

Erfassung von Fügekräften mittels Roboter zur ergonomischen Bewertung von Arbeitsprozessen

Michael SPITZHIRN¹, Eric ÖTTLER¹, André KAISER²,
Bilel Ben ATITALLAH³, Olfa KANOUN³

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

² *ICM, Otto-Schmerbach-Straße 19, D-09117 Chemnitz*

³ *Technische Universität Chemnitz,
Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik,
Reichenhainerstraße 70, D-09126, Chemnitz*

Kurzfassung: Die Montage von Fügeelementen wie Clipse erfolgt hochfrequent und kann hohe Fügekräfte erfordern, woraus sich hohe Belastungen für das Hand-Arm-System ergeben können. Mittels digitalen Planungswerkzeugen, wie ema Work Designer (ema WD) oder biomechanischer Menschmodelle wie Dynamicus können bereits im Planungsprozess Arbeitsprozesse simuliert und Belastungsfaktoren wie Fügekraft in die ergonomische Bewertung einbezogen werden. Die Fügekraftermittlung erfolgt aktuell manuell per Schätzung, Messungen oder FEM-Simulationen. Im SimKra Projekt wurde dazu ein Ansatz zur Berechnung von Fügekräften erstellt, der es insbesondere KMU ermöglichen soll, Fügekräfte valide zu bestimmen und für die virtuelle Produktionsplanung einzusetzen. Um eine ausreichende, valide Zahl an Fügekraftdaten zu erreichen, wurde ein Robotermessstand entwickelt.

Wie der Vergleich mit Messungen an einer Zug-Druck-Maschinen zeigt, können am Robotermessstand valide, reproduzierbare Fügekräfte gemessen werden. Zudem besteht zwischen dem im UR16e eingebauten Kraftsensor und dem als Referenz verwendeten 6-Achs-Kraftsensor eine wesentliche Übereinstimmung. Alternative Füge Techniken zum geraden Fügen wie Kippeln/Drehend könnten ebenso auf den Roboter übertragen werden, jedoch sind im Gegensatz zur geraden Füge Technik wesentliche Kraftdatenabweichungen im Vergleich zu Probandenversuchen vorhanden.

Zusammenfassend kann der Robotermessstand ein effizientes Mittel sein, um umfangreiche, valide Kraftdatensammlungen für das numerische Modell und eine Kraftdatenbank im emaWD zu erzeugen.

Schlüsselwörter: Digitale Arbeitsplanung, ema Work Designer, Fügekräfte, Kraftmessung, Roboter, Fügeelemente

1. Ergonomische Gestaltung von Arbeitsprozessen

Die Montage von Fügeelementen wie Clipse erfolgt hochfrequent und erfordert häufig hohe Fügekräfte, woraus sich hohe Belastungen für das Hand-Arm-System ergeben können (Walther 2015). Im Zusammenhang mit nicht ergonomischen Ausführungen der Fügeprozesse oder zu hohen Fügekräften kann so die Entstehung verschiedener Muskel-Skelett-Erkrankungen begünstigt werden (BAuA 2021).

Mittels digitalen Planungswerkzeugen, wie ema WD oder Dynamicus, können mittels Prozesssimulationen unter Einsatz digitaler Menschmodelle bereits im Planungsprozess ergonomische Faktoren wie Fügekraft einbezogen und mittels anerkannten Bewertungsverfahren wie EAWS semi-automatisch bewertet werden (Spitzhirm et al. 2022a). Die für die ergonomische Bewertung notwendigen Fügekräfte sind aktuell manuell auf Basis von Schätzungen, Messungen oder FEM-Simulationen (Finite-Elemente-Methode) einzugeben (Walther 2015). 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. Zur Entwicklung ist eine ausreichend große und valide Datenbasis an Fügekräften unter Einbeziehung wesentlicher Einflussgrößen zu erstellen. Im vorliegenden Beitrag wird ein Ansatz zur Bestimmung von Fügekräfte mittels eines Robotermessstandes vorgestellt, mit dem umfangreiche Messungen unter Abbildung verschiedener Fügebedingungen und Fügetechniken möglich sein soll.

