

Methodische Entwicklung mobilitätserhaltender Produkte am Beispiel einer Aufstehhilfe

Daniel Krüger, Sandro Wartzack¹, Sandra Eilmus, Dieter Krause², Johanna Walter, Kristin Paetzold³,

¹Universität Erlangen-Nürnberg, KTmfk, Erlangen
krueger@mfk.uni-erlangen.de

²Universität Hamburg-Harburg, PKT, Hamburg-Harburg
sandra.eilmus@tuhh.de

³Universität der Bundeswehr München, Neubiberg
kristin.paetzold@unibw.de

Abstract: In unserer Gesellschaft ist eine Veränderung der Altersstruktur zu beobachten, ältere Menschen machen einen immer größeren Anteil an der Gesamtbevölkerung aus. Der Erhaltung von Mobilität im Alter wird zukünftig eine steigende Bedeutung zukommen. Mobilität umfasst neben der Bewegungsfähigkeit auch den Transport von Dingen, die Interaktion mit der Umwelt oder die Kommunikation mit Anderen, was eine Teilhabe am gesellschaftlichen Leben erst ermöglicht. Mobilität ist damit ein wichtiger Aspekt für Lebensqualität. Infolge von Krankheit oder natürlichem Altern sind Menschen von Einschränkungen der motorischen Fähigkeiten betroffen, die ein selbstständiges Aufstehen aus sitzender Haltung schwierig machen. Der Beitrag zeigt am Beispiel einer Aufstehhilfe, die der Entlastung des Bewegungsapparates dient und damit teilweise die Wiederherstellung der Mobilität ermöglicht, welche besonderen Herausforderungen bei der Entwicklung von Produkten zu diesem Zweck bestehen. Es wird ein methodisches Framework vorgeschlagen, das Aspekte der Anforderungserhebung, die Simulation von Mensch-Maschine Interaktionen mittels digitaler Menschmodelle sowie Methoden des Variantenmanagements bereitstellt.

Keywords:

seniorengerechte Produktentwicklung, Nutzerbeschreibung, Variantengestaltung, biomechanische Simulation

1 Herausforderungen für die gezielte Mobilitätsunterstützung älterer Menschen

Mithilfe technischer Systeme sind wir in der Lage, die Lebensqualität der Menschen zu erhalten, sodass z.B. ein Leben im vertrauten häuslichen Umfeld auch im hohen Alter ohne zusätzlichen Betreuungsbedarf denkbar ist. Die Entwicklung von technischen Systemen für diese Nutzergruppe stellt eine Herausforderung dar, weil ältere Menschen aufgrund ihrer Lebenserfahrungen, ihrer Sozialisierung aber auch aufgrund von alters- und krankheitsbedingten Leistungseinschränkungen nicht nur sehr komplexe sondern auch sehr individuelle Anforderungen an Produkte stellen. Um die Akzeptanz der technischen Systeme beim Nutzer sicher zu stellen, ist daher eine gezielte Anpassung dieser an deren spezifischen Bedürfnisse und Anforderungen von großer Bedeutung. Hinzu kommt, dass oberste Priorität hat, den Menschen in seiner Leistungsfähigkeit zu trainieren, ihn zu motivieren diese zu erhalten bevor durch das technische System unterstützt oder gar kompensiert wird. Ausgangspunkt für den Syntheseprozesses für Mobilitätsunterstützung bildet eine detaillierte Nutzeranalyse. Hierbei sind folgende Aspekte zu berücksichtigen:

Mit dem Alterungsprozess verbunden sind **Einschränkungen der Leistungsfähigkeit** des Menschen, die sich prinzipiell in Kategorien motorisch, sensorisch und kognitiv unterscheiden lassen. Unter Berücksichtigung der zu erfüllenden Funktion durch das technische System gilt es einerseits zu überlegen, welche Fähigkeiten vom Nutzer zur Bedienung bzw. zur Funktionserfüllung erwartet werden. Andererseits sollen die technischen Funktionen den Nutzer in seiner selbständigen

Lebensführung unterstützen. Daher bedarf es einer Analyse der Leistungsfähigkeit in Bezug auf die technische Funktionalität des Produktes. Im Bezug zu der zu entwickelnden Aufstehhilfe bedeutet dies, dass neben der Analyse der beim Aufstehen beanspruchten Muskelgruppen auch überlegt werden muss, welche natürlichen Kompensationsmechanismen für diese Aktivität vom Nutzer entwickelt werden bzw. welche Entlastungsstrategien der Körper beim Aufstehen entwickelt. Hieraus kann abgeleitet werden, ob eine direkte Hilfe im Aufstehen notwendig ist oder ob die indirekte Stimulierung durch die Anregung von Kompensationsmechanismen ausreicht. Eine konsequente Analyse ist erforderlich, um sinnvolle Unterstützungshierarchien abzuleiten.

Technische Systeme können ihre Wirkung nur dann voll entfalten, wenn sie in vom Nutzer geforderte **Nutzungsszenarios** passen. Daher ist es erforderlich, auch die Rahmenbedingungen des Einsatzes bzw. die Einsatzumgebung zu analysieren und für die Konkretisierung der Anforderungsbeschreibung aufzuarbeiten. Das Aufstehen ist eine Aktivität, die für die eigene Mobilität eine Grundvoraussetzung ist. Die Bewegungsabläufe sind dabei weitestgehend gleich, unabhängig davon, ob man vom Sofa, einem Stuhl oder einer Parkbank aufsteht. Die Umgebungsbedingungen für die Aktivität variieren aber signifikant: so können mehr oder weniger Hilfsmittel verfügbar sein (Haltegriffe, Stuhllehne), die unterstützend wirken. Gerade im öffentlichen Raum ist mit Art der Ausführung von Mobilitätsaufgaben auch ein Selbstbild verbunden, welches der Nutzer von sich vermitteln will. Beim Aufstehen spielen nicht zuletzt Fragen der Motivation (Notwendigkeit des Aufstehens) eine Rolle.

Schließlich bedarf es einer Analyse des **Nutzerverhaltens**. Hier ist die Frage zu beantworten, wie ein Nutzer das System in seiner Funktionalität wahrnimmt und daher typischerweise auch einsetzt. Die Beantwortung dieser Frage erfordert es, sich mit Kompetenzen, Erfahrungen und dem Wissen potentieller Nutzer auseinander zu setzen.

