

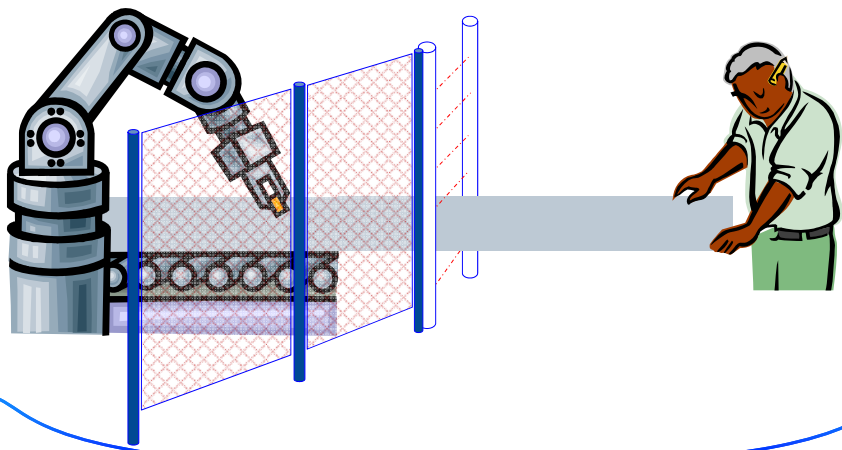
# Entwicklung eines Konzepts zur sicheren Personenerfassung als Schutzeinrichtung an kollaborierenden Robotern

Fachbereich D der Bergischen Universität Wuppertal  
Björn Ostermann

## Inhalt

- **Einleitung**
- Thesen
- Rechtliche Grundlagen
- Technische Anforderungen
- Arbeitssystem
- Stand der Technik / Wissenschaft
- Sensoren: Platzierung und Auswahl
- Algorithmus zur Robotersteuerung
- Erreichte Performanz und Sicherheit
- Zusammenfassung
- Ausblick

## Industrielle Praxis

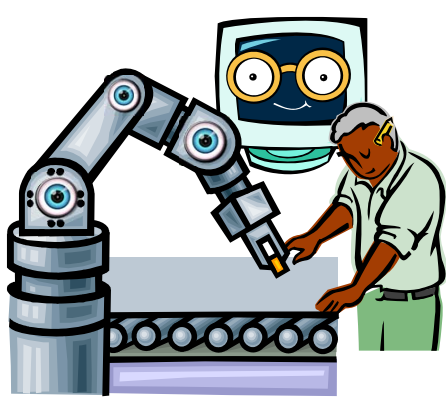


Einleitung

11.06.2014  
Björn Ostermann

Nutzung mit Genehmigung von Microsoft.  
3 / 52

## Kollaborierend



**Roboter und Mensch im „Kontakt“**

- **Mechanik:**
  - Reduzierte Kräfte
  - ...
- **Sensorik:**
  - Umgebung wahrnehmen
  - ...
- **Steuerung:**
  - Geschwindigkeit reduzieren
  - ausweichen
- **Psychologie:**
  - Zusammenarbeit mit schnellem, ausdauernden Partner


Einleitung

11.06.2014  
Björn Ostermann

Nutzung mit Genehmigung von Microsoft.  
4 / 52

## Ziel kollaborierender Arbeitsplätze

- Forschung
  - neue, flexible Arbeitsplätze
- Industrie
  - effiziente Arbeitsplätze
  - Arbeitsplätze einsparen
- IFA – DGUV
  - Bedürfnisse nach Manipulationen senken
  - Manipulationen erschweren
  - Sicherheit des Arbeitnehmers erhöhen



Nutzung mit Genehmigung von Microsoft.

11.06.2014  
Björn Ostermann

Einleitung

5 / 52

## Inhalt

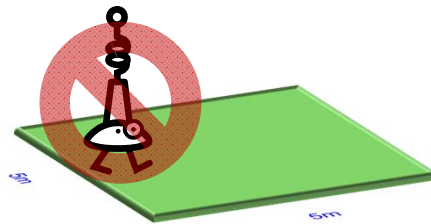
- Einleitung
- **Thesen**
- Rechtliche Grundlagen
- Technische Anforderungen
- Arbeitssystem
- Stand der Technik / Wissenschaft
- Sensoren: Platzierung und Auswahl
- Algorithmus zur Robotersteuerung
- Erreichte Performanz und Sicherheit
- Zusammenfassung
- Ausblick

11.06.2014  
Björn Ostermann

6 / 52

## These I

- Eine sicherheitsgerichtete Überwachung eines Arbeitsbereichs mit bekannten Ausmaßen kleiner 5x5m ist mit Sensortechnik **ohne Marker** möglich.



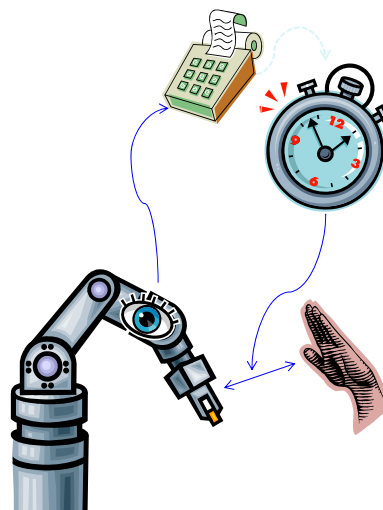
Nutzung mit Genehmigung von Microsoft.

