

Anwendungsleitfaden: Umrechnungshilfe für biomechanische Grenzwerte

Eine Praxishilfe für die Risikobeurteilung bei Arbeitsplätzen mit Cobots

Version V0.4 beta (Stand: 11.11.2022)

1 Einleitung

Die DGUV hat mehrere Forschungsprojekte ([FP317](#), [FP411](#), [FP430](#)) gefördert, in denen das IFA zusammen mit anderen Forschungseinrichtungen biomechanische Grenzwerte ermittelt hat, die nun bei der Bewertung mechanischer Gefährdungen durch sogenannte kollaborierende Roboter (Collaborative Robots, Cobots) herangezogen werden können. Für verschiedene Körperstellen mit unterschiedlichen Gewebekonstellationen (Haut, Muskel, Fett, Knochen) sind dabei charakteristische Deformationen in Abhängigkeit von Kraft und Druck tolerierbar, woraus spezifische Steifigkeiten resultieren. In der betrieblichen Praxis muss die Stoßkraft der Cobots mit geeigneten Messgeräten gemessen werden, um die Einhaltung der Grenzwerte sicherstellen zu können. Da sich die für verschiedene Körperregionen ermittelten Steifigkeiten teilweise von den in Messgeräten zum Einsatz kommenden Federraten unterscheiden, bedarf es der Umrechnung der gemessenen Kraft gemäß der tatsächlichen Konstellation. Hier setzt die Praxishilfe des IFA an: Die Umrechnungshilfe ermittelt energetisch optimierte Werte, die die reale Steifigkeit der einzelnen Messgeräte berücksichtigen, und ermöglicht so die Risikoeinschätzung dynamischer Stoßbelastungen mit nur wenigen Messungen.

Die Umrechnungshilfe entstand im Auftrag der Berufsgenossenschaft Holz und Metall (BGHM) im Rahmen des Projekts [IFA5160](#). Als Grundlage für die Umrechnung dienen die im [IFA Report 2/2022](#) ermittelten Biomechanischen Korridore. Zudem wird die Detektionsschwelle des Cobots berücksichtigt, um den Energieanteil zu bestimmen, der für die Umrechnung verwendet wird. Neben geglätteten Spitzendruckwerten kann die Tabelle zusätzlich auch einen Wert für die Flächenpressung (mittlerer Druck) ausgeben. Voreingestellt sind Steifigkeiten in fünf Clustern; die Tabelle ermöglicht aber auch Beurteilungen mit weniger Messgeräten: So kann eine bekannte Messgerätesteifigkeit auch manuell eingegeben werden.

Die hier zur Verfügung gestellte Umrechnungshilfe des IFA vereinfacht die Risikobeurteilung für Arbeitsplätze mit kollaborierenden Robotern deutlich. Wie genau die kritischen Prüfpunkte mithilfe der Umrechnungshilfe ermittelt werden können, wird im Folgenden erläutert.

2 Entstehung

Mit der Entwicklung sicherer Steuerungen und überwachter Sensoren für sogenannte kollaborierende Roboter (Collaborative Robots, Cobots) ließen sich die klassischen Schutzmechanismen erweitern – eine direkte Zusammenarbeit von Mensch und Roboter wurde möglich. Was aber, wenn menschliche Beschäftigte und Roboter doch einmal kollidieren? In diesem Fall muss ein echtes Verletzungsrisiko ausgeschlossen sein. Neben technischen Herausforderungen war es also nötig, eine Methodik zu entwickeln, um die auftretenden Kräfte zu messen und biomechanische Grenzwerte zu erforschen, die eine Minimierung des Verletzungsrisikos gewährleisten und nachprüfbar machen.

Das Institut für Arbeitsschutz (IFA) hat im Auftrag der Berufsgenossenschaft Holz und Metall (BGHM) hierzu eine Messmethodik entwickelt und getestet [1].

Die Forschungsförderung der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV) ermöglichte die Durchführung von zwei zusätzlichen DGUV Forschungsprojekten: „Anschlussuntersuchungen zur BGHM-Studie ‚Kollaborierende Roboter: Ermittlung von Schmerzeintrittsschwellen an der Mensch-Maschine-Schnittstelle‘“ (FP 411) und „Mensch-Roboter-Kollaboration – Partielle Ergänzungsuntersuchungen zur Eignung für die Übernahme in das DGUV Schriftenwerk sowie Normung“ (FP 430).

