

Björn Matthias, ABB AG Forschungszentrum

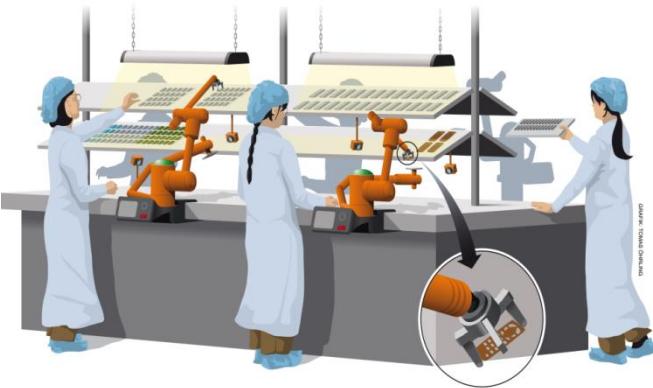
# Sicherheit, Akzeptanz und Produktivität bei der Mensch-Roboter-Zusammenarbeit

1. Workshop: Mensch-Roboter-Zusammenarbeit - Gestaltung  
sicherer, gesunder und wettbewerbsfähiger Arbeit  
BAuA – Dortmund – 9. März 2015

# Sicherheit, Akzeptanz und Produktivität bei MRK

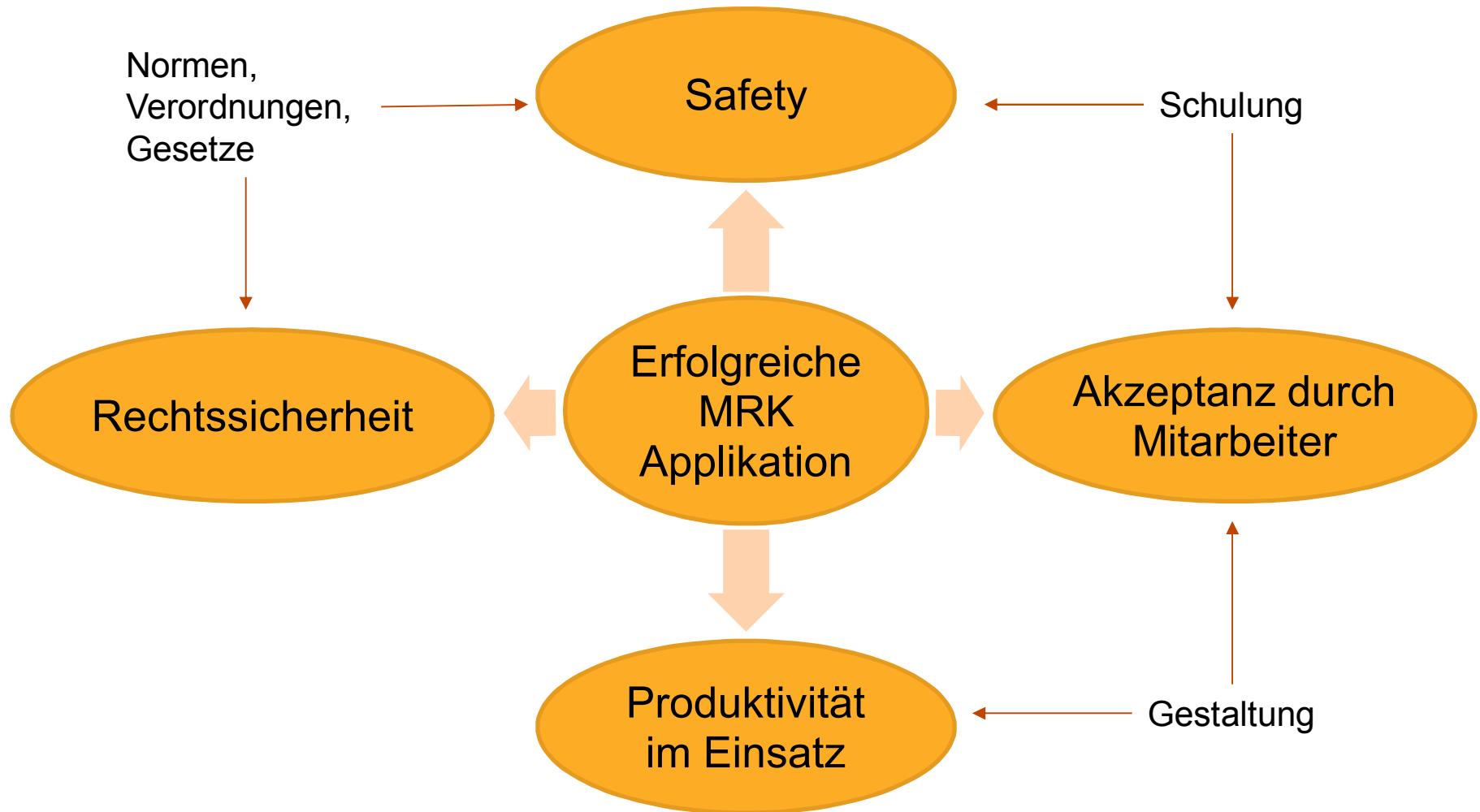
## Übersicht

- Definitionen
  - Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK), kollaborierender Betrieb
- Sicherheit / Safety
  - Übersicht über Normen für MRK
  - Arten der MRK, Schutzkonzepte – Beispiele
  - Stand der Normung, ISO/TS 15066 „Robots and robotic devices – collaborative robots“
  - Biomechanische Grenzwerte
- Akzeptanz
  - Ergonomie
  - Bedienerfreundlichkeit
- Produktivität
  - Wirtschaftlichkeit und Automatisierungsgrad
  - Verschiedene Fertigungsparadigmen
- Offene Fragen
- Zusammenfassung



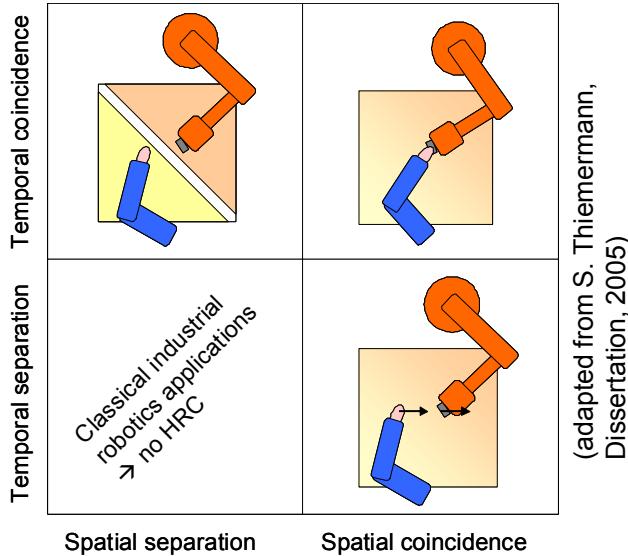
# Sicherheit, Akzeptanz und Produktivität bei MRK

## Erfolgsfaktoren für MRK als Technologie in der Produktion



# Human-Robot Collaboration

## Definition of Collaborative Operation



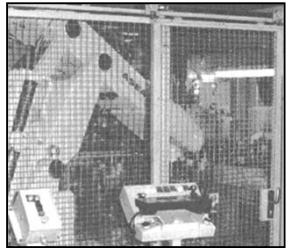
- ISO 10218-1:2011, clause 3.4
  - **collaborative operation**  
*state in which purposely designed robots work in direct cooperation with a human within a defined workspace*
- Types of collaborative operation (ISO 10218-1:2011, clause 5.10)
  1. Safety-rated monitored stop
  2. Hand guiding
  3. Speed and separation monitoring
  4. Power and force limiting
- Degree of collaboration
  1. Once for setting up  
(e.g. lead-through teaching)
  2. Recurring isolated steps  
(e.g. manual gripper tending)
  3. Regularly or continuously  
(e.g. hand guiding)

