

Tests und Fahrversuche für sehr leichte elektrische Nutzfahrzeuge

Prof. Dr. Andreas Daberkow, B.Sc. Verena Barske

Hochschule Heilbronn HHN
Studiengang Automotive Systems Engineering ASE
Max-Planck-Str. 39
74081 Heilbronn
andreas.daberkow@hs-heilbronn.de
vbarske@stud.hs-heilbronn.de

Abstract: Kleine emissionsarme elektrische Nutzfahrzeuge sind ein wichtiges Element einer künftigen urbanen Mobilität. Doch auch bei geringen Geschwindigkeiten können in Fußgängerzonen oder im gemischten Verkehr Ausweichmanöver erforderlich sein. Viele der in der Regel kleineren Hersteller haben nicht die Entwicklungressourcen, um die aus dem Automobilbereich langjährig bewährten und kostenoptimierten Sicherheitssysteme zu entwickeln, zu adaptieren und in den Fahrzeugen zu implementieren. Am Beispiel eines elektrisch angetriebenen Lastendreirades wird gezeigt, wie neben einem Lenkwinkelsensor ein Smartphone als preisgünstiges Messgerät eingesetzt werden kann. Es werden aus der Automobilentwicklung abgeleitete Tests und Fahrversuche in der Kreisbahn durchgefahren. Schon bei geringen Kurvengeschwindigkeiten können Ausweichmanöver auf ein kritisches Kipp- und Schleuderverhalten des Fahrzeugs führen. Konzeptentwürfe zur Reduzierung des Verletzungsrisikos für Insassen und Passanten runden den Beitrag ab.

1 Einleitung

Leichte elektrische Nutzfahrzeuge als Transportalternative im Wirtschaftsverkehr von Handwerk, Dienstleistung und Handel werden im Projekt “Ich entlaste Städte” erforscht [DLR24]. Die nachfolgend beschriebenen Fahrversuche werden mit dem Typ des dreirädrigen Lastenrads aus Abb. 1 links durchgeführt. Das Lastenrad aus Abb. 1 Mitte ist vierrädrig und hat einen Wetterschutz. In Abb. 1 rechts ist ein dreirädriges Lastendreirad mit einem Wechselcontainer abgebildet. Alle Fahrzeuge werden mittels Muskelkraft und mit einem unterstützenden Elektromotor bewegt (maximal elektrisch unterstützte Geschwindigkeit 25 km/h). Ladevolumina und Gesamtgewichte zu den nachfolgend als eLastenräder bezeichneten Fahrzeugen finden sich in [DLR24], der Projektträger ist das DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt).



Abbildung 1: Leichte elektrische Nutzfahrzeuge, DLR-Projekt “Ich entlaste Städte 2” [DLR24], Bildquelle DLR / Amac Garbe

Das dreirädrige Prinzip mit einem lenkbaren Rad vorne nach Abb. 1 links erlaubt eine von der Last nicht beeinträchtigte Sicht. Die starre Konstruktion mit einer ungefederten Pritsche hat einen einfachen Aufbau mit vielen Übernahmekomponenten aus der Zweiradtechnik. Den größten Zuwachs im deutschen Markt 2023 findet man bei eLastenrädern in Höhe von 189.000 Stück mit einem Zuwachs von 14,5 %. Der Anteil von eLastenrädern an elektrisch unterstützten Fahrrädern ist von 7,5 % auf 9 % gestiegen [ZIV23]. Verkehrssichere Fahrzeuge müssen eine geeignete Ladungssicherung oder Maßnahmen zum Selbst- und Kontrahentenschutz (hier Fußgänger) aufweisen. Weitere Maßnahmen zur Fahrzeugsicherheit umfassen die Qualität von Bremsen und Reifen und ggf. Fahrerassistenzsysteme wie Antiblockier- oder Antischleudersysteme. Das Team der Hochschule Heilbronn hat für eLastenräder im gemeinschaftlichen Verkehr mit Fußgängern und anderen Fahrzeugen mögliche kritische Fahrsituationen herausgearbeitet, siehe Abb. 2.