11.06.2014  
Björn Ostermann

7 / 52

## These II

- Eine Erfassung und Verarbeitung der Umgebungsdaten ist ausreichend **schnell** möglich, um einen geringen Abstand zwischen Mensch und Roboter zuzulassen.



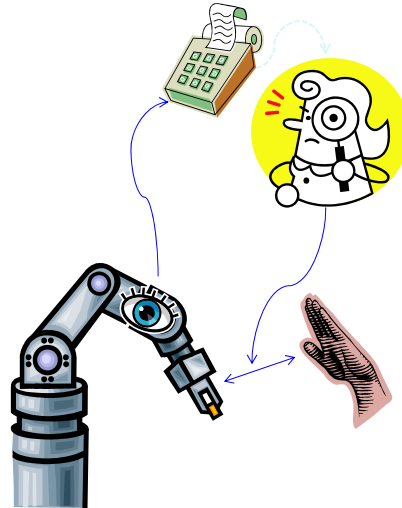
Nutzung mit Genehmigung von Microsoft.

11.06.2014  
Björn Ostermann

8 / 52

### These III

- Eine Erfassung und Verarbeitung der Umgebungsdaten ist ausreichend **genau** möglich, um einen geringen Abstand zwischen Mensch und Roboter zuzulassen.

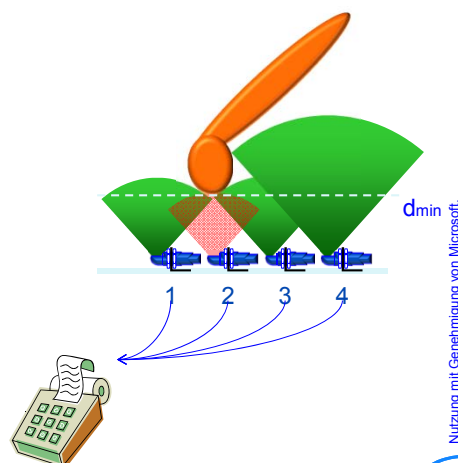


11.06.2014  
Björn Ostermann

9 / 52

### These IV

- Mehrere aktive Sensoren lassen sich zu einem **redundanten Array** zusammenschalten um eine sichere zweikanalige Auswertung zu ermöglichen. Hierbei wird der notwendige **Performance Level „d“** nach EN ISO 13849-1:2008 erreicht.

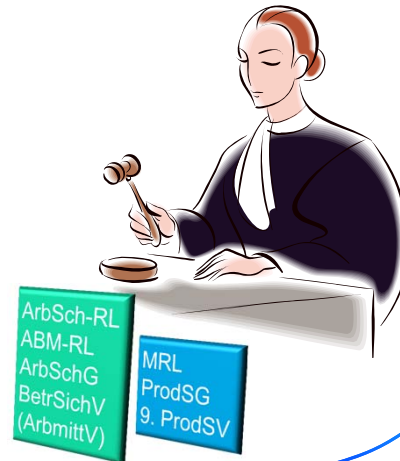


11.06.2014  
Björn Ostermann

10 / 52

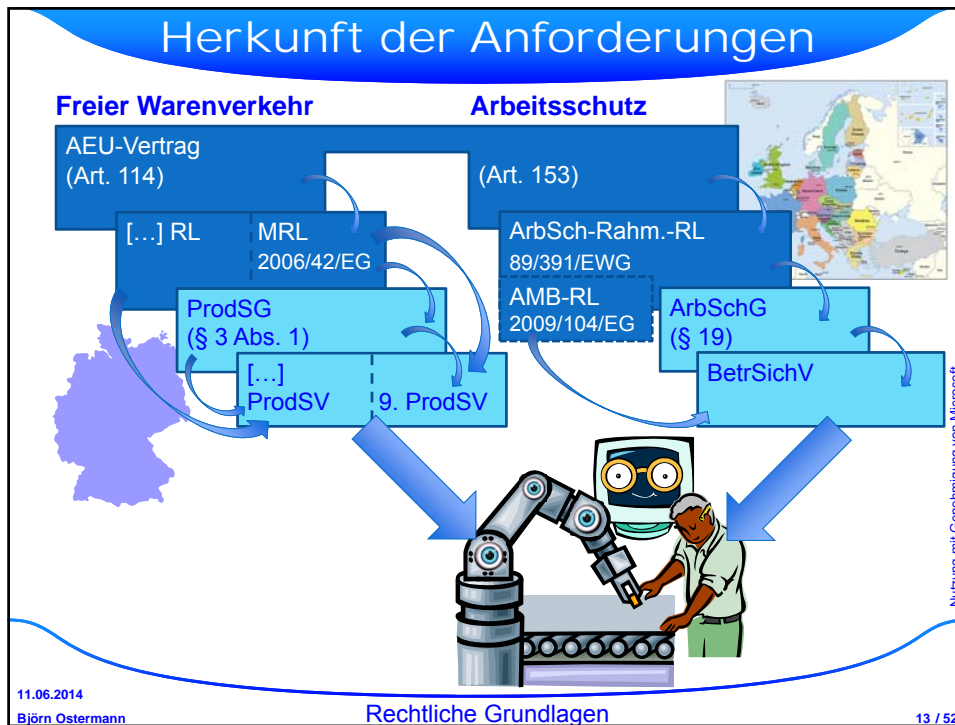
## These V

- Die in dieser Arbeit entwickelte Schutzeinrichtung kann die rechtlichen Anforderungen an das **Inverkehrbringen** erfüllen und damit eine Grundlage zur Erfüllung der **Arbeitsschutzanforderungen** an ein kollaborierendes Robotersystem bilden.