# Sicherheit:

- Normen und MRK
- Kollaborationsarten
- Beispielezenarien
- Stand der ISO/TS 15066
- biomechanische Grenzwerte

# The Road to Human-Robot Collaboration

## Evolution of Safety Concepts

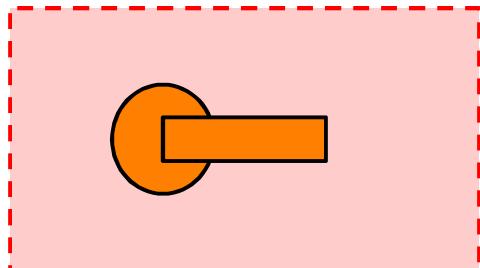


absolute separation of  
robot and human  
workspaces



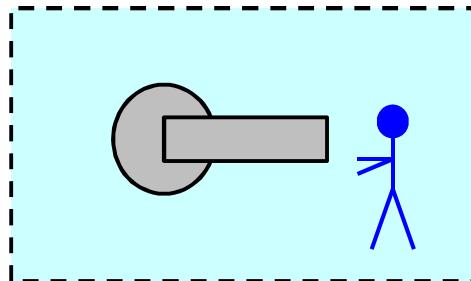
Discrete safety  
→ No HRC

Conventional industrial robots

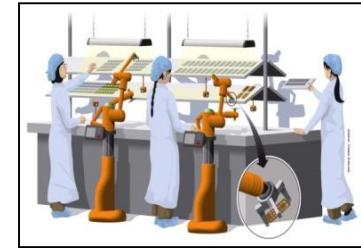


Safety controllers  
→ Limited HRC

Collaborative industrial robots



Harmless manipulators  
→ Full HRC



complete union  
of robot and human  
workspaces

# Sicherheitsnormen für die Industrierobotik

## ISO 10218-1, ISO 10218-2

### ISO 10218-1:2011

- Industrieroboter – Sicherheitsanforderungen – Teil 1: **Roboter**
- Anwendungsbereich
  - Industrielle Verwendung
  - Controller
  - Manipulator
- Literaturbezüge
  - ISO 10218-2 – Robotersysteme und Integration
- Gemeinsame Literaturbezüge
  - ISO 13849-1 / IEC 62061 – Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen
  - IEC 60204-1 – Elektrische Ausrüstung von Maschinen
  - ISO 12100 – Risikobeurteilung
  - ISO 13850 – Not-Halt



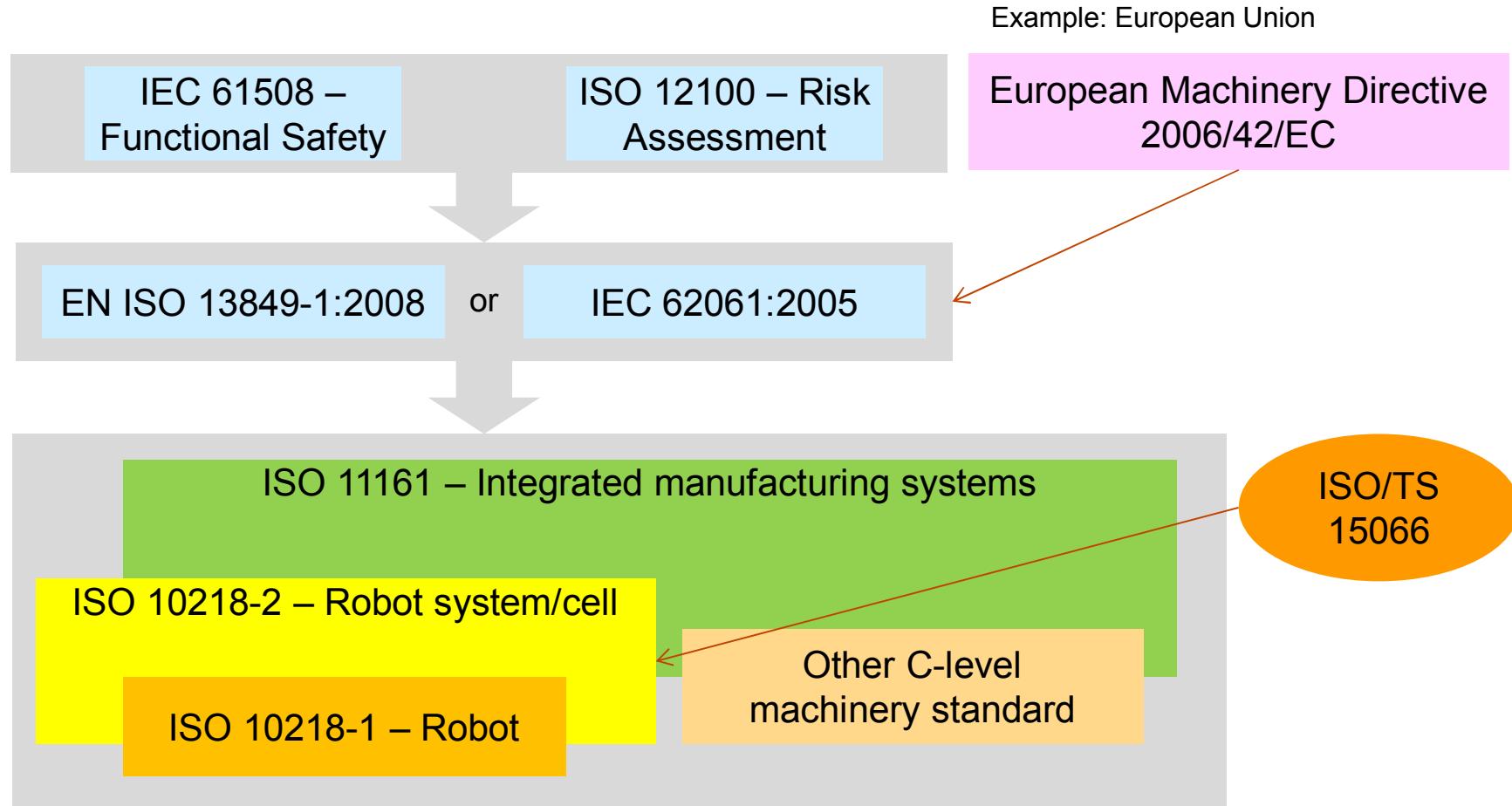
### ISO 10218-2:2011

- Industrieroboter – Sicherheitsanforderungen – Teil 2: **Robotersystem und Integration**
- Anwendungsbereich
  - Roboter (siehe Teil 1)
  - Werkzeuge
  - Werkstücke
  - Peripherie
  - Schutzeinrichtungen
- Literaturbezüge
  - ISO 10218-1 – Roboter
  - ISO 11161 – Integrierte Fertigungssysteme
  - ISO 13854 – Mindestabstände
  - ISO 13855 – Anordnung von Schutzeinrichtungen
  - ISO 13857 – Sicherheitsabstände
  - ISO 14120 – Trennende Schutzeinrichtungen



# Sicherheitsnormen für die Industrierobotik

## Normen für die MRK



# Laufende Normungsprojekte

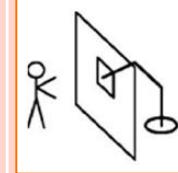
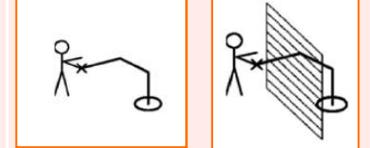
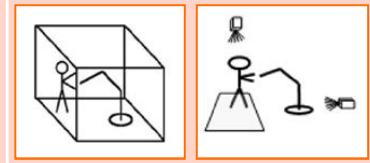
## ISO/TS 15066 – Sicherheit kollaborierender Roboter



