



# Bau eines voll funktionsfähiges, individuell angepasstem E-Bike

## STUDIENARBEIT

für die Prüfung zum  
Bachelor of Science  
des Studienganges Informatik / Informationstechnik

an der  
Dualen Hochschule Baden-Württemberg Karlsruhe  
von  
**Lorenz Scherrer**

Abgabedatum 20. Mai 2024

|                               |                             |
|-------------------------------|-----------------------------|
| Bearbeitungszeitraum          | 6 Monate                    |
| Matrikelnummer                | 8809469                     |
| Kurs                          | tinf21b3                    |
| Ausbildungsfirma              | Sick AG                     |
| Gutachter der Studienakademie | Waldkirch<br>Stefan Lehmann |

## **Erklärung**

Ich versichere hiermit, dass ich meine Studienarbeit mit dem Thema: »Bau eines voll funktionsfähiges, individuell angepasstem E-Bike« selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Ich versichere zudem, dass die eingereichte elektronische Fassung mit der gedruckten Fassung übereinstimmt. \_\_\_\_\_

---

Ort      Datum

Unterschrift

# Inhaltsverzeichnis

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1 Einleitung</b>   | <b>2</b>  |
| <b>2 Batterie</b>   | <b>5</b>  |
| 2.1 Zellen . . . . .  | 6         |
| 2.1.1 Art der Zellen . . . . .                              | 6         |
| 2.1.2 Wahl der Marke . . . . .                              | 7         |
| 2.2 Battery Management Systems . . . . .                    | 8         |
| 2.3 Verbindung zwischen den Zellen . . . . .                | 9         |
| 2.3.1 Löten vs. Punktscheißen . . . . .                     | 10        |
| 2.4 Punktschweißgerät . . . . .                             | 12        |
| 2.4.1 Funktionsweise des Punktschweißens . . . . .          | 12        |
| 2.4.2 Erforderlicher Strom für das Punktschweißen . . . . . | 12        |
| 2.5 Konstruktion der Batterie . . . . .                     | 14        |
| <b>3 Motor</b>  | <b>15</b> |
| 3.1 Arten von Fahrradmotoren . . . . .                      | 15        |
| 3.1.1 Energierückgewinnung . . . . .                        | 20        |
| 3.2 Position des Motors . . . . .                           | 20        |
| 3.3 Leistung des Motors . . . . .                           | 21        |
| 3.4 Reichweite . . . . .                                    | 22        |
| <b>4 Controller</b>   | <b>23</b> |
| 4.1 Controller Parameter . . . . .                          | 23        |
| 4.2 Funktionsweise eines Controllers . . . . .              | 24        |
| 4.3 Installation des Controllers . . . . .                  | 24        |
| <b>5 Steuergerät</b>  | <b>27</b> |
| 5.1 Umsetzung des Steuergeräts . . . . .                    | 27        |
| 5.2 Gründe für ein Steuergerät . . . . .                    | 27        |
| 5.3 Wahl des Steuergeräts . . . . .                         | 28        |
| 5.4 Konfiguration des Steuergeräts . . . . .                | 29        |
| 5.5 Allgemeine Grundeinstellungen . . . . .                 | 29        |
| 5.6 P-Parameter-Einstellung . . . . .                       | 29        |
| 5.7 C-Parameter-Einstellung . . . . .                       | 30        |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>6 Fahrdynamik</b>                   | <b>31</b> |
| 6.1 Schaltung . . . . .                | 31        |
| 6.2 Fahrgefühl . . . . .               | 33        |
| <b>7 Konstruktion</b>                  | <b>34</b> |
| 7.1 Position der Batterie . . . . .    | 34        |
| 7.2 Position des Controllers . . . . . | 34        |
| 7.3 Anbringen des Motors . . . . .     | 34        |
| <b>8 Fazit</b>                         | <b>35</b> |
| <b>Anhang</b>                          | <b>36</b> |
| <b>Index</b>                           | <b>38</b> |
| <b>Literaturverzeichnis</b>            | <b>38</b> |

# Abbildungsverzeichnis

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 1.1 | Elementare Komponenten eines E-Bike und Schwerpunkte der Studienarbeit. . . . .  | 3  |
| 1.2 | Zusammenspiel der E-Bike Komponenten . . . . .   | 4  |
| 2.1 | 1850 VS 21700[ <b>Tritek.12132021</b> ] . . . . .  | 6  |
| 2.2 | Schaltplan[LORENZ SCHERRER 2023] . . . . .   | 9  |
| 2.3 | Fassung für 18650 Batterie[ <b>.02.03.2024</b> ] . . . . .   | 11 |
| 2.4 | Punktgeschweißte Verbindung[ <b>LorenzScherrer.02.03.2024</b> ] . . . . .  | 11 |
| 2.5 | Verbindung Löten[ <b>LorenzScherrer.02.03.2024</b> ] . . . . .   | 12 |
| 3.1 | Motorenarten[ <i>E-Bike Motoren – Die E-Bike Motorarten im Überblick o.D.</i> ] . . . . .  | 15 |
| 3.2 | Mittelmotor[ <i>Mittelmotor nachrüsten: Fahrrad zum Elektrofahrrad umbauen / Pedelec &amp; E-Bike Umbausätze: Warum sich Nachrüsten lohnt! / ebike-solutions.com o.D.</i> ] . . . . .  | 17 |
| 3.3 | Radnabenmotor[LORENZ SCHERRER 2023] . . . . .  | 18 |
| 3.4 | Rotor und Stator[INGENIEURSMENTALITÄT 2022] . . . . .  | 19 |
| 3.5 | DLRK-Wicklung[INGENIEURSMENTALITÄT 2022] . . . . .   | 19 |
| 4.1 | Controller Parameter[LORENZ SCHERRER 2023] . . . . .   | 24 |
| 4.2 | Funktionsweise eines Controllers [ <i>28.22€ /Elektrische Bike Display KT LCD4 E bike LCD Display 36V 48V Ebike Computer für E Bike Kunteng controller SM oder Wasserdichten Stecker/E-Bike Zubehör/ - AliExpress o.D.</i> ] . . . . . | 25 |
| 4.3 | Anschlüsse des Controllers[ <i>22.48€ 33% OFF/KT controller 24V 36V 48V ebike controller 500W 750W 1000W 1500W 350W mit KT LCD5 LCD4 LCD3 display für Elektrische Fahrrad/E-Bike Zubehör/ - AliExpress o.D.</i> ] . . . . .            | 26 |
| 5.1 | KT LCD4[ <i>28.22€ /Elektrische Bike Display KT LCD4 E bike LCD Display 36V 48V Ebike Computer für E Bike Kunteng controller SM oder Wasserdichten Stecker/E-Bike Zubehör/ - AliExpress o.D.</i> ] . . . . .                           | 29 |
| 6.1 | Fahrradschalung[ <i>Schaltung beim Fahrrad / LEIFIphysik o.D.</i> ] . . . . .  | 31 |
| 6.2 | Fahrradschaltung[ <i>Traditional Thread-on Freewheels o.D.</i> ] . . . . .   | 32 |
| 6.3 | Fahrradschaltung[ <i>Schaltung beim Fahrrad / LEIFIphysik o.D.</i> ] . . . . .   | 32 |
| 6.4 | Fahrradschaltung[ <i>4.23€ /Fahrrad Fahrrad Schwungrad Freilauf 1 Single Speed 12tbmx Fahrrad Freilauf rad Nickel Chrom Molybdän Stahl/ - AliExpress o.D.</i> ] . .  | 32 |
| 1   | Schaltplan[LORENZ SCHERRER 2023] . . . . .   | 37 |
| 2   | sw900[LORENZ SCHERRER 2023] . . . . .  | 38 |

# Kapitel 1

## Einleitung

Die Implementierung von E-Bikes hat in den vergangenen Jahren eine bemerkenswerte Entwicklung erfahren, die nicht nur das Mobilitätsverhalten beeinflusst hat, sondern auch neue Perspektiven für nachhaltige Fortbewegung eröffnet hat. Angesichts der drängenden Herausforderungen der Verkehrswende erweisen sich E-Bikes als vielversprechende Alternative zu herkömmlichen Verkehrsmitteln.

Um ein fundiertes Verständnis dieses Fachgebiets zu erlangen und ein individuell angepasstes und voll funktionsfähiges E-Bike zu entwickeln, wurde dieses Thema als Gegenstand meiner Studienarbeit gewählt. Die Studie zielt darauf ab, die verschiedenen Aspekte der E-Bike-Technologie zu erforschen und eine maßgeschneiderte Lösung zu entwickeln, die den individuellen Bedürfnissen und Anforderungen gerecht wird.

Die Komplexität der verschiedenen Komponenten eines E-Bikes erfordert eine gründliche Analyse und Planung. Besondere Herausforderungen ergeben sich beispielsweise bei der Integration von selbstgebauten Batterien in maßgeschneiderte E-Bikes. Diese Batterien müssen nicht nur den Energiebedarf des E-Bike-Motors effizient decken, sondern auch den hohen Sicherheits- und Zuverlässigkeitssstandards entsprechen.

Das erwartete Ergebnis dieser Studienarbeit ist ein voll funktionsfähiges, selbstgebautes E-Bike, das den individuellen Anforderungen und Vorlieben des Fahrers entspricht. Durch eine gründliche Analyse und Implementierung aller relevanten Komponenten wird angestrebt, ein E-Bike zu entwickeln, das nicht nur effizient und zuverlässig ist, sondern auch einen Beitrag zur Mobilität leistet.

Angesichts der Vielzahl an Komponenten, aus denen ein E-Bike besteht, wurden für die Untersuchungen, das Design und die Implementierung folgende Schwerpunkte festgelegt:

- **Batterie:** Auswahl einer geeigneten Zelle mit der erforderlichen Kapazität und Leistung. Konfektionierung und Implementierung der Batterie
- **Batteriemanagement:** Auswahl eines effizienten Systems zur Überwachung und Steuerung der Batterie, um ihre Lebensdauer zu maximieren
- Auswahl eines **Antriebs:** Auswahl eines Front-/Hecknabenmotor oder Mittelmotor der mit der Batterie und dem Fahrradrahmen eingesetzt werden kann

- **Elektrischer Steuerung (Controllers):** Selektion und Programmierung einer elektronischen Steuereinheit, die eine präzise Kontrolle über den Motor und die Unterstützungsstufen ermöglicht
- **Zusammenspiel der elektrischen und mechanischen E-Bike-Komponenten:** Integration und Abstimmung aller elektrischen und mechanischen Teile, um ein reibungsloses Funktionieren des E-Bikes zu gewährleisten 1.1

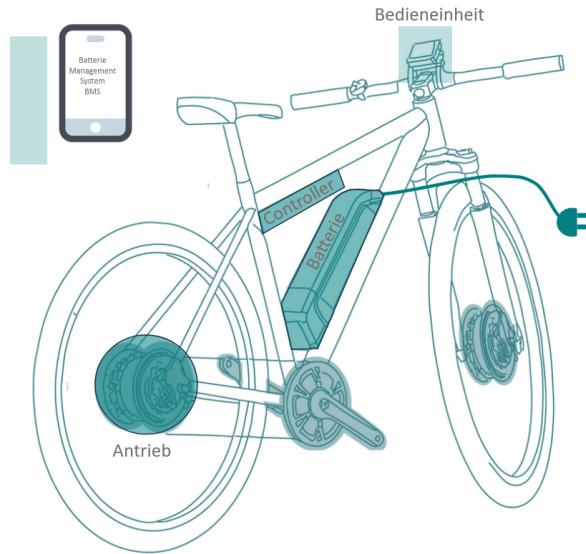


Abbildung 1.1: Elementare Komponenten eines E-Bike und Schwerpunkte der Studienarbeit.