Für den wirtschaftlichen Erfolg eines Produktes ist es unabdingbar, eine möglichst hohe Akzeptanz des technischen Systems beim Nutzer sicher zu stellen. Akzeptanz bedeutet, die Bereitschaft, etwas anzunehmen bzw. gut zu heißen. Damit stecken hinter dem Begriff zum einen eine gewisse Freiwilligkeit als aktive Komponente und zum anderen aber auch ein Werturteil, da eine Zustimmung erforderlich ist. Aus philosophischer Sicht bedeutet Akzeptanz, dass das Individuum Wertstrukturen annimmt, die es für sich als relevant und wahrhaftig bestimmt, um daraus eigene Handlungsstrukturen zu rechtfertigen (Drosdowski 1989). Es wird demnach versucht ein emotionales Thema zu versachlichen, indem subjektiven Begründungen eine gewisse Objektivität verliehen wird. Akzeptanz zielt auf die Annahme von Dingen, deren Wertmaßstäbe für die Person zunächst fremd sind. Mit dem Begriff geht daher eine Beurteilung einher, wobei die Beurteilungskriterien eher subjektiv sind. (Paetzold 2011)

Entsprechend schwierig ist es, Akzeptanz über die Rückführung auf einfache Parameter zu erfassen. Sie wird vielmehr beherrscht durch ein Ursache-Wirkungs-Geflecht, welches durch die oben genannten drei Aspekte geprägt ist. Dies sei am Beispiel verdeutlicht. Die genannte Aufstehhilfe dient vordergründig dazu bei motorischen Einschränkungen des Nutzers zu unterstützen. Hierbei gilt es zu berücksichtigen, dass die Ursachen für Schwierigkeiten im Aufstehen sehr vielfältig sein können:

- Motivationsprobleme (Lustlosigkeit, Überforderung) führen dazu, dass sich ein potentieller Nutzer dem System gegenüber verschließt;
- bei spezifischen Krankheitsbilder wie z.B. Parkinson ist der Wille zum Aufstehen genauso wie die motorische Fähigkeit zwar vorhanden, aufgrund eingeschränkter kognitiver und sensorischer Leistungen fehlt der Impuls zum Aufstehen;
- Schmerzen durch Bewegungen führen zu veränderten Bewegungsabläufen beim Aufstehen, Schonhaltungen werden eingenommen, die die Funktionalität der Aufstehhilfe einschränkt;
- Andere Leistungseinschränkungen (schlechtes Sehen, schlechtes Hören) führen dazu, dass die Nutzer ängstlich bzw. unsicher sind und daher die Motivation nicht gegeben ist, die Aufstehhilfe nicht nutzen.

Die genannten Aspekte lassen sich nicht direkt in technische Parameter umwandeln, da sie schlicht einer Quantifizierung unzugänglich sind. Hinzu kommt, dass die Vielfältigkeit nur sehr schwer erfasst und verarbeitet werden kann. Zum heutigen Zeitpunkt fehlen Methoden, wie diese komplexen Anforderungsbedingungen erfasst und ausgewertet werden können. Für die Anforderungsbestimmung wird daher zunächst empfohlen, mögliche Schnittstellen zwischen dem Nutzer und dem technischen System aber auch zwischen dem Nutzer und der Umgebung zu erfassen und zu analysieren. Hier gilt

es zu überlegen, welche Parameter sich vom Nutzer detektieren lassen, um letztendlich seine Intention zu erfassen und bewerten zu können.

Ein weiterer wichtiger Aspekt, der die Nutzung eines technischen Systems beschreibt, ist das soziale Umfeld bzw. die gesellschaftliche Integration des Nutzers. Während also eine Aufstehhilfe im privaten Bereich durchaus akzeptiert wird, wird deren Nutzung im öffentlichen Raum abgelehnt, da sie auf einen Makel an der Persönlichkeit hinweisen und daher stigmatisierend wirken. Die Nutzung des Produktes wird daher geprägt durch weiche Aspekte wie „Selbstbewusstsein“ oder auch „Leidensdruck“. Um diesem Phänomen zu begegnen gilt es bereits in den Anforderungen zu überlegen, wie ein Produkt vom Nutzer wahrgenommen wird und wie möglicherweise diese Wahrnehmung durch die äußere Gestaltung manipuliert werden kann (Steffens 2000).

Studien aus dem Bereich der Gerontologie zeigen, dass es zudem nicht im Sinne der Erhaltung der Leistungsfähigkeit des Menschen ist, wenn pure Kompensationsstrategien (technische Funktion ersetzt menschliche Fähigkeit) verfolgt werden, da Restleistungsfähigkeiten des Menschen schneller verloren gehen (Wahl und Mollenkopf 2003). Zur Erhaltung der Lebensqualität ist vielmehr eine Stufung in der Unterstützung sinnvoll:

- Motivation (Anregung und Training): Das Produkt soll den Nutzer nur dazu anregen, es zu verwenden um sich den Alltag erleichtern. Ziel ist es, die Leistungsfähigkeit zu stärken.
- Unterstützung: In der Ebene soll das Produkt bei der Nutzung vorhandener Fähigkeiten in spezifischen schwierigen Situationen unterstützen. Ziel ist es, Restleistungsfähigkeit möglichst lange zu erhalten bzw. kompensative Fähigkeiten zu trainieren.
- Kompensation: sind Fähigkeiten nicht (mehr) ausreichend vorhanden, sollen diese vom Produkt kompensiert werden, um weiterhin eine selbständige Lebensführung sicher zu stellen.

Letztlich steht der Entwickler vor der Aufgabe, wie der erforderliche Unterstützungsgrad nicht nur erfasst sondern idealerweise auch situationsspezifisch angepasst werden kann. Auch hierfür sind heute noch keine befriedigenden Strategien verfügbar.