- Risikobeurteilung
- Entwurf des Kollaborationsraums
- Entwurf des kollaborierenden Betriebs
  - Minimale Abstände Mensch-Roboter
  - Maximale Roboter-Geschwindigkeiten
  - Maximale Roboter-Kräfte
  - Sicherheitsgerichtete Sensorik
  - Ergonomie
  - Bedienkonzept
- Arten des kollaborierenden Betriebs
  - Überwachter Stillstand
  - Handführung
  - Überwachung von Geschwindigkeit und Abstand
  - Begrenzung von Kraft und Leistung (biomechanische Kriterien!)
- Wechsel zwischen den Arten
  - Kollaborativ / nicht-kollaborativ
  - Verschiedene Kollaborationsarten
- Bedienelemente für verschiedene Arten, Applikationen

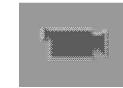
# Kollaborierender Betrieb

## Arten gemäß ISO 10218-1, -2 und ISO/TS 15066

ISO 10218-1, clause	Type of collaborative operation	Main means of risk reduction	Pictogram (ISO 10218-2)
5.10.2	Safety-rated monitored stop (Example: manual loading-station)	No robot motion when operator is in collaborative work space	
5.10.3	Hand guiding (Example: operation as assist device)	Robot motion only through direct input of operator	
5.10.4	Speed and separation monitoring (Example: replenishing parts containers)	Robot motion only when separation distance above minimum separation distance	
5.10.5	Power and force limiting by inherent design or control (Example: ABB YuMi® collaborative assembly robot)	In contact events, robot can only impart limited static and dynamics forces	

# Mensch-Roboter-Kollaboration

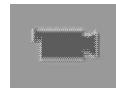
## Beispiele für kollaborierenden Betrieb (1)



### Safety-rated monitored stop

(ISO 10218-1, 5.10.2, ISO/TS 15066)

- Reduce risk by ensuring robot standstill whenever a worker is in collaborative workspace
- Achieved by
  - Supervised standstill - Category 2 stop (IEC 60204-1)
  - Category 0 stop in case of fault (IEC 60204-1)



### Hand guiding

(ISO 10218-1, 5.10.3, ISO/TS 15066)

- Reduce risk by providing worker with direct control over robot motion at all times in collaborative workspace
- Achieved by (controls close to end-effector)
  - Emergency stop
  - Enabling device

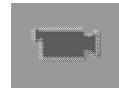
# Mensch-Roboter-Kollaboration

## Beispiele für kollaborierenden Betrieb (2)

### Speed and separation monitoring

(ISO 10218-1, 5.10.4, ISO/TS 15066)

- Reduce risk by maintaining sufficient distance between worker and robot in collaborative workspace
- Achieved by
  - distance supervision, speed supervision
  - protective stop if minimum separation distance or speed limit is violated
  - taking account of the braking distance in minimum separation distance
- Additional requirements on safety-rated periphery
  - for example, safety-rated camera systems



### Power and force limiting by inherent design or control

(ISO 10218-1, 5.10.5, ISO/TS 15066)

- Reduce risk by limiting mechanical loading of human-body parts by moving parts of robot, end-effector or work piece
- Achieved by low inertia, suitable geometry and material, sensory input, control functions, ...
- Applications involving transient and/or quasi-static physical contact



DC523



KNX



Coll.



HMI 2011.



VR1.



VR2.



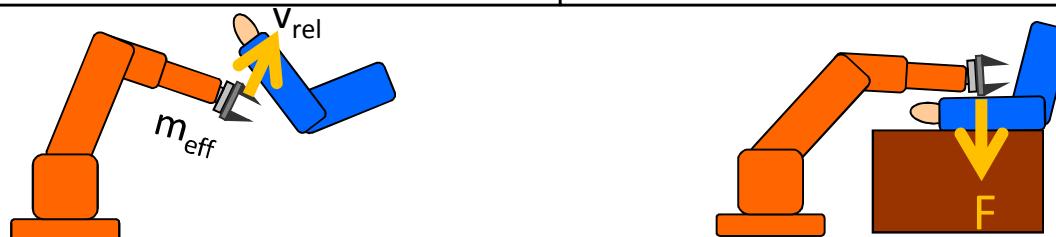
BJE.

# Mensch-Roboter-Kollaboration

## Biomechanische Grenzwerte

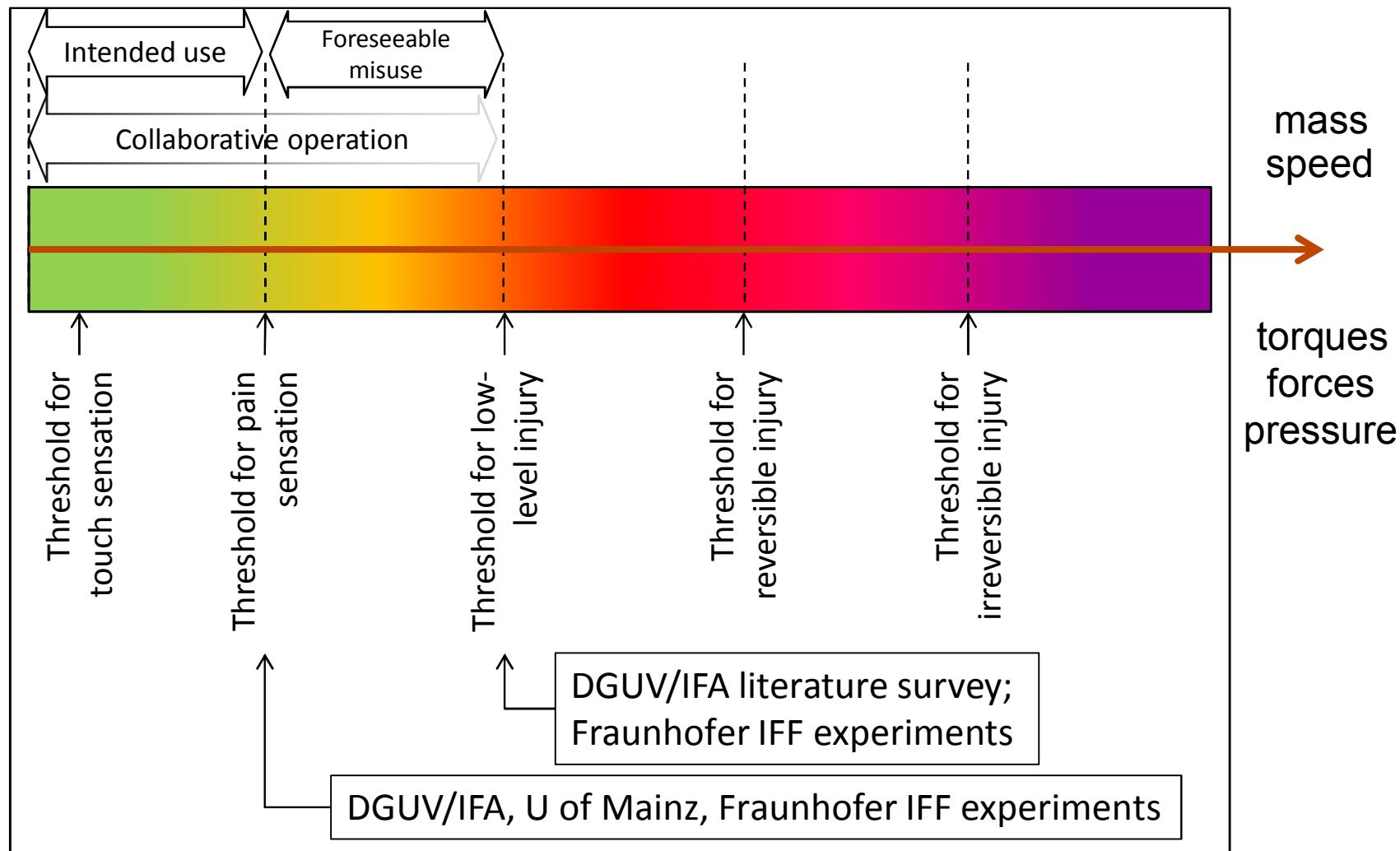
ISO / TS 15066 – clause 5.5.4 “Power and force limiting”

