

# Intelligente Anhängerdeichsel für verschiedene Zugfahrzeuge

Marius Miller – RWU, Fakultät für Elektrotechnik und Informatik, Institut für Elektromobilität  
Prof. Dr.-Ing. André Kaufmann – RWU, Fakultät für Maschinenbau, Institut für Elektromobilität  
Prof. Dr.-Ing. Benedikt Reick – RWU, Fakultät für Elektrotechnik und Informatik, Institut für Elektromobilität  
Prof. Dr. rer. nat. Markus Pfeil - RWU, Fakultät für Elektrotechnik und Informatik, Institut für Elektromobilität

Schlüsselwörter: Mikromobilität, elektrisch unterstützter Anhänger, Steuerung und Regelung des Antriebs, Sicherheitsaspekte der Mikromobilität

Ergänzend zu bestehenden Mobilitätskonzepten entwickeln sich derzeit neue Mikromobilitätskonzepte, die eine Beförderung von Lasten ermöglichen. Hier bieten elektrisch unterstützte Anhänger eine Option, in kommerzieller und privater Nutzung, Waren oder Lasten zu transportieren. Bereits verfügbare elektrisch unterstützte Anhänger benötigen eine Steuerungsverbindung zum Zugfahrzeug. In der vorliegenden Schrift wird als Alternative eine intelligente Zugdeichsel zur Steuerung des Anhängerantriebs ohne Steuerverbindung zum Zugfahrzeug vorgestellt. Dabei werden insbesondere die Sicherheitsaspekte genauer betrachtet.

## Motivation und Stand der Technik

Die Mobilität ist im Wandel, zum einen verändert sich der Antriebsstrang von Fahrzeugen vom Verbrennungsmotor hin zu hybriden oder rein elektrischen Antrieben. Zum anderen nehmen kleine elektrische Fahrzeuge für den Nahverkehr wie z.B. elektrisch angetriebene Roller (Scooter), Pedelecs sowie S-Pedelecs zunehmend Raum im Verkehr ein. In Städten ergänzen diese Transportmittel, welche nach ivm GmbH; Fraunhofer IML [1] der Kategorie „Mikromobilität“ zugewiesen werden können, bereits auf kürzeren Distanzen klassische Verkehrsmittel, wie beispielsweise das Auto oder die Straßenbahn. Repräsentativ für die Mikromobilität wird oftmals das E-Bike betrachtet, dessen Absatzzahlen die steigende Beliebtheit dieser Fortbewegungskategorie aufzeigen. So konnte der E-Bike Markt von 2009 bis 2019 nach BMVI [2], ZIV [3] und ZIV [4] eine Steigerung der Absatzzahlen von 807% verbuchen. Berechnungen nach ZIV [5] zeigen zudem einen Zuwachs der E-Bike Absatzzahlen von 15,8% im ersten Halbjahr des Jahres 2020, während viele andere Branchen in diesem Zeitraum rückläufige Verkaufszahlen aufgrund der COVID-19-Pandemie erfassen. Die aufgeführten Zahlen bestätigen die subjektive Wahrnehmung einer wachsenden Beliebtheit und Bereitschaft zur Nutzung von Fortbewegungsmitteln der Mikromobilität insbesondere im Freizeitbereich.

Allerdings stehen Nutzer vor einer Herausforderung, sofern das E-Bike im Alltag das Automobil in bestimmten Bereichen ersetzen soll. Beim Transport von Lasten treten für diese Transportmittel neue Probleme auf, so lässt sich der große Wocheneinkauf nicht mit dem Fahrrad oder dem Pedelec erledigen. Es fehlt dort schlicht der Stauraum oder die Waren müssen auf mehrere Taschen am Fahrrad verteilt werden. Seit einiger Zeit treten Lastenanhänger in diese Nische. Bei einem Pedelec unterstützt der elektrische Antrieb bei der Bewältigung der zusätzlichen Anhängelast, bei einem Fahrrad ohne elektrische Unterstützung muss der Fahrer die zusätzlich benötigte Antriebsleistung aufbringen. Anhänger haben per Definition keinen eigenen Antrieb. Es werden jedoch seit neustem auch sogenannte Schubanhänger angeboten, welche über eine Motorisierung verfügen und das Zugfahrzeug entlasten oder anschieben können.

Allerdings weisen angetriebene Anhänger neben den beschriebenen Vorteilen, bekannte und neue Gefahrenpotentiale auf. So beschreibt Ersoy; Gies [6] die entstehenden Gefahren bei der Nutzung eines nicht angetriebenen Anhängers in Kombination mit einem Zugfahrzeug. Durch sinusförmige Lenkbewegungen und das Erreichen oder Überschreiten einer Anhängerspezifischen kritischen Geschwindigkeit kann sich das Gespann, bestehend aus Anhänger und Zugfahrzeug, gefährlich aufschaukeln. Hierdurch wird ein Kontrollverlust des Fahrers nahezu unvermeidbar. Das von Ersoy; Gies [6] beschriebene Verhalten ist im Rahmen eines elektrisch angetriebenen Fahrradanhängers ebenfalls zu erwarten. Greift ein elektrischer Antrieb zusätzlich in den

Fahrbetrieb eines Gespanns ein, kann dieser im schlechtesten Szenario die Fahrdynamik, beispielsweise durch zyklische Drehmomentabgabe in der Eigenfrequenz des Systems, negativ beeinflussen. Wird als Zugfahrzeug ein Zweirad genutzt, befindet sich dies nach Stoffregen [7] im Ruhezustand in einem labilen Gleichgewicht. Die Stabilisierung des Systems Fahrrad im Fahrbetrieb erfolgt nach Kooijman et al. [8] jedoch nicht lediglich durch die Präzession an Vorder- und Hinterachse, wie dies verallgemeinert oftmals angenommen wird. Stattdessen spielen verschiedene Parameter der Rahmengeometrie wie Nachlauf und Massenschwerpunkt von bewegten Teilen im Zusammenspiel mit der Präzession an Vorder- und Hinterrad eine entscheidende Rolle bei der Stabilisierung von Zweirädern im Fahrbetrieb. Diese stabilisieren ebenfalls ein Motorrad während der Fahrt gegen seitliche Störeinflüsse wie beispielsweise Windböen, sofern nach Stoffregen [7] eine Geschwindigkeit von ca. 35km/h erreicht oder überschritten wird. Da Pedelecs im Rahmen der gesetzlichen Grundlage nach §63a der Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (StVZO) jedoch eine maximale Unterstützungsgeschwindigkeit von 25km/h besitzen, ergeben sich oftmals Zustände in denen die stabilisierende Wirkung der nach Kooijman et al. [8] aufgeführten Parameter nur abgeschwächt oder nicht ausreichend eintritt. Folglich sind Fahrräder und Pedelecs in diesem Zustand wesentlich anfälliger für seitliche Störeinflüsse, wie diese im Falle eines aufschaukelnden Anhängers auftreten können.

Bereits nach dieser oberflächlichen ersten Betrachtung der Fahrdynamik von Zweirad und Anhänger, stellt sich die Frage, ob es möglich ist mithilfe von auf der Deichsel des Anhängers angebrachten Sensoren den Fahrzustand des Zugfahrzeugs ausreichend genau zu beschreiben. Anschließend sollen diese Informationen als Messgröße genutzt werden, um den elektrischen Antrieb zu regeln. Hierbei steht die Sicherheit des Nutzers im Vordergrund, sodass der elektrisch angetriebene Anhänger kein zusätzliches Gefährdungspotential bildet.

Die Antriebssteuerung von bisherigen Schubanhängern erfolgt über das ziehende Fahrzeug. Dies kann über eine entsprechende Kraftmessung am Antrieb des Zugfahrzeugs oder durch den Fahrer gesteuert werden. Jedoch erschwert diese Anordnung einen schnellen Wechsel eines Schubanhängers auf ein anderes Fahrrad, da neben der mechanischen Verbindung eine Verbindung für die Steuerung aufgebaut werden muss. Dies erfolgt durch entsprechende Installationen am ziehenden Fahrrad.

In der vorliegenden Schrift wird eine Alternative zu dieser Steuerung vorgestellt.

