



BG/BGIA-Empfehlungen für die Gefährdungsbeurteilung nach Maschinenrichtlinie

**Gestaltung von Arbeitsplätzen mit kollaborierenden
Robotern**

Herausgeber

BGIA – Institut für Arbeitsschutz der
Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung

Alte Heerstraße 111
53757 Sankt Augustin
Tel.: 02241 231-02
Fax: 02241 231-2234
E-Mail: bgia-info@dguv.de
Internet: www.dguv.de/bgia

Ausgabe Oktober 2009, **Fassung Februar 2011**
U 001/2009

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Vorbemerkung	4
1 Einleitung.....	5
2 Zweck	6
3 Kollision und Verletzungskriterien.....	7
4 Vorgehensweise bei der Anwendung der BG/BGIA-Empfehlungen	11
5 Anforderungen	12
5.1 Technologische Anforderungen.....	12
5.2 Medizinisch-biomechanische Anforderungen	13
5.3 Ergonomische Anforderungen	16
5.4 Arbeitsorganisatorische Anforderungen	16
6 Prüfung der Anforderungen.....	17
7 Vorgehensweise bei der messtechnischen Erfassung der Verletzungskriterien.....	19
8 Beispiel zur Anwendung der BG/BGIA-Empfehlungen	20
9 Dokumentation	28
Anhang:	29
1 Dokumentvorlage für die Festlegung von Körperbereichen und Grenzwerten eines Kollisionsfalls aus Tabelle 2	30
2 Definitionen orientierender Gestaltungsgrößen für Kollisionsflächen.....	31
3 Gestaltungswerte auf der Basis der Klemm-/Quetschkräfte aus Tabelle 2	32
4 Gestaltungswerte auf der Basis der Stoßkräfte aus Tabelle 2	33
5 Checkliste und Empfehlungen zur Anwendung der BG/BGIA-Empfehlungen in der betrieblichen Praxis	34

Vorbemerkung

BG/BGIA-Empfehlungen für die Gefährdungsbeurteilung nach Maschinenrichtlinie werden von

- den Trägern der gesetzlichen Unfallversicherung
- und
- dem BGIA – Institut für Arbeitsschutz

herausgegeben. Sie haben das Ziel, den Unternehmen eine Hilfe für den auf die Unfallverhütung bezogenen Teil der Gefährdungsbeurteilung zu geben.

Diese BG/BGIA-Empfehlungen wurden erarbeitet in Zusammenarbeit mit

- Fachausschuss Maschinenbau, Fertigungssysteme, Stahlbau der Berufsgenossenschaft Metall Nord-Süd.

1 Einleitung

Für den Bereich der Industrieroboter werden in den Normen DIN EN ISO 10218, Teil 1 und Teil 2, die sicherheitstechnischen Anforderungen für das Anwendungsgebiet „Kollaborierende Roboter (Collaborative Robots)“ definiert. Betroffen sind Arbeitstätigkeiten, bei denen es zu direktem nahen Kontakt zwischen dem kollaborierenden Roboter und arbeitenden Personen kommt.

Der in diesen BG/BGIA-Empfehlungen verwendete Begriff „Kollaborierender Roboter“ schließt neben dem Roboter selbst den Endeffektor – das Werkzeug, das am Roboterarm adaptiert wird und mit dem der Roboter Tätigkeiten durchführt – sowie die damit bewegten Gegenstände ein.

Dies betrifft z. B. Kleinroboter, die in Fertigungsverfahren laufend mit Personen in nahen und überschneidenden Arbeitsräumen eingesetzt werden. Diese Handlungsanleitung kann auch im Bereich Serviceroboter hilfreich sein.

Bei diesen Robotereinsätzen gibt es für bestimmte Arbeitsräume keine trennenden Schutzeinrichtungen in der Weise mehr, dass eine Kollisionsgefahr zwischen Roboter und betroffenen Personen in jedem Fall sicher ausgeschlossen wird. Hier sind jedoch andere geeignete Schutzmaßnahmen einzusetzen, um die Möglichkeit einer Kollision zu bestimmen und mit der Robotersteuerung ständig zu minimieren. Trotzdem bleibt ein restliches Kollisionsrisiko bestehen.

Für solche Arbeitsbereiche sind Risikobeurteilungen durchzuführen, in denen neue, für den Fall einer Kollision geltende sicherheitstechnische Anforderungen berücksichtigt werden müssen. Hierdurch werden die Verletzungsrisiken bei einer Kollision in einem niedrigen und tolerablen Niveaubereich gehalten.

Die von diesen BG/BGIA-Empfehlungen umfassten Kollisionen sind als unerwünschte Ereignisse innerhalb von Arbeitstätigkeiten zu bewerten, wenngleich diese keine Arbeitsunterbrechung oder keinen Arbeitsausfall der beteiligten Personen zur Folge haben müssen. Willentliche und im Sinne einer Arbeitsaufgabe notwendige Kontakte zwischen einer Person und einem technischen Arbeitsmittel sind nicht gemeint. Eine Kollision kann jedoch eine Unterbrechung oder sogar zeitweise Beendigung der Arbeitstätigkeit mit u. U. weiteren fachlichen Behandlungen der betroffenen Person und eine Neubewertung des Arbeitsplatzes zur Folge haben.

2 Zweck

In diesen BG/BGIA-Empfehlungen sind sicherheitstechnische Anforderungen für Arbeitstätigkeiten mit kollaborierenden Robotern in Ergänzung bzw. als Präzisierung der Anforderungen in den Normen DIN EN ISO 10218, Teil 1 und 2, aufgeführt. Sie werden dem Anwender als Teil der Risikobeurteilung bei Arbeitstätigkeiten mit kollaborierenden Robotern empfohlen, um sicherzustellen, dass Unfälle vermieden werden.

Technologische, medizinisch-biomechanische, ergonomische und arbeitsorganisatorische sicherheitstechnische Anforderungen werden aufgeführt. Je nach Risikoanalyse sind weitere sicherheitstechnische Anforderungen einzubeziehen.

Besonders zu beachten sind die medizinisch-biomechanischen Anforderungswerte. Sie sind in Analogie zu den Grenzwerten abgeleitet, wie sie für Belastungen und daraus resultierende Beanspruchungen des menschlichen Körpers an Schließkanten für alle Arbeits- und Verkehrsbereiche festgelegt sind. Werden sie berücksichtigt, dann bleiben die Beanspruchungen des Menschen durch mechanische Einwirkungen auf dem niedrigen, dem Stand und den Regeln der Technik entsprechenden Niveau. Das für Arbeitstätigkeiten mit kollaborierenden Robotern angestrebte Schutzziel wird jedoch nur bei Einhaltung aller Anforderungen dieser Empfehlungen als Ergänzung bzw. Präzisierung der Anforderungen aus den Normen DIN EN ISO 10218, Teil 1 und 2, erzielt.

Für die Überprüfung der sicherheitstechnischen Anforderungsgrenzwerte werden weiterhin Messprinzipien beschrieben, die in geeigneten Messgeräten zum Messen von Werten der Verletzungskriterien technisch ausgeführt sein müssen. Ergänzend hierzu wird eine Verfahrensweise für die messtechnische Ermittlung von Anforderungswerten beschrieben.

Weiterhin bieten diese Empfehlungen ein Anwendungsbeispiel aus der Praxis, siehe Abschnitt 8, ein Formblatt zur Festlegung der im Einzelfall anzuwendenden Grenzwerte der relevanten Verletzungskriterien, orientierende Werte zur Gestaltung von Kollisionsflächen kollaborierender Roboter und eine Checkliste für die Anwendung der BG/BGIA-Empfehlungen im Rahmen einer Risikobeurteilung in der betrieblichen Praxis.

3 Kollision und Verletzungskriterien

Bei den hier gemeinten Kollisionen zwischen einem kollaborierenden Roboter und einer Person kommt es zu elastisch-plastischen Verformungen bestimmter Körperbereiche, während die kollidierende Roboterstruktur – Teilbereiche von Roboter, Werkzeug und/oder Lastgegenständen – im Wesentlichen nicht verformt wird. Dabei entsteht am Körper eine dreidimensionale Kontaktfläche, deren Größe und Form sich während des Kollisionsprozesses dynamisch ändert. Im Falle einer länger andauernden Quetschung/Einklemmung eines Körperteiles bleibt eine dreidimensionale Verformungsfläche des Körperbereiches bestehen.

In der Kontaktfläche werden partielle dynamische Kollisionskräfte und -drücke übertragen. Sie bestimmen das Verletzungspotenzial. Daher werden in den medizinisch-biomechanischen Anforderungen dieser Empfehlungen Grenzwerte für die Verletzungskriterien „Kraft“ (als Klemm-/Quetschkraft oder Stoßkraft) und „Druck/Flächenpressung“ festgelegt. Die Grenzwerte der Kräfte geben die maximal zulässige äußere einwirkende Gesamtkraft in der Kollisionsfläche an. Als Begrenzung der in der Kollisionsphase wirkenden Druckbelastung ist der maximal zulässige Partialdruck in der Kollisionsfläche angegeben. Die Einhaltung der Grenzwerte beider Verletzungskriterien stellt daher sicher, dass die Verletzungsschwere bei der lokalen Belastung eines bestimmten Körperteils im tolerablen Bereich bleibt.

Das Zusammenwirken beider Verletzungskriterien ist in Bild 1 dargestellt. Ein Kollisionsprozess wird in diesem Beispiel in der Risikoanalyse als ein Klemm-/Quetschvorgang am Hand-Finger-System festgestellt. Als Grenzwerte werden für das Hand-Finger-System eine maximale äußere Gesamtkraft von 135 N und ein maximaler Partialdruck in der Kollisionsfläche von 50 N/cm² angenommen.

Im linken Kraft/Flächen-Diagramm ist der Druckgrenzwert als lineare Funktion und der Kraftgrenzwert als Konstante eingetragen. Der Kraftgrenzwert von 135 N begrenzt Flächenpressungen von 50 N/cm² mit höheren Kräften ab 135 N und erzeugt damit die geknickte Kennlinie des rechten oberen Kraft/Flächen-Diagramms.

Die Kennlinie teilt erlaubte von unerlaubten Flächenpressungen ab. Die Knickstelle liegt bei einer Flächengröße von 2,7 cm². Dies entspricht dem Quotienten aus den oben genannten Grenzwerten von Kraft und Druck. Für Kollisionsflächen ab 2,7 cm² entstehen somit bei homogenen Flächenpressungen Drücke im Bereich bis 50 N/cm². Bei Kollisionsflächen unter 2,7 cm² muss die äußere Gesamtkraft reduziert werden, um den Grenzwert von 50 N/cm² nicht zu überschreiten. Im unteren rechten Diagramm ist der Verlauf des Drucks (Flächenpressung) bezogen auf die Kollisionsfläche dargestellt.

Der Grenzwert für den Druck (Flächenpressung) verhindert lokale Überbeanspruchungen durch zu hohe Drücke aufgrund zu kleiner Kollisionsflächen. Der Grenzwert für die maximale äußere Kollisionskraft verhindert Überbeanspruchungen der Körperumgebung bei größeren Kollisionsflächen, in denen es ohne Begrenzung zu hohen Kräften bei gleichbleibendem Druck kommen könnte.

