

Multidisziplinäre Entwicklung von neuen Türkonzepten als ein Teil einer ergonomisch optimierten Ein-/Ausstiegsunterstützung

¹ C. Scharfenberger, ² C. Daniilidis, ³ M. Fischer, ² D. Hellenbrand,
⁶ P. Kuhl, ³ C. Richter, ⁴ O. Sabbah, ⁵ M. Strolz und ¹ G. Färber

¹ Lehrstuhl für Realzeit-Computersysteme (Prof. G. Färber) und ² Lehrstuhl für Produktentwicklung (Prof. U. Lindemann) und ³ Lehrstuhl für Mikrotechnik und Medizingerätetechnik (Prof. T. C. Lüth) und ⁴ Lehrstuhl für Ergonomie (Prof. H. Bubb) und ⁵ Lehrstuhl für Steuerungs- und Regelungstechnik (Prof. M. Buss), Technische Universität München, ⁶ BMW Group Forschung und Technik

Kurzfassung

Gerade in engen Parksituationen stoßen konventionelle Fahrzeugtürkonzepte sowohl in ihrer Bedienbarkeit als auch unter ergonomischen Gesichtspunkten schnell an ihre Grenzen.

Bedingt durch den geringen Arbeitsraum kann eine normale Fahrzeugtüre zum einen nur unzureichend betätigt werden, zum anderen steigt der Diskomfort während des Ein-/Ausstiegsvorgangs sehr stark an. Ziel dieses Projektes ist daher die Konzeption und Entwicklung neuartiger, multikinematischer Türkonzepte, welche den hohen Diskomfort in engen Parklücken reduzieren und eine Türbedienung erleichtern.

Multikinematische Türkonzepte erlauben eine Vielzahl von Öffnungsmöglichkeiten, die situativ angepasst werden können. Um eine intuitive und komfortable Bedienung solcher Türen sicherzustellen, wird jedoch eine fortgeschrittene Regelung benötigt. Dazu wurde ein omnidirektionales Kamerasystem eingesetzt, das Umgebungsinformationen zur Verfügung stellt, auf dessen Grundlage eine geeignete Unterstützung des Bedieners möglich ist. Zur Ermittlung geeigneter Türkonzepte und zur Bestimmung intuitiver und komfortbeeinflussender Faktoren wird eine Versuchsreihe zur Bedienung von sieben realen Fahrzeugtüren vorgestellt. Aufbauend auf diesen Ergebnissen werden mit Hilfe von Simulationen und eines digitalen Menschmodells geeignete Türbewegungen ausgewählt, für die mit Unterstützung eines neu entwickelten Softwarewerkzeuges Türkonzepte generisch erzeugt werden. Diese Türkonzepte werden unter Berücksichtigung von Aktuierung und Regelung an einem VR-Versuchsstand haptisch und visuell simuliert. Auf dieser Grundlage wird ein Versuch mit 18 Probanden durchgeführt, um fünf Konzepte hinsichtlich bedienkomfortbeeinflussenden Faktoren und Intuitivität bewerten zu lassen. Die besten zwei Konzepte werden schließlich prototypisch realisiert. Anhand der Erfahrung mit der

Entwicklung des beschriebenen Systems wird weiterhin eine generische Methodik zur Prozessmodellierung vorgestellt, welches die multidisziplinäre Entwicklung mechatronischer Projekte unterstützt.

1. Einleitung und Motivation

Trotz einer Fülle an Komfortfeatures in heutigen Fahrzeugen gibt es im Alltag immer noch Situationen, in denen ein relativ hoher Diskomfort entsteht. Ein klassisches Beispiel hierfür ist das Ein- und Aussteigen in engen Parklücken. Insbesondere lange Fahrzeurtüren, wie sie bei zweitürigen Fahrzeugen verwendet werden, lassen sich häufig kaum weit genug öffnen, um bequem und rasch ein- und aussteigen zu können. Zudem rasten dann typische Türfeststeller nicht richtig oder nur in ungünstigen Türöffnungswinkeln ein, sodass der Fahrer beim Ein- und Ausstieg gezwungen ist, die Tür mit der Hand festzuhalten.

Unabhängig von der Tür muss der Fahrer beim Einsteigen seinen Körper in das Fahrzeug einfädeln und sein Gewicht auf den Fahrersitz kontrolliert herablassen. Beim Aussteigen muss er seinen Körper von Sitz erheben. Beide Bewegungsabläufe erzeugen gerade in engen Parksituationen, in denen durch den spitzen Türöffnungswinkel nur eine geringe Verkehrsfläche für das Aufsetzen der Füße zur Verfügung steht, einen hohen Diskomfort. Hieraus ergibt sich ein Verbesserungspotential, das von fünf Instituten der Technischen Universität München in einem gemeinsamen Projekt mit BMW im Rahmen der Kooperation CAR@TUM adressiert wird. Zwei Aspekte liegen im Fokus des Projektes:

1. Gestaltung und Anwendung interdisziplinärer Entwicklungsprozesse mechatronischer Systeme am konkreten Beispiel von multikinematischen Türkonzepten
2. Verbesserung des Ein-Ausstiegskomforts mit Hilfe eines nach ergonomischen Vorgaben entwickelten, mechatronischen Unterstützungssystems, welches aus einer aktuierten multikinematischen Tür sowie einer angetriebenen Sitzkinematik besteht.

Der Schwerpunkt dieses Beitrags liegt auf Aspekt 2, der Entwicklung von multikinematischen Türkonzepten.

Bild 1 zeigt die an dem Entwicklungsprozess beteiligten Fachgebiete sowie deren Schnittstellen. Basierend auf ergonomischen Vorgaben unter dem Aspekt der Diskomfortreduzierung werden Türtrajektorien und Türkonzepte generiert, die anhand Außenrauminformationen situationsangepasst geöffnet werden können. Ein VR-Versuchsstand simuliert und validiert vorgeschlagene Türkonzepte, wobei die durch Simulation gewonnenen Erkenntnisse weiterhin als Input für Ergonomie und Kinematik dienen.

