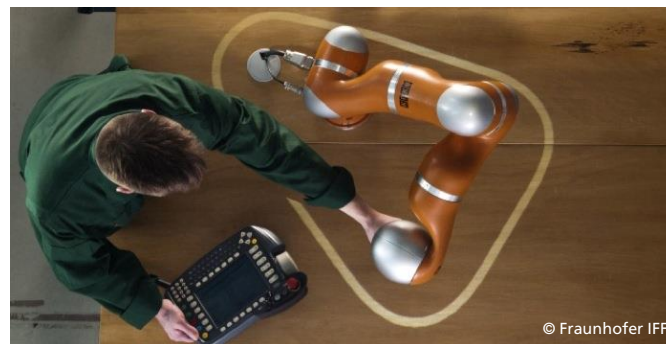


Workshop BAuA: Mensch-Roboter-Zusammenarbeit – Gestaltung sicherer, gesunder und wettbewerbsfähiger Arbeit

Aktuelle Projekte zur Mensch-Roboter-Kollaboration am Fraunhofer IFF

Dr. techn. Norbert Elkmann

09.03.2015



Mensch-Roboter-Kollaboration

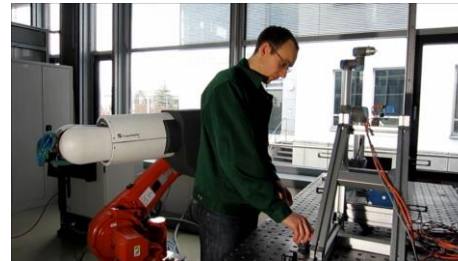
Herausforderungen, Motivation

Herausforderungen

- Demografischer Wandel
- Mangel an Fachkräften
- Produktion in Hochlohnländern
- Wirtschaftlichkeit
- Qualitätssteigerung
- Neue Produktionskonzepte

Motivation

- Entlastung des Menschen bei körperlichen Tätigkeiten
- Flexible Automatisierung
- Zusammenführung der Stärken von Mensch und Roboter
- Steigerung von Effizienz, Produktivität und Qualität
- Neue Anlagenkonzepte durch Wegfall von trennenden Schutzeinrichtungen



Kapazitive Sensorik zur Annäherungsdetektion



Werkerassistenz mit Industrieroboter hoher Traglasten
Handgeführter Roboter/ Sicherheit/ Ergonomie

Forschungsschwerpunkte Geschäftsfeld Robotersysteme am Fraunhofer IFF

- Stationäre und mobile Assistenzroboter
- Entwicklung neuer Technologien für sichere Mensch-Roboter-Kollaboration
- Intuitive Mensch-Roboter-Interaktion



Taktile Sensorik zur Kollisionsdetektion



Mobiler Assistenzroboter „ANNIE“

Sichere Mensch-Roboter-Kollaboration

Sicherheitskonzepte

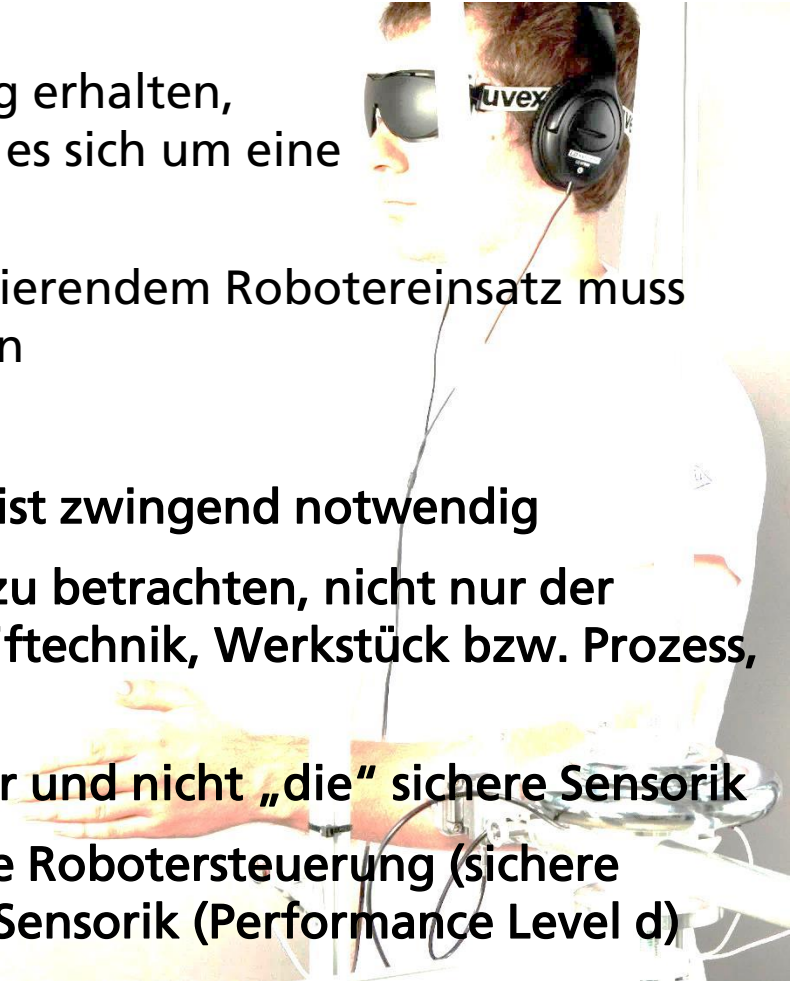
- **DIN EN ISO 10218 und ISO/TS15066:**
4 Ansätze für die Realisierung von MRK-Arbeitsplätzen
 - Handführung
 - Sicherheitsgerichteter überwachter Halt
 - Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung
 - Leistungs- und Kraftbegrenzung



Sichere Mensch-Roboter-Kollaboration

Allgemeine Hinweise zu Normen/Sicherheit bei MRK

- Roboter kann keine CE-Kennzeichnung erhalten, sondern nur eine Einbauerklärung, da es sich um eine unvollständige Maschine handelt
- Die konkrete Applikation mit kollaborierendem Robotereinsatz muss einer Risikoanalyse unterzogen werden
- **Fazit:**
 - eine umfassende Risikobeurteilung ist zwingend notwendig
 - es ist dabei immer die Gesamtzelle zu betrachten, nicht nur der Roboter (Applikation, Spanner, Greiftechnik, Werkstück bzw. Prozess, Roboter, Sensorik, Anlagenlayout)
 - es gibt nicht „den“ sicheren Roboter und nicht „die“ sichere Sensorik
 - Voraussetzung: sicherheitszertifizierte Robotersteuerung (sichere Geschwindigkeit und Position) und Sensorik (Performance Level d)



Sichere Mensch-Roboter-Kollaboration

Forschungsschwerpunkte / Technologien am Fraunhofer IFF

Taktile und kapazitive Sensorsysteme

- Taktile Sensoren an Robotern
- Detektion Annäherung (kapazitive Sensorik)



Kollisionsuntersuchungen

- Ermittlung Belastungsgrenzen
- Messung der Kollisionskräfte/-druckverteilung

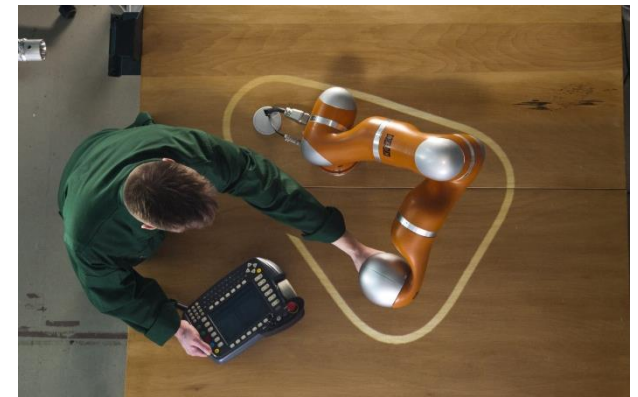


Sichere Kinematiken

- Rüsselkinematik
- Leichtbauroboter

Sensorische Arbeitsraumüberwachung

- Projektions-/Kameratechnik
- Dynamische Schutzraumplanung
- Absicherung von Werkzeugen und Werkstücken