Die Grenzwerte der für den jeweiligen Kollisionsfall geltenden Verletzungskriterien von Kraft und Druck – festgestellt im Rahmen der Risikoanalyse – sind für alle unter Kollisionsrisiko stehenden Körperbereiche einzuhalten. Hierfür ist ein prüftechnisch akzeptabler Nachweis erforderlich. Durch gestalterische Maßnahmen im Rahmen von Sensorik, Robotersteuerung und konstruktiver Gestaltung kollidierender Roboterteile lässt

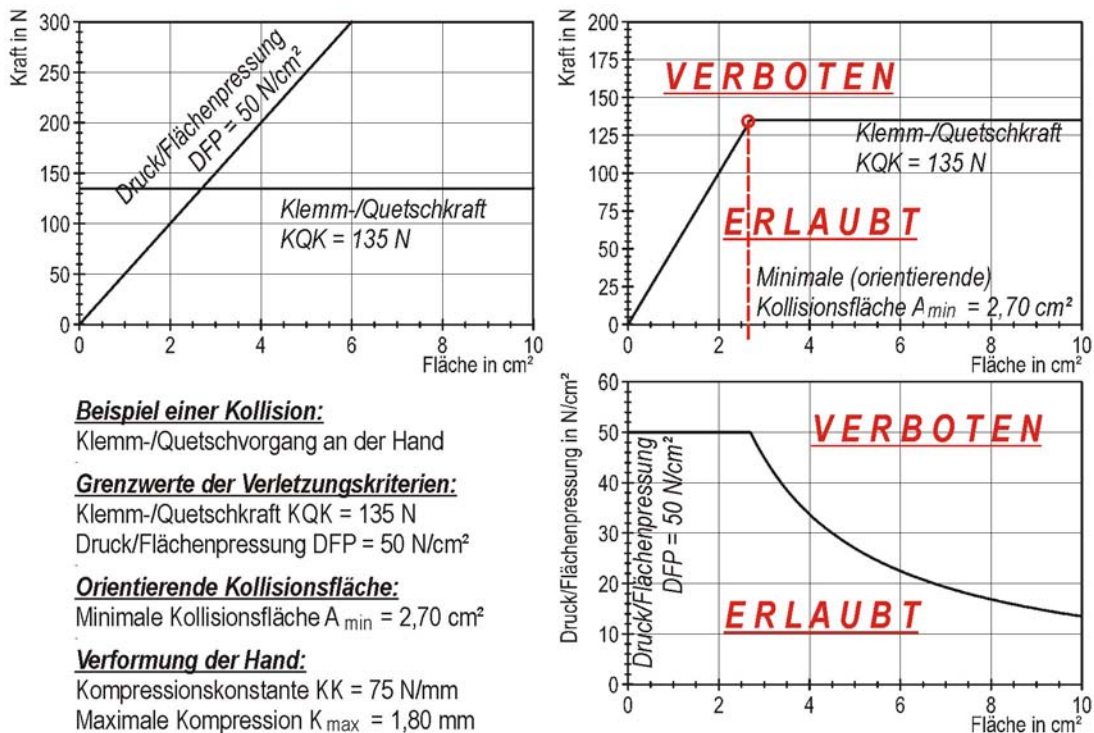


Bild 1: Beispielhafte Darstellung des Konzeptes der Verletzungskriterien für angemessene Grenzwerte des Körpereinzelsbereichs „Hand und Finger“

sich die Einhaltung der Grenzwerte und damit eines tolerablen Verletzungsschwerebereichs erreichen.

Wenn es bei einem Kollisionsprozess zu einem dynamischen Kraftimpuls mit anschließendem deutlichen Abklingen der Krafteinwirkung bis in den Null-Bereich kommt, sind die Grenzwerte für das Verletzungskriterium „Stoßkraft“ als sicherheitstechnische Anforderungen einzuhalten. Liegt dagegen ein Kraftanstieg auf ein bestimmtes Halteniveau ohne wesentliche anfängliche dynamische Kraftüberhöhung vor, sind die Grenzwerte des Verletzungskriteriums „Klemm-/Quetschkraft“ einzuhalten. Die Grenzwerte beider Verletzungskriterien – „Stoßkraft“ und „Klemm-/Quetschkraft“ – sind zu verwenden, wenn es im gesamten Kraftverlauf zu dynamischen Kraftimpulsen und Halteniveaus kommt.

Durch eine günstige Gestaltung der kollidierenden Flächen von Roboterteilen kann die Streuung der Partialdrücke in der Kollisionsfläche reduziert werden. Wenn es zu einer flächenhaft gleichmäßigen Beanspruchung kommt, kann der Quotient aus Grenzkraft und Grenzdruck in grober Annäherung zur Schätzung einer minimal erforderlichen Größe der Kontaktflächen dienen. Bei Kontaktflächen, deren Größe oberhalb dieses Minimalwertes liegen, kann eine Einhaltung der Druckgrenzwerte erreicht werden. Eine Reduzierung der äußeren Belastungskraft begünstigt dies. Diese Abschätzung dient

als Orientierungswert für die konstruktive Beurteilung und Gestaltung betroffener Roboterbereiche.

Für eine Abschätzung der Verformungswege bis zum Erreichen der Kraftgrenzwerte durch kollidierende Roboterteile werden für alle Körpereinzelsbereiche Verformungskonstanten angegeben. Diese Angaben beruhen auf der in erster Näherung ausreichenden Annahme eines linearen Verformungsverhaltens der Körperbereiche. Die Grenzwerte der Verletzungskriterien und die Verformungskonstanten werden für die Einzelbereiche eines detaillierten Körpermodells angegeben.

In Bild 2 ist ein Beispiel für einen Kollisionsprozess zwischen einem Roboterteil und einem Kontaktbereich am Oberarm dargestellt. Am Kontaktpunkt ist zur Verdeutlichung des Geschwindigkeit/Weg-Verhaltens ein Koordinatensystem eingezeichnet. Das Diagramm zeigt einen Geschwindigkeitsverlauf mit Detektionszeitpunkt der Kollision und der daraufhin erfolgenden Reversionsbewegung des kollidierenden Roboterteils in Abhängigkeit von der Annäherung an den Arm und von dessen Verformungsverhalten.

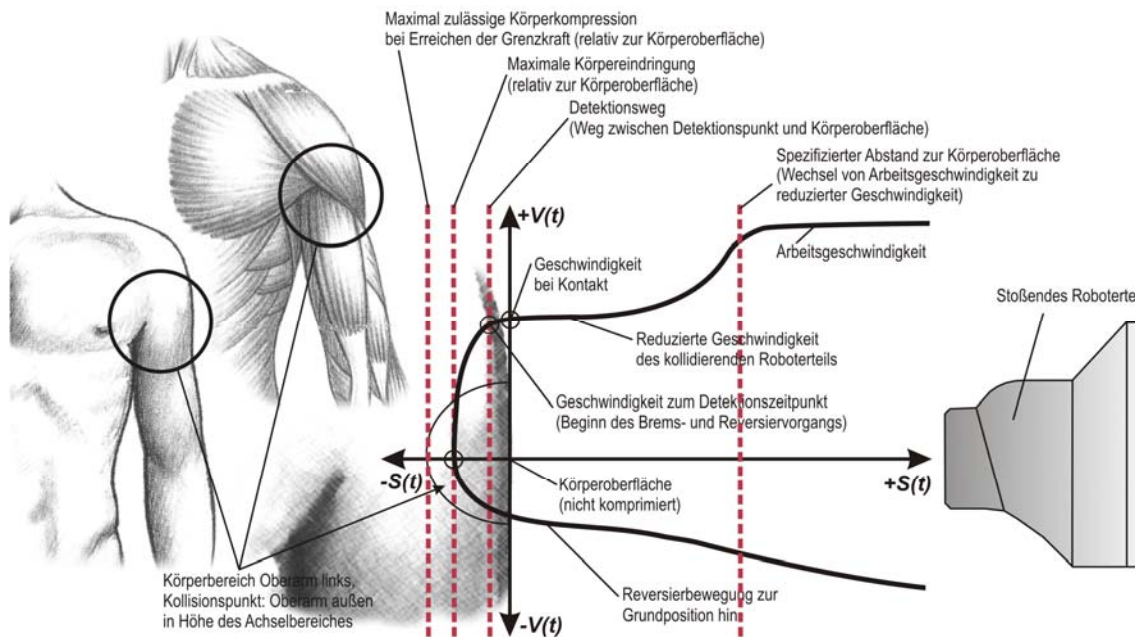


Bild 2: Beispiel eines Kollisionsprozesses zwischen einem Roboterteil und dem Oberarm mit Geschwindigkeits/Weg-Verlauf des kollidierenden Roboterteils

Auf der Weg-Achse sind vier Grenzmarkierungen eingetragen. Im Wegbereich vor dem Kontakt wird die Arbeitsgeschwindigkeit auf eine reduzierte Geschwindigkeit heruntergeregelt. Die Distanz zur Körperoberfläche bei Reduzierung der Geschwindigkeit wird durch den rechten Marker angedeutet.

Kommt es bei weiterer Annäherung zur Kollision, verursacht beispielsweise durch Fehlverhalten der Robotersteuerung, dann wird der Kontakt zwischen Oberarm und Roboter mit einem Kraftsensor im Roboterarm detektiert. Für die Detektionsfeststellung aufgrund der Überschreitung einer überwachten Kraftschwelle wird ein bestimmter

Verformungsweg am Kontaktpunkt des Oberarmes benötigt, der durch die erste Wegmarkierung links vom Nullpunkt der Wegachse dargestellt ist.

Das stoßende Roboterteil hat zu diesem Zeitpunkt den Kontaktbereich des Oberarms geringfügig – bei bis hierhin gleichbleibender reduzierter Geschwindigkeit – verformt. Zum Zeitpunkt der Detektion wird der Brems- und Reversierungsvorgang des stoßenden Roboterteils ausgelöst. Seine Ausführungsgeschwindigkeit hängt von der Steuerung und dem elektromechanischen Bewegungsverhalten des Roboters ab.

Bis zur vollständigen Reduzierung der Geschwindigkeit auf Null hat der stoßende Roboterteil den Oberarm weiter verformt. Der Weg am Umkehrpunkt der Geschwindigkeit ist durch die zweite Wegmarke links vom Nullpunkt dargestellt. Danach beginnt die Reversierung des stoßenden Roboterteils mit einem programmierten Geschwindigkeitsverlauf bis zu einer sicheren Grundposition. Die dritte Wegmarke links vom Nullpunkt der Wegachse stellt den Bereich maximal zulässiger Körperverformung dar, die als Quotient aus der zulässigen äußeren Belastungskraft und der Kompressionskonstanten des betroffenen Körperbereiches abgeschätzt werden kann.

In diesem Beispiel wird die tolerable Verletzungsschwere an diesem Körperpunkt durch eine angemessene Reduzierung der Geschwindigkeit des Roboterteils in der Nähe des Oberarms, durch eine sensibel eingestellte Detektion des Kontaktes mit der verfügbaren Kraftsensorik, durch ein ausreichend verfügbares Brems- und Reversierungsverhalten des Roboters und eine relativ ebene Kollisionsfläche des stoßenden Roboterteils eingehalten.

4 Vorgehensweise bei der Anwendung der BG/BGIA-Empfehlungen

Die Vorgehensweise bei der Anwendung dieser BG/BGIA-Empfehlungen in der betrieblichen Praxis kann mit der Checkliste, siehe Seite 34, überprüft werden. In dieser Checkliste sind Kriterien, Stichworte und Hilfsmittel aufgeführt, die zur Erstellung einer Risikobeurteilung für den Betrieb eines kollaborierenden Roboters beachtet werden sollten. Vonseiten des Anwenders und Roboterherstellers sind dazu umfangreiche Informationen bereit zu stellen.

Alle Elemente, Informationen, Daten, Messungen, Festlegungen und Ergebnisse, die im Rahmen der sicherheitstechnischen Teilrisikobeurteilung nach diesen Empfehlungen durchgeführt und/oder geprüft werden müssen, sind in einem geeigneten Dokument zusammenfassend aufzuführen. Die Reihenfolge der Punkte und Unterpunkte der Checkliste kann als geeignete Struktur eines solchen Dokumentes angenommen werden. Dieses Dokument ist in die gesamte Risikobeurteilung zur Arbeitsplatzapplikation mit einem kollaborierenden Roboterbetrieb einzufügen.

5 Anforderungen

In den folgenden Abschnitten sind technologische, medizinisch-biomechanische, ergonomische und arbeitsorganisatorische Anforderungen zur Gestaltung von Arbeitstätigkeiten mit kollaborierenden Robotern aufgeführt.

5.1 Technologische Anforderungen

- a) An Arbeitsplätzen mit kollaborierenden Robotern ist die Wahrscheinlichkeit einer Kollision zwischen Mensch und kollaborierendem Roboter mit geeigneten Maßnahmen zu minimieren, z. B. durch Begrenzung des potenziellen Kollisionsraumes.
- b) Bei einer möglichen Kollision zwischen Mensch und kollaborierendem Roboter dürfen sich im Kollisionsbereich keine scharfen, spitzen, scherenden oder schneidenden Kanten und Konstruktionsteile oder raue Oberflächen befinden.
- c) Im Falle einer möglichen Kollision darf es nur zu flächenhaften Berührungsbereichen kommen. Hierfür können geeignete Gehäuse, Abdeckungen oder Trennflächen eingesetzt werden. Die Distanz zwischen zwei gegenüberliegenden Punkten der Außenlinien der Kollisionsfläche sollte mindestens 5 mm betragen, siehe Bild 3.
- d) Mögliche Kollisionsbereiche sind erkennbar (schwarz/gelb) zu gestalten.