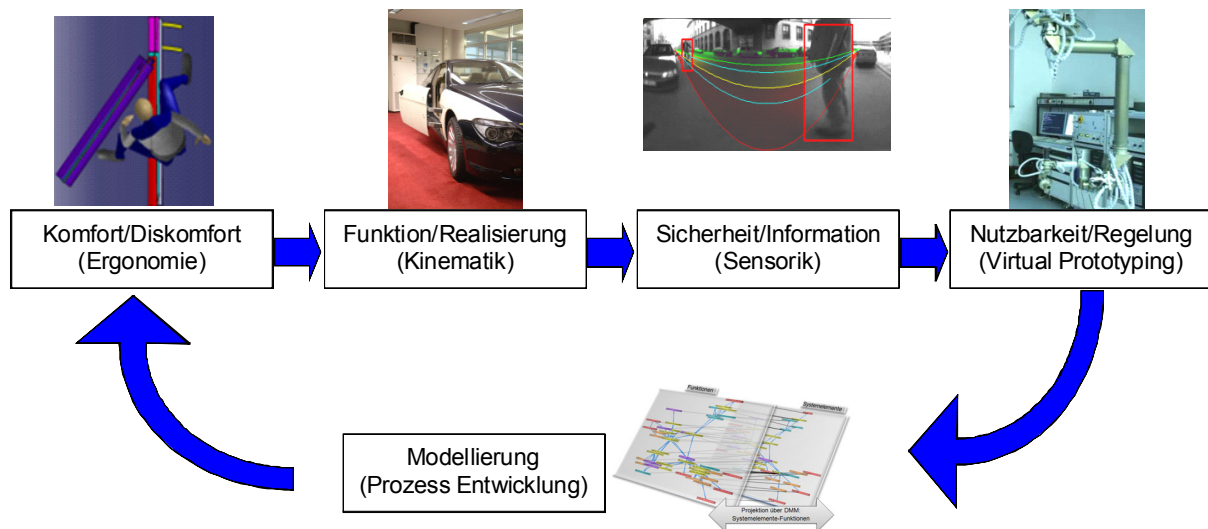


Bild 1: Schema des Entwicklungsprozesses für multikinematische Türkonzepte.

2. Stand der Technik, abgeleitete Aufgaben und Forschungsthemen

Der Großteil am Markt verfügbarer Fahrzeuge ist mit konventionellen Dreh- oder Schiebtüren mit einem Freiheitsgrad ausgestattet, wodurch eine mögliche Öffnungsbewegung konstruktiv durch deren mechanischen Aufbau festgelegt ist. Konventionelle Drehtüren bieten Vorteile wie einfacher Aufbau und intuitive Bedienung, sind aber gerade in Parksituationen mit wenig seitlichem Freiraum nachteilig. Schiebetüren ermöglichen zwar größere Verkehrsflächen, deren Einsatz ist jedoch in vielen Anwendungsfällen aufgrund höherer Komplexität und höheren Kosten nicht unbedingt sinnvoll. Daher sind Türen mit mehreren Freiheitsgraden erforderlich, deren Türbahn situationsangepasst verwendet wird [1].

Für den Benutzer eines Automobils sind die Türen in der Regel die ersten Bedienelemente, mit denen eine Interaktion erfolgt. Durch die Verwendung multikinematischer Türen kann bei unterschiedlichen Arbeitsräumen der Diskomfort erheblich reduziert werden, da die vorhandene Fläche vor der Tür besser ausgenutzt und dem Benutzer eine maximal große Ein-/Ausstiegsverkehrsfläche bereitgestellt wird.

Für die Gestaltung multikinematischer Türen kann ein Vielzahl von Ansätzen gewählt werden. Um die Anzahl der Gestaltungsmöglichkeiten auf ein sinnvolles Maß zu reduzieren, werden zunächst ergonomische Bewertungskriterien anhand einer Versuchsreihe ermittelt und mittels digitaler Menschmodelle (RAMSIS¹) im CAD visualisiert und analysiert. Unabhängig von technischen Ausschlusskriterien wird so eine Vorauswahl zur Reduzierung der Vielfalt an Gestaltungsmöglichkeiten getroffen.

¹ RAMSIS = CAE-Programm mit einem Digitalen Mensch Modell. Hier als Tool eingebettet in Catia V5

Da derartige multikinematische Türen aus ergonomischer Sicht bislang kaum untersucht worden sind, liegen in der Literatur bisher keine Erkenntnisse über diese Thematik vor, so dass allgemeine Angaben verwendet werden müssen. Weiterhin sind multikinematische Türkonzepte nur dann intuitiv und komfortabel bedienbar, wenn Benutzer auf geeignete Weise unterstützt werden. Ein weiteres Ziel ist es daher, intuitive und komfortbeeinflussende Faktoren in einer Versuchsreihe zu ermitteln.

Zur Kinematikentwicklung sind unterschiedliche Softwarewerkzeuge bekannt (z. B. SAM, Mattool) [2, 3]. Diese beschränken sich auf Mechanismen mit einem Freiheitsgrad und sind in ihren Möglichkeiten zur Eingabe notwendiger Randbedingungen bei Fahrzeugtüren eingeschränkt. Weiterhin unterscheiden sich geometrische Randbedingungen in Abhängigkeit vom Fahrzeugtyp und Variante, woraus unterschiedliche Anforderungen an die Kinematik resultieren. Zudem können unterschiedliche Türbahnen nur mit rechnerüblichen Werkzeugen (Tastatur und Maus) eingegeben werden, was einen Bezug zum betrachteten Türsystem erschwert.

Generierte Kinematiken und Ergebnisse des darauf folgenden Syntheseprozesses werden mittels Skizzen oder Graphen dargestellt, die zur näheren Untersuchung des Mechanismus in CAD-Systeme oder Hardwareprototypen zur Erhöhung der Anschaulichkeit [4] übertragen werden müssen. Um daher kurze Entwicklungszeiten und höchste Flexibilität zu bieten, ist eine Entwicklung angepasster Werkzeuge zur Kinematiksynthese notwendig.

Konventionelle, iterative Produktentwicklungsprozesse (z.B. nach VDI 2206) basieren auf der Verwendung physischer Prototypen, deren Bau häufig zeitintensiv und teuer ist. Daher sind in frühen Phasen an deren Stelle multimodale Simulationen vorteilhaft, wie es in [5] für konventionelle Fahrzeugtüren angewendet wird. Allerdings ist bisher keine Anwendung bekannt, bei der Fahrzeugtüren mit mehr als einem Freiheitsgrad haptisch simuliert worden sind, was jedoch für die Überprüfung von vorgeschlagenen Kinematikkonzepten notwendig ist. Aus diesem Grund werden Konzepte an einem VR-Versuchsstand simuliert, was eine Durchführung von Probandenversuchen und damit eine Eingrenzung der weiterzuentwickelnden Kinematikvarianten basierend auf ergonomischen Erkenntnissen zur Bestimmung komfortbeeinflussender Faktoren ermöglicht.