Sichere Mensch-Roboter-Kollaboration

Spezialisierte Kinematiken für die sichere MRK

- Eigensichere Kinematiken durch Leichtbau, Kraftbegrenzung und Vermeidung von Scher- und Klemmstellen
- Sicherheit ohne Zusatzsensoren



Rüsselkinematik „BROMMI“



Leichtbauroboter ALEXA

Sichere Mensch-Roboter-Kollaboration

Taktile Sensorik an Robotern

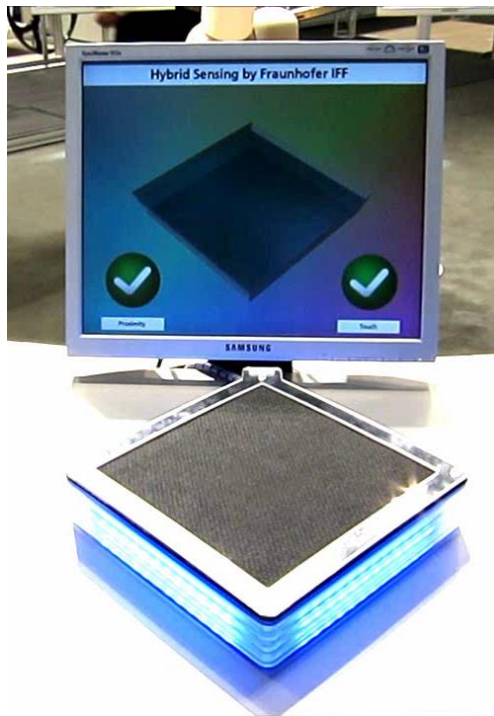
- Geometrieadaptierte Taktilsensoren mit stoßdämpfenden Eigenschaften zur sicheren Kollisionserkennung (patentiert)
- Kollisionserkennung und berührungsbasierte Interaktion



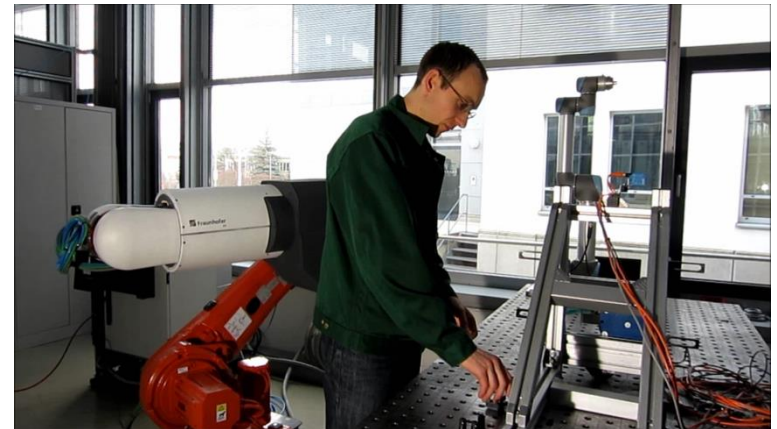
Sichere Mensch-Roboter-Kollaboration

Hybride (taktile/kapazitive) Sensorsysteme

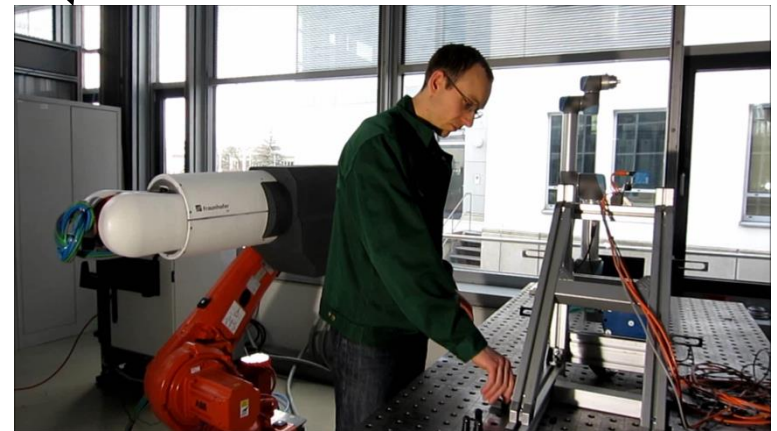
- Taktile Sensoren und kapazitive Sensoren zur Kollisions- und Annäherungsdetektion



zweistufiges
Sicherheitskonzept



Annäherungsdetektion



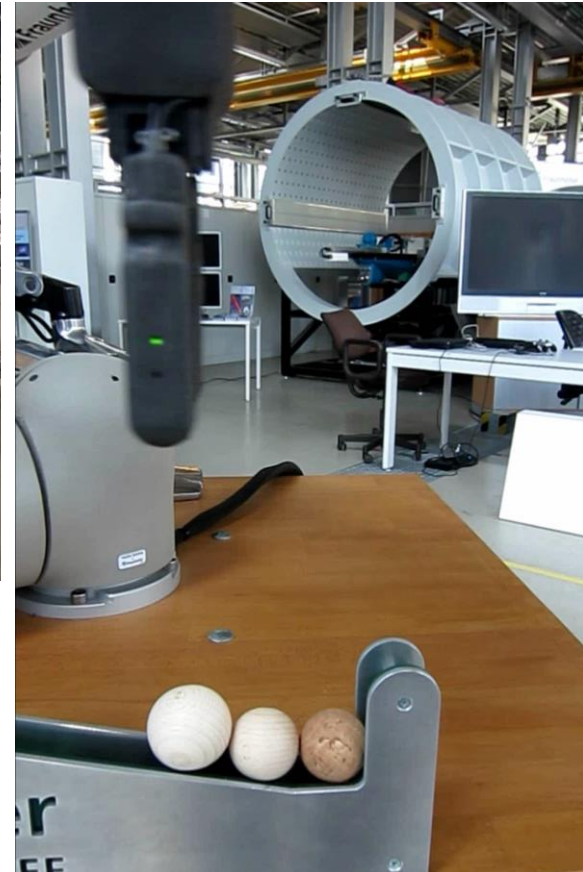
Kollisionserkennung

Sichere Mensch-Roboter-Kollaboration

Taktile Sensoren im Greifer, Kapazitive Sensoren zur Annäherungsdetektion



Taktile Sensoren im Greifer



Kapazitive Sensoren integriert im Greifer

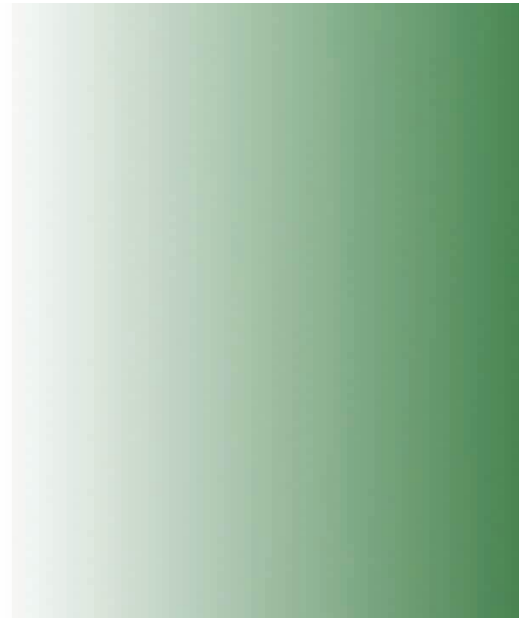
Sichere Mensch-Roboter-Kollaboration

Arbeitsraumüberwachung: drucksensitiver Fußboden

- Ortsauflösende Fußbodenbeläge mit integrierten Taktilsensoren zur Personenlokalisierung und flexiblen Absicherung von Maschinen und Anlagen (patentiert)
- Frei definierbare Warn- und Schutzbereiche