Auf zwei große Herausforderungen die sich in diesem Kontext für die Produktentwicklung ergeben soll im Folgenden näher eingegangen werden:

- Es bedarf Methoden, um die dargestellten Ursache-Wirkungs-Beziehungen zu erfassen und hieraus technische Parameter abzuleiten, auf deren Basis der Entwickler technische Funktionen präzisieren kann. (Kap. 3)
- Es bedarf Methoden, um mit der resultierenden Varianz und Variabilität umzugehen. (Kap. 2)

2 Entwicklung einer varianten und variablen Aufstehhilfe

Um eine hohe Akzeptanz beim Nutzer zu erzielen, ist es wichtig, dass die Aufstehhilfe den spezifischen Bedürfnissen des Nutzers gerecht wird. Diese spezifischen Bedürfnisse können über alle Nutzer bezüglich der benötigten Unterstützung und durch unterschiedliche Körpermaße variieren. Um diese streuenden Bedürfnisse bedienen zu können, sind Produktvarianten erforderlich. Zusätzlich treten Veränderungen während der Nutzungszeit der Aufstehhilfe bei jedem einzelnen Nutzer auf. Je nach Gesundheitszustand und Trainingssituation variiert der benötigte Unterstützungsgrad. Bei fortschreitenden Krankheiten oder Alterserscheinungen wird eine stärkere Unterstützung erforderlich. In der Rehabilitation nach Operationen oder Unfällen kann diese schrittweise reduziert werden. Hierbei ist es von besonderer Wichtigkeit, die tatsächlich benötigte Unterstützung des einzelnen Nutzers genau zu ermöglichen. Ist die bereitgestellte Unterstützung zu niedrig kann das zum Vermeiden des Aufstehens oder zu Beschwerden führen. Wird zu stark unterstützt bleiben Trainingseffekte aus, die Fähigkeiten verschlechtern sich weiter. Neben der benötigten Unterstützung variieren auch die Körpermaße. Sowohl eine Gewichtsveränderung als auch eine Verringerung der Körpergröße können bei einer mehrjährigen Nutzung auftreten, sodass eine Anpassung der Aufstehhilfe erforderlich ist. Die größten Veränderungen während der Nutzungszeit treten allerdings durch verschiedene Mobilitätssituationen auf. Wird die Aufstehhilfe im eigenen Haushalt angewendet, so sind die Anforderungen an ihre Transportierbarkeit geringer als bei einer Anwendung im nahen und weiten Umfeld. Während es im Haus wichtig ist, die Aufstehhilfe auf verschiedenen Sitzgelegenheiten wie Stuhl, Bett und Sofa anzuwenden, spielen außerhalb des Hauses Sitzgelegenheiten in Verkehrsmitteln eine wichtige Rolle. Diese benötigte Vielfalt ist in **Bild 1** dargestellt.

Im Stand der Technik sind verschiedenste Methoden bekannt, die eine Erfassung einer großen externen Vielfalt ermöglichen und die Entwicklung von Produktvarianten auf Basis einer möglichst kleinen internen Vielfalt unterstützen. Sie wurden durch Jiao et al. (2007) sowie Zhila und Wang (2011) zusammengefasst. Am Institut PKT ist zusätzlich der integrierte PKT-Ansatz zur Entwicklung modularer Produktfamilien (Krause und Eilmus 2011) entwickelt worden. Auch die Mass Customization beschäftigt sich mit der wirtschaftlichen Erfüllung sehr varianter, kundenspezifischer Anforderungen (Pine 1993). Eine derart große und relevante Varianz der geforderten Eigenschaften während der Nutzung, wie sie bei der Entwicklung mobilitäts-erhaltender Produkte vorkommt und oben am Beispiel der Aufstehhilfe erläutert wurde, wird durch den Stand der Technik nicht thematisiert. Dennoch ist sie von der herkömmlichen Varianz der Bedürfnisse verschiedener Nutzer abzugrenzen und wird daher im Folgenden Variabilität genannt. Varianz und Variabilität in einer Produktfamilie abzubilden, erhöht die Komplexität der Entwicklungsaufgabe zusätzlich zu rein varianten Produktfamilien. Schon die Erfassung der geforderten externen Vielfalt erfordert zusätzliche Betrachtungen, wie im Folgenden am Beispiel der Aufstehhilfe gezeigt wird.

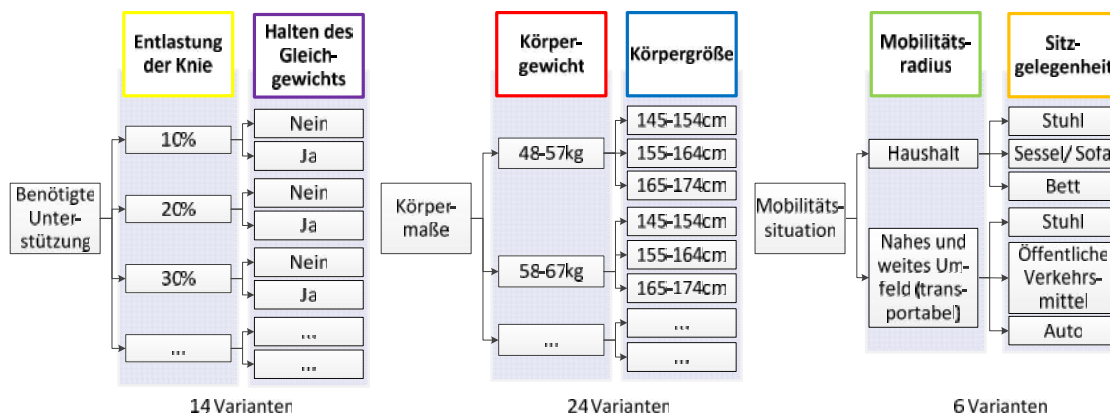


Bild 1: Variante Eigenschaften in den Bereichen Benötigte Unterstützung, Körpermaße und Mobilitätssituation

Varianz entsteht durch die benötigte Unterstützung, die Körpermaße und die Mobilitätssituationen. Für diese drei Bereiche sind in **Bild 1** die varianten Eigenschaften (Entlastung der Knie, Halten des Gleichgewichts, Körpergewicht etc.) und ihre Ausprägungen (10%, 20%, 30% etc.) aufgeführt. Im integrierten PKT-Ansatz zur Entwicklung modularer Produktfamilien Kipp (2012) wird zur Darstellung der externen Vielfalt der Vielfaltsbaum empfohlen. Hierzu werden alle varianten Eigenschaften in der Kombinatorik ihrer Ausprägungen dargestellt, wie entsprechende Varianten am Markt angeboten werden. Mit den in **Bild 1** aufgeführten Eigenschaften der Aufstehhilfe ist dies nicht ohne weiteres möglich, da hier variante und variable Eigenschaften nicht aufgetrennt werden. Variante Eigenschaften führen zu den Produktvarianten, die beim Kauf zur Auswahl stehen müssen, während alle geforderten variable Eigenschaften von einer Produktvariante während der Nutzung ermöglicht werden müssen. Dass dies nicht einfach zu trennen ist, kann am Beispiel des Körpergewichts veranschaulicht werden. Beim Kauf wählt sich ein Nutzer eine Produktvariante entsprechend seines Gewichts aus. Wiegt er 70 kg, wird er die Variante für 68-77 kg wählen. Sinkt im Verlauf der Nutzung das Gewicht um 5 kg, ist es erforderlich das Produkt auf das neue Gewicht anzupassen, um eine optimale Unterstützung zu gewährleisten. In diesem Fall ist das Gewicht eine variable Eigenschaft, die während der Nutzung einstellbar sein muss, damit sich der Nutzer keine neue Produktvariante zulegen oder eine nicht optimale Variante nutzen muss. Beides würde zu einem Verlust der Akzeptanz führen. Die Eigenschaften sind also z.T. variant und variabel. Eine einfache Kombination zu Produktvarianten in einem Vielfaltsbaum würde nicht ermöglichen zu unterscheiden, welche Produktvarianten echte Marktvarianten sind und welche durch Variabilität in der Nutzung entstehen.