In Kooperation mit dem Fraunhofer Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung (IFF) konnten dabei dynamische Kraft- und Druckgrenzwerte sowohl für kantige als auch für flächige Belastungen ermittelt werden [2].

Im IFA-Projekt 5160 „Entwicklung und Evaluation eines messtechnischen Konzeptes für kollaborierende Roboter“ sollten die wissenschaftlichen Ergebnisse in den Stand der Technik überführt werden und in der technischen Praxis Anwendung finden. Hierzu war eine weitere Auswertung des gewonnenen Datenmaterials nach Steifigkeitsparametern erforderlich. Diese Aufgabe setzten IFA und IFF mit der Studie „Bestimmung biomechanischer Korridore zur Bewertung von mechanischen Gefährdungen und Ableitung von Steifigkeitsparametern für zukünftige Messmittel“ ([IFA-Report 2-2022](#) [3]) um.

In der Praxis können nun neben den Grenzwerten selbst auch passenden Messmittel verwendet werden. Dazu wurden die verschiedenen Körperstellen in fünf Cluster aufgeteilt und Fehler bis 25 % zugelassen. Grundsätzlich gilt: Je mehr Cluster (also Messgerätesteifigkeiten) zur Anwendung kommen, desto geringer werden die potenziellen Fehler. In der betrieblichen Praxis stehen häufig jedoch nur wenige Messgeräte unterschiedlicher Steifigkeit zur Verfügung.

Um beiden Anforderungen –Genauigkeit und Pragmatismus – bei der realen Gefährdungsbeurteilung gerecht zu werden, stellt das IFA mit der Umrechnungshilfe einen analytischen Ansatz vor, mit dem sich die Risiken in der Praxis einfacher und schneller bewerten lassen.

3 Zweck

Um die Restrisiken kollaborierender Roboter, die mit der Sicherheitsfunktion *Kraft- und Leistungsbegrenzung* abgesichert sind, auf ein akzeptables Niveau zu begrenzen, wurden Grenzwerte für dynamische Stoßbelastungen erforscht. Für 24 verschiedene Körperstellen wurden Kraft-Deformationskurven ermittelt, aus denen sich Maximalwerte der Stoßkräfte und Steifigkeiten ablesen lassen, die für eine messtechnische Überprüfung verwendet werden können.

Die vorliegende Umrechnungshilfe optimiert die Grenzwerte für die in Betrieben zum Einsatz kommenden Messgeräte und ermöglicht somit eine schnelle und effektive Bewertung.

4 Start

Die Tabelle ist als einfache Excel-Datei im .xlsx-Format ausführbar und verwendet ausschließlich Standardfunktionen. Vor der Ausführung ist [online](#) zu prüfen, ob die aktuelle Version vorliegt und die Tabelle nicht zwischenzeitlich zurückgerufen wurde.

5 Aufbau der Tabelle

5.1 Übersicht

Die Tabelle besteht aus zwei Arbeitsblättern: Blatt 1 stellt die eigentliche Umrechnungstabelle dar, während auf Blatt 2 ergänzende Hinweise zu finden sind. Die Umrechnungstabelle (Abbildung 1) gliedert sich in folgende Abschnitte: Im Kopfbereich (Zeile 1 bis 6) finden sich allgemeine Angaben zur Version der Tabelle, der Bereich für die Nutzereingaben, die Spaltenbezeichnungen und die Legende. Darunter befinden sich von links nach rechts die Liste der verschiedenen Körperstellen, gefolgt von den Grunddaten, die aus den biomechanischen Korridoren entnommen wurden, und schließlich der Ergebnisbereich mit den berechneten optimierten Werten.

Kopfbereich

Körperstellen

Grunddaten

Ergebnisbereich

Legende

- Eingabefeld
- Ergebnisbereich
- Ergebnisse für freie Eingabe
- Benutzeroberfläche
- Grunddaten
- Empfehlung
- rot nicht empfohlen
- kritischer Prüfpunkt
- nicht anwendbar
- anwendbar

Abbildung 1: Der beschriftete Screenshot zeigt die verschiedenen Bereiche der Umrechnungstabelle

5.2 Legende

Die Bedeutung der Felder, Abkürzungen und Farben lässt sich Tabelle 1 entnehmen.