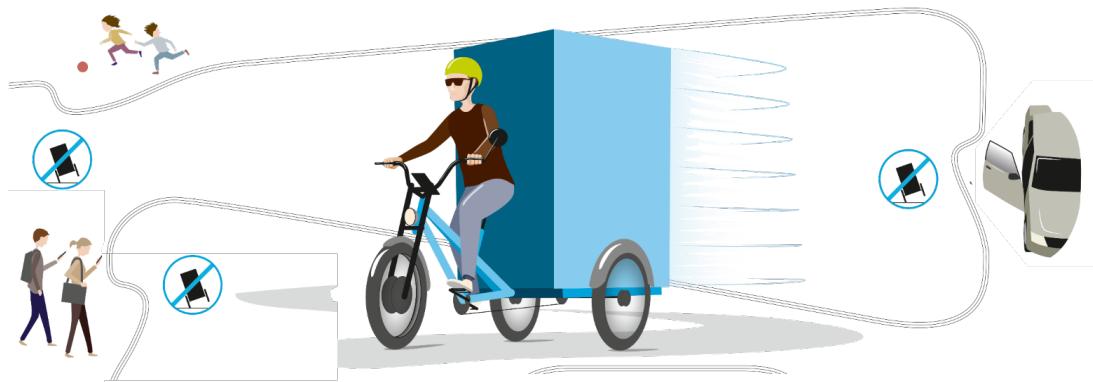


Abbildung 2: eLastenräder und kritische Fahrsituationen im gemeinschaftlich genutzten Verkehrsraum

Die DIN 79010 „Fahrräder – Transport- und Lastenfahrrad – Anforderungen und Prüfverfahren für ein- und mehrspurige Fahrräder“ [DIN79] enthält erste Sicherheitsregeln.

Die Richtlinie umfasst sicherheitstechnische Ausführungen wie z.B. zur Berechnung der Schwerpunktlage oder zur quasistatischen seitlichen Kippstabilität. Es ist eine Kreisfahrt ohne Abheben von Rädern auf einer ebenen Fläche mit einer konstanten Geschwindigkeit von 8 km/h auf einer Kreisbahn mit Durchmesser von 10 m durchzuführen. Dynamische Ausweichmanöver sind nicht vorgesehen.

Dies ist für das Team ASE an der HHN die Motivation für erste praktische Untersuchungen und Testfahrten mit einem eLastendreirad [Da22]. Alle kritischen Fahrsituationen nach Abb. 2 erfordern, dass FahrerInnen des eLastendreirades zur Vermeidung eines Zusammenstoßes reagieren müssen. Zwei Forschungsfragen dazu sollen beantwortet werden:

- Ist ein Kippen von eLastendreirädern in Kurven oder bei Ausweichmanövern eine Vermutung oder tatsächlich ein kritischer Fahrzeugsicherheitsaspekt?
- Wie kann der Aufwand einer Mess- und Sicherheitstechnik für eLastendreiräder durch Übernahme von Komponenten aus einer Automobilentwicklung gering gehalten werden ?

2 Testfahrzeug und erste Testfahrten

Das eLastendreirad des Herstellers [Radk24] hat einen elektrischen Vorderradantrieb, die Teleskopgabel ist gefedert und gedämpft und der Pedalantrieb wirkt auf ein Rad der ungefederten Hinterachse. Scheibenbremsen wirken am Vorderrad und an beiden Hinterrädern. Die elektrische Antriebsleistung beträgt 250 W bei einem maximalen Drehmoment von 70 Nm. Mit einem Achsabstand von 1818 mm und einer Spur von 940 mm ist das Fahrzeug kompakt. Für die fahrdynamischen Untersuchungen wird das Fahrzeug mit einer Stützkonstruktion ergänzt, siehe Abb. 3, welche das Fahrzeuggewicht und die Schwerpunktlage nur unwesentlich beeinflusst. Das Fahrzeug ist während der Testfahrten unbeladen. Das Kippen des Fahrzeugs wird dadurch bewirkt, dass während einer Fahrt mit konstanten Bahngeschwindigkeiten v von der Fahrerin ein sprungförmiger Lenkwinkel δ zum Kreismittelpunkt hinein ausgeführt wird.