Um diesen Unterschied der externen Varianz hervorgerufen durch variante und durch variable Eigenschaften darzustellen, wird eine zusätzliche Darstellungsform benötigt. Diese lehnt sich an das Variety Rate of Change – Diagramm nach Erixon (1998) an und ist in **Bild 2** dargestellt. Hier werden variante Eigenschaften nach ihrer Varianz im Bereich der linken Achse und nach ihrer Variabilität im Bereich der unteren Achse eingetragen. Dies ermöglicht eine Einteilung, wie diese Varianz am

Produkt als Standard-, optionale oder variante Eigenschaft auszuprägen ist (**Bild 2**, rechte Achse). Gleichzeitig kann auf der unteren Achse aufgezeigt werden, wie häufig die Variabilität der Eigenschaft genutzt werden muss. Dies ermöglicht eine Entscheidung, ob die Variabilität wegen großer Häufigkeit durch den Nutzer erzeugt werden muss oder ob eine professionelle Umkonfiguration durch Sanitätshaus oder Arztpraxis erfolgen sollte. Für die modulare Gestaltung der Produktfamilie ist auch diese Unterscheidung sehr wichtig. Konfiguration, die weniger häufig und durch geschultes Personal erfolgt, erfordert eine andere Gestaltung der Schnittstellen als Konfiguration häufig im Alltag durch den Nutzer selbst. Letzteres muss z.B. ohne Werkzeuge möglich und so einfach sein, dass es den Alltag nicht so einschränkt, dass die Produktakzeptanz gefährdet ist.

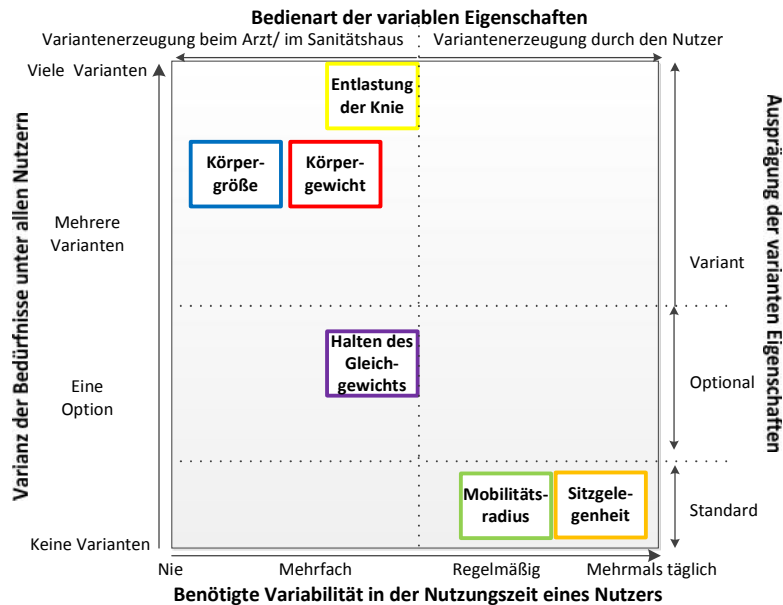


Bild 2: Einordnung der Eigenschaften in die Ausprägung ihrer Varianz und Variabilität

Neben der Aufnahme der externen Vielfalt wurde am Beispiel der Aufstehhilfe auch die Konzeptfindung, variantengerechte Gestaltung und Modularisierung der Aufstehhilfe unter Zuhilfenahme bekannter Methoden durchgeführt. Es konnten zwar mögliche Konzepte gefunden werden, die gleichzeitige Betrachtung von Produktvarianten und variablen Eigenschaften führt allerdings zu so komplexen Entwicklungsaufgaben, dass bestehende Methoden nicht auf Lösungen führten, in denen sich jeweils alle varianten und variablen Eigenschaften abbilden ließen. So entstanden nach bestehenden Konzeptfindungsmethoden z.T. Produktkonzepte mit besonderem Fokus auf die Einsetzbarkeit in allen Mobilitätssituationen (**Bild 3**, links) und andere mit besonderem Fokus auf die Einstellbarkeit der benötigten Unterstützung und der Körpermaße (**Bild 3**, rechts).

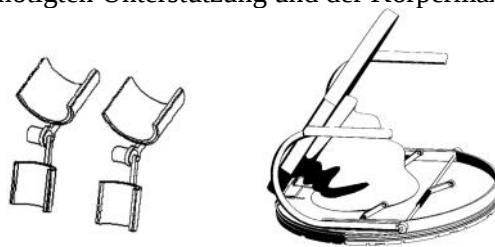


Bild 3: Mögliche Konzepte mit Fokus der Einsetzbarkeit (links) und Fokus der Einstellbarkeit (rechts)

Auch in der variantengerechten Gestaltung (Kipp 2012) des integrierten PKT-Ansatzes ist die Berücksichtigung variabler Eigenschaften bisher nicht vorgesehen und wird nicht unterstützt. In der Lebensphasen-Modularisierung (Blees 2011) des integrierten PKT-Ansatzes werden Modultreiber als Gründe jeder Produktlebensphase aufgeführt, warum Komponenten gemeinsam oder einzeln als Modul gestaltet werden sollten. Hier hat die Darstellung des Netzplanes für die Lebensphase Nutzung und den Modultreiber Anpassbarkeit aufgezeigt, wie eine sehr anpassungsgerechte modulare Produktstruktur aussieht.