## Inhalt

- Einleitung
- Thesen
- **Rechtliche Grundlagen**
- Technische Anforderungen
- Arbeitssystem
- Stand der Technik / Wissenschaft
- Sensoren: Platzierung und Auswahl
- Algorithmus zur Robotersteuerung
- Erreichte Performanz und Sicherheit
- Zusammenfassung
- Ausblick



## Anforderungen

- **Freier Warenverkehr:**
  - MRL 2006/42/EG, Art. 5(1)a):  
**Grundlegende Sicherheits- und Gesundheitsschutzanforderungen erfüllen**
  - MRL 2006/42/EG, Anhang I, Allgemeine Grundsätze 3:  
Maßgabe: **Stand der Technik**
- **Arbeitsschutz:**
  - BetrSichV, §7 Abs. 1:  
grundsätzlich nur Arbeitsmittel die dem **Binnenmarktrecht** entsprechen erstmalig bereitstellen
  - BetrSichV, §4 Abs. 2:  
Arbeitsmittel u.a. nach **Stand der Technik** bereitstellen

11.06.2014  
Björn Ostermann Nutzung mit Genehmigung von Microsoft.

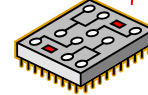
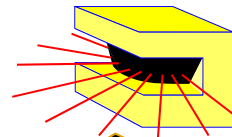
Rechtliche Grundlagen 14 / 52

## Inhalt

- Einleitung
- Thesen
- Rechtliche Grundlagen
- **Technische Anforderungen**
- Arbeitssystem
- Stand der Technik / Wissenschaft
- Sensoren: Platzierung und Auswahl
- Algorithmus zur Robotersteuerung
- Erreichte Performanz und Sicherheit
- Zusammenfassung
- Ausblick

## Anforderungen aus 2006/42/EG Anhang I

- bewegliche Teile, die am Arbeitsprozess beteiligt sind
  - Schutz durch nichttrennende Schutzeinrichtungen möglich / zulässig
- Anforderungen an nichttrennende Schutzeinrichtungen
  - bewegliche Teile vor Erreichen stillsetzen
  - keine Bewegung zulassen, wenn Personen im Gefahrenbereich sind
- Sicherheit und Zuverlässigkeit von Steuerungen
- Ingangsetzen
  - automatisches Wiedereingangssetzen nach einer Abschaltung darf nicht zur Gefährdungssituation führen
- Lärm





## Hilfestellung aus Normen

- EN ISO 10218 Teil 1 und 2 „Industrielle Roboter“
  - PLr d; Kategorie 3
- EN ISO 13849-1 „Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen“
  - Kategorie 3: einzelne Fehler dürfen nicht zum Verlust der Sicherheitsfunktion führen
- EN ISO 13855 „Anordnung von Schutzeinrichtungen“
  - Diagramm
- EN 61496-1 „Berührungslos wirkende Schutzeinrichtungen“
  - Kategorie 3 ≈ BWS Typ 3
- VDI 2058 2 und VDI 3766 „Am Arbeitsplatz erlaubter Ultraschallpegel“
  - für 50 kHz: maximaler 5 Minuten Terzschalldruckpegel von bis zu 110 dB kann als unbedenklich angesehen werden
  - Z-bewertete Spitzenschalldruckpegel: 140 dB