Die Erfassung von Umgebungsinformationen ist eine Voraussetzung für ein sicheres Türöffnen. Gerade in engen Parksituation können Türen mit Hindernissen wie Wänden oder anderen Fahrzeugen kollidieren. Daher muss der seitliche Fahrzeugaußenraum vollständig auf statische und dynamische Hindernisse überwacht werden, wozu es unterschiedliche Sensorkonzepte wie Lidarsensoren, Radarsensoren oder Ultraschallsensoren gibt [6,7]. Diese Sensorkonzepte ermöglichen eine schnelle Hinderniserfassung und Berechnung von

Distanzen, nachteilig ist aber deren eingeschränkter Erfassungsbereich. Dafür sind sehr viele von diesen Sensoren notwendig; Ziel der Sensorik ist hier, mit einer geringen Anzahl den Seitenbereich des Fahrzeuges zu sensieren.

Komplexe mechatronische Systeme wie das hier vorgestellte System zur Ein- und Ausstiegsunterstützung stellen durch Integration von Elektronik und Software in ein mechanisches System zusätzliche Funktionalitäten zur Verfügung. Jedoch verursacht die synergetische Integration der beteiligten Disziplinen Maschinenbaus und Elektrotechnik ein signifikant höheres Komplexitätsniveaus des gesamten Systems [8]. Aktuelle Methoden zur Modellierung multidisziplinärer Entwicklungsprozesse [9] bieten zu wenig Unterstützung bei der Bildung eines übergreifenden Systemverständnisses und der transparenten Darstellung disziplinübergreifender Meilensteine. Grund hierfür ist die unterschiedliche Beschreibung und Darstellung eines Systems in Maschinenbau, Elektro- und Softwaretechnik. Im Maschinenbau werden mechanische Systeme komponenten-orientiert beschrieben und abstrahiert, während im Gegensatz dazu in der Elektro- und Softwaretechnik Systeme funktionsorientiert dargestellt werden. Um diese Defizite zu beheben, ist die Entwicklung eines generischen Produktentwicklungsprozesses sowie einer interdisziplinären und integrierten Produkt- und Prozessmodellierungsmethodik notwendig.

3. Methoden, Experimente und Ergebnisse

Aufgrund fehlender ergonomischer Erkenntnisse bezüglich multikinematischen Türen können lediglich allgemeiner gefasste Vorgaben hinsichtlich der Türgestaltung ermittelt werden., z.B. zur Ermittlung einer optimalen Lage für Türgriffe. Nach [10] wird für Außengriffe eine Breite von 127mm und ein Abstand von mindestens 45mm zur Karosserie empfohlen. Bei einer Einstiegsöffnung soll zudem eine Breite von 875mm und eine Höhe von 825mm erreicht werden. Hinsichtlich der maximal aufzubringenden Bedienkräfte des Arm-Schulter-Systems für Stellteile empfehlen Schmidke und Rühmann [11] für die schwächste, auslegungsrelevante Frau (5. Perzentil) für das sitzende Öffnen einer Tür im Allgemeinen eine Kraft von 144N und für das Schließen 186N. Für die genauere Ermittlung der konstruktiven Lage der Türgriffe können im CAD mit RAMSIS in Catia V5 Grenzgeometrien ermittelt und abgebildet werden (siehe Bild 2a, 2b).

Für die Bestimmung weiterer komfortbeeinflussender Türparameter wurden im Rahmen einer Versuchsreihe mit 27 Probanden sieben konventionelle Drehtüren (Audi A2, Bj. 01; Audi A6, Bj. 05; Alfa Romeo 156, Bj. 03; VW Golf, Bj. 99; BMW 3er, Bj. 99; BMW 6er, Bj. 05 und BMW 7er, Bj. 02) bei drei definierten Parklückenbreiten (600mm; 450mm und frei) untersucht (siehe Bild 2c). Dabei wurden alle Eindrücke der Probanden beim Bedienen der

Türen und beim Ein-/Aussteigen aufgezeichnet sowie in einem Fragebogen Parameter, wie beispielsweise Einstiegsfreiraum oder Türgewicht, auf ihre Relevanz eingestuft. Als wichtigste Nennungen seien Einstiegsfreiraum, Erreichbarkeit der Griffe und Kraftaufwand genannt (siehe Bild 2d).

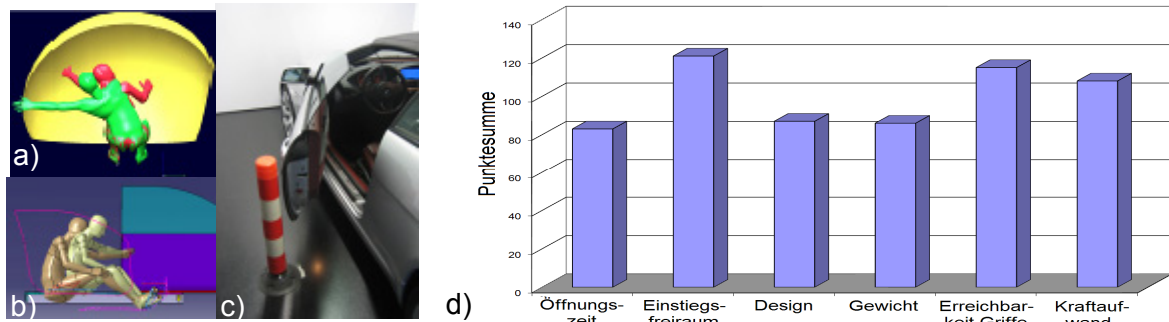


Bild 2: a), b) Grenzgeometrien, c) Türöffnung (600mm), d) Punktesumme der gruppierten Parameter

Ausgehend von Gruppierung und Gewichtung der beim Versuch genannter Einflussparameter (Bild 2d) werden nun diejenigen Parameter abgeleitet, die mittels RAMSIS für eine Bewertung von fünf möglichen, multikinematischen Türen im CAD am geeignetsten sind. Dazu wird untersucht, bei welchem Konzept die oben genannten Parameter wie gut abgebildet werden. Die fünf näher betrachteten Türkonzepte sind in Bild (3.1 – 3.5) dargestellt.