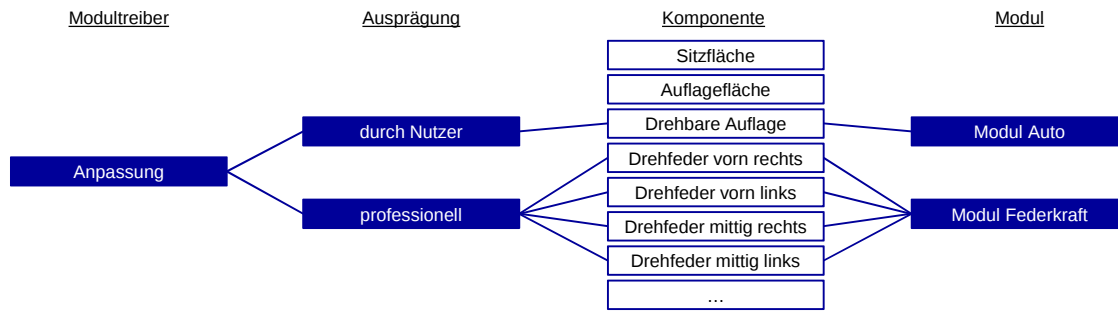


Bild 4: Netzplan der Lebensphase Nutzung

In **Bild 4** ist ein Ausschnitt dieses Netzplans dargestellt. Der Modultreiber „Anpassung“ wird aufgeteilt in seine Ausprägungen „durch Nutzer“ und „professionell“. Die Komponente „Drehbare Auflage“ beschreibt einen Untersatz der Auflagefläche, der drehbar gelagert ist, um das Aufstehen aus dem Auto zu erleichtern, das sich von anderen Mobilitätssituationen dadurch unterscheidet, dass vor dem Aufstehen eine 90°-Drehung aus der Fahrtrichtung in die Ausstiegsrichtung notwendig ist. Diese Komponente ist also als separates Modul „Auto“ so zu gestalten, dass es nur für die Nutzung im Auto mit der Aufstehhilfe durch den Nutzer einfach verbunden werden kann. Das Modul „Federkraft“ umfasst die Federn, die durch eine geschulte professionelle Person in Sanitätshaus oder Arztpraxis je nach Körpergröße, Gewicht und benötigtem Unterstützungsgrad vorgespannt oder ausgetauscht werden. Dieses sollte als zusammenhängendes Modul gestaltet, um ein schnelles Entnehmen zu ermöglichen und sicherzustellen, dass keine relevante Feder vergessen wird. Gleichzeitig müssen Schnittstellen so gestaltet sein, dass eine Verstellung durch den Nutzer nicht passieren kann, da das Einstellen auf Körpergröße, Gewicht und benötigtem Unterstützungsgrad Fachwissen erfordert. Auch wenn der Netzplan bei der Bildung der Module, die der Variabilität unterliegen, unterstützt, fehlt im Bereich der Modularisierung bisher eine Unterstützung der Modul- und Schnittstellengestaltung für in der Nutzung variable Module, die die beschriebenen Anforderungen an die Modulgestaltung abdeckt.

3 Biomechanische Simulation zur Quantifizierung technischer Parameter

Die Übersetzung von Nutzeranforderungen in konkrete technische Parameter wurde als zentrale Herausforderung während der Entwicklung der Aufstehhilfe identifiziert. Aus pathologischer Sicht kann die Anforderung des notwendigen Unterstützungsgrades in Abhängigkeit von den in der Nutzergruppe vorliegenden körperlichen Beeinträchtigungen abgeleitet werden. Der Unterstützungsgrad ist ein Maß für die Entlastung des Bewegungsapparates, welche durch die Aufstehhilfe bewirkt wird. Im vorliegenden Abschnitt wird ein biomechanisches Modell des menschlichen Körpers dazu verwendet, einen Zusammenhang zwischen dem Unterstützungsgrad und einem durch den Produktentwickler beeinflussbaren Designparameter abzuleiten. Exemplarisch wird hierbei die Härte einer Drehfeder betrachtet, die, gemäß des beispielhaft betrachteten Lösungskonzeptes in Bild 3 (rechts) die unterstützende Kraftwirkung der Aufstehhilfe erzeugt. Das grundlegende Vorgehen kann jedoch sehr einfach auf beliebige Designparameter übertragen werden.

Bild 5 zeigt das biomechanische Modell, welches zur Simulation des Aufstehvorganges verwendet wurde. Der Körper des Nutzers wird durch ein Skelettmodell repräsentiert, das in Grundzügen auf einem Entwurf von Delp (1990) basiert. Zur Vereinfachung wurden jedoch die kleineren Gelenke der Zehen, Finger und der Wirbelsäule entfernt, so dass die Bewegungsmöglichkeit des Modells durch insgesamt 30 generalisierte Koordinaten beschrieben werden kann. Jedem Freiheitsgrad ist ein idealisierter Drehmomentaktuator zugeordnet, der die Kräfte der angrenzenden Muskeln reproduziert und so eine Bewegung der Gelenke ermöglicht. Zwischen den Füßen und dem Boden sowie zwischen Gesäß und dem oberen Teil der Aufstehhilfe erfolgt eine elastische Kontaktbehandlung. Die Körpermaße sowie die Masseeigenschaften des Skeletts können beliebig skaliert werden, wobei die Masse des nicht abgebildeten Gewebes den Knochen des jeweiligen Körpersegments zugeordnet ist. Die Aufstehhilfe selbst besteht aus einem unteren und einem oberen Teil. Beide Teile sind durch ein Drehgelenk miteinander verbunden, das mit Hilfe eines Feder-Dämpfersystems angetrieben wird.

Die größte Herausforderung im Zusammenhang mit biomechanischen Simulationen in der Produktentwicklung ist die Vorhersage menschlicher Bewegungen auf Grundlage von festgelegten Aufgaben. In der Sportmedizin, wo biomechanische Modelle schon seit längerer Zeit Verwendung finden, werden meist Bewegungsabläufe realer Testpersonen aufgenommen und anschließend auf das Modell übertragen. Diese Art der Simulation eignet sich jedoch mehr dazu, eine bekannte Bewegung zu analysieren, als neue unbekannte Bewegungen vorherzusagen. In der Produktentwicklung wäre dieses Vorgehen nicht zielführend da solche Laborexperimente physische Prototypen des Produktes notwendig machen, was im Sinn einer kosteneffizienten, virtuellen Produktentwicklung weitestgehend vermieden werden sollte. In dieser Arbeit wurde ein algorithmisches Verfahren zur Bewegungssynthese gewählt das auf inverser Kinematik und geregelter Vorwärtsdynamik basiert.

