



Universität Osnabrück
FB6 Mathematik/Informatik/Physik
Institut für Physik
Arbeitsgruppe Physikdidaktik

Masterarbeit

Thema:

**Kostengünstiges Energiefahrrad für den
Schulunterricht – Entwicklung, Prototyping und
Erstellung eines Nachbaukonzepts**

Autor: B. Sc.-Ing. Kevin Krause

Matrikelnummer: 1011812

Mail: kevkrause@uni-osnabrueck.de

Erstprüfer: Prof. Dr. rer. nat. Roland Berger

Zweitprüfer: Prof. Dr.-Ing. Harald Strating

Abgabefrist: 16.10.2025

Danksagung

Zuerst möchte ich mich bei meinen Betreuern Prof. Dr. rer. nat. Roland Berger und Prof. Dr.-Ing. Harald Strating bedanken. Ich bedanke mich für stets konstruktive Kritik sowie für einen angenehmen und lockeren Umgang miteinander. Zudem möchte ich mich dafür bedanken, dass sie als Prüfer für diese Arbeit zur Verfügung stehen.

Weiterführend möchte ich mich bei Herrn Dipl. Phys. Michael Kahnt bedanken, der die Idee zu dieser Arbeit hatte. Herr Kahnt unterstützte mich bei der Erstellung dieser Arbeit enorm, indem er mir sowohl bei didaktischen als auch fachlichen Fragen zur Seite stand. Herr Kahnt war zudem maßgeblich an einigen der in dieser Arbeit gezeigten Ideen beteiligt.

Ein besonderer Dank gebührt dem Phys. Tech. A. Daniel Schwarz. Daniel pflegte vom ersten Tag an einen offenen und freundschaftlichen Umgang und unterstützte mich bei allem Erdenklichen. Seine Unterstützung reichte von der Materialbeschaffung über die Durchführung von 3D-Drucken bis hin zur Hilfestellung bei Messaufbauten.

Nun möchte ich mich bei Herrn Florian Diek bedanken, der für die Prüfung der Nachbaubarkeit zur Verfügung stand. Herr Diek ist Lehrkraft am Graf-Adolf-Gymnasium Tecklenburg und opferte Teile seiner Freizeit, um das Energiefahrrad nachzubauen. Der Nachbau hat viele wichtige Informationen hervorgebracht und stellt somit einen bedeutenden Teil dieser Arbeit dar.

Ich möchte mich auch bei meinem Onkel Rudolf Grunden bedanken, der mir bei der sprachlichen Ausgestaltung dieser Arbeit half. Durch sein orthografisches Talent und grammatikalisches Geschick machte er mich auf einige sprachliche Schwierigkeiten aufmerksam. So sorgte er für eine gute Leserlichkeit und orthographische Schärfe.

Als nächstes möchte ich meinem Bruder Patrick Krause danken. Als Bruder und als Dipl.-Ing. für Elektrotechnik hatte er stets die richtige Antwort für mich. Egal ob als Freund oder als Fachberater, mein Bruder stand mir stets zur Seite.

Ganz besonders möchte ich auch meiner Freundin danken. Sie unterstützt mich bereits seit vielen Jahren und ist in allen Lebenslagen eine große Stütze. Während der gesamten Bearbeitungszeit dieser Arbeit zeigte sie stets Verständnis für lange und anstrengende Arbeitsphasen. Für die damit verbundenen Einschränkungen zeigte sie stets Einsicht. Ihre Geduld und ihr Zuspruch halfen mir bei der Erstellung dieser Arbeit. In schwierigen Zeiten sorgte ihr Glaube an mich für neue Motivation.

Ich danke auch meinen Eltern, die mir jederzeit emotionale und finanzielle Unterstützung geben. Ihre Ermutigungen und Hilfen haben maßgeblich dazu beigetragen, meine beruflichen und privaten Ziele verfolgen zu können. Ohne ihren Support wäre es sicher nicht möglich gewesen, diesen Weg zu beschreiten. Mit ihrer Unterstützung haben meine Eltern großen Anteil am Erfolg dieser Arbeit.

Abschließend möchte ich mich bei meinen Freunden und Kommilitonen bedanken. Durch ihren unglaublichen emotionalen Rückhalt sorgten meine Freunde dafür, nie das Ziel aus den Augen zu verlieren. Während arbeitsintensiver Phasen schafften meine Freunde und Kommilitonen es, mich abzulenken. So konnte ich Kraft für neue Herausforderungen tanken.

Allen, die mich während der Erstellung dieser Arbeit unterstützt haben, möchte ich nun noch einmal herzlichen Dank aussprechen. Diese Arbeit ist nicht nur Ergebnis meiner Bemühungen, sondern Ausdruck des Rückhalts der Menschen in meinem Umfeld. Danke!

Kevin Krause

Osnabrück den 13.10.2025

Kurzfassung

„Mach das Licht aus, wir müssen Strom sparen“. Diesen Satz habe ich – und wahrscheinlich viele andere auch – häufiger als Kind gehört. Leider steckt in diesem Satz neben der pädagogischen Intention ein fachliches und gleichzeitig fachdidaktisches Problem. In der Alltagssprache werden die Begriffe „Strom“ und „Elektrische-Energie“ häufig synonym verwendet. Selbst in vermeintlich seriösen Zeitungen werden die Begriffe „Strom“ und „Energie“ im gleichen Kontext verwendet.

Viele Schülerinnen und Schüler kommen unter anderem aufgrund dieser unpräzisen Alltagssprache mit Präkonzepten – sogenannten Schülervorstellungen – in den Elektrikunterricht. Diese Fehlvorstellungen zu beseitigen und ein Gefühl für die Unterschiedlichkeit von Alltagssprache und Fachsprache zu vermitteln sind Ziel des Elektrikunterrichts der Sekundarstufe I. Besonders die Thematisierung der energieübertragenden Funktion elektrischer Kreisläufe steht im Focus.

Ein Unterrichtskonzept von Heinz Muckenfuss und Adolf Walz setzt an dieser Stelle an und geht „neue Wege im Elektrikunterricht“. Während einige Schulbücher die Elektrizitätslehre mit der Elektrostatik oder der elektrischen Spannung einführen, setzen Muckenfuss und Walz auf den Zugang über die energieübertragende Funktion elektrischer Stromkreise sowie das Erleben von Energie am eigenen Leib. Hierzu verwenden Muckenfuss und Walz häufig handgetriebene Generatoren, um elektrische Energie erfahrbar zu machen.

Da diese handgetriebenen Generatoren nur für geringe Leistungen ausgelegt sind, wäre es wünschenswert, einen fußgetriebenen Generator zu entwickeln, mit dem größere Leistungen und Energiemengen erfahrbar gemacht werden können. Die Entwicklung und Erprobung eines solchen „Energiefahrrades“ ist neben der fachdidaktischen Einordnung Kern dieser Arbeit. Um Schulen mit geringen finanziellen Mitteln den Zugang zu einem solchen Energiefahrrad zu ermöglichen, soll das Energiefahrrad möglichst einfach und kostengünstig herzustellen sein. Um die Wahrscheinlichkeit eines Nachbaus zu erhöhen, ist ein Nachbaukonzept ebenfalls Teil dieser Arbeit.

I. Inhalt

I. Inhalt.....	I
II. Abbildungsverzeichnis	III
III. Tabellenverzeichnis	VIII
1 Einleitung	1
1.1 Einführung in die Thematik	1
1.2 Ausgangssituation	2
1.3 Ziele und Aufgabenstellung	3
1.4 Projektumfeld und Zielgruppen	5
1.5 Aufbau der Arbeit.....	6
2 Didaktische Aspekte.....	7
2.1 Didaktische Hürden im Elektrounterricht	7
2.1.1 Problem der Motivation und Sinnhaftigkeit	7
2.1.2 Stromverbrauchsvorstellung und unscharfe Semantik	8
2.2 Curriculare Leitlinie Energie	9
2.3 Unterrichtskonzept von Muckenfuss und Walz	11
2.3.1 Energieübertragende Funktion elektrischer Stromkreise.....	13
2.3.2 Energieumsätze erfahrbar machen.....	15
2.3.3 Differenzierung von Energiestrom und Elektronenstrom	17
2.3.4 Definition der Spannung.....	20
2.4 Einbindung in ein Konzept zur Bildung für nachhaltige Entwicklung.....	23
3 Technische Grundlagen und Analyse	27
3.1 Anforderungen und Betriebsbedingungen	27
3.2 Fahrradhalterung	30
3.3 Generator	31
3.4 Auswahl der mechanischen Kopplung	36
3.5 Wechselrichter.....	37
4 Konzeptionierung des Energiefahrrades	39
4.1 Mechanische Konstruktion	39
4.1.1 Lichtmaschinenhalterung	39
4.1.2 Konstruktion der Abstandshalter.....	44
4.1.3 Konstruktion der Laufrolle	46
4.1.4 Konstruktion der Spannvorrichtung.....	52
4.1.5 Sicherheit der mechanischen Konstruktion	53
4.2 Elektrotechnische Konzeptionierung	55
4.2.1 Entwicklung des Betriebsstromkreises	55
4.2.1 Entwicklung des Vorerregerstromkreises	59
4.2.2 Einbindung von Messpunkten	62
4.2.3 Entwicklung eines Strommesswiderstandes.....	65
4.2.4 Auslegung und Auswahl der elektrotechnischen Komponenten im Betriebsstromkreis	68
4.2.5 Auswahl von Messbuchsen und Anschlüssen im Vorerregerstromkreis:.....	77
4.2.1 Auslegung und Auswahl der elektrotechnischen Komponenten im Vorerregerstromkreis.....	78
4.3 Konstruktion eines Gehäuses	84
4.3.1 Elektrobox	84
4.3.2 Shunt-Gehäuse	88

5	Praktische Umsetzung des Energiefahrrades (Nachbaukonzept)	91
5.1	Mechanische Umsetzung	91
5.2	Wechsel der Laufrolle	99
5.3	Elektrotechnische Umsetzung	102
5.4	Verbindung der Elektrobox mit der Lichtmaschine	112
5.5	Anschluss des Wechselrichters	113
5.6	Umsetzung des Strommesswiderstands	114
6	Erprobung und Analyse	121
6.1	Funktionstests und ihre Ergebnisse	121
6.1.1	Mechanische Konstruktion	121
6.1.2	Elektrotechnische Konstruktion	123
6.2	Wirkungsgrad	132
6.3	Schülerversuche	137
6.3.1	Energie erfahrbar machen	138
6.3.2	Definition der Spannung nach Muckenfuss und Walz	141
6.3.3	Wasser kochen mit dem Energiefahrrad	143
6.4	Kostenanalyse	144
6.5	Prüfung der Nachbaubarkeit	147
7	Fazit	151
7.1	Zusammenfassung der Ergebnisse	151
7.2	Ausblick und weitere Schritte	154
IV.	Literatur	IX
V.	Anhänge	XIII

II. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Struktur der Unterrichtseinheiten nach Muckenfuss und Walz, entnommen aus [1, S. 69]	12
Abbildung 2-2: Strukturierung der Elektrizitätsfelder, nach [1, S. 15]	13
Abbildung 2-3: Darstellung des idealisierten Energieflusses vom menschlichen Körper, über das Fahrrad und das Energiefahrrad zum Betriebsmittel	16
Abbildung 2-4: Links: Vergleich elektrischer Energieübertragung mit mechanischer Energieübertragung, entnommen aus [28]. Rechts: Prinzipdarstellung von Energieflüssen mittels zirkulierender Mittel, nach [1, S. 73]	18
Abbildung 2-5: (rechts) P/I -Diagramm der Heizplatte, ergänzt mit Glühlampe und Haarföhn, entnommen aus [1, S. 140]	22
Abbildung 3-1: Ultrasport Fahrradrollentrainer mit Zubehör	30
Abbildung 3-2: Prinzipdarstellung einer KFZ-Lichtmaschine, entnommen aus [43] © Verlag Europa-Lehrmittel	32
Abbildung 3-3: Explosionszeichnung eines Klauenpolläufers, entnommen aus [42] (links); Foto eines Klauenpolläufers (rechts)	33
Abbildung 3-4: Schaltbild einer Drehstromlichtmaschine mit externen Regler, entnommen aus [43] © Verlag Europa-Lehrmittel	34
Abbildung 3-5: Fotos der vorhandenen Lichtmaschinen mit Typenbezeichnung	36
Abbildung 4-1: Gerendertes CAD-Modell des Rollentrainers ohne Bremsrolle	40
Abbildung 4-2: Gerendertes CAD-Modell einer Lichtmaschine	40
Abbildung 4-3: Nahaufnahme der Bremsrollenhalterung des Rollentrainers (KI bearbeitetes Foto)	41
Abbildung 4-4: Gerendertes CAD-Modell des Rollentrainers mit vergrößerter Bohrung für die Schwenkachse (Gewindestange) und eingefügter M10-Gewindestange in 440 mm Länge	42
Abbildung 4-5: Gerendertes CAD-Modell des Rollentrainers mit M10-Gewindestange und Lichtmaschine, 28-Zoll-Fahrradreifen	42
Abbildung 4-6: Gerendertes CAD-Modell des Rollentrainers mit M10-Gewindestange, angelegter Lichtmaschine und 28-Zoll-Fahrradreifen zur Prüfung des Schwenkradius	43
Abbildung 4-7: Gerendertes CAD-Modell des Rollentrainers mit M10-Gewindestange, Lichtmaschine, 28-Zoll-Fahrradreifen und Befestigungselementen	44
Abbildung 4-8: Gerendertes CAD-Modell des Abstandshalters	45
Abbildung 4-9: Gerendertes CAD-Modell des Rollentrainers mit M10-Gewindestange, Lichtmaschine, 28-Zoll-Fahrradreifen und Abstandshaltern	45
Abbildung 4-10: Maximal möglicher Generatorstrom einer KFZ-Lichtmaschine aufgetragen über die Generatordrehzahl, entnommen aus [48]	46

Abbildung 4-11: Gerendertes CAD-Modell des Rollentrainers mit M10-Gewindestange, Lichtmaschine, 28-Zoll-Fahrradreifen, Abstandshaltern und Laufrolle (links)	51
Abbildung 4-12: Kennzeichnung und Bemaßung des 8,5-mm-Bohrloches für die Ringmutter am Rollentrainer	52
Abbildung 4-13: Gerendertes CAD-Modell des Rollentrainers mit M10-Gewindestange, Lichtmaschine, 28-Zoll-Fahrradreifen, Abstandshaltern und Ringmuttern zu Befestigung des Seilspanners	53
Abbildung 4-14: Gerendertes CAD-Modell der vollständigen mechanischen Konstruktion ohne Seilspanner	54
Abbildung 4-15: Schaltplan einer Drehstromlichtmaschine mit allen gängigen Kontaktbezeichnungen, Anschlüssen sowie dem Stromfluss im Betriebsstromkreis (bei angeschlossenem Betriebsmittel)	56
Abbildung 4-16: Schaltplan einer Drehstromlichtmaschine mit allen gängigen Kontaktbezeichnungen, Anschlüssen (rechts), Verbindern (Mitte) und angedeuteter Elektrobox (links)	57
Abbildung 4-17: Oszillogramm der Ausgangsspannung einer Mitsubishi A1T25097 Lichtmaschine im Leerlauf und im batterielosen Betrieb	57
Abbildung 4-18: Schaltplan der Elektrobox mit Sicherung, Kondensator und TVS-Diode (links) mit Verbinder zur Lichtmaschine (Mitte) sowie angedeuteter Lichtmaschine (rechts)	59
Abbildung 4-19: Vorerregerstromkreis bei stillstehender Lichtmaschine und eingeschaltetem Erregerschalter S1, nach [49, S. 122]	60
Abbildung 4-20: Erregerstromkreis bei Selbsterregung, nach [41, S. 122]	61
Abbildung 4-21: Schaltplan der Elektrobox Position mit Messbuchsen, angeschlossenen Messgeräten und Betriebsmittel	64
Abbildung 4-22: Schaltplan der Elektrobox mit angeschlossenem Betriebsmittel und Shunt zur Strommessung über ein Voltmeter	68
Abbildung 4-23: Lichtmaschinenanschlusskabel mit Hochstromstecker Pos. 13 (links); Hochstromsteckdose zum Gehäuseeinbau Pos. 14 (rechts)	70
Abbildung 4-24: Auslösecharakteristik von KFZ-Schmelzsicherungen zwischen 2 und 40 A, entnommen aus [58]	71
Abbildung 4-25: Leitungen, Anschlüsse, Klemmen und Sicherungshalter für den Betriebsstromkreis mit Positionsbezeichnungen	72
Abbildung 4-26: Schaltbild einer TVS-Diode (oben); Foto einer 1,5KE 18A TVS-Diode (unten)	73
Abbildung 4-27: Strom- Spannungskurve einer 1,5 KE-ATVS-Diode, entnommen aus [60] .	74
Abbildung 4-28: Glättungskondensator inkl. Anschlussschrauben, Unterlegscheiben, Federringen und M5-Kabelschuhen sowie Positionsbezeichnungen	77

Abbildung 4-29: SEB 2600 G M4 Sicherheits-Laborbuchse in verschiedenen Kontaktierungen und Farben mit Positionsbezeichnungen	78
Abbildung 4-30: YU-NP1,2-12-Batterie mit 4,8 mm-Faston-Adaptoren auf 6,3 mm Flachsteckhülse	80
Abbildung 4-31: Vergleich der Sicherung und Sicherungshalter des Betriebsstromkreises mit der des Vorerregerstromkreises sowie dessen Positionsnummern.....	81
Abbildung 4-32: Verbindungs- und Verdrahtungsmaterial für den Vorerregerstromkreis mit Positionsbezeichnung	82
Abbildung 4-33: Zwei MAR 1552.3112 Schalter mit (rechts) und ohne (links) gesteckten Flachsteckhülsen sowie mit Positionsbezeichnung.....	83
Abbildung 4-34: HELLA-2AA-008-592-031-Kontrollleuchte und 12V/2W-Leuchtmittel mit Positionsbezeichnung	84
Abbildung 4-35: Gerendertes CAD-Modell des Gehäuses der Elektrobox.....	85
Abbildung 4-36: Gerendertes CAD-Modell des Gehäuses der Elektrobox (links); Gerendertes CAD-Modell der Batterieklemme (rechts).	86
Abbildung 4-37: Gerendertes CAD-Modell des Gehäusedeckels in der Version "Deckel extrudiert"	87
Abbildung 4-38: Vergleich des 3D-gedruckten Deckels in der Version "eingelassen" (links) mit der Version "extrudiert" (rechts).....	88
Abbildung 4-39: Gerendertes CAD-Modell des Shuntgehäuses (links); Foto des Kühlkörpers (rechts).....	89
Abbildung 4-40: Gerendertes CAD-Modell des Deckels für das Shunt-Gehäuse	89
Abbildung 5-1: Rollentrainer mit demontierter Bremsrolle und demontierter Spannvorrichtung	92
Abbildung 5-2: Ablängen der Gewindestange	93
Abbildung 5-3: Einführen der Gewindestange in den U-Stahl.....	93
Abbildung 5-4: Zentrierung der Gewindestange am Rollentrainer	94
Abbildung 5-5: Befestigung der Gewindestange am Rollentrainer.....	94
Abbildung 5-6: Verspannen der Muttern am U-Stahl.....	95
Abbildung 5-7: Erkennen der Drehrichtung von Kfz-Lichtmaschinen anhand des Lüfterrades; Beispiel Rechtslauf (links); Beide Drehrichtungen (Mitte); Umkehrlüfter für Rechtslauf (rechts); entnommen aus [42, S. 22].....	95
Abbildung 5-8: Montage der Lichtmaschine auf der Gewindestange	96
Abbildung 5-9: Montage der Abstandshalter	96
Abbildung 5-10: Montage der Ringmutter an der Lichtmaschine	97
Abbildung 5-11: Bohrloch für Ringmutter im Holm des Rollentrainers	97
Abbildung 5-12: Befestigung der Ringmutter am Holm des Rollentrainers	98
Abbildung 5-13: Fertige mechanische Konstruktion des Energiefahrrades.....	99

Abbildung 5-14: Demontage der Riemenscheibe	100
Abbildung 5-15: Messen des Wellendurchmessers	101
Abbildung 5-16: Montierte 3D-gedruckte Laufrolle	101
Abbildung 5-17: Einschmelzen der Einschmelzgewinde.....	102
Abbildung 5-18: Elektrobox mit montierter Batterie und montiertem Kondensator	103
Abbildung 5-19: Elektrobox mit Batterie, Batterieklemme und Anderson-Steckdosen	103
Abbildung 5-20: Einlöten der Erregerdioden.....	104
Abbildung 5-21: Elektrobox mit Batterie, Batterieklemme, Kondensator, Anderson- Steckdosen und Anschlüssen des Vorerregerstromkreises	104
Abbildung 5-22: Deckel mit montierten Komponenten von vorne (oben) und von hinten (unten).....	105
Abbildung 5-23: Gelötete Anderson Kabelschuhe	106
Abbildung 5-24: Montage der Anderson-Stecker, entnommen aus [67].....	106
Abbildung 5-25: Crimpen von isolierten Kabelschuhen	107
Abbildung 5-26: Anschlussmöglichkeiten der TVS-Schutzdiode; Bedrahtete Diode mit Schrumpfschlauch (links); Schutzdiode (Mitte); Schutzdiode in zwei Leybold- Klemmsteckern (rechts).....	109
Abbildung 5-27: Explosionszeichnung der Elektrobox im Querformat; Achtung! Leitungslängen entsprechen nicht der Realität!	110
Abbildung 5-28: Schaltplan der Elektrobox im Querformat	111
Abbildung 5-29: Anschlüsse an der Lichtmaschine herstellen	112
Abbildung 5-30: Anschluss des Wechselrichters	113
Abbildung 5-31: Markierung des Bohrlochs am Kühlkörper	114
Abbildung 5-32: Bohren des Bohrlochs in den Kühlkörper	115
Abbildung 5-33: Montage des Kühlkörpers und der 4 mm-Bananenstecker im Shuntgehäuse	115
Abbildung 5-34: Montage der Sicherheitsmessbuchsen in das Shunt-Gehäuse und einschmelzen der Gewinde	116
Abbildung 5-35: Löten der Einzeladern an den Shunt	116
Abbildung 5-36: Montage des Shunts im Gehäuse bzw. am Kühlkörper	117
Abbildung 5-37: Verbinden M3-Ringkabelschuhe mit den Bananensteckern	117
Abbildung 5-38: Löten der Einzeladern an die Sicherheits-Laborbuchsen.....	118
Abbildung 5-39: In die Elektrobox eingesteckter Shunt	118
Abbildung 6-1: Foto vom Gummiabrieb mit gummierter Keilrippenriemenscheibe als Laufrolle	122
Abbildung 6-2: Foto der 3D-gedruckten Laufrolle nach zahlreichen Versuchen	123
Abbildung 6-3: Versuchsaufbau; Überprüfung des Kondensators (vereinfachte Darstellung ohne Lichtmaschine)	124

Abbildung 6-4: Oszillogramm zur Überprüfung des Kondensators	125
Abbildung 6-5: Versuchsaufbau; Überprüfung des TVS-Diode (vereinfachte Darstellung ohne Lichtmaschine)	127
Abbildung 6-6: Oszillogramm zur Überprüfung der TVS-Schutzdiode	128
Abbildung 6-7: Widerstandsmessung an einer defekten TVS-Diode in Sperrrichtung	130
Abbildung 6-8: Versuchsaufbau zur Bestimmung der maximal möglichen Ausgangsspannung einer defekten unregelmäßigen Lichtmaschine	131
Abbildung 6-9: E-Bike Display bei ausgeschalteter Unterstützung und im Stillstand nach einer Fahrt.....	132
Abbildung 6-10: Versuchsaufbau zur Bestimmung des Wirkungsgrades.....	134
Abbildung 6-11: Energieflussdiagramm des Energiefahrrades mit Verlustleistungen bei einem 230V/100W-Leuchtmittel.....	137
Abbildung 6-12: Versuchsaufbau zum Erfahrbarmachen von elektrischer Energie.....	139
Abbildung 6-13: Energieströme unterschiedlicher Leuchtmittel, aufgetragen über den Elektronenstrom hinter und vor dem Wechselrichter	142
Abbildung 6-14: Versuchsaufbau zum Kochen von 250 ml Wasser	144
Abbildung 6-15: Betrieb einer unregelmäßigen Lichtmaschine am Zubehör des Oekotrainers	147

III. Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Messwerte für Elektronen- und Energiestrom einer Heizplatte, entnommen aus [1, S. 140].....	21
Tabelle 3-1: Mögliche, herstellertypische Kontaktbezeichnungen an Lichtmaschinen und ihre Funktion, nach [44].....	35
Tabelle 4-1: Darstellung möglicher Laufrollen-Varianten mit deren Einsatzbereich, Bildern, Durchmessern und minimal-, sowie maximal möglichen Drehzahlen.....	50
Tabelle 4-2: Höhenbereich des Gehäusedeckels für mehrfarbigen 3D-Druck	87
Tabelle 6-1: Oszilloskop Einstellungen zur Überprüfung des Kondensators	125
Tabelle 6-2: Tabelle 6-3: Oszilloskop Einstellungen zur Überprüfung des Kondensators ...	127
Tabelle 6-4: Messergebnisse zur Bestimmung des Wirkungsgrades des Energiefahrrades	134
Tabelle 6-5: Berechnete Wirkungsgrade für das Energiefahrrad, den Wechselrichter und beide zusammen für unterschiedlichen Anschlussleistungen	135
Tabelle 6-6: Berechnete Wirkungsgrade für das Energiefahrrad, den Oekotrainer und beide zusammen für unterschiedliche Anschlussleistungen	136
Tabelle 6-7: Für unterschiedliche Leuchtmittel aufgenommene Energie- und Elektronenströme	141
Tabelle 6-8: Kostenrechnung für das Energiefahrrad	145
Tabelle 6-9: Kostenrechnung für den Oekotrainer.....	146

1 Einleitung

In diesem Abschnitt wird in die Thematik „Kostengünstiges Energiefahrrad für den Schulunterricht – Entwicklung, Prototyping und Erstellung eines Nachbaukonzepts“ eingeführt. Die Hintergründe des Themas werden erläutert und die Ausgangssituation beschrieben. Darauf aufbauend wird eine Zielsetzung definiert. Die Zielgruppen werden genannt und die Struktur der vorliegenden Arbeit beschrieben.

1.1 Einführung in die Thematik

Es soll ein fußgetriebener Generator entwickelt werden, mit dem es möglich ist, einige Teile des Unterrichtskonzepts „Neue Wege im Elektrikunterricht“, nach Heinz Muckenfuss und Adolf Walz (1997) mit einem leistungsfähigeren Generator zu ergänzen. Das Unterrichtskonzept setzt auf eine Leitlinie, in der Handlungsorientierung und die energieübertragende Funktion elektrischer Stromkreise im Mittelpunkt stehen [1, S. 62-64]. Zudem soll es für Zwecke der Bildung für nachhaltige Entwicklung im Bereich der Energie dienen.

Eine „Leitlinie Energie“ wird unter anderem durch die curricularen Vorgaben zum naturwissenschaftlichen Unterricht der Sekundarstufe I des Landes Niedersachsen gefordert. Die Leitlinie Energie wird sowohl in der Haupt-, Ober- und Realschule als auch im Gymnasium gefordert, vgl. [2], [3], [4], [5]. Auch im Niedersächsischen Kerncurriculum Physik, in der Sekundarstufe II, findet sich ein Anschluss an diese Leitidee [6, S. 10].

Zur unterrichtlichen Umsetzung dieser Leitidee setzt das elfstufige Unterrichtskonzept von Muckenfuss und Walz immer wieder darauf, Energieumsätze physiologisch erfahrbar zu machen. Dazu werden in einigen Unterrichtsteilen handgetriebene Generatoren – sogenannte DynaMots– verwendet. Diese Generatoren ermöglichen es den Schülerinnen und Schülern, die elektrische Energie für Versuche selbst zu erzeugen. Dadurch werden Zusammenhänge physiologisch erlebbar gemacht, die sich sonst hinter einer Batterie, einem Netzgerät oder einer Steckdose verbergen. Die Generatoren ermöglichen im Handbetrieb eine Spannung 8 V, diese ist jedoch drehzahlabhängig. Bei leicht zu erreichenden Drehzahlen von 2 rpm liegt die Spannung zwischen 3 und 4 V. Der Generator ermöglicht handgetrieben eine Leistungsabgabe von 30 W, der physiologisch gut wahrnehmbare Arbeitsbereich liegt jedoch eher zwischen 4 W und 20 W. Als elektrische Betriebsmittel eignen sich daher hauptsächlich Glühlampen der 4 V Serie mit E10 Fassung oder weitere Dynamots im motorischen Betrieb [1, S. 65-67].

Trotz der Maxime einer ausgeprägten handlungsorientierten methodischen Gestaltung des Unterrichtskonzepts müssen einige Versuche als Lehrerexperiment durchgeführt werden, vgl. [1, S. 59][1, S. 142]. So kann ein Experimentieren an Netzspannung notwendig werden, wenn größere Leistungen an konstanter Spannung untersucht werden sollen. Das Arbeiten an Netzspannung ist allerdings laut „Richtlinien zur Sicherheit im Unterricht“ (GUV-SI 8070) bis

einschließlich der 10. Jahrgangsstufe für Schüler nicht erlaubt. Weiterführend bedeutet dies, dass beim Experimentieren mit nicht berührungsgefährlichen Spannungen kleiner 25 V AC/ 60 V DC gearbeitet werden sollte. Kleinspannungen oberhalb dieser Grenzen dürfen 50 V AC/120 V DC nicht überschreiten und müssen über Basisschutz-Isolierung verfügen [7].

Um dennoch größere Leistungen an konstanter Spannung erfahrbar zu machen und die Handlungsorientierung der Unterrichtsreihe aufrecht zu erhalten, kann es sinnvoll sein, einen leistungsfähigeren Kleinspannungs-Generator mit konstanter Ausgangsspannung zu entwickeln. Da die Leistungsgrenzen der Hände offenbar bei 30 W erreicht werden [1, S. 66], liegt der Gedanke nahe, einen fußgetriebenen Generator zu entwickeln. Über die Beine könnten Energieumsätze (Dauerleistung) von 100 W bis 200 W ermöglicht werden. Kurzzeitig können sogar Spitzenleistungen von 500 W bis 700 W erzielt werden [1, S. 63]. Für die weiteren Entwicklungsschritte wird daher eine Nennleistung von 300 W angenommen, um auch trainierten Personen die Möglichkeit zu geben ihre Leistungsfähigkeit auszutesten.

Da einfache Fahrradrollentrainer online bereits ab etwa 50 Euro erhältlich sind und 77 % der deutschen Bevölkerung Fahrräder nutzen [8], liegt der Gedanken nahe, den Generator über ein Fahrrad zu betreiben. Die Kombination aus Fahrradrollentrainer und Generator wird daher im folgenden „Energiefahrrad“ genannt.

1.2 Ausgangssituation

Die Idee, einen fußgetriebenen und vielleicht sogar fahrradgetriebenen Generator zu entwickeln, ist gewiss nicht neu. Im Internet kursieren einige Videos und Artikel, die den Bau eines solchen Generators zeigen bzw. beschreiben. Einige dieser Generatoren arbeiten mit KFZ-Lichtmaschinen, andere verwenden Gleichstrommotoren und wieder andere verwenden bürstenlose Gleichstrommaschinen. Häufig ist der Bau jedoch mit erhöhtem Kostenaufwand oder komplexen mechanischen Konstruktionen verbunden. Nicht selten erfordern diese Konstruktionen mit Schweiß-, Dreh- und Fräsarbeiten. Teilweise werden Batterien zur Energiespeicherung verwendet, wodurch der Erfahrungsbereich im Sinne des Unterrichtskonzepts von Muckenfuß und Walz an Wirkung verliert. Die „Anstrengung“, mit der ein gewisser Energiestrom verbunden ist, versteckt sich dadurch wieder teilweise hinter der Batterie.

In einem Projekt des Mitmach-Fonds Sachsen wird ein Fahrrad-Narbenmotor als Generator verwendet, um elektrische Energie zu erzeugen. Dieses Projekt wurde bereits in einem schulischen Umfeld durchgeführt. Schülerinnen und Schüler der 10. Klasse der Oberschule des Evangelischen Schulzentrums Muldental bauten den Fahrradgenerator selbstständig unter der Anleitung von Elektrotechnikstudenten nach [9]. Zusätzlich wurde ein Video erstellt, in dem der Bau erläutert wird. Zum Zeitpunkt 2.23 min ist zu sehen, wie bei bereits moderaten Drehzahlen –119,2 V DC an den Klemmen des Gleichrichters anliegen [10]. Bei etwas höheren

Drehzahlen könnte es hierbei zu gefährlichen Berührungsspannungen über 50 V AC/120 V DC kommen. Dies liegt mit großer Wahrscheinlichkeit an der hohen Übersetzung des im Video gezeigten Aufbaus und der damit verbundenen hohen Generator Drehzahl. Ein Nachbau des Projekts im schulischen Umfeld ist daher nicht zu empfehlen.

Neben einigen Nachbaukonzepten sind auch fertige Energiefahrräder auf dem Markt erhältlich. Auch hier setzen die Hersteller auf unterschiedliche Konzepte. Der sogenannte Oekotrainer von Tim Baudermann setzt auf einen bürstenlosen Gleichstrommotor [11]. Die Fahrradsimulatoren von Bernhard Lang – Sportmarketing & Eventsupport – setzen augenscheinlich auf KFZ-Lichtmaschinen [12]. Wieder andere Hersteller verwenden DC-Gleichstrommotoren.

Die genannten, käuflich zu erwerbenden Produkte sind keineswegs schlecht. Dennoch eignen sie sich mehr oder weniger für den Schulunterricht. Teilweise sind die Geräte sehr kostenintensiv in der Anschaffung, zu komplex oder wie bei Bernhard Lang Sportmarketing & Eventsupport nur zu mieten [12]. Zudem sind alle Geräte weniger für den Elektrownunterricht geeignet, da sie über keine Messstellen für Strom und Spannung verfügen. Beim Oekotrainer kann ein PowerAnalyzer hinzugekauft werden. Dieser PowerAnalyzer ermöglicht die Analyse elektrotechnischer Daten per Bluetooth, jedoch nicht den Anschluss an die den Schülerinnen und Schülern bekannten Messgeräte, vgl. [13]. Der Anschluss bekannter Messgeräte wie z.B. einfacher Drehspulen- und Dreheisenmesswerke oder Multimeter ist allerdings für das Unterrichtskonzept von Muckenfuss und Walz essenziell. Zudem kommen mit dem PowerAnalyzer weitere Kosten auf die Schule hinzu, wenn der Oekotrainer im Unterricht verwendet werden soll, obwohl die meisten Schulen bereits über einfache Strom- und Spannungsmessgeräte verfügen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Markt eine große Auswahl an Energiefahrrädern und Nachbuanleitungen bereitstellt, diese weisen jedoch Schwächen auf, sofern sie im Unterricht verwendet werden sollen. Die Gründe hierfür können technisch, didaktisch oder finanziell sein.

Im weiteren Verlauf der Arbeit wird das eigenständig entwickelte Energiefahrrad ausschließlich mit dem Oekotrainer von Tim Baudermann verglichen, da dieser im Rahmen der Arbeit zugänglich ist. Allgemeingültige technische Betrachtungen, für die ein Modell nicht notwendig ist, sind jedoch nicht ausgeschlossen.

1.3 Ziele und Aufgabenstellung

Dynamots machen erfahrbar, wie elektrischer Strom, Spannung und Energieflüsse zusammenhängen. Sie ermöglichen jedoch eine Leistung von nur 30 W. Zudem ist ihre Spannung abhängig von der Drehzahl, vgl. Abschnitt 1.1. Diese drehzahlabhängige Spannung ist für einige Unterrichtsteile von Muckenfuss und Walz sogar notwendig [1, S. 119-126],

andere Unterrichtsteile benötigen wiederum Konstantspannungsquellen [1, S. 137-150]. Ein Energiefahrrad größerer Leistung und mit konstanter Ausgangsspannung wäre daher wünschenswert.

Handelsübliche Energiefahrräder und Nachbaukonzepte kommen mit technischen, finanziellen oder didaktischen Problemen einher, vgl. Abschnitt 1.2.

Es soll daher ein kostengünstiges Energiefahrrad entwickelt, gefertigt und getestet werden, das es ermöglicht, mithilfe eines handelsüblichen Fahrrades elektrische Energie zu erzeugen. Dieses Energiefahrrad soll bewirken, Schülerin und Schülern ein Gefühl für elektrische Leistung zu verschaffen und eine Alternative zum DynaMot und klassischen Ergometer darstellen. Das Energiefahrrad soll:

- sich gut in Teile des Unterrichtskonzepts von Muckenfuss und Walz integrieren
- eine konstante (Drehzahlunabhängige) Ausgangsspannung liefern
 - ggf. über eine Umschaltmöglichkeit für drehzahlabhängige Spannung verfügen
- Leistungen bis zu 300 W ermöglichen
- Kostengünstiger als handelsübliche Energiefahrräder sein
- mit moderaten Mitteln nachbaubar sein
- den Anschluss an einen 12 V DC/230 V AC Wechselrichter ermöglichen
- einfache Anschlussmöglichkeiten für handelsübliche Messgeräte besitzen
- sicher sein

Als Grundlage für sicherheitstechnische Betrachtungen wird die Richtlinie zur Sicherheit im Unterricht (RiSU-KMK) sowie die Information „Sicher experimentieren mit elektrischer Energie in Schulen“ (BG/GUV-SI 8040) herangezogen vgl. [14], [7].

Neben den genannten Zielen, die das Energiefahrrad selbst erfüllen soll, wird im Laufe dieser Arbeit gezeigt, wie ein Nachbau realisierbar ist und an welchen Scheidepunkten auf welche technischen Details zu achten ist. Dieser Teil stellt das im Titel bezeichnete „Nachbaukonzept“ dar.

Zusätzlich soll eine didaktische Einordnung des Energiefahrrades in das o.g. Unterrichtskonzept stattfinden. Die didaktische Einordnung dient der Motivation zu einem Nachbau sowie der Beschreibung, wie sich das Energiefahrrad in das Unterrichtskonzept integrieren könnte. Nach dem das Energiefahrrad entwickelt wurde, sollen mögliche UnterrichtVSersuche für den Elektrikunterricht vorgestellt werden.

Das Gesamtziel ist es, Schulen den Nachbau eines Energiefahrrades zu ermöglichen. Ein Nachbau sollte deshalb möglichst ressourcenschonend, im Sinne der personellen und

finanziellen Mittel sein, um die Wahrscheinlichkeit eines Nachbaus zu erhöhen. Daraus lässt sich das extrahierte Ziel ableiten, Schülerinnen und Schülern den Zugang zu einem solchen Energiefahrrad zu ermöglichen, wodurch die Qualität verschiedener Unterrichtselemente erhöht werden kann. So könnte entsprechend Muckenfuss und Walz die Motivation zur Teilnahme am Elektrounterricht, erhöht werden, vgl. [1, S. 24-25].

Eine Detaillierte Beschreibung der Muss- Wunsch und Abgrenzungskriterien für die Entwicklung des Energiefahrrads ist im Anhang B zu finden. Es ist an dieser Stelle zu erwähnen, dass die Anforderungen aus der Aufgabenstellung abgeleitet worden sind und ebenfalls Teil dieser Arbeit sind.

1.4 Projektumfeld und Zielgruppen

Das Projekt „Energiefahrrad“ findet im Rahmen einer Masterarbeit an der Universität Osnabrück statt. Die Masterarbeit wird im Fachbereich 6 (Mathematik / Informatik / Physik), Am Institut für Physik, in der Arbeitsgruppe Physikdidaktik durchgeführt. Neben den Prüfenden Personen sind Herr Dipl. Phys. Michael Kahnt sowie Phys. Tech. A. Daniel Schwarz unterstützend an der Arbeit beteiligt. Herr Kahnt steht bei didaktischen und technischen Fragestellungen beratend zur Seite. Herr Schwarz, unterstützt bei Arbeiten im Labor.

Die Arbeit wird zum größten Teil in den Laboren der Arbeitsgruppe Physikdidaktik umgesetzt. Einige Arbeitsschritte sowie die schriftliche Ausgestaltung der Masterarbeit finden außerhalb der Labore statt.

Für die Fertigung und Beschaffung einzelner Bauteile steht die feinmechanische Werkstatt und die Werkstatt für Elektronik und Informationstechnik der Universität Osnabrück zur Verfügung.

Zielgruppe des Energiefahrrades sind Schülerinnen und Schüler der Sekundarstufe I und II, welche sich im naturwissenschaftlichen bzw. physikalischen Unterricht befinden. Weitere schulische Einsatzgebiete könnten sein:

- Der Technikunterricht
- Diverse Arbeitsgemeinschaften
- Projekte zur Bildung für nachhaltigen Entwicklung
- Tage der offenen Tür

Die Dokumentation (diese Arbeit) richtet sich hingegen eher an Lehrpersonal und Schulleiter. Lehrpersonal im naturwissenschaftlichen Sektor, welches an einem Nachbau interessiert ist, könnte von dieser Arbeit profitieren. Speziell mit dem Blick auf die Kosteneinsparungen gegenüber handelsüblichen Energiefahrrädern kann diese Arbeit punkten und die Zielgruppe vergrößern.

Schülerinnen und Schüler können von der Dokumentation profitieren, wenn sie selbst mit dem Nachbau des Energiefahrrades konfrontiert werden. Ein solcher von Schülerinnen und Schülern durchgeführter Nachbau könnte für Auszubildende im MINT-Bereich, für Klassen der Fachoberschule oder der gymnasialen Oberstufe in Frage kommen. Wird der Nachbau intensiv durch Fachlehrer unterstützt, wäre ein Nachbau, wie beim Projekt des Mitmach-Fonds Sachsen (vgl. [9]), in einer 10. Klasse denkbar.

1.5 Aufbau der Arbeit

Im folgenden Abschnitt (2 Didaktische Aspekte) werden zunächst didaktische Hürden des Elektrikunterrichts beleuchtet. Schülervorstellungen, Interessens- und Motivationsprobleme werden beschrieben. Darüber hinaus soll die in 1.1 erwähnte „Leitlinie Energie“ des Niedersächsischen Kerncurriculums dargestellt werden, um die Aktualität des Unterrichtskonzepts von Muckenfuss und Walz (1997) hervorzuheben. Die Wichtigen Aspekte des Unterrichtskonzepts von Muckenfuss und Walz werden skizziert. Hierbei wird regelmäßig auf die mögliche Integrierung des Energiefahrrades hingewiesen.

In den technischen Grundlagen und der Anforderungsanalyse (Abschnitt 3) werden die technischen Anforderungen auf Basis der in 1.3 vorgestellten Ziele analysiert. Die Auswahl des Generators wird getätigt und argumentativ begleitet. Die technischen Grundlagen des ausgewählten Generators werden beschrieben. Zusätzlich wird beschrieben, welche Möglichkeiten vorliegen, den Generator mechanisch an das Fahrrad zu koppeln und welche die sinnvollste ist. Weiterführend wird ein 12 V DC/230 V AC Wechselrichter ausgewählt.

Im weiteren Verlauf der Arbeit wird auf Basis der technischen und didaktischen Anforderungen ein Konzept entwickelt, auf Basis dessen das Energiefahrrad gebaut werden soll, vgl. Abschnitt 4. Die Konzeptionierung wird in mechanische und elektrotechnische Konstruktion unterschieden. Ein Gehäuse für die Elektronik (z.B. Messbuchsen) wird ebenfalls konstruiert.

Im Teil „Praktische Umsetzung des Energiefahrrades“ findet der Bau des Energiefahrrades statt. Dieser Teil stellt das im Titel beschriebene „Nachbaukonzept“ dar. Es wird hier gezeigt, wie und mit welchen Mitteln der Bau eines Energiefahrrades umsetzbar ist.

Im vorletzten Abschnitt (Kapitel 6) dieser Arbeit wird das Energiefahrrad getestet. Es wird überprüft, ob es die zuvor beschriebenen Anforderungen erfüllt und wie gut es dies tut. Werden Anforderungen nicht erfüllt, können ggf. Auswege aufgezeigt werden. Zudem sollen in diesem Kapitel mögliche Schülerversuche gezeigt werden, die mit dem Energiefahrrad durchgeführt werden können. Eine Kostenanalyse findet ebenfalls statt. Weiterführend soll die Komplexität eines Nachbaus für nicht elektrotechnische Fachkräfte abgeschätzt werden.

Abschließend wird eine Zusammenfassung gegeben und mögliche, weitere Entwicklungsschritte werden beschrieben.

2 Didaktische Aspekte

Im folgenden Abschnitt werden die didaktischen Aspekte, die für die Entwicklung des Energiefahrrades von Interesse sind, beschrieben. Dafür wird zunächst auf didaktische Hindernisse im Elektrounterrichteingegangen eingegangen.

2.1 Didaktische Hürden im Elektrounterricht

2.1.1 Problem der Motivation und Sinnhaftigkeit

Das Interesse an naturwissenschaftlichen Phänomenen und die Motivation zur aktiven Teilnahme am Sachunterricht ist in den Klassenstufen 5 und 6 noch recht groß. Diese Sachlage ändert sich jedoch bei vielen Schülerinnen und Schülern im Laufe der Sekundarstufe I. Viele Lernende wenden sich im Laufe der Schulzeit besonders von der Physik und Chemie ab. Unterrichtsinhalte werden häufig als zu schwierig und zu abstrakt empfunden [15, S. 3].

In der Physik scheint besonders die Elektrizitätslehre für die Unbeliebtheit des Faches maßgeblich zu sein [1, S. 11], [16, S. 5]. Zudem scheinen die in der Elektrizitätslehre gewonnenen Erkenntnisse und Sachstrukturen nur von kurzer Dauer zu sein. Schülerinnen und Schüler rechtfertigen ihren Wissensverlust häufig mit Sätzen wie „[...] *das braucht doch keiner!*“ [17, S. 2]. Dies bestätigt der Didaktiker Prof. A. Walz seinem Kollegen Muckenfuss mit den Worten „*Da hat sie allerdings recht*“ [17, S. 2]. Es drängen sich also die Fragen auf, wie die Motivation zur Teilnahme in der Elektrizitätslehre gesteigert werden, wie die Sinnhaftigkeit des Unterrichts gerechtfertigt werden kann und wie die einst gelernten Inhalte so vermittelt werden können, dass sie als sinnvoll erachtet werden. Die Antwort auf diese Fragen muss auch vor dem Hintergrund gesehen werden, dass nicht jeder Schüler und jede Schülerin Physik, Ingenieurwissenschaften, Mathematik oder Informatik studieren wird. Dabei reicht es nicht, zu simplifizieren und mit einer Argumentation zu antworten, die beschreibt, wie oft und wo Menschen Elektrizität im Alltag verwenden. Die Elektrizitätslehre muss sich den tiefergehenden Fragen stellen, was, wie und wozu gelehrt werden soll [16, S. 5].

Die Antwort auf die Frage „Was unterrichtet werden soll“, ist zumindest rahmend in den curricularen Vorgaben zu finden. Die Beantwortung der Fragen „Wie“ und „Wozu“ bleibt zum größten Teil den Lehrkräften überlassen. Angaben in Lehrplänen sind oft sehr allgemein und wenig verbindlich [1, S. 14]. Vor dem Hintergrund des genannten Motivationsproblem ist es jedoch umso wichtiger, sich über diese Fragen klar zu werden. Je nachdem, wie die Frage „Wie“ beantwortet wird, kann der Unterricht zum Interesse an ihm beitragen oder eben nicht. Kann im Unterricht klar herausgestellt werden, „Wozu“ der Inhalt gelernt werden soll, kann es positiven Einfluss auf das Lernverhalten nehmen. Es ist dabei wichtig, erkennbar zu machen, dass nicht nur reines Fachwissen, sondern dass „Alltagskompetenzen“ vermittelt werden.

Wie dies gelingen kann und wie die Fragen „Was, Wie und Wozu“ beantwortet werden können, wird im Abschnitt 2.3 beschrieben. Zudem wird beschrieben, wie das Energiefahrrad die Motivation der Lernenden positiv beeinflussen kann.

2.1.2 Stromverbrauchsvorstellung und unscharfe Semantik

„Mach das Licht aus, wir müssen Strom sparen“. Diesen Satz hören wahrscheinlich viele Kinder von Ihren Eltern, wenn sie mal wieder das Licht angelassen haben, nachdem sie durch die Tür gegangen sind. In diesem Satz steckt jedoch eine didaktische Hürde für den Anfangsunterricht der Elektrik. Schließlich sparen wir keinen „Strom“, wenn wir das Licht ausschalten. Natürlich fließt nach dem Öffnen des Stromkreises kein Elektronenstrom mehr, die anfangs erwähnte Aussage meint jedoch mit dem Wort „Strom“ die elektrische Energie. Noch deutlicher wird die Synonymisierung der Begriffe Strom und elektrische Energie, wenn wir uns über unseren Stromverbrauch oder die Stromrechnung unterhalten.

Das Wort „Strom“ wird jedoch auch mit dem Begriff der Leistung bzw. dem Energiestrom in Verbindung gebracht. Beispielsweise berichten Medien über den Ausbau der Netze, um den Strom der Offshore-Windparks in den urbanen Lebensraum transportieren zu können.

Doch nicht nur in der Alltagssprache und in den Medien wird der Begriff „Strom“ missbräuchlich verwendet. Unterhalten sich Elektriker über eine 16 A-CEE-Steckdose, so fällt häufig das Wort „Starkstrom-Steckdose“. Dabei ist es nicht der Strom, der größere Energieströme ermöglicht. Der maximale Elektronenstrom (16 A) ist genau so groß wie bei einer Haushaltssteckdose. Primär ist die höhere Spannung (400 V) und die dreifache Anzahl der Außenseiter dafür verantwortlich, dass eine „Starkstromsteckdose“ mehr Leistung zur Verfügung stellen kann. Ein weiteres Beispiel für die unpräzise Fachsprache ist die veraltete Berufsbezeichnung des Schwachstromelektrikers, der in der Regel an kleinen Betriebsspannungen arbeitet.

Doch wenn sich nicht einmal seriöse Medien und Fachleute über die Semantik der Begriffe Strom, Spannung, Leistung und Energie einig sind, stellt sich die Frage, wie Schülerinnen und Schüler das Wörterchaos mit fachlichen Zusammenhängen unter einen Hut bringen sollen. Viele Lernende kommen unter anderem aufgrund dieser unpräzisen Semantik mit Präkonzepten – sogenannten Schülervorstellungen – in den Anfangsunterricht. So ist es nicht Wunderswert, dass einige der Lernenden glauben, der Strom würde in einem elektrischen Betriebsmittel „verbraucht“ (Stromverbrauchsvorstellung). Immerhin sprechen wir vom „Stromverbrauch“ und Betriebsmittel werden häufig als „Verbraucher“ bezeichnet. Hinzu kommt, dass verschiedene Schülervorstellungen gleichzeitig vorliegen können und diese oft voneinander abhängig sind [18, S. 116].

