



**DGUV**

Fachbereich Holz und Metall  
Berufsgenossenschaft  
Holz und Metall

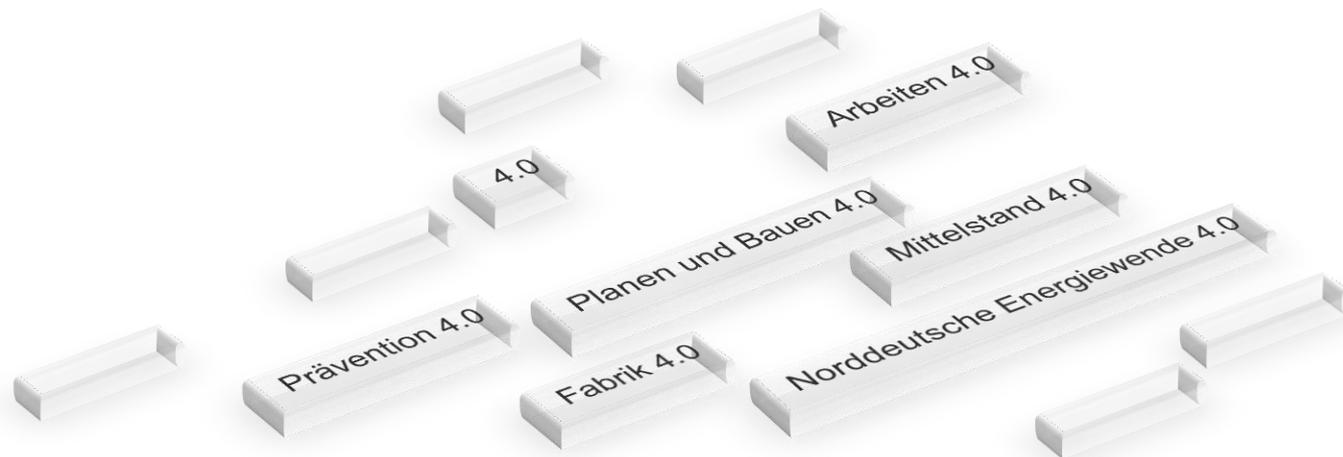
# **Industrie 4.0 als Motor für mehr Sicherheit und Gesundheit am Beispiel der Mensch-Roboter-Kollaboration**

Dr. Matthias Umbreit, Berufsgenossenschaft Holz und Metall  
Isaac-Fulda-Allee 18, 55124 Mainz  
Tel. +49 6131 802 11442

Industrie 1.0	Ende 18. Jh. Einsatz von Dampfmaschinen in der Produktion
Industrie 2.0	Ende 19. Jh. Anfang der Industrieproduktion, erste Fließbänder, Elektromotoren
Industrie 3.0	1970er Jahre SPS- und CNC- Steuerungen in der Produktion
Industrie 4.0	20?? Digitalisierung und Vernetzung der Fertigungstechnik und Logistik, Vernetzung von Maschinen und Teilen

Bundesregierung\*: Verzahnung der industriellen Produktion mit modernster Informations- und Kommunikationstechnik

- Zentraler Befähiger: Anwendung der Internettechnologie zur Kommunikation zwischen Menschen, Maschinen und Produkten
- Ziele: Klassische Ziele der produzierenden Industrie wie Qualität, Kosten- und Zeiteffizienz, Ressourceneffizienz, Flexibilität ...