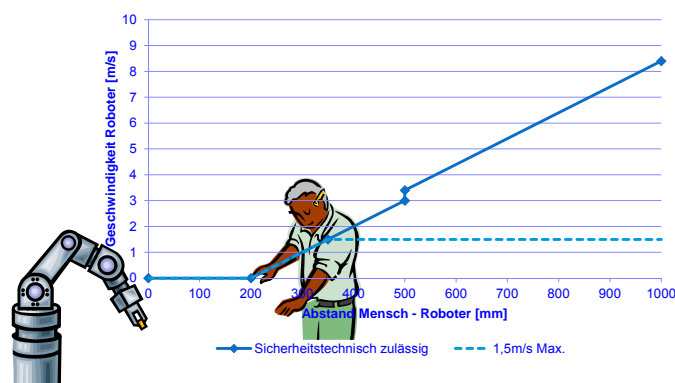
11.06.2014  
Björn Ostermann

Technische Anforderungen

17 / 52

## Hilfestellung aus Normen

- EN ISO 13855 „Anordnung von Schutzeinrichtungen“



11.06.2014  
Björn Ostermann

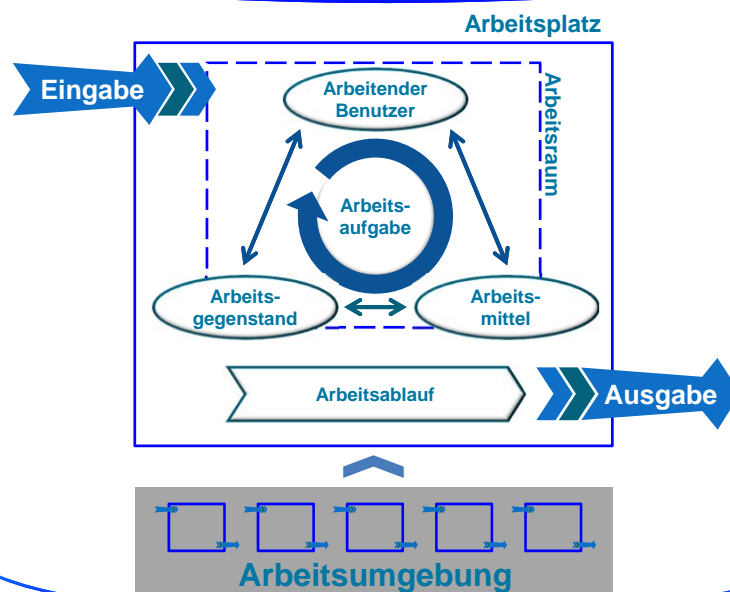
Technische Anforderungen

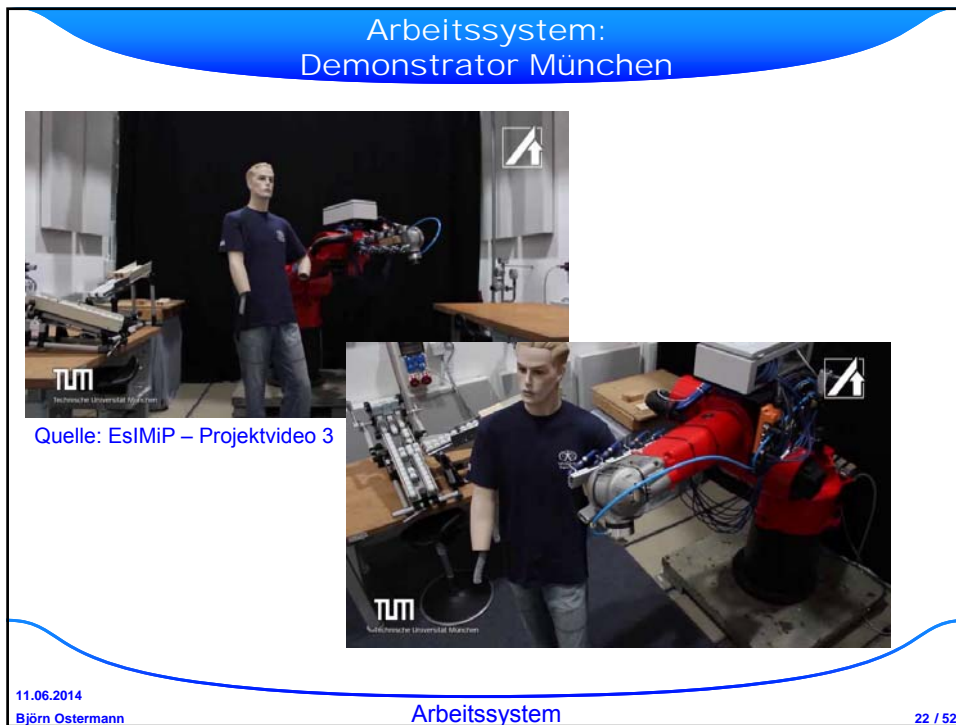
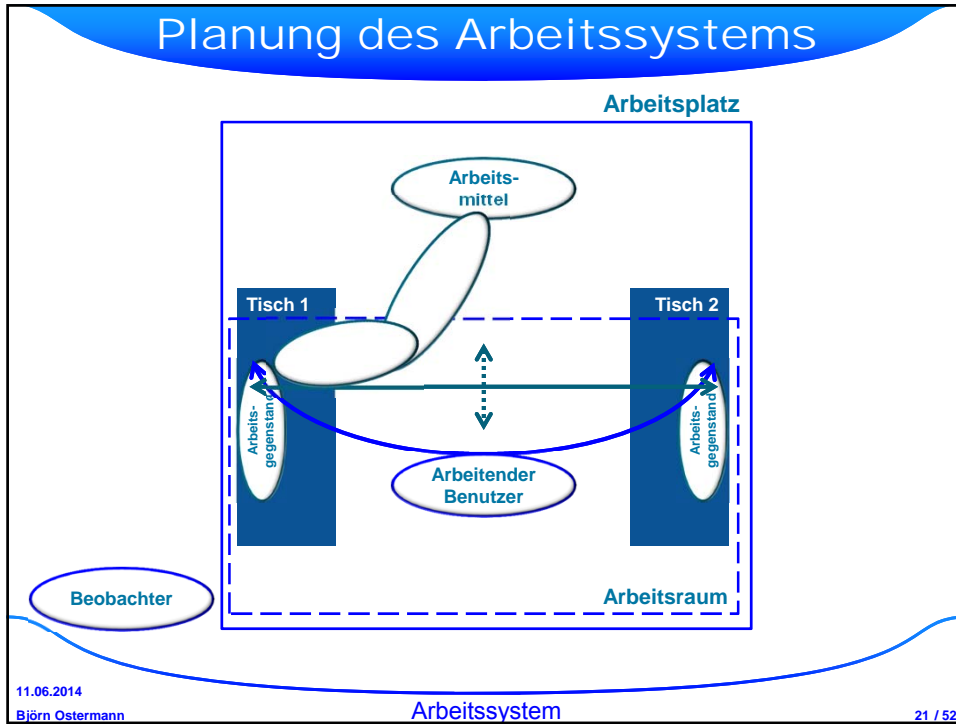
18 / 52