Vor diesem Hintergrund erscheint es nicht einfach, die Begriffe des elektrischen Stromkreises in den richtigen Kontext zu setzen. Umso wichtiger ist es, einen sprachsensiblen Umgang im Physikunterricht zu wählen und zu erkennen, dass dieser eng mit der Vermittlung von

Fachinhalten verbunden ist. Dabei ist sowohl die didaktische als auch die methodische Dimension der Sprache zu berücksichtigen, vgl. [19, S. 650].

Das Unterrichtskonzept von Muckenfuss und Walz beleuchtet einige dieser Punkte intensiver und empfiehlt z.B. die sprachliche Trennung von Leistung und Energiestrom. Leistung P ist demnach definiert als „[...] *pro Sekunde umgewandelte oder auf ein anderes System übertragene Energie*“ [1, S. 35]. Den Energiestrom beschreiben Muckenfuss und Walz als innerhalb der Systemgrenzen übertragenen Quotienten $P_{str} = E/t$, wenn bei der Übertragung nichts geleistet wird (geschlossenes System) [1, S. 29-36].

Auch werden die Begriffe „Erzeuger“ und „Verbraucher“ semantisch unter die Lupe genommen und deren Verwendung legitimiert [1, S. 36]. Aus den zuvor genannten Gründen ist m. E. nach deren Verwendung dennoch nicht zu empfehlen. Die Verwendung dieser Worte sollte angesprochen werden, jedoch im Unterrichtsverlauf durch das Wort „Betriebsmittel“ ersetzt werden, da dieses Wort keine Vorprägung besitzt. Zudem eignet sich der Begriff des Betriebsmittels für die Benennung von „Erzeugern“ und „Verbrauchern“, wodurch der Wörterumfang reduziert wird. Hinzukommt, dass einige Betriebsmittel, wie z.B. der Dynamo, als „Verbraucher“ und „Erzeuger“ fungieren können.

Das Energiefahrrad kann bei der sprachlichen Ausdifferenzierung helfen, da es einige dieser Begriffe und ihre physikalischen Eigenschaften in den Erlebnishorizont der Schülerinnen und Schüler bringt. Bedarf ein Betriebsmittel großer Anstrengung P_{mech} , so hat es offenbar eine große elektrische Leistung P_{el} , es fließt ein großer Energiestrom P_{str} vom Energiefahrrad zu den Betriebsmitteln („Verbraucher“). Strengt sich die strampelnde Person längere Zeit t an, so kommt diese ins Schwitzen. Die langanhaltende Anstrengung über die Zeit t wird als Arbeit W (Work) wahrgenommen. Arbeit wird auch als Energie E bezeichnet. Bei konstanter Ausgangsspannung ist die Anstrengung P_{mech} proportional zum Elektronenstrom I , usw.

2.2 Curriculare Leitlinie Energie

Das Unterrichtskonzept von Muckenfuss und Walz (1997) stellt die energieübertragende Funktion elektrischer Stromkreise in den Mittelpunkt, vgl. 2.3.1. Seinerzeit stellte die Integrierbarkeit des Unterrichtskonzepts in die Lehrpläne die Autoren vor eine große Herausforderung. Kaum ein Lehrplan sah die energieübertragende Funktion elektrischer Stromkreise als Leitidee vor [1, S. 60]. Diese Tatsache sowie die mangelnde, curriculare Legitimation des Elektrizitätsunterrichts (vgl. 2.1) motivierte die Autoren des Unterrichtskonzepts zu einer begründeten Kritik an die Curriculum-Entwicklung [1, S. 161-164]. Diese Kritik ist zumindest in einigen Bundesländern auf fruchtbaren Boden gestoßen, so dass das Unterrichtskonzept zumindest in seiner Grundidee in die aktuellen Curricula Einfluss gefunden hat. Besonders in den Niedersächsischen Schulformen der Sekundarstufe I ist eine themenübergreifende „Leitlinie Energie“ zu finden, vgl. [2], [3], [4], [5].

In anderen Bundesländern ist eine solche themenbergreifende Leitlinie weniger zu erkennen. Z.B. wird in Nordrhein-Westfalen (NRW) Energie als themenübergreifendes „Basiskonzept“ verstanden, vgl. [20, S. 11-12]. Die für Muckenfuss und Walz so wichtige Kontextualisierung „Energieübertragung durch Stromkreise“ ist in NRW jedoch nicht zu erkennen. Als mögliche Kontextualisierung schlägt das Curriculum hier vor:

- Elektrizität im Haushalt
- Elektrische Phänomene in der Natur
- Akkus und Batterien - Strom für unterwegs [20, S. 49]

Ersteres könnte die Idee eines solchen Unterrichtskonzepts tragen. Der zweite und dritte Kontextualisierungsbereich widerspricht jedoch einem solchen Unterrichtskonzept. Es kann also festgehalten werden, dass ein elektrischer Anfangsunterricht nach Muckenfuss und Walz in NRW möglich wäre, jedoch keineswegs gefordert ist. Da die vorliegende Arbeit in Osnabrück (Niedersachsen) geschrieben wird, beziehen sich die weiteren Inhalte auf niedersächsische oder nationale Vorgaben.

Das niedersächsische Kerncurriculum (KC) setzt besonders in der Haupt-, Real- und Oberschule auf den Energiebegriff als Leitlinie, welche sich auch als Leitlinie nach Muckenfuss und Walz interpretieren ließe, vgl. [2, S. 20], [3, S. 20], [4, S. 20]. Die Leitlinie durchzieht alle Themenbereiche, vom Dauermagnetismus bis hin zur Optik. Eine besondere Stellung nimmt die Leitlinie in den Themenbereichen der Mechanik, Elektrizität als auch Atom- und Kernphysik ein. Die Idee dieser Leitlinie ist es, ähnlich wie bei den Basiskonzepten (NRW) ein verbindendes Element zwischen einzelnen Themenbereichen zu finden. Jedoch geht die Leitlinie Energie über die themenverbindende Eigenschaft hinaus und sorgt für einen universellen Charakter der Größe Energie. Dabei soll die Bedeutung des Begriffes im Laufe der Thematiken und Schuljahre immer weiter ausdifferenziert werden. Auch in Bezug auf Bildung für nachhaltige Entwicklung (BNE) ist die Leitlinie Energie ein sinnvolles Mittel, da sie alltagsbezogene, realistische, und themenübergreifende Betrachtungen zulässt oder sogar fordert. Damit stellt die Leitlinie nicht nur ein Basiskonzept dar, sondern wird als globales Thema bzw. eigenständige Inhaltskompetenz aufgefasst. [2, S. 20], [3, S. 20], [4, S. 20]. Weitere Aspekte zum Thema BNE und der Rolle des Energiefahrrades für dieses Thema werden im Abschnitt 2.4 beschrieben.

Es ist zu erwähnen, dass die Leitlinie Energie in ähnlicher Form auch in der Sekundarstufe II des Gymnasiums zu finden ist, jedoch weniger explizit und hervorgehoben. Dennoch finden sich auch hier Bestandteile des Unterrichtskonzepts von Muckenfuss und Walz wieder, vgl. [5] mit [1]. Das KC der gymnasialen Oberstufe erlaubt ebenfalls einen Anschluss an das Unterrichtskonzept und die Leitlinie [6, S. 10].

Für den – für das Energiefahrrad – so wichtigen inhaltsbezogenen Kompetenzbereich der Elektrizität erklärt das KC der Haupt- und Realschule:

„Neben dem Begriff der Leistung ist der Begriff des Energiestroms mit Blick auf den Unterrichtsgang wichtig. Durch diesen Begriff wird die energieübertragende Funktion des Stromkreises hervorgehoben und so die Grundlage für die Unterscheidung des gerichteten Energiestroms und des kreisenden Elektronenstroms gelegt. Insbesondere mit Blick auf die Lebenswelt der Schülerinnen und Schüler ist der Energiestrom bzw. die energieübertragende Funktion die relevantere Eigenschaft eines Stromkreises.“ [2, S. 20], [4, S. 20]

Gleiches erklärt das KC der Oberschule in kürzerer Form, vgl. [3, S. 20].

Der hier dargestellte Ausschnitt aus den KCs, entspricht in etwa den Gedanken von Muckenfuss und Walz. Die Differenzierung von Leistung und Energiestrom wurde bereits in 2.1 angesprochen. Dies sowie die Differenzierung von Energiestrom und Elektronenstrom wird im Abschnitt 2.3.1 weiter beschrieben.

Insgesamt stützen die niedersächsischen KCs die Idee eines Unterrichts entsprechend der Vorschläge von Muckenfuss und Walz (1997), wodurch das Unterrichtskonzept [1] an Aktualität gewinnt. Lässt sich das Energiefahrrad sinnvoll in Teile des Unterrichtskonzepts integrieren, so kann es sich auch in Teile der curricularen Vorgaben integrieren. Andersherum ausgedrückt können Teile der curricularen Vorgaben mithilfe des Energiefahrrads umgesetzt werden.

2.3 Unterrichtskonzept von Muckenfuss und Walz

Das Unterrichtskonzept „Neue Wege im Elektrikunterricht“ von Muckenfuss und Walz (Autoren) stammt aus dem Jahr 1992 und wurde 1997 in der 2. Auflage überarbeitet. Das Unterrichtskonzept richtet sich an Haupt- Real- und Oberschüler. An einigen Stellen finden sich auch Ergänzungen für das Gymnasium oder die gymnasiale Oberstufe. Es zeichnet sich durch besondere Handlungsorientierung und starkem Alltagsbezug aus. Dies wird erreicht, indem die energieübertragende Funktion elektrischer Stromkreise in den Mittelpunkt gestellt wird und Erfahrungen an handgetriebenen Generatoren gesammelt werden. Anhand dieser Erfahrungen werden zunächst konzeptionelle Zusammenhänge elektrischer Stromkreise erlernt und in späteren Zügen formalisiert. Das Unterrichtskonzept gliedert sich in insgesamt 11 Stufen. Die untenstehende Abbildung 2-1 zeigt diese Struktur.

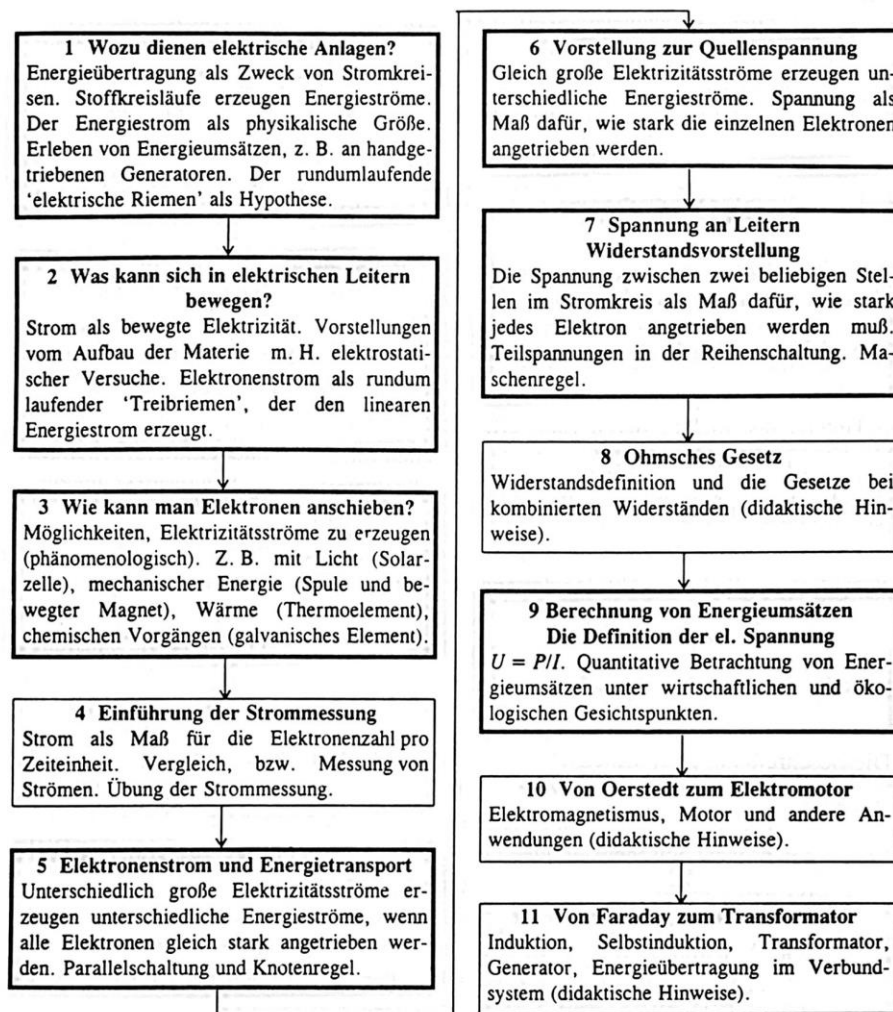


Abbildung 2-1: Struktur der Unterrichtseinheiten nach Muckenfuss und Walz, entnommen aus [1, S. 69]

Die Unterrichtseinheiten 1 bis 8 sind qualitativ konzeptionell angelegt, die Unterrichtseinheiten 9 bis 11 quantitativ formalisierend. Die fettumrandeten Kästchen in der Abbildung 2-1 werden von Muckenfuss und Walz detailliert beschrieben. Die anders dargestellten Unterrichtsreihen (mit schmalen Rahmenlinien) sind weniger detailliert beschrieben bzw. werden nur durch didaktische Hinweise versehen. Für die vorliegende Arbeit sind die Unterrichtseinheiten 1, 5 und 9 von besonderem Interesse, da sich hier eine Integration des Energiefahrrades besonders gut anbietet.

Die Autoren des Unterrichtskonzepts schlagen vor, die Unterrichtseinheiten 1 bis 8 in der 6/7 Klasse durchzuführen und die Einheiten 9 bis 11 in der 9/10 Klasse zu unterrichten. Dieser Vorschlag deckt sich jedoch nicht mit den zeitlichen Vorgaben der niedersächsischen Curricula der Haupt- und Realschule, vgl. [2, S. 34], [4, S. 34]. Es wäre möglich, die Unterrichtseinheiten 1 bis 9 auf die Jahrgangsstufen 6 und 8 aufzuteilen. Die Einheiten 9 bis 11 decken sich mit den Inhalten der 10. Klasse.

In den nachfolgenden Unterkapiteln zum Unterrichtskonzept wird zunächst die Idee erläutert, den Energiebegriff als Leitfaden zu verwenden und ihn in den Erfahrungsbereich zu bringen. Anschließend wird auf die relevanten Unterrichtsinhalte näher eingegangen.

2.3.1 Energieübertragende Funktion elektrischer Stromkreise

Im Kapitel 2.1 wurde bereits auf die Problematik hingewiesen, dass es schwierig sein kann, den Elektrikunterricht zu legitimieren. Besonders herausfordernd ist es, die anfängliche Motivation der Schülerinnen und Schüler aufrecht zu erhalten, denn der Elektrikunterricht wird häufig als zu komplex, uninteressant und lebensfern empfunden [15, S. 3].

Um dem Motivationsproblem zu begegnen und den Elektrikunterricht zu legitimieren, haben Muckenfuss und Walz zunächst das Feld der Elektrizität entsprechend der unten stehenden Abbildung 2-2: Strukturierung der Elektrizitätsfelder, nach [1, S. 15] strukturiert.

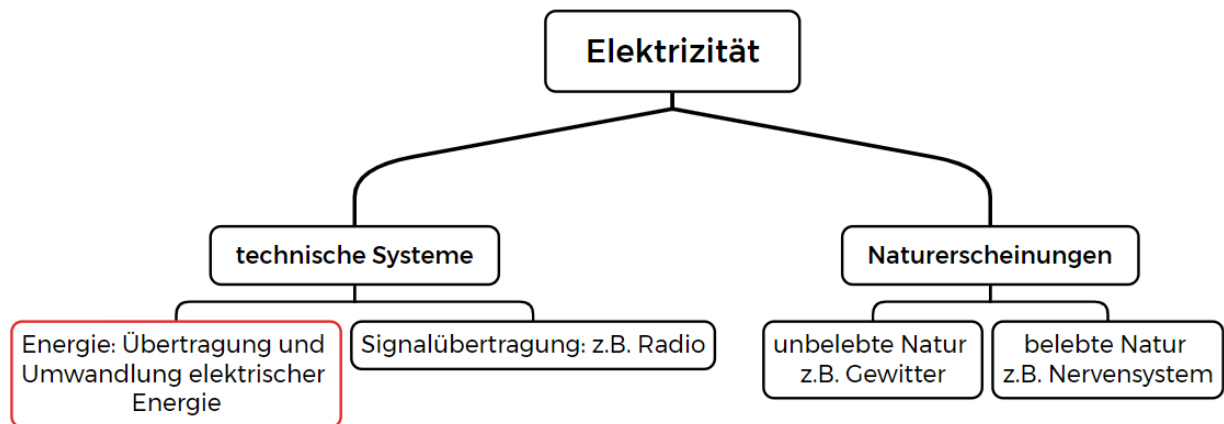


Abbildung 2-2: Strukturierung der Elektrizitätsfelder, nach [1, S. 15]

Die Abbildung 2-2: Strukturierung der Elektrizitätsfelder, nach [1, S. 15] zeigt das Themenfeld Elektrizität an der Spitze, welches sich in technische Systeme (links) und Naturerscheinungen (recht) aufteilt.

Die Naturerscheinungen werden in belebte und unbelebte Natur aufgeteilt. Beispiele für unbelebte Naturerscheinungen sind Gewitter, Polarlichter, elektrostatische Aufladung oder piezoelektrische Effekte. Elektrizitätsbeispiele in der belebten Natur sind das menschliche Nervensystem, EKGs, Zitteraale und andere bioelektrische Prozesse. All diese Beispiele sind wenig anschaulich und können wenig mit Erfahrungen anknüpfen.

Die technischen Systeme unterteilen die Autoren in signalübertragende Anlagen wie Funk, Audioverstärker, Microcontroller, Telekommunikationstechnik, Computer u.v.m. Demgegenüber stehen die energieübertragenden bzw. umwandelnden Techniken wie Lampen, Wärmepumpen, Heizelemente, elektrische Motoren, Haushaltsgeräten u.v.m. Da die Autoren das Themenfeld der Energietechnik als besonders lebensnah identifiziert haben, ist dieser Themenbereich in der Abbildung 2-2: Strukturierung der Elektrizitätsfelder, nach [1, S. 15] rot umrahmt. Dies ist die Leitlinie für alle Unterrichtseinheiten.

Der Elektrikunterricht soll entsprechend der Autoren im Kontextbereich der Energieübertragung stattfinden, da sich hier besonders viel Alltagbeispiele finden lassen. Zudem ist die Bedeutung der Energieübertragung für die Gesellschaft als besonders groß zu erachten. Klar wird dies, wenn man sich vorstellt, wie ein Leben ohne elektrische Energie

aussähe. Auch mit Blick auf BNE hat die elektrische Energieversorgung einen wichtigen Stellenwert für unsere gesellschaftliche Existenz. Die Delphi-Studie zum Interesse im Physikunterricht (1980) stützt eine Kontextualisierung von „Physik und Gesellschaft“ sowie „Physik im Alltag“. Die Studie identifiziert die Bildungsdiskrepanz im ersten Kontextbereich als besonders groß. Die Bildung im Bereich „Physik im Alltag“ ist am höchsten [21]. Es ließe sich also ableiten, dass die Bildung im ersten Kontext „Physik und Gesellschaft“ besonderer Aufmerksamkeit bedarf. Weiter lässt sich identifizieren, dass der Kontextbereich „Physik im Alltag“ besonders lernwirksam ist. Die Wirksamkeit einer solchen Kontextualisierung lässt sich durch weitere Studien und Fachliteratur bestätigen, vergleiche dazu, [22, S. 41-52] oder [23].

Besonders für Mädchen scheint der Kontext wichtig zu sein, da sie häufiger ein geringeres Fachinteresse (Interesse am Fach als solches) als Jungen besitzen. Bei Jungen hingegen ist das Interesse weniger kontextabhängig als bei Mädchen. Zudem zeigt die Kieler IPN-Interessensstudie, dass bei Jungen und Mädchen das Interesse im Kontext „Physik und Gesellschaft“ über die Klassenstufen 6-10 steigt [24].

Insgesamt scheint es also sinnvoll zu sein, den Elektrizitätsunterricht entlang einer energetischen Richtschnur zu führen, da dieser Bereich besonders lernwirksam erscheint. Dabei sollte der Unterricht durch alltagsnahe Erfahrungen und gesellschaftliche Bedeutungen akzentuiert werden. Die Orientierungsfunktion hat dabei Vorrang vor der Qualifizierungsfunktion. Dies bedeutet, dass gesellschaftliche, kulturelle, persönliche und politische Zusammenhänge Strukturelemente des Unterrichtes sein sollten und nicht nur „loses Beiwerk“ [23, S. 72]. Es soll den Lernenden jederzeit der Eindruck verschafft werden, dass nicht Fachwissen, sondern Alltagskompetenzen und Erfahrungswissen im Vordergrund steht [1, S. 14]. Ein rein fachlicher Unterricht hemmt das Interesse, anstatt es zu beflügeln. Unterricht, der häufig das situationsgebundene Interesse (Interesse an einer bestimmten Unterrichtssituation) hervorruft, kann das Fach- und Sachinteresse fördern.

Für das Energiefahrrad bedeutet dies, dass angeschlossene Betriebsmittel möglichst im Erfahrungsbereich der Schülerinnen und Schüler liegen sollten. Zudem kann es daraus sinnvoller sein, einen Küchenmixer oder Wasserkocher an das Energiefahrrad anzuschließen als eine Bohrmaschine oder Tauchsieder. Durch die Verwendung des bekannten Geräts rückt die Systematik näher in den so wichtigen Erfahrungsbereich. Zudem kann durch das Energiefahrrad der Kontextbereich „Physik und Gesellschaft“ betreten werden, indem man die Erleichterungen im Alltag thematisiert. Es wäre z.B. möglich, den Küchenmixer mit dem Energiefahrrad zu betreiben, um einen Teig zuzubereiten. Die Anstrengung können die Schülerinnen und Schüler dann mit einem Kurbel-Handmixer und einem am Netz angeschlossenen Küchenmixer vergleichen. So können Energieumsätze erfahrbar gemacht und diskutiert werden. In diesem Zuge ließen sich auch ökologische und ökonomische Aspekte behandeln.

2.3.2 Energieumsätze erfahrbar machen

Zunächst ist zu erwähnen, dass die Autoren des Unterrichtskonzepts nicht davon ausgehen, dass der Energiebegriff im Elektrikunterricht eingeführt wird. Die curricularen Analysen vor 1997 sahen vor, dass der Energiebegriff am Ende der Mechanik, vor der Elektrizität eingeführt wird [1, S. 62]. Die aktuellen (2025) niedersächsischen Curricula für Haupt-, Real- und Oberschule sehen dies nicht zwingend vor, vgl. [2, S. 33-34], [3, S. 33-34], [4, S. 30-34]. Die meisten Schulbücher für Niedersachsen – sowohl jüngere als auch ältere Exemplare – führen die Energie jedoch weiterhin über die Mechanik ein, vgl. [25], [26].

Gleich, ob Energie in der Mechanik oder im Elektrizitätsunterricht eingeführt wird: Es macht Sinn, Energieumsätze in den Erfahrungsbereich zu rücken. Erfahrungswissen wird den Schülerinnen und Schülern langanhaltender im Gedächtnis bleiben, da es mit Emotionen verknüpft wird. Besonders wenn diese Emotionen mit Alltagserfahrungen verknüpft werden, wird die Erfahrung verankert. Zudem sollte der Unterricht zu Erfolgserlebnissen führen, beispielsweise, wenn mit dem Energiefahrrad und einem Handmixer ein Teig zubereitet wird, sollte er im Anschluss auch gebacken werden. Die körperliche Anstrengung, um den Handmixer zu betreiben, wird so als lohnend erachtet. Dies führt zur Motivations- und Interessen-Steigerung. Dabei muss die Belohnung nicht zwingend physischer Natur sein (backen des Teiges), sondern können auch psychologischer Natur sein. Gelingt es dem Lernenden, einen Zusammenhang durch neue Erfahrungen zu durchdringen, wird die Erfahrung mit Erfolg verknüpft [1, S. 24]. So können vorhandene Schülervorstellungen durch neue einleuchtende Konzepte ersetzt werden, ohne einen kognitiven Konflikt auszulösen. Wird den Lernenden die Zeit gegeben, selbstständig Erfahrungen zu sammeln und daraus Zusammenhänge abzuleiten, so wirkt sich dies weiter positiv auf deren Lernerfolg aus (Stichwort Handlungsorientierung). Dies heißt jedoch nicht, dass immer alle Schülerinnen und Schüler die Experimente selbstständig durchführen müssen. Handlungsorientierung bedeutet Handlungen möglichst selbst auszuführen oder aber gedanklich nachvollziehen zu können [27, S. 2].

Im Teilgebiet der mechanischen Energie kann diese Maxime umgesetzt werden, indem die Schülerinnen und Schüler einfache Sportübungen auswerten. Es kann zum Beispiel die Energie berechnet werden, die notwendig ist, um das Treppenhaus der Schule hochzulaufen. Wird zusätzlich die Zeit gemessen, kann die physiologische Leistung der Beine bestimmt werden ($P = E/t$).

Elektrische Energie ist jedoch nicht direkt sicht- oder spürbar. Sie verbirgt sich meistens hinter Steckdosen, Netzteilen oder Batterien. Schaut man sich eine Leitung unter dem Mikroskop an, so kann nicht erkannt werden, ob ein Strom durch diesen fließt oder nicht. Um Elektrizität sichtbar zu machen, verwenden wir Messgeräte, die selbst Energiewandler sind. Ein Drehspulenmessgerät (Analoges Voltmeter) wandelt z.B. elektrische Energie, um ein

Magnetfeld zu erzeugen, welches wiederum den Zeiger ausschlagen lässt. Der Zeigerausschlag macht die elektrische Spannung sichtbar. Das Spüren elektrischer Energie muss ebenfalls durch Energiewandler wie das Energiefahrrad oder die in 1.1 erwähnten Dynamots erfolgen. Beide wandeln elektrische in mechanische Energie. Die angeschlossenen Betriebsmittel wandelt elektrische Energie wiederum in eine andere Energieform um. Die unten stehende Abbildung 2-3 zeigt diese idealisierte, verlustfreie Energieumwandlungskette für das Energiefahrrad.

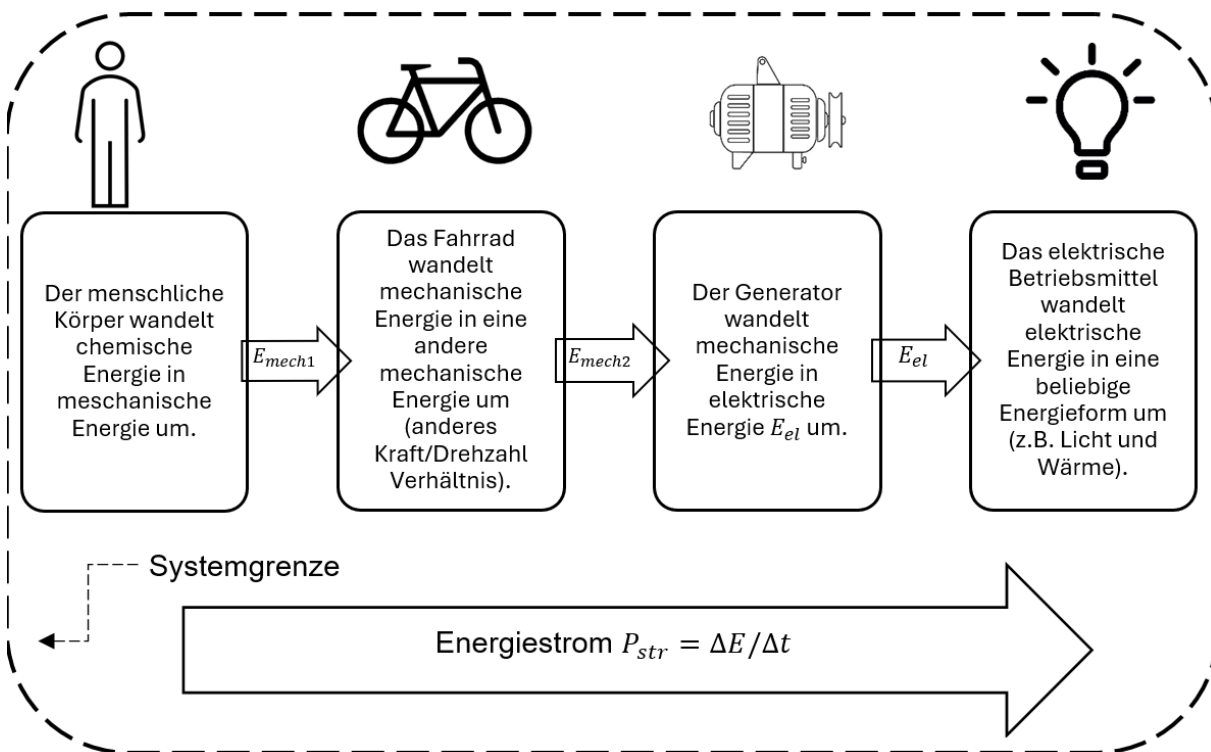


Abbildung 2-3: Darstellung des idealisierten Energieflusses vom menschlichen Körper, über das Fahrrad und das Energiefahrrad zum Betriebsmittel

Der menschliche Körper kann chemische Energie E_{chem} in mechanische Energie E_{mech} umwandeln, vgl. Abbildung 2-3. Dazu muss der Mensch Energie in Form von Nahrung (außerhalb der Systemgrenzen) zu sich nehmen. Das Fahrrad wandelt die mechanische Energie des Menschen in eine andere Form mechanischer Energie um. Diese Umformung findet durch eine mechanische Übersetzung statt. Die „neue“ mechanische Energie zeichnet sich durch ein anderes Verhältnis von Kraft F zur Geschwindigkeit v aus. Es gilt:

$$E_{mech1} = E_{mech2}$$

mit $E = P \cdot t$ und $P = F \cdot v$ folgt:

$$F_1 \cdot v_1 \cdot t = F_2 \cdot v_2 \cdot t$$

Damit ist gezeigt, dass sich die Energiebeträge durch die mechanische Umformung nicht ändern (Energieerhaltung). Auch die Energieströme $F_1 \cdot v_1$ und $F_2 \cdot v_2$ sind zu jedem Zeitpunkt t identisch.

Das Energiefahrrad bzw. die Lichtmaschine wandelt die mechanische Energie des Fahrrades E_{mech2} in elektrische Energie E_{el} um. Dabei gilt:

$$E_{mech2} = E_{el}$$

Mit $E_{mech2} = F_2 \cdot v_2 \cdot t$ und $E_{el} = U \cdot I \cdot t$ folgt:

$$F_2 \cdot v_2 \cdot t = U \cdot I \cdot t$$

Das elektrische Betriebsmittel wandelt die elektrische Energie wiederum in eine andere Energieform um. Das in Abbildung 2-3 gezeigte Betriebsmittel „Glühbirne“ wandelt die elektrische Energie in die Energieformen Licht E_{phot} und Wärme E_{therm} um. Für das Beispiel Glühbirne gilt:

$$E_{el} = E_{phot} + E_{therm}$$

Durch diese Energieübertragungskette wird die chemische Energie des Menschen in optische und thermische Energie umgewandelt. Die Energiemenge innerhalb des Raumes bleibt aufgrund des Energieerhaltungssatzes gleich. Die umgesetzte Energiemenge kann als körperliche Belastung wahrgenommen werden. Durch diese Energieübertragungskette können die hinter elektrischen Kreisläufen verborgenen Prozesse in den Erlebnisbereich der Schülerinnen und Schüler gerückt werden.

Auch hier ist es für die Schülerinnen und Schüler wichtig, die Energiemenge E und den Energiestrom E_{str} zu differenzieren. Die Differenzierung fällt vielen Schülerinnen und Schülern leicht, da sie gut verstehen können, dass eine große Anstrengung über lange Zeit viel Energie benötigt, sie kommen ins Schwitzen. Kurzfristig können auch große Anstrengungen geleistet werden, ohne ins Schwitzen zu kommen. Hierbei könnte es Sinn machen, die Energiemenge mit dem Begriff „Körperliche Belastung“ gleichzusetzen. Energieströme können mit dem Begriff „Anstrengung“ gleichgesetzt werden. So erfolgt eine semantische Trennung der Begriffe zu Gunsten des systematischen Verständnisses, vgl. 2.1.

2.3.3 Differenzierung von Energiestrom und Elektronenstrom

Entgegengesetzt zum klassischen Elektrikunterricht führen die Autoren die Elektrizität nicht über die Elektrostatik ein, wie es auch heute noch in vielen Schulbüchern vorkommt, vgl. [25, S. 122]. Die Autoren starten in das Themenfeld, indem sie den Nutzen elektrischer Anlagen historisch einordnen. Weiterführend werden Stoffkreisläufe zur Energieübertragung thematisiert, vgl. Abbildung 2-1 1. Unterrichtseinheit.

Ziel dieser ersten Unterrichtseinheit ist es, die Zweckmäßigkeit elektrischer Anlagen in den Blick zu nehmen und die Grundstruktur dieser Funktion zu beschreiben. Auf die Frage hin, welche elektrischen Geräte die Schülerinnen und Schüler kennen, werden einige Geräte zur Energieübertragung genannt und einige zu Signal- bzw. Informationsübertragung. An der Tafel können diese Begriffe entsprechend der Abbildung 2-2: Strukturierung der Elektrizitätsfelder,

nach [1, S. 15] geordnet werden. Im Klassengespräch kann erklärt werden, dass alle die an der Tafel stehenden Geräte elektrische Energie benötigen. Auch eine Audio-Endstufe braucht elektrische Energie. Auch der Fernseher hat einen Netzstecker und das Campingradio benötigt Batterien, um zu funktionieren. Auf dieser Basis und mit dem Wissen aus Abschnitt 2.3.2 kann begründet werden, warum die Energieübertragung in den folgenden Unterrichtseinheiten im Focus steht.

Einführend wird zunächst dargestellt, dass Kreisläufe wie z.B. Riemen, Ketten, Wasserkreisläufe und Winde Energie übertragen können. An dieser Stelle könnte auch ein Museumsbesuch zum Thema Industriekultur angebracht sein. Auch die Einbindung in den Geschichtsunterricht könnte an dieser Stelle hilfreich sein. Denn schnell erkennen Schülerinnen und Schüler, dass unsere heutige Industrielandschaft anders aussieht als noch vor 200 Jahren. Anstelle von Dampfmaschinen und Lederriemen, die unter der Decke geführt werden und Webstühle antreiben, sind heute Kabel und Leitungen verlegt. Im Anschluss an diesen historischen Rückblick schlagen die Autoren vor, ein Experiment durchzuführen. Das Experiment zeigt die Energieübertragung mit Riemen und Elektrizität auf Basis gleicher Strukturelemente [1, S. 76]. Die nachstehende Abbildung 2-4 zeigt diesen Versuchsaufbau auf der linken Seite.

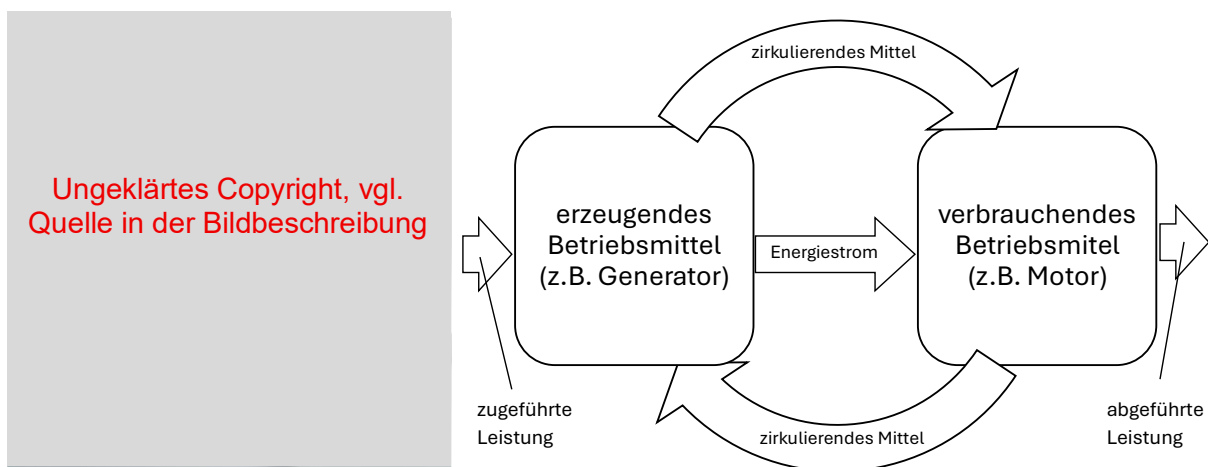


Abbildung 2-4: Links: Vergleich elektrischer Energieübertragung mit mechanischer Energieübertragung, entnommen aus [28].

Rechts: Prinzipdarstellung von Energieflüssen mittels zirkulierender Mittel, nach [1, S. 73]

Die Abbildung 2-4 zeigt die prinzipielle Funktionsweise von Energieübertragungssystemen mittels zirkulierender Mittel. Nach dem historischen Exkurs wissen die meisten Lernenden, dass mithilfe von Riemen Energie übertragen werden kann (Abbildung 2-4 links unten). Wird der mechanische Kreislauf mit dem elektrischen verglichen, vgl. Abbildung 2-4 links oben, so liegt die Bezeichnung des Elektronenstroms als „elektrischer Riemen“ nahe. Die Schülerinnen und Schüler erkennen diese Parallele und sollten in der Lage sein, den Energiestrom vom Elektronenstrom zu differenzieren. Diese Funktion wird auf Basis der in Abbildung 2-4 rechtsstehenden Grafik verallgemeinert. Der Schülervorstellung des „Stromverbrauchs“ kann

so nachhaltig entgegengewirkt werden, vgl. [18, S. 123]. Von der Einführung eines „Rucksackmodells“ ist an dieser Stelle abzusehen [1, S. 71-81].

An dieser Stelle ist es zudem sinnvoll, die Begriffe „Erzeuger“ und „Verbraucher“ zu erläutern und damit in Verbindung stehende semantischen Probleme aufzuzeigen. Hierfür können ebenfalls andere Kreisläufe als Analogie verwendet werden.

Bei Wasser wird ebenfalls von einem „Wasserverbrauch“ gesprochen, obwohl die globale Wassermenge konstant ist. Wasserquellen oder der hiesige Wasserhahn können als „Erzeuger“ definiert werden. Ein Abfluss könnte als „Verbraucher“ bezeichnet werden. Innerhalb unserer Wohnung (der Systemgrenze) wird also sehr wohl Wasser „erzeugt“ und „verbraucht“. Gleiches gilt für elektrische Kreisläufe. Innerhalb der Systemgrenzen gibt es ein erzeugendes Betriebsmittel und ein verbrauchendes Betriebsmittel. Die „erzeugte“ Energiemenge und die „verbrauchte“ Energiemenge sind zu jeder Zeit im Gleichgewicht. Es fließt bei gleichmäßiger Belastung ein konstanter Energiestrom $P_{str} = E/t$ vom erzeugenden zum verbrauchenden Betriebsmittel, vgl. Abbildung 2-4 rechts. Für die Analogie bedeutet dies, dass wir so viel Wasser „verbrauchen“ wie unser Wasserhahn „erzeugt“ [1, S. 36].

Da der Energieerhaltungssatz weiterhin gilt, muss Leistung dem System von außen zugeführt und auf der anderen Seite wieder abgeführt werden. Für den elektrischen Kreislauf bedeutet dies, dass dem Generator mechanische Leistung zugeführt werden muss, damit ein elektrischer Energiestrom vom Generator zum Motor fließen kann. Der Generator „erzeugt“ also aus mechanischer Energie elektrische Energie. Der Motor leistet dann am angrenzenden System Arbeit. Er „verbraucht“ elektrische Energie, um mechanische Energie zu „erzeugen“, vgl. Abbildung 2-4 rechts. In der Abbildung 2-4 links leistet der Mensch mechanische Arbeit am DynaMot. Der als Motor betriebene DynaMot leistet Hubarbeit am Gewicht. Die zu- und abgeführten Leistungen sind dabei zu jeder Zeit im Gleichgewicht. Leistung ist demnach ein Maß für die pro Sekunde dem System zu- oder abgeführte Energiemenge $P_{zu} = P_{ab} = E/t$. Für unsere heutige Energieübertragung mittels elektrischer Kreisläufe bedeutet dies, dass das Kraftwerk, sobald ein Gerät einschaltet wird, mehr Energie zur Verfügung stellen muss [1, S. 73].

Das Energiefahrrad kann in diese erste Unterrichtseinheit sinnvoll integriert werden, indem gezeigt wird, dass Energiekreisläufe hintereinander geschaltet werden können. Die Fahrradkette überträgt wie der Riemen in Abbildung 2-4 links mechanische Energie vom Menschen auf das Energiefahrrad. Das Energiefahrrad überträgt mittels elektrischen Riemens elektrische Energie vom Fahrrad zu den verbrauchenden Betriebsmitteln. Das Zeichnen von Energieflussdiagrammen und Energiewandlungsketten ist zudem curricularer Bestandteil [4, S. 40] und kann entsprechend Abbildung 2-3 geübt werden.

In der weiterführenden Unterrichtseinheit (Abbildung 2-1 2) sollte auf den Modellcharakter und die damit verbundenen Probleme des zuvor beschriebenen Experimentes eingegangen

werden. Eines dieser Probleme ist, dass bei steigender Eingangsdrehzahl die Riemengeschwindigkeit des mechanischen Kreislaufs steigt. Im elektrischen Kreislauf steigt bei höherer Drehzahl die elektrische Spannung, nicht der Elektronenstrom. Hierbei ist auf die Geschwindigkeit der Elektronen einzugehen. Viele der Lernenden haben die Vorstellung, der elektrische Riemen sei schnell, denn schließlich fängt das Licht sofort nach dem Betätigen des Lichtschalters an zu leuchten. Die sehr langsame Strömungsgeschwindigkeit von etwa $v_{el} = 1 \text{ mm/s}$ kann über die Einführung des Elektronenstroms als „elektrisches Fluid“ gelingen [1, S. 92-93]. Jedoch eignet sich m.E. nach auch das Modells des elektrischen Riemens zur Erklärung der geringen Strömungsgeschwindigkeit. Denn auch ein langsamer Riemen kann große Energieströme ermöglichen. Sichtbar wird dies bei historischen Dampfmaschinen.

2.3.4 Definition der Spannung

Nachdem den Schülerinnen und Schülern beigebracht wurde, wie elektrische Energie übertragen wird und was sich genau im elektrischen Leiter bewegt, führen die Autoren den Begriff des Antriebs ein. Die Frage, wie sich Elektronen antreiben lassen, erläutern die Autoren in der 3. Unterrichtseinheit, vgl. Abbildung 2-1. Es stellt sich heraus, dass die elektrische Spannung U in Volt [V] für den Antrieb der Elektronen verantwortlich ist. In der 4. Unterrichtseinheit wird dann thematisiert, wie sich Elektronenströme I messen lassen und welche Einheit verwendet wird. Die Unterrichtseinheiten 5 und 9 beschäftigen sich mit der Verbindung zwischen Elektronenstrom I und Energiestrom P_{str} und Antrieb U . Dabei soll verdeutlicht werden, dass die elektrische Spannung keine Eigenschaft des Stromes ist, sondern eine eigenständige elektrische Grundgröße.

Ziel der 5. und 9. Unterrichtseinheit ist es zu zeigen, dass unterschiedlich große Elektronenströme unterschiedliche Energieströme bewirken. Es soll dargestellt werden, dass bei konstanter Spannung Leistung und Elektronenstrom proportional zueinander sind ($P \sim I$). Bei konstanter Spannung ergibt sich im P/I -Diagramm eine Gerade, somit ein linearer Zusammenhang. Die Proportionalitätskonstante wird dann in der 9. Unterrichtseinheit als Spannung U definiert. Weiter kann gezeigt werden, dass sich bei Parallelschaltungen die Teil-Elektronenströme und Teil-Energieströme aufaddieren (Knotenregel). Die Aufsummierung der Teilströme kann am DynaMot oder Energiefahrrad als zunehmender Bedarf mechanischer Leistung wahrgenommen werden, am DynaMot konkret als größerer Kraftaufwand F an der Kurbel. In der 9. Unterrichtseinheit werden auf dieser Basis ökologische und ökonomische Betrachtungen durchgeführt [1, S. 137-150].

Die Autoren führen in die 5. Unterrichtseinheit ein, indem Sie den „Stromverbrauch“ in den Haushalten der Lernenden diskutieren. Die Schülerinnen und Schüler wissen, dass je mehr und je länger Haushaltsgeräte eingeschaltet sind, desto größer ist der „Stromverbrauch“. Als Hausaufgabe bekommen die Lernenden den Auftrag, die Leistungen verschiedener Haushaltsgeräte zu notieren. Die Leistungen der Haushaltsgeräte können dann im

Klassengespräch kontextualisiert und mit körperlichen Leistungen verglichen werden [1, S. 109]. Der Vergleich elektrischer Leistungen von Haushaltsgeräten mit körperlichen Leistungen legt ein Schülerexperiment nahe.

Im Gegensatz zum DynaMot erlaubt das Energiefahrrad ein solches Schülerexperiment. Die Autoren verwenden in ihren Experimenten zu dieser Einheit dennoch ein DynaMot mit Leuchtmitteln als Betriebsmittel oder einen weiteren DynaMot als Motor. Dies widerspricht jedoch einer lebensweltnahen Kontextualisierung, entsprechend 2.3.1.

Um zu zeigen, dass sich bei konstantem Antrieb (Spannung) der Energiestrom proportional zum Elektronenstrom verhält, wird ein Versuch wie in Abbildung 2-4 links dargestellt verwendet. Ein DynaMot wird an einen weiteren DynaMot angeschlossen. Die Handkurbel des einen DynaMots wird durch eine Schurwelle ersetzt, auf der ein Faden aufgewickelt ist. Am Faden hängt ein Gewicht. Zudem wird der Motor- bzw. Generatorstrom gemessen. Aus dem Mechanikunterricht und den vorangegangenen Einheiten wissen die Lernenden, dass die mechanische Hubleistung einen Energiestrom erfordert, der mit steigendem Gewicht und steigender Geschwindigkeit wächst. Nacheinander werden immer größere Gewichte in gleicher Zeit um die gleiche Strecke angehoben. Dabei wird der Elektronenstrom gemessen und beobachtet [1, S. 115-116]. Die Lernenden erkennen, dass:

„Je größer der Energiestrom wird, desto größer ist auch der Elektronenstrom ($P_{str} \sim I$)“ [1, S. 115].

In der 9. Unterrichtseinheit wird diese Proportionalität weiter untersucht und quantitativ beschrieben. Dazu wird ein P/I -Diagramm zu erstellt. Die Autoren verwenden hierfür eine 7-stufige 230 V Kochplatte, deren Stufenleistung bekannt ist. Für jede Stufe wird dann der Elektronenstrom gemessen und der Quotient P/I berechnet [1, S. 140]. Die Ergebnisse sehen wie folgt aus:

Tabelle 2-1: Messwerte für Elektronen- und Energiestrom einer Heizplatte, entnommen aus [1, S. 140]

Heiz- stufe	P_{str} (in W)	I in A	$\frac{P}{I}$ in $\frac{W}{A}$
0,5	230	1,0	230
1	342	1,5	228
1,5	456	2,0	228
2	1265	5,6	226
2,5	1710	7,6	225
3	2530	11,3	224

Die Tabelle 2-1 zeigt die Messwerte für die jeweiligen Heizstufen. Zudem zeigt die dargestellte Tabelle den berechneten Quotienten aus Energie- und Elektronenstrom. Leistung und

Elektronenstrom werden in einem gemeinsamen Diagramm aufgetragen und eine lineare Regression durchgeführt, vgl. Abbildung 2-5.

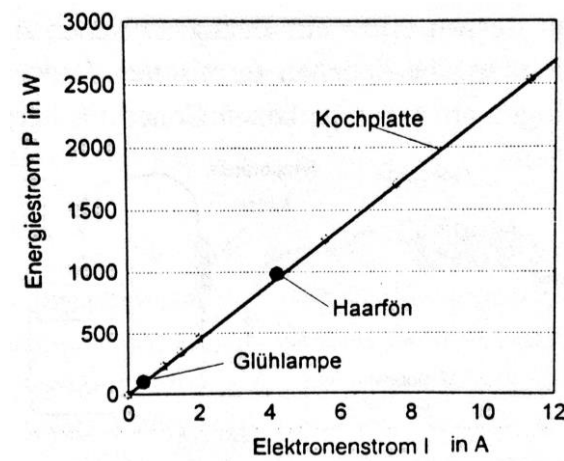


Abbildung 2-5: (rechts) P/I-Diagramm der Heizplatte, ergänzt mit Glühlampe und Haarföhn, entnommen aus [1, S. 140]

Die Steigung der Geraden entspricht in etwa 230 W/A. Werden die Energie- und Elektronenströme weiterer Haushaltsgeräte gemessen, so liegen diese ebenfalls auf der Geraden.

Die Zahl „230“ kommt den meisten Schülerinnen und Schülern aus den vorangegangenen Unterrichtseinheiten und dem Alltag bekannt vor. Sie wissen, dass diese Zahl für den Antrieb bzw. die Spannung an der Haushaltssteckdose steht. Aufgrund der Einheit [W/A] kann die Spannung als Quotient aus Energie- und dem Elektronenstrom

$$U = \frac{P_{str}}{I}$$

definiert werden. 1 V bedeutet demnach, dass bei einem Ampere ein Energiestrom von einem Watt übertragen wird. Hat eine Batterie eine Spannung von 1,5 V, so fließen bei einem Ampere 1,5 W von der Batterie zum Betriebsmittel [1, S. 140-141]. Der Schülervorstellung „Spannung als Eigenschaft des Stroms“ kann so nachhaltig entgegengewirkt werden, vgl. [18, S. 118-119].

Die Experimente für die 5. Unterrichtseinheit werden zwar mit DynaMots durchgeführt, jedoch erfordert es einiges an Übung, mit konstanter Drehzahl zu drehen [1, S. 107]. Zudem wirken einige der Experimente in dieser Unterrichtseinheit weniger lebensnah als andere. In der 9. Unterrichtseinheit experimentieren die Autoren mit einer Hauskochplatte, jedoch verbirgt sich der größte Teil des Systems hinter der Steckdose. Die dargestellten Zusammenhänge lassen sich durch das Energiefahrrad lebensweltnäher und handlungsorientierter gestalten. Beispielsweise könnten 12 V DC-Geräte aus dem Campingbedarf an das Energiefahrrad angeschlossen werden. Deren Elektronen- und Energieströme werden aufgenommen. Der Quotient P/I wäre in etwa 12 W/A. Mit einem Wechselrichter wäre der Quotient 230 W/A. Zudem könnten die Elektronenströme auf 12 V- und 230 V-Ebene, also vor und hinter dem

Wechselrichter aufgenommen und verglichen werden. Auf Basis dieses Vergleichs, kann diskutiert werden, weshalb unsere Transportnetze auf Hochspannung setzen, warum 12 V im KFZ verwendet wird und warum unsere Haushaltssteckdose eine Nennspannung von 230 V hat. Im Abschnitt 6.3.2. wird ein solches Vorgehen skizziert.