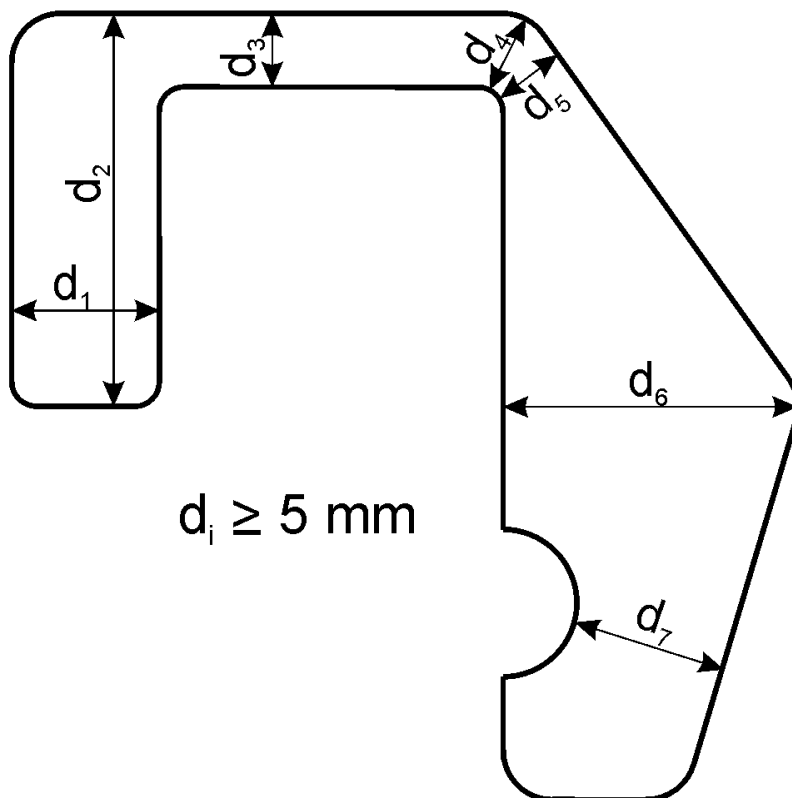


Bild 3: Kollisionsfläche mit verschiedenen Distanzen der Außenlinien

5.2 Medizinisch-biomechanische Anforderungen

In diesem Abschnitt werden medizinisch-biomechanische Anforderungen, ein definiertes Körpermodell mit Haupt- und Einzelbereichen, relevante Verletzungskriterien mit ihren Grenzwerten und charakteristische Werte der Verformungskonstanten der Körpereinzelsbereiche angegeben. Die Grenzwerte der Verletzungskriterien wurden auf der Grundlage einer Literaturstudie festgelegt. Sie sind als orientierende Werte zu betrachten und können durch weitere zukünftige Forschungsarbeiten angepasst werden.

- a) Die medizinisch-biomechanischen Anforderungen dieser Empfehlungen beziehen sich auf die Körpereinzelsbereiche des in Tabelle 1 (siehe Seite 14), aufgeführten Körpermodells. Das Körpermodell legt vier Körperhauptbereiche und 15 Körpereinzelsbereiche innerhalb der Hauptbereiche fest. Damit lassen sich alle anthropometrischen Punkte der Körperoberfläche im Körpermodell zuordnen.
- b) Zur Festlegung und Abgrenzung von Körpereinzelsbereichen, die einem Kollisionsrisiko ausgesetzt werden, dient das Körpermodell nach Tabelle 1. Alle Körperbereiche sind mittels einer Codierung identifizierbar. Bei der Risikoanalyse werden die mit einem Kollisionsrisiko besetzten Einzelkörperbereiche bestimmt.
- c) In den Haupt- und Einzelkörperbereichen nach Tabelle 1 dürfen ausschließlich solche Beanspruchungen der Haut und des darunter liegenden Binde- oder Muskelgewebes eintreten, bei denen es nicht zu einem tieferen Durchdringen der Haut und des Gewebes mit blutenden Wunden sowie zu Frakturen oder anderweitigen bleibenden Schäden des Skelettsystems kommt.
- d) Weiterhin dürfen keine Verletzungen entstehen, bei denen die Verletzungsschwerekategorie 1 der Abbreviated Injury Scale – AIS¹ sowie Verletzungsschweren mit den Codierungen für oberflächliche Verletzungen des ICD-10-GM 2006² überschritten werden.
- e) Besteht bei bestimmungsgemäßem Gebrauch ein Verletzungsrisiko für die Sinnesorgane Augen, Ohren, Nase und Mund, muss es durch besondere Schutzmaßnahmen (z. B. Schutzbrille) herabgesetzt werden.
- f) Bei nicht bestimmungsgemäßem Gebrauch innerhalb eines kollaborierenden Betriebes oder bei bewusstem Provozieren einer Kollision mit dem kollaborierenden Roboter ist eine ausreichende Schutzwirkung durch die hier aufgeführten sicherheitstechnischen Maßnahmen nicht gewährleistet.
- g) Die Verletzungsschwere wird, bezogen auf alle Körpereinzelsbereiche, ausreichend durch folgende Verletzungskriterien erfasst:
 - Klemm-/Quetschkraft (KQK, Einheit: N)
 - Stoßkraft (STK, Einheit: N)
 - Druck/Flächenpressung (DFP, Einheit: N/cm²)

Der in den Körpereinzelsbereichen jeweils tolerierbare Verletzungsschwerebereich wird durch Einhaltung der Grenzwerte der Verletzungskriterien nach Tabelle 2 (siehe Seite 15) nicht überschritten.

¹ Abbreviated Injury Scale – AIS 2005

² ICD-10-GM 2006 Internationale statistische Klassifikation der Krankheiten und verwandter Gesundheitsprobleme

- h) Für die Körpereinzelsbereiche sind Verformungskonstanten angegeben, durch die der maximale Kompressionsweg der Körperbereiche bis zum Erreichen der Grenzwerte abgeschätzt werden kann. Hierbei wurde lineares Verformungsverhalten angenommen.
- Kompressionskonstante (KK, Einheit: N/mm)
- i) In eine Risikoanalyse sind die Grenzwerte der Verletzungskriterien als einzuhaltende Anforderungswerte und die Werte der Kompressionskonstanten als Orientierungsgrößen für alle Körpereinzelsbereiche mit Kollisionsrisiko einzubeziehen.
- j) Personen, die mit kollaborierenden Robotern bei Anwendung aller erforderlichen Schutzmaßnahmen unter einem verbleibenden Kollisionsrisiko arbeiten, müssen für diese Tätigkeiten gesundheitlich geeignet sein. Die Eignung ist vom Betriebsarzt festzustellen. Die Person sollte mindestens die Anforderungen nach der arbeitsmedizinischen Grundsatzuntersuchung G25 „Fahr-, Steuer- und Überwachungstätigkeiten“ erfüllen.

Tabelle 1: Körpermodell mit Hauptbereichen, Einzelbereichen und Codierung

Körperhauptbereiche	KB-Code	Körpereinzelsbereiche
Hauptbereich 1: Kopf mit Hals	1.1	Schädel/Stirn
	1.2	Gesicht
	1.3	Hals (Seiten/Nacken)
	1.4	Hals (vorne/Kehlkopf)
Hauptbereich 2: Rumpf	2.1	Rücken/Schultern
	2.2	Brust
	2.3	Bauch
	2.4	Becken
	2.5	Gesäß
Hauptbereich 3: Obere Extremitäten	3.1	Oberarm/Ellenbogengelenk
	3.2	Unterarm/Handgelenk
	3.3	Hand/Finger
Hauptbereich 4: Untere Extremitäten	4.1	Oberschenkel/Knie
	4.2	Unterschenkel
	4.3	Füße/Zehen/Gelenk

Körperbereichscode (KB-Code)	Codierung des Körperbereiches (Gesamt- und Einzelbereiche)
Körperhauptbereiche	Name der Körperhauptbereiche
Körpereinzelsbereiche	Name der Körpereinzelsbereiche

Tabelle 2: Grenzwerte für Kräfte und Drücke und Konstante der Körperverformbarkeit nach Körperbereichen des Körpermodells

Körpermodell – Haupt- und Einzelbereiche mit Codierung			Grenzwerte der Anforderungskriterien			
KHB		KEB	KQK	STK	DFP	KK
			[N]	[N]	[N/cm ²]	[N/mm]
1. Kopf mit Hals	1.1	Schädel/Stirn	130	175	30	150
	1.2	Gesicht	65	90	20	75
	1.3	Hals (Seiten/Nacken)	145	190	50	50
	1.4	Hals (vorne/Kehlkopf)	35	35	10	10
	2.1	Rücken/Schultern	210	250	70	35
2. Rumpf	2.2	Brust	140	210	45	25
	2.3	Bauch	110	160	35	10
	2.4	Becken	180	250	75	25
	2.5	Gesäß	210	250	80	15
3. Obere Extremitäten	3.1	Oberarm/Ellenbogengelenk	150	190	50	30
	3.2	Unterarm/Handgelenk	160	220	50	40
	3.3	Hand/Finger	135	180	60	75
4. Untere Extremitäten	4.1	Oberschenkel/Knie	220	250	80	50
	4.2	Unterschenkel	140	170	45	60
	4.3	Füße/Zehen/Gelenk	125	160	45	75

KHB	Name des Körperhauptbereichs mit Codierung	STK	Stoßkraft
KEB	Name des Körpereinzelsbereichs	DFP	Druck/Flächenpressung
KQK	Klemm-/Quetschkraft	KK	Kompressionskonstante

5.3 Ergonomische Anforderungen

- a) Der Arbeitsraum, in dem es zu einer Kollision zwischen Mensch und kollaborierendem Roboter kommen kann, muss so gestaltet sein, dass die Körperbeweglichkeit der Person ausreichend gewährleistet ist.
- b) Die Wahrnehmung, die Aufmerksamkeit und das Denken der Person darf durch die Arbeitsumgebung und den kollaborierenden Roboter nicht eingeschränkt oder gestört werden.
- c) Im Falle einer Kollision zwischen Mensch und kollaborierendem Roboter darf es nicht zu weiteren, nicht-mechanischen belastenden Beanspruchungen der Person kommen (z. B. durch strömende oder strahlende Expositionen, elektrische Durchflutung).

5.4 Arbeitsorganisatorische Anforderungen

- a) Die Einhaltung aller sicherheitstechnischen Anforderungswerte nach Risikobeurteilung muss detailliert bescheinigt werden.
- b) Bei Arbeitstätigkeiten mit kollaborierenden Robotern sind Zugangs- bzw. Zutrittsbeschränkungen, z. B. Verbotsschilder „Betreten durch Unbefugte verboten!“, vorzunehmen.
- c) Die gesundheitliche Eignung einer Person, die mit einem kollaborierenden Roboter arbeitet und einem Kollisionsrisiko ausgesetzt ist, sollte in geeigneten regelmäßigen Abständen festgestellt und testiert werden, siehe Abschnitt 5.2 j).
- d) Personen, die mit kollaborierenden Robotern arbeiten und Kollisionsrisiken ausgesetzt sind, müssen regelmäßig über die Risiken, den Notfall und die dann erforderlichen sicherheitsgerechten Maßnahmen unterwiesen werden. Dies ist besonders für Installations-, Montage- oder Testarbeiten, zum Einrichtbetrieb und bei der Inbetriebnahme zu beachten.
- e) Für Arbeitsplätze mit kollaborierenden Robotern sind die besonderen arbeitsorganisatorischen Rahmenbedingungen zu prüfen und festzulegen (z. B. Arbeitszeiten, Pausen, Erste-Hilfe-Koffer, Meldebuch).
- f) Nach einem Kollisionsvorgang sind die Arbeitsfähigkeit der Person und die korrekte Einrichtung des Arbeitsplatzes zu prüfen.

6 Prüfung der Anforderungen

Die Einhaltung der in Tabelle 1 aufgeführten zulässigen Kräfte und Drücke/Flächenpressungen für die betroffenen Körpereinzelsbereiche muss nach Einrichtung eines Arbeitsplatzes an relevanten Punkten der Kollisionsflächen überprüft werden. Dazu eignen sich Messgeräte mit folgenden Wirkprinzipien:

Kraftmessgeräte

Kraftmessgeräte messen statische und dynamische Kollisionskräfte. Die Messgeräte sollten einaxial verformbar sein und ein lineares Verformungsverhalten besitzen. Die verformbaren Komponenten der Geräte, z. B. lineare Federn, müssen die Kompressionskonstanten der Körpereinzelsbereiche (Körpersteifigkeiten), siehe Tabelle 2, abbilden und Belastungen mindestens bis zu den Grenzwerten der Kräfte zulassen.