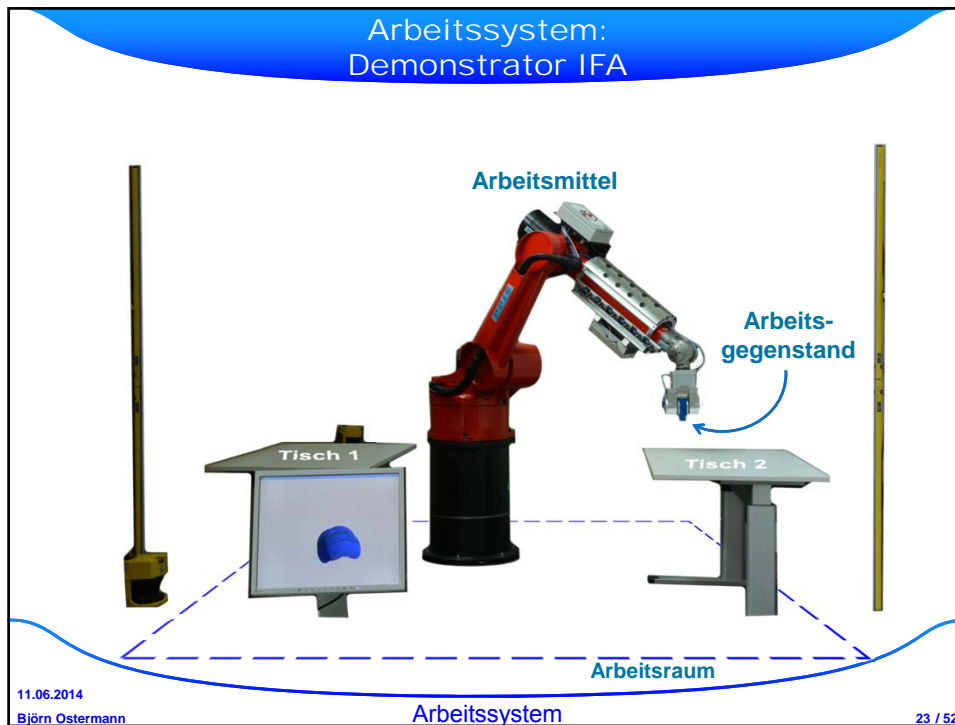
## Inhalt

- Einleitung
- Thesen
- Rechtliche Grundlagen
- Technische Anforderungen
- **Arbeitssystem**
- Stand der Technik / Wissenschaft
- Sensoren: Platzierung und Auswahl
- Algorithmus zur Robotersteuerung
- Erreichte Performanz und Sicherheit
- Zusammenfassung
- Ausblick

## Arbeitssystem







Inhalt


- Einleitung
- Thesen
- Rechtliche Grundlagen
- Technische Anforderungen
- Arbeitssystem
- **Stand der Technik / Wissenschaft**
- Sensoren: Platzierung und Auswahl
- Algorithmus zur Robotersteuerung
- Erreichte Performanz und Sicherheit
- Zusammenfassung
- Ausblick

11.06.2014  
Björn Ostermann

24 / 52

## Stand der Technik

- Elan Safety Controller
  - sichere kartesische Nocken
  - sicher begrenzte kartesische Geschwindigkeit
- Arbeitsplätze einzeln geprüft durch BGHM
  - MRK
    - in Schaumstoff gehüllt
    - druckempfindliche Sensoren
    - zusätzliche kapazitive Sensoren
  - Bosch
  - Tetra Gesellschaft für Sensorik
    - nur geringe Kräfte



Nutzung mit Genehmigung von Microsoft.


11.06.2014  
Björn Ostermann

Stand der Technik / Wissenschaft

25 / 52

## Stand der Wissenschaft

- Optoelektronische Sensoren
  - 2D / 3D Kameras
  - 2D / 3D Laserscanner
- Ultraschallsensoren
- Taktile / Momenten-Sensoren
- Kapazitive Sensoren
- Radar (Mikrowellen)



Nutzung mit Genehmigung von Microsoft.

11.06.2014  
Björn Ostermann

Stand der Technik / Wissenschaft

26 / 52

## Inhalt

- Einleitung
- Thesen
- Rechtliche Grundlagen
- Technische Anforderungen
- Arbeitssystem
- Stand der Technik / Wissenschaft
- **Sensoren: Platzierung und Auswahl**
- Algorithmus zur Robotersteuerung
- Erreichte Performanz und Sicherheit
- Zusammenfassung
- Ausblick

11.06.2014  
Björn Ostermann

27 / 52

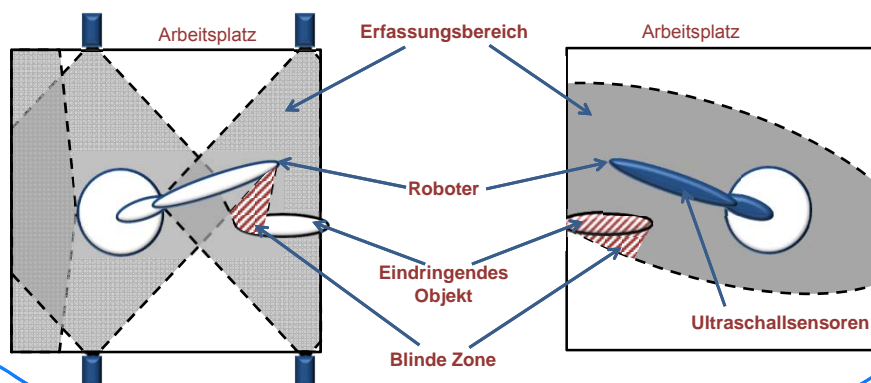
## Sensorplatzierung

### Allozentrisch

- großräumige Übersicht möglich
- blinde Zonen zwischen Roboter und Mensch

### Egozentrisch

- Übersicht nur bis zum nächsten Objekt
- keine blinden Zonen direkt am Roboter



11.06.2014  
Björn Ostermann


Sensoren: Platzierung und Auswahl

28 / 52

## Sensorauswahl

### Ultraschall

- Vorteile
  - Robuste Technologie verfügbar
  - Sichere Sensoren bereits geprüft und zertifiziert
  - ausreichend kurze Messzeit (<30 ms)
- Nachteile
  - Totzeit
  - Aktive Messung: Störung benachbarter Sensoren
  - nur kürzeste Distanz bis zum ersten gemessenen Objekt verfügbar
  - Mögliche Störung durch Umgebungseinflüsse