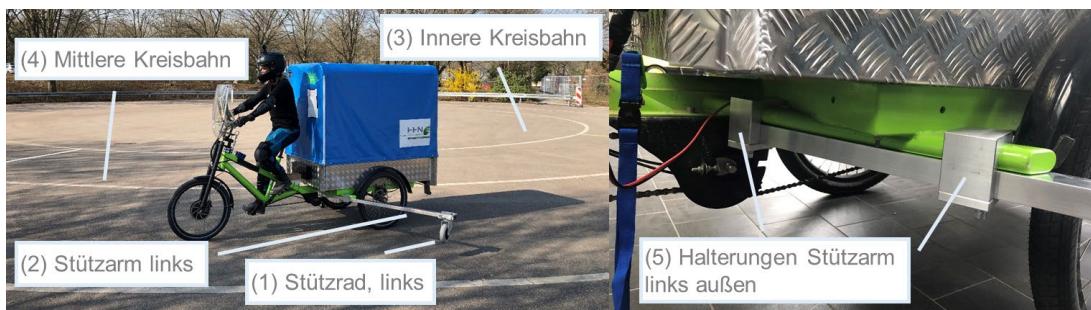


Abbildung 3: Stützkonstruktion des eLastendreirads [Radk24] für Testfahrten

Gummi-Stützräder (1) in Abb. 3 an jedem Stützarm (2) können das Fahrzeug nach dem Abheben eines Hinterrades führen. Die befahrenen Kreisbahnen des ASE-Testgeländes haben einem Durchmesser $D_i = 24,1$ m für die innere Bahn (3) sowie von $D_m = 31,1$ m für die mittlere Bahn (4). Die Halterungen (5) erlauben eine schnelle Montage bzw. Demontage der Stützarme.

Für die Tests wurde ein Gesamtprogramm mit sechs Testprogrammen und verschiedenen Fahrmanövern bei Geschwindigkeiten von 10, 15 und 20 km/h umgesetzt. Jedes Programm startet mit einer Einfahrt in die Kreisbahn und durchläuft die mittlere und innere Kreisbahn, an einem fixen Ort wird der Lenkwinkelsprung durchgeführt. Zum Abgleich werden Links- und Rechtskurven gefahren. Um den Einfluss von Bremsmanövern zu untersuchen, wird im Programm 3 eine Hinterradbremse durchgeführt und im Programm 4 eine Bremsung vorne.

Bei allen Lenkwinkelsprüngen konnte schon bei den ersten Testfahrten eine deutliche Kippneigung festgestellt werden. Bereits bei $v = 10$ km/h und einem Lenkwinkelsprung auf der mittleren Kreisbahn hebt das kurveninnere Rad leicht ab. Die Sequenzen in Bild 4 zeigen von links nach rechts das Durchfahren der mittleren Kreisbahn bei einer Geschwindigkeit von $v = 15$ km/h gefolgt von dem Lenkwinkelsprung. Nur die Stützkonstruktion verhindert das vollständige Kippen.



Abbildung 4: eLastendreirad mit Lenkwinkelsprung und zweifacher Kippneigung

Derartige Ausweichmanöver können auch nach Expertise der professionellen Testfahrerin nicht durch ungeschultes Fahrpersonal bewältigt werden. Eine hohe Beladung kann bei günstiger Schwerpunktlage die Kippneigung verringern oder bei ungünstiger Schwerpunktlage sogar erhöhen. Die erste Forschungsfrage aus der Einleitung ist geklärt – die Kippneigung ist tatsächlich vorhanden und ein kritischer Fahrzeugsicherheitsaspekt, welcher beispielweise durch aktive Fahrwerkskomponenten verhindert werden kann.