Die Messgeräte müssen in Richtung der aufgebrachten Kollisionskraftebene, planparallel geführt und ausreichend große Kollisionsflächen besitzen, zwischen denen sich die verformbaren Messgerätekomponenten befinden. Durch die Kollisionseinwirkung dürfen an den Messgeräten keine bleibenden Verformungen eintreten.

Die bei einer Kollisionssimulation wirkende Kraft muss mit einem geeigneten Kraftmesssystem zeitdiskret gemessen werden. Mit der Messdatenerfassung müssen alle dynamischen Anteile der Kollisionskraft erfasst und aufgezeichnet werden. Durch die Beschaffenheit der Messgeräte dürfen keine filternden Effekte auf die Messung der Kollisionskraft wirksam werden. Die Kollisionskraft ist mit einem maximalen Fehler von $\pm 1\%$ v. M. zu bestimmen. Die Linearität der Fehler muss im Bereich von $\pm 5\%$ liegen.

Biofidele Prüfkörper

Biofidele Prüfkörper müssen zur Überprüfung der Kraftgrenzwerte, siehe Tabelle 2, das mechanische Bewegungs-, Belastungs- und Verformungsverhalten der Körpereinzelsbereiche, siehe Tabelle 1, entsprechend der spezifischen Arbeitshaltung der Person, in der eine Kollision erfolgen kann, abbilden können.

Im biofiden Prüfkörper befindet sich eine Kraftsensorik, mit der die einwirkende äußere Kraft in Betrag und Richtung erfasst werden kann. Je nach Kollisionsverhalten muss eine dreidimensionale Kraftmessung erfolgen. Die einwirkende Stoßkraft ist zeitdiskret zu erfassen.

Mit der Messdatenerfassung müssen alle dynamischen Anteile der Kollisionskraft erfasst und aufgezeichnet werden. Durch die Beschaffenheit des biofiden Prüfkörpers einschließlich des Kraftmesssystems dürfen keine filternden Effekte auf die Messung der Kollisionskraft wirksam werden. Die Kollisionskraft ist mit einem maximalen Fehler von $\pm 1\%$ v. M. zu bestimmen.

Druckmessgeräte

Mit Druckmessgeräten müssen die Grenzwerte für Druck/Flächenpressung, siehe Tabelle 2, überprüft werden können. Die Druckmesssensorik muss zusätzlich auf die relevanten Stoßflächen biofider Prüfkörper adaptiert werden, damit die Druckmessung bei dem vorgesehenen Bewegungs- und Verformungsverhalten durchgeführt werden kann.

Durch die Druckmesssensorik darf keine verfälschende Dämpfung des Stoßimpulses und keinerlei Beeinflussung der Kraftmessungen, insbesondere der Spitzenkräfte, stattfinden. Mit den Druckmessgeräten muss mindestens der höchste Partialdruck, besser jedoch die gesamte Druckverteilung innerhalb der kollidierenden Fläche, gemessen werden. Die Messsensorik muss die gesamte Kollisionsfläche und Partialdrücke mit Sensorflächen $\leq 10 \text{ mm}^2$ erfassen können. Partial- oder Spitzendruckmessungen müssen mit einem maximalen Fehler von $\pm 2,5 \%$ v. M. durchgeführt werden.

7 Vorgehensweise bei der messtechnischen Erfassung der Verletzungskriterien

Um die Einhaltung der Grenzwerte für die jeweils nach Applikation festgelegten geltenden Verletzungskriterien zu überprüfen, sind Messgeräte erforderlich. Diese Messgeräte müssen die in Abschnitt 6 beschriebenen Wirkprinzipien für die Messung von Kollisionskräften und Drücken sowie für ein bestimmtes Bewegungsverhalten durch ihre Bauart und die verwendeten Elemente realisieren.

Für die Messung von Stoß- oder Klemm-/Quetschkräften können verschiedene auf dem Markt verfügbare Messgeräte mit technischen Modifikationen eingesetzt werden. Der Nachweis der hier geforderten zulässigen Kraftbelastungsbereiche kann daher nur mit geeigneten Kraftmessgeräten geführt werden.

Zur Erfassung des maximalen Partialdrucks in einer Kollisionsfläche existieren zwar verschiedene Messmöglichkeiten, jedoch zurzeit noch keine standardisierten Messgeräte, die den erforderlichen Wirkprinzipien nach Abschnitt 6 ausreichend genügen und ein einheitliches Vorgehen im Rahmen von Prüfungen gewährleisten. Solche Messgeräte werden zurzeit entwickelt.

Ist eine messtechnische Erfassung der zulässigen maximalen Partialdrücke nicht möglich, sind für eine vorläufige Beurteilung Berechnungen der auftretenden Drücke/Flächenpressungen bei allen betroffenen Kollisionsvarianten und -punkten erforderlich. Diese orientierenden Berechnungen können auf der Grundlage der Kraftmessungen und genauer Messungen der Kollisionsflächen durchgeführt werden. Zur Erfassung von Kollisionsflächen können beispielsweise Abdruckverfahren (z. B. Abdrücke mittels Blaupausen oder dickere, plastische Verformungsschichten geeigneter Materialien) verwendet werden. Die Messgenauigkeit der verwendeten Feststellungsverfahren ist anzugeben.

Zurzeit werden weitere biofidele Messgeräte für die synchrone Erfassung der Verletzungskriterien bei praxisnahe Körperverhalten einer Person unter bestimmten Kollisionsbedingungen entwickelt.

8 Beispiel zur Anwendung der BG/BGIA-Empfehlungen

In diesem Kapitel wird ein einfaches Beispiel für die Anwendung der BG/BGIA-Empfehlungen, insbesondere der medizinisch-biomechanischen Anforderungen in der betrieblichen Praxis gegeben. Hierzu wird ein Arbeitsplatzszenario angenommen, für das eine Risikobeurteilung erfolgen soll. In diesem Beispiel werden die Risiken im Wesentlichen in Bezug zu den medizinisch-biomechanischen Anforderungen dieser Empfehlungen analysiert und entsprechende Berechnungen für den Einsatz geeigneter Maßnahmen zum Erreichen des Schutzzieles beschrieben.

Angenommenes Arbeitsplatzszenario

Als Arbeitsplatzszenario wird eine Tätigkeit angenommen, bei der ein Montageraum mit einer Trennwand in zwei Teilräume geteilt wird. Im ersten Teilraum arbeitet eine Person, im zweiten Teilraum befindet sich ein kollaborierender Roboter. Die Trennwand besitzt ein speziell eingerichtetes Fenster, durch das die Person in den zweiten Teilraum hineingreifen kann. Oberhalb des offenen Fensterbereiches befindet sich ein durchsichtiger Wandbereich, sodass die Person die Arbeitsprozesse in Teilraum 2 vollständig einsehen kann. Die Person soll mithilfe des kollaborierenden Roboters eine bestimmte Arbeitstätigkeit durchführen.

Arbeitsaufgabe

Eine Serie von Konsolen soll mit verschiedenen elektromechanischen Bauteilen zu einem funktionstüchtigen Modul einer größeren Maschine komplettiert werden. Der Teilraum 1 wird über ein Band ständig mit vorbereiteten Konsolen beliefert. Nach Komplettierung der Konsole und bestimmten Qualitätskontrollen sollen die Module mit einem weiteren Band in Teilraum 1 zum nächsten Bestimmungsort weiter transportiert werden. Der Arbeitsprozess ist so angelegt, dass der gesamte Fertigungsvorgang der Module mit einem Mischbetrieb aus manuellen und Robotertätigkeiten effizient durchgeführt werden kann.

Konkrete Arbeitstätigkeit

Die Person in Teilraum 1 nimmt eine Konsole vom Transportband und führt mehrere Montagevorgänge mit kurzen Elektrokabeln und Luftschläuchen sowie verschiedene Einstellarbeiten an der Konsole aus. In Teilraum 2 befindet sich direkt am Fenster der Trennwand ein größerer Arbeitstisch, hinter dem ein kollaborierender Roboter positioniert ist. Die Person reicht die Konsole mit beiden Händen durch die Fensteröffnung der Trennwand bis zu einer Montageeinrichtung auf dem Arbeitstisch.

Dort soll der kollaborierende Roboter die Konsole in einem Klemmrahmen fixieren und mit elektromechanischen Elementen bestücken. Die exakte Positionierung und Fixierung der Konsole in dem Rahmen nimmt der Roboter mit einer pneumatischen Zange (Werkzeug des Roboters) vor. Die Person hält die Konsole in den Einzugsbereich der Klemmfixierung hinein. Der kollaborierende Roboter übernimmt die Konsole und zieht sie in die Klemmfixierung bis zur endgültigen Positionierung hinein. Dann folgt die Bestückung der Konsole.

Während der Bestückung durch den Roboter müssen die vorher montierten Kabel und Schlauchleitungen mit den Händen von den zu bestückenden Konsolenbereichen zurückgehalten werden. Dabei müssen die Kabel und Schlauchleitungen in verschiedene Richtungen geführt werden, damit es nicht zu einer Beschädigung der Leitungen durch

die Steckvorgänge des Roboters oder zu einer Behinderung der Steckvorgänge kommt. Der Roboter entnimmt die Steckelemente einem Band oberhalb der Fensteröffnung im Teilraum 2. Nach Montage der Steckmodule schiebt der Roboter die fertig bestückte Konsole wieder aus ihrer Fixierung heraus, sodass die Person das fertige Modul mit den Händen aufnehmen und durch die Fensteröffnung in den Teilraum 1 zurückführen kann.

Im Teilraum 1 kontrolliert die Person dann die Qualität an der komplettierten Konsole und legt diese anschließend auf das Band zum Transport an den nächsten Arbeitsort. Der gesamte Produktionsvorgang für eine Konsole dauert vier Minuten. Die Teiltätigkeiten im kollaborierenden Betrieb in Teilraum 2 dauern zwei Minuten.

Feststellung des „Kollaborierenden Betriebes“

Während der gesamten Teiltätigkeiten des kollaborierenden Roboters bleiben beide Hand-Arm-Bereiche der Person zur Klemmfixierung der Konsole, Durchführung der Kabel- und Leitungssicherungen und Rückführung der Konsole im Teilraum 2. Bei allen Roboterbewegungen im Teilraum 2 ist eine direkte Nähe des Roboterarmes und des eingesetzten Werkzeuges zu den Hand-Arm-Bereichen der Person gegeben. Die minimalen Distanzen aller anthropometrischen Punkte der oberen Extremitäten zu den relevanten Roboterteilen während des gesamten kollaborierenden Betriebs liegen in einem Bereich zwischen 8 und 43 cm. Bei bestimmungsgemäßer Durchführung der Arbeitstätigkeit wird dieser Bereich nicht unterschritten. Für die gesamten oberen Extremitäten besteht daher während der Teiltätigkeiten im Teilraum 2 Kollisionsrisiko. Hier ist eindeutig ein kollaborierender Betrieb nach DIN EN ISO 10218 Teil 2 gegeben, dessen Umfang präzise bestimmbar ist und für den eine Risikobeurteilung zu erstellen ist.

Risikoanalyse für den Kollisionsfall und Maßnahmen

Der Roboter besitzt eine Kraftsensorik, mit der die Gesamtkraft beim kompletten Arbeitsvorgang gemessen wird. Beim Einrichten wurde der Kraftverlauf in Abhängigkeit von der Zeit und der Werkzeugposition ermittelt und liegt somit als Soll-Kraftwert-Verlauf vor, siehe Bild 4. Bei 100 Testläufen lag die Streuung im Gesamtkraftverlauf bei $\pm 8 \text{ N}$.

Der Signalverlauf des Betrags der Gesamtkraft mit Reproduzierbarkeitsbereich wird in der Robotersteuerung zur Detektierung von Kollisionseignissen eingesetzt. Beim Arbeitsvorgang wird der Ist-Wert der Gesamtkraft (Betrag) ständig mit dem Soll-Wert (Betrag) am entsprechenden Positionspunkt der Kraftwertkurve abgeglichen.

