

# Follow Me! Wie Roboter Menschen führen sollen

Jakob Reinhardt, Jonas Schmidler, Moritz Körber und Klaus Bengler  
Lehrstuhl für Ergonomie, Technische Universität München

## Schlüsselwörter

Mensch-Roboter-Interaktion, Kooperation, Bewegungsverhalten, Proxemik, Trajektorienplanung

## Zusammenfassung

Um in der Mensch-Roboter-Interaktion Wohlbefinden der Menschen und Effizienz des Systems zu kombinieren, ist Berücksichtigung der sozialen Räume und des subjektiven Empfindens der Menschen sowie Vorhersehbarkeit der Aktionen der interagierenden Partner erforderlich. Im Bereich der mobilen Robotik gibt es kaum Referenzen zu Auswirkungen des kinematischen Verhaltens eines mobilen Roboters auf den Menschen. Der Einfluss der kinematischen Variablen Beschleunigung und Wahl der Kurventrajektorie auf Abstandsverhalten und subjektives Empfinden der folgenden Personen wurde in einem Folgeszenario von Probanden hinter einem vorausfahrenden Roboter untersucht. Differenziert in Vor- und Hauptversuch mit jeweils 40 Probanden studentischen Alters wurden unterschiedliche Roboter-Kurventrajektorien in einer Abbiegesituation und Beschleunigungen beim Anfahren untersucht. Im Anschluss an eine statistische Auswertung der Versuche konnten Gestaltungsempfehlungen für Mensch-Roboter-Systeme formuliert werden. Daraus wurden Vorschläge für Richtwerte der Anfahrtsbeschleunigung ( $M = 607,39 \text{ mm/s}^2$ ) und Radius der Kurventrajektorien ( $M = 2164 \text{ mm}$ ) des Roboters erarbeitet. Der mittlere eingenommene Abstand der Interaktionspartner bei unterschiedlichen Kurventrajektorien wurde mit  $M = 1018,30 \text{ mm}$  ( $SD = 186 \text{ mm}$ ) bis  $M = 1323 \text{ mm}$  ( $SD = 208 \text{ mm}$ ) ermittelt. Zwischen Beschleunigung des Roboters beim Anfahren aus dem Stand und Änderung des Abstands der Interaktionspartner ergab sich ein linearer Zusammenhang:  $\text{Variabilität}_a = -31,1 \frac{\text{mm}}{\text{s}} + 0,591 \text{ s} * a$ .

## Praktische Relevanz

Führung von Personen in Alltagssituationen (bspw. öffentliche Gebäude, Einzelhandel) und in der Altenpflege (z. B. bei Demenzpatienten) sind Anwendungsbereiche, in denen mobile Roboter verstärkt zum Einsatz kommen werden. Die in diesem Artikel entwickelten Gestaltungshinweise sollten in solchen Szenarien beachtet werden.

# ***Follow Me! How Robots Should Guide Humans***

## **Keywords**

Human-Robot Interaction, cooperation, movement-behavior, proxemics, trajectory planning

## **Abstract**

To combine well-being of the human and performance of the system in human-robot interaction, one has to consider human proxemics, human subjective evaluations and predictability of the interacting partners' actions. In the field of mobile Robotics there is little reference about the influence of robot kinematics on the human. In the follow-scenario of subjects behind a mobile robot, the influences on human proxemics and subjective evaluation of the variables acceleration and trajectory are investigated. Divided into a pre- and a main study with 40 student aged participants each, different robot trajectories and accelerations are analyzed. As a result to a statistical analysis of the studies, design recommendations for human-robot systems are proposed. Suggestions for the approximate value of the robot's acceleration ( $M = 607,39 \text{ mm/s}^2$ ) and radius of the trajectories ( $M = 2164 \text{ mm}$ ) are provided. The mean distance between the interacting partners during different trajectories ranges from  $M = 1018,30 \text{ mm}$  ( $SD = 186 \text{ mm}$ ) to  $M = 1323 \text{ mm}$  ( $SD = 208 \text{ mm}$ ). Between the robot's acceleration and change in distance between the interacting partners, a linear relation  $Variability_a = 31,1 \frac{\text{mm}}{\text{s}} + 0,591 \text{ s} * a$  is identified.

## **Practical Relevance**

Guiding people in daily routine scenarios or in elderly caretaking settings are fields, in which mobile robots will be applied (e.g., guiding customers to products or guiding patients with dementia). This article provides guidelines which should be taken into account for an appropriate implementation of such scenarios.

## **1 Hintergrund und Ziele**

Das Führen von Personen in Alltagssituationen und in der Altenpflege ist ein Anwendungsbereich, in dem mobile Roboter zukünftig stärker zum Einsatz kommen (z. B. das Führen von Einzelhandelskunden und Demenzpatienten). Mobile Roboter wurden bereits als Navigationsassistenten in Baumärkten vorgestellt (Pöschl et al., 2009).

Jedoch fokussieren sich bisher untersuchte Mensch-Roboter-Interaktionsstudien (MRI) eher auf statische Szenarien, bei denen sich maximal einer von zwei Interaktionspartnern bewegt (Morales et al., 2014) und obwohl menschenähnliche Roboterbewegung als entscheidend für menschenseitiges Interpretationsvermögen in Roboternähe bewertet wurde (Carton et al., 2014), bewegen sich Roboter in MRI-Studien bislang langsamer als dies für Menschen üblich wäre (Butler & Agah, 2001; Hüttenrauch et al., 2006; Pacchierotti et al., 2005). Solch unnatürliche Geschwindigkeiten führen zu unzureichender Akzeptanz und Effizienz in der Kooperation. In der Industrierobotik hatten anthropomorphe Geschwindigkeitsprofile in Roboterbewegungen bereits zu einer Verkürzung der Zeit geführt, welche Menschen zur Vorhersehbarkeit von Roboterbewegungen benötigen (Kuz et al., 2014).