\* Ehemals Projekt Hightech-Strategie (2006)  
Quelle: Wikipedia

# Motivation

Elimination  
klassischer  
Unfallursachen

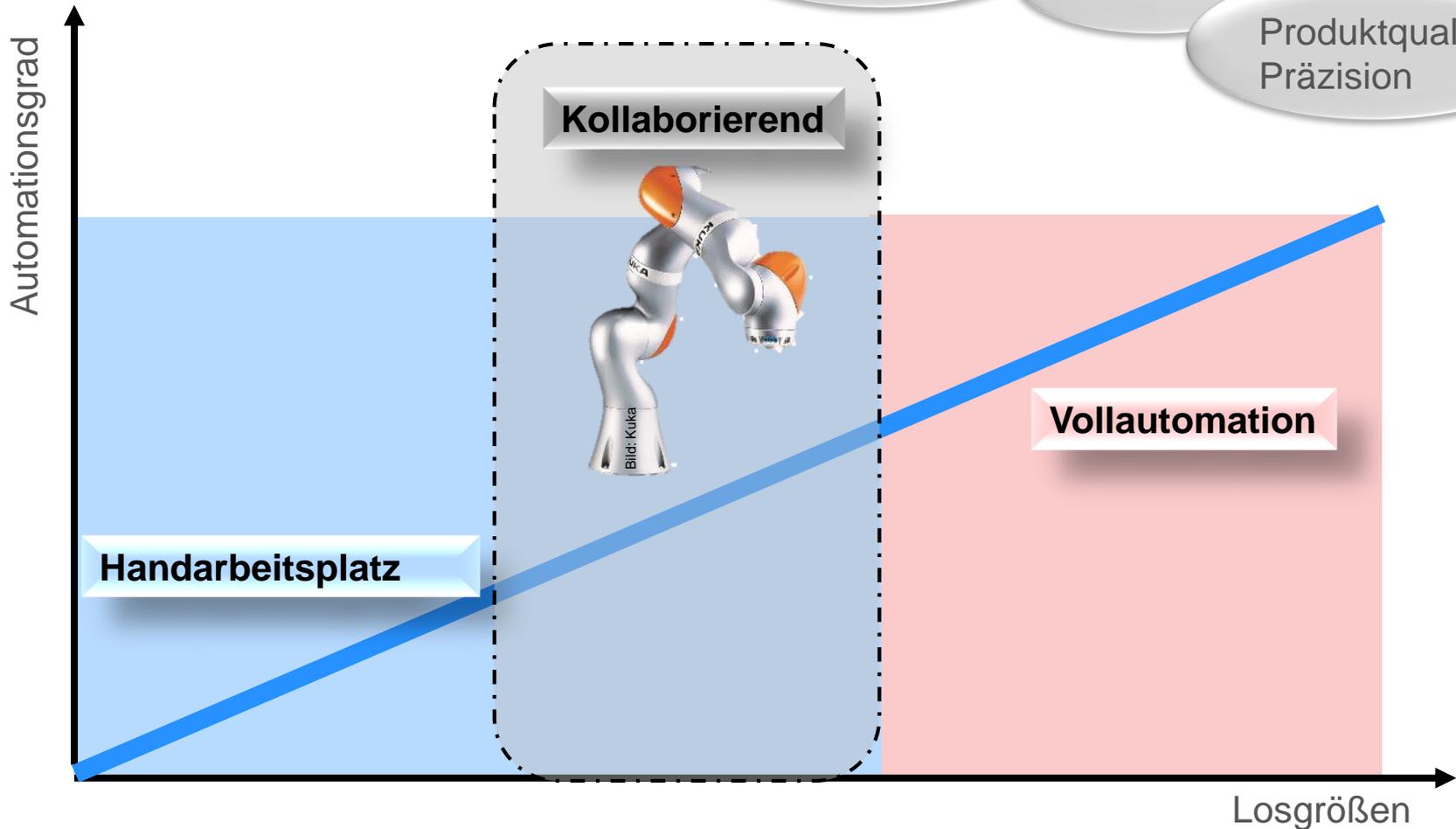
Ergonomie

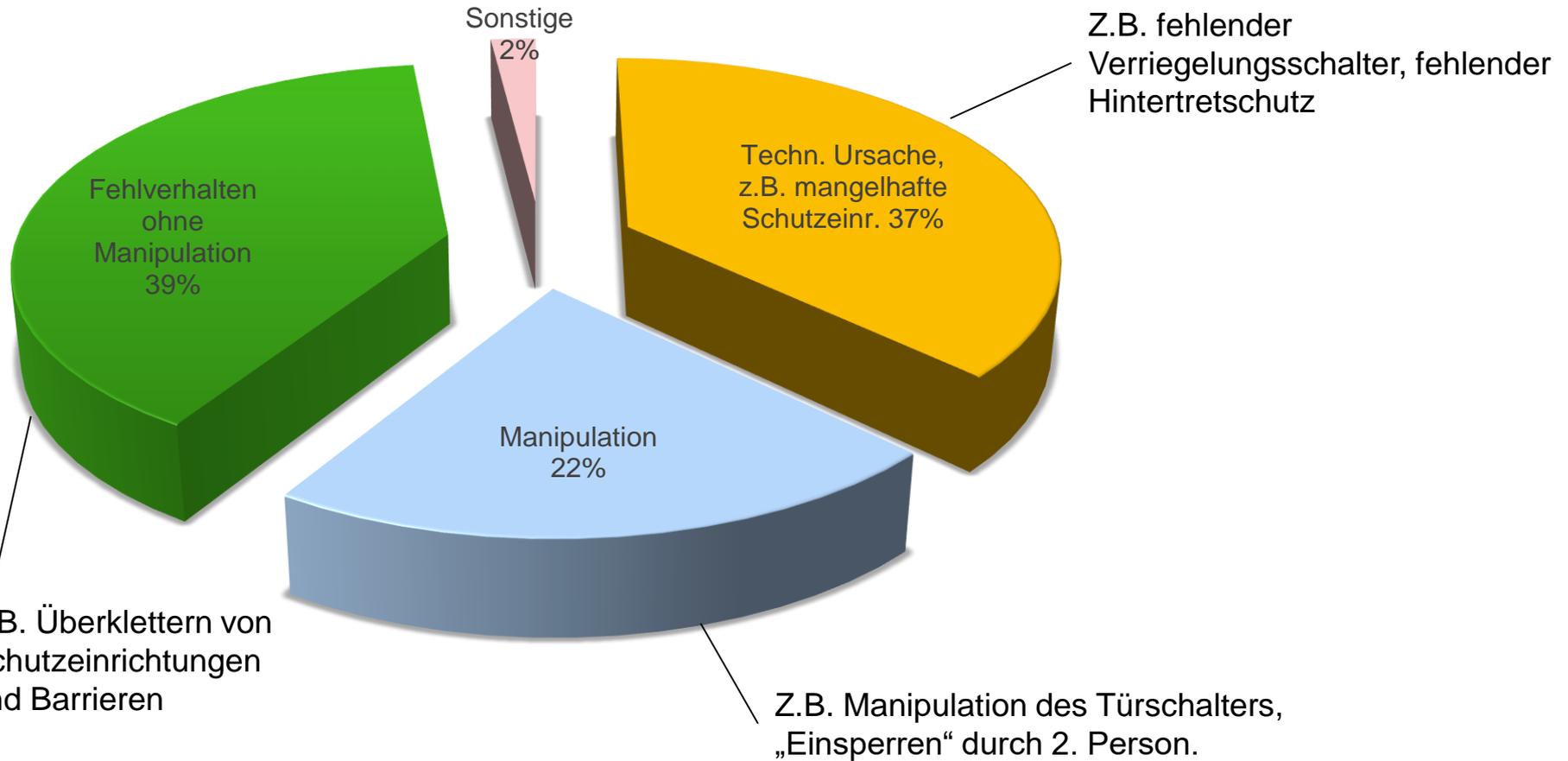
Demografischer  
Wandel

Flexibilität

Wirtschaftlichkeit

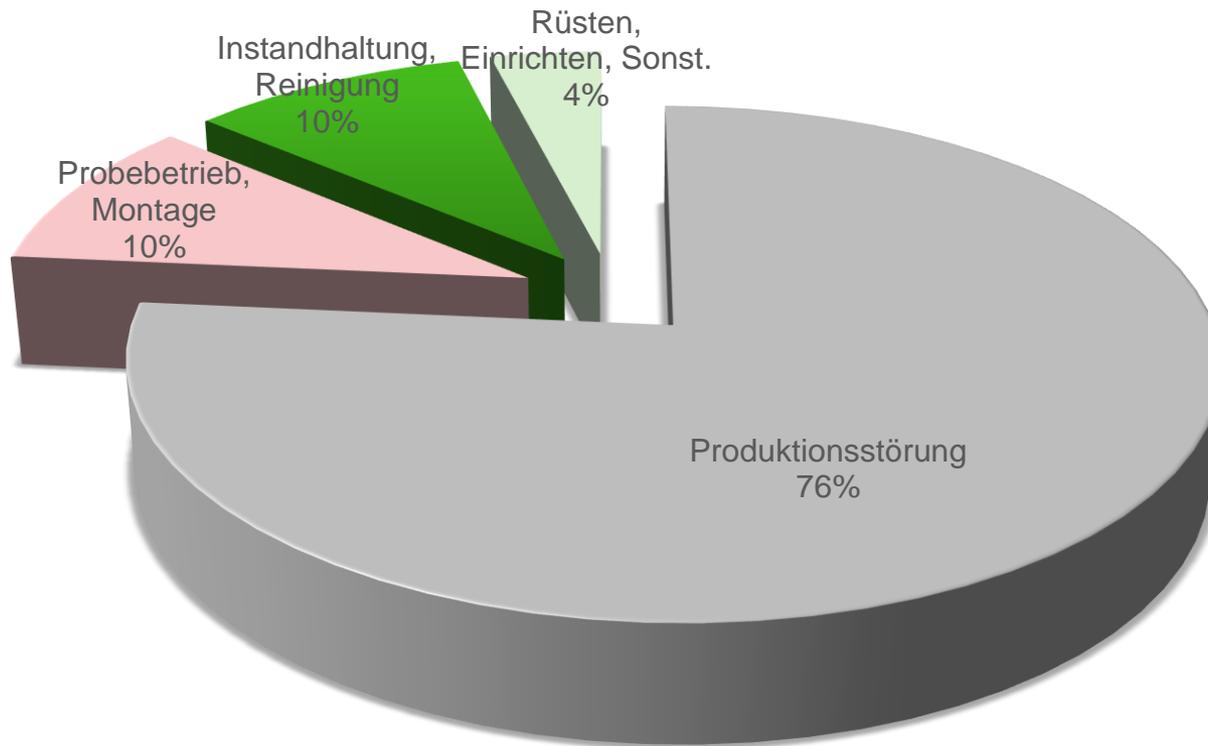
Produktqualität /  
Präzision





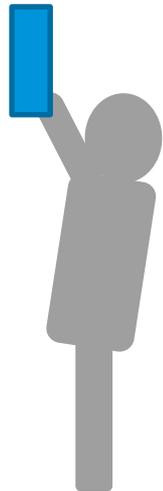
Auswertung von 51 schweren Arbeitsunfällen an Industrieroboteranlagen im Bereich BGHM im Zeitraum 2009-2016

Anmerkung: Die Angaben erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Änderungen und Aktualisierungen aufgrund geänderter/aktualisierter Daten möglich.