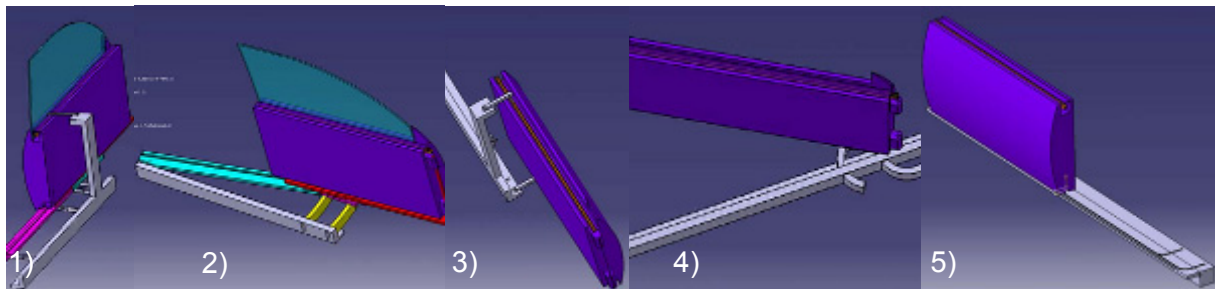
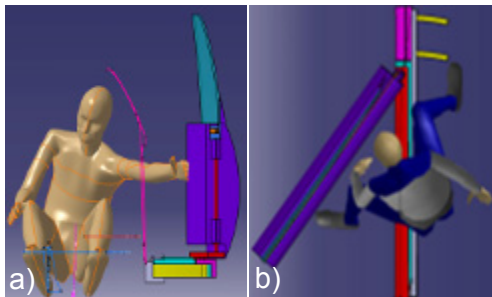


Bild 3: Konzept 1): Ausschwenkbarer Doppelschweller, Konzept 2): Ausdrehbarer Schweller, Konzept 3): Doppelgelenk, Konzept 4): Doppelbogen und Konzept 5): Schiebetür.

Für die relative Bewertung der fünf Türen im CAD werden als Bewertungskriterien eine mögliche Tür rasterung, Beweglichkeit, Verkehrsfläche und der möglichen Türgriffposition untersucht (Bild 4a, 4b). Die Übersicht, im Besonderen die Punktevergabe, stellt eine rein ergonomische Einschätzung unabhängig jeglicher Realisierbarkeit und Wirtschaftlichkeit bezüglich genannter Konzepte dar. Konzepte 3 und 4 (Doppelgelenk und Doppelbogen)

zeigen, dass das bei den Probandenversuchen meist genannte Kriterium, die Rastermöglichkeit, wichtig gegenüber anderen Konzepten ist, und Rastermöglichkeiten nur bei Schwenkbewegungen realisierbar sind.



Konzept	Gew.	1	2	3	4	5
Raster/Stufenlos/Zwischenraster	3	-2	-1	2	2	-1
Gewicht/Schließen/Bewegbarkeit	2	1	1	-1	0	1
Platz/störende Bauteile/Länge	1	-2	-1	2	1	0
Griff innen/pos.	1	-1	0	-1	0	1
Erg.	-7	-2	5	7	0	

Bild 4: a) Griffposition (innen), b) Freiraum, Übersicht Konzeptvergleich/Gewichtung.

Mit diesen Konzepten sind verschiedene Türöffnungsweiten möglich. Bei Konzepten 1, 2 und 5 müssen erst die Schienen für eine Rasterung ausgefahren werden. Auch hinsichtlich des freigegebenen Ein-/Ausstiegsaums, insbesondere des Fußraumes, sind Schienen eher hinderlich. Als Gesamtergebnis zeigen Konzepte 3 und 4 einen deutlichen Punktevorsprung den anderen Konzepten gegenüber und werden daher aus ergonomischer Sicht befürwortet und als Ansatz für Türkinematiken weiter verfolgt.

In einem weiteren Schritt werden zur Unterstützung der Synthese von Türkinematiken Methoden und Werkzeuge definiert und in einem Entwicklungssystem realisiert. Dieses zeichnet sich durch die frühzeitige Berücksichtigung von geometrischen Randbedingungen sowie die Verknüpfung zu Rapid Prototyping Prozessen aus [4]. Zudem wird ein Roboter eingesetzt, der als Eingabemedium sowohl eine gewünschte Bewegungsbahn für die Synthese einliest als auch die tatsächliche Bahn der gefundenen Mechanismen darstellt. Dafür ist ein Türmodell am Roboterflansch befestigt, welches entweder durch den Benutzer oder entlang vorausberechneter Bahnen bewegt wird.

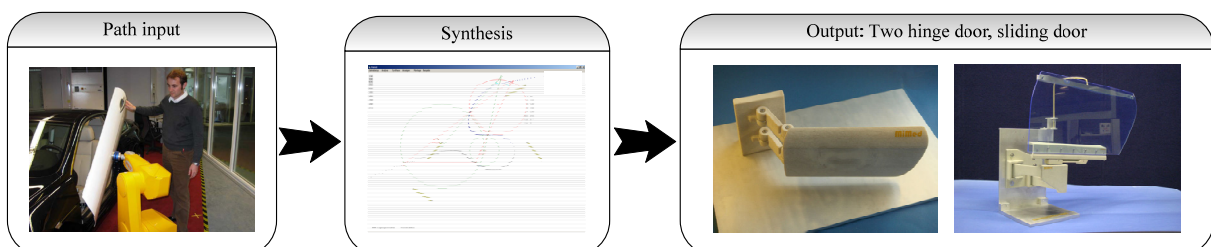


Bild 5: Vorgehen bei der Kinematikentwicklung (Eingabe von Randbedingungen, Synthese, Prototypenausgabe).

Dieser Prozess ermöglicht die Generierung einer großen Anzahl unterschiedlicher Mechanismen, welche die vorgegebene Türbewegung in unterschiedlicher Qualität annähern (siehe Bild 5). Unter Zuhilfenahme der erweiterten Ausgabemöglichkeiten können neben den objektiven auch subjektive Kriterien zur Bewertung herangezogen werden. Die beiden dabei favorisierten Konzepte sowie als Referenz dazu eine gewöhnliche Schiebetür zeigt Bild 6.

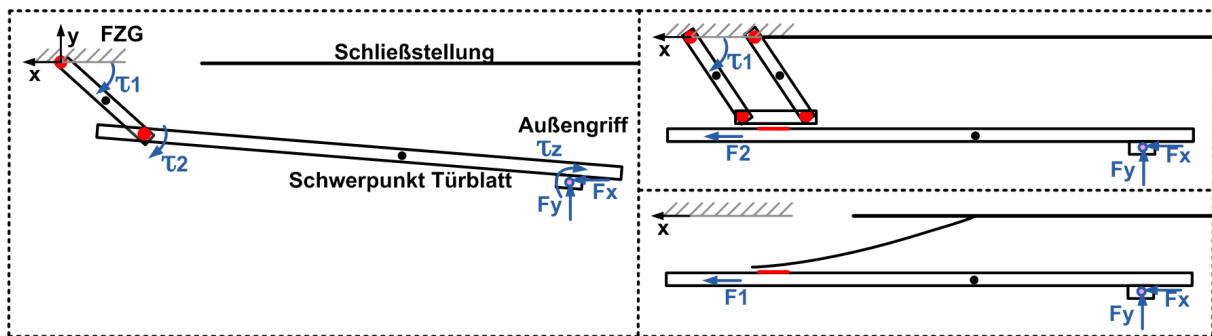


Bild 6: Skizze von drei Türkinematiken, die am VR-Versuchsstand evaluiert werden. Links: Zweigelenktür, rechts oben: Hybride Schwenk-/Schiebetür, rechts unten: Schiebetür

Diese Türkinematiken werden nun an einem VR-Versuchsstand simuliert (siehe Bild 7) und durch Probandenversuche evaluiert. Der VR-Versuchsstand ermöglicht neben visuellem Feedback über den Roboterarm ViSHaRD10 [12] eine realitätsnahe haptische Interaktion eines Bedieners mit dem Modell einer Fahrzeugtür.