Es gibt außerdem Bedenken zum hohen Grad der Adaptivität, der mit heutigen robotischen Systemen erreicht wird. Hoch-adaptive Roboter verfolgen die Aktionen der

Menschen in hoher Frequenz und adaptieren ihr eigenes Verhalten danach. Dies kann zu Abkoppelung und Abgelenktheit des menschlichen Partners führen, da der Roboter seine Trajektorie oft ändert, sodass der Mensch nicht in präziser Weise folgen kann (Garrell & Sanfeliu, 2010). Das suggeriert die Verwendung vordefinierter Bewegungen für flüssigere Interaktionen, da Menschen das Roboterverhalten besser antizipieren können.

In Zukunft werden Menschen mit einer wachsenden Anzahl von sich bewegenden autonomen Systemen umgeben sein. Die Frage, die sich dabei stellt ist, wie sich solche koexistierenden Systeme bewegen und verhalten sollen um das Wohlbefinden der Menschen zu gewährleisten und die kooperative Effizienz zu maximieren. In der MRI ist es außerdem essentiell die Proxemik der Menschen sowie die Vorhersehbarkeit der Aktionen des Roboters zu behandeln (Bortot, 2014). Obwohl bereits einzelne Untersuchungen zur Stilisierung der Roboterbewegungen existieren, fehlt bisher ein verallgemeinerbares Gerüst bzw. eine Sammlung von Gestaltungsmerkmalen zu Bewegungsabläufen und deren Effekt auf den Menschen (LaViers & Egerstedt, 2012). Als Ergebnis mehrerer Studien zum Bewegungsverhalten von Mensch und Roboter könnte eine solche Sammlung aufgebaut werden. Standardisierung angepasster robotischer Bewegungen hat dabei das Potential, Nutzererwartungen durch wiedererkennbares Roboter Verhalten zu bestätigen.

Im Szenario des Folgens eines vorausfahrenden Roboters wurde der Einfluss der kinematischen Variablen Beschleunigung und Kurventrajektorie auf Abstandsverhalten und subjektives Empfinden der folgenden Personen untersucht. Werte für geometrische Dimensionen des interagierenden Systems können Wissenschaftlern und Entwicklern dabei helfen den benötigten Raumbedarf in zukünftigen Anwendungen abzuschätzen. Basierend auf den subjektiven Ergebnissen werden schließlich Gestaltungsempfehlungen für die Roboterkinematik gegeben. Der Fokus liegt dabei auf Strategien zur Richtungsänderung und Charakteristika der Beschleunigungsphase. Roboter können unterschiedliche Arten der Richtungsänderung vollziehen. Diese bewegen sich zwischen einem Drehen auf der Stelle bis hin zu weiten ausgefahrenen Radiuskurven. Um zu analysieren, ob die Art der ausgeführten Strategie und damit Trajektorie Einfluss auf die Distanz hat, welche der Mensch vom Roboter einnimmt, wurde folgende Hypothese aufgestellt.

*H1: Die Distanz zwischen Mensch und Roboter variiert zwischen unterschiedlichen Kurventrajektorien des Roboters.*

Ferner wurde der funktionale Zusammenhang zwischen unterschiedlicher Stärke der Roboterbeschleunigung und dem Distanzverhalten des Menschen untersucht. In der Beziehung zwischen der Beschleunigungsstärke und der dynamischen Änderungen der Distanz während der Beschleunigungsphase des Roboters, erwarteten wir folgenden Zusammenhang:

*H2: Es gibt eine positive Korrelation zwischen der Beschleunigung des Roboters und der betragsmäßigen Änderung der Distanz zwischen den interagierenden Partnern.*

Eine Recherche im Bereich des menschlichen Bewegungsverhaltens bildete die Basis der präsentierten Studien. Welche charakteristischen Werte dabei für Schrittgeschwindigkeit, Beschleunigung aus dem Stand oder Kurvenstrategie bei Menschen vorherrschen, waren dabei von Interesse. Bohannon (1997) fand durchschnittliche Gehgeschwindigkeiten für Frauen zwischen 20 und 30 Jahren von  $M = 1,41 \text{ m/s}$  ( $SD = 0,18 \text{ m/s}$ ) und für Männern der gleichen Altersgruppe  $M = 1,39 \text{ m/s}$  ( $SD = 0,15 \text{ m/s}$ ). In einer Kurvensituation haben Fino et al. (2015) Geschwindigkeiten

von  $M = 1,27 \text{ m/s}$  ( $SD = 0,26 \text{ m/s}$ ) festgestellt. Außerdem tendieren Menschen dazu, die Kurven zu schneiden. Damit ist gemeint, dass ihre laterale Distanz zu Hindernissen in der Kurvenmitte ein Minimum erreicht (Brogan & Johnson, 2003). Das Schneiden von Kurven ist in seiner Geometrie gleichbedeutend mit der später verwendeten Definition von einem großen Kurvenradius.

Die menschliche Proxemik folgt einem von Hall (1969) beschriebenen Muster, welches der sozialen Beziehung zweier interagierender Menschen typische Abstände voneinander zuordnet, angefangen mit intimmem Raum (0,45 m) bis hin zu öffentlichem Raum (7,6 m). Ein Ziel aktueller MRI-Forschung ist es vergleichbare typische Distanzen zwischen Menschen und mobilen Robotern zu ergründen.

In der vorliegenden Studie wurden unterschiedliche Roboterbeschleunigungsprofile sowie unterschiedliche Kurventrajektorien im Kontext eines MRI Szenarios untersucht. Eine quantitativ menschenähnliche Geschwindigkeit (m/s) sowie Bewegungstrajektorie (Kurvenradius) müssen mit der Roboterkinematik, neben anderen, nicht menschlichen Verhaltensweisen umgesetzt werden. Daher wurde eine initiale explorative Pilot-Studie durchgeführt, um die Bandbreite der Beschleunigungen und Trajektorien für die Hauptstudie zu ermitteln.