Als „Eintreten des Kollisionseignisses“ wird das Überschreiten des Reproduzierbarkeitsbereiches von $\pm 8 \text{ N}$ durch die Ist-Soll-Wertdifferenz (Betrag) $| \text{ISD} |$ festgelegt.

$$\text{Kollisionseignis: } | \text{Ist-Kraftwert} - \text{Soll-Kraftwert} | > 8 \text{ N}$$

Nach Feststellung eines Kollisionseignisses reagiert die Steuerung mit sofortiger Reversierung des Roboterarmes (mit Werkzeug und evtl. Steckelement) auf eine unkritische Grundposition. Der Sicherungsfahrweg dorthin ist in der Steuerung vorgegeben.

Bei einer Kollisionsdetektion findet jedoch zunächst ein Kraftstoß auf den betroffenen Körperbereich statt und damit liegt ein Verletzungsrisiko vor. Die Verletzungsschwere muss im zulässigen, also tolerablen Bereich liegen.

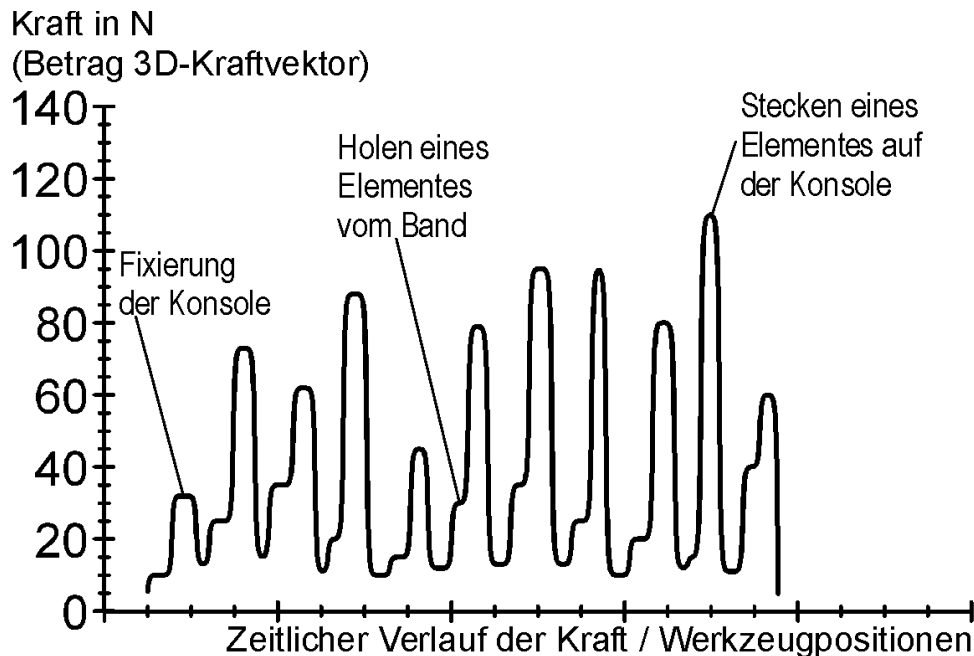


Bild 4: Soll-Kraftwert-Kurve der Robotertätigkeiten

Zur Einhaltung der zulässigen Verletzungsschwere für mögliche Kollisionen innerhalb des kollaborierenden Betriebes werden die medizinisch-biomechanischen Anforderungen der Empfehlungen herangezogen. Zunächst werden die Körpereinzelsbereiche nach dem Körpermodell bestimmt, für die ein Kollisionsrisiko besteht. Hierzu dient das Vorlagenblatt, siehe Seite 30. Kollisionsrisiko besteht bei diesem Arbeitsvorgang für die gesamten oberen Extremitäten. Die Körpereinzelsbereiche mit der KB-Kodierung 3.1, 3.2 und 3.3 werden angekreuzt. Mit den für diese Körperbereiche geltenden Grenzwerten werden nun die Gesamtgrenzwerte für die oberen Extremitäten bestimmt.

Da es hier nur zu Stoßprozessen in der Kollision kommen kann (sofortige Reversierung nach Kollisionsdetektion), wird aus den drei Grenzwerten des Verletzungskriteriums „Stoßkraft“ der minimale Wert für die oberen Extremitäten bestimmt. Der minimale Grenzwert aus 190 N, 220 N und 180 N beträgt $STK_{ges} = 180 \text{ N}$. Die Werte für zulässige Klemmkraft der oberen Extremitäten bleiben unberücksichtigt. Für die Ermittlung des maximal zulässigen Partialdrucks in der Kollisionsfläche wird ebenfalls der minimale Wert aus den drei Grenzwerten für die oberen Extremitätenbereiche 50 N/cm^2 , 50 N/cm^2 und 60 N/cm^2 mit $DFP_{ges} = 50 \text{ N/cm}^2$ bestimmt.

Zusätzlich wird als Kompressionskonstante der Hand-Arm-Bereiche der maximale Wert aus den drei Konstanten 30 N/mm , 40 N/mm und 75 N/mm bestimmt und als Gesamtkompressionskonstante $KK_{ges} = 75 \text{ N/mm}$ festgelegt. Zusammenfassend lauten damit die Angaben zur Kollision, siehe Tabelle 3:

Tabelle 3: Zusammenfassung der Randbedingungen und Anforderungen zum Kollisionsfall

Zu ermittelnde Parameter	Festlegungen
Körpereinzelsbereiche mit Kollisionsrisiko (Festlegung im Vorlagenblatt Seite 30)	– KB-Code 3.1 „Oberarm/Ellenbogengelenk“ – KB-Code 3.2 „Unterarm/Handgelenk“ – KB-Code 3.3 „Hand/Finger“
Gesamtkörperbereich mit Kollisionsrisiko	Komplette Hände und Arme bis zum Schulterbereich (gesamte obere Extremitäten)
Ermittelte Kollisionsbedingungen	Stoßvorgänge auf die oberen Extremitäten; keine Klemm-/Quetschvorgänge
Verletzungskriterien für ermittelte Kollisionsbedingungen	– Stoßkraft – Druck/Flächenpressung
Gesamtgrenzwerte	– Gesamtstoßkraft $STK_{ges} \leq 180 \text{ N}$ – Gesamtdruck $DFP_{ges} \leq 50 \text{ N/cm}^2$
Kompressionskonstante	– Kompressionskonstante $KK_{ges} = 75 \text{ N/mm}$

Mit einem geeignet gestalteten Bewegungsverhalten des kollaborierenden Roboters und einer geeigneten konstruktiven Gestaltung der kollidierenden Roboterteile können die zulässige Stoßkraft und der zulässige Partialdruck in der Kollisionsfläche eingehalten werden.

Maßnahmen zur Einhaltung des Grenzwertes des Verletzungskriteriums „Stoßkraft“

Eine Kollision wird nach den obigen Bedingungen durch Überschreiten des Reproduzierbarkeitsbereiches der Soll-Kraftwertkurve von $|8 \text{ N}|$ durch den Betrag der Soll-Ist-Kraftwertdifferenz $|ISD|$ detektiert. Sobald der Betrag des Kraftvektors vom Betrag des positionsentsprechenden Soll-Kraftwertes um mehr als 8 N abweicht, liegt eine Kollision vor und wird in der Steuerung als Kollisionsereignis gemeldet.

In der Kollisionsfläche, die durch bestimmte Roboterteile und Hand-Arm-Teilbereiche gebildet wird, wirkt eine schnell ansteigende Stoßkraft. Nach Detektion des Kollisionsereignisses wird so zeitnah wie möglich eine Reversierung des Roboterarmes ausgelöst. Die Steuerung muss diese Reversierung mindestens so schnell durchführen, dass die ansteigende Stoßkraft den Grenzwert von $STK_{ges} = 180 \text{ N}$ im Zeitraum von der Kollisionsfeststellung bis zum Lösen der Roboterteile vom Körperbereich nicht überschreitet. Je geringer das Kraftniveau ist, bei dem ein Kollisionsereignis detektiert wird, desto geringer sind auch die in der Kollisionsfläche wirkenden Partialdrücke. Außer dem für die Stoßkraft einzuhaltenden Grenzwert darf ebenfalls der Grenzwert für den maximalen Partialdruck in der Kollisionsfläche nicht überschritten werden. Durch eine sensible Kollisionsdetektierung wird die Einhaltung dieser Anforderung begünstigt.

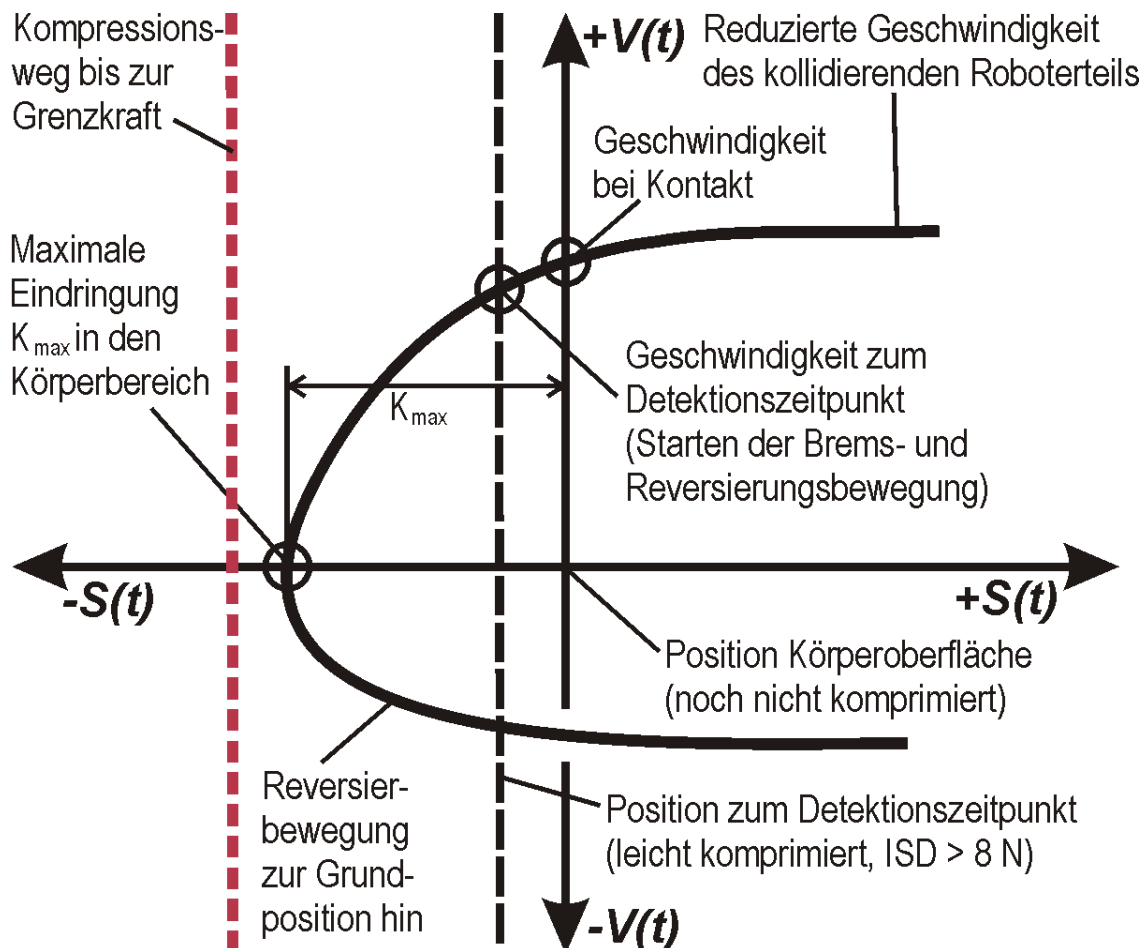


Bild 5: Geschwindigkeits-/Weg-Verhalten des kollidierenden Roboterteils in der Kollisionsphase

Mit der festgelegten Kompressionskonstante kann der Kompressionsweg bis zum Erreichen der Grenzkraft berechnet werden. Für einen Stoßkraftgrenzwert von $STK_{\text{ges}} = 180 \text{ N}$ und eine Kompressionskonstante $KK_{\text{ges}} = 75 \text{ N/mm}$ ergibt sich ein Kompressionsweg von 2,4 mm. Mit dem Bremsverhalten am technischen Kollisionspunkt des Roboters und insbesondere der Aufprallgeschwindigkeit kann die Zeit abgeschätzt werden, in der der Abbremsvorgang zum Stillstand gekommen und die Reversierung begonnen sein muss. Hierdurch kann die Leistungsfähigkeit der Robotersteuerung bezüglich der notwendigen Reversierbewegung beurteilt und angepasst werden. Je nach Nachlaufweg des kollidierenden Roboterteils, Reaktionsvermögen der Steuerung und mechanischem Reaktionsvermögen des Roboters muss eine geeignete Reversierungsreaktion, siehe Bild 5, festgelegt und eingerichtet werden, um den zulässigen Grenzwert der Kollisionskraft nicht zu überschreiten.