2. Kraftmessungen mittels Robotersystemen

Robotersysteme bieten den Vorteil gegenüber dem Menschen, dass diese durchgehend (ohne Ermüdung) mit einer hohen Wiederholgenauigkeit und Verfügbarkeit eingesetzt werden können (Maier et al. 2020). Roboter, wie die e-Serie von Universal Robots verfügen über eingebaute Sensoren, die für die Kraftmessung genutzt werden können (Universal Robots Germany GmbH 2021).

Einzelne Studien haben sich mit der Einsatzbarkeit von Robotern für die Kraftmessung beschäftigt. Blum et al. (2020) ermittelte ein Vertrauensbereich für den Roboter in denen die KUKA LBR iiwa und Motoman HC10 als inline-Messsystem eingesetzt werden können und zeigte wesentliche mögliche Einflüsse auf das Messergebnis wie z. B. die exakte Einrichtung der mechanischen Schnittstelle zwischen Werkzeug und Wirkobjekt (TCP) auf. Gute Übereinstimmungen zwischen einer Universalprüfmaschine und einem Robotersystem bei der Montage von Schnappverbindungen konnten auch von Linsinger et al. (2018) festgestellt werden. Diese Studien sowie weitere Anwendungen im Bereich Kraftkontrolle, die nach Owell-Hill (2016) zu den häufigsten Anwendungen der Kraftsensoren von Robotern gehören, zeigen, dass ein grundsätzlicher Einsatz möglich sein sollte.

3. Versuchsdesign zur Kraftmessung mittels Roboter

Ziel des Versuchs ist die Untersuchung der Einsatzfähigkeit eines Robotermessstandes zur Erfassung von Fügekräften mit hinreichender Genauigkeit für die Kraftbewertung sowie zum Aufbau des numerischen Modells. Weiterhin wird untersucht, inwiefern die eingebauten Kraftsensoren im Roboter für die Kraftmessung genutzt werden können. Aufgrund der hohen wirkenden Kräfte war es notwendig, einen spezifischen Roboter-Versuchsstand (vgl. Abbildung 1) aufzubauen, um eine ausreichende Stabilität sowie Bewegungsräume zu erreichen. Dabei sind Roboter und Magazin auf einer Platte in gleicher Höhe fixiert, um Relativbewegungen zu vermeiden. Als Roboter wird ein UR16e eingesetzt, da er ausreichend Kraft (F_{\max} : bis zu 320N) aufbringen

kann sowie eine hohe Positionierungs- und Wiederholungsgenauigkeit ($\pm 0,1$ mm) hat. Zudem verfügt der Roboter über einen eingebauten Kraftsensor, der zusätzlich zum im Kraftmessstand verbauten 6-Achs-Sensor ME K6D80 genutzt wird.



Abbildung 1: Roboterkraftmessstand zur Erfassung von Fügekräften

Für die Untersuchung wurden zwei Versuchsreihen R1 und R2 entworfen. In R1 wird der Einfluss verschiedener Fügebedingungen, Material Lochplatte (S235JR, DC01,1.43.01), Blechdicke (0,8 bis 4 mm), Fügegeschwindigkeit (100, 500, 1000 mm/min) sowie verschiedene Fügetoleranzen (Durchmesser des Lochs minus Dicke des Elements) beim geraden Fügen auf die Fügekraft, untersucht. Dazu werden 15 Fügeelemente ausgewählt (darunter Tannenbaumclipse, Spreizmuttern und Stopfen) und mit Messreihen an einer Zug-Druck-Maschine und manuellen Versuchsreihen verglichen. In R2 wird untersucht, inwiefern verschiedene Fügeverfahren (kippend/drehend) basierend auf aufgenommenen Motion-Capturing-Daten manueller Fügeprozesse mittels Roboter durchführbar sind.

