



Information zum Referenten:

Dipl.-Ing.

Theo Jacobs



Studium

Leibniz Universität Hannover, Deutschland

- Maschinenbau, Schwerpunkte Robotik und Konstruktion

Berufliche Karriere

Fraunhofer IPA, Stuttgart, Deutschland

- Abteilung Robotersysteme, Bereich Haushaltsrobotik

Derzeitiger Arbeitgeber / Institution

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart

www.ipa.fraunhofer.de

theo.jacobs@ipa.fraunhofer.de

Steigerung der Flexibilität mobiler Roboter und Transportsysteme durch den Einsatz kompakter, omnidirektionaler Antriebe

*Theo Jacobs, Christian Connette, Martin Hägele, Alexander Verl,
Fraunhofer IPA*

Zusammenfassung

Ein hohes Maß an Mobilität und Flexibilität wird Voraussetzung für den erfolgreichen Einsatz mobiler autonomer Systeme in einer ganzen Reihe zukünftiger Anwendungen sein. Im industriellen Umfeld steht zu erwarten, dass mobile Manipulatoren zum Transport oder zur Bearbeitung von Werkstücken an Bedeutung gewinnen. Serviceroboter, welche im privaten oder gewerblichen Umfeld in direkter Nähe zum Menschen eingesetzt werden sollen, müssen durch Engstellen navigieren oder ihre Bewegungsmuster denen des Menschen anpassen können.

Flexibilität und Mobilität der derzeit dominierenden Differential- und Dreiradkinematiken sind für solche Anwendungen häufig unzureichend. Laufmaschinen mögen in Zukunft eine interessante Lösung sein, sind heute aber noch zu aufwändig und fehleranfällig. Quasiomnidirektionale und omnidirektionale Fahrwerke stellen dagegen einen mittelfristig gangbaren Weg dar. Unter diesen Systemen zeichnen sich Fahrwerke mit aktiv gelenkten und angetriebenen Standardrädern durch eine hohe Robustheit gegenüber unterschiedlicher Bodenbeschaffenheit und unebenem Untergrund aus.

Diese Arbeit behandelt Entwurf und Auslegung eines auf aktiv gelenkten und angetriebenen Rädern basierenden Antriebsmoduls für quasiomnidirektionale Fahrwerke. Das entwickelte Antriebsmodul wird qualitativ mit anderen Designkonzepten, wie Mecanum und Kugelrad, und quantitativ mit dem zuvor für das quasiomnidirektionale Fahrwerk des Serviceroboters Care-O-bot[®] 3 entworfenen Antriebsmodul verglichen.

1 Einleitung und Stand der Technik

Der Fortschritt der letzten Jahrzehnte in den unterschiedlichen Bereichen von Wahrnehmung und Kognition bis hin zu Regelungstechnik und Mechatronik lässt eine Vielzahl neuer Anwendungen für mobile autonome Systeme erahnen. Im industriellen Umfeld steht zu erwarten, dass mobile Manipulatoren zum Transport oder zur Bearbeitung von Werkstücken an Bedeutung gewinnen. Solche Systeme könnten zur Einzelstück-Kommissionierung einerseits oder zum Ziehen meterlanger Schweißnähte andererseits eingesetzt werden. Darüber hinaus sollen Roboter auch hier langfristig unmittelbar mit dem Menschen zusammenarbeiten [1, 2]. Serviceroboter, welche im privaten oder gewerblichen Umfeld in direkter Nähe zum Menschen eingesetzt werden sollen, werden durch Engstellen navigieren und – zur intuitiveren Interaktion – ihre Bewegungsmuster denen des Menschen anpassen können [3]. Eine Voraussetzung für den erfolgreichen Einsatz solcher mobiler Roboter ist ein hohes Maß an Mobilität, Flexibilität und Zuverlässigkeit der eingesetzten Fahrwerke.



Das von den derzeit dominierenden, äußerst zuverlässigen Differential- und Dreiradkinematiken bereitgestellte Maß an Flexibilität und Mobilität ist in diesem Kontext meist unzureichend. Laufmaschinen zeichnen sich dahingegen durch eine besonders hohe Flexibilität aus und mögen in Zukunft eine interessante Lösung sein [4, 5], sind heute aber noch zu aufwändig und fehleranfällig. Dementsprechend wird derzeit intensiv an der Entwicklung gleichermaßen flexibler, wie robuster Fahrwerks- und Antriebskonzepte gearbeitet. Eine detaillierte Einführung in dieses Thema kann in [6] gefunden werden.

Derzeit erscheint der Einsatz quasioomidirektionaler und omnidirektionaler Fahrwerke als mittelfristig gangbarer Kompromiss. Solche Fahrwerke erlauben Feinpositionierungen ohne aufwändige Rangiermanöver. Sie bieten die Möglichkeit, die Orientierung des Systems unabhängig von dessen Fahrtrichtung zu wählen und vereinfachen damit komplexe Manipulationsaufgaben erheblich, z. B. solche mit kinematischen Beschränkungen. Die mit solchen Fahrwerken mögliche freie Überlagerung aller Freiheitsgrade der ebenen Bewegung erlaubt schließlich die Nachbildung beliebiger Bewegungsmuster und flexible Reaktionen auf unerwartete Ereignisse. Dementsprechend wurde eine Vielzahl unterschiedlicher Konzepte von entsprechend intelligent angesteuerten, voll gelenkten und angetriebenen Standardrädern [7, 8, 9] bis hin zum Einsatz spezieller Räder, wie Mecanum [10] und Kugelrad [11, 12] entwickelt.

Legt man die kinematische Klassifizierung der unterschiedlichen Fahrwerkstypen nach Campion, Bastin und D'Andréa-Novel [13] zugrunde, sind auf Mecanum-, Kugel- oder Castorrädern (z. B. eingesetzt bei üblichen Einkaufswagen) basierende, omnidirektionale Fahrwerke den quasi-omnidirektionalen, auf aktiv gelenkten und angetriebenen Rädern basierenden Fahrwerken überlegen. Der „Degree of Mobility“ δ_m , welcher ein Maß für die instantan realisierbaren Freiheitsgrade (differentiable Degrees of Freedom dDoF) der ebenen Bewegung eines Fahrwerks ist, beträgt hier 3, wohingegen er bei aktiv gelenkten und angetriebenen Rädern lediglich bei 1 liegt. Allerdings liegt der „Degree of Maneuvrability“ δ_M , welcher ein Maß für die Flächenbeweglichkeit eines Fahrwerks ist und den Freiheitsgraden der ebenen Bewegung entspricht, sowohl für omnidirektionale wie auch für quasioomidirektionale Fahrwerke bei 3. Das heißt: Während Roboter mit omnidirektionalen Fahrwerken prinzipiell zu jedem Zeitpunkt und in jeder beliebigen Konfiguration jede beliebige Geschwindigkeit realisieren können, müssen quasioomidirektionale Systeme zunächst ihre innere Konfiguration anpassen, können dann aber ebenfalls beliebige Geschwindigkeiten realisieren. Die Anzahl der frei einstellbaren Freiheitsgrade der Konfiguration „Degree of Steerability“ δ_s ist bei solchen Systemen gleich 2. Freiheitsgrade der Konfigurationen stehen prinzipiell mit Lenkbewegungen in Beziehung. So gilt für einen Pkw z. B. $\delta_s = 1$ (Drehen des Lenkrades) und $\delta_m = 1$ (Geschwindigkeit). Generell gilt der Zusammenhang $\delta_M = \delta_m + \delta_s$. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die möglichen Konfigurationen von Fahrwerken und ihren jeweiligen Grad der Steuerbarkeit, Mobilität bzw. Manövrierbarkeit.

