

Auslegung und Implementierung eines bidirektionalen Antriebssystems für einen kraftgeregelten Akku-Rasenmäher

Adrian Siegele, Fabian Eberwein (Betreuender), und Andreas Mehrle (Begutachter)

Kurzfassung—In den letzten Jahren gewinnen bodengeführte, batteriebetriebene Geräte mit Antriebsregelung in verschiedenen Branchen immer mehr an Bedeutung. Ein Prototyp eines Rasenmähers existiert bereits aus einem Vorgängerprojekt der EBERWEIN GmbH, welcher Kraftsensoren verwendet für eine Geschwindigkeitsregelung des Antriebsmotors. Der Grundgedanke dieser Regelung ist, die Gehgeschwindigkeit des Nutzers mit der Antriebsgeschwindigkeit des Rasenmähers abzugleichen. Aufgrund des vorhandenen Antriebs kann die Antriebsunterstützung jedoch nur in Vorwärtsrichtung wirken, was für einige Anwendungen nicht optimal ist. Das Ziel dieser Masterarbeit besteht darin, ein Antriebskonzept zu entwickeln, welches eine beidseitige Drehmomentübertragung ermöglicht. Die zentrale Forschungsfrage untersucht die Chancen und Risiken der Implementierung eines solchen Antriebs in Rasenmähern. Der theoretische Teil umfasst eine Literaturrecherche, um verschiedene Antriebskonzepte zu vergleichen und ein geeignetes auszuwählen. Im praktischen Teil wird der ausgewählte Antrieb in einen batteriebetriebenen Rasenmäher implementiert und ein geeigneter Regler ausgelegt. Schließlich wird ein Feldtest durchgeführt, bei dem diverse Anwender die Funktionalität des Prototyps im Vergleich zum Aufbau mit unidirektionaler Antriebsunterstützung subjektiv bewerten. Es kann gezeigt werden, dass der bidirektionale Antrieb die Benutzerzufriedenheit erhöhen und zu einem besseren Mähverhalten führen kann. Somit trägt diese Masterarbeit zur Entwicklung von kraftgesteuerten, batteriebetriebenen Rasenmähern bei.

A. Siegele, sa7651@mci4me.at, EBERWEIN GmbH, Innsbruck, Österreich,
F. Eberwein, fe@eberwein.at, EBERWEIN GmbH, Innsbruck, Österreich, und
A. Mehrle, andreas.mehrle@mci.edu, Studiengang Mechatronik, MCI, Innsbruck, Österreich.

Schlagwörter—Rasenmäher, Kraftregelung, Antriebsauslegung.

I. EINLEITUNG

KONVENTIONELLE bodengeführte Rasenmäher funktionieren alle nach einem ähnlichen Schema. Die Anwesenheit des Bedieners wird durch eine Anwesenheitskontrolle erfasst. Dies erfolgt in der Regel durch das Betätigen eines Bügels am Lenker. Sofern die Benutzererkennung positiv ausfällt, treibt ein Elektromotor die beiden Antriebsräder mit konstanter Geschwindigkeit an.

Während des Rasenmähens treten allerdings unterschiedliche Betriebsfälle auf. Die aktuellen Bedingungen des zu mähenden Rasens und die Spezifität des Anwenders beeinflussen die Anforderungen an das Antriebssystem. Die Anpassung der Motordrehzahl an diese Situationen erfordert jedoch das manuelle Eingreifen des Benutzers.

Aus dieser Problemstellung entstand die Idee eines Rasenmähers, dessen Antriebsgeschwindigkeit sich automatisch an die Gehgeschwindigkeit des Nutzers anpasst. Bei der EBERWEIN GmbH entwickelte sich daraus ein konkretes Vorentwicklungsprojekt für eine entsprechende Antriebsregelung. Bei diesem Aufbau erfolgt die Messung der vom Nutzer auf den Lenker ausgeübten Kraft durch eine Sensorik. Die gemessene Kraft wird als Eingangsgröße für einen Regelalgorithmus verwendet und auf einen Konstantwert geregelt.