Das Grundprinzip besteht in einer intelligenten Deichsel. Die Zug- bzw. Schubkräfte werden direkt in der Deichsel gemessen und ein elektrischer Antrieb im Anhänger wird entsprechend geregelt. Dies ermöglicht drei Betriebsmodi bei Verwendung des Anhängers, der unabhängig von dem Zugfahrzeug verwendet werden kann.

- Eine Schubregelung bei der durch den Anhänger eine zusätzliche Vortriebskraft aufgebracht wird.
- Eine kraftneutrale Regelung bei der nach Möglichkeit keine Zugkraft in der Deichsel auftritt.
- Eine Zugregelung bei der durch den Anhänger eine Bremskraft aufgebracht wird. Dieser Modus kann beispielsweise für Pedelecs mit Mittelmotor genutzt werden, um auch in dieser Gespannkonfiguration eine Rekuperation zu ermöglichen.

Aus diesem Grund werden bislang oft als „Schubanhänger“ bezeichnete Anhänger im Folgenden als Elektroanhänger oder auch E-Anhänger bezeichnet.

## Konzept

Das Konzept des Elektroanhängers besteht aus drei wesentlichen Bestandteilen, siehe Abbildung 1. Ein elektrischer Traktionsantrieb am Anhänger, eine Speichereinrichtung für die Bereitstellung der elektrischen Energie durch beispielsweise gängige Akkumulatoren sowie der intelligenten Anhängerdeichsel mit einer entsprechenden Regelung.

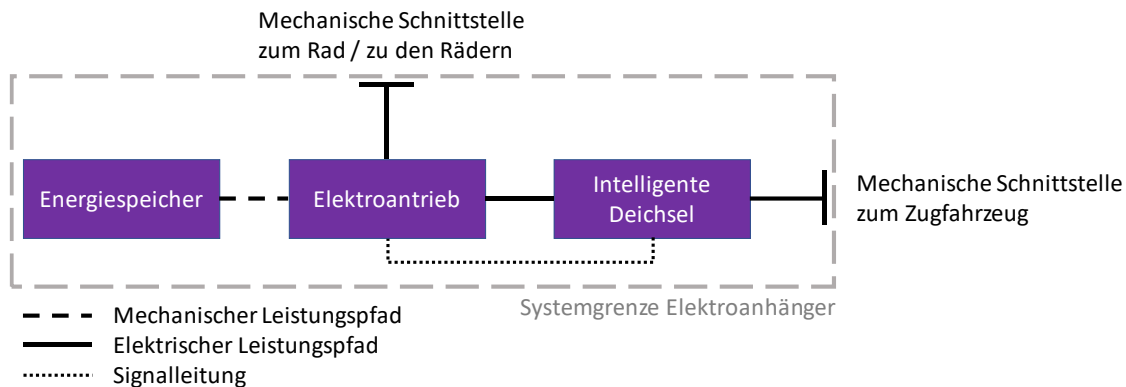


Abbildung 1: Systemschema des Elektroanhängers, Symbolik angelehnt an Reick [9]

Für den elektrischen Antrieb können verschiedene Konzepte verwendet werden. Eine Möglichkeit besteht in der Verwendung von Pedelec-Antrieben mit einer entsprechenden Kraftübertragung über Kette oder Riemen. Praktikabler sind Radnabenantriebe die weniger Bauraum im Bereich der Ladefläche einnehmen und als Bausätze kommerziell erhältlich sind. Bei der Stromversorgung kann ebenfalls auf bestehende Standardkomponenten aus dem Elektroroller, Pedelec oder S-Pedelec Bereich zurückgegriffen werden, so dass der Fokus im Folgenden auf der intelligenten Deichsel und der entsprechenden Steuerung liegen soll. Dabei werden an die Deichsel und die Steuerung zunächst folgende Anforderungen gestellt:

1. Kraftneutralität beim Zug- und Schubetrieb:  
Die intelligente Deichsel soll die Zug- und Schubkräfte messen und den Antrieb so regeln, dass die Antriebs- und Bremsleistung des Zugfahrzeugs durch die angehängte Last weitestgehend unberührt bleiben.
2. Betriebssicherheit: Die Messeinrichtung soll derart gestaltet sein, dass die Kräfte redundant gemessen und berechnet werden. Erst bei kohärenten Signalen soll die Kraftunterstützung erfolgen.
3. Die Regelung soll derart ausgeführt sein, dass bei allen Betriebsmodi die Fahrstabilität gewährleistet ist, insbesondere bei verschiedenen Beladungszuständen und Beschaffenheiten des Untergrunds.
4. Im Ausfall oder nach Auftreten eines Fehlers bei der Messung sollen keine Antriebskräfte gestellt werden und der Anhänger nur passiv gezogen werden können.

Die intelligente Deichsel hat zwei Funktionen, zum einen sollen entsprechende Kräfte und Momente vom Zugfahrzeug auf den Anhänger übertragen werden und zum anderen sollen Zug- und Druckkräfte gemessen werden. Hierbei handelt es sich um Kräfte in verschiedene Richtungen und wenigstens zwei Momente ausgehend vom Schwerpunkt des Lastenanhängers. Die Anzahl und Größe der Kraftkomponenten hängen von der Ausführung des Anhängers ab. Auf eine Detaillierung von ein, drei und vierrädrigen Anhängern wird hier verzichtet, wobei eine Anwendung der intelligenten Deichsel auf diese Antriebsstrangkonfigurationen ebenso möglich ist. Im Folgenden wird von einem einachsigen Anhänger mit zwei Rädern ausgegangen. Unter diesen Bedingungen kann der E-Anhänger unabhängig vom Zugfahrzeug angekoppelt werden. Die Auslegung des Antriebs und der Batterieleistung richtet sich im Wesentlichen nach den Transportanforderungen und der Gesetzgebung.

In Deutschland existiert derzeit keine gesonderte Gesetzgebung hinsichtlich der Verwendung von elektrischen Anhängern oder deren rechtliche Einordnung bezüglich der StVO, daher wird hier zunächst nur auf das Prinzip eingegangen. Verwendete Größen liegen der Annahme zugrunde, dass der Schubanhänger in den Rahmen der gesetzlichen Anforderungen von Anhängern ohne Antrieb fällt. Es soll nach §63a StVZO die maximale

Geschwindigkeit mit Unterstützung auf 25 km/h begrenzt sein und der Anhänger die maximal zulässigen Maße nicht überschreitet.

Bei Kurvenfahrt ist es weiterhin möglich, die Ansteuerung der Elektromotoren so zu regeln, dass beide Räder unterschiedlich unterstützen und somit ein Giermoment auf den Schwerpunkt des E-Anhängers aufgeprägt wird (Torque Vectoring). Dies ist ebenfalls bei drei bzw. vierrädrigen Schubanhängern möglich, sofern mehr als ein Rad angetrieben ist. Wird lediglich ein Motor angetrieben ist die Fahrstabilität auch durch eine individuelle Ansteuerung der Bremsen eines Anhängers realisierbar.

## Sicherheitsanforderungen

Da ein elektrisch angetriebener Anhänger ein Pedelec maßgeblich in seiner Fahrdynamik beeinflusst, kann ein Fehler im System schnell zum Unfall und somit auch zur Gefährdung des Nutzers führen. Aus diesem Grund müssen die sicherheitskritischen Aspekte eines angetriebenen Anhängers und einer intelligenten Deichsel näher untersucht werden. Durch Betrachtung des Systems in Abbildung 1 ergeben sich somit zwei kritische Ebenen in denen sicherheitsrelevante Fehler auftreten können. In der ersten Ebene können falsche Informationen von der Messtechnik in der Deichsel übermittelt werden, sodass die anschließende Regelung des elektrischen Antriebs nicht wie geplant ablaufen kann. In der zweiten Ebene kann ein richtiges Messsignal an ein fehlerhaftes Regelungskonzept übermittelt werden, wodurch ebenfalls nicht die geforderte Ansteuerung des elektrischen Antriebs erfolgt. Da sich die vorliegende Schrift explizit mit der Messtechnik und Regelung eines elektrisch angetriebenen Anhängers befasst, werden die Sicherheitsanforderungen bezüglich des EMV-Verhaltens und des Akkumulators nicht näher betrachtet. Weiterführende Informationen sind der Richtlinie 2004/108/EG zu entnehmen.