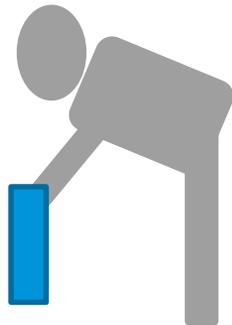


Auswertung von 51 schweren Arbeitsunfällen an Industrieroboteranlagen im Bereich BGHM im Zeitraum 2009-2016

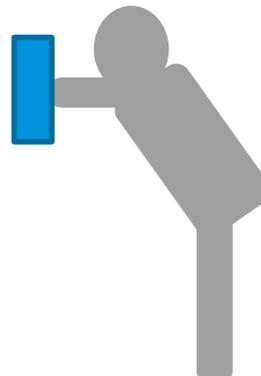
Anmerkung: Die Angaben erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Änderungen und Aktualisierungen aufgrund geänderter/aktualisierter Daten möglich.



Überkopfarbeit

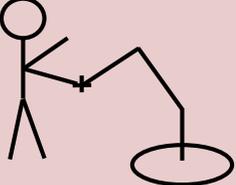
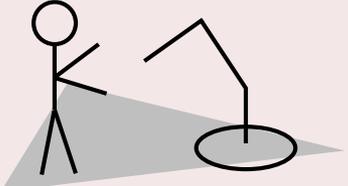
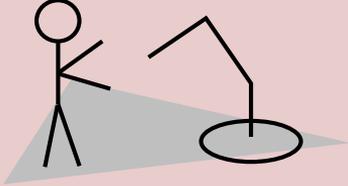
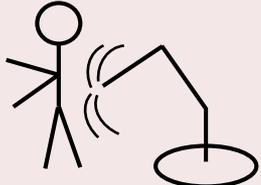


Häufiges Bücken



Montage in vorgebeugter  
Haltung

# Kollaborationsarten

Kollaborationsart	Zweck	Sicherheitsanforderungen	Beispiel Anmerkung
<p>Handführung</p> 	<p>Manuelle Führung z.B. durch Joystick. und Zustimmschalter</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Sichere Geschwindigkeit (Kategorie 3, PLd)</li> <li>▪ Not-Halt leicht erreichbar</li> <li>▪ Zustimmschalter (Kategorie 3, PLd)</li> </ul>	<p>Manuelle Feinpositionierung schwerer Teile Achtung Handführung ≠ Programmieren</p>
<p>Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung</p> 	<p>Roboter verlangsamt bei Annäherung Roboter beschleunigt bei Entfernung</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Personendetektionssystem (Kategorie 3, PLd), z.B. Laserscanner, Sicherheits-3-D-Kamera</li> <li>▪ Sichere Geschwindigkeit (Kategorie 3, PLd)</li> <li>▪ Sicherheitsabstände nach EN ISO 13855</li> </ul>	<p>Kontrollaufgaben Achtung: Sicherheitsabstände nach EN ISO 13855 sind im Betrieb meist nicht vorhanden</p>
<p>Sicherheitsgerichteter Stopp</p> 	<p>Roboter stoppt bei Annäherung Roboter startet bei Entfernung</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Personendetektionssystem (Kategorie 3, PLd), z.B. Laserscanner, Sicherheits-3-D-Kamera</li> <li>▪ Sicherer Stopp bei jedem Zutritt</li> <li>▪ Sichere Geschwindigkeit (Kategorie 3, PLd)</li> <li>▪ Kein automat. Wiederanlauf im Detektionsbereich</li> <li>▪ Sicherheitsabstände nach EN ISO 13855 !</li> </ul>	<p>Kontrollaufgaben Achtung: Sicherheitsabstände nach EN ISO 13855 sind im Betrieb meist nicht vorhanden</p>
<p>Leistungs- und Kraftbegrenzung</p> 	<p>Roboter stoppt bei Kontakt wenn Kraft oder Druck über Limit</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Pauschale Begrenzung auf 80W oder 150N entfällt ab Jan. 2012</li> <li>▪ Begrenzung von Kraft und/oder Druck bei Kontakt (Körperregion)</li> <li>▪ Z.B. taktile Schutzeinrichtungen, Drehmomentsensoren (Kategorie 3, PLd)</li> <li>▪ Sichere Geschwindigkeit (Kategorie 3, PLd)</li> </ul>	<p>Unterstützung manueller Tätigkeiten, Kommissionierauf- gaben leichter Teile</p>

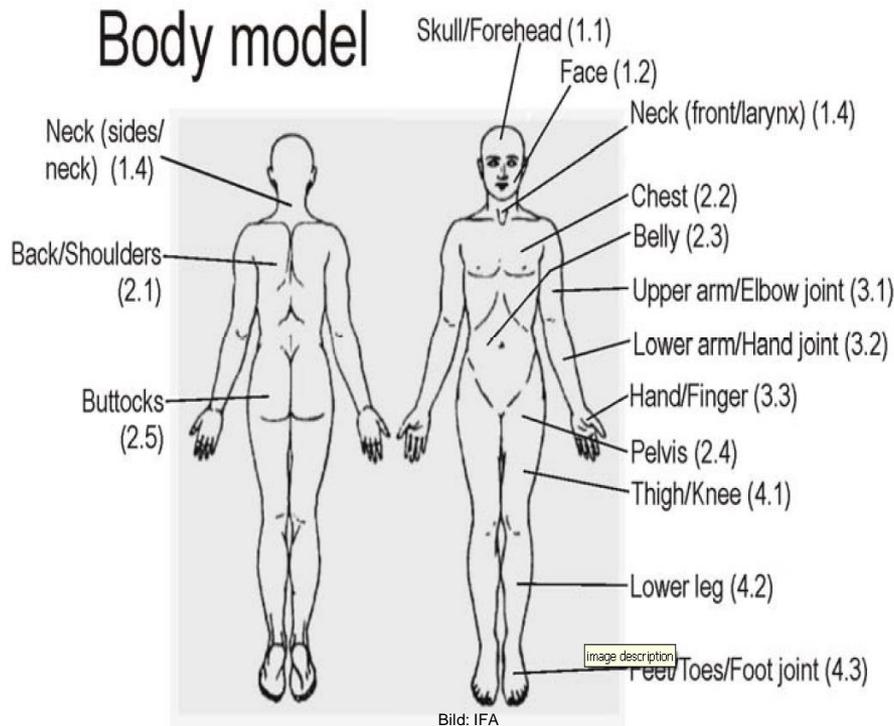


Der Roboter ist sicher ...

