

# VuLF – Entwicklung eines Versuchsstandes zur Fehlerminimierung durch Fahrzeuganalyse

VuLF – Development of a test area to minimize bad influence with vehicle analysis

**Maximilian Hochstein**  
**Daria Kohler**  
**Tobias Baur**  
**Kai Furmans**

*Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme (IFL)  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)*

**F**ahrerlose Transportsysteme (FTS) kommen in der Intralogistik immer mehr zum Einsatz. Dabei werden neue Anforderungen an die FTS gestellt, die bisherige Aufgaben weit übersteigen. Der Transport von schweren Lasten und die Fahrt mehrere FTS in einer Formation sind dabei nur der Anfang einer Menge zukünftiger Einsatzgebiete.

Große Probleme stellen dabei Schlupf und Verschleiß dar, die bisher noch kaum erforscht sind, welche die Performance der Fahrzeuge jedoch stark beeinträchtigen. Um diese Fehlerquellen besser verstehen zu können, wurde ein Versuchsstand entwickelt, mit dessen Hilfe Einzelfahrten aber auch Formationsfahrten in Bezug auf Schlupf und Verschleiß besser untersucht werden können. Dabei kann ein sehr breites Spektrum an Fahrzeugarten abgedeckt werden, da Parameter wie Lenksysteme oder Bereifung variabel gewählt werden können.

*[Schlüsselwörter: Formationsfahrt, FTS, Versuchsaufbau, Fahrzeugparameter, Lenksysteme]*

**A**bstract: Influences of errors that lead to slip and wear on small scale transport systems are known, but have not been studied. New areas of responsibility are steadily opened up. Therefore the requirements for automated guided vehicle systems (AGVs) increase rapidly. To be able to study the influences of errors and to analyze the error's sources a test rig was developed. The objective described in the paper is an experimental setup that allows studying single trips as well as formation trips. Vehicle parameters and steering systems of the vehicle can be varied.

*[Keywords: formation trips, AGV, experimental setup, vehicle parameters, steering systems]*

## 1 MOTIVATION

Fahrerlose Transportsysteme (FTS) erfreuen sich unter anderem im intralogistischen Warentransport großer Beliebtheit. Durch ein hohes Maß an Flexibilität und Dynamik können durch den Einsatz von FTS Abläufe in Produktionsketten stark vereinfacht und beschleunigt werden. Am Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme in Karlsruhe [1] werden FTS entwickelt und mögliche zukünftige Einsatzgebiete untersucht. Dabei zeigt sich, dass es vonnöten ist FTS zu kreieren, welche möglichst klein und intelligent sind. Ein gutes Beispiel eines solchen Transportsystems stellt KARIS [2], ein neuartiges, intelligentes und autonomes Funktionsmodul für den Objekttransport dar.

Ein bisher ungelöstes Problem solcher FTS ist der entstehende Schlupf an den Rädern und ein davon herrührender Verschleiß. Vollaufführt das Fahrzeug eine Kurvenbahn für das zwangsläufig, je nach Lenksystem zu mehr oder weniger stark, zu Schlupf.

Beim Transport schwerer Waren ist dieser besonders groß und limitiert Anwendungen der FTS beträchtlich. Um z.B. große sperrige Gegenstände zu transportieren, können mehrere kleine FTS anstatt eines großen unflexibleren FTS zum Einsatz kommen. Als problematisch stellt sich dabei die Koordination der einzelnen Fahrzeuge heraus. Der Transport einer Palette beispielsweise zwingt die FTS in eine starre Formation. Da die Kurvenbahnen auf Grund äußerer als auch innerer Störungen jedoch nicht exakt übereinstimmen, werden die FTS durch die starre Verbindung zueinander auf die richtige Fahrbahn gezwungen. Dieses „Zwingen“ führt neben dem durch Lenkbewegungen verursachten Schlupf zu einer weiteren Schlupfquelle. Gerade beim Transport schwerer Ladungsträger spiegelt sich dieser Schlupf sehr stark im Verschleiß wieder.

Mit Hilfe des hier beschriebenen Versuchsaufbaus ist es möglich zu untersuchen, mit welchen Fahrzeugparametern der Schlupf minimiert werden kann und in welchem Maße die Art des Lenksystems Einfluss darauf hat.