Tabelle 1: Legende der Umrechnungstabelle und Bedeutung

Legende	
	Eingabefeld
	Ergebnisbereich
	Ergebnisse für freie Eingabe
	Benutzeroberfläche
	Grunddaten
	Empfehlung
	nicht empfohlen
	kritischer Prüfpunkt
	nicht anwendbar
	anwendbar
SH70A	Shore-A-Härte 70 (7 mm)
c1 [N/mm]	Steigung bis Knickpunkt

c2 [N/mm]	Steigung ab Knickpunkt
d_t [mm]	Deformation Knickpunkt
F_t [N]	Kraft Knickpunkt
F_max [N]	Maximalkraft
d_c2 [mm]	maximale Deformation
E_max [mJ]	Gesamtenergie

5.3 Eingaben

Im Eingabebereich (Abbildung 2) können leichte Modifikationen und Einstellungen vorgenommen werden:

	D	E	F	G	H	I	J	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X
1																	
2			1	Ersatzfläche:(0.85)		0.85	2	Messgerät	150	75	40	25	10 [N/mm]			3	25 Freie
3		50	[N]	Flächenpressung:		0	1=ja	Auflage: SH70A	130	130	130	130	130 [N/mm]			###	Eingabe
4				Faktor:		1.2		Ersatzsteifigkeit:	69.6	47.6	30.6	21.0	9.3 [N/mm]			25.0	[N/mm]
5																	

Abbildung 2: Eingabebereich mit hellblau hervorgehobenen Eingabefeldern

- 1 Hier kann die Detektionsschwelle (Feld E3) eingegeben werden, die in der Steuerung der Applikation verwendet wird. Im Dropdown-Menü sind die Werte 0, 25, 50, 75 oder 100 N auswählbar, voreingestellt sind 50 N.
- 2 Zu Berechnung des Spitzendrucks wird eine Ersatzfläche (Feld I2, des in den Studien verwendeten Kontaktkörpers verwendet. Die voreingestellten 0,85 cm² wurden aus den Studiendaten der Forschungsprojekte abgeleitet und sollten ohne Fachkenntnisse nicht verändert werden. Zusätzlich besteht die Option, die Flächenpressung (Feld I3) zu verwenden: Wird dieser Wert auf 1 gesetzt, wird anstatt eines Spitzendrucks ein mittlerer Druckwert ausgegeben.
- 3 Neben den fünf voreingestellten Messgeräten (Spalte P bis T) mit Steifigkeiten von 150 N/mm, 75 N/mm, 40 N/mm, 25 N/mm und 10 N/mm mit einer 7 mm dicken Auflage der Shore-A-Härte 70 kann in der freien Eingabe (Feld W2) eine beliebige Messgerätesteifigkeit ausgewählt werden. Steifigkeiten gängiger, am Markt verfügbarer Geräte sind hinterlegt. Wird keine Auflage auf dem Messgerät verwendet, sollte in Feld W3 der Wert 9999999 (###) stehen, für die 7 mm dicke Auflage der Shore-A-Härte 70 kann 130 N/mm verwendet werden.

5.4 Körperstellen

Im Drop-down-Menü in Zeile 6 lassen sich die betroffenen Körperstellen auswählen. Als Voreinstellung sind die Körperbereiche „Obere Extremitäten“ und „Hand & Finger“ ausgewählt. Bei der Kontaktgeometrie wird zwischen stumpf und kantig unterschieden. Bei stumpfer Geometrie wird das Ergebnis in Newton [N] ausgegeben, für kantige Geometrien als Druckwert in N/cm².

5.5 Grunddaten

In der Tabelle sind in den Spalten D bis J Grunddaten hinterlegt, die der im IFA Report 2/2022 vorgestellten Studie zur Ermittlung biomechanischer Korridore entnommen sind und die für die Berechnung und Umrechnung benötigt werden [3]. Die Grunddaten sind hier informativ angegeben.

In den [Hintergrundinformationen](#) weiter unten findet sich eine Kurzbeschreibung über die prinzipielle Vorgehensweise der Berechnung.