Bezogen auf die Zielsetzung sind verschiedene Ansätze und Vorgehensweisen zu untersuchen. Durch die vielen Abhängigkeiten zwischen den elektrischen und mechanischen Komponenten eines E-Bikes ist die strukturierte Vorgehensweise und Iterationen bei der Lösungsfindung ein entscheidender Erfolgsfaktor. Folgende Fragestellung sind zu bearbeiten und daraus Ableitungen zu treffen 1.2:

Diese wesentlichen Komponenten arbeiten zusammen, um ein E-Bike zu bilden, das dem Fahrer elektrische Unterstützung beim Treten bietet und das Fahren erleichtert.

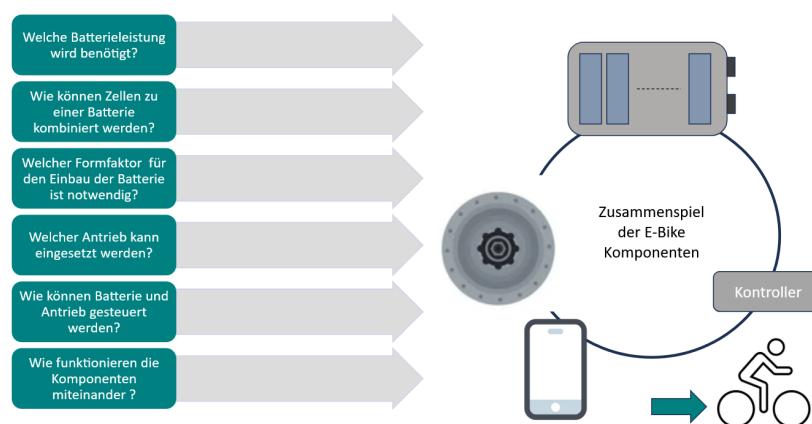


Abbildung 1.2: Zusammenspiel der E-Bike Komponenten

## Kapitel 2

# Batterie

Die Kernkomponente dieser Arbeit wird der Bau der Batterie sein, die den Motor des E-Bikes antreiben wird. Hierbei werde ich größere Lithium-Ionen-Zellen verwenden und diese in einer geeigneten Konfiguration zusammenschließen, um die benötigte Spannung und Kapazität zu erreichen. Zudem wird ein Smart Battery Management System (BMS) eingesetzt, um die Sicherheit und Effizienz der Batterie zu gewährleisten.

Des Weiteren liegt im Fokus die Programmierung des Controllers. Ich will die Motordaten und die Leistung flexibel anpassen, um das E-Bike sowohl Straßen tauglich zu machen (maximale Leistung 250W), als auch zu testen, welche Leistung ein 1500W Motor erreicht (bringt) (auf einem Privatgrundstück).

Eine essenzielle Komponente bei der Realisierung eines individuell konstruierten E-Bikes ist die Batterie, welche den Motor mit der benötigten Energie versorgt. Im vorliegenden Abschnitt wird detailliert auf die Fertigung einer individuellen Lithium-Ionen-Batterie eingegangen, die durch die Auswahl passenden Zellen und ihre spezifische Konfiguration realisiert wird.

Die Batterie muss den spezifizierten Anforderungen hinsichtlich Leistung, Form und Stabilität entsprechen. In Bezug auf die Leistung ist eine Spannung von 48 Volt erforderlich, um den Motor zu versorgen. Damit die gewünschte Leistung gewährleistet wird, muss die Batterie eine Leistung von 1500 Watt bereitstellen. Eine Berechnung erfolgt mit dieser Formel 2.1:

$$P = U \cdot I \longrightarrow I = \frac{P}{U} = \frac{1500W}{48V} = 31.25 \quad (2.1)$$

Die Batterie sollte nicht nur die erforderliche Leistung liefern, sondern auch eine stabile und sichere Form aufweisen. Die physikalische Stabilität der Batterie ist entscheidend, um sicherzustellen, dass sie den Belastungen während des Betriebs standhält und keine strukturellen Schwächen aufweist.

Darüber hinaus ist die Form der Batterie relevant, da sie in das E-Bike integriert werden muss. Die Form sollte daher kompatibel mit dem vorgesehenen Platzierungsort sein, um eine effiziente Nutzung des verfügbaren Raums zu ermöglichen. Damit eine optimale Integration in das Gesamtsystem gewährleistet ist, ist eine leichte und sichere Befestigung des Akkus im vorgesehenen Bereich erforderlich. Die Konstruktion der Batterie stellt einen maßgeblichen Schritt

im Bau eines selbst gefertigten E-Bikes dar, da sie maßgeblich die Leistung und Reichweite des Fahrzeugs beeinflusst.

## 2.1 Zellen

Die Zellen in einer Lithium-Ionen-Batterie für E-Bikes spielen eine entscheidende Rolle bei der Speicherung und Bereitstellung elektrischer Energie. Jede Zelle fungiert als eigenständige Energieeinheit, welche miteinander kombiniert wird, um die gewünschte Spannung und Kapazität für den E-Bike-Motor zu erreichen. Ihre Aufgaben umfassen die Speicherung von Elektronen während des Ladevorgangs und die Abgabe dieser Elektronen während des Entladevorgangs, um den Motor mit Strom zu versorgen.

Die Zellen werden in der Batterie durch spezifische Verbindungsmethoden miteinander verbunden. Die Verbindung erfolgt durch das serielle Schalten der Zellen, wodurch die Einzelspannungen addiert werden. Dieser Schritt ermöglicht es, die für den E-Bike-Motor erforderliche höhere Gesamtspannung von 48 Volt zu erreichen. Wie viele Zellen in Reihe geschaltet werden müssen um auf 48V zukommen, wird hier berechnet: 2.4

Die Entscheidung, Zellen in Serie oder parallel zu schalten, beeinflusst maßgeblich die Leistung und Charakteristik der Batterie. Die Reihenschaltung erhöht die Gesamtspannung, während die Parallelschaltung die Gesamtkapazität steigert. Dadurch wird eine direkte Auswirkung auf die Leistungsfähigkeit des E-Bikes erzielt.

### 2.1.1 Art der Zellen

Bei der Art der Zellen kommen nur zwei in Frage: einmal die 21700-Zellen und 18650-Zellen2.1.



Abbildung 2.1: 1850 VS 21700[Tritek.12132021]

Die Entscheidung zwischen 21700-Zellen und 18650-Zellen für die Batterie-Konstruktion von E-Bikes erfordert eine eingehende wissenschaftliche Analyse verschiedener Faktoren. Einer der entscheidenden Aspekte ist die energetische Leistung und Kapazität der Zellen. Die größeren Dimensionen der 21700-Zellen ermöglichen eine höhere Kapazität pro Zelle im Vergleich zu den kleineren 18650-Zellen, was zu einer potenziell höheren Energiedichte führt und somit die

Gesamtkapazität und Reichweite der Batterie positiv beeinflussen kann.

Die Verwendung von 21700-Zellen bietet eine Reihe von Vorteilen, die das Preis-Leistungs-Verhältnis im Vergleich zu 18650-Zellen verbessern. Zum einen sind 21700-Zellen aufgrund ihrer höheren Energiedichte kosteneffizienter, da sie eine größere Kapazität pro Zelle bieten. Dadurch werden weniger Zellen benötigt, um die gleiche Leistung zu erzielen und führt somit zu einer Einsparung sowohl beim Material als auch bei den Herstellungskosten. Zudem reduziert die Verwendung weniger Zellen das Risiko von Ausfällen und erfordert weniger Arbeitsaufwand für die Montage und Wartung.

Der wichtigste Grund liegt darin, dass durch die höhere Kapazität der 21700-Zellen weniger Zellen benötigt werden. Dies reduziert nicht nur den Arbeitsaufwand, sondern verringert auch die Ausfallwahrscheinlichkeit bei weniger Zellen. Im Zuge dieser Untersuchung wurde auch ein defekter Rasenmäher-Akku analysiert und auseinandergekommen. Dieser konnte die Leistung nicht mehr erbringen, da eine der 18650-Zellen ausgefallen war. Ein Bild des Rasenmäher-Akkus findet sich im Anhang??.

Zusammenfassend lässt sagen, dass die Verwendung von 21700-Zellen aufgrund ihrer potenziell höheren Kapazität, verbesserten Wärmeableitung und der Möglichkeit, von technologischen Fortschritten zu profitieren, für E-Bike-Batterien vorteilhaft sein könnte.

### 2.1.2 Wahl der Marke

Die beiden Zelltypen, Samsung und Lishen, unterscheiden sich in mehreren Schlüssel-Parametern, die bei der Entscheidung für die Batterie-Konstruktion eines E-Bikes berücksichtigt werden sollten.

Die Samsung-Zellen zeichnen sich durch eine höhere Kapazität von 4900 mAh aus, dies führt potenziell zu einer längeren Betriebsdauer des E-Bikes. Allerdings liegt der maximale Entladestrom bei 9,8 Amper pro Zelle und kann die Leistungsfähigkeit des Motors ebenso beeinflussen.

Im Gegensatz dazu bietet die Lishen-Zelle eine Kapazität von 4000mAh, dies ist etwas niedriger als Samsung. Allerdings ermöglicht sie einen höheren maximalen Entladestrom von 12 Amper pro Zelle. Ein zusätzlicher Vorteil könnte sein, dass die Lishen-Zellen preiswerter und somit eine wirtschaftliche Alternative darstellen.

In einer Batterie-Konfiguration für E-Bikes spielt die Anzahl der parallel geschalteten Zellen eine entscheidende Rolle für die Entladeleistung. Sind weniger Zellen parallel geschaltet, bedeutet dies, dass die Gesamtkapazität der Batterie reduziert ist. Um dennoch die erforderliche Leistung bereitzustellen, muss der Entladestrom pro Zelle erhöht werden. Es gibt auch Zellen, die einen Entladestrom von 35 Amper liefern.

Die Entscheidung zwischen diesen Zellen hängt von den spezifischen Anforderungen des E-Bike-Projekts ab. Wenn eine längere Reichweite und eine höhere Kapazität priorisiert werden, könnten die Samsung-Zellen die bessere Wahl sein. Wenn jedoch eine höhere Leistungsfähigkeit des Motors und ein wirtschaftlicher Preis im Vordergrund stehen, könnte die Lishen-Zelle die geeignete Option sein. Es ist ratsam, die Projektspezifikationen und das Budget sorgfältig zu

prüfen, um die optimale Zell-Wahl zu treffen.

Die Entscheidung fiel auf die Lishen-Zellen. Sie sind am billigsten und es können mehrere parallel geschaltet werden, damit eine höhere Kapazität erreicht werden kann. Entscheidend ist, dass der Akku genug Leistung zur Verfügung stellen kann.