Maßnahmen zur Einhaltung des Grenzwertes des Verletzungskriteriums Druck/Flächenpressung

Neben der Einhaltung des Grenzwertes für die äußere Gesamtstoßkraft ist auch die Einhaltung des Grenzwertes des Verletzungskriteriums „Druck/Flächenpressung“ erforderlich. Die Form und Größe der Kollisionsfläche ändern sich in der Kollisionsdauer, d. h. während des Zeitbereichs mit Kontakt, dynamisch. Das Gleiche gilt für die dabei wirksame Druckverteilung. Der für den maximalen Druck angegebene Grenzwert $DFP_{ges} = 50 \text{ N/cm}^2$ ist als Grenzwert für den maximalen Partialdruck in der Kollisionsfläche zu verstehen.

Je nach kollidierendem Roboterteil und Körperbereich kann der in der Kollisionsfläche wirksame maximale Partialdruck den festgelegten Partialdruckgrenzwert von $DFP = 50 \text{ N/cm}^2$ trotz eingehaltener äußerer Gesamtkraft von $STK_{ges} = 180 \text{ N}$ überschreiten. Der Partialdruck kann messtechnisch ermittelt werden. Hierfür können Messgeräte mit den Wirkprinzipien, die in Abschnitt 6 beschrieben sind, eingesetzt werden.

Als orientierende Abschätzung dafür, ob die sicherheitstechnische Anforderung für den zulässigen Druck in der Fläche erfüllt wird, kann der Vergleich der Kollisionsgeometrie des beteiligten Roboterteils mit Referenzflächen herangezogen werden. Wenn für die Kollision eine gleichmäßige Druckverteilung in der Kollisionsfläche angenommen wird, muss bei dem vorgegebenen Grenzwert für die Stoßkraft von 180 N und einer zulässigen Flächenpressung der oberen Extremitäten (50 N/cm^2 , 50 N/cm^2 und 60 N/cm^2) zur Erreichung des Schutzziels eine wirkende Fläche von mindestens $A_{ref} = 3,6 \text{ cm}^2$ vorliegen.

Tabelle 4: Charakteristische Größen verschiedener Referenzflächen bei einer Flächen-
größe von $3,6 \text{ cm}^2$

Berechnung charakteristischer Größen für eine Fläche von $3,6 \text{ cm}^2$				
Referenz- flächen	Charakteristische Größe	Name	Wert in cm	Bemerkungen
Kreis	Durchmesser	DK_{ref}	2,14	
Ringfläche	Innendurchmesser	$IDR50_{ref}$	4,52	Bei Außendurchmesser 5,00 cm
	Innendurchmesser	$IDR40_{ref}$	3,38	Bei Außendurchmesser 4,00 cm
	Innendurchmesser	$IDR30_{ref}$	2,10	Bei Außendurchmesser 3,00 cm
	Innendurchmesser	$IDR25_{ref}$	1,29	Bei Außendurchmesser 2,50 cm
Quadrat	Seitenlänge	LQ_{ref}	1,89	
Rechteck	2. Seitenlänge	$SR25_{ref}$	1,44	Bei 1. Seitenlänge $S1R = 2,5 \text{ cm}$
	2. Seitenlänge	$SR20_{ref}$	1,80	Bei 1. Seitenlänge $S1R = 2,00 \text{ cm}$
	2. Seitenlänge	$SR15_{ref}$	2,40	Bei 1. Seitenlänge $S1R = 1,50 \text{ cm}$
	2. Seitenlänge	$SR10_{ref}$	3,60	Bei 1. Seitenlänge $S1R = 1,00 \text{ cm}$
	2. Seitenlänge	$SR5_{ref}$	7,20	Bei 1. Seitenlänge $S1R = 0,50 \text{ cm}$

Dieser Wert kann als Orientierungswert zur Beurteilung der Kollisionsfläche in Form und Größe herangezogen werden. Nimmt man in dem hier angeführten Beispiel eine wirksame Fläche von mindestens $3,6 \text{ cm}^2$ als Bedingung für die Einhaltung des Grenzwertes von Druck/Flächenpressung an, dann ergeben sich charakteristische Größen für verschiedene Kollisionsflächenformen (Referenzflächen). Sie können mit den real vorliegenden Kollisionsflächen des betroffenen Roboterteils verglichen werden und so für eine grobe erfüllt/nicht-erfüllt-Abschätzung des Kollisionsdrucks herangezogen werden. Die charakteristischen Größen sind in der Tabelle 4 für verschiedene Referenzflächen mit der Größe $3,6 \text{ cm}^2$ angegeben.

In den Tabellen 6 und 7 auf 32f. sind für alle Körpereinzelsbereiche des Körpermodells orientierende Daten zur Gestaltung der Kollisionsflächen nach dem Muster der Tabelle 4 aufgeführt. Ergänzend dazu werden der maximal zulässige Kompressionsweg S_{kom} und die bei Erreichen eines Kraftgrenzwertes geleistete Verformungsarbeit WK_{ref} angegeben. Bei einem angenommenen stumpfen Kollisionsmodus mit dem Roboterwerkzeug (Zange) nach Bild 6 beträgt die Kollisionsfläche $4,8 \text{ cm}^2$ und dies könnte im Vergleich zu der geschätzten Mindestkollisionsfläche von $3,6 \text{ cm}^2$ die Einhaltung der zulässigen Flächenpressung bedeuten. U. U. ist das Schutzziel mit geringen Gestaltungsmaßnahmen am Werkzeug zu erreichen.

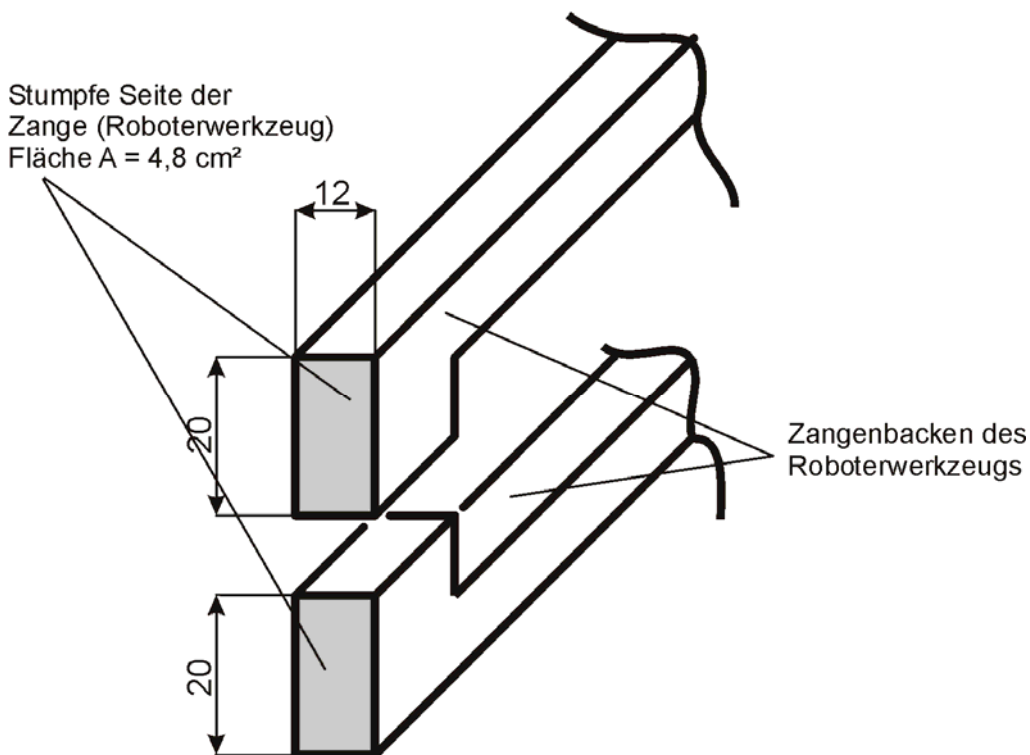


Bild 6: Zangenbacken des Roboterwerkzeugs

Mögliche Designänderungen zur Reduzierung von Partialdrücken sind die Vergrößerung der wirksamen Flächen und eine am kollidierenden Körperteil orientierte verbesserte, dreidimensionale Flächenform. Reduzierungen der äußeren Spitzenstoßkraft, beispielsweise durch Verringerung der Kollisionsgeschwindigkeit, gehen ebenfalls direkt in die Reduzierung der Druckverteilung ein. Als Gestaltungsmaßnahmen kommen in diesem Beispiel grundsätzlich Optimierungen der Kollisionsgeschwindigkeit, der konstruktiven Gestaltung der Kollisionsfläche, der Empfindlichkeit der Kollisionsdetektion und der Gestaltung des Reversierungsprozesses in Frage. Weitere Maßnahmen können u. U. notwendig sein.

In diesem Beispiel wurde eine typische Anwendung der medizinisch-biomechanischen Anforderungen dieser BG/BGIA-Empfehlungen beschrieben. Durch die hier beispielhaft aufgeführten Berechnungen und Gestaltungshilfen können unzulässige Verletzungsrisiken im bestimmungsgemäßen Gebrauch verhindert werden. Für den kollaborierenden Betrieb müssen zusätzlich die weiteren sicherheitstechnischen Anforderungen dieser Empfehlungen erfüllt werden. Das gesamte Schutzziel wird bei der Einhaltung aller sicherheitstechnischen Anforderungen in Ergänzung bzw. als Präzisierung zu den Normen ISO 10218, Teil 1 und 2, erreicht.

9 Dokumentation

Die Anforderungen zu den betroffenen Körperbereichen sowie die Maßnahmen und Prüfungen zur Gewährleistung der Einhaltung der Anforderungen sind für die spezielle Arbeitstätigkeit zu dokumentieren und fließen in die Risikobeurteilung des Arbeitsplatzes ein. Für alle erforderlichen Dokumente, die im Rahmen dieser Empfehlungen zu erstellen sind, gelten die Anforderungen der DIN EN ISO 14121-1: 2007, Abschnitt 9 „Dokumentation“.

Im Anhang (Seite 30) ist ein Formblatt zur Festlegung von betroffenen Körperbereichen mit den danach geltenden Grenzwerten für die Verwendung in einer Risikobeurteilung beigelegt. Nach Festlegung der betroffenen Körperbereiche können die minimalen Grenzwerte für Kräfte und Druck/Flächenpressung sowie die höchste Kompressionskonstante für die weitere Bearbeitung in eine Summenzeile eingetragen werden.

Anhang

- 1 Das Vorlagenblatt enthält die Grenzwerte der Verletzungskriterien und der Kompressionskonstanten für alle Körpereinzelsbereiche. Es kann in einer Risikobeurteilung zur Festlegung von Körperbereichen unter Kollisionsrisiko verwendet werden. Für die betroffenen Körperbereiche gelten dann die Grenzwerte und Orientierungswerte je nach festgelegter Kollisionsart.
- 2 Definitionen orientierender Gestaltungsgrößen für Kollisionsflächen
- 3 Gestaltungswerte auf der Basis der Klemm-/Quetschkräfte aus Tabelle 2
- 4 Gestaltungswerte auf der Basis der Stoßkräfte aus Tabelle 2
- 5 Checkliste und Empfehlungen zur Anwendung der BG/BGIA-Empfehlungen in der betrieblichen Praxis.

Anhang

1 Dokumentvorlage für die Festlegung von Körperbereichen und Grenzwerten eines Kollisionsfalls aus Tabelle 2

Orientierende Grenzwerte der Verletzungskriterien und Angabe der Kompressionskonstanten für die Körpereinzelsbereiche nach Tabelle 1

Vorgehensweise

Die Körpereinzelsbereiche unter Kollisionsgefahr werden bestimmt und in der Spalte „X?“ angekreuzt. Als zusammenfassende Grenzwerte werden die minimalen Werte für Kräfte und Drücke und für die Körperversformung der höchste Wert der Kompressionskonstanten innerhalb der ausgewählten Körpereinzelsbereiche bestimmt und in der letzten Zeile der Tabelle dokumentiert.

