Interaktion mit mobilen Robotern

Gestaltung und Bewertung

ECN 2018

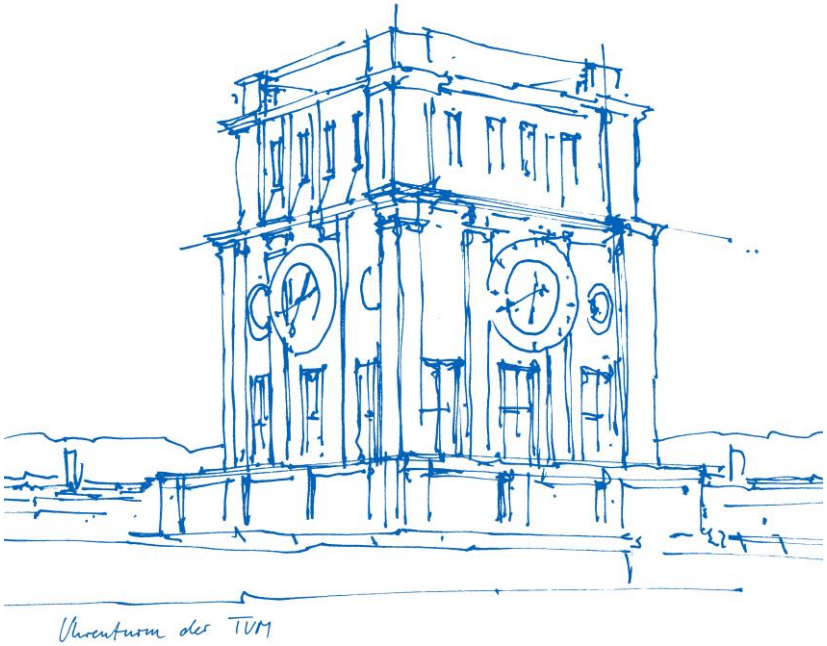
Prof. Klaus Bengler

Technische Universität München

Fakultät für Maschinenwesen

Lehrstuhl für Ergonomie

with contributions of J.Schmidtler, J.Reinhart, D.Bortot



COPYRIGHT RECHTE DER INHALTE VERBLEIBEN BEIM LEHRSTUHL FÜR ERGONOMIE TU MÜNCHEN

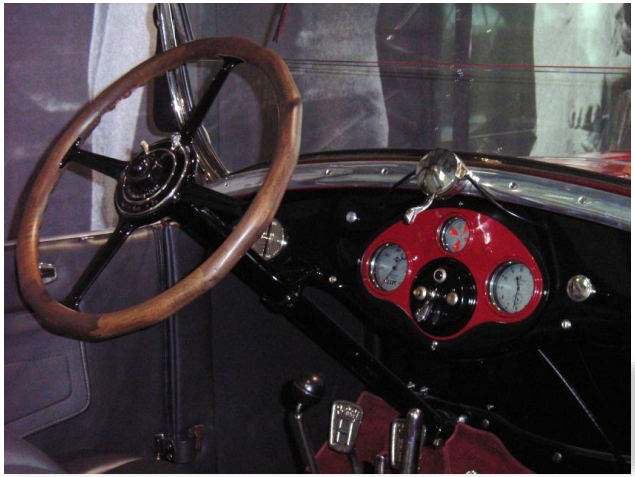
Die Welt um uns herum

- War in Bewegung
- Ist in Bewegung
- Setzt sich in Bewegung

COPYRIGHT RECHTE DER INHALTE VERBLEIBEN BEIM LEHRSTUHL FÜR ERGONOMIE TU MÜNCHEN

Wir setzen/halten Maschinen in Bewegung ..

August Horch (1908)



COPYRIGHT RECHTE DER INHALTE VERBLEIBEN BEIM LEHRSTUHL FÜR ERGONOMIE TU MÜNCHEN

33:40 Sinfonie der Großstadt
https://www.bing.com/videos/search?q=sinfonie+der+gro%c3%9fstadt&&view=detail&mid=12FA1B07F39B9EF726DA12FA1B07F39B9EF726DA&FORM=VRDGAR

COPYRIGHT RECHTE DER INHALTE VERBLEIBEN BEIM LEHRSTUHL FÜR ERGONOMIE TU MÜNCHEN

SIM – Simulation und Verhaltensmodellierung

Realitätsnahe Verhaltensmodelle in Verkehrs- und Fahrsimulation ermöglichen die Untersuchung kooperativer Fahrerassistenzsysteme

Dazu wurden

- Fahrsimulatoren vernetzt
- Fußgänger- und Motorradsimulatoren aufgebaut
- das Verhalten von Radfahrern modelliert
- die Kooperation zwischen Verkehrsteilnehmern modelliert

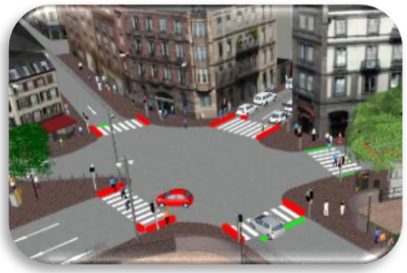


Abbildung des gemischten Verkehrs in VISSIM

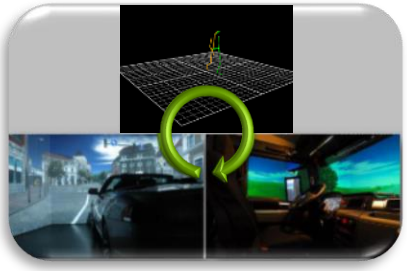
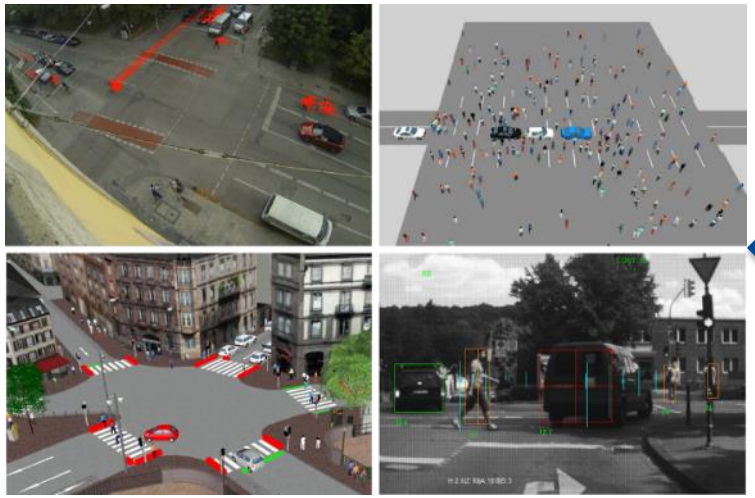
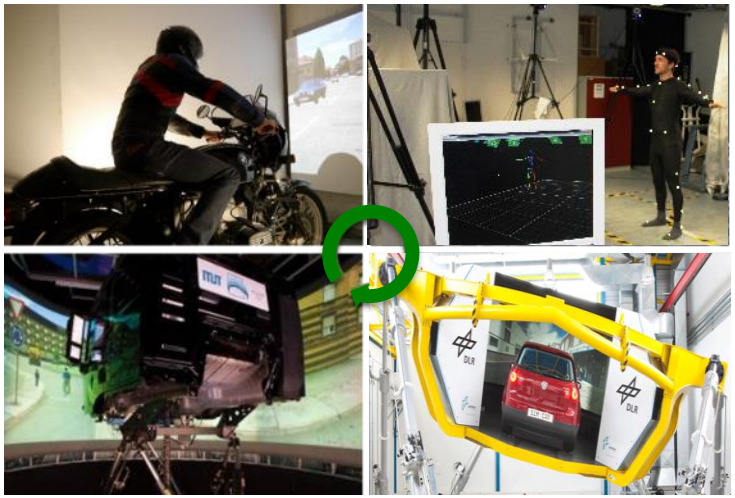


Abbildung einer vernetzten Fahrsimulation

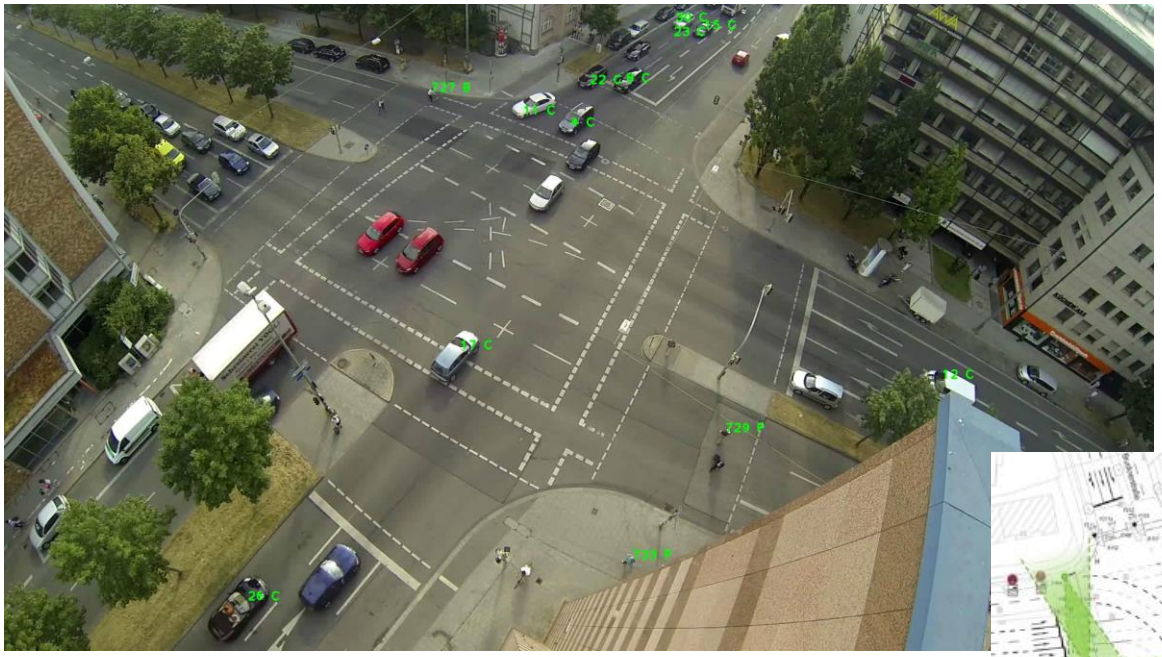
Simulatoren

Reale und virtuelle urbane Welten vernetzen und verstehen





Erhebung von Trajektorien an Knotenpunkten



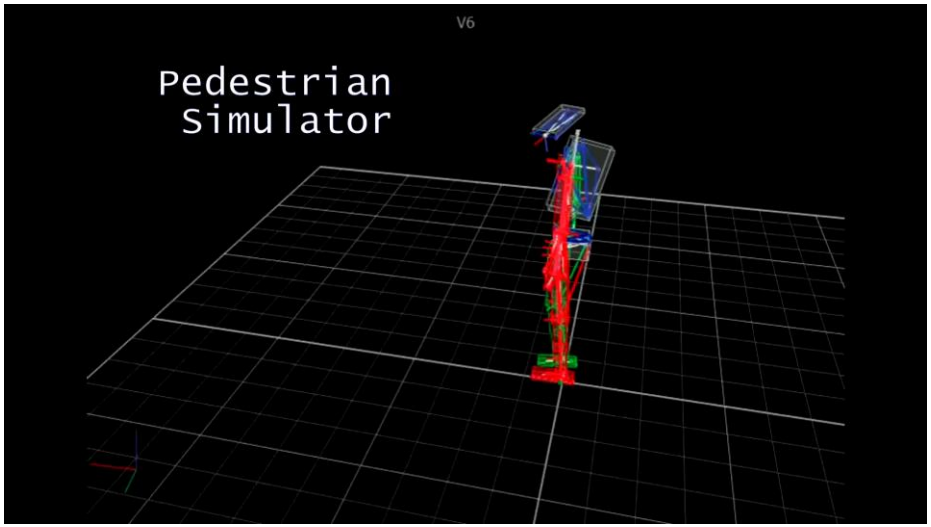
Datenerhebung an vier Knotenpunkten in München

Datenerhebung am AIM Forschungsknotenpunkt (DLR)

