

HOCHSCHULE RHEINMAIN



PROJEKTARBEIT

**Konzeption und Realisierung eines Antriebssystems
für ein elektrisches Longboard**
“MotherBoard”

Autor

DENNIS HUNTER

FACHBEREICH INGENIEURWISSENSCHAFTEN

STUDIENBEREICH ANGEWANDTE PHYSIK & MEDIZINTECHNIK

Datum: 28. Juli 2022

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	II
Abkürzungen	III
1 Einleitung	1
2 Konzeption	2
2.1 Funktionale Komponenten eines Longboards	2
2.2 Konstruktive Rahmenbedingungen	4
2.2.1 Bestehendes System	5
2.2.2 Einsatzumgebung und -bedingungen	6
2.3 Designziele	6
3 Theorie	8
4 Mechanik	9
5 Electronik	10
6 Evaluation	11
7 Zusammenfassung	12
8 Referenzen	13
Abbildungsverzeichnis	14
Tabellenverzeichnis	15
Literatur	17

Nomenklatur

a A letter

α Greek gibberish

Abkürzungen

BLDC	Brushless Direct Current
ESC	Electronic Speed Controller
PEV	Persönliches elektrisches Vehikel
PEKV	Persönliches elektrisches Kleinstvehikel
ePKW	Elektrischer Personenkraftwagen

1 Einleitung

Weltweit findet derzeit auf politischer wie gesellschaftlicher Ebene ein Umdenken im Transportwesen statt – sei es der Transport von Gütern, Fahrgästen oder im Individualverkehr. Angefeuert durch den unmittelbaren monetären Druck durch steigende Treibstoffpreise, die immer deutlicher werdenden Folgen fortdauernder CO₂-Emissionen aber auch Lebensqualität beeinflussende Faktoren wie Staus und abnehmende Luftqualität in urbanen Gebieten treibt eine wachsende Zahl Menschen aus Auto heraus auf alternative Transportmöglichkeiten. Neben der klassischen Möglichkeit des Fahrrades kam mit erheblichen Verbesserungen und der deutlich breiteren Verfügbarkeit der Lithiumbatterie-Technologie ein Wandel des gesellschaftlichen Lebens einher, wie es vergleichbar zuletzt geschah, als das Smartphone die Bühne der Welt betrat – die Elektrifizierung des Individualverkehrs. Nachdem einige Vorreiterstädte bereits früh mit baulichen Maßnahmen etwa durch Herabsetzen innerörtlicher Geschwindigkeitsbegrenzungen, Ausbau von Fahrradwegen oder Zuwachs öffentlicher Verkehrsmittel reagierten, ziehen nun immer mehr Städte nach. Dieser wechselseitige Trend bildet sich auch in der politischen Stimmung ab mit einer der wichtigsten Novellen für das öffentliche Verkehrsbild, die die „*Verordnung über die Teilnahme von Elektrokleinstfahrzeugen am Straßenverkehr und zur Änderung weiterer strassenverkehrsrechtlicher Vorschriften*“ von 2019 mit sich zog [1]. Sie leutete den Advent breit verfügbarer persönlicher elektrischer Kleinstvehikel (PEKV) zur Überbrückung der „letzten Meile“ ein.

Die Kategorie elektrifizierter persönlicher Fahrzeuge lässt sich grob unterteilen in elektrische Personenkraftwagen (ePKW), persönliche elektrische Vehikel (PEV) und – wie oben bereits erwähnt – die persönlichen elektrischen Kleinstvehikel in der kleinsten Variante. Zwar dominiert die erste Gruppe gegenwärtige politische Bemühungen zum Thema, gerade im städtischen Raum bieten sie jedoch kaum bis kein Potenzial, Infarkte des Straßenverkehrs zu vermeiden. Die Ladeinfrastruktur ist noch nicht einheitlich und flächendeckend geregelt und allem voran sind sie preislich für breite Teile der Bevölkerung unattraktiv. Vielversprechender sind Vertreter der beiden letztgenannten Gruppen. Dem Statistischen Bundesamt zufolge besaßen zu Jahresanfang 2020 etwa jeder neunte deutsche Haushalt oder 11,4 % zumindest ein elektrisch angetriebenes Fahrrad. Während sie Anfang 2015 mit ~ 4 % noch in etwa jedem 25. Haushalt aufzufinden waren kann hier eine Verbreitung um fast das Dreifache verzeichnet werden [3].

