente wesentlich zu (vgl. Abb. 3 und Tab. 1). So ist beim Clips CLTa167 die die mittlere Fügekraft von 86,9N bei einer Fügetoleranz von -0,4 auf 280,9N bei einer Fügetoleranz von -1,0. Bei der Spreizmutter variiert die Fügekraft zwischen 84,0N bei -0,8 Toleranz und 112,4N bei -1,0 Toleranz.

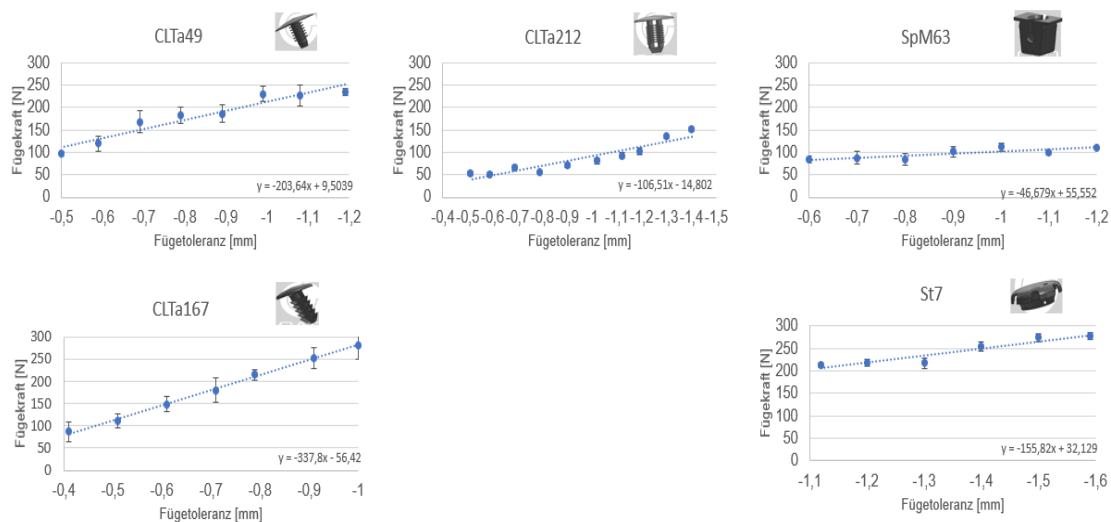


Abbildung 3: Fügekraft der drei Clipse (CLTa49, CLTa167, CLTa212), Spreizmutter (SpM63) und Stopfe (St7) in Abhängigkeit von Fügetoleranz

Zwischen den untersuchten Blechdicke (Clipse: 4 mm, 6 mm, 8 mm; Spreizmutter: 1,0 mm, 1,5 mm) konnte bei allen Fügeelementen signifikante Unterschiede identifiziert werden ($p < .001$). Mit Zunahme der Blechdicke ist bei den drei Tannenbaum-Clipse eine Zunahme der Fügekraft zwischen 15 % und 24 % zu verzeichnen. Bei der Spreizmutter nimmt die Fügekraft bei 1,5 mm Blechdicke im Vergleich zu 1,0 mm bei der Fügetoleranz von -1,0 von 112,4 N auf 97,9 N ab.

Das Blechmaterial nimmt auch signifikanten Einfluss auf die Fügekraft. Bei Verwendung eines Blechs aus Aluminium (Almg3-H22) ist im Vergleich zu Stahlblech (S235JR-gg) bei den Tannenbaum-Clipsen und der Spreizmutter eine Zunahme der Kräfte zwischen 11,5 N (8%) beim CLTa167 (Fügetoleranz: -0,6) und 48,6 N (26%) beim CLTa49 bei Fügetoleranz von -0,9 vorhanden. Bei dem Stopfen erhöhte sich die Fügekraft bei Änderung des Materials von Edelstahl (1.4301) auf Feinblech-Stahl (DC01-g) um 38,9 N (18%) bei der Fügetoleranz von -1,2mm und um 15,1N (6%) bei der Fügetoleranz -1,4mm.

Als weitere Einflussgröße wurde der Einsatz eines Schmiermittels untersucht. Es zeigt sich, dass die Schmierung keinen signifikanten Einfluss auf die Fügekraft bei den

Tannenbaum-Clipsen CLTa167 und CLTa212 ($p = .559$; $p = .507$) hat. Bei dem CLTa49, S7 und SP63 sind signifikante Unterschiede vorhanden. Vor allem bei dem Stopfen St7 zeigt die Effektgröße $\eta_p^2 = .921$ einen großen Einfluss der Schmierung auf die Fügekraft. Diese reduziert sich bei der Fügetoleranz -1,2 mm um 92,8 N (42%). Die Tabelle1 fasst die Ergebnisse der statistischen Untersuchung zusammen.