Die nachfolgende Erläuterung der Sicherheitsrisiken innerhalb der zuvor beschriebenen Ebenen erfolgt anhand einer System-Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) in Anlehnung an Hering; Schloske [10]. Zu Beginn wird das System E-Anhänger in ein Gesamtsystem und diverse Subsysteme unterteilt, welche in Abbildung 2 innerhalb des blauen Rahmens dargestellt sind. Anschließend werden die Funktionen der Subsysteme im gelben Bereich der Abbildung 2 aufgeführt, aus denen sich die Fehlfunktionen ableiten lassen.

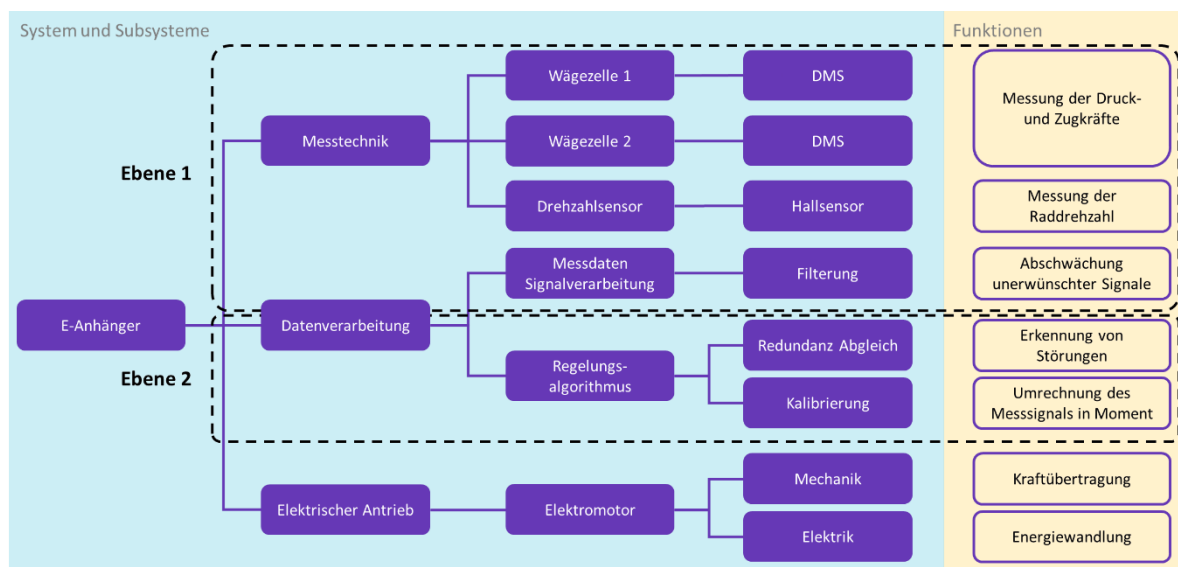


Abbildung 2: Strukturierung des Systems E-Anhänger mit Funktionsbeschreibung der Subsysteme

Wie in Abbildung 2 ersichtlich, wird der E-Anhänger in die drei Bereiche Messtechnik, Datenverarbeitung und elektrischer Antrieb unterteilt. Als Subsysteme der Messtechnik definieren sich hierbei die in der intelligenten Deichsel eingesetzten Wägezellen, deren Messprinzip auf der Technik eines Dehnmessstreifens (DMS) beruht. Die Funktion der Wägezellen liegt in der Messung von Druck- und Zugkräften, welche von der Anhängerkupplung im Fahrbetrieb auf die Deichsel übertragen werden. Ein weiteres Subsystem der Messtechnik bildet ein Drehzahlsensor, welcher nach dem in Urban [11] beschriebenen Hall-Effekt eine Bestimmung der Raddrehzahl

ermöglicht. Im Bereich der Datenverarbeitung werden den Spannungssignalen der Sensoren Messwerte zugeordnet. Hierbei wird neben der Umrechnung von Spannungen in andere Größen zudem oftmals eine Frequenzfilterung vorgenommen. Zusätzlich erfolgt im Bereich Datenverarbeitung die Regelung des Systems, welche im ersten Schritt eine Messwertvalidierung durchführt, um eventuell auftretende Störungen zu erkennen. Anschließend wird mit einem P-Regler über einen Kalibrierungsfaktor das Messsignal in das benötigte Sollmoment überführt, welches nun die Steuergröße bildet. Über den dritten Bereich des elektrischen Antriebs wird dieses Moment auf die Räder übertragen. Hierbei lässt sich der Antrieb in die weiteren Subsysteme Mechanik und Elektrik unterteilen. Darunter umfasst die Mechanik alle Teile des Elektromotors wie beispielsweise Rotor, Stator und weitere Bauteile, deren Funktion die Krafterzeugung und -übertragung sind. Je nach Motortyp können hierbei ebenfalls Getriebe zum Einsatz kommen, deren Aufgabe die Wandlung von Drehmoment und Drehzahl ist. Das Subsystem Elektrik umfasst hierbei die Verkabelung und Verschaltung der Komponenten, sodass die Energiewandlung von elektrischer in mechanische Leistung erfolgen kann. In der nachfolgenden FMEA werden lediglich die in Abbildung 2 eingezeichneten Ebenen eins und zwei untersucht, da diese das Kernthema der vorliegenden Schrift bilden. Mögliche Strategien zur Fehlervermeidung und Optimierung des elektrischen Antriebs können beispielsweise Tschöke et al. [12] entnommen werden.

Aus den in Abbildung 2 dargestellten Funktionen lassen sich mögliche Fehlerfolgen, die hierfür verantwortlichen Ursachen und falls vorhanden die Entdeckungsmaßnahmen für die FMEA ableiten. Die Bedeutung (B) sowie die Auftrittswahrscheinlichkeit (A) und die Entdeckungswahrscheinlichkeit (E) des Fehlers werden nach Hering; Schloske [10] in einem Punktesystem von eins bis zehn bewertet. Zehn Punkte entsprechen somit einer sicherheitsgefährdenden Bedeutung des Fehlers, einer hohen Auftrittswahrscheinlichkeit sowie einer äußerst geringen Entdeckungswahrscheinlichkeit. Eine detailliert untergliederte Skala für B, A und E ist Hering; Schloske [10] zu entnehmen.

Die in Tabelle 1 aufgeführten Fehlerfolgen lassen sich grundsätzlich in vier Fälle einteilen, welche unterschiedliche Bedeutungen für die Sicherheit des Nutzers und die Hauptfunktion des Systems haben. Im ersten Fehlerfall wird ein zu großes Drehmoment vom elektrischen Antrieb an die Räder übertragen. Dieses sorgt dafür, dass in bestimmten Fahrsituationen ein zu langer Bremsweg oder ein Kontrollverlust durch das Anschleichen des Anhängers zu erwarten ist. Dieser Fehlerfolge ist ebenfalls eine Drehmomentabgabe im Ruhezustand zugeordnet, welche bereits zum Kontrollverlust vor dem eigentlichen Fahrbetrieb führen kann. Die Bedeutung dieser Fehlerfolgen wird durch das gesteigerte Unfallrisiko, welches sich auch direkt auf den Gesundheitszustand des Nutzers auswirken kann, mit zehn Punkten bewertet. Im zweiten Fehlerfall wird ein richtig berechnetes Drehmoment periodisch übertragen, sodass das System in der Eigenfrequenz angeregt wird und sich aufschaukelt. Da dieser Fehlerfall ebenfalls der Auslöser für einen Unfall sein kann, wird die Bedeutung auch mit zehn Punkten bewertet. Der dritte Fehlerfall umfasst die nicht unterbrochene Drehmomentabgabe nach einer mechanischen Entkopplung des Systems während des Fahrbetriebs, wie diese im Fall einer gebrochenen Deichsel auftreten kann. Im Realbetrieb wird dieser Fehlerfall durch ein Sicherungsseil zwischen Anhänger und Fahrrad aufgefangen. Allerdings wird im vorliegenden schlimmsten Szenario der Fall betrachtet, dass das Seil nicht vorhanden oder nicht funktionsfähig ist. Somit können in diesem Szenario auch unbeteiligte Dritte durch einen entkoppelten, aber angetriebenen Anhänger verletzt werden. Dieser Fall ist ebenfalls mit einer Bedeutung von 10 Punkten zu bewerten. Im vierten Fehlerfall wird ein zu geringes Drehmoment übertragen. Tritt dieser Fall durchgehend auf, so muss die benötigte Kraft vom Fahrer des Zugfahrzeugs geleistet werden. Die Hauptfunktion des E-Anhängers wird herabgesetzt, weshalb dieser Fehler mit sieben Punkten bewertet wird. Ebenfalls denkbar ist ein zu geringes Drehmoment in bestimmten Situationen, wie beispielsweise beim Anfahren aus dem Stillstand. Ist im anschließenden Fahrbetrieb von einer richtig berechneten Unterstützung des elektrischen Antriebs auszugehen, bedeutet dieser Fehler lediglich den Verlust einer Komfortfunktion. Diese wird mit fünf Punkten bewertet. Um die Fehler besser zu kategorisieren werden diese wie in Tabelle 1 ersichtlich in die Fehlerart eingeteilt. Da das beschriebene System in der vorliegenden Schrift umfassender betrachtet wird, beschränken sich diese auf die Bereiche Messtechnik und Regelung. Hierbei beschreibt die Messtechnik die Sensoren und deren Auswertung zur Zustandsbeschreibung des Gespanns, während die Regelung jegliche Auswertung der Daten zur Drehmomentberechnung und Ansteuerung des Systems umfasst.