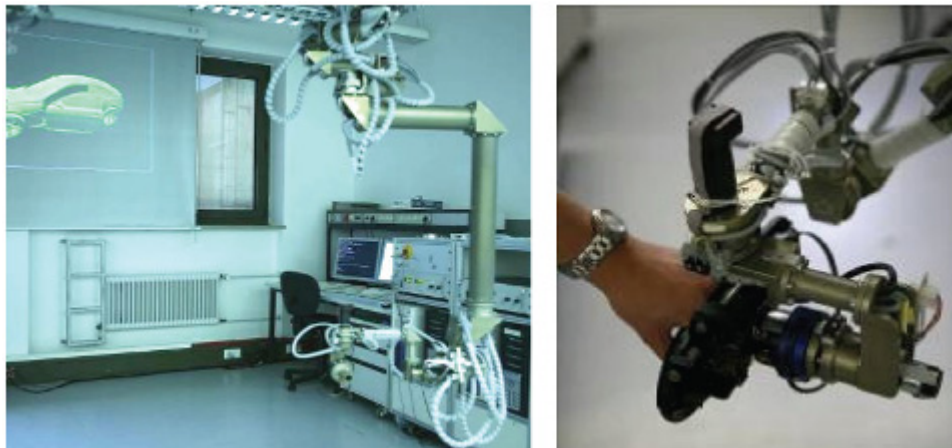


Bild 7: VR-Versuchsstand mit visuellem und haptischem Feedback. Als Endeffektor des kraft- und positionsgeregelten Roboterarms dient der Außengriff einer Fahrzeugtür.

Die haptische Simulation basiert auf einer Admittanzregelung: Die generalisierte Interaktionskraft \mathbf{F}_B des Bedieners wird über einen Kraft-Momenten-Sensor gemessen. Sie dient als Eingang eines Türmodells, dass auf Basis der Bewegungsgleichungen der

modellierten Tür daraus eine Türbewegung \mathbf{x}_{sim} errechnet. Diese Bewegung wiederum wird dann über eine Positionsregelung am Roboterarm dargestellt. Durch die Verwendung eines in Serienfertigung hergestellten Außengriffs einer Fahrzeugtür als Endeffektor des Roboters wird sichergestellt, dass neben einer realitätsgetreuen, kinesthetischen Simulation auch ein erwartungskonformer taktiler Eindruck entsteht.

Um nicht nur die reine Mechanik der Türkonzepte, sondern das vollständige Verhalten der später geregelten, aktuierten Fahrzeugtüren simulieren zu können, wurde das Konzept der Aktiven Admittanzregelung vorgeschlagen [13]. Diese erweitert das konventionelle, rein auf Bewegungsgleichungen basierte Admittanzmodell um ein Modell der Aktuierung und Regelung des Systems. Auf dieser Basis kann berechnet werden, welche generalisierten Aktuatorkräfte \mathbf{F}_A zusätzlich zur Bedienerinteraktionskraft \mathbf{F}_B auf das Türmodell wirken müssen, um eine realistische Bewegung am VR-Versuchsstand darzustellen. In [14] wurde darauf aufbauend ein Konzept für die intelligente Steuerung und Regelung von Fahrzeugtüren mit mehreren Freiheitsgraden entwickelt.

Um zu ermitteln, ob und in welchem Umfang die vorgeschlagenen Kinematiken Hybride Schwenk-/Schiebetür und Zweigelenktür als vorteilhafte Konzepte wahrgenommen werden, sollen diese in verschiedenen Ausprägungen (Szenarien) am VR-Versuchsstand evaluiert werden. Als Referenz dient dabei eine Schiebetür mit nur einem mechanischen Freiheitsgrad. Dafür werden folgende fünf Evaluations-Szenarien definiert:

Szenario1: Zweigelenktür mit durch Regelung festem Drehzahlverhältnis $\mathbf{q}_1/\mathbf{q}_2=1$

Szenario2: Zweigelenktür mit durch Regelung festem Drehzahlverhältnis $\mathbf{q}_1/\mathbf{q}_2=0,2$

Szenario3: Hybride Schwenk-/Schiebetür mit nur einem DOF ($\mathbf{q}_2=0$ für $\mathbf{q}_1 < \mathbf{q}_{1,max}=90^\circ$)

Szenario4: Hybride Schwenk-/Schiebetür mit durch Regelung unbeschränkten DOF

Szenario5: Schiebetür mit nur einem ungeregelten DOF

Für jedes Szenario sollte mittels einer CP10-Skala eine Bewertung zwischen 1 Punkt („sehr schlecht“) und 10 Punkten („sehr gut“) vergeben werden. Die Reihenfolge der Szenarien sollte zufällig ausgewählt werden, um Reiheneffekte zu vermeiden. Die Ergebnisse der Bewertung der einzelnen Szenarien durch 18 Probanden sind in Tabelle 1 dargestellt.

Die absolute Bewertung entspricht dabei direkt der von den Probanden vergebenen Punktezahlen (1 bis 10), woraus sich eine relative Rangfolge (5.0 stets bevorzugt, 1.0 stets abgelehnt) ableiten lässt. Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass Szenario1 das mit Abstand am meisten bevorzugte Konzept ist, während Szenario5 mit Abstand am wenigsten präferiert wird. Die beiden vielversprechendsten Konzepte zur Realisierung von Türen mit mehreren Freiheitsgraden, die *Zweigelenktür* sowie die *hybride Dreh-/Schiebetüre*, werden abschließend prototypisch realisiert.