Allerdings musste bei diesem Projekt aus Zeit- und Kostengründen ein Antrieb verwendet werden,

welcher nur eine unidirektionale Drehmomentübertragung in Vorwärtsrichtung ermöglicht. Als Konsequenz daraus ergibt sich, dass der Bediener in bestimmten Fällen den Rasenmäher manuell verlangsamen muss. Eine Unterstützung während des Rückwärtsfahrens ist ebenfalls nicht möglich. Diese Masterarbeit entstand aus dem Gedanken, die Vor- und Nachteile eines bidirektionalen Antriebssystems an Hand eines Funktionsmuster aufzuzeigen.

Während der Masterarbeit wurde die folgende Hauptforschungsfrage verfolgt: *Welche Chancen und Risiken bietet eine bidirektionale Antriebsunterstützung bei kraftgesteuerten Akku-Rasenmähern?* In diesem Paper werden die wichtigsten Erkenntnisse in dieser Hinsicht zusammenfassend präsentiert.

Es sei noch anzumerken, dass die Arbeit aus Gründen der Vertraulichkeit gesperrt ist, da sie sensible Informationen für beteiligte Unternehmen enthält. In diesem Paper können daher nur verallgemeinerte Ergebnisse beschrieben werden.

II. METHODEN

Das Antriebssystem soll auf einem Akku-Rasenmäher integriert werden können und mit der bestehenden 36 V Akku-Plattform kompatibel sein. Aus diesem Grund beschränkt sich die Auswahl der Antriebe auf Gleichstrommotoren. Es wurden der bürstenbehaftete Gleichstrommotor (DCM) und der bürstenlose Gleichstrommotor (BLDCM) näher betrachtet.

Der Theorieteil hat gezeigt, dass bürstenlose Gleichstrommotoren einige Vorteile haben gegenüber bürstenbehafteten Motoren. Die Ankerwicklungen von Elektromotoren sind im Normalfall relativ schwer. Bei BLDCM sind diese auf dem Stator angebracht, was den Vorteil bringt, dass der Rotor ein geringeres Trägheitsmoment als bei einem bürstenbehafteten Pendant gleicher Größe aufweist. Aus diesem Grund können die bürstenlosen Motoren schneller auf Geschwindigkeitsänderungen reagieren und sind somit weniger träge. [1]

Im Gegensatz zu DCM weisen die bürstenlosen Motoren eine höhere Lebensdauer auf und sind leiser,

weil die mechanische Kommutation mittels Bürsten und Kommutator durch eine elektrische Kommutation ersetzt wird [2].

Wegen des geringeren Gewichts, dem leiseren Betrieb, weniger Wartungsaufwand, der höheren Verlässlichkeit und der kompakteren Bauweise werden BLDCM als effizienter angesehen als die Bürstenmotoren [3].

Aus genannten Gründen wurde die Entscheidung getroffen, einen BLDCM zur Drehmomenterzeugung zu verwenden. An das Antriebssystem wird die Forderung gestellt, dass dieses System in der Lage ist, das vom Motor erzeugte Drehmoment in beide Richtungen auf die Antriebsräder zu übertragen, und somit den Rasenmäher sowohl vorwärts als auch rückwärts zu bewegen.

Des Weiteren ist es von Bedeutung, dass das Antriebssystem im spannungslosen Zustand einen minimalen Rollwiderstand aufweist, um sicherzustellen, dass der Rasenmäher leicht geschoben werden kann, selbst wenn die Akkus entladen sind oder der Antrieb während des Betriebs ausfällt. Da Rasenmäher in der Regel auf der Stelle gewendet werden, muss zusätzlich ein entgegengesetztes Drehen der beiden Antriebsräder möglich sein.

Die beiden untersuchten Antriebskonzepte sind die Nutzung eines Differentialgetriebes und die Anwendung von Radnabenmotoren als Direktantrieb. Ein mechanisches Differentialgetriebe wird dazu verwendet, um zwei Antriebsräder mit demselben Drehmoment zu versorgen und gleichzeitig unterschiedliche Raddrehzahlen zu ermöglichen [4].

Eine weitere Möglichkeit zur Entkopplung der Antriebsraddrehzahlen voneinander besteht in der Verwendung eines individuellen Elektromotors für jedes Antriebsrad. Dieses System wird auch als elektrisches Differential bezeichnet [5].