2.4 Einbindung in ein Konzept zur Bildung für nachhaltige Entwicklung

Bildung für nachhaltige Entwicklung (BNE) scheint Bildungsbereichsübergreifend an Bedeutung zu gewinnen. BNE wird international als immer wichtigerer Schlüsselfaktor für eine nachhaltige Entwicklung anerkannt. Deshalb ist BNE auch Bestandteil vieler deutscher curricularer Vorgaben, die weit über das Fach der Physik hinaus gehen. Auch im Bereich der beruflichen Bildung spielt BNE eine immer größere Rolle. BNE hat das Ziel, Menschen zu einem zukunftsorientierten, nachhaltigen Handeln und Denken zu befähigen. Um dies zu erreichen, wurde sich International auf 17 Zielbereiche für nachhaltige Entwicklung geeinigt [29].

Die 17 Zielbereiche sind auch als Sustainable Development Goals (SDGs) bekannt. Sie wurden 2014 bei der UN-Generalversammlung von allen 193 Mitgliedstaaten beschlossen und haben ihren Geltungsbereich über den Bildungssektor hinaus. Im Zuge der UNESCO-Weltkonferenz BNE und des Weltbildungsforums 2015 wurde BNE in den Zielsetzungen verankert. Seither verpflichten sich die UN-Mitgliedstaaten zur Arbeit an Bildung für nachhaltige Entwicklung [30].

Für den Physikunterricht und das Energiefahrrad ist das 7. SDG besonders interessant. Es heißt: *„Zugang zu bezahlbarer, verlässlicher, nachhaltiger und moderner Energie für alle sichern“* [31]

Zusätzlich können Aspekte des 13. Ziels *„Umgehend Maßnahmen zur Bekämpfung des Klimawandels und seiner Auswirkungen ergreifen“* [32] anhand des Energiefahrrades thematisiert werden.

Diese Ziele sind besonders mit Blick auf die jüngsten, allgegenwärtigen politischen Entwicklungen wie die Debatte um das „Heizungsgesetz“ oder den Netz- und Energieausbauplänen der Bundesregierung von großem Interesse. Gleichzeitig werden Themen wie Klimaschutz und Energiewende in der Medienlandschaft immer präsenter. Bewegungen wie Fridays for Future zeigen das Interesse junger Menschen an diesen Themen. Trotz der Relevanz und des großen Interesses kann davon ausgegangen werden, dass tiefergehende physikalische Zusammenhänge nicht bekannt sind [33].

Das Energiefahrrad ist eine Möglichkeit, ein tiefergehendes Verständnis für Energiemengen, Energiesparmaßnahmen, Energietransport, Energieumwandlung und Energieentwertung zu erwerben. Hierfür ist es hilfreich, die Energiequadriga des Didaktikers Duit Reinders

einzuführen, vgl. [34]. Das Unterrichtskonzept von Muckenfuss und Walz bietet ebenfalls eine gute Grundlage für ökologische Betrachtungen im Elektriunterricht, vgl. [1, S. 137-150].

Ist den Schülerinnen und Schülern die energieübertragende Funktion entsprechend Abschnitt 2.3.1 bekannt, kann die Elektrizität als „elektrischer Sklave“ eingeführt werden [1, S. 79]. Häufig wissen die Lernenden jedoch nicht, wie viele „elektrische Sklaven“ ihr Lebensstil benötigt. Laut Stromspiegel lag der Prokopfverbrauch eines Bundesbürgers im Jahr 2024 bei etwa 1.322 kWh im Jahr [35]. Dies entspricht etwa 3,62 kWh am Tag oder einem kontinuierlichen Energiestrom von ≈ 150 W. Wird davon ausgegangen, dass ein Sklave für 8 h, 100 W auf dem Energiefahrrad treten kann, so „erzeugt“ jeder Sklave 0,8 kWh am Tag. Jeder Bundesbürger brauchte demnach 4,5 Sklaven, die jeden Tag 8 h lang Fahrradfahren. Es macht an dieser Stelle Sinn, einige Schülerinnen und Schüler für mehr als 5 min 100 W auf dem Energiefahrrad treten zu lassen und zu fragen, ob sie sich vorstellen können, dies für 8 h jeden Tag zu machen. Die meisten werden diese Frage vermutlich mit „nein“ beantworten.

Vertieft werden kann das Thema, indem weitere Energiebedarfe für Heizenergie oder Verkehr betrachtet werden. Auch hierfür kann die benötigte Menge „elektrischer Sklaven“ berechnet werden. Für die Ladung eines Tesla Model 3 mit 57,5 kWh brauchte es z.B. 72 Sklaven, die an einem Tag 8 h lang in die Pedale treten. Ein Sklave benötigte demnach 72 Tage für eine Akkuladung. Anhand dieser Thematik können dann auch Primärenergiebedarfe z.B. für Benzin mit der elektrischen Primärenergie eines Elektrofahrzeugs verglichen werden. Darauf aufbauend könnten die CO₂-Einsparungen des Elektrofahrzeuges pro „Tankfüllung“ berechnet werden. Anhand dessen ließe sich auch der Vergleich einer Ladung des deutschen Energiemix mit reinem Ökostrom (z.B. aus eigener PV-Anlage) diskutieren.

Die vorrausgegangenen Betrachtungen legen nahe, Einsparmöglichkeiten für den Alltag zu untersuchen. Eine Möglichkeit ist es, Standby-Verbräuche zu diskutieren. Der Standby-Stromverbrauch liegt im Schnitt bei 360 kWh pro Jahr und Haushalt [35]. Dies entspricht einer Dauerlast von 41,1 W. Es macht an dieser Stelle Sinn, einen entsprechenden Widerstand an das Energiefahrrad anzuschließen und den Schülerinnen und Schülern die Möglichkeit zu geben, die entsprechende Anstrengung zu erfahren. Dabei sollte ein Keramikwiderstand verwendet werden, der die Leistung in Wärme umsetzt, um den „Verlustcharakter“ bzw. die Energieentwertung zu verdeutlichen. Mit einem DynaMot ist diese Last nicht umsetzbar.

Anhand der Entwicklung von Leuchtmitteln lassen sich ebenfalls einige ökologische und ökonomische Betrachtungen durchführen. Wird zuerst eine 100 W Glühbirne (ca. 1500 lm) an das Energiefahrrad angeschlossen, so schaffen es wahrscheinlich die meisten Schülerinnen und Schüler, diese zu betreiben. Eine zweite parallele Glühbirne sorgt bereits für sehr große Anstrengungen. Eine dritte ist für manche bereits zu viel. Gleiches wird mit Kompaktleuchtstofflampen – auch bekannt als Energiesparlampen – mit gleicher Lumenzahl (ca. 25 W) durchgeführt. Schnell fällt auf, dass bereits 4 Leuchtmittel parallel angeschlossen

werden können, um die Belastung einer Glühbirne zu erhalten. Gleiches wird mit einem 1500 lm LED-Leuchtmittel durchgeführt. Diese haben in der Regel eine Leistung von 10 – 15 W. Eine LED am Energiefahrrad ist nun kaum als Belastung wahrnehmbar, erst ab einer Mehrzahl paralleler LED-Leuchtmittel spüren die Schülerinnen und Schüler eine Anstrengung. Neben den Energiesparpotentialen von LED-Leuchtmitteln können auch ökonomische Betrachtungen durchgeführt werden. Beispielweise könnten die benötigten „Stromkosten“ und die deutlich längere Lebensdauer von LED-Leuchtmitteln mit denen von Glühbirnen verglichen und diskutiert werden. Ein ähnliches Vergleich wäre auch mit TV-Geräten denkbar. Während ein alter Plasma-TV in etwa 250 W benötigt, liegen moderne Geräte unter 100 W.

Deutlich größere Energiesparpotentiale liegen jedoch bei der Erhitzung von Wasser. Muckenfuss und Walz diskutieren das Einsparpotenzial von Koch- zu Buntwäsche bei unterschiedlichen Temperaturen. Sie berechnen die benötigten Energiemengen und Energiekosten pro Waschgang, vgl. [1, S. 144]. Für eine größere Alltagbedeutung kann die Energieersparnis für das Kochen von Wasser ermittelt werden. Dazu werden Schülerinnen und Schüler beauftragt, einen halben Liter Wasser zum Kochen zu bringen, um ein Paket Instant-Götterspeise zuzubereiten. Mit einem DynaMots wird sich schnell zeigen, dass dies auch mit mehreren DynaMots nicht möglich ist [1, S. 139]. Für ein Erfolgserlebnis müssen die Schülerinnen und Schüler das Energiefahrrad verwenden. Mithilfe eines 100 W-Campingwasserkochers gelingt es schließlich, die 500 ml Wasser zum Kochen zu bringen. Dazu müssen sich die Lernenden jedoch abwechseln, damit die körperliche Belastung nicht zu groß wird. Denn für einen halben Liter wird ca. eine halbe Stunde benötigt. Ziel ist es darzustellen, dass die benötigte Energiemenge, um einen halben Liter Wasser zum Kochen zu bringen, groß ist. Anhand dessen kann diskutiert werden, wie viel Energie und Geld gespart werden kann, wenn nur ein halber anstatt eines ganzen Liters zum Kochen gebracht wird. Diese Diskussion wird den Lernenden im Gedächtnis bleiben und für das nächste Mal beeinflussen, wenn es darum geht, Nudeln oder Tee zu kochen. Ein solches Vorgehen wird im Abschnitt 6.3.3. weiter skizziert.

Die Anzahl weiterer möglicher Experimente ist groß, mithilfe des Energiefahrrads lassen sich Energiemengen, Wirkungsgrade und Energieflüsse in den Erlebnisbereich bringen. Auf dessen Basis können dann politische, kulturelle, gesellschaftliche, ökologische und ökonomische Zusammenhänge diskutiert werden. Ziel aller hier dargestellten Versuche ist es, den Lernenden ein Gefühl für Energiemengen und Energieentwertung zu verschaffen, um zu verantwortungsvoller Nutzung zu erziehen. Dabei spielt das Lernen im sinnstiftenden Kontext eine besonders wichtige Rolle. Durch den strengen Alltagsbezug sowie die ökologischen und ökonomischen Einordnungen wird den Lernenden die Sinnhaftigkeit der Lehrinhalte klar gemacht. Ihnen wird gezeigt, wie sie verantwortungsvoll mit Energie umgehen können, und dabei gleichzeitig Geld sparen sowie etwas für die Umwelt tun. Dies kann die Lernenden zudem bei zukünftigen Kaufentscheidungen wie z.B. Wärmepumpentrockner vs.

konventioneller Trockner beeinflussen. Zudem bekommen Schülerinnen und Schüler ein Gefühl für die Einheit Watt und können diese beim Kauf von Produkten kontextualisieren. Sie können z.B. verstehen, dass es einige Produkte gibt, bei denen eine große Leistung erwünscht ist, wie z.B. bei einem Wasserkocher, damit das Wasser möglichst schnell kocht. Andersherum können sie nachvollziehen, dass es mit dem Blick auf Energieentwertung sinnvoll ist, ein Leuchtmittel mit geringer Leistung und hoher Lumenzahl zu kaufen. Für weitere Beispiele zu diesen Thema, vgl. [1, S. 137-146] und [33].

3 Technische Grundlagen und Analyse

Im diesem Abschnitt werden die für das Energiefahrrad (Produkt) wichtigen technischen Grundlagen erläutert und erste Komponenten ausgewählt. Um die technischen Abwägungen durchführen zu können, wird zunächst eine Anforderungs- und Betriebsbedingungsanalyse gezeigt. Aus dieser Analyse können dann technische Schlussfolgerungen abgeleitet werden. Daraus kann weiterführend eine erste Auswahl der Grundkomponenten wie, z.B. dem Generator, erfolgen.

3.1 Anforderungen und Betriebsbedingungen

Es soll ein Energiefahrrad entwickelt werden, welches der Zieldefinition aus Abschnitt 1.3 und den Kriterien aus Anhang B entspricht. Das Fahrrad soll als Inseltopologie, vgl. Abbildung 2-3, entworfen werden. Dies bedeutet, dass keinerlei Verbindung zum Netz vorliegt. Aus diesen Zieldefinitionen wurden folgende Anforderungen und Betriebsbedingungen für das zu entwickelnde Energiefahrrad bestimmt. Die folgenden Punkte sind für die Entwicklung sowie für den späteren Betrieb des Energiefahrrads unbedingt zu beachten:

B1: Umgebungsbedingung

- **Einsatzort:** Das Energiefahrrad wird typischerweise für den Schulunterricht verwendet. Sein Einsatzort sind Klassenräume, Fachräume, Werkstätten und Mehrzweckräume.
- **Feuchtigkeit:** Das Produkt wird ausschließlich für den Betrieb in geschlossenen, trockenen Räumen gemäß VDE 0700-1 konstruiert, dessen relative Luftfeuchte bis 85% (nicht kondensierend) beträgt. Der Betrieb in Feuchträumen und im Außenbereich ist nicht vorgesehen.
- **Temperatur:** Das Produkt wird für den kommerziellen Temperaturbereich gemäß VDE 0700-1 von 0 bis 70 C° ausgelegt. Es wird von einer Raumtemperatur zwischen 5 und 35 C° ausgegangen.

B2: Sicherheit

- **Nutzung:** Das Energiefahrrad darf nicht von Lernenden ohne die Aufsicht von Lehrpersonal genutzt werden. Das Lehrpersonal muss über entsprechende Fachkenntnisse und Kenntnisse über die RiSU besitzen, vgl. [14, S. 92].
- **Quetschgefahr:** Um Quetschungen zu vermeiden, sind, sofern möglich, alle drehenden Teile abzudecken. Bauteile, deren Zugang betriebsbedingt möglich sein muss, sind durch Warnzeichen nach DIN EN ISO 7010 auszustatten. Sicherheitsabstände sind zu bestimmen und einzuhalten, vgl. [36].
- **Rutschgefahr:** Auf rutschigem Untergrund ist eine Gummimatte unterzulegen, der Halt der Standfüße ist alle 4 Wochen zu überprüfen, vgl. [37].
- **Elektrische Sicherheit:**

- Die Leitungsquerschnitte, Kontaktflächen und Bauteile sind gemäß VDE 0140-1 im Leistungsteil für den Betriebsstrom im Aussetzbetrieb (S3) auszulegen. Die Betriebszeit t_B wird auf max. 30 min festgelegt. Die Aussetzzeit t_{St} wird auf 10 min festgelegt, vgl. [38, S. 104].
- Das Energiefahrrad (ohne Wechselrichter) sollte, **sofern möglich**, eine nicht-berührungsgefährlich Spannung gemäß RiSU I-10.1 liefern, um das Experimentieren in allen Klassenstufen zu ermöglichen, vgl. [7, S. 26]. Dazu darf:
 - die Spannung 60 V DC, gemessen mit einem hochohmigen ($< 50 \text{ k}\Omega$) Spannungsmesser, nicht überschreiten
oder
 - bei Spannungen über 60 V DC der Fehlerstrom (über einen Körperwiderstand von $2 \text{ k}\Omega$) 12 mA nicht überschreiten
oder
 - die mögliche Entladungsenergie 350 mJ nicht überschreiten[14, S. 91].

Für eine nicht-berührungsgefährlich Spannung muss mindestens einer dieser Punkte erfüllt werden. Sie wird i.d.R. netzunabhängig durch Batterien, Solarzellen oder netzabhängig durch Netzteile mit galvanischer Trennung gemäß EN 61558-2-6 bereitgestellt [14, S. 91].

- Wird ein 230 V – AC Wechselrichter verwendet, darf ausschließlich eine Fachlehrkraft mit entsprechender Ausbildung und Kenntnissen daran experimentieren. Ausnahmen sind nur in der Gymnasialen Oberstufe erlaubt, vgl. [14, S. 92-93]
- Der 12 V DC/230 V AC Wechselrichter sollte über eine galvanische Trennung zwischen Schutzkleinspannung und Netzspannung verfügen, vgl. [14, S. 91]. Durch den Betrieb des Wechselrichters sind die Bestimmungen gemäß VDE 0100-410 für Schutzkleinspannungen einzuhalten. Versuche dürfen nur oberhalb der 4. Jahrgangsstufe oder durch eine fachkundige Lehrkraft erfolgen, vgl. [7, S. 26]

B3: Konnektivität und Funktion

- Das Produkt sollte mit den gängigsten Fahrrädern von 26 bis 28 Zoll kompatibel sein.
- Es sollten keine baulichen Veränderungen am eigentlichen Fahrrad notwendig sein, um es mit dem Energiefahrrad zu verbinden.
- Das Fahrrad sollte schnell und einfach mit dem Energiefahrrad verbunden werden können.

- Handelsübliche 12 V – DC Lasten bis 300 W können über 4 mm Sicherheitsbuchsen oder alternative Steckvorrichtungen an das Energiefahrrad angeschlossen werden.
- Handelsübliche 230 V – AC Lasten mit Schutzkontaktstecker bis 300 W können über einen Wechselrichter angeschlossen werden. Der Wechselrichter lässt sich über eine geeignete Steckvorrichtung an das Energiefahrrad anschließen.
- Das Produkt verfügt über Messbuchsen, an denen der Strom und die Spannung gemessen werden kann.

B4: Wartung und Reparatur

- **Prüfungen:** Bei einem Nachbau sollte das Energiefahrrad durch eine Elektrofachkraft geprüft werden. Eine Prüfung nach DGUV 4 ist für den Wechselrichter unumgänglich. Die geprüften Geräte sind mit einem DGUV-Test-Zeichen zu versehen. Der Wechselrichter sollte über GS- oder VDE-Kennzeichen verfügen, vgl. [14, S. 269].
- **Wiederholungsprüfung:** Es sind jährliche Prüfungen nach DGUV 4 am Wechselrichter sowie den anzuschließenden Betriebsmitteln durchzuführen. Darüber hinaus ist das Energiefahrrad als solches durch eine Elektrofachkraft zu prüfen. Regelmäßige Thermografien sind ebenfalls zu empfehlen [39].
- **Sichtprüfung:** Vor jeder Benutzung des Energiefahrrades ist eine Sichtprüfung gemäß GU-V-SI 8040 durchzuführen, vgl. [7, S. 41]. Im Anhang C ist eine Prüfliste für die Sichtprüfung gezeigt.
- **Reparaturen:** Das Produkt soll modular aufgebaut werden, so dass bei der Beschädigung einzelner Komponenten nur diese austauschbar sind. Zudem sollte die Verfügbarkeit der einzelnen Komponenten gegeben sein. Nach jeder Reparatur ist das Energiefahrrad durch eine Elektrofachkraft zu prüfen. Reparaturen am Wechselrichter dürfen nur durch Elektrofachkräfte durchgeführt werden.
 - Die Sicherung im Energiefahrrad ist kleiner auszulegen als die des Wechselrichters, um eine Beschädigung dessen auszuschließen.

B5: Nachbaubarkeit

- **Elektrische Konstruktion:** Elektrische Anschlüsse sollten durch einfache Chrimpverbinder, Verschraubungen oder Lötanschlüsse realisierbar sein. Das Anschließen und Verbinden sollte möglichst ohne Spezialwerkzeuge auskommen.
- **3D-Druck:** 3D-gedruckte Bauteile sollten möglichst einfach herzustellen sein, um das Nachdrucken auch auf günstigeren 3D-Drucker-Modellen zu erleichtern.

- **Mechanische Konstruktion:** Die mechanische Konstruktion sollte mit haushaltsüblichen Werkzeugen (Akkuschrauber, Bohrer, Hammer, Säge, Feile, etc.) nachbaubar sein.
- **Kosten:** Die Anschaffungskosten der Materialien sind möglichst gering zu halten
- **Beschaffung:** Die benötigten Materialien sollten schnell und einfach über das Internet oder einen Baumarkt zu beschaffen sein.

3.2 Fahrradhalterung

Während der vorangegangenen Analysen wurde festgelegt, dass Fahrräder von 26 bis 28 Zoll mit dem Energiefahrrad kompatibel sein sollen, weil der elektrische Anfangsunterricht in den curricularen Vorgaben für die 6. bzw. 7. Klasse vorgesehen ist, vgl. Abschnitt 2.3. In diesen Jahrgängen sind die Schülerinnen und Schüler i.d.R. zwischen 11 und 13 Jahre alt. Für diese Altersgruppe empfiehlt sich ein 26 Zoll-Fahrrad [40]. In höheren Klassenstufen und in der Sekundarstufe II werden 28 Zoll-Fahrräder präsenter. Der Fahrradrollentrainer von Ultrasport, erlaubt die Aufnahme von Fahrrädern zwischen 26 und 28 Zoll [37]. Das Produkt wird im Folgenden als Rollentrainer bezeichnet.

Der Rollentrainer ist zudem mit einem Preis von etwa 50 € preisgünstig. Zudem bietet der Markt eine Vielzahl baugleicher alternativer Produkte an, wodurch die Verfügbarkeit erhöht wird. Die Abbildung 3-1 zeigt den ausgewählten Fahrradrollentrainer von Ultrasport.

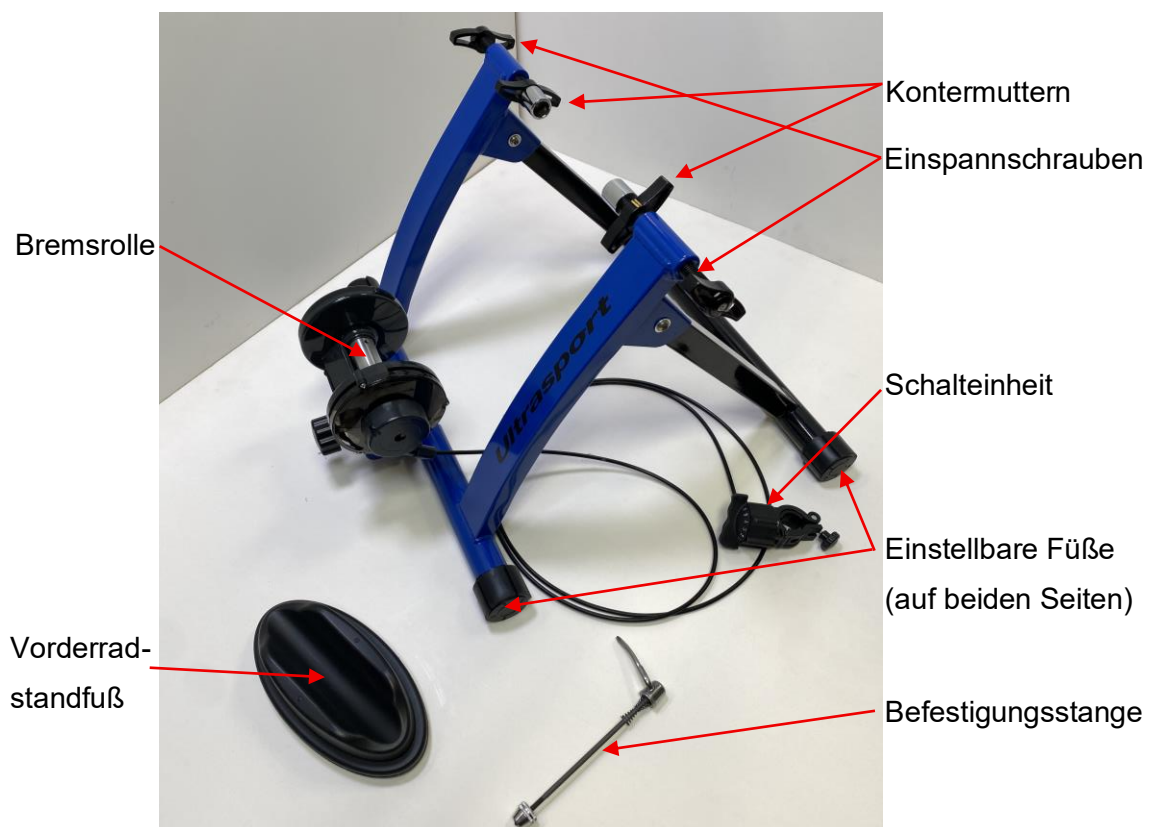


Abbildung 3-1: Ultrasport Fahrradrollentrainer mit Zubehör

Der Fahrradrollentrainer von Ultrasport verfügt über eine Bremsrolle, die das Hinterrad des eingespannten Fahrrades bremsen kann, vgl. Abbildung 3-1. Einstellen lässt sich die Bremskraft über die Schalteinrichtung. Die Bremsvorrichtung wird für das Energiefahrrad demontiert. Für das Energiefahrrad dient der Ultrasport Fahrradrollentrainer lediglich als Grundgestell und Fahrradhalterung. Eine Wiederverwendung der Bremsrolle muss im Laufe der Arbeit geprüft werden.

Die Halterung des Fahrrades erfolgt über zwei Schrauben, mit denen sich die Schnellspann-Achse des Fahrrades fixieren lässt, vgl. Abbildung 3-1. Durch zwei Kontermuttern lässt sich das eingespannte Fahrrad sichern, so dass es sich nicht durch Vibrationen lösen kann. Für Fahrräder, die über keine Schnellspannachse verfügen, ist eine entsprechende Befestigungsstange im Lieferumfang enthalten. Zur besseren Stabilität ist ein Standfuß für das Vorderrad ebenfalls im Lieferumfang enthalten. Zudem lassen sich die Füße des Rollentrainers durch Drehen in der Höhe verstellen, um den Stand weiter zu verbessern. Für weitere Hinweise zur Nutzung, Wartung und Pflege vgl. [37].

Da der Rollentrainer von Ultrasport zum aktuellen Zeitpunkt (11.08.2025) nicht mehr verfügbar ist, wird an dieser Stelle auf den baugleichen Rollentrainer von Relaxdays verwiesen, vgl. Anhang D, Stückliste Mechanik, Position (Pos) 2. In der Stückliste Mechanik werden alle für die mechanische Konstruktion notwendigen Komponenten aufgelistet. Im Anhang A, im Inhalt des USB-Sticks, ist zusätzlich eine ausführliche Stückliste mit möglichen Bezugsquellen und Preisen zu finden.

3.3 Generator

Um aus dem in 3.2 ausgewählten Fahrradrollentrainer ein Energiefahrrad zu konstruieren, wird ein Energiewandler benötigt, welcher die mechanische Energie des Hinterrades in elektrische Energie umwandelt. Dieses wichtige Strukturelement wurde bereits im Abschnitt 2.3.2 angesprochen und in Abbildung 2-3 gezeigt. Als Energiewandler kommt eine Reihe elektrischer Maschinen in Frage. Im Zuge dieser Arbeit wurden jedoch Kfz-Lichtmaschinen wurden als gut geeignete Generatoren identifiziert. Lichtmaschinen sind robuste selbsterregte Drehstrom-Synchron-Generatoren und haben damit einen Aufbau analog zu Kraftwerksgeneratoren. Das Drehstromsystem wird intern über ein B6-Brückengleichrichter gleichgerichtet. Dank der internen Gleichrichtung und Regelung geben Lichtmaschinen eine auf ca. 14 V-DC geregelte, pulsierende Gleichspannung aus. Sie verfügen über eine Schwenkarmkonstruktion, mithilfe der sie an das Hinterrad gepresst werden können. Lichtmaschinen besitzen Riemenscheiben, die ggf. als Laufrolle fungieren können. Auch ein Betrieb mehrerer Lichtmaschinen parallel ist unter bestimmten Umständen umsetzbar, vgl. [41, S. 153]. Zudem können Kfz-Lichtmaschinen bei lokalen Kfz-Verwertern oft kostenlos beschafft werden. Die überzeugenden Vorteile von Lichtmaschinen sprechen für eine Verwendung als Generator beim Energiefahrrad.

Für die spätere Entwicklung des Energiefahrrades ist es weiterführend notwendig zu verstehen, wie Kfz-Lichtmaschinen aufgebaut sind und welche Problematiken dieser Aufbau birgt. Da seit den 1970 er-Jahren fast ausschließlich Drehstrom-Generatoren verwendet werden [42], wird sich im Folgenden auf diese Bauart beschränkt. Die nachstehende Abbildung 3-2 zeigt den prinzipiellen Aufbau einer Drehstrom KFZ-Lichtmaschine.



Abbildung 3-2: Prinzipdarstellung einer KFZ-Lichtmaschine, entnommen aus [43] © Verlag Europa-Lehrmittel

Wie in Abbildung 3-2 zu erkennen ist, verfügt die Lichtmaschine über drei um 120 Grad räumlich versetzte Ständerwicklungen (Spulen). Der Ständer ist der Teil der Lichtmaschine, der sich nicht dreht. Die drei Ständerwicklungen sind um einen Eisenkern gewickelt, um den magnetischen Fluss zu stärken. Jeweils ein Ende der drei Ständerwicklungen ist auf einen gemeinsamen Sternpunkt geführt. Die drei Wicklungen sind damit in einer sogenannten Sternschaltung. Wird in diesen Ständerwicklungen ein Magnet gedreht, entsteht ein dreiphasiges Drehstromsystem.

Die drei freien Enden Ständerwicklung (Phasen) sind auf einen B6-Brückengleichrichter geführt. Jede der drei Phasen wird über jeweils zwei Leistungsdiode gleichgerichtet, vgl. Abbildung 3-2. Die gleichgerichtet pulsierende Gleichspannung kann dann zwischen den Kontakten B+ und D- bzw. dem Gehäuse gemessen werden. Dieser Teil wird im späteren Verlauf dieser Arbeit als Betriebsstromkreis bezeichnet.

Der Rotor (drehender Teil) in der Lichtmaschine ist ein Elektromagnet. Um diesen Elektromagneten mit Energie zu versorgen, verfügen Lichtmaschinen über einen Hilfsgleichrichter. Der Hilfsgleichrichter richtet über die Erregerdioden das Drehstromsystem ebenfalls gleich, vgl. Abbildung 3-2. Diese Spannung kann am D+ Kontakt angegriffen werden.

In modernen Lichtmaschinen wird der Kontakt D+ auf einen internen Regler geführt. Der Regler ist in Abbildung 3-2 nicht gezeigt, da er bei alten Lichtmaschinen manchmal als externes Bauteil ausgeführt ist. Moderne Kfz-Lichtmaschinen (jünger als 1970) verfügen allerdings i.d.R. über interne Regler [41, S. 139].

Über den Kontakt D+ und den Regler wird der DF (Dynamo Field) Kontakt mit Energie versorgt. Zwei Schleifringe kontaktieren den rotierenden Elektromagneten mit DF und dem Gehäuse, vgl. Abbildung 3-2. Der Rotor kann so von einem Elektronenstrom durchflossen werden und ein Magnetfeld aufbauen.

Der durchströmte Elektromagnet ist zusätzlich mit zwei sogenannten Klauenpolen ausgestattet. Diese beiden Klauenpole sind Eisenteile mit jeweils sechs Klauen. Die Klauenpole sind über die beiden Enden der Spule geschoben, so dass ein Klauenpol den magnetischen Plus- und der andere den Minuspol darstellt, vgl. Abbildung 3-2 und Abbildung 3-3.



Abbildung 3-3: Explosionszeichnung eines Klauenpolläufers, entnommen aus [42] (links); Foto eines Klauenpolläufers (rechts)

Durch das Drehen dieses 12-poligen Elektromagneten in den drei Ständerwicklungen wird eine Spannung in die Ständerwicklungen induziert. Pro Rotorumdrehung wird so eine sinusförmige Spannung mit 12 Halbwellen in jede Phase induziert. Bei drei gleichgerichteten Phasen entsteht eine pulsierende Gleichspannung mit 36 Halbwellen pro Umdrehung. Die pulsierende Eigenschaft der Gleichspannung stellt das erste Problem der Lichtmaschine für das Energiefahrrad dar. Um einen Wechselrichter an das Energiefahrrad anschließen zu können, muss die Ausgangsspannung U_{out} geglättet werden. Hierfür könnte ein Kondensator in Frage kommen.

Da die für den Rotor benötigte Energie über den internen Hilfsgleichrichter generiert wird und der Rotor die gezeigte Bauform aufweist, bezeichnet man Lichtmaschinen auch als „Selbsterregte-Drehstrom-Klauenpolgeneratoren“.

Um den Aufbau von Lichtmaschinen weiter zu verdeutlichen, ist das nachstehende Schaltbild einer Selbsterregten-Drehstrom-Lichtmaschine gezeigt. In der Abbildung 3-4 ist zudem der

Regler (blaues Kästchen) gezeigt, welcher in den vorherigen Abbildungen nicht zu erkennen ist.



Abbildung 3-4: Schaltbild einer Drehstromlichtmaschine mit externen Regler, entnommen aus [43] © Verlag Europa-Lehrmittel

Der in Abbildung 3-4 gezeigte Spannungsregler ist zunächst ein großer Vorteil von Lichtmaschinen als Generator. Der Regler sorgt für eine geregelte Ausgangsspannung von etwa $U_{out} = 14 \text{ V} - \text{DC}$. Auf der anderen Seite verursacht der Regler Spannungsspitzen. Diese Spannungsspitzen sind das zweite große Problem für das Energiefahrrad. Die Spannungsspitzen entstehen dadurch, dass der Regler den Elektromagneten im Rotor ein- und ausschaltet. Genau dieses Ein- und Ausschalten der Erregerwicklung sorgt für die Regelung der in die Ständerwicklung induzierten Spannung. Jedoch kommt es beim Abschalten zur Selbstinduktion innerhalb der Erregerwicklung. Diese Selbstinduktion sorgt wiederum für die Spannungsspitzen. Zenerdioden könnten diese Spannungsspitzen verhindern, indem sie bei Überspannungen niederohmig werden.

Das dritte Problem von KFZ-Lichtmaschinen ist, dass die Remanenz (Restmagnetisierung des Klauenpolläufers) nicht ausreicht, um die Durchlassspannung der Erreger- und Minusdioden ($2 \cdot 0,7 \text{ V} = 1,4 \text{ V}$) zu überwinden [41, S. 122-123]. Aufgrund dieser Problematik sind Lichtmaschinen auf einen Vorerregerstrom aus der Bordnetz-Batterie angewiesen. Die Batterie ist in Abbildung 3-4 gezeigt, sie wird über eine Kontrolllampe auf den Kontakt D+ geführt. Für das Energiefahrrad bedeutet dies, dass eine Batterie notwendig ist, die die Vorerregung sicherstellt.

Der vierte und letzte große Nachteil von Kfz-Lichtmaschinen ist, dass unterschiedliche Hersteller unterschiedliche Kontaktbezeichnungen und Stecker verwenden. Die nachstehende Tabelle 3-1 zeigt, wie die unterschiedlich die Kontaktbezeichnungen von Lichtmaschinen ausfallen können.

Tabelle 3-1: Mögliche, herstellertypische Kontaktbezeichnungen an Lichtmaschinen und ihre Funktion, nach [44]

	Feld/Rotor	Masse	Kontroll-Lampe	Batterie +	Zündung	Drehzahl-Signal	CPU-Anschluss
<i>Bosch</i>	DF	D-	D+/61/L	B+	15	W	DMF/FR
<i>Butech</i>	F	-	D+	B+	/	/	/
<i>Chrysler</i>	FLD	B-	L	B+	/	/	/
<i>Delco (Remy)</i>	F/FLD/DF	GRD/B	D+/L/1	B+	I/IG	P/R/W	/
<i>Fiat</i>	67	31	15	B+	/	W	/
<i>Ford-Visteon</i>	DF/F/FLD	DF/F/FLD	D+/IND/I	B+/BA T	/	W/STA/S	/
<i>Hitachi</i>	F/FLD	E	L	B+/A	IG/R	P	FR/G
<i>Iskra</i>	DF	D-	D+	B+	/	W	/
<i>Lada</i>	61	31	15	B+/30	/	/	/
<i>Lucas</i>	F	-	D+	B+	/	STA	/
<i>Marelli</i>	67	31	15	B+/A	/	W	FR/SIG
<i>Mitsubishi</i>	F	E	L	B+	IG/R	P	FR/G/D
<i>Motorola</i>	EXC/DF	-/B-	D+/L/IND	B+/+	/	W/AC	+F
<i>Paris</i>	EXC	-/B-	L	B+	/	W	/
<i>Sev Marchal</i>	DF	-/B-	61+	B+	/	W	/
<i>Valeo</i>	EXC	-	L/D+	B+	+	W	DMF
<i>AS-PL</i>	F	N/E	L	B+	IG	W	/
<i>Ridex</i>	DF/F	B-	L/D+	B+	/	W	DMF/COM

Diese unterschiedlichen Kontaktbezeichnungen erschweren den Nachbau. Durch die Tabelle 4-1 ist es jedoch möglich, die entsprechenden Kontakte zu identifizieren.

Für das Energiefahrrad sind lediglich die ersten 5 gelb markierten Spalten wichtig, vgl. Tabelle 4-1. Drehzahlsignal und CPU-Anschlüsse (Steuergerät) sind für das Energiefahrrad eher uninteressant. An der Klemme W kann, falls erwünscht, die Drehzahl n in U/min entsprechend der Gleichung $n = (6 \cdot f)/60$ bestimmt werden. Darin ist f die Frequenz der an Klemme W gemessenen Spannung, vgl. [41, S. 153]

Da die Stecker des Vorerregerkreises nicht herstellerübergreifend passen, sollte beim Kauf der Lichtmaschine darauf geachtet werden, den passenden Stecker mitzuerwerben. Besser sind Lichtmaschinen, die keinen Stecker benötigen und ausschließlich über Schraubkontakt verfügen. Im Anhang E ist eine gut geeignete Lichtmaschine vorgeschlagen.

Insgesamt kann gezeigt werden, dass Kfz-Lichtmaschinen gut für das Projekt Energiefahrrad geeignet sind. Sie sind robust und verfügen bereits über Gleichrichter und Regelung, wodurch teure elektrotechnische Komponenten wie ein DC-DC-Wandler hinfällig werden. Auftretende Problematiken können durch eine geschickte elektrotechnische Entwicklung behoben werden.

Für diese Arbeit wurden insgesamt drei Lichtmaschinen beschafft. Es wurde ein Bosch-0123-120-001-70A-Compaktgenerator aus einem Opel Corsa C, ein Mitsubishi-A1T25097B-Topfgenerator und eine unbekannte Lichtmaschine ohne Typenschild beschafft. Die Lichtmaschinen unterscheiden sich lediglich etwas in ihrer Bauweise. Compaktgeneratoren sind gegenüber Topfgeneratoren effizienter (höherer Wirkungsgrad) und haben eine höhere Leistung bei ähnlichem Bauvolumen, vgl. [41, S. 146-147]. Die unbekannte und die Mitsubishi Lichtmaschine verfügen über einen Keilriemenantrieb, die Bosch-Lichtmaschine über einen Keilrippenriemen-Antrieb. Die nachstehende Abbildung zeigt die zur Verfügung stehenden Lichtmaschinen, vgl. Abbildung 3-5.

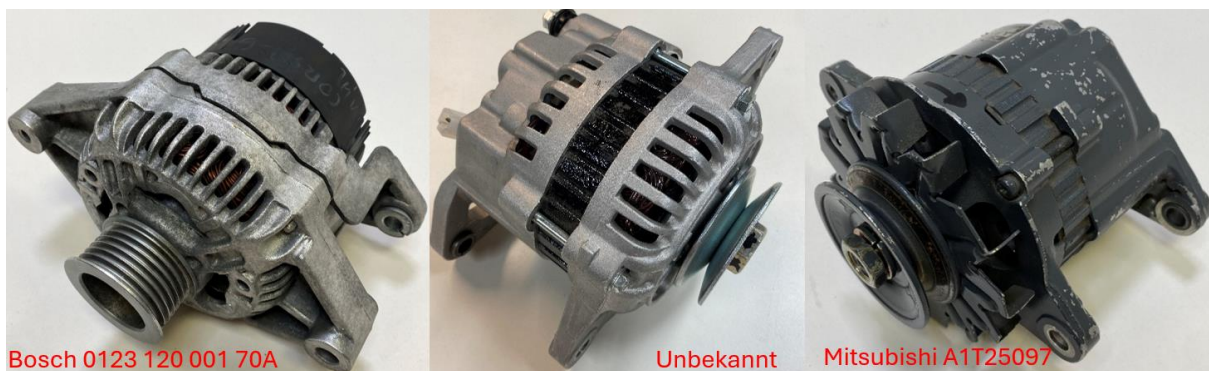


Abbildung 3-5: Fotos der vorhandenen Lichtmaschinen mit Typenbezeichnung

3.4 Auswahl der mechanischen Kopplung

Insgesamt kommen drei mögliche mechanische Kopplungsvarianten für Lichtmaschine und Fahrrad in Frage. Die Lichtmaschine kann zum einen über eine Kette angetrieben werden, wofür sich eine Fahrradkette eignen könnte. Die zweite Möglichkeit ist die Verwendung eines Riemens, der über Hinterrad und Riemenscheibe gelegt wird. Die letzte Variante ist die direkte Kopplung der Lichtmaschine an das Hinterrad.

Die Kopplung des Fahrrades mit der Lichtmaschine über eine Fahrradkette scheint zunächst einleuchtend, da das Fahrrad bereits über Kettenblätter verfügt. An der Lichtmaschine könnte ein 3D-gedrucktes Kettenrad angebracht werden. Allerdings würde die Konstruktion einen komplexen Kettenspanner benötigen und die Kette wäre nicht mit jedem Fahrrad kompatibel, da es unterschiedliche Typen von Ketten und Kettenblättern gibt. Zudem würden sich Lehrkräfte bei der Montage der Kette die Finger an den Kettenblättern schmutzig machen. Der Antrieb über eine Kette fällt damit raus.

Riemen sind gegenüber Ketten eine sauberere Lösung und benötigen keine Schmierung. Allerdings benötigen Riemen erst recht einen gut konzipierten Riemenspanner, da es sonst zum Durchrutschen des Riemens kommen würde. Ein weiteres Problem mit Riemen ist, dass diese vom Hinterrad abspringen können. Zudem verfügen Lichtmaschinen über unterschiedliche Rientriebe, vgl. Abbildung 3-5. Aufgrund dieser und weiterer Problematiken wurde sich gegen die Verwendung eines Riemenantriebs entschieden.

Die direkte Kopplung der Lichtmaschine mit ihrer Welle bzw. Riemenscheibe an das Hinterrad erscheint als sinnvollste Lösung. Da die Lichtmaschine bereits über eine Schwenkarm-Konstruktion verfügt, kann diese genutzt werden, um die Lichtmaschine an das Hinterrad zu schwenken. Zudem haben erste Überschlagsrechnungen gezeigt, dass die Übersetzung zwischen Keilrippenriemen-Scheibe und Hinterrad bei der Bosch-0123-120-001 ausreicht, um die Lichtmaschine schnell genug zu drehen. Für die anderen beiden Lichtmaschinen kann eine 3D-gedruckte Laufrolle konstruiert werden. Ein weiterer Vorteil der direkten Hinterradkopplung ist, dass das Fahrrad schnell und ohne großen Aufwand in den Rollentrainer eingesetzt werden kann. Die Lichtmaschine kann weggeschwenkt, das Fahrrad eingespannt, die Lichtmaschine wieder an das Hinterrad angeschwenkt und gespannt werden. Diese Kopplung wird auch beim Oekotrainer verwendet, vgl. [11]. Die Herausforderung dieser Kopplungsvariante ist die Konstruktion der Lichtmaschinenhalterung am Rollentrainer sowie die Entwicklung einer geeigneten Spannvorrichtung. Die Spannvorrichtung muss präzise einstellbar sein, um den Anpressdruck der Laufrolle an das Hinterrad exakt einstellen zu können.

3.5 Wechselrichter

Wechselrichter formen Gleichspannungen zu sinusförmiger Wechselspannung um. So können Haushaltsgeräte, die 230 V-Netzspannung benötigen, am Energiefahrrad betrieben werden. Für die Ausgangsspannung der Lichtmaschine ($U_{out} = 14\text{ V} - DC$) ist ein klassischer 12 V-DC/230-AC Wechselrichter aus dem Kfz-Zubehör gut geeignet. Ein solcher Wechselrichter kann auch an den Oekotrainer angeschlossen werden und auf dessen Website erworben werden, vgl. [45]. Um die preisliche Vergleichbarkeit zu erhöhen und die Recherche Arbeit für diese Arbeit zu verringern, wurde sich für das gleiche Modell entschieden. Der Wechselrichter ermöglicht den Anschluss von 230 V Haushaltsgeräten bis 300 W. Das Modell ist in der

Stückliste im Anhang E aufgeführt. Es handelt sich dabei um einen „Solartronics TS SERIE PURE SINE WAVE INVERTER“ in der Größe 300 W. Vor der Verwendung des Wechselrichters sollten die Sicherheitsinformationen in der Bedienungsanleitung gelesen werden, vgl. [46]. Zudem sollte vor der Verwendung des Gerätes eine Prüfung gemäß DGUV Vorschrift 4 durchgeführt werden.

4 Konzeptionierung des Energiefahrrades

In diesem Abschnitt wird auf Basis der zuvor getätigten Überlegungen die Konzeptionierung des Energiefahrrades vorgenommen. Nachdem der Rollentrainer und die Lichtmaschine als geeignete Komponenten identifiziert worden sind, werden sie im Folgenden zusammengefügt. Hierbei wird das Energiefahrrad noch nicht real gebaut, sondern lediglich modelliert. Die mechanische Modellierung findet innerhalb der Software Autodesk Fusion statt.

Weiterführend wird ein Schaltplan für die elektrotechnische Beschaltung der Lichtmaschine erstellt und die elektrischen Bauteile werden ausgelegt. Um auftretende hohe Ströme mit schulischen Messgeräten aufnehmen zu können, wird zudem ein Strommessshunt konzipiert.

Um die elektrotechnischen Bauteile zu schützen, Stecker und Messpunkte platzieren zu können und ein kompaktes Produkt zu erhalten, wird im weiteren Verlauf ein Gehäuse mit Autodesk Fusion konstruiert.

4.1 Mechanische Konstruktion

Zunächst ist es von Bedeutung, die richtige Position der Lichtmaschine am Rollentrainer zu finden. Wie bereits im Abschnitt 3.2 erwähnt, wird die vorhandene Bremsrolle dafür zunächst demontiert, um Platz für die Lichtmaschine zu schaffen. Weiterführend wird die Laufrolle zur Hinterradkopplung konzipiert und unterschiedliche Varianten gegenübergestellt. Abschließend wird eine Spannvorrichtung konstruiert, um die Lichtmaschine über die Schwenkarmkonstruktion an das Hinterrad zu pressen.

4.1.1 Lichtmaschinenhalterung

Um die optimale Position der Lichtmaschine am Rollentrainer zu finden und beim Prototyping nicht zu viele Rollentrainer zu zerstören, ist es notwendig, ein 3D-Modell des Rollentrainers zu erstellen. An diesem Modell können dann unterschiedliche Positionen und Halterungen konstruiert werden, ohne sie physisch zu bauen. Mithilfe der Computer Aided Design (CAD) Software Fusion des Unternehmens Autodesk wird ein solches 3D-Modell erstellt. Bei der Erstellung des Rollentrainers wird sich auf die für das Energiefahrrad wesentlichen Komponenten beschränkt. Das Zubehör und die Bremsrolle werden nicht mitkonstruiert. Die nachstehende Abbildung 4-1 zeigt ein gerendertes Bild der Konstruktion. Die CAD-Datei der Konstruktion ist im Anhang A, im Inhalt des USB-Sticks, als 3MF-Datei zu finden.



Abbildung 4-1: Gerendertes CAD-Modell des Rollentrainers ohne Bremsrolle

Nachdem der Rollentrainer modelliert wurde, ist ein vereinfachtes Modell einer Lichtmaschine zu erstellen. Bei der Modellierung wird zunächst auf die Konstruktion der Laufrolle bzw. der Riemenscheibe verzichtet. Die Maße wurden an der unbekannten Lichtmaschine ohne Typenschild genommen, da diese als erstes zur Verfügung stand. Die unten gezeigte Abbildung 4-2 zeigt das vereinfachte 3D-Modell der Lichtmaschine.

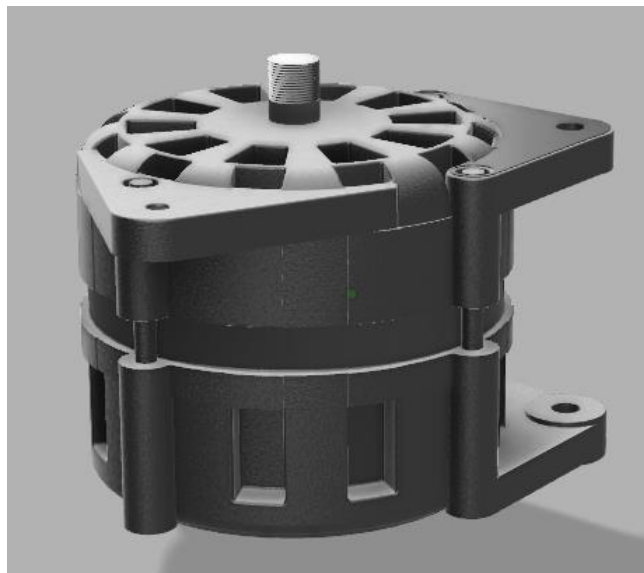


Abbildung 4-2: Gerendertes CAD-Modell einer Lichtmaschine

Das 3D-Modell ist ebenfalls im Anhang A, im Inhalt des USB-Sticks als STL-Datei zu finden. Nachdem die beiden wichtigsten Komponenten der mechanischen Konstruktion erstellt worden sind, ist es nun die Herausforderung, eine geeignete Stelle der Lichtmaschine am Rollentrainer zu definieren. Der Schwenkbereich muss so groß sein, dass sowohl 26 Zoll- als

auch 28 Zoll-Fahrräder an die Lichtmaschine gespannt werden können. Aufgrund des großen Lichtmaschinendurchmessers wird der Schwenkbereich jedoch durch den gebogenen, vertikalen Holm (Abbildung 4-1 blau) eingeschränkt. Eine weitere Herausforderung stellt die mechanische Belastbarkeit dar. Da Lichtmaschinen hohe Gewichte aufweisen und durch die Spannvorrichtung weitere Kräfte wirken, muss die Lichtmaschinenhalterung sehr robust ausgelegt werden. Aufgrund der dünnwandigen Konstruktion der Holme des Rollentrainers stellt lediglich das U-Stück des Bremsrollenhalters eine robuste Halterung dar. Diese ist aus etwa 2 mm starkem Stahl gefertigt und robust genug, die Lichtmaschine zu halten. Zudem sind hier bereits zwei Löcher vorhanden. Diese können einfach aufgebohrt werden, ohne zuvor eine genaue Position ausmessen zu müssen. Dies vereinfacht den Nachbau und verringert dessen Fehleranfälligkeit.