Der Roboter ist inhärent sicher ...

Der Roboter ist zertifiziert ...

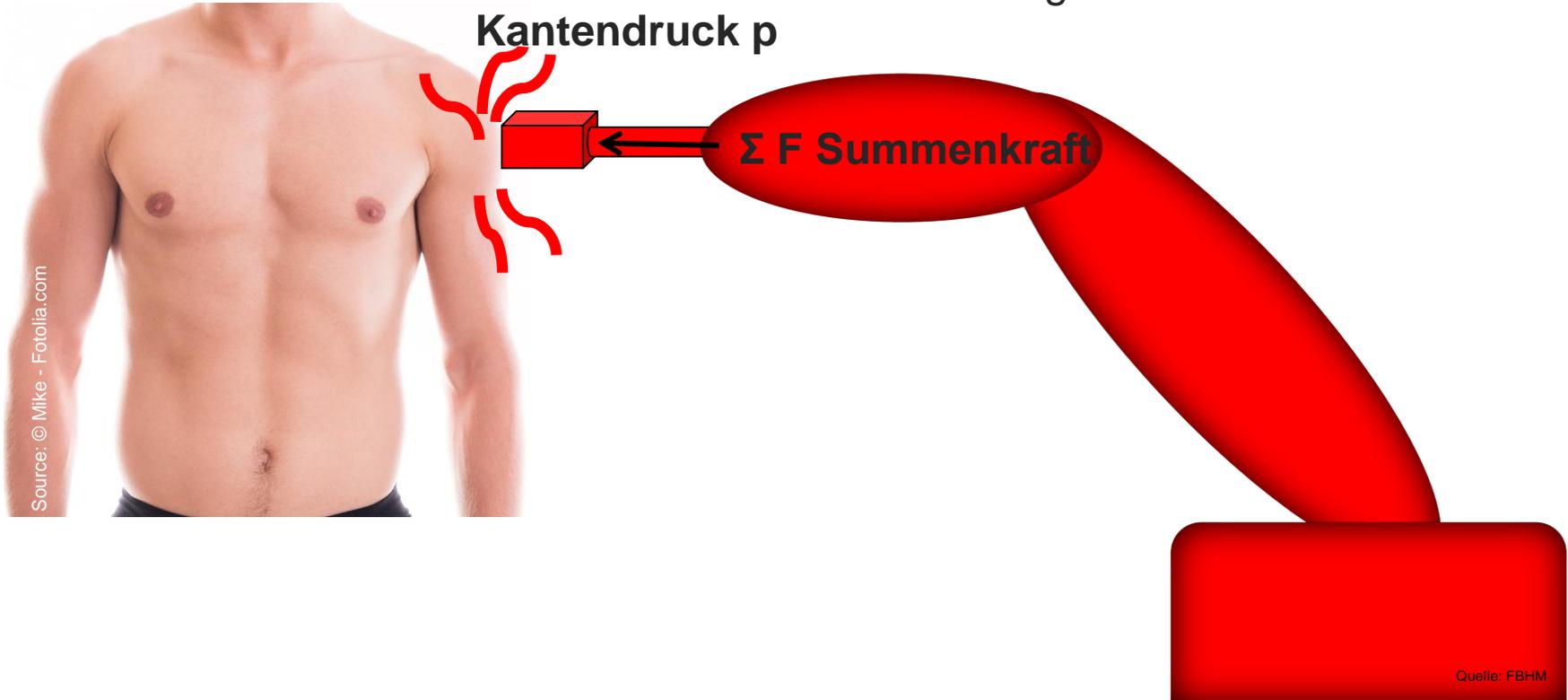
Der Roboter benötigt keinen Zaun ...

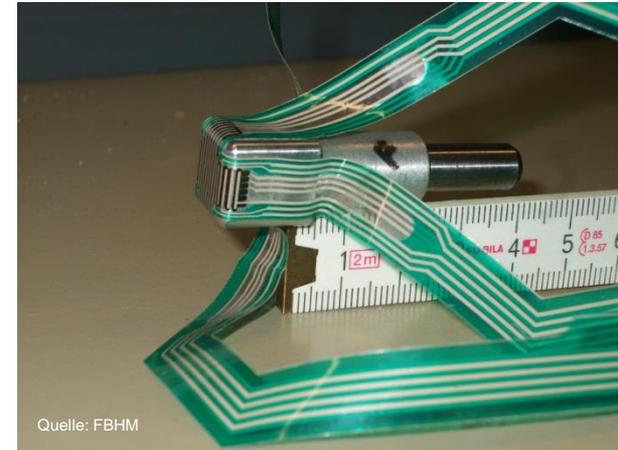


- Aus der Literatur wurden erste Kraftgrenzwerte extrahiert
- Kraftgrenzwerte unterscheiden sich nach Körperregionen
- Keine spezifischen Grenzwerte für Mensch-Maschine-Schnittstellen

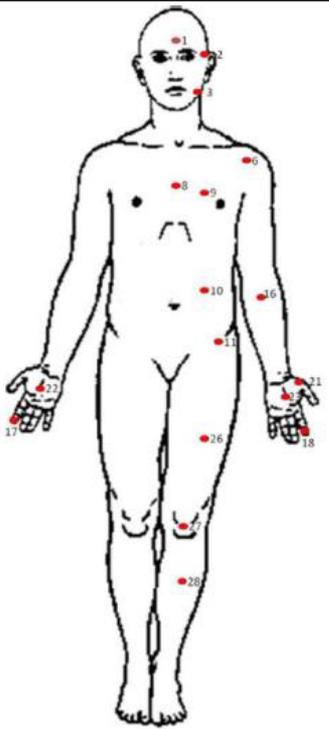
# Kraft F und Druck p

- Neben der eingeleiteten Kraft ist besonders der Druck  $p$  [N/cm<sup>2</sup>] an der Schmerzauslösung beteiligt





- Forschungsprojekt: DGUV – Uni Mainz
- Algometer entwickelt am IFA (Institut für Arbeitssicherheit der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung)
- Spezieller Stößel nach Anforderungen von Roboterherstellern und- Anwendern
- Algometer stoppt wenn Druckgefühl übergeht in Schmerz
- 100 Probanden

Front	Specific Localization	Body Region	
	1	Mid of forehead	Skull/Forehead
	2	Temple	Skull/Forehead
	3	Masticatory muscle	Face
	6	Shoulder joint	Back/Shoulders
	8	Stemum	Chest
	9	Pectoral muscle	Chest
	10	Abdominal muscle	Belly
	11	Pelvic bone	Pelvis
	16	Arm nerve	Upper arm/Elbow joint
	17	Forefinger pad d	Hand/Finger
	18	Forefinger pad nd	Hand/Finger
	21	Thenar	Hand/Finger
	22	Palm of hand d	Hand/Finger
	23	Palm of hand nd	Hand/Finger
	26	Thigh muscle	Thigh/Knee
	27	Kneecap	Thigh/Knee
	28	Shin splint	Lower leg
	d	Dominant body side	
	nd	Non dom. body side	