Tabelle 1: Absolute und Relative Bewertung der fünf Szenarien durch 18 Probanden

	Kenngrößen	Szenario1	Szenario2	Szenario3	Szenario4	Szenario5
Absolute Bewertung (1 bis 10)	Mittelwert	7,83	6,72	6,11	6,94	5,72
	Std.Abw.	1,10	2,02	1,68	1,43	2,35
Relative Bewertung (1 bis 5)	Mittelwert	3,28	2,39	2,22	2,67	2,00
	Std.Abw.	0,83	1,04	1,00	1,08	1,33

An der Zweigelenktür ist ein zusätzlicher Lenker zwischen Karosserie und Türe eingebracht (Bild 8), wodurch der Freiheitsgrad der Türe auf zwei erhöht wird. Die resultierende Gesamtdrehachse (Drehpol) kann so situationsabhängig nach vorne bzw. zur Seite verschoben werden. Eine rein manuelle Bedienung dieser Kinematik ist anfällig gegen Bedienfehler (Kollision der Tür mit der Karosserie). Daher muss der Freiheitsgrad des Systems beschränkt werden. Dies kann durch mechanische Kopplung oder unter Verwendung gesteuerter Antriebe geschehen. Diese mechatronische Realisierung ermöglicht weiterhin ein automatisches, situationsangepasstes Öffnung der Tür auf Basis von Umgebungsinformationen.

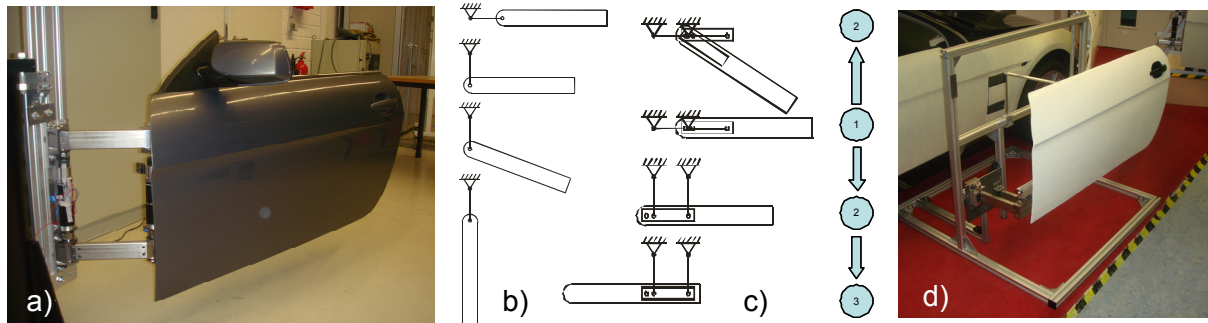


Bild 8: a): Aufbau und Funktion der Zweigelenktür als mechanischer Prototyp des Türkonzeptes; b): Kinematischer Aufbau und Bewegungsablauf der Tür; c): Aufbau und Funktion der hybriden Dreh-/Schiebetüre als mechanischer Prototyp des Türkonzeptes; d): Kinematischer Aufbau und Bewegungsablauf der Tür.

Die hybride Dreh-/Schiebetüre besitzt ebenfalls mehr als einen Freiheitsgrad und ermöglicht damit zwei unterschiedliche Öffnungsbewegungen. So ist zum einen die Öffnung als konventionelle Drehtür, zum anderen als nach vorne öffnende Schiebetür, möglich. Analog zur Zweigelenktür ist auch hier zur Sicherstellung einer definierten Öffnungsbewegung eine Kopplung der beiden Freiheitsgrade notwendig. Weiterhin bietet die Türkinematik die

Öffnungsbewegung einer konventionellen Drehtür. Aufgrund der erhöhten Flexibilität sowie der besseren ergonomischen Bewertung wurde das Konzept der Zweigelenktür für die Realisierung im Gesamtprototyp ausgewählt.

Um ein situationsangepasstes Türöffnen zu ermöglichen und um eine Überwachung des Fahrzeugseitenbereiches zu gewährleisten, wird eine omnidirektionale Kamera, die ein sehr großes Sichtfeld gegenüber normalen Kameras besitzt, zur vollständigen Überwachung des seitlichen Fahrzeugbereiches in die Fahrzeugtüre integriert. Nach einer Bildtransformation können omnidirektionale Kameras wie normale Kameras verwendet werden [15].

Mittels Einparkbewegungen, Spiegelbewegungen oder Türbewegungen [14] können 3D Hindernisinformationen mittels des Motion Stereoverfahren [16, 17] generiert werden. Daraus resultierende Daten werden an die Regelung der Tür weitergegeben, so dass eine situationsangepasste Türbewegung gefahrlos möglich ist. Bild 10 zeigt den vollständig überwachten Fahrzeugaußenraum sowie die frühzeitige Detektion und Anzeige von Hindernissen.

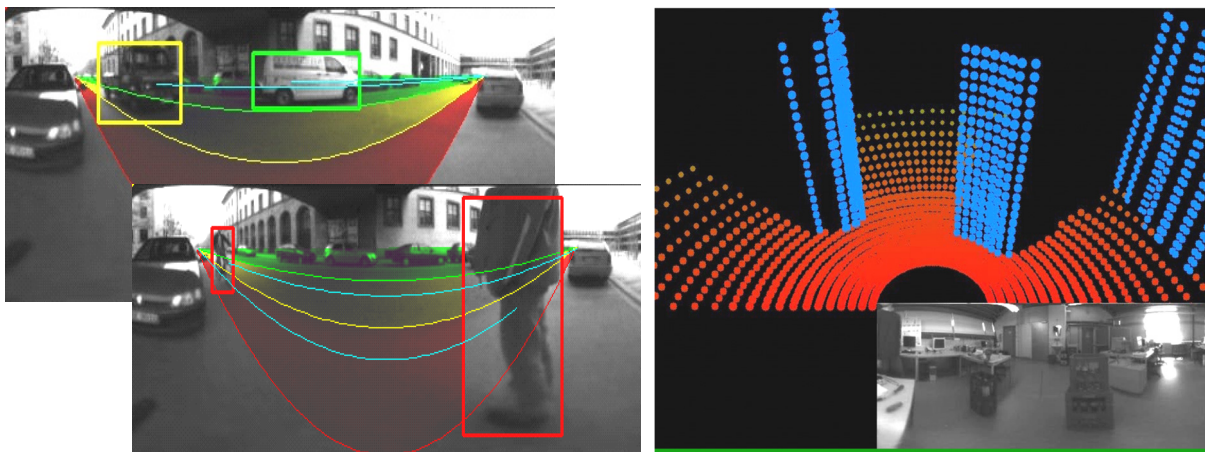


Bild 10: Links: Detektion von dynamischen Hindernissen wie Fahrzeuge und Fußgänger sowie Vorausberechnung des Gefährdungsgrades. Rechts: Generierung von 3D Hindernisinformationen zum situationsangepassten Türöffnen.