Sichere Mensch-
Roboter-Interaktion

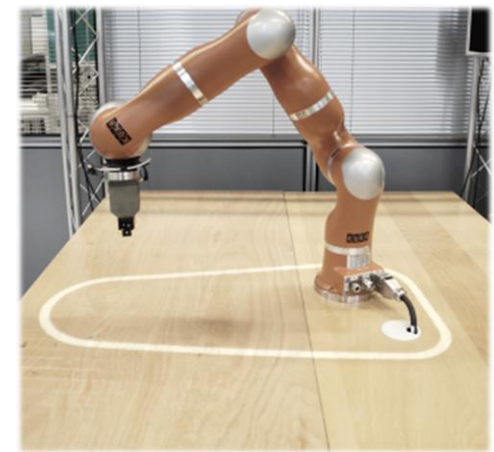
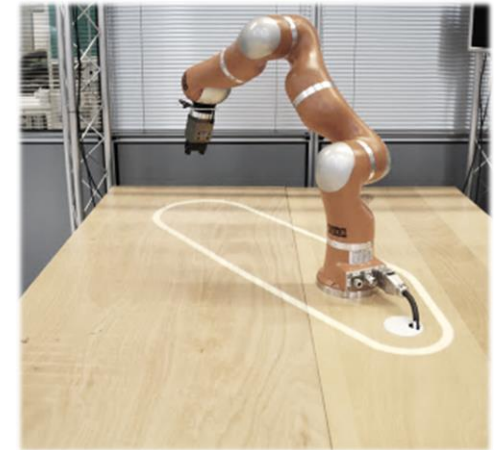
Drucksensitiver Fußboden
zur Arbeitsraumüberwachung



Sichere Mensch-Roboter-Kollaboration

Projektions- und kamerabasiertes Sensorsystem zur Arbeitsraumüberwachung

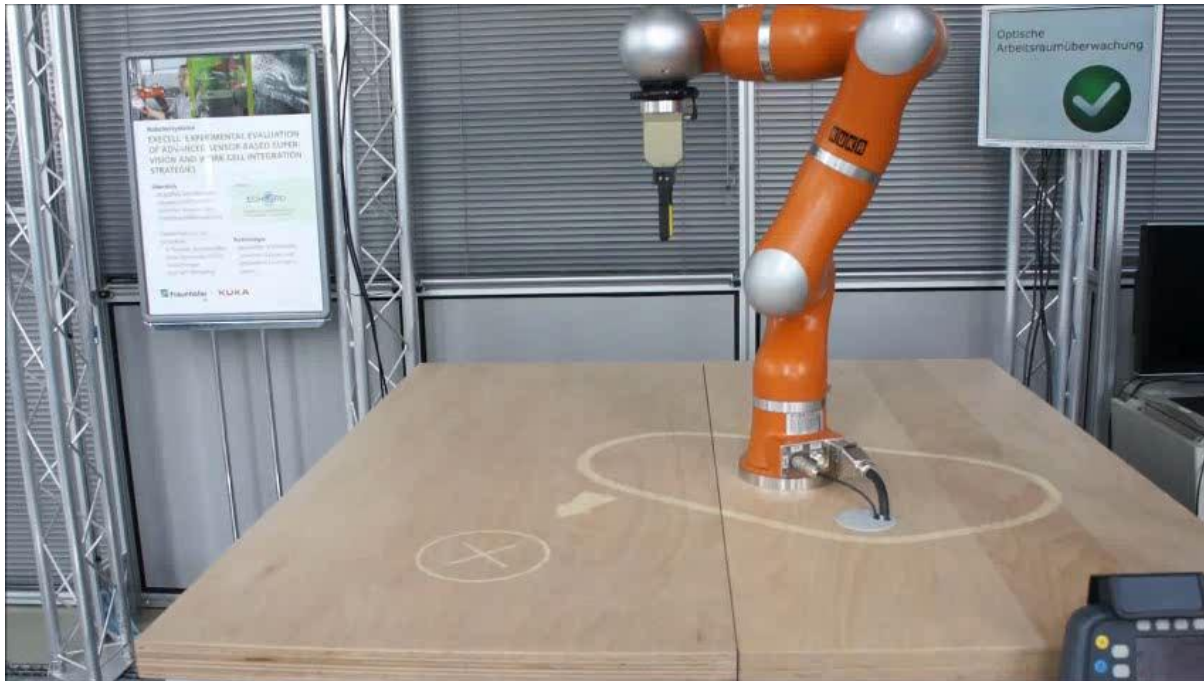
- Projektor- und Kameratechnik zur Erzeugung und Überwachung von Schutzräumen (patentiert)
- Dynamische Änderung der Schutzräume in Form, Position und Größe
- Schutzräume werden direkt in die Umgebung projiziert
- Verletzungen des Schutzraumes durch Unterbrechungen der Projektionsstrahlen
- Hard- (Sicherheit) und Soft-(intuitive Interaktion) Safety



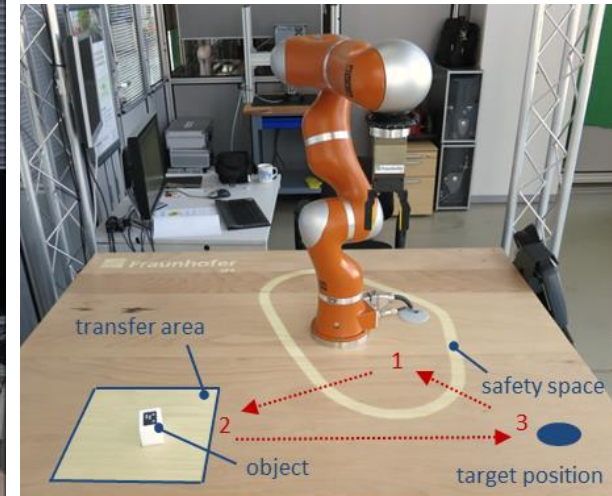
Assistenzrobotik und sichere MRK

Sensorische Arbeitsraumüberwachung

- Projektions- und kamerabasiertes Sicherheitssystem zur Arbeitsraumüberwachung mit dynamischen Schutzbereichen
- Kombination von Hard- und Softsafety



Arbeitsraumüberwachung mit dynamischen Schutzbereichen



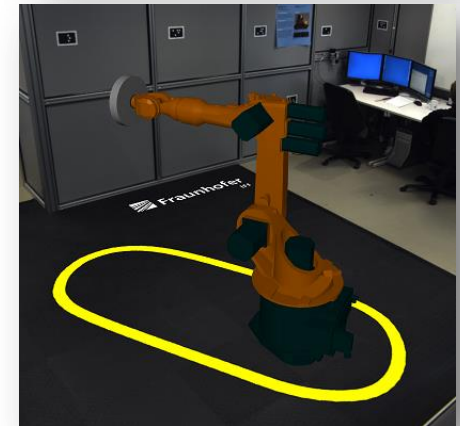
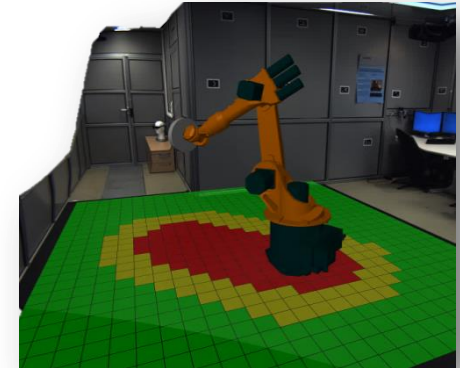
Arbeitsraumüberwachung und Objekterkennung mittels Kamera