Es werden 13 Zellen in Reihe geschaltet, um 48 Volt zu erreichen, 5 parallel für eine Kapazität von 20 Amperestunden und einen maximalen Entladestrom von 60 Amper. Hier ist die Berechnung: 2.4. Die Begründung, weshalb 5 parallel geschaltet werden, ist nachstehend zu sehen: 2

$$A_{\text{Batterie}} = 12A \cdot 5 = 60A \quad (2.2)$$

$$V_{\text{Batterie}} = 3.6V \cdot 13 = 46.8V \quad (2.3)$$

$$\text{Kapazität} = 4000mAh \cdot 5 = 20Ah \quad (2.4)$$

Hier sieht ist der Schaltplan einer solchen Batterie mit BMS:2.2

## 2.2 Battery Management Systems

Ein entscheidender Aspekt bei der Konstruktion von Lithium-Ionen-Batterien für E-Bikes ist die Wahl des richtigen Battery-Management-Systems (BMS). Dieser Abschnitt erläutert die Funktionen, den Auswahlprozess und die Entscheidungsgrundlagen für die Verwendung eines Balancing-BMS anstelle eines BMS, welches lediglich Überwachungsfunktionen bietet. Ein BMS ist ein elektronisches System, das die Leistung und Sicherheit von Lithium-Ionen-Batterien überwacht und regelt. In seiner Grundfunktion überwacht es Parameter wie Spannung, Strom, Temperatur und Ladezustand. Zudem bietet es Schutzmechanismen, um Überladung, Tiefentladung und Überhitzung zu verhindern.

Es gibt zwei Haupttypen von BMS: Solche, die lediglich Überwachungsfunktionen bereitstellen, und solche, die auch ein sogenanntes Balancing implementieren. Balancing bedeutet, dass das BMS aktiv eingreift, um sicherzustellen, dass alle Zellen in der Batterie während des Lade- und Entladevorgangs ähnliche Spannungen aufweisen.

Die Wahl eines Balancing-BMS für die E-Bike-Batteriekonstruktion basiert auf der Notwendigkeit einer gleichmäßigen Verteilung der Spannung über alle Zellen hinweg, um die Lebensdauer der Batterie zu verlängern und eine optimale Leistung zu gewährleisten. Im Gegensatz zu einem BMS mit ausschließlich Überwachungsfunktionen interveniert ein Balancing-BMS aktiv, um den Ladungsausgleich zwischen den Zellen sicherzustellen. Die Variation der Spannung zwischen den Zellen ist problematisch, da sie zu negativen Effekten wie ungleichmäßiger Entladung, Überladung und Tiefentladung führen kann. Eine ungleichmäßige Spannungsverteilung kann zu einer ungleichen Alterung der Zellen und vorzeitigem Versagen der Batterie führen. Durch das aktive Balancing wird vermieden, dass einzelne Zellen aufgrund unterschiedlicher Lade- und Entladezyklen eine Ungleichgewichtssituation erfahren, was die Batterielebensdauer verbessert und die Gesamtleistung des E-Bike-Akkus optimiert.

Die Entscheidung für ein Balancing-BMS wurde getroffen, um eine maximale homogene Spannungsverteilung zu gewährleisten und sicherzustellen, dass die Batterie effizient, leistungsstark sowie langfristig zuverlässig und haltbar ist. Hier folgt der Schaltplan der Batterie der mit Hilfe der gewonnenen Erkenntnisse erstellt wurde 2.2.

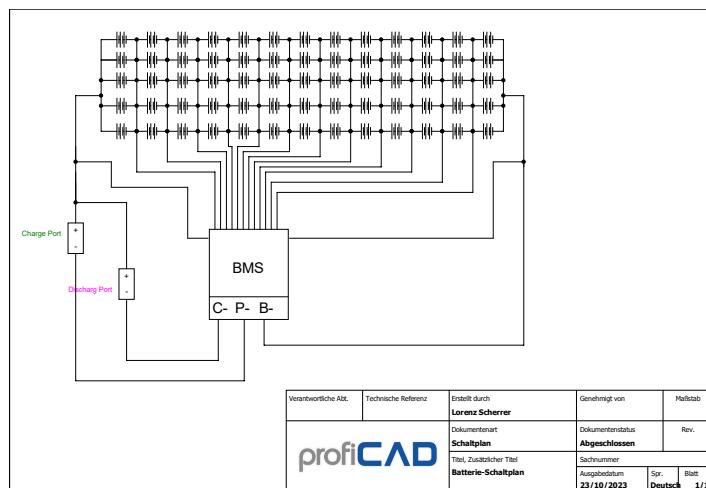


Abbildung 2.2: Schaltplan[LORENZ SCHERRER 2023]

Eine größere Version dieser Abbildung ist im Anhang zu finden.<sup>1</sup> Da LLT Power die besten BMS für den Anwendungsfall herstellen wurde sich für dieses BMS entschieden.

## 2.3 Verbindung zwischen den Zellen

Die Verbindung zwischen den Zellen in einer Batterie kann auf verschiedene Weisen hergestellt werden, wobei die gängigsten Methoden das Punktzuschweißen, das Löten und das Verschrauben sind. Jede Methode hat ihre eigenen Vor- und Nachteile, und die Auswahl hängt von den spezifischen Anforderungen des Batteriedesigns ab.

Beim Punktzuschweißen werden dünnere Drähte oder Metallstreifen direkt an bestimmte Punkte auf den Batteriezellen geschweißt. Dies geschieht durch kurze elektrische Impulse, die einen Punkt auf der Zelle schmelzen und den Draht oder Streifen daran befestigen.

Beim Löten wird ein Lötzinn verwendet, um die Verbindungen zwischen den Zellen und den Verbindungselementen herzustellen. Dies kann mit einem Lötkolben erfolgen, der das Lötzinn schmilzt und es an Ort und Stelle hält, wenn es abkühlt.

Diese Methode beinhaltet das Anbringen von Metallfassungen an den Enden der Batteriezellen, die dann miteinander verschraubt werden. Die Fassungen dienen als Anschlusspunkte für die Verbindungselemente.

### 2.3.1 Löten vs. Punktscheißen

Die Wahl der geeigneten Methode zur Verbindung von Batteriezellen ist entscheidend für die Leistung, Sicherheit und Mobilität eines E-Bike-Batteriesystems. Angesichts der spezifischen Anforderungen und Einschränkungen wurde die Entscheidung getroffen, nur Löten und Punktschweißen in Betracht zu ziehen, wobei die Methode der mechanischen Verbindung mit Fassungen ausgeschlossen wurde.

Die Methode der mechanischen Verbindung mit Fassungen wurde aus mehreren Gründen ausgeschlossen. Die schwere und kostspielige Natur dieser Methode erwies sich als unpraktisch für die Anzahl der Zellen in einer E-Bike-Batterie. Darüber hinaus war die mobile Verwendung des E-Bikes ein entscheidender Faktor, und eine zu komplexe mechanische Verbindung hätte die Tragbarkeit des Systems erheblich beeinträchtigt.<sup>2.3</sup>



Abbildung 2.3: Fassung für 18650 Batterie[**.02.03.2024**]

Nach Ausschluss der mechanischen Verbindung blieben Löten und Punktschweißen als die beiden geeigneten Optionen für die Verbindung der Batteriezellen. Obwohl beide Methoden ihre Vor- und Nachteile haben, wurde eine fundierte Entscheidung getroffen, um den spezifischen Anforderungen gerecht zu werden.<sup>2.4</sup>

Löten ist die kosteneffizientere Option mit dem geringern Beschaffungsaufwand, da es weniger spezielle Ausrüstung erfordert und leichter zugänglich ist. Die Einfachheit des Lötens ermöglichte eine effiziente Materialbeschaffung und eine schnellere Umsetzung. Obwohl Löten die Batterie durch die Wärmeentwicklung belasten kann und sie weniger stabil ist. Diese Vermutung muss durch einen Test geprüft werden, da die andere Option nicht ohne weiters zugänglich ist.<sup>2.5</sup>

Das Punktgeschweißt werden der Batteriezellen wurde als bevorzugte Methode ausgewählt, da Löten aufgrund seiner Instabilität und des erhöhten Platzbedarfs mechanisch weniger praktikabel



Abbildung 2.4: Punktgeschweißte Verbindung[LorenzScherrer.02.03.2024]



Abbildung 2.5: Verbindung Löten[LorenzScherrer.02.03.2024]

war. Die Auswahl der geeigneten Verbindungs methode für Batteriezellen ist von entscheidender Bedeutung für Leistung, Sicherheit und Mobilität eines E-Bike-Batteriesystems. Angesichts der spezifischen Anforderungen und Einschränkungen erwies sich das Punktgeschweißt werden als die effizienteste Lösung, während die mechanische Verbindung mit Fassungen aus mehreren Gründen ausgeschlossen wurde. Die komplexe Natur und der hohe Platzbedarf der mechanischen Verbindung wären unpraktisch für die Anzahl der Zellen gewesen und hätten die Tragbarkeit des Systems beeinträchtigt. Nachdem die mechanische Verbindung ausgeschlossen war, blieben Löten und Punktschweißen als die beiden geeigneten Optionen für die Verbindung der Batteriezellen. Löten erwies sich als kosteneffizienter, erforderte jedoch einen Test, um die Stabilität zu bestätigen. Punktschweißen hingegen bot eine Standardlösung mit hoher Stabilität und geringerer Wärmeentwicklung auf den Batterien. Insgesamt wurde das Punktgeschweißt werden aufgrund seiner Effizienz und Zuverlässigkeit als bevorzugte Methode für die Verbindung der Batteriezellen für das E-Bike-Batteriesystem gewählt.

## 2.4 Punktschweißgerät

Das Punktschweißen ist ein gängiges Widerstandsschweißverfahren, das zur Verbindung von einem Blech und einer Zelle ohne den Einsatz von Zusatzwerkstoffen verwendet wird. Dabei werden die zu verbindenden Werkstücke durch die Erzeugung von Wärme an der Kontaktstelle verschmolzen und zu einer festen Verbindung vereint. Das Funktionsprinzip des Punktschweißens beruht auf der Nutzung elektrischen Stroms, um die erforderliche Wärmeenergie zu erzeugen und die Werkstücke zu verbinden.

### 2.4.1 Funktionsweise des Punktschweißens

1. **Ausrichtung der Werkstücke:** Zunächst werden die zu schweißenden Bleche präzise zueinander ausgerichtet, da eine nachträgliche Korrektur schwierig ist.
2. **Anbringen und Aufpressen der Elektroden:** Zwei Elektroden, typischerweise aus Kupferlegierungen, werden auf die Oberflächen der Bleche aufgebracht und miteinander gepresst. Die Elektroden dienen dazu, den elektrischen Strom in die Schweißstelle zu leiten.
3. **Erhitzung und Verflüssigung:** Durch den elektrischen Strom, der zwischen den Elektroden fließt, entsteht an der Kontaktstelle der Bleche Wärme. Diese führt dazu, dass das Material lokal schmilzt und die Bleche miteinander verschweißt werden.
4. **Abkühlung und Erstarrung:** Nach Abschalten des Stroms erstarrt das geschmolzene Material und bildet eine feste Verbindung zwischen den Blechen. Der Druck der Elektroden wird während dieses Prozesses aufrechterhalten.

### 2.4.2 Erforderlicher Strom für das Punktschweißen

Der für das Punktschweißen benötigte Strom hängt von verschiedenen Faktoren ab, darunter die Materialien der Werkstücke, ihre Dicke und die gewünschte Schweißqualität. Typischerweise liegt die erforderliche Stromstärke im Bereich von mehreren Hundert bis Tausend Ampere.