Neben dem Experiment existieren mehrere Simulationsansätze und mathematische Modelle, mit deren Hilfe entstehender Schlupf erkannt und berechnet werden soll.

Robert L. Williams et al. [3] beschreiben ein dynamisches Modell, für räderne, omnidirektionale Roboter (s. Abb. 1). Nachdem experimentell die Bodenhaftung ermittelt werden konnte, wurden durch eine dynamische Simulation die Kräfte ermittelt, die bei einer omnidirektionalen Bewegung zum Schlupf führen.

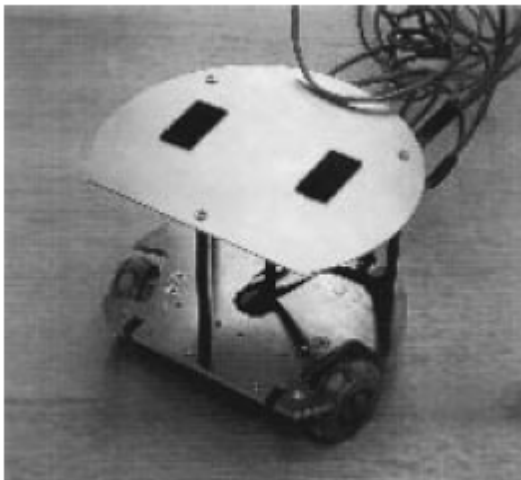


Abbildung 1: Räderner, omnidirektionaler Roboter für Schlupfuntersuchungen [3].

Ein weiteres Modell wird von Sidek et al. [4] beschrieben. Sie entwickelten ein theoretisches und systematisches Gerüst, in dem die Schlupfdynamik mit der allgemeinen Dynamik eines Roboters überlagert wurde. Als Plattform für das Modell diente ein dreirädriges Fahrzeug mit Radseitenlenkung und einem Nachlauftrad gemäß Abbildung 2.

Es wird deutlich, dass alle bisherigen Simulationen und Experimente auf ein jeweils, spezifisches und unveränderbares Fahrzeug beschränkt waren, daher erschließen sich aus den Ergebnissen nur sehr ungenaue Zusammenhänge zwischen Schlupf und Fahrzeugart.

Damit in Zukunft vor der Entwicklung eines FTS entschieden werden kann, welcher Fahrzeugtyp mit welchen Eigenschaften für die Anwendung in Frage kommt, damit der durch den Schlupf entstehende Verschleiß minimiert ist, müssen die Zusammenhänge zwischen Lenksystem, Fahrzeugparametern und Schlupf genau ermittelt werden. Dafür müssen möglichst viele Fahrzeugtypen untersucht werden. Um schnell zu einer großen Bandbreite an Ergebnissen zu gelangen, ohne für jede Parameteränderung ein neues Fahrzeug konstruieren und bauen zu

müssen, wurde ein universelles Versuchsfahrzeug entwickelt.

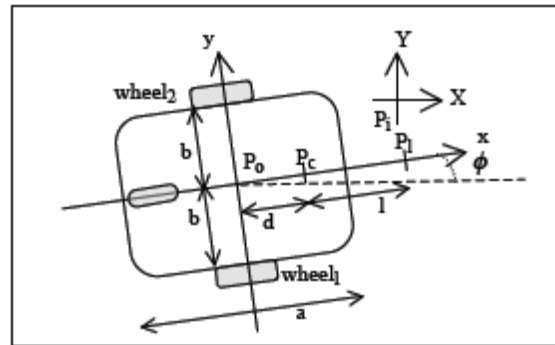


Abbildung 2: Skizze eines zur Schlupfuntersuchung verwendeten Fahrzeuges mit Radseitenlenkung und Nachlauftrad [4].

Der von uns entwickelte Versuchsaufbau zeichnet sich durch ein sehr flexibles FTS aus, bei dem zwischen vier verschiedenen Grund-Fahrzeugtypen gewählt werden kann. Auf Grund der hohen Flexibilität des entwickelten Versuchsfahrzeugs ist es möglich ohne großen Umbaufwand verschiedene Lenksysteme und Fahrzeugparameter zu untersuchen und miteinander zu vergleichen. Dabei können neben dem Lenksystem Spurweite, Radstand und Lagertoleranzen variiert werden.