Assistenzrobotik und sichere MRK

Sichere Mensch-Roboter-Kooperation mit Schwerlast-Robotern in industriellen Anwendungen - SAPARO



- Entwicklung eines Sicherheitskonzeptes bestehend aus
 - Hard Safety – **Taktiler Fußbodenbelag**
„Safe“, „Warn“, „Critical“ – Bereiche
Detektion der Position bzw. Annäherung von Menschen
und Geschwindigkeitsreduzierung/ -stopp des Roboters
 - Soft Safety - **Projektionstechnik**
Visualisierung der Sicherheitsbereiche, Darstellung
zusätzlicher Informationen, z.B. zukünftige
Roboterbewegungen, Prozessinformation, Werkerassistenz
- Generierung dynamischer (minimaler) Schutzräume durch
 - Auswertung aktueller Robotergelenkstellungen und
-geschwindigkeiten
 - Berücksichtigung des Bewegungsverhalten des Menschen
(Richtung, Geschwindigkeit)
 - Validierung entsprechend Abstandsformel EN ISO 13855
- Projektlaufzeit 2015 - 2016



Sichere Mensch-Roboter-Kollaboration

Werkerassistenz mit Industrieroboter

Handgeführter Roboter/ Sicherheit/ Ergonomie

- Robotergestützte feinfühliges Handführung von schweren Werkstücken
- Taktisensorik als Zustimmschalter (3-stufig), Zweihandsteuerung
- Erkennung des Werkstücks mithilfe des Stereokamerasystems
- Automatikbetrieb: Arbeitsraumüberwachung durch kamerabasiertes Projektionssystem



Sichere Mensch-Roboter-Kollaboration

Werkerassistenz mit Industrieroboter

Handgeführter Roboter/ Sicherheit/ Ergonomie



Robotik und mobile Plattformen

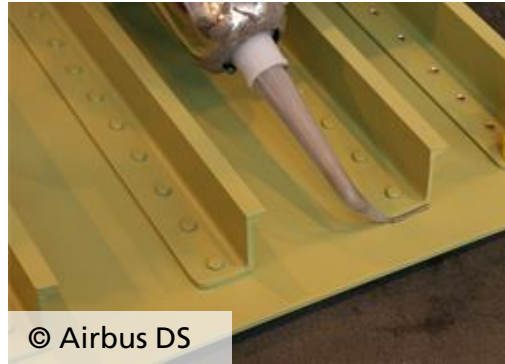
EU VALERI

Validation of Advanced, Collaborative Robotics for Industrial Applications



Mobile Roboter in der Flugzeugproduktion

- Beispielapplikation: Dichtmittelauftrag/-inspektion



© Airbus DS



© Airbus DS



Robotik und mobile Plattformen

EU VALERI

Validation of Advanced, Collaborative Robotics for Industrial Applications



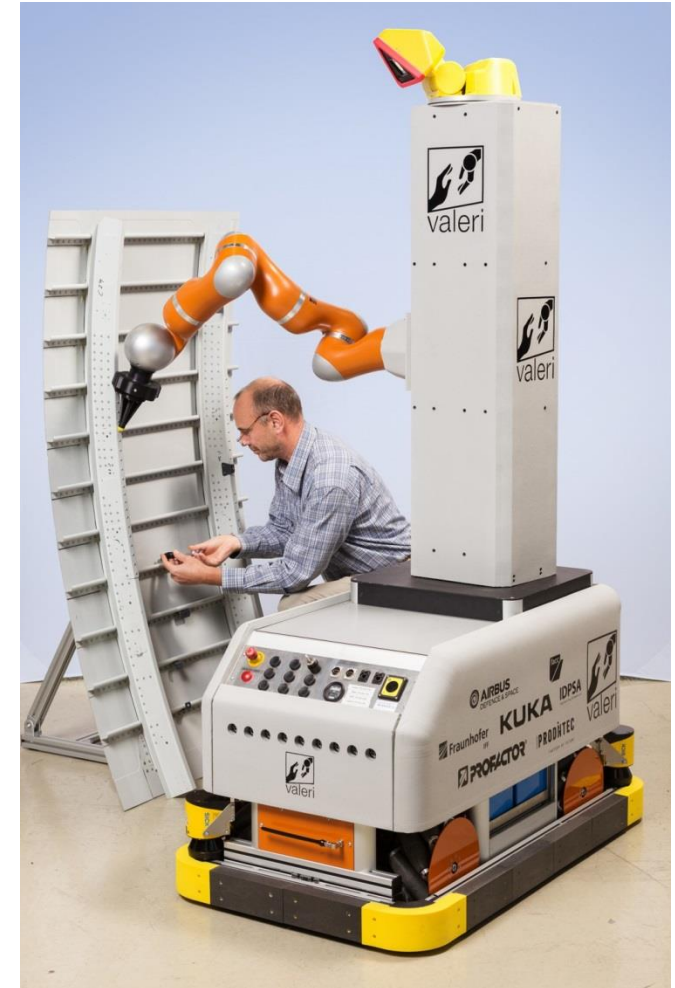
Mobile Roboter in der Flugzeugproduktion

IFF Projektfokus

- Entwicklung und Integration von Sicherheitssensoren
 - taktile Sensoren für mobile Plattform
 - 2 ½ D Kamerasystem zur visuellen Überwachung des Werkzeugs
- Mensch-Roboter-Interaktion
 - Haptische Interaktion mittels taktiler Sensoren

Projektkoordination: Fraunhofer IFF

Projektlaufzeit: 2013 - 2015



Robotik und mobile Plattformen

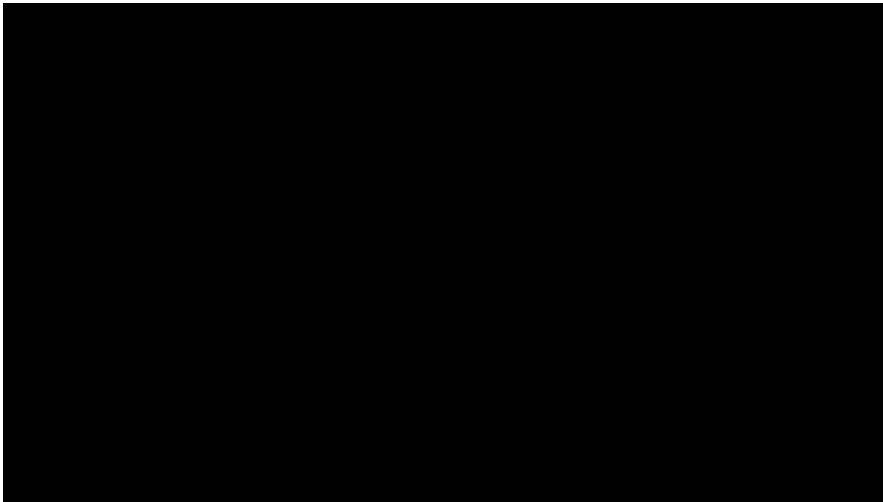
EU VALERI

Validation of Advanced, Collaborative Robotics for Industrial Applications



Taktile Sensoren für Sicherheit und haptische Interaktion

- Umlaufend auf Plattform, Linearachse und als Bumper angebracht
- Mit integriertem Dämpfungsmaterial
- Als Eingabegerät für einfache und intuitive Bewegung der Plattform und der Linearachse