2 Konzeption

Um Konsistenz mit Literatur und Marktrecherchen sicherzustellen werden im Rahmen dieser Arbeit technische Begriffe aus der Skaterszene genutzt. Während *Skateboarding* einerseits keinesfalls als neuartiges Phänomen zu bezeichnen ist und andererseits in den vergangenen fünf Jahren eine Renaissance erlebt hat, kann nicht davon ausgegangen werden, dass alle Lesenden mit der Terminologie vertraut sind. Daher wird im Folgenden zunächst Fokus auf eine Begriffskonvention gelegt und in diesem Rahmen funktionale Kernkomponenten eines Skate- bzw. Longboards¹ erläutert.

Das Antriebssystem soll in ein bestehendes, übergeordnetes System bestehend aus mechanischen und elektronischen Komponenten eingebettet werden. Sowohl das übergeordnete System, als auch die Einsatzumgebung definieren konstruktive Einschränkungen, die in einem weiteren Unterkapitel herausgearbeitet werden sollen.

Zuletzt sollen vor dem Hintergrund der zuvor festgelegten Rahmenbedingungen Designziele definiert und erste Designideen konkretisiert werden. Unterstützt wird dies durch Markt- und Literaturrecherche.

2.1 Funktionale Komponenten eines Longboards

Historisch ergaben sich esoterische Namenskonventionen für Teilkomponenten von Skate- und Longboards. Während sie im einfachsten Fall unabhängig vom jeweiligen Sprachraum mit ihren jeweiligen englischen Begriffen zu finden sind, weichen Bezeichnungen Teilweise aber auch stark von in der Industrie verbreiteten Bezeichnungen ab. Um dieser Konvention zu folgen, sollen hier zunächst die Teilkomponenten kurz beschrieben werden.

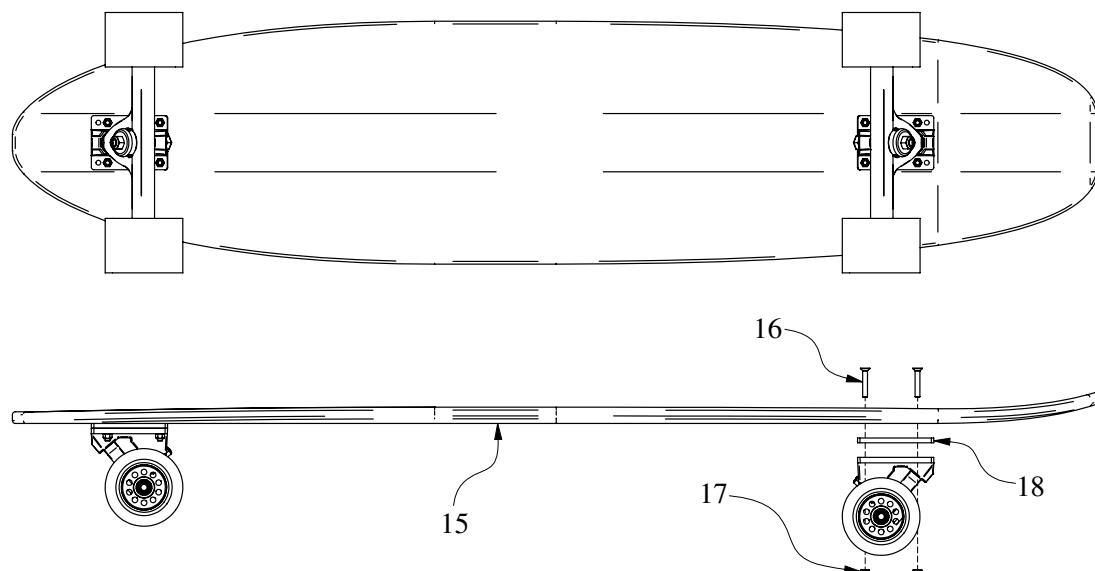


Abb. 2.1: Grundlegender Aufbau eines Longboards. 15 Deck, 16 Truck Bolts, 17 Truck Bolt Nuts, 18 Riser Pad.

Abbildung 2.1 zeigt zunächst den grundlegenden Aufbau eines Longboards. Erkennbar sind hier vorergründig das Deck (15), welches die fahrende Person trägt und hierbei einen Großteil der wirkenden Kräfte aufnehmen muss. Je nach Fahrstil werden weichere oder härtere Materialien gewünscht um etwa

¹Baulich zwar leicht zu unterscheiden, jedoch aus den gleichen Kernkomponenten und -funktionalitäten aufgebaut.