5.6 Ergebnisbereich

Für die fünf voreingestellten Steifigkeiten werden im Ergebnisbereich Werte für Kraft und Druck ausgegeben, die der Anwender für seinen Risikobeurteilung verwenden kann. Hier lassen sich verschiedene Körperstellen vergleichen und feststellen, welcher Wert am kritischsten ist. Als kritischer Prüfpunkt ist immer die Konstellation zu verwenden, die bei einer Messgeräte-Konstellation die geringsten Werte innerhalb des Körperbereiches anzeigt. Für den Hand- und Armbereich sind die beiden kritischen Prüfpunkte lila hervorgehoben. Werden weitere Körperstellen betrachtet, ist die Identifizierung der kritischsten Punkte manuell vorzunehmen. Liegt die Steifigkeit des Messgerätes deutlich außerhalb des erwarteten Bereichs, sind nur weiße Felder zu sehen. Zusätzlich werden im gelb hinterlegten Bereich die Ergebnisse angezeigt, die für die Steifigkeit aus der freien Eingabe berechnet wurden. In Spalte V erfolgt zusätzlich eine Prüfung, ob der berechnete Wert anwendbar ist (grüner Haken) oder ob es zu Problemen bei der Berechnung kam, sodass er nicht anwendbar ist (rotes Kreuz). Zu Fehlern kann es kommen, wenn hohe Detektionsschwellen eingestellt sind. Die Ergebnisse sind auf 5 N bzw. 5 N/cm² gerundet.

6 Anwendungsbeispiel

Ein Integrator hat für eine Gefährdungsbeurteilung Arbeitsbereiche und Tätigkeiten festgelegt. Dabei wurde festgestellt, dass an einem Arbeitsplatz mit einem kollaborierenden Roboter Gefährdungen im Bereich der Hände und Arme auftreten können. Er hat daher eine reduzierte Geschwindigkeit am Roboter eingestellt und die Detektionsschwelle des Roboters in den Sicherheitseinstellungen auf 50 N gesetzt. Nun soll mit zwei Messgeräten ermittelt werden, welche verbleibenden Gefährdungen noch auftreten können. Zur Verfügung steht ein Messgerät mit einer Steifigkeit von 75 N/mm und eines mit einer Steifigkeit von 25 N/mm; beide Messgeräte haben eine 7 mm dicke Auflage der Shore-A-Härte 70. Nach der Messung kann er mithilfe des Umrechnungsprogramms die Grenzwerte überprüfen und so die Gefahren beurteilen.

Körperbereich	Körperstelle	Kontaktgeometrie	170N/mm +7mm SH70A	75N/mm +7mm SH70A	40N/mm +7mm SH70A	25N/mm +7mm SH70A	12N/mm +7mm SH70A	Einheit	
(C) Obere Extremität (12) Deltamuskel	Stumpf					175	120	[N]	✓
(C) Obere Extremität (12) Deltamuskel	Kantig					155	110	[N/cm ²]	✓
(C) Obere Extremität (13) Oberarmknochen	Stumpf			180	150	110		[N]	✓
(C) Obere Extremität (13) Oberarmknochen	Kantig			170	145	105		[N/cm ²]	✓
(C) Obere Extremität (14) Speichenknochen	Stumpf			200	170	120		[N]	✓
(C) Obere Extremität (14) Speichenknochen	Kantig			190	160	115		[N/cm ²]	✓
(C) Obere Extremität (15) Unterarmmuskel	Stumpf			205	170	120		[N]	✓
(C) Obere Extremität (15) Unterarmmuskel	Kantig			205	170	125		[N/cm ²]	✓
(C) Obere Extremität (16) Ellenbogengrube	Stumpf					160	115	[N]	✓
(C) Obere Extremität (16) Ellenbogengrube	Kantig					145	110	[N/cm ²]	✓
(D) Hand & Fingerring (17)/(18) Zeigefingerkuppe	Stumpf		430	355	285			[N]	✓
(D) Hand & Fingerring (17)/(18) Zeigefingerkuppe	Kantig		370	310	250			[N/cm ²]	✓
(D) Hand & Fingerring (19)/(20) Zeigefingergelenk	Stumpf		360	300	245			[N]	✓
(D) Hand & Fingerring (19)/(20) Zeigefingergelenk	Kantig		270	225	185			[N/cm ²]	✓
(D) Hand & Fingerring (21) Daumenballen	Stumpf			345	275	230		[N]	✓
(D) Hand & Fingerring (21) Daumenballen	Kantig			300	245	205		[N/cm ²]	✓
(D) Hand & Fingerring (22)/(23) Handinnenfläche	Stumpf			365	295			[N]	✓
(D) Hand & Fingerring (22)/(23) Handinnenfläche	Kantig			335	270			[N/cm ²]	✓
(D) Hand & Fingerring (24)/(25) Handrücken	Stumpf			250	205	170		[N]	✓
(D) Hand & Fingerring (24)/(25) Handrücken	Kantig			205	170	145		[N/cm ²]	✓