	Transient Contact	Quasi-Static Contact
Description	<ul style="list-style-type: none"><li>Contact event is “short” (&lt; 50 ms)</li><li>Human body part can usually recoil</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>Contact duration is “extended”</li><li>Human body part cannot recoil, is trapped</li></ul>
Limit Criteria	<ul style="list-style-type: none"><li>Peak forces, pressures, stresses</li><li>Energy transfer, power density</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>Peak forces, pressures, stresses</li></ul>
Accessible in Design or Control	<ul style="list-style-type: none"><li>Effective mass (robot pose, payload)</li><li>Speed (relative)</li><li>Contact area, duration</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>Force (joint torques, pose)</li><li>Contact area, duration</li></ul>



# Mensch-Roboter-Kollaboration

## Biomechanische Grenzwerte



J. Fryman, B. Matthias, Proceedings of  
ROBOTIK 2012, Munich

<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6309480>

# Mensch-Roboter-Kollaboration

## Biomechanische Grenzwerte

- Sicherheit = verletzungsfreier Arbeitsplatz
- Sicherheit ≠ angenehmer Arbeitsplatz
  - Nicht verletzende aber subjektiv unangenehme Kontakte sind nicht verboten, verhindern aber die Akzeptanz
- Konstruktive Vorkehrungen für kollaborierende Roboter mit PFL Technologie
  - **Müssen** Risiken ausreichend mindern um Verletzungen zu vermeiden
  - **Können** Ergonomie-Aspekte und Bedienbarkeitsprinzipien anwenden um Akzeptanz zu fördern

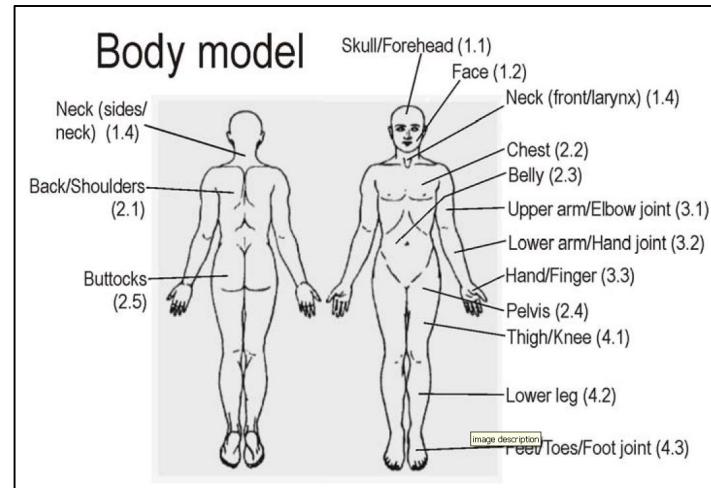
# Biomechanical Limit Criteria

## DGUV/IFA – Quasi-Static and Transient Loading

Table 2: Limit values for the forces, pressures and body deformation constant according to the body regions of the body model

Body model – Main and individual regions with codification		Limit values of the required criteria			
BR	Regions	CSF	IMF	PSP	CC
		[N]	[N]	[N/cm <sup>2</sup> ]	[N/mm]
1. Head with neck	1.1 Skull/Forehead	130	175	30	150
	1.2 Face	65	90	20	75
	1.3 Neck (sides/neck)	145	190	50	50
	1.4 Neck (front/larynx)	35	35	10	10
2. Trunk	2.1 Back/Shoulders	210	250	70	35
	2.2 Chest	140	210	45	25
	2.3 Belly	110	160	35	10
	2.4 Pelvis	180	250	75	25
	2.5 Buttocks	210	250	80	15
3. Upper extremities	3.1 Upper arm/Elbow joint	150	190	50	30
	3.2 Lower arm/Hand joint	160	220	50	40
	3.3 Hand/Finger	135	180	60	75
4. Lower extremities	4.1 Thigh/Knee	220	250	80	50
	4.2 Lower leg	140	170	45	60
	4.3 Feet/Toes/Joint	125	160	45	75

BR	Body region with codification	IMF	Impact force
Regions	Name of the individual body region	PSP	Pressure/Surface pressing
CSF	Clamping/Squeezing force	CC	Compression constant



- BG/BGIA risk assessment recommendations according to machinery directive – Design of workplaces with collaborative robots, U 001/2009e October 2009 edition, revised February 2011
- Values for quasi-static and transient forces derived from literature study

[http://publikationen.dguv.de/dguv/pdf/10002/bg\\_bgia\\_empf\\_u\\_001e.pdf](http://publikationen.dguv.de/dguv/pdf/10002/bg_bgia_empf_u_001e.pdf)

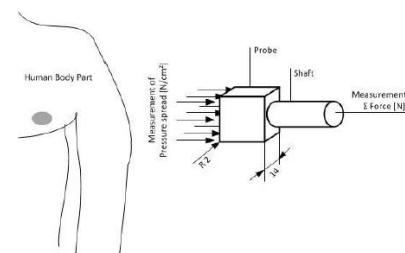
# Biomechanical Limit Criteria

## University of Mainz – Quasi-Static Loading

Measurement localization		Force [N]				Peak pressure [N/cm <sup>2</sup> ]			
Body model	Description	N	Q1	Median	Q3	N	Q1	Median	Q3
	1 Mid of forehead	36	30	45	52	36	92	114	134
	2 Temple	36	17	24	27	35	50	85	154
	3 Masticatory muscle	35	13	18	21	32	46	100	197
	4 Neck muscle	35	15	18	25	33	51	108	153
	5 7th neck muscle	36	27	39	48	36	103	149	194
	6 Shoulder joint	36	19	27	37	36	87	99	156
	7 5th lumbar vertebra	36	50	64	72	36	109	133	190
	8 Sternum	36	31	42	53	36	82	99	118
	9 Pectoral muscle	25	25	30	46	25	63	89	161
	10 Abdominal muscle	35	21	29	38	34	73	119	247
	11 Pelvic bone	36	32	42	54	36	130	181	197
	12 Deltoid muscle	36	33	45	57	35	108	137	181
	13 Humerus	36	38	44	57	36	142	178	251
	14 Radius bone	36	32	38	50	36	116	158	193
	15 Forearm muscle	36	29	34	42	36	90	134	162
	16 Arm nerve	36	36	44	60	35	106	122	175
	17 Forefinger pad nd	36	51	63	83	36	117	163	230
	18 Forefinger pad d	36	50	61	80	36	124	159	215
	19 Forefinger end joint nd	36	38	47	67	36	160	208	269
	20 Forefinger end joint d	36	35	46	61	36	125	176	219
	21 Thenar	36	38	46	59	36	116	144	199
	22 Back of the hand nd	36	49	56	81	36	126	171	214
	23 Back of the hand d	36	45	58	72	35	145	183	215
	24 Palm of the hand nd	36	38	48	56	36	129	166	229
	25 Palm of the hand d	36	36	45	58	36	118	156	214
	26 Thigh muscle	36	44	57	72	36	95	133	236
	27 Kneecap	36	47	65	82	36	135	194	235
	28 Shin splint	36	39	55	67	36	131	168	236
	29 Calf muscle	36	49	63	79	35	107	128	196

(preliminary data, final results to be published later in 2015)

University of Mainz, Occupational Medicine,  
Prof. A. Muttray et al.