Für die Durchführung der Fügeprozesse wurden entsprechend der Form des Fügeelements verschiedene Greifer und Aufnahmen konstruiert sowie für R1 und R2 die Roboterprogramme erstellt. Vor der Versuchsdurchführung war der Roboter bzgl. relevanter Parameter (Geschwindigkeit, Größe zu erfassendes Objekt etc.) einzustellen und der Versuchsstand vorzubereiten (u.a. Magazin befüllen, Labview-Programm starten). Danach wurden jeweils 10 Messwiederholungen durchgeführt.

4. Ergebnisse der Kraftmessung mittels Roboterkraftmessstand

4.1 Roboterkraftmessung R1 gerades Einfügen bei verschiedenen Fügebedingungen

Insgesamt wurden 15 Fügeelemente in 146 Messreihen mit einer Gesamtzahl von 790 Messungen mittels Roboter UR16e gefügt. 22 Datensätze mussten ausgeschlossen werden. Bei 9 Messreihen konnten die Fügeelemente aufgrund des Sicherheitsstopps des UR16e nicht gefügt werden. Abbildung 2 gibt einen Überblick über die einzelnen Fügeelemente und die Anzahl an bereinigten Messungen sowie die mittlere Fügekraft und die Spannweiten.

Fügeelement	N	MW	SD	Min	Max
CLOM349	9	57,6	5,8	50,7	71,2
CLTa167	55	138,6	24,2	92,6	179,4
CLTa212	135	84,1	30,2	44,3	142,5
CLTa49	75	124,8	25,8	81,1	191,1
CLTa71	11	154,5	24,2	124,1	181,1
CLTa72	64	81,2	13,9	45,6	123,2
SpM116	50	77,6	30,7	48,2	179,5
SpM63	114	64,6	31,8	26,8	166,3
St147	10	189,2	9,3	171,1	205,3
St148	40	144,0	17,0	104,5	168,0
St149	55	133,9	52,4	57,3	227,6
St150	20	188,0	17,9	149,7	221,8
St57	15	146,9	23,8	110,0	171,6
St66	53	153,9	44,2	71,1	245,7
St7	62	188,4	51,3	25,1	238,5
Gesamtergebnis	768	114,3	52,4	25,1	245,7

Abbildung 2: Robotermessung R1 und deren Fügekräfte

Die meisten Messungen wurden für die Tannenbaumclipse CLTa149, CLTa167, CLTa212, die Spreizmutter SPM63 sowie den Stopfen ST7 durchgeführt, da es sich um Standardelemente handelt, die in allen anderen Messreihen (Zug-Druck-Messung, manuelle Versuche) verwendet wurden. Des Weiteren sind wesentliche Unterschiede in den Fügekräften zwischen den Elementen vorhanden. Innerhalb der Fügeelemente sind Spannweiten von 34,2N (ST147) bis 228,6N (ST7) vorhanden. Diese resultieren aus den unterschiedlichen Fügebedingungen wie Toleranzen, Material, die in den Versuchen durchgeführt wurden. Abbildung 3 zeigt ausgewählte Ergebnisse für das Fügeelement CLTa212 bei einer Blechdicke von 4 mm und Fügetoleranzen von -0,56 bis -1,30 mm bei einer Standardgeschwindigkeit von 500 mm/min. Zusätzlich sind zwei Messreihen mit der Fügegeschwindigkeit von 100 und 1000 mm/min dargestellt. Es fällt auf, dass die gemessenen Fügekräfte bei gleichen Messreihen bei der Zug-Druck-Messung tendenziell höher und die Standardabweichungen beim Roboter Versuch geringer sind. Die Differenzen der MW liegen zwischen -20,8 N bis +3,2 N und nehmen mit zunehmender Fügekraft ab. Die mittlere absolute Differenz beträgt 8,9 N.