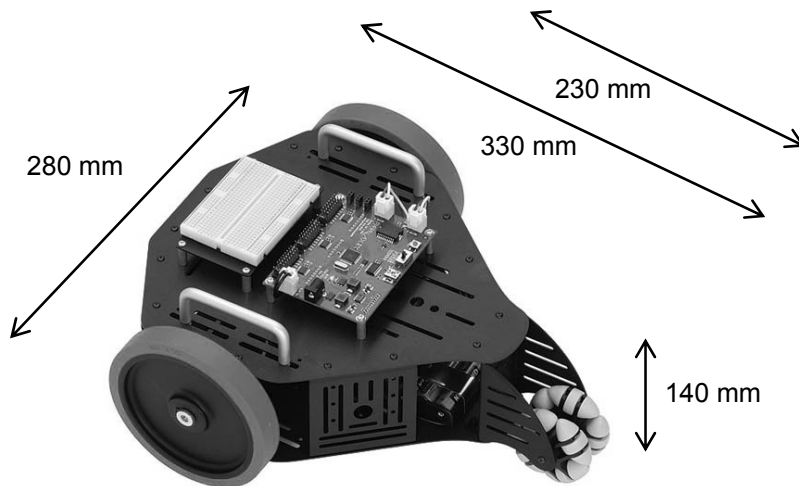
## **2 Pilot-Studie**

### **2.1 Methodik**

1) *Ziel*: Das Ziel der Pilot-Studie war es zu beurteilen, ob das Szenario des Folgens von Menschen hinter einem Roboter mit dem üblichen Szenario des Folgens hinter einem anderen Menschen in Bezug auf Abstand, Geschwindigkeit und Akzeptanz verglichen werden kann.

2) *Stichprobe*: Vierzig Versuchspersonen nahmen freiwillig an dem Experiment teil (20/50 % weiblich, 20/50 % männlich). Das durchschnittliche Alter der Probanden war 24,30 Jahre, zwischen 19 und 29 Jahre ( $SD = 2,52$ ). Kein Proband berichtete von motorischen Störungen oder Sinnesbeeinträchtigungen.

3) *Versuchsumgebung*: Die Umgebung für die Pilot-Studie war ein zwei Meter breiter Gang von ungefähr 10 Meter Länge, gefolgt von einer  $90^\circ$  Richtungsänderung nach rechts und einem weiteren fünf Meter langen Gang geradeaus im Umfeld des Lehrstuhls. Für alle Experimente wurde der mobile Roboter „Stingray“ von Parallax Inc. verwendet (s. Bild 1). Stingray wird von einem programmierbaren Mikrokontroller gesteuert. Die Bewegung wird durch das Adjustieren der Leistung an zwei Elektromotoren, welche jeweils eines der beiden Räder antreiben, realisiert.



**Bild 1:** Versuchsroboter Parallax „Stingray“  
**Figure 1:** Experimental Robot Parallax “Stingray”

4) *Vorgehen:* In einem Teil der Studie folgte der Proband einem vorausgehenden zweiten Menschen (Versuchsleiter). Im zweiten Teil folgte der Proband dem Roboter. Die beiden Experimenteile wurden für jeden Probanden randomisiert in ihrer Abfolge durchgeführt. Roboter bzw. Versuchsleiter starteten dazu jeweils von einer markierten Stelle. Die Probanden folgten von einer Markierung ausgehend, welche einen Meter hinter der vorherhergehenden Person/Roboter angebracht war. Die Probanden hatten die Aufgabe dem Führenden zu folgen sobald dieser sich bewegte. Dabei wurden vom Roboter zwei Richtungsänderungsstrategien within-subject verfolgt. Zum einen fuhr der Roboter eine Kurve mit Radius, zum anderen drehte der Roboter auf der Stelle. Der vorausgehende Mensch gab stets eine Kurve mit Radius vor. Die Gehgeschwindigkeit versuchte der Mensch stets gleich der Fahrgeschwindigkeit des Roboters und dabei auch für jeden Probanden gleich groß vorzugeben.

5) *Messmethodik:* Um subjektives Empfinden der Probanden festzustellen, wurde eine fünfteilige Likert-Skala verwendet. Dabei wurde bewertet ob Geschwindigkeit, Beschleunigung, und Kurvenradius in der Skala von *zu langsam/schwach/klein* bis *zu schnell/stark/groß* empfunden wurde. Mit einer weiteren Abfrage: Bevorzugen Sie die ausgefahrene oder die auf der Stelle drehende Roboter Kurvenfahrt, wurde eine Präferenz ermittelt. Der Abstand der Interaktionspartner wurde vom Versuchsleiter in dieser Pilot-Studie mit einem Maßband zum Ende des Folgens gemessen. Hierzu wartete der Versuchsleiter den Moment des Stillstandes beider Interaktionspartner nach erfolgtem Kurvengang ab und klebte daraufhin kleine Aufkleber an Hinterkante des Schuhs des Vorausgehenden (also die eigene) und Vorderkante des Schuhs der folgenden Person. Ebenso erfolgte die Messung des Abstands zwischen Roboter-Hinterkante und Proband.

## 2.2 Ergebnis

Zwischen dem Mensch-Roboter und dem Mensch-Mensch Szenario konnten im Ablauf keine kritischen Unterschiede festgestellt werden. Menschen hielten sowohl zum vorausgehenden Menschen als auch zum vorausfahrenden Roboter ähnlich große Abstände ein. Es kann ebenfalls festgehalten werden, dass die Aufgabe des Roboters

generell akzeptiert wurde, was die These unterstützt, dass Roboter zum Führen von Menschen prinzipiell geeignet sind. Vierunddreißig Probanden (85 %) bevorzugten eine Kurve mit ausgeprägtem Radius des Roboters im Gegensatz zu einer durch entgegengesetztes Drehen der Räder auf der Stelle gedrehten Kurve. Die Robotergeschwindigkeit (ca. 1,5 m/s) wurde als zu schnell bewertet und deshalb für die Hauptstudie auf 1,39 m/s reduziert. Diese Geschwindigkeit repräsentiert nach Bohannon (1997) eine komfortable Gehgeschwindigkeit für die untersuchte Altersgruppe.