Körpermodell Haupt- und Einzelbereiche Betroffene Bereiche unter X? ankreuzen!				Grenzwerte der Anforderungskriterien			
KB		X?	Bereiche	KQK [N]	STK [N]	DFP [N/cm²]	KK [N/mm]
1. Kopf mit Hals	1.1		Schädel/Stirn	130	175	30	150
	1.2		Gesicht	65	90	20	75
	1.3		Hals (Seiten/Nacken)	145	190	50	50
	1.4		Hals (vorne/Kehlkopf)	35	35	10	10
2. Rumpf	2.1		Rücken/Schultern	210	250	70	35
	2.2		Brust	140	210	45	25
	2.3		Bauch	110	160	35	10
	2.4		Becken	180	250	75	25
	2.5		Gesäß	210	250	80	15
3. Obere Extremitäten	3.1		Oberarm/Ellenbogengelenk	150	190	50	30
	3.2		Unterarm/Handgelenk	160	220	50	40
	3.3		Hand/Finger	135	180	60	75
4. Untere Extremitäten	4.1		Oberschenkel/Knie	220	250	80	50
	4.2		Unterschenkel	140	170	45	60
	4.3		Füße/Zehen/Gelenk	125	160	45	75
Zusammenfassung der Grenzwerte und der Verformungskonstanten				Min	Min	Min	Max

KB	Körperbereich	STK	Stoßkraft
Bereiche	Name des Körperbereiches (Gesamt- und Einzelbereiche)	DFP	Druck/Flächenpressung
KQK	Klemm-/Quetschkraft	KK	Kompressionskonstante

Hinweis: Die in der Tabelle angegebenen Grenzwerte können durch zukünftige Forschung bei nachfolgenden Revisionen der BG/BGIA-Empfehlungen angepasst werden.

Anhang

2 Definitionen orientierender Gestaltungsgrößen für Kollisionsflächen

Ausgehend von den Grenzwerten der Verletzungskriterien und den Kompressionskonstanten der Einzelkörperbereiche ergeben sich weitere Größen, die zur Gestaltung des Kollisionsbereichs herangezogen werden können.

Durch die Kraftgrenzwerte und die Kompressionskonstanten ergeben sich für die einzelnen Körperbereiche maximale Kompressionswege in mm und maximale Verformungsarbeiten in Nm. Aus den Grenzwerten der Kräfte – Klemm-/Quetschkraft KQK oder Stoßkraft STK – und den Drücken/Flächenpressungen DFP ergeben sich für bestimmte Grundformen Referenzflächen mit charakteristischen Größen. Sie können zur Abschätzung der Kollisionsbelastung bei gegebener Kollisionsfläche herangezogen werden. Sie stellen Mindestangaben zu ebenen wirksamen Kollisionsflächen dar, bei deren Einhaltung beide Grenzwerte für Kraft und Druck nicht überschritten werden.

Die aus Grenzwerten und Verformungskonstante abgeleiteten Größen sind mit Namen, Einheit und Definition in Tabelle 5 aufgeführt.

Tabelle 5: Namen, Einheit und Definition abgeleiteter Gestaltungsgrößen für mögliche Kollisionsflächen

Größe	Einheit	Abgeleitete Gestaltungsgrößen
S_{kom}	mm	Maximaler Kompressionsweg im Körpereinzelsbereich bei Erreichen der Grenzwerte von Klemm-/Quetschkraft oder Stoßkraft
A_{ref}	cm ²	Referenzfläche (Quotient aus Klemm-/Quetschkraft oder Stoßkraft und Druck/Flächenpressung)
WK_{ref}	Nm	Verformungsarbeit am Körpereinzelsbereich bei Erreichen der Grenzwerte von Klemm-/Quetschkraft oder Stoßkraft
DK_{ref}	mm	Kreis – Durchmesser einer kreisförmigen Fläche
$IDR50_{\text{ref}}$	mm	Kreisring – Innendurchmesser eines Kreisrings mit Außendurchmesser 50 mm
$IDR40_{\text{ref}}$	mm	Kreisring – Innendurchmesser eines Kreisrings mit Außendurchmesser 40 mm
$IDR30_{\text{ref}}$	mm	Kreisring – Innendurchmesser eines Kreisrings mit Außendurchmesser 30 mm
$IDR25_{\text{ref}}$	mm	Kreisring – Innendurchmesser eines Kreisrings mit Außendurchmesser 25 mm
LQ_{ref}	mm	Quadrat – Seitenlänge einer quadratischen Fläche
$SR25_{\text{ref}}$	mm	Rechteck – 2. Seitenlänge einer rechteckigen Form mit einer 1. Seitenlänge von 25 mm
$SR20_{\text{ref}}$	mm	Rechteck – 2. Seitenlänge einer rechteckigen Form mit einer 1. Seitenlänge von 20 mm
$SR15_{\text{ref}}$	mm	Rechteck – 2. Seitenlänge einer rechteckigen Form mit einer 1. Seitenlänge von 15 mm
$SR10_{\text{ref}}$	mm	Rechteck – 2. Seitenlänge einer rechteckigen Form mit einer 1. Seitenlänge von 10 mm
$SR5_{\text{ref}}$	mm	Rechteck – 2. Seitenlänge einer rechteckigen Form mit einer 1. Seitenlänge von 5 mm

Ausgehend von den Grenzwerten für die Klemm-/Quetschkräfte und die Stoßkräfte sind die Berechnungen der orientierenden Werte in Tabelle 6 und 7 aufgeführt und an einem Beispiel dargestellt.

Anhang

3 Gestaltungswerte auf der Basis der Klemm-/Quetschkkräfte aus Tabelle 2

Tabelle 6: Orientierende konstruktive Eckdaten als Gestaltungshilfe auf der Grundlage der zulässigen Klemm-/Quetschkkräfte

Körpermodell mit Körpereinzeln- bereichen und Codierung		Grenzwerte der Anforderungskriterien			Kompressionsweg, Kompres- sionsarbeit und Flächengröße			Charakteristische Größen von Referenzflächen										
KB	Körpereinzelnbereiche	Z	N/cm ²	N/mm	mm	Nm	cm ²	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
		KQK	DFP	KK	S _{kom}	WK _{ref}	A _{ref}	DK _{ref}	IDR50 _{ref}	IDR40 _{ref}	IDR30 _{ref}	IDR25 _{ref}	LQ _{ref}	SR25 _{ref}	SR20 _{ref}	SR15 _{ref}	SR10 _{ref}	SR5 _{ref}
1.1	Schädel/Stirn	130	30	150	0,87	0,06	4,33	23,5	44,1	32,4	18,7	8,6	20,8	17,3	21,7	28,9	43,3	86,7
1.2	Gesicht	65	20	75	0,87	0,03	3,25	20,3	45,7	34,4	22,0	14,5	18,0	13,0	16,3	21,7	32,5	65,0
1.3	Hals (Seiten/Nacken)	145	50	50	2,90	0,21	2,90	19,2	46,2	35,1	23,0	16,0	17,0	11,6	14,5	19,3	29,0	58,0
1.4	Hals (vorne/Kehlkopf)	35	10	10	3,50	0,06	3,50	21,1	45,3	34,0	21,3	13,4	18,7	14,0	17,5	23,3	35,0	70,0
2.1	Rücken/Schultern	210	70	35	6,00	0,63	3,00	19,5	46,0	34,9	22,8	15,6	17,3	12,0	15,0	20,0	30,0	60,0
2.2	Brust	140	45	25	5,60	0,39	3,11	19,9	45,9	34,7	22,4	15,1	17,6	12,4	15,6	20,7	31,1	62,2
2.3	Bauch	110	35	10	11,00	0,61	3,14	20,0	45,8	34,6	22,4	15,0	17,7	12,6	15,7	21,0	31,4	62,9
2.4	Becken	180	75	25	7,20	0,65	2,40	17,5	46,8	36,0	24,4	17,9	15,5	9,6	12,0	16,0	24,0	48,0
2.5	Gesäß	210	80	15	14,00	1,47	2,63	18,3	46,5	35,6	23,8	17,1	16,2	10,5	13,1	17,5	26,3	52,5
3.1	Oberarm/Ellenbogengelenk	150	50	30	5,00	0,38	3,00	19,5	46,0	34,9	22,8	15,6	17,3	12,0	15,0	20,0	30,0	60,0
3.2	Unterarm/Handgelenk	160	50	40	4,00	0,32	3,20	20,2	45,7	34,5	22,2	14,8	17,9	12,8	16,0	21,3	32,0	64,0
3.3	Hand/Finger	135	60	75	1,80	0,12	2,25	16,9	47,0	36,2	24,8	18,4	15,0	9,0	11,3	15,0	22,5	45,0
4.1	Oberschenkel/Knie	220	80	50	4,40	0,48	2,75	18,7	46,4	35,4	23,4	16,6	16,6	11,0	13,8	18,3	27,5	55,0
4.2	Unterschenkel	140	45	60	2,33	0,16	3,11	19,9	45,9	34,7	22,4	15,1	17,6	12,4	15,6	20,7	31,1	62,2
4.3	Füße/Zehen/Gelenk	125	45	75	1,67	0,10	2,78	18,8	46,3	35,3	23,4	16,5	16,7	11,1	13,9	18,5	27,8	55,6

Größe	Einheit	Definition	Größe	Einheit	Definition	Größe	Einheit	Definition
KB		Codierung des Körperbereichs	A _{ref}	cm ²	Druckfläche	LQ _{ref}	mm	Seitenlänge Quadrat
KQK	N	Klemm-/Quetschkraft	DK _{ref}	mm	Durchmesser Kreis	SR25 _{ref}	mm	Seitenlänge Rechteck (1. Seite 25 mm)
DFP	N/cm ²	Druck/Flächenpressung	IDR50 _{ref}	mm	Innendurchmesser Kreisring (außen 50 mm)	SR20 _{ref}	mm	Seitenlänge Rechteck (1. Seite 20 mm)
KK	N/mm	Kompressionskonstante	IDR40 _{ref}	mm	Innendurchmesser Kreisring (außen 40 mm)	SR15 _{ref}	mm	Seitenlänge Rechteck (1. Seite 15 mm)
S _{kom}	mm	Maximaler Kompressionsweg	IDR30 _{ref}	mm	Innendurchmesser Kreisring (außen 30 mm)	SR10 _{ref}	mm	Seitenlänge Rechteck (1. Seite 10 mm)
WK _{ref}	Nm	Maximale Kompressionsarbeit bis S _{kom}	IDR25 _{ref}	mm	Innendurchmesser Kreisring (außen 25 mm)	SR5 _{ref}	mm	Seitenlänge Rechteck (1. Seite 5 mm)

Anhang

4 Gestaltungswerte auf der Basis der Stoßkräfte aus Tabelle 2

Tabelle 7: Orientierende konstruktive Eckdaten als Gestaltungshilfe auf der Grundlage der zulässigen Stoßkräfte

Körpermodell mit Körpereinzeln- bereichen und Codierung		Grenzwerte der Anforderungskriterien			Kompressionsweg, Kompres- sionsarbeit und Flächengröße			Charakteristische Größen von Referenzflächen										
KB	Körpereinzelnbereiche	N	N/cm ²	N/mm	mm	Nm	cm ²	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
		STK	DFP	KK	S _{kom}	WK _{ref}	A _{ref}	DK _{ref}	IDR50 _{ref}	IDR40 _{ref}	IDR30 _{ref}	IDR25 _{ref}	LQ _{ref}	SR25 _{ref}	SR20 _{ref}	SR15 _{ref}	SR10 _{ref}	SR5 _{ref}
1.1	Schädel/Stirn	175	30	150	1,17	0,10	5,83	27,3	41,9	29,3	12,5	-	24,2	23,3	29,2	38,9	58,3	-
1.2	Gesicht	90	20	75	1,20	0,05	4,50	23,9	43,9	32,0	18,1	7,2	21,2	18,0	22,5	30,0	45,0	90,0
1.3	Hals (Seiten/Nacken)	190	50	50	3,80	0,36	3,80	22,0	44,9	33,4	20,4	11,9	19,5	15,2	19,0	25,3	38,0	76,0
1.4	Hals (vorne/Kehlkopf)	35	10	10	3,50	0,06	3,50	21,1	45,3	34,0	21,3	13,4	18,7	14,0	17,5	23,3	35,0	70,0
2.1	Rücken/Schultern	250	70	35	7,14	0,89	3,57	21,3	45,2	33,8	21,1	13,0	18,9	14,3	17,9	23,8	35,7	71,4
2.2	Brust	210	45	25	8,40	0,88	4,67	24,4	43,7	31,7	17,5	5,6	21,6	18,7	23,3	31,1	46,7	93,3
2.3	Bauch	160	35	10	16,00	1,28	4,57	24,1	43,8	31,9	17,8	6,6	21,4	18,3	22,9	30,5	45,7	91,4
2.4	Becken	250	75	25	10,00	1,25	3,33	20,6	45,6	34,3	21,8	14,2	18,3	13,3	16,7	22,2	33,3	66,7
2.5	Gesäß	250	80	15	16,67	2,08	3,13	19,9	45,8	34,7	22,4	15,1	17,7	12,5	15,6	20,8	31,3	62,5
3.1	Oberarm/Ellenbogengelenk	190	50	30	6,33	0,60	3,80	22,0	44,9	33,4	20,4	11,9	19,5	15,2	19,0	25,3	38,0	76,0
3.2	Unterarm/Handgelenk	220	50	40	5,50	0,61	4,40	23,7	44,0	32,2	18,4	8,0	21,0	17,6	22,0	29,3	44,0	88,0
3.3	Hand/Finger	180	60	75	2,40	0,22	3,00	19,5	46,0	34,9	22,8	15,6	17,3	12,0	15,0	20,0	30,0	60,0
4.1	Oberschenkel/Knie	250	80	50	5,00	0,63	3,13	19,9	45,8	34,7	22,4	15,1	17,7	12,5	15,6	20,8	31,3	62,5
4.2	Unterschenkel	170	45	60	2,83	0,24	3,78	21,9	44,9	33,5	20,5	12,0	19,4	15,1	18,9	25,2	37,8	75,6
4.3	Füße/Zehen/Gelenk	160	45	75	2,13	0,17	3,56	21,3	45,2	33,9	21,1	13,1	18,9	14,2	17,8	23,7	35,6	71,1