Fügeelement / Messreihe	Roboter Versuche			Zug-Druck-Messungen			Differenz FK	Mittel % Abweichung
	F (N)	F (MW)	F (SD)	F (N)	F (MW)	F (SD)		
CLTa212	119	86,37	30,64	154	93,26	28,48	-6,89	-7,4%
S235JR (4,0) Fügetoleranz -0,56	5	52,97	3,92	5	66,59	11,44	-13,62	-20,4%
S235JR (4,0) v = 1000 Fügetoleranz -0,59	5	56,13	4,36	5	65,75	4,90	-9,62	-14,6%
S235JR (4,0) v = 100 Fügetoleranz -0,59	5	51,91	3,73	5	62,04	9,94	-10,13	-16,3%
S235JR (4,0) Fügetoleranz -0,59	10	53,08	5,15	10	60,11	6,48	-7,03	-11,7%
S235JR (4,0) Fügetoleranz -0,62	5	51,26	3,92	5	70,95	3,24	-19,69	-27,7%
S235JR (4,0) Fügetoleranz -0,65	5	53,98	1,33	5	67,41	13,16	-13,42	-19,9%
S235JR (4,0) Fügetoleranz -0,66	5	61,51	4,73	5	82,31	7,67	-20,79	-25,3%
S235JR (4,0) Fügetoleranz -0,69	5	64,78	2,77	10	66,42	4,93	-1,65	-2,5%
S235JR (4,0) Fügetoleranz -0,87	5	68,68	3,99	5	80,14	12,39	-11,47	-14,3%
S235JR (4,0) Fügetoleranz -0,90	5	69,94	2,48	10	72,04	5,67	-2,11	-2,9%
S235JR (4,0) Fügetoleranz -0,99	5	104,76	5,52	10	101,61	7,40	3,14	3,1%
S235JR (4,0) Fügetoleranz -1,06	4	91,03	5,07	5	103,07	10,25	-12,04	-11,7%
S235JR (4,0) Fügetoleranz -1,09	5	92,51	2,92	10	89,32	6,91	3,20	3,6%
S235JR (4,0) Fügetoleranz -1,30	5	137,33	4,09	10	135,89	4,14	1,43	1,1%

Abbildung 3: Messreihen für Roboter- und Zug-Druck-Messungen für CLTa212 (Auszug)

Der Vergleich zwischen UR16e Kraftsensor und 6-Achs-Sensor ergibt eine mittlere Differenz zwischen -0,3 % für CLOM349 und 9,6 % für den ST7. Der mittlere Messunterschied beträgt 0,89 N und reicht von -1,26N bis 3,63N bzw. -1,9 % und 2,9 %.

4.2 Roboterkraftmessung R2 zu kippeInder / drehender Fügetechnik

Insgesamt wurden 3 Fügeelemente (CLTa212, CLTa49, SPM63) in 57 Messreihen mit unterschiedlichen Bewegungsausführungen der Probanden vom Roboter mit jeweils 5 Wiederholungen ausgeführt. So konnten bereinigt 187 Messungen untersucht werden. Die gemessenen Fügekräfte der RoboterAusführungen variieren von 105,1N (SD: 1,6) bis 130,6N (SD: 9,1N). Die Fügekraftdifferenz zwischen den mittels Roboter und manuell vom Probanden ausgeführten Bewegungen beträgt im Mittel 17,9N. Die Mehrzahl der Messdifferenzen liegt bei mehr als +/-10 %.

5. Diskussion der Messergebnisse

Zwischen den Fügeelementen bestehen aufgrund unterschiedlicher Geometrien, Materialien sowie Fügebedingungen wesentliche Unterschiede in den Fügekräften. So nimmt bspw. die Füge toleranz wesentlichen Einfluss und stimmt damit auch mit den Ergebnissen der Zug-Druck-Messung aus Spitzhahn et al. (2022b) überein.