Weiter beschreibt die Fehlerursache eine mögliche Quelle der zuerst aufgeführten Fehlerfolge. So kann beispielsweise ein konstant anliegendes und zu großes Drehmoment aus einer eingeklemmten und damit falsch belasteten Wägezelle (Messtechnik) oder aus einem fehlerhaften Regelalgorithmus resultieren. Zudem ist das benötigte Drehmoment abhängig vom Beladungszustand des Anhängers. Wird der Beladungszustand falsch

erfasst, kann beispielsweise bei einem unbeladenen Anhänger durch eine fehlerhafte Skalierung der Zugkraft ein zu großes Drehmoment aufgebracht werden. Neben diesen Ursachen kann auch ein fehlerhaftes Messsignal der Hall-Sensoren, welche für die Bestimmung der Raddrehzahl verwendet werden, zu dieser Fehlerfolge führen. Wird beim schnellen Abbremsen des Anhängers ein zu großes Drehmoment an die Räder übertragen, kann dies beispielsweise aus einer retardierten Verarbeitung der Messdaten resultieren. Ist das System nicht echtzeitfähig, erfolgt die Zustandsbeschreibung mit einem zu großen zeitlichen Versatz. Während sich das Zugfahrzeug bereits im Bremszustand befindet, ist das anliegende Drehmoment des Anhängers noch auf die Berechnungen eines Fahrzustands mit konstanter Geschwindigkeit zurückzuführen. Die aufgeführten Ursachen können je nach Zustand ebenfalls in einer zu geringen Drehmomentabgabe resultieren. Als Ursache für das Aufschaukeln des Gespanns kann die periodische Drehmomentabgabe der elektrischen Antriebe des Anhängers genannt werden, sofern diese das System in der Eigenfrequenz anregen. Weitere Ursachen für die verschiedenen Fehlerfolgen sind Tabelle 1 zu entnehmen.

Hinsichtlich der Auftrittswahrscheinlichkeit besteht die Annahme, dass Fahrzustände, die oft auftreten vermehrt zu Fehlerfällen führen. Hierunter fallen das Anfahren und Abbremsen des Anhängers, deren Auftrittswahrscheinlichkeit somit mit acht Punkten als hoch bewertet wird. Das Aufschaukeln des Anhängers wird hingegen nur in speziellen Situationen erwartet und demnach mit sechs Punkten als moderat eingeordnet. Des Weiteren wird eine Entkopplung des Anhängers bei richtiger Auslegung der Deichsel mit einer geringen Auftrittswahrscheinlichkeit und deshalb mit vier Punkten bewertet. Da es noch keine speziellen Testverfahren für elektrisch angetriebene Anhänger zur Verwendung in Kombination mit Fahrzeugen aus der Mikromobilität gibt, sind die nachfolgenden Entdeckungswahrscheinlichkeiten basierend auf der Annahme, dass Testfahrten und Simulationen einige Fehler aufdecken. So kann beispielsweise eine Messung des Gespann-Bremswegs mit ausgeschaltetem System sowie im aktiven Zustand Rückschlüsse über ein eventuell vorhandenes und zu hohes Drehmoment des Antriebs während der Abbremsung liefern. Die Entdeckungswahrscheinlichkeit dieser Fehler wird aus diesem Grund mit drei als hoch eingestuft. Ebenfalls besteht die Annahme, dass eine Entkopplung der Deichsel durch eine sofortige Zugkraftunterbrechung sowie ein charakteristisches Beschleunigungsprofil gut anhand der vorhandenen Messtechnik erkannt werden kann. Die Entdeckungswahrscheinlichkeit einer fortlaufenden Drehmomentabgabe in Kombination mit einer Entkopplung der Deichsel wird deshalb mit 3 Punkten als hoch eingestuft. Die Entdeckung einer zu hohen Drehmomentabgabe im Ruhezustand des Gespanns in ebener Lage kann durch einen Abgleich der Zugkraftmesswerte mit den Beschleunigungswerten erkannt werden. So kann eine eingeklemmte Wägezelle eine Zug- oder Druckkraft messen, sofern jedoch keine Beschleunigung vorliegt, kann eine Drehmomentabgabe über eine Plausibilitätslogik unterbunden werden. Die Lageschätzung, ob sich ein Fahrzeug am Hang oder in der Ebene befindet, kann ebenfalls über die IMU realisiert werden. Da für die Entdeckung dieses Fehlers jedoch weitere Sensoren benötigt werden, welche wiederum spezifische Ungenauigkeiten und Fehler aufweisen, wird die Entdeckungswahrscheinlichkeit mit 5 Punkten bewertet. Hingegen sind Fehlerfolgen wie das Aufschaukeln des Gespanns lediglich simulativ zu prüfen, da Sie ein erhöhtes Sturzrisiko mit Gefährdung der Gesundheit eines Testfahrers aufweisen. Allerdings setzt die simulative Prüfung ein mit der Realität übereinstimmendes Modell voraus, dessen Fehler wiederum die Entdeckungswahrscheinlichkeit mindern können. Aus diesem Grund wird das Aufschaukeln des Anhängers mit sechs Punkten und somit einer geringen Entdeckungswahrscheinlichkeit eingestuft. Da die Bestimmung der Eigenfrequenz jedoch nach Ersoy; Gies [6] abhängig von der Masse ist, wird zur Vermeidung einer Anregung des Systems in diesem Frequenzbereich eine Bestimmung des Beladungszustandes benötigt. Dies kann über die Wägezelle oder eine separate Messeinrichtung auf der Beladungsfläche erfolgen. Der gemessene Beladungszustand kann anschließend für eine Approximation der Eigenfrequenz des Systems genutzt werden, sodass eine periodische Drehmomentabgabe in diesem Bereich verhindert werden kann.

Nach Betrachtung der einzelnen Bestandteile der FMEA wird auf eine detaillierte Auswertung der RPZ verzichtet, da diese zu einer falschen Priorisierung von sicherheitsrelevanten Themen führen kann, sofern deren Auftretens- oder Entdeckungswahrscheinlichkeit gering ist. Stattdessen soll die Durchführung einer FMEA die anstehenden Problemfelder der aufgeführten Ebenen verdeutlichen, sodass diese im weiteren Entwicklungsprozess bedacht werden. Hierbei sollen Möglichkeiten gefunden werden alle sicherheitsrelevanten Fehlerfälle mit einer Bewertung von zehn Punkten zu vermeiden oder mit einer angemessenen Funktion die Auswirkungen im Moment des Fehlereintritts bestmöglich zu mindern. Nachfolgend wird deshalb eine erste Realisierungsmöglichkeit aufgezeigt den Zustand des Zugfahrzeugs zu bestimmen und darauf aufbauend eine Regelung des elektrischen Antriebs im Anhänger zu implementieren. Die hierbei bedachten Redundanzen tragen bereits zur Lösung einiger Fehlerfälle, welche in der FMEA aufgedeckt wurden bei.

