Demonstrator zur Übertragung von Zug- und Druckkräften auf ein Antriebssystem

M. Wilken[1], E. Wings[1]

Zusammenfassung

Um einen ökologisch nachhaltigen Weinanbau zu ermöglichen, setzen Winzer vermehrt Pferde in ihrer Landwirtschaft ein [1]. Mit dem Ziel, diese Tiere bei der Arbeit mit Landmaschinen vor Überlastung zu schützen, hat das italienische Unternehmen SYDE Srl. das patentierte Hybrid Traction Assistance (HTA)-System, vgl. Bild 1, entwickelt [2]. Es integriert einen Elektromotor mit Sensorik, um das Zuggewicht zu regulieren und damit die Belastung der Tiere stets unter einer zuvor definierten Schwelle [1] zu halten. Der Motor greift bei Bedarf ein und verringert die auf dem Tier lastende Zug- beziehungsweise Druckkraft [2]. Dieses HTA-System soll nun als Demonstrator entwickelt werden, das sich leicht auf ähnliche Zug-/Drucksysteme anwenden lässt [2]. An diesen Demonstrator werden drei zentrale Anforderungen gestellt. Zum einen muss die Lösung auf weitere Applikationen, implementierbar sein, die von einem unabhängigen Antrieb, zum Beispiel menschliche Kraft, in Bewegung gesetzt werden. Zweitens darf eine vorgegebene Maximalkraft weder bei Zug- noch bei Druckbelastung überschritten werden. Schließlich soll aus Sicherheitsgründen eine maximale Geschwindigkeit für die Applikation festlegbar sein. Dafür ist eine permanente Geschwindigkeitsmessung relativ zum Boden vorgesehen [2]. Zur Umsetzung wurde ein Demonstrator realisiert, der zum einen die gegebenen Anforderungen erfüllt und zum anderen die Umsetzbarkeit des HTA-Moduls testet und evaluiert.

Stichwörter

Kraftmessung, Signalverarbeitung und Übertragung, Antriebstechnik, Regelungstechnik

1 Hybrid Traction Assistance System

1.1 Sytem für den Weinanbau

Der Hybrid Traction Assistant, vgl. Bild 1, ist ein elektrisches Assistenzsystem für tiergezogene Fahrzeuge oder Maschinen. Es wird an einem Rahmen montiert, der über geeignete Befestigungselemente mit dem Tier verbunden ist. Es integriert mehrere zentrale Komponenten, die gemeinsam darauf ausgelegt sind, den erforderlichen Zugaufwand zu reduzieren und gleichzeitig Sicherheit sowie Effizienz zu gewährleisten. Kernbestandteil des Systems ist eine Kraftmesseinrichtung, bestehend aus Dehnungsmessstreifen [14], die kontinuierlich die vom Tier aufgebrachte Zugkraft erfasst und dabei sowohl deren Betrag als auch Richtung bestimmt [2].

Das System kombiniert die gemessenen Kraftdaten mit Informationen zur Radbewegung, um die Traktion in Echtzeit zu regeln. Die Dehnungsmessstreifen zeichnen kontinuierlich die vom Tier ausgeübte Zug- beziehungsweise Druckkraft einschließlich ihrer Richtung auf. Parallel dazu liefern Radsensoren unabhängige Informationen über Geschwindigkeit und Fahrtrichtung, vgl. Bild 2. Diese Eingangsdaten werden von der zentralen Steuereinheit verarbeitet, welche den aktuellen Bewegungszustand des Fahrzeugs ermittelt und die entsprechende Traktionssituation identifiziert. Abhängig davon, ob das

[1] Hochschule Emden Leer, Fachbereich Technik, Emden, Deutschland

Open Access. © 2026 M. Wilken, E. Wings
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