Neben den kinematischen Eigenschaften spielen jedoch noch eine Reihe praktischer Erwägungen eine Rolle bei der Auswahl des Antriebskonzeptes. So stellen unter anderem unterschiedliche, vorab häufig unbekannte bzw. wechselnde Bodenbeschaffenheiten hohe Ansprüche an die Robustheit des Fahrwerks. Bei Fahrten im Außenbereich muss z. B. mit lockerem Grund, wie Schotter, Kies und ähnlichem, gerechnet werden. Im privaten Umfeld wechseln Bodenbeläge wie Fliesen, Parkett, Teppichböden oder gar lose aufliegende Läufer. Auch Unebenheiten, wie Türschwellen und ähnliches sind keine Seltenheit. Mecanum- und Kugelräder, die auf passiven Rollen basieren, sowie Castorräder, die einen hohen Reibkoeffizienten zwischen Rad und Boden voraussetzen, sind auf solch

weichem Untergrund nur bedingt einsetzbar. Fahrwerke mit aktiv gelenkten und angetriebenen Standardrädern zeichnen sich hingegen durch eine hohe Robustheit gegenüber unterschiedlicher Bodenbeschaffenheit und unebenem Untergrund aus. Dementsprechend werden in einer Reihe jüngst entwickelter Serviceroboter, wie Willow Garage's PR2 [9], Rollin' Justin des DLR [7] oder Care-O-bot[®] 3 des Fraunhofer IPA [8], aktiv gelenkte und angetriebene Räder eingesetzt.

	„Pkw“- und „Dreirad“-Kinematik	Differentialantrieb	Quasi-omnidirektionale Kinematik (Typ1)	Quasi-omnidirektionale Kinematik (Typ2)	Omnidirektionale Kinematik
δ_m	1	2	1	2	3
δ_s	1	0	2	1	0
δ_M	2	2	3	3	3

Tabelle 1: Klassen von Fahrwerkskinematiken nach Campion, Bastin und D'Andréa-Novel [13]; Omnidirektionale Fahrwerke setzen den Einsatz von speziellen Rädern voraus, während quasiomnidirektionale Fahrwerke (Typ1) mit aktiv gelenkten und angetriebenen Standardrädern konstruiert werden können. Quasiomnidirektionale Fahrwerke vom Typ 2 bestehen aus max. einem Standardrad und beliebigen Kombinationen von speziellen Rädern. Der „Degree of Steerability“ ist ein Maß für die Steuerbarkeit eines Fahrwerks. Der „Degree of Mobility“ ist ein Maß für die Beweglichkeit einer Plattform, während der „Degree of Maneuvrability“ ein Maß für die Flächenbeweglichkeit ist – die prinzipielle Eigenschaft beide translatorische und den rotatorischen Freiheitsgrad der ebenen Bewegung unabhängig voneinander einzustellen. Alternative Methoden zur Klassifizierung von Fahrwerken können bei Alexander und Maddocks [14], sowie von Muir und Neumann [15] gefunden werden.

Auf Basis der mit dem Fahrwerk des Care-O-bot[®] 3 [16] gemachten Erfahrungen wurde das dort eingesetzte Antriebsmodul überarbeitet. Betrachtet wurden dabei neben oben genannten Aspekten auch Gesichtspunkte wie die Rücktreibbarkeit der Räder, welche vor dem Hintergrund des Einsatzes als Antrieb für eine universelle Forschungsplattform an Bedeutung gewinnen. Die vorliegende Arbeit gibt einen Einblick in Entwurf und Auslegung des überarbeiteten, auf aktiv gelenkten und angetriebenen Rädern basierenden Antriebsmoduls für das quasiomnidirektionale Fahrwerk des Care-O-bot[®] 3. Das entwickelte Antriebsmodul wird qualitativ mit anderen Designkonzepten, und quantitativ mit dem zuvor für das quasiomnidirektionale Fahrwerk des Serviceroboters Care-O-bot[®] 3 entworfenen Antriebsmodul verglichen.

Kapitel 2 gibt einen Einblick in die Konzeption der Antriebsmodule. Mithilfe eines morphologischen Kastens werden unterschiedliche Konzepte entwickelt und einander gegenüber gestellt. Verglichen werden dabei unter anderem Eigenschaften wie die wechselseitige Verkopplung von Lenk- und Fahrtrieben über die Getriebe. In Kapitel 3 wird die konkrete Umsetzung des letztlich ausgewählten Konzeptes erläutert. Kapitel 4 befasst sich mit der Inbetriebnahme und experimentellen Validierung des Antriebsmoduls. Dabei werden unterschiedliche Designs einander qualitativ und quantitativ gegenüber gestellt und die jeweiligen Stärken und Schwächen werden aufgezeigt und diskutiert.

2 Antriebskonzepte für omnidirektionale Antriebsmodule

Für eine omnidirektionale Plattform auf Basis von Standardrädern werden zwei unabhängig voneinander ansteuerbare Antriebseinheiten benötigt. Ein Fahrmotor übernimmt den Vortrieb des Rades, während ein Lenkmotor das Rad abhängig von der gewünschten Bewegungsrichtung um seine Hochachse dreht. Für die Anordnung der Elektromotoren und die Art der Kraftübertragung



zwischen Motor und Rad ist eine Vielzahl konstruktiver Lösungen denkbar. In diesem Kapitel werden einige grundlegende Ansätze zur Konstruktion von Antriebsmodulen betrachtet und auf ihre Vor- und Nachteile untersucht.

2.1 Anordnung des Fahrmotors

Um ein Fahren in beliebige Richtungen zu ermöglichen, muss das Rad um zwei Achsen bewegt werden. Die Lenkbewegung wird durch ein Verdrehen der Radaufhängung relativ zur mobilen Basis des Roboters erreicht. Die Vortriebsbewegung erfolgt durch eine Drehung des Rades innerhalb der beweglichen Radaufhängung und damit um eine mitbewegte Achse. Für die Anordnung des Fahrmotors ergeben sich daher zwei verschiedene Ansätze. So ist es einerseits möglich den Fahrmotor in der beweglichen Radaufhängung unterzubringen, so dass er bei einer Lenkbewegung mitgedreht wird. Andererseits kann der Fahrmotor fest an der Roboterplattform befestigt werden. In diesem Fall ist ein Überlagerungsgetriebe nötig, um die Kraft durch die sich drehende Radaufhängung auf das Rad zu übertragen.

Die Verwendung eines mitbewegten Fahrmotors hat den Vorteil, dass der Motor sehr nah am Rad angebracht werden kann und so auf ein großes und schweres Getriebe mit mehreren Übertragungsstufen verzichtet werden kann. Eine interessante Möglichkeit ist dabei die Unterbringung des Motors in der Radnabe, weil so der ohnehin vorhandene Bauraum im Innern des Rades optimal genutzt wird. Der Nachteil einer solchen Konstruktion ist, dass die Strom- und Datenleitungen des Motors in die bewegte Radaufhängung hineingeführt werden müssen. Um ein „endloses“ Drehen der Radaufhängung ohne Verdrillen der Kabel zu ermöglichen, ist die Verwendung von Drehdurchführungen, beispielsweise von Schleifringen, unabdingbar. Dies führt wiederum zu Problemen, wenn sehr viele Leitungen zum Fahrmotor geführt werden müssen.