Erhebung von Interaktionsvorgängen

Datenerhebung auf der Teststrecke in Aachen

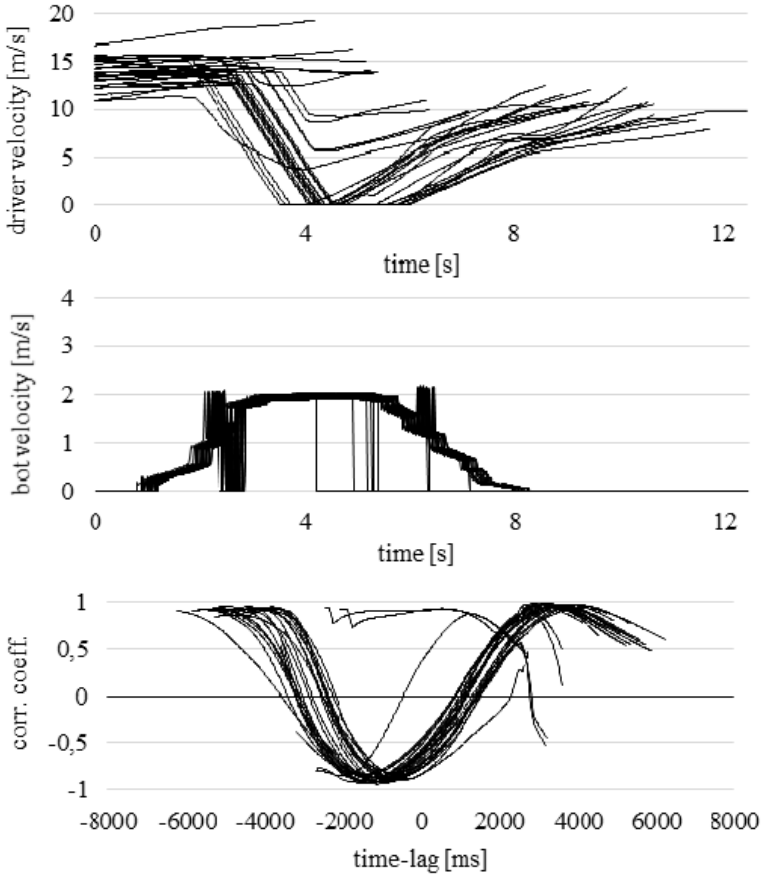
Testfeld Aachen



Fußgängersimulator TU München

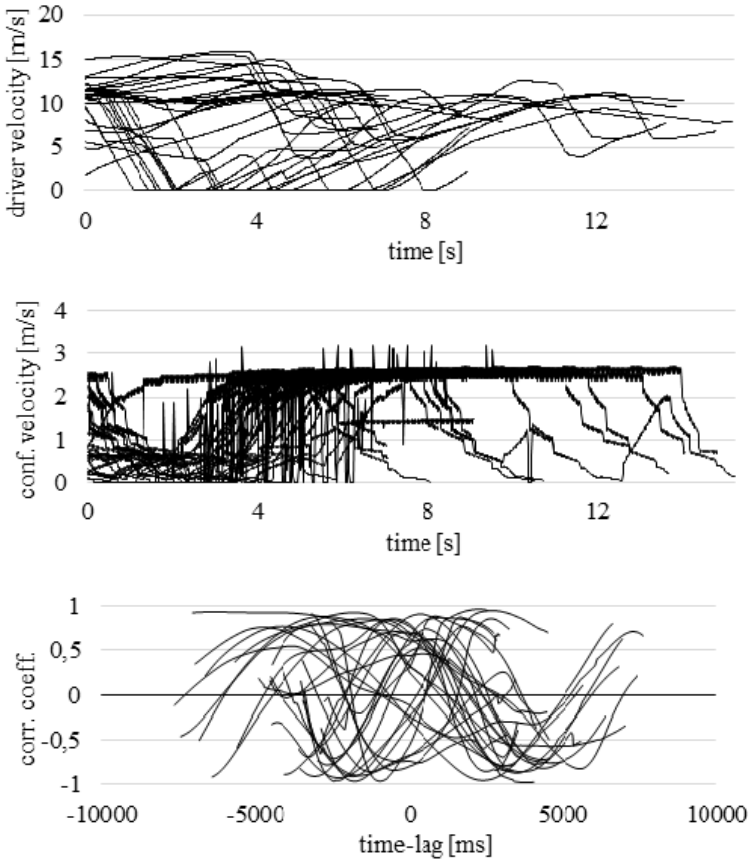
Results – Free Lane

Programmed pedestrian vs. car



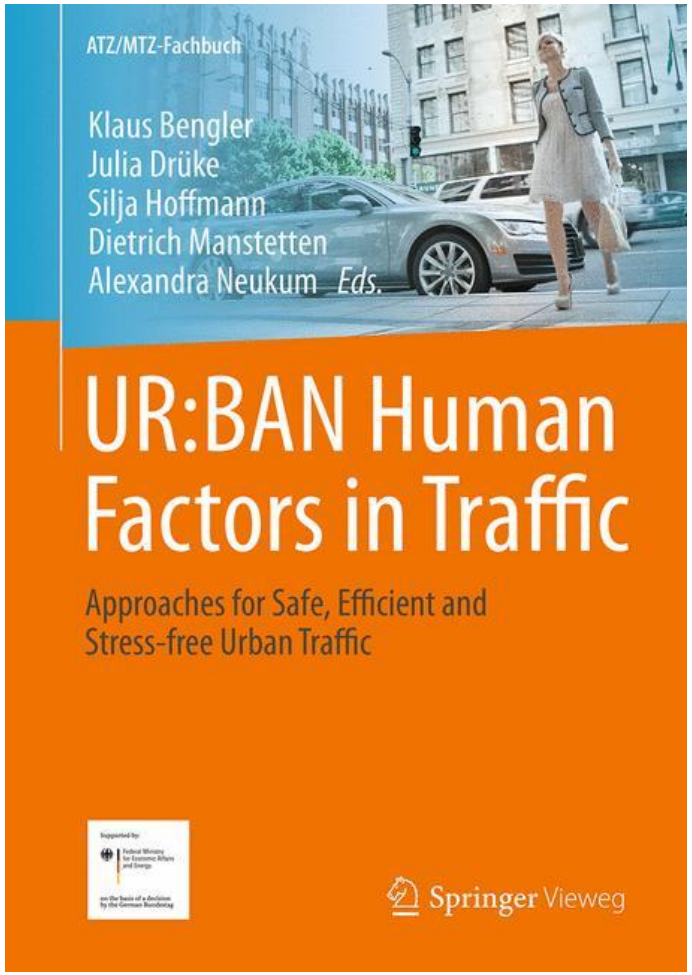
$R_{XY}(\tau)$

Human pedestrian vs. car



(Lehsing, Kracke, Bengler 2015)

COPYRIGHT RECHTE DER INHALTE VERGEBEN DEM LEHRSTUHL FÜR ERGONOMIE TU MÜNCHEN

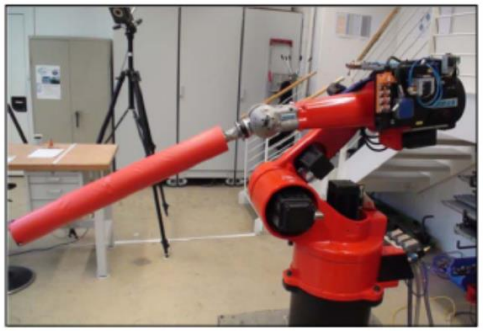
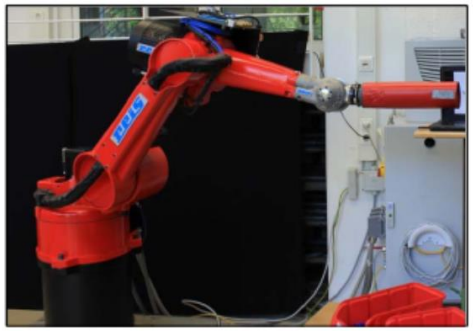


COPYRIGHT RECHTE DER INHALTE VERBLEIBEN BEIM LEHRSTUHL FÜR ERGONOMIE TU MÜNCHEN

http://paleofuture.gizmodo.com/why-is-angela-merkel-always-palling-around-with-robots-1691672950

Untersuchungen im Realsystem

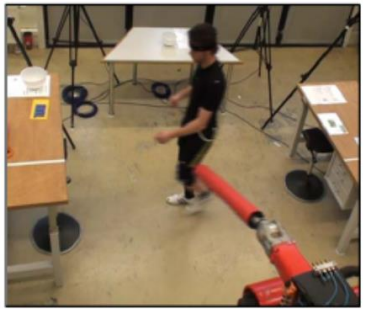
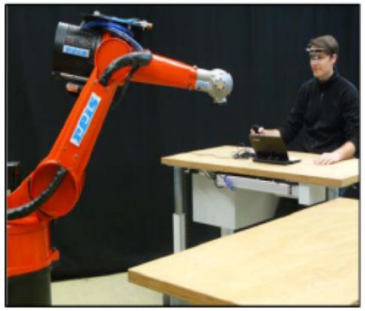
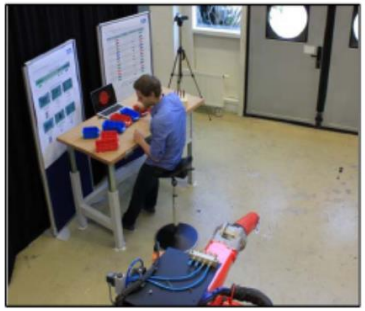
- **Verwendung eines 6-achsigen Vertikal-Knickarmroboters: RV20-16 (Reis)**

Verlängerung des TCP mit einer Schaumstoffattrappe zur Gewährleistung der Sicherheit der Versuchspersonen

Sauggreifer ermöglicht direkte Interaktion mit dem TCP

- **Unterschiedliche Versuchs-/Laborumgebungen (je nach Untersuchung)**

IFA
Institut für Arbeitsschutz der
Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung

Ergonomische Kernfragen in EsIMiP

Analyse des menschlichen Bewegungsverhaltens

- Auf welchen Bahnen bewegt sich der Menschen um einen aktiven Roboter?
- Wie groß sind minimale, mittlere oder maximale Abstände zwischen Menschen und Robotern?
- Welche Geschwindigkeiten und Beschleunigungen sind typischerweise vorzufinden?

Gewährleistung der Akzeptanz unter den späteren Nutzern

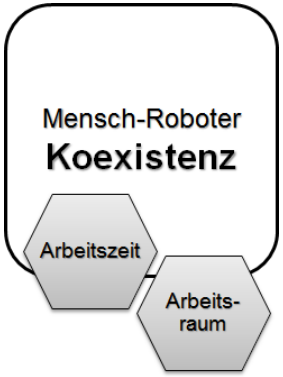
- Wie müssen Industrieroboter programmiert werden, damit sich der Mensch in der Kooperation wohl fühlt und die Arbeitsform akzeptiert?
- Wie wichtig ist die Vorhersehbarkeit des Verhaltens (der Bewegungs-bahnen) des Roboters?

Ziele:
- Reduktion der Beeinträchtigung des Menschen
- Gewährleistung einer *sicheren* und *effizienten* Zusammenarbeit

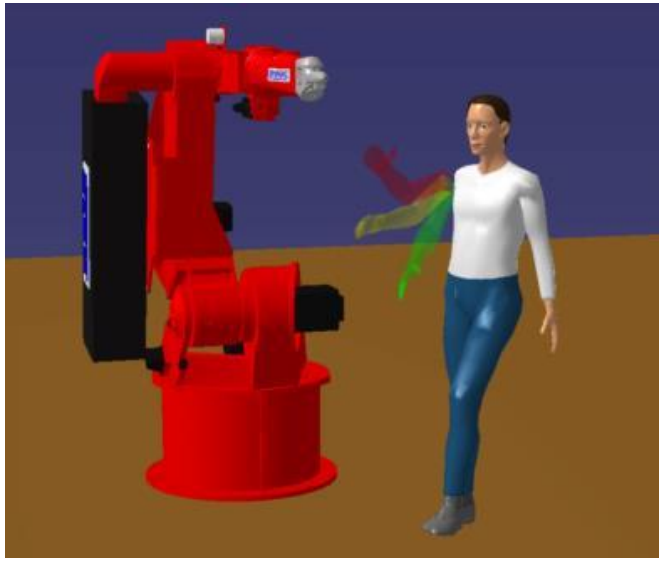
IFA Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung

COPYRIGHT RECHTE DER INHALTE VERBLEIBEN BEIM LEHRSTUHL FÜR ERGONOMIE TU MÜNCHEN

Aspekte der Mensch-Roboter-Koexistenz



Effiziente und sichere Interaktion von Menschen und intelligenten Produktionsanlagen



EsIMiP

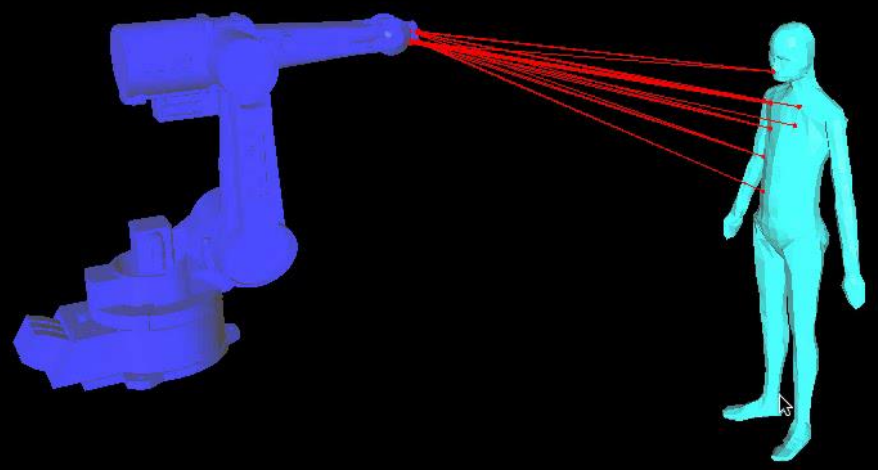
Bayerische Forschungsstiftung

Gefördert durch die Bayerische Forschungsstiftung
http://www.forschungsstiftung.de/index.php/Drucken/Projekt/152.html

COPYRIGHT RECHTE DER INHALTE VERBLEIBEN BEIM LEHRSTUHL FÜR ERGONOMIE TU MÜNCHEN

Ableiten von Maßnahmen

Abstandsberechnung zwischen Mensch und Roboter



Einleiten einer der Situation angemessenen Reaktion

- Frühzeitige Vermeidung von potenziellen Kollisionen
- Einhalten eines ergonomisch begründeten Mindestabstands zwischen Mensch und Roboter
- Planung der Robotergeschwindigkeit auf Basis des aktuellen Abstands

Zentrale Fragestellungen in der Mensch-Roboter-Koexistenz (Bortot, 2014)

Wie sollte ein MRK-System gestaltet sein, damit sich der Mensch zu jeder Zeit **wohlfühlt** und das kooperative System somit höchstmöglich **effizient** arbeitet?