Die hohe Stromstärke ist notwendig, um ausreichend Wärmeenergie an der Schweißstelle zu erzeugen und die Bleche lokal aufzuschmelzen. Niedrigere Ströme würden nicht genügend Wärme erzeugen, um die erforderliche Schmelztemperatur zu erreichen.

Insgesamt ist das Punktschweißen ein effizientes Verfahren zur Herstellung von festen Verbindungen zwischen Blechen. Es erfordert einen geeigneten elektrischen Strom, um die erforderliche Wärmeenergie zu erzeugen und die Werkstücke erfolgreich zu verschweißen.

## Transformator

Ein Transformator wird beim Punktschweißen verwendet, um die erforderliche Stromstärke und Spannung für den Schweißprozess bereitzustellen.

Ein Transformator ist ein elektrisches Gerät, das verwendet wird, um die Spannung von Wechselstrom (AC) zu ändern. Es besteht aus zwei Spulen, die eng miteinander gekoppelt sind, aber elektrisch isoliert voneinander sind. Diese Spulen sind als Primär- und Sekundärwicklung bekannt.

Das Funktionsprinzip eines Transformators basiert auf elektromagnetischer Induktion. Wenn Wechselstrom durch die Primärwicklung fließt, erzeugt er ein wechselndes Magnetfeld um die

Spule herum. Dieses Magnetfeld induziert eine Spannung in der Sekundärwicklung gemäß den Prinzipien der elektromagnetischen Induktion von Faraday.

Die Verhältnisse der Windungen in der Primär- und Sekundärwicklung bestimmen die resultierende Spannungsumwandlung. Wenn die Anzahl der Windungen in der Sekundärwicklung größer ist als die in der Primärwicklung, wird die Spannung im Verhältnis erhöht (Step-Up-Transformator). Wenn die Anzahl der Windungen in der Sekundärwicklung kleiner ist als die in der Primärwicklung, wird die Spannung im Verhältnis reduziert (Step-Down-Transformator).

Ein Mirkowelen-Transformator eignet sich sehr gut für den Bau eines Punktschweißgeräts.

Um herauszufinden, wie der sekundäre Block gewickelt werden muss, kann die Transformatorformel verwendet werden.<sup>2.8</sup>

Transformator Formel:

$$\frac{U_s}{U_p} = \frac{N_s}{N_p} \quad (2.5)$$

$$\frac{U_s}{U_p} \cdot N_p = N_s \quad (2.6)$$

$$\frac{I_s}{I_p} = \frac{N_p}{N_s} \quad (2.7)$$

$$\frac{I_p}{I_s} \cdot N_p = N_s = \frac{16A}{800A} \cdot 224 \approx 4.48 \quad (2.8)$$

$U_p$  : Spannung am primären Block

$U_s$  : Spannung am sekundären Block  $\approx 4V$

$I_p$  : Stromstärke am primären Block = 16A

$I_s$  : Stromstärke am sekundären Block

$N_p$  : Wicklungen primären Block =  $16 \cdot 14 = 224$

$N_s$  : Wicklungen sekundären Block

Jetzt muss der sekundäre Block entfernt werden um hin neu zu wickeln. <sup>2.8</sup>

Der Block muss auf einer Seite mit einer Stahlsäge durchtrennt werden und dann heraus geschlagen werden.

## 2.5 Konstruktion der Batterie

Es wurde beschlossen, die Zellen mit doppelseitigem Klebeband anstatt mit Heißkleber zu verbinden.

Anschließend wurden alle Zellen punktverschweißt, sowohl in Reihe als auch parallel geschaltet. Die Anschlüsse des Batteriemanagementsystems (BMS) wurden gemäß dem Blockschatzbild 1 an die jeweilige Zellreihe angeschlossen. Nach Abschluss dieser Schritte wurde das Batteriepack mit einer Umwicklung aus Katonasch und Kaptonband isoliert. Diese Maßnahme diente dazu, die Zellen vor äußeren Einflüssen zu schützen und potenzielle Kurzschlüsse zu vermeiden. Nach der Isolierung konnte das Batteriepack erfolgreich mit einem Ladegerät geladen werden.

# Kapitel 3

## Motor

Kapitel 5 widmet sich dem Motor, einem zentralen Bauteil im E-Bike-System. Bei der Auswahl und Integration eines Motors sind mehrere wichtige Fragen zu berücksichtigen, um eine optimale Leistung und Kompatibilität sicherzustellen. Im Folgenden werden diese Fragen detailliert behandelt, wobei besonderes Augenmerk auf die Auswahl des Motors, seine Abmessungen, die Passform am Fahrrad, die Leistung in Watt und die ideale Positionierung des Motors gelegt wird.

### 3.1 Arten von Fahrradmotoren

E-Bikes verwenden drei Hauptarten von Motoren. Der Mittelmotor befindet sich im Bereich des Tretlagers und bietet eine ausgeglichene Gewichtsverteilung, ein natürlicheres Fahrgefühl und eine effiziente Kraftübertragung durch die Mitte des Rahmens. Im Gegensatz dazu ist der Hecknabenmotor im Hinterrad integriert und ermöglicht eine einfache Installation, kann jedoch das zusätzliche Gewicht die Fahrstabilität beeinträchtigen. Der Frontnabenmotor befindet sich im Vorderrad und bietet ebenfalls eine einfache Installation, aber ein erhöhtes Lenkerdrehmoment kann das Lenkverhalten beeinflussen. Die Wahl des Motors hängt von den individuellen Vorlieben des Fahrers und den Fahreranforderungen ab.



Abbildung 3.1: Motorenarten [E-Bike Motoren – Die E-Bike Motorarten im Überblick o. D.]

### Mittelmotor

Ein Mittelmotor bei einem E-Bike befindet sich im Bereich des Tretlagers, also dort, wo üblicherweise auch die Kurbelgarnitur sitzt. Im Gegensatz zu einem Heckmotor, der sich im Hinterrad befindet, oder einem Frontmotor, der sich im Vorderrad befindet, bietet ein Mittelmotor einige Vorteile:

Der Mittelmotor zeichnet sich durch eine ausgeglichene Gewichtsverteilung aus, da er sich im Bereich des Tretlagers befindet. Dadurch befindet sich der Schwerpunkt des Fahrrads näher am Boden, was zu einer besseren Fahrstabilität führt. Dieses Merkmal ist besonders vorteilhaft beim Fahren auf unebenem Gelände oder in Kurven. Zudem bietet der Mittelmotor ein natürlicheres Fahrgefühl, da er das Treten ähnlich wie ein herkömmliches Fahrrad unterstützt.

Ein weiterer Vorteil des Mittelmotors liegt in seiner Effizienz. Durch die direkte Übertragung der Kraft auf das Antriebsritzel kann der Motor den Gangwechsel des Fahrers besser nutzen. Dadurch wird die verfügbare Energie effizienter genutzt, was zu einer längeren Reichweite pro Akkuladung führen kann. Schließlich trägt die zentrale Position des Motors im Rahmen zu einer besseren Gewichtsverteilung bei. Im Vergleich zu einem Heckmotor, der das Gewicht eher auf der hinteren Seite des Fahrrads platziert, hilft der Mittelmotor dabei, das Fahrrad weniger unausgewogen zu machen und eine angenehmere Fahrt zu ermöglichen.

Ein Nachteil des Mittelmotors ist, dass der Verschleiß an den Ritzeln und der Kassette höher sein kann als bei anderen Antriebssystemen. Dies liegt daran, dass der Motor direkt auf das Antriebsritzel wirkt und somit eine erhöhte Belastung auf die Zahnräder ausübt. Insbesondere bei intensiver Nutzung und häufigen Schaltvorgängen kann dies zu einem schnelleren Verschleiß führen. Es ist daher ratsam, regelmäßige Wartung durchzuführen und verschlissene Teile rechtzeitig auszutauschen, um die Lebensdauer des Antriebssystems zu maximieren und eine optimale Leistung zu gewährleisten.

Die Funktionsweise des Mittelmotors besteht darin, dass er die durch das Treten erzeugte Kraft des Fahrers verstärkt, indem er sie durch das Antriebsritzel auf das Hinterrad überträgt. Dies geschieht normalerweise über ein System aus Zahnrädern und einer Kette oder einem Riemen. Der Motor wird von der Energie aus einem Akku gespeist, der am Fahrrad angebracht ist und über einen Steuerungselektronik mit dem Motor verbunden ist. Diese Elektronik regelt unter anderem die Leistung des Motors und kann oft auch verschiedene Fahrmodi und Assistenzniveaus bieten.

### Radnarbenmotor

Der Nabennmotor ist in der Nabe des Hinterrads integriert und treibt dieses direkt an, wodurch die Kraftübertragung ohne Verluste direkt vom Motor auf das Laufrad erfolgt. Ein Drehmomentsensor misst die Tretleistung des Fahrers und steuert die Motorunterstützung entsprechend.

Die Vorteile des Nabennmotors liegen im leisen Betrieb mit geringer Geräuschentwicklung, der Möglichkeit der Rekuperation zur Reichweitenerhöhung, der unauffälligen Integration in die Fahrradoptik und dem einfachen Einbau ohne spezielle Rahmenauslegung.



Abbildung 3.2: Mittelmotor [*Mittelmotor nachrüsten: Fahrrad zum Elektrofahrrad umbauen / Pedelec & E-Bike Umbausätze: Warum sich Nachrüsten lohnt! / ebike-solutions.com o. D.*]

Jedoch weist der Nabenzugmotor auch einige Nachteile auf, wie eine ungünstige Gewichtsverteilung mit dem Schwerpunkt am Hinterrad, die Inkompatibilität mit Nabenschaltungen (nur Kettengetriebe möglich), die Tendenz zum Durchdrehen des Vorderrads bei Steigungen und Nässe, einen höheren Tretwiderstand durch das Getriebe im Hinterrad, problematischen Reifenwechsel durch integrierte Verkabelung und die Möglichkeit älterer Systeme, bei Dauerbelastung zu überhitzen.

Zusammengefasst bietet der Nabenzugmotor einen leisen Betrieb und Rekuperation, hat aber Nachteile bei der Gewichtsverteilung, Schaltungskompatibilität und Lenkung, vor allem bei anspruchsvollem Gelände.

Die Entscheidung für einen Nabenzugmotor basiert auf mehreren überzeugenden Argumenten. Zunächst einmal ist die Installation eines Nabenzugmotors im Vergleich zu anderen Antriebssystemen, wie beispielsweise einem Mittelmotor, deutlich einfacher. Da der Motor direkt in der Nabe des Rades integriert ist, erfordert seine Installation keine speziellen Rahmenanpassungen oder komplexe Montageprozesse. Dies macht den Einbau sowohl für Hersteller als auch für Endbenutzer unkompliziert und kostengünstig.

Ein weiterer Vorteil des Nabenzugmotors liegt in seiner dezenteren Integration in das Design des Fahrrads. Da der Motor im Inneren der Nabe verborgen ist, ist er für Außenstehende weniger sichtbar und beeinträchtigt nicht das ästhetische Erscheinungsbild des Fahrrads. Diese unauffällige Integration kann besonders für Fahrer wichtig sein, die ein elegantes und minimalistisches Design bevorzugen.

Darüber hinaus weist der Nabenzugmotor tendenziell einen geringeren Verschleiß auf als andere Antriebssysteme. Da die Kraftübertragung direkt vom Motor auf das Laufrad erfolgt, gibt es weniger bewegliche Teile und somit weniger Anfälligkeit für Verschleißerscheinungen. Dies führt zu einer längeren Lebensdauer des Antriebssystems und reduzierten Wartungskosten für den Fahrer.