### **3 Hauptstudie**

#### **3.1 Methodik**

1) *Ziel:* Es wurden metrische Daten der Distanzen zwischen Roboter und Probanden während einem dynamischen Folgeszenario erhoben. Zusätzlich wurde eine Befragung zu den unterschiedlichen Bewegungsstrategien durchgeführt

2) *Stichprobe:* Erneut 40 Versuchspersonen nahmen freiwillig an dem Experiment teil (17/42,50 % weiblich, 23/57,50 % männlich). Das durchschnittliche Alter der Probanden betrug 27,43 Jahre, zwischen 16 und 35 Jahre (SD = 7,99). Kein Proband berichtete von motorischen Störungen oder Sinnesbeeinträchtigungen.

3) *Versuchsumgebung:* Die Versuchsumgebung für die Hauptstudie war ein zwei Meter breiter, mit weißem Klebeband markierter Gang, bestehend aus einem geraden Stück und einer 90° Rechtskurve im Bewegungslabor des Lehrstuhls für Ergonomie an der Technischen Universität München (s. Bild 2). Bild 2 zeigt einen Ausschnitt aus dem Versuchsablauf mit einem Proband, welcher dem Roboter im Kurvenbereich folgt. Nach den Erkenntnissen von Fino et al. (2015) wurde ein 104 cm hohes Hindernis an der Innenseite der Kurve aufgestellt, um eine realistische Bahnmarkierung herbeizuführen. Gehversuche dieser Autoren hatten einen Einfluss der Bahnmarkierungshöhe auf die von Personen gewählte Trajektorie gezeigt. Durch kontinuierliche optische Bewegungsaufzeichnung der Position von fahrendem Roboter und gehendem Proband, wurden Datensätze von jedem Versuchsteil erstellt. Hierfür wurde Vicon Motion Tracking mit 10 Kameras und einer Aufzeichnungsrate von 120 Aufzeichnungen/Sekunde verwendet. Infrarotlicht Reflektoren wurden auf dem Roboter und dem Oberkörper sowie den Füßen der Probanden angebracht (s. Bild 4). Diese Marker sind in den Datensätzen mit Spalten für X-, Y-, und Z-Koordinaten repräsentiert.

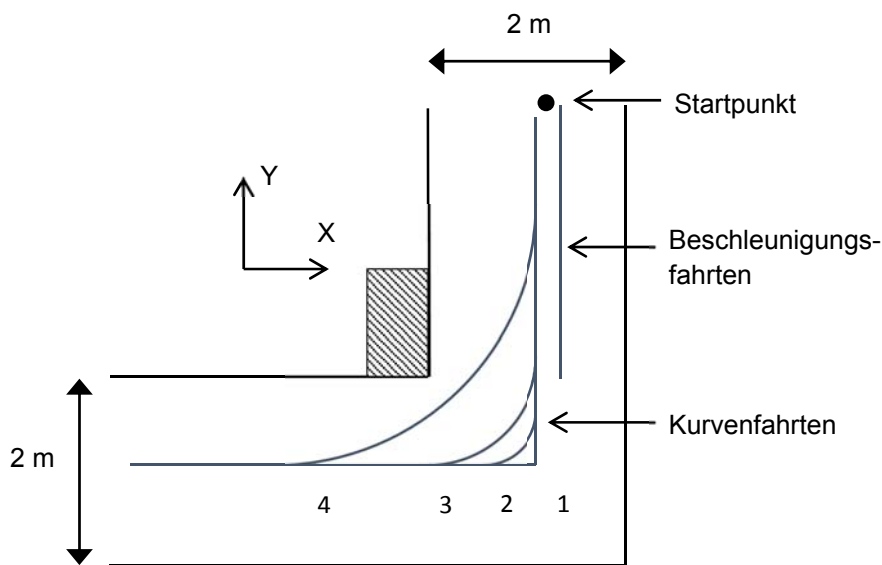


**Bild 2:** Proband folgt dem Roboter im gekennzeichneten Versuchsbereich  
**Figure 2:** Test person follows the robot in marked experimental working space

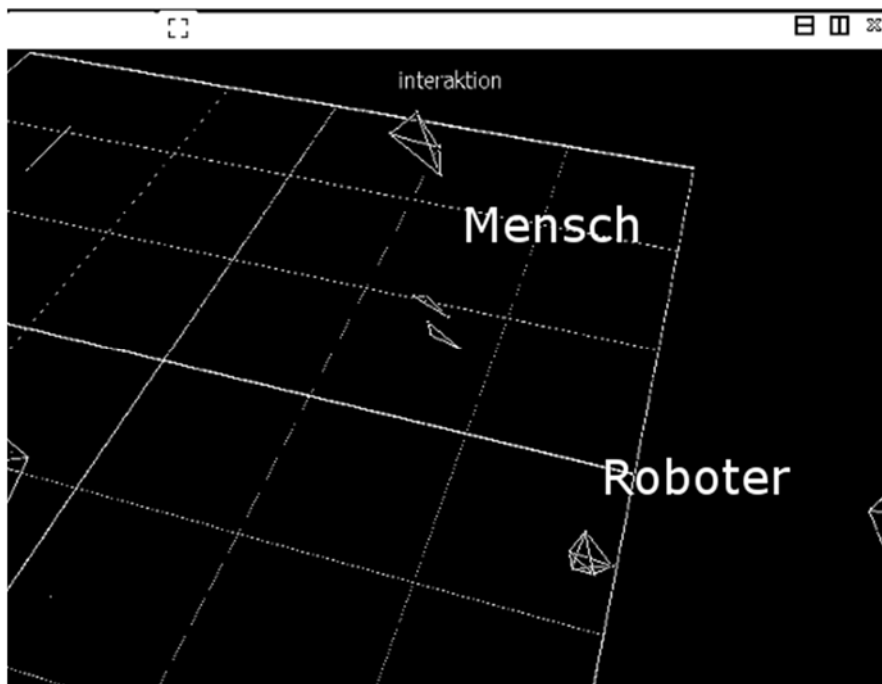
4) *Vorgehen:* Der Roboter startete zu jedem Versuchsteil von einer markierten Stelle. Die Probanden folgten von einer Markierung, welche einen Meter hinter der Vorderkante des führenden Roboters angebracht war, sobald dieser sich bewegte. Vier unterschiedliche Roboter Beschleunigungsprofile (s. Bild 3), vier Arten von Kurventrajektorien (s. Bild 3 und 5) und ein Gang der Probanden um das Hindernis alleine, ohne vorausfahrenden Roboter (s. Bild 6), wurden randomisiert durchgeführt. Während aller Kurvenfahrten fuhr der Roboter aus dem Stand mit Beschleunigungstyp 2 an. Insgesamt ergaben sich pro Versuchsperson somit neun Interaktionsszenarien. Die Werte für die realisierten Beschleunigungstypen 1–4 sind Mittelwerte, welche der Roboter benötigt um seine konstante Fortbewegungsgeschwindigkeit aus dem Stand zu erreichen. Die realisierten Radiustypen 1–4 wurden durch Anwendung der Methode der kleinsten Fehlerquadrate auf die mittleren erreichten Bahnkurven berechnet. Eine Übersicht der Werte ist in der nachfolgenden Tabelle 1 dargestellt.