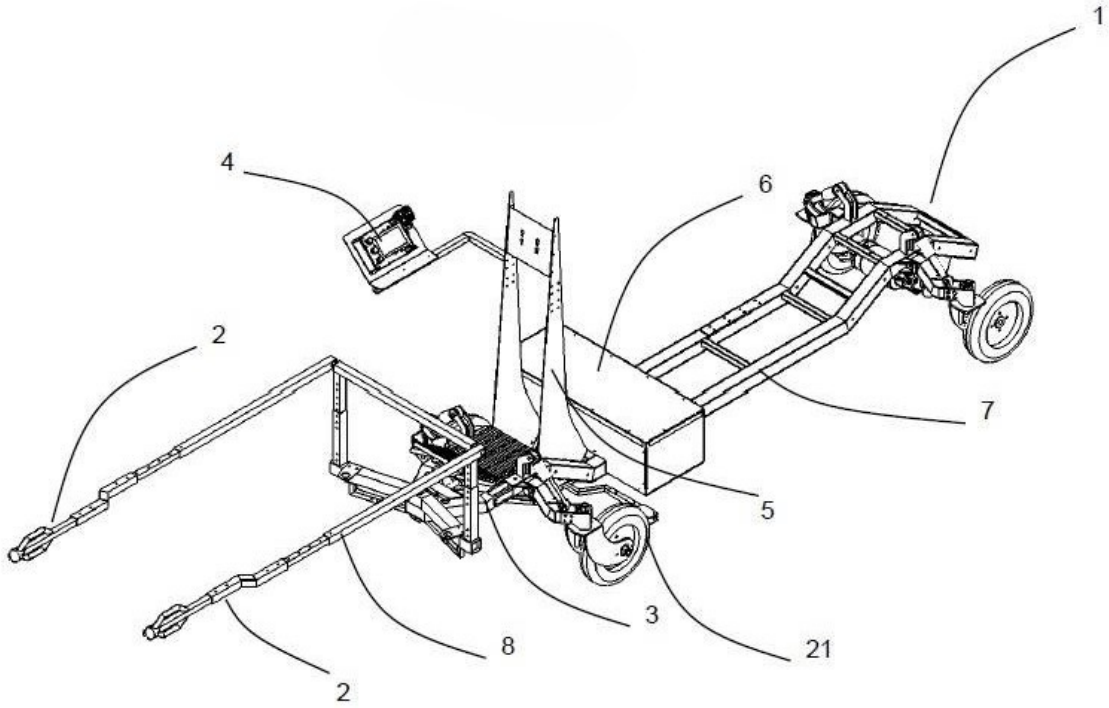


Bild 1: Hybrid Traction Assistance [3]

Tier Zugkraft aufbringt oder einer Druckbelastung ausgesetzt ist, steuert die Regeleinheit den Elektromotor so an, dass eine geeignete Korrekturmaßnahme umgesetzt wird. Dies kann eine unterstützende Antriebskraft, ein gezielter Widerstand oder eine aktivierte Assistenzfunktion auf Basis definierter Ermüdungsschwellen umfassen [2].

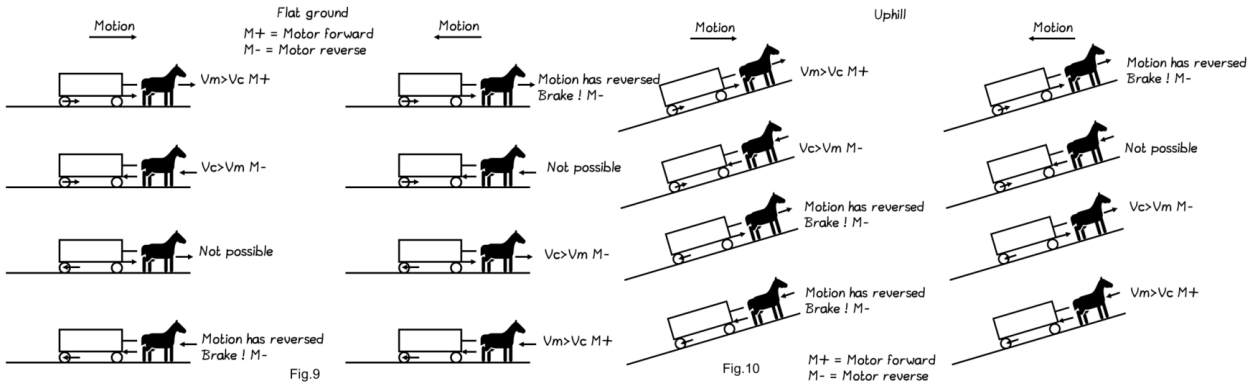


Bild 2: Algorithmus des HTA-Systems [3]

1.2 Konzeptidee für den Demonstrator

Aufbauend auf dem ursprünglich für den Einsatz mit Pferden entwickelten System besteht das Ziel darin, eine modulare Implementierung zu ermöglichen. Ein solches Modul kann beispielsweise in Hubwagen integriert oder potenziell als eigenständiges Fahrzeugkonzept realisiert werden. Zur Unterstützung dieser erweiterten Anwendbarkeit wurde eine dedizierte Systemarchitektur entworfen, vgl. Bild 3 [3].

Open Access. © 2026 M. Wilken, E. Wings
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