Tabelle 1: FMEA des Systems E-Anhänger

Ebene	Fehlerfolge	B	Fehlerart	Fehlerursache	Vermeidungs- maßnahme	A	Entdeckungs- maßnahme	E	RPZ
2	Zu hohe Drehmoment-abgabe bei Notbremsung	10	Regelung	Regelung des Systems nicht Echtzeitfähig	Maximale Reaktionszeit bestimmen	8	Echtzeitfähigkeit in Simulation prüfen	3	240
1	Durchgehend zu hohe Drehmoment-abgabe	10	Mess-technik	Sensor liefert durchgehend zu große Messwerte der Druck- oder Zugkraft	Redundantes System, Einsatz von zwei Sensoren jeweils auf Druck bzw. Zug belastet	5	Vergleich der gemessenen Absolutbeträge, Einsatz Referenzsensoren	4	200
2	Durchgehend zu hohe Drehmoment-abgabe	10	Regelung	Aus richtig erfassten Messwerten berechnetes Drehmoment zu hoch	Auslegung des Reglers simulativ prüfen	4	Maximales Drehmoment in Software begrenzen (Status LED)	5	200
1	Durchgehend zu hohe Drehmoment-abgabe	10	Mess-technik	Fehlerhafter Hallsensor	Status-LED für Daten-eingang	5	Kontrolle der Status-LED	3	150
1	Durchgehend zu hohe Drehmoment-abgabe	10	Mess-technik	Fehlerhafte Berechnung der Raddrehzahl	Abgleich mit GPS-Geschwindigkeit	3	Kontrolle der Status-LED	3	90
1	Drehmoment-abgabe im Ruhezustand (Ebene Lage des Gepans)	10	Mess-technik	Deichsel mit Wägezellen eingeklemmt	Geometrie Anpassung zur störungsfreien Lagerung	6	Vergleich mit Referenzsensor z.B. IMU, Detektion der Lage	5	300
1	Aufschaukeln des Anhängers	10	Mess-technik	Anregung des Systems in Eigenfrequenz durch Drehmoment-abgabe auf Basis von zyklischer Zugbelastung	Einsatz von Frequenzfilter zur Glättung der Messsignale	6	Bestimmung der Eigenfrequenz in Abhängigkeit der Masse	6	360
2	Aufschaukeln des Anhängers	10	Regelung	Anregung des Systems in Eigenfrequenz durch Drehmomentabgabe aufgrund fehlerhafter Regelalgorithmen	Keine zyklische Drehmoment-abgabe durch Glättung des berechneten Moments	6	Bestimmung der Eigenfrequenz in Abhängigkeit der Masse	6	360
2	Drehmoment-abgabe zu hoch	10	Regelung	Richtig erfasste Zugkraftwerte werden aufgrund unbekannter Beladung des Anhängers falsch skaliert	Bestimmung der Beladungsmasse	6	Berechnung der Beladungsmasse über Zugkraftsignal oder mithilfe von Sensor	4	240
2	Drehmoment-abgabe nach Entkopplung während des Fahrbetriebs (z.B. Deichsel bricht)	10	Regelung	Drehmoment wird abgegeben obwohl Anhänger nicht mehr mit Zugfahrzeug verbunden	Sofortige Unterbrechung des Drehmoments	4	Charakteristisches Profil bei der Entkopplung durch Wägezelle / IMU detektieren	3	120

Ebene	Fehlerfolge	B	Fehlerart	Fehlerursache	Vermeidungs- maßnahme	A	Entdeckungs- maßnahme	E	RPZ
1	Durchgehend zu geringe Drehmoment-abgabe	7	Mess-technik	Sensor liefert durchgehend zu geringe Messwerte der Druck- oder Zugkraft	Redundantes System, Einsatz von zwei Sensoren jeweils eine auf Druck bzw. auf Zug belastet	5	Vergleich der gemessenen Absolutbeträge, Einsatz Referenzsensoren	6	210
2	Durchgehend zu geringe Drehmoment-abgabe	7	Regelung	Aus richtig erfassten Messwerten berechnetes Drehmoment zu gering	Auslegung des Reglers simulativ prüfen	4	Maximales Drehmoment in Software begrenzen (Status LED)	6	168
2	Durchgehend zu geringe Drehmoment-abgabe	7	Regelung	Richtig erfasste Zugkraftwerte werden aufgrund unbekannter Beladung des Anhängers falsch skaliert	Bestimmung der Beladungsmasse	5	Berechnung der Beladungsmasse über Zugkraftsignal oder mithilfe von Sensor	5	175
1	Durchgehend zu geringe Drehmoment-abgabe	7	Mess-technik	Fehlerhafter Hallsensor	Status-LED für Daten-eingang	5	Kontrolle der Status-LED	3	105
1	Durchgehend zu geringe Drehmoment-abgabe	7	Mess-technik	Fehlerhafte Berechnung der Raddrehzahl	Abgleich mit GPS-Geschwindigkeit	3	Kontrolle der Status-LED	3	63
1	Zu geringe Drehmoment-abgabe beim Anfahren	5	Mess-technik	Durchlassbereich der Filterung des Zugkraftsignals zu gering	Filterung im Post Processing prüfen, kleinsten Zug- oder Druckkraftbereich festlegen	8	Test des Anfahrverhaltens	6	240

## Realisierungsmöglichkeiten

Eine weit erprobte und gängige Form der Kraftmessung besteht in der Verwendung von Dehnmessstreifen. Diese werden in großer Zahl in elektronischen Waagen mit hoher Genauigkeit eingesetzt und werden in großen Stückzahlen gefertigt. Für die Auswertung stehen integrierte Schaltungen zur Verfügung (z.B. HX711) in denen die entsprechende Verstärkerschaltung und ein Analog-Digitalwandler integriert sind. Daher bietet es sich an solche Komponenten in der intelligenten Deichsel zu verwenden. Um eine Redundante Messung von Zugkräften und Schubkräften zu ermöglichen, müssen wenigstens jeweils zwei Sensoren zug- beziehungsweise drucksensibel sein. Dies ist durch verschiedene Ausführungen möglich. Wie in Abbildung 3 ersichtlich können zum Beispiel zwei Sensoren mit jeweils zwei Dehnmessstreifen als Halbbrücke für die Zug und zwei Sensoren mit jeweils zwei Dehnmessstreifen als Halbbrücke für die Druckkräfte verwendet werden. Kommerzielle Sensoren als Halbbrücke werden oftmals in Waagen verbaut und sind somit insbesondere auf Druck empfindlich. Hierbei ist eine Auswertung mit vier Verstärkerschaltungen und AD-Wandlern notwendig. Zur Positionierung der Drucksensoren ist die Geometrie zur Erfüllung der Funktion Kraftaufnahme und Weitergabe entscheidend. Die Elemente der Deichsel müssen hierbei derart gelagert werden, dass die Lagerung eine störungsfreie Messung der Kräfte in Zug und Druckrichtung ermöglicht. Des Weiteren ist es notwendig die Lagerung so auszuführen, dass alle Kräfte und Momente, die auf die Deichsel wirken, spielfrei übertragen werden.



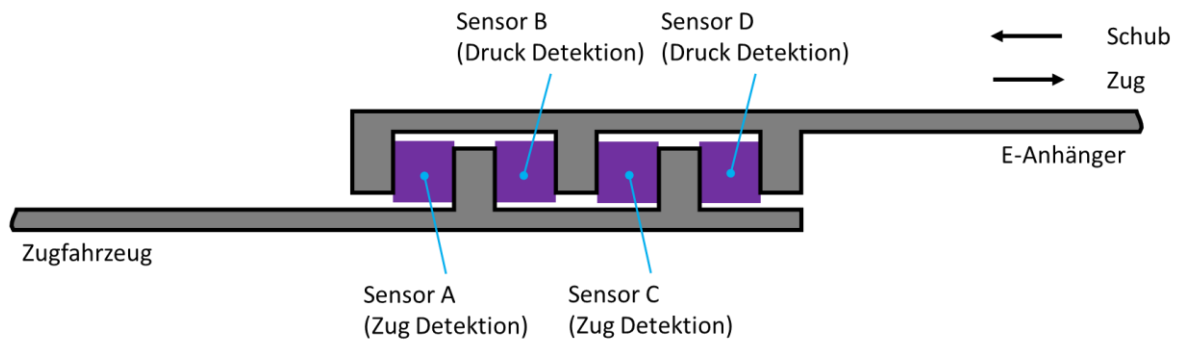


Abbildung 3: Drucksensible Sensoren: Halbbrücken System mit vier Sensoren

Eine Alternative ist in Abbildung 4 dargestellt und besteht in der Verwendung von zwei Sensoren mit Kraftmessung, die jeweils auf Zug- und Druck empfindlich sind und somit in beide Richtungen sensibel sind. Hierbei kann mit zwei Verstärkerschaltungen und AD-Wandlern gearbeitet werden. Bezüglich der Kräfte und Momente gilt gelten die gleichen Bedingungen wie für Kraftmessung mit vier Halbbrücken.