11.06.2014  
Björn Ostermann

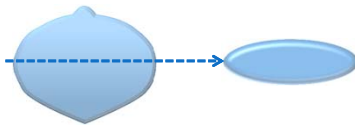
Sensoren: Platzierung und Auswahl

29 / 52

## Am Roboter



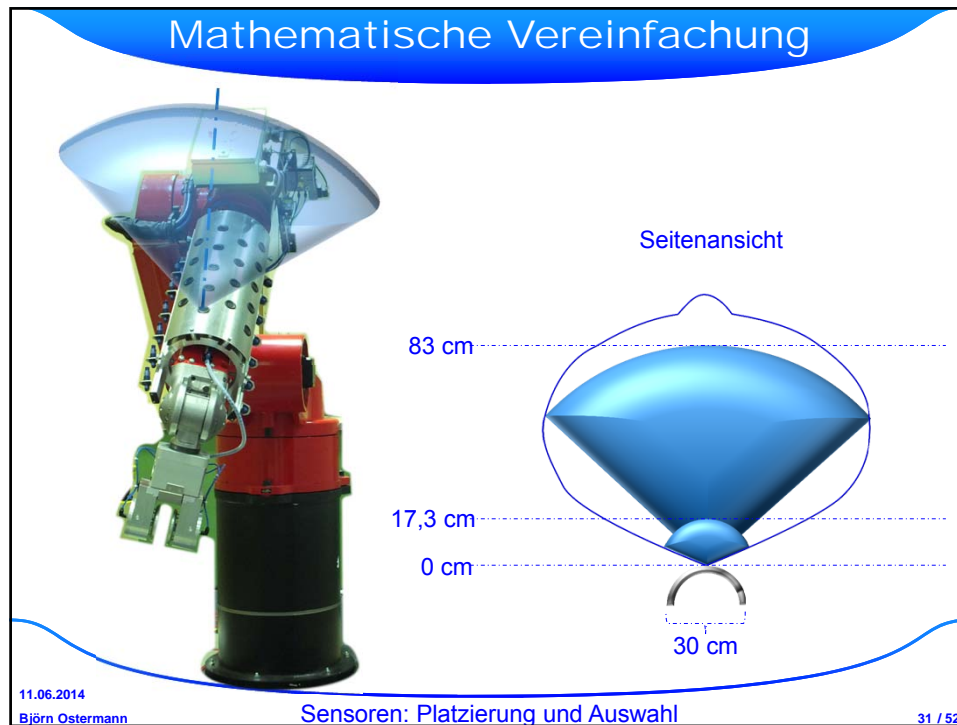
- aktueller Demonstrator mit 18 Ultraschallsensoren
- $\frac{1}{4}$  des Roboterarms abgedeckt
- Redundante Abdeckung des Raums von 17,3 cm bis 83 cm
- Sensorkeulen haben ovalen Schnitt



11.06.2014  
Björn Ostermann

Sensoren: Platzierung und Auswahl

30 / 52





### Festlegen der Eckpunkte

The diagram illustrates the process of defining vertices for a robot's path. On the left, a diamond-shaped area is shown with a grid of points and lines, representing a discretized path. On the right, a sensor layout is shown with beams originating from a central point and hitting a curved surface, representing the robot's field of view.

11.06.2014  
Björn Ostermann

Algorithmus zur Robotersteuerung

33 / 52

### Verlust an Genauigkeit

The diagram illustrates the loss of accuracy in a robot's path. On the left, a diamond-shaped area is shown with a red shaded region at the top, indicating the loss of accuracy. On the right, a sensor layout is shown with beams originating from a central point and hitting a curved surface, representing the robot's field of view.