Zusammenfassend erfordert die Entwicklung komplexer und robuster mechatronischer Systeme ein verbessertes interdisziplinäres Systemverständnis. Insbesondere die Schritte der Funktionsprüfung im Entwicklungsprozess erfordern es, die Ergebnismfänge aller beteiligten Disziplinen im Entwicklungsprozess frühzeitig zeitlich zu integrieren und inhaltlich aufeinander abzustimmen. Dazu müssen die Entwicklungsprozesse aller betroffenen Disziplinen effektiver als bisher üblich miteinander verknüpft werden. Demzufolge wurde ein ,Ansatz zur integrierten Produkt- und Prozessmodellierung entwickelt, der die zeitliche und inhaltliche Transparenz zwischen den unterschiedlichen Disziplinen erhöht, Abhängigkeiten

zwischen den Disziplinen im Prozess aufzeigt und funktions- mit der komponentenorientierten Sichtweise miteinander verknüpft. Weiterhin werden Systemelemente mit den Prozessschritten über Ergebnisumfänge, die das Arbeitsergebnis von Prozessschritten darstellen, verknüpft. Das Ergebnis ist somit ein integriertes Produkt- und Prozessmodell (siehe Bild 11). Um die Komplexität der Betrachtungsobjekte, die aus der Anzahl der Elemente, der Anzahl Beziehungen zwischen diesen Elementen sowie den Verknüpfungen zwischen Elementen unterschiedlicher Domänen resultiert, zu beherrschen, wird eine Multi Domain Matrix (MDM) [18] verwendet.

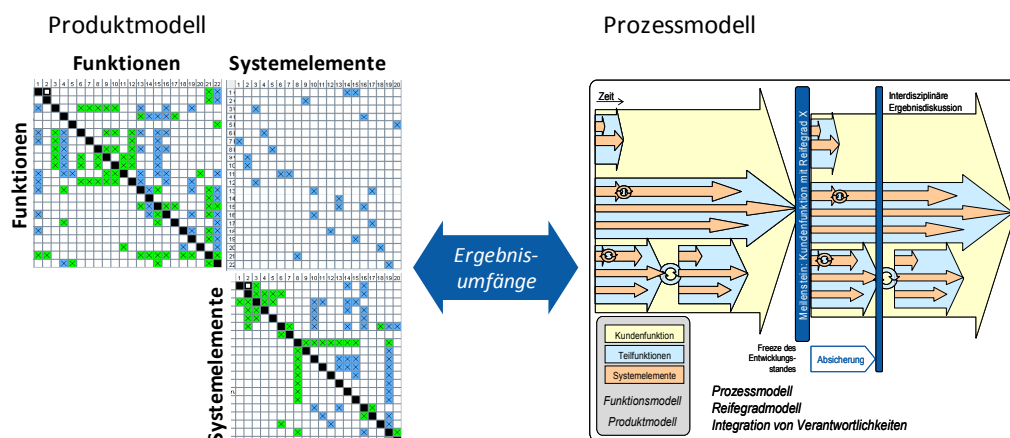


Bild 11: Verknüpfung von Produkt- und Prozessmodell

Das entwickelte Produktmodell besteht aus zwei Betrachtungsdomänen, der Funktions- und der Komponenten- oder Systemelementdomäne. Durch die MDM-Darstellung können sowohl die komplexen Abhängigkeiten innerhalb einer Domäne als auch die Verknüpfungen zwischen unterschiedlichen Domänen analysiert und optimiert werden [18]. Davon ausgehend kann der weitere Entwicklungsablauf geplant werden. Entwicklungsprozesse werden chronologisch strukturiert, indem funktionsabprüfende Meilensteine und Meilensteine zur Freigabe von Dokumenten im Prozess bestimmt werden. Um dabei den Erfüllungsgrad einer Kundenfunktion abzu prüfen zu können, müssen alle dazugehörige technischen und Elementarfunktionen, die vom Kunden nicht direkt wahrgenommen werden, erfüllt sein. Demzufolge müssen alle Systemelemente, die mit den betroffenen Elementarfunktionen verknüpft sind, den benötigten Reifegrad erreicht haben. Diese Systemelemente werden von unterschiedlichen Verantwortlichen oder Disziplin verantwortet und daher in parallelen, bisher nicht optimal synchronisierten Prozessen entwickelt. Weiterhin ist die zeitliche Dauer des Entwicklungsprozesses eines Systemelements je nach Disziplin unterschiedlich, von daher muss die chronologische Korrelation dieser Prozesse in einem mechatronischen

Prozessmodell ersichtlich sein. Darüber hinaus können mit dem MDM-Ansatz Zusammenhänge zwischen Meilensteinen und Systemelementen ersichtlich gemacht werden. Dies unterstützt die Sichtweisen der jeweiligen Disziplin und ermöglicht eine transparente Gestaltung von Abhängigkeiten mit anderen Verantwortungsstellen. Die Integration von Produktreifegraden kann über die Betrachtung von Systemelementen erreicht werden [8].

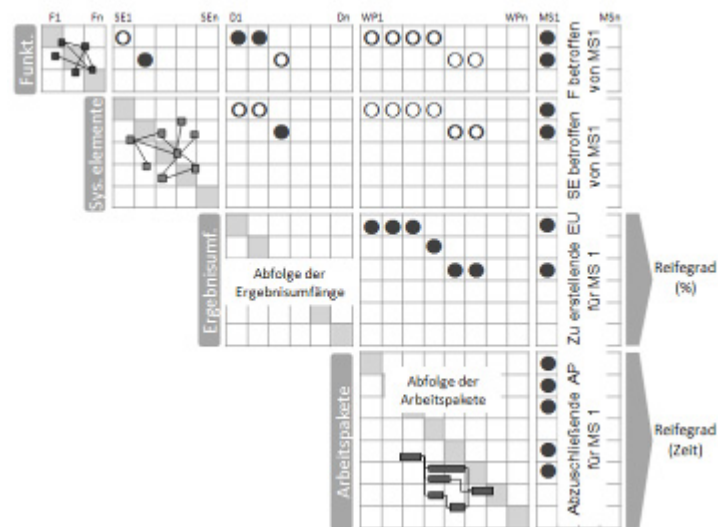


Bild 12: Integriertes Produkt- und Prozessmodell

Die Verknüpfung des Produkt- mit dem Prozessmodell erfolgt, wie bereits beschreiben, über Ergebnisumfänge als Ergebnisse von Arbeitspaketen wie technische Zeichnungen oder Modelle. Ergebnisumfänge können sowohl mit den Arbeitspaketen im Prozessmodell als auch mit den betroffenen Systemelementen im Produktmodell direkt verknüpft werden und repräsentieren die logische und zeitliche Abfolge von Arbeitsergebnissen. Der zeitliche Abstand zwischen zwei Meilensteinen wird von der Dauer der Arbeitspaketen bestimmt, die notwendig sind um die Ergebnisumfänge der betrachteten Entwicklungsphase zu liefern. Die Abfolge der Arbeitspakete kann dabei von der Abfolge der Ergebnisumfänge abgeleitet werden. Über die Betrachtung der Ergebnisumfänge und deren Fortschritt können den Produktreifegraden Prozentangaben oder zeitliche Aussagen zugeordnet werden.