Robotik und mobile Plattformen

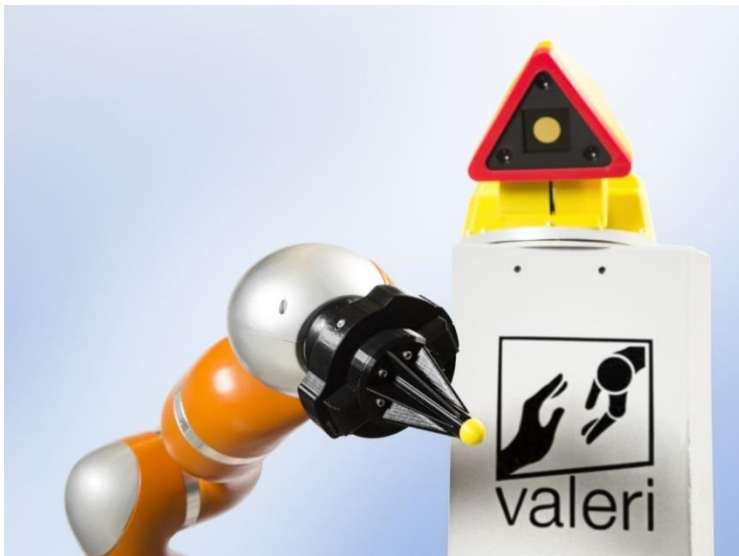
EU VALERI

Validation of Advanced, Collaborative Robotics for Industrial Applications



Visuelle Arbeitsraumüberwachung zur Werkzeugabsicherung

- 2½ D Arbeitsraumüberwachung
- Kombination TOF (Time-of-Flight)-Kamera und 3 Stereokamerapaaren
- Oberhalb Linearachse angebracht
- Mit Schwenk-Neige-Einheit zur automatischen Verfolgung des Werkzeugs/TCP



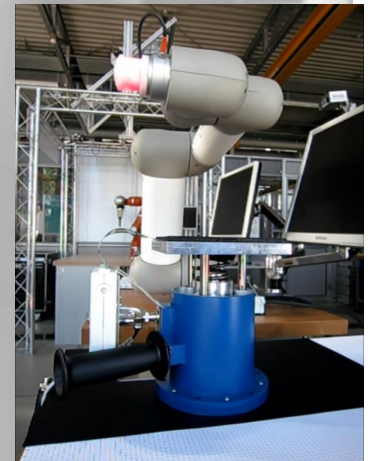
Sichere Mensch-Roboter-Kollaboration

Forschungsarbeiten Mensch-Roboter-Kollision

- Experimentelle Bestimmung der biomechanischen Belastungsgrenzen bei Mensch-Roboter-Kollisionen (IFF mit Uniklinik Magdeburg, finanzielle Unterstützung von Daimler und KUKA), in Bearbeitung
- „Kollaborierende Roboter - Ermittlung von Schmerzeintrittsschwellen an der Mensch-Maschine-Schnittstelle - Flächige statische und dynamische Kontaktierung“, Auftrag Berufsgenossenschaft Holz und Metall (BGHM) - DGUV Fachbereich Holz und Metall – Mainz, Projektbeginn 12/2014
- Bestimmung des Trägheitseinflusses bei nachgiebiger und nicht-nachgiebiger Mensch-Roboter-Kollision (klemmende und freie Kollisionen (im Auftrag des IFA))
- KAN-Studie 52: Biomechanische Belastungsgrenzen
- Ermittlung der Kollisionsparameter (Kraft/-verlauf, Druckverteilung, Nachlaufweg ...) mit Robotern auf Basis des Kolrobot-Messsystems (IFA)



Kollisionsmesssystem des IFF für dynamische Kollision (Probandenversuche)



Kolrobot-Messsystem (Messung mit Roboter)

Sichere Mensch-Roboter-Kollaboration

KAN-Studie 52: Biomechanische Belastungsgrenzen

Ziele und Untersuchungsschwerpunkte

- Literaturrecherche
 - Biomechanische Belastungsgrenzen in der gesamten Regelsetzung
 - Biomechanische Verletzungskriterien anderer Arbeitsbereiche
 - Medizinische und biomechanische Verletzungskriterien mit denen sich die Schadensschwerekategorie S0 besser spezifizieren lässt
 - Angewandte Verletzungs-Schwereskalen und -codierungen, mit denen sich die Schadensschwerekategorie einordnen lässt
- Erarbeitung von Vorschlägen, wie biomechanische Belastungsgrenzen sinnvoll abgestuft und strukturiert werden können
- Ausarbeitung einer Definition für die Schadensschwerekategorie S0
- Einordnung der Schadensschwerekategorie S0

Sichere Mensch-Roboter-Kollaboration

KAN-Studie 52: Biomechanische Belastungsgrenzen

Projektkonsortium

Fraunhofer IFF

- Koordination
- Entwicklung Recherchemethodik
- Technische Recherche

Kommission f. Arbeitsschutz & Normung

- Projektinitiator
- Projektbegleitung in Kooperation mit BG, DGUV, BAuA, BMAS, IFA und DIN

Klinikum der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Institut für Rechtsmedizin

- Medizinische Recherche
- Medizinische Bewertung der Ergebnisse



Zeitraum: November 2012 bis Ende 2013

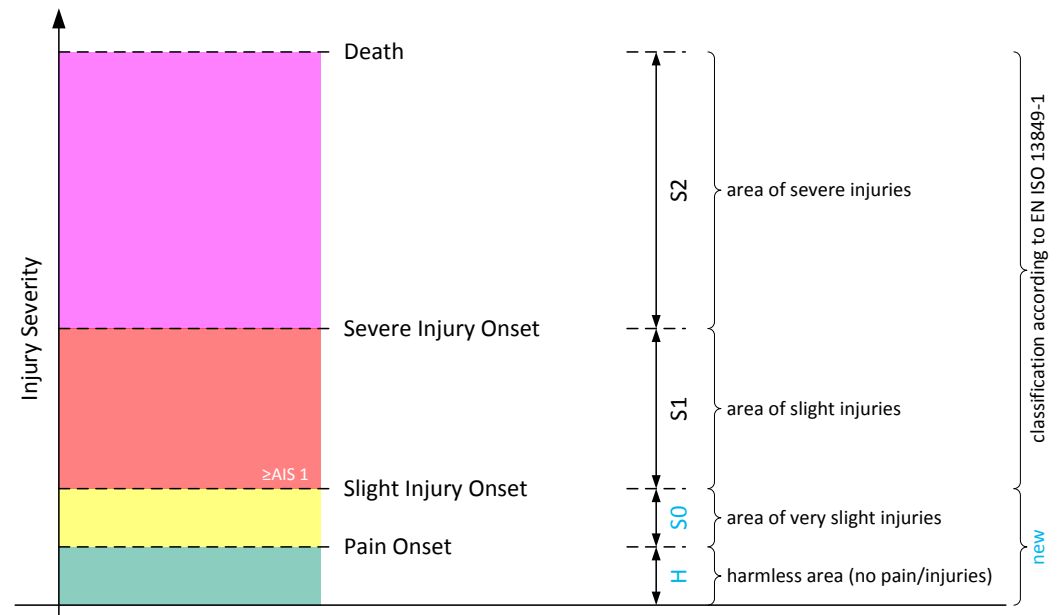
Sichere Mensch-Roboter-Kollaboration

KAN-Studie 52: Biomechanische Belastungsgrenzen

Definitionsvorschlag Verletzungsschwerekategorie S0

„Zu der Verletzungsschwerekategorie S0 zählen ausschließlich oberflächliche Verletzungen, die ohne medizinische Behandlung folgenlos ausheilen. Eine Durchdringung der Oberhaut ist nicht zulässig und daher von dieser Kategorie ausgenommen.“