THEMA 1

Bewegungsverhalten des Menschen in MRK-Systemen

THEMA 2

Einflussfaktoren auf das menschliche Wohlbefinden und dessen Leistung

THEMA 3

Vorhersagbarkeit des Roboterverhaltens in MRK-Systemen

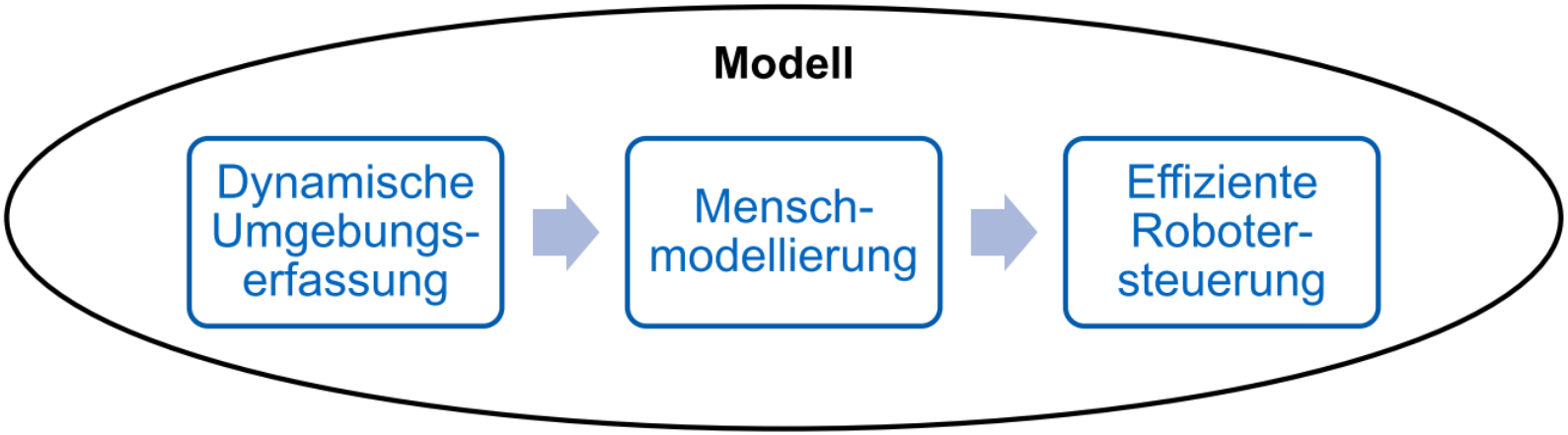
COPYRIGHT RECHTE DER INHALTE VERBLEIBEN BEIM LEHRSTUHL FÜR ERGONOMIE TU MÜNCHEN

Bewegungsverhalten in der Mensch-Roboter-Koexistenz

Empirische Studie – Analyse des Bewegungsverhaltens bei M-R Begegnungen

Forschungsfragen

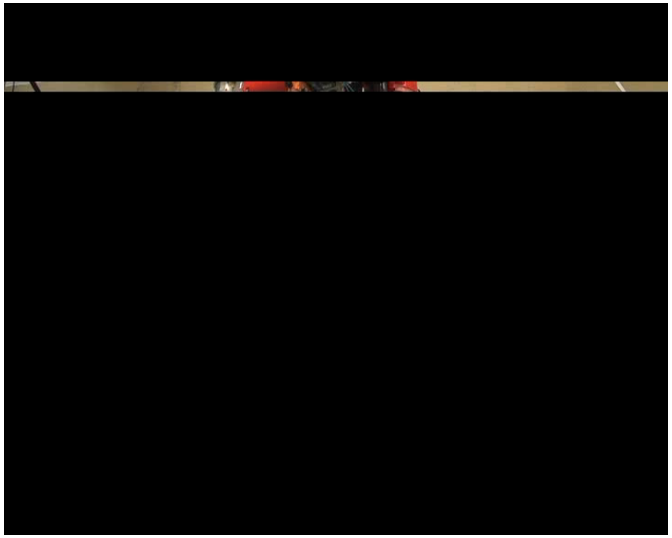
1. Auf welchen Bahnen bewegt sich ein Mensch um einen aktiven Industrieroboter?
2. Wie groß sind Abstände und TTCs bei Begegnungen zwischen Mensch und Roboter?
3. Welche Rolle spielt dabei die Vorhersagbarkeit der Roboterbewegungen?



COPYRIGHT RECHTE DER INHALTE VERBLEIBEN BEIM LEHRSTUHL FÜR ERGONOMIE TU MÜNCHEN

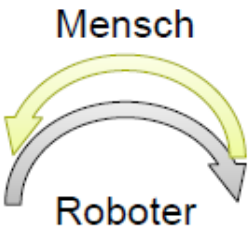
Versuchsdesign

- An die Montage angelehnte Aufgaben
- Wechsel der Arbeitsposition nach Erledigung der Aufgaben
- Schutz der Probanden durch Schaumstoffattrappe

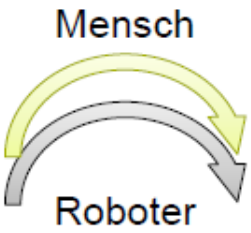


→ Bewusst provozierte Begegnungen mit dem Roboter beim Durchschreiten des Arbeitsbereiches von einer Werkbank zur anderen