11.06.2014  
Björn Ostermann

Algorithmus zur Robotersteuerung

34 / 52

### Kombinieren von Messbereichen

11.06.2014  
Björn Ostermann

Algorithmus zur Robotersteuerung

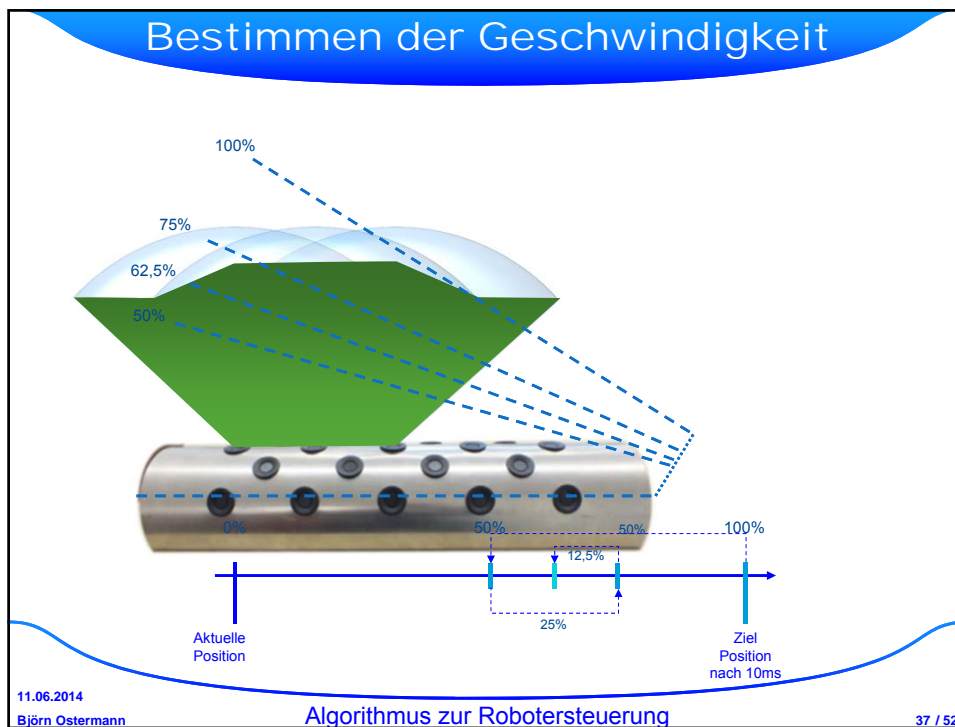
35 / 52

### Freier Raum mit Dreiecken

11.06.2014  
Björn Ostermann

Algorithmus zur Robotersteuerung

36 / 52



## Inhalt

- Einleitung
- Thesen
- Rechtliche Grundlagen
- Technische Anforderungen
- Arbeitssystem
- Stand der Technik / Wissenschaft
- Sensoren: Platzierung und Auswahl
- Algorithmus zur Robotersteuerung
- **Erreichte Performanz und Sicherheit**
- Zusammenfassung
- Ausblick

11.06.2014  
Björn Ostermann

38 / 52

## Performanz

- Pro Sensor, zum Erreichen von 99,9% Genauigkeit
  - 20 Divisionen (~400 Takte)
  - 306 Multiplikationen (~918 Takte)
  - 535 Subtraktionen/Additionen (~1070 Takte)
  - 180 Vergleiche (kleiner/größer) (~360 Takte)
- Bei 80 Sensoren (komplette Abdeckung des unteren Arms)
  - ca. 1.319.040 Takte
  - bei 1,3 GHz → 1ms Rechenzeit
  - stark parallelisierbar (2x 750 MHz, 10x 130 MHz)
  - bei erkannter Kollision in einem Schritt kann abgebrochen werden
  - ein Ergebnis ist nach jedem einzelnen Schritt verfügbar

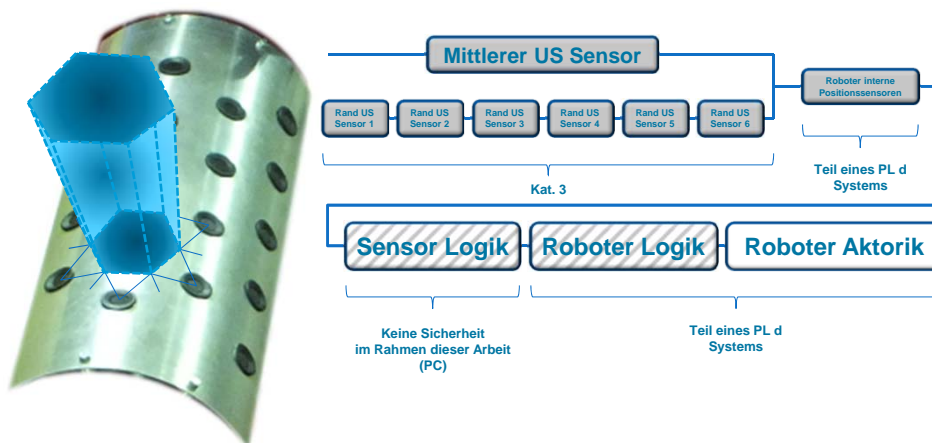
11.06.2014

Björn Ostermann

Erreichte Performanz und Sicherheit

39 / 52

## Sicherheit nach EN ISO 13849-1



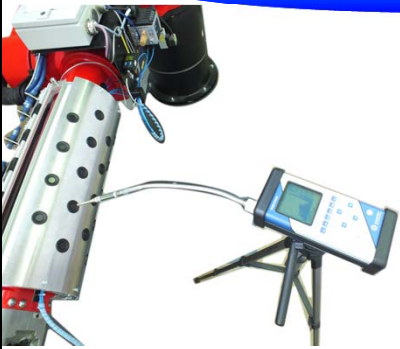
11.06.2014

Björn Ostermann

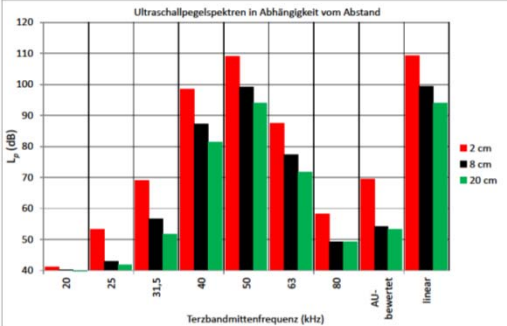
Erreichte Performanz und Sicherheit

40 / 52

## Unbedenklichkeit



Ultraschallpegelspektren in Abhängigkeit vom Abstand



Terzbandmittenfrequenz (kHz)	2 cm (dB)	8 cm (dB)	20 cm (dB)
20	40	40	40
25	55	45	45
31.5	70	55	55
40	95	85	85
50	110	100	100
63	85	75	75
80	60	50	50
All. bewertet	70	55	55
linear	110	100	100