Wird der Fahrmotor außerhalb der Radaufhängung an der mobilen Plattform befestigt, kann die Kabelführung frei gestaltet werden. Allerdings muss in diesem Fall zwingend ein mehrstufiges Getriebe verwendet werden. Neben den genannten Nachteilen bei Bauraum und Gewicht führt dies auch zu einer Kopplung von Fahr- und Lenkbewegung. So muss bei jeder Lenkbewegung auch immer der Fahrmotor bewegt werden. Um gleichzeitiges Fahren und Lenken zu ermöglichen, muss der Fahrmotor dann Leistungsreserven vorhalten, um auch bei hohen Geschwindigkeiten die Beeinflussung durch den Lenkmotor zu kompensieren.

2.2 Realisierung niedriger Drehzahlen und hoher Antriebsmomente

Gängige Servomotoren weisen im Allgemeinen ein vergleichsweise hohes Verhältnis von Nenndrehzahl zu Nennmoment auf. Typisch sind Drehzahlen von 2000 1/min bis 5000 1/min bei einem Nennmoment von 0,5 Nm bis 2 Nm (Leistungsbereich bis 1000 W). Zum Antrieb mobiler Roboterplattformen und Transportsysteme werden dagegen im Allgemeinen höhere Antriebsmomente und bei geringeren Drehzahlen verlangt.

Mobile Roboterplattformen und Transportsysteme sollen üblicherweise Höchstgeschwindigkeiten von 1 m/s bis 2 m/s erreichen. Bei einer Last von 45kg pro Rad sollen Rampen mit einer Steigung von 10% befahren werden können. Mit einem Raddurchmesser von 160 mm ergibt sich eine geforderte Drehzahl zwischen 100 1/min und 300 1/min und ein benötigtes Antriebsmoment von etwa 4 Nm. Für Lenkmotoren ergeben sich ähnliche Anforderungen. Hohe Antriebsmomente sind hier vor allem erforderlich, um das Rad bei Geradeausfahrt stabil in seiner Orientierung zu halten und um Lenkbewegungen möglichst schnell ausführen zu können.

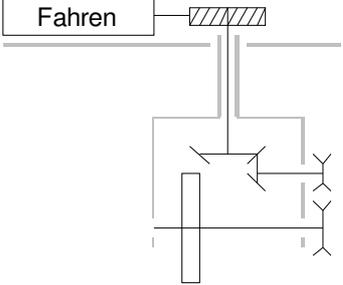
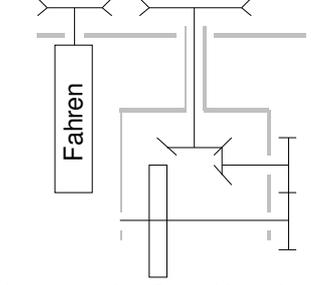
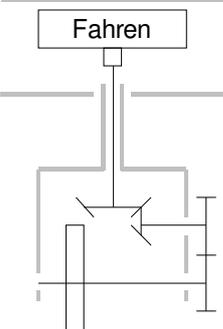
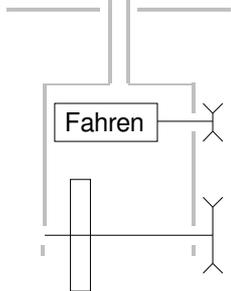
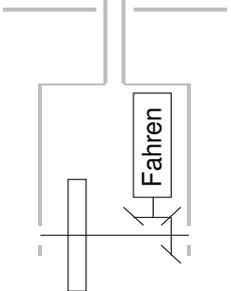
Um höhere Antriebsmomente zu erreichen, bietet es sich an, Getriebe mit einer Untersetzung zwischen 1:4 und 1:15 zu verwenden. Hierzu kommen beispielsweise ein- oder zweistufige Planeten-

oder Schneckengetriebe in Frage. Kleine Untersetzungen können auch mit Hilfe von Stirnradstufen oder Riemenantrieben erreicht werden. Soll der Fahrmotor allerdings möglichst kompakt in der Rad-aufhängung platziert werden, bieten Standardlösungen häufig nicht die nötige Flexibilität, so dass als einzig mögliche Lösung die Eigenkonstruktion des Getriebes übrig bleibt. Gerade in diesem Fall verursacht das zusätzliche Getriebe jedoch meist viel zusätzliches Gewicht. Darüber hinaus muss eine Schmierung für das Getriebe vorgesehen und das Gehäuse entsprechend abgedichtet werden.

Als Alternative zur Verwendung eines Getriebes können Motoren verwendet werden, die von sich aus ein geringes Verhältnis von Nenndrehzahl zu Nennmoment aufweisen. Entsprechende Servomotoren verfügen über einen vergleichsweise kurzen Stator, der dafür einen besonders großen Durchmesser und eine hohe Polpaarzahl aufweist. Entsprechende Motoren lassen sich bei einigen Herstellern als Sonderausführung beschaffen. Die von vielen Herstellern angebotenen Torquemotoren sind dagegen weniger geeignet, da sie hauptsächlich für den Einsatz in Werkzeugmaschinen und damit für Zwischenkreisspannungen von 400 V bis 600 V ausgelegt sind. Darüber hinaus sind sie mit Durchmessern ab 180 mm meist schon wieder zu groß für den Einsatz in mobilen Robotersystemen.

2.3 Vergleich verschiedener Antriebskonzepte

Auf Basis der obigen Überlegungen wurden bei der Konzeption des neuen Antriebsmoduls für den Care-O-bot[®] verschiedene Konzepte verglichen. Eine Auflistung der möglichen Varianten für die Realisierung des Fährantriebes ist in Abbildung 1 zu sehen.

<p>(1) Servomotor waagrecht liegend mit Schneckengetriebe</p>  <ul style="list-style-type: none"> + hohe Untersetzung - hohe Reibungsverluste - keine Rücktreibbarkeit - viele Übersetzungsstufen - Kopplung der Motoren 	<p>(2) Servomotor senkrecht eingebaut mit Riemenradstufe</p>  <ul style="list-style-type: none"> + kompakt im Schaftbereich - viele Übersetzungsstufen - Kopplung der Motoren 	<p>(3) Scheibenläufermotor kopfüber eingebaut</p>  <ul style="list-style-type: none"> + spart Bauraum - Kopplung der Motoren - Motortyp schlecht regelbar
<p>(4) Mitbewegter Servomotor mit Stirnradstufe</p>  <ul style="list-style-type: none"> + wenig Übersetzungsstufen + spart Bauraum - baut sehr hoch - Schleifring nötig 	<p>(5) Mitbewegter Servomotor mit Kegelradstufe</p>  <ul style="list-style-type: none"> + wenig Übersetzungsstufen - baut sehr breit - Schleifring nötig 	