Abbildung 1 zeigt das Funktionsprinzip eines elektrischen Differentials in Form eines Blockschaltbilds.

Es wurde die Entscheidung getroffen, ein solches Antriebssystem umzusetzen.

BLDC-Radnabenmotoren als Direktantrieb werden bei vergleichbaren Anwendungen kleiner Elektrofahrzeuge mittlerweile häufig eingesetzt. Eine Internetrecherche zeigte, dass insbesondere sogenannte *Self-Balancing-Boards* Radnabenmotoren in ähnlichen Größenordnungen verwenden. Sowohl der kraftgesteuerte Rasenmäher als auch das Self-Balancing-Board müssen präzise regelbar sein, schnelle Richtungs- und Drehzahlwechsel ermöglichen und auch bei niedrigen Drehzahlen funktionsfähig sein. Aufgrund dieser Tatsachen, der guten Verfügbarkeit der Radnabenmotoren und der Möglichkeit der einfachen Integration im Funktionsmuster, wurden diese Radnabenmotoren gewählt. Es wurden zwei Radnabenmotoren für Self-Balancing-Boards beschafft und auf der Hinterachse des Rasenmähers assembliert.

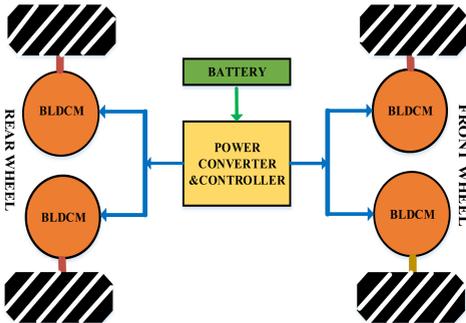


Abbildung 1. Blockschaltbild eines elektrischen Differentials bei einem Elektrofahrzeug mit Allradantrieb [5].

Beim Systemmodell wird sich an dem in [6] beschriebenen Konzept für ein elektrisches Fahrzeug orientiert, wie in Abbildung 2 dargestellt. Der Luftwiderstand wird dabei vernachlässigt. Summiert man alle Kräfte in x -Richtung ergibt sich

$$\sum \vec{F}_x \stackrel{!}{=} 0 = \vec{F}_{Bx} + \vec{F}_A - \vec{F}_T - \vec{F}_{RW} - \vec{F}_H. \quad (1)$$

Die Kraft \vec{F}_{Bx} ist die vom Nutzer auf den Lenker ausgeübte Kraft in Fahrtrichtung. Es ist ersichtlich, dass \vec{F}_{Bx} und \vec{F}_A den Rasenmäher vorwärts bewegen, während \vec{F}_T , \vec{F}_{RW} und \vec{F}_H der Bewegung entgegenwirken. Zum Erreichen des Ziels der Regelung wird \vec{F}_{Bx} auf einen konstanten Wert von 10 N geregelt. Die Antriebskraft \vec{F}_A wird verwendet, um \vec{F}_{Bx} zu steuern.

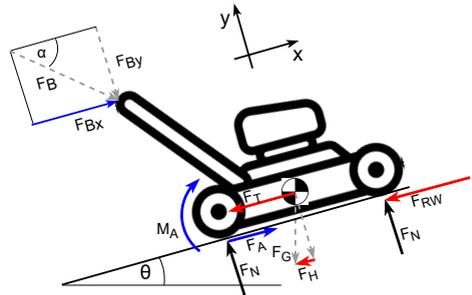


Abbildung 2. Kräfte am angetriebenen Rasenmäher [6].

Die Sensoranordnung bzw. der mechanische Aufbau des Sensor-Lenkens muss gewährleisten, dass diese Kraft \vec{F}_{Bx} zuverlässig erfasst wird. Für diesen Zweck wurde der erste Lenker-Prototyp aus dem Vorserienprojekt wiederverwendet. Dieser Prototyp erfasst die Kräfte auf den Lenker mittels Wägezellen. Wägezellen sind gängige Bauelemente im Bereich der Wiegetechnik und bestehen aus einem metallischen Grundkörper, auf welchem Dehnmessstreifen angebracht sind.