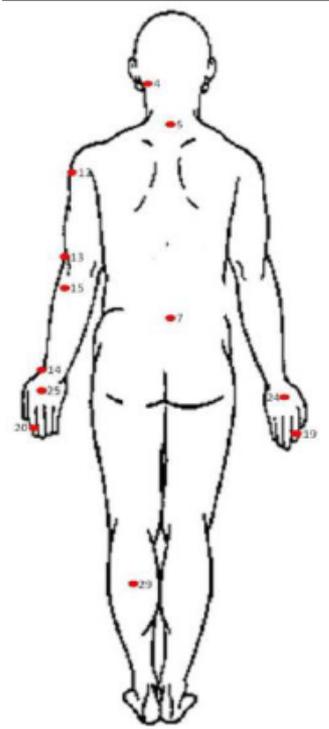
Rear	Specific Localization	Body Region	
	4	Neck muscle	Neck (sides/neck)
	5	7th neck muscle	Neck (sides/neck)
	7	5th lumbar vertebra	Back/Shoulders
	12	Deltoid muscle	Upper arm/Elbow joint
	13	Humerus	Upper arm/Elbow joint
	14	Radius bone	Lower arm/Hand joint
	15	Forearm muscle	Lower arm/Hand joint
	19	Forefinger end joint nd	Hand/Finger
	20	Forefinger end joint d	Hand/Finger
	24	Back of the hand d	Hand/Finger
	25	Back of the hand nd	Hand/Finger
	29	Calf muscle	Lower leg
	d	Dominant body side	
nd	Non dom. body side		

Bild: Uni Mainz

# Biomechanische Grenzwerte

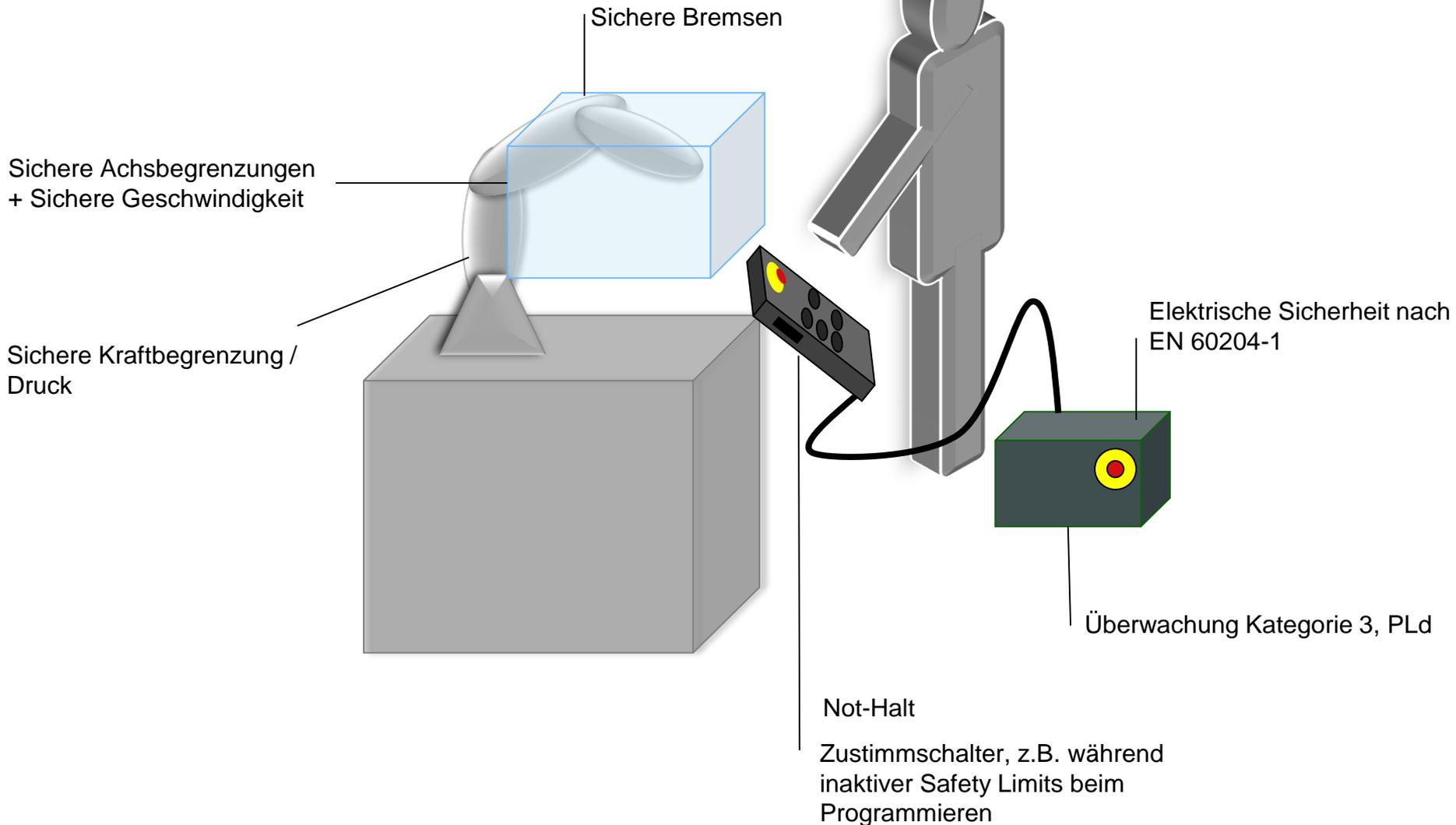
Körperlokalisierung		Quasi statischer Kontakt		Transienter Kontakt	
Spezifische Lokalisation	Körperregion	Spitzendruck $p_s$ [N/cm <sup>2</sup> ] (Anmerkung 1)	Kraft $F_s$ [N] (Anmerkung 2)	Spitzendruck $P_T$ Faktor (Anmerkung 3)	Kraft $F_T$ Faktor (Anmerkung 3)
1	Stirnmitte	Schädel und Stirn	130	Kein	Kein
2	Schläfe		110		
3	Kaumuskel	Gesicht	110	2	2
4	Halsmuskel	Nacken	140		
5	Dornfortsatz 7. Halswirbel		210		
6	Schultergelenk	Rücken und Schultern	160		
7	Dornfortsatz 5. Lendenwirbel		210		
8	Brustbein	Brust	120		
9	Brustmuskel		170		
10	Bauchmuskel	Bauch	140		
11	Beckenknochen	Becken	110		
12	Deltamuskel	Oberarm und Ellenbogen	210		
13	Oberarmknochen		190		
14	Speichenknochen	Unterarm und Handgelenk	220		
15	Unterarmmuskel		180		
16	Armnerve		180		
17	Zeigefingerbeere d	Hand und Finger	300		
18	Zeigefingerbeere nd		270		
19	Zeigefingerendgelenk d		280		
20	Zeigefingerendgelenk nd		220		
21	Daumenballen		200		
22	Handinnenfläche d		140		
23	Handinnenfläche nd		260		
24	Handrücken d		260		
25	Handrücken nd		200		
26	Oberschenkelmuskel		Oberschenkel und Knie		
27	Kniescheibe	250			
28	Schienbein	Unterschenkel	220		
29	Wadenmuskel		210		