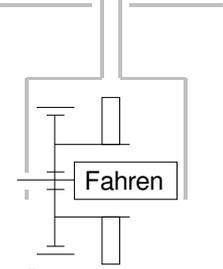
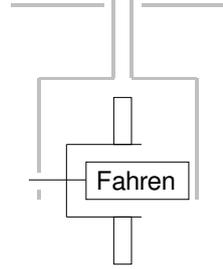
<p>(6) Servomotor in der Radnabe mit Planetenstufe</p>  <ul style="list-style-type: none"> + wenig Übersetzungsstufen + spart Bauraum - großer Getriebedurchmesser - Schleifring nötig 	<p>(7) Servomotor in der Radnabe als Direktantrieb</p>  <ul style="list-style-type: none"> + getriebeles + spart Bauraum - keine Untersetzung - Schleifring nötig 	
---	--	--

Abbildung 1: Konstruktionsvarianten für die Realisierung des Fahrtriebes (Komponenten des Lenkantriebes sind ausgeblendet)

In der ersten Zeile sind konstruktive Lösungen aufgeführt, bei denen der Fahrmotor außerhalb der Radaufhängung an der mobilen Plattform befestigt ist. Zeile 2 zeigt Varianten, bei denen der Fahrmotor in die Radaufhängung integriert ist. In den letzten beiden Konzepten findet ein Nabenantrieb Verwendung. Varianten für die Umsetzung des Lenkantriebes sind in Abbildung 2 aufgeführt. Die drei Varianten ähneln den ersten drei Konzepten zur Platzierung des Fahrtriebes.

Bei der Bewertung der verschiedenen Varianten wurden auch die Erfahrungen mit einbezogen, die in den vergangenen Jahren mit dem bestehenden Antriebsmodul des Care-O-bot[®] 3 gemacht wurden (Abbildung 3). Dort kommen zwei Servomotoren zum Einsatz, die oberhalb des Rades an der mobilen Plattform angebracht sind. Dies entspricht jeweils der Variante (1) in Abbildung 1 und Abbildung 2. Die Kraftübertragung erfolgt durch eine Schneckenradstufe mit einer Untersetzung von 1:15 für den Lenk- und 1:12 für den Fahrtrieb mit zwei ineinander gelagerten Wellen. Über eine Kegelradstufe wird die Bewegung für den Fahrtrieb weiter nach unten geleitet. Diese stellt gleichzeitig ein Überlagerungsgetriebe dar, mit dem die Fahrbewegung in das beim Lenken bewegte System eingebracht wird.

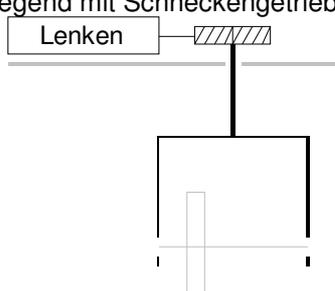
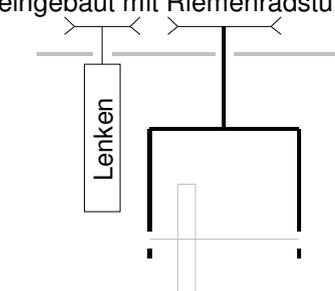
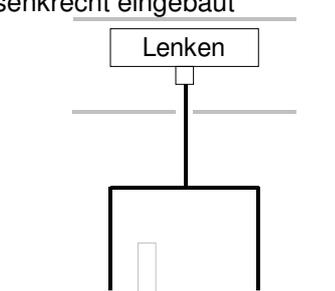
<p>(1) Servomotor waagrecht liegend mit Schneckengetriebe</p>  <ul style="list-style-type: none"> + hohe Untersetzung - hohe Reibungsverluste - keine Rücktreibbarkeit 	<p>(2) Servomotor senkrecht eingebaut mit Riemenradstufe</p>  <ul style="list-style-type: none"> + kompakt im Schaftbereich + Rücktreibbarkeit + Motor flexibel platzierbar 	<p>(3) Scheibenläufermotor senkrecht eingebaut</p>  <ul style="list-style-type: none"> + spart Bauraum + Rücktreibbarkeit + getriebeles - keine Untersetzung - kein Schleifring verwendbar - Motortyp schlecht regelbar
--	---	--

Abbildung 2: Konstruktionsvarianten für die Realisierung des Lenkantriebes (Komponenten des Fahrtriebes sind ausgeblendet)

Einer der größten Nachteile der bestehenden Konstruktionslösung liegt im schlechten Wirkungsgrad des Schneckengetriebes. Auf diese Weise geht ein beträchtlicher Teil der Antriebsenergie als Reibung verloren. Darüber hinaus sind die Schneckengetriebe selbstbremsend. Der Roboter kann daher im ausgeschalteten Zustand nicht geschoben werden, was sich in vielen Situationen als unpraktisch erwiesen hat. Aus diesem Grund wurde bei der Konzeption der neuen Antriebsmodule besonders auf rücktreibbare Antriebe geachtet.

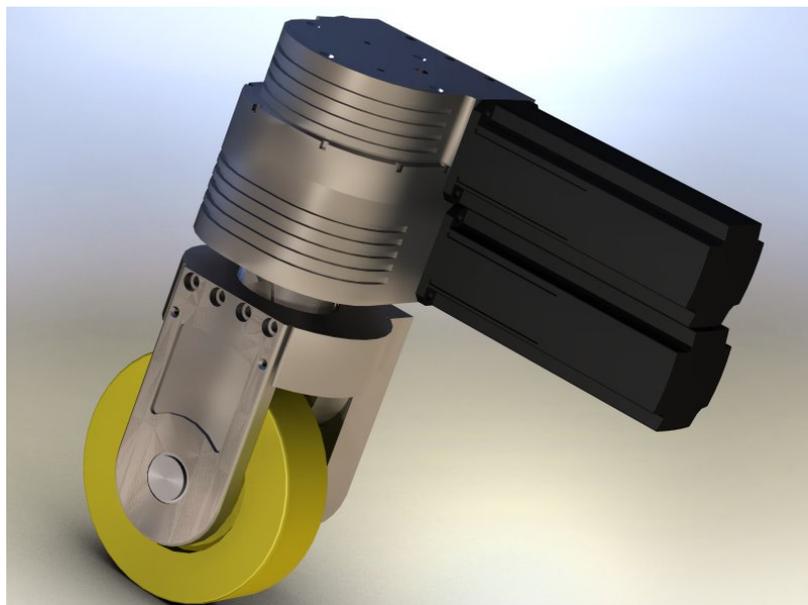


Abbildung 3: Antriebsmodul des aktuellen Care-O-bot[®] 3

Im direkten Vergleich wurden die Varianten (2) bis (5) verworfen, weil sie weiterhin eine hohe Anzahl Getriebestufen benötigen oder aber im Bereich der Radaufhängung viel Bauraum nötig wäre. In den Varianten (6) und (7) lassen sich dagegen sehr kompakte Antriebe realisieren. Wie sich gezeigt hat, benötigen beide Antriebe dabei einen ähnlich großen Bauraum. Der bei Variante (7) durch das Weglassen des Planetengetriebes gewonnene Platz wird vom Motor selbst eingenommen, der in dieser Konstruktionslösung wesentlich größer ausfallen muss, um die nötigen Antriebsmomente bereitstellen zu können. Die Verwendung des Direktantriebs hat den Vorteil, dass die Konstruktion aus wesentlich weniger Einzelteilen besteht. Darüber hinaus kann, sofern lebensdauer geschmierte Lager verwendet werden, auf eine zusätzliche Schmierung komplett verzichtet werden. Weitere Vorteile sind die Spielfreiheit des Antriebs und die geringere Geräuschentwicklung. Aus diesen Gründen wurde die Variante (7) für die Konstruktion der neuen Antriebsmodule ausgewählt.