## 2 DER VERSUCHSAUFBAU

Schlupf und Verschleiß kann durch viele verschiedene Einflüsse entstehen. Neben der bereits oben erwähnten Spuruntreue spielen dabei das Lenksystem bzw. die Lenkung, äußere Kräfteeinwirkungen auf das Fahrzeug und die Bodenbeschaffenheit eine große Rolle.

Dabei darf nicht nur die Minimierung des Verschleißes betrachtet werden, sondern auch das Maß der Wendigkeit des Fahrzeuges spielt bei der Wahl des optimalen Fahrzeuges für die jeweiligen Einsatzorte eine tragende Rolle. Dabei wird zwischen nicht omnidirektionalen, omnidirektionalen und holonomen Antriebsarten unterschieden.

Während sich nicht omnidirektionale Antriebe durch eine hohe Wendigkeit auf Grund eines sehr kleinen Wendekreises auszeichnen, besitzen die Fahrzeuge im Gegensatz zum omnidirektionalen Antrieb eine Vorzugsrichtung. Das heißt, Fahrzeuge mit einem omnidirektionalen Antrieb können sich zusätzlich zur Vor- und Rückwärtsbewegung in jede andere Himmelsrichtung bewegen und besitzen somit keine eindeutige Vorzugsrichtung. Allerdings ist mit einer Richtungsänderung gleichzeitig auch eine Winkeländerung des Einschlags der antreibenden Motoren verbunden. Dies führt zu einem zeitlichen Versatz [5].

Von einem holonomen Antrieb wird gesprochen, wenn das Fahrzeug unmittelbar seine Fahrtrichtung ändern kann. Dies ist möglich, da die Richtung nicht von einem Lenkwinkel, sondern nur von der Drehzahl der Antriebsräder abhängt[6]. Im Gegensatz dazu sind also nicht holonome Roboter in den Freiheitsgraden der Bewegung eingeschränkt, sie unterliegen also holonomen Zwangsbedingungen. Bewegungen in Richtung bestimmter Winkel können dann beispielsweise nur durch eine Rückwärtsbewegung vollführt werden. Holonome Fahrzeuge sind dementsprechend immer Omnidirektional, während eine Omnidirektionale Lenkung nicht durch ein holonomes Fahrzeug umgesetzt werden muss.

Bisher ist es nicht gelungen alle Antriebsarten in einem Fahrzeug zu vereinen, daher wurde in einer ersten Versuchsreihe ein Versuchsaufbau gewählt, der die gängigsten Antriebsarten abdecken kann. Da der Radseitenantrieb in der Praxis am häufigsten Verwendung findet wurde auf diesen ein besonderes Augenmerk gesetzt, zusätzlich kann zwischen der Knicklenkung mit Allrad oder Nachlauftrad und Meccanumrädern gewählt werden. Darüber hinaus können bei allen Fahrzeugen die Spurweite, der Radstand, die Lagertoleranz, die Steifigkeit und die Räder variiert werden. Mit unterschiedlichen Spurtweiten und Radständen können unterschiedliche Maße eines Fahrzeugs simuliert werden. Durch das Testen verschiedener Reifen, können das optimale Material und Profil für verschiedene Untergründe und Umgebungen ermittelt werden. Um Untersuchungen im Verbund durchführen zu können wurden vier unabhängig ansteuerbare Fahrzeuge angefertigt.

Da die Änderungen der Parameter einfach und schnell durchgeführt werden kann, können die Versuche schnell und realitätsnah umgesetzt werden. Um eine Fahrt unter Last zu simulieren sind die Fahrzeuge in der Lage mindestens 100 kg zu transportieren.

In den folgenden Abschnitten werden die verschiedenen Lenksysteme und die Veränderung der beiden Fahrzeugparameter Spurweite und Radstand beschrieben.