# Mensch-Roboter-Kollaboration

## Risikominderung

	<b>Transient Contact</b>	<b>Quasi-Static Contact</b>
<b>Mechanical Design</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Reduce effective mass</li><li>• Increase contact area</li><li>• Increase contact duration</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Increase contact area</li></ul>
<b>Control Design</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Reduce relative speed</li><li>• (Reduce effective mass by suitable choices of pose)</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Decrease maximum joint torques, forces</li><li>• Decrease contact duration</li></ul>

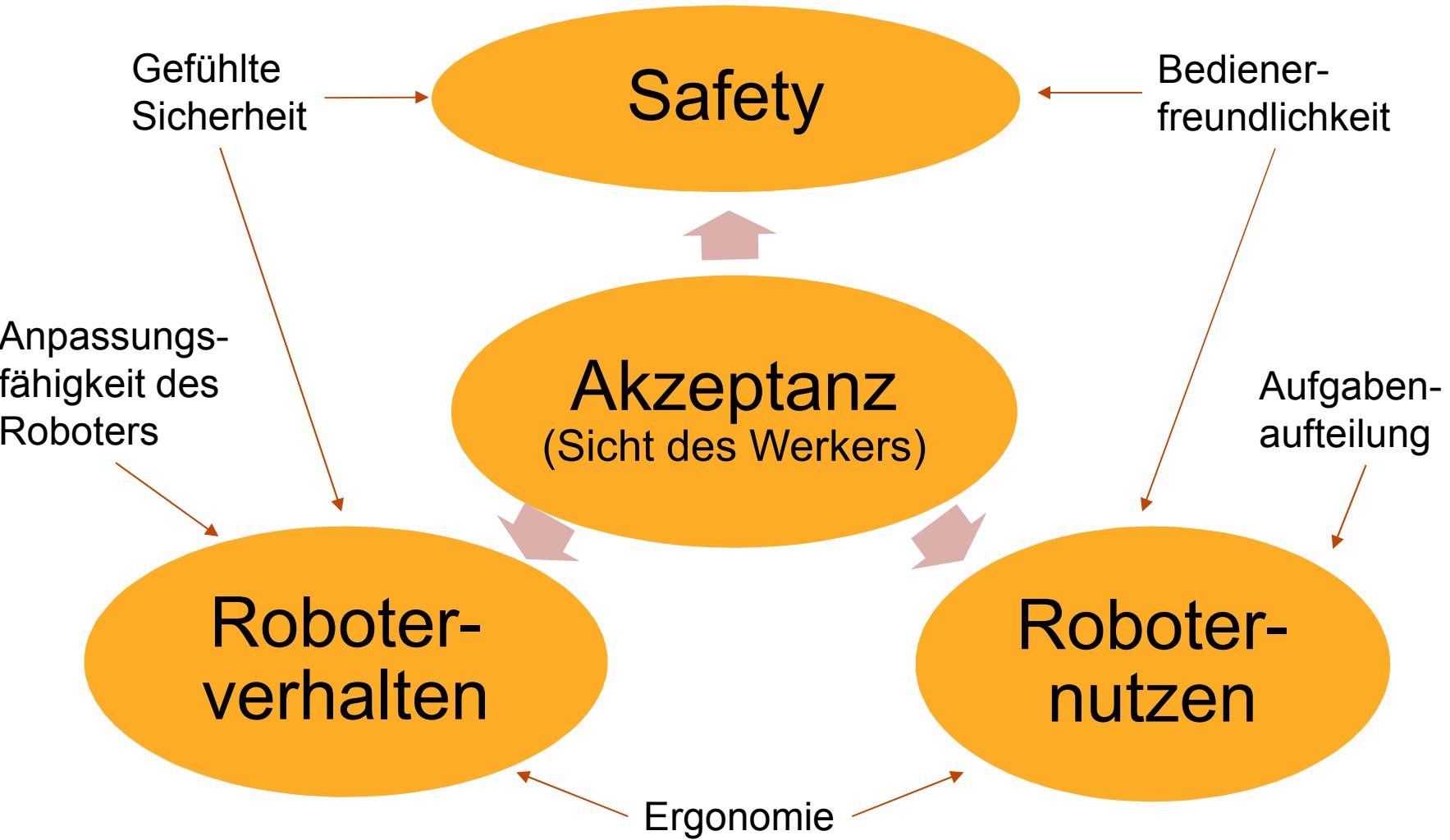
- Design choices are a balance between performance characteristics and safety requirements
- Safety-related control functions must be designed and implemented according to appropriate choice of safety performance level (PL) / safety integrity level (SIL) and designated architecture (ISO 13849-1, IEC 62061)

# Akzeptanz:

- Ergonomie
- Anpassungsfähigkeit des Roboters
- Bedienerfreundlichkeit

# Sicherheit, Akzeptanz und Produktivität bei MRK

## Was fördert Akzeptanz?



# Sicherheit, Akzeptanz und Produktivität bei MRK

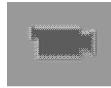
## Ergonomie – mögliche Aspekte und Beispiele

- Roboter als Hebehilfe, Positionierhilfe für Lasten
  - Kollaborationsart „hand guiding“
  - Kontrolle über und Vertrauen in die Technik
  - Entwurfsrichtlinien
- Roboter als Montagekollege in gemischter Mensch-Roboter Umgebung
  - Kollaborationsart „power and force limiting“
  - Dimensionen des Arbeitsplatzes
  - Bewegungseigenschaften (Beschleunigung, Geschwindigkeit, Armpositionen, ...)
  - Kontrolle über und Vertrauen in die Technik
  - Entwurfsrichtlinien?

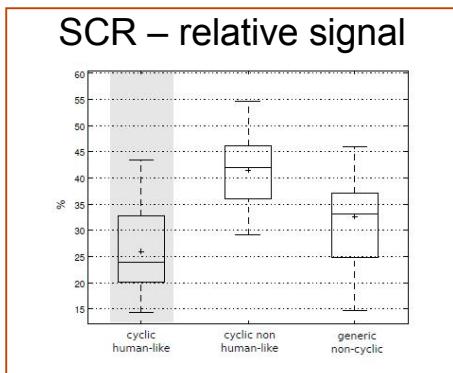
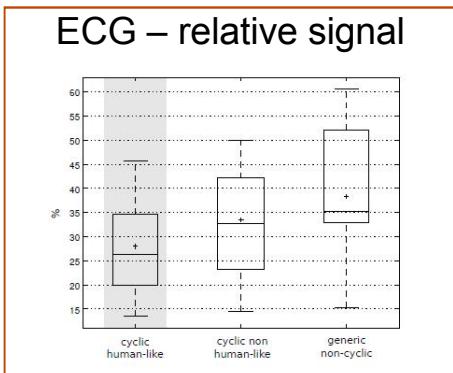
# Sicherheit, Akzeptanz und Produktivität bei MRK Stressempfinden



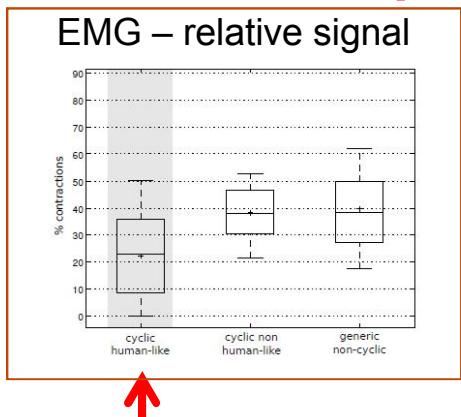
- Worker acceptance of collaborative robots in production
- First experimental determination of stress indicators as function of motion characteristics