Zum Beispiel würde eine leichte Prellung am Unterarm ohne Verletzung der Oberhaut als S0 klassifiziert werden, wohingegen eine Schürfwunde am Handballen S1 sein würde.“



Einordnung Verletzungsschwerekategorien:
Schmerzeintritt: H, Verletzungseintritt: S0

Sichere Mensch-Roboter-Kollaboration

KAN-Studie 52: Biomechanische Belastungsgrenzen

Gesamtergebnis

- ✓ Konzeptpapier über die Durchführung einer Literaturrecherche
- ✓ Liste mit allen durchsuchten Datenbanken
- ✓ Suchbegriffsverzeichnis und Suchdokumentationen
- ✓ CITAVI-Datenbank mit allen übernommenen Ergebnistreffern
- ✓ Datenfaktenblätter zu allen relevanten Titeln im PDF-Format
- ✓ Abschlussbericht, enthält u.a.:
 - Vorschlag über eine Definition der Schadensschwerekategorie S0
 - Vorschlag zur Strukturierung von Belastungsgrößen
 - Glossar

Mehr Infos unter www.kan.de/publikationen/studie52

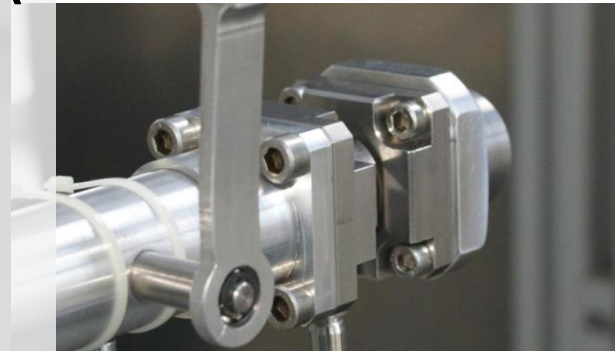
Sichere Mensch-Roboter-Kollaboration

Bestimmung Trägheitseinfluss bei Mensch-Roboter-Kollisionen

Motivation und Ansatz

Studie im Auftrag des Instituts für Arbeitsschutz IFA

- Zwei mögliche Stoßfälle
 - Freier Stoß (häufigerer Fall)
 - Klemmender Stoß (seltener)
- Umrechnung der Messwerte klemmenden Stoß auf den freien Stoß mit Hilfe einer Korrekturfunktion
- Bestimmung dieser Korrekturfunktion durch Kollisionsversuche mit Probanden
- Relevanz: Übernahme der Ergebnisse in zukünftige Version der ISO TS 15066
- Positives Votum der Ethik-Kommission für Probandenversuche



Sichere Mensch-Roboter-Kollaboration

Bestimmung Trägheitseinfluss bei Mensch-Roboter-Kollisionen

Anwendung der Ergebnisse

1. Messen der Kontaktkraft $F_K(t)$ für die klemmende Kollision
2. Bestimmen der Robotergeschwindigkeit v_C (Entnahme des Werts aus der Steuerung)
3. Bestimmen der Maximalkraft

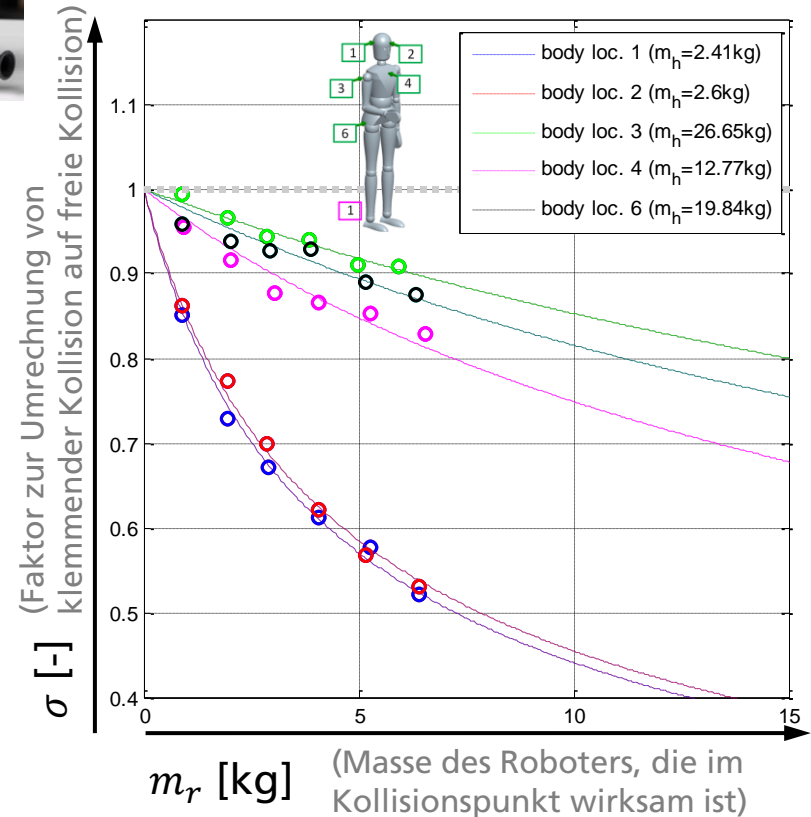
$$F_{K,max} = F_K(t_{max})$$

4. Abschätzen der wirksamen Robotermasse

$$m_r \approx \frac{p}{v_C} \quad p \approx 2 \int_0^{t_{max}} F_K(t) dt$$

5. Bestimmen des Umrechnungsfaktors σ für die Masse m_r (siehe Diagramm rechts)
6. Umrechnen der Maximalkraft von der klemmenden Kollision $F_{K,max}$ auf die freie Kollision $F_{F,max}$

$$F_{F,max} = \sigma(m_r) \cdot F_{K,max}$$



Sichere Mensch-Roboter-Kollaboration

Experimentelle Bestimmung der biomechanischen Belastungsgrenzen: Motivation und Ansatz

- Methodisch ermittelte Belastungsgrenzen (Schmerz- und Verletzungseintritt) für Körpereinzelnbereiche
- IFF-Konzept: Kollisions-Untersuchungen mit Probanden
 - Positives Votum der Ethik-Kommission liegt vor



Sichere Mensch-Roboter-Kollaboration

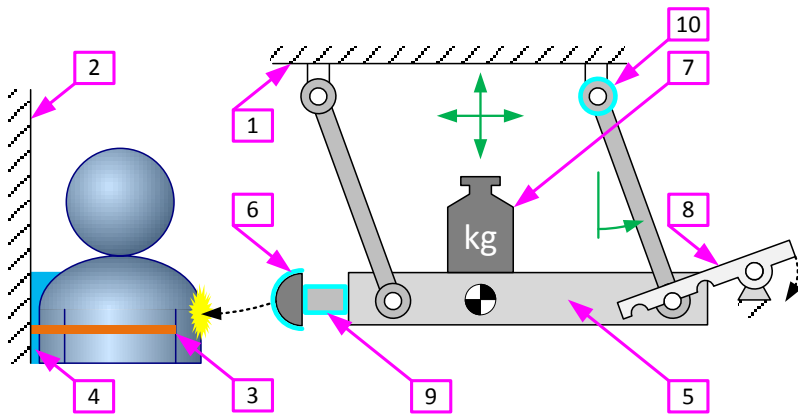
Experimentelle Verifikation der biomechanischen Belastungsgrenzen: Ziel und Untersuchungsschwerpunkte