Tabelle 1: Ergebnisse Signifikanztests anhand mehrfaktorielle ANOVA zwischen Fügekraft und verschiedenen Einflussfaktoren

Einflussgröße/ Fügeelement	Toleranz		Blechdicke		Material		Schmierung	
	p-	η_p^2	p-Wert	η_p^2	p-Wert	η_p^2	p-Wert	η_p^2
CLTa49	<,001	,889	<,001	,535	<,001	,453	,042	,109
CLTa167	<,001	,901	<,001	,402	<,001	,403	,559	,010
CLTa212	<,001	,976	<,001	,715	<,001	,687	,507	,012
SpM63	<,001	,592	<,001	,700	,011	,310	<,001	,416
St7	<,001	,921	*	*	<,001	,782	<,001	,921

* Für den Stopfen St7 wurde der Einfluss einer veränderten Blechdicke nicht untersucht.

4. Diskussion der Zug-Druck-Messungen

Die Ergebnisse zeigen, dass zwischen Fügekraft und den betrachteten Einflussgrößen signifikante Zusammenhänge bestehen. Die Fügetoleranz zwischen Fügeelement und Bohrungsloch hat den stärksten Effekt auf die Fügekraft. Mit zunehmender Engpassung ist ein linearer Kraftanstieg zu erkennen. Dies deckt sich auch mit Untersuchungen von Walther (2016) und Würz (1992), die mit Zunahme der Enge der Passung, eine wesentliche Zunahme der Kraft bis zur Beschädigung bzw. Zerstörung des Blechs bzw. Fügeelements ermittelten. Diese Erkenntnis ist bzgl. fertigungsbedingter Maßabweichungen sehr wichtig, da nur geringe Änderungen in der Toleranz zu starker Erhöhung oder Verringerung der Fügekräfte führen können.

Das verwendete Blechmaterial nimmt auch wesentlichen Einfluss, der sich aus unterschiedlichen Reibwerten und Materialpaarungen ergeben. Bspw. weist die Materialpaarung Kunststoff auf Stahl einen geringeren Reibwert als Kunststoff auf Aluminium auf, so dass eine geringe Fügekraft bei der ersten Paarung vorhanden sein sollte. Dies bestätigt sich auch im Versuch. Der Einsatz eines Montageschmiermittels verändert die Oberflächenbeschaffenheit und die damit verbundene Reibung zwischen Kontaktflächen des Fügeelements und des Blechs. So konnte für die Elemente CLTa49, SpM63 und St7 signifikante Effekt ermittelt werden. Keinen signifikanten Unterschied zeigt die Schmierung bei den Clipsen CLTa167 und CLTa212. Der größte Effekt bei der Schmierung konnte beim Stopfen S7 ermittelt werden.

Bei unterschiedlichen Blechdicken konnten auch Veränderungen der Fügekraft gemessen werden. Bei der Spreizmutter kommt es zur Reduzierung der Kraft infolge eines dickeren Blechs. Durch das dickere Blech könnte eine Durchbiegung des Blechs aufgrund der Kraftaufbringung vermieden werden, wodurch die aufzubringende Kraft geringer wird. Dazu sind weiterführende Untersuchungen geplant.

Trotz der standardisierten Vorgehensweise mit der Zug-Druck-Maschine sind Schwankungen in den Messreihen vorhanden. Diese betragen zwischen 13% und 40%. Dies kann durch Geometrieabweichung der Fügeelemente oder andere strukturelle Eigenschaften (Lamellenlänge, Lamellendicke, etc.) trotz dem vorab standardisierten Ausmessen der Fügeelemente und Bohrungen resultieren. So

können die einzelnen Bohrungen in den Blechen unterschiedliche Eigenschaften aufgrund von Gratbildung, Oberflächenqualität, Beschaffenheit aufweisen. Die Gratbildung wurde durch eine Sichtanalyse kontrolliert und bei Vorhandensein entfernt.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen standardisierter Messungen auf einer Zug-Druck-Maschine wurden Zusammenhang zwischen der Fügekraft und den Einflussfaktoren Fügeelementgeometrie, Fügetoleranz zwischen Fügeelement und Bohrung des Blechs, Blechmaterial und – dicke sowie Schmierung untersucht. Im Ergebnis konnten signifikante und relevante Unterschiede in der Höhe der Fügekräfte in Abhängigkeit der Einflussgrößen ermittelt werden. Insbesondere die Fügetoleranz nimmt einen wesentlichen Einfluss ein. In den Messungen konnte auch nachgewiesen werden, dass der Einsatz von Schmiermitteln z.T. zu einer wesentlichen Reduktion der Fügekräfte führen kann. Aus den Ergebnissen können damit erste Hinweise zur Gestaltung von Fügeelementen sowie der Arbeitsprozesse abgeleitet werden.