Größe	Einheit	Definition	Größe	Einheit	Definition	Größe	Einheit	Definition
KB		Codierung des Körperbereichs	A _{ref}	cm ²	Druckfläche	LQ _{ref}	mm	Seitenlänge Quadrat
STK	N	Stoßkraft	DK _{ref}	mm	Durchmesser Kreis	SR25 _{ref}	mm	Seitenlänge Rechteck (1. Seite 25 mm)
DFP	N/cm ²	Druck/Flächenpressung	IDR50 _{ref}	mm	Innendurchmesser Kreisring (außen 50 mm)	SR20 _{ref}	mm	Seitenlänge Rechteck (1. Seite 20 mm)
KK	N/mm	Kompressionskonstante	IDR40 _{ref}	mm	Innendurchmesser Kreisring (außen 40 mm)	SR15 _{ref}	mm	Seitenlänge Rechteck (1. Seite 15 mm)
S _{kom}	mm	Maximaler Kompressionsweg	IDR30 _{ref}	mm	Innendurchmesser Kreisring (außen 30 mm)	SR10 _{ref}	mm	Seitenlänge Rechteck (1. Seite 10 mm)
WK _{ref}	Nm	Maximale Kompressionsarbeit bis S _{kom}	IDR25 _{ref}	mm	Innendurchmesser Kreisring (außen 25 mm)	SR5 _{ref}	mm	Seitenlänge Rechteck (1. Seite 5 mm)

Anhang

5 Checkliste und Empfehlungen zur Anwendung der BG/BGIA-Empfehlungen in der betrieblichen Praxis

Bei einer Arbeitsplatzapplikation, bei der ein kollaborierender Roboter eingesetzt wird, muss der Anwender/Systemintegrator oder die hierfür verantwortliche Person eine Risikobeurteilung erstellen. Zur Beurteilung und zum Nachweis einer sicheren Mensch-Maschine-Interaktion zwischen Person und kollaborierendem Roboter innerhalb einer spezifischen Arbeitsplatzapplikation müssen die Kollisionsrisiken, im Wesentlichen bestimmt durch das Schadensausmaß (Verletzungsschwere) relevanter Kollisionsvorgänge und deren Eintrittswahrscheinlichkeit, beurteilt und gegebenenfalls minimiert (Risikominderung) werden.

Um die Verletzungsrisiken zu beurteilen, denen eine Person aufgrund mechanischer Einwirkungen durch den kollaborierenden Roboter ausgesetzt ist, werden die aufgeführten Prüfgrundlagen nach Punkt 1 der Checkliste heran gezogen. Hier ist neben der Maschinenrichtlinie und den geltenden Normen für Industrieroboter insbesondere die „BG/BGIA-Empfehlungen zur Gestaltung von Arbeitsplätzen mit kollaborierenden Robotern“, U 001/2009, Ausgabe Juli 2009 zu beachten.

Diese Checkliste soll die Erstellung von Risikoanalysen ausschließlich nur auf der Grundlage der Anforderungen dieser Empfehlungen unterstützen. Sonstige Sicherheitsbetrachtungen, z. B. funktionale Sicherheit, elektrische Sicherheit oder Widerstandsfähigkeit gegen Umwelteinflüsse bleiben unberührt bzw. werden durch unabhängig geltende Standards und Checklisten abgedeckt.

In der Checkliste sind Kriterien und Stichworte aufgeführt, die für eine Risikoanalyse eines kollaborierenden Roboterbetriebs beachtet werden sollten. Alle Elemente, Informationen, Daten, Messungen, Festlegungen und Ergebnisse der Risikobeurteilung sind in einem geeigneten Dokument zusammenfassend aufzuführen. Die Reihenfolge der Checkliste bietet hierfür eine geeignete Struktur.

Checkliste

1 Prüfgrundlagen

- a) Maschinenrichtlinie (2006/42/EG)
- b) DIN EN ISO 10218-1:2006 „Industrieroboter – Sicherheitsanforderungen – Teil 1: Roboter“
- c) DIN EN ISO 10218-2:2008 „Industrieroboter – Sicherheitsanforderungen – Teil 2: Robotersystem und Integration“ (Norm-Entwurf)
- d) Ergänzung/Präzisierung der sicherheitstechnischen Anforderungen der unter 1 b) und 1 c) aufgeführten Normen durch die „BG/BGIA-Empfehlungen zur Gestaltung von Arbeitsplätzen mit kollaborierenden Robotern“, U 001/2009, Ausgabe Juli 2009.

2 Allgemeine Daten zur Risikoanalyse

- a) Antragsteller/Unternehmen (evtl. Bereiche/verantwortliche Person)
- b) Für die Risikobeurteilung des Arbeitsplatzes: Anwender/Hersteller oder verantwortliche Person

- c) Prüfende Organisation (Prüfinstitut, verantwortlicher Prüfer, Prüfdatum)
- d) Typ und Kurzbeschreibung des eingesetzten kollaborierenden Roboters
- e) Bezeichnung der Arbeitsplatzapplikation (Name des Arbeitsplatzes, u. U. mit kollaborierendem Roboter).

3 Kollaborierender Roboter

- a) Spezifikationsdaten zur Verwendung des kollaborierenden Roboters in der Applikation (präzise Beschreibungen, aussagekräftige Zeichnungen und Bilder)
- b) Beschreibung und Spezifikationsdaten des kollaborierenden Roboters (relevante technische Daten, aussagekräftige Zeichnungen und Bilder)
- c) Beschreibungen und Spezifikationsdaten der am kollaborierenden Roboter und am gesamten Arbeitsplatz eingesetzten Schutzeinrichtungen
- d) Dokument zur (zusammenhängenden) Gesamtwirksamkeit aller Schutzeinrichtungen am Arbeitsplatz (Integration aller Schutzeinrichtungen, Funktionswirkungen, Zusammenwirken, Blockschaltbild).

4 Beschreibungen und Spezifikationsdaten der Arbeitsplatzapplikation

- a) Räumliche Umgebungsbedingungen, Zugänge, Abgänge, Verkehrswege
- b) Im Arbeitsbereich befindliche und für die Applikation relevante Geräte, Einrichtungen, Maschinen, optional Ausrüstungen, Werkzeuge, Produktionsgüter und deren Positionierungen einschließlich des kollaborierenden Roboters
- c) Aussagekräftige Übersichts- und Detailzeichnungen und Bilder.

5 Beschreibungen und Spezifikationsdaten der Arbeitsaufgabe und der Arbeitstätigkeiten in der Arbeitsplatzapplikation

- a) Alle relevanten Arbeitstätigkeiten/Tätigkeitsaspekte der Person
- b) Alle relevanten Arbeitstätigkeiten/Tätigkeitsaspekte des kollaborierenden Roboters
- c) Zeitliche Abfolge aller Arbeitstätigkeiten und Zusammenwirken bzw. Sequenzen von Tätigkeitsaspekten, bei denen Person und kollaborierender Roboter beteiligt sind
- d) Wichtige Distanzmaße zwischen Roboter und Person in allen Arbeitsphasen.

6 Beschreibungen und Spezifizierung des Kollaborationsraumes, Tätigkeiten der Person im Kollaborationsraum

- a) Präzise geometrische Spezifikation des Kollaborationsraumes (Angabe von Distanzmaßen mit einer Genauigkeit von 1 % v. M., jedoch nicht genauer als eine Distanztoleranz von ± 1 mm).

7 Festlegung der Körpereinzelbereiche mit Kollisionsrisiko im Kollaborationsraum

- a) Hierzu ist das Verfahren nach „BG/BGIA-Empfehlungen zur Gestaltung von Arbeitsplätzen mit kollaborierenden Robotern“, U 001/2009, Ausgabe Juli 2009 zu verwenden
- b) Die Festlegungen zu den Körperbereichen sind plausibel zu begründen (Körperorientierungen der Person zum kollaborierenden Roboter)
- c) Es ist ausreichend zu begründen, wie aufgrund von Applikations- und Roboterbedingungen sicher gestellt wird, dass für die im Vorlagenblatt nicht gewählten Körpereinzelbereiche kein Kollisionsrisiko besteht.

8 Zusammenfassung aller relevanten Angaben zu den mit Kollisionsrisiko besetzten Arbeitstätigkeiten mit den hierfür gültigen Grenzwerten der Verletzungskriterien und orientierenden Verformungskonstanten (Tabellarische Form empfehlenswert; siehe Beispiel in Abschnitt 8 der BG/BGIA-Empfehlungen)

9 Überprüfung der zulässigen Verletzungsschwere mit den Grenzwerten der festgelegten Verletzungskriterien

- a) Erstellung einer Liste mit charakteristischen Kollisionsvorgängen, die alle Kollisionsarten im Kollaborationsraum/in den Kollaborationsräumen abdecken
- b) Durchführung von Messungen zur Erfassung der applikationsbedingten Werte der Verletzungskriterien und Vergleich mit den zulässigen Grenzwerten
- c) Geeignete Messgeräte zur Messung der Verletzungskriterien „Klemm-/Quetschkraft“, „Stoßkraft“ und „Druck/Flächenpressung“ werden zurzeit entwickelt. Die Kräfte und Drücke müssen messtechnisch nachgewiesen werden. Wenn Messungen des Verletzungskriteriums „Druck/Flächenpressung“ nicht durchgeführt werden können, sind zumindest aussagekräftige Berechnungen dazu erforderlich
- d) Messgeräte zur Erfassung der Verletzungskriterien müssen die Wirkprinzipien nach Abschnitt 6 der Empfehlungen realisieren.

10 Erstellen von zusammenfassenden Prüfprotokollen

- a) Prüfprotokoll zu den „Technologischen Anforderungen“ nach Abschnitt 5.1 der BG/BGIA-Empfehlungen, U 001/2009, Ausgabe Juli 2009
- b) Prüfprotokoll zu den „Medizinisch-biomechanischen Anforderungen“ nach Abschnitt 5.2 der BG/BGIA-Empfehlungen, U 001/2009, Ausgabe Juli 2009
- c) Prüfprotokoll zu den „Ergonomischen Anforderungen“ nach Abschnitt 5.2 der BG/BGIA-Empfehlungen, U 001/2009, Ausgabe Juli 2009
- d) Prüfprotokoll zu den „Arbeitsorganisatorischen Anforderungen“ nach Abschnitt 5.2 der BG/BGIA-Empfehlungen, U 001/2009, Ausgabe Juli 2009

- 11 Einzelbeurteilungen zu allen Rahmenbedingungen, Spezifikationsdaten und Prüfungen (Messungen, Berechnungen)**
- 12 Gesamtbeurteilung zu den Ergebnissen aller sicherheitstechnischen Teilprüfungen der BG/BGI-A-Empfehlungen, Dokument U 001/2009, Ausgabe Juli 2009.**