Unebenheiten des Untergrundes auszugleichen oder die Ausführung von Tricks² positiv zu beeinflussen. Meist kommt hier Schichtholz mit oder ohne eingearbeitetem Glas-, Aramid- oder Kohlefaserstoff zum Einsatz, es sind bisweilen aber auch exotischere Materialien wie Aluminium, ABS³ vertreten. In Abb. 2.1 befinden sich links und rechts, zentral entlang der Längsachse des Decks angeordnet die Trucks genannten Baugruppen zusammen mit jeweils zwei Rollen. Eine mechanisch belastbare Verbindung zum Deck wird durch *Truck Bolts* (16) und *Truck Bolt Nuts* (17) hergestellt. Im Longboarding üblicher, als bei den mit deutlich kleineren Rollen ausgestatteten Skateboards werden zwischen Deck und Truck häufig *Riser Pads* (18) eingesetzt. Hier handelt es sich um aus flexiblem Material verschiedener Härtegrade gefertigte Pufferplatten mit Doppelfunktion. Einerseits unterstützen sie die Entkopplung der Füße von Vibration und verhindern sogenannte *Wheel Bites* – ein Kontakt des Decks mit den Rollen während eines Lenkmanövers mit meist fataler Konsequenz.

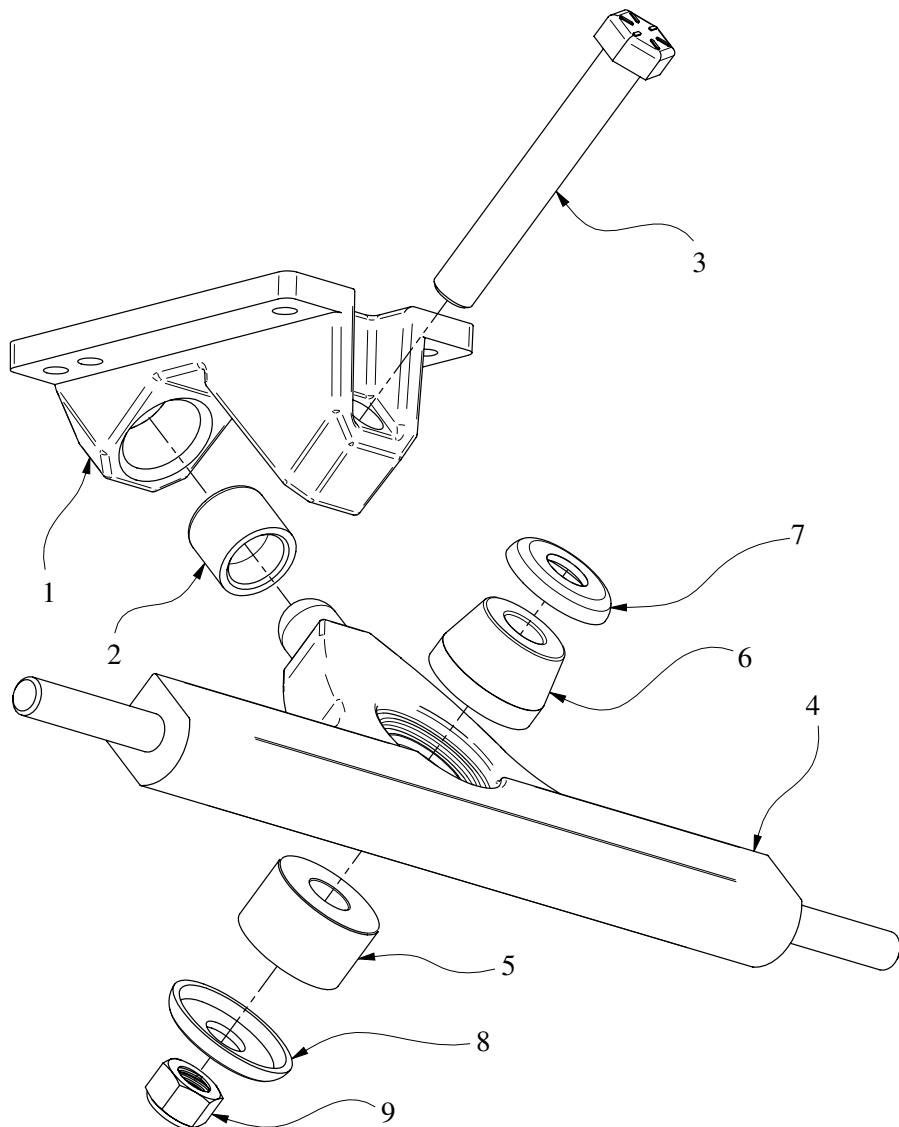


Abb. 2.2: Aufbau eines der Trucks als Explosionsansicht exemplarisch an einem CALIPER II. Sichtbar sind hier: 1 Baseplate, 2 Pivot Cup, 3 Kingpin, 4 Hanger, 5 RS Bushing, 6 BS Bushing, 7 BS Washer, 8 RS Washer, 9 Kingpin Nut.