Schließlich bietet der Nabenzugmotor ein großes Potenzial für Leistung. Durch die direkte Kraftübertragung auf das Laufrad und die Möglichkeit einer hohen Drehmomententwicklung kann der Nabenzugmotor beeindruckende Leistungen erbringen, insbesondere im Hinblick auf Beschleunigung und Bewältigung von Steigungen. Diese Leistungsstärke macht den Nabenzugmotor



Abbildung 3.3: Radnabenmotor[LORENZ SCHERRER 2023]

zu einer attraktiven Option für Fahrer, die hohe Leistung und Effizienz von ihrem E-Bike erwarten.

Insgesamt bietet der Nabennmotor eine Reihe von überzeugenden Vorteilen, darunter eine einfache Installation, dezente Integration, geringeren Verschleiß und beeindruckende Leistungsfähigkeit. Diese Argumente machen ihn zu einer attraktiven Wahl für diejenigen, die nach einem zuverlässigen und leistungsstarken Antriebssystem für ihr E-Bike suchen.

#### Funktionsweise eines Bürstenlosen Gleichstrommotors

Bei dem Radnabenmotoren handelt es sich um einen Bürstenlosen Gleichstrommotor. Die Motor wandeln elektrische Energie in meschanische um.

Bürstenlose Gleichstrommotoren (BLDC-Motoren) gehören zu den effizientesten und leistungsstärksten Antriebslösungen in der heutigen Industrie. Sie bestehen aus einem Rotor und einem Stator, wobei der Stator die feststehende Komponente und der Rotor die sich drehende

ist. Links ist der Rotor zusehen und recht der Stator 3.4

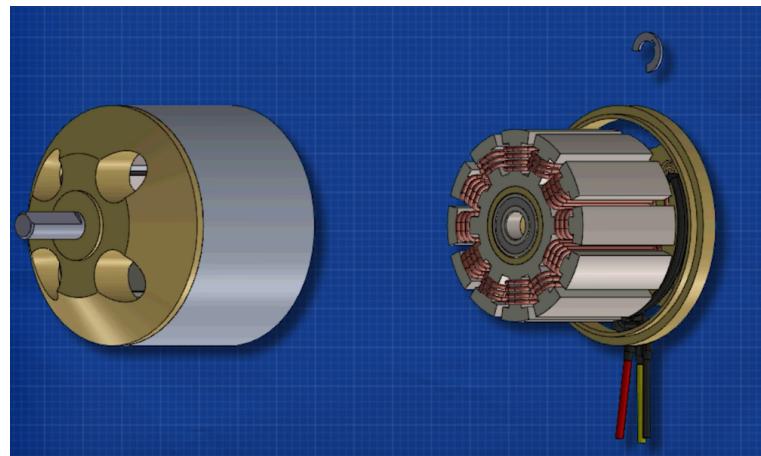


Abbildung 3.4: Rotor und Stator[INGENIEURSMENTALITÄT 2022]

Die Zähne des Stators sind die hervorstehenden Teile des Statorblechs, die dazu dienen, die Spulen zu umgeben und zu führen. Sie sind strategisch angeordnet, um ein magnetisches Feld zu erzeugen, das den Rotor antreibt. 3.4

Die Spulen im Stator sind für die Erzeugung des magnetischen Feldes verantwortlich, das den Rotor antreibt. Sie sind in drei Phasengruppen unterteilt: U, V und W. Diese Phasengruppen sind jeweils um 120 Grad versetzt, um ein gleichmäßiges Drehmoment zu erzeugen.

Die benachbarten Spulen sind in verschiedene Richtungen gewickelt, um sicherzustellen, dass sich das magnetische Feld gleichmäßig um den Rotor verteilt und somit ein reibungsloser Betrieb gewährleistet ist. Diese Wickeltechnik wird auch als dlrk-Wicklung bezeichnet 3.5.

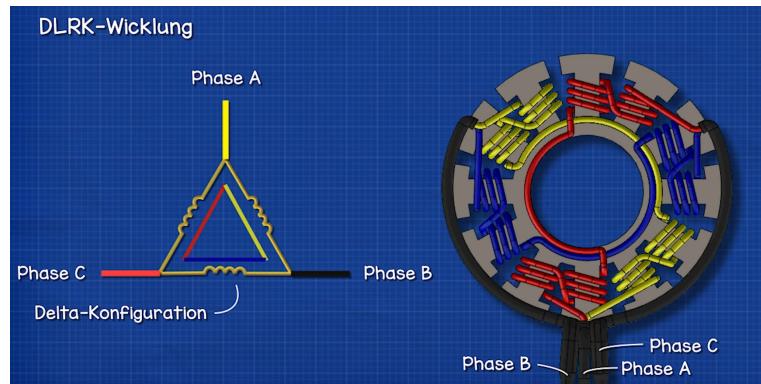


Abbildung 3.5: DLRK-Wicklung[INGENIEURSMENTALITÄT 2022]

Die Permanentmagnete am Rotor sind so angebracht, dass sie eine feste und starke magnetische Kraft erzeugen. Sie sind in einer bestimmten Anordnung platziert, um ein optimales magnetisches Feld zu erzeugen und somit eine effiziente Drehbewegung zu ermöglichen.

Die Anzahl der Magneten und Spulen kann variieren, um sicherzustellen, dass sich diese nicht ausrichten und somit das gewünschte Drehmoment erzeugt wird. Durch diese Unterschiede in der Anordnung wird eine gleichmäßige und stabile Leistung des Motors gewährleistet.

### 3.1.1 Energierückgewinnung

Radnarbenmotoren bieten einen weiteren Vorteil: die Stromrückgewinnung. Durch ihre Konstruktion ermöglichen sie es, kinetische Energie während des Bremsens in elektrische Energie umzuwandeln. Dies geschieht, indem der Motor als Generator fungiert.

Der BLDC-Motor, der in Radnarbenmotoren verwendet wird, kann seine Rolle ändern und als Generator arbeiten, wenn er dem Drehmoment entgegenwirkt. Bei dieser Umkehrung des Betriebsmodus des Motors wird die mechanische Energie des rotierenden Rades in elektrische Energie umgewandelt, die dann in einer Batterie gespeichert oder direkt verwendet werden kann. Diese Stromrückgewinnungsfunktion ist besonders nützlich in Anwendungen, in denen häufiges Bremsen oder Abbremsen erforderlich ist, wie zum Beispiel bei Elektrofahrrädern. Sie trägt nicht nur zur Verbesserung der Energieeffizienz bei, sondern kann auch die Reichweite des Fahrzeugs erhöhen und die Lebensdauer der Bremsen verlängern, da weniger mechanische Bremsen verwendet werden müssen. Zudem vergessert sie den Bremsweg des E-bikes.

## 3.2 Position des Motors

Die Wahl zwischen einem Vorderrad- oder Hinterradmotor bei einem E-Bike hängt von verschiedenen Faktoren ab, die sowohl die Leistung als auch das Fahrverhalten des Fahrrads beeinflussen können. Beginnen wir mit dem Vorderradmotor: Ein klarer Vorteil liegt in der schnellen Umsetzbarkeit des Umbaus. Die Installation gestaltet sich vergleichsweise einfach, da der Motor direkt in die Nabe des Vorderrads integriert wird. Dies ermöglicht eine rasche Anpassung von herkömmlichen Fahrrädern zu E-Bikes.

Jedoch weist der Vorderradmotor einige Nachteile auf. Aufgrund der direkten Kraftübertragung auf das Vorderrad kommt es schnell zum Durchdrehen, insbesondere auf rutschigem Untergrund oder bei Steigungen. Dies beeinträchtigt das Fahrverhalten und die Traktion des Vorderrads negativ. Darüber hinaus ist die Gewichtsverteilung problematisch, da ein Großteil des zusätzlichen Gewichts durch den Motor vorne am Fahrrad konzentriert ist. Dies kann zu einem ungleichmäßigen Fahrgefühl führen, insbesondere bei höheren Geschwindigkeiten oder in Kurven.

Um diese potenziellen Probleme zu untersuchen, wurden zwei Experimente durchgeführt. Diese Experimente zielen darauf ab, das Durchdrehen des Vorderrads unter verschiedenen Bedingungen zu untersuchen und die Auswirkungen auf das Fahrverhalten zu bewerten. Die Ergebnisse dieser Experimente liefern wertvolle Erkenntnisse für die Entscheidungsfindung bei der Wahl des Motors.

Auf der anderen Seite steht der Hinterradmotor, der seine eigenen Vor- und Nachteile bietet. Einer der offensichtlichen Nachteile ist die komplexere Installation im Vergleich zum Vorderradmotor. Da der Motor in die Nabe des Hinterrads integriert wird, erfordert die Installation möglicherweise spezielle Anpassungen des Rahmens und der Verkabelung. Dies kann zu einem längeren Installationsprozess führen und zusätzliche Kosten verursachen.

Darüber hinaus kann der Hinterradmotor die Kompatibilität mit Nabenschaltungen einschränken, da die meisten Hinterradmotoren nur mit Kettenschaltungen kompatibel sind. Dies kann die Auswahl an verfügbaren Schaltungs- und Gangoptionen für den Fahrer begrenzen. Zudem kann der Einbau des Motors zu einem höheren Tretwiderstand führen, da das Getriebe im Hinterrad zusätzlichen Widerstand erzeugen kann.

Trotz dieser Nachteile bietet der Hinterradmotor auch einige wichtige Vorteile. Die Gewichtsverteilung ist oft besser ausgeglichen als beim Vorderradmotor, da sich der Motor im hinteren Teil des Fahrrads befindet. Dies kann zu einem stabileren Fahrverhalten beitragen, insbesondere bei höheren Geschwindigkeiten oder in Kurven. Darüber hinaus ermöglicht die Integration des Motors in das Hinterrad eine unauffälligere Optik, da der Motor weniger sichtbar ist und das ästhetische Erscheinungsbild des Fahrrads weniger beeinträchtigt wird.

Die Entscheidung für einen Hinterradmotor wurde letztendlich aufgrund dieser verschiedenen Faktoren und den Ergebnissen der zwei Experimente getroffen. Trotz der komplexeren Installation bietet der Hinterradmotor eine bessere Gewichtsverteilung, eine stabilere Fahrdynamik und eine unauffälligere Optik, was ihn zu einer attraktiven Option für viele Fahrradfahrer macht.

### 3.3 Lesitung des Motors

Die Entscheidung über die Motorleistung für den Bau eines E-Bikes ist ein wichtiger Schritt, der sorgfältige Überlegungen erfordert. Dabei müssen mehrere Faktoren berücksichtigt werden, um die optimale Leistung zu bestimmen. In diesem wissenschaftlichen Text argumentiere ich dafür, dass die Motorleistung aufgrund bestimmter Kriterien auf einen höheren Wert festgelegt werden sollte, jedoch nicht so hoch, dass sie Schäden am Fahrzeug verursacht.

Zunächst ist es wichtig zu erwähnen, dass das E-Bike nicht in seiner vorgefertigten Form gekauft werden kann, was bedeutet, dass der Motor separat erworben werden muss. Dies eröffnet verschiedene Möglichkeiten für den Erwerb und die Installation des Motors. Eine Möglichkeit besteht darin, einen Motor zu kaufen, an dem bereits Speichen und Felge angebracht sind, während eine andere Möglichkeit darin besteht, nur den Motor zu erwerben und Speichen sowie Felge selbst anzubringen. Beide Optionen haben ihre Vor- und Nachteile.