**Tabelle 1:** Beschleunigungs- sowie Trajektorientypen 1–4  
**Table 1:** Acceleration and Trajectory Types 1–4

Typ	1	2	3	4
Beschleunigung [mm/s <sup>2</sup> ]	425	607	780	1165
Trajektorie R = [mm]	kein Radius	824	1072	2164



**Bild 3:** Versuchsskizze mit geplanten Roboter Trajektorien der vier Beschleunigungsfahrten sowie der vier Kurvenfahrten  
**Figure 3:** Sketch of the experimental working space including the planned acceleration types as well as the curve trajectories



**Bild 4:** Mit Infrarotmarkern versehener Roboter und Proband in Vicon Nexus Software  
**Figure 4:** Robot and human with infrared markers in Vicon Nexus Software

##### 5) Messmethodik:

Die Probanden wurden gebeten, die vier Beschleunigungen und die vier Kurvenradii jeweils mit Hilfe einer siebenstufigen Likert-Skala mit den Ankerpunkten sehr unangenehm – sehr angenehm zu bewerten.



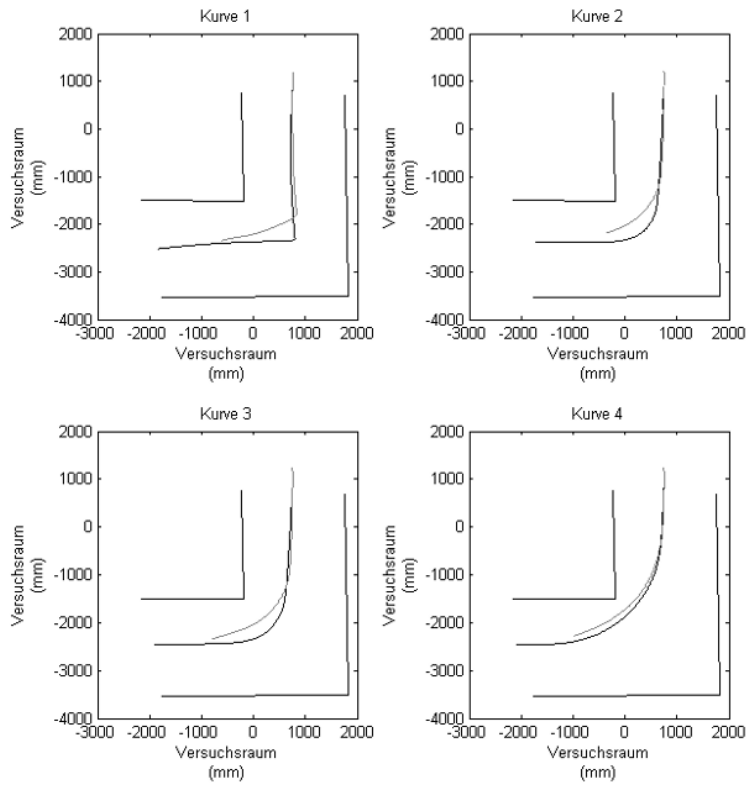
Zur Positionsdatenanalyse wurde die Bewegung des zentralen Punkts des Roboters dadurch generiert, den Mittelwert aus zwei sich an den beiden Rädern des Roboters befindlichen Markern zu berechnen. Die Bewegung des Menschen wurde über einen Marker, der sich zwischen den Schlüsselbeinen der Probanden befand, in die Datenanalyse einbezogen. Z-Koordinaten wurden von der Analyse ausgeschlossen, dadurch wurden lediglich Bewegungen in der horizontalen Ebene (X-Y) betrachtet. Für alle Abstandsberechnungen wurde somit der horizontale Abstand des Brustkorbs des Menschen zur Robotermitte betrachtet. In Bild 4 sind ein mit Markern versehender Proband und der vorausfahrende Roboter in der Vicon Nexus Software zu sehen. Die Datensätze wurden zeitlich getrimmt, um die Daten während des tatsächlichen Kurvenvorgangs für die statistische Auswertung zu erheben. Die Ableitung von Positionsdaten zu Geschwindigkeits- und Beschleunigungsdaten erfolgt mittels Fünf-Punkte-Mittelpunkts-Formel (1) (Schmidtler et al., 2015). Der Algorithmus bezieht die vier das Datum (x) umgebenden Positionsdaten (f) ein um eine Ableitung (f') zu erstellen. Dabei handelt es sich um Positionsdaten der zwei zukünftigen und der zwei vorhergegangenen diskreten Zeitschritte.