Abbildung 3: Umrechnungstabelle mit kritischen Prüfpunkten (violett hervorgehoben) für den Hand und Arm-Bereich.

In der Umrechnungshilfe (Abbildung 3) geht er die Körperstellen an der Hand und am Arm durch und identifiziert die beiden kritischen Prüfpunkte. Im Bereich der Hand sind die Werte für den Handrücken die niedrigsten und definieren damit die kritische Schwelle: 250 N und 205 N/cm² sollen hier nicht überschritten werden, wenn mit dem 75-N/mm-Messgerät gemessen wird. Im Bereich des Armes ermittelt er, dass mit dem 25-N/mm-Messgerät die Grenzwerte 150 N und 145 N/cm² nicht überschritten werden sollen.

Nun kann er die Messungen durchführen und prüfen, ob die Grenzwerte eingehalten werden. Wenn die Messungen zeigen, dass die Werte nicht eingehalten werden, müssen weitere Schutzmaßnahmen festgelegt und umgesetzt werden. So können zum Beispiel die überwachte Geschwindigkeit weiter reduziert und die Messung wiederholt werden, bis nachgewiesen ist, dass alle Werte eingehalten werden. Die Messergebnisse und die zugehörige sicher reduzierte Geschwindigkeit sind in der Gefährdungsbeurteilung zu dokumentieren, auch sind Maschinenbetreiber, Bediener und Anwender zu informieren.

Anmerkung: Eine Arbeitshilfe zur Durchführung der Messungen findet sich zum Beispiel in der „Messspezifikation für Kraft- und Druckmessungen an Applikationen von kollaborierenden Robotersystemen“ [4].

7 Limitationen

Achtung: Die Umrechnungshilfe berechnet nur einen idealisierten Vergleichswert. Mögliche zusätzliche biomechanische Einflüsse werden in der vorliegenden Version vernachlässigt, da erwartet wird, dass für nah beieinanderliegende Steifigkeiten die potenziellen Unterschiede in der Größenordnung der vorgenommenen Rundung liegen.

Für die fünf voreingestellten Messgeräte wurde die Ersatzsteifigkeit aus einer Reihenschaltung der Federsteifigkeit und der Auflage (~130 N/mm) bestimmt – diese Berechnung erscheint hinreichend konservativ und kann ggf. zukünftig mit exakteren Daten noch optimiert werden.

Die Umrechnungstabelle berücksichtigt nicht die regelungstechnischen Eigenschaften des technischen Systems, weshalb die Systeme mit mehreren Steifigkeiten geprüft werden sollten, wie im Anwendungsbeispiel beschrieben.

Hinweis: Wenn die Sicherheitsparameter an den Applikationen nicht richtig eingestellt sind, ist zu erwarten, dass der Sollwert nicht eingehalten werden kann! Bisherige Untersuchungen zeigen, dass viele Applikationen mit falsch eingestellten Sicherheitsparametern die Grenzwerte unnötigerweise übertreten und damit eine vermeidbare Gefährdung aufweisen.

Um eine ausreichend sichere Applikation zu gewährleisten, sind mindestens zwei Messungen zu empfehlen – mit je einer harten und einer weichen Messgerätekonfiguration.