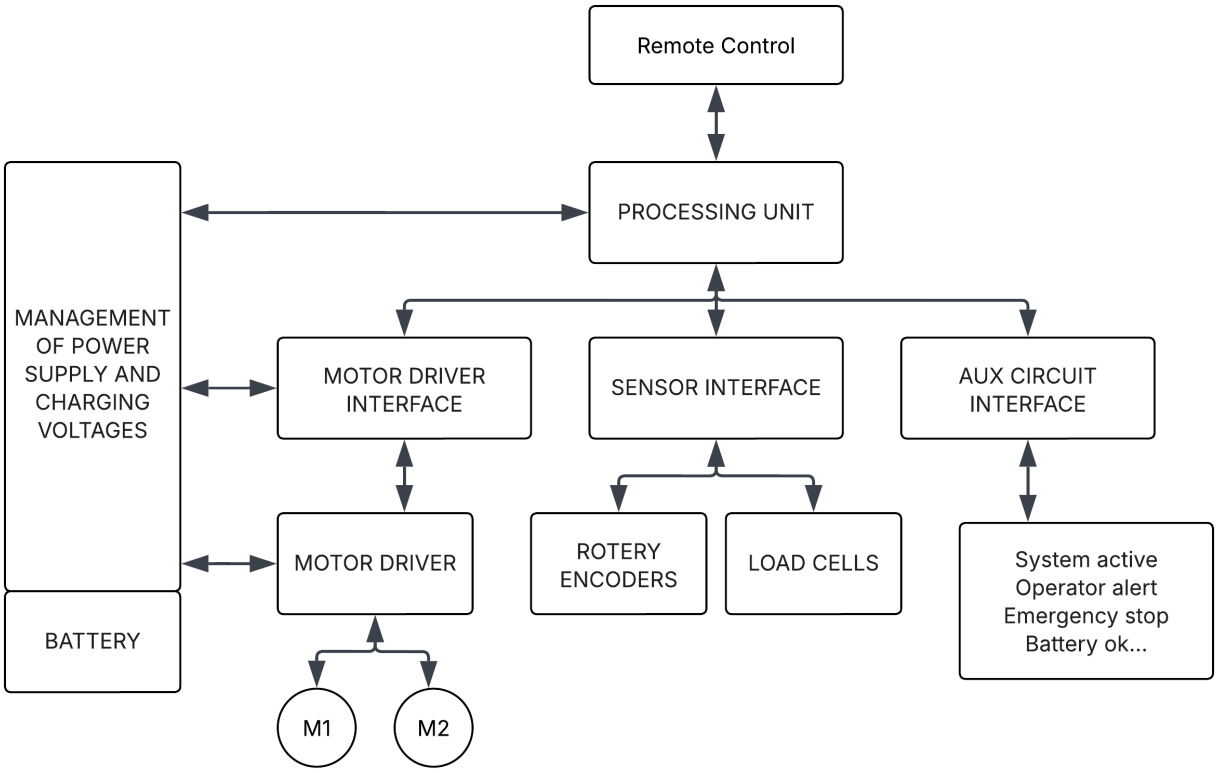


Bild 3: Architektur des HTA-Systems [3]

Im Zentrum der ursprünglichen Architektur, vgl. Bild 3, befindet sich eine Verarbeitungseinheit, welche das Energiemanagement, die Sensorik, die Aktorik sowie sicherheitsrelevante Funktionen koordiniert. Eine Batterie versorgt das Gesamtsystem, wobei ihre Ausgangsleistung über spezialisierte Module aufbereitet und an den Prozessor, die Motor-Treiber-Schnittstelle sowie den Motorcontroller zur Ansteuerung der beiden Motoren (M1 und M2) verteilt wird. Der Prozessor tauscht Signale mit der Motorsteuerung, der Sensorschnittstelle für Drehgeber- und Kraftmessdaten sowie mit einer Zusatzschaltung für Statusanzeigen, Not-Aus und Batteriezustand aus. Im praktischen Betrieb ist eine mobile Fernbedienung mit der Verarbeitungseinheit verbunden, sodass der Bediener das System steuern und eingreifen kann, ohne direkten Kontakt mit der Hardware zu haben. Auf diese Weise werden Rohmessdaten in gezielte Motorbefehle überführt, während Transparenz und Betriebssicherheit des Systems gewährleistet bleiben [3]. Jedes Subsystem ist als eigenständige, jedoch eng gekoppelte Einheit ausgeführt.

Die Funktionalität des ursprünglichen Systems soll nun auf einen Demonstrator übertragen werden, so dass unter Laborbedingungen die einzelnen Komponenten getestet werden können. In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Module und Systeme des Demonstrators detailliert beschrieben, um deren Aufgaben und Wechselwirkungen innerhalb des Gesamtsystems nachvollziehbar darzustellen.

2 Funktionalität und Architektur des Demonstrators

Der Demonstrator besteht aus drei miteinander gekoppelten Subsystemen. Im Zentrum steht das HTA-System, das in einem Anhänger integriert ist und entsprechend der zuvor beschriebenen Architektur ausgeführt wurde. Ergänzend dazu kommt ein Dashboard in Form einer mobilen Applikation zum Einsatz, das über eine WLAN-Verbindung mit dem System kommuniziert und Funktionen zur Überwachung sowie zur Interaktion bereitstellt. Der Anhänger wird von einem mobilen System gezogen, welches die für den Betrieb des HTA-Moduls erforderliche externe Kraft aufbringt. Dieses mobile System

Open Access. © 2026 M. Wilken, E. Wings
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

wird unabhängig über eine separate Fernbedienung gesteuert, wodurch eine flexible Manövrierbarkeit gewährleistet wird. Das in den folgenden Bildern dargestellte Flussdiagramm veranschaulicht den grundlegenden Aufbau des Demonstrators. Durch die detaillierte Betrachtung der einzelnen Subsysteme lassen sich die Wechselwirkungen und der Datenaustausch zwischen den Hardwarekomponenten nachvollziehen.