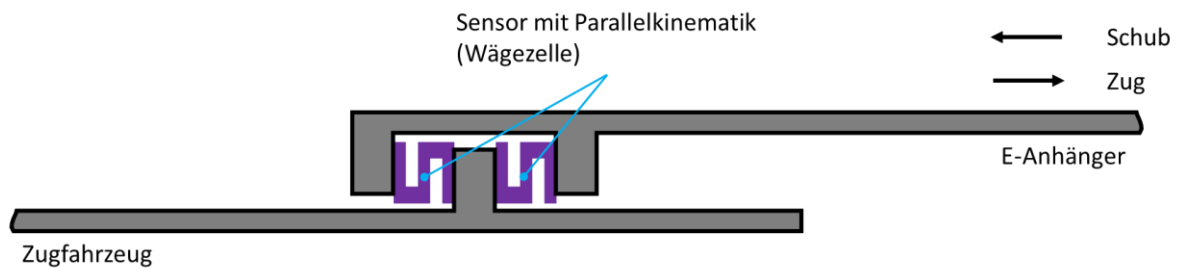


Abbildung 4: Zug- und Drucksensible Sensoren: Redundante Kraftmessung auf Zug und Schub

Wird auf die Sicherheit durch redundante Messungen verzichtet und zum Beispiel eine Plausibilitätslogik eingesetzt, so halbiert sich die Anzahl der Sensoren und Verstärker. Die in Abbildung 5 dargestellte Ausführung lässt sich mit zwei drucksensitiven Sensoren oder einer Kraftsensorik mit vier Dehnmessstreifen und einer Vollbrücke realisieren. Bei der Auslegung ist darauf zu achten, dass die jeweiligen Drucksensoren bzw. die Kraftsensorik die doppelten Kräfte im Vergleich zu den redundanten Sensoren aufnehmen müssen.

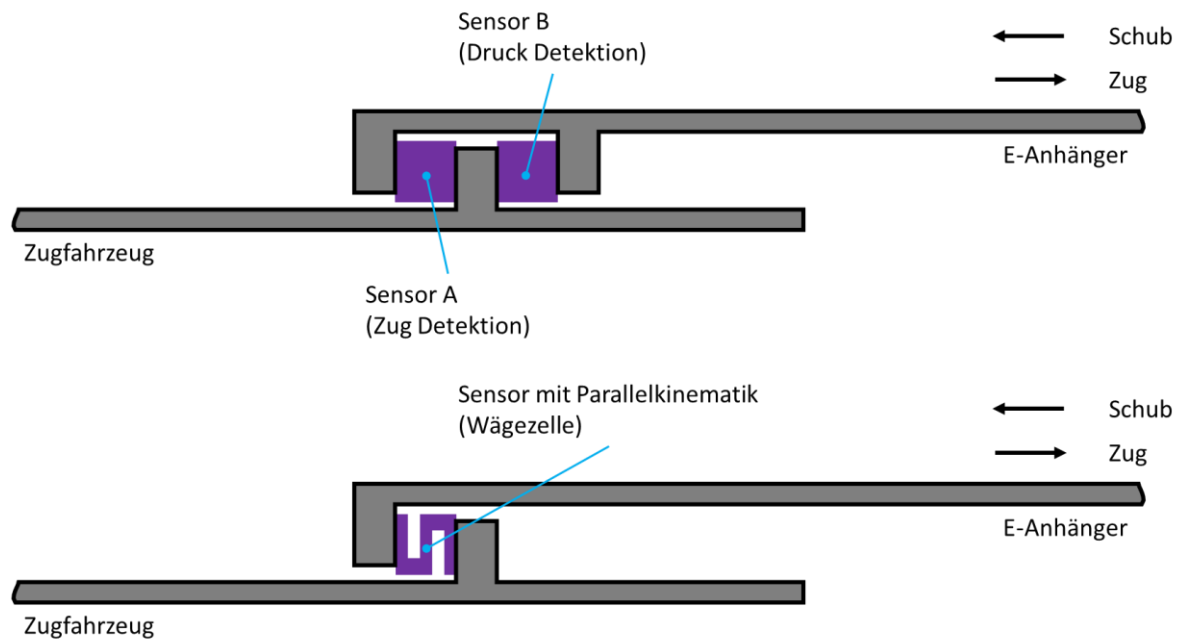


Abbildung 5: Ausführungen ohne redundante Messung: Drucksensible Sensoren (oben) und Kraftsensorik (unten)

Zur Aufnahme der Kräfte, insbesondere in vertikaler Ebene und in geringerem Maße in horizontaler Ebene sind Lageraufnahmen ausreichend und spielfrei zu realisieren. Dabei muss darauf geachtet werden, dass nach Möglichkeit auftretende vertikale und horizontale Kräfte die Messung der Zug- und Schubkräfte nicht beeinträchtigen. Dies ist bei unsachgemäßer Auslegung zum Beispiel durch ein Verkanten der Lager möglich. Eine Prämisse der Lagerung besteht also darin, möglichst geringe Reibkräfte aufzuweisen.

## Messung der Kräfte

Die Messung der Kräfte erfolgt bei den drucksensiblen Sensoren über zwei Dehnmessstreifen. Die Dehnmessstreifen sind, wie in Abbildung 6 ersichtlich, in Form einer Halbbrücke angeordnet.

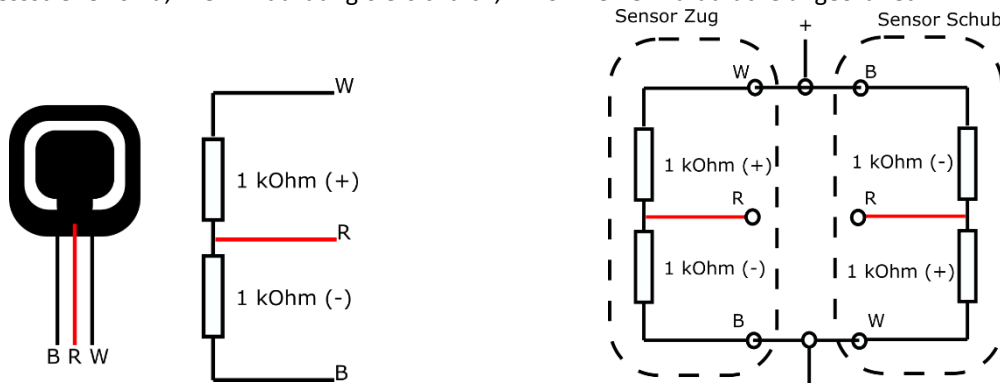


Abbildung 6: Messaufnehmer mit Halbbrücke (links) sowie Schaltung für AD-Wandler (rechts)

So lassen sich die Messwertaufnehmer für Zug und für Druck zu einer Vollbrücke kombinieren. Wird nun ein Zug auf die Deichsel ausgeübt so wird nur der linke Messwertaufnehmer (Zug) belastet. Der rechte Messwertaufnehmer dient nur als Widerstand. Nun wird zwischen der rechten und linken positiven Leitung ein positives Spannungssignal gemessen. Im Schubfall wird nur der rechte Messwertaufnehmer (Schub) belastet. Der linke Messwertaufnehmer dient nur als Widerstand. Durch eine Vertauschung der Verkabelung wird nun ein negatives Spannungssignal zwischen den beiden Halbbrücken gemessen. Die Messwernerfassung erfolgt somit mit nur einem AD-Wandler für ein Paar aus einem Zug- und einem Drucksensor. Für eine redundante Messung ist die Anordnung lediglich zu verdoppeln. Im Falle der Verwendung der Kraftsensorik liegt bereits eine Vollbrücke vor. Das zugehörige Signal ändert automatisch bei einem Wechsel von Zug auf Schub das Vorzeichen.