Human-like motion



Human-like elbow pattern

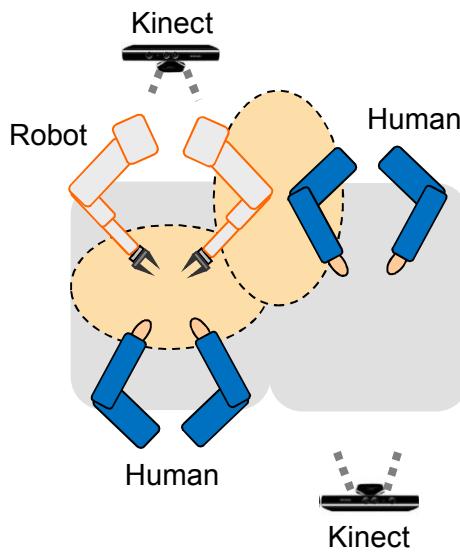


- All stress indicators show lowest levels for human-like motion
- ECG – Electrocardiography
- SCR – Skin conductivity, resistivity
- EMG – Electromyography

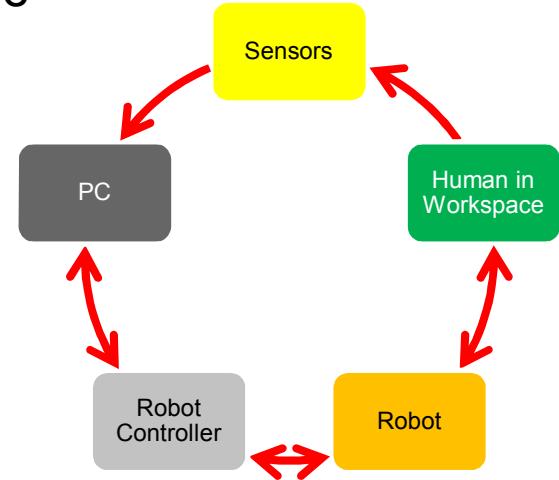
Reference: P. Rocco, A. Zanchettin, DEI, Politecnico di Milano;  
work in EU-FP7 Project ROSETTA

# Sicherheit, Akzeptanz und Produktivität bei MRK

## Bewegungsverhalten von kollaborierenden Robotern



- ABB Dual-Arm Concept Robot
  - Inherently safe coworker
  - Two arms, 7 DOF per arm
- Human worker position detection by Microsoft Kinect
- Two interaction zones
  - Face-to-face
  - Side-by-side



# Sicherheit, Akzeptanz und Produktivität bei MRK

## Bewegungsverhalten von kollaborierenden Robotern

# Sicherheit, Akzeptanz und Produktivität bei MRK

## Bewegungsverhalten von kollaborierenden Robotern

# Sicherheit, Akzeptanz und Produktivität bei MRK

## Bewegungsverhalten von kollaborierenden Robotern

# Sicherheit, Akzeptanz und Produktivität bei MRK

## Leichte Bedienbarkeit

- Criteria and approaches are research topics
  - Alternatives to textual programming
  - Input modality must be intuitive and robust
  - Intelligent default values for configuration parameters
  - Selective hiding / exposing of complexity adapted to user group
  - ...

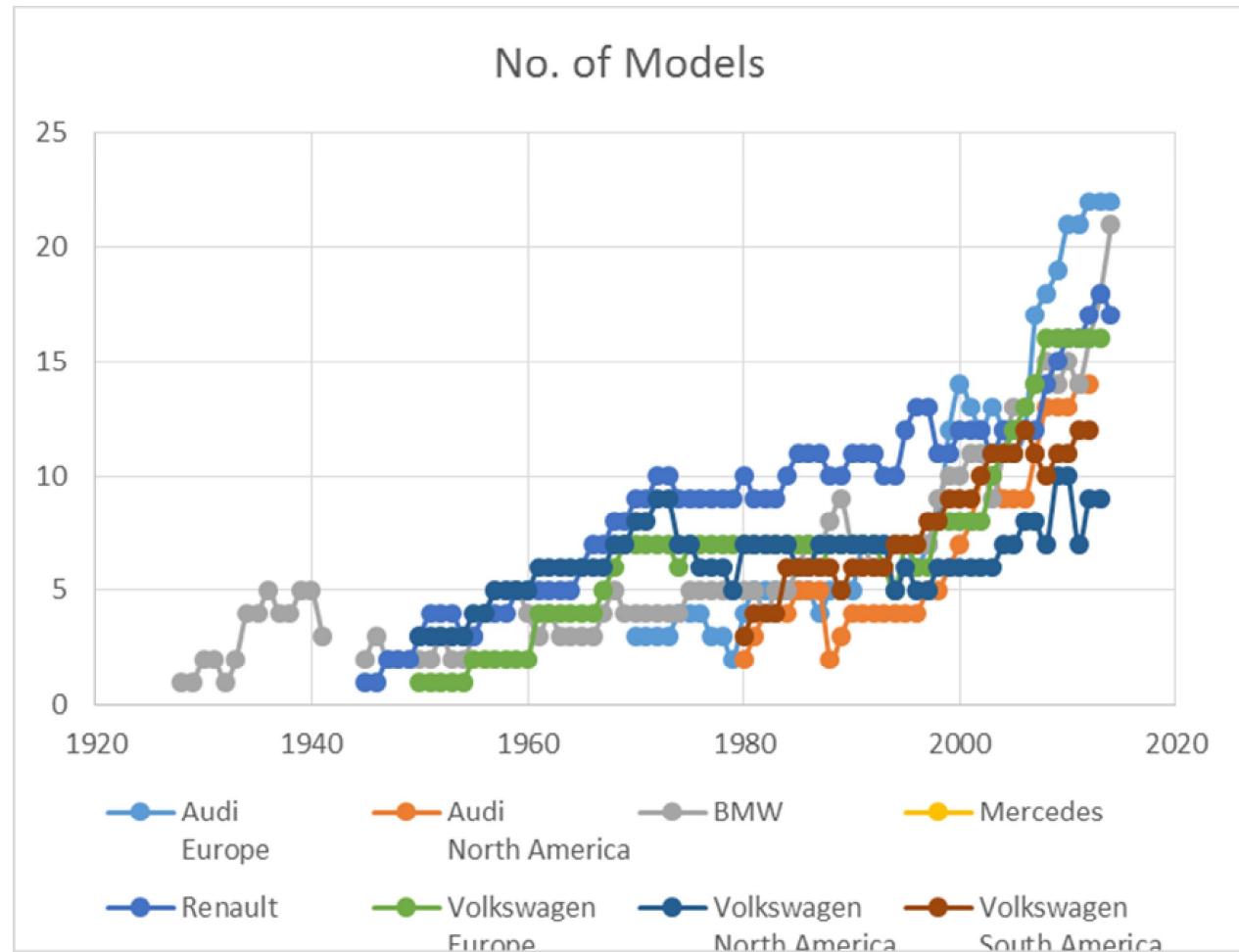
# Produktivität:

- Wirtschaftlichkeit
- Automatisierungsgrad
- verschiedene Fertigungsparadigmen

# Explosion der Produktvarianten

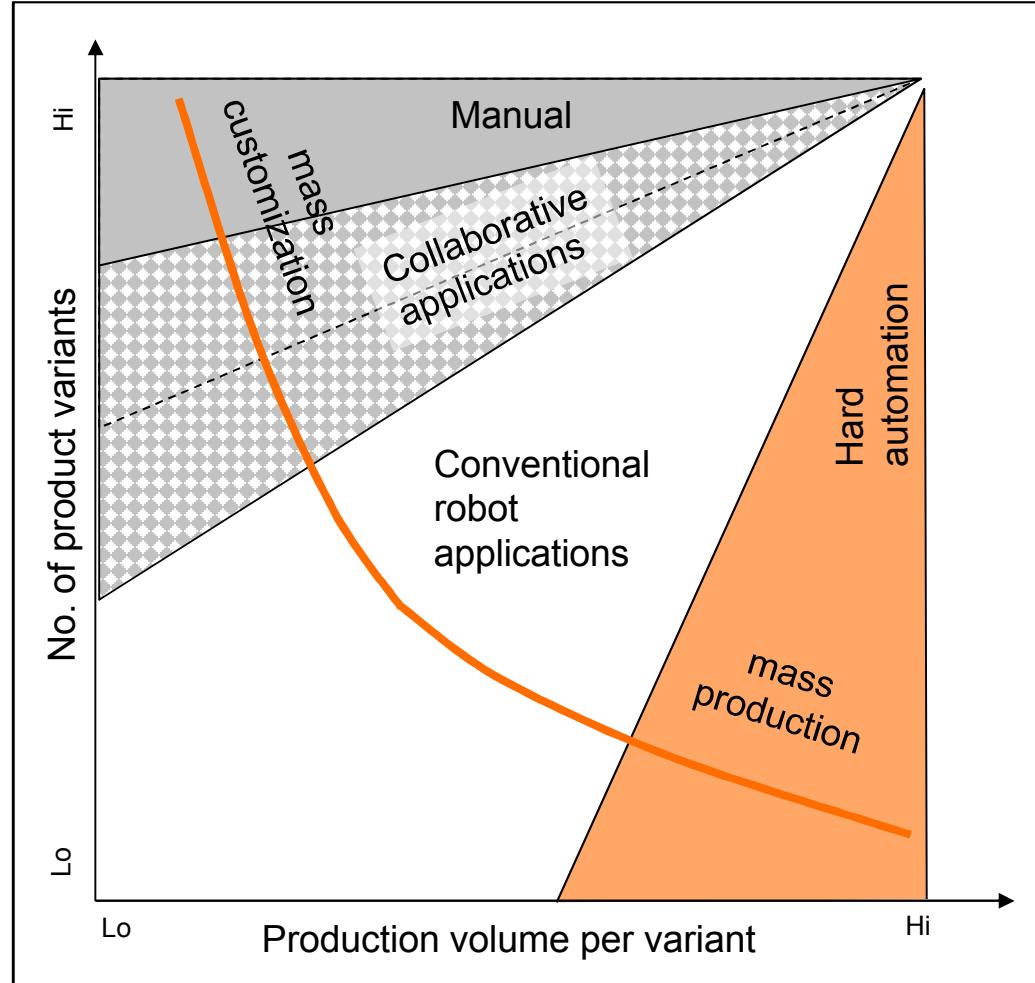
## Beispiel: Automobile

(Quelle: Wikipedia Seiten der Automobil-OEMs)



# Mensch-Roboter-Kollaboration

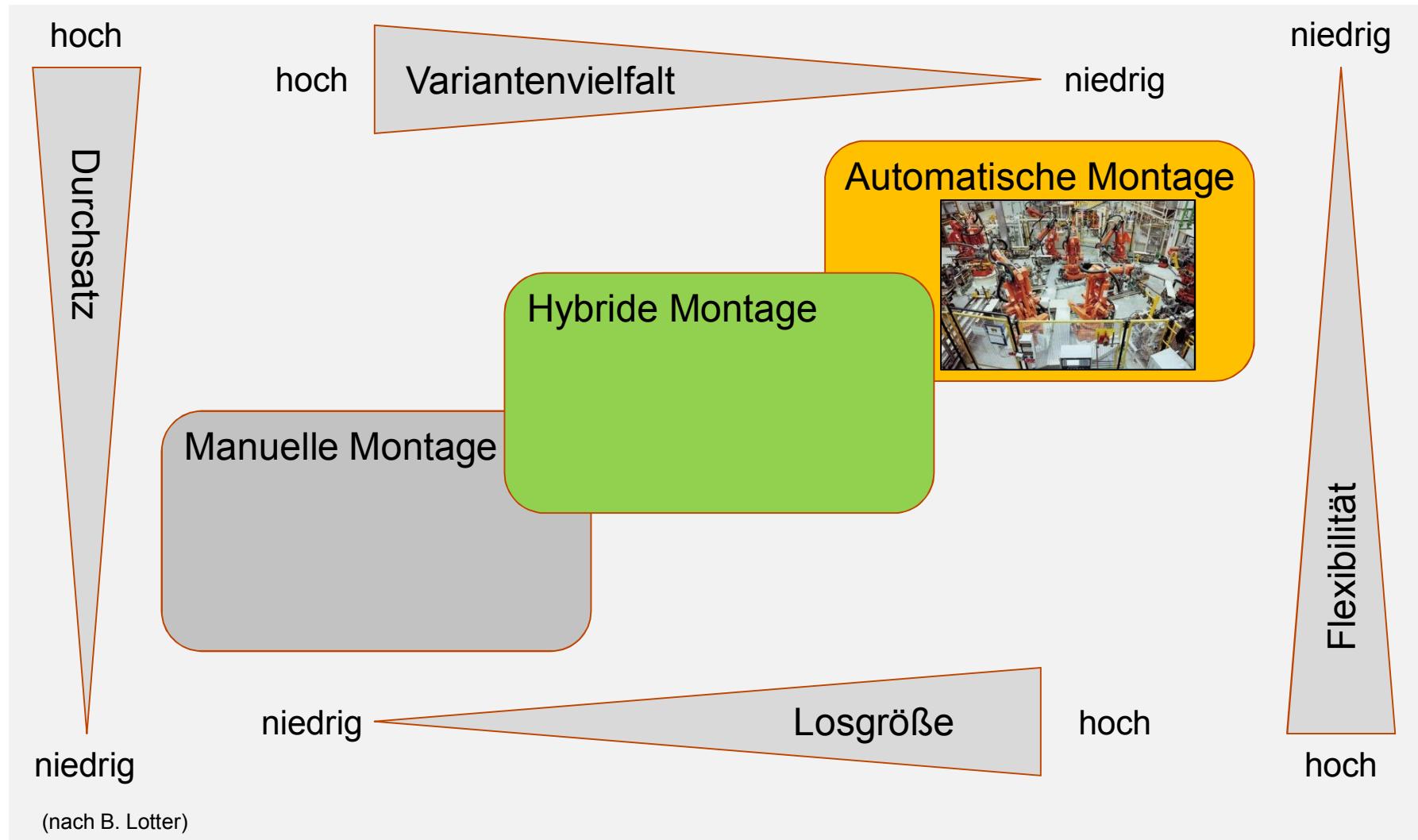
## Wirtschaftliche Motivation



- **Gesellschaftstrend**
  - Individualisierung, Betonung von Einzigartigkeit, sich Absetzen von Mitmenschen
- **Resultierender Markttrend**
  - Zunehmende Produkt- und Variantenvielfalt
  - Kürzere Produktzyklen
  - Von Massenproduktion (“mass production”) zur Massenspezialisierung (“mass customization”)
- **Herausforderung an die industrielle Produktion**
  - Effizienter Umgang mit Variantenvielfalt und kurzen Produktzyklen
  - Häufige Lösung heute: manuelle Fertigung in Asien