Für den Lenkmotor wurde Variante (2) aus Abbildung 2 gewählt, da dieses Konzept als einziges sowohl auf die Verwendung eines Schneckengetriebes verzichtet, als auch die Verwendung eines Schleifrings ermöglicht. Darüber hinaus ermöglicht die Riemenstufe die Verwendung eines herkömmlichen Servoantriebs. Dieser kann, wenn die Länge des Riemens entsprechend angepasst wird, relativ flexibel platziert und so optimal in den vorhandenen Bauraum eingepasst werden.

3 Aufbau eines Antriebsmoduls für Care-O-bot[®]

Die Neukonstruktion der Antriebsmodule für den Care-O-bot[®] wurde mit dem Ziel vorgenommen, universell einsetzbare Fahrwerksmodule zu entwickeln, die für eine Vielzahl von Aufgaben in verschiedensten Robotern zum Einsatz kommen können. Eines der wichtigsten Ziele war das Erreichen einer möglichst kompakten Bauweise, die sich insbesondere in einer geringen Höhe und einem geringen



Radius des umhüllenden Volumens bei einer Drehung um die Hochachse ausdrückt. Um die Antriebe als in sich geschlossene Einheiten auch anderen Forschungseinrichtungen zur Verfügung stellen zu können, wurde zudem das Ziel verfolgt, die Elektronik zur Ansteuerung des Fahrmotors vollständig in das Modul zu integrieren. Auf die Einzelheiten der Konstruktion wird in den folgenden Abschnitten eingegangen.

3.1 Dimensionierung der Antriebe

Care-O-bot[®] 3 soll sich in alltäglichen Haushaltsumgebungen bewegen können. In diesen finden sich immer wieder kleine Hindernisse wie Teppichkanten oder Türschwellen. Darüber hinaus sollte der Roboter auch Rampen mit einer Steigung bis zu 10 % überwinden können. Als Höchstgeschwindigkeit wird 1,5 m/s angestrebt, was zügigem Gehen entspricht. Care-O-bot[®] 3 hat in seiner derzeitigen Form ein Gesamtgewicht von etwa 180 kg. Dieses Gewicht wurde als Grundlage für die Dimensionierung der Antriebe gewählt. Für den Fahrantrieb ergeben sich damit ein benötigtes Spitzenantriebsmoment von etwa 9 Nm und ein Dauermoment von etwas über 4 Nm.

Beim Lenkantrieb muss die Leistung hoch genug sein, um die Räder auf verschiedenen Untergründen um die Hochachse drehen zu können. Angestrebt werden Drehraten von bis zu 3 Hz, auf die innerhalb von 0,2 s beschleunigt werden soll. Dadurch wird ein schnelles Einschwenken der Räder bei Lenkbewegungen gewährleistet und so die Regelung der quasioxidirektionalen Plattform vereinfacht. Aus diesen Anforderungen ergeben sich ein Spitzenmoment von etwa 8 Nm und ein Dauermoment von etwa 2 Nm für den Lenkantrieb.

3.2 Mechanischer Aufbau

Die angestrebte Kompaktheit lässt sich bei der Verwendung von Servomotoren mit Standardgehäusen nicht erreichen. Die meist eckige Bauform dieser Motoren und die in der Regel seitlich aus dem Motorgehäuse herausgeführten Kabel würden die Radnabe nur unnötig aufblähen. Stattdessen wurde für die Konstruktion des Antriebsmoduls ein gehäuseloser Motorbausatz verwendet, der von der Firma Wittenstein speziell für diesen Anwendungszweck ausgelegt wurde. Er verfügt über ein Spitzenmoment von 9,4 Nm und ein Dauermoment von 4,2 Nm bei einer Zwischenkreisspannung von 48 V und erfüllt damit die oben aufgestellten Anforderungen (siehe Tabelle 2).

Zur Regelung des Motors wird dieser um einen Resolver ergänzt. Der Resolver sitzt zusammen mit dem Motor auf einer zentralen Antriebswelle im Innern des Rades. Um ein schnelles Abbremsen der mobilen Plattform im Störfall zu gewährleisten, verfügt der Antrieb außerdem über eine magnetische Bremse, die beim Abschalten des Haltestroms automatisch einfällt. Die Anordnung der Komponenten ist schematisch in Abbildung 4 dargestellt. Ein Bild des vollständigen Antriebsmoduls ist in Abbildung 5 zu sehen.

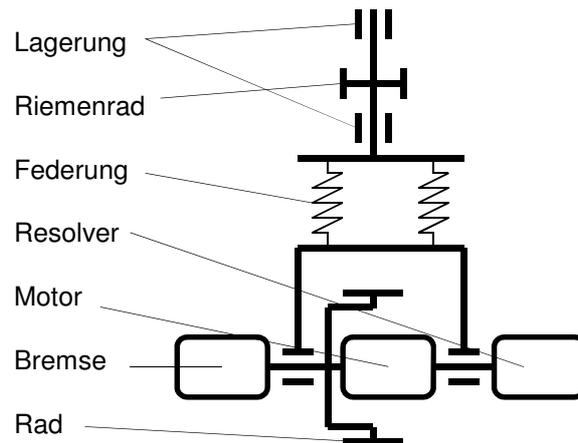


Abbildung 4: Schemazeichnung des neu gestalteten Antriebsmoduls

Die Bewegung des Fahrmotors wird über die Radnabe auf eine Radbandage übertragen. Diese hat einen Durchmesser von 160 mm und ist genau im Zentrum des Antriebsmoduls angeordnet, so dass der Aufstandspunkt bei einer Lenkbewegung gleich bleibt. Somit ist eine vollständige Entkopplung der beiden Antriebe gewährleistet. Die Radnabe ist über drei Federbeine mit dem Schaft des Antriebsmoduls verbunden. Die Federung schützt die mobile Plattform vor Stößen und stellt sicher, dass alle vier Räder sicheren Bodenkontakt haben. Die Federung wurde allerdings bewusst relativ hart ausgelegt, um Schwingungen des Aufbaus oder ein übermäßiges Einfedern der Plattform bei Gewichtsverlagerung, beispielsweise beim Ausstrecken eines Manipulators, zu vermeiden.