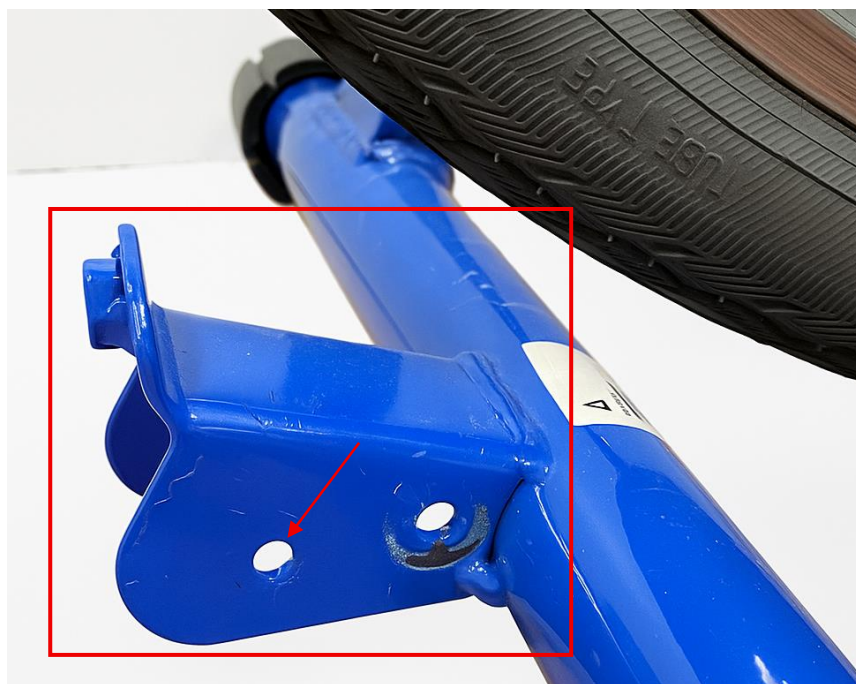


Abbildung 4-3: Nahaufnahme der Bremsrollenhalterung des Rollentrainers (KI bearbeitetes Foto)

Die Abbildung 4-3 zeigt eine Nahaufnahme des Rollentrainers mit demontierter Bremsrolle. Das U-Stück, an dem zuvor die Bremsrolle montiert war, ist mit einem roten Kasten gekennzeichnet. Das Loch, in dem die spätere Schwenkachse der Lichtmaschine montiert wird, ist mit einem roten Pfeil markiert. Als Schwenkachse wird eine M10-Gewindestange verwendet. Um herauszufinden, ob das markierte Loch tatsächlich eine gute Position der Schwenkachse darstellt, wird das Loch (auf beiden Seiten) in der CAD-Software auf 10,5 mm vergrößert und das Modell einer M10-Gewindestange in diesen Löchern positioniert. Das Modell der Gewindestange ist über die Bibliothek der CAD-Software abrufbar und muss nicht selbstständig erstellt werden. Die Gewindestange ist damit die zweite Position in der Stückliste für die mechanische Konstruktion, vgl. Anhang D. Die unten gezeigte Abbildung 4-4 zeigt den Konstruktionsschritt.

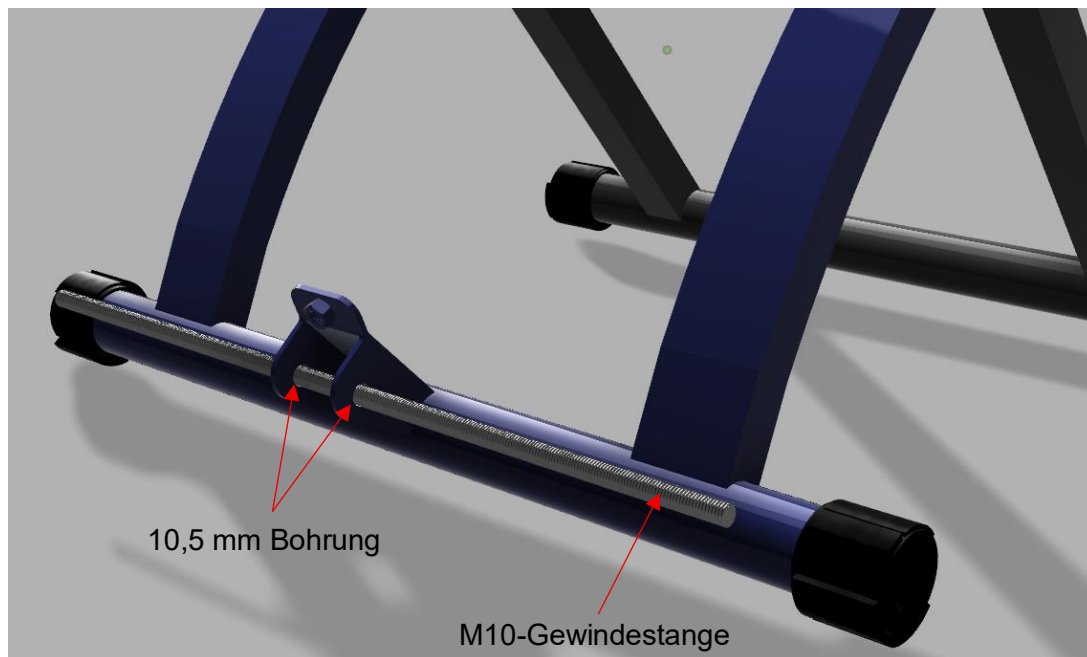


Abbildung 4-4: Gerendertes CAD-Modell des Rollentrainers mit vergrößerter Bohrung für die Schwenkachse (Gewindestange) und eingefügter M10-Gewindestange in 440 mm Länge

Weiterführend wird das Modell der Lichtmaschine mit den Schwenkarmen auf die Schwenkachse (Gewindestange) positioniert. Zudem wird ein CAD-Modell eines 28-Zoll-Fahrradreifens inklusive Felge ergänzt und in den Rollentrainer eingefügt. Das Modell des Rades (Reifen und Felge) wurde nicht selbstständig erstellt, es wurde von der Website Grabar heruntergeladen, vgl. [47]. Bei der Positionierung des Rades wurde darauf geachtet, dass es mittig im Rollentrainer steht. Die Abbildung 4-5 zeigt das CAD-Modell des Rollentrainers samt Gewindestange, Rad und Lichtmaschine.

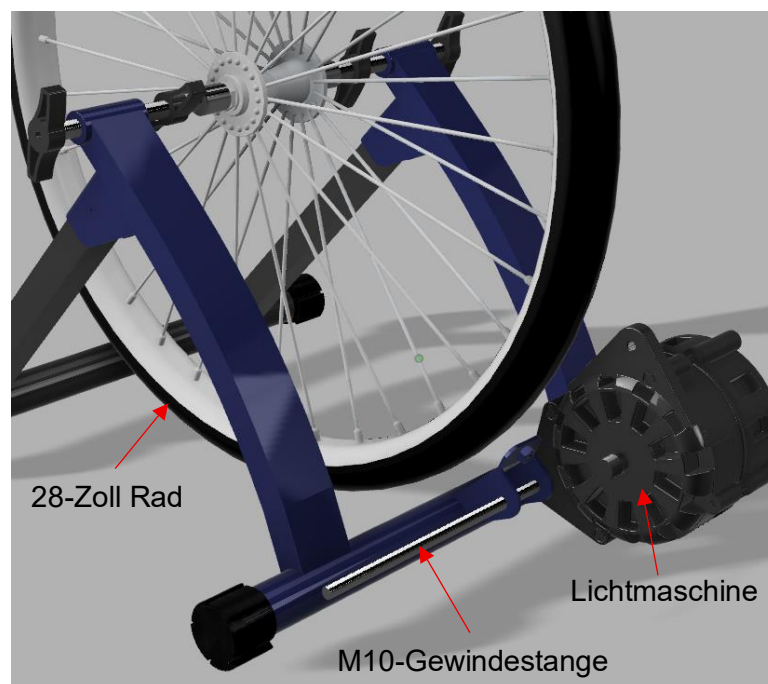


Abbildung 4-5: Gerendertes CAD-Modell des Rollentrainers mit M10-Gewindestange und Lichtmaschine, 28-Zoll-Fahrradreifen

Um die Position der Schwenkachse und damit auch der Lichtmaschine zu verifizieren, ist es nun notwendig, die Lichtmaschine in der Konstruktion an das Hinterrad zu schwenken. Dabei wird beobachtet, ob die Lichtmaschine mit Teilen des Rollentrainers kollidieren. Um dies umzusetzen, werden alle Komponenten in der CAD-Software als starre Objekte definiert und nur die Lichtmaschine zur Schwenkachse als beweglich definiert. Anschließend wird die Antriebswelle der Lichtmaschine abhängig zur Reifenoberfläche gesetzt. Anders ausgedrückt wurde die Lichtmaschine mit der Antriebswelle an das Rad angelegt. Dabei wurde festgestellt, dass der Schwenkradius der Lichtmaschine für ein 28-Zoll-Rad ausreichend ist und sie nicht mit dem Rollentrainer kollidiert. Die nachfolgende Abbildung 4-6 zeigt die Konstruktion mit angelegter Lichtmaschine.

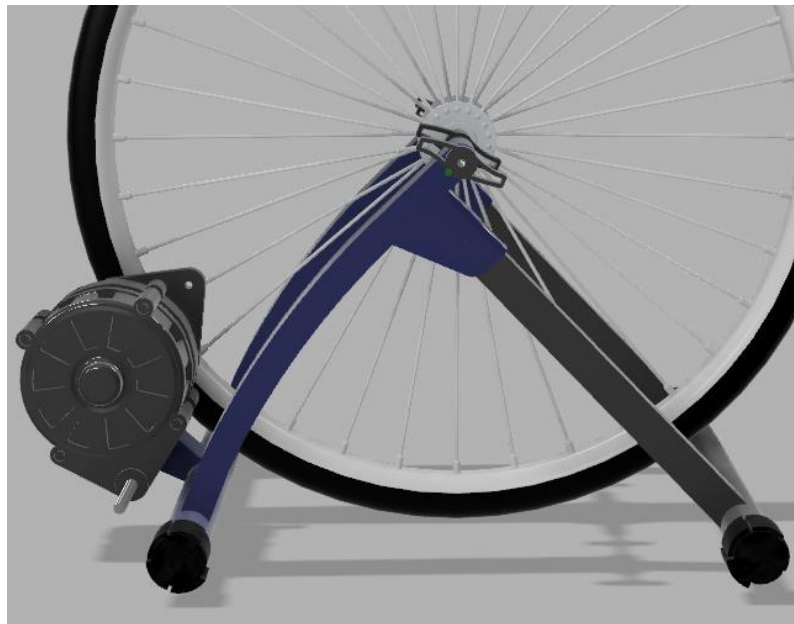


Abbildung 4-6: Gerendertes CAD-Modell des Rollentrainers mit M10-Gewindestange, angelegter Lichtmaschine und 28-Zoll-Fahrradreifen zur Prüfung des Schwenkradius

Das gleiche Verfahren wurde mit einem Modell eines 26-Zoll-Rades durchgeführt. Auch hierbei konnten keine Kollisionen festgestellt werden. Hinzu kommt, dass durch das Einfügen einer Laufrolle, vgl. Abschnitt 4.1.3, der Abstand zwischen Lichtmaschine und Rollentrainer zusätzlich vergrößert wird.

Die Position der Schwenkachse (Gewindestange) kann durch das gezeigte Verfahren bestätigt werden. Das in Abbildung 4-3 markierte Loch im U-Stück der Bremsrollenhalterung stellt somit eine gute Position für die Schwenkachse dar. Die Bremsrolle kann einfach demontiert und das Loch aufgebohrt werden. Die Gewindestange kann zudem mit einfachen Muttern und Unterlegscheiben gegen das U-Stück von beiden Seiten gekontert werden. Je nach Drehrichtung der Lichtmaschine kann dann die Lichtmaschine von einer der beiden Seiten auf die Gewindestange geschoben und ebenfalls mit Muttern fixiert werden. So lässt sich die Position der Lichtmaschine zum Rad einstellen. Die unten stehende Abbildung 4-7 zeigt die schematische Befestigung der Gewindestange am U-Stück mithilfe von M10-Muttern und

entsprechenden Unterlegscheiben. Die Befestigungselemente sind nur auf einer Seite des U-Stücks gezeigt. Die Befestigung sollte auf beiden Seiten durchgeführt werden. Die Unterlegscheiben und Muttern konnten aus der Bauteilbibliothek der CAD-Software entnommen werden.

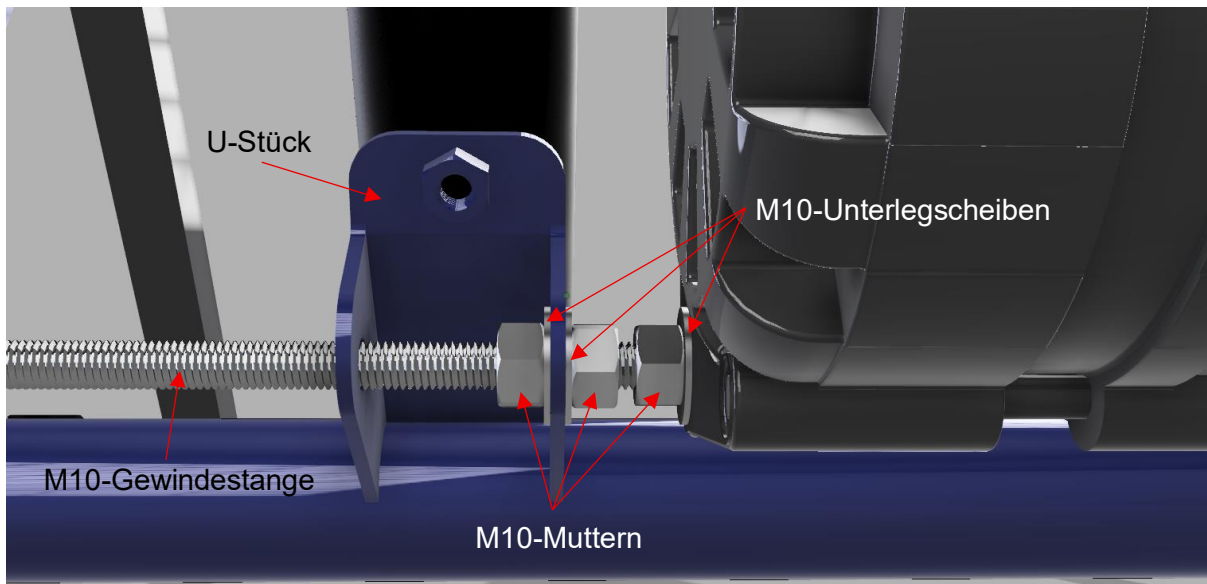


Abbildung 4-7: Gerendertes CAD-Modell des Rollentrainers mit M10-Gewindestange, Lichtmaschine, 28-Zoll-Fahrradreifen und Befestigungselementen

Die Abbildung 4-7 zeigt, wie die Lichtmaschine vor dem Verrutschen auf der Schwenkachse gesichert wird. Die Befestigung mit M10-Mutter und -Unterlegscheibe ist in der Abbildung nur auf einer der Lichtmaschinenseiten gezeigt. Die Lichtmaschine sollte jedoch mit mindestens zwei Muttern und Unterlegscheiben befestigt werden. Zur Befestigung der Gewindestange am Rollentrainer werden also vier Muttern und Unterlegscheiben benötigt. Insgesamt sind so sechs Muttern und Unterlegscheiben notwendig, vgl. Anhang D Stückliste Mechanik, Pos. 3 und 4.

4.1.2 Konstruktion der Abstandshalter

Erste Prototypenversuche haben ergeben, dass sich die Gewindestange in gewissen Betriebssituationen durchbiegt, besonders wenn die Laufrolle der Lichtmaschine an das Hinterrad gespannt wird. Beim Spannen ist zu beobachten, dass sich die Gewindestange am Ende zum Standfuß des Rollentrainers biegt. Zudem sehen die Enden der Gewindestange unschön aus und stellen durch die hervorstehenden Enden ein Sicherheitsrisiko dar. Schülerinnen und Schüler können an den Enden hängen bleiben und sich verletzen. Es ist demnach eine Drehmomentstütze und Endkappe notwendig, dieser wird im Folgenden als Abstandshalter betitelt.

Da die Standfüße des Rollentrainers einfach heruntergezogen werden können, wurde sich dafür entschieden, einen Abstandshalter zu konstruieren, der auf das Standrohr des Rollentrainers aufgeschoben wird und ein geschlossenes Loch (kein Durchgangsloche) für die

Gewindestange bietet. Anhand des erstellten Modells können Maße genommen und ein solcher Abstandshalter konstruiert werden. Der Abstandshalter kann dann mit einem 3D-Drucker hergestellt und somit für beide Seiten, also zweimal gefertigt werden. Die unten zu sehende Abbildung 4-8 zeigt den konstruierten Abstandshalter.



Abbildung 4-8: Gerendertes CAD-Modell des Abstandshalters

Das CAD-Modell des Abstandshalters kann dem Anhang A, aus dem Inhalt des USB-Sticks, entnommen werden. Der Abstandshalter ist in der Stückliste Anhang G als Pos. 45 aufgeführt.

Die Abstandshalter werden der Baugruppe hinzugefügt, um deren Pass-Genauigkeit zu verifizieren, bevor sie mit dem 3D-Drucker gefertigt werden. Die nachfolgende Abbildung zeigt erweiterte die die Konstruktion



Abbildung 4-9: Gerendertes CAD-Modell des Rollentrainers mit M10-Gewindestange, Lichtmaschine, 28-Zoll Fahrradreifen und Abstandshaltern

Die Abbildung 4-9 zeigt die Passform und Montageart der Abstandshalter. Die Abstandshalter haben eine maximale Länge von 85,75 mm und eine maximale Breite von 42,5 mm. Ihre Höhe

beträgt 32 mm. Damit sind die Abstandshalter recht klein und können auch auf kleinen 3D-Druckern gefertigt werden. Da die mechanische Beanspruchung recht hoch ist, sollten sie mit mindestens 20 % Infill gedruckt werden, um die Stabilität des Bauteils gewährleisten.

4.1.3 Konstruktion der Laufrolle

Wie bereits im Kapitel 3.3 beschrieben, verfügen Lichtmaschinen i.d.R. über unterschiedliche Riemenscheiben, die sich manchmal mehr oder weniger gut als Laufrolle eignen.

Um den optimalen Durchmesser der Laufrolle zu bestimmen, muss zunächst die Lichtmaschinendrehzahl betrachtet werden, um anschließend das benötigte Übersetzungsverhältnis zwischen Hinterrad und Laufrolle bestimmen zu können.

KFZ-Lichtmaschinen besitzen eine 0A-Drehzahl, bei der im KFZ kein Elektronenstrom durch die Lichtmaschine fließt. Dies liegt daran, dass unterhalb der 0A-Drehzahl die Ausgangsspannung der Lichtmaschine U_{out} geringer als die Bordnetzspannung ist ($U_{out} < 12\text{ V}$) [48]. Auch wenn die Lichtmaschine im Energiefahrrad batterieelos betrieben werden soll, sollte die 0A-Drehzahl nicht unterschritten werden, um eine konstante Ausgangsspannung $U_{out} \approx 14\text{ V}$ sicherzustellen. Die 0A-Drehzahl liegt bei Compactgeneratoren i.d.R. bei etwa $n_{0A} = 800\text{ U/min}$ [48]. Sie stellt die Minstdrehzahl für das Energiefahrrad dar. Die nachfolgende Abbildung 4-10 zeigt das Strom-Drehzahlverhalten eines Compactgenerators.



Abbildung 4-10: Maximal möglicher Generatorstrom einer KFZ-Lichtmaschine aufgetragen über die Generatordrehzahl, entnommen aus [48]

Die Abbildung 4-10 zeigt oberhalb der 0A-Drehzahl ($n(0A)$) einen steilen Anstieg der Strom-Drehzahl-Kennlinie. Bereits ab einer Drehzahl von 1500 U/min können Compactgeneratoren die Hälfte des auf dem Typenschild angegebenen Nennstroms liefern, ohne dass die Spannung einbricht. Ab einer Drehzahl von 6000 U/min kann die Lichtmaschine ihren Nennstrom I_{6000} liefern. Oberhalb dieser Drehzahl flacht die Strom-Drehzahl-Kennlinie stark

ab, so dass der maximale Strom I_{max} nur geringfügig höher ist als der Nennstrom. Die maximale Drehzahl liegt für Compactgeneratoren zwischen 8000 U/min und 18000 U/min [48]. Für das Energiefahrrad bedeutet dies, dass eine Mindestdrehzahl von $n_{Lima-min} = 800 \text{ U/min}$ erreicht und Maximaldrehzahl $n_{Lima-max} = 8000 \text{ U/min}$ eingehalten werden muss.

Um die Laufrolle dimensionieren zu können, wird nun betrachtet, welche Trittfrequenzen und Übersetzungen für Fahrräder typisch sind. Die Übersetzung des Fahrrades ist wie folgt definiert:

$$\ddot{U}_{Fahrrad} = \frac{n_{tritt}}{n_{Rad}} \quad 4-1$$

Darin ist n_{tritt} die Trittfrequenz in U/min. n_{Rad} ist die Raddrehzahl, ebenfalls in U/min. Die Übersetzung ist damit mathematisch einheitenlos und ist ausschließlich vom eingelegten Gang abhängig. Treckingfahrräder haben typischerweise Übersetzungen von $\ddot{U}_{Fahrrad-min} = 0,72$ im kleinsten Gang bis $\ddot{U}_{Fahrrad-max} = 4,36$ im größten Gang [49].

Die typische Trittfrequenz für untrainierte Fahrradfahrer $n_{tritt-max}$ liegt zwischen 70 U/min und 80 U/min. Für trainierte Fahrradfahrer kann eine Trittfrequenz $n_{tritt-max}$ von etwa 100 U/min bis 110 U/min angenommen werden [50].

Da die Laufrolle der Lichtmaschine an das Hinterrad gespannt wird und die Laufrolle einen deutlich geringeren Umfang als das Hinterrad des Fahrrades besitzt, liegt hier eine weitere Übersetzung $\ddot{U}_{Rad-Rolle}$ vor. Diese lässt sich wie folgt berechnen:

$$\ddot{U}_{Rad-Rolle} = \frac{U_{Rreifen}}{U_{Rolle}} \quad 4-2$$

Darin entspricht $U_{Rreifen}$ dem Umfang des Hinterrades und U_{Rolle} dem gesuchten Laufrollen-Umfang. Der gemessene Reifenumfang eines 28-Zoll-Fahrrades beträgt etwa $U_{28-Zoll} = 2,2 \text{ m}$. Der Umfang eines 26-Zoll-Fahrrades beträgt ca. $U_{26-Zoll} = 2,0 \text{ m}$. Die Reifendurchmesser bei Mountainbikes können größer ausfallen. Es wird jedoch im weiteren Verlauf von Treckingrädern angegebenen ausgegangen.

Die Drehzahl der Laufrolle – damit auch der der Lichtmaschine – ergibt sich aus der Multiplikation der Trittfrequenz mit beiden Übersetzungen. Es folgt:

$$n_{Lima} = n_{tritt} \cdot \ddot{U}_{Fahrrad} \cdot \ddot{U}_{Rad-Rolle} \quad 4-3$$

Um den Umfang der Laufrolle U_{Rolle} zu bestimmen, wird die Gleichung 4-2 in die Gleichung 4-3 eingesetzt und zum Rollenumfang umgeformt. Es folgt:

$$U_{Rolle} = \frac{n_{tritt} \cdot \ddot{U}_{Fahrrad} \cdot U_{Reifen}}{n_{Lima}} \quad 4-4$$

Da für die Konstruktion der Durchmesser der Laufrolle entscheidend ist, wird der Umfang U_{Rolle} zum Durchmesser d_{Rolle} umgeformt. Dazu wird die Gleichung $U = \pi \cdot d$ in die Gleichung 4-4 eingesetzt. Es folgt:

$$d_{Rolle} = \frac{n_{tritt} \cdot \ddot{U}_{Fahrrad} \cdot U_{Reifen}}{\pi \cdot n_{Lima}} \quad 4-5$$

Um den größtmöglichen Rollendurchmesser $d_{Rolle-max}$ zu bestimmen, werden nun die Minimal-Werte sowie der 26-Zoll-Reifenumfang in die Gleichung 4-5 eingesetzt. Denn es gilt: Je kleiner die Laufrolle im Verhältnis zum Hinterrad, desto kleiner ist die Lichtmaschinendrehzahl bei vorgegebener Trittfrequenz. Es folgt:

$$d_{Rolle-max} = \frac{n_{tritt-min} \cdot \ddot{U}_{Fahrrad-min} \cdot U_{26-Zoll}}{\pi \cdot n_{Lima-min}}$$

Mit:

$$n_{tritt-min} \approx 75 \text{ U/min}$$

$$\ddot{U}_{Fahrrad-min} = 0,72$$

$$U_{26-Zoll} = 2 \text{ m}$$

$$n_{Lima-min} = 800 \text{ U/min}$$

Folgt:

$$d_{Rolle-max} = \frac{75 \frac{\text{U}}{\text{min}} \cdot 0,72 \cdot 2 \text{ m}}{\pi \cdot 800 \frac{\text{U}}{\text{min}}} \approx 0,043 \text{ m}$$

Um bei geringer Trittfrequenz in einem 26-Zoll-Fahrrad eine ausreichende Lichtmaschinendrehzahl zu erreichen, sollte die Laufrolle demnach einen Durchmesser von etwa $d_{Rolle-max} \approx 0,043 \text{ m}$ besitzen. Aus konstruktiven Gründen wurde sich für einen Laufrollendurchmesser von $d_{Rolle} = 45 \text{ cm}$ entschieden, weil bei einem Wellendurchmesser von 17 mm (etwa 32-35 mm Stecknussdurchmesser) noch eine ausreichende Wandstärke vorhanden sein muss um, die Stabilität zu gewährleisten. Um dennoch eine ausreichende Lichtmaschinendrehzahl zu erreichen, kann einfach ein größerer Gang am Fahrrad eingelegt werden.

Mit einem Rollendurchmesser von $d_{Rolle} = 45 \text{ cm}$ und einem Reifenumfang von $U_{26\text{-Zoll}} = 2 \text{ m}$ ergibt sich gemäß 4-2 eine Übersetzung von etwa $\ddot{U}_{26\text{''Rad-Rolle}} = 14,14$. Für ein 28-Zoll-Rad ergibt sich eine Übersetzung von $\ddot{U}_{28\text{''Rad-Rolle}} = 15,56$.

Um zu überprüfen, ob die maximale Lichtmaschinendrehzahl von $n_{Lima-max} = 8000 \text{ U/min}$ nicht überschritten wird, kann mithilfe der Gleichung 4-3 die maximal mögliche Drehzahl $n_{Lima-max-mögl.}$ berechnet. Es folgt:

$$n_{Lima-max-mögl.} = n_{tritt-max} \cdot \ddot{U}_{Fahrrad-max} \cdot \ddot{U}_{28\text{''Rad-Rolle}}$$

Mit:

$$n_{tritt-max} = 110 \text{ U/min}$$

$$\ddot{U}_{Fahrrad-max} = 4,36$$

$$\ddot{U}_{28\text{''Rad-Rolle}} = 15,56$$

Folgt:

$$n_{Lima-max-mögl.} = 110 \frac{\text{U}}{\text{min}} \cdot 4,36 \cdot 15,56 = 7463 \frac{\text{U}}{\text{min}}$$

Die Berechnung zeigt, dass die maximal mögliche Lichtmaschinendrehzahl $n_{Lima-max-mögl.} = 7463 \text{ U/min}$ unwesentlich kleiner ist als die maximal zulässige Lichtmaschinendrehzahl $n_{Lima-max} = 8000 \text{ U/min}$. Zudem kann die Nenndrehzahl für Compactgeneratoren von 6000 U/min erreicht werden. Es lässt sich daraus ableiten, dass der Laufrollendurchmesser von $d_{Rolle} = 45 \text{ mm}$ optimal ist, um das gesamte Drehzahlband der Lichtmaschine nutzen zu können, vgl. Abbildung 4-10.

Die für diese Arbeit vorliegenden Lichtmaschinen mit Keilriemenscheibe weisen einen deutlich zu großen Durchmesser auf, so dass die maximale Lichtmaschinendrehzahl weit überschritten werden kann. Zudem bietet die Keilriemenscheibe kaum Auflagefläche für das Hinterrad. Für Lichtmaschinen mit Keilriemenscheibe ist eine alternative Laufrolle zwingend erforderlich. Ein CAD-Modell einer Laufrolle mit 45 mm Durchmesser wird im Folgenden gezeigt.

Der vorliegende Bosch-0123-120-001-70A-Compaktgenerator besitzt eine Keilrippenriemenscheibe. Diese Riemenscheibe hat einen Durchmesser von $d_{Bosch} = 49 \text{ mm}$. Mit diesem Rollendurchmesser wäre das Drehzahlband zwar abdeckbar, jedoch ist die Riemenscheibe in dieser Form ungeeignet, da die Auflagefläche zwischen Hinterrad und Riemenscheibe zu gering ist. Zudem sind die Rippen der Keilrippenriemenscheibe zu glatt und scharfkantig, so dass erste Versuche einen großen Verschleiß am Mantel des Hinterrades zeigten. Um dies zu umgehen, gibt es drei Möglichkeiten, die kostengünstig und im Sinne der Nachbaubarkeit zu akzeptieren sind:

1. Fünf O Ringe mit den Maßen $45 \times 5 \text{ mm}$ um die Riemenscheibe legen

2. Drei HT Lippendichtringe DN 40 mm um die Riemenscheibe legen
3. 3D-gedruckte Laufrolle mit 45 mm Durchmesser.

Die nachstehende Tabelle zeigt die drei möglichen Varianten mit ihren Durchmessern, ihren Einsatzbereich und deren maximal sowie minimal möglichen Drehzahlen.

Tabelle 4-1: Darstellung möglicher Laufrollen-Varianten mit deren Einsatzbereich, Bildern, Durchmessern und minimal-, sowie maximal möglichen Drehzahlen.

Variante	1. 5x 45x5 mm O-Ring	2. 3x HT-Lippendichtring DN 40 mm	3. 3D- gedruckte Laufrolle
Einsatzbereich	Lichtmaschinen mit Keilrippenriemen	Lichtmaschinen mit Keilrippenriemen	Alle Lichtmaschinen (besonders bei Keilriemenscheiben)
Bild			
Durchmesser	56 mm	58 mm	45 mm
Minimal-Drehzahl	572 U/min	553 U/min	713 U/min
Maximal-Drehzahl	5997 U/min	5790 U/min	7463 U/min

Die Tabelle 4-1 zeigt, dass alle Varianten die maximal zulässige Drehzahl von $n_{Lima-max} = 8000 \text{ U/min}$ nicht überschreiten. Die minimalen Drehzahlen liegen alle unterhalb der Mindestdrehzahl. Erste Tests zeigen jedoch auch, dass bereits der nächsthöhere Gang Drehzahlen oberhalb von 800 U/min erlaubt. Es sollten sich daher alle Varianten eignen, die Lichtmaschine in einem nutzbaren Drehzahlband zu betreiben. Im Abschnitt 6.1.1 werden die Laufrollen weiter untersucht. Es wird sich zeigen, dass die Vorteile der 3D-gedruckten Laufrolle überwiegen.

Die unten gezeigte Abbildung 4-11 zeigt das CAD-Modell der Laufrolle mit einem Durchmesser von $d_{Rolle} = 45 \text{ mm}$ (links), sowie die gesamte Konstruktion mit eingefügter Laufrolle (rechts).

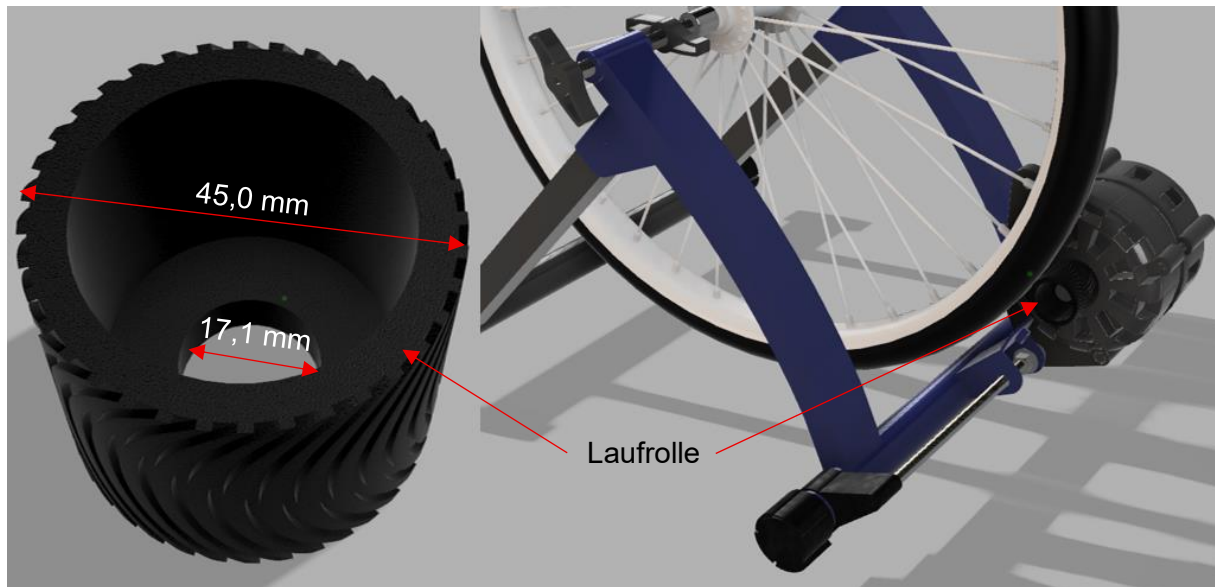


Abbildung 4-11: Gerendertes CAD-Modell des Rollentrainers mit M10-Gewindestange, Lichtmaschine, 28-Zoll-Fahrradreifen, Abstandshaltern und Laufrolle (links)

Die in der Abbildung 4-11 (links) gezeigte Laufrolle ist für Lichtmaschinen mit einem Wellendurchmesser von 17 mm konzipiert. Das Loch für die Welle hat einen um 0,1 mm größer Durchmesser als die Welle selbst. Dies hat den Grund, Ungenauigkeiten im 3D-Druck auszugleichen und dennoch einen Rundlauf zu erreichen. Da die Laufrolle mit einem 3D-Drucker hergestellt wird, ist ein Auswuchten der Rolle aufgrund des geringen Gewichtes nicht notwendig. Die Laufrolle hat eine Breite von 40 mm, wodurch auch Fahrräder mit breiteren Reifen in das Energiefahrrad eingespannt werden können. Da sowohl die Lichtmaschine als auch das Rad parallel zur Schwenkachse (Gewindestange) verschoben werden können, ist eine breitere Laufrolle nicht notwendig.

Die Laufrolle wird, wie in Abbildung 4-11 (rechts) gezeigt, auf die Welle der Lichtmaschine verschraubt. Dazu wird die serienmäßige Laufrolle demontiert und durch die 3D-gedruckte Welle ersetzt. Der Vorteil dieser Konstruktionsweise ist, dass die serienmäßig vorhandene Mutter und der Sicherungsring (i.d.R. Spannscheibe) wiederverwendet werden können. Da die Wellen von Lichtmaschinen i.d.R. über Feingewinde verfügen, ist ein Lösen der Mutter aufgrund der höheren Selbsthemmung auch bei kleinen Anzugsdrehmomenten gegeben, vgl. [51, S. 63].

CAD-Modelle können für die Wellendurchmesser 15 mm, 16 mm, 17 mm und 3/8-Zoll (Anhang A, im Inhalt des USB-Sticks) im 3MF-Dateiformat heruntergeladen werden. Da nicht alle Lichtmaschinen über Distanzhülsen verfügen, können auch diese für alle Durchmesser heruntergeladen werden. Die Distanzhülse schafft Platz zwischen dem Lager im Lagerschild und der Laufrolle, so dass die Laufrolle nicht auf dem Lagerschild aufliegt und sich frei drehen kann. Bei den vorliegenden Lichtmaschinen und der empfohlenen BOSCH 0 986 041 820 Lichtmaschine ist keine Distanzhülse notwendig, vgl. Anhang E.

4.1.4 Konstruktion der Spannvorrichtung

Anfängliche Überlegungen für die Spannvorrichtung gingen von einem Spanngurt, welcher zwischen Lichtmaschine und Gepäckträger gespannt wird, bis hin zu einer komplexen 3D-gedruckten Konstruktion aus. Spanngurte lassen sich jedoch unpräzise einstellen, zudem besitzt nicht jedes Fahrrad einen Gepäckträger. Die Idee eines Spanngurtes ist damit wenig geeignet, um die Laufrolle an das Hinterrad zu spannen. Eine komplexe Konstruktion mit 3D-gedruckten Bauteilen würde die Fertigung verkomplizieren und die Wahrscheinlichkeit eines Nachbaus verringern.

Da alle vorliegenden Lichtmaschinen über ein M8-Schraubloch auf der gegenüberliegenden Seite der Schwenkachse verfügen (vgl. z.B. Abbildung 4-9), kann hier eine M8-Ringschraube bzw. -Ringmutter montiert werden. Dieses Loch dient auch im KFZ der Spannvorrichtung. Für die Montage einer Ringmutter wird einfach eine M8x40-mm-Schraube durch das Gewinde in der Lichtmaschine geschraubt und die Ringmutter auf das herausstehende Ende gedreht, vgl. Abbildung 4-13. Zudem wird eine weitere M8-Ringmutter für den Holm des Rollentrainers vorgesehen. Zwischen diese beiden Ringösen kann ein Seilspanner montiert werden, mithilfe dessen sich die Lichtmaschine an das Hinterrad spannen lässt.

Die unten gezeigte Abbildung 4-12 zeigt die Position des 8,5-mm-Bohrloches im rechten (von hinten betrachtet) Holm des Rollentrainers.

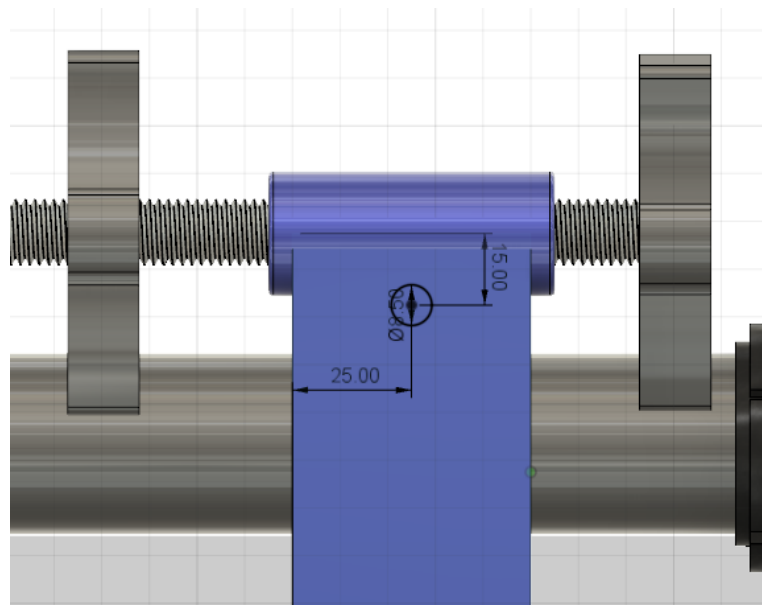


Abbildung 4-12: Kennzeichnung und Bemaßung des 8,5-mm-Bohrloches für die Ringmutter am Rollentrainer

In das in Abbildung 4-12 gezeigte Bohrloch kann eine M8-Schraube in 40 mm Länge inkl. Unterlegscheibe gesteckt werden. Mittels Unterlegscheibe und Ringmutter wird die Konstruktion am Rollentrainer fixiert. Die nachstehende Abbildung 4-13 zeigt die montierten Ringmuttern, Schrauben und Unterlegscheiben im CAD-Modell. Die Bauteile konnten vollständig aus der Bauteilbibliothek des CAD-Programms entnommen werden.

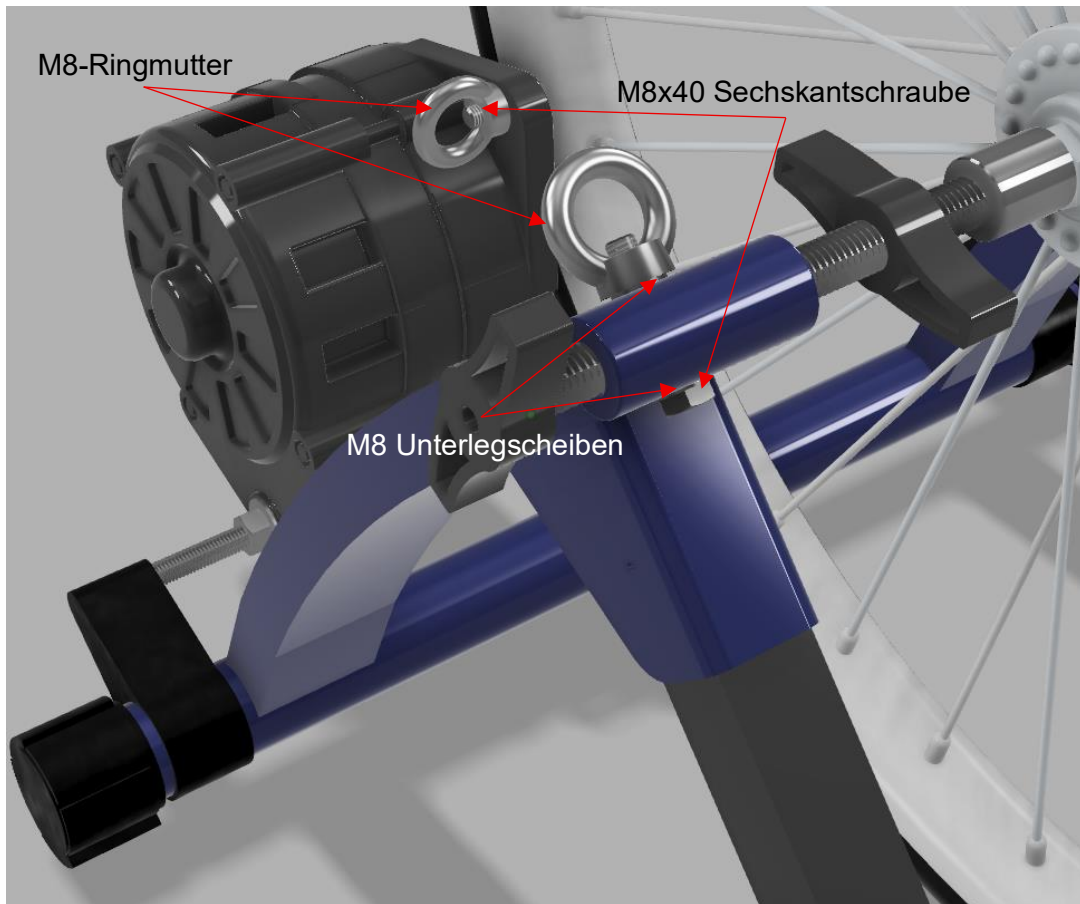


Abbildung 4-13: Gerendertes CAD-Modell des Rollentrainers mit M10-Gewindestange, Lichtmaschine, 28-Zoll-Fahrradreifen, Abstandshaltern und Ringmuttern zu Befestigung des Seilspanners

Wie in Abbildung 4-13 zu erkennen ist, wurde die Ringmutter für den Holm auf der von hinten betrachteten, rechten Seite montiert. Bei Lichtmaschinen mit anderer Drehrichtung kann es ggf. notwendig sein, die Ringmutter auf der anderen Seite zu montieren.

Im Anhang D sind die verwendeten Ringmutter (Pos. 5), Sechskantschrauben (Pos. 6) und Unterlegscheiben (Pos. 7) aufgelistet.

Da die Konstruktion eines Seilspanners in der CAD-Software sehr komplex ist, wird auf diesen Schritt verzichtet. Die Montage des Seilspanners sowie dessen Verlängerung durch einen Karabinerhaken ist im Abschnitt 5.1 gezeigt. Der verwendete Seilspanner (Pos. 9) und Karabinerhaken (Pos. 8) sind im Anhang D aufgelistet.

4.1.5 Sicherheit der mechanischen Konstruktion

Die Beschreibung der Konstruktion funktionsrelevanter Komponenten ist mit den vorangegangenen Abschnitten 4.1.1 bis 4.1.3 abgeschlossen. Es sind jedoch weitere Betrachtungen zu Personensicherheit der Konstruktion, vgl. Abschnitt 3.1, vorzunehmen. Dies ist notwendig, da im Betrieb die Gefahr einer Quetsch-, Scherverletzung (Rad und Fahrradrahmen) sowie des Einzuges durch entgegenlaufende Rollen (Reifen und Laufrolle) besteht. Das Handbuch Gefährdungsbeurteilung (Teil 2: Mechanische Gefährdungen) der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin schlägt hierfür zwei grundsätzliche

Gegenmaßnahmen vor. Zunächst kann die Gefährdung auf ein ungefährliches Maß begrenzt werden, z.B. durch Reduktion der Kräfte und Geschwindigkeit [52, S. 9]. Zweitens durch „Verhinderung der Wirkung der Gefahrstelle durch Schutzmaßnahmen, insbesondere durch Schutzeinrichtungen“ [52, S. 9].

Da das Hinterrad des Fahrrades, bzw. dessen Speichen, die zulässige Geschwindigkeit von $v < 33 \text{ mm/s}$ überschreitet, ist die zuerst genannte Gegenmaßnahme ausgeschlossen, vgl. [52]. In diesem Fall muss die zweite Gegenmaßnahme greifen und eine Wirkung verhindern. Dies kann sowohl durch Abdeckungen, Sicherheitsabstände und Warnzeichen erfolgen. Bei einer verbleibenden Gefährdung ist besonders bei der Anwesenheit mehrerer Personen, mit Warnzeichen nach DIN EN ISO 7010 zu warnen [52].

Für den Schulunterricht wird daher ein Sicherheitsabstand von $s > 1,5 \text{ m}$ vorgeschlagen, der die Arm- und Beinlänge Erwachsener überschreitet. Ein Hineingreifen ist somit nicht möglich. Zudem sollte das Hinterrad, falls vorhanden, durch Aufsteller (z.B. Plexiglasscheibe) seitlich abgedeckt werden. Hinter dem Energiefahrrad sollte sich keine Person befinden, um die Verletzung durch herumfliegende Teile zu vermeiden. Der Schutzbereich kann durch Absperrband markiert werden. Vor dem zuletzt verbleibenden Restrisiko wird durch das Warnzeichen W025 „Warnung vor gegenläufigen Rollen“ gewarnt. Das Warnzeichen wird in Form eines Aufklebers mit den Maßen $50 \times 50 \text{ mm}$ (Anhang D Pos. 10) auf dem Rollentrainer angebracht. Das Warnzeichen wird auf beide Holme geklebt, so dass das Warnzeichen von beiden Seiten aus erkennbar ist. Die unten gezeigte Abbildung 4-14 veranschaulicht die Positionierung des Warnzeichens W025 und zeigt die vollständige mechanische Konstruktion mit Ausnahme des Seilspanners.



Abbildung 4-14: Gerendertes CAD-Modell der vollständigen mechanischen Konstruktion ohne Seilspanner

Die mechanische Konstruktion ist damit abgeschlossen und wird im Abschnitt 915.1 gefertigt. Erste Tests sind im Abschnitt 6.1.1 gezeigt.

4.2 Elektrotechnische Konzeptionierung

Für die elektrotechnische Konzeptionierung ist es zunächst wichtig, die Daten und Anschlüsse einer Lichtmaschine zu untersuchen und einen Gleichspannungszwischenkreis zu entwerfen, welcher anschließend in einem Gehäuse verbaut wird. Der Gleichspannungszwischenkreis dient der Schutzbeschaltung und Glättung der Gleichspannung sowie der Bereitstellung der Erregerenergie. Nachdem der Zwischenkreis entworfen wurde, werden Möglichkeiten für Messpunkte untersucht und ein Strommesswiderstand entwickelt. Abschließend wird die Auslegung und Auswahl der elektrischen Komponenten vorgenommen.

4.2.1 Entwicklung des Betriebsstromkreises

Wie bereits im Abschnitt 3.3 beschrieben, sind Lichtmaschinen selbsterregte Drehstrom-Synchronmaschinen, welche ständerseitig über eine B6-Brückengleichrichterschaltung verfügen und deren Erregerfeld (Rotor) geregelt wird, vgl. Abbildung 3-4. Da die Lichtmaschine batterieelos betrieben werden soll, wird im Folgenden zwischen dem Betriebsstromkreis und dem Vorerregerstromkreis unterschieden, denn zwischen ihnen wird keine direkte Verbindung hergestellt.

Der Betriebsstromkreis bezeichnet den Kreislauf von den Ständerwicklungen zum Betriebsmittel und wieder zurück. Die drei in Stern geschalteten Ständerwicklungen sind mit ihren Enden auf einen B6-Brückengleichrichter geführt. Der Pluspol des Gleichrichters ist nach außen geführt und wird i.d.R. durch einen Schraubanschluss kontaktiert, üblicherweise wird dieser mit B+, 30, Bat oder + beschriftet, vgl. Tabelle 3-1 und Abbildung 4-15. Der Minusanschluss des Gleichrichters ist wie in der KFZ-Technik üblich mit dem Gehäuse verbunden und wird daher häufig nicht beschriftet. Die Masseleitung (Minus) kann folglich an einer beliebigen Stelle des Gehäuses angeschraubt werden. Wenn der Masse-Kontakt dennoch separat ausgeführt wird, sollte dieser Anschluss verwendet werden. Sofern ein Masse-Anschluss vorhanden ist, ist dieser mit B-, D-, 31 oder nur - (Minus) bezeichnet, vgl. Tabelle 3-1. Die nachstehende Abbildung 4-15 zeigt die interne Schaltung einer Lichtmaschine sowie den exemplarischen Elektronenstrom durch den Betriebsstromkreis bei einem angeschlossenen Betriebsmittel RL.