Beim selbstständigen Anbringen von Speichen und Felge ist die Entscheidungsfreiheit hinsichtlich des Motors flexibler. Allerdings geht dies mit zusätzlichem Arbeitsaufwand einher und birgt das Risiko, dass die Zusammenstellung möglicherweise nicht in der Lage ist, die auf den Motor ausgeübte Kraft zu bewältigen. Im Gegensatz dazu kann bei einem vollständigen Motor mit Speichen und Felge davon ausgegangen werden, dass die Zusammenstellung die Kraftauswirkung aushält.

Nachdem diese Kriterien definiert wurden, wurde eine Marktanalyse durchgeführt, um festzustellen, welche Optionen verfügbar sind. Basierend auf den identifizierten Anforderungen und den verfügbaren Optionen wurde die Entscheidung getroffen, einen 1500 Watt-Motor zu verwenden. Diese Leistungseinstellung ermöglicht eine angemessene Motorleistung für das E-Bike, ohne dabei die Strukturintegrität des Fahrzeugs zu gefährden. Durch die Verwendung eines Motors mit dieser Leistung kann eine ausreichende Unterstützung für das E-Bike gewährleistet werden, während gleichzeitig potenzielle Schäden vermieden werden.

### 3.4 Reichweite

Reichweite berechnen

Es muss noch ein experiment gemacht werden

# Kapitel 4

## Controller

Der Controller bei einem E-Bike spielt eine zentrale Rolle bei der Steuerung des Motors und der Batterie. Seine Hauptfunktionen umfassen:

1. **Leistungsregelung:** Der Controller steuert die Leistungszufuhr zum Motor, was die Geschwindigkeit und Beschleunigung des E-Bikes beeinflusst. Je nach den Einstellungen und Anforderungen des Fahrers kann der Controller die Leistung variieren, um eine sanfte Beschleunigung oder eine schnelle Fahrt zu ermöglichen.
2. **Unterstützungsmodi:** Viele E-Bikes bieten verschiedene Unterstützungsmodi, die es dem Fahrer ermöglichen, die gewünschte Leistung und Reichweite auszuwählen. Der Controller steuert diese Modi und passt die Leistung des Motors entsprechend an.
3. **Sicherheitsfunktionen:** Der Controller kann Sicherheitsfunktionen wie Überhitzungsschutz und Kurzschlusschutz bieten, um den sicheren Betrieb des E-Bikes zu gewährleisten.

Insgesamt ist der Controller eine wesentliche Komponente eines E-Bikes, die eine präzise Steuerung der Leistung und eine effiziente Nutzung der Batterie ermöglicht.

### 4.1 Controller Parameter

Hier sind einige wichtige Parameter und ihre Bedeutungen 6.2:

1. **Rated Voltage (Nennspannung):** Diese Angabe gibt die Spannung an, bei der der Controller ordnungsgemäß funktioniert. In deinem Fall beträgt die Nennspannung DC36V / 48V, was bedeutet, dass der Controller für den Betrieb mit Batterien mit einer Spannung von entweder 36V oder 48V ausgelegt ist.
2. **Rated Current (Nennstrom):** Dies ist die maximale Stromstärke, die der Controller kontinuierlich liefern kann, ohne überlastet zu werden. Der Nennstrom wird normalerweise in Ampere (A) gemessen und bestimmt die Leistungsfähigkeit des Controllers, den Motor mit Energie zu versorgen.
3. **Low Voltage Protection (Unterspannungsschutz):** Diese Funktion schützt die Batterie vor übermäßiger Entladung, indem der Controller den Betrieb des Motors abschaltet, wenn die Batteriespannung unter einen bestimmten Schwellenwert fällt. Dadurch wird verhindert, dass die Batterie beschädigt wird und ihre Lebensdauer verlängert.

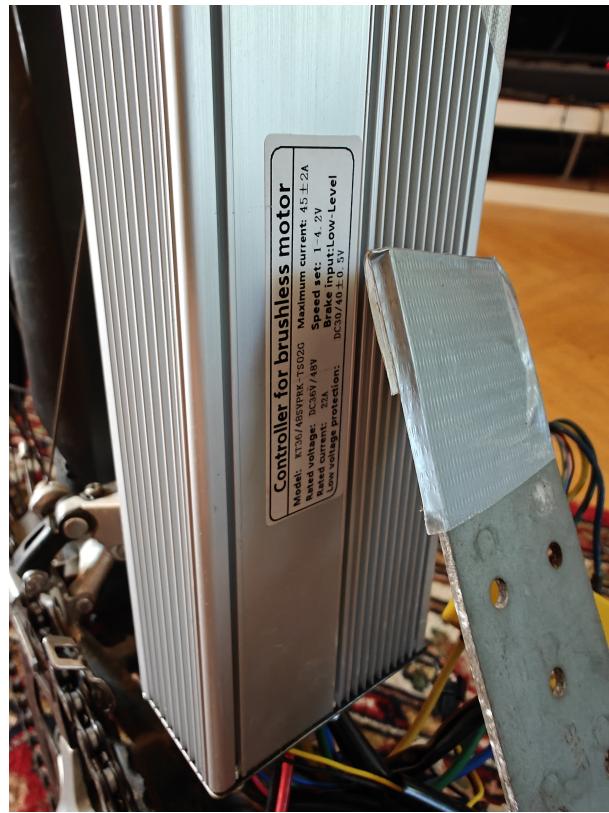


Abbildung 4.1: Controller Parameter[LORENZ SCHERRER 2023]

4. **Maximum Current (Maximalstrom):** Dies ist die maximale Stromstärke, die der Controller kurzzeitig liefern kann, um beispielsweise bei Beschleunigungsvorgängen einen hohen Drehmoment zu erzeugen. Es ist wichtig, dass dieser Wert die Spezifikationen des Motors und anderer Komponenten nicht überschreitet, um Schäden zu vermeiden.
5. **Speed Set (Geschwindigkeitseinstellung):** Diese Funktion ermöglicht es dem Benutzer, die maximale Geschwindigkeit des E-Bikes einzustellen. Der Controller regelt dann die Leistung entsprechend, um diese Geschwindigkeit beizubehalten.
6. **Brake Input (Bremseingang):** Dieser Eingang ermöglicht es dem Controller, auf Bremsvorgänge zu reagieren, beispielsweise indem er den Motor abschaltet oder die Rückgewinnung von Bremsenergie aktiviert, um die Batterie wieder aufzuladen.

Diese Parameter sind entscheidend für die korrekte Konfiguration und den sicheren Betrieb des E-Bike-Systems und sollten entsprechend den Anforderungen des Fahrzeugs.

## 4.2 Funktionsweise eines Controllers

## 4.3 Installation des Controllers

Hier ist der Text, der die Anschlüsse des Controllers und ihre Bedeutungen beschreibt, die in diesem Bild zu sehen sind6.1:

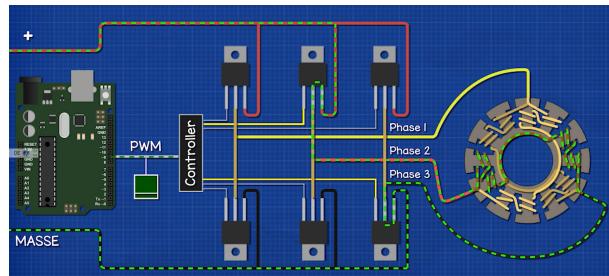


Abbildung 4.2: Funktionsweise eines Controllers [28.22€ /Elektrische Bike Display KT LCD4 E bike LCD Display 36V 48V Ebike Computer für E Bike Kunteng controller SM oder Wasserdichten Stecker/E-Bike Zubehör/ - AliExpress o. D.]

1. **Phase Hall Sensor Wire (Phasen-Hall-Sensor-Kabel):** Diese Anschlüsse sind für die Verbindung mit den Hall-Sensoren des Motors vorgesehen. Die Hall-Sensoren dienen dazu, die Position des Rotors des Motors zu erfassen und dem Controller mitzuteilen, wann und wie viel Strom an die einzelnen Phasen des Motors geliefert werden soll.
2. **Battery (Batterie):** Dieser Anschluss ist für die Verbindung mit der Batterie des E-Bikes vorgesehen. Hier wird die Stromversorgung für den Controller und den Motor bereitgestellt.
3. **Throttle (Gashebel):** Dieser Anschluss ist für die Verbindung mit dem Gashebel des E-Bikes vorgesehen. Der Gashebel ermöglicht es dem Fahrer, die Geschwindigkeit des E-Bikes zu steuern, indem er die Leistung des Motors reguliert.
4. **PAS Sensor (Pedal-Assist-Sensor):** Dieser Anschluss ist für die Verbindung mit dem Pedal-Assist-Sensor vorgesehen. Der PAS-Sensor erkennt die Pedalbewegungen des Fahrers und passt die Leistung des Motors entsprechend an, um eine unterstützende Fahrt zu gewährleisten.
5. **Brake Light (Bremslicht):** Dieser Anschluss ist für die Verbindung mit dem Bremslicht des E-Bikes vorgesehen. Wenn der Fahrer bremst, wird das Bremslicht aktiviert, um andere Verkehrsteilnehmer zu warnen.
6. **Electric Lock (Elektrisches Schloss):** Dieser Anschluss ist für die Verbindung mit dem elektrischen Schloss des E-Bikes vorgesehen. Das elektrische Schloss kann verwendet werden, um das E-Bike vor Diebstahl zu schützen, indem es den Motor oder andere Funktionen sperrt.
7. **Display (Anzeige):** Dieser Anschluss ist für die Verbindung mit dem Display des E-Bikes vorgesehen. Das Display zeigt dem Fahrer wichtige Informationen wie Geschwindigkeit, Batteriestand und unterstützende Modi an.
8. **Back-Up (Sicherung):** Dieser Anschluss ist für die Verbindung mit einer Sicherung vorgesehen, um den Controller vor Überlastung oder Kurzschluss zu schützen.
9. **Cruise Light (Tempomatlicht):** Dieser Anschluss ist für die Verbindung mit einer optionalen Tempomatlichtfunktion vorgesehen, die dem Fahrer anzeigt, wann der Tempomat aktiviert ist.

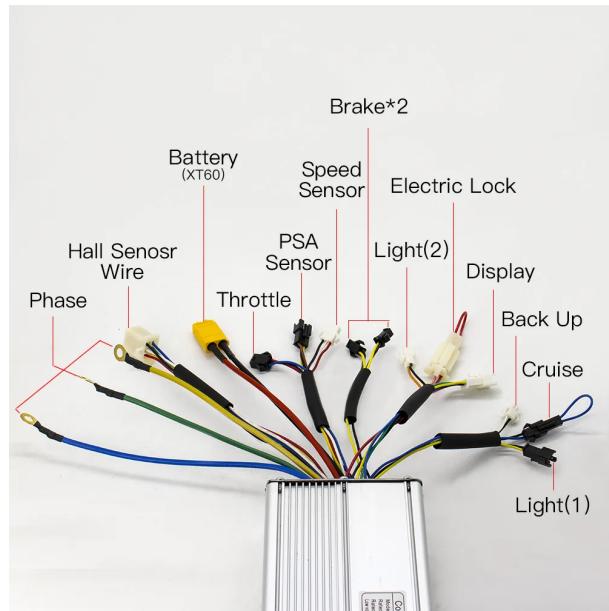


Abbildung 4.3: Anschlüsse des Controllers [22.48€ 33% OFF/KT controller 24V 36V 48V ebike controller 500W 750W 1000W 1500W 350W mit KT LCD5 LCD4 LCD3 display für Elektrische Fahrrad/E-Bike Zubehör/ - AliExpress o. D.]