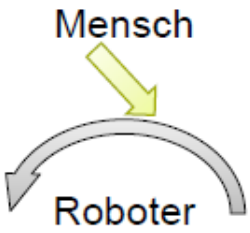
frontal



lateral



schräg frontal



G1 – Konstantes Roboterverhalten

Roboter-verhalten erlernbar

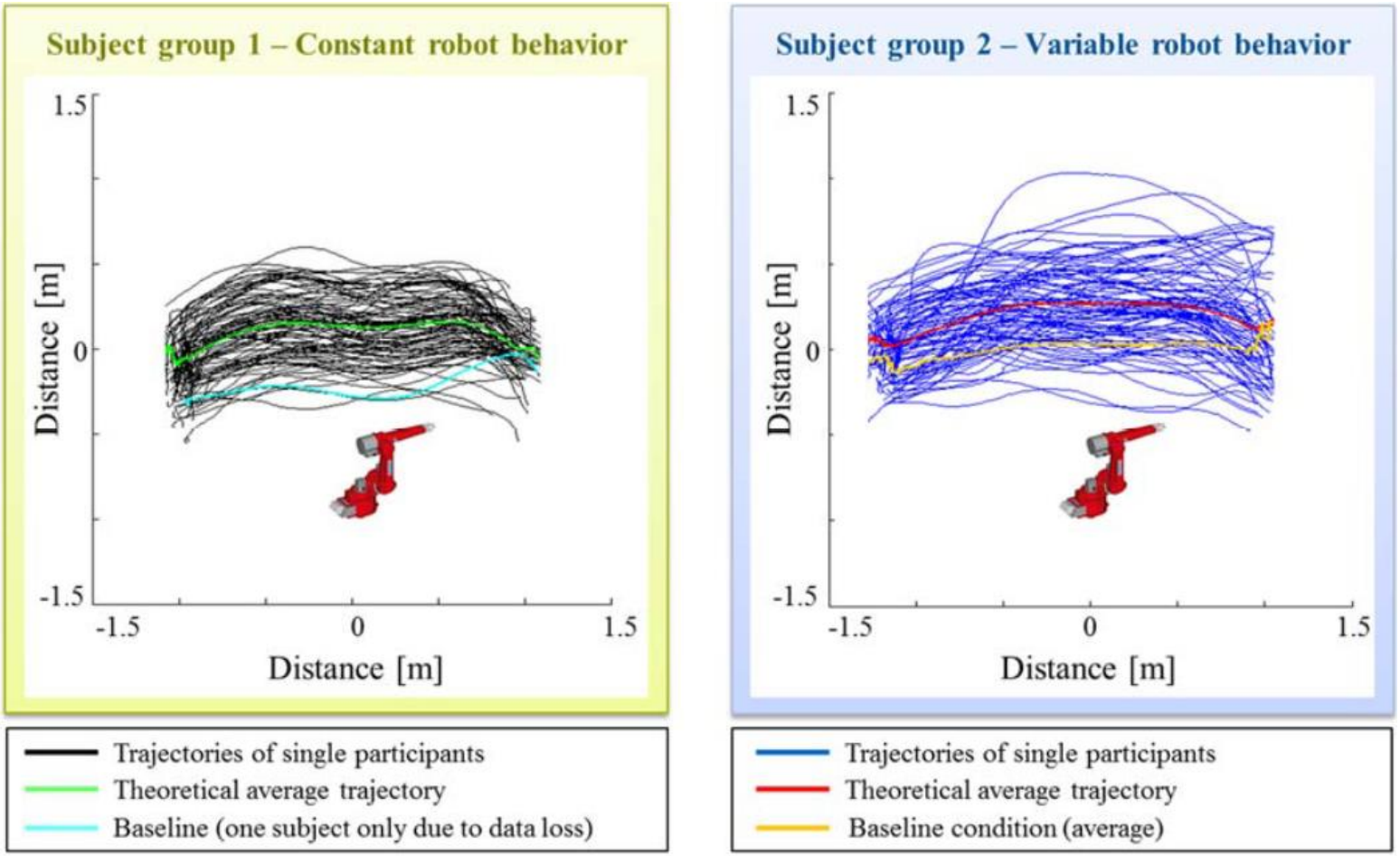
G2 – Variables Roboterverhalten

Roboter-verhalten nicht prädizierbar

COPYRIGHT RECHTE DER INHALTE VERBLEIBEN BEIM LEHRSTUHL FUR ERGONOMIE TU MUNCHEN

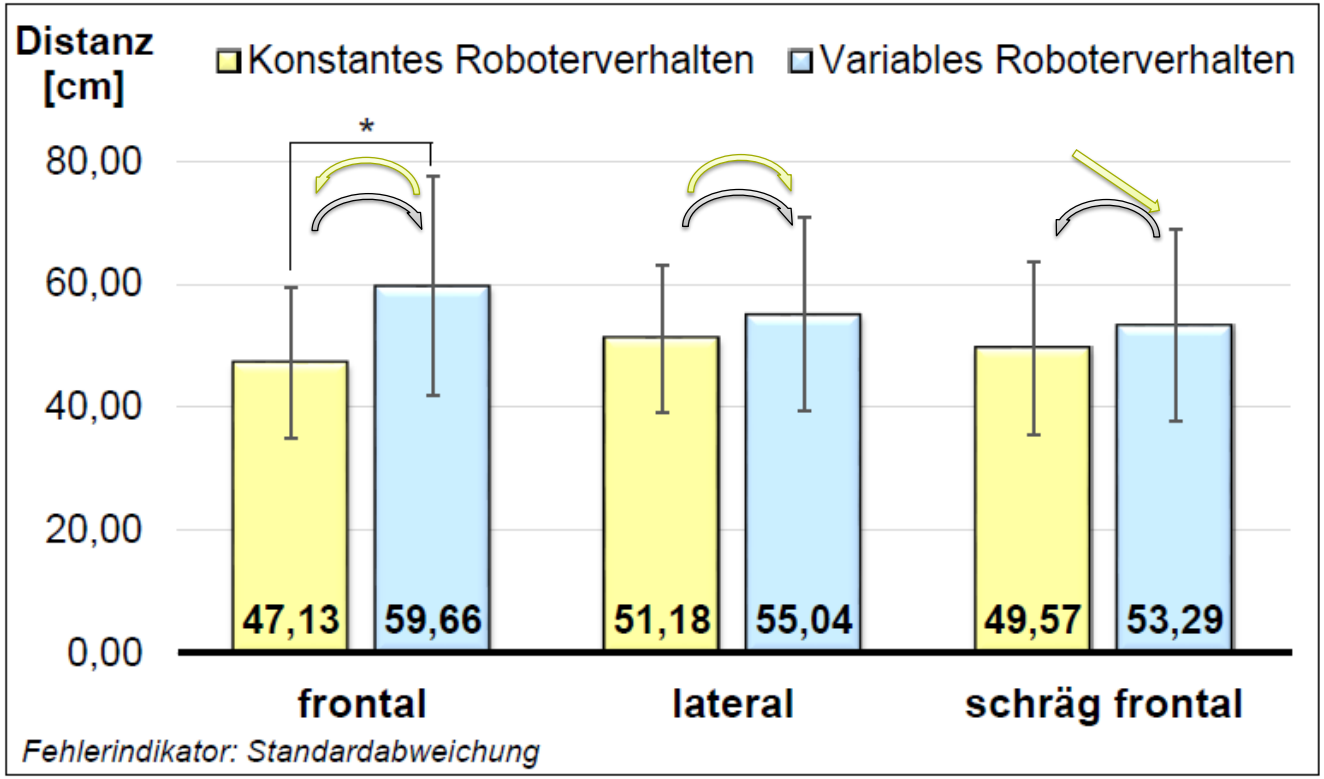
Versuchsergebnisse

Trajektorien des Menschen in einer frontalen Begegnung



Versuchsergebnisse

Minimale Abstände Mensch-TCP [cm] - während ihrer Begegnungen



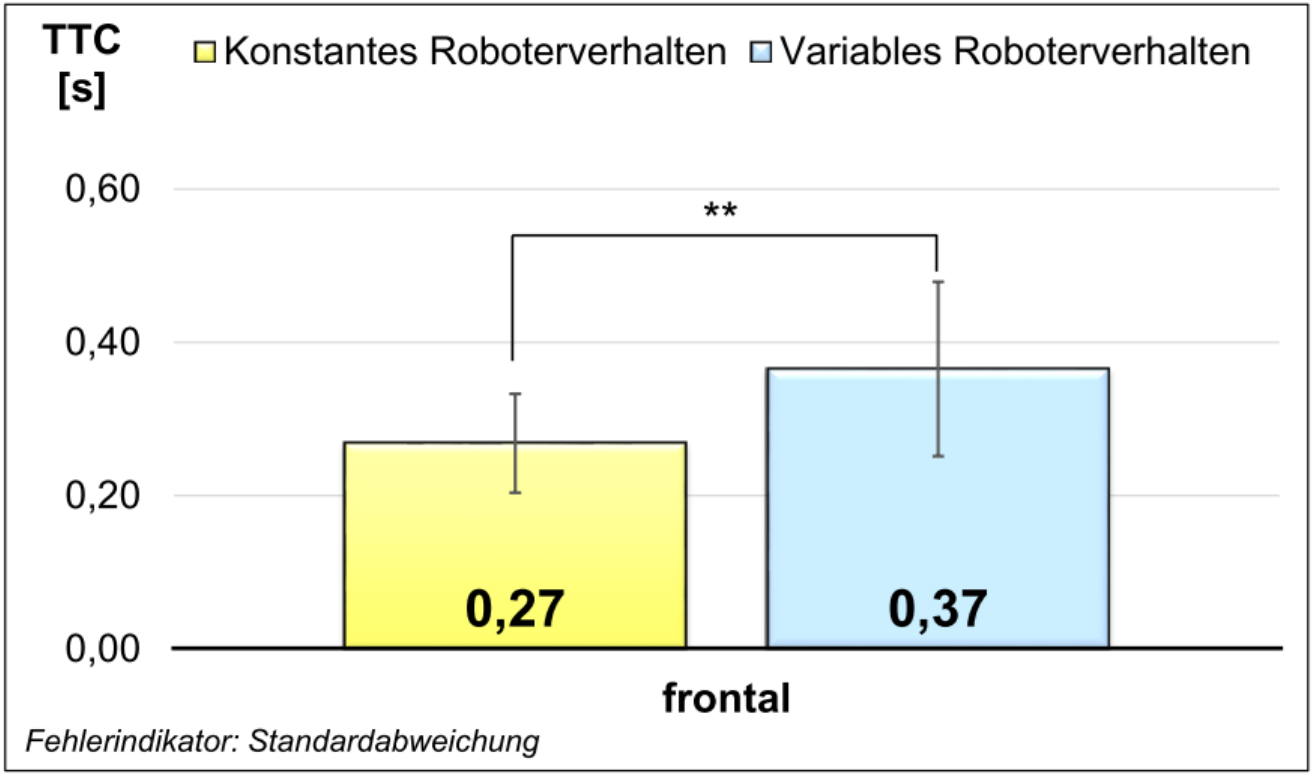
Statistik:
T-Test
(unabhängige
Stichproben)

*T(28) = -2,241;
$p < 0,05$;
$r = 0,39$

COPYRIGHT RECHTE DER INHALTE VERBLEIBEN BEIM LEHRSTUHL FÜR ERGONOMIE TU MÜNCHEN

Versuchsergebnisse

Time-to-collision (TTC) [s] – während der frontalen Begegnung



Statistik:
T-Test (unabhängige Stichproben)

**T(28) = 2,866;
$p < 0{,}01$;
$r = 0{,}48$

COPYRIGHT RECHTE DER INHALTE VERBLEIBEN BEIM LEHRSTUHL FÜR ERGONOMIE TU MÜNCHEN

Take home messages…

Wie sollte ein MRK-System gestaltet sein, damit sich der Mensch zu jeder Zeit **wohlfühlt** und das kooperative System somit höchstmöglich **effizient** arbeitet?

BEWEGUNGSVERHALTEN

1. Hohe Variabilität im menschlichen Bewegungsverhalten
   → Berücksichtigung **individueller Eigenschaften/Verhaltensweisen**
2. Ausreichend Platz für **mittlere Abstände > 0,5m** und **TTCs > 0,37s**

EINFLUSSFAKTOREN

Bortot, 2014

VORHERSAGBARKEIT

1. **Prädizierbarkeit** des Roboters **erhöht** das **Vertrauen** der Menschen bei Einführung der Systeme
2. **Verringerung** der Sicherheitsgrößen **Abstand** und **TTC** bei **konstantem Roboterverhalten** (signifikanter Unterschied im Abstand und TTC bei frontaler Begegnung)

COPYRIGHT RECHTE DER INHALTE VERBLEIBEN BEIM LEHRSTUHL FÜR ERGONOMIE TU MÜNCHEN

Roboterlandkarte

Spezifische Funktion

Rasenmäherroboter

Bodenreinigungsroboter

Lieferroboter

Lagerroboter

Autonome Busse

Autonome Züge

KFZ

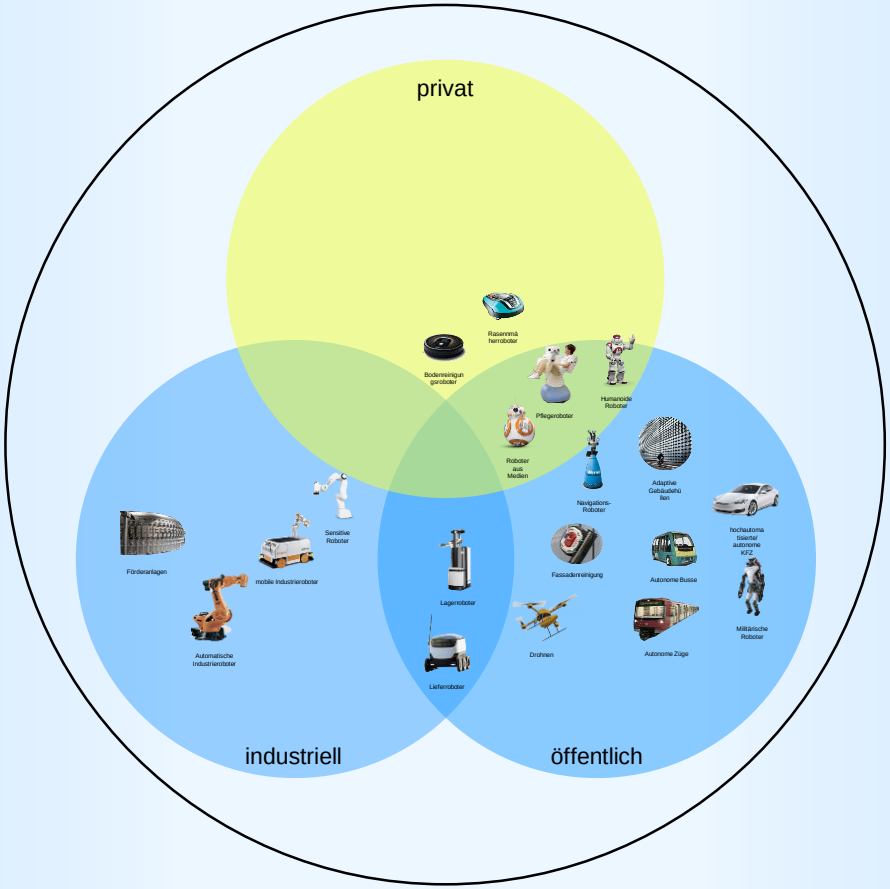
Adaptive Gebäudehüllen

Fassadenreinigung

Förderanlagen

Roboter zur Navigation

Bewegte Automatisierte & Autonome Systeme in Koexistenz und Kooperation



Multiple Anwendung

Humanoide

Pflegeroboter

Sensitive Roboter

Roboter aus Medien

Drohnen

Mobile Industrierobotor

Automatische Industrierobotor

Militärische Roboter

COPYRIGHT RECHTE DER INHALTE VERBLEIBEN BEIM LEHRSTUHL FÜR ERGONOMIE TU MÜNCHEN

Aktuell: Robotische Systeme - Grundfertigkeiten unterstützen

Führen

Quelle: Exertion Games Lab

Bringen

Quelle: Fraunhofer IPA

Heben

Quelle: DGUV (2014)

Umsetzung am Lehrstuhl für Ergonomie

Reinhardt et al. (2016)

Reinhardt (2017)

Lehrstuhl für Ergonomie, TUM, 2017

COPYRIGHT RECHTE DER INHALTE VERBLEIBEN BEIM LEHRSTUHL FÜR ERGONOMIE TU MÜNCHEN

Innovationstreiber für Mensch-Roboter-Interaktion

Industrie

Mass production
(Lay & Schirrmeister, 2001)

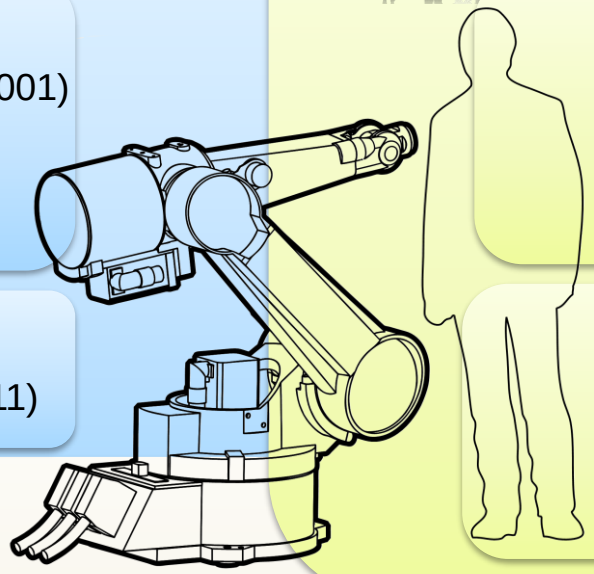
Mass customization
(Fogliatto, da Silveira & Borenstein, 2012)

Kosteneinsparung
(Bartscher, 2011)

Gesellschaft

Physisch hoch belastende Arbeitsplätze
(Frieling, 2006)

Grenzen klassisch ergonomischer Lösungsansätze
(Bartscher, 2011)