Das External-Force-System wird durch eine Fernbedienung gesteuert, vgl. Bild 4, die mit zwei KY-023-Joystick-Modulen ausgestattet ist [4]. Jedes dieser Module regelt jeweils die Drehzahl und Drehrichtung eines Motors des Systems. Ein SSD1315-Display [5] dient zur Anzeige der aktuellen Geschwindigkeit des Demonstrators. Zusätzlich sind ein Hauptschalter sowie ein Taster integriert, um eine ESP-NOW-Verbindung [6] zur drahtlosen Datenübertragung mit dem External-Force-System zu initiieren. Die Fernbedienung basiert ebenfalls auf einem Hypatia-Board, das sowohl als Kommunikationsschnittstelle als auch als zentrale Steuereinheit für die angeschlossenen Hardwarekomponenten fungiert.

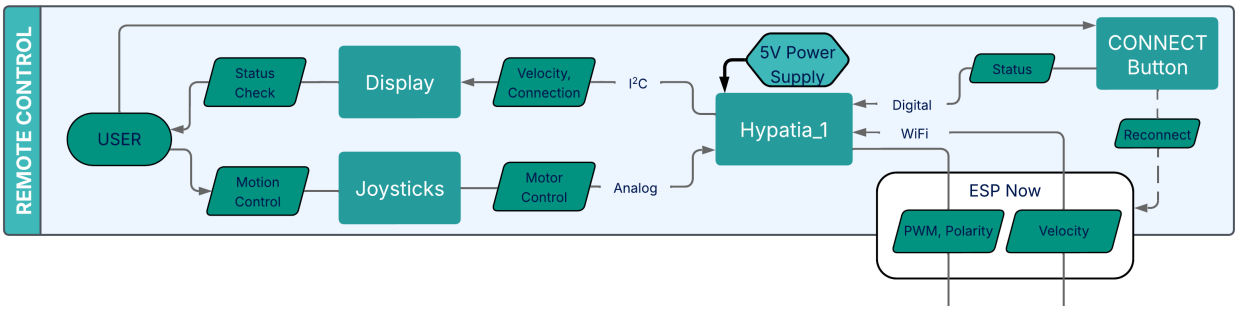


Bild 4: Flussdiagramm des Fernbedienungssystems

Das External-Force-System überträgt Zug- und Druckkräfte auf das HTA-System, indem es den Wagen bewegt (siehe Bild 5). In diesem System empfängt ein zweites Hypatia-Board die Beschleunigungssignale und steuert zwei unabhängig angetriebene Motoren über ein MOTODRIVER2-Modul mit integriertem L298N-H-Brückentreiber [7], wodurch sowohl Leistung als auch Drehrichtung geregelt werden. Die Rückmeldung der Motordrehzahl erfolgt über zwei LM393-Drehgeber [8]. Analog zum Hauptsystem ermöglichen ein Schalter und eine LED die Spannungsversorgung sowie die Zustandsüberwachung. Die Energieversorgung erfolgt über vier 1,5 V-Batterien sowie eine 5 V-Powerbank.

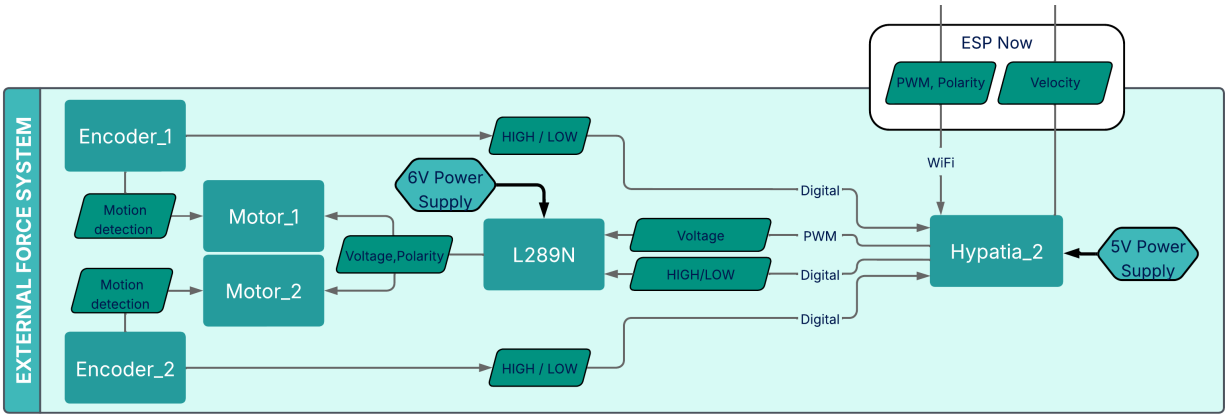


Bild 5: Flussdiagramm des External-Force-Systems

Das Hauptsystem, vgl. Bild 6, umfasst den Wagen mit integriertem HTA-System sowie ein WLAN-basiertes Dashboard, das eine grafische Visualisierung der Messdaten ermöglicht und die Anpassung von Regelparametern erlaubt. Die Messung der Zug- und Druckkräfte erfolgt mithilfe eines Dehnungsmessstreifens, der in einer Wheatstone-Brückenschaltung integriert und an einen HX711-Analog-Digital-Wandler angeschlossen ist [9]. Die erfassten Messdaten werden softwareseitig gefiltert und durch

Open Access. © 2026 M. Wilken, E. Wings
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

einen PD-Regelalgorithmus weiterverarbeitet, bevor sie über einen MCP4725-Digital-Analog-Wandler ausgegeben werden [10]. Der analoge Ausgang wird durch einen LM358-Operationsverstärker [11] verstärkt und anschließend an eine transistorbasierte H-Brücke weitergeleitet, wodurch zwei Motoren gleichzeitig angesteuert werden können. Die Motordrehzahl wird über zwei LM393-Drehgeber [8] erfasst, wodurch ein geschlossener Regelkreis realisiert wird. Ein Schalter dient zum Ein- und Ausschalten des Systems und eine LED zeigt den Betriebszustand an.