Allgemein kann der Roboter UR16e für Kraftmessungen ausgewählter Fügeelemente eingesetzt werden, solange sich deren Fügekraft im definierten Maximalbereich des Roboters befindet. Die hohe Positionierungs- und hohe Wiederholungsgenauigkeit minimiert das Risiko eines Verkantens beim Fügen. Die Koordinaten sind hierfür für jede Messreihe genau einzustellen. Die Elemente wurden zudem vorab vermessen, um Chargenunterschiede und daraus resultierende Variationen der Fügekraft zu minimieren. Die Roboter messungen weisen geringere Schwankungen innerhalb der Messreihen im Vergleich zu den Zug-Druck-Messungen auf. Trotzdem sind teilweise höhere Variationen in den Messreihen vorhanden, die mit produktionsbedingten Maßschwankungen der Fügeelemente begründet werden können. Erkenntnisse über Schwankungen sind für die ergonomische Bewertung wichtig, da diese zu höheren maximalen Fügekräften führen könnten, die bei gestalterischen bzw. produktionsbezogene Maßnahmen zu berücksichtigen wären.

Eine Begründung für die Differenz zwischen Roboter messdaten und Zug-Druck-Messungen kann durch unterschiedliche Toleranzen beim Einspannen liegen. So kann im Robotersystem eine auf +/-0,1 mm genaue Positionierung vorgenommen werden, die bei den Zug-Druck-Messungen nicht möglich ist. Somit bietet der Roboter tendenziell eine höhere Reproduzierbarkeit, da die Aufnahme sowie das Einfügen automatisiert erfolgen kann. Beim Großteil der Messungen besteht zwischen den ermittelten Fügekräften mit UR16e Robotersensors und 6-Achs-Sensors eine hohe Übereinstimmung, sodass Messungen nur mit dem UR16e unter bestimmten Bedingungen (Kräfte bis ca. 180N) möglich sein sollten.

Messreihe R2 zeigt, dass alternative Fügetechniken (Kippen / Drehend) vom Roboter ausgeführt werden können. Im Vergleich zu Kraftdaten manueller Versuche weichen die Mehrzahl der Kraftdaten um mehr als +/-10 % ab. Diese wesentlichen Unterschiede sprechen dafür, dass der Roboter messstand die alternativen Fügetechniken nicht adäquat imitieren und die damit gemessenen Fügekraft nicht genutzt werden sollten. Dazu bedarf es weiterer Untersuchungen, da wesentliche Mehrwerte für den Anwendungsfall gesehen werden. So konnten in Probandenversuchen Reduktionen der Fügekraft von bis zu 50 % erreicht werden.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Mit den entwickelten Methoden zur standardisierten Kraftmessung unter Einsatz eines Kraftmessstandes (Spitzhörn et al. 2022b) sowie Roboterstands stehen geeignete Methoden zur Kraftmessung zur Verfügung. Für den Roboterstands wurden geeignete Magazine, Greifer und -backen sowie Roboterprogramme entwickelt, die darüber hinaus für weitere Anwendungsfälle eingesetzt werden können.

Unter Einsatz des Roboterstands können Fügekräfte valide, reproduzierbar und zeiteffizient gemessen werden. Dabei können verschiedenste Fügeelemente automatisiert aufgenommen und gerade gefügt werden. Alternative Fügeverfahren (Drehen/Kippen) konnten über das Einladen von Bewegungsaufnahmen manueller Versuche vom Roboter durchgeführt werden, jedoch entsprechen die Fügekräfte nicht den in manuellen Versuchen ermittelten.