3 Messtechnik und fahrdynamische Größen

Zur Auswahl einer geeigneten Messtechnik wurde der aktuell publizierte Stand von Forschungsarbeiten herangezogen. Nach den Arbeiten [Ho00] an einem Dreiradfahrzeug mit PKW-ähnlicher Bereifung sind weitere Forschungstätigkeiten zu dreirädrigen Fahrzeugen vorwiegend im außereuropäischen Raum identifiziert worden.

Von einer indonesischen Forschergruppe wird in [End22] ein sogenannter Rollover Index (RI) abgeleitet und bewertet. Dieser Index baut auf den rechen- oder messtechnisch zu ermittelnden Radaufstandskräften für die drei Räder auf. Seit langem befassen sich Forscher aus einem mexikanischen Team mit der theoretischen und simulatorischen Untersuchung der Kippstabilität von Dreiradfahrzeugen [Va18], [Ro21]. Auch hier wird der Rollover Index betrachtet. Die in diesen Arbeiten untersuchten Fahrzeuge haben Reifen und Räder aus der Automobiltechnik und decken einen höheren Geschwindigkeits- und Lastbereich als die betrachteten eLastendreiräder ab. Zu den Erprobungen im Jahr 2022 waren keine fahrdynamischen Experimente zur Kippstabilität von elektrisch unterstützten dreirädri gen Lastenfahrrädern bekannt.

Eine fahrdynamische Modellbildung und die Auswahl einer geeigneten Messtechnik sind eng miteinander verzahnt. Die Pritsche des Fahrzeugs ist ungefedert und ein Eintauchen der Vorderradgabel beim Lenkwinkelsprung kann vernachlässigt werden. Das Nicken und das Wanken des eLastendreirads wird daher vernachlässigt. Eine gute Näherung der Fahrzeugkinematik stellt daher das sogenannte Einspurmodell [Mit04] dar, welches nach Abb. 5 (unmaßstäblich) für die kinematische Modellierung des eLastendreirades zugrundegelegt wird.

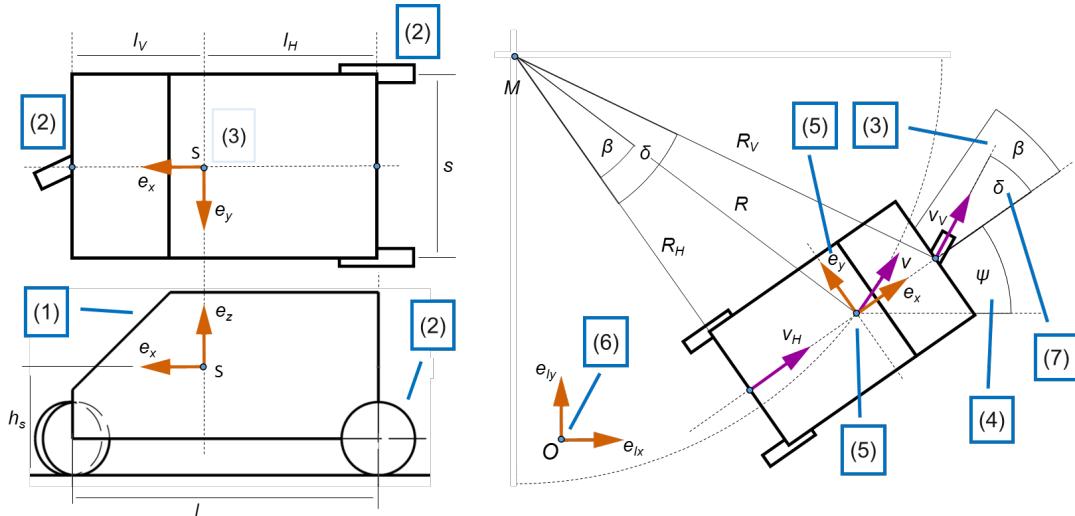


Abbildung 5: Modellbildung des eLastendreirads in Anlehnung an das Einspurmodell [Mit04] und kinematische Größen