Der Aufbau der Trucks selbst wird in Abb. 2.2 exemplarisch am Typ CALIPER II gezeigt. Der *Hanger* (4) bildet hier das zentrale Bauteil und muss den Großteil der wirkenden Kräfte aufnehmen. Er wird drehbar

²Über die rein laterale Fortbewegung hinausgehende, meist kunstvoll ausgeführte Bewegungen des Boards mit und unter den Füßen.

³Acrylnitrilbutadienstyrol.

in der *Baseplate* (1) gleitend gelagert. Würden der *Hanger* und die *Baseplate* in direkten Kontakt kommen, so käme es zu erhöhtem Abrieb und reduziertem Gleitverhalten. Hier wird ein meist aus POM⁴ gefertigter *Pivot Cup* (2) eingesetzt. In Position gehalten wird der *Hanger* mittels des *King Pins* (3) und der *Kingpin Nut* (9). Das Rückstellmoment nach Ende eines Lenkmanövers wird durch zwei vergleichsweise dicke Gummiringe – *Bushings* genannt – erzeugt, die mit der *Kingpin-Achse* koaxial beidseitig mit dem *Hanger* in mechanischem Kontakt stehen. Deckseitig befindet sich der *BS Bushing* (6), straßenseitig angeordnet der *RS Bushing*. Die Präfixe stehen für *Boardside* bzw. *Roadside* und spiegeln ihre Positionen wider. Unterschieden wird hier, da sich verschiedene Geometrien und Härtegrade der *Bushings* nicht unabhängig ihrer Position merklich auf das Fahrgefühl und Lenkvermögen auswirken können⁵. Um die Lasten besser auf die Oberfläche der *Bushings* zu verteilen werden üblicherweise tellerförmige Scheiben, die *RS* und *BS Washer* (5,6) auf den *Hanger* abgewandten Seite platziert.

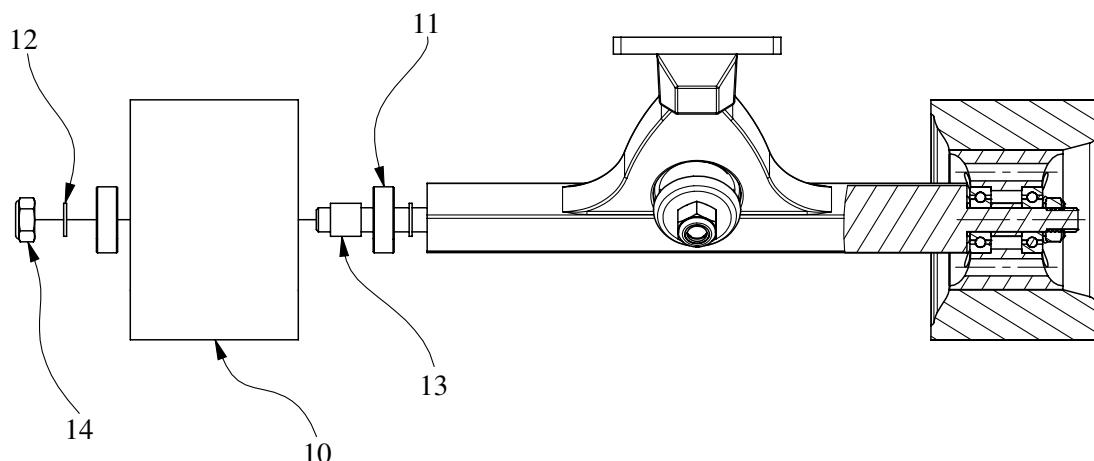


Abb. 2.3: Montage der Rollen an der Achse des Hangers. Links in explodierter und rechts in Schnittansicht. Zu sehen sind: 10 Rolle, 11 Kugellager, 12 Speedring, 13 Spacer, 14 Achsmutter.