Für die Kraftregelung wurde ein PID-Regler gewählt. Die Regelstrecke umfasst das Gesamtsystem, bestehend aus den beiden Radnabenmotoren inklusive deren Motorreglern und dem Rasenmäher.

Im gewählten Regelkreis ist der Ausgang der Regelstrecke die Geschwindigkeit des Mähers. Diese Geschwindigkeit wird mit der Gehgeschwindigkeit

keit des Nutzers verglichen, wobei die Differenz berechnet und anschließend aufintegriert wird. Auf diese Weise wird die Wegdifferenz zwischen dem Mäher und dem Nutzer ermittelt. Die Arme des Nutzers, welche die Betriebskraft aufbringen, werden als linear-elastische Federn idealisiert.

Durch Multiplikation der Wegdifferenz mit der Federkonstante ergibt sich die Regelgröße, welche die Betriebskraft in Fahrtrichtung auf den Lenker darstellt. Diese Kraft wird von den Wägezellen erfasst und mit der vorgegebenen Führungsgröße von 10 N verglichen.

Zur Reglerauslegung muss zuerst die Regelstrecke identifiziert werden. Zu diesem Zweck wurde die Sprungantwort der Regelstrecke erfasst. Es wurde ein PWM-Signal mit einem Tastverhältnis von 20 % an den Motorregler übermittelt. Dies entspricht einer anliegenden Motorspannung von $\vec{U}_{Motor} = 7,85 \text{ V}$. Die gemessene Sprungantwort ähnelte jener eines PT_1 -Systems. Der sofortige Anstieg der Ausgangsgröße ohne Überschwingung ist kennzeichnend für diese Art von Systemen [7]. Die folgenden Formeln sind ebenfalls aus [7] übernommen. Die Sprungantwort eines PT_1 -Systems wird charakterisiert durch die Übertragungsfunktion

$$G_S(s) = \frac{K}{\tau s + 1}. \quad (2)$$

Anschließend wurde die Sprungantwort normiert auf einen Spannungseingang von $\vec{U}_{Motor} = 1 \text{ V}$ und beschnitten. Der Verstärkungsfaktor K und die Zeitkonstante τ wurden mittels der Matlab-Funktion *lsqcurvefit* geschätzt mit dem Ergebnis

$$G_S(s) = \frac{12,1297}{0,3584s + 1}. \quad (3)$$

Abbildung 3 zeigt die Sprungantwort der Regelstrecke sowie die angenommene Übertragungsfunktion aus Gleichung (3). Der Mäher befindet sich dabei auf einem Rasen, was eine typische Last während des Betriebs eines Rasenmähers darstellt. Die Schwankungen in den Messwerten sind auf Unebenheiten

des Rasens zurückzuführen.

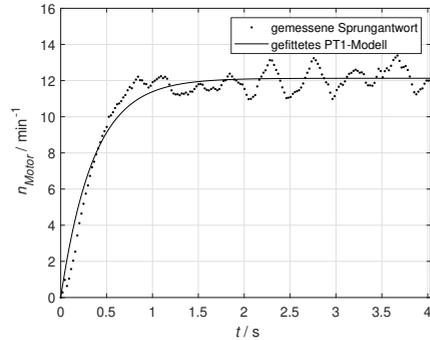


Abbildung 3. Normierte Sprungantwort der Regelstrecke unter Lasteinwirkung.

Mit dem identifizierten System wurde eine Abschätzung geeigneter Regelparameter durchgeführt mittels Polvorgabe. Die Übertragungsfunktion eines PID-Reglers ist definiert als

$$G_C(s) = k_P + k_I \frac{1}{s} + k_D s. \quad (4)$$

Die Übertragungsfunktion des geschlossenen Regelkreises $T(s)$, bestehend aus PID-Regler und PT_1 -Regelstrecke, wird berechnet durch

$$T(s) = \frac{G_C(s)G_S(s)}{1 + G_C(s)G_S(s)}, \quad (5)$$

mit dem Ergebnis

$$T(s) = \frac{K(k_D s^2 + k_P s + k_I)}{(\tau + K k_D) s^2 + (1 + K k_P) s + K k_I}. \quad (6)$$