- Untersuchungen zur Schmerz- und Verletzungseintrittsschwelle
- Ermittlung der Belastungsgrenzen bei Mensch-Roboter-Kollisionen unter Einbeziehung aller messbaren Einflussgrößen
- Abbruchkriterien:
Schwellung oder Hämatom oder mittelstarker Schmerz
- Bestimmung der verletzungsrelevanten Einflussgrößen (Geometrie, Fläche, Geschwindigkeit, Masse ..)
- Untersuchung der Abhängigkeit zwischen Schmerz und Verletzungseintritt (Bagatellverletzungen)
- Ziel:
Erarbeitung einer evaluierten und statistisch signifikanten Schmerz- und Verletzungseintrittsschwellen- Tabelle für dynamische Kollisionen

Sichere Mensch-Roboter-Kollaboration

Experimentelle Verifikation der biomechanischen Belastungsgrenzen: Versuchsaufbau



- | | |
|------------------------|----------------------------|
| (1) Gestell | (6) Stößel mit Drucksensor |
| (2) Starres Gegenlager | (7) Zusatzmasse |
| (3) Fixierhilfe | (8) Sperrhebel |
| (4) Vakuummatte | (9) Kraftsensor |
| (5) Ramme | (10) Potentiometer |

Veränderliche/einstellbare Parameter:

- Massen
- Aufprallgeschwindigkeit
- Kollisionsgeometrie



Sichere Mensch-Roboter-Kollaboration

Studien zur Bestimmung biomechanischer Grenzwerte

Konsortium

Fraunhofer IFF

- Koordination
- Probandenakquise
- Durchführung der Stoßversuche
- Messtechnik und Versuchsstand
- Auswertung der Messergebnisse

Klinikum der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Institut für Rechtsmedizin

Klinik für Unfallchirurgie

Klinik für Dermatologie & Venerologie

Institut für Neuroradiologie

Votum der Ethik-Kommission liegt vor

Studie 1: Experimentelle Bestimmung der biomechanischen Belastungsgrenzen bei Mensch-Roboter-Kollisionen (IFF mit Uniklinik Magdeburg), Schwerpunkt liegt auf **Verletzungseintritt**; Beginn: 2013, in Bearbeitung (finanzielle Unterstützung durch Daimler AG und KUKA AG)

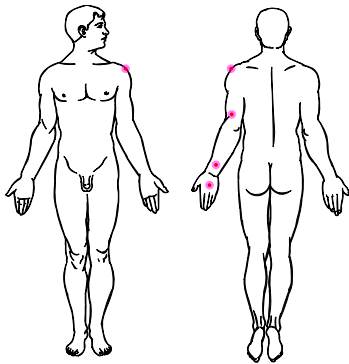
Studie 2: „Kollaborierende Roboter - Ermittlung von **Schmerzeintrittsschwellen** an der Mensch-Maschine-Schnittstelle - Flächige statische (Uni_Mainz) und dynamische Kontaktierung (IFF)“, Auftrag Berufsgenossenschaft Holz und Metall (BGHM) - DGUV Fachbereich Holz und Metall, projektbeteiligt: Uni Mainz, Projektbeginn 12/2014

Sichere Mensch-Roboter-Kollaboration

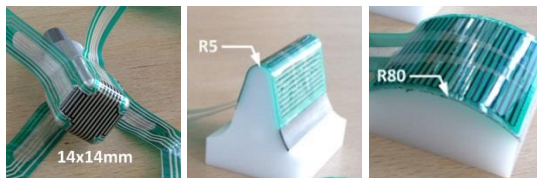
Studien zur Bestimmung biomechanischer Grenzwerte

IFF-Studie zum Verletzungseintritt

- 15 Probanden
- zunächst 4 Lokalisationen
- drei verschiedene Kollisionsmassen (5kg, 10kg und 15kg)

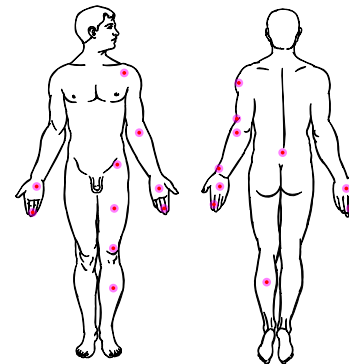


- drei verschiedene Stoßgeometrien

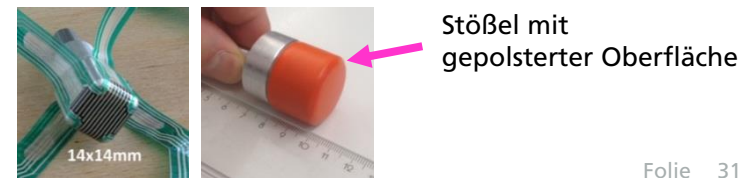


IFF-Studie zum Schmerzeintritt (Auftrag BGHM)

- 20 Probanden
- 21 Lokalisationen
- zwei verschiedene Kollisionsmassen (5kg und 15kg)



- zwei verschiedene Stoßgeometrien

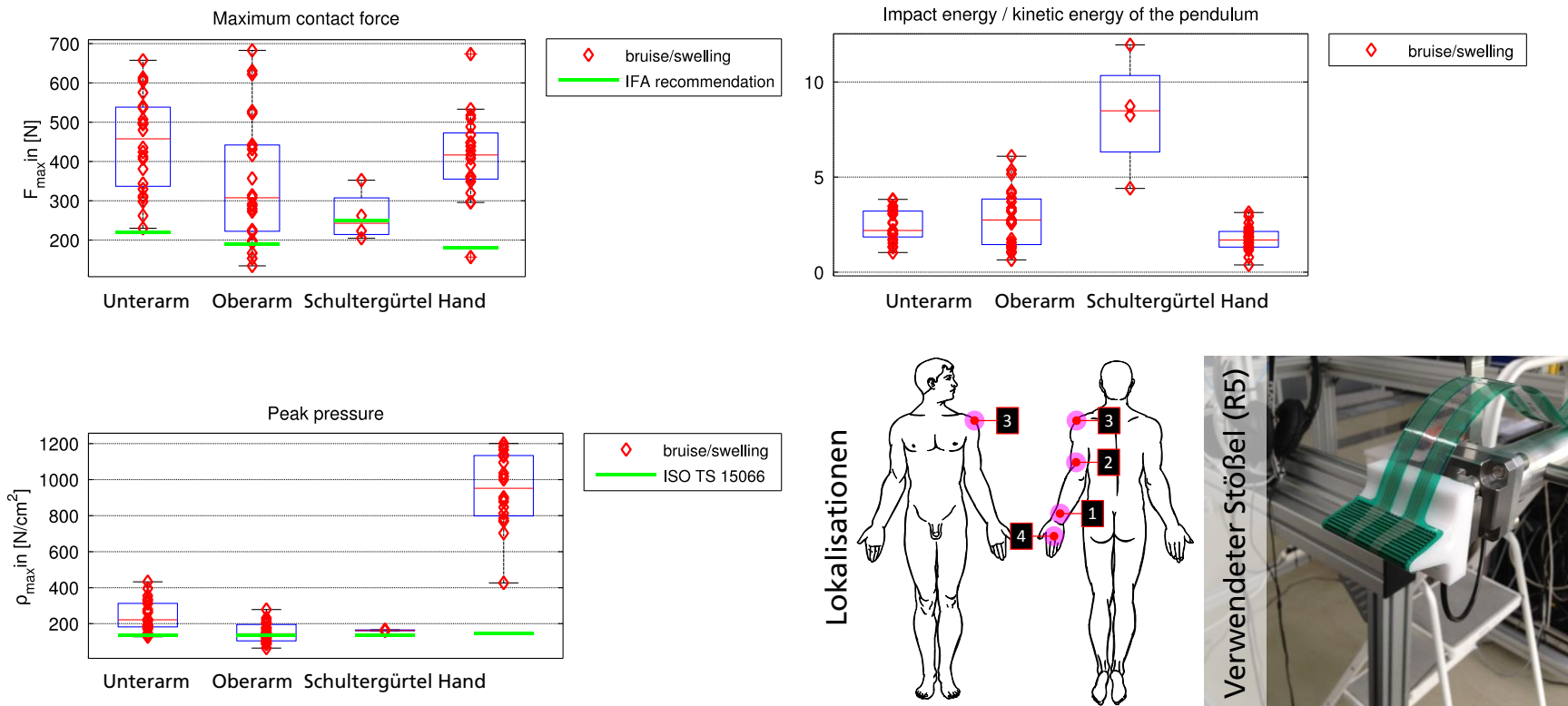


Folie 31

Biomechanische Belastungsgrenzen für die sichere MRK

Ergebnis IFF Studie (Verletzungseintritt) mit 7 Probanden (1. Phase): Verteilung der betrachteten Größen