Nutzung mit Genehmigung von Daniel Förster.

maximaler 5-Minuten-Terzschalldruckpegel 110 dB

Grenzwert  $L_{Zpeak} = 140$  dB  
gemessen bei 2cm:  $L_{Zpeak} = 135$  dB

11.06.2014  
Björn Ostermann
Erreichte Performanz und Sicherheit
41 / 52


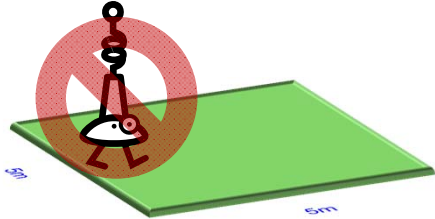
## Inhalt

- Einleitung
- Thesen
- Rechtliche Grundlagen
- Technische Anforderungen
- Arbeitssystem
- Stand der Technik / Wissenschaft
- Sensoren: Platzierung und Auswahl
- Algorithmus zur Robotersteuerung
- Erreichte Performanz und Sicherheit
- **Zusammenfassung**
- Ausblick

11.06.2014  
Björn Ostermann
42 / 52

## These I

- Eine sicherheitsgerichtete Überwachung eines Arbeitsbereichs mit bekannten Ausmaßen kleiner 5x5m ist mit Sensortechnik **ohne Marker** möglich.

Nutzung mit Genehmigung von Microsoft.


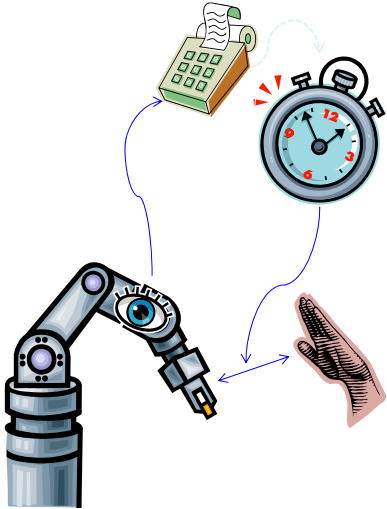
11.06.2014  
Björn Ostermann

Zusammenfassung

43 / 52

## These II

- Eine Erfassung und Verarbeitung der Umgebungsdaten ist ausreichend **schnell** möglich, um einen geringen Abstand zwischen Mensch und Roboter zuzulassen.

Nutzung mit Genehmigung von Microsoft.

11.06.2014  
Björn Ostermann

Zusammenfassung

44 / 52

### These III

- Eine Erfassung und Verarbeitung der Umgebungsdaten ist ausreichend **genau** möglich, um einen geringen Abstand zwischen Mensch und Roboter zuzulassen.

Nutzung mit Genehmigung von Microsoft.

11.06.2014  
Björn Ostermann

Zusammenfassung

45 / 52

### These IV

- Mehrere aktive Sensoren lassen sich zu einem **redundanten Array** zusammenschalten um eine sichere zweikanalige Auswertung zu ermöglichen. Hierbei wird der notwendige **Performance Level „d“** nach EN ISO 13849-1 erreicht.

Nutzung mit Genehmigung von Microsoft.


11.06.2014  
Björn Ostermann

Zusammenfassung

46 / 52

## These V

- Die in dieser Arbeit entwickelte Schutzeinrichtung kann die rechtlichen Anforderungen an das **Inverkehrbringen** erfüllen und damit eine Grundlage zur Erfüllung der **Arbeitsschutzanforderungen an ein kollaborierend arbeitendes Robotersystem** bilden.



Nutzung mit Genehmigung von Microsoft.

11.06.2014  
Björn Ostermann

Zusammenfassung

47 / 52

## Inhalt

- Einleitung
- Thesen
- Rechtliche Grundlagen
- Technische Anforderungen
- Arbeitssystem
- Stand der Technik / Wissenschaft
- Sensoren: Platzierung und Auswahl
- Algorithmus zur Robotersteuerung
- Erreichte Performanz und Sicherheit
- Zusammenfassung
- **Ausblick**

11.06.2014  
Björn Ostermann

48 / 52



## Sensor-Fusion

- Laserscanner mit großem Sicherheitsabstand für entfernten Armteil
- Geschwindigkeit über Ultraschall kontrolliert, Pfadplanung über Kamera



11.06.2014  
Björn Ostermann

Ausblick

49 / 52

## Sensor-Substituion

- Einsatz von Radar
  - Algorithmen übertragbar
  - Schnellere Reaktion
- Probleme
  - Blinde Zone und Geringe Auflösung oder
  - nur Anzeige von Bewegung



Nutzung mit Genehmigung von Microsoft.

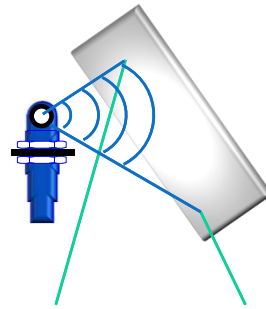
11.06.2014  
Björn Ostermann

Ausblick

50 / 52

## Sensorkeulen formen

- Formung / Umlenkung der Ultraschallkeulen



11.06.2014  
Björn Ostermann

Ausblick

51 / 52

Ende

Fragen?