Je nach gewünschter Laufruhe und in Abwägung zwischen Traktion und Rollwiderstand werden Rollen verschiedener Größen und Materialien drehbar auf den *Hanger-Achsen* gelagert. Mit Blick auf Abb. 2.3 wird Konzentrisch in den Kern der Rolle (10) – vergleichbar mit einer Felge, die das weichere Mantelmaterial trägt – beidseitig jeweils ein 608 Kugellager (11) platziert. Diese Kugellager sind Radialrillenkugellager und gebaut, um besonders gut radiale Kräfte aufnehmen und ableiten zu können. Um potenziell destruktive axiale Kräfte in Kurven oder durch das Anzugsmoment der Achsmutter (14) zu minimieren, wird, ebenfalls in den Kern der Rolle und ziwschen die beiden Lager, der *Spacer* (13) angeordnet. Er besteht aus hartem Metall, hat einen Innendurchmesser gleich des nominellen Durchmessers der *Hanger-Achse*, eine Wandstärke von ~ 1 mm und eine Länge, die gerade so gewählt ist, dass er an beiden Flanken mit den Innenringen der Lager in Kontakt steht, wenn sie beide vollständig im Kern eingelassen sind. Ein schleifffreies Laufen der Lager wird durch *Speedrings* (12) sichergestellt. Ihre Dimensionen entsprechen denen des *Spacers*, allerdings mit nur 1 mm eine deutlich geringere Länge. Letztlich wird alles mit einer *Achsmutter* auf der *Hanger-Achse* fixiert.

2.2 Konstruktive Rahmenbedingungen

Das Antriebssystem soll in ein bestehendes System aus Batterie, Batteriemanagement, Motorcontrollern und Deck integriert und die Einsatzbedingungen müssen berücksichtigt werden. Hieraus ergeben sich konstruktive Rahmenbedingungen, die bei der Planung berücksichtigt werden müssen.

⁴Polyoxymethylen.

⁵Durch Drehen der *Kingpin Nut* und damit einer Änderung der Vorspannung der *Bushings* kann hier auch im Feld relativ unkompliziert nachjustiert werden

2.2.1 Bestehendes System

Die Batterie besteht aus 40 Lithium-Ionen Zellen in 10S4P-Konfiguration vom Typ SAMSUNG INR18650-30Q mit einer nominellen Zellspannung von 3,6 V, einer Mindestzellentladekapazität von 2950 mAh und einem maximalen Entladestrom von 15 A (vgl. Tabelle 2.1 und [4]). 10S4P meint hier jeweils vier Zellen

Tab. 2.1: Zellspezifikationen SAMSUNG INR18650-30Q [4].

Charakteristik	Spezifikationen
Minimale Entladekapazität	2950 mAh
Nominelle Zellspannung	3,6 V
Standard Ladebedingungen	CC/CV, 1,5 A, $(4,20 \pm 0,05)$ V
Maximale Ladebedingungen	CC/CV, 4 A, $(4,20 \pm 0,05)$ V
Maximaler Dauerentladestrom	15 A bei 25 °C
Minimale Zellspannung	2,5 V
Gewicht	48 g
Betriebstemperatur	Laden: 0 °C bis 50 °C, Entladen: -20 °C bis 75 °C

parallel geschaltet mit 10 jener Sub-Zellen in Reihe (vgl. hierzu Abb. 2.4). So ergibt sich eine nominelle Spannung der Batterie von 36 V, eine Kapazität von 11,8 Ah und eine abrufbare Leistung von ~ 425 Wh bei einem maximalen Dauerentladestrom von 60 A.