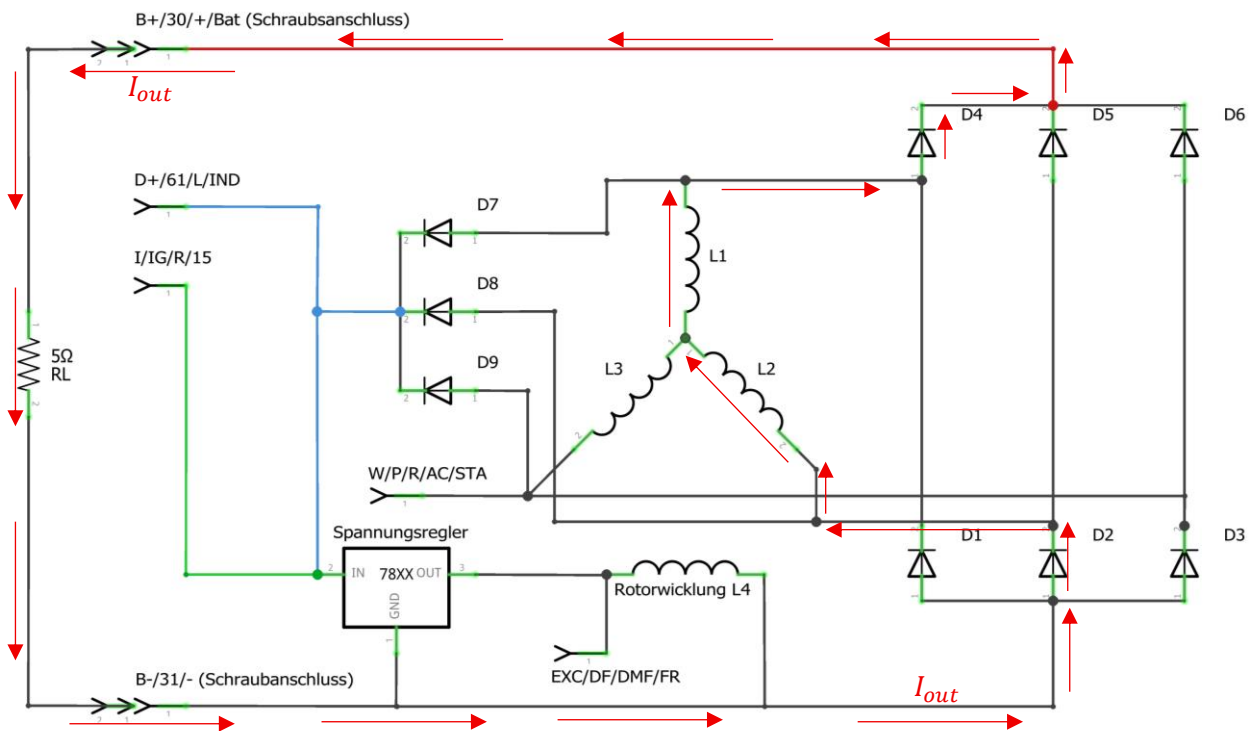


Abbildung 4-15: Schaltplan einer Drehstromlichtmaschine mit allen gängigen Kontaktbezeichnungen, Anschlüssen sowie dem Stromfluss im Betriebsstromkreis (bei angeschlossenem Betriebsmittel)

Durch den Betriebsstromkreis der Lichtmaschine fließt der Betriebsstrom, wie in Abbildung 4-15 gezeigt. Der Betriebsstrom ist im geregelten Betrieb ausschließlich vom angeschlossenen Betriebsmittel abhängig. Er kann im KFZ bei modernen Compactgeneratoren mehr als $I_{out} > 100 \text{ A}$ betragen. Der maximale Betriebsstrom wird im Energiefahrrad jedoch durch die maximal mögliche, zugeführte Leistung der Beine begrenzt. Wird eine Leistung von $P = 300 \text{ W}$ und eine Spannung von $U_{out} = 12 \text{ V} - \text{DC}$ angenommen (Spannung kann unter Last etwas einbrechen), so fließt ein Elektronenstrom von:

$$I_{out} = \frac{P}{U_{out}} = \frac{300 \text{ W}}{12 \text{ V}} = 25 \text{ A} \quad \mathbf{4-6}$$

Die Leitungen und Anschlüsse sind demnach auf einen Betriebsstrom von mindestens $I_{out} = 25 \text{ A}$ auszulegen. Zudem ist eine Schmelzsicherung (F1) mit einem Betriebsstrom von $I_{F1} \geq 25 \text{ A}$ vorzusehen, um einzelne Komponenten vor einem Überstrom zu schützen. Die genaue Auswahl der Sicherung erfolgt im Abschnitt 4.2.4.

Aufgrund der Strombelastung und Schraubkontakte am B+Kontakt wird ein Kabelschuh-Anschluss an der Lichtmaschine vorgesehen. An der Elektronikbox wird ein leistungsfähiger Hochstromsteckverbinder eingeplant. Für die Sicherung kommt eine KFZ-Schmelzsicherung infrage. Die nachstehende Abbildung zeigt die interne Schaltung einer Lichtmaschine, ergänzt durch Hochstromstecker, -Kupplung und Sicherung F1.

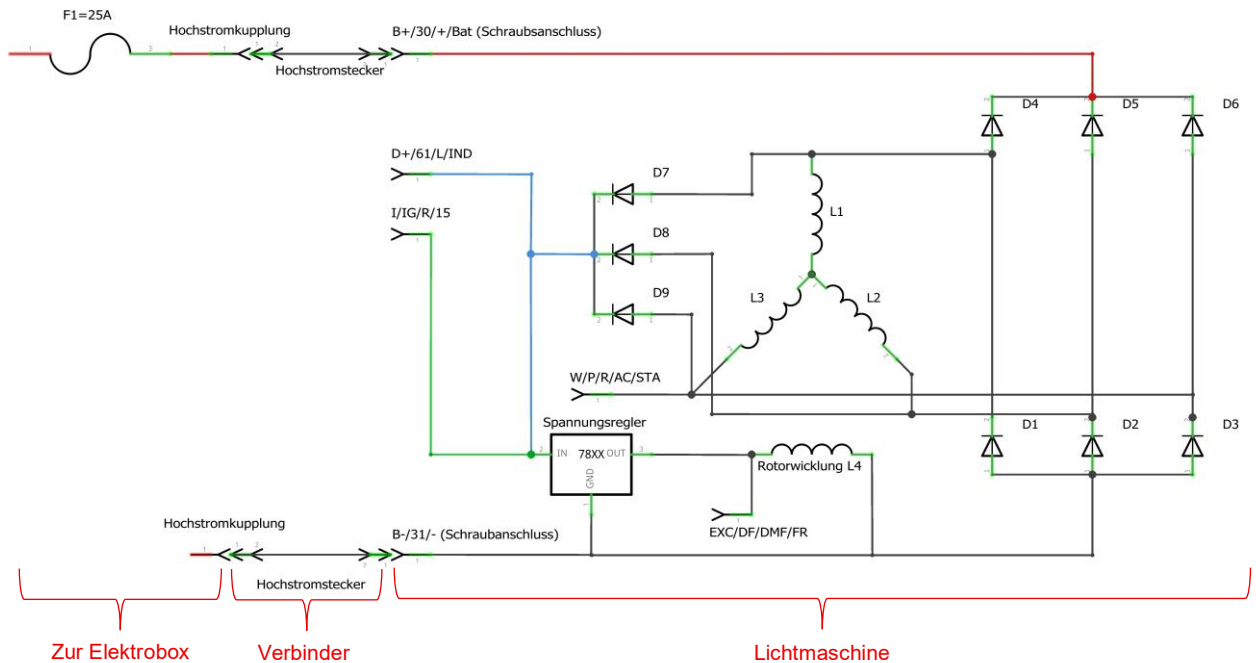


Abbildung 4-16: Schaltplan einer Drehstromlichtmaschine mit allen gängigen Kontaktbezeichnungen, Anschlüssen (rechts), Verbindern (Mitte) und angedeuteter Elektrobox (links)

Zwischen B+ und dem Generatorgehäuse können im geregelten Betrieb etwa $U_{out} = 14 \text{ V} - \text{DC}$ gemessen werden. Belastet kann sie auf $U_{out} < 12 \text{ V} - \text{DC}$ absinken. Im Leerlauf (ohne angeschlossenes Betriebsmittel) kann die Ausgangsspannung über $V_{out} > 18 \text{ V} - \text{DC}$ kommen. Diese Spannungen beschreiben den Effektivwert der Ausgangsspannung. Da es sich bei der Lichtmaschine um ein gleichgerichtetes Drehstromsystem handelt, ist die Ausgangsspannung keine ideale Gleichspannung. Die Ausgangsspannung U_{out} weist eine Welligkeit sowie Spannungsspitzen auf. Die unten gezeigte Abbildung 4-17 zeigt das Oszillogramm der vorliegenden Mitsubishi A1T25097 Lichtmaschine im Leerlauf.

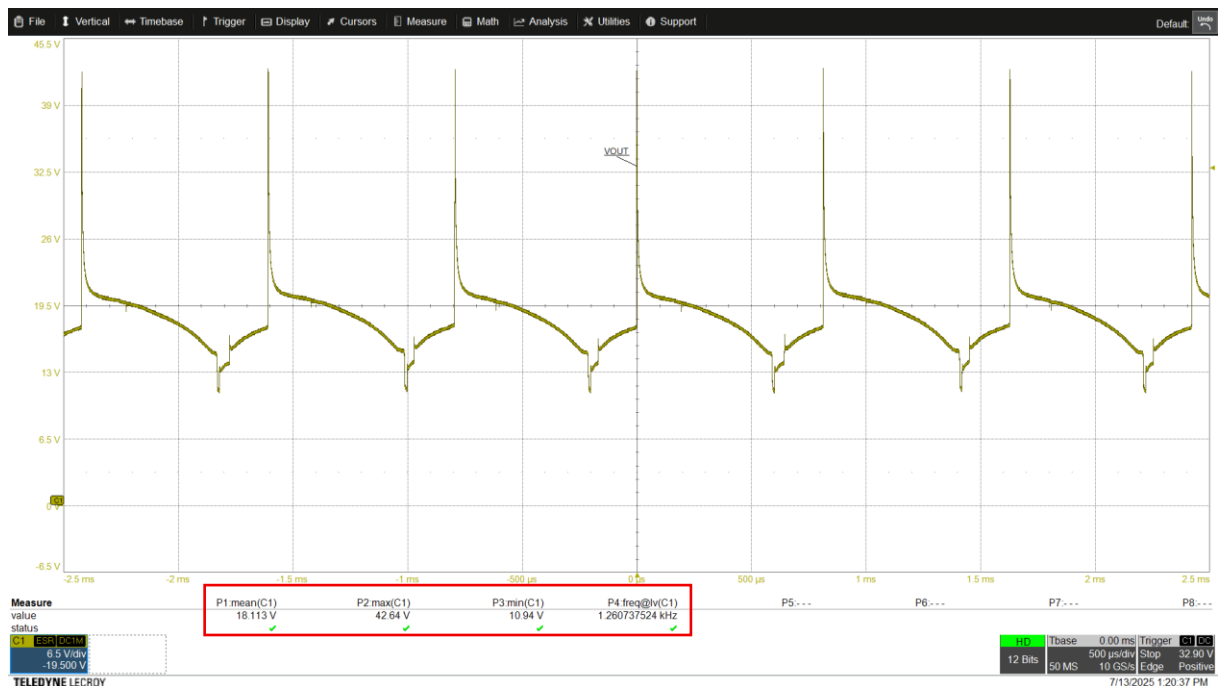


Abbildung 4-17: Oszillogramm der Ausgangsspannung einer Mitsubishi A1T25097 Lichtmaschine im Leerlauf und im batterielosen Betrieb

Das Oszillogramm in Abbildung 4-17 zeigt einen Effektivwert von P1: $\text{mean}(C1) = 18,113 \text{ V}$, vgl. roter Kasten. Der Spitzenwert der Ausgangsspannung liegt bei P1: $\text{max}(C1) = 42,64 \text{ V}$. Der kleinste Spannungswert liegt bei P1: $\text{min}(C1) = 10,94 \text{ V}$. Die erkennbaren Spannungsspitzen und -einbrüche sind Folge der Regelung und des batterielosen Betriebs [41, S. 159]. Die Spannungsspitzen können Schäden an Elektronik verursachen und sollten daher verhindert werden. Möglichkeiten zur Unterdrückung der Spannungsspitzen sind:

- Zenerdioden (Z-Dioden)
- Generator und Regler in spannungsfester Ausführung
- Überspannungsschutzgeräte

[41, S. 159]

Compactgeneratoren des Herstellers Bosch, wie die vorliegende Bosch 0123 120 001 70A Lichtmaschine, sind grundsätzlich mit Z-Dioden ausgestattet und verursachen keine Spannungsspitzen im Leerlauf [41, S. 142]. Da das Energiefahrrad mit einer großen Bandbreite an Lichtmaschinen funktionieren soll, wird dennoch eine unidirektionale Transient-Voltage-Suppressor-(TVS)Diode im Gleichspannungszwischenkreis bzw. in der Elektrobox vorgesehen. Diese hat den zusätzlichen Vorteil, dass sie zusätzlich als Freilaufdiode dient und vor Überspannungen durch:

- Reglerausfall
- Abschalten von Verbrauchern mit induktiver Last
- Reglerumschaltung (von Ein nach Aus)
- Wackelkontakte

schützen kann, vgl. [41, S. 142-145]. Zudem schützt die unidirektionale TVS-Diode vor einer Verpolung der Steckvorrichtung. Werden Plus- und Minus-Anschlüsse vertauscht, stellt die Diode einen Kurzschluss her und behindert das Treten auf dem Energiefahrrad. So wird der Elektrolytkondensator vor einer Verpolung und damit vor einer Zerstörung geschützt. Eine detailliertere Funktionsbeschreibung der Diode wird im Abschnitt 0 gegeben.

Die Spannungseinbrüche in Abbildung 4-17 sind ebenfalls Folge des batterielosen Betriebs, da die Ausgangsspannung nicht durch den Energiespeicher der Batterie gestützt wird. Um die Gleichspannung sowohl im Leerlauf als auch im belasteten Zustand zu stützen, wird ein Elektrolytkondensator im Gleichspannungszwischenkreis vorgesehen. Dieser glättet die Gleichspannung und sorgt zudem für ein lineareres Tretgefühl, da er als kurzzeitiger Energiespeicher dient. Der Kondensator kann zudem dabei helfen, Spannungsspitzen zu verringern und unterstützt damit die TVS-Diode. Kondensator und TVS-Diode werden parallel

zwischen Pluspol und Masse geschaltet. Die Abbildung 4-19 zeigt die Elektrobox, ergänzt durch Kondensator C1 und TVS-Diode D-TVS.

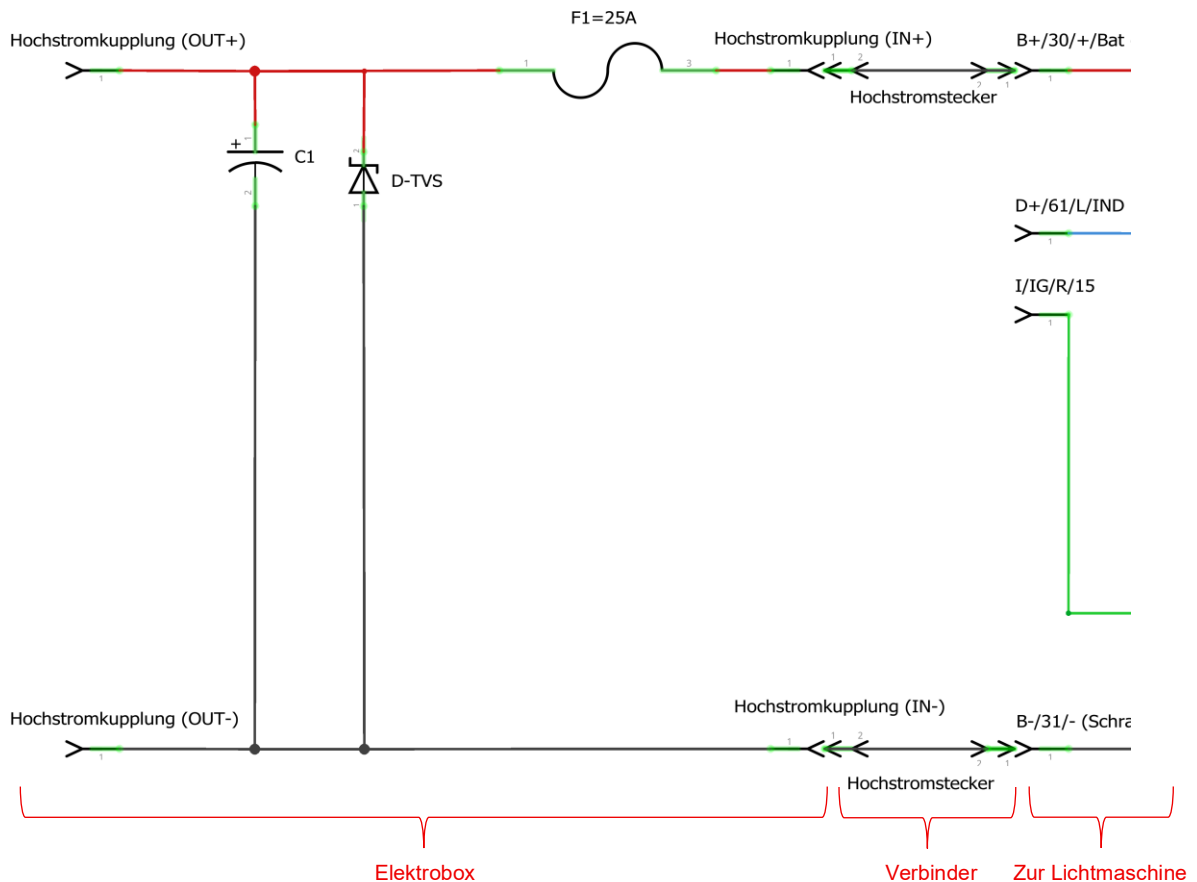


Abbildung 4-18: Schaltplan der Elektrobox mit Sicherung, Kondensator und TVS-Diode (links) mit Verbinder zur Lichtmaschine (Mitte) sowie angedeuteter Lichtmaschine (rechts)

Zusätzlich zu den Komponenten zur Spannungsregulierung zeigt die Abbildung 4-19 ausgangsseitige Hochstromsteckkupplungen (Out- und Out+). An diese Hochstromkupplungen können Betriebsmittel, die einen hohen Elektronenstrom hervorrufen, angeschlossen werden.

4.2.1 Entwicklung des Vorerregerstromkreises

Die Erregerenergie für den Klauenpolläufer (Rotor) wird im KFZ bei ausgeschaltetem Motor über die 12V-Bordnetzbatterie sichergestellt. Für den Vorerregerstromkreis wird demnach ein Akku benötigt. Da Akkus im automobilen Kontext als Batterien bezeichnet werden, wird im Folgenden weiter das Wort „Batterie“ verwendet [41, S. 122-123].

Um die Erregerspannung zu reduzieren und eine optische Anzeige über den Status der Lichtmaschine zu erhalten, wird zwischen Batterie und Erregerkontakt (D+/61/L/IND) eine Kontrollleuchte geschaltet. Sie wirkt wie ein Vorwiderstand und reduziert den Vorerregerstrom I_{Err} . Für 12V-Lichtmaschinen wird i.d.R. ein 12V/2W Leuchtmittel verwendet, vgl. Abbildung 4-19 X1 [41, S. 123]. Bei modernen Fahrzeugen wird die Kontrollleuchte durch eine LED mit

einem entsprechenden Parallelwiderstand ersetzt [41, S. 123]. Zusätzlich wird zwischen Batterie und Erregerkontakt der Zündschalter (Abbildung 4-19 S1 Erregung) geschaltet.

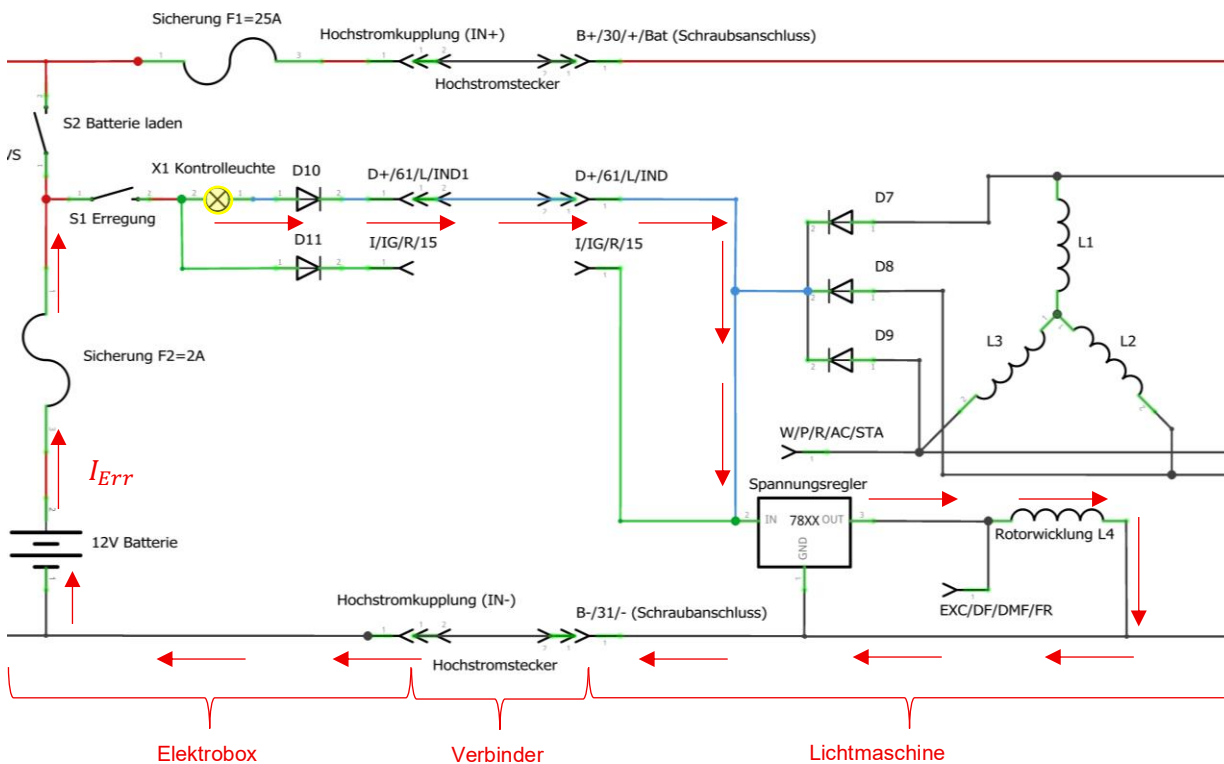


Abbildung 4-19: Vorerregerstromkreis bei stillstehender Lichtmaschine und eingeschaltetem Erregerschalter S1, nach [49, S. 122]

Wie in Abbildung 4-19 gut zu erkennen ist, fließt der Erregerstrom I_{Err} aus der Batterie, über die Sicherung F2, den Schalter S1, die Leuchte X1 und die Diode D10 in die Lichtmaschine hinein. In der Lichtmaschine fließt der Elektronenstrom über den Regler und die Rotorwicklung zurück zur Masse und damit zurück zur Batterie. Beim Durchströmen der Rotorwicklung wird der Rotor magnetisiert und kann bei Rotation eine Spannung in den Ständerwicklungen induzieren. Die Kontrollleuchte leuchtet.

Die Diode D10 in Abbildung 4-19 hat die Funktion, ein ungewolltes Laden der Batterie zu verhindern. Denn sobald die Lichtmaschine ihre Mindestdrehzahl $n_{Lima-min} = 800 \text{ U/min}$ erreicht, ist das Potential an D+/61/L/IND höher als das der Batterie. Die Folge wäre ein Batterie-Ladestrom, der sich wiederum als Drehmoment wahrnehmen ließe. Um dennoch ein Laden der Batterie über den Betriebsstromkreis zu ermöglichen, ist der Batterieladeschalter S2 vorgesehen, vgl. Abbildung 4-19.

Da manche Lichtmaschinentypen einen zusätzlichen Zündungskontakt (I/IG/R/15) zur Freigabe des Reglers besitzen, ist zusätzlich ein Anschluss vorzusehen, der hinter dem Schalter S1 abgegriffen wird, vgl. Abbildung 4-19 grüne Leitung.

Die Kontaktierung des Vorerregerstromkreises ist in der Elektrobox mit 4mm-Sicherheitslaborbuchsen vorgesehen. Die Kontaktierung an der Lichtmaschine kann sowohl

über Schraubkontakte erfolgen als auch über herstellerspezifische KFZ-Steckvorrichtungen. Spezielle Steckvorrichtungen sollten bei der Anschaffung der Lichtmaschine berücksichtigt werden. Alternativ kann die Kontaktierung an der Lichtmaschine über Krokodil- Klemmen erfolgen.

Sobald die Lichtmaschine vom Energiefahrrad angetrieben wird und die in die Ständerwicklung induzierte Spannung größer ist als die Durchlassspannung U_D der Gleichrichterioden ($U_{out} > 2 \cdot U_D$), erregt sich die Lichtmaschine selbst [41, S. 123]. Sie liefert die Energie für das Erregerfeld selbstständig über den internen Hilfsgleichrichter (Abbildung 4-20: Erregerstromkreis bei Selbsterregung, nach [41, S. 122] D7-D9). Es fließt kein Elektronenstrom von der Batterie zur Erregerwicklung. Die Kontrollleuchte erlischt. Die Abbildung 4-20: Erregerstromkreis bei Selbsterregung, nach [41, S. 122] zeigt den Fluss des Erregerstromes I_{Err} , bei Selbsterregung.

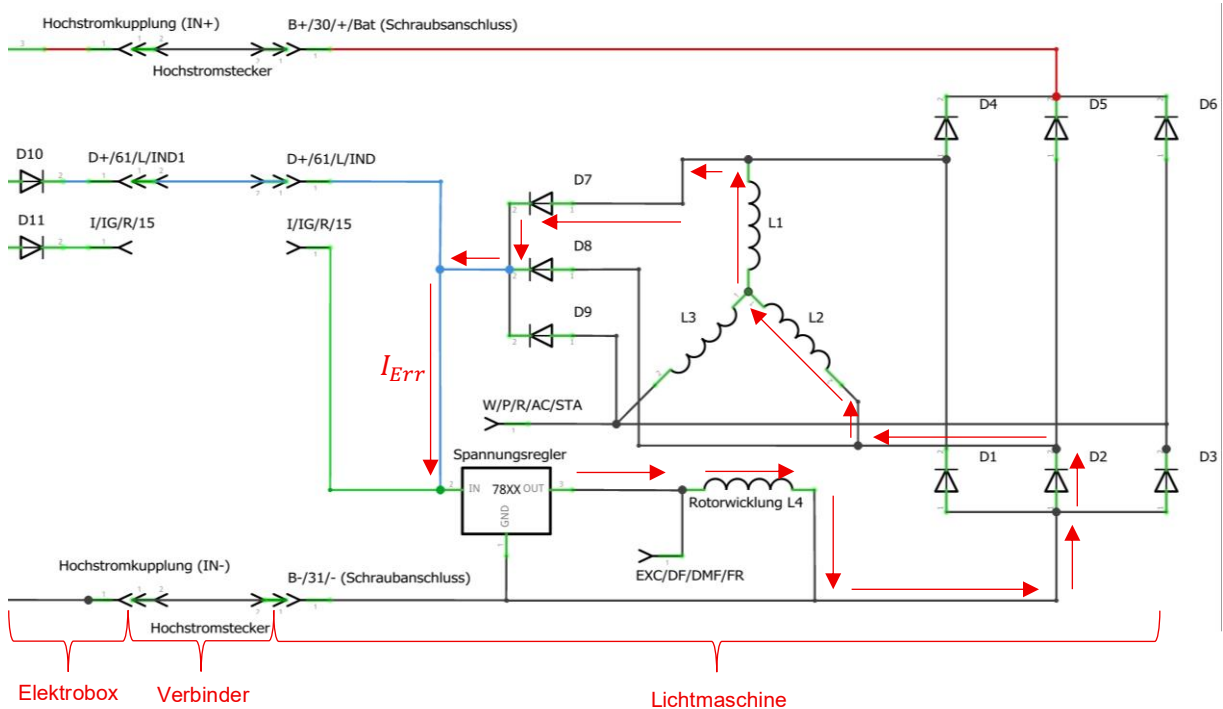


Abbildung 4-20: Erregerstromkreis bei Selbsterregung, nach [41, S. 122]

Die Batterie ist folglich nur notwendig, um die Energie im Stillstand bzw. für den Anlauf sicherzustellen, da die Remanenz im Läufer nicht ausreicht, die Durchlassspannung der Gleichrichterioden zu überwinden.

Da die Zeit des Stillstandes bei eingeschaltetem Erregerschalter kurzgehalten werden kann und der Erregerstrom i.d.R. $I_{Err} \leq 1 \text{ A}$ ist [41, S. 122], kann die Kapazität der Batterie und die Sicherungsgröße für den Erregerkreis klein ausgelegt werden. Die Dioden D10 und D11 müssen einen entsprechenden Erregerstrom tragen können.

Der Batterieladestrom bei eingeschaltetem Batterieladeschalter S2 ist von der verwendeten Batterie abhängig. Da die kleinste mögliche Sicherungsgröße im KFZ-Bereich 2 A beträgt, wird

zunächst von einer Sicherungsgröße von $I_{F2} = 2 \text{ A}$ ausgegangen. Sofern der Batterieladestrom den Bemessungsstrom der Sicherung überschreitet, ist diese anzupassen.

Es ist nicht vorgesehen, die angeschlossene Last über den eingeschalteten Batterieladeschalter S2 und die Batterie zu versorgen. Schließlich ist für das Energiefahrrad ein hauptsächlich batterieloser Betrieb vorgesehen, damit die angeschlossene Last physiologisch spürbar bleibt und sich nicht hinter einer Batterie „versteckt“, vgl. Abschnitt 2.3.2. Die Sicherung F2 schützt die Batterie vor diesem unerwünschten Betriebszustand. Sobald ein Betriebsmittel einen Laststrom größer $I_L \gg 2 \text{ A}$ hervorruft, löst die Sicherung aus und schützt die Batterie vor einem unerwünschten Entladen. Der Batterieladeschalter sollte folglich nur ohne angeschlossenes Betriebsmittel (im Leerlauf) eingeschaltet werden.

4.2.2 Einbindung von Messpunkten

Für das Energiefahrrad ist es wichtig, den Elektronenstrom im Betriebsstromkreis messen zu können. Zudem ist es wichtig, die Spannung messen zu können, mit der ein Betriebsmittel angetrieben wird. Zudem sollte es möglich sein, den Schülerinnen und Schülern bekannte Messgeräte an die Messpunkte anzuschließen. Aufgrund der hohen Ströme im Betriebsstromkreis wird im Abschnitt 4.2.3 ein Strommesswiderstand (Shunt) entwickelt. Der niederohmige Präzisionswiderstand wird in den Betriebsstromkreis geschaltet. Dieser Widerstand sorgt für einen Spannungsfall, wenn er von einem Betriebsstrom I_{out} durchflossen wird. Es muss daher bestimmt werden, ob eine stromrichtige oder eine spannungsrichtige Messung zu bevorzugen ist.

Stromrichtige Messung:

Der im Abschnitt 4.2.3 geplante Strommesswiderstand besitzt einen Widerstandswert von $R_{Shunt} = 0,01 \Omega$ und würde bei einem als ideal angenommenen Betriebsstrom von $I_{out} = 25 \text{ A}$ einen Spannungsfall von:

$$U_{Shunt} = R_{Shunt} \cdot I_{out} = 0,01 \Omega \cdot 25 \text{ A} = 0,25 \text{ V}$$

hervorrufen. Bei einer stromrichtigen Messung (Spannung wird in Energieflussrichtung vor dem Betriebsmittel gemessen) würde der systematische Spannungsfehler $\Delta U = 0,25 \text{ V}$ betragen. Dies bedeutet, dass das Spannungsmessgerät $U_{mess} = 14 \text{ V}$ anzeigen würde, die Elektronen im Betriebsmittel jedoch nur mit $U_L = 13,75 \text{ V}$ angetrieben werden. Der Fehler der berechneten Leistung würde damit:

$$\Delta P = \Delta U \cdot I_{out} = 0,25 \text{ V} \cdot 25 \text{ A} = 6,25 \text{ W}$$

betragen. Weitere Messfehler können aufgrund der Fehlerfortpflanzung die Gesamtfehler vergrößern.

Spannungsrichtige Messung:

Wird von einem Innenwiderstand des Spannungsmessers von $R_U = 10 \text{ M}\Omega$ ausgegangen, so fließen bei einer als ideal angenommenen Spannung von $U_{out} = 14 \text{ V}$ ein Strom von:

$$I_{Volt} = \frac{R_U}{U_{out}} = \frac{10 \text{ M}\Omega}{14 \text{ V}} = 1,4 \text{ }\mu\text{A}$$

durch den Spannungsmesser. Da der Spannungsmesser unmittelbar parallel zum Betriebsmittel geschaltet wird, addieren sich die Ströme durch den Shunt. Die $1,4 \text{ }\mu\text{A}$ durch das Spannungsmessgerät sind jedoch im Verhältnis zum Betriebsmittelstrom von $I_L = 25 \text{ A}$ verschwindend gering. Der Fehler für die berechnete Leistung liegt bei nur:

$$\Delta P = U_{out} \cdot I_{Volt} = 14 \text{ V} \cdot 1,4 \text{ }\mu\text{A} = 19,6 \text{ }\mu\text{W}$$

Es ist damit gezeigt, dass für die Strom- und Spannungsmessung eine Spannungsrichtige Messung vorziehen ist. Die Spannung wird also unmittelbar am Betriebsmittel gemessen. Die Strommessung findet in Energieflussrichtung gesehen vor der Spannungsmessung statt.

Die spannungsrichtige Messung ist auch bei der Verwendung eines Digitalmultimeters als Strommesser, also keiner Shunt-Messung, vorzuziehen. Dies liegt daran, dass der Widerstand des angeschlossenen 12V-Betriebsmittels im Verhältnis zum hochohmigen Innenwiderstand des Spannungsmessers sehr gering ist. Hingegen ist der Innenwiderstand des Strommessers in einer zumindest ähnlichen Größenordnung wie der Widerstand des Betriebsmittels. Bei geringen Betriebsmittelwiderständen, welche für das Energiefahrrad typisch sind, ist deshalb die spannungsrichtige Messung vorzuziehen, vgl. [53].

Um den Schülerinnen und Schülern bekannte Messgeräte (z.B. Multimeter) einfach anschließen zu können, werden die Messpunkte über 4mm-Sicherheitslabormessbuchsen hergestellt. Die nachstehende Abbildung 4-21 zeigt die Verschaltung der Messbuchsen in der Elektrobox mit angeschlossenen Messgeräten und Betriebsmittel.

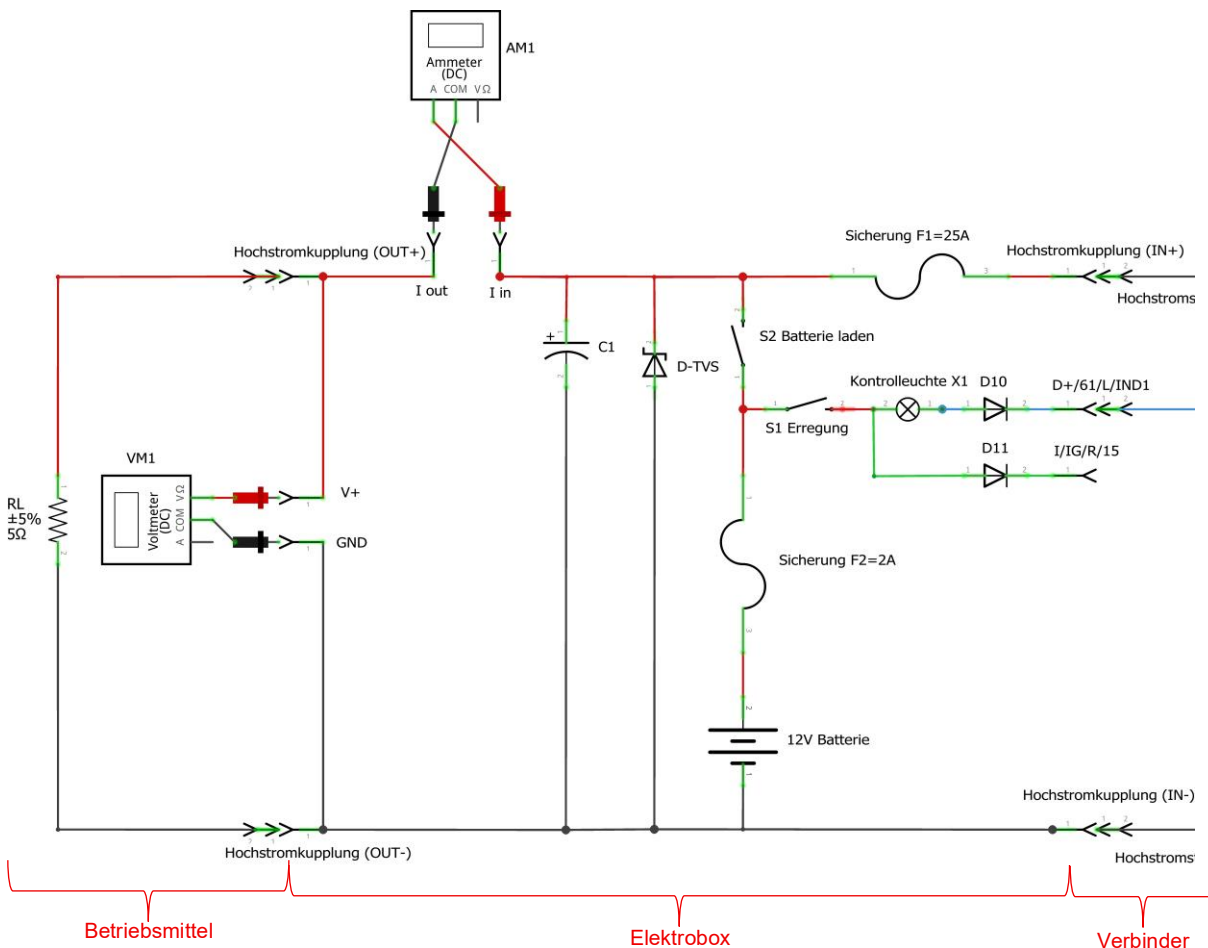


Abbildung 4-21: Schaltplan der Elektrobox Position mit Messbuchsen, angeschlossenen Messgeräten und Betriebsmittel

Die Abbildung 4-21 zeigt, wie der Spannungsmesser VM1 an die vorgesehenen Spannungsbuchsen V+ und GND angeschlossen wird. Er misst die Spannung parallel zum Betriebsmittel. Zudem ist gezeigt, wie das Strommessgerät AM1 an die Elektrobox angeschlossen wird. Die Messbuchsen I_{in} und I_{out} sind nicht miteinander verbunden, da der Elektronenstrom in Reihe gemessen wird. Dies bedeutet allerdings auch, dass der Betriebsstromkreis bei nicht angeschlossenem Strommesser offen ist. Es kann kein Elektronenstrom fließen. Um den Stromkreis zu schließen, wenn keine Strommessung stattfinden soll, kann ein Sicherheits-Kurzschlussstecker in die Buchsen I_{in} und I_{out} gesteckt werden. Mit diesem Kurzschlussstecker werden die Buchsen gebrückt und der Stromkreis geschlossen. Um das Einstecken des Kurzschlusssteckers zu ermöglichen, ist es notwendig, die Buchsen in einem Abstand von 19 mm im Gehäuse zu platzieren. Der Abstand ist nach DIN 41612 festgelegt und gibt den Abstand zwischen den Mittelpunkten der Messbuchsen an.

Auch die Spannungsmessbuchsen V+ und GND werden in diesem Abstand montiert, um Bauelemente im 19-mm-Stecksystem hineinstecken zu können. Damit stellen die Buchsen V+ und GND nicht nur Messbuchsen da, sondern ermöglichen auch den Anschluss von Betriebsmitteln.

4.2.3 Entwicklung eines Strommesswiderstandes

Wie bereits in Gleichung 4-6 gezeigt, können Elektronenströme von $I_{out} = 25 \text{ A}$ mit dem Energiefahrrad erzeugt werden. Aufgrund der Auslösecharakteristik der KFZ-Sicherung können die Ströme kurzzeitig diese 25 A überschreiten. Solch hohe Ströme können die meisten Multimeter nicht messen. Typische Strommessbereiche von Multimetern gehen bis 10 A. In seltenen Fällen können diese bis 20 A messen. Mit einem Multimeter kann der Elektronenstrom demnach nur eingeschränkt gemessen werden. Ein Auslösen der internen Messbereichssicherung vor dem Auslösen der Sicherung F1 ist sicher.

Messgeräte, welche über 25 A – DC messen können, sind womöglich sehr kostenintensiv.

Um dennoch den Elektronenstrom mit den in den meisten Schulen vorhandenen Multimetern messen zu können, wird ein Strommesswiderstand geplant. Solch ein Strommesswiderstand wird auch als Shunt bezeichnet. Dabei handelt es sich um einen sehr niederohmigen Präzisionswiderstand aus Konstantan. Der Widerstand wird in den Betriebsstromkreis geschaltet und über ihn der Spannungsfall gemessen, welcher wiederum proportional zum Stromfluss ist. Sein Widerstandswert ist aufgrund seiner Materialbeschaffenheit kaum von dessen Temperatur abhängig, vgl. [54].

Shunt-Widerstände können für verschiedene Betriebsströme und mit unterschiedlichen Widerstandswerten gekauft werden. Der begrenzende Faktor ist die zulässige Verlustleistung am Widerstand selbst. Durch den hohen Betriebsstrom von $I_{out} = 25 \text{ A}$ können bereits bei kleinen Widerstandswerten nennenswerte Verlustleistungen entstehen, welche in Wärme umgewandelt werden. Von der Firma Isabellenhütte gibt es in der PBV-Serie eine Reihe von Widerstandswerten in kompakter Bauform und einer Präzision von $\Delta R_{Shunt} = 0,5 \text{ \%}$ [54]. Die Verlustleistung am Shunt darf bei dieser Serie mit Kühlkörper $P_{max} = 10 \text{ W}$ nicht überschreiten [54]. Ohne Kühlkörper darf die Verlustleistung 3 W nicht überschreiten [54]. Der Widerstandswert darf also nur so groß sein, dass bei einem Strom von 25 A die zulässige Verlustleistung nicht überschritten wird.

Für eine gute Auflösung des Stromes darf der Widerstandswert des Shunts jedoch nicht zu gering sein. Denn je geringer der Widerstandswert ist, desto geringer ist der zu messende Spannungsfall am Shunt. Um auch mit günstigen Spannungsmessern eine ausreichende Genauigkeit zu erzielen, muss der Widerstandswert demnach groß genug sein. Als Referenz-Spannungsmesser wird der PASCO PS-3211 wireless-voltage-Sensor herangezogen. Dieses Gerät ist ein typisches kabelloses Voltmeter aus dem Lehrmittelbedarf, vgl. [55]. Es hat im Messbereich von $\pm 5 \text{ V}$ eine Auflösung von 2 mV und eine Genauigkeit von $\pm 1\%$ [55, S. 3].

Mit einem Shunt-Widerstand von $R_{Shunt} = 0,01 \text{ V/A } (\Omega)$ würden 10 mV pro Ampere am Shunt abfallen. Mit der angegebenen Auflösung des Spannungsmessers von 2 mV entspricht dies einer Stromauflösung von 0,2 A. Angesichts des großen Messbereiches erscheint diese

Auflösung akzeptabel. Der größtmögliche relative Messfehler beträgt $\pm 1,5\%$. Bei einem maximalen Betriebsstrom von $I_{out} = 25\text{ A}$ würde eine Spannung von:

$$U_{shunt} = I_{out} \cdot R_{shunt} \quad 4-7$$

am Shunt abfallen. Mit eingesetzten Werten folgt:

$$U_{shunt} = 25\text{ A} \cdot 0,01\ \Omega = 0,25\text{ V}$$

Soll aus diesem Spannungsfall der Betriebsstrom ermittelt werden, so muss der Quotient aus Spannung und Shunt-Widerstand berechnet werden. Hierbei werden nun die relativen Fehler berücksichtigt:

$$I_{out} = \frac{U_{shunt} \pm 1\%}{R_{shunt} \pm 0,5\%} \quad 4-8$$

Mit eingesetzten Werten folgt:

$$I_{out} = \frac{0,25\text{ V} \pm 1\%}{0,01\ \Omega \pm 0,5\%} = (25 \pm 0,38)\text{ A}$$

Wird die Auflösung von $0,2\text{ A}$ berücksichtigt; so muss der Fehler auf die nächstmögliche Auflösung gerundet werden. Daraus folgt, dass der Fehler am oberen Ende des Messbereichs der doppelten Auflösung $\Delta I_{out} = 0,4\text{ A}$ entspricht.

Es kann gezeigt werden, dass der Messfehler bis zu einem Betriebsstrom von etwa $I_{out} = 13\text{ A}$ im Bereich der einfachen Auflösung $\Delta I_{out} = \pm 0,2\text{ A}$ liegt. Diese Fehler sind unter Berücksichtigung der Auflösung akzeptabel und für den Schulunterricht ausreichend präzise. Der Shunt-Widerstand ist ausreichend groß dimensioniert.

Um zu überprüfen, ob der Shunt im Betrieb überhitzt kann, muss zunächst die Verlustleistung am Shunt bei maximalem Betriebsstrom berechnet werden. Diese berechnet sich wie folgt:

$$P_{shunt} = I_{out}^2 \cdot R_{shunt} \quad 4-9$$

Bei einem Betriebsstrom von $I_{out} = 25\text{ A}$ verursacht der Messwiderstand eine Verlustleistung von:

$$P_{shunt} = (25\text{ A})^2 \cdot 0,01\ \Omega = 6,25\text{ W}$$

Diese $6,25\text{ W}$ wandelt der Shunt unmittelbar in Wärmeenergie um. Angesichts der im Datenblatt angegebenen maximal zulässigen Verlustleistung von 3 W ohne Kühlkörper und 10 W mit Kühlkörper ist unumstritten, dass ein Kühlkörper mit Wärmeleitpaste eingeplant werden muss, vgl. [54].

Um die Größe des Kühlkörpers zu bestimmen, muss zunächst die zulässige Temperaturerhöhung ermittelt werden. Wird von einer Raumtemperatur von $\Theta_{Raum} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ausgegangen und die maximale Temperaturerhöhung des Shunts auf etwa $\Theta_{max} = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ festgelegt, so ergibt sich eine zulässige Temperaturerhöhung von $\Delta\Theta_{max} = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Der maximale zulässige Wärmewiderstand $R_{\Theta_{max}}$ berechnet sich wie folgt:

$$R_{\Theta_{max}} = \frac{\Delta\Theta_{max}}{P_{shunt}} \quad \mathbf{4-10}$$

Mit eingesetzten Werten folgt:

$$R_{\Theta_{max}} = \frac{40\text{ K}}{6,25\text{ W}} = 6,4\text{ } \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

Dieser Wärmewiderstand gibt den maximal zulässigen Wärmewiderstand zur Umgebung an. Dieser besteht aus einer Reihenschaltung zweier thermischer Einzelwiderstände. Dem Wärmewiderstand des Kühlkörpers zur Umgebungsluft R_{Kk} und dem Wärmewiderstand zwischen Shunt und Kühlkörper R_{thi} . Letzteres ist im Datenblatt des Shunts mit $R_{thi} < 3\text{ K/W}$ angegeben, vgl. [54].

Um den thermischen Widerstand des Kühlkörpers zu bestimmen, wird der thermische Widerstand des Shunts vom maximal zulässigen Wärmewiderstand abgezogen:

$$R_{Kk} = R_{\Theta_{max}} - R_{thi} = 6,4\text{ } \frac{\text{K}}{\text{W}} - 3\text{ } \frac{\text{K}}{\text{W}} = 3,4\text{ } \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

Der Kühlkörper sollte den Berechnungen nach einen thermischen Widerstand von $R_{\Theta_{Kk}} < 3,4\text{ K/W}$ besitzen, um den Shunt ausreichend zu kühlen. Der Fischer Elektronik 10020610-SK-48-50-SA-Kühlkörper besitzt einen thermischen Widerstand von $R_{\Theta_{Kk}} = 2,8\text{ K/W}$ und ist damit ausreichend groß. Mit Shunt und Kühlkörper können so dauerhaft Ströme bis zu 30 A gemessen werden.

Der Shunt wird samt Kühlkörper in ein 3D-gedrucktes Gehäuse eingelassen und über 4 mm Laborstecker kontaktiert. Der Spannungsfall über den Shunt kann über zwei Labormessbuchsen gemessen werden. Die nachstehende Abbildung 4-22 zeigt das Messverfahren mittels Shunt (R_{Shunt}) und Voltmeter (VM2) an der Elektrobox.

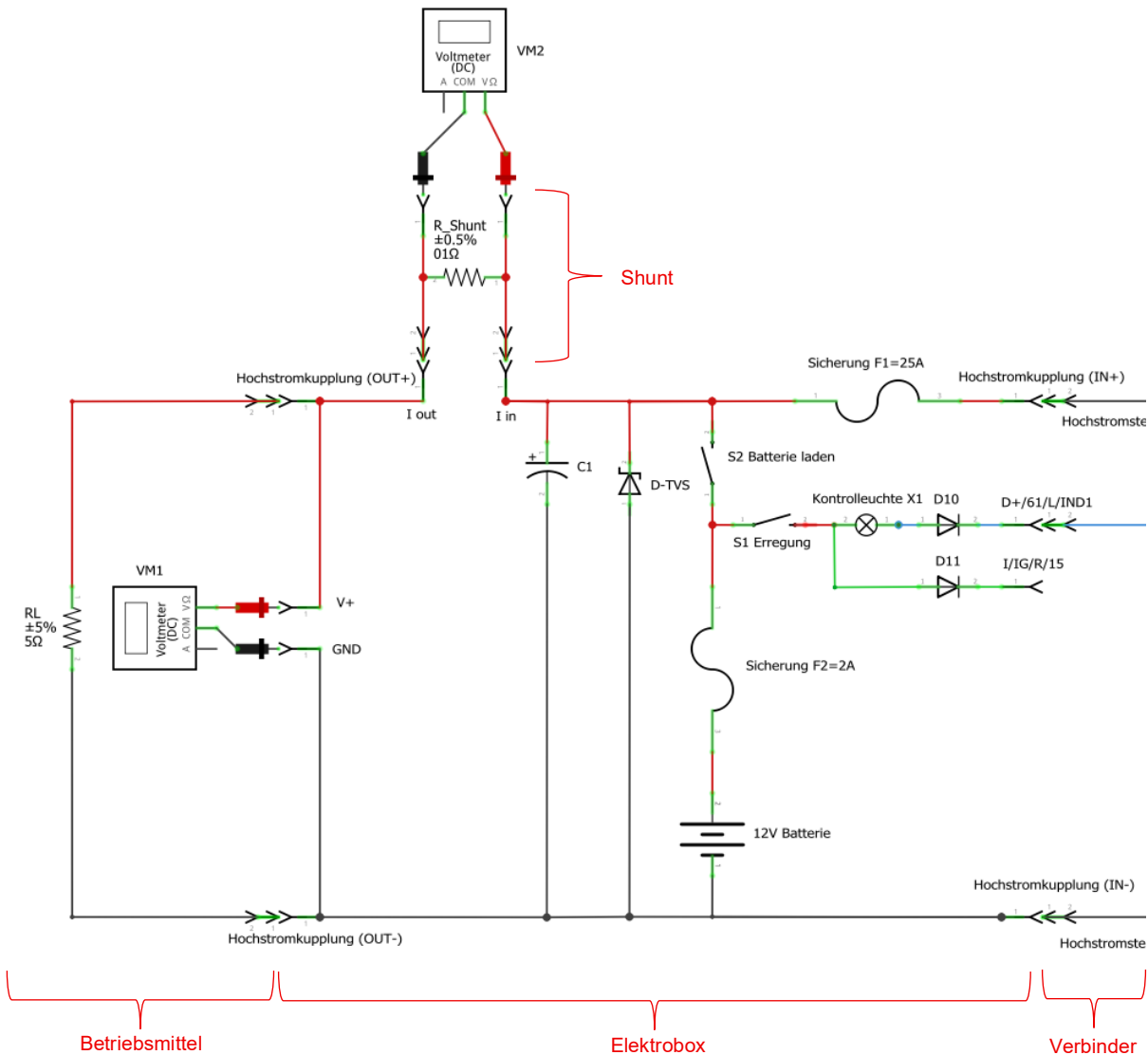


Abbildung 4-22: Schaltplan der Elektrobox mit angeschlossenem Betriebsmittel und Shunt zur Strommessung über ein Voltmeter

Da der Shunt ein optionales Zubehör ist, sind seine Bauteile in einer gesonderten Stückliste aufgeführt, vgl. Anhang H.