## 2.1 RADSEITENLENKUNG

Bei den oben aufgezählten Lenksystemen fällt die Radseitenlenkung oder Bremslenkung aus der Reihe. Im Gegensatz zu den anderen Systemen besitzt ein solches nicht omnidirektionales Fahrwerk außer den Rädern keine beweglichen Teile, was es für einfache Anwendung sehr attraktiv macht (s. Abb. 3). Die Räder können dabei nicht um einen bestimmten Winkel geneigt werden, sondern sind starr mit der Achse verbunden, können jedoch unabhängig voneinander angesteuert werden. Das es eines der Ziele ist, mittels des Versuchsfahrzeuges die Fahreigenschaften von kleinen wendigen eventuell Paletten transportierenden Roboter, siehe Projekt BiNe [7], zu ermitteln, bietet sich die Radseitenlenkung als zu testen-

des Lenksystem an. Zu ihrer Wendigkeit kommt der Vorteil hinzu, dass sie bei sehr beengten Platzverhältnissen zum Einsatz kommen kann. Die Lenkbewegung kommt durch unterschiedliche Drehzahlen der beiden Seitenräder des Fahrzeugs zustande. Ein großer Nachteil dieses Systems ergibt sich auf Grund großen Schlupfes, was schnell zu großem Verschleiß führen kann.

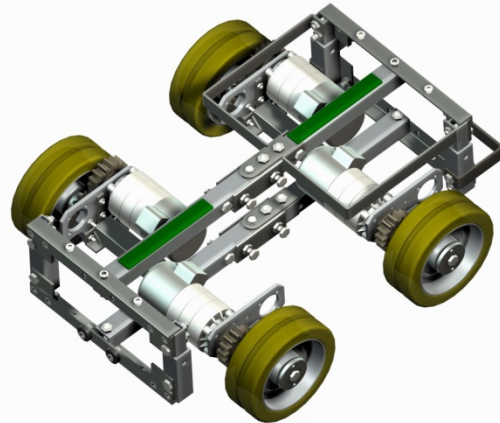


Abbildung 3: Fahrwerk mit Radseitenlenkung.

## 2.2 KNICKLENKUNG

Bei der nicht omnidirektionalen Knicklenkung wird das Fahrzeug in zwei Hälften geteilt, die jeweils auf einer starr mit ihnen verbundenen Achse laufen und durch ein Drehgelenk miteinander verbunden sind (s. Abb. 4).

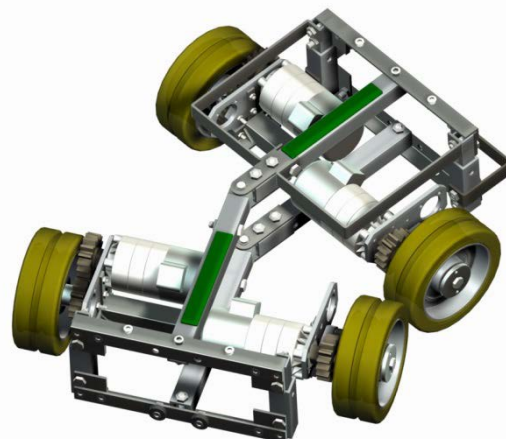


Abbildung 4: Fahrwerk mit Knicklenkung

Diese Form der Lenkung bietet mehr Stabilität als die Schwenkachslenkung. Sie ist aber nur für Fahrzeugtypen geeignet, die funktionell in zwei separate Elemente aufgeteilt werden können, die nur über das Gelenk verbunden werden müssen.

### 2.3 MECCANUM

Durch die Ausstattung eines steifen Fahrwerks mit Meccanum Rädern (s. Abb. 5), wird diesem ermöglicht holonome, omnidirektionale Bewegungen auszuführen. Auf der Felge eines solchen Rades sind mehrere, drehbar gelagerte Rollen im 45° Winkel zur Radachse hin befestigt. Die Bewegung eines einzelnen Rades wird nicht durch die Ansteuerung der einzelnen Rollen vollzogen, diese sind frei beweglich gelagert. Nur das gesamte Rad kann von einem Motor angetrieben werden, welcher den Drehsinn und die Umdrehungsgeschwindigkeit variiert.