4. Zusammenfassung und Diskussion

In diesem Artikel wurde ein multidisziplinärer Entwicklungsprozess für multikinematische Fahrzeugtüren vorgestellt. Multikinematischen Türen erlauben ein situationsangepasstes Türöffnen und Schließen und können gerade in engen Parklücken den Diskomfort beim Ein- und Aussteigen entscheidend reduzieren. In einem ersten Schritt wurden dazu ergonomische

Vorgaben zur Gestaltung von multikinematischen Türen erstellt und mittels Probandenversuchen evaluiert. Aufbauend auf einer Versuchsreihe mit sieben Fahrzeugtüren wurden komfortbeeinflussende Faktoren wie Einstiegsfreiraum, Erreichbarkeit der Griffe und Kraftaufwand ermittelt und damit fünf mögliche Türkonzepte und Türtrajektorien hinsichtlich ergonomischen Kriterien bewertet. Mit Hilfe eines neuartigen Synthesetools, welches wichtige Randbedingungen bei der Kinematiksynthese berücksichtigt, wurden anschließend zu den am besten bewerteten Türtrajektorien geeignete Kinematiken erstellt. An einem VR-Versuchsstand wurden diese simuliert und eine intuitive und komfortable Bedienbarkeit anhand unterschiedlicher Unterstützungsszenarien getestet. Dabei zeigte sich deutlich, dass multikinematische Türen nur dann intuitiv und komfortabel betätigt werden können, wenn Benutzer durch eine Türregelung auf geeignete Weise unterstützt werden. Abschließend wurden die beiden besten Türkonzepte an einem Versuchsfahrzeug prototypisch realisiert.

Um die Sicherheit beim Türöffnen zu gewährleisten und um ein situationsangepasstes Türöffnen zu ermöglichen, wurde ein omnidirektionales Kamerasystem vorgestellt, welches in die Tür integriert den seitlichen Fahrzeugaußenraum vollständig überwacht und statische und dynamische Hindernisse extrahiert.

Weiterhin war aufgrund unterschiedlicher Disziplinen ein neuer Ansatz zur integrierten Produkt- und Prozessmodellierung von mechatronischen Produkten zur Erhöhung der Transparenz von Abhängigkeiten bei der Entwicklung komplexer Produkte notwendig. Durch die Integration unterschiedlicher Sichtweisen auf ein System, die Verknüpfung der Domänen untereinander und die Zuordnung von Verantwortlichkeiten kann der Einfluss von Änderungen bei einem Systemelement oder einer Funktion auf andere Elemente und auf den Prozess sehr schnell sichtbar gemacht werden.

Literaturverzeichnis

- [1] Fischer, M.; Richter, C.; Irlinger, F.; Pollehn, D.; Lüth, T. C. (2007): Reduktion des Tür-Diskomforts beim Ein- und Ausstieg in engen Parksituationen. ATZ – Automobiltechnische Zeitschrift, 109 09/2007, Vieweg Verlag, Wiesbaden, S. 820-29.
- [2] Rankers, A. M. (2002): SAM (Simulation and Analysis of Mechanisms). Contribution to the ASME 2002 Design Engineering Technical Conferences (Special Session on Computer Aided Linkage Design). Canada, Montreal.

- [3] Berger, M.; Matthes, J. (2006): MATTOOL – Eine Sammlung modularer Algorithmen zur rechnergestützten Antriebs- und Getriebeauslegung mittels Mathcad. VDI Berichte 1966, VDI-Verlag, Düsseldorf, S. 403–21.
- [4] Fischer, M.; Donner, P.; Richter, C.; Irlinger, F.; Lüth, T. C. (2008): Eine durch Funktionsprototypen unterstützte Methode zur Kinematikentwicklung. VDI-Berichte 2050. VDI-Verlag, Düsseldorf, S. 227–40.
- [5] Buttolo, P.; Stewart, P.; Marsan, A.: “A haptic hybrid controller for virtual prototyping of vehicle mechanisms” in Proceedings of the 10th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 249 - 254, 2002.
- [6] DE19533804A1, Patent, 1996
- [7] DE10003220A1, Patent, 2001
- [8] Braun, S. C., Diehl, H., Petermann, M., Hellenbrand, D., Lindemann, U.: Function Driven Process Design for the Development of Mechatronic Systems. Proceedings of the 9th International DSM Conference, S. 161-173, München 2007
- [9] VDI 2206: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. Berlin: Beuth 2004
- [10] Woodson, W.E., Human Factors Design Handbook, McGrawHill, New York, 1981
- [11] Rühmann, H. und Schmidtke, H.: Isometrische Maximalkräfte von Männern und Frauen an Stellteilen und Betriebsmitteln, 1989. Ergonomische Studien, Nr.31, Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung, Koblenz 1990
- [12] Ueberle, M.; Mock, N.; Buss M.: “ViSHaRD10, a novel hyper-redundant haptic interface” in Proceedings of the 12th International Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 58 - 65, 2004.
- [13] Strolz, M; Buss, M.: “Virtual Prototyping System for the Haptic Rendering of Large Actuated Mechanisms” in Haptics: Perception, Devices and Scenarios, LNCS 5024, Springer, Heidelberg, 712 - 717, 2008.
- [14] Strolz, M.; Mühlbauer, Q.; Scharfenberger, C.; Färber, G.; Buss, M.: “Towards a Generic Control System for Actuated Car Doors with Arbitrary Degrees of Freedom“ in Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 391 - 397, 2008.
- [15] C. Scharfenberger, F. Böhm and G. Färber, “IMAGE RECTIFICATION: Evaluation of Various Projections for Omnidirectional Vision Sensors Using the Pixel Density”, In Proceedings of the International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications (2009), Lisbon, Portugal, February 2009
- [16] B. Lucas and T. Kanade, “An iterative image registration technique with an application with application to stereo vision”, in IJCAI81, 674-679, 1981

- [17] A. Ogale and Y. Aloimonos, "Robust contrast invariant stereo correspondence", Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2005), 819-824, 2005
- [18] Maurer, M.: Structural Awareness in Complex Product Design. TU – München, Dissertation, 2007