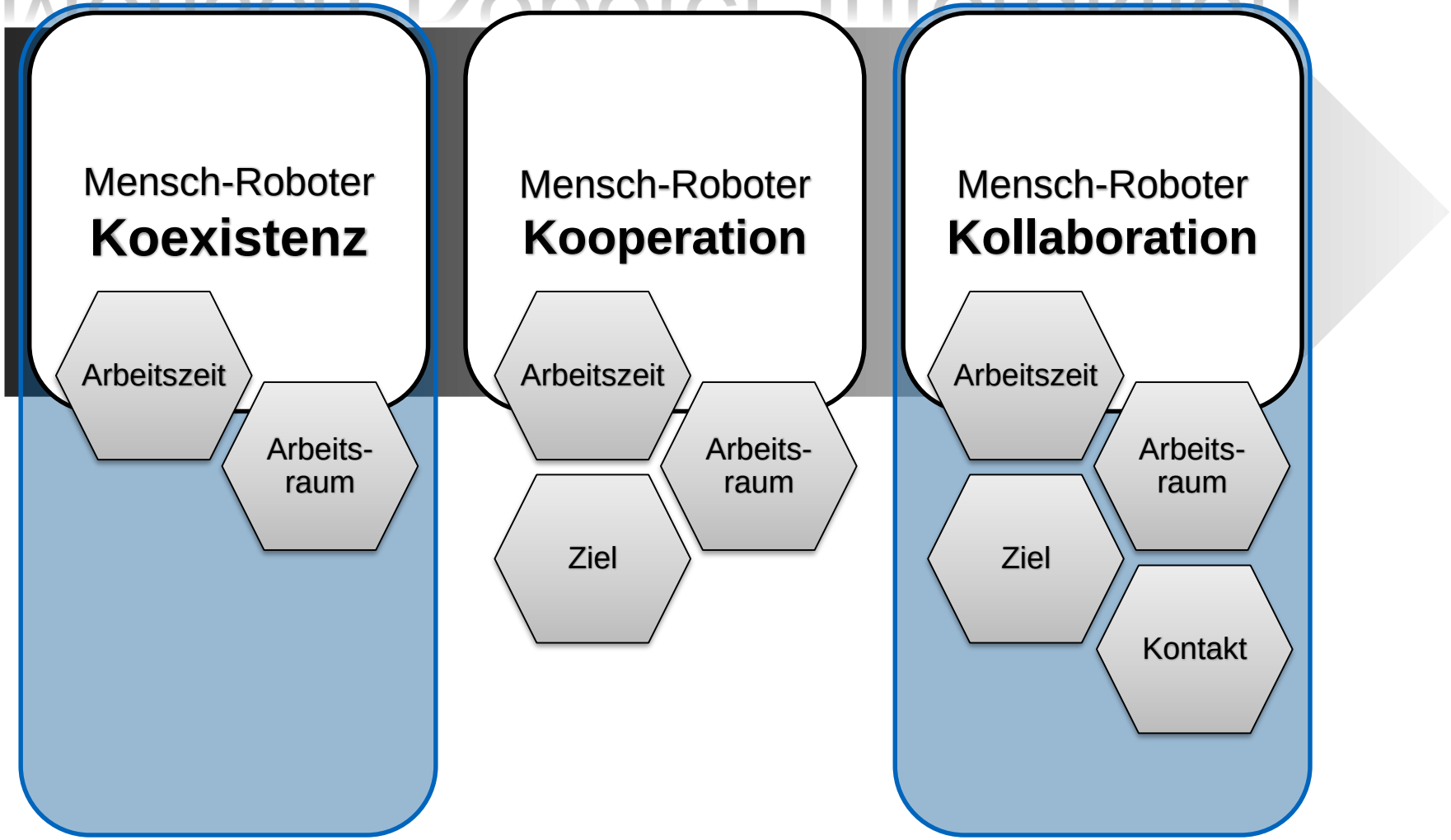


Kollaborative Systeme erstmals einsetzbar
(DIN EN ISO 10218, ISO/TS 15066)

Gesetze & Normen

COPYRIGHT RECHTE DER INHALTE VERBLEIBEN BEIM LEHRSTUHL FÜR ERGONOMIE TU MÜNCHEN

Mensch-Roboter-Interaktion

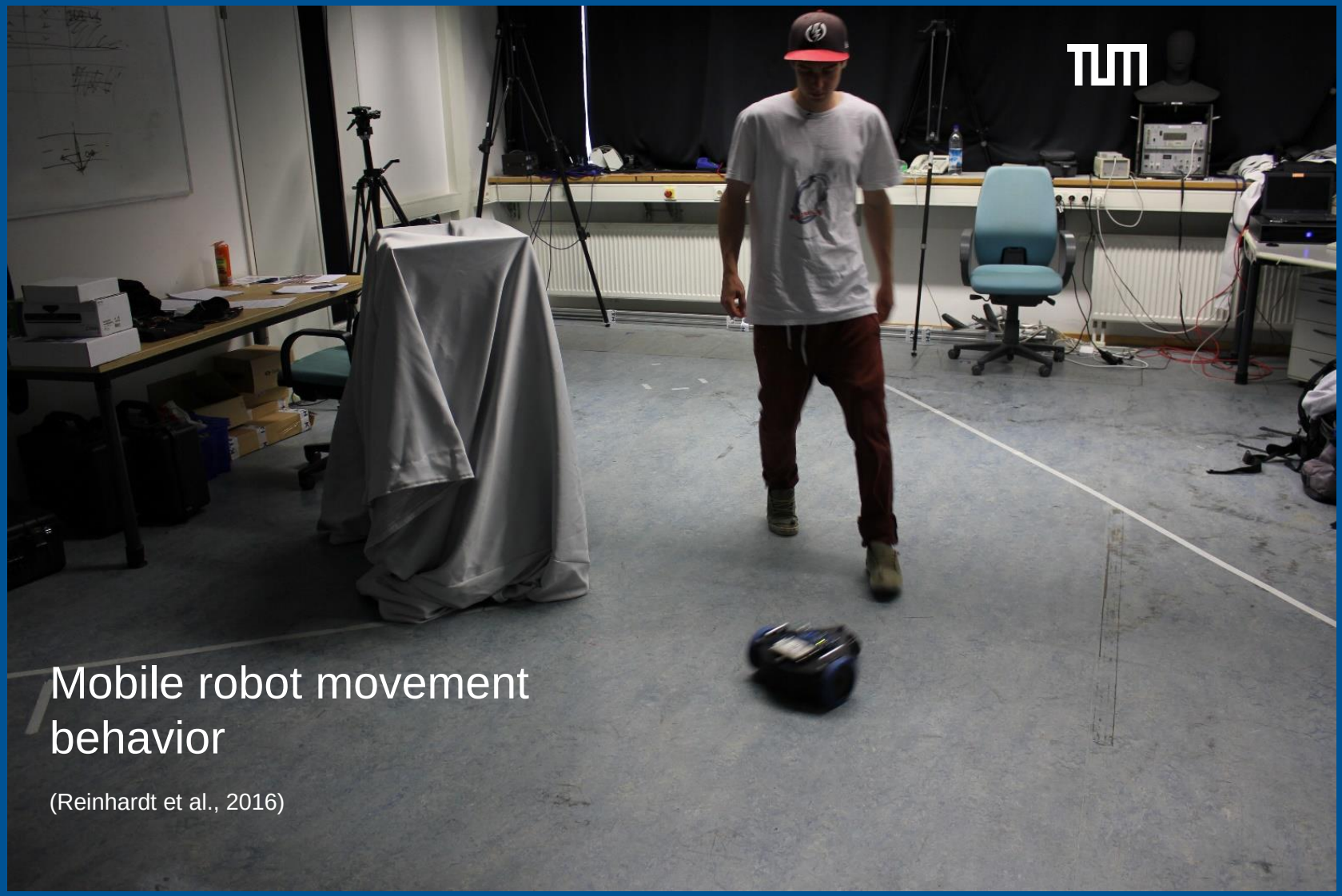


COPYRIGHT RECHTE DER INHALTE VERBLEIBEN BEIM LEHRSTUHL FÜR ERGONOMIE TU MÜNCHEN

(Schmidtler, 2015)

https://mediapool.bmwgroup.com/cache/P9/201603/P90212123/P90212123-self-driving-robot-in-supply-logistics-at-bmw-group-03-2016-

COPYRIGHT RECHTE DER INHALTE VERBLEIBEN BEIM LEHRSTUHL FÜR ERGONOMIE TU MÜNCHEN



Mobile robot movement behavior

(Reinhardt et al., 2016)

Folgeszenario
der Mensch-Roboter-Interaktion
in der mobilen **Service-Robotik**

(International Federation of Robotics, 2012)

Beschleunigung?

Kurventrajektorie?

Feedbackfunktion?

Abstandsverhalten

Subjektives Empfinden

COPYRIGHT: RECHTE DER INHALTE VERBLEIBEN BEIM LEHRSTUHL FÜR ERGONOMIE TU MÜNCHEN

Menschliches Gehverhalten

Beschleunigung

→Unter Annahme eines linearen Geschwindigkeitsverlauf:

$M = 1{,}02\ m/s^2$ (Brogan & Johnson, 2003)

Schrittgeschwindigkeit

→Geradeaus:

$M = 1{,}36\ m/s$ – $M = 1{,}43\ m/s$ (Brogan & Johnson, 2003)

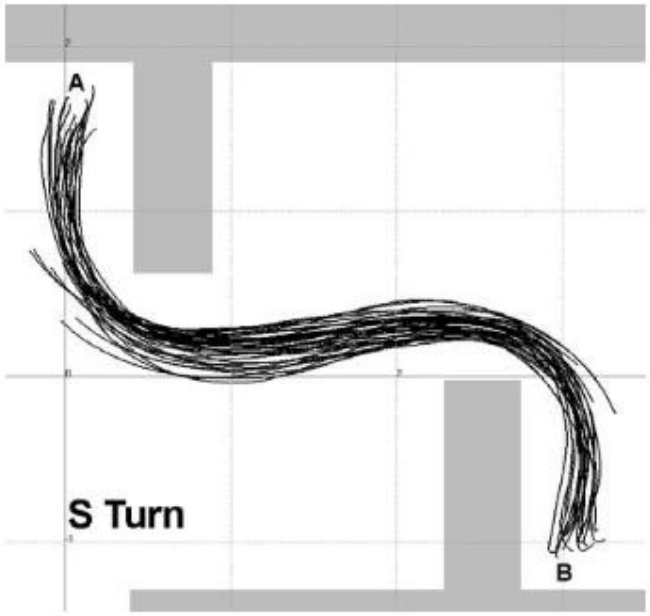
→In Kurvensituationen:

$M = 1{,}27\ m/s$ (Fino et al., 2015)

COPYRIGHT RECHTE DER INHALTE VERBLEIBEN BEIM LEHRSTUHL FÜR ERGONOMIE TU MÜNCHEN

Menschliches Gehverhalten

Kurventrajektorien
→Kurven werden „geschnitten“ (Brogan & Johnson, 2003)



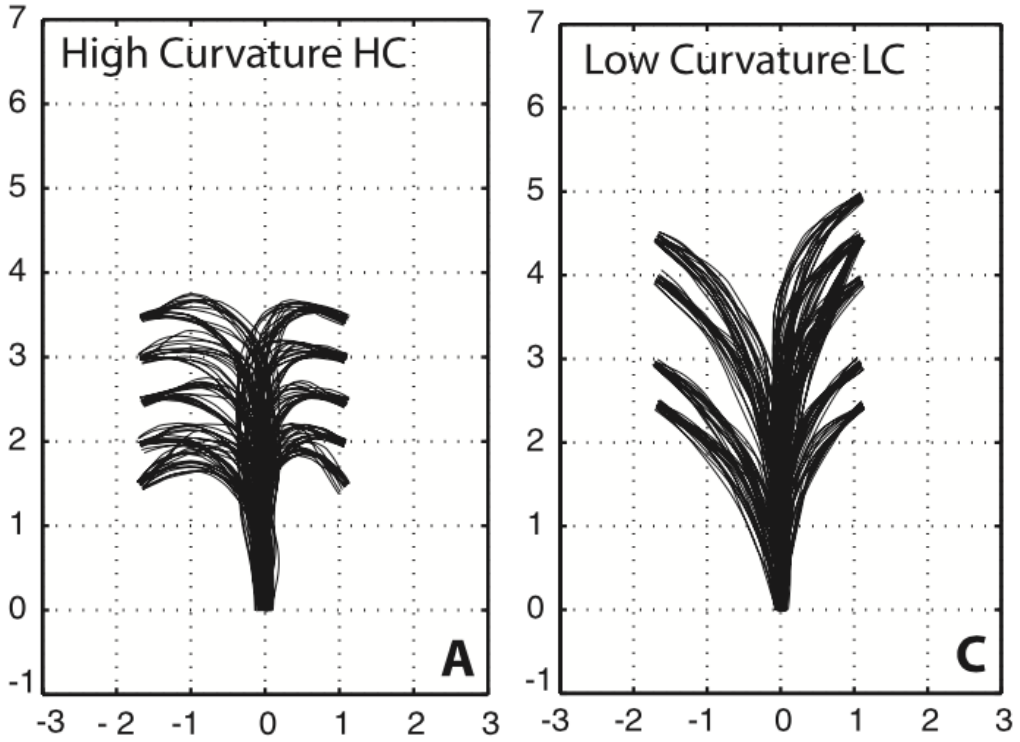
Brogan und Johnson (2003)

COPYRIGHT RECHTE DER INHALTE VERBLEIBEN BEIM LEHRSTUHL FÜR ERGONOMIE TU MÜNCHEN

Menschliches Gehverhalten

Kurventrajektorien

→Varianz um mittlere Trajektorie nimmt mit der Krümmung zu (Hicheur et al., 2007)