Es wird vorgegeben, dass im Regelkreis das Überschwingen nicht mehr als $p = 5\%$ des Zielwerts betragen darf und die Einstellzeit bei unter $t_S = 8 \text{ s}$ liegen soll. Gemäß diesen Vorgaben wird der erlaubte Bereich der Pole des geschlossenen Regelkreises berechnet über die Formeln

$$\varphi = -\arctan \frac{\pi}{\ln p} = -\arctan \frac{\pi}{\ln 0,05} = 46,4^\circ \quad (7)$$

und

$$\zeta \omega_n = \frac{4}{t_S} > 0,5. \quad (8)$$

Abbildung 4 zeigt grau hinterlegt den erlaubten Bereich der Pole des geschlossenen Regelkreises. Um die Stellgröße möglichst gering zu halten, werden die Pole nahe an $-\zeta \omega_n$ und der realen Achse platziert

$$s_{1,2} = -0,55 \pm 0,05j. \quad (9)$$

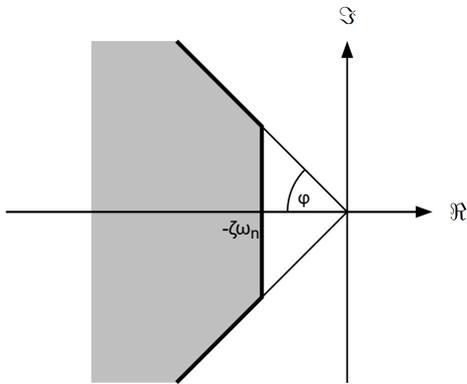


Abbildung 4. Erlaubte Polpositionen des geschlossenen Regelkreises. Die Pole müssen im grau hinterlegten Bereich liegen. [7]

Durch Gleichsetzen des charakteristischen Polynoms der Pole mit dem Nennerpolynom der Übertragungsfunktion des geschlossenen Regelkreises $T(s)$ erhält man die Gleichung

$$s^2 + \frac{11}{10}s + \frac{61}{200} = (\tau + Kk_D)s^2 + (1 + Kk_P)s + Kk_I.$$

Durch einen Koeffizientenvergleich können die entsprechenden Regelparame-ter berechnet werden

$$k_D = \frac{1 - \tau}{K} = \frac{1 - 0,3584}{12,1297} = 0,0529 \quad (10)$$

$$k_I = \frac{\frac{61}{200}}{K} = \frac{\frac{61}{200}}{12,1297} = 0,0251 \quad (11)$$

$$k_P = \frac{\frac{11}{10} - 1}{K} = \frac{\frac{11}{10} - 1}{12,1297} = 0,0082. \quad (12)$$

Die Parameter werden an der realen Anlage in verschiedenen Anwendungsfällen getestet. Der Regler reagiert in manchen Fällen zu schnell, was vom Nutzer als ruckartige Geschwindigkeitsänderung wahrgenommen werden kann. Deshalb werden die Faktoren k_P und k_I geringfügig reduziert. Der Faktor k_D wird gleich 0 gesetzt, um potenziellen Problemen durch Rauschen in der Messgröße, verursacht durch den D-Term, vorzubeugen. Die optimierten Parameter sind somit

$$k_D = 0$$

$$k_P = 0,005$$

$$k_I = 0,01.$$

Basierend auf dem beschriebenen System wurde ein Matlab Simulink-Modell erstellt. Dieses wurde mit den gewählten Regelparame-tern untersucht. Der Arm des Nutzers wird als Federkonstante idealisiert. Da dieser Wert in der Realität von einer Vielzahl Faktoren abhängt, wurde das System bei verschiedenen Federsteifigkeiten getestet. Mithilfe des Modells können sowohl eine konstante Geschwindigkeit als auch pulsformige und sinusformige Geschwindigkeiten analysiert werden.

Abbildung 5 zeigt das Simulationsergebnis der Betriebskraft in Fahrtrichtung F_{Bx} bei einer konstanten Nutzergeschwindigkeit $\vec{v}_{Nutzer} = 1 \text{ m s}^{-1}$ und einer Federkonstante des Nutzers $k = 100 \text{ N m}^{-1}$. Man

kann erkennen, dass sich die Betriebskraft auf einen Wert von 10 N nach einer Zeit $t \approx 22$ s einschwingt.