Abbildung 5: Meccanum Rad. Entnommen aus [8]

Sind an einem Fahrwerk vier solche Räder angebracht, kann jedes dieser Räder einzeln angesteuert werden. Mit der richtigen Ansteuerung der einzelnen Räder wird nun bewirkt, dass sich die Rollen unterschiedlich auf dem Boden abrollen. Je nachdem können so Bewegungen und Drehungen in alle Richtungen vollzogen werden.

### 2.4 FAHRZEUGPARAMETER SPURWEITE UND RADSTAND

Der Aspekt, der bis jetzt noch am wenigsten untersucht wurde ist, welchen Einfluss die Spurweite, der Radstand und deren Verhältnis auf den Schlupf haben.

Aus diesem Grund sind die Achsen des Versuchsfahrzeuges wie in Abbildung 6 dargestellt ist längenverstellbar um die Spurweite variieren zu können. Der Radstand kann durch Verschieben der Achsen nach vorne und hinten vergrößert oder verkleinert werden (s. Abb. 7). Da bei der Einhaltung der Spur nicht nur äußere, sondern auch innere Fehlereinflüsse eine Rolle spielen, können durch Veränderung des Lagerspiels Fehler provoziert werden. Um verschieden Bodenhaftungen simulieren zu können ist ein Wechsel der Bereifung mit wenigen Handgriffen möglich.

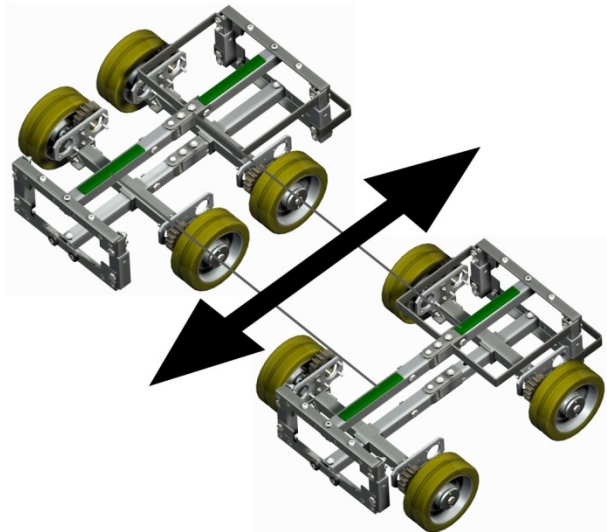


Abbildung 6: Veränderung des Radstandes eines Fahrzeuges.

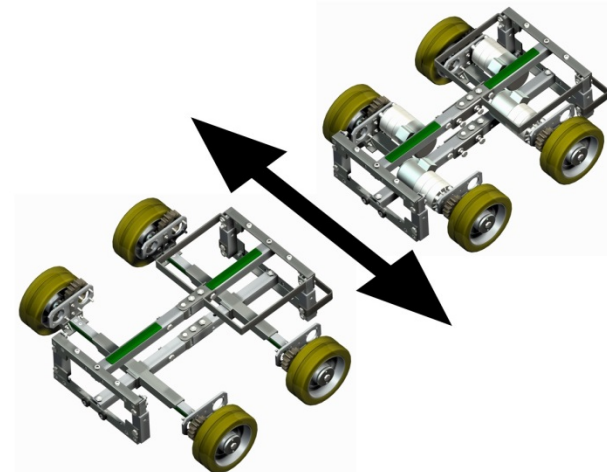


Abbildung 7: Veränderung der Spurweite eines Fahrzeuges.

## 3 VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

In einem möglichen Versuchsszenario muss das Fahrzeug mit einer bestimmten Einstellung der Parameter eine vorgegebene Strecke abfahren (Abb. 8). Mit dem Wissen um die durchgeführten Radumdrehungen kann errechnet werden, an welcher Stelle sich das Fahrzeug am Ende seiner Fahrt befinden sollte. Aus der Differenz zwischen Ist- und Soll-position können wiederum Rückschlüsse auf die Fehleranfälligkeit gezogen werden, da ein entstehender Schlupf sich auf die Weite und Richtung der zurückgelegten Strecke auswirkt. Um bei den Versuchen repräsentative Ergebnisse zu erzielen, sind viele Durchläufe notwendig, was bei der Anzahl an Verstellmöglichkeiten zu einer kaum zu bewältigenden Fülle an Versuchen führen könnte. Um die Anzahl an Versuchen zu verringern, bei der ein Mitarbeiter vor Ort sein muss,

ist es wichtig einen großen Teil der Versuche zu automatisieren. Eine Methode zur exakten und automatischen Bestimmung der Ist-Position ist dabei unerlässlich.