Der ungefederte Aufbau mit Fahrer, Pritsche und Last sind durch einen starren Körper (1) angenähert. Die fahrradähnlichen Räder (2) werden als masselos und starr betrachtet. Die Vorderradgabel wird ebenfalls als masselos angenommen. Nach Abb. 5 kennzeichnen β den sogenannten Schwimmwinkel (3) und ψ den Gierwinkel (4) des Fahrzeugkoordinatensystems (5) gegenüber dem Inertialsystem (6). Das Fahrzeugkoordinatensystem hat die Abstände l_v und l_h zu den Achsmittelpunkten vorne und hinten sowie die Schwerpunkthöhe h_s .

In Abb. 5 erkennbar sind zudem der (momentane) Kreismittelpunkt M , die Kurvenradien R_V , R und R_H , die Starrkörpergeschwindigkeit v (7) sowie der Lenkwinkel δ (8).

Am eLastendreirad bleibt nur wenig Bauraum, um Sensorik und Datenerfassung am Fahrzeug zu implementieren. Ein neuer Weg für diese Fahrzeugart und deren Einsatz ist es, das von FahrerInnen mitgeführte Mobiltelefon als Sensoreinheit zu nutzen. Selbst kostengünstige Mobiltelefone als sogenannte Smartphones haben heute eine Vielzahl von Sensoren für kinematische Größen. Eine aus der technisch-wissenschaftlichen Ausbildung bekannte Applikation auf dem Smartphone ist Phyphox [Phy24]. Phyphox sensiert und speichert auf dem Smartphone die Gierrate als erste Ableitung des Gierwinkels ψ , die Bahnbeschleunigungen a_x , a_y und a_z in Bezug auf das geräte- bzw. fahrzeugfeste Koordinatensystem sowie den Betrag der Bahngeschwindigkeit v . Das Smartphone wird daher als Sensorikeinheit genutzt und so in der Nähe des gedachten Fahrzeugschwerpunktes in einer Halterung (1) am Fahrzeugrahmen befestigt, siehe Abb. 6.

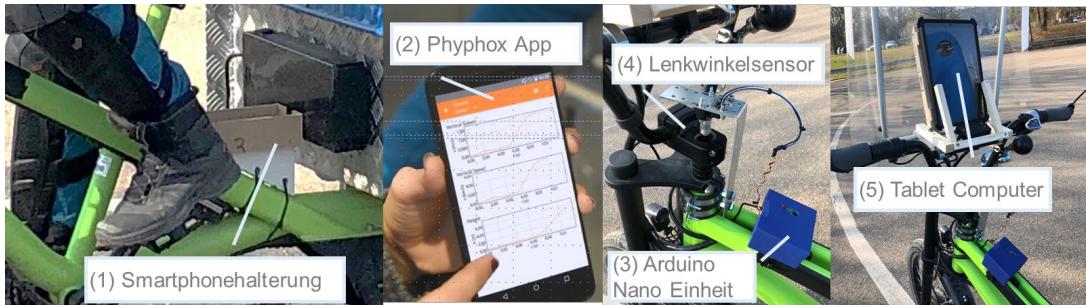


Abbildung 6: Sensorik und Messdatenerfassung am eLastendreirad

Eine Geräteebene des Smartphones ist durch die Halterung (1) zur Fahrbene näherungsweise parallel. Zusammen mit einer sogenannten Physical-Computing-Einheit Arduino [Ard24] wird der Lenkwinkelsensor (4) hard- und softwaretechnisch integriert. Die Smartphone-App (2) sensiert redundant die vom Arduino gemessene Gierrate sowie die Beschleunigungen. Das Signal der Gierrate liegt damit zweifach vor und kann zur Kompensation eines zeitlichen Signalversatzes von Smartphone und Arduino-Einheit (3) genutzt werden.