Kritische Zone

Die im DGUV-Forschungsprojekt ermittelten biomechanischen Grenzwerte wurden in die internationale Spezifikation ISO TS 15066 übernommen

# Sicherheitsbewertung Robotersystem -

## a) Roboter ISO 10218-1



# Sicherheitsbewertung Robotersystem - b) Applikation ISO 10218-2, ISO TS 15066

Kopf außerhalb Arbeitsbereich

Parametrierung Safety Limits

Keine scharfen Kanten oder Spitzen, keine Scherkanten, insbesondere im Werkzeugbereich

Person kann sich selbst befreien

Reaktionszeit der Steuerung

CE

Typenschild mit Name u. Anschrift des Integrators

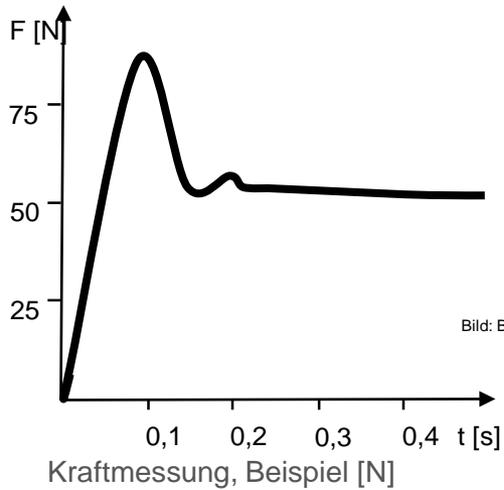
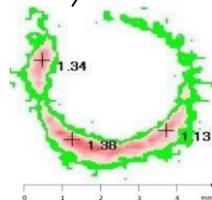
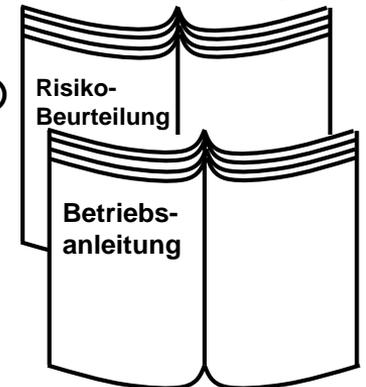
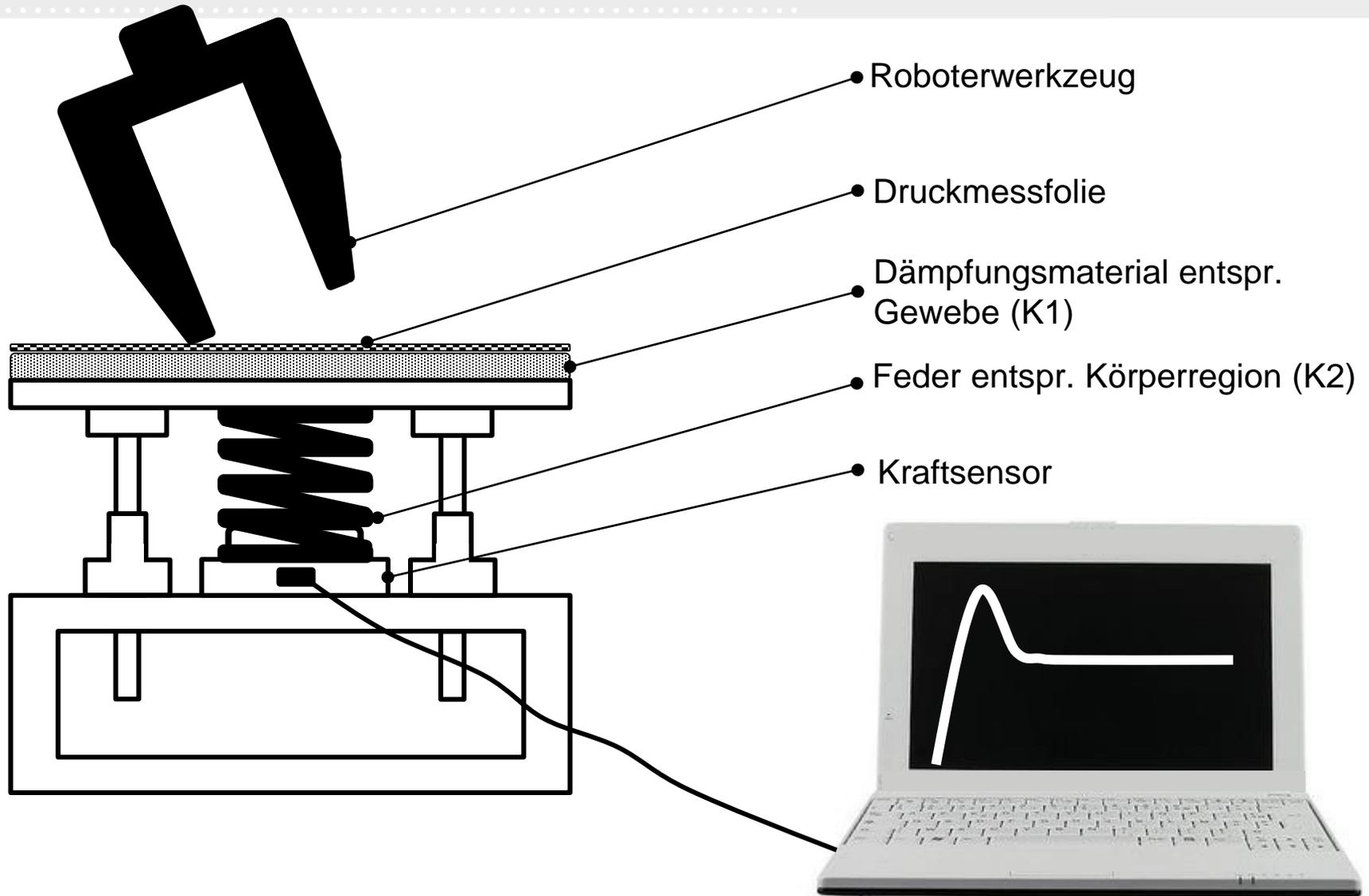