## Steuerung und Regelung

Der prinzipielle Regelkreislauf kann wie nebenstehend, vergleiche Abbildung 7, beschrieben werden. Die Sensoren erfassen die Zug- bzw. Schubkräfte und werden in entsprechenden AD-Wandlern zu digitalen Signalen verarbeitet. Ergänzend wird von dem angetriebenen Rad die Drehzahl erfasst. Aus den nun vorliegenden Signalen wird in Folge die Ansteuerung des E-Antriebs berechnet. Dabei können im Detail durch die Zug- und Schubkräfte, den Ladezustand des Energiespeichers und entsprechende Algorithmen die periodischen Schwankungen in Abhängigkeit von der Trittfrequenz und dem Straßenzustand ausgeglichen werden.

Zur Verhinderung des Aufschaukelns können die Messgrößen entsprechend durch einen Frequenzfilter, z.B. einen Tiefpassfilter gefiltert werden. Alternativ oder ergänzend ist auch ein entsprechender Einsatz eines PID-Reglers möglich. Hier ist insbesondere eine entsprechende Einstellung des Reglers erforderlich.

Die detaillierte Regelung unterscheidet sich je nach Aufbau und Anzahl der Sensoren. Im Falle von 4 Sensoren mit Halbbrücken ist eine Regelung möglich, in der die redundante Messwernerfassung berücksichtigt wird. Dabei können in getrennten Pfaden für Zug bzw. Schubbetrieb die redundanten Sensorsignale zur Plausibilisierung genutzt werden.

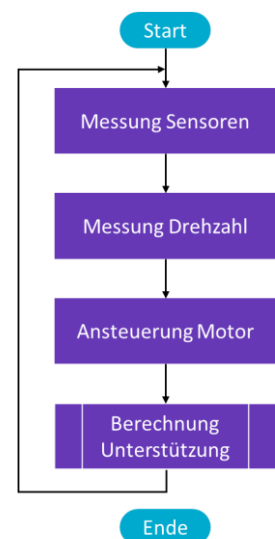


Abbildung 7: Regelkreislauf

Im Fall der Messung mit zweifacher Kraftsensoren lässt sich der prinzipielle Regelablauf ähnlich gestalten. Hier werden jedoch die beiden Signale direkt miteinander verglichen. Im Falle eines kohärenten Signals kann dann direkt die Kraft z.B. aus dem Mittelwert der beiden Sensoren bestimmt werden. Aus dem Vorzeichen der Kraft lässt sich dann der Zug- bzw. Schubetrieb ermitteln und die Motoren sich entsprechend ansteuern. Der in Abbildung 8 exemplarisch aufgeführte P-Regler überführt die gemessene Zugkraft proportional in das benötigte Moment.

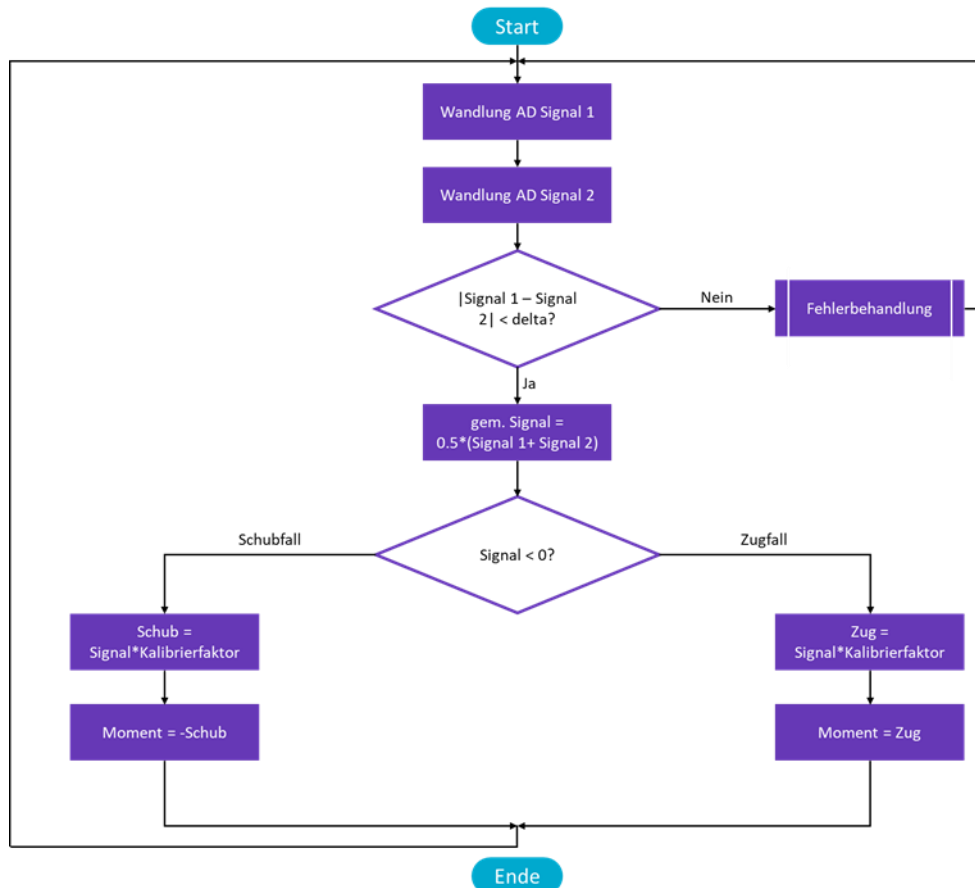


Abbildung 8: Beispiel zur Berechnung der Unterstützung bei redundanter Messung

## Anwendungsfelder

Die Anwendung einer intelligenten Deichsel ist nicht auf die Verwendung in zweiachsigen Fahrradanhängern, Fahrräder, Pedelecs oder S-Pedelecs beschränkt. Die Möglichkeit der Anwendung an ein, drei oder vierräderigen E-Anhängern ändert die Anforderungen hinsichtlich der Aufnahme der Kräfte der Deichsel, jedoch nicht die prinzipielle Positionierung der Kraftaufnehmer oder Auswerteelektronik.

Vorausgesetzt die Gesetzgebung erlaubt langfristig eine Zulassung solcher Fahrzeuge, ist auch eine Verwendung von größeren Anhängern an Krafträdern oder Personenkraftwagen z.B. mit Elektroantrieb denkbar. Insbesondere bei Zugfahrzeugen mit ohnehin eingeschränkter Reichweite, z.B. bei Elektrofahrzeugen mit Batterieantrieb könnte ein Schubanhänger für eine Reichweitenverlängerung und eine erweiterte Nutzungsmöglichkeit sorgen. Erste Konzepte hierzu sind bereits bekannt, siehe Freimann et al. [13]. Die Potentiale von E-Anhängern in unterschiedlichen Anwendungen und detaillierte Untersuchungen der genannten Zugdeichselausführungen für Fahrradanhänger sind bislang nicht lückenlos erforscht.

## Zusammenfassung und Ausblick

Es wurden die Vor- und Nachteile heutiger Systeme sowie die Möglichkeit zum Einsatz einer intelligenten Deichsel beschrieben. Der Einsatz der Deichsel in verschiedenen Antriebsstrangkonfigurationen am Anhänger wurden diskutiert, dabei fokussierten sich die Betrachtungen zunächst auf den Einsatz der Deichsel in einem Zweirad-Fahrrad-Gespann (bspw. Pedelec). Es wurden mögliche Ausführungen zur Messung und Regelung prinzipiell vorgestellt.