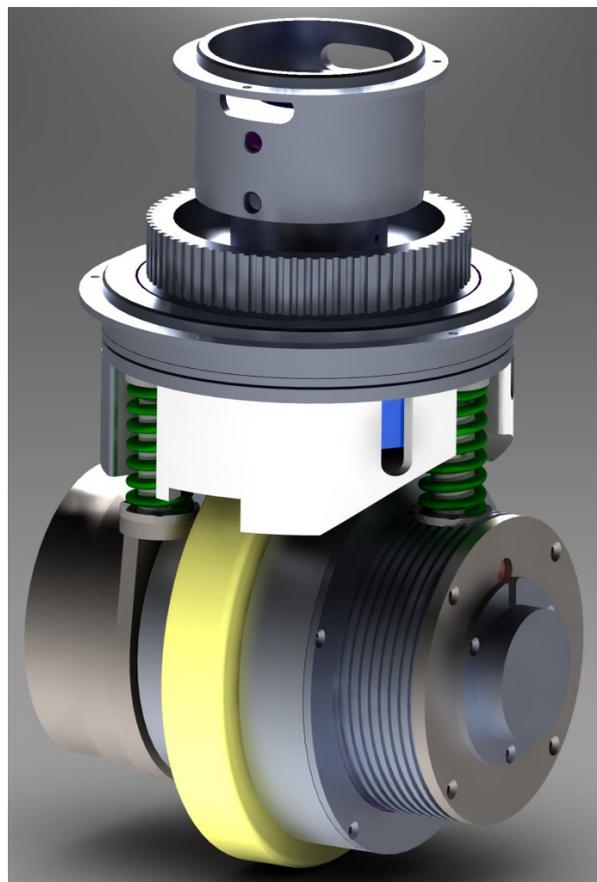


Abbildung 5: Neu gestaltetes Antriebsmodul im zusammengebauten Zustand



Die Lagerung des Antriebsmoduls erfolgt über zwei Lagerstellen, von denen eine im mittleren Bereich und eine am oberen Ende des Schaftes liegt. Zwischen den beiden Lagern befindet sich ein Riemenrad, an dem der Lenkmotor angreift. Wie Abbildung 5 zeigt, ist die äußere Form des Antriebsmoduls fast rotationssymmetrisch, so dass der zum Drehen um die Hochachse benötigte Raum mit einem Durchmesser von 195 mm nur wenig größer ist als das Antriebsmodul selbst. Die Höhe des Moduls beträgt 291 mm.

Der Lenkmotor ist mit dem Antriebsmodul über einen Riemen verbunden. Aus der Größe der Riemenräder ergibt sich eine Untersetzung von 4. Daher ist der Lenkmotor mit einem Spitzenmoment von 2,3 Nm und einem Dauermoment von 0,7 Nm ausreichend dimensioniert. In Tabelle 2 wird eine Übersicht über die erreichte Performanz gegeben.

	soll	ist
Dauermoment Fahrtrieb	4 Nm	4,9 Nm
Spitzenmoment Fahrtrieb	9 Nm	9,4 Nm
maximale Rampensteigung	10 %	11 %
Beschleunigungsvermögen	2 m/s ²	
Höchstgeschwindigkeit	1,5 m/s	>2 m/s
Dauermoment Lenkantrieb	2,5 Nm	2,8 Nm
Spitzenmoment Lenkantrieb	6 Nm	10,8 Nm
Beschleunigung Lenkantrieb	103 1/s ²	
Höchstdrehzahl	3 Hz	3,4 Hz

Tabelle 2: Leistungsfähigkeit der neuen Antriebsmodule im Soll-Ist-Vergleich

3.3 Elektrischer Aufbau

Bei der Verwendung eines Nabenantriebs müssen die Datenleitungen und die Leitungen zur Energieversorgung des Motors über eine Drehdurchführung nach außen geführt werden. Dabei ist zu beachten, dass die Drehdurchführung nicht nur die Anzahl der möglichen Leitungen begrenzt, sondern auch einen maßgeblichen Einfluss auf die Übertragungsqualität der Signale hat. Da sowohl Daten- als auch Stromleitungen über das Bauteil geführt werden sollen wird in dem neu gestalteten Antriebsmodul eine hochwertige Drehdurchführung von Mercotac mit acht Kanälen verwendet.

Der Elmo-Whistle-Controller, der zur Regelung des Fahrmotors eingesetzt wird, ist im Schaft des Antriebsmoduls untergebracht. Nach außen hin erfolgt die Anbindung des Controllers über einen CAN-Bus, der drei der acht Kanäle belegt. Weitere Adern sind für Leistungs- und Logikstromkreis reserviert. Über eine zusätzliche Leitung kann manuell die Bremse freigegeben werden, so dass die mobile Plattform im ausgeschalteten Zustand geschoben werden kann. Eine schematische Darstellung des elektrischen Aufbaus ist in Abbildung 6 zu sehen.

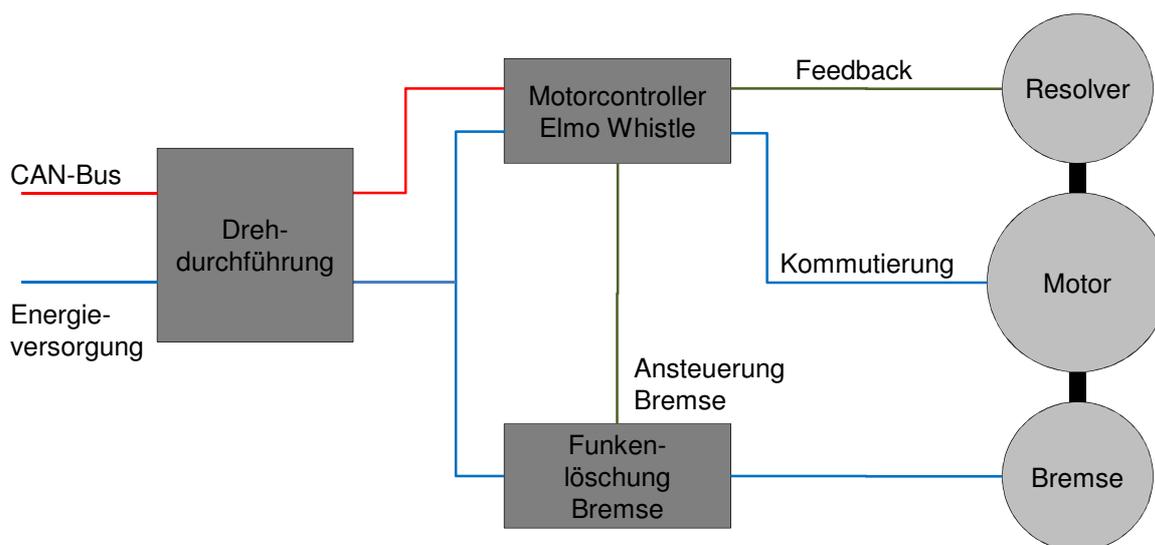


Abbildung 6: Schematische Darstellung des elektrischen Aufbaus

Wie oben beschrieben, teilt sich die Energieversorgung in einen Leistungs- und einen Logikkreis. Wird auf einer übergeordneten Ebene ein NOT-AUS ausgelöst, fällt lediglich die Leistungsspannung ab, so dass das interne Rechenwerk des Motorcontrollers weiterhin mit Energie versorgt wird.

4 Testaufbau und Evaluierung

Das neue Antriebsmodul wurde mit dem Ziel entwickelt, die mobile Plattform des Care-O-bot® kompakter und flexibler zu gestalten und zugleich die benötigte Leistungsfähigkeit beizubehalten. Gleichzeitig sollte die Effizienz gesteigert und die Antriebe rücktreibbar gestaltet werden. Das Erreichen dieses Ziels soll im Folgenden evaluiert werden. Dabei werden zum einen die technischen Daten der Antriebsmodule gegenübergestellt. Zum anderen wird auf die Testplattform eingegangen, mit der die Antriebe umfangreichen Tests unterzogen werden sollen.