Als dritte Sensorikeinheit wird nach Abb. 6 rechts ein am Lenker montiertes Tablet (5) genutzt, welches der Fahrerin die aktuell ermittelte Geschwindigkeit v als Richtgröße anzeigt. Damit kann nun das Testprogramm messtechnisch aufwandsarm unterstützt werden.

Beispielhaft für die Messdatenauswertung ist in Abb. 7 der gemessene und berechnete Verlauf der Gierrate für zwei Lenkwinkelsprünge über der Zeit dargestellt. Deutlich erkennbar ist die näherungsweise Konstantfahrt im Zeitabschnitt von 45 bis 70 s und von 88 bis 103 s. Dazwischen wurden zwei Lenkwinkelsprünge während der Fahrt einbracht und ein Kippen mit Gegenlenkbewegungen kompensiert. In blau dargestellt ist die durch das Smartphone gemessene Gierrate.

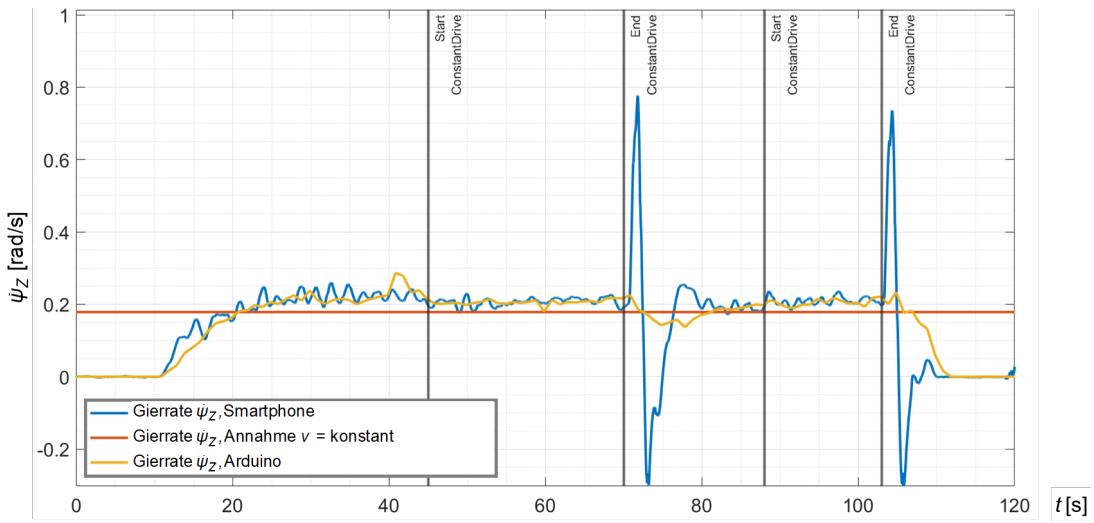


Abbildung 7: Gierrate bei Lenkwinkelsprung, Linkskurve $v = 10 \text{ km/h}$, mittlerer Radius

Unerwartet ist, dass es trotz der Einfahrrunde in der Kreisbahn schwer fällt, eine konstante Fahrgeschwindigkeit v einzuhalten. Dies ist zum einen durch das ruckartige Einsetzen des Elektromotorantriebs und zum anderen durch die beobachtete Mittelwertbildung der Tachometer-Applikation (5), Abb. 6, bedingt. Die Übereinstimmung der Messgrößen mit den Approximationen des Einspurmodells aus [Mit04] wird insgesamt als ausreichend erachtet.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Das Kippen von Lastenfreirädern bei Ausweichmanövern ist nachweislich ein wichtiger Fahrzeugsicherheitsaspekt. Lenkwinkelsprünge als Testsignal führen zu einem Abheben des jeweils kurveninneren Hinterrades und damit zum Kippen, welches hier nur durch die Stützkonstruktion und eine professionelle Fahrerin beherrscht werden kann. Das für FahrerInnen verfügbare Smartphone ist eine neue Option der Fahrerassistenz. Derzeit unverzichtbar ist ein Lenkwinkelsensor, der als neue Komponente im eLastendreirad konstruktive Maßnahmen am Rahmenkopf bedingt. Vorteilhaft ist eine Bremsung der Räder hinten.