4.2.4 Auslegung und Auswahl der elektrotechnischen Komponenten im Betriebsstromkreis

Nachdem die grundsätzliche Topologie des Betriebs- und Erreger-Stromkreises abgeschlossen ist, müssen konkrete elektrische Bauteilparameter bestimmt und Komponenten ausgewählt werden. Im Betriebsstromkreis müssen mehrere Anschlüsse, eine Sicherung mit Halter, Leiterquerschnitte, eine TVS-Diode sowie ein Kondensator ausgelegt werden.

Anschlüsse für den Betriebsstromkreis

Wie im Abschnitt 4.2.1 berechnet, muss der Betriebsstromkreis für einen Strom von mindestens $I_{out} = 25 \text{ A} - \text{DC}$ ausgelegt werden. Da moderne Compactgeneratoren jedoch Ströme über 70 A liefern können, vgl. [42] und die Spitzenleistung der Beine bis zu 700 W beträgt [1, S. 63] werden die Komponenten des Betriebsstromkreises für größere Ströme

ausgelegt. Dies hat den zusätzlichen Vorteil, dass sich auch Leistungssportler mit größeren Dauerleistungen über 400 W am Energiefahrrad verausgaben können, vgl. [56]. Bei einer Spitzenleistung von 700 W und einer Spannung von $U_{out} = 14 \text{ V}$ beträgt der Elektronenstrom:

$$I_{out} = \frac{P_{max}}{U_{out}} = \frac{700 \text{ W}}{14 \text{ V}} = 50 \text{ A}$$

Die Anschlüsse des Betriebsstromkreises sollten demnach für einen kurzzeitigen Strom von 50 A – DC ausgelegt werden. Steckverbinder für solch hohe Gleich-Ströme müssen robust und zuverlässig sein. Die aus dem KFZ- und Industrie-Bereich bekannten und nach dem Hersteller benannten „Anderson-Stecker“ sind hierfür gut geeignet. Speziell die SB50®-Serie der „Anderson-Stecker“ ist ideal geeignet. Sie ist verpolungssicher zweipolig, mit + und – gekennzeichnet, für 50 A – DC ausgelegt und können sowohl einfach gelötet als auch mit einer speziell dafür vorgesehenen Zange gecrimpt (verpresst) werden. Die Stecker sind für Leitungsquerschnitte zwischen 1,5 mm² und 13,3 mm² geeignet, vgl. [57]. Die Möglichkeit des Lötens vereinfacht die Verbindung und erlaubt auch Laien den Anschluss.

Ein weiterer Vorteil der „Anderson-Stecker“ ist, dass zahlreiche Drittanbieter passende Alternativen anbieten, welche untereinander kompatibel sind. Sie werden auf dem Markt als 50A-Hochstromstecker, -Batteriesteckverbinder oder einfach Andersonstecker beworben. Andere Anbieter bezeichnen die Produkte auch als SB50-Stecker.

Ein weiterer Vorteil dieser Hochstromstecker ist die große Auswahl an vorkonfektionierten Adaptern, Y-Stücken und Verlängerungen. Es gibt Adapter vom Anderson-SB50 auf XT-60 Stecker, MC4-Stecker (PV-Stecker), KFZ-Steckdose (Zigarettenanzünder) u.v.m. Eine Auswahl an Adaptern ist in der Stückliste Zubehör, im Anhang I, aufgeführt.

Für das Gehäuse der Elektrobox gibt es Steckdosen zur Einbaumontage, vgl. Anhang F Pos. 14. Zum Anschluss an die Lichtmaschine kann ein vorkonfektionierter Stecker mit Kabelschuhen verwendet werden, vgl. Anhang F Pos. 13. Die nachstehende Abbildung 4-23 zeigt Bilder der beiden Produkte.

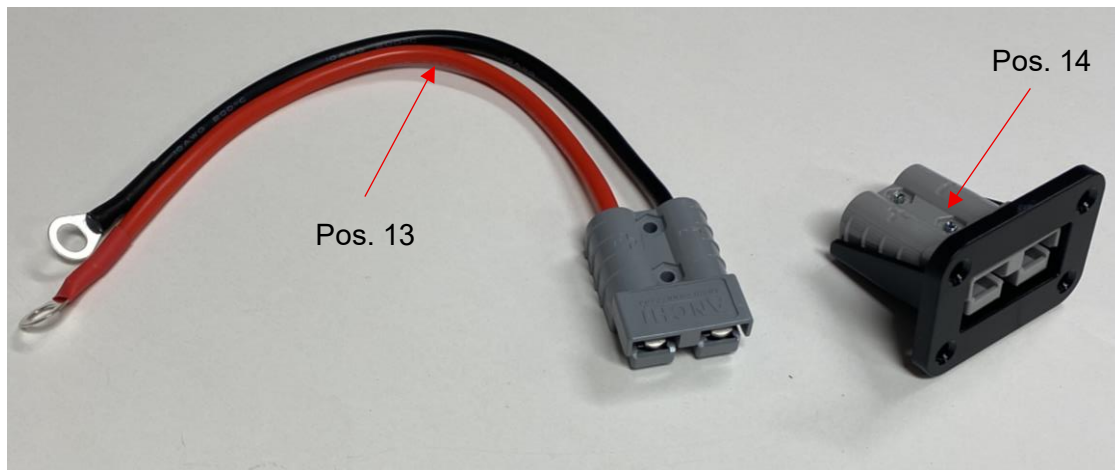


Abbildung 4-23: Lichtmaschinenanschlusskabel mit Hochstromstecker Pos. 13 (links); Hochstromsteckdose zum Gehäuseeinbau Pos. 14 (rechts)

Der in der Abbildung 4-23 links gezeigte Stecker hat den weiteren Vorteil, dass Plus- und Minus-Leitung voneinander getrennt sind. Sie sind nicht in einem gemeinsamen Mantel untergebracht und können gut unterschieden werden. Dies kann der Schülervorstellung der „Einleitervorstellung“ entgegenwirken und unterstützt das Modell des elektrischen Riemens, vgl. [18, S. 117]. Die Kabelschuhe ermöglichen einen einfachen Anschluss an die Lichtmaschine.

Sicherung des Betriebsstromkreises F1

Aus der Auswahl des Hochstromsteckers und dem Abschnitt 4.2.1 ging hervor, dass die auftretenden Ströme bis zu 25 A und kurzzeitig sogar 50 A betragen können. Um einen ausreichenden Schutz der Elektronik vor Überlast zu gewährleisten und gleichzeitig genug Leistung zuzulassen, ist es wichtig, eine passende Sicherung auszuwählen. Zudem muss ein passender Sicherungshalter ausgewählt werden.

Kfz-Standsicherungen sind Schmelzsicherungen und haben eine Auslösecharakteristik. Je höher der Überstrom, desto schneller lösen diese aus. Die nachfolgende Grafik zeigt die Schmelzkurve ausgewählter KFZ-Schmelzsicherungen.

Ungeklärtes Copyright, vgl. Quelle in
der Bildbeschreibung

Abbildung 4-24: Auslösecharakteristik von KFZ-Schmelzsicherungen zwischen 2 und 40 A, entnommen aus [58]

Die Abbildung 4-24 zeigt die Zeit des Überstromes auf der Y-Achse und die Höhe des Stromes auf der X-Achse. Links unterhalb der jeweiligen Kurve löst die Sicherung nicht aus. Rechts oberhalb der Kurve ist ein Auslösen der KFZ-Sicherung garantiert. Für die grüne 30A-Sicherung ist zu erkennen, dass die Auslösezeit für $I = 30\text{ A}$ ins Unendliche geht. Für einen Strom von $I = 60\text{ A}$ beträgt die Auslösezeit noch etwa 1,5 Sekunden. Bei einer Spannung von $U_{out} = 14\text{ V}$ und einem Elektronenstrom von $I_{out} = 60\text{ A}$ müssten $P_{out} = 840\text{ W}$ über zwei Sekunden geleistet werden, um die Sicherung auszulösen. Da diese körperliche Leistung nur von Sportlern zu erreichen ist und der Schutz von Leitungen, Anschlüssen sowie Lichtmaschine gegeben ist, ist eine 30A-KFZ-Sicherung angemessen. Eine 25-A-Kfz-Sicherung ist ebenfalls ausreichend, vgl. Anhang F Pos. 26.

Leitungen und Verbinder des Betriebsstromkreises

Bei Gleichstromkreisen ist der maximal zulässige Spannungsfall entlang der Leitungen maßgeblich für die Auslegung des Leiterquerschnitts. Für Leitungslängen bis 5 m gibt es eine Faustregel, mit deren der benötigte Leiterquerschnitt abgeschätzt werden kann. Die Faustregel lautet:

$$\frac{\text{Strom [A]}}{3} = \text{Leiterquerschnitt [mm}^2\text{]}$$

[59]. Wird in die Gleichung ein Strom von $I_{out} = 25\text{ A}$ eingesetzt, so folgt:

$$\text{Leiterquerschnitt} = \frac{25\text{ A}}{3} = 8,33\text{ mm}^2$$

Da es keine Leitungen mit einem Querschnitt von $8,33 \text{ mm}^2$ gibt, wird ein Querschnitt von 6 mm^2 verwendet. Der nächstgrößere Leiterquerschnitt beträgt 10 mm^2 und wäre überdimensioniert. Zudem sind 25 A nur kurzzeitig zu erreichen. Ein Querschnitt von 10 mm^2 würde außerdem die Schwierigkeit der Konstruktion erhöhen, da mit steigendem Querschnitt die Steifigkeit der Leitung zunimmt.

Für den Betriebsstromkreis wird daher ein 6 mm^2 -KFZ-Sicherungshalter verwendet. Die Anschlüsse innerhalb der Elektrobox werden gelötet oder mit entsprechenden Kabelschuhen versehen. Als Sammelklemme wird eine 5-Fach-Federzugklemme der Firma Wago verwendet. Plus- und Minus-Leitungen werden durch unterschiedliche Farben gekennzeichnet, Rot für Plus-Leitungen sowie Schwarz für Minus. Die nachfolgende Abbildung 4-25 zeigt die Leitungen, Anschlüsse sowie den Sicherungshalter für den Betriebsstromkreis inkl. Positionsbezeichnung (Pos.).

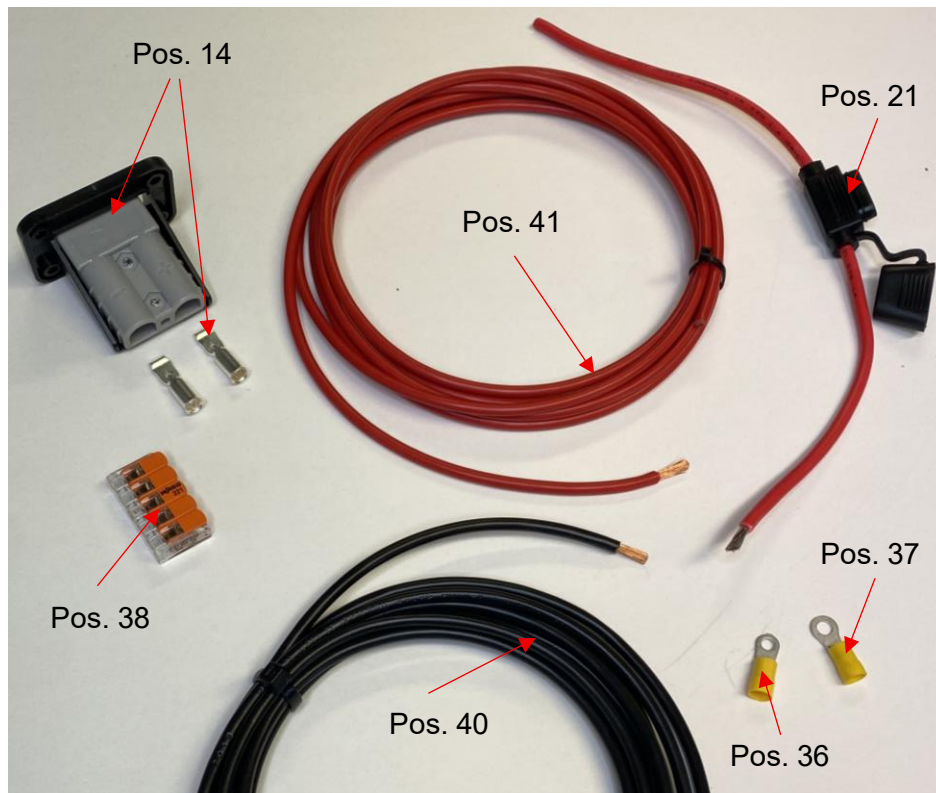


Abbildung 4-25: Leitungen, Anschlüsse, Klemmen und Sicherungshalter für den Betriebsstromkreis mit Positionsbezeichnungen

Die in der Abbildung 4-25 gezeigten Ring-Kabelschuhe für die Schraubdurchmesser M4 (Pos. 36) und M5 (Pos. 37) müssen mit einer dafür vorgesehenen Crimpzange verpresst werden. Solche Zangen sind unter dem Suchbegriff „Crimpzange für isolierte Kabelschuhe“ zu finden. Im Anhang I ist ein kostengünstiges Modell aufgeführt. Die Bedienung einer solchen Zange ist auch elektrotechnischen Laien zuzumuten und wird im Abschnitt 5.3 erörtert.

Die Federzugklemme (Pos. 38) ist leicht zu bedienen. Die orangefarbenen Hebel müssen hochgestellt werden, die 13 mm abisolierte Leitung muss eingeführt und die Hebel wieder geschlossen werden. Eine Aderendhülse oder das Verzinnen der Leitung ist nicht notwendig.

Der Anschluss für die Anderson-Einbaubuchse (Pos.14) wird gelötet und kann ebenfalls einem Laien zugemutet werden.

TVS-Diode

Die Transient-Voltage-Suppressor(TVS)-Diode hat die Aufgabe Spannungsspitzen zu unterdrücken und vor einer Verpolung zu schützen. Sie ist im Betriebsstromkreis verschaltet und liegt mit ihrer Kathode am Pluspotential, mit ihrer Anode liegt sie auf Massepotential. Erkennbar ist die Kathode am Weißen-Ring, vgl. Abbildung 4-26 unten.

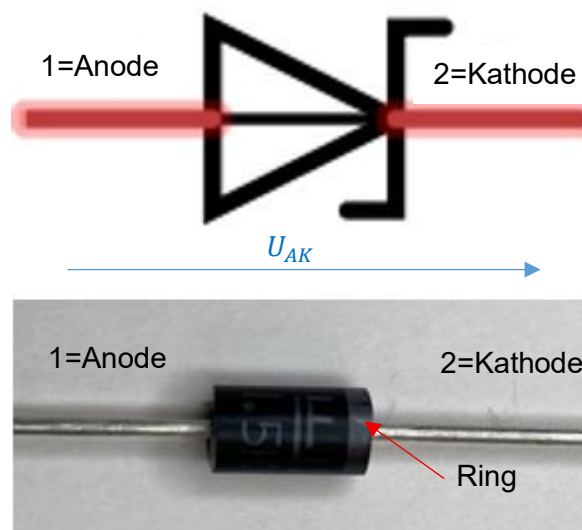


Abbildung 4-26: Schaltbild einer TVS-Diode (oben); Foto einer 1,5KE 18A TVS-Diode (unten)

Die in Abbildung 4-26 mit „2“ gekennzeichneten Kontakte sind die Kathoden. Die mit „1“ beschrifteten Kontakte sind die Anoden.

Die TVS-Diode ist bereits bei sehr kleinen Spannungen U_{AK} leitend und stellt bei einer Verpolung des Energiefahrrades einen Kurzschluss dar, vgl. Abbildung 4-27. Zudem dient sie als Freilaufdiode und schließt negative Spannungsspitzen, ausgelöst durch das Abschalten induktiver Betriebsmittel, kurz. Bei negativen Spannungen $U_{AK} < 0$ sperrt die Diode bis hin zu einer spezifischen Durchbruchspannung V_{BR} . Ab dieser Durchbruchspannung V_{BR} wird die Diode in Sperrrichtung leitend. Die Folge ist ein Strom in Sperrrichtung. Die Abbildung 4-27 zeigt das Strom-Spannungsverhalten einer TVS-Diode.



Abbildung 4-27: Strom- Spannungskurve einer 1,5 KE-ATVS-Diode, entnommen aus [60]

Steigt die Spannung weiter, so steigt der Strom in Sperrrichtung rasant an. Ab der sogenannten Clampingsspannung V_C kann der maximale peak-pulse-Strom I_{pp} fließen. Die Diode wird sehr niederohmig. Spätestens bei dieser Clampingsspannung sollte die Quellspannung der Lichtmaschine $U_{out} = -U_{AK}$ zusammenbrechen.

Bricht die Quellspannung durch die niederohmige TVS-Diode zusammen, so wird die Diode spätestens ab einer Rückstellspannung von V_R wieder hochohmig. Dieser Prozess kann sehr schnell ablaufen und kurzzeitige Spannungsspitzen abfangen. Die Dioden können kurzzeitig sehr hohe Leistungen ($P_{PPM} = V_C \cdot I_{pp}$) abfangen. Langfristige Überspannung dürfen weniger energiereich sein, um die Diode nicht zu zerstören (P_D).

TVS-Dioden können mit unterschiedlichen Kennwerten gekauft werden. Für das Energiefahrrad wurde eine Littelfuse 1,5KE18A ausgewählt, vgl. Anhang F Pos. 23. Diese Diode hat eine Rückstellspannung von $V_R = 15,3 \text{ V}$. Die Durchbruchspannung liegt zwischen $V_{BR-min} = 17,10 \text{ V}$ und $V_{BR-max} = 18,9 \text{ V}$. Die Clampingsspannung liegt bei $V_C = 25,2 \text{ V}$. Kurzzeitig kann die Diode $P_{PPM} = 1500 \text{ W}$ kurzschließen. Langfristig kann die Diode eine Leistung von $P_D = 6,5 \text{ W}$ tragen, vgl. [60].

Mit diesen Werten sollte die Diode in der Lage sein, unerwünschte Spannungsspitzen aus Abbildung 4-17 zu unterdrücken und so die Elektrobox, Lichtmaschine sowie das angeschlossene Betriebsmittel zu schützen. Die Prüfung ihrer Funktion wird im Abschnitt 0 vorgenommen.

Die Kontaktierung der TVS-Diode erfolgt entweder über die 5-Fach-Federzugklemmen der Firma Wago oder über die Spannungsmessbuchsen und zwei Leybold Klemmstecker, vgl. Zubehör Pos. 7 Anhang I.

Wird eine unregelte Lichtmaschine verwendet, bei der die Ausgangsspannung U_{out} proportional zur Drehzahl ist, muss weiterhin sichergestellt werden, dass keine übermäßigen Spannungsspitzen entstehen. Zudem darf die Ausgangsspannung $U_{out} = 40 \text{ V} - \text{DC}$ nicht überschreiten, um den Kondensator C1 nicht zu zerstören. Für den Betrieb an einer unregelten Lichtmaschine wurde die TVS-Diode 1,5KE36A ausgewählt. Sie ist im Anhang I unter der Positionsnummer (Pos.) 8 zu finden.

Kondensator

Der Kondensator C1 in Abbildung 4-18 dient der Spannungsglättung und sorgt so für ein lineareres Tretgefühl. Eine Spannungsglättung ist zudem wichtig, um einen Wechselrichter betreiben zu können. Moderne Elektroniken sind häufig auf eine glatte Gleichspannung angewiesen. Bei einer zu großen Welligkeit, wie in Abbildung 4-17 gezeigt, können manche Wechselrichter ihre Funktion einstellen.

Um die Welligkeit möglichst gering zu halten, ist eine ausreichend hohe Kapazität des Kondensators notwendig. Die Kapazität darf jedoch nicht zu groß sein, da mit ihr die Baugröße steigt, was wiederum die Elektrobox vergrößern würde. Zudem steigt mit der Kapazität der Preis des Kondensators. Ein zu groß gewählter Kondensator hat zudem den Effekt, dass der Ladestrom beim Start zu groß werden kann. Ein zu hoher Ladestrom ist auf dem Energiefahrrad als kurzzeitiger Drehmomentanstieg wahrnehmbar. Erste Tests haben ergeben, dass eine Kapazität von $C = 470 \text{ mF}$ bereits deutlich zu groß ist.

Um die benötigte Kapazität zu berechnen, wird die Kondensatorformel:

$$C = \frac{Q}{\Delta U} = \frac{I \cdot T}{\Delta U} \quad 4-11$$

herangezogen. Darin ist Q die Ladungsmenge, I der Elektronenstrom, T die Zeit zwischen zwei Halbwellen und ΔU die Spannung, um welche die Ausgangsspannung einbrechen darf. Wird davon ausgegangen, dass eine Lichtmaschine eine mittlere Ausgangsspannung von $\overline{U_{out}} = 14 \text{ V} - \text{DC}$ bereitstellt, muss untersucht werden, wie weit die Spannung bei Belastung einbrechen darf. Im Datenblatt des Wechselrichters ist eine Mindestspannung $U_{min} = 10 \text{ V}$ angegeben, vgl [46]. Die Spannung darf bei Belastung demnach um $\Delta U = 4 \text{ V}$ einbrechen.

Um die Ladungsmenge Q zu bestimmen, wird von einem Betriebsstrom von $I = 25 \text{ A}$ ausgegangen. Die Zeit, die der Kondensator stützen muss, ist von der Periodendauer und damit von der Lichtmaschinendrehzahl abhängig. Je langsamer die Lichtmaschine dreht, desto länger ist die Periodendauer der pulsierenden Gleichspannung. Bei einer Lichtmaschine mit einem 12-poligen Klauenpolläufer werden pro Phase und Umdrehung 12 Halbwellen induziert. Für eine dreiphasige Lichtmaschine entstehen so 32 Halbwellen pro Umdrehung. Mit einer Minstdrehzahl von $n_{lima-min} = 800 \text{ 1/min}$ folgt:

$$\frac{1}{T} = \frac{800 \text{ 1/min}}{60 \text{ s/min}} \cdot 32 = 427 \text{ Hz} \quad 4-12$$

bzw.

$$T = \frac{1}{427 \text{ Hz}} = 2,34 \text{ ms} \quad 4-13$$

Der Kondensator muss demnach für 2,34 ms einen Strom von 25 A liefern, um die Spannung zu stabilisieren. Werden diese Werte nun in Gleichung 4-11 eingesetzt und berechnet, folgt:

$$C = \frac{I \cdot T}{\Delta U} = \frac{25 \text{ A} \cdot 2,34 \text{ ms}}{4 \text{ V}} = 14,62 \text{ mF} \quad 4-14$$

Der Kondensator benötigt eine Kapazität von 14,62 mF. Die nächstgrößere standardmäßige Baugröße beträgt $C = 15 \text{ mF}$, vgl. [61]

Der Kemet-ALS31A153DB040-Kondensator hat eine Kapazität von $C = 15 \text{ mF}$ mit einer Toleranz von $\pm 20 \%$, vgl. Anhang F Pos. 17. Er besitzt eine Spannungsfestigkeit von $U_{max} = 40 \text{ V} - \text{DC}$ und eignet sich damit auch für den Betrieb an einer ungeregelten Lichtmaschine.

Die Kondensatoren dieser Baureihe haben den Vorteil, dass sie eine sehr lange Lebensdauer von 20.000 Stunden bei 85°C haben. Sie können hohe Rippelströme ausgleichen und verfügen über eine hohe Stoßspannungsfestigkeit. Zudem ist ihre Baugröße sehr kompakt gehalten. Der Kemet ALS31A153DB040 hat einen Durchmesser von nur $d = 36 \text{ mm}$ und eine Länge von $l = 62 \text{ mm}$. Zur Befestigung verfügt der Kondensator über eine M8x12-Schraube auf der Unterseite, wodurch er sich gut in der Elektrobox befestigen lässt. Zur Kontaktierung verfügt der Kondensator über M5x 10-Schraubanschlüsse an der Oberseite. So können auch große Leiterquerschnitte an den Kondensator mit einem M5-Kabelschuh (Pos. 37) geschraubt werden, vgl. [61]

Da die Anschlussschrauben nicht im Lieferumfang enthalten sind, werden M5x10-Zylinderkopfschrauben (Pos. 18), M5-Unterlegscheiben (Pos. 19) sowie M5-Federringe (Pos. 20) eingeplant. Die Abbildung 4-28 zeigt den Kondensator inkl. Anschlusstechnik.



Abbildung 4-28: Glättungskondensator inkl. Anschlussschrauben, Unterlegscheiben, Federringen und M5-Kabelschuhen sowie Positionsbezeichnungen

Die Abbildung 4-28 veranschaulicht zudem die Reihenfolge des Anschlusses. Der Pluspol des Kondensators ist in Abbildung 4-28 links. Der Pluspol ist an der Oberseite mit einem „+“ Symbol gekennzeichnet. Der Kondensator darf nicht verpolt werden, da er sonst zerstört werden würde.

4.2.5 Auswahl von Messbuchsen und Anschlüssen im Vorerregerstromkreis:

Für die Messbuchsen im Betriebsstromkreis sowie für die Anschlüsse des Vorerregerstromkreises werden 4mm-Sicherheitsmessbuschen vorgesehen. Diese Messbuchsen erlauben sowohl den Anschluss von Sicherheitsmessleitungen als auch nicht isolierter Messleitungen. So können die Buchsen auch verwendet werden, sollte das Energiefahrrad als berührungsgefährliche Spannung eingestuft werden.

Als Einbaubuchse in die Elektrobox wurde sich für die SKS-Hirschmann-SEB2600G-M4 Sicherheits-Laborbuchse entschieden. Diese hochwertige Messbuchse hat den Vorteil, dass sie sowohl mit M4-Kabelschuhen (Pos. 36) kontaktiert werden kann, als auch einen Lötanschluss für geringere Querschnitte erlaubt. Zudem ist die Buchse für einen Bemessungsstrom von 32 A ausgelegt. vgl. [62]. Damit kann die Messbuchse den Betriebsstrom I_{out} tragen. Zudem können mehrere Kabelschuhe an eine Buchse angeschlossen werden, um eine Parallelschaltung zu ermöglichen. Die Dioden D10 und D11 können direkt an die Buchse angelötet werden, vgl. Abbildung 4-21. Die nachfolgen Abbildung 4-29 zeigt die ausgewählten Messbuchsen inkl. Positionsbezeichnung (Pos.).

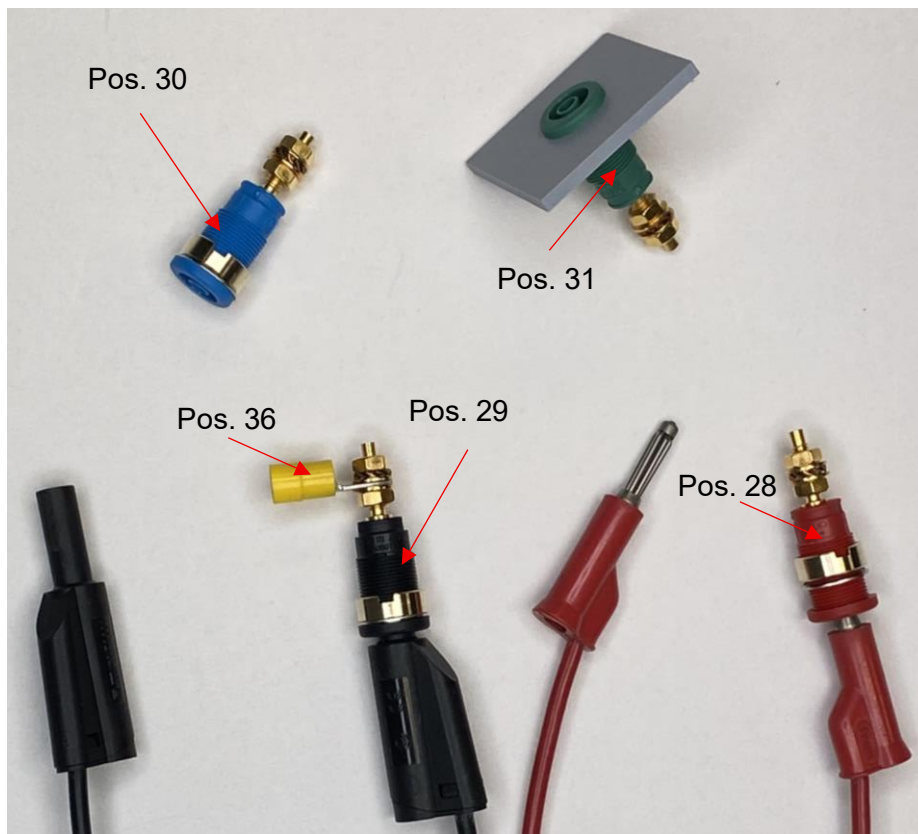


Abbildung 4-29: SEB 2600 G M4 Sicherheits-Laborbuchse in verschiedenen Kontaktierungen und Farben mit Positionsbezeichnungen

Wie gut in der Abbildung 4-29 zu erkennen ist, zeigt die rote Messbuchse (Pos. 28) den Anschluss einer 4mm-Labormessleitung und ist für die Strom- und die Spannungsmessung vorgesehen. Sie sind alle auf positivem Potential. Die schwarze Buchse (Pos. 29) zeigt den Anschluss einer Sicherheitsmessleitung und die Kontaktierung mit einem M4-Kabelschuh (Pos. 36). Sie wird für die Spannungsmessung verwendet und liegt auf Massepotential.

An den Strommessbuchsen sollten aufgrund des hohen Stromes nur kurze Messleitungen mit einem Querschnitt von $2,5 \text{ mm}^2$ angeschlossen werden. Gleiches gilt für den Anschluss eines Betriebsmittels über die Spannungsmessbuchsen

Die grüne Messbuchse (Pos. 31) soll veranschaulichen, wie die Messbuchsen im eingebautem Zustand aussehen. Sie ist für den Kontakt I/IG/R/15 vorgesehen, der nur bei speziellen Lichtmaschinen benötigt wird. Die blaue Buchse (Pos. 30) ist für den Anschluss der Erregerspannung (Anschluss D+/61/L/IND) vorgesehen vgl. Abschnitt 4.2.1.

4.2.1 Auslegung und Auswahl der elektrotechnischen Komponenten im Vorerregerstromkreis

Für den Vorerregerstromkreis müssen eine geeignete Batterie, eine Sicherung samt Sicherungshalter, zwei Schalter, zwei Dioden, eine Leuchte inkl. Leuchtmittel sowie Anschlüsse und Leiterquerschnitte ausgelegt und ausgewählt werden.

Batterie des Vorerregerstromkreises

Für den Vorerregerstromkreis wird eine Batterie benötigt, welche die anfängliche Erregerenergie für den Anlauf der Lichtmaschine liefert, vgl. Abschnitt 4.2.1. Da der Erregerstrom $I_{Err} \leq 1 \text{ A}$ ist [41, S. 122] und die Zeit der Vorerregung kurz gehalten kann, genügt eine Batterie mit einer geringen Kapazität. Die Batterie muss diesen Erregerstrom bei einer Spannung von $U_{Bat} = 12 \text{ V} - \text{DC}$ liefern können.

Die YU-NP1,2-12 Batterie von YUASA ist eine kleine 12V-Batterie mit einer Kapazität von $C_{Bat} = 1,2 \text{ Ah}$. Sie ist vom Verband deutscher Schadensversicherer (Vds) zertifiziert und ist eine geschlossene Blei-Säure Batterie. Sie hat einen maximalen Endladestrom von 36 A für eine Sekunde und 12 A für eine Minute. Mit ihren kleinen Maßen von 97x48x54,5 mm (LxBxH) ist die Batterie ideal für den Einbau in die Elektrobox, vgl. [63].

Um zu bestimmen, wie lange eine Batterieladung bei stillstehender Lichtmaschine und eingeschaltetem Erregerschalter hält, wird von einer vollständig geladenen Batterie und einem maximalen Erregerstrom von $I_{Err} = 1 \text{ A}$ ausgegangen. Die mögliche Erregerzeit berechnet sich wie folgt:

$$t = \frac{C_{Bat}}{I_{Err}} \quad 4-15$$

Mit eingesetzten Werten folgt:

$$t = \frac{1,2 \text{ Ah}}{1 \text{ A}} = 1,2 \text{ h}$$

Die maximal mögliche Erregerzeit beträgt demnach 1,2 h. Diese Zeit wird als ausreichend erachtet, wenn davon ausgegangen wird, dass das Energiefahrrad aufgebaut, der Erregerschalter S1 eingeschaltet und nach wenigen Minuten die Lichtmaschine selbst erregt wird. Ist ein Schüler oder eine Schülerin erschöpft, dauert ein Wechsel ebenfalls nur wenige Minuten. Wird konsequent darauf geachtet, zwischen einzelnen Teilversuchen den Erregerschalter S1 auszuschalten, kann die Batterie sehr lange verwendet werden, ohne dass ein Laden notwendig wird. Falls die Batterie doch einmal entladen ist, kann sie über den Ladeschalter S2 geladen werden. Dazu kann die Elektrobox bei eingeschaltetem Ladeschalter an ein Netzteil angeschlossen werden oder mit der Lichtmaschine geladen werden. Der Ladestrom beträgt laut Datenblatt $I_{Charge} = 0,3 \text{ A}$, vgl. [63].

Leider verfügt die Batterie über zwei sogenannte 4,8 mm-Faston-Anschlüsse, für die es keine isolierten Kabelschuhe gibt. Daher muss zusätzlich zur Batterie ein Adapter von Faston auf 6,3 mm Flachsteckhülse beschafft werden, vgl. Anhang F Pos. 16. Die Abbildung 4-30 zeigt ein Foto der Batterie (Pos. 15) mit aufgestecktem Adapter am Pluspol der Batterie sowie einem abgezogenen Adapter.

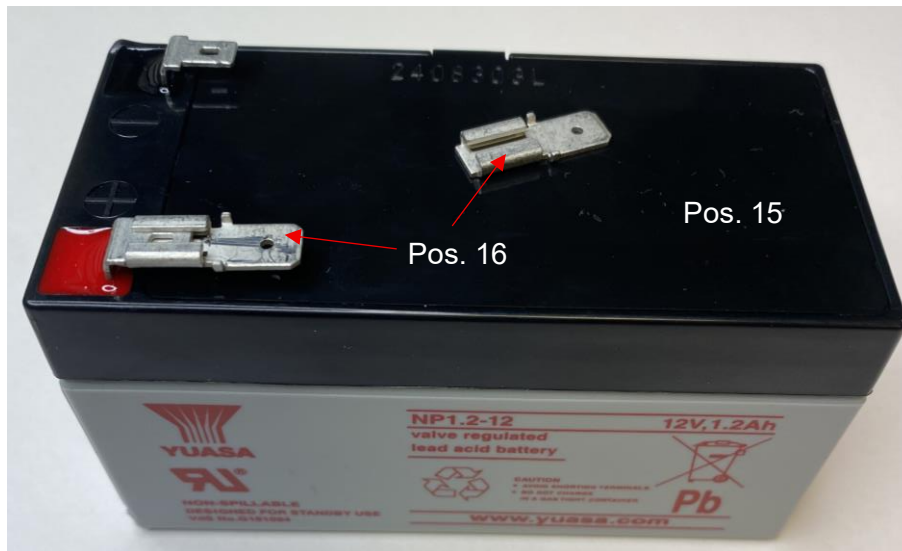


Abbildung 4-30: YU-NP1,2-12-Batterie mit 4,8 mm-Faston-Adaptoren auf 6,3 mm Flachsteckhülse

Sicherung des Vorerregerstromkreises F1

Wie zuvor beschrieben, liegt der maximale Erregerstrom bei etwa $I_{Err} \leq 1 \text{ A}$ [41, S. 122]. Der Batterieladestrom liegt bei $I_{Charge} = 0,3 \text{ A}$. Der maximal zulässige Entladestrom beträgt 36 A für eine Sekunde bzw. 12 A bei einer Minute [63].

Die kleinstmögliche KFZ-Sicherungsgröße beträgt 2 A, vgl. Abbildung 4-24. Eine 2A-KFZ-Sicherung hält dem Lade- und Erregerstrom stand. Sie muss auslösen, bevor der maximale Entladestrom der Batterie erreicht ist. Dies kann z.B. der Fall sein, wenn der Batterieschalter bei angeschlossenem Betriebsmittel und stehender Lichtmaschine betätigt wird.

Um zu überprüfen, ob die 2A-KFZ-Sicherung rechtzeitig auslöst, wird die Abbildung 4-24 betrachtet (graue Kurve). Bei 12 A liegt die Auslösezeit bei etwa 0,08 Sekunden. Damit ist sichergestellt, dass die Batterie nicht zu schnell entladen wird und dass sie nur zur Erregung dient. Bereits bei einem 12V-Betriebsmittel mit $P \geq 24 \text{ W}$ würde die Sicherung auslösen.

Für die Sicherung und Sicherungshalter wird ein Kfz-Sicherungshalter in der Bauform mini verwendet, welche der Standard in modernen Fahrzeugen ist. Die Wahl der kleineren Sicherungsbauf orm hat den Grund, dass eine klare optische Unterscheidung zwischen Erreger- und Betriebsstromkreis besteht. Zudem ist so sichergestellt, dass nicht versehentlich eine zu große Sicherung aus dem Betriebsstromkreis (25 oder 30 A) in den Vorerregerstromkreis gesteckt wird. Die nachstehende Abbildung 4-31 zeigt den Vergleich der beiden Sicherungen F1 und F2 sowie deren Positionsnummern (Pos.).

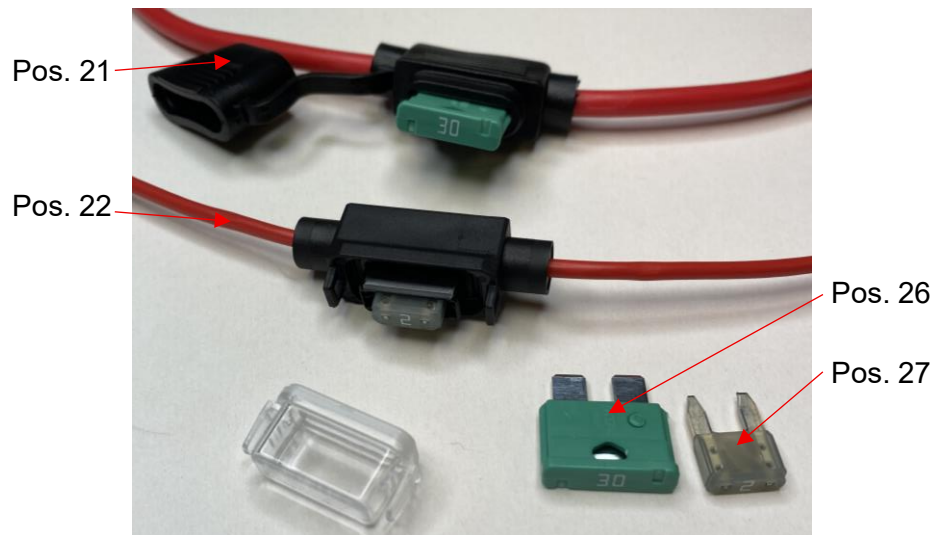


Abbildung 4-31: Vergleich der Sicherung und Sicherungshalter des Betriebsstromkreises mit der des Vorerregerstromkreises sowie dessen Positionsnummern

Die Abbildung 4-31 zeigt gut, dass eine Verwechslung der Sicherungen nicht möglich ist, da sie eine unterschiedliche Baugröße aufweisen. Zudem ist der Leiterquerschnitt der Vorerregerstromkreis-Sicherung (Abbildung 4-31 unten) mit $2,5 \text{ mm}^2$ deutlich kleiner, was einer Verwechslung der Sicherungshalter entgegenwirkt und den Nachbau vereinfacht.

Für den Anschluss an die Batterie bzw. an dessen Faston-Adapter (Pos. 16) werden $2,5 \text{ mm}^2$ -Flachsteckhülsen (Pos. 33) eingeplant, welche gecrimpt (verpresst) werden.

Leitungen und Anschlüsse

Die zuvor ausgewählte KFZ-Mini-Sicherung hat einen Leiterquerschnitt von $2,5 \text{ mm}^2$. Der Masseanschluss der Batterie wird daher auch in $2,5 \text{ mm}^2$ -Schwarz umgesetzt (Pos. 42) und ebenfalls mit Flachsteckhülsen (Pos. 33) ausgeführt. Der Anschluss an die Masseleitung des Betriebsstromkreises erfolgt über die 5-Fach-Federzugklemme (Pos. 38, vgl. Abbildung 4-25).

Hinter der Sicherung wird eine 3-Fach-Federzugklemme der Firma Wago (Pos. 39) eingeplant. Diese nimmt die Leitung des Sicherungshalters auf und verteilt das Pluspotential an die Schalter S1 und S2. Die weitere Verdrahtung des Vorerregerstromkreises erfolgt in $1,5 \text{ mm}^2$ -Rot (Pos. 43).

Die Anschlüsse an den Schaltern werden mit Flachsteckhülsen für $1,5 \text{ mm}^2$ (Pos. 34) ausgeführt. Um den geschalteten Kontakt von S1 mit der Leuchte X1 und Diode D11 zu verbinden, wird eine Flachsteckhülse mit zweiter Anschlussfahne (Pos. 35) eingeplant.

Die Anoden der Dioden D10 und D11 werden gelötet. Die Kathoden werden direkt an die Sicherheits-Laborbuchsen gelötet.

Der Anschlussstellen an der Leuchte X1 sind geschraubt. Die Leiterenden sind vor dem Kontaktieren zu verzinnen, um eine Verletzung der Adern zu verhindern.

Die nachfolgende Abbildung 4-32 zeigt das Verdrahtungs- und Verbindungsmaterial für den Vorerregerstromkreis.

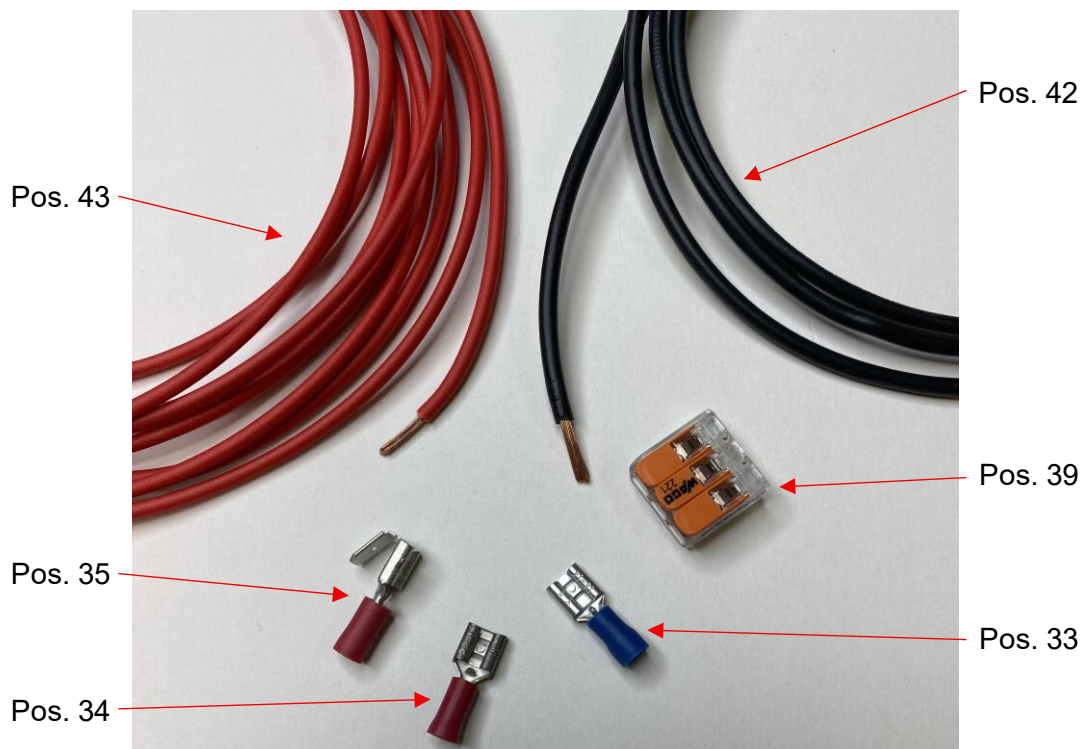


Abbildung 4-32: Verbindungs- und Verdrahtungsmaterial für den Vorerregerstromkreis mit Positionsbezeichnung

Wie gut in Abbildung 4-32 zu erkennen ist, weist die schwarze Leitung (Pos. 42) einen größeren Querschnitt auf als die rote Leitung (Pos. 43) auf.

Die Federzugklemme (Pos. 39) ist leicht zu bedienen. Die orangefarbenen Hebel müssen hochgestellt werden, die 11 mm abisolierte Leitung eingeführt und die Hebel wieder geschlossen werden. Eine Aderendhülse oder das Verzinnen der Leitung ist nicht notwendig.

Die Leiter-Querschnitte der Flachsteckhülsen sind an ihrer Farbe erkennbar. Blaue Crimp-Kontakte (Pos. 33) sind für 2,5mm²-Leitungen. Rote Crimp-Kontakte (Pos. 34, 35) sind für 1,5mm²-Leitungen. Alle Crimp-Kontakte müssen mit einer dafür vorgesehenen Crimpzange verpresst werden. Im Anhang I ist eine kostengünstige Crimpzange gezeigt.

Schalter S1 und S2

Für den Erregerschalter S1 und den Batterieladeschalter S2 wird der gleiche Schaltertyp verwendet. Für das Energiefahrrad wird der Marquard MAR-1552.3112 verwendet, vgl. Anhang F Pos. 32.

Dieser Schalter kann einen Strom von 5 A – DC schalten und ist zweipolig. Zweipolig bedeutet, dass der Schalter intern über zwei Schalter verfügt die über eine gemeinsame Wippe geschaltet wird. Für das Energiefahrrad wird nur einer der beiden Schalter benötigt. Die zu verwendenden Kontakte sind mit 1 und 1A beschriftet. Die Wippe ist rastend und mit den Symbolen I für „EIN“ und O für „AUS“ gekennzeichnet. Die Kontakte sind beide als Schließer

ausgeführt. Die unten gezeigte Abbildung 4-33 zeigt den Schalter aus zwei Perspektiven mit und ohne Flachsteckhülsen.

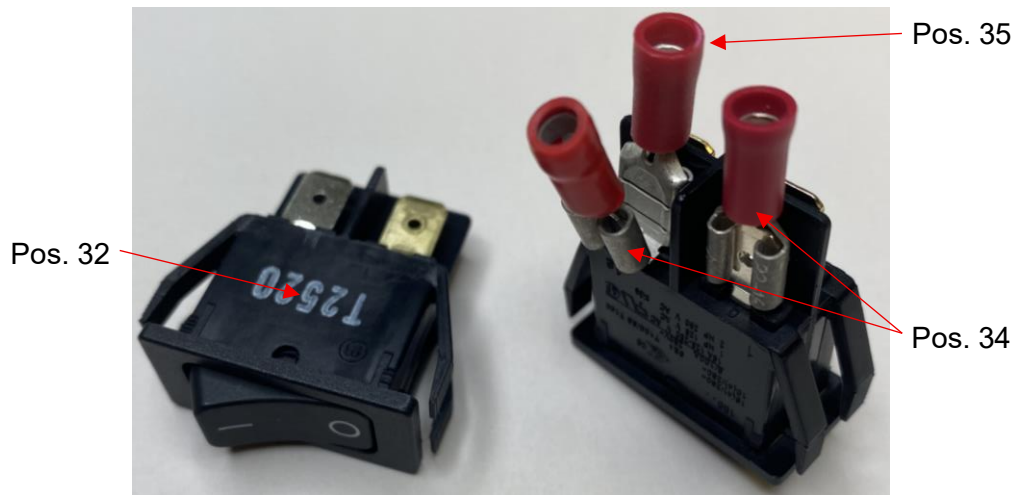


Abbildung 4-33: Zwei MAR 1552.3112 Schalter mit (rechts) und ohne (links) gesteckten Flachsteckhülsen sowie mit Positionsbezeichnung

Die Abbildung 4-33 zeigt zudem, wie dank der Flachsteckhülse mit Abzweig (Pos. 35) eine Doppelkontaktierung stattfinden kann.

Leuchte X1

Die Leuchte X1 wird für die Anzeige der Fremderregung (leuchtet) und als Vorwiderstand vor der Erregerwicklung benötigt. Für die Leuchte wurde vor der Erfindung der LED typischerweise ein 12V/2W Leuchtmittel verwendet. Moderne Fahrzeuge verwenden eine LED mit entsprechendem Vorwiderstand [41, S. 123]. Um die Konstruktion so einfach und anschaulich wie möglich zu halten, wird für das Energiefahrrad auf eine 12V/2W-Glühbirne gesetzt, vgl. Anhang F Pos. 25.

Für die Leuchtmittelfassung wurde die HELLA-2AA-008-592-031-Kontrollleuchte ausgewählt, vgl. Anhang F Pos. 24. Sie fasst Leuchtmittel mit BA9S-Sockel und verfügt über zwei Schraubkontakte. Ihr Schauglas ist rot gefärbt, so dass die Leuchte bei Fremderregung rot leuchtet. Die Leuchte ist rund hat ein Lochmaß von 17,2 mm. Die nachstehende Abbildung zeigt sowohl die Leuchte als auch das entsprechende Leuchtmittel.



Abbildung 4-34: HELLA-2AA-008-592-031-Kontrollleuchte und 12V/2W-Leuchtmittel mit Positionsbezeichnung

Erregerdiode D10 und D11

Die beiden Erregerdioden D10 und D11 sorgen dafür, dass der Erregerstrom in die Lichtmaschine hineinfließen, jedoch kein Strom von der Lichtmaschine in die Batterie fließen kann. Die Dioden müssen demnach den Erregerstrom $E_{Err} \leq 1 \text{ A}$ tragen können und eine Sperrspannung von $U_{Sperr} \geq 2 \text{ V}$ aufweisen. Die benötigte Sperrspannung ergibt sich aus der Spannungsdifferenz zwischen Lichtmaschine $U_{out} = 14 \text{ V}$ und der Batteriespannung $U_{Bat} = 12 \text{ V}$.

Die Gleichrichterdiode 1N 5060 hat eine Sperrspannung von 400 V und kann dauerhaft einen Strom von 2 A tragen. Bei einem Strom von 2 A fällt maximal 1 V an der Diode ab. In Flussrichtung wird die Diode ab etwa 0,6 V leitend. Ihre Kathode ist ähnlich wie in Abbildung 4-26 mit einem weißen Ring gekennzeichnet, vgl. [64]. Die Diode ist in der Stückliste, im Anhang F unter der Position (Pos.) 44 aufgeführt.