Abbildung 8: Einzelfahrtversuche

Zusätzlich können Formationsfahrten von mehreren Fahrzeugen durchgeführt werden (s. Abb. 9). Dabei kann zwischen Formationsfahrten unterschieden werden, bei denen die Fahrzeuge unterschiedlich miteinander verbunden sind. Zu erwarten sind divergierende Abweichungswerte von den vorgegebenen Zielen, je nachdem, ob die Fahrzeuge frei fahren oder starr aneinander gekoppelt sind.

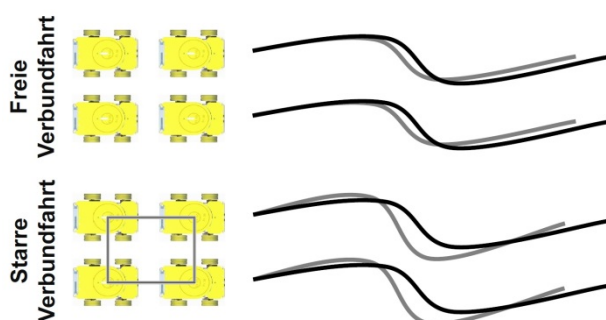


Abbildung 9: Verbundfahrtversuche

Mit Hilfe solcher Versuche können zum einen die Fahrzeugparameter angepasst und dadurch die Schlupfentwicklung minimiert werden. Zum anderen kann die Regelung der Fahrzeuge so verbessert werden, dass die tatsächlich zurückgelegte Strecke der vorgegebenen Strecke möglichst nahe kommt.

Bei der Durchführung der Versuche liegt eine der Herausforderungen in der Erkennung der Ursprünge der auftretenden Fehler. Ein sehr großer Anteil kann durch äußere Einflüsse stattfinden, die nur im weiteren Sinne etwas mit den Fahrzeugparametern zu tun haben und je nach Präzision zu unterschiedlichen Ergebnissen führen. Als Beispiel sei der Untergrund aufgeführt. Ein nicht homogener Untergrund kann alleine durch Unebenheiten, oder schlimmer, durch unterschiedliche Rauigkeitswerte das Fahrverhalten beträchtlich beeinflussen. Mit der Wahl der passenden Bereifung, können auch hier große Verbesserungen erzielt werden. Damit ein Fahrzeug jedoch tatsächlich an dem Vorbestimmten Ort ankommt, müssen die verbleibenden Fehler korrigiert werden, was nur mit einer permanenten Abstimmung der tatsächlichen Position des Fahrzeuges möglich ist. Diese Problematik verschlimmert sich sogar noch beim Anfahren oder Abbremsen der Fahrzeuge. Wird beispielsweise die An-

fahrtsrampe zu steil gewählt entsteht schon beim Beschleunigen durch Schlupf ein Fehler, der größer sein kann, als der, der beim normalen Fahren entsteht.

Zu berücksichtigen ist auch die Stellung des Nachlaufrades oder der Knickwinkel der Knicklenkung beim Positionieren des Fahrzeuges.

Da noch nicht bekannt ist, ob die Eigenschaften unseres Hallenbodens für die Versuche ausreichend sind, müssen, neben möglichst flachen Anfahrampen und einer Vorrichtung zur Fixierung auch Methoden der Messung eronnen werden, die den schädlichen Einfluss weitestgehend eliminieren.

Geplant ist die Vermessung des Start- und des Endpunktes. Über die Entfernung des realen Endpunktes vom errechneten können Rückschlüsse auf Fehler und somit Schlupf gezogen werden. Sind die Starteinstellungen und die Beschleunigungen nicht in ausreichendem Maße reproduzierbar, muss die gesamte Fahrstrecke aufgezeichnet werden. Eine Auswertung erfolgt dann erst nachdem der Beschleunigungsprozess abgeschlossen ist und sich das Fahrwerk so eingestellt hat, dass Startfehler von einer fehlerhaft platzierten Lenkung (Knickwinkel) ausgeschlossen werden können.