Diese Anschlüsse ermöglichen es dem Controller, mit verschiedenen Komponenten des E-Bikes zu kommunizieren und sie zu steuern, um eine sichere und effiziente Fahrt zu gewährleisten.

# Kapitel 5

## Steuergerät

Das Steuergerät, auch als Fahrrad-Bordcomputer bekannt, ist ein entscheidender Bestandteil eines E-Bike-Systems. Es dient dazu, die verschiedenen Betriebsmodi des Controllers zu steuern und dem Fahrer die Möglichkeit zu geben, die Einstellungen und Leistungsparameter des E-Bikes je nach Bedarf anzupassen.

### 5.1 Umsetzung des Steuergeräts

Die Umsetzung des Steuergeräts kann auf verschiedene Arten erfolgen. Eine Möglichkeit besteht darin, einen einfachen Schalter zu verwenden, der dem Fahrer die Wahl zwischen verschiedenen Modi bietet. Dieser Schalter kann beispielsweise zwischen den Modi für unterschiedliche Geschwindigkeitsstufen oder Leistungsniveaus umschalten.

Eine andere Möglichkeit ist die Integration eines anpassbaren Displays, das dem Fahrer eine visuelle Schnittstelle zur Steuerung des E-Bikes bietet. Mit einem solchen Display kann der Fahrer nicht nur zwischen verschiedenen Modi wählen, sondern auch Informationen wie Geschwindigkeit, Batterieladung und Fahrstrecke anzeigen.

Die Wahl zwischen einem einfachen Schalter und einem anpassbaren Display hängt von den individuellen Anforderungen und Präferenzen des Fahrers ab. Während ein einfacher Schalter eine unkomplizierte Bedienung bietet, ermöglicht ein Display zusätzliche Informationen und Anpassungsoptionen.

### 5.2 Gründe für ein Steuergerät

Ein Fahrrad-Bordcomputer bietet eine Vielzahl von Gründen und Vorteilen, die das Fahrerlebnis bei E-Bikes verbessern können. Einer der wichtigsten Gründe ist die Kontrolle über die Beschleunigung. Mit einer Throttle kann der Fahrer das Drehgas langsam aufdrehen und so die Beschleunigung kontrollieren. Im Gegensatz dazu gibt ein Tretlager-Sensor nur an, ob gerade getreten wird, und der Motor gibt automatisch die volle Beschleunigung. Dies kann zu unerwünschten Situationen und Gefahren führen, insbesondere in anspruchsvollen Gelände oder beim Starten an Steigungen.

Ein weiterer relevanter Aspekt ist die Möglichkeit, Motorparameter über den Bordcomputer einzustellen. Viele E-Bikes bieten verschiedene Unterstützungsstufen, die bestimmen, wie viel zusätzliche Leistung der Elektromotor beim Treten bietet. Über den Bordcomputer kann der

Fahrer die gewünschte Unterstützungsstufe auswählen, die seinen Vorlieben und den Anforderungen der Strecke entspricht. Darüber hinaus ermöglicht der Bordcomputer die Anpassung der maximalen Geschwindigkeit des Motors, was besonders nützlich ist, um die Konformität mit lokalen Vorschriften einzuhalten oder persönliche Präferenzen zu berücksichtigen. Die Einstellung des Startverhaltens beeinflusst, wie schnell der Motor reagiert, wenn der Fahrer mit dem Treten beginnt, und einige E-Bikes bieten die Möglichkeit, zwischen verschiedenen Startmodi zu wählen, um den Fahrkomfort und die Sicherheit zu verbessern.

Des Weiteren kann der Bordcomputer den Rekuperationsmodus steuern, der bestimmt, wie stark der Motor beim Bremsen oder Bergabfahren Energie zurückgewinnt. Dies trägt nicht nur zur Effizienz des E-Bikes bei, sondern auch zur Erhöhung der Reichweite.

Zusammenfassend bietet ein Fahrrad-Bordcomputer zahlreiche Funktionen, die das Fahrerlebnis bei E-Bikes verbessern können. Von der Kontrolle über die Beschleunigung bis zur Anpassung von Motorparametern bietet der Bordcomputer eine Vielzahl von Möglichkeiten, um die Fahrt sicherer, komfortabler und individueller zu gestalten.

### 5.3 Wahl des Steuergeräts

Es ist nicht unbedingt erforderlich, ein Steuergerät zu verwenden, da die meisten Controller es ermöglichen, den Motor mit einer Throttle oder einem Tretlager-Sensor zu starten. Jedoch bietet ein Steuergerät eine bessere Kontrolle über das Fahrzeug. Bei der Verwendung einer Throttle kann der Fahrer das Drehgas langsam aufdrehen und so die Beschleunigung kontrollieren, während ein Tretlager-Sensor automatisch die volle Beschleunigung gibt, sobald mit dem Treten begonnen wird, was zu Gefahren führen kann.

Ein Fahrrad-Bordcomputer kann auch verwendet werden, um Motorparameter festzulegen, wie zum Beispiel verschiedene Unterstützungsstufen, maximale Geschwindigkeit, Startverhalten, Rekuperationsmodus und Motorleistung. Die Wahl des Steuergeräts hängt von den individuellen Anforderungen und Präferenzen des Fahrers ab.

In der Domäne der E-Bike-Technologie stehen verschiedene Steuergeräte zur Verfügung, die in ihren Funktionen und Einstellungen ähnlich sind. Dennoch variieren sie hauptsächlich im Bereich des Displays, des Designs und der Benutzeroberfläche, wobei die meisten über eine Standardausstattung von drei Bedienelementen verfügen, wie in Abbildung 5.1 dargestellt.

Die Wahl fiel auf das KT LCD4 Display aufgrund mehrerer Kriterien. Zum einen zeichnet sich das KT LCD4 durch seine minimalistische und kompakte Bauweise aus. Ein weiterer entscheidender Faktor war die Kompatibilität des KT LCD4 Displays mit dem vorhandenen Controller.

Im Vergleich zu anderen Displays, die potenziell größer und sperriger sind, präsentiert sich das KT LCD4 als eine simple Lösung. Das minimalistische Design und die benutzerfreundliche Oberfläche die sich nicht zu anderen unterscheidet machen es zu einer optimalen Wahl für das E-Bike-Projekt.

Im Anhang ist eine Abbildung eines alternativen Displays zu finden<sup>2</sup>, das zur Verfügung stand. Dieses zeichnet sich durch seine größeren Dimensionen und klobigeres Erscheinungsbild aus, was nicht mit dem Platzangebot des Lenkers kompatibel war. Das größte Problem ist jedoch, dass es nicht mit dem neuen Controller kompatibel ist.



|   |  |                            |    |      |                          |
|---|--|----------------------------|----|------|--------------------------|
| 1 |  | SW Button                  | 9  | DST  | Trip distance            |
| 2 |  | UP Button                  | 10 | ODO  | Total distance           |
| 3 |  | DOWN Button                | 11 |      | Backlight and headlights |
| 4 |  | Battery capacity indicator | 12 | PAS  | Pas level                |
| 5 |  | Run sign                   | 13 | MXS  | MAX speed                |
| 6 |  | 6Km/H push power assist    | 14 | KM/H | Riding speed(metric)     |
| 7 |  | The brake display          | 15 | VOL  | Battery voltage          |
| 8 |  | CRUISE display             |    | KM   | Distance(metric)         |

Abbildung 5.1: KT LCD4[28.22€ /Elektrische Bike Display KT LCD4 E bike LCD Display 36V 48V Ebike Computer für E Bike Kunteng controller SM oder Wasserdichten Stecker/E-Bike Zubehör/ - AliExpress o. D.]

## 5.4 Konfiguration des Steuergeräts

Die Konfigurationsparameter des Steuergeräts sind entscheidend für die optimale Leistung und Funktionalität des Systems. Diese Parameter ermöglichen es, verschiedene Einstellungen anzupassen, um den individuellen Anforderungen des E-Bikes gerecht zu werden.

## 5.5 Allgemeine Grundeinstellungen

1. Maximale Fahrgeschwindigkeit
2. Rad-Durchmesser
3. Metrische und imperiale Einheiten

## 5.6 P-Parameter-Einstellung

1. P1 Motorumdrehung Einstellung (Alnico-Zahl)
2. P2 Geschwindigkeitssignal Einstellung
3. P3 Motor Unterstützungsmodus
4. P4 Daumengas Startmodus
5. P5 Batterie - Ladezustandsanzeige

## 5.7 C-Parameter-Einstellung

1. C1 PAS - Sensor Parametereinstellung
2. C2 Motor Phasen Anpassung
3. C3 Einstellung der Anzahl der Unterstützungsstufen
4. C4 Daumengas Funktionseinstellung
5. C5-Controller maximale Stromeinstellung
6. C6-Hintergrundbeleuchtung Helligkeitseinstellung
7. C7 Cruise Funktionseinstellung
8. C8 Motor Betriebstemperatur Anzeige
9. C9 Power on Passwort Einstellung
10. C10 Wiederherstellung Werkseinstellung
11. C11 Einstellung Übertragungsprotokoll
12. C12-Controller Unterspannungseinstellung
13. C13 Bremsenergiegewinnung
14. C14 Abstimmung der Unterstützungsstufen

Die meisten Motorparameter sind standardmäßig gut eingestellt, und das Steuergerät hat nur begrenzten Einfluss auf den Controller. Auf einige Änderungen der Parameter reagiert der Controller möglicherweise nicht. Dennoch gibt es zwei Parameter, die besonders wichtig sind und angepasst werden mussten.

### P1: Geschwindigkeit mit Induktionsstrom bestimmen

Der Parameter P1 ist von entscheidender Bedeutung, da er die Geschwindigkeitsregelung des Motors über den Induktionsstrom steuert. Indem dieser Parameter angepasst wird, kann die Motorleistung effektiv kontrolliert werden, um eine reibungslose und effiziente Fahrt zu gewährleisten.

### C13: Rekuperationskonfiguration

Die Konfiguration der Rekuperation (Rückgewinnung von Bremsenergie) ist ein weiterer wichtiger Motorparameter. Durch die Anpassung von C13 können Fahrer die Bremsenergieeffizienz optimieren und die Reichweite ihres E-Bikes erhöhen. Eine präzise Einstellung dieses Parameters ist entscheidend für ein ausgewogenes Fahrerlebnis und eine verbesserte Energieeffizienz.

Die sorgfältige Anpassung dieser wichtigen Motorparameter ermöglicht es den Fahrern, das volle Potenzial ihres E-Bikes auszuschöpfen und eine optimale Leistung sowie Effizienz zu erreichen.