Die Ergebnisse werden zudem in die Entwicklung des numerischen Modells zur Berechnung von Fügekräften mit eingehen. In den nächsten Monaten werden weiterführende Messungen an einem selbstentwickelten adaptiven Kraftmessstand durchgeführt. Dazu gehören u.a. die Erweiterung der untersuchten Elemente sowie die Durchführung manueller Messungen mit Probanden sowie einem Roboter UR16e. Damit wird die Datenbasis erweitert sowie weitere Einflussgrößen wie die unterschiedliche Handhabungstechniken untersucht und im Modell abgebildet. Perspektivisch soll damit die digitale Planung nach ergonomischen und wirtschaftlichen Kriterien wie mit dem Planungswerkzeug ema Work Designer vereinfacht werden, indem das Modell anhand der verwendeten Elemente und Rahmenbedingungen eine Prognose der Fügekräfte ermöglicht.

6. Literatur

- Becker D (2016) Ergonomie-Absicherung in der frühen Phase des Produktentstehungsprozesses der Automobilproduktion
- Kakade H, Patil V (2019) Design Optimization of Snap Fit Feature of Lock Plate to reduce its Installation Force by using DOE Methodology. In International Research Journal of Engineering and Technology, 2994-2999.
- Pfeifer T, Schmitt R (2010) Fertigungsmesstechnik (3., überarb. und erw. Aufl.). Oldenbourg. <http://www.oldenbourg-link.com/isbn/9783486592023> <https://doi.org/10.1524/9783486711356>.
- Salman Zadeh H (2011) Einflüsse von Greif- und Kontaktbedingungen auf die Montage von Clipsverbindungen aus der Automobilindustrie. Bericht aus dem Institut für Arbeitswissenschaft der TU Darmstadt. Ergonomia.
- Ullmann S, Spitzhirm M, Fritzsche L (2019) Virtuelle Arbeitsgestaltung – Vorstellung des ema Work Designer, ASU Arbeitsmed Sozialmed Umweltmed 54, 10.
- Walther M (2016) Entwicklung und Evaluierung eines systematischen Vorgehens zur Erfassung von Aktionskräften in der Automobilproduktion. Universitätsbibliothek Chemnitz.
- Würtz G (1992) Montage von Pressverbindungen mit Industrierobotern [Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss, Springer, Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo, Hong Kong, Barcelona, Budapest]. Deutsche Nationalbibliothek.

Danksagung: Dieser Beitrag wäre ohne die Unterstützung durch die Sächsische Aufbaubank (SAB) sowie dem Europäischen Sozialfonds (ESF) (FuE-Verbundprojektförderung: SimKra FKZ 100376593) nicht möglich gewesen.



Gesellschaft für
Arbeitswissenschaft e.V.

Technologie und Bildung in hybriden Arbeitswelten

68. Kongress der
Gesellschaft für Arbeitswissenschaft

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und
Fabrikautomatisierung IFF, Magdeburg

02. – 04. März 2022

GfA-Press

Bericht zum 68. Arbeitswissenschaftlichen Kongress vom 02. – 04. März 2022

**Otto-von Guericke-Universität Magdeburg;
Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF, Magdeburg**

Herausgegeben von der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.
Sankt Augustin: GfA-Press, 2022
ISBN 978-3-936804-31-7

NE: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft: Jahresdokumentation

Als Manuskript zusammengestellt. Diese Jahresdokumentation ist nur in der Geschäftsstelle (s. u.) erhältlich.

Alle Rechte vorbehalten.

© **GfA-Press, Sankt Augustin**

Schriftleitung: Prof. Dr. Rolf Ellegast

im Auftrag der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.

Ohne ausdrückliche Genehmigung der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V. ist es nicht gestattet:

- den Kongressband oder Teile daraus in irgendeiner Form (durch Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) zu vervielfältigen,
- den Kongressband oder Teile daraus in Print- und/oder Nonprint-Medien (Webseiten, Blog, Social Media) zu verbreiten.

Die Verantwortung für die Inhalte der Beiträge tragen alleine die jeweiligen Verfasser; die GfA haftet nicht für die weitere Verwendung der darin enthaltenen Angaben.

Geschäftsstelle der GfA

Simone John, Tel.: +49 (0)30 1300-13003

Alte Heerstraße 111, D-53757 Sankt Augustin

info@gesellschaft-fuer-arbeitswissenschaft.de · www.gesellschaft-fuer-arbeitswissenschaft.de

Screen design und Umsetzung

© 2022 fröse multimedia, Frank Fröse

office@internetkundenservice.de · www.internetkundenservice.de