- Betrachtung: Maximalkraft, Spitzendruck und Stoßenergie
- erste Projektphase mit sieben Probanden abgeschlossen



Biomechanische Belastungsgrenzen für die sichere MRK

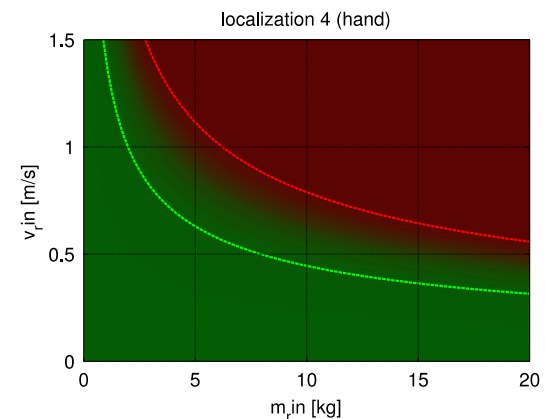
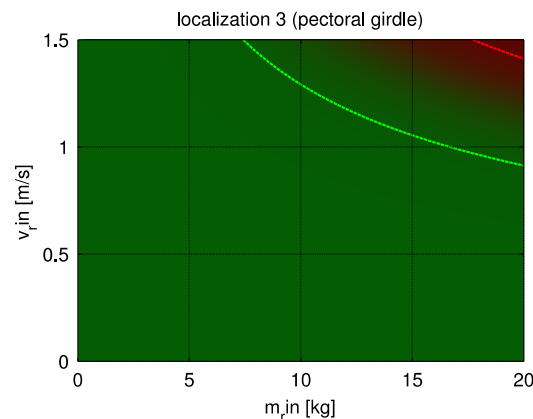
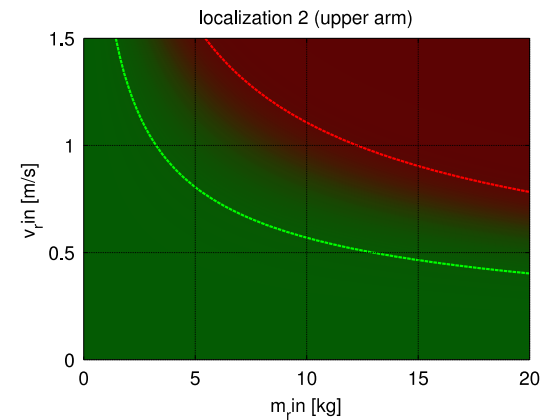
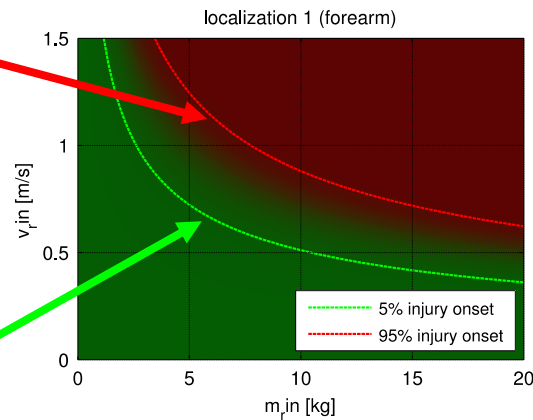
Ergebnis 1. Phase IFF Studie (Verletzungseintritt)

Safety-Diagramme mit Sicherheitszonen

Oberhalb der roten Kurve beträgt die Auftretswahrscheinlichkeit von Schwellungen oder leichten Hämatomen >95%

Unterhalb der grünen Kurve beträgt die Auftretswahrscheinlichkeit von Schwellungen oder leichten Hämatomen <5%

Prinzip eignet sich zur Programmierung der Geschwindigkeit bei kollaborierenden Robotern

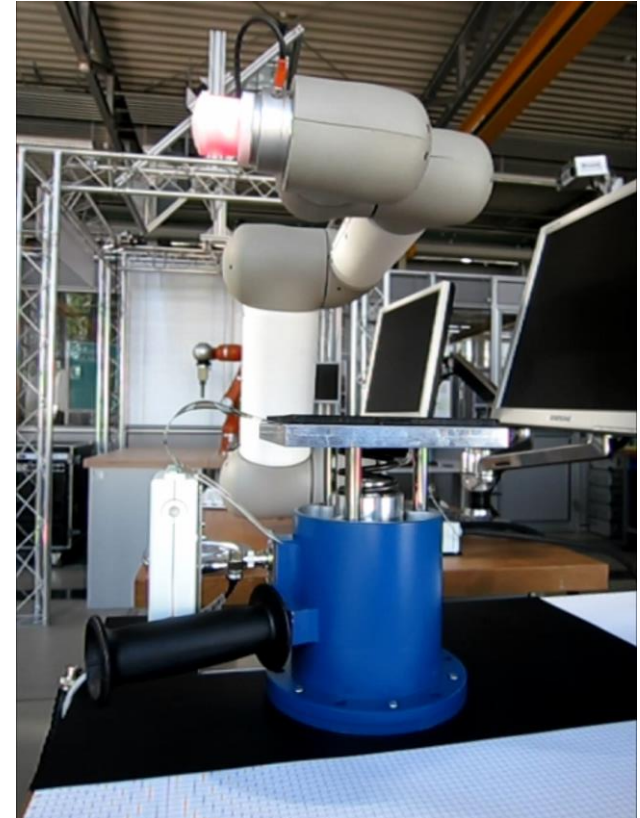


Biomechanische Belastungsgrenzen für die sichere MRK Planung, Analyse und Aufbau von MRK-Szenarien

Validierung von Robotersystemen für MRK- Einsatz

- Untersuchung von Robotern hinsichtlich ihrer dynamischen Kollisions- und Bremsverhaltens (auftretende Kräfte/Druckverteilungen bei Kollision mit biofidelem Messsystem des IFA „Kolrobot“)

→ Ermittlung MRK- Eignung bzw. max. Robotergeschwindigkeiten für MRK



Kolrobot-Messsystem (Kollisionsmessung mit Roboter)

Fachtagung „Assistenzrobotik und Mensch-Roboter-Kollaboration“ 24./25.06.2015 im Fraunhofer IFF, Magdeburg



**Fraunhofer-Institut für Fabrik-
betrieb und -automatisierung IFF**
Sandtorstraße 22
39106 Magdeburg

Kontakt

Dr. techn. Norbert Elkmann
Geschäftsfeldleiter Robotersysteme
Telefon 0391 4090-222
Fax 0391 4090-93-222
email norbert.elkmann@iff.fraunhofer.de