Das Energiemanagement wird durch ein TPS5430-Modul [12] realisiert, das in Kombination mit einem LM2596HVS-Abwärtswandler [13] eine Versorgungsspannung von ±12 V sowie eine zusätzliche 5 V-Spannungsquelle bereitstellt. Beide Module werden von einem wiederaufladbaren 12,6 V-LiPo-Akku gespeist, während dem Hypatia-Board zusätzlich eine 5 V-Powerbank als Energiequelle zur Verfügung steht.

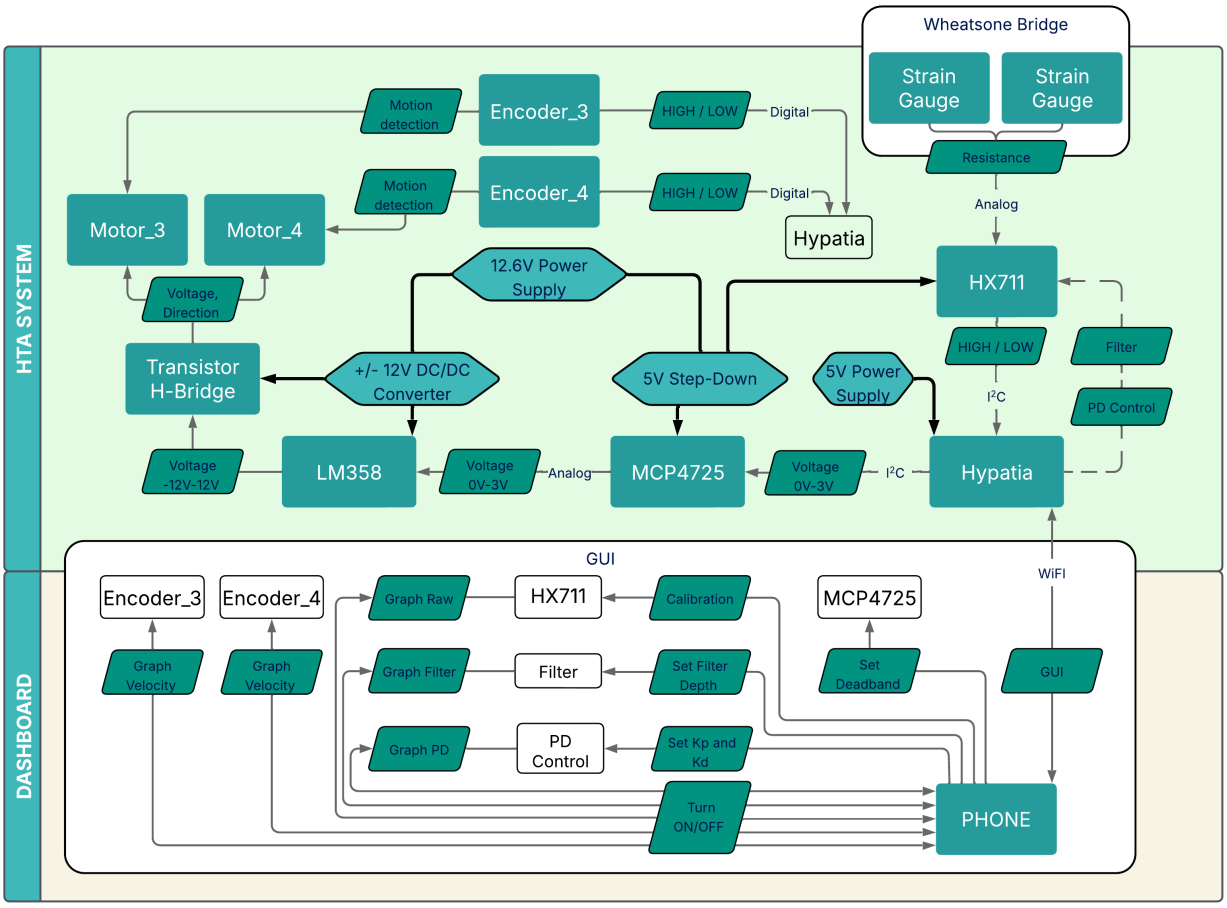


Bild 6: Flussdiagramm des HTA-Systems

3 Evaluation

Nach dem Aufbau des Demonstrators besteht das Ziel darin, jede Stufe der Signalkette zu verifizieren. Zunächst wird das Kraftsignal der Dehnungsmessstreifen als Rohsignal aufgezeichnet (HX711-Rohwerte, umgerechnet in Gramm). Anschließend zeigt das gefilterte Signal denselben Verlauf nach Anwendung des gleitenden Mittelwertfilters. Dabei soll der grundsätzliche Trend erhalten bleiben, während hochfrequentes Rauschen reduziert wird, wobei eine kleine, messbare Verzögerung auftritt. Der PD-Regler ergänzt diese Verarbeitung um eine proportional-derivative Filterung. Damit wird si-