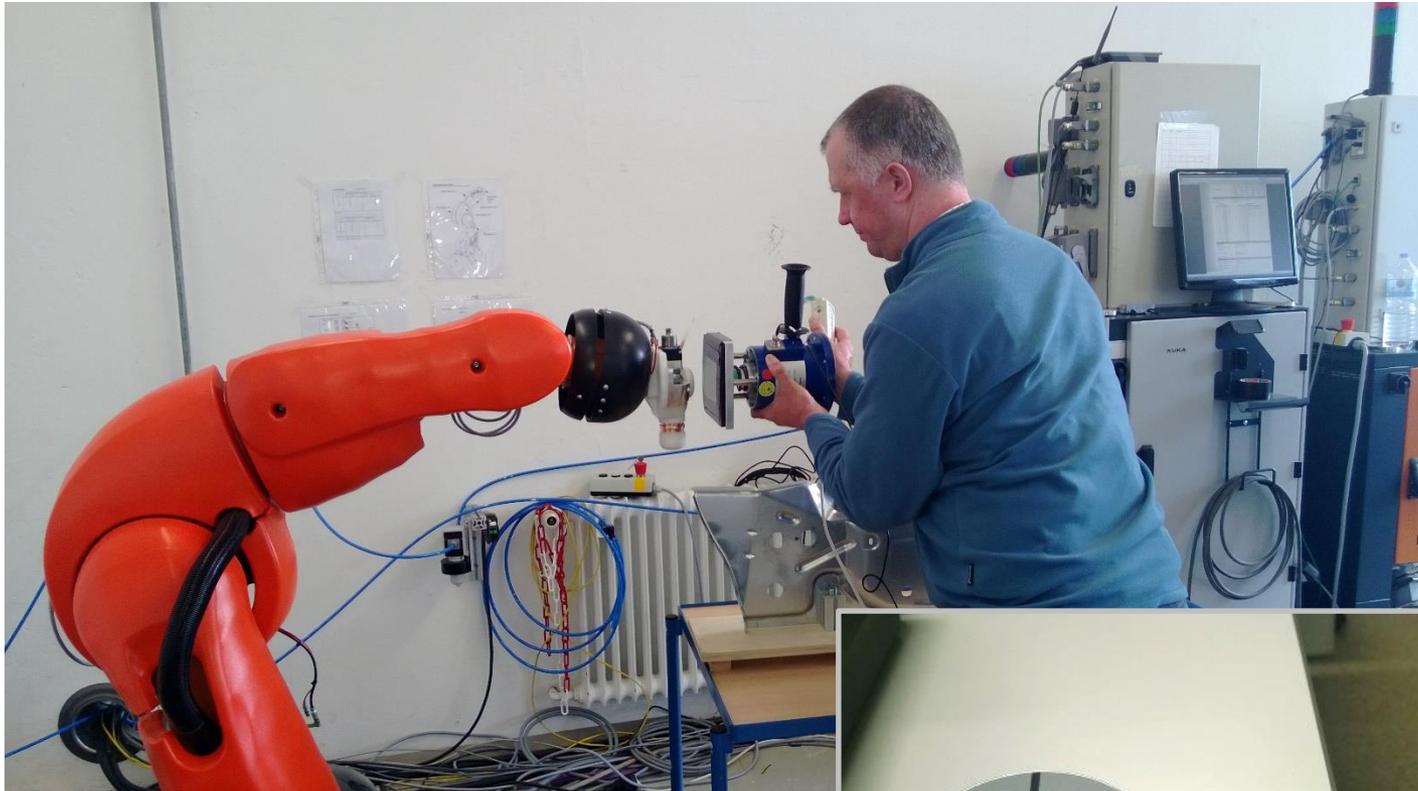
Bild: BGHM



Druckmessung, Beispiel [Mpa]







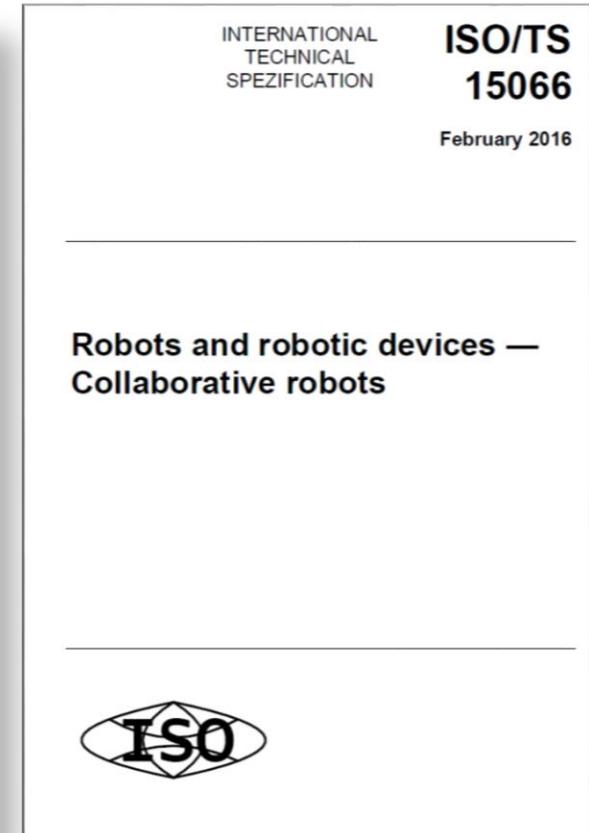
# Gefährdungsbeurteilung

Kollaborierende Robotersysteme

Gefährdung	Risiko	Schutzmaßnahme
<u>Mechanische Gefährdung des Werkers</u> – Unbeabsichtigter Kontakt mit gefahrbringenden Bewegungen	Hoch	<ul style="list-style-type: none"><li>– Sichere Arbeitsräume für Roboter einschl. Werkzeug nach PLd, Kategorie 3, (Risikobewertung des Herstellers anfordern)</li><li>– Ausschluss von Kopf und Hals vom Arbeitsbereich (Risikobewertung des Herstellers anfordern)</li><li>– Messung von Kraft- und Druckgrenzwerten vor Inbetriebnahme (Messprotokolle anfordern), gerundete Kanten</li><li>– Einsatz nur von gesunden Mitarbeitern</li><li>– Wiederkehrende Messungen durch jährl. Prüfung</li><li>– Freigabe von veränderten Programmen, Werkzeugen und Werkstücken</li><li>– Mitarbeiterschulung vor Inbetriebnahme</li><li>– Ausreichende Beleuchtung</li></ul>
<u>Mechanische Gefährdung von Programmierern, Einrichtern und Instandhaltern</u> – Unbeabsichtigter Kontakt mit gefahrbringenden Bewegungen	Hoch	<ul style="list-style-type: none"><li>– Betriebsartenwahlschalter, Zustimmschalter und reduzierte Geschwindigkeit (Risikobewertung des Herstellers anfordern)</li><li>– Safety-Programmierer qualifizieren</li></ul>
<u>Mechanische Gefährdung von Besuchern</u> – Unbeabsichtigter Kontakt mit gefahrbringenden Bewegungen	Gering	<ul style="list-style-type: none"><li>– Besucher nur in Begleitung</li><li>– Schwarz/gelbe Schraffur am Boden</li><li>– Vermeidung von Stolperstellen</li><li>– Keine Bedienknöpfe im Arbeitsbereich</li><li>– Not-Halt leicht erreichbar</li></ul>
<u>Psychische Gefährdung</u> – Einklemmtsein nach einem Sicherheitsstopp – Überforderung, Stress, Arbeitstempo	Mittel	<ul style="list-style-type: none"><li>– Knopf zum Entlasten der Achsen vom Hersteller fordern</li><li>– Einweisung der Mitarbeiter in Notsituationen, Fluchtwege vorsehen</li><li>– Betriebsanweisung leicht verständlich an der Anlage anbringen</li><li>– Durch biomechanische Grenzwerte keine hohen Geschwindigkeiten möglich</li></ul>
<u>Ergonomie</u> – Ungünstige Körperhaltung	Mittel	<ul style="list-style-type: none"><li>– Positionierung des Roboters auf Sockel oder hängend</li><li>– Optimierte Bahnplanung - erste Bewegung vom Werker weg (Sichtprüfung)</li></ul>
<u>Elektrische Gefährdung</u> – Elektrischer Schlag, statische Aufladung	Mittel	<ul style="list-style-type: none"><li>– Ausführung der Anlage nach EN 60204-1 (EG-Konformität)</li></ul>