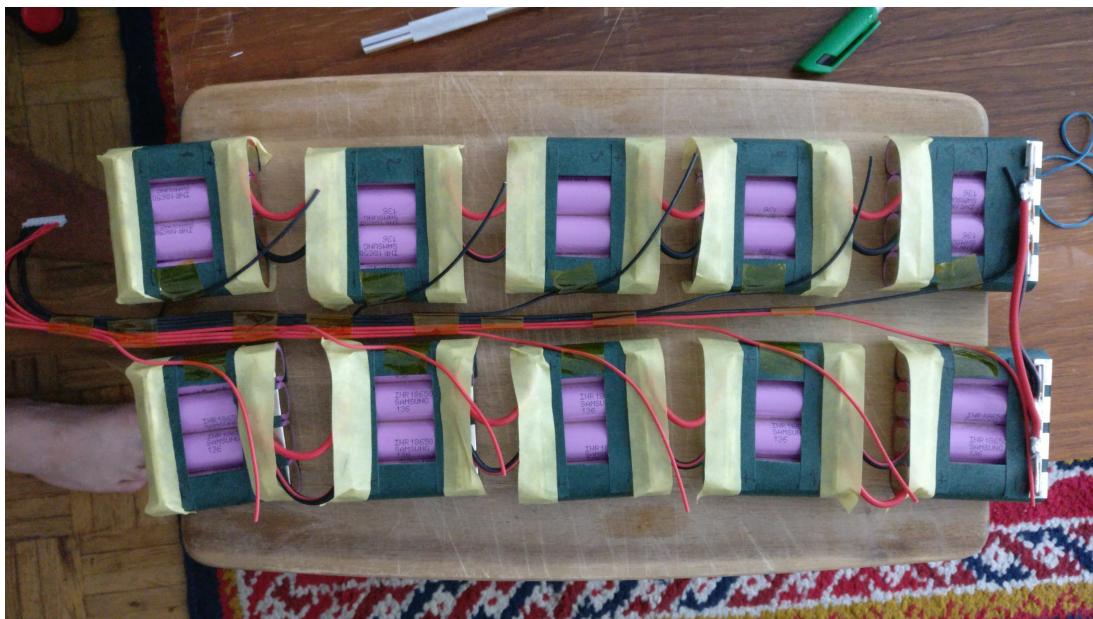


Abb. 2.4: Der verbaute Lithium-Ionen Zellverband. Zu erkennen sind die 10 Sub-Zellen bestehend aus jeweils vier Einzelzellen.

Das Drehmoment soll durch Elektromotoren erzeugt werden, die von zwei *Elektronischen Speed Controllern* (ESC) des Typs FSESC 4.12⁶ angesteuert werden. ESC sind elektronische Komponenten vornehmlich zur elektronischen Kommutation von bürstenlosen Gleichstrommotoren (*Brushless Direct Current*, BLDC). Als solche schränken sie die Auswahl der Motortypen zwar nicht exklusiv auf BLDCs ein – Gleichstrommotoren mit Schleifkontakt sind auch denkbar – allerdings bieten sie in Kombination mit BLDCs einen deutlich höheren Funktionsumfang. Darüber hinaus sind BLDC gegenüber Gleichstrommotoren mit Schleifkontakteffizienter, bieten eine höhere Leistungsdichte und sind bauartbedingt unempfindlich gegenüber Nässe⁷.

⁶Die wiederum industriell gefertigte 1:1 Nachbauten des populären VESC von Benjamin Vedder sind.

⁷Je nach Art der Lagerung. Dies betrifft jedoch ausschließlich die mechanischen Komponenten der Motoren.



Abb. 2.5: Unten im Bild die beiden eingesetzten ESC vom Typ FSESC 4.12. Weiterhin im Bild zu sehen oben links ein HC-06 Bluetooth Modul, darunter das Batteriemanagementsystem. Auf der rechten Seite im Bild von links nach rechts: Spannungsregler, elektronischer Schalter und der Funkempfänger für die Steuersignale.

2.2.2 Einsatzumgebung und -bedingungen

Das Gewicht des Fahrers wird inklusive Kleidung und transportiertem Gepäck mit 90 kg angenommen. Hinzu zu addieren sind ~ 5 kg durch Deck, Batterie und Elektronik und pessimistisch geschätzte weitere 5 kg durch die beiden Trucks zusammen mit dem Antriebssystem. So ergibt sich ein geschätztes, vom Antriebssystem zu beschleunigendes Gesamtgewicht von ~ 100 kg

Weiter soll die fertige Maschine auf in urbanen Gebieten üblichen Untergründen betrieben werden können. Es wird also mit leichten bis moderaten Steigungen und Asphalt in Form des Bodenbelages gerechnet.

Die Maschine soll vorrangig als Sportgerät für milde bis sonnige Wetterlagen gedacht werden. Extrembedingungen wie Starkregen, Schnee oder Eisglätte finden hier also keine weitere Beachtung.

2.3 Designziele

Mit in den obigen Kapiteln genannten Einschränkungen können einige Soll-Forderungen formuliert werden. So muss das System...

- ... in der Lage sein mindestens das angenommene Gesamtgewicht von 100 kg moderate Steigungen hinauf befördern zu können. Als Designrichtlinie wird hier eine Steigung von 5 % festgelegt.
- ... auf ebenem Asphalt auf mindestens $25 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ beschleunigen können. In Kombination mit obiger Forderung wird hier auf das Festlegen eines Zeitintervalls, innerhalb dessen die Endgeschwindigkeit erreicht werden soll, verzichtet.
- ... einfach zu Warten sein.

Neben den harten Zielen ist wünschenswert, dass das System...