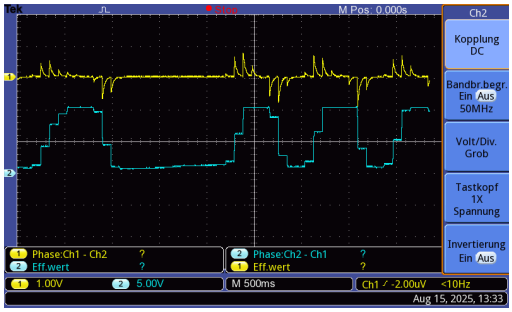
Open Access. © 2026 M. Wilken, E. Wings
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

cher gestellt, dass das System schneller auf Signaländerungen reagieren und Überschwinger unterdrückt werden.

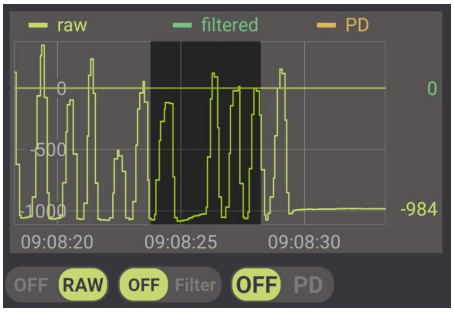
Diese drei softwareseitig erzeugten Signale werden zeitlich miteinander verglichen und erfüllen die erwarteten Signalverläufe, siehe Bild 7. Die Filtertiefe wurde hierbei auf 10 gesetzt, der Proportionalfaktor K_p auf 6 und der Differentialfaktor K_d auf 0,02. Optional können diese Parameter angepasst werden, um die Signalqualität weiter zu optimieren.

Bild 7: Vergleich von Roh-, gefiltertem und PD-geregeltem Signal

Zur Bewertung des Einflusses des DAC-Ausgangs auf den LM358 werden das Ausgangssignal des DAC und der Ausgang des B-Kanals des Operationsverstärkers simultan gemessen und auf einem Oszilloskop dargestellt. Dabei werden drei Betriebszustände getrennt untersucht: zunächst die direkte Ausgabe der Rohdaten des Dehnungsmessstreifens an den DAC, anschließend das gefilterte Signal nach Anwendung des gleitenden Mittelwertfilters und schließlich das PD-geregelte Signal. Durch das gezielte Ein- und Ausschalten dieser Stufen über das HTA-Dashboard lassen sich die resultierenden Signalverläufe unmittelbar miteinander vergleichen.



(a) MCP4725-Ausgang (Gelb) und LM358-Ausgang (Blau).



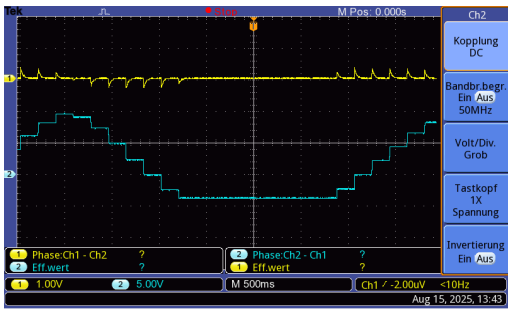
(b) HTA-Dashboard: Rohdaten des Dehnungsmessstreifens (Gelb).

Bild 8: Vergleich des DAC-/LM358-Ausgangs mit Rohdaten des Dehnungsmessstreifens.

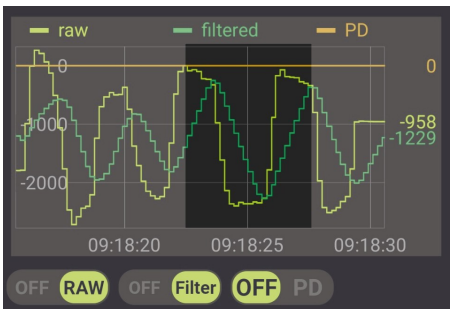
Ziel ist es, den Ausgangsbereich des DAC von 0–5 V auf den Ausgangsbereich des Verstärkers von ±10 V abzubilden. Im Rohdatenmodus, siehe Bild 8, zeigt das Oszilloskop das DAC-Signal (gelb), das stufenweise die Sollwerte durchläuft, während der LM358-Ausgang (blau) diesen mit einer Verstärkung von etwa vier nachbildet. Die Mittelwertzuordnung ist so gewählt, dass $V_{\mathrm{DAC}} \approx 2{,}5\,\mathrm{V}$ einem Verstärkerausgang von $V_{\mathrm{amp}} \approx 0\,\mathrm{V}$ entspricht. Die Flanken am Verstärkerausgang treten kurz nach den DAC-Stufen auf und spiegeln die intrinsische Laufzeit des analogen Signalpfads ohne zusätzliche Signalaufbereitung wider. Der im Dashboard markierte Zeitabschnitt stimmt mit der Oszilloskopaufnahme überein

Open Access. © 2026 M. Wilken, E. Wings
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

und bestätigt, dass die ausgegebenen Stufensignale mit der vorgesehenen Skalierung und dem definierten Offset am Verstärkerausgang reproduziert werden.