Beim Betrieb ist auf folgendes zu achten:

- Betriebsanleitung des Herstellers verfügbar halten
- Auszug der wichtigsten Anweisungen als Betriebsanweisung gut sichtbar und dauerhaft an der Maschine
- Verhalten bei Störungen und
- Verhalten in Notsituationen, z.B. Eingequetschtsein
- Schulung des Personals, z.B. Safety-Programmierer
- Wegen des generell möglichen Kontakts Roboter-Mensch nur gesunde Bediener
- Wie für jede andere Maschine: Wiederkehrende Prüfungen nach BetrSichV 1/Jahr (siehe DGUV-I 209-074).
- Infolge Verschleiß können sich sicherheitsgerichtete Parameter verändern: Wiederholungsmessungen von Kraft und Druck
- Ebenso nach jedem Umbau, Programmänderung, Softwareupdate etc. Wiederholungsmessungen von Kraft und Druck



Harmonisierte Normen nach EG-Maschinenrichtlinie

209-074

DGUV Information 209



Industrie

**Checkliste: Kollaborierende Robotersysteme**  
(Freilaufender Betrieb ohne äußere Schutzvorrichtungen)  
Stand: 02/2014

Dokumentation	Liegen für die Roboterapplikation folgende technische Unterlagen vor:
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- EG-Konformitätserklärung</li> <li>- Risikoanalyse</li> <li>- Betriebsanleitung</li> <li>- CE-Zeichen</li> </ul>
	<p><i>Anmerkung:</i> Dokumentation für Roboterapplikation einschließlich Werkzeugen und Vorrichtungen. Diese Unterlagen stellt in der Regel der sogenannte Integrator zusammen, d.h. die Firma, welche den Roboter prüft und dem Betreiber zur Nutzung übergibt. Die Unterlagen für den "nackten" Roboter sind nicht ausreichend. Wenn kein Integrator existiert muss der Betreiber die o.g. Unterlagen selbst erstellen.</p>
Äußere technische Merkmale	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Typenschild mit Name und Anschrift des Herstellers (Typenschild des Roboters ist nicht ausreichend)</li> <li>- Not-Halt-Taster leicht erreichbar</li> <li>- Keine scharfen oder spitzen Kanten an Werkzeugaufhängungen und Werkstück. Polsterung an Scherkanten</li> <li>- Kann sich der Mitarbeiter jederzeit von der Roboterzelle entfernen bzw. selbst befreien?</li> <li>- Keine großen Traglasten</li> <li>- Ist der Kopf außerhalb des Arbeitsbereichs?</li> </ul>
Innere Sicherheit	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ist der Roboter sicher? Sichere Geschwindigkeit, Position, Kraft (Kategorie 3, PLd)</li> </ul> <p><i>Anmerkung:</i> Kann in der Regel nur durch ein Zertifikat einer zugelassenen Prüfstelle nachgewiesen werden.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Wurden Geschwindigkeit, Kraft und Position für die Applikation gemessen, um sie zu minimieren?</li> </ul>

DGUV-Information

**Kollaborierende Robotersysteme**  
Planung von Anlagen mit der Funktion „Leistungs- und Kraftbegrenzung“  
Entwurf 11/2015

FB HM-080

Kollaborierende Robotersysteme können in der Funktion „Leistungs- und Kraftbegrenzung (Power and Force Limiting)“ ohne traditionelle Schutzvorrichtungen wie Zäune und Lichtvorhänge zum Einsatz kommen. Bezüglich der Anforderungen zum Einsatz von kollaborierenden Robotersystemen besteht ein Bedarf an praktischen Handlungsanleitungen für Hersteller, Systemintegratoren, Betreiber, Unfallversicherungs-träger und Zertifizierungsstellen.



Bild 1: Hinweisschild Kollaborierendes Robotersystem

**1 Rechtsvorschriften und Normen**

Kollaborierende Robotersysteme fallen unter den Geltungsbereich der EG-Maschinenrichtlinie 2006/42/EG [1]. Sie müssen zum Bereitstellen auf dem Markt mit einer EG-Konformitätserklärung und einem CE-Zeichen ausgestattet sein. Die harmonisierten Europäischen Normen EN ISO 10218-1 [2] und EN ISO 10218-2 [3] lösen die sogenannte Vermutungswirkung aus. Bei Anwendung dieser Normen darf davon ausgegangen werden, dass die Anforderungen der EG-Maschinenrichtlinie eingehalten wurden.

Die Anforderungen speziell zu kollaborierenden Robotersystemen sind in EN ISO 10218-1 und EN ISO 10218-2 ständig.

Gleiches gilt für die DGUV-Information 209-074 „Industrieroboter“ [4].

**Inhaltsverzeichnis**

- 1 Rechtsvorschriften und Normen
- 2 Risikoanalyse
- 3 Leistungs- und Kraftbegrenzung (Power an Force Limiting / PFL)
- 4 Anforderungen an die Roboter
- 5 Robotersystem (Applikation)
- 6 Bestimmung der biomechanischen Belastungen (Kraft und Druck)
- 7 Dokumentation und Kennzeichnung der Ausrüstung
- 8 Zusammenfassung und Anwendungsgrenzen

Im Rahmen der Technischen Spezifikation ISO TS 15066 [5] werden die Anforderungen derzeit weiterentwickelt. Insbesondere fließen in diese Technische Spezifikation ISO TS 15066 mit deren Inhalten eine Überarbeitung der Normen EN ISO 10218-1 und EN ISO 10218-2 geplant.

Während dieser Phase und darüber hinaus sollen mithilfe dieser Fachinformation Hersteller, Systemintegratoren und wertung von sich kollaborierenden Robotersystemen unterstützt werden.

**2 Risikoanalyse**

Die Risikoanalyse ist ein nach Maschinenrichtlinie erforderliches Dokument. Sie muss spätestens zum Zeitpunkt der Integration verfügbar sein. Risikoanalysen für kollaborierende Robotersysteme unterscheiden sich in der Vorgehensweise grundsätzlich nicht von solchen für andere Maschinen oder Roboteranlagen. Beispiele für Risikoanalysen befinden sich in [4].

Risikoanalysen für kollaborierende Robotersysteme sollten insbesondere die unmittelbare Nähe von Mensch und Robotersystem berücksichtigen und entsprechende Schutzmaßnahmen ableiten. Eine ausführliche Zusammenstellung von möglichen Gefährdungen, die an kollabo-

Bilder: FBHM

22