- ... möglichst aus selbst herstellbaren Komponenten besteht.
- ... kostengünstig ist. Als Richtwert soll hier 300 EUR angelegt werden.

- ... die von der Batterie zur Verfügung gestellte Leistung von 425 Wh bezogen auf die erreichbare Reichweite möglichst effizient nutzt.

3 Theorie

Die mechanische Gesamtleistung, die vom System auf den Boden übertragen werden muss ist die Summe unterschiedlicher Einzelfaktoren. Neben der erforderlichen Leistung, um die träge Masse von Maschine und Pilot aus dem Stand auf eine gewünschte Geschwindigkeit zu beschleunigen müssen zusätzliche Reserven zur Verfügung stehen, um mechanische Verluste wie Rollwiderstand zum Untergrund, bei höheren Geschwindigkeiten zunehmend aerodynamische Effekte oder Hangabtriebskräfte während des Befahrens von Steigungen überwinden zu können.

Der Rollwiderstand wird beschrieben durch:

$$F_{Roll} = mg \cdot c_{Roll} \quad (3.1)$$

Die Hangabtriebskraft mit dem Neigungswinkel θ ist gegeben durch:

$$F_{Hang} = mg \cdot \sin(\theta) \quad (3.2)$$

Die durch Luftreibung verursachte Kraft errechnet sich aus:

$$F_{Luft} = \frac{1}{2} \rho A c_{Luft} v^2 \quad (3.3)$$

Darüber hinaus sind elektrische Verluste etwa im Serienwiderstand der Batterie, bei der Kommutation und bei der Ummagnetisierung der Phasenwicklungen zu berücksichtigen. Da diese im Einzelnen jedoch nur schwer quantifiziert werden können, sollen sie sich im Wirkungsgrad η , der das Verhältnis aus abgerufener elektrischer Leistung zu umgesetzter mechanischer Leistung bildet, widerspiegeln.

Die Drehmomentkonstante K_T eines BLDC berechnet sich aus der reziproken Drehzahlkonstante K_V korrigiert um den Umrechnungsfaktor $\frac{60}{2\pi}$ und trägt die Einheit $\frac{\text{Nm}}{\text{A}}$. Der Umrechnungsfaktor trägt der Tatsache Rechnung, dass die Drehzahlkonstante üblicherweise in $\frac{1}{\text{min}}$ und nicht in $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$ angegeben wird.

$$K_T = \frac{60}{2\pi K_V} \quad (3.4)$$

Die mechanische Untersetzung sei:

$$\zeta = \frac{N_{rolle}}{N_{Motor}} \quad (3.5)$$

Das vom System erzeugte, verlustfreie Drehmoment errechnet sich mit:

$$T = K_T \cdot I_{Motor} \cdot \zeta \quad (3.6)$$

Die theoretische Maximalgeschwindigkeit unter Vernachlässigung von elektrischen und thermischen Verlusten ergibt sich zu:

$$v = K_V \cdot U_{Bat} \cdot \frac{2\pi}{\zeta 60} \cdot r_{Rolle} \quad (3.7)$$

4 Mechanik

Wie in Abschnitt 2.2 besprochen beschränkt sich die Auswahl möglicher Antriebselemente praktischerweise auf BLDC-Motoren. BLDC-Motoren sind auf dem Markt als *Inrunner* und *Outrunner* erhältlich. In ersteren sind die Statorwicklungen an der Außenseite angeordnet, zweitere ordnen sie an der Innenseite an. Das Funktionsprinzip bleibt so zwar unverändert, durch den vergrößerten Radius des Angriffspunk-