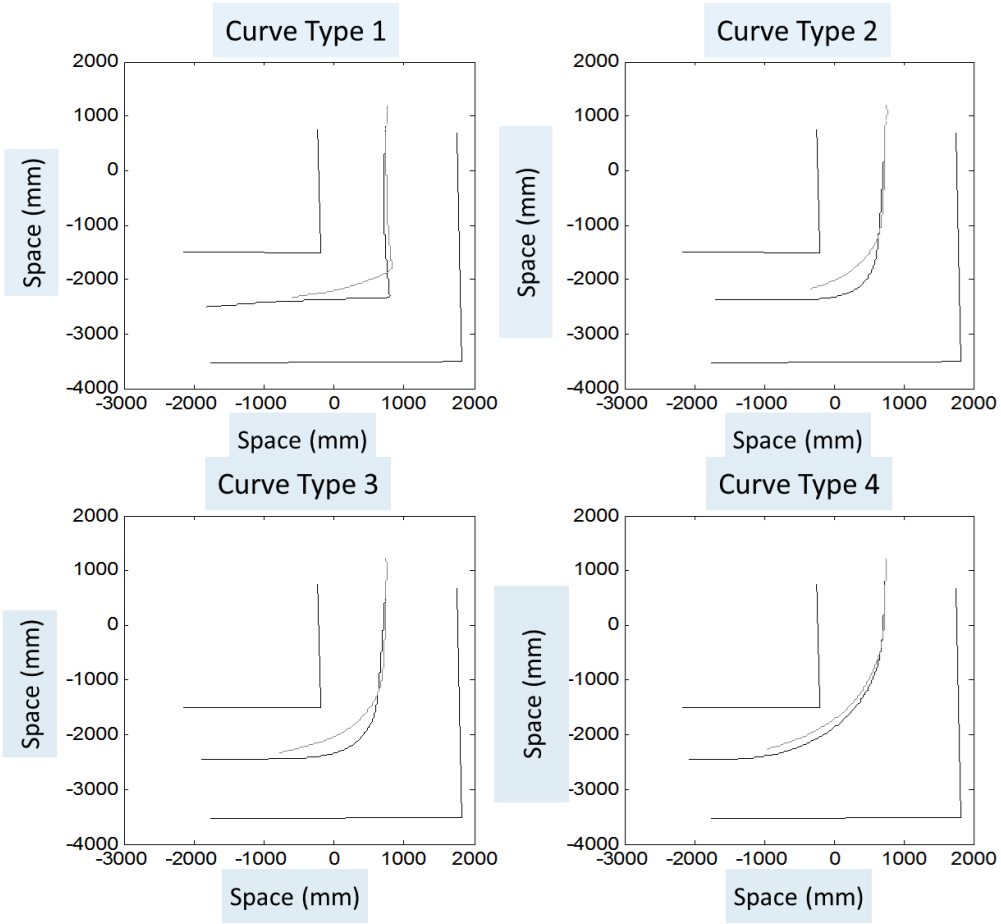
Hicheur et al. (2007)

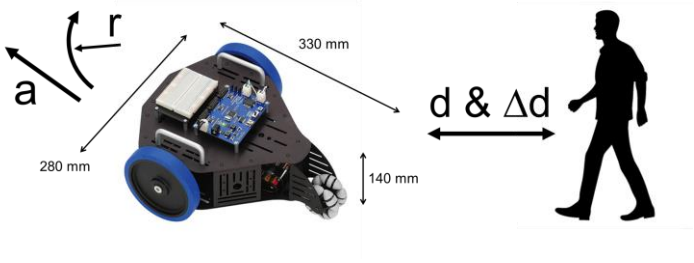
COPYRIGHT RECHTE DER INHALTE VERBLEIBEN BEIM LEHRSTUHL FÜR ERGONOMIE TU MÜNCHEN

Probandenprofil

40 VPs
20 weiblich/20 männlich
M = 24,3 Jahre (SD = 2,524)

COPYRIGHT RECHTE DER INHALTE VERBLEIBEN BEIM LEHRSTUHL FÜR ERGONOMIE TU MÜNCHEN

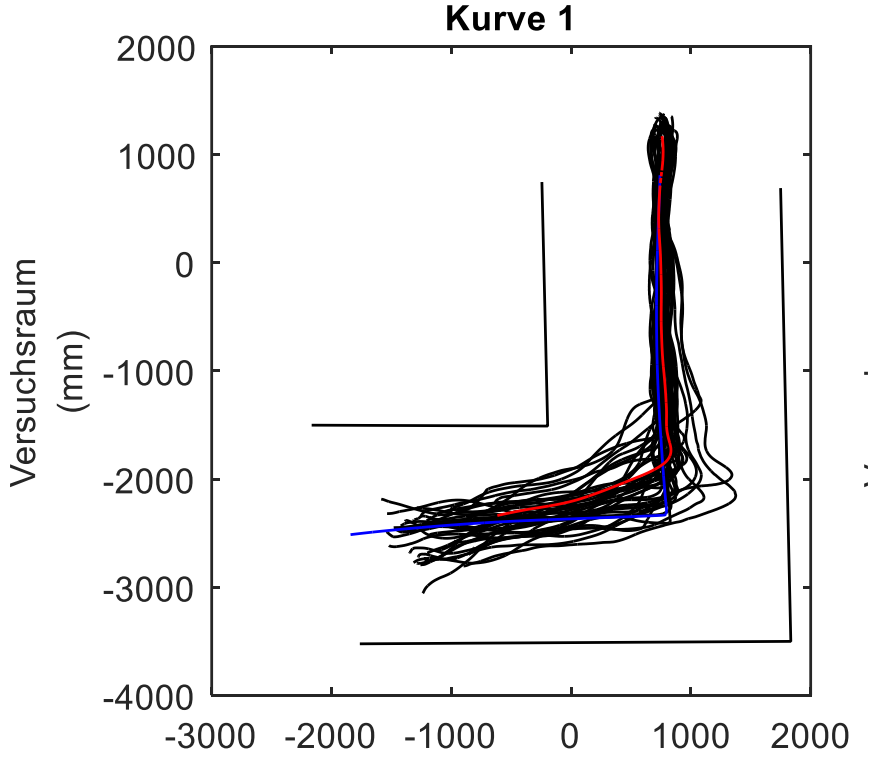


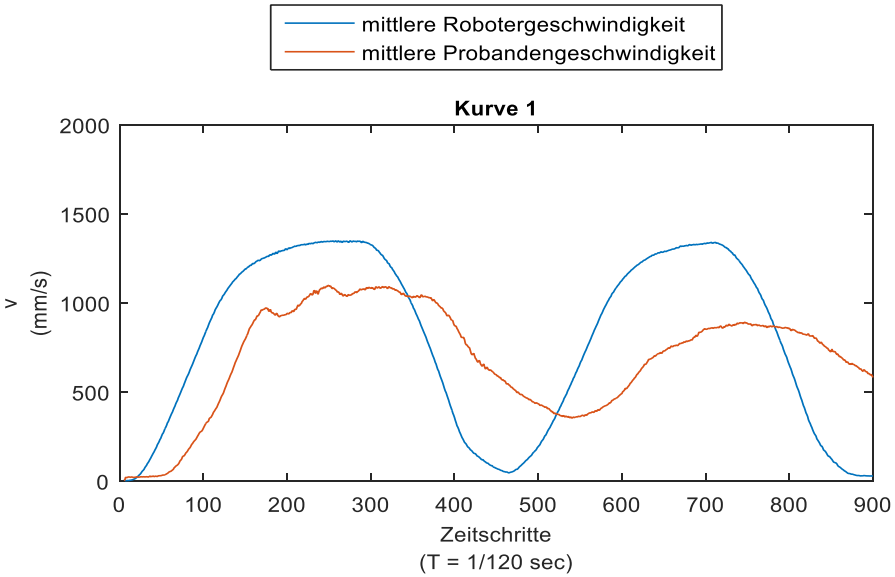


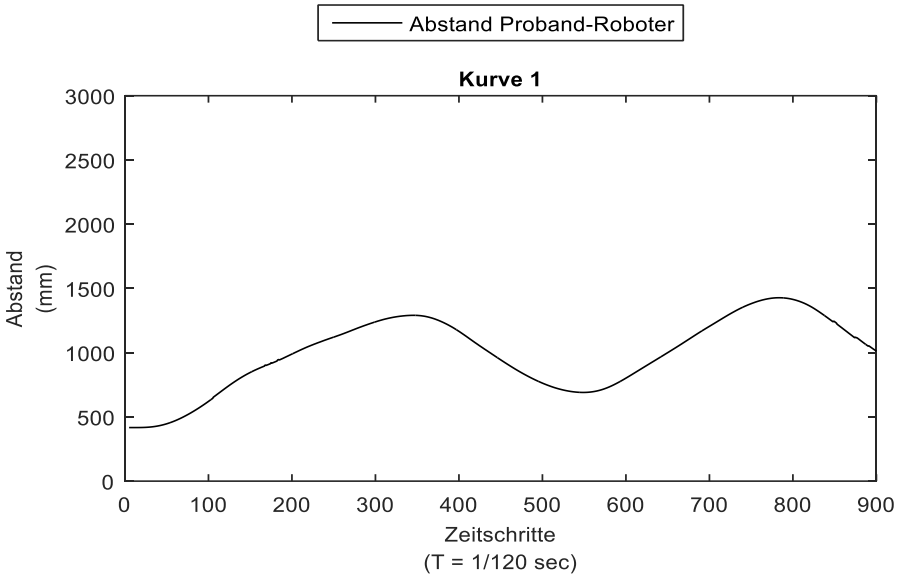
Reinhardt, J., Schmidtler, J., Körber, M., Bengler, K. (2016). Follow Me! How Robots Guide Humans. To appear in Workshop on Robotics in the 21st Century: Challenges and Promises. http://doi.org/10.13140/RG.2.2.29661.61924

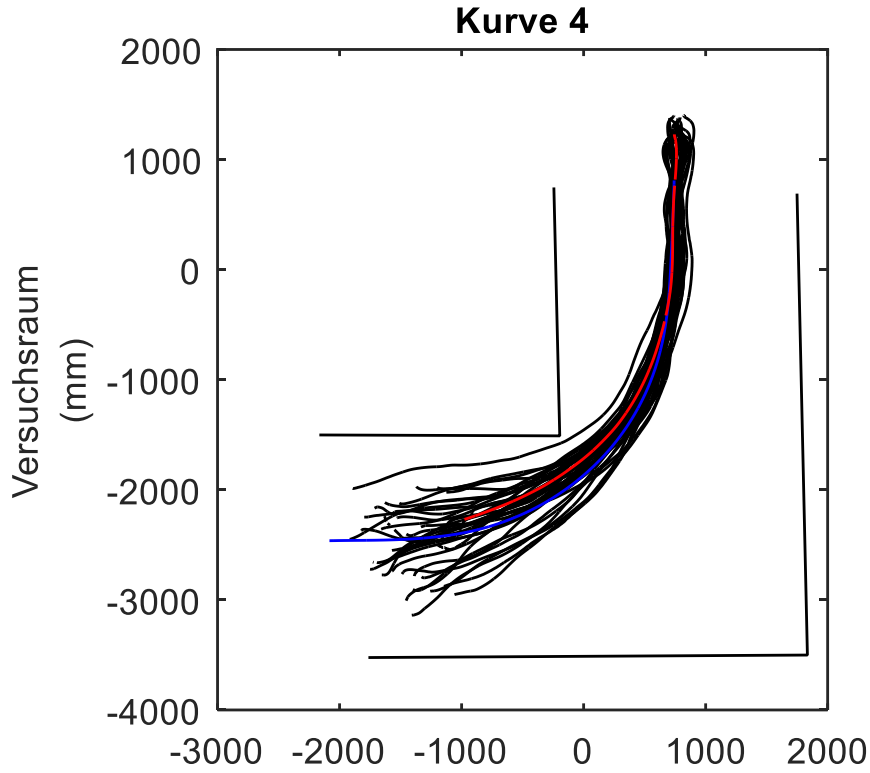
Reinhardt, J., Schmidtler, J., Körber, M., & Bengler, K. (2016). Follow Me! Wie Roboter Menschen führen sollen. Zeitschrift Für Arbeitswissenschaft, 70(4), 203–210. http://doi.org/10.1007/s41449-016-0039-2