4.3 Konstruktion eines Gehäuses

Die im Kapitel 4.2 beschriebenen Komponenten müssen in einem Gehäuse untergebracht werden. Die Box wird als Elektrobox bezeichnet. Die Elektrobox setzt sich aus drei Bestandteilen zusammen: Gehäuse, Deckel und Batterieklammer. Da der Strommesswiderstand (Shunt) ein optionales Zusatzbauteil ist, wird er in einem separaten, steckbaren Gehäuse platziert.

4.3.1 Elektrobox

Für das Gehäuse der Elektrobox werden die Maße 220x120x100 mm (LxBxH) gewählt, um einen ausreichenden Platz für die Komponenten zu erhalten. Gleichzeitig ist die Box damit nicht zu groß, um von 3D-Druckern mittlerer Größe gedruckt werden zu können [65, S. 22]. In das Gehäuse werden die Batterie, der Kondensator und die Anschlüsse für den Vorerregerkreis montiert. Die Hochstromsteckdose für den Anschluss der Lichtmaschine sowie für den Anschluss der Betriebsmittel werden ebenfalls im Gehäuse montiert. Der

Lichtmaschinenanschluss wird auf der gleichen Gehäusesseite wie die Anschlüsse für den Vorerregerkreis platziert.

Die Hochstromsteckdose für den Anschluss wird mit „In“ beschriftet. Die Steckdose für die Betriebsmittel wird mit „Out“ beschriftet. Der blaue Anschluss des Vorerregerstromkreises wird mit D+ / L / IND / 61 beschriftet. Der zweite Anschluss des Vorerregerstromkreises wird mit I / IG / R / 15 beschriftet. Mit diesen Beschriftungen wird die Wahrscheinlichkeit einer falschen Beschaltung reduziert. Alle Beschriftungen werden einen Millimeter tief geprägt, so wird für die Beschriftung keine Stützstruktur im 3D-Druck benötigt. Die Abbildung 4-35 zeigt das Gehäuse mit Blick auf die Seite der Lichtmaschinenanschlüsse.

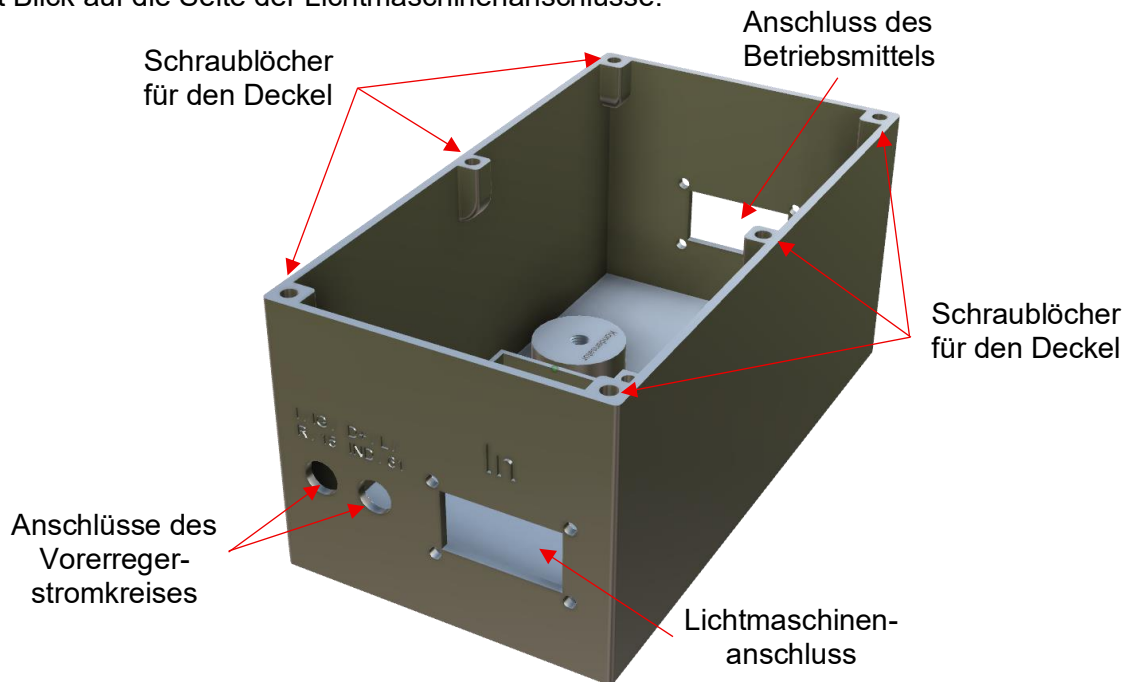


Abbildung 4-35: Gerendertes CAD-Modell des Gehäuses der Elektrobox

Wie in Abbildung 4-35 zu sehen ist, sind die Überhänge der Hochstromsteckdosen groß (rechteckige Öffnung). Die Einbauöffnung der Steckdosen sollte daher im 3D-Druck mit Stützstruktur gedruckt werden. Die Steckdosen werden jeweils mit vier M4-Senkkopfschrauben, Muttern und Unterlegscheiben im Gehäuse verschraubt, vgl. Anhang G Pos. 51 und 52.

Die Löcher für die Anschlüsse der Vorerregerstromkreises haben einen Durchmesser von 17,2 mm und können ohne Stützen gedruckt werden.

Die an der Oberseite zu erkennenden Strukturen um die Schraublöcher des Deckels sind so konstruiert, dass kein Stützmaterial notwendig ist. Die Struktur um die Löcher herum baut sich mit jeder Schicht des 3D-Drucks langsam auf, so dass keine großen Überhänge entstehen. In die Schraublöcher werden M4x8,1-Einschmelzgewinde eingeschmolzen, um eine langlebige robuste Verschraubung zu erhalten, vgl. Anhang G Pos. 50.

Auf dem Boden des Gehäuses sind Stege für die Halterung der Batterie konstruiert worden. An den langen Seiten der Batterie sind zudem zwei Löcher für Einschmelzgewinde konstruiert. Auf die Struktur um die Schraublöcher herum wird so eine Batterieklammer gesteckt und mit zwei Senkkopfschrauben verschraubt, vgl. Abbildung 4-36.

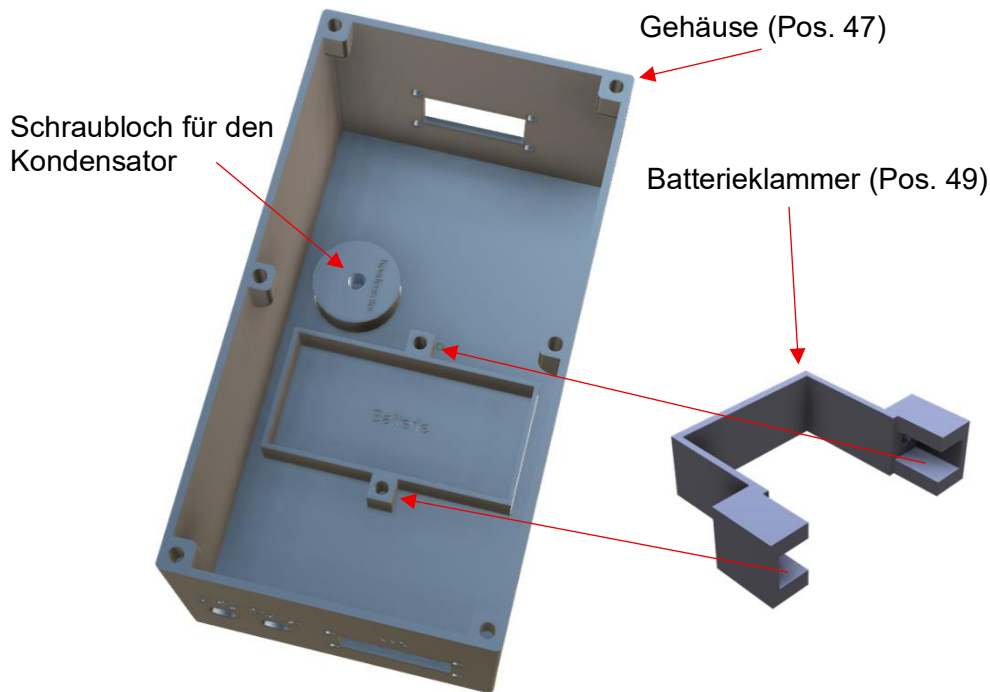


Abbildung 4-36: Gerendertes CAD-Modell des Gehäuses der Elektrobox (links); Gerendertes CAD-Modell der Batterieklammer (rechts).

Die in Abbildung 4-36 gezeigte Montage der Batterieklammer hat den Vorteil, dass die Batterie mit ihrem hohem Gewicht nicht durch das Gehäuse rutschen kann. So werden Kurzschlüsse, Kabelbrüche und mechanische Zerstörungen verhindert.

In Abbildung 4-36 ist zudem das Schraubloch für den Glättungskondensator gezeigt. Dazu ist ein Volumenkörper mit dem Durchmesser des Kondensators erstellt und um 12 mm extrudiert worden. In die Mitte des Zylinders ist ein M8x12 mm Gewinde konstruiert. Gewinde können ab M8 direkt mit dem 3D-Drucker gedruckt werden [66].

Die CAD-Dateien sowie das benötigte Verbindungsmaterial sind im Anhang G aufgeführt. Die CAD-Dateien können dem Inhalt des USB-Sticks entnommen werden.

Gehäusedeckel:

In den Gehäusedeckel werden die Strom- und Spannungsmessbuchsen eingelassen. Zudem werden die beiden Schalter S1 und S1 im Deckel montiert. Die Kontrollleuchte X1 findet ebenfalls ihren Platz im Deckel.

Um der bei Schülern häufig anzutreffenden „Einleitervorstellung“ entgegenzuwirken und das Prinzip von Strom- und Spannungsmessung zu veranschaulichen, werden die Leitungswege des Betriebsstromkreises auf dem Deckel angedeutet. Dies unterstützt zudem die Vorstellung

des elektrischen Riemens, da Hin- und Rückleiter klar erkennbar sind. Die Schaltung des Vorerregerstromkreises wird nicht auf dem Deckel abgebildet, da dieser zu komplex ist, um ihn abzubilden.

Der Deckel wird mit insgesamt sechs Senkkopfschrauben (Pos. 51) auf das Gehäuse verschraubt. Um eine ebene Fläche zu schaffen, werden die Schraubenköpfe in den Deckel eingesenkt. Die nachstehende Abbildung 4-37 zeigt das CAD-Modell des Deckels

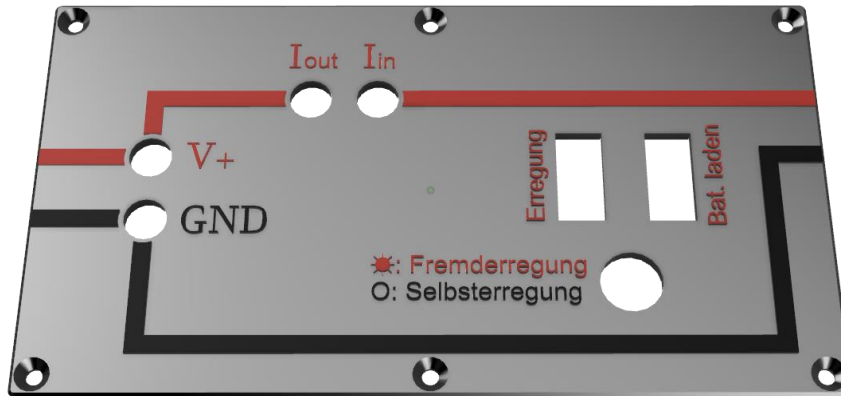


Abbildung 4-37: Gerendertes CAD-Modell des Gehäusedeckels in der Version "Deckel extrudiert"

In der Abbildung 4-37 ist zu erkennen, dass alle auf Plus-Potential befindlichen Leitungen und Messbuchsen-Beschriftungen rot dargestellt sind. Alle Masseleitungen und „GND“ sind schwarz dargestellt. Die Leuchte ist mit „☼:Fremderregung“ (rot) und „O:Selbsterregung“ (schwarz) beschriftet. Der Schalter S1 ist mit „Erregung“ und der Schalter S2 mit „Bat. Laden“ beschriftet.

Die Beschriftungen und Leitungen sind in unterschiedlichen Höhen extrudiert. Die extrudierten Körper gehören jedoch zum Deckel, sind also keine eigenständigen Volumenkörper. Dies hat den Vorteil, dass so auch mit einfachen Single-Extruder-3D-Druckern ein mehrfarbiger Druck möglich ist. Dazu müssen die Höhenbereiche in unterschiedlichen Farben gedruckt werden. Bei jedem Farbübergang wird das Filament dazu gewechselt. Die nachstehende Tabelle 4-2 zeigt die Höhenbereiche mit ihrer dazugehörigen Farbe:

Tabelle 4-2: Höhenbereich des Gehäusedeckels für mehrfarbigen 3D-Druck

Höhenbereich	Farbe
0 - 4 mm	Beliebig
4 - 4,5 mm	Rot
4,5 – 5 mm	Schwarz

Ein weiterer Vorteil dieser Konstruktion ist, dass auch bei einem einfarbigen 3D-Druck alle Beschriftungen und Leitungen erkennbar sind.

Für Schulen, die im Besitz von Mehrfach-Extruder-Druckern sind, ist eine zweite CAD-Datei zur Verfügung gestellt. Bei der Version „Deckel eingelassen“ sind alle Beschriftungen in dem Deckel eingelassen und als neue Volumenkörper angelegt. Im Slicer kann dann für jeden Volumenkörper eine eigene Farbe bzw. ein eigener Extruder definiert werden. Die nachstehende Abbildung 4-38 vergleicht beide Versionen.

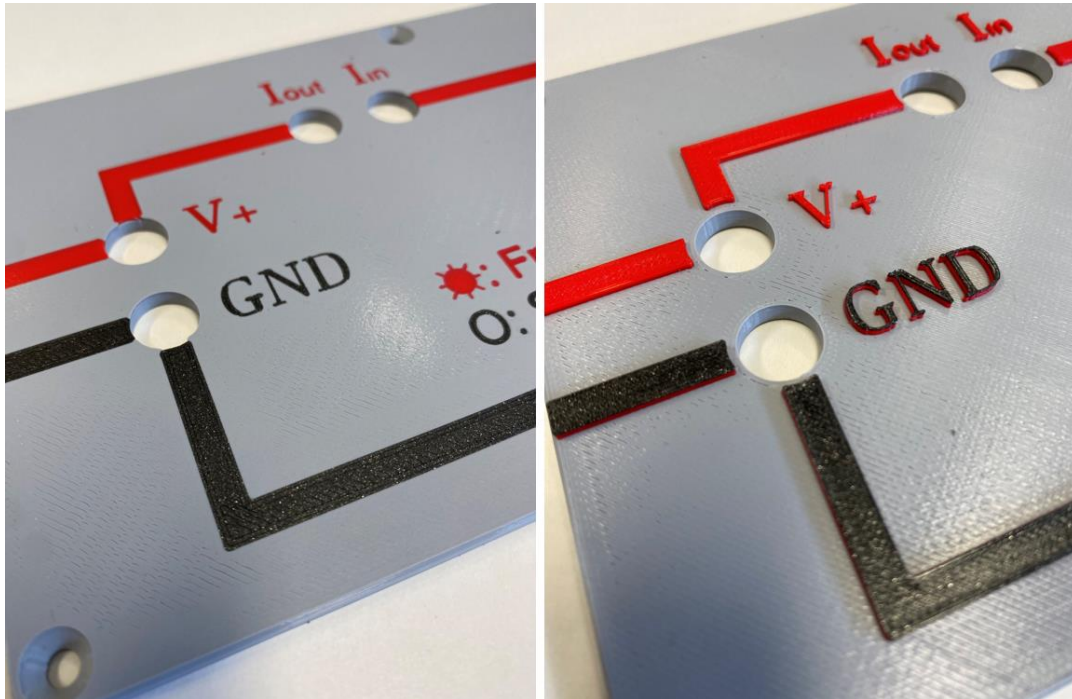


Abbildung 4-38: Vergleich des 3D-gedruckten Deckels in der Version "eingelassen" (links) mit der Version "extrudiert" (rechts)

Die im Nachbau verwendete Version des Deckels ist dem Erbauer überlassen. Es gibt kaum Vor- bzw. Nachteile zwischen den Versionen. Die eingelassene Version ist lediglich optisch etwas eleganter als die extrudierte. Die benötigten CAD-Dateien sind im Anhang G aufgeführt und können dem Inhalt des USB-Sticks als 3MF-Datei entnommen werden.

4.3.2 Shunt-Gehäuse

Für den optionalen Shunt ist ebenfalls ein Gehäuse zu entwerfen, welches das Einstecken in die Strommessbuchsen I_{in} und I_{out} ermöglicht. Zudem müssen zwei Sicherheits-Laborbuchsen in ihm Platz finden, an denen der Spannungsfall über den Shunt gemessen werden kann. Der Kühlkörper des Shunts muss außerhalb des Gehäuses liegen, um Wärmeenergie an die Umgebung abführen zu können.

Die nachstehende Abbildung 4-39 zeigt das CAD-Modell des Shunt-Gehäuses sowie den Kühlkörper. Zudem sind die einzelnen Verwendungen der Öffnungen beschriftet.

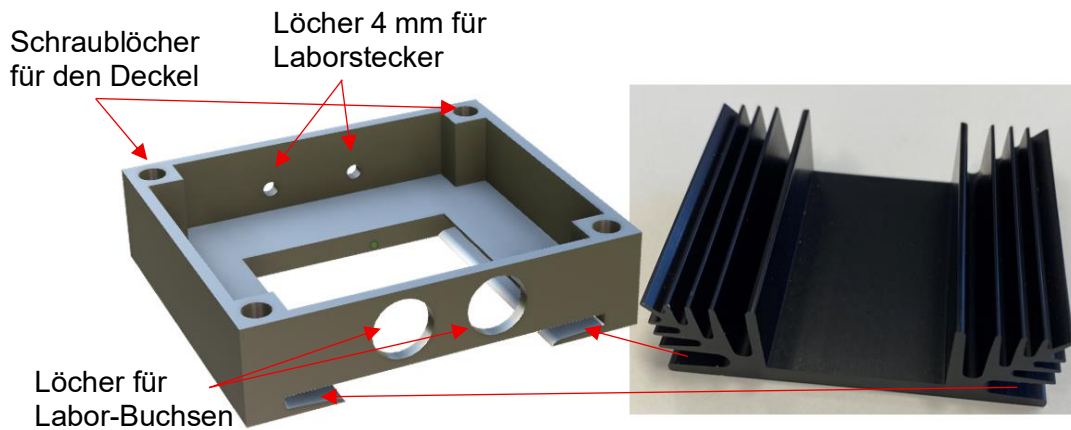


Abbildung 4-39: Gerendertes CAD-Modell des Shuntgehäuses (links); Foto des Kühlkörpers (rechts)

Wie in der Abbildung 4-39 zu erkennen, wird der Kühlkörper in das Shuntgehäuse eingeschoben. Der Shunt wird auf dem Kühlkörper verschraubt und mit den Laborsteckern sowie mit den Buchsen verbunden. Der Deckel schließt das Gehäuse ab.

Der Deckel wird mit 4 Senkkopfschrauben im Gehäusedeckel verschraubt. Dazu werden erneut M4x8,1-Einschmelzgewinde verwendet. Das Befestigungsmaterial ist in der Stückliste Shunt (Anhang H) aufgeführt. Einige Materialien für den Shunt sind bereits in den Stücklisten des Energiefahrrades enthalten. Diese Materialien sind kenntlich gemacht.

Der Deckel des Shuntgehäuses sieht wie folgt aus:

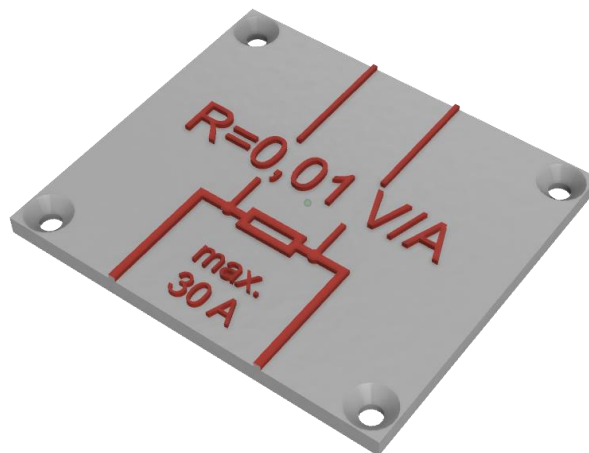


Abbildung 4-40: Gerendertes CAD-Modell des Deckels für das Shunt-Gehäuse

Wie in Abbildung 4-40 zu erkennen, ist die Beschriftung des Deckels erhaben also extrudiert. Der Deckel ist 4 mm stark. Ist ein mehrfarbiger Druck erwünscht, so ist für den Höhenbereich 4-5 mm die Farbe bzw. das Filament zu wechseln. Der maximale Strom von $I_{out} = 30\text{ A}$ über den Laborsteckern ist auf dem Gehäuse notiert. Zudem wurde interne Schaltung angedeutet und der Widerstandswert in der Einheit V/A aufgedruckt.

Die CAD-Dateien sind im Anhang H aufgeführt und können dem Inhalt des USB-Sticks als 3MF-Datei entnommen werden.

5 Praktische Umsetzung des Energiefahrrades (Nachbaukonzept)

Dieses Kapitel dient als Leitfaden für einen Nachbau. Schulen, die an einem Nachbau interessiert sind, sollen auf Basis dieses Kapitels in der Lage sein, ein Energiefahrrad herzustellen. Die Herstellung unterteilt sich in einen mechanischen und elektrotechnischen Teil sowie die Verbindung aller Teile. Die Fertigung des optionalen Strommesswiderstands ist in einem weiteren Unterkapitel gezeigt.

Um die Praktikabilität des Kapitels zu erhöhen, ist dieses Kapitel in Form von Handlungsanweisungen geschrieben.

5.1 Mechanische Umsetzung

Für den Bau des Energiefahrrades empfiehlt es sich zunächst, alle benötigten Materialien zusammenzustellen. Beschaffen Sie sich dazu alle in der Stückliste Mechanik (Anhang D) aufgelisteten Komponenten in der dort angegebenen Anzahl.

Drucken Sie zusätzlich zwei Abstandshalter mit dem 3D-Drucker. Die dafür benötigte CAD-Datei kann unter www.uos.de/fb6/physik/physikdidaktik heruntergeladen werden. Die alte URL lautet <https://www.physikdidaktik.uos.de/materialien/elektrizitaetslehre.html>. Die Datei ist unter den Namen „Abstandshalter.3mf“ zu finden. In den Einstellungen des 3D-Druckers sollten ein Infill von mindestens 20% eingestellt werden. Um die Festigkeit der Abstandshalter zu erhöhen, empfiehlt es sich, die Perimeter (Anzahl der äußeren Hülle) auf 3 oder 4 einzustellen.

Für die mechanische Konstruktion benötigen Sie noch folgende Werkzeuge:

- 1x 10,5 mm HSS-Bohrer
- 1x 8,5 mm HSS-Bohrer
- 1x Akkubohrschrauber oder Bohrmaschine
- 1x Metallbügelsäge
- 1x Schutzbrille
- 1x Feile
- 2x 17 mm Maulschlüssel
- 1x 13 mm Maulschlüssel
- 1x 10 mm Maulschlüssel
- 1x 5 mm Innensechskant (Inbus)
- Permanentmarker

- Maßband oder Zollstock

Sofern Sie alle Materialien (Pos. 1-10 und 45) sowie Werkzeuge bereitgelegt haben, können Sie den Fahrradrollentrainer (Pos. 1) entsprechend der beigelegten Anleitung zusammenbauen.

Demontieren Sie nun die Bremsrolle und die Spannvorrichtung mithilfe des 5 mm Innensechskants und des 10 mm Maulschlüssels vom blauen U-Stahl. Schrauben Sie auch die Spannschraube aus der angeschweißten Mutter heraus. Der Rollentrainer sieht nun wie folgt aus:



Abbildung 5-1: Rollentrainer mit demontierter Bremsrolle und demontierter Spannvorrichtung

Die Bremsrolle, Spannvorrichtung und Schrauben können zur Seite gelegt werden. Diese können später nicht mehr verwendet werden.

Bohren sie das in Abbildung 5-1 gekennzeichnete Loch auf 10,5 mm auf. Verwenden Sie hierzu einen 10,5 mm High-Speed Steel (HSS) Bohrer. Bohren Sie mit einer Drehzahl zwischen 500 und 700 U/min und setzen sie eine Schutzbrille auf.

Entfernen Sie nun mit einer Feile den Grat (scharfkantige Metallreste) vom Bohrloch. Sie können auch einen Kegel-Senker oder größeren Bohrer verwenden, um den Grat von außen zu entfernen.

Nehmen Sie nun die M10-Gewindestange (Pos. 2) zur Hand und markieren mithilfe des Messwerkzeugs eine Länge von 45 cm.

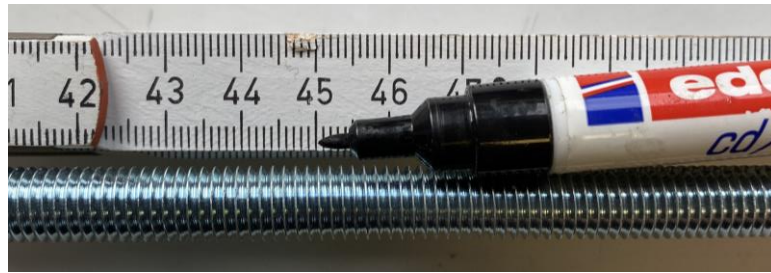


Abbildung 5-2: Ablängen der Gewindestange

Sägen Sie nun mit einer Bügelsäge das 45 cm lange Stück von der Gewindestange ab.

Praxistipp: Drehen Sie vor und hinter der Markierung jeweils zwei Muttern auf die Gewindestange und lassen zwischen den mittleren Muttern einen Spalt, der in etwa so breit ist wie das Sägeblatt. Verspannen Sie die Muttern rechts und links vom Spalt, so dass sie fest sind. Sägen Sie nun durch den Spalt in der Mitte. Der Schnitt wird dadurch gerade und das Gewinde wird weniger beschädigt.

Entgraten Sie, nachdem Sie die Gewindestange gekürzt haben, das gesägte Ende. Führen Sie die 45 cm lange Gewindestange durch **eines** der zuvor aufgebohrten Löcher. Montieren Sie nun in der Reihenfolge:

- Unterlegscheibe (Pos. 4)
- Mutter (Pos. 3)
- Mutter (Pos. 3)
- Unterlegscheibe (Pos. 4)

auf die Gewindestange und schieben die Gewindestange durch das **zweite** Loch. Es sollte nun wie in Abbildung 5-3 aussehen.



Abbildung 5-3: Einführen der Gewindestange in den U-Stahl

Drehen Sie die Gewindestange so weit auf die Muttern, dass sie mittig im U-Stahl sitzt. Der Rollentrainer sollte an beiden Seiten ca. 4-5 cm über den Enden der Gewindestange hinausragen, vgl. Abbildung 5-4.

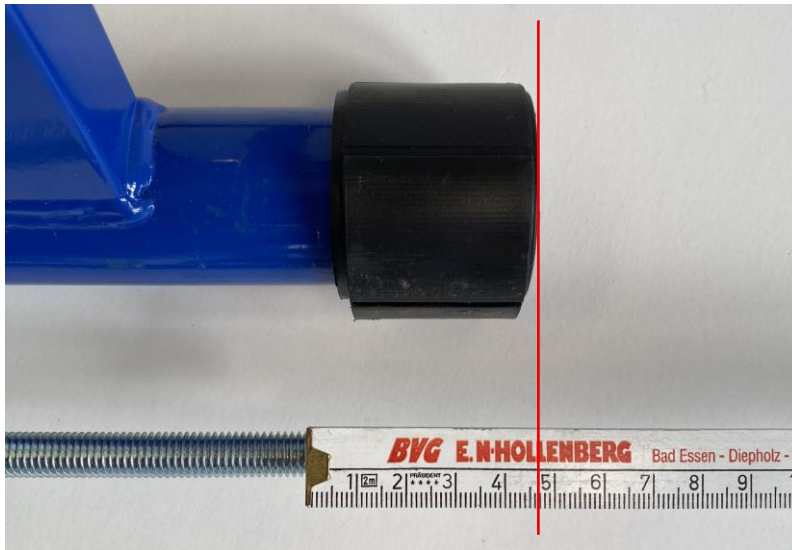


Abbildung 5-4: Zentrierung der Gewindestange am Rollentrainer

Drehen Sie nun die beiden Muttern im U-Stahl gegen das Profil, so dass Sie die Gewindestange nicht mehr parallel verschieben können. Es genügt, die Muttern handfest zu drehen. Schieben Sie auf die Enden der Gewindestange jeweils eine weitere Unterlegscheibe (Pos. 4). Drehen Sie anschließend zwei Muttern bis an das U-Stück heran, vgl. Abbildung 5-5

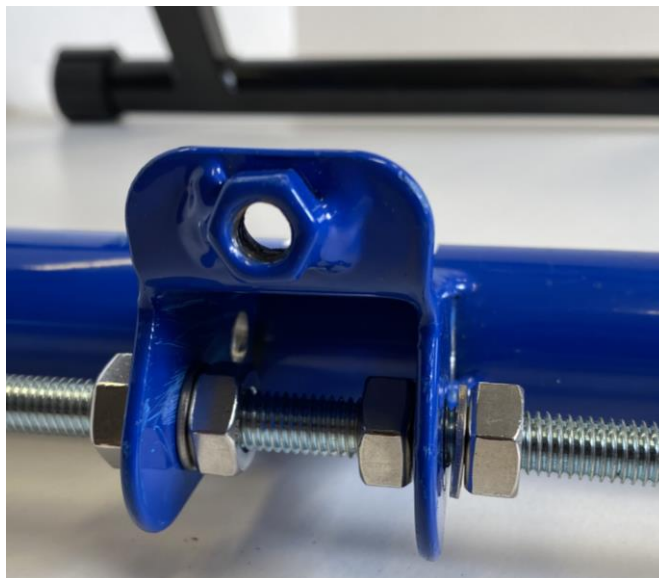


Abbildung 5-5: Befestigung der Gewindestange am Rollentrainer

Prüfen Sie erneut, ob die Gewindestange korrekt am Rollentrainer zentriert ist, vgl. Abbildung 5-4. Nehmen Sie nun zwei 17 mm Maulschlüssel zur Hand und kontern (verspannen) die Muttern gegeneinander, vgl. Abbildung 5-6.



Abbildung 5-6: Verspannen der Muttern am U-Stahl

Drehen Sie nun eine weitere Mutter (Pos. 3) auf die Seite der Gewindestange, auf der Sie die Lichtmaschine montieren wollen. Bei der Montage der Lichtmaschine ist die Drehrichtung zu beachten!

Sie erkennen die Drehrichtung der Lichtmaschine häufig an einem Pfeil auf dem antriebsseitigen Lagerschild. Ist kein Pfeil auf dem Lagerschild zu erkennen, kann die Drehrichtung anhand des Lüfterrades erkannt werden, vgl. Abbildung 5-7

Ungeklärtes Copyright, vgl. Quelle in der Bildbeschreibung

Abbildung 5-7: Erkennen der Drehrichtung von Kfz-Lichtmaschinen anhand des Lüfterrades; Beispiel Rechtslauf (links); Beide Drehrichtungen (Mitte); Umkehrlüfter für Rechtslauf (rechts); entnommen aus [42, S. 22]

Da die Drehrichtung der Lichtmaschine ausschließlich von der Durchlüftung abhängt, gibt es auch Lichtmaschinen, die für beide Drehrichtung zugelassen sind, vgl. Abbildung 5-7 Mitte. Bei manchen Lichtmaschinenherstellern kann die Drehrichtung auch auf dem Typenschild

entnommen werden [42, S. 19]. Es ist dann häufig ein R oder L am Ende der Typennummer zu erkennen. Die Drehrichtung ist immer mit Blick auf die Antriebswelle angegeben.

Nachdem Sie die Montageseite der Lichtmaschine identifiziert haben, drehen Sie die Mutter (Pos. 3) und Unterlegscheibe (Pos. 4) auf die entsprechende Seite. Anschließend schieben Sie die Lichtmaschine mit ihrer Schwenkarmkonstruktion auf die Gewindestange und sichern diese mit einer weiteren Unterlegscheibe sowie einer Mutter, vgl. Abbildung 5-8.

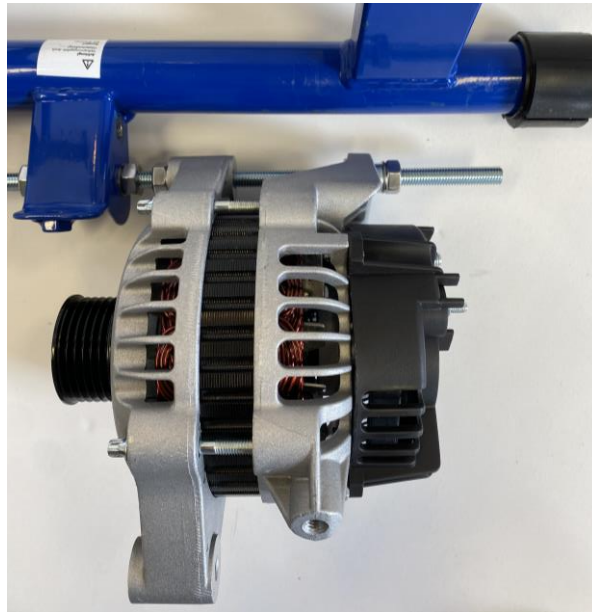


Abbildung 5-8: Montage der Lichtmaschine auf der Gewindestange

Drehen Sie die Muttern an der Lichtmaschine nicht fest, um sie parallel verschieben zu können. So kann die Lichtmaschine später am Fahrrad ausgerichtet werden.

Entnehmen Sie nun die Gummifüße vom blauen Teil des Rollentrainers und schieben auf beiden Seiten die 3D-gedruckten Abstandshalter auf das Rohr, vgl. Abbildung 5-9.



Abbildung 5-9: Montage der Abstandshalter

Stecken Sie die Füße wieder auf den Rollentrainer und montieren Sie die M8-Rungmutter (Pos. 5) an der Lichtmaschine. Dazu schrauben Sie eine M8x40-Schraube (Pos. 6) durch den

Befestigungspunkt der Spannvorrichtung und drehen die Ringmutter, wie in Abbildung 5-10 gezeigt, auf die Schraube.

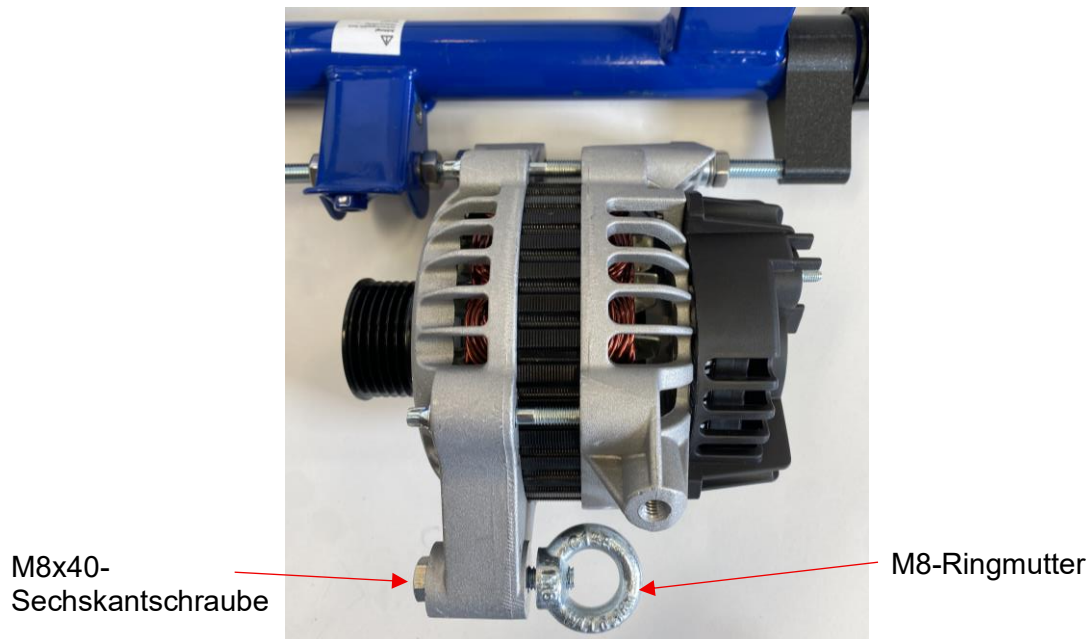


Abbildung 5-10: Montage der Ringmutter an der Lichtmaschine

Achten Sie bei der Montage der Ringmutter darauf, diese **nicht** vollständig auf die Schraube zu drehen, um etwas Flexibilität in der Spannvorrichtung zu erhalten.

Um einen Anschlagspunkt für die Spannvorrichtung zu schaffen, wird eine zweite Ringmutter auf der Seite der Lichtmaschine an den Holm geschraubt. Dazu muss zunächst ein 8,5 mm Loch, wie in Abbildung 5-11 ersichtlich in den Rollentrainer gebohrt werden.



Abbildung 5-11: Bohrloch für Ringmutter im Holm des Rollentrainers

Zeichnen Sie zunächst das Bohrloch, wie in Abbildung 5-11 gezeigt, an. Das Bohrloch sitzt mittig im Holm bzw. 25 mm von dessen Außenkante. Die Mitte des Lochs sitzt 10 mm unterhalb der Schweißnaht.

Praxistipp: Damit der Bohrer beim Ansetzen nicht wegläuft, macht es Sinn, mit einen Körner oder einem alten Kreuzschraubendreher anzukörnen. Dazu den Schraubendreher auf die markierte Stelle legen und mit einem Hammer auf den Schraubendreher schlagen.

Bohren Sie nun mit einem 8,5 mm-HSS-Bohrer das Loch in den Holm. Setzen Sie dabei eine Schutzbrille auf und achten Sie darauf, im rechten Winkel zum Holm zu bohren. Bohren Sie mit einer Drehzahl zwischen 500 und 800 U/min.

Nachdem Sie das Loch gebohrt haben, entgraten Sie das Bohrloch. Stecken Sie nun eine M8x40-Sechskantschraube (Pos. 6) mit Unterlegscheibe (Pos. 7) von unten durch das Loch und drehen Sie die M8-Ringmutter (Pos. 5) auf die Schraube.



Abbildung 5-12: Befestigung der Ringmutter am Holm des Rollentrainers

Ziehen Sie nun die Schraube mit einem 13 mm-Maulschlüssel fest. Damit sich die Ringmutter nicht mitdreht, kann diese wie in Abbildung 5-12 gezeigt festgehalten werden. Zum Festhalten der Ringmutter eignet sich ein Inbus oder Schraubendreher. Drehen Sie die Schraube nicht zu fest, um den Holm nicht zu sehr einzudrücken.

Zwischen den Ringmuttern wird nun der Seilspanner (Pos. 9) montiert. Verbinden Sie dazu die Ösen des Seilspanners und der Lichtmaschine mit einem Karabinerhaken (Pos. 8). Der Haken des Seilspanners wird an der Öse des Holms eingehängt, vgl. Abbildung 5-13.



Abbildung 5-13: Fertige mechanische Konstruktion des Energiefahrrades

Kleben Sie nun zwei Warnzeichen (Pos. 10) auf die blauen Holme, wie in Abbildung 5-13 gezeigt.

5.2 Wechsel der Laufrolle

Sollten Sie eine Lichtmaschine mit einer Keilrippenriemenscheibe besitzen, können Sie diese Riemenscheibe als Laufrolle verwenden, indem Sie fünf 45x5-mm-O-Ringe auf die Riemenscheibe montieren, vgl. Kapitel 4.1.3.

Möchten Sie auf einen hohen Verschleiß an den O-Ringen und am Hinterrad verzichten, empfiehlt es sich, eine 3D-gedruckte Laufrolle zu montieren. Sollten Sie eine Lichtmaschine mit Keilriemenscheibe verwenden, müssen Sie eine 3D-gedruckte Laufrolle nehmen.

Um herauszufinden, welche Variante der 3D-gedruckten Laufrolle Sie benötigen, muss zunächst die Riemenscheibe demontiert werden. Dazu benötigen Sie:

- Steckschlüsselsatz
- Schraubendreher

oder:

- Schlagschrauber mit Steckschlüssel

Später benötigen Sie noch einen Messschieber.

Identifizieren Sie zunächst den benötigten Steckschlüssel für die Mutter der Riemenscheibe. In der Regel hat diese eine Schlüsselweite zwischen 22 und 24 mm.

Sollten Sie Zugang zu einem Schlagschrauber haben, können Sie einfach die Laufrolle festhalten und die Mutter mit dem Schlagschrauber lösen. Sofern Sie keinen Schlagschrauber besitzen, stecken Sie einen Schraubendreher in eine Öffnung der Lichtmaschine, so dass sich diese nicht mehr drehen kann. Lösen Sie nun die Riemenscheibe mit der Knarre (Ratsche) von der Welle, vgl. Abbildung 5-14.



Abbildung 5-14: Demontage der Riemenscheibe

Bei gebrauchten Lichtmaschinen kann sich das Lösen der Riemenscheibe schwierig gestalten. Sie können Rostlöser verwenden, um die Demontage zu erleichtern.

Tipp: Sofern Sie Ihre Lichtmaschine von einem Verwerter beschaffen, können Sie diesen bitten, die Riemenscheibe zu demontieren. Fragen Sie hierbei gleich nach dem passenden Stecker für den Vorerregerkreis, sofern die Lichtmaschine einen Stecker hat.

Messen Sie nun den Wellendurchmesser der Lichtmaschine mit einem Messschieber, vgl. Abbildung 5-15. In der Regel haben Lichtmaschinen einen Wellendurchmesser zwischen 15 und 17 mm.

Nachdem Sie den Wellendurchmesser identifiziert haben, können Sie die passende Lichtmaschine für den 3D-Druck auswählen. Es stehen CAD-Dateien für die Wellendurchmesser 17, 16, 18 mm und 3/8-Zoll zur Verfügung. Die Datei kann unter www.uos.de/fb6/physik/physikdidaktik heruntergeladen werden. Die alte URL lautet <https://www.physikdidaktik.uos.de/materialien/elektrizitaetslehre.html>.

Prüfen Sie auch, ob Sie eine Distanzhülse benötigen. Sie benötigen eine Distanzhülse, wenn die Riemenscheibe auf der Seite des Lagerschildes eine Erhöhung hat. Die in Abbildung 5-15 gezeigte Riemenscheibe zeigt, dass für diese Lichtmaschine eine Distanzhülse benötigt wird, für die empfohlenene Bosch-0-986-041-820-Lichtmaschine (Pos. 11) ist keine Distanzhülse notwendig.

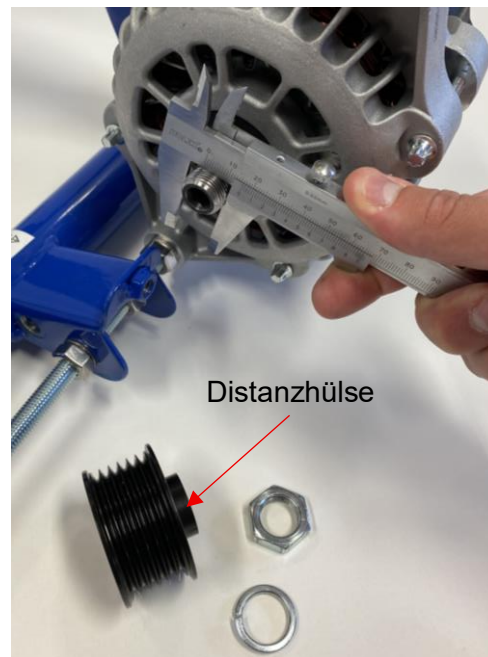


Abbildung 5-15: Messen des Wellendurchmessers

Sie können die Distanzhülse ebenfalls für alle Durchmesser unter dem oben genannten Link herunterladen.

Achten Sie beim 3D-Druck darauf, die Distanzhülse mit 100% Infill zu drucken. Die untersten 7 mm der Laufrolle sollten ebenfalls mit 100% Infill gedruckt werden. Dies hat den Grund, dass die Verschraubung einen großen Anpressdruck ausübt, durch den der Kunststoff bei der Montage platzen könnte.

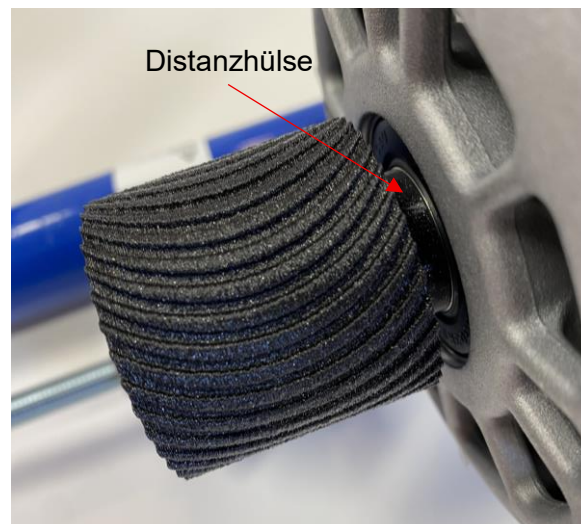


Abbildung 5-16: Montierte 3D-gedruckte Laufrolle

Montieren Sie die Laufrolle mit der serienmäßigen Mutter und Sicherungsscheibe an die Lichtmaschine, vgl. Abbildung 5-16.

5.3 Elektrotechnische Umsetzung

Für die elektrotechnische Umsetzung benötigen Sie die Positionen 13-44 in den angegebenen Stückzahlen, vgl. Anhang F. Zudem benötigen Sie für das Gehäuse die Positionen 47-52, vgl. Anhang G. Für die Wahl der CAD des Deckel vgl. Kapitel 4.3.1.

Drucken Sie das Gehäuse, die Batterieklemme und den Deckel mit einem Infill von mindestens 20 %.

Für den Bau der Energiefahrrades benötigen Sie die folgenden Werkzeuge und Verbrauchsmaterialien:

- 7 mm Maulschlüssel
- 4 mm Innensechskant (Inbus)
- PH-2 Schraubendreher (Kreuz)
- Seitenschneider
- Abisolierzange oder Messer
- Lötkolben mit Lötzinn
- Crimpzange für isolierte Kabelschuhe (vgl. Anhang I Pos. 9)
- PH-2 Schraubendreher (Kreuz)
- Isolierband oder etwas Schrumpfschlauch

Sobald Sie alle Materialien und Werkzeuge zusammen haben, kann die Montage der Elektrobox starten. Nehmen Sie sich zunächst das Unterteil des Gehäuses zur Hand und schmelzen die sechs Einschmelzgewinde (Pos. 50) für die Deckelmontage den Kunststoff ein. Schmelzen Sie auch zwei Einschmelzgewinde für die Batterieklemme im Inneren der Box ein. Drücken sie dazu zunächst die Gewinde mit der Glatten Seite in die dafür vorgesehenen Löcher. vgl. Abbildung 5-17.

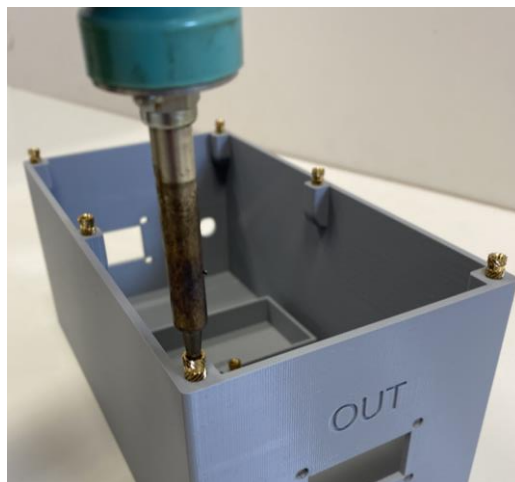


Abbildung 5-17: Einschmelzen der Einschmelzgewinde

Nachdem Sie alle Gewindeeinsätze in die Löcher gedrückt haben, nehmen Sie sich einen LötKolben zur Hand und schmelzen die Gewinde so tief ein, bis sie bündig zur Oberfläche sind. Achten Sie beim Einschmelzen darauf die Gewinde gerade einzudrücken.

Setzen Sie nun die Batterie (Pos. 15) an die dafür vorgesehene Position in der Elektrobox und drehen Sie den Kondensator (Pos. 17) in das dafür vorgesehene Gewinde.

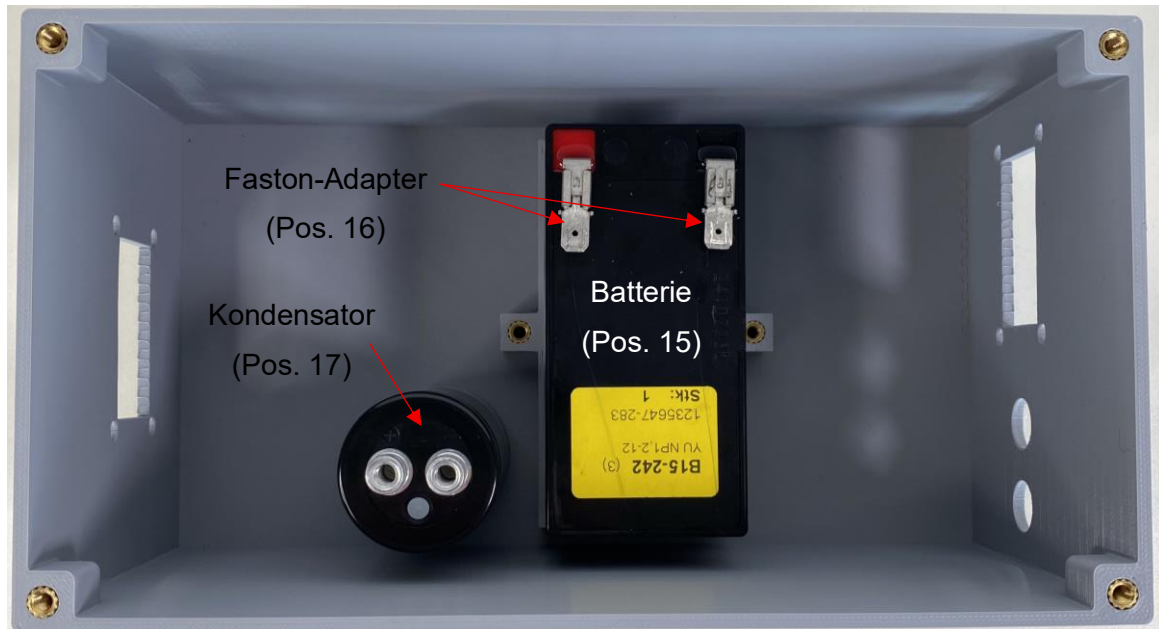


Abbildung 5-18: Elektrobox mit montierter Batterie und montiertem Kondensator

Stecken Sie die Faston-Adapter (Pos. 16) auf die Batterie und montieren Sie die Batterieklemme. Schrauben Sie die Batterieklemme mit den M4x16 Senkkopfschrauben fest.