$$f'(x) \approx \frac{-f(x+2h)+8f(x+h)-8f(x-h)+f(x-2h)}{12h} \quad (1)$$

## 3.2 Ergebnis

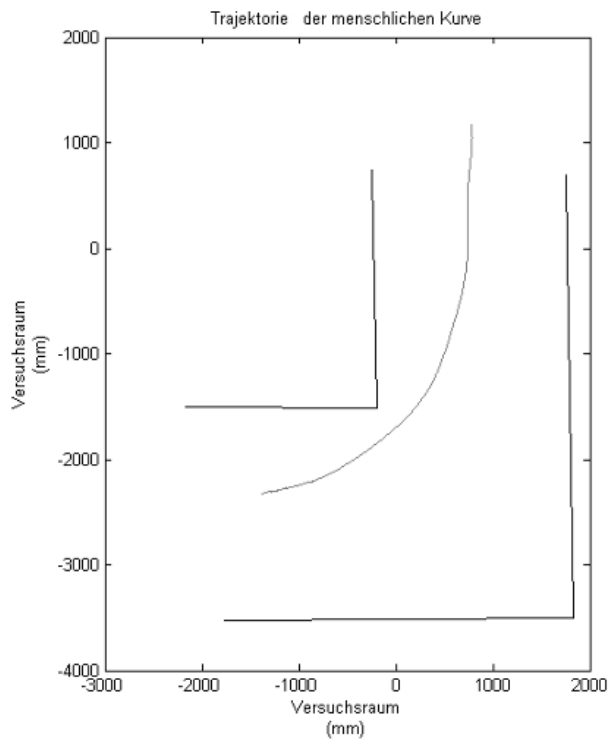
### 1) *H1: Distanz zwischen Mensch und Roboter* und subjektive Evaluation

Subjektiv bevorzugt wurde Trajektorie Typ 4 (s. Bild 5). Dies stellten 20 Probanden im Vergleich zu 7 Probanden (Typ 3) und 11 Probanden (Typ 2) fest, von denen andere Kurventypen bevorzugt wurden. Zwei Probanden waren auf Grund von Datenverlust von der subjektiven Evaluation ausgeschlossen. Mit einer einfaktoriellem ANOVA mit Messwiederholung wurde der Effekt von Trajektorientyp auf mittlere Distanz zwischen Roboter und nachfolgender Versuchsperson untersucht ( $F(3, 117) = 116,49, p < ,001, \eta^2_p = ,75$ ). Trajektorie Typ 1, welche ein Drehen auf der Stelle darstellt, resultierte in einer mittleren Distanz von  $M_1 = 1018,30$  mm ( $SD = 186,29$  mm). Post hoc tests mit Bonferroni-Holm korrigierten  $p$ -Werten zeigte auf, dass das signifikant weniger ist, als die Distanz zwischen den interagierenden Partnern bei den Radius-Kurven (Trajektorientypen 2-4) mit  $M_2 = 1323,90$  mm ( $SD = 208,48$  mm,  $p < ,001$ ),  $M_3 = 1324,13$  mm ( $SD = 226,28$  mm,  $p < ,001$ ), und  $M_4 = 1303,81$  mm ( $SD = 229,48$  mm,  $p < ,001$ ). Trajektorientypen 2 und 3 unterscheiden sich nicht signifikant ( $p = ,948$ ), sowie auch Typ 2 und 4 ( $p = ,948$ ) oder Typ 3 und 4 ( $p = ,989$ ). Das Ergebnis unterstützt die Hypothese, dass Distanzen zwischen Roboter und folgender Person von der Richtungsänderungsstrategie beeinflusst sind. Die menschenähnlichste Trajektorie Typ 4 (Radius 2164 mm) – festgestellt durch visuellen Vergleich mit der Trajektorie, die von Probanden alleine ausgeführt wurde (s. Bild 7) – wurde als bevorzugte Kurvenstrategie gewählt. Mit diesem Trajektorientyp können Entwickler Akzeptanz erreichen.



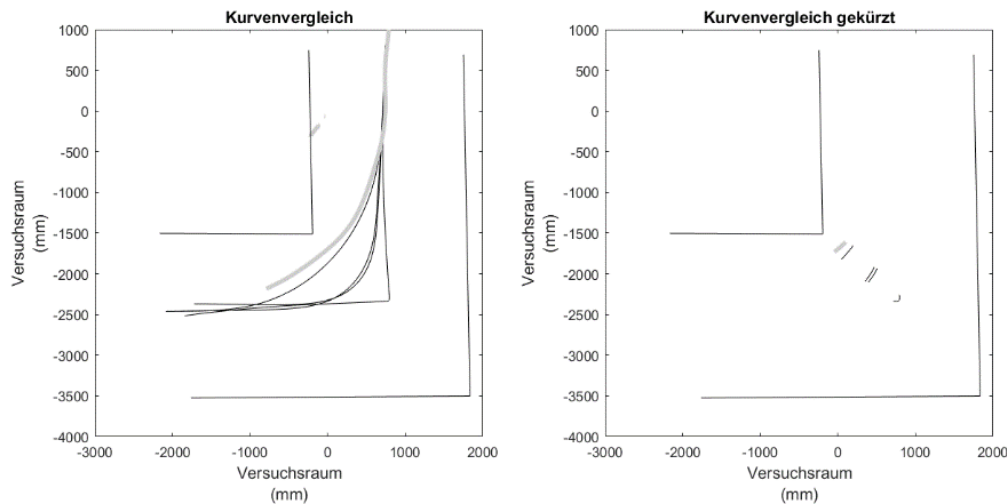
**Bild 5:** Mittlere Robotertrajektorie (schwarz) und mittlere Probandentrajektorie (grau) für Kurvenfahrten 1–4