4.1 Vergleichende Analyse

Der größte Unterschied zum derzeitigen Antriebsmodul besteht darin, dass beim neu entwickelten Modul der Fahrmotor vollständig in die Radnabe verlegt wurde. Mit einem Durchmesser von 195 mm im unteren und 145 mm im oberen Bereich fällt der Raum, der beim Drehen um die Hochachse benötigt wird, ähnlich groß aus wie bei der alten Konstruktion mit 175 mm. Dies liegt insbesondere daran, dass durch die zentrische Anordnung des Rades die Außenkontur nahezu rotationssymmetrisch ausfällt und so der Bauraum optimal genutzt wird. In der Bauhöhe konnten dagegen gegenüber der alten Bauform mit 340 mm Höhe rund 50 mm eingespart werden. Dies stellt besonders bei der Verwendung in flachen Transportplattformen einen großen Vorteil dar. Insgesamt konnte ein großer Teil der Masse nach unten verlagert und so oberhalb des Rades mehr Platz für andere Komponenten geschaffen werden.

Ein weiterer Vorteil der neuen Konstruktion ist die Federung, mit der der Aufbau von den Rädern entkoppelt wird. Durch die Nachgiebigkeit der Antriebsmodule wird der Kontakt zwischen Rädern und Boden stark verbessert werden. Darüber hinaus kann beim Überfahren von Schwellen oder Stufen das jeweilige Rad einfedern. Starke Stöße werden vermieden.

Durch die Verwendung des Direktantriebs und insbesondere durch den Verzicht auf eine Schneckenradstufe wird der Wirkungsgrad sowohl des Fahr- als auch des Lenkantriebs gesteigert –



dies führt im Batteriebetrieb zu einer längeren Laufzeit. Auch die Verwendung eines schmalen, zentral unter der Hochachse angeordneten Rades senkt die Reibung des Lenkmotors. Außerdem sinkt, wenn die Kräfte zwischen Rad und Boden geringer ausfallen, auch die Gefahr, empfindliche Untergründe zu beschädigen. Schließlich wird der Wirkungsgrad auch dadurch verbessert, dass nun keine Kopplung mehr zwischen den beiden Motoren vorhanden ist.

Die starke Untersetzung der Schneckengetriebe sorgte bei der bisherigen Konstruktion dafür, dass die Höchstgeschwindigkeit der mobilen Plattform auf etwa 0,9 m/s begrenzt war. Mit dem neuen Motor sind dagegen Geschwindigkeiten über 2 m/s erreichbar. Serviceroboter werden so in die Lage versetzt, mit einem zügig gehenden Menschen Schritt zu halten. Insbesondere bei Transportplattformen, die lange Wege zurücklegen, bedeutet die höhere Geschwindigkeit eine große Zeitersparnis. Ein weiterer Vorteil, der sich durch die neue Bauweise ergibt, ist die Rücktreibbarkeit des Antriebs und damit die Möglichkeit, den Roboter im ausgeschalteten Zustand bei gelöster Bremse zu schieben.

4.2 Aufbau der Testplattform

Um die korrekte Funktionsweise und die Leistungsfähigkeit des neu gestalteten Antriebsmoduls untersuchen zu können, wurde eine Testplattform für ein Antriebsmodul aufgebaut. Die Plattform ist als Dreirad ausgeführt. Die anderen Räder sind starr und passiv (Abbildung 7). Auf diese Weise kann zunächst ein Modul unter relativ einfachen Bedingungen untersucht werden und die Konstruktion gegebenenfalls optimiert werden. Mit dieser Plattform werden in den kommenden Wochen Belastungstests durchgeführt werden, bei denen zum Beispiel das Befahren von Rampen und das Überfahren von Schwellen getestet werden. Darüber hinaus soll evaluiert werden, wie eine Erhöhung der Zuladung die Fahreigenschaften verändert.

Auf der Plattform wird ein Akku mitgeführt, der eine Laufzeit von sechs bis acht Stunden ermöglicht. Die Testplattform ist außerdem mit einem Laserscanner ausgestattet, der als Kollisionsschutz dient und darüber hinaus das autonome Fahren der Testplattform ermöglicht. So können die Dauertests durchgeführt werden, ohne dass ständig ein Mensch zur Betreuung anwesend sein muss. Die Messdaten können mit Hilfe eines Laptops aufgenommen werden, der auf die Plattform gestellt wird.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Mobile Plattformen mit quasiomnidirektionalen Antriebskinematiken werden in Zukunft als Basis für die Automatisierung komplexer Transport- und Handhabungsaufgaben an Bedeutung gewinnen. Aus diesem Grund wurden am Fraunhofer IPA kompakte und flexible Antriebsmodule entwickelt, die für derartige mobile Plattformen einsetzbar sind.

Nach einer sorgfältigen Abwägung möglicher Konstruktionsalternativen wurden die in den Antriebsmodulen des Care-O-bot[®] 3 verwendeten Schneckengetriebe durch hochpolige Direktantriebe ersetzt, die in der Nabe des Antriebsrades untergebracht sind. Auf diese Weise konnte im Vergleich zu den bestehenden Antriebsmodulen Bauraum sowohl im Durchmesser als auch in der Höhe eingespart werden. Die getriebelose Konstruktion begünstigt darüber hinaus den Einbau einer Federung, welche das Fahrverhalten auf unebenen Untergründen stark verbessert.

Der Servocontroller zur Ansteuerung des Fahrmotors und die benötigte Leistungselektronik sind vollständig in das Antriebsmodul integriert. Durch diese Kapselung gewinnt das Modul an Robustheit. In Kombination mit einem relativ frei gestaltbaren Lenkmotor können die Antriebsmodule leicht in beliebige omnidirektionale Plattformen eingebaut werden.

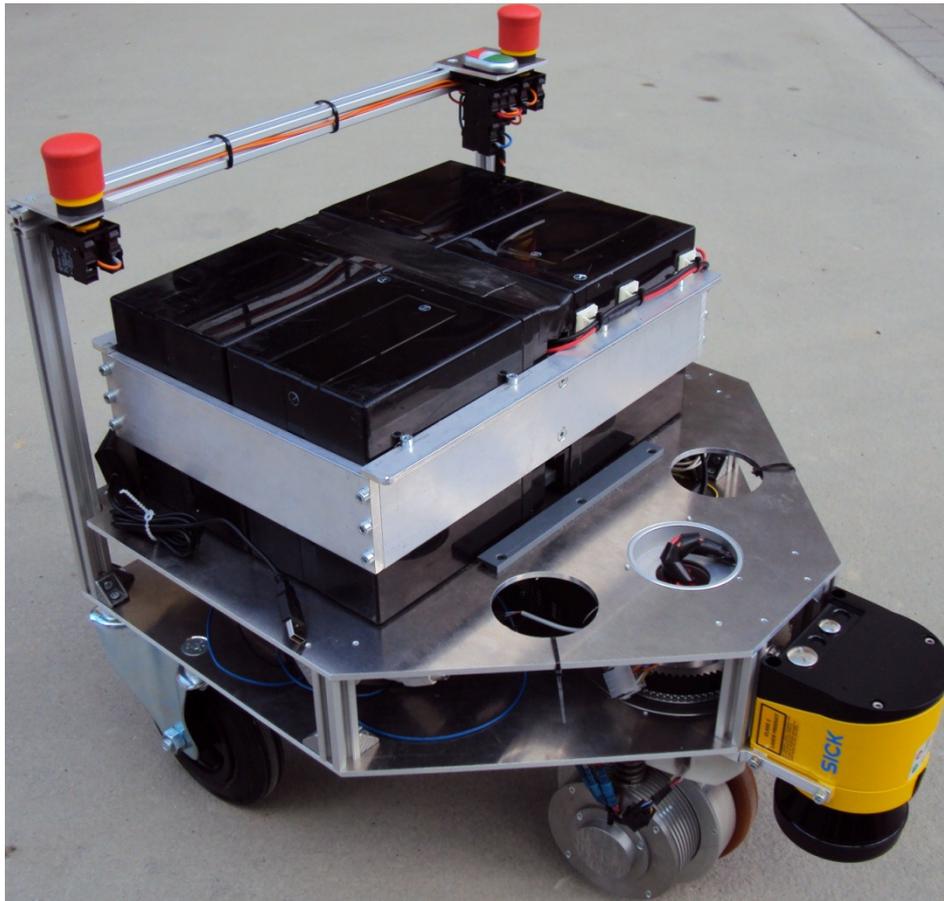


Abbildung 7: Testplattform für erste Funktionstests des Antriebsmoduls und für die Durchführung von Dauertests