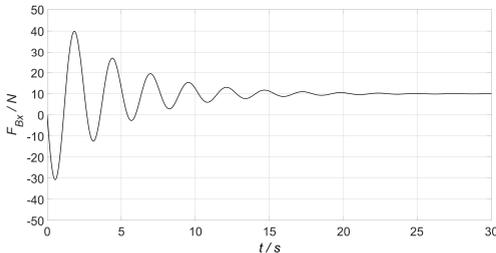


Abbildung 5. Simulation von F_{Bx} bei einer Federkonstante $k = 100 \text{ N m}^{-1}$ und einer konstanten Nutzergeschwindigkeit $\vec{v}_{Nutzer} = 1 \text{ m s}^{-1}$.

Zum Vergleich zeigt Abbildung 6 den Kraftverlauf von F_{Bx} bei einer Federkonstante von $k = 100 \text{ N m}^{-1}$ und der sinusförmigen Nutzergeschwindigkeit \vec{v}_{Nutzer} , welche zwischen 0 m s^{-1} und 1 m s^{-1} wechselt. Die Kraft schwingt mit einer Amplitude von circa 50 N um die Führungsgröße des Reglers von 10 N.

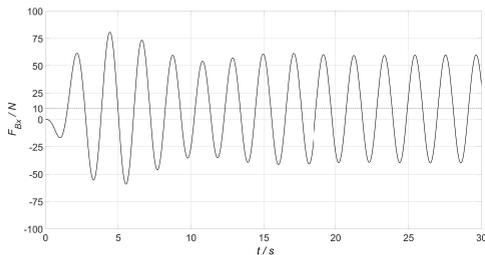


Abbildung 6. Simulation von F_{Bx} bei einer Federkonstante $k = 100 \text{ N m}^{-1}$ und einer sinusförmigen Nutzergeschwindigkeit $\vec{v}_{Nutzer} = 1 \text{ m s}^{-1}$.

Während sämtlichen Simulationen verfolgt der Kraftverlauf die Führungsgröße. Bei einer konstanten Geschwindigkeit passt sich das System allmählich der Führungsgröße an, was dem Hauptziel der Kraftregelung entspricht. Im Falle einer pulsierenden oder sinusförmigen Geschwindigkeit schwingt das System

jeweils um die Führungsgröße. Auch bei unterschiedlichen Federkonstanten ist dies gegeben. Daraus kann geschlussfolgert werden, dass das Modell eine angemessene Annäherung an das reale System darstellt und die Regelparameter passend gewählt wurden.

III. ERGEBNISSE

Zur Überprüfung des Simulink-Modells und der Software wird die Umsetzung der Kraftregelung mit den zuvor genannten Regelparametern an der realen Anlage getestet. Hierzu werden Messdaten sowohl der Eingangsgröße des Regelkreises F_{Bx} als auch der Stellgröße erfasst. Eine repräsentative Darstellung ist in nachfolgender Abbildung 7 ersichtlich.

Es wird beobachtet, dass die Stellgröße der Kraft folgt. Darüber hinaus wurde das System in verschiedenen Betriebszuständen positiv getestet. Daraus lässt sich schließen, dass die erfolgreiche Implementierung einer Kraftregelung mit bidirektionalem Antrieb vorliegt.

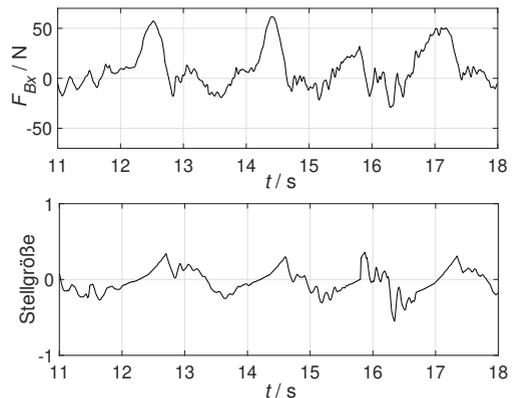


Abbildung 7. Messung von F_{Bx} und der Stellgröße am bidirektionalen Funktionsmuster mit den definierten Regelparametern während der Fahrt im Flachen.