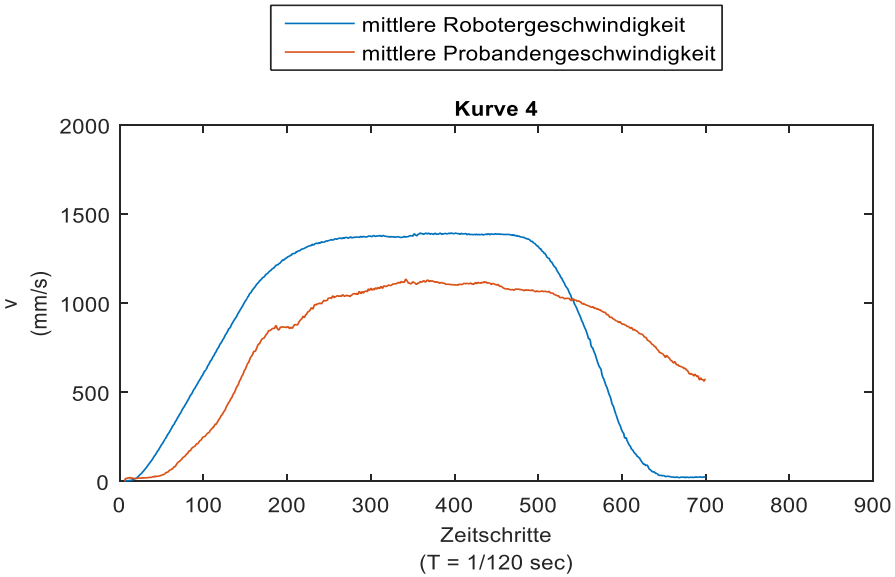
COPYRIGHT RECHTE DER INHALTE VERBLEIBEN BEIM LEHRSTUHL FÜR ERGONOMIE TU MÜNCHEN

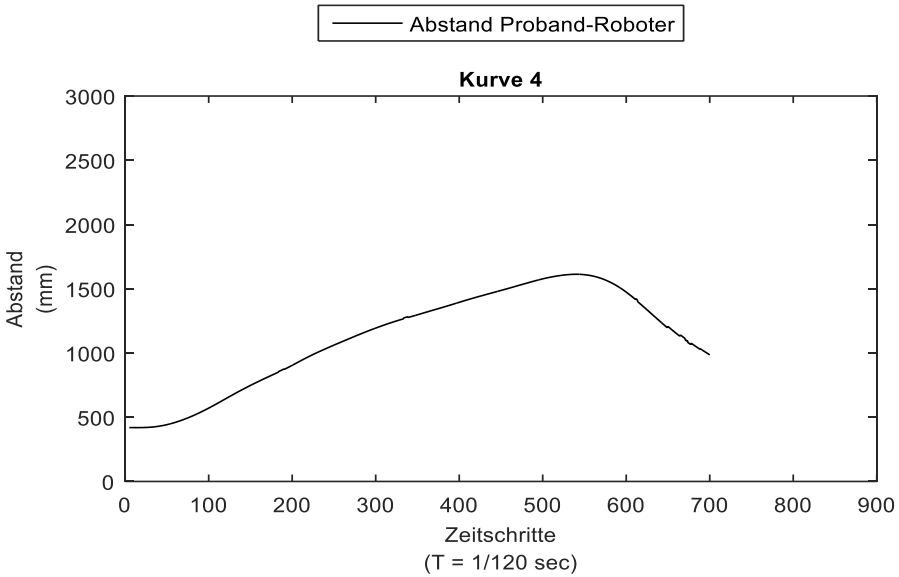

Kurve 1
Versuchsraum
(mm)
2000
1000
0
-1000
-2000
-3000
-4000
-3000
-2000
-1000
0
1000
2000

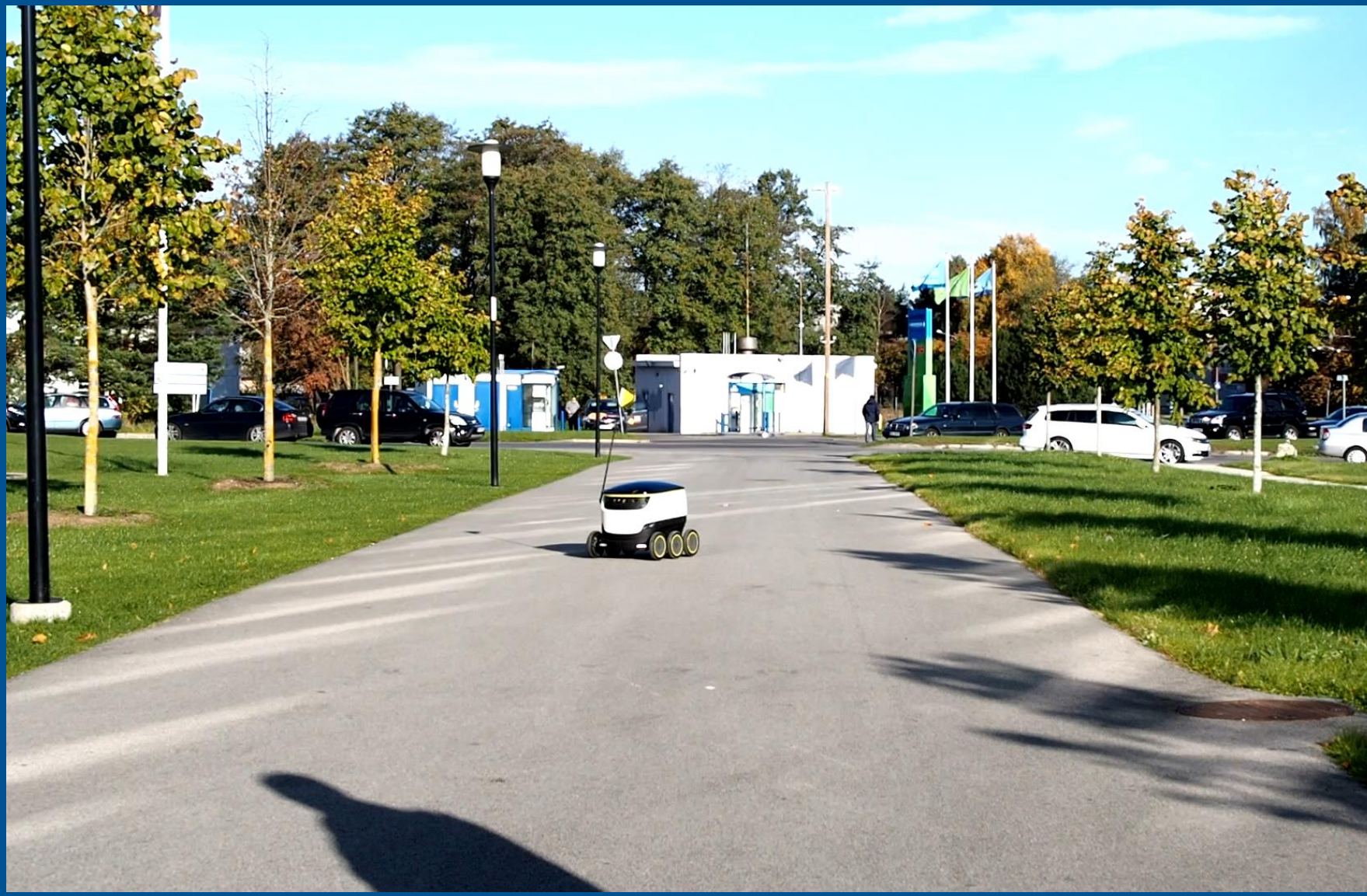

mittlere Robotergeschwindigkeit
mittlere Probandengeschwindigkeit
Kurve 1
v
(mm/s)
2000
1500
1000
500
0
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
Zeitschritte
(T = 1/120 sec)

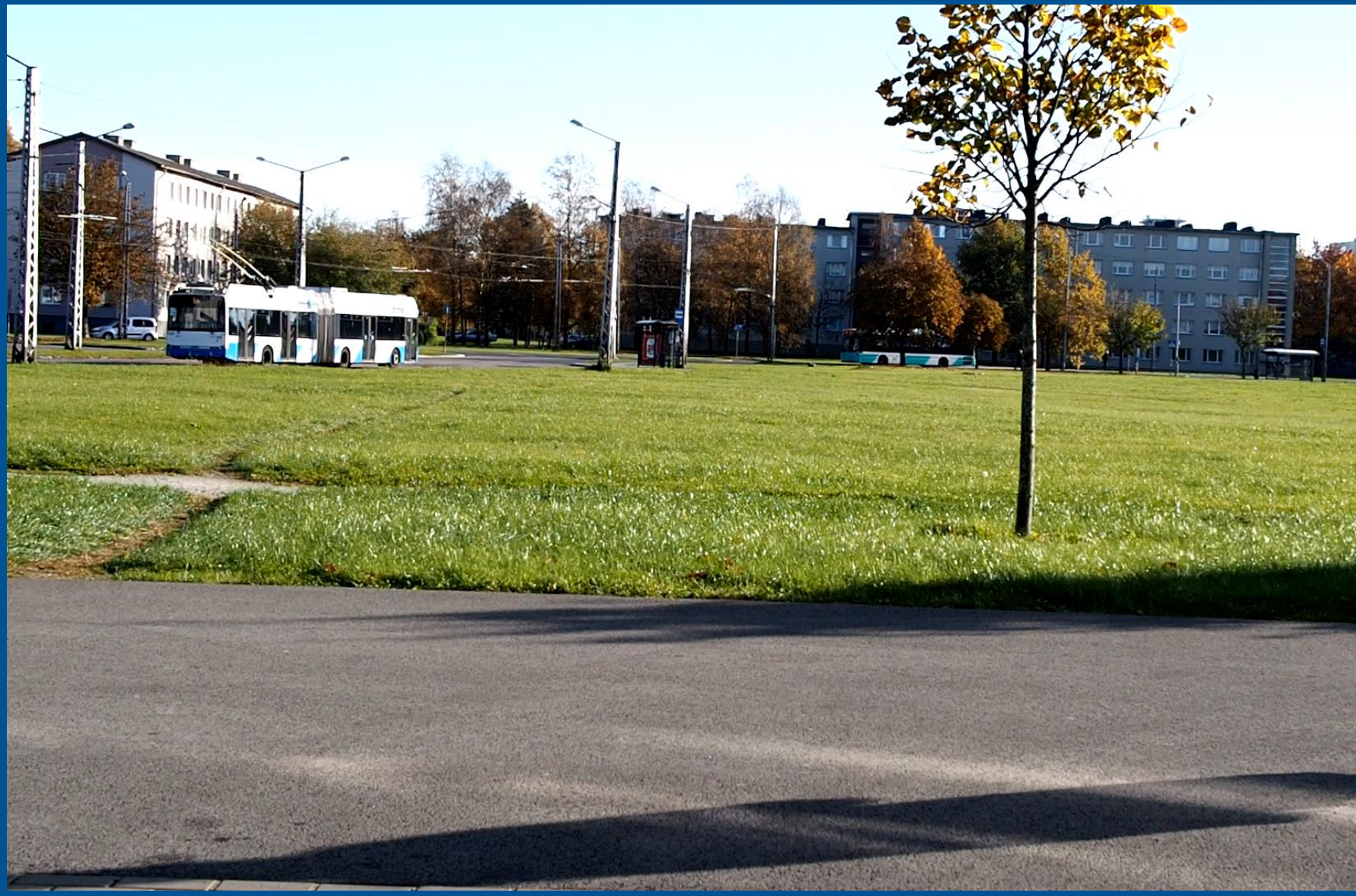

Abstand Proband-Roboter
Kurve 1
Abstand
(mm)
3000
2500
2000
1500
1000
500
0
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
Zeitschritte
(T = 1/120 sec)


Kurve 4
Versuchsraum
(mm)
2000
1000
0
-1000
-2000
-3000
-4000
-3000
-2000
-1000
0
1000
2000


mittlere Robotergeschwindigkeit
mittlere Probandengeschwindigkeit
Kurve 4
v
(mm/s)
2000
1500
1000
500
0
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
Zeitschritte
(T = 1/120 sec)

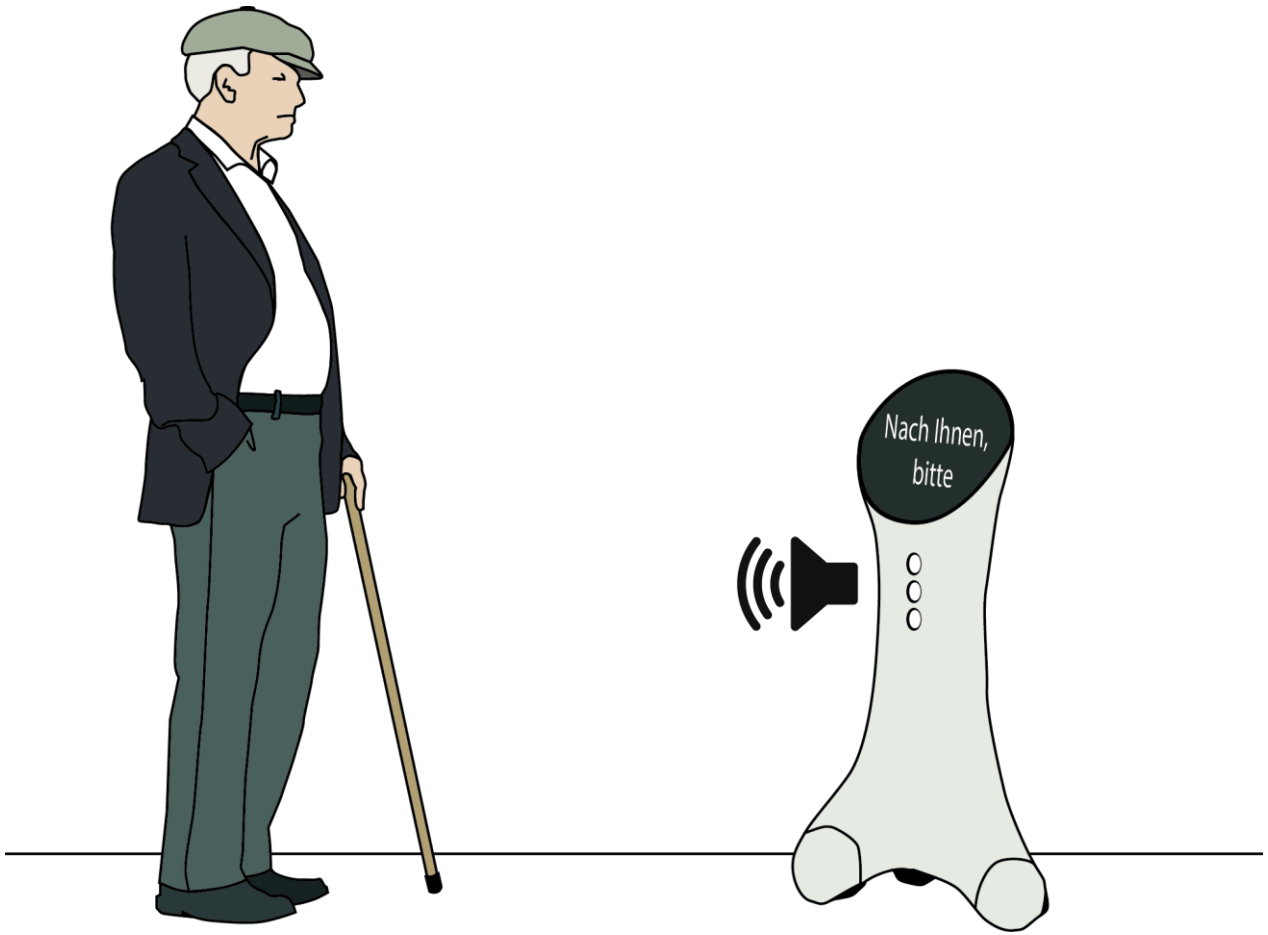

Abstand Proband-Roboter
Kurve 4
Abstand
(mm)
3000
2500
2000
1500
1000
500
0
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
Zeitschritte
(T = 1/120 sec)