Die Aufgabe des Aufstehens von einem Stuhl wird dabei durch eine Menge von diskreten Zielvorgaben beschrieben die im folgenden Abschnitt näher erläutert werden. Diese Zielvorgaben definieren ein Optimierungsproblem mit Nebenbedingungen und den Gelenkwinkeln als freie Variable. Die entsprechenden Lösungen können als statische Körperhaltungen interpretiert werden. Diese Körperhaltungen dienen als Sollwertvorgaben für einen PD-Regler der die Aktivierungssignale für die Drehmomentaktuatoren im Modell bestimmt. Auf diese Weise wird die Bewegung des Modells in Richtung der vorgegebenen Körperhaltungen gesteuert wobei es vollständig den Gesetzen der Mechanik unterliegt. Obwohl das Verfahren noch sehr viele Beschränkungen aufweist, sollte erwähnt werden, dass die Grundidee mit der von vielen Wissenschaftlern anerkannten neurologischen **Equilibrium Point Hypothese** (Latash 2008) übereinstimmt.

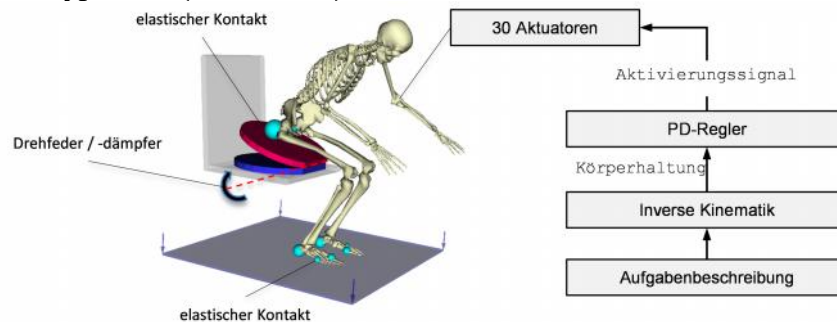


Bild 5: Biomechanisches Simulationsmodell

Das Simulationsmodell wurde auf Basis von **OpenSim** (Delp 2007) einem frei verfügbaren System zur biomechanischen Modellierung entwickelt. Wissenschaftliche Anwendungen profitieren von der Erweiterbarkeit der Software: Eigene Implementierungen von Modellkomponenten können mit wenig Aufwand als Programmiererweiterungen hinzugefügt werden. Auf diese Weise wurde in der vorliegenden Arbeit z.B. der Regler zur Bewegungskontrolle implementiert.

Ein wichtiges Element des Bewegungssyntheseverfahrens ist die Beschreibung einer Aufgabe mit Hilfe von Zielvorgaben und Nebenbedingungen. Im vorliegenden Fall ist die zu simulierende Aufgabe das Aufstehen von einem Stuhl. Dies ist in **Bild 6** näher beschrieben. Der Vorgang beginnt mit einer Körperhaltung im Sitzen. Die nächste Zielhaltung wird durch das Lösen eines Optimierungsproblems berechnet, dessen Zielvorgabe den Körperschwerpunkt (COG) möglichst immer über den Füßen hält. Dadurch wird eine statische Balance des Körpers erreicht. Zusätzlich gilt die Nebenbedingung, dass die Füße stets in Kontakt mit dem Boden sein müssen. Dies bewirkt, dass sich der Körper nach vorne beugt. Die zweite Phase der Bewegung wird durch Hinzufügen einer Zielvorgabe eingeleitet, welche die beiden Kniegelenke möglichst vollständig streckt. Der Körper richtet sich nun auf. Mit diesen drei Zielkörperhaltungen ist der Regler in der Lage durch Interpolation einen stetigen Zeitverlauf für jede der 30 generalisierten Koordinaten des Modells zu erzeugen. Die Dauer des Vorganges von zwei Sekunden und damit indirekt die Geschwindigkeit der Bewegung wurde auf Grundlage von Erfahrungswerten festgelegt. Während der vorwärtsdynamischen Phase der Simulation werden durch den Regler Aktivierungssignale für die Drehmomentaktuatoren erzeugt, so dass das Modell den vorgegebenen Zeitverläufen folgt.

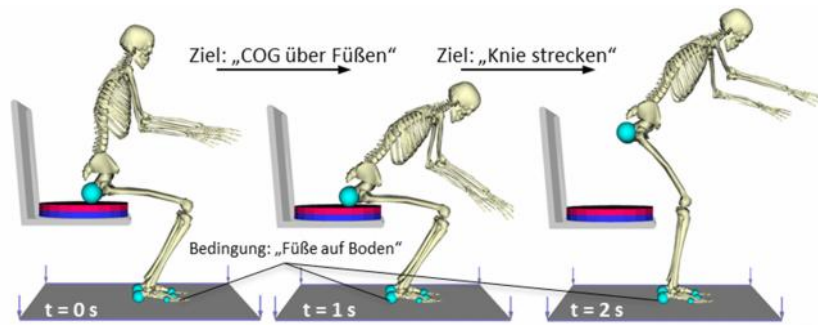


Bild 6: Beschreibung der Aufgabe durch Zielvorgaben und Nebenbedingungen

Um eine verlässliche Aussage über den Zusammenhang zwischen der Nutzeranforderung Unterstützungsgrad und der Federhärte als technischen Designparameter treffen zu können, wurden zwei Versuchsreihen durchgeführt. In Reihe A wurde der Aufstehvorgang ohne die Unterstützung durch die Aufstehhilfe simuliert. Ziel war es herauszufinden welches Gelenk im Körper hierbei am stärksten beansprucht wird. Als Vergleichskriterium wurde der Spitzenwert des Gelenkdrehmoments T_{max}^0 festgelegt. Versuchsreihe B umfasst Simulationen des Aufstehvorgangs unter Verwendung der Aufstehhilfe wobei die Federhärte auf verschiedenen Niveaus variiert wird. Wie in Reihe A wird auch hier in jedem Experiment das Spitzendrehmoment T_{max} des am höchsten beanspruchten Gelenks ermittelt. Mit diesen Daten kann der Unterstützungsgrad s wie folgt definiert werden:

$$s = \frac{T_{max}^0 - T_{max}}{T_{max}^0} \quad (1)$$

Durch diese Definition wird der Unterstützungsgrad in ein objektives Maß übersetzt, welches direkt über die Simulation von der Federhärte als Designparameter abhängt. Es ist zu erwarten, dass die mechanischen Beanspruchungen des Bewegungsapparates während des Aufstehens von Körpergröße und -masse des Nutzers abhängen. Daher ist die Beziehung zwischen s und der Federhärte nicht konstant, sondern muss immer im Zusammenhang mit der physiologischen Konstitution des Nutzers gesehen werden. Um die Varianz innerhalb der Nutzergruppe zu berücksichtigen wurde jedes Experiment zweimal durchgeführt. Zunächst für eine weibliche Testperson P_5 mit einer Körpermasse 48 kg und anschließend für eine männliche Testperson P_{95} mit einer Körpermasse von 98 kg. Nach einer Studie von Vandervoort (1992) korrespondieren diese Daten jeweils mit den 5% und den 95% Perzentilwerten einer statistischen Verteilung über eine Gruppe von älteren Menschen zwischen 60 und 86 Jahren. Die Testpersonen markieren also die beiden Extreme innerhalb der Nutzergruppe und sind deshalb dafür geeignet, die notwendigen Wertebereiche für technische Designparameter wie die Federhärte abzuschätzen. Um die Anzahl der Simulationen überschaubar zu halten, wurde die Varianz der Körpergröße zunächst nicht berücksichtigt. Dies ist sicherlich eine Vereinfachung die hier nur durch den exemplarischen Charakter des Experiments zu rechtfertigen ist.

Als Ergebnis von Versuch A1 (Testperson P_5 : weiblich, $m=48$ kg) zeigt **Bild 7 a)** den zeitlichen Verlauf der Gelenkdrehmomente des Unterkörpers. Den absoluten Spitzenwerten nach zu urteilen kann das Knie als das am stärksten beanspruchte Gelenk identifiziert werden. Es folgen das Hüftgelenk und das Sprunggelenk. Dieses Ergebnis wird qualitativ auch durch experimentelle Untersuchungen von Schultz (1992) bestätigt. Das maximale Drehmoment im Knie beträgt $T_{max}^0 = 53 \text{ Nm}$. Für Versuch A2 (Testperson P_{95} : männlich, $m=98$ kg) erhält man qualitativ das gleiche Ergebnis mit dem Unterschied, dass der Spitzenwert des Drehmomentes im Knie zu $T_{max}^0 = 96 \text{ Nm}$ verschoben ist. Alle Gelenkmomente wurden in der Sagittalebene des Körpers bestimmt.

Die Ergebnisse von Versuchsreihe B sind in **Bild 7 b)** dargestellt. Wie erwartet steigt der Unterstützungsgrad für beide Testpersonen mit zunehmender Federhärte an. Unterhalb eines kritischen Wertes scheint die Annahme eines linearen Zusammenhanges gerechtfertigt. Eine weitere Erhöhung der Federhärte über diesen Punkt hinaus führt jedoch zu unerwarteten Ergebnissen. Der errechnete Unterstützungsgrad nimmt ab. Eine mögliche Erklärung für dieses Phänomen ist die Tatsache, dass das aktuell angewandte Verfahren zur Bewegungsplanung keine Anpassung des Nutzerverhaltens auf den unterstützenden Effekt der Aufstehhilfe berücksichtigt. Da die Bewegung im Voraus geplant ist wird das Modell stets versuchen, die gleiche Kinematik zu reproduzieren. In der Realität muss jedoch

davon ausgegangen werden, dass der Mensch den Stil seiner Bewegung dem Unterstützungsgrad anpasst. Wird lediglich der vertrauenswürdige, lineare Bereich der Kurven berücksichtigt, lässt sich dennoch ein Wertebereich für die Federhärte angeben: Um einen Unterstützungsgrad zwischen 5% und 20 % für die gesamte Nutzergruppe (jede Person zwischen P5 und P95) realisieren zu können muss die Federhärte zwischen 10 Nm/rad und 29 Nm/rad gewählt werden.

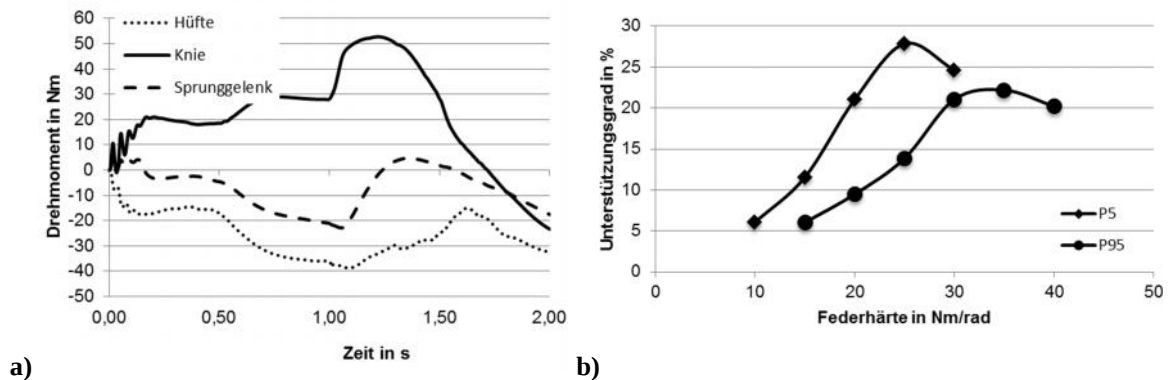


Bild 7: a) Gelenkdrehmomente während des Aufstehvorganges, b) Unterstützungsgrad über Federhärte

4 Zusammenfassung und Ausblick

Am Fallbeispiel der variablen Aufstieghilfe wurde gezeigt dass die Klärung der Anforderungen durch die intensive Nutzerbetrachtung deutlich komplexer wird. Heute verfügbare Methoden gehen dabei nicht ausreichend auf die Erfassung eher „weicher“ Faktoren zur Nutzerbeschreibung und deren Transformation in konkrete technische Parameter ein. Individuelle Ausprägungen führen zu einer hohen geforderten Vielfalt am Produkt. Es wurde dargestellt, wie verschiedene Methoden aus der Entwicklung modularer Produktfamilien dazu beitragen, die Komplexität der Aufgabe in der Entwicklung mobilitätserhaltender Produkte zu reduzieren. Zudem wurde Forschungsbedarf im Bereich der Konzeptfindung, der varianten- und variabilitätsgerechten Produktgestaltung und der Modul- und Schnittstellengestaltung aufgedeckt. Der Stand der Technik bietet keine durchgängige Unterstützung, um zu einer Produktfamilie zu gelangen, um die Akzeptanz eines breiten Nutzerspektrums gezielt zu erreichen. Das Konzept eines geeigneten Methodenframeworks (**Bild 8**) wurde am Beispiel der Aufstieghilfe validiert und ist zukünftig auszuarbeiten.