8 Hintergrundinformationen

8.1 Prinzip der energetischen Umrechnung:

Aus den Kennlinien $f(x)$ der Biomechanischen Korridore (vgl. [3]) wird durch Integration zwischen Detektionsschwelle F_D und Maximum F_{max} die zulässige Energie E ermittelt. Unter Berücksichtigung der realen Messgeräte-Kennlinie k , wird ein optimierter Ersatzwert F_{Neu} berechnet, sodass das Messgerät nach Erreichen der Detektionsschwelle dieselbe Energie aufnimmt. Die Formel zeigt die zugrunde liegende mathematische Gleichung, die durch die Umrechnungshilfe gelöst wird.

$$\begin{aligned} E &= \int_{x(F_D)}^{x(F_{Max})} f(x) dx \\ &= 0.5 * \Delta x^2 * k + \Delta x * F_D \\ \text{mit } \Delta x &= (F_{Neu} - F_D)/k \end{aligned}$$

Der Ersatzwert kann für eine vereinfachte Überprüfung in der Praxis herangezogen werden, wenn die Steifigkeiten von Messgerät und Biomechanischem Korridor nahbeieinander liegen. (Anmerkung: Umrechnungen auf sehr unterschiedliche Steifigkeiten sind zwar technisch möglich, aber biomechanisch nicht immer sinnvoll. Bisher gesammelte Erfahrungen zeigen, dass Messungen mit *geringeren* Steifigkeiten potenziell zu sichereren Ergebnissen führen, da die auftretenden effektiven Massen vieler Systeme unter weicheren Konstellationen ansteigen.)

8.2 Bestimmung Spitzendruck bzw. Flächenpressung:

Analog erfolgt das Vorgehen für den Druck, wobei hier ein zusätzlicher Faktor berücksichtigt wird: Er wird aus der Ersatzfläche des in den Forschungsprojekten verwendeten Prüfkörpers (F-Q10) bestimmt (mittlere Ersatzfläche F-Q10= $\sim 0,85 \text{ cm}^2$). Durch diese analytische Methode werden potenzielle Ausreißer in den Originaldaten eliminiert, was zu einer Glättung der Spitzendruckwerte und besserer Vergleichbarkeit führt.

Außerdem kann die Option „Flächenpressung“ verwendet werden, wodurch die Kraft gleichmäßig auf die Gesamtfläche (experimentell ermittelte Gesamtfläche F-Q10= $\sim 1,2 \text{ cm}^2$) verteilt wird. Die hier verwendeten Ersatzflächen können von Filter- und Auflösungseigenschaften der verwendeten Messtechnik abhängen.

9 Übertragbarkeit

Die hier am Beispiel kollaborierender Roboter vorgestellte Bewertung lässt sich prinzipiell auch auf mechanische Gefährdungen im Allgemeinen anwenden. Die Fachleute des IFA unterstützen hierbei gerne und beraten, welche Anpassungen gegebenenfalls erforderlich sind.

10 Kontakt

Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA)

Internet: <https://www.dguv.de/webcode.jsp?query=d130119>

E-Mail: jan.zimmermann@dguv.de

11 Literaturverzeichnis

[1] Huelke, M.; Ottersbach, H.-J. (2012): How to approve Collaborating Robots. The IFA force pressure measurement system. In: Proceedings of the 7th International conference on the Safety of Industrial Automated Systems, Bd. 7. International conference on the safety of industrial automated systems (SIAS). Montreal, Canada, October 11-12. Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST).

[2] Behrens, R.; Pliske, G.; Umbreit, M.; Piatek, S.; Walcher, F.; Elkmann, N.: A Statistical Model to Determine Biomechanical Limits for Physically Safe Interactions With Collaborative Robots. Front. Robot. AI (2022) . doi: [10.3389/frobt.2021.667818](https://doi.org/10.3389/frobt.2021.667818)

[3] Behrens, R., Zimmermann, J.: Bestimmung biomechanischer Korridore zur Bewertung von mechanischen Gefährdungen und Ableitung von Steifigkeitsparametern für zukünftige Messmittel, [IFA-Report 2-2022](#), Berlin, April 2022

[4] BG ETEM: Messspezifikation für Kraft- und Druckmessungen an Applikationen von kollaborierenden Robotersystemen MS-ET-01. 2018

Autor:

Jan Zimmermann

Institut für Arbeitsschutz, Abteilung Unfallprävention: Digitalisierung – Technologien