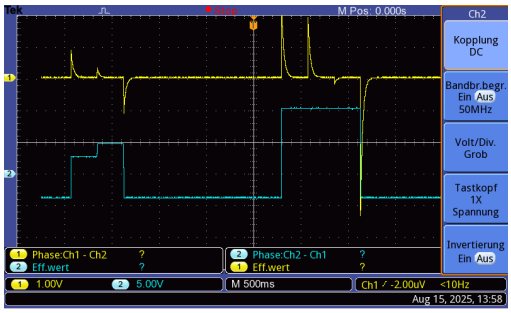
(a) MCP4725-Ausgang (Gelb) und LM358-Ausgang (Blau).



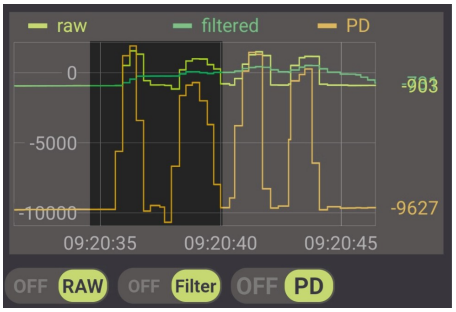
(b) HTA-Dashboard: Gefilterte Dehnungsmessstreifendaten (Grün).

Bild 9: Vergleich des DAC-/LM358-Ausgangs mit gefilterten Dehnungsmessstreifendaten.

Mit aktiviertem gleitendem Mittelwertfilter, siehe Bild 9, weist das DAC-Signal deutlich glattere Übergänge auf, und der Ausgang des Verstärkers zeigt entsprechend sanftere Flanken. Die grundlegende Skalierung sowie die Mittelwertabbildung bleiben unverändert, jedoch ist eine konstante Phasenverschiebung zwischen dem gefilterten Messsignal und dem analogen Ausgang erkennbar, wie sie aufgrund der Gruppenlaufzeit des Filters zu erwarten ist. Die während des gefilterten Dashboard-Abschnitts aufgezeichnete Oszilloskopaufnahme zeigt diese abgerundeten Übergänge und stabilen Plateaus und belegt, dass die Tiefpasswirkung des Filters das Ansteuersignal stabilisiert, ohne die Abbildung 0–5 V → ±10 V zu verfälschen.



(a) MCP4725-Ausgang (Gelb) und LM358-Ausgang (Blau).



(b) HTA-Dashboard: PD-geregelte Dehnungsmessstreifendaten (Orange).

Bild 10: Vergleich des DAC-/LM358-Ausgangs mit PD-geregelten Dehnungsmessstreifendaten.

Bei aktivierter PD-Regelung, siehe Bild 10, weist das DAC-Signal kurzzeitige Übergangsspitzen auf, die den Sollwerten überlagert sind, während der Verstärkerausgang diesen Änderungen in Form kontrollierter, gedämpfter Stufen folgt. Diese kurzen Impulse repräsentieren den Differentialanteil, der zu Beginn einer Änderung beschleunigend wirkt und in der Nähe des Zielwerts bremsend eingreift. Dadurch wird eine schnellere Einschwingzeit erreicht, während die festgelegte Verstärkung von vier sowie die Mittelwertreferenz von 2,5 V beibehalten werden. Die Oszilloskopaufzeichnung stimmt mit dem im Dashboard dargestellten PD-Zeitabschnitt überein: Übergangsunterstützungen sind an jeder Flanke erkennbar, die stationären Bereiche liegen auf den erwarteten Pegeln, und das Gesamtverhalten erfüllt das Ziel einer sauberen, bidirektionalen Ansteuerung auf Basis des DAC-Befehlsbereichs von 0–5 V.

Zusammenfassend zeigen die Darstellungen im Dashboard und auf dem Oszilloskop, dass sowohl der gleitende Mittelwertfilter als auch der PD-Regler das Ansteuersignal vorteilhaft beeinflussen: Der Filter verbessert die Signalqualität, während der Regler das dynamische Verhalten optimiert. Gleichzeitig bleibt die geforderte Abbildung 0–5 V → ±10 V sowie die Mittelwertreferenz von 2,5 V erhalten.