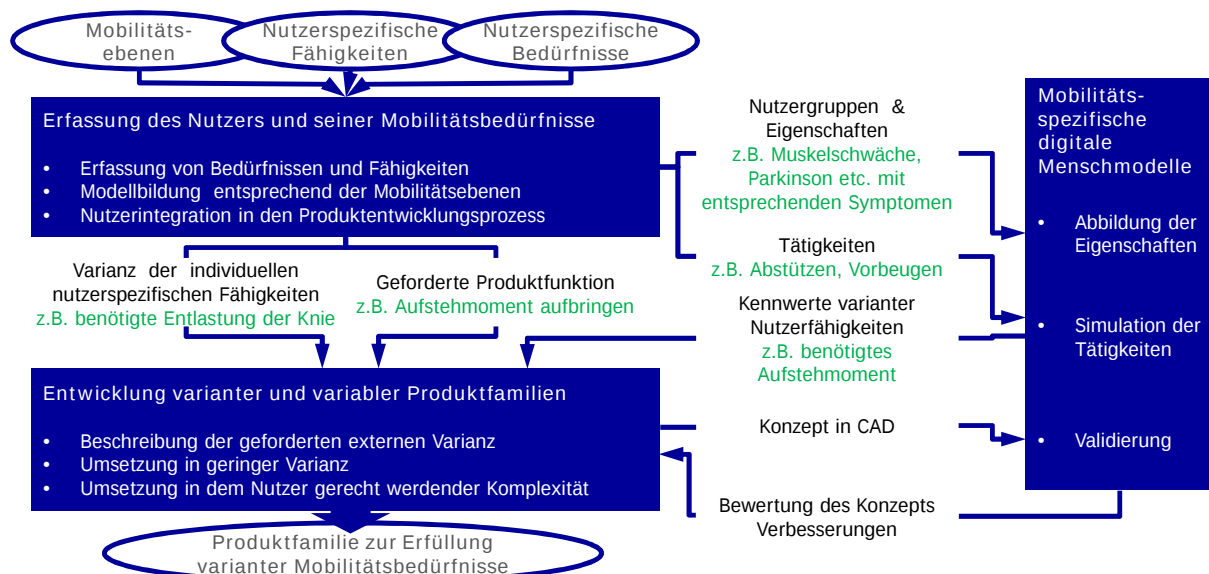


Bild 8: Konzept des Methodenframeworks zur methodischen Entwicklung mobilitätserhaltender Produkte mit Beispielen für die Validierung der In- und Outputs der Methodenbausteine durch die Fallstudie (grün)

Literaturverzeichnis

- Blees 2011 BLEES, C.: *Eine Methode zur Entwicklung modularer Produktfamilien*. Hamburg : TuTech-Verlag, 2011.
- Delp 2007 DELP, S. et al.: *OpenSim: Open-Source Software to Create and Analyze Dynamic Simulations of Movement*. In: *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 54 (2007), S. 1940–1950.
- Delp 1990 DELP, S. et al.: *An interactive graphics-based model of the lower extremity to study orthopaedic surgical procedures*. In: *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 37 (1990), S. 757-767.
- Drosdowski 1989 DROSDOWSKI, G. (Hrsg.): *Duden Etymologie : Herkunftswörterbuch der deutschen Sprache*. Mannheim: Dudenverlag, 1989.
- Erixon 1998 ERIXON, G.: *Modular function deployment: a method for product modularisation*. The Royal Inst. of Technology, Dept. of Manufacturing Systems, Assembly Systems Division. Stockholm, 1998.
- Jiao et al. 2007 JIAO, J.; SIMPSON, T.W.; SIDDIQUE, Z.: *Product family design and platform-based product development: a state-of-the-art review*. In: *Journal of Intelligent Manufacturing* 18 (2007), Nr. 1, S. 5–29
- Kipp 2012 KIPP, T.: *Methodische Unterstützung der variantengerechten Produktgestaltung*. Hamburg : TuTech-Verlag, 2012.
- Krause und Eilmus 2011 KRAUSE, D.; EILMUS, S.: *Methodical Support for the Development of Modular Product Families*. In: Birkhofer, H. (Hrsg.): *The future of design methodology*. London; New York: Springer, 2011. S. 35–45
- Latash 2008 LATASH, M.: *Evolution of Motor Control: From Reflexes and Motor Programs to the Equilibrium-Point Hypothesis*. In: *Journal of Human Kinetics* 19 (2008), S. 3–24.
- Paetzold 2011 PAETZOLD, K.: *An Approach to Adapt the Product Functionality to the Abilities of Seniors*. In: Ziefele, M.; Röcker, C. (Hrsg.): *Human-Centered Design of E-Health*. IGI Global, 2011.
- Pine 1993 PINE, B. J.: *Mass customization : The new frontier in business competition*. Boston: Harvard Business School Press, 1993
- Schultz 1992 SCHULTZ, A.; ALEXANDER, N.; ASHTON-MILLER, J.: *Biomechanical Analyses of Rising from a Chair*. In: *Journal of Biomechanics* 25 (1992), Nr. 12, S. 1383-1391
- Steffen 2000 STEFFEN, D.: *Design als Produktsprache – Der „Offenbacher Ansatz“ in Theorie und Praxis*. Frankfurt/Main: Verlag Form, 2000.
- Vandervoort 1992 VANDERVOORT, A.; CHESWORTH, B.; et al.: *Age and Sex Effects on Mobility of the Human Ankle*. In: *Journal of Gerontology* 47 (1992). S. 17–21.
- Wahl und Mollenkopf 2003 WAHL, H.-W.; MOLLENKOPF, H.: *Impact of everyday technology in the home environment on older adults' quality of life*. In: Schaie, K.; Charness, N. (Hrsg.): *Impact of technology on successful aging*. New York: Springer, 2003, S. 215-241.
- Zhila und Wang 2011 ZHILA, P.; WANG, G.: *Recent Advancements in Product Family Design and Platform-Based Product Development: A Literature Review* (IDETC/CIE 2011). Washington D.C., 2011