Im Rahmen der Arbeit wurden zur Beantwortung der Hauptforschungsfrage Nutzertest mit fünf freiwilligen Testpersonen durchgeführt. Die

Testpersonen verfügen über unterschiedliches Vorwissen bezüglich kraftgeregelten Rasenmähern. Bei den Tests erfolgte ein Vergleich zwischen dem unidirektionalen und bidirektionalen Funktionsmuster.

Zur Auswertung der Tests wurde ein Fragebogen verwendet. Die Unterstützungsfunktion des Rasenmähers bei ausgewählten Anwendungsfällen wird quantitativ bewertet. Hierbei wird eine Bewertungslegende basierend auf dem Schulnotensystem verwendet (1: sehr gute Unterstützung bis 5: keine Unterstützung).

Der Fragebogen enthält außerdem allgemeine Fragen zu kraftgeregelten Rasenmähern. Das Ziel dieser Fragen besteht darin, weitere Informationen aus Nutzersicht bezüglich Funktionalität, technischer Umsetzung und Kosten zu erhalten.

Tabelle I präsentiert das ausgefüllte Bewertungsraster der Anwendungsfälle. Erkennlich sind die getesteten Anwendungsfälle und der Mittelwert der von den Testpersonen vergebenen Noten. Aus allen Mittelwerten wird eine Gesamtnote für das jeweilige Funktionsmuster berechnet.

Die bidirektionale Variante (Gesamtnote 1,64) wird von den Probanden deutlich besser bewertet als das unidirektionale Pendant (Gesamtnote 3,2). Des Weiteren wird das bidirektionale Funktionsmuster in jedem einzelnen Anwendungsfall entweder besser oder mindestens gleich gut bewertet. Auffällig ist dabei, dass bei allen Anwendungsfällen, die ausschließlich eine Vorwärtsunterstützung erfordern, beide Varianten ähnliche Bewertungen aufweisen.

In vielen Betriebssituationen wird der Mäher rückwärts bewegt. In diesen Fällen weist das unidirektionale Funktionsmuster keine Unterstützungsfunktion auf. Der Mäher wiegt mit vollem Mähkorb und Akku-Gewicht bis zu 50 kg. Bei der Fahrt bergauf oder bergab stellt dies einen erheblichen Muskelaufwand für den Nutzer dar.

Dies erklärt, warum das bidirektionale System in

Tabelle I
AUSGEFÜLLTES BEWERTUNGSRASTER.

Anwendungsfall	unidirektional	bidirektional
	\bar{x}	\bar{x}
Anfahren im Flachen	1,8	1,6
Schieben im Flachen	1,8	1,6
Verzögern bis zum Stillstand	1,8	1,6
Richtungswechsel vor/zurück	4,6	1,8
Ziehen im Flachen	3,8	1,8
Bergauffahrt vorwärts	1,6	1,4
Halten bergauf	2,8	1,6
Wenden bergab	3,2	1,4
Bergabfahrt vorwärts	4	1,2
Halten bergab	4,4	1,8
Bergauffahrt rückwärts	4,8	2,2
Bergabfahrt rückwärts	4	1,6
Fahrt quer zum Hang	1,4	1,4
Fahrt quer zum Hang, Wenden Bergauf	1,8	1,6
Fahrt quer zum Hang, Wenden Bergab	3,6	2
Gesamtnote:	3,2	1,64

diesen Anwendungsszenarien wesentlich positiver bewertet wird. Die Verwendung eines bidirektionalen Antriebs bietet die Chance, den Kunden eine verbesserte Funktionalität bereitzustellen und die Kundenbegeisterung möglicherweise zu erhöhen.

Hier ist zu erwähnen, dass in dieser Arbeit die Kosten, die für die Implementierung einer bidirektionalen Kraftregelung bei Rasenmähern notwendig sind, nicht angeführt sind. Es wurden gezielt Bauteile ausgewählt, die sich für einen ersten Prototyp eignen und gleichzeitig eine Vielzahl von Konfigurationsmöglichkeiten bieten. Dies hängt stark von den Anforderungen der jeweiligen Einkaufsabteilung ab.