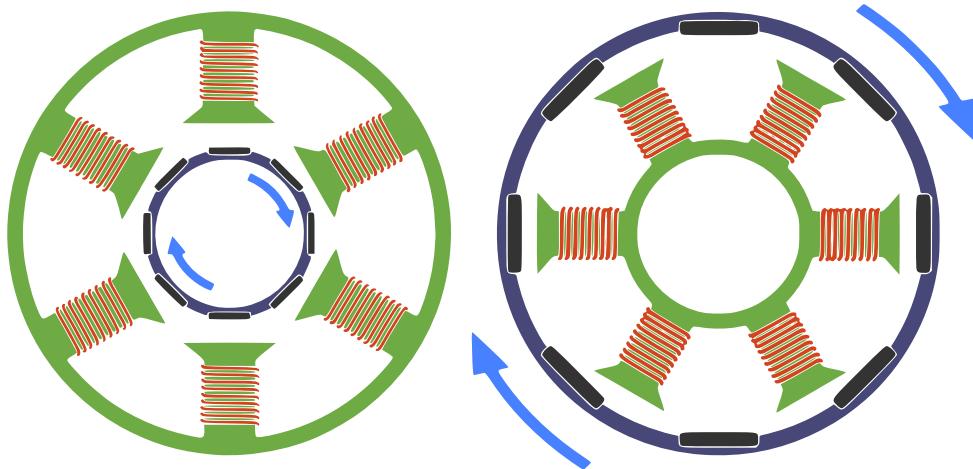


Abb. 4.1: Schematische Gegenüberstellung von BLDC-Motoren als Inrunner (links) bzw. Outrunner (rechts) ausgeführt [2].

tes der magnetischen Kopplung kann bei gleicher Baugröße und gleichem Phasenstrom ein höheres Drehmoment erzeugt werden. Sind größere Drehzahlen gefordert, so ist die Bauweise des Inrunners durch den reduzierten Durchmesser des Rotors vorteilhaft. Da hohe Drehzahlen gegenüber einem zu erzeugenden Drehmoment für das zu konstruierende Antriebssystem von untergeordneter Priorität sind und sich oberhalb eines Schwellwertes sogar kontraproduktiv auswirken können fällt hier die Wahl auf das Outrunnerprinzip.

Auch während Lenkmanövern muss eine Übertragung des Drehmomentes auf die Rollen der Trucks sichergestellt sein. Praktikabel und mit einfachen Mitteln denkbar sind hier eine koaxiale Positionierung des Motors mit der angetriebenen Rolle. Der Motor kann hier unter eines Offsets weiter im Zentrum des Hangers platziert werden, setzt in dem Fall jedoch eine Hohlwelle zwingend vorraus. Eine weitere Option bildet die Positionierung des Motors in der Rolle selbst. So bildet das rotierende Gehäuse des Motors selbst die Rolle. Ein Vorteil dieser Variante ist einfache Marktverfügbarkeit und deutliche Reduktion mechanischer Komplexität. Nachteilig sind hier im Vergleich deutlich erhöhte Preise, weniger Auswahl und schlechtere Wartungsmöglichkeiten.

Letztlich kann die Motorachse parallel zur Achse der Rollen positioniert werden. Da diese Lösungsvariante die geringsten Anforderungen an die Bauweise der Motoren stellt, sind hier Motoren sehr günstig und in großer Vielfalt am Markt verfügbar. Dem gegenüber steht ein höherer Komplexitätsgrad zur mechanischen Kopplung des Drehmomentes der Motorachse mit den Rollen.

5 Electronik

6 Evaluation

7 Zusammenfassung

8 Referenzen

Abbildungsverzeichnis

2.1	Grundlegender Aufbau eines Longboards	2
2.2	Explosionsansicht eines der Trucks	3
2.3	Montage der Rollen an der Achse des Hanger	4
2.4	Der verbaute Lithium-Ionen Zellverband	5
2.5	Eingesetzte ESC	6
4.1	Gegenüberstellung von Inrunner und Outrunner	9

Tabellenverzeichnis

2.1 Zellspezifikationen SAMSUNG INR18650-30Q	5
--------------------------------------------------------	---

Anhang

Literatur

- [1] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. *Bundesgesetzblatt*. Hrsg. von Bundesanzeiger Verlag. 14.06.2019. URL: https://www.bgb1.de/xaver/bgb1/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGB1&jumpTo=bgb119s0753.pdf (besucht am 17.07.2022).
- [2] Emrik Joner. *How Brushless Motors Work and How to Test Them*. Hrsg. von Tyto Robotics Inc. 2021-08-19. URL: <https://www.tytorobotics.com/blogs/articles/how-brushless-motors-work> (besucht am 28.07.2022).
- [3] Statistisches Bundesamt. *Zahl der Haushalte mit E-Bikes hat sich seit 2015 fast verdreifacht*. Pressemitteilung Nr. 375 vom 28. September 2020. 2020-09-28. URL: https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2020/09/PD20_375_639.html (besucht am 23.07.2022).
- [4] Wan-Mook, Lim. *SPECIFICATION OF PRODUCT. Lithium-ion rechargeable cell for power tools Model name : INR18650-30Q*. Hrsg. von Samsung SDI Co., Ltd., Energy Business Division. Version v1.0. 2022-02-02. URL: <https://eu.nkon.nl/sk/k/30q-specs.pdf> (besucht am 26.07.2022).