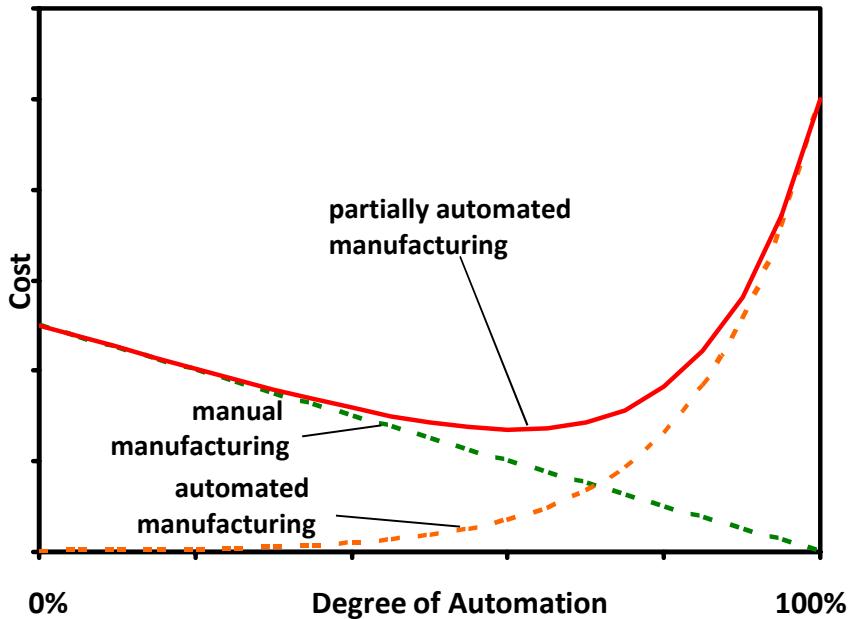
# Mensch-Roboter-Kollaboration

## Automatisierungsgrad



# Moving Humans + Robots Closer Together

## Scalable Degree of Automation



- Optimum degree of automation < 100%
  - Raising degree of automation becomes increasingly expensive, esp. on changeover
  - Manual manufacturing becomes increasingly competitive for remaining fraction of production task

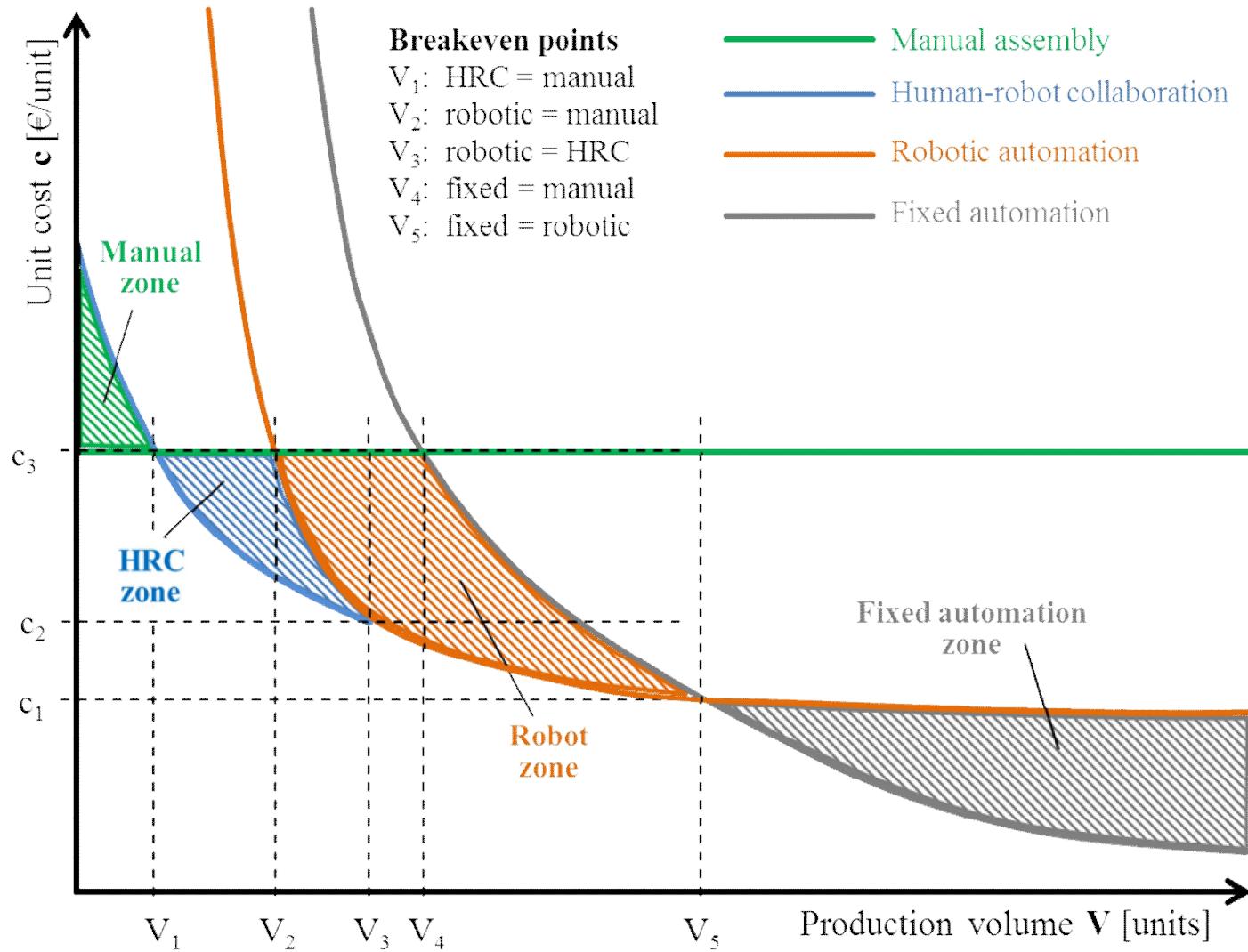
- **Worker Strengths**
  - Cognition
  - Reaction
  - Adaptation
  - Improvisation
- **Worker Limitations**
  - Modest speed
  - Modest force
  - Weak repeatability
  - Inconsistent quality
- **Robot Strengths**
  - High speed
  - High force
  - Repeatability
  - Consistent quality
- **Robot Limitations**
  - No cognitive capability
  - No autonomous adaptation
  - Modest working envelope



- **Synergy: HRC**
  - Automation of applications requiring high flexibility (variants ↑, lot sizes ↓)
  - New ergonomics functionality
  - New applications in which robots previously have not been used

# Kollaborierende Roboter

## Produktivität verschiedener Produktionsparadigmen



# Sicherheit, Akzeptanz und Produktivität bei MRK

## Offene Fragen

- Sicherheit
  - Sicherheitsgerichtete Sensorik zum **Tracking** von Werkern im Arbeitsraum (speed and separation monitoring)
  - Weitere Messergebnisse zu **Grenzwerten** für mechanische Beanspruchung von Körperregionen
- Akzeptanz
  - **Dynamische Anpassung** des Roboterverhaltens an kollaborierende Situation im Spannungsfeld Montageaufgabe vs. Werkerpräsenz
  - **Bedienkonzepte** speziell für den kollaborierenden Betrieb
  - Möglichkeiten komplexe Montageabläufe zu **programmieren**, auch ohne Roboterexpertise
- Produktivität
  - Regeln / Algorithmen für **Aufgabenverteilung** Werker – Roboter
  - **Wirtschaftliche** Kombinationen von Losgrößen, Stückzahlen, Aufgabenkomplexität, ...

# Sicherheit, Akzeptanz und Produktivität bei MRK Zusammenfassung

- Sicherheit
  - Grundlagen in der Normung sind gelegt
  - Detaillierte Informationen Ende 2015 in ISO/TS 15066, inkl. biomechanische Kriterien
  - → Weitere Forschung zu Kriterien
- Akzeptanz
  - Optimale Beanspruchung – Definition für MRK?
  - Safety, objektiv und gefühlt
  - Bewegungsverhalten des Roboters
  - Nützlichkeit des Roboters in der Zusammenarbeit
  - → Weitere Forschung zur Quantifizierung von Ergonomie für MRK
- Produktivität
  - MRK erschließt partielle Automatisierung, vorübergehend in der Zeit und/oder teilweise in der Gesamtfertigung
  - Eignung für kleine Losgrößen und große Variantenvielfalt
  - Mensch und Roboter bringen jeweilige Stärken ein
  - → Forschung zu geeigneter Aufgabenaufteilung Mensch + Roboter
- Ausblick
  - Zusammenarbeit über Disziplingrenzen hinweg
  - Technologische Verbesserungen
  - Rigorose Beschreibung der Ergonomie von MRK
  - Praktische Erfahrungen mit Geschäftsmodellen

Power and productivity  
for a better world™