#### 4 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Während dieses Projektes konnte ein Versuchsstand mit vier Versuchsfahrzeugen entwickelt und umgesetzt werden. Bei den Fahrzeugen sind die Spurweite und der Radstand stufenlos einstellbar. Je nach Versuch kann man als Lenksystem zwischen verschiedenen Radseitenlenkungsmodi, Knicklenkung und einer Lenkung mittels Meccanum-Räder wählen. Als weiterer Parameter ist es möglich das Lagerspiel verschieden groß einzustellen. Um Versuche unter Last durchführen zu können wurden die Fahrzeuge so konstruiert, dass sie bis zu 130 kg transportieren können.

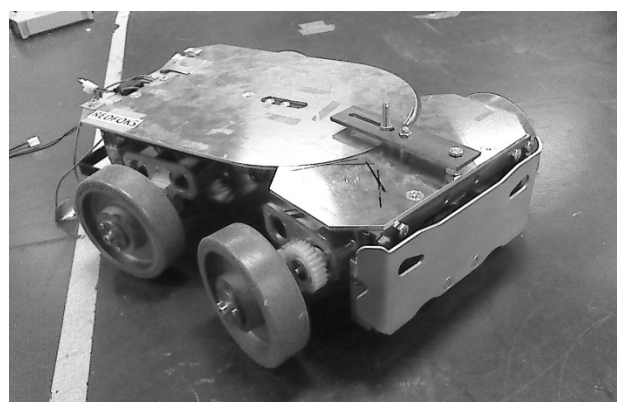


Abbildung 10: Foto des Versuchsfahrzeugs.

In kommenden Projektabschnitten gilt es homogene Randbedingungen für die Versuche zu schaffen. Durch die Erkenntnisse, die bei den Versuchen erzielt werden erhoffen wir uns ein besseres Verständnis der Auswirkungen der Fehlereinflüsse auf das Fahrverhalten.

Eine der Herausforderungen besteht darin, mit Hilfe der erlangten Erkenntnisse eine Software zu programmieren, die nach Eingabe der Randbedingungen das passende Lenksystem mit den dazu gehörigen Fahrzeugparametern ausgibt.

Im Verlauf des Projektes soll des Weiteren, durch die Installation von Kraftsensoren, die bei der Formationsfahrt zwischen den Fahrzeugen auftretenden Kräfte ermittelt werden. Ziel ist anhand der Kräfte ein Modell zu erstellen, welches die Auswirkungen des Fehlverhaltens eines oder mehrerer Fahrzeuge auf die gesamte Formation beschreibt.

## LITERATUR

- [1] Institut für Fördertechnik und Logistik, Karlsruhe, IFL, Okt. 2013. <http://www.ifl.kit.edu>
- [2] Kleinskaliges Autonomes Redundantes IntralogistikSystem – KARIS, IFL, Okt. 2013. [http://www.ifl.kit.edu/mitarbeiter\\_1312.php](http://www.ifl.kit.edu/mitarbeiter_1312.php)
- [3] R. L. Williams; B. E. Carter; P. Gallina, G. Rosati.: *Dynamic Model With Slip for Wheeled Omnidirectional Robots*, Dept. of Mech. Eng., 18:285 – 293, 2003.
- [4] N. Sidek; N. Sarkar: *Dynamic Modeling and Control of Nonholonomic Mobile Robot with Lateral Slip*, Systems, 35 – 40, 2008
- [5] J. Hertzberg: *Mobile Roboter: Eine Einführung aus Sicht der Informatik*, Springer, 2012.
- [6] J.-P. Laumond: *Robot motion planning and control*, Springer, 1998.
- [7] Basic Intralogistic Element, IFL, Okt. 2013. 1998.[http://www.ifl.kit.edu/1003\\_1374.php](http://www.ifl.kit.edu/1003_1374.php)
- [8] Imetron, Gesellschaft für industrielle Mechatronik mbH, Okt. 2013. <http://www.imetron.de/mecanum/mecanum-rad/>