Derzeit erfolgen die Entwicklung und der Aufbau eines Prototyps zur Darstellung der Regelung und zur Verifizierung der Funktionalität der intelligenten Deichsel am Institut für Elektromobilität der Hochschule Ravensburg-Weingarten. Zusätzlich ist geplant weitere Sensoren auf der Deichsel des Anhängers, hinsichtlich Ihrer Eignung zur Bestimmung der Fahrzustände des Zugfahrzeugs, zu untersuchen. Neben dem bestehenden System soll eine inertielle Messeinheit in MEMS-Bauweise, welche Beschleunigungs- und Drehratensensoren räumlich kombiniert, eingesetzt werden. Im Falle, dass einzelne Sensoren in bestimmten Situationen keinen Aufschluss über den Fahrzustand des Zugfahrzeugs liefern, ist eine Sensorfusion angedacht. Um auf äußere Einflüsse wie Änderungen der Fahrtrichtung oder Notbremsungen schnell genug reagieren zu können muss nach Berns et al. [14] sichergestellt werden, dass die Zustandsbestimmung und Regelung des Systems in einer vorgegebenen Zeit abläuft. Die Vorgabe dieser Echtzeitfähigkeit, kann im Rahmen der Fahrzustandsbestimmung nach Marchthaler; Dingler [15] beispielsweise über einen Kalman-Filter realisiert werden. Hierfür ist angedacht im nächsten Schritt das physikalisch dynamische System bestehend aus zweiräderigem Zugfahrzeug und angetriebenem Anhänger mithilfe von Differentialgleichungen in eine Zustandsraumbeschreibung zu überführen. Zusätzlich soll untersucht werden ob über einen Vergleich, der von der IMU erfassten Beschleunigungen mit den von der Wägezelle gemessenen Zugkräften eine weitere Redundanz geschaffen werden kann.

Des Weiteren soll ein bestehender Prototyp mit zwei angetriebenen Rädern aufgebaut werden, welcher Torque Vectoring ermöglicht. Im Rahmen der Beschreibung des dynamischen Systems sollen hierbei ebenfalls Regelstrategien entwickelt werden, welche aktiv die Sicherheit des Gesamtgespanns in schwierigen Fahrsituationen erhöhen können. Im Rahmen erster Analysen konnten hierbei komplexe Zusammenhänge der Momente und Kräfte festgestellt werden, welche in weiteren Untersuchungen und Modellbildungen explizit dargestellt werden sollen, sodass eine Basis für die weiteren geplanten Regelungskonzepte geschaffen wird. Bevor die hieraus entwickelten Regelstrategien jedoch in realen Untersuchungen getestet werden, sollten die Algorithmen mithilfe einer RCP-Umgebung untersucht werden, sodass die in Tabelle 1 aufgeführten Fehlerfälle reduziert oder bestenfalls ausgeschlossen werden können. Abel; Bollig [16] führen hierbei ebenfalls den Vorteil auf, dass falsche Annahmen in der Modellbildung während der Entwicklungsphase schnell ausgetauscht und in einem iterativen Verfahren erneut getestet werden können. In weiteren Schritten soll eine Validierung des Testaufbaus sowie der Regelung erfolgen. Im Sinne einer Produktgenerationsentwicklung nach Albers et al. [17] werden weitere Aufbauten und eine verstärkte Unterstützung der Entwicklung durch den Einsatz von Simulationstools geplant, um den ersten Aufbau schrittweise zu verbessern. Mit der Unterstützung durch Simulationsmodelle können weitere Anwendungsfelder erschlossen und virtuell getestet werden.

## Literatur

- [1] Vargas Díaz, A.; Wagner, N.; Lietz, S. „Zukunftsfeld Mikromobile E-Tretroller & Co: Anforderungen und Handlungsmöglichkeiten für Kommunen und kommunale Aufgabenträger in der Region Frankfurt RheinMain“, ivm GmbH; Fraunhofer IML 2019.
- [2] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur „Radverkehr in Deutschland: Zahlen, Daten, Fakten“, BMVI, Berlin Aug. 2014.
- [3] Zweirad-Industrie-Verband „Zahlen – Daten – Fakten zum Fahrradmarkt in Deutschland 2015“, ZIV, Berlin Mrz. 2016. [Online] Verfügbar unter: [https://www.ziv-zweirad.de/fileadmin/redakteure/Downloads/Marktdaten/PK-2016\\_08-03-2016\\_Praesentation.pdf](https://www.ziv-zweirad.de/fileadmin/redakteure/Downloads/Marktdaten/PK-2016_08-03-2016_Praesentation.pdf). Zugriff am: 27. April 2020.
- [4] Zweirad-Industrie-Verband „Zahlen - Daten - Fakten zum Fahrradmarkt in Deutschland 2019“, ZIV, Berlin Mrz. 2020. [Online] Verfügbar unter: [https://www.ziv-zweirad.de/fileadmin/redakteure/Downloads/Marktdaten/PK-2020\\_11-03-2020\\_Praesentation.pdf](https://www.ziv-zweirad.de/fileadmin/redakteure/Downloads/Marktdaten/PK-2020_11-03-2020_Praesentation.pdf). Zugriff am: 27. April 2020.
- [5] Zweirad-Industrie-Verband „Fahrrad- und E-Bike-Industrie trotz der Corona-Krise: Stimmungsbarometer für das 1. Halbjahr 2020“, ZIV, Bad Soden Sep. 2020. Zugriff am: 27. Oktober 2020.
- [6] Ersoy, M.; Gies, S. *Fahrwerkhandbuch*; Springer Fachmedien Wiesbaden: Wiesbaden, Deutschland, 2017, ISBN 978-3-658-15467-7.
- [7] Stoffregen, J. *Motorradtechnik*; Grundlagen und Konzepte von Motor, Antrieb und Fahrwerk, 9. Aufl.; Springer Vieweg: Wiesbaden, Deutschland, 2018, ISBN 978-3-658-07445-6.
- [8] Kooijman, J.D.G.; Meijaard, J.P.; Papadopoulos, J.M.; Ruina, A.; Schwab, A.L. *A bicycle can be self-stable without gyroscopic or caster effects*, *Science (New York, N.Y.)* **2011**, Jg. 332, Nr. 6027, S. 339–342, doi:10.1126/science.1201959.
- [9] Reick, B. „Methode zur Analyse und Bewertung von stufenlosen Traktorgetrieben mit mehreren Schnittstellen“. Dissertation, doi:10.5445/KSP/1000084168, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, 2018;
- [10] Hering, E.; Schloske, A. *Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse*; Methode zur vorbeugenden, systematischen Qualitätsplanung unter Risikogesichtspunkten; Springer Fachmedien Wiesbaden, Deutschland, 2019, ISBN 978-3-658-25762-0.
- [11] Urban, G.; Physikalische Sensoreffekte in *Sensortechnik - Handbuch für Praxis und Wissenschaft* Tränkler, H.R., Reindl, L.M., Hg.; Springer Vieweg: Berlin, Deutschland, 2014, 2. Aufl., ISBN 978-3-642-29941-4.
- [12] Tschöke, H.; Gutzmer, P.; Pfund, T. *Elektrifizierung des Antriebsstrangs*; Grundlagen - vom Mikro-Hybrid zum vollelektrischen Antrieb; Springer Vieweg: Berlin, Deutschland, 2019, ISBN 978-3-662-60355-0.
- [13] Freimann, R.; Gillich, U.; Gumpoltsberger, G.; Kaiser, R. „New vehicle concepts for mobile vacation“ in *19. Internationales Stuttgarter Symposium: Automobil- und Motorentechnik*, M. Bargende, H.-C. Reuss, A. Wagner und J. Wiedemann, Hg., Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2019, S. 843–854,
- [14] Berns, K.; Köpper, A.; Schürmann, B. *Technische Grundlagen eingebetteter Systeme*; Elektronik, systemtheorie, komponenten und analyse; Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH: Wiesbaden, Deutschland, 2019, ISBN 978-3-658-26515-1.
- [15] Marchthaler, R.; Dinger, S. *Kalman-Filter*; Einführung in die Zustandsschätzung und ihre Anwendung für eingebettete Systeme; Springer Vieweg: Wiesbaden, Deutschland, 2017, ISBN 978-3-658-16727-1.
- [16] Abel, D.; Bollig, A. *Rapid control prototyping*; Methoden und Anwendungen; mit 16 Tabellen, 1. Aufl.; Springer: Berlin, Deutschland, 2006, ISBN 978-3-540-29524-2.
- [17] Albers, A.; Rapp, S.; Birk, C.; Bursac, N. „Die Frühe Phase der PGE - Produktgenerationsentwicklung“ in *4. Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung 2017 (SSP): Produktentwicklung im disruptiven Umfeld*, H. Binz, B. Bertsche, W. Bauer, D. Spath und D. Roth, Hg., 2017.