**Figure 5:** mean robot trajectory (black) and mean test person trajectory (grey) for trajectory types 1–4



**Bild 6:** Mittlere von Probanden selbstständig gegangene Trajektorie

**Figure 6:** mean test person trajectory without using the robot



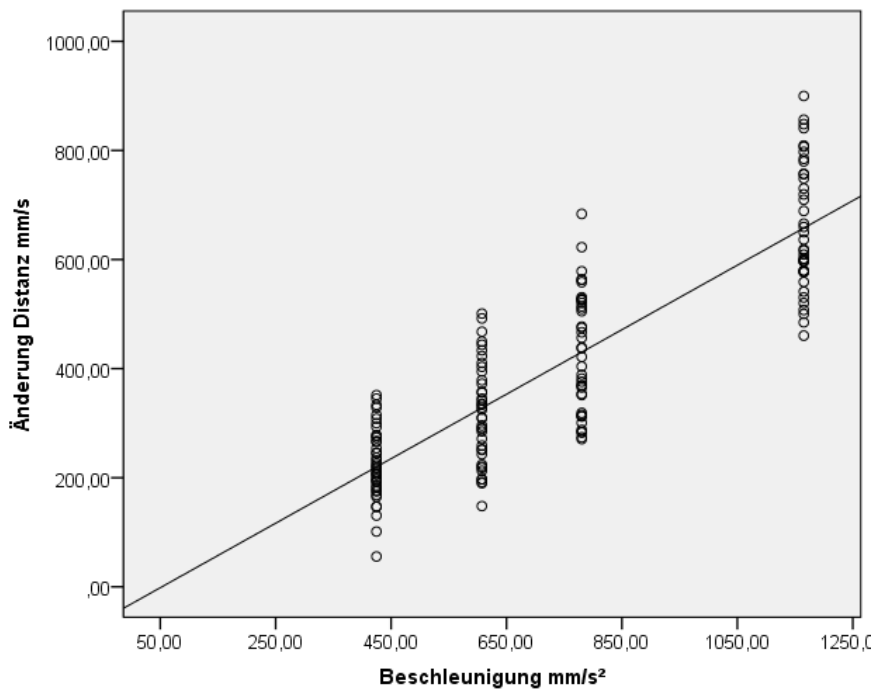
**Bild 7:** Vergleich der Trajektorientypen 1–4 (schwarz) des Roboters mit der menschlichen Trajektorie (grau & fett). Im rechten Bild sind zugeschnittene Datensätze dargestellt, was die Unterschiede des Abstands zur Kurvenmitte verdeutlicht.

**Figure 7:** Comparison of the robot trajectory types 1–4 (black) with the human trajectory (grey & bold). In the right picture the trimmed datasets in mid-curve are displayed, which emphasizes the differences in distance to the inner curve.

2) *H2: Korrelation zwischen Roboter Beschleunigung und Änderung der Distanz der Probanden und subjektive Evaluation*

Die Mehrheit der Probanden (19/50 %) präferierte die Roboterbeschleunigung Typ 2 von 607,39 mm/s<sup>2</sup>, seltener präferiert wird dagegen die Beschleunigungstypen 1 (6/15,78 %), 3 (11/28,94 %) und 4 (2/5,26 %). Das Proxemik-Verhalten während der vier Beschleunigungstypen zeigte Unterschiede in der Größe der Änderung der Distanz auf. Zur Analyse dient der Betrag der ersten Ableitung der Distanzdaten zwischen Probanden und Roboter. Vom ersten Moment der Bewegung des Probanden bis zum Erreichen einer konstanten Robotergeschwindigkeit wurde die Summe dieser Daten berechnet. Über alle Probanden wurde anschließend ein Mittelwert dieser Summe gebildet. Dieser Wert stellt ein Maß für die Variabilität im Abstandsverhalten dar und resultierte in  $M_1 = 227$  mm/s für Beschleunigungstyp 1,  $M_2 = 319$  mm/s für Beschleunigungstyp 2,  $M_3 = 431$  mm/s für Beschleunigungstyp 3 und  $M_4 = 660$  mm/s für Beschleunigungstyp 4. Pearson Korrelation zwischen der ansteigenden Änderung der Distanz mit ansteigender Roboterbeschleunigung war sehr stark  $r = ,86$  ( $p < ,001$ ). Über eine lineare Regression wurde der funktionale Zusammenhang (2) ermittelt ( $R^2 = ,74$ ;  $SE = 0,028$ ;  $p < ,001$ ; s. Bild 8).

$$\text{Variabilität}_a = -31,1 \frac{\text{mm}}{\text{s}} + 0,591 \text{ s} * a \quad (2)$$



**Bild 8:** Eine Lineare Regression stellt den funktionalen Zusammenhang zwischen Beschleunigungsstärke des Roboters und Änderung im Abstand zwischen Mensch und Roboter während des Beschleunigungsvorgangs dar

**Figure 8:** A Linear regression displays the functional connection between the robot's acceleration and the change in distance between human and robot during the acceleration phase

## 4 Diskussion

Anstatt hoch-adaptive Roboterregelung zu verwenden, kann das Implementieren von vordefinierten Kurventrajektorien und Beschleunigungen den flüssigen Ablauf in einem MRI-Folgeszenario verbessern. Vier Beschleunigungsprofile, und vier Kurventrajektorien wurden getestet. Aus dieser Auswahl wurden die bevorzugten Strategien durch subjektive Bewertung der Probanden identifiziert.

Die Autoren raten dazu, dass Entwickler einen Kurvenradius in der Größenordnung der Trajektorie Typ 4 für mobile Roboteranwendungen bei ähnlichen Gangabmessungen als Richtwert verwenden, um weitreichende Akzeptanz zu erlangen. Außerdem wurden quantitative Größen für Distanz und Änderung der Distanz aufgezeichnet und berechnet. Auf diese Weise wurde hier ein spezifisches Szenario mobiler MRI betrachtet. Die Distanz zwischen den interagierenden Partnern während unterschiedlicher Trajektorien bewegte sich zwischen  $M_1 = 1018,30$  mm ( $SD = 186,29$  mm) und  $M_3 = 1324,13$  mm ( $SD = 226,28$  mm), wobei die Startdistanz zu beachten ist. Die Kenntnis typischer Distanzen ist wichtig, wenn Simulationen mehrerer solcher Mensch-Roboter-Teams erstellt werden. Industrielle Anbieter dieser M-R-Systeme werden sich die Frage stellen müssen, wie viele solcher Roboter in einem gemeinsamen Umfeld arbeiten können, wenn Anforderungen an Sicherheit und Effizienz erreicht werden müssen. Als Resultat der Trajektorien-Analyse variierte die Distanz zwischen Mensch und Roboter in verschiedenen Radiuskurven kaum, was die Vermutung zulässt, dass unterschiedlich große Radien der vom Roboter gefahrenen Kurve die Distanz zwischen den interagierenden Partnern nicht beeinflussen.