Im Kontext dieser Arbeit wurde jedoch eingehend untersucht, in welchem Umfang potenzielle Käufer bereit sind, Mehrkosten für einen Mäher mit Kraftregelung zu akzeptieren. Die Mehrheit der Testpersonen gibt an, zwischen 30€ und 50€ für das unidirektionale System auszugeben, während sie für das bidirektionale System Kosten im Bereich von 70€ bis 100€ als angemessen erachten.

Die Nutzertests haben außerdem eindeutig gezeigt, dass es Personen gibt, welche die Kraftregelung als nützlich erachten und bereit wären, diese zu erwerben. Besonders beim Mähen in Hanglagen bietet der bidirektionale, kraftgeregelter Mäher die meisten Vorteile. Der Hauptanwendungsbereich der Kraftregelung würde vorwiegend im Profi-Segment der Rasenmäher liegen. Im Hochpreissektor angesiedelt, finden diese Produkte oft ihre Anwendung beim regelmäßigen Mähen großer Flächen.

IV. CONCLUSIO

Die Nutzertests haben gezeigt, dass das bidirektionale System gegenüber dem unidirektionalen Antrieb einige Vorteile aufweist und bei den Kunden auf wesentlich höhere Akzeptanz stößt. Beim bidirektionalen Antrieb können alle Anwendungsfälle, die während dem Prozess des Rasenmähens auftreten, unterstützt werden. Außerdem wurde untersucht, wie die Kraftregelung generell von den Testpersonen aufgenommen wird. Die Testergebnisse zeigen, dass diese Funktion durchaus Potenzial hat, in einem Serienprodukt umgesetzt zu werden.

Insgesamt liefert diese Arbeit nicht nur einen Überblick über ein bidirektionales Antriebssystem für kraftgesteuerte Akku-Rasenmäher, sondern eröffnet auch vielversprechende Perspektiven für zukünftige Forschung und die praktische Anwendung dieser innovativen Technologie in der Rasenmäherbranche. Es konnte somit ein Beitrag zur Entwicklung kraftgeregelter Rasenmäher geleistet werden, indem diese Zusatzfunktion aus Sicht der Kunden untersucht wurde.

LITERATUR

- [1] K. Sang-Hoon, *Electric Motor Control: DC, AC, and BLDC Motors*. [s.l.]: Elsevier Science Publishing Co Inc, 2017.
- [2] P. Suganthi, S. Nagapavithra, and S. Umamaheswari, "Modeling and simulation of closed loop speed control for bldc motor," in *2017 Conference on Emerging Devices and Smart Systems (ICEDSS)*, 2017, pp. 229–233.
- [3] V. K. Awaar, P. Jugge, S. T. Kalyani, and M. Eskandari, "Dynamic voltage restorer—a custom power device for power quality improvement in electrical distribution systems," in *Power Quality: Infrastructures and Control*, A. K. Giri, S. R. Arya, J. M. Guerrero, and S. Kumar, Eds. Singapore: Springer Nature Singapore, 2023, pp. 97–116.
- [4] P.-Y. Wang and K.-L. Liu, "Analysis and design of differential bevel gear," in *2018 IEEE International Conference on Advanced Manufacturing (ICAM)*, 2018, pp. 243–245.
- [5] D. Mohanraj, R. Arulavid, R. Verma, K. Sathiyasekar, A. B. Barnawi, B. Chokkalingam, and L. Mihet-Popa, "A review of bldc motor: State of art, advanced control techniques, and applications," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 54 833–54 869, 2022.
- [6] MathWorks Student Competitions Team, "Matlab and simulink racing lounge: Vehicle modeling," Online, 23.09.2020. [Online]. Available: <https://github.com/mathworks/vehicle-modeling/releases/tag/v4.1.1>
- [7] Yeongmi Kim, Andreas Mehrle, Ronald Stärz, and Peter Wimmer, "Reader for the Course Control Engineering - Frequency Domain Methods," Skriptum, 2019, Management Center Innsbruck.



Adrian Siegele ist bei der EBERWEIN GmbH als Projektmanager beschäftigt und ein Masterstudent am Management Center Innsbruck im Studiengang Mechatronik & Smart Technologies.