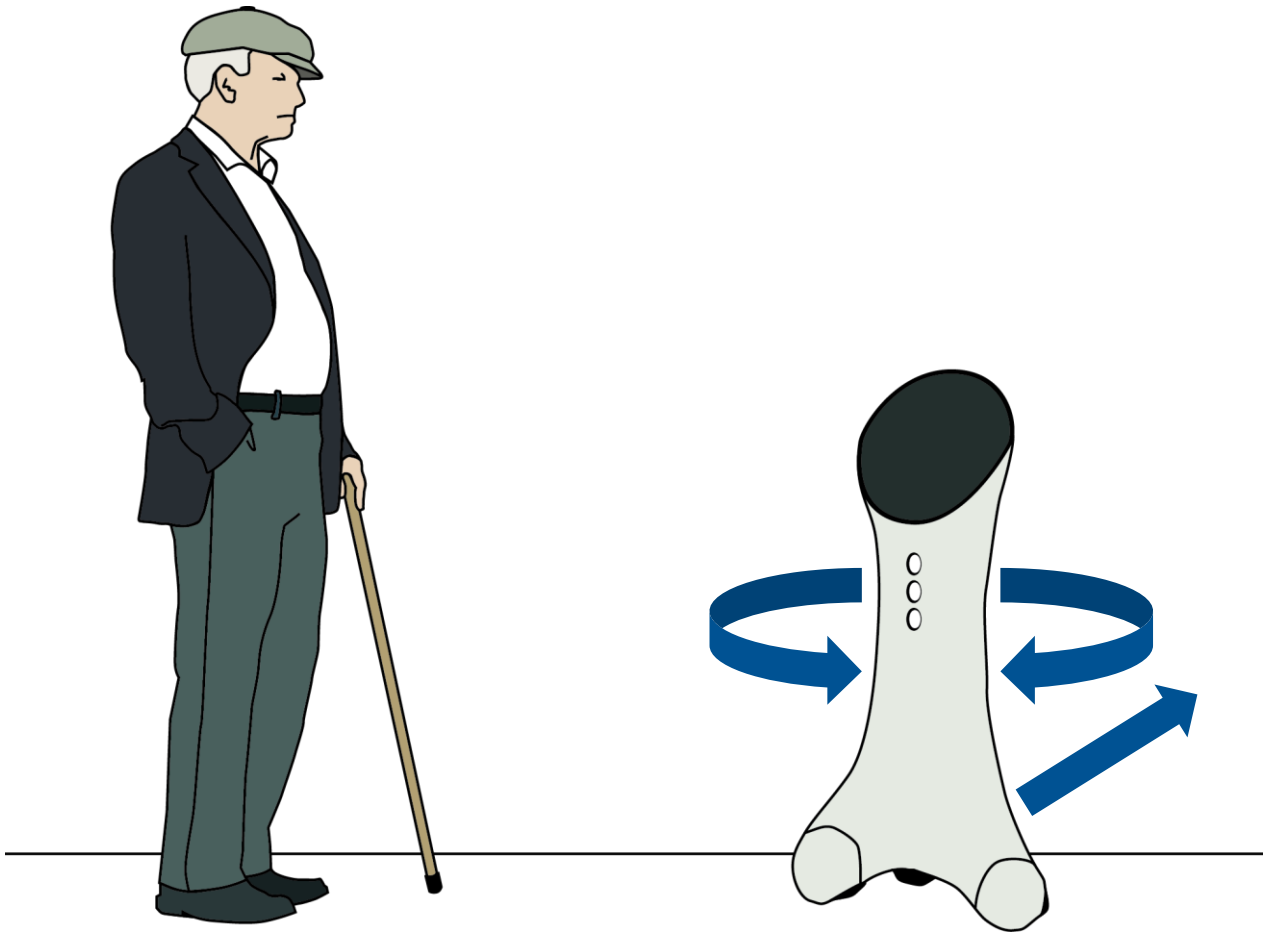
COPYRIGHT RECHTE DER INHALTE VERBLEIBEN BEIM LEHRSTUHL FÜR ERGONOMIE TU MÜNCHEN

Explicit Communication



COPYRIGHT RECHTE DER INHALTE VERBLEIBEN BEIM LEHRSTUHL FÜR ERGONOMIE TU MÜNCHEN

Implicit Communication



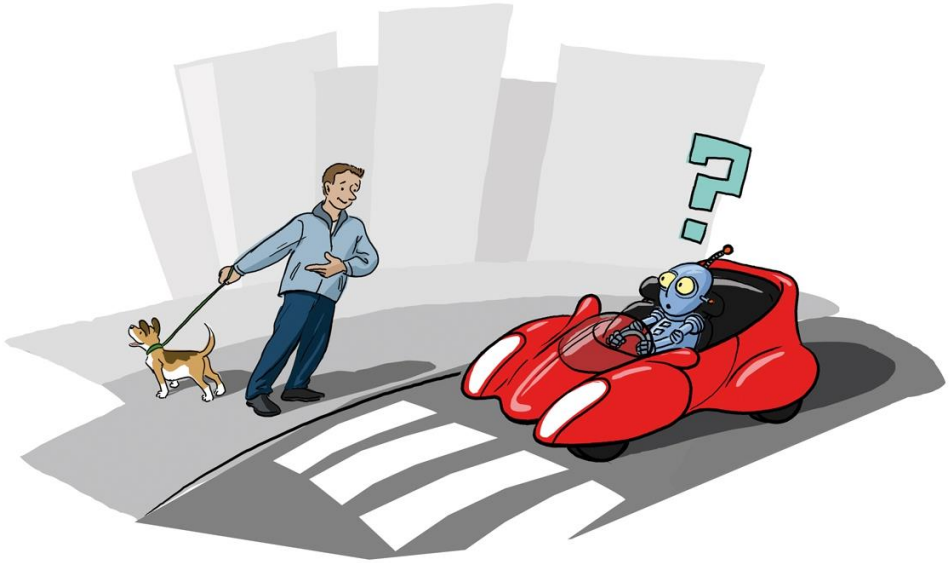
COPYRIGHT RECHTE DER INHALTE VERBLEIBEN BEIM LEHRSTUHL FÜR ERGONOMIE TU MÜNCHEN

https://nemo-responsive-image.live.cf.public.springer.com/v1/resize/width/%7Bwidth%7D/%7Bpixel_ratio%7D/url/http:/resource-cms.springer.com/springer-cms/rest/v1/img/6509180/v3/4by3

Legible Movements of automated mobile Systems

Communication of Intentions, Actions and system states

- Explicitly via displays etc.
- Implicitly via movements



Legibility – “Robot behavior is legibile if:

- (factor 1) a human observer or interactor is able to understand its intentions, and
- (factor 2) the behavior met the expectations of the human observer or interactor.” (Lichtenthäler & Kirsch, 2016)

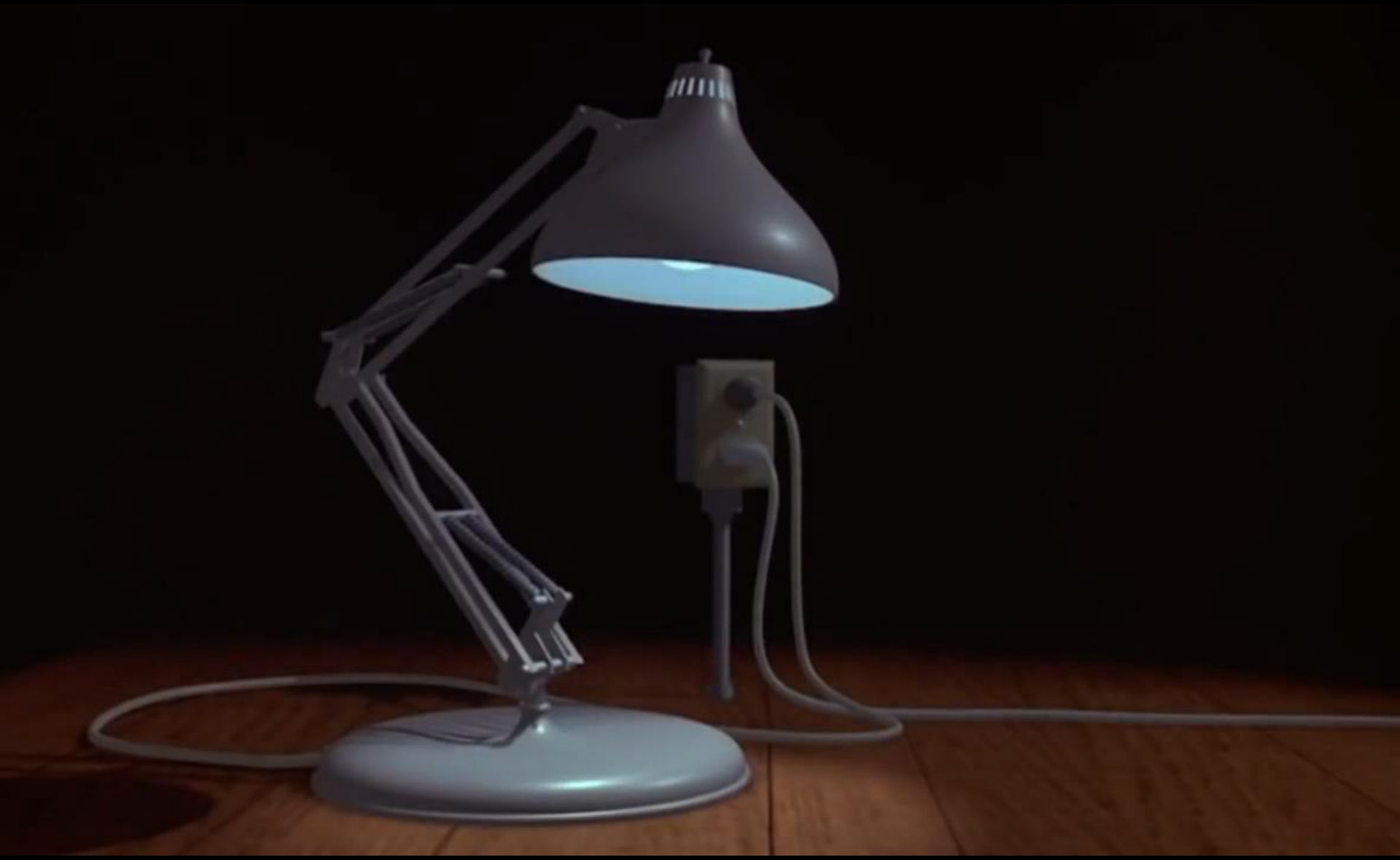
Reading:

Lichtenthäler, C., & Kirsch, A. (2016). **Legibility of Robot Behavior : A Literature Review**. Retrieved from https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01306977/

COPYRIGHT RECHTE DER INHALTE VERBLEIBEN BEIM LEHRSTUHL FÜR ERGONOMIE TU MÜNCHEN

COEXISTENCE
COOPERATION
COLLABORATION

Pixar Luxo Jr (1986) https://www.youtube.com/watch?v=6G3O60o5U7w



Zusammenfassung

- Technische Systeme mit Eigenbewegung nehmen in Anzahl und Ausprägung zu
- Interpretierbare Bewegung als Grundlage für Kooperation
- Energieeffiziente Trajektorien sind nicht zwangsläufig gut interpretierbar (legible)
- Widersprüche zwischen Bewegung und Kennzeichnung senken Effizienz und Sicherheit
- Es existieren keine „Design Patterns“ für Bewegungsmuster
- Klassische Metriken reichen für die Bewertung nicht mehr aus

COPYRIGHT RECHTE DER INHALTE VERBLEIBEN BEIM LEHRSTUHL FÜR ERGONOMIE TU MÜNCHEN