Bei der Konstruktion der Antriebe wurde bewusst auf Skalierbarkeit geachtet. So kann ohne größere konstruktive Änderungen ein stärkerer Direktantrieb eingebaut werden, indem der untere Teil des Antriebsmoduls im Durchmesser vergrößert wird. Auch ein Austausch gegen härtere Federn, um höhere Lasten pro Rad zu ermöglichen, ist relativ leicht möglich. Der Schaft des Antriebsmoduls muss dabei kaum verändert werden. Abgesehen von der Verwendung größerer Antriebsmodule ist es selbstverständlich auch möglich, mehr als vier Antriebsmodule zu einer Plattform zu kombinieren. Damit eignen sich die Antriebsmodule auch für den Einsatz in fahrerlosen Transportsystemen, zur Beförderung größerer Lasten.

Derzeit wird das Antriebsmodul mit unterschiedlichen Reglerabstimmungen und Lastfällen getestet. Nach der Verifizierung der Leistungsdaten wird in praktischen Fahrttests das Verhalten beim Befahren von Rampen oder dem Überfahren von Schwellen getestet. In Dauertests soll schließlich die Haltbarkeit der eingesetzten Teile verifiziert werden. Nach Abschluss der Tests, wird unter Verwendung der neu entwickelten Antriebsmodule eine omnidirektionale Transportplattform für den Einsatz in Industrieumgebungen aufgebaut werden.

6 Literatur

- [1] Schraft, Rolf Dieter; Helms, Evert; Meyer, Christian (2004): Assistenzfunktionen des ASSISTOR-Demonstrators rob@work. Robotik 2004; München; 2004
- [12] Meyer, Christian; Hollmann, Rebecca; Parlitz, Christopher; Hägele, Martin (2009): Programmieren durch Vormachen für Assistenzsysteme – Schweiß- und Klebebahnen intuitiv programmieren. In: it – Information Technology; Vol. 49; Nr. 4; 2009; pp. 238-246.
- [3] Graf, Birgit; Hans, Matthias; Schraft, Rolf Dieter (2004): Mobile Robot Assistants – Issues for Dependable Operation in Direct Cooperation with Humans. In: IEEE Robotics & Automation Magazine; Vol. 11, 2004, No. 2, pp. 67-77.
- [4] Sakagami, Yoshiaki; Watanabe, Ryujin; Aoyama, Chiaki; Matsunaga, Shinichi; Higaki, Nobuo; Fujimura, Kikuo (2002): The intelligent ASIMO: System overview and integration. In: IEEE; RSJ (Hg.): 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS 2002, Sep 30 - Oct 4, 2002, Lausanne, Schweiz. Piscataway, NJ: IEEE Press, Bd. 3, pp. 2478-2483.
- [5] Raibert, Marc; Blankespoor, Kevin; Nelson, Gabriel; Playter, Rob (2008): BigDog, the Rough-Terrain Quadruped Robot. In: IFAC (Hg.): 17th International Federation of Automatic Control World Congress, Juli 6-11, 2008, Seoul, South Korea. Oxford: Elsevier, pp. 10822-10825.
- [6] Siegart, Roland; Nourbakhsh, Illah Reza (2004): Introduction to Autonomous Mobile Robots. Cambridge, Mass.: MIT Press (Intelligent robotics and autonomous agents).
- [7] Fuchs, M.; Borst, C.; Robuffo Giordano, P.; Baumann, A.; Kraemer, E.; Langwald, J. et al. (2009): Rollin' Justin – Design Considerations and Realization of a Mobile Platform for a Humanoid Upper Body. In: IEEE (Hg.): 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA 2009, May 12-17, 2009, Kobe, Japan. Piscataway, NJ: IEEE Press, pp. 4131-4137.
- [8] Reiser, Ulrich; Connette, Christian P.; Fischer, Jan; Kubacki, Jens; Bubeck, Alexander; Weisshardt, Florian et al. (2009): Care-O-bot 3 – Creating a product vision for service robot applications by integrating design and technology. In: IEEE; RSJ (Hg.): 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS 2009, Oct 11-15, 2009, St. Louis, Missouri, USA. Piscataway, NJ: IEEE Press, pp. 1992-1998.
- [8] Wyrobek, Keenan A.; Berger, Eric H.; van der Loos, H. F. Machiel; Salisbury, J. Kenneth (2008): Towards a Personal Robotics Development Platform: Rationale and Design of an Intrinsically Safe Personal Robot. In: IEEE (Hg.): 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA 2008, May 19-23, 2008, Pasadena, California, USA. Piscataway, NJ: IEEE Press, pp. 2165-2170.
- [10] Ilon, Bengt Erland: Wheels for a course stable selfpropelling vehicle movable in any desired direction on the ground or some other base, 13.11.1972. Anmelde nummer: 05/305,887. Veröffentlichungsnummer: US3876255.
- [11] Tadakuma, K.; Tadakuma, R. (2007): Mechanical Design of "Omni-Ball": Spherical wheel for Holonomic Motion. In: IEEE Conference on Automation Science and Engineering, ,Scottsdale, Sept. 2007, pp. 788-794.
- [12] West, M.; Asada, H. (1995): Design and Control of Ball Wheel Omnidirectional Vehicles. In: IEEE ICRA, Vol.2, Nagoya, May 1995, pp. 1931-1938.

- [13] Champion, Guy; Bastin, Georges; D'Andréa-Novel, Brigitte (1996): Structural Properties and Classification of Kinematic and Dynamic Models of Wheeled Mobile Robots. In: IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 12, No. 1, pp. 47-62.
- [14] Alexander, J. C.; Maddocks, J. H. (1989): On the Kinematics of Wheeled Mobile Robots. In: The International Journal of Robotics Research, Vol. 8, No. 5, pp. 15-27. Online verfügbar unter <http://ijr.sagepub.com/cgi/content/abstract/8/5/15>, zuletzt geprüft am 23.01.2010.
- [15] Muir, Patrick; Neuman, Charles P. (1986): Kinematic Modeling of Wheeled Mobile Robots. Robotics Institute, Carnegie Mellon University. Pittsburgh, PA. (CMU-RI-TR-86-12). Online verfügbar unter http://www.ri.cmu.edu/publication_view.html?pub_id=132, zuletzt geprüft am 15.01.2010.
- [16] Connette, Christian Pascal; Parlitz, Christopher; Hägele, Martin; Verl, Alexander (2008): The Mobility Concept of Care-O-bot 3. In: IFR 39th International Symposium on Robotics ISR2008; Oktober 15-17 2008, Seoul, Korea, pp. 746-750.