Zur Erarbeitung der Patentschrift [Da23] wurden die kinetischen Gleichungen zum Einspurmodell für eine modellbasierte Ansteuerung von aktiven Sicherheitskomponenten aufgestellt. So könnte im Fahrbetrieb das Kippen sensiert und Gegenmaßnahmen wie ein Akustiksignal, eine automatische Bremsung oder ein Zusatzgewichtsausgleich ausgelöst werden [Da23]. Zusammen mit interessierten Herstellern sollte aufbauend auf diesen Untersuchungen ein sicherer Lastenradbetrieb und damit eine vermehrte Nutzung von klimafreundlichen Fahrzeugen im urbanen Verkehr weiter erforscht werden.

5 Literaturverzeichnis

- [DLR24] N. N. <https://www.lastenradtest.de/infos-downloads/>, abgerufen am 26.8.2024.
- [ZIV23] N. N. ZIV – Die Fahrradindustrie. Marktdaten Fahrräder und E-Bikes für 2023 in Kooperation mit dem VSF – Verbund Service und Fahrrad. https://www.ziv-zweirad.de/wp-content/uploads/2024/03/ZIV_Marktdatenpraesentation_2024_fuer_GJ_2023.pdf, abgerufen am 26.8.2024.
- [DIN79] DIN 79010:2020-02, Fahrräder – Transport- und Lastenfahrrad – Anforderungen und Prüfverfahren für ein- und mehrspurige Fahrräder. <https://www.din.de/de/mitwirken/normenausschuesse/nasport/wdc-beuth:din21:315466805>, abgerufen am 26.8.2024.
- [Da22] Andreas Daberkow, Verena Barske. Fahrdynamik eines elektrisch angetriebenen Lastendreirads. In: Beiträge zum 5. Aalener Kolloquium antriebstechnische Anwendung 2022, S. 113-127. Shaker, 2023.
- [Radk24] N. N. <https://www.radkutsche.de/musketier/>, abgerufen am 26.8.2024.
- [Ho00] Peter Holdmann. Auswirkungen der Kraftübertragungseigenschaften von Personen-und Kratradreifen auf die Fahrdynamik eines Dreiradfahrzeuges (Dissertation). Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen, 2000.
- [End22] Fitri Endrasari et al. Rollover Stability Analysis and Layout Optimization of a Delta E-trike. *Automotive Experiences* 5(2), 137-149, 2022.
- [Va18] Edgar A. Vázquez-Rodríguez et al. The Rollover Risk and its Mitigation in Rickshaws. In 2018 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC) (pp. 1-6), 2018.
- [Ro21] Martín-Antonio Rodríguez-Licea et al. On the tripped rollovers and lateral skid in three-wheeled vehicles and their mitigation. *Vehicles*, 3(3), 357-376, 2021.
- [Mit04] Manfred Mitschke, Henning Wallentowitz. *Dynamik der Kraftfahrzeuge*. Springer, 2004.
- [Phy24] phyphox - Physical Phone Experiments. <https://phyphox.org/de/home-de/>, abgerufen am 26.8.2024.
- [Ard24] N. N. <https://www.arduino.cc/>, abgerufen am 26.8.2024.
- [Da23] Andreas Daberkow, Nico Weselin. Stabilisierungssystem und Verfahren zur Stabilisierung eines Lastenrads, Lastenrad, Radanhänger und Computerprogrammprodukt. P 060 0002 DE, DE 10 2021 130 824.0, Patenterteilung am 9.11.2023