Die Autoren raten außerdem dazu, dass Entwickler für das Anfahren einen Richtwert in der Größenordnung von Beschleunigung Typ 2 für mobile Roboteranwendungen verwenden, um weitreichende Akzeptanz zu erlangen. Um die Roboterbeschleunigung und die Variabilität der Distanz miteinander zu verknüpfen, wurde mit den erhobenen Daten ein linearer funktionaler Zusammenhang *Variabilität<sub>a</sub>* gefunden. Werte im Bereich der gefundenen Steigung und des Ordinatenabschnitts können verwendet werden um die dynamische Entwicklung des Mensch-Roboter-Systems über den Beschleunigungsvorgang für weitere Beschleunigungsstärken des Roboters vorausszusagen. Simulationssoftware könnte mit derartigen Zusammenhänge ausgestattet werden, um die Realitätsnähe zu erhöhen. Zukünftige Forschung sollte mehrere solcher Bewegungsszenarien untersuchen und schließlich könnte ein Baukastensystem für Bewegungsverhalten in MRI und deren Effekt auf die Menschen erstellt werden.

Der Abstand der Interaktionspartner zu Beginn von Kurvenbewegungen wurde nicht als Variable in der Auswertung betrachtet. Ob also zunächst weit entfernte Personen bei bestimmten Kurventypen schneller auf den Roboter aufschließen oder zunächst rasch folgende dem Roboter während der Kurvenbewegung mehr Raum lassen, konnte mit der hier umgesetzten Analyse nicht geklärt werden. Darüber hinaus empfehlen die Autoren, die kinematischen und geometrischen Aspekte der vorliegenden Arbeit auch in realen Alltagsumgebungen zu validieren. Außerdem sollten in zukünftigen Studien unterschiedliche Altersgruppen betrachtet werden. Ob die Größe des Roboters einen Effekt auf das Folgeverhalten hat, ist ebenfalls noch nicht geklärt.

## Literatur

- Bohannon, R. W. (1997). Comfortable and maximum walking speed of adults aged 20–79 years: Reference values and determinants. *Age and Ageing*, 26(1), 15–19. doi:10.1093/ageing/26.1.15
- Bortot, D. (2014). *Ergonomic human-robot coexistence in the branch of production* (Dissertation). Technische Universität München, München.
- Brogan, D. C., & Johnson, N. L. (2003). Realistic Human Walking Paths. In *Proceedings of the 16th International Conference on Computer Animation and Social Agents* (S. 94–101). Los Alamitos, USA: IEEE Computer Society.
- Butler, J. T., & Agah, A. (2001). Psychological Effects of Behavior Patterns of a Mobile Personal Rob. *Autonomous Robots*, 10(2), 185–202. doi:10.1023/A:1008986004181
- Carton, D., Turnwald, A., Olszowy, W., Buss, M., & Wollherr, D. (2014). Using penalized spline regression to calculate mean trajectories including confidence intervals of human motion data. In *2014 IEEE Workshop on Advanced Robotics and its Social Impacts (ARSO)* (S. 76–81). doi:10.1109/ARSO.2014.7020984
- Fino, P. C., Lockhart, T. E., & Fino, N. F. (2015). Corner height influences center of mass kinematics and path trajectory during turning. *Journal of biomechanics*, 48(1), 104–112. doi:10.1016/j.jbiomech.2014.10.034
- Garrell, A., & Sanfeliu, A. (2010). Model validation: Robot behavior in people guidance mission using DTM model and estimation of human motion behavior. In *2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* (S. 5836–5841). Piscataway, NJ: IEEE. doi:10.1109/IROS.2010.5651685
- Hall, E. T. (1969). *The hidden dimension*. New York, NY: Anchor Books.

- Hüttenrauch, H., Eklundh, K., Green, A., & ToS, E. (2006). Investigating Spatial Relationships in Human-Robot Interaction. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* (S. 5052–5059). Piscataway, NJ: IEEE Operations Center. doi:10.1109/IROS.2006.282535
- Kuz, S., Bützler, J., & Schlick, C. (2014). Anthropomorphismus in der ergonomischen Gestaltung der Mensch-Roboter-Interaktion in Montagezellen. In Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e. V. (Ed.): *Jahresdokumentation 2014, 60. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft. Gestaltung der Arbeitswelt der Zukunft* (S. 513–515). Dortmund: GfA-Press.
- LaViers, A., & Egerstedt, M. (2012). Style Based Robotic Motion. In *Proceedings of the 2012 American Control Conference (ACC)* (S. 4327–4332). Piscataway, NJ: IEEE.
- Morales, Y., Kanda, T., & Hagita, N. (2014). Walking Together: Side by Side Walking Model for an Interacting Robot. *Journal of Human-Robot Interaction*, 3(2), 51. doi:10.5898/JHRI.3.2.Morales
- Pacchierotti, E., Christensen, H. I., & Jensfelt, P. (2005). Human-robot embodied interaction in hallway settings: a pilot user study. In *2005 IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN)* (S. 164–171). Piscataway, NJ: IEEE Service Center.
- Pöschl, S., Döring, N., Böhme, H.-J., & Martin, C. (2009). Mensch-Roboter-Interaktion im Baumarkt – Formative Evaluation eines mobilen Shopping-Roboters. *Evaluation*, 8(1), 27–58.
- Saerbeck, M., & Breemen, A. J. N. van (2007). Design guidelines and tools for creating believable motion for personal robots. In *The 16th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN)* (S. 386–391). Piscataway, NJ: IEEE Service Center.
- Schmidtler, J., Harbauer, C., & Bengler, K. (2014). Investigation of human behaviour in pushing and pulling tasks for direct manipulation of a collaborative robot. In D. de Waard, J. Sauer, S. Röttger, A. Kluge, D. Manzey, C. Weikert, . . . J. Hoonhout (Eds.), *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Europe Chapter 2014 Annual Conference*.

**Anschrift der Verfasser:**

**Jakob Reinhardt, M. Sc.**

E-Mail: jakob.reinhardt@tum.de

**Dipl.-Ing. Jonas Schmidtler**

**Dipl.-Psych. Moritz Körber**

**Prof. Dr. phil. Klaus Bengler**

Technische Universität München

Lehrstuhl für Ergonomie

Boltzmannstraße 15

D-85747 Garching