Open Access. © 2026 M. Wilken, E. Wings
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +

4 Fazit

Diese Arbeit präsentiert eine vollständige und funktionsfähige Signalkette von der Kraftmessung bis zur Traktionsausgabe. Zug- und Druckkräfte werden mithilfe geklebter elektrischer Widerstands-Dehnungsmessstreifen in einer Wheatstone-Brückenschaltung erfasst, über ein HX711-Modul (PGA und 24-Bit-Analog-Digital-Wandler) konditioniert, softwareseitig auf dem Hypatia-Board mittels gleitendem Mittelwertfilter und PD-Regelung verarbeitet, über einen MCP4725 in ein analoges Signal umgewandelt, mit einem LM358 auf ein Steuersignal von ±10 V verstärkt und schließlich einer diskret aufgebauten Transistor-H-Brücke zugeführt, welche die Gleichstrommotoren antreibt. Ein smartphonebasiertes Dashboard ermöglichte die Live-Visualisierung der Messdaten sowie die Anpassung von Regelparametern, während Raddrehgeber eine Rückmeldung zur Überwachung und für zukünftige Erweiterungen in Richtung geschlossener Regelkreise lieferten. In der praktischen Umsetzung übersetzt der Demonstrator die gemessene Last in ein stabiles, bidirektionales Radmoment und macht jede Verarbeitungsstufe der Signalkette nachvollziehbar.

Die Kraftmessung sowie eine grundlegende Kalibrierung konnten erfolgreich realisiert werden. Die Signalaufbereitung und Regelung (Filter und PD-Anteil) reduzierten das Messrauschen und verbesserten das dynamische Ansprechverhalten. Die Aktorik vom Digital-Analog-Wandler über den Verstärker bis zur H-Brücke arbeitete wie vorgesehen. Rückmeldungen beider Raddrehgeber wurden zuverlässig erfasst, und die Systemintegration legte einen Schwerpunkt auf die Bedienbarkeit durch getrennte Versorgungsbereiche, einen Hauptschalter, Statusanzeigen sowie ein mobiles Dashboard. Der Demonstrator erfüllt damit die zu Beginn definierten funktionalen und integrativen Zielsetzungen.

Abschließend ist ein kurzer Hinweis zur Genauigkeit und zu potenziellen Datenverlusten angebracht: Verbleibende Unsicherheiten resultieren hauptsächlich aus Toleranzen der Sensorik und der Brückenschaltung (Klebung, Kalibration, Temperatureinflüsse), aus elektrischen Grenzen (Auflösung von ADC und DAC, Referenzspannungen und Verhalten des Operationsverstärkers) sowie aus antriebstechnischen Effekten (Totzonen der H-Brücke, Nichtlinearitäten der Motoren). Die implementierte Filterung und PD-Regelung kompensieren einen Teil dieser Einflüsse, setzen jedoch gleichzeitig eine praxisbedingte Grenze für die erreichbare Präzision.

5 Literatur

[1] Syde S.r.l. (2025): HTA – Hybrid Traction Assistance. Trazione animale assistita – Agricoltura 4.0. Online verfügbar unter: https://www.syde.technology/prodotti/trazione-animale-assistita-agricoltura-40 zuletzt abgerufen am 07.12.2026.
[2] Syde S.r.l. (2021): Hybrid Traction Assistant Claim. Patentanmeldung, Italienisches Patent Nr. IT102021000008240.
[3] Syde S.r.l. (2022): Electrical Aid Apparatus for an Animal-Drawn Vehicle or Machine. Patentschrift, Italien.
[4] Joy-IT (2017): KY-023 Joystick-Modul Technisches Datenblatt.
[5] Seed Studio (2025): *Grove – OLED Yellow&Blue Display 0,96" (SSD1315)*. Datenblatt.
[6] Karuppusamy, P.; García Márquez, F. P.; Nguyen, T. N. (2022): Ubiquitous Intelligent Systems. Proceedings of the Second ICUIS 2022. Springer Nature, Cham.
[7] Joy-IT (2025): SBC-MotoDriver2 – Datenblatt. Kompakte H-Brücken-Lösung zur Gleichstrommotor-Ansteuerung. SIMAC Electronics GmbH, Neukirchen-Vluyn.
[8] Rajguru Electronics (2017): Lm393 Motor Speed Measuring Sensor Module For Arduino. Datenblatt, Pune, Indien.
[9] Avia Semiconductor (2009): HX711 – 24-Bit-Analog-Digital-Wandler für Wägeanwendungen. Datenblatt, Volksrepublik China.
[10] Microchip Technology Inc. (2009): MCP4725 – 12-Bit-Digital-Analog-Wandler mit EEPROM. Datenblatt.
[11] EVVOSEMI (2023): LM2596 / LM2596HV – 3A-Abwärts-Schaltregler. Datenblatt, Revision 2023A2.
[12] Texas Instruments (2006): 5.5-V to 36-V, 3-A STEP-DOWN SWIFT CONVERTER. Datenblatt, SLVS632, Dallas, TX, USA.
[13] Texas Instruments (2023): LM2596 SIMPLE SWITCHER Power Converter 150-kHz 3-A Step-Down Voltage Regulator. Datenblatt, SNVS124G, Revision G (März 2023).
[14] ICStation (2019): Foil Resistance Strain Gauge BF350-3AA, 350 Ω. Datenblatt.

Open Access. © 2026 M. Wilken, E. Wings
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 License. +