Als Nächstes soll der Roboterstand so weiterentwickelt werden, dass alternative Fügeverfahren und damit eine Imitation des menschlichen Verhaltens beim Fügen realitätsnäher ermöglicht wird. Weiterhin werden die gemessenen Fügekräfte auf dem Roboterstand für die Weiterentwicklung des numerischen Modells genutzt, um die Datenbasis zu erweitern. Mit dem numerischen Modell sollen perspektivisch im ema WD die notwendigen (Finger-)Fügekräfte berechnet werden und damit als eine Datenbasis für die ergonomische Bewertung nach z. B. EAWS zur Verfügung stehen. Weiterhin werden die Kraftdaten aus der Roboterkraftmessung sowie weiterer Messungen (Zug-Druck-Messungen, manuelle Kraftmessungen mit Probanden) im Planungssystem ema WD in eine Kraftdatenbank einfließen, die vom Kunden für ergonomische und zeitliche Bewertungen herangezogen werden könnte.

7. Literatur

- BAuA. (2021). AMR 13.2—Tätigkeiten mit wesentlich erhöhten körperlichen Belastungen mit Gesundheitsgefährdungen für das Muskel-Skelett-System. <https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Regelwerk/AMR/AMR-13-2.html> (30.12.2022)
- Blum A, Kanso, A, Scholer M, Müller R (2020). Untersuchung eines Prozessroboters als Mess-roboter in der Montage am Beispiel der Identifikation der dynamischen Parameter eines Roboterwerkzeuges. *tm - Technisches Messen*, 87(9), 564–574.
- Maier G W, Engels G, Steffen E (Hrsg.). (2020). *Handbuch Gestaltung digitaler und vernetzter Arbeitswelten*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-52979-9>
- Owen-Hill A (2016). *Robotiq—Force Sensors in Robotics Research—The Essential Guide* (09.01.23).
- Spitzhörn M, Ullmann S, Fritzsche L (2022a) Considering individual abilities and age-related changes in digital production planning—human-centered design of industrial work tasks with ema software. *Z. Arb. Wiss.* 76, 459–477, <https://doi.org/10.1007/s41449-022-00343-5>
- Spitzhörn M, Pollmer S, Kaiser A, Atitallah BB, Kanoun O (2022b) Bestimmung von Fügekräften und deren Einflussgrößen als Basis zur digitalen Arbeitsprozessbewertung. In GfA, Sankt Augustin (Hrsg.): *Frühjahrskongress 2022, Magdeburg Technologie und Bildung in hybriden Arbeitswelten*
- Universal Robots (Germany) GmbH. (2021). *Robotergefühle: Der Kraft-Momenten-Sensor*. Online: <https://www.universal-robots.com/de/blog/robotergefuehle-der-kraft-momenten-sensor/> (08.01.23)
- Walther, M. (2015). *Entwicklung und Evaluierung eines systematischen Vorgehens zur Erfassung von Aktionskräften in der Automobilproduktion*. Dissertation Technische Universität Chemnitz.

Danksagung: Dieser Beitrag wäre ohne die Unterstützung durch die Sächsische Aufbaubank SAB und die Europäische Union/EFRE vom 08.10.2020 bis zum 30.11.2022 (Projekt: SimKra, FKZ 100376593) nicht möglich gewesen.



Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.

Nachhaltig Arbeiten und Lernen

**Analyse und Gestaltung lernförderlicher
und nachhaltiger Arbeitssysteme
und Arbeits- und Lernprozesse**

69. Kongress der
Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.

Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover

01. – 03. März 2023

GfA-Press

Bericht zum 69. Arbeitswissenschaftlichen Kongress vom 01. – 03. März 2023

**Fakultät Maschinenbau, Institut für Berufswissenschaften der Metalltechnik (IBM) und
Institut für Fabrikanlagen und Logistik (IFA), Leibniz Universität Hannover**

Herausgegeben von der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.
Sankt Augustin: GfA-Press, 2023
ISBN 978-3-936804-32-4

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

© 2023 fröse multimedia, Frank Fröse

office@internetkundenservice.de · www.internetkundenservice.de