# Kapitel 6

## Fahrdynamik

### 6.1 Schaltung

#### Notwendige Komponenten

Für den Aufbau der Schaltung sind folgende Komponenten erforderlich:

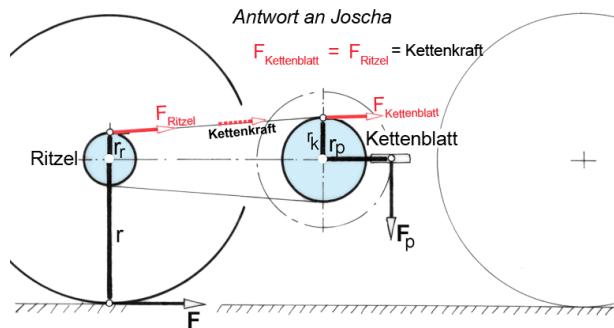


Abbildung 6.1: Fahrradschaltung [Schaltung beim Fahrrad / LEIFIphysik o. D.]

- Kassette
- Kettenblatt
- Umwerfer
- Schaltwerk
- Schaltzüge

Der Motor hat ein Traditional Thread-on Freewheel. Hier sind die beiden Verfahren zu sehen wie eine Kassette montiert werden kann 6.2:

Bei der Auswahl der Schaltung für das selbst gebaute E-Bike ist es wichtig, die Kompatibilität zwischen dem Motor und den vorhandenen Fahrradkomponenten zu berücksichtigen. Da der Motor einen Traditional Thread-on Freewheel-Anschluss hat 6.3, kann der vorhandene Kassettenblock des Fahrrads nicht verwendet werden.

Abgesehen von der Kassette können die vorhandenen Schaltungskomponenten weiterverwendet werden.

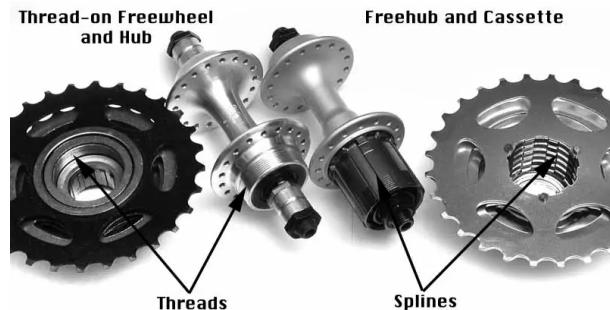


Abbildung 6.2: Fahrradschaltung[Traditional Thread-on Freewheels o. D.]



Abbildung 6.3: Fahrradschaltung[Schaltung beim Fahrrad / LEIFIphysik o. D.]

### Auswahl der Kassette

Die Kassette und das Kettenblatt beeinflussen die Geschwindigkeit und Übersetzung des E-Bikes maßgeblich. Da eine neue Kassette benötigt wird, ist dies die erste Option, um die Übersetzung und Geschwindigkeit anzupassen.

### Geschwindigkeitsanforderungen

Das E-Bike ist für Geschwindigkeiten zwischen 20 und 50 Stundenkilometern ausgelegt. Daher wird ein kleines Ritzel 6.4 hinten bevorzugt, da beim Anfahren der Motor stark unterstützt und bei höheren Geschwindigkeiten weniger Widerstand benötigt wird.



Abbildung 6.4: Fahrradschaltung[4.23€ /Fahrrad Fahrrad Schwungrad Freilauf 1 Single Speed 12tbmx Fahrrad Freilauf rad Nickel Chrom Molybdän Stahl/ | - AliExpress o. D.]

**Aktueller Zustand und Modifikation**

Aktuell verfügt das E-Bike über zwei Gänge durch die beiden vorhandenen Kettenblätter vorne. Um den Motor auch bei Geschwindigkeiten über 40 Kilometer pro Stunde zu unterstützen, müssen die Kettenblätter modifiziert werden.

## 6.2 Fahrgefühl

# **Kapitel 7**

## **Konstruktion**

**7.1 Position der Batterie**

**7.2 Position des Controllers**

**7.3 Anbringen des Motors**

TroqueArm

## **Kapitel 8**

### **Fazit**

# **Anhang**

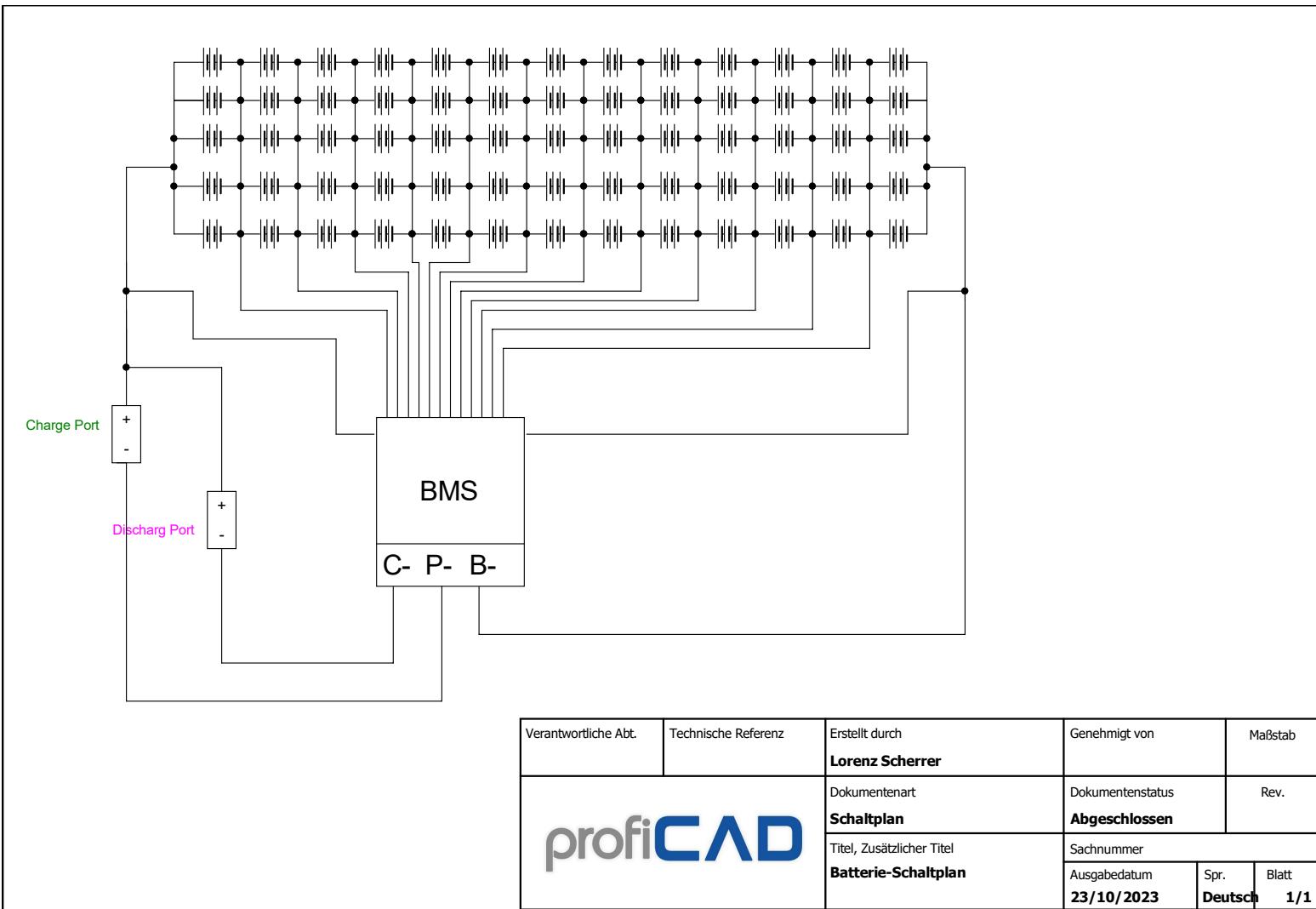


Abbildung 1: Schaltplan[LORENZ SCHERRER 2023]



Abbildung 2: sw900[LORENZ SCHERRER 2023]



Abbildung 3: Rasenmäher Akku[LORENZ SCHERRER 2023]

# Literatur

- 22.48€ 33% OFF/ *KT controller 24V 36V 48V ebike controller 500W 750W 1000W 1500W 350W mit KT LCD5 LCD4 LCD3 display für Elektrische Fahrrad/E-Bike Zubehör* / - AliExpress [o. D.] aliexpress.com. URL: [//de.aliexpress.com/item/4000475225607.html?src=ibdm\\_d03p0558e02r02&sk=&aff\\_platform=&aff\\_trace\\_key=&af=&cv=&cn=&dp=](https://de.aliexpress.com/item/4000475225607.html?src=ibdm_d03p0558e02r02&sk=&aff_platform=&aff_trace_key=&af=&cv=&cn=&dp=) [besucht am 20. 04. 2024] [siehe S. 26].
- 28.22€ / *Elektrische Bike Display KT LCD4 E bike LCD Display 36V 48V Ebike Computer für E Bike Kunteng controller SM oder Wasserdichten Stecker/E-Bike Zubehör* / - AliExpress [o. D.] aliexpress.com. URL: [//de.aliexpress.com/item/4001142752280.html?src=ibdm\\_d03p0558e02r02&sk=&aff\\_platform=&aff\\_trace\\_key=&af=&cv=&cn=&dp=](https://de.aliexpress.com/item/4001142752280.html?src=ibdm_d03p0558e02r02&sk=&aff_platform=&aff_trace_key=&af=&cv=&cn=&dp=) [besucht am 15. 04. 2024] [siehe S. 25, 29].
- 4.23€ / *Fahrrad Fahrrad Schwungrad Freilauf 1 Single Speed 12tbmx Fahrrad Freilauf rad Nickel Chrom Molybdän Stahl* / - AliExpress [o. D.] aliexpress.com. URL: [//de.aliexpress.com/item/1005006370686063.html?src=ibdm\\_d03p0558e02r02&sk=&aff\\_platform=&aff\\_trace\\_key=&af=&cv=&cn=&dp=](https://de.aliexpress.com/item/1005006370686063.html?src=ibdm_d03p0558e02r02&sk=&aff_platform=&aff_trace_key=&af=&cv=&cn=&dp=) [besucht am 05. 05. 2024] [siehe S. 32].
- E-Bike Motoren – Die E-Bike Motorarten im Überblick* [o. D.] Die Fahrradschmiede. URL: <https://fahrradschmiede.de/bikes/e-bike-motoren-die-motorarten-im-ueberblick/> [besucht am 05. 04. 2024] [siehe S. 15].
- INGENIEURSMENTALITÄT [5. Jan. 2022]. *Bürstenloser Gleichstrommotor*. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=kqcFiTrMz4Q> [besucht am 10. 04. 2024] [siehe S. 19].
- LORENZ SCHERRER [5. Nov. 2023]. *Selbst Experiment* [siehe S. 9, 18, 24, 37, 38].
- Mittelmotor nachrüsten: Fahrrad zum Elektrofahrrad umbauen / Pedelec & E-Bike Umbausätze: Warum sich Nachrüsten lohnt!* / [ebike-solutions.com](http://ebike-solutions.com) [o. D.] URL: <https://www.ebike-solutions.com/de/bafang-mittelmotor.html> [besucht am 05. 04. 2024] [siehe S. 17].
- Schaltung beim Fahrrad / LEIFIphysik* [o. D.] URL: <https://www.leifiphysik.de/mechanik/einfache-maschinen/ausblick/schaltung-beim-fahrrad> [besucht am 05. 05. 2024] [siehe S. 31, 32].
- Traditional Thread-on Freewheels* [o. D.] URL: <https://www.sheldonbrown.com/freewheels.html> [besucht am 05. 05. 2024] [siehe S. 32].