Montieren Sie nun die Anderson-Steckdosen (Pos. 14) in die Elektrobox. Achten Sie dabei darauf, dass die In-Steckdose mit dem schwarzen Kunststoffteil nach oben und die OUT-Steckdose mit dem Anderson-Stecker nach oben montiert wird, vgl. Abbildung 5-19. Verwenden Sie für die Montage die M4x16-Senkkopfschrauben und platzieren sie auf der Innenseite Unterlegscheibe und Mutter (Pos. 51 und 52).



Abbildung 5-19: Elektrobox mit Batterie, Batterieklemme und Anderson-Steckdosen

Schrauben Sie die Anderson-Steckdosen mit dem Schraubendreher und einem 7 mm-Maulschlüssel fest. Die im Lieferumfang enthaltenen Schrauben werden nicht verwendet.

Da das Löten der Anschlüsse des Vorerregerkreises nicht in der Elektrobox möglich ist, ist es notwendig, diese entsprechend vorzubereiten. Achtung! Bei manchen Lichtmaschinen kann die Regelung durch die Dioden beeinträchtigt werden. Testen Sie daher zuvor, ob Ihre Lichtmaschine mit den Dioden (D10 und D11) im Vorerregerkreis funktioniert. Falls nicht, lassen Sie die Dioden weg. Der Wirkungsgrad des Energiefahrrades sinkt ohne die Dioden ein wenig, da die Batterie unerwünscht geladen wird. Bei Lichtmaschinen der Firma Bosch funktioniert die Regelung mit den Dioden im Vorerregerstromkreis problemlos.

Nehmen Sie sich nun die blaue (Pos. 28) und grüne (Pos. 29) Labormessbuchse zur Hand. Nehmen Sie sich auch zwei Gleichrichterdioden (Pos. 44) zur Hand. Löten Sie nun die Gleichrichterdioden, wie in Abbildung 5-20 links gezeigt, an die Messbuchsen. Achten Sie dabei auf die Polarität der Dioden.



Abbildung 5-20: Einlöten der Erregerdioden

Löten Sie an das andere Ende der Diode jeweils ein ca. 15 cm langes rotes Stück H07V-K 1 x 1.50 mm² (Pos. 43). Um mehr mechanische Stabilität zu erzielen und einen Drahtbruch zu verhindern, können Sie Schumpfschlauch oder Isolierband über die Verbindungsstelle ziehen, Abbildung 5-20 rechts.

Schrauben Sie nach dem Löten die Messbuchsen in die Elektrobox ein. Die blaue Buchse wird in das mit D+ / L / IND / 61 beschriftete Loch geschraubt. Die grüne Messbuchse wird in das andere Loch geschraubt, vgl. Abbildung 5-21.

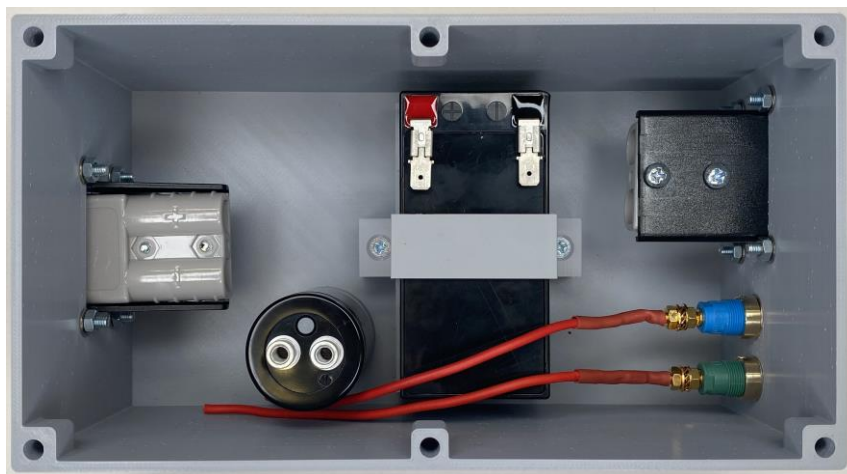


Abbildung 5-21: Elektrobox mit Batterie, Batterieklemme, Kondensator, Anderson-Steckdosen und Anschlüssen des Vorerregerstromkreises

Legen Sie das Unterteil zur Seite und nehmen Sie sich ihren 3D-gedruckten Deckel zur Hand.

Nehmen Sie sich auch:

- 3x Sicherheits-Messbuchse Rot (Pos. 28)
- 1x Sicherheits-Messbuchse schwarz (Pos. 29)
- 2x Schalter (Pos. 32)
- 1x Leuchte mit Leuchtmittel (Pos. 24, 25)

zur Hand. Setzen Sie das Leuchtmittel in die Leuchte ein und schrauben Sie diese in den Deckel. Stecken Sie die beiden Schalter in die dafür vorgesehenen Löcher und montieren Sie die Messbuchsen wie in Abbildung 5-22 gezeigt.

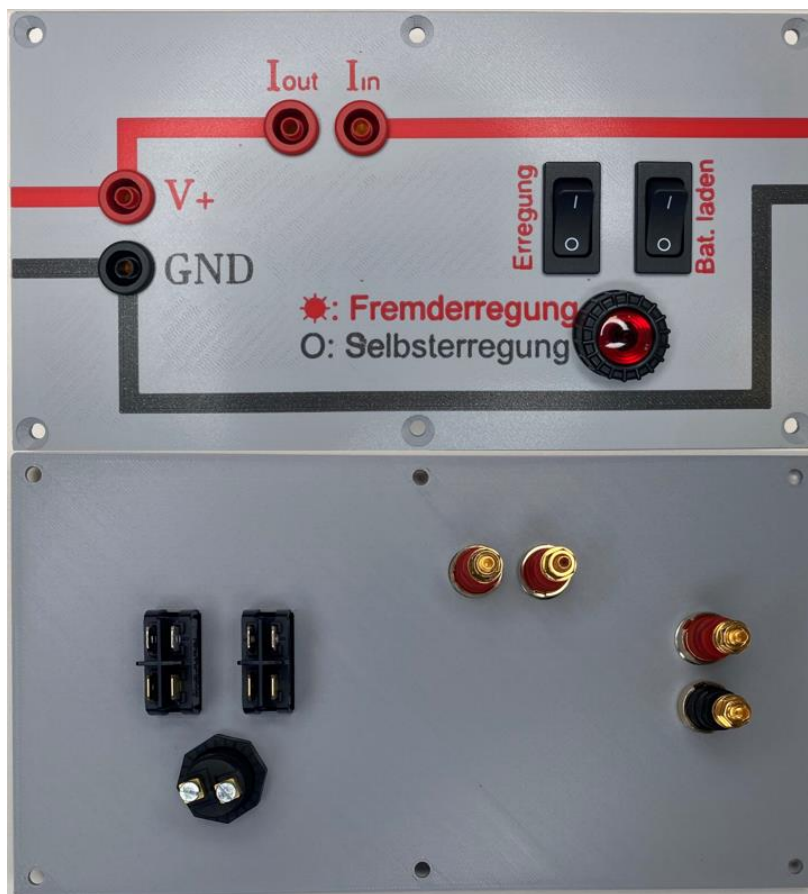


Abbildung 5-22: Deckel mit montierten Komponenten von vorne (oben) und von hinten (unten)

Nun beginnt die Verdrahtung der Elektrobox anhand des Schaltplanes bzw. einer bereitgestellten Explosionszeichnung. Bevor Sie mit dem Verdrahten beginnen, empfiehlt es sich, die nachfolgenden **Hinweise** durchzulesen. Sofern sie die Hinweise gelesen haben, verdrahten Sie die Elektrobox nach Plan oder Explosionszeichnung, vgl. Abbildung 5-27 und Abbildung 5-28.

Hinweis: Anderson Steckdose

Die Anderson-Steckdosen werden verlötet. Im Lieferumfang der Anderson-Steckdosen sind insgesamt 4 Anderson-Kabelschuhe enthalten. Die Abisolierlänge beträgt 15 mm. Falls Sie sich nicht sicher sind, wie Sie diese großen Stecker löteten, finden Sie unter <https://www.youtube.com/watch?v=6ljG6-PxNBs> ein Video, in dem gezeigt wird, wie diese Stecker zu verlöten sind. Die Lötanschlüsse sollten wie in Abbildung 5-23 aussehen.



Abbildung 5-23: Gelötete Anderson Kabelschuhe

Nachdem Sie die Kontakte gelötet haben, können Sie den Übergangsbereich der Stecker mit Isolierband oder Schrumpfschlauch überziehen, um ein schöneres Bild zu erhalten. Beim Einstecken der Anderson-Kontakte ist darauf zu achten, wie herum die Kontakte in die Stecker geschoben werden. Die nachstehende Abbildung 5-24 zeigt, wie herum Sie die Stecker einstecken müssen.



Abbildung 5-24: Montage der Anderson-Stecker, entnommen aus [67]

Beim Einschieben der Kontakte müssen sie ein leises „Klick“ hören. Achten Sie zudem auf die + und – Beschriftung. „Minus“ ist schwarz und „Plus“ ist rot.

Hinweis: Crimpkontakte

Crimpkontakte sind zuverlässige Pressverbindungen. Es ist jedoch wichtig die Pressverbindungen korrekt auszuführen. Andernfalls können Leitungen aus den Kabelschuhen herausrutschen und einen Kurzschluss verursachen. Nehmen Sie zum Pressen

der Kabelschuhe daher immer eine Professionelle Crimpzange. Sollten Sie über keine Presszange verfügen, ist im Anhang I eine kostengünstige Variante gezeigt.

Bei Kabelschuhen ist es wichtig, die richtige Kabelschuhgröße für den entsprechenden Leiterquerschnitt zu verwenden. Für einen 1,5 mm²-Leiterquerschnitt verwenden Sie die roten Kabelschuhe. Für den 2,5 mm²-Leiterquerschnitt verwenden Sie die blauen Kabelschuhe. 6 mm²-Einzelader wird mit gelben Kabelschuhen kontaktiert.

Vor dem Verpressen längen Sie die Leitungen so lang ab, bis das Kupfer vorne aus dem Kabelschuh herausschaut. Manche Kabelschuhe haben dafür sogar einen kleinen Anschlag. Haben die Kabelschuhe keinen Anschlag, sollte das Kupfer 1-2 mm aus dem Kabelschuh herausschauen. Auf der isolierten Seite des Kabelschuhs darf kein Kupfer herausstehen, vgl. Abbildung 5-25.



Abbildung 5-25: Crimpen von isolierten Kabelschuhen

Verwenden Sie beim Pressen unbedingt die richtige Pressbacke. Die gelbe Pressbacke darf nur für gelbe Kabelschuhe verwendet werden, da diese für den entsprechenden Querschnitt zugelassen sind. Das Gleiche gilt für Blau und Rot. Pressen Sie pro Kabelschuh nur einmal.

Nach dem Verpressen sollten Sie am Kabelschuh ziehen, um die Festigkeit der Verbindung zu überprüfen.

Hinweis: Anschluss des Kondensators

Achten Sie unbedingt darauf, + und – am Kondensator nicht zu vertauschen. Dies würde die Zerstörung des Kondensators zur Folge haben. Der Plus-Kontakt ist mit einem kleinen Plus-Symbol gekennzeichnet. Schrauben Sie die Kontakte des Kondensators mit den dafür vorgesehenen Schrauben fest und verwenden Sie unbedingt Unterlegscheibe und Federring,

vgl. Abbildung 4-28. Die Schrauben des Kondensators haben ein Anzugsmoment von 2 Nm. Verwenden Sie nur den passenden, gelben M5-Kabelschuh.

Hinweis: Anschluss der Leuchte

Die Leuchte ist das einzige Bauteil, welches über Schraubkontakte verfügt. Damit die Adern der Leitung nicht zerquetscht werden, sollte eine 1,5 mm²-Aderendhülse auf die Leitung gepresst werden. Alternativ können Sie das Leitungsende mit etwas Lötzinn überziehen. Vergessen Sie nicht, das Leuchtmittel einzusetzen. Die Polarität der Leuchte ist egal.

Hinweis: Anschluss der Federzug-Klemmen (Wago-Klemmen)

Beachten Sie beim Anschluss der Federzugklemmen die Abisolierlänge. Die großen 6 mm² Klemmen haben eine Abisolierlänge von 13 mm. Die kleine Klemme hat eine Abisolierlänge von 11 mm. Die Abisolierlänge ist auf den Klemmen aufgedruckt. Die Leitungen benötigen keine Aderendhülsen und kein Lötzinn.

Hinweis: Anschluss der Sicherheitsmessbuchsen.

Die 4 mm-Labor-Sicherheitsmessbuchsen sind sowohl für den Lot- als auch für den Schraubanschluss zugelassen. Es empfiehlt sich jedoch bei allen Anschlüssen des Betriebsstromkreises der Schraubanschluss. Dieser vereinfacht die Verbindung von Deckel und Unterteil und ermöglicht den Doppelanschluss. Verwenden Sie zum Schraubanschluss nur die empfohlenen gelben M4-Kabelschuhe.

Hinweis: Anschluss der Schutzdiode

Sie können die Schutzdiode bedrahten, indem Sie eine rote Leitung an die Kathode (weißer Ring) und eine schwarze an die Anode löten. Anschließend machen Sie einen Schrumpfschlauch oder etwas Isolierband um die Lötstellen um die mechanische Festigkeit zu erhöhen. Dieser Anschluss ist im Schaltplan und in der Explosionszeichnung gezeigt.

Alternativ können Sie auch die Diode über die beiden Spannungsmessbuchsen (von außen) kontaktieren. Beschaffen Sie sich dazu das Zubehör Anhang I, Pos. 7. Die Leybold-Klemmstecker ermöglichen das einfache Einstecken der Diode. Die Messbuschen können zur Spannungsmessung weiterverwendet werden.



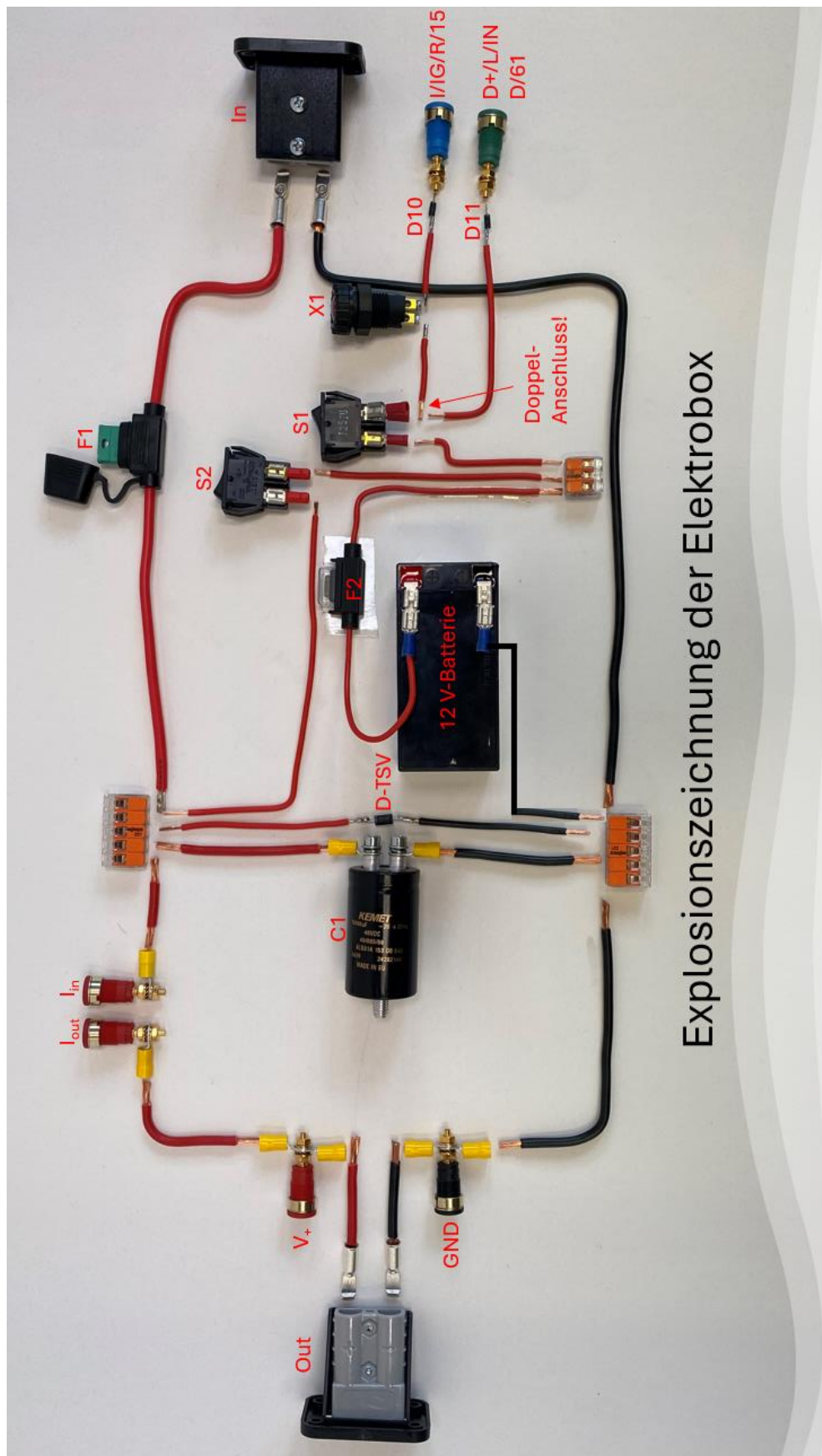
Abbildung 5-26: Anschlussmöglichkeiten der TVS-Schutzdiode; Bedrahtete Diode mit Schrumpfschlauch (links); Schutzdiode (Mitte); Schutzdiode in zwei Leybold-Klemmsteckern (rechts)

Die Abbildung 5-26 zeigt die Anschlussmöglichkeiten in einem gemeinsamen Bild. In der Explosionszeichnung ist die linke, bedrahtete Variante gezeigt.

Hinweis: Leiterquerschnitte

Schließen sie den Betriebsstromkreis ausschließlich mit 6 mm²-Einzelader an. Für die Hauptanschlüsse der Batterie verwenden Sie 2,5 mm²-Leitungen. Der Vorerregerstromkreis wird mit 1,5 mm²-Einzelader verdrahtet.

Die nachfolgende Abbildung 5-27 zeigt die Explosionszeichnung der Elektrobox.



Explosionszeichnung der Elektrobox

Abbildung 5-27: Explosionszeichnung der Elektrobox im Querformat; Achtung! Leitungslängen entsprechen nicht der Realität!

Die Abbildung 5-27 zeigt einen Vorschlag, wie alle Komponenten nach Plan verdrahtet werden können. Sie können die Verdrahtung auch anders vornehmen, solange Sie dem Plan

entspricht. Die Leitungslängen in der Explosionszeichnung sind **nicht** korrekt dargestellt. Die Leitungslängen müssen individuell an der Elektrobox bestimmt werden. Das Bild soll lediglich veranschaulichen, welche Komponenten wie zu verbinden sind. Die nachfolgende Abbildung 5-28 zeigt den Schaltplan der Elektrobox.

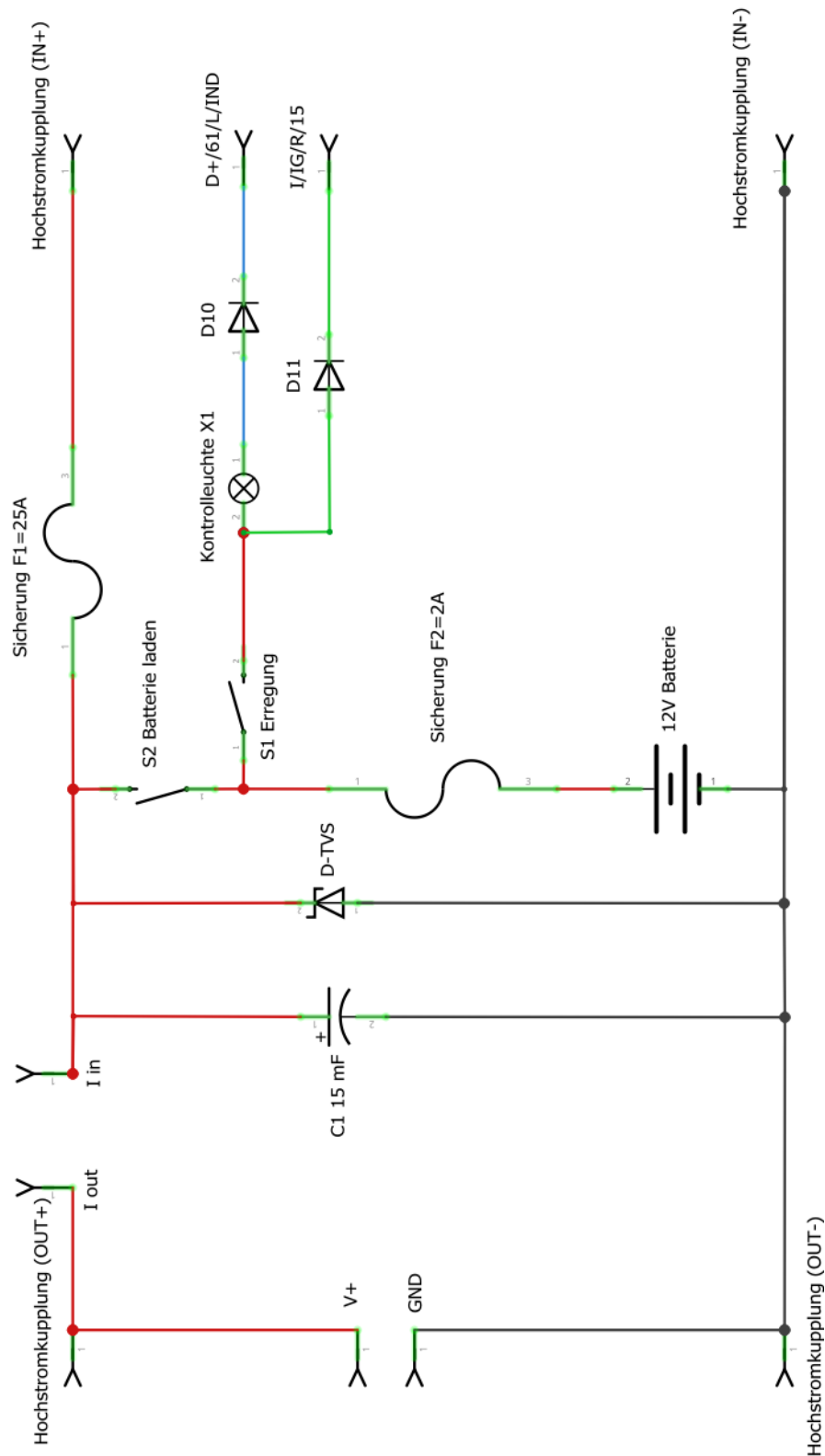


Abbildung 5-28: Schaltplan der Elektrobox im Querformat

Schrauben Sie, nachdem die Elektrobox verdrahtet worden ist, den Deckel auf das Gehäuse. Verwenden Sie dazu die M4-Senkkopfschrauben (Pos. 51). Die Elektrobox ist fertig gestellt.

5.4 Verbindung der Elektrobox mit der Lichtmaschine

Jede Lichtmaschine wird über B+ und das Gehäuse an die Elektrobox angeschlossen. Der B+ Kontakt kann bei manchen Lichtmaschinenherstellern auch als +, B, A oder 30 beschriftet sein, vgl. Tabelle 3-1. Die Masseleitung wird in der Regel an das Gehäuse geschraubt, weshalb die meisten Lichtmaschinen dafür ein Schraubloch besitzen.

Nehmen Sie sich den Anderson-Stecker (Pos. 13) und schrauben die rote Leitung an den B+ Kontakt. Dieser ist i.d.R. als Gewindestift ausgeführt. Suchen Sie sich ein geeignetes Schraubloch am Gehäuse der Lichtmaschine und schrauben den Massekontakt an das Gehäuse. Bei der empfohlenen Bosch-0-986-041-820-Lichtmaschine (Pos. 11) und der untersuchten Bosch-0123-120-001 ist eine M8-Verschraubung an der Oberseite hierfür gut geeignet, vgl. Abbildung 5-29.

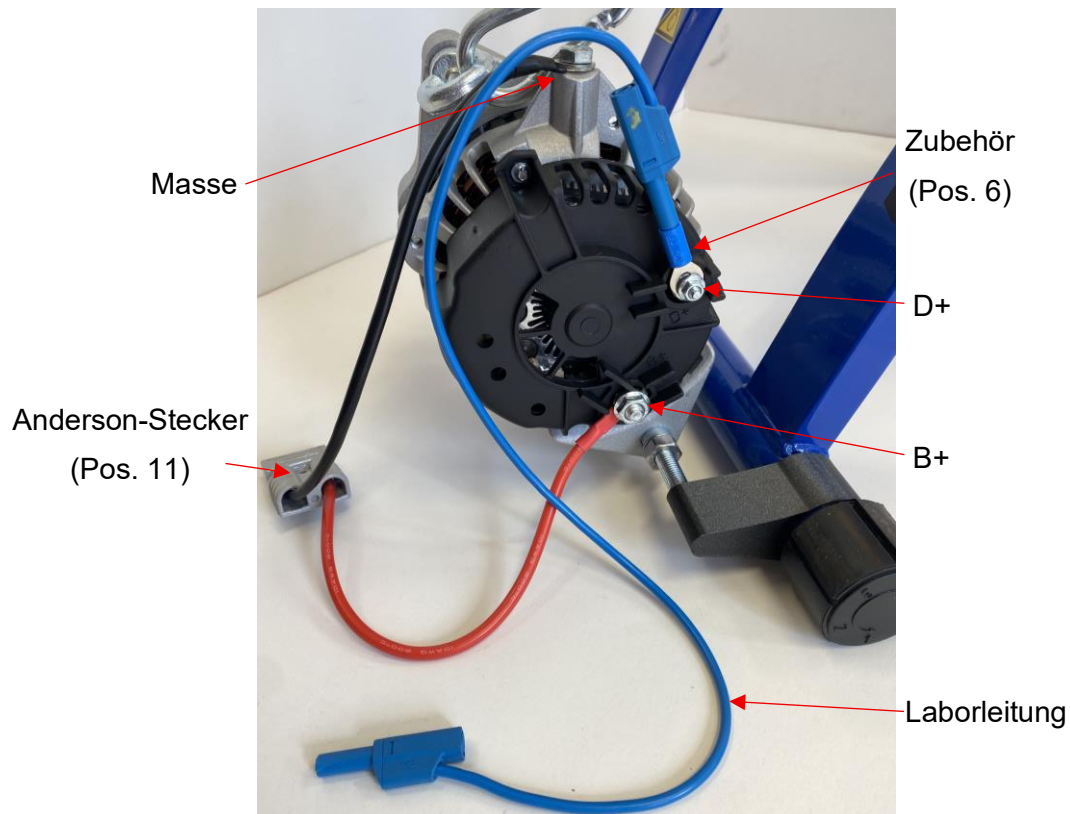


Abbildung 5-29: Anschlüsse an der Lichtmaschine herstellen

Wie in Abbildung 5-29 bereits zu erkennen, gibt es einen weiteren Anschluss, der für Lichtmaschinen wichtig ist. Der Kontakt D+ dient der Vorerregung im Stillstand und muss mit der blauen Buchse der Elektrobox verbunden werden. Der Kontakt kann auch mit L, IND oder 61 beschriftet sein, vgl. Tabelle 3-1. Die empfohlene Bosch-Lichtmaschine in Abbildung 5-29 verfügt über einen M6-Schraubanschluss. Mit einem Kabelschuh-Adapter (Zubehör, Pos. 6)

können Sie diesen kontaktieren. Mit einer Laborleitung können Sie Elektrobox und D+ Kontakt verbinden.

Sollten Sie eine Lichtmaschine mit speziellem KFZ-Stecker haben, empfiehlt es sich, diesen beim Verwerter zu beschaffen. An den Stecker können dann Leitungen angelötet werden, die wiederum mit der Elektrobox verbunden werden können. Alternativ können Sie versuchen, den D+ Kontakt mit Laborleitung und Krokodilklemme zu verbinden.

Sollte Ihre Lichtmaschine einen Kontakt, beschriftet mit I, IG, R oder 15 besitzen, verbinden Sie diesen mit dem gleichnamigen Kontakt an der Elektrobox (grüne Buchse).

Alle anderen Kontakte wie die Klemme W oder DMF können ignoriert werden. Diese Klemmen dienen der Drehzahlerkennung bzw. dem Anschluss des Steuergerätes im KFZ.

Stecken Sie den Anderson-Stecker in die „In“-Steckdose der Elektrobox und verbinden Sie die D+ Kontakte miteinander. Ihr Energiefahrrad ist fertig.

5.5 Anschluss des Wechselrichters

Um den Wechselrichter (Pos. 12) anzuschließen, benötigen Sie lediglich den Wechselrichter selbst und den 2. Anderson-Hochstromstecker mit Ring-Kabelschuhen (Pos. 13). Im Lieferumfang des Wechselrichters sind neben Krokodilklemmen und vier Unterlegscheiben auch zwei Rändelmuttern vorhanden. Schrauben Sie den Anderson-Stecker mit den Ring-Kabelschuhen und den Rändelmuttern an den DC-Eingang des Wechselrichters. Schrauben Sie die rote Leitung an Plus und die Schwarze an Minus. Legen Sie zwischen Wechselrichter und Kabelschuh und zwischen Kabelschuh und Rändelmutter jeweils eine Unterlegscheibe, um einen guten Kontakt zu erzielen. Die nachstehende Abbildung 5-30 veranschaulicht den Anschluss.



Abbildung 5-30: Anschluss des Wechselrichters

Sie können nun den Wechselrichter über den Anderson-Stecker an die Out-Steckdose der Elektrobox anschließen und Haushaltsgeräte mit Netzspannung bis 300 W betreiben.

5.6 Umsetzung des Strommesswiderstands

Wenn Sie sich für die Fertigung eines Strommesswiderstandes entschieden haben, benötigen Sie die Komponenten Pos.1-13 aus der Stückliste Shunt (Anhang H). Sofern Sie zuvor das Energiefahrrad gefertigt haben, sollten Sie bereits im Besitz der Pos. 8-11 sein. Die CAD-Dateien für den 3D-Druck können Sie über die bereits bekannten Links auf der Website der Universität Osnabrück abrufen. Neben den erwähnten Materialien benötigen Sie folgende Werkzeuge:

- Anreißnadel
- Körner
- 3,5 mm HSS-Bohrer
- Lötkolben mit Lötzinn
- PH2-Schraubendreher (Kreuz)
- Spitzzange und oder Maulschlüssel mit 5,5 mm Schlüsselweite

Nehmen Sie sich zunächst den Kühlkörper (Pos. 3) zur Hand. Markieren Sie die Stelle für das Bohrloch entsprechend Abbildung 5-31.

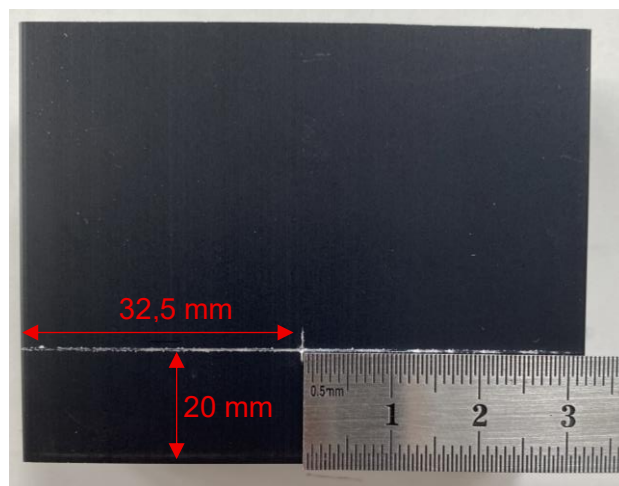


Abbildung 5-31: Markierung des Bohrlochs am Kühlkörper

Das Bohrloch wird 207 mm von der langen Seite aus gemessen und 32,5 mm (mittig) von der kurzen Seite aus gemessen markiert. Um das Bohrloch auf dem eloxierten Aluminium markieren zu können, empfiehlt es sich, eine Anreißnadel zu verwenden. Sofern keine Anreißnadel vorhanden ist, kann auch ein alter Schraubendreher am Schleifstein angespitzt werden und als Anreißnadel fungieren.

Können Sie nun die markierte Stelle für das Bohrloch an. Setzen Sie dazu einen Körner oder alten Kreuzschraubendreher auf die markierte Stelle und schlagen mit einem Hammer auf das Werkzeug.

Bohren Sie nun mit einem 3,5 mm-HSS-Bohrer das Loch in den Kühlkörper, vgl. Abbildung 5-32. Tragen Sie beim Bohren eine Schutzbrille und verwenden Sie eine Schnittgeschwindigkeit zwischen 7.000 und 10.000 U/min.

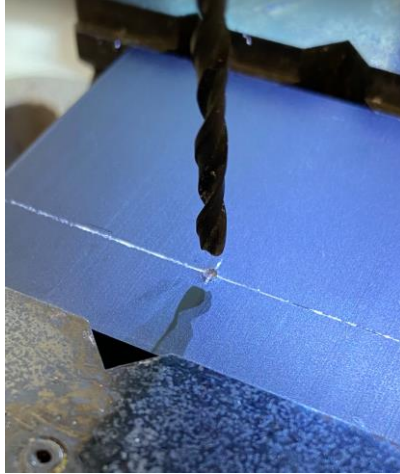


Abbildung 5-32: Bohren des Bohrlochs in den Kühlkörper

Entfernen Sie nun mit einer Feile, einem Kegelsenker oder einem größeren Bohrer den Grat (scharfkantige Materialüberstände).

Nehmen Sie sich nun das Shunt-Gehäuse (Pos. 12) sowie die zwei 4mm-Bananenstecker (Pos. 5) zur Hand. Schieben Sie den Kühlkörper mit den Kühlrippen nach außen in den dafür vorgesehenen Schlitz. Die Seite mit dem Bohrloch zeigt in Richtung der Bananenstecker, vgl. Abbildung 5-33. Sollten Sie Schwierigkeiten beim Hineinschieben des Kühlkörpers haben, können Sie diesen vorsichtig mit einem Kunststoffhammer hineintreiben. Montieren Sie auch die Bananenstecker entsprechend Abbildung 5-33.

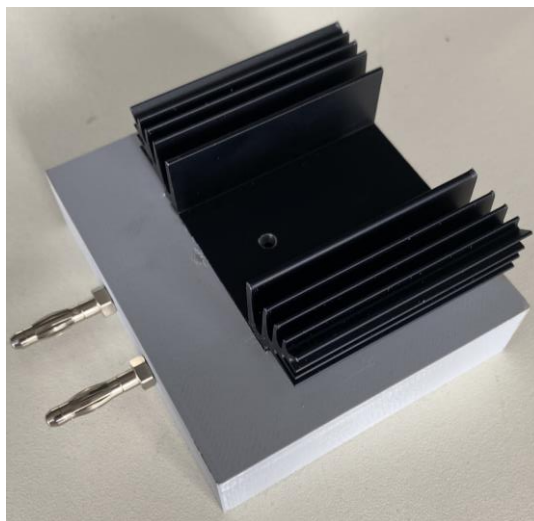


Abbildung 5-33: Montage des Kühlkörpers und der 4 mm-Bananestecker im Shuntgehäuse

Drehen Sie nun das Gehäuse um und montieren die roten 4mm Sicherheits-Messbuchsen (Pos. 1) in die dafür vorgesehenen Löcher. Schmelzen Sie auch die Einschmelzgewinde (Pos. 9) wie in Abbildung 5-34. gezeigt in das Gehäuse ein. Nutzen Sie zum Einschmelzen der Gewinde einen LötKolben und achten Sie darauf, die Gewinde gerade einzuschmelzen.

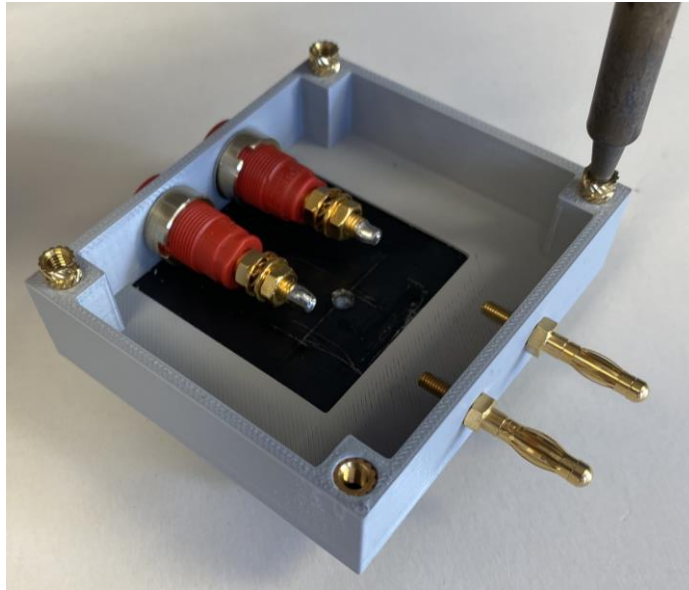


Abbildung 5-34: Montage der Sicherheitsmessbuchsen in das Shunt-Gehäuse und einschmelzen der Gewinde

Nachdem Sie das Gehäuse entsprechend vormontiert haben, legen Sie es zur Seite. Nehmen Sie sich den Messwiderstand (Shunt, Pos. 2). zur Hand. Nehmen Sie sich auch die 2,5 mm² schwarze sowie 1,5 mm² rote Einzelader zur Hand (Pos. 10, 11). Schneiden Sie zwei Stücke mit jeweils 8 cm Länge von der schwarzen Einzelader ab. Schneiden Sie auch zwei Stücke mit jeweils 6 cm Länge von der roten Einzelader ab. Isolieren Sie die Enden etwa 5-8 mm ab. Die rote Einzelader wird an beiden Seiten verzinnt. Die schwarzen Einzeladern werden an einem Ende verzinnt und an dem anderen Ende mit jeweils einem blauen M3-Ring-Kabelschuh versehen. Löten Sie nun die Einzeladern wie in Abbildung 5-35 an den Shunt.

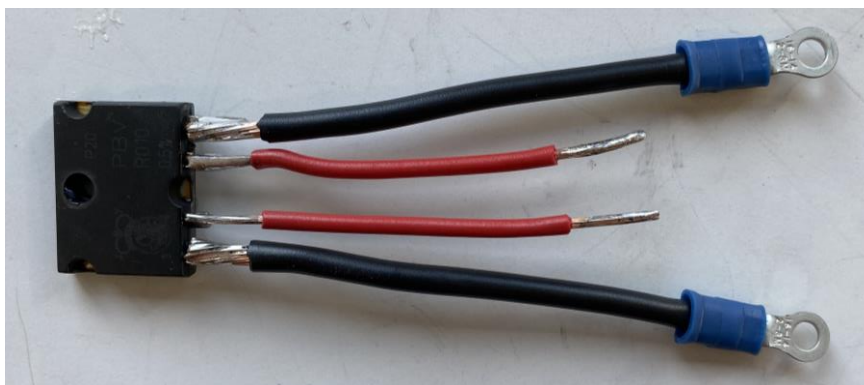


Abbildung 5-35: Löten der Einzeladern an den Shunt

Nachdem Sie den Shunt bedrahtet haben, geben Sie etwas von der Wärmeleitpaste (Pos. 4) auf die Aluminium-Rückseite des Shunts und verstreichen diese, so dass ein dünner Film

entsteht. Montieren Sie nun den Shunt mit der M3x16-Schraube und Mutter (Pos. 7) von innen an den Kühlkörper, vgl. Abbildung 5-36.

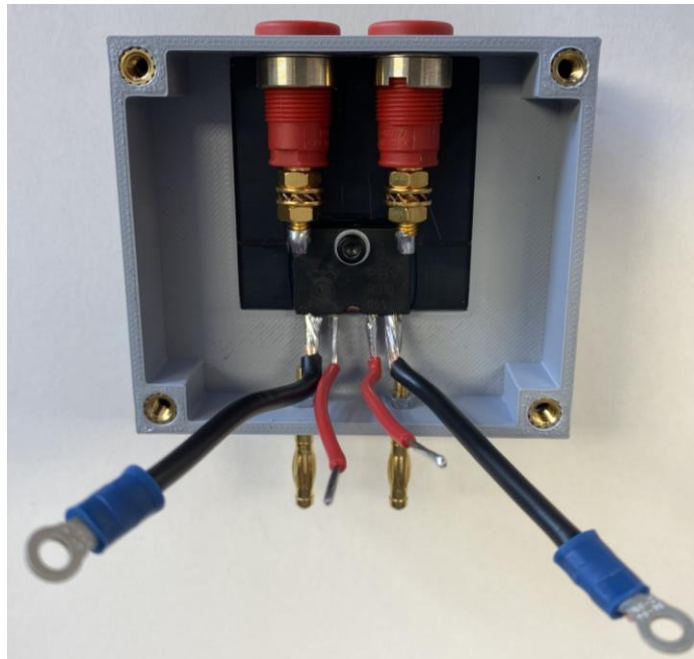


Abbildung 5-36: Montage des Shunts im Gehäuse bzw. am Kühlkörper

Schrauben Sie nun die M3-Ringkabelschuhe mit den mitgelieferten Muttern an die Bananenstecker, wie in Abbildung 5-37 gezeigt. Sollte der Platz zwischen Shunt-Anschluss und Bananenstecker nicht reichen, können Sie die Stecker etwas herausdrehen, den Kabelschuh aufschieben, die Mutter aufdrehen und den gesamten Stecker anschließend in das Gehäuse einschrauben. Achten Sie darauf, dass Stecker und Kabelschuhe fest miteinander verbunden sind.



Abbildung 5-37: Verbinden M3-Ringkabelchuhe mit den Bananensteckern

Löten Sie nun die roten Einzeladern an die Sicherheits-Laborbuchsen, vgl. Abbildung 5-38. Achten Sie dabei darauf, nicht mit dem LötKolben an das Gehäuse zu kommen, da dies sonst schmilzt und beschädigt wird. Löten Sie nicht zu lange an einer Messbuchse, da sich diese sonst erhitzt und das Gehäuse verformen könnte.



Abbildung 5-38: Löten der Einzeladern an die Sicherheits-Laborbuchsen

Schrauben Sie nun den 3D-gedruckten Deckel mit den M4-Senkkopfschrauben auf das Shunt-Gehäuse. Sie können nun den fertigen Shunt in die Strommessbuchsen der Elektrobox (I_{in} und I_{out}) stecken und den Elektronenstrom mittels Spannungsmesser bestimmen, vgl. Abbildung 5-39.



Abbildung 5-39: In die Elektrobox eingesteckter Shunt

Messen Sie an den roten Sicherheitsmessbuchsen nur Spannung (hochohmig) und stecken Sie den Shunt nur in die dafür vorgesehenen Strommessbuchsen ein. Der Shunt kann einen Dauerstrom bis zu $I_{out} = 30 \text{ A}$ messen. Pro Ampere fallen 0,01 V am Messwiderstand ab.

6 Erprobung und Analyse

In diesem Abschnitt wird das zuvor entwickelte und gefertigte Energiefahrrad auf seine grundlegende Funktion und Sicherheit sowie Stabilität überprüft. Diese Prüfungen unterteilen sich in einen mechanischen und elektrotechnischen Teil. Im elektrotechnischen Teil wird auch analysiert, ob es sich bei dem Energiefahrrad um eine berührungsgefährliche Spannung handelt oder nicht.

Weiterführend wird der Wirkungsgrad des Energiefahrrades bestimmt und ein mögliches unterrichtliches Vorgehen zu zum Thema Wirkungsgrad beschrieben. Zudem werden Schülerversuche zu den Themen:

- Energie erfahrbar machen (Was ist eine Kilowattstunde?)
- Definition der Spannung nach $U = P/I$
- Kochen von Wasser

beschrieben.

Im Anschluss wird eine Kostenanalyse durchgeführt, indem die Kosten für das Energiefahrrad berechnet und mit dem Oekotrainer verglichen werden. Abschließend wird die Nachbaubarkeit des Energiefahrrades überprüft, indem das Energiefahrrad an einer Schule von Lehrpersonal nachgebaut wird.

6.1 Funktionstests und ihre Ergebnisse

Zunächst wird die Funktion der mechanischen Konstruktion überprüft. Im weiteren Verlauf folgt die elektrische Konstruktion.

6.1.1 Mechanische Konstruktion

Einführend kann gesagt werden, dass die mechanische Konstruktion gut funktioniert. Die Konstruktion zeichnet sich durch eine besondere Robustheit bei gleichzeitiger Einfachheit aus. Durch die Abstandshalter, die die Gewindestange stützen, wird die Spannvorrichtung stabilisiert. Da die Abstandshalter nur auf dem blauen Standrohr des Rollentrainers aufgeschoben sind, kann die Konstruktion etwas schwingen. Die Möglichkeit etwas zu schwingen erlaubt minimale Unwuchten im Hinterreifen auszugleichen.

Dadurch, dass die Lichtmaschine entlang der Schwenkachse verschoben werden kann und aufgrund der Tatsache, dass das Fahrrad im Rollentrainer ebenfalls ausgerichtet werden kann, ist der Einspannvorgang einfach und geht schneller als beim Oekotrainer vonstatten.

Die Spannvorrichtung ermöglicht das präzise Einstellen des Anpressdruckes zwischen Hinterrad und Laufrolle. Im Zuge einiger Tests wurde eine Anpresskraft zwischen 35 N und 50 N als ideal identifiziert. Bei diesem Anpressdruck kommt es nicht zum Durchrutschen des

Reifens auf der Laufrolle. Getestet wurde dies bis zu einer Belastung von $P = 150 \text{ W}$. Höhere Leistungen konnten aufgrund zu großer Anstrengung nicht getestet werden. Bei einem Anpressdruck von 50 N wird die Laufrolle zudem nicht zu stark an das Hinterrad gepresst, so dass es nicht zu hohen Verlustleistungen durch Verformung des Reifens kommt. Die Tests haben auch gezeigt, dass es wichtig ist, einen ausreichenden Reifendruck zu verwenden. Je geringer der Reifendruck des Hinterrades ist, desto mehr verformt sich das Gummi des Reifens und die Verlustleistung nimmt zu.

Bei der Prüfung der unterschiedlichen Laufrollen ist festzustellen, dass es bei den Varianten 1 und 2, vgl. Tabelle 4-1 (S.50), zu enormen Gummiabrieb kommt. Bereits nach wenigen Minuten und einer elektrischen Anschlussleistung von $P = 100 \text{ W}$ zeigte sich das folgende Bild:



Abbildung 6-1: Foto vom Gummiabrieb mit gummierter Keilrippenriemenscheibe als Laufrolle

Aufgrund des hohen Abriebs ist von einer kurzen Lebensdauer der Laufrollenvarianten 1 und 2 nach Tabelle 4-1 auszugehen. Daher empfiehlt es sich, auf die 3D-gedruckte Laufrolle zurückzugreifen

Die 3D-gedruckte Laufrolle zeigte im Zuge erster Tests kaum wahrnehmbaren Gummiabrieb. Im weiteren Verlauf und nach zahlreichen Tests zeigte die 3D-gedruckte Laufrolle jedoch erste Verschleißerscheinungen, vgl. Abbildung 6-2.



Abbildung 6-2: Foto der 3D-geruckten Laufrolle nach zahlreichen Versuchen

Es scheint, als würde sich das weiche im 3D-Druck verwendete PLA (Polylactic Acid) mit der Nutzungsdauer abreiben. Nach zahlreichen Versuchen konnte ein Abrieb von etwa 1,5 mm festgestellt werden. Da dieses Problem die Funktion des Energiefahrrades nicht beeinträchtigt, wurden keine direkten Gegenmaßnahmen ergriffen. Die Lösung des Problems könnte die Verwendung eines anderen Kunststoffes im 3D-Druck sein. Auch die Anpassung oder das Weglassen des Laufrollenprofils könnte den Verschleiß der Laufrolle verringern.

Insgesamt kann gezeigt werden, dass die mechanische Konstruktion mit allen vorliegenden Lichtmaschinen gut funktioniert und keine nennenswerten Probleme zeigt.

6.1.2 Elektrotechnische Konstruktion

Einführend kann gesagt werden, dass das Energiefahrrad mit dem vorliegenden Bosch-0123-120-001-70A-Compaktgenerator problemlos funktioniert. Auch die vorliegende unbekannte Lichtmaschine funktioniert am Energiefahrrad problemlos. Beide Lichtmaschinen geben an der Elektrobox eine auf etwa 14 V – DC geregelte, geglättete Ausgangsspannung aus und können somit Wechselrichter und 12 V-DC-Campinggeräte betreiben. Testversuche wurden bis zu einer elektrischen Anschlussleistung von 200 W durchgeführt. Betriebsmittel größerer Leistung konnten aufgrund des schlechten Wirkungsgrades, vgl. Abschnitt 6.2, nicht betrieben werden. Auch Haushaltsgeräte wie ein Küchenrührgerät konnten mit den Lichtmaschinen, der Elektrobox und dem Wechselrichter betrieben werden.

Der Mitsubishi-A1T25097-Topfgenerator zeigt hingegen Probleme beim Betrieb mit Wechselrichter. Oszilloskop Aufnahmen zeigen, dass die Ausgangsspannung der Lichtmaschine beim Zuschalten des Wechselrichters zu stark einbricht, so dass die Elektronik des Wechselrichters nicht einschaltet. Angesichts des hohen Alters (1985) und der geringen

Generatorleistung ist dieses Verhalten jedoch nicht verwunderlich. 12 V-DC-Betriebsmittel wie Leuchtmittel oder Campinggeräte bis 100 W lassen sich mit der Mitsubishi-A1T25097 dennoch betreiben.

Aufgrund der Tatsache, dass die Bosch-0123-120-001 einen problemlosen Betrieb ermöglicht und Bosch-Kompaktgeneratoren ab Werk mit Z-Dioden im Gleichrichter ausgestattet sind [41, S. 142], empfiehlt sich die Verwendung von Bosch Generatoren. Konkret können die beiden Modelle Bosch-0123-120-001 und Bosch-0986-041-820 empfohlen werden. Ob Lichtmaschinen anderer Hersteller und anderer Bauformen ebenfalls für das Energiefahrrad geeignet sind, konnte im Zuge dieser Arbeit nicht geprüft werden.

Um zu überprüfen, ob die Bauelemente in der Elektrobox funktionieren und ob sie deren Belastungen standhalten, wurden diese mittels Oszilloskop untersucht. Besonders der Glättungskondensator und die TVS-Schutzdiode müssen überprüft werden, da diese nicht von der Sicherung F1 geschützt werden. Ihre Belastungsgrenzen liegen unterhalb der Auslösegrenze der Sicherung F1. Aufgrund der Empfehlungen wird die folgende Messung ausschließlich an der Bosch-0123-120-001 Lichtmaschine vorgenommen.

Überprüfung des Kondensators

Um die Funktion des Glättungskondensators zu überprüfen, wird die Ausgangsspannung der Elektrobox bzw. die Spannung am Betriebsmittel mittels Oszilloskop gemessen. Zudem wird der Kondensatorstrom mittels Stromprobe (Stromzange für das Oszilloskop) aufgezeichnet. Die nachstehende Abbildung 6-3 zeigt den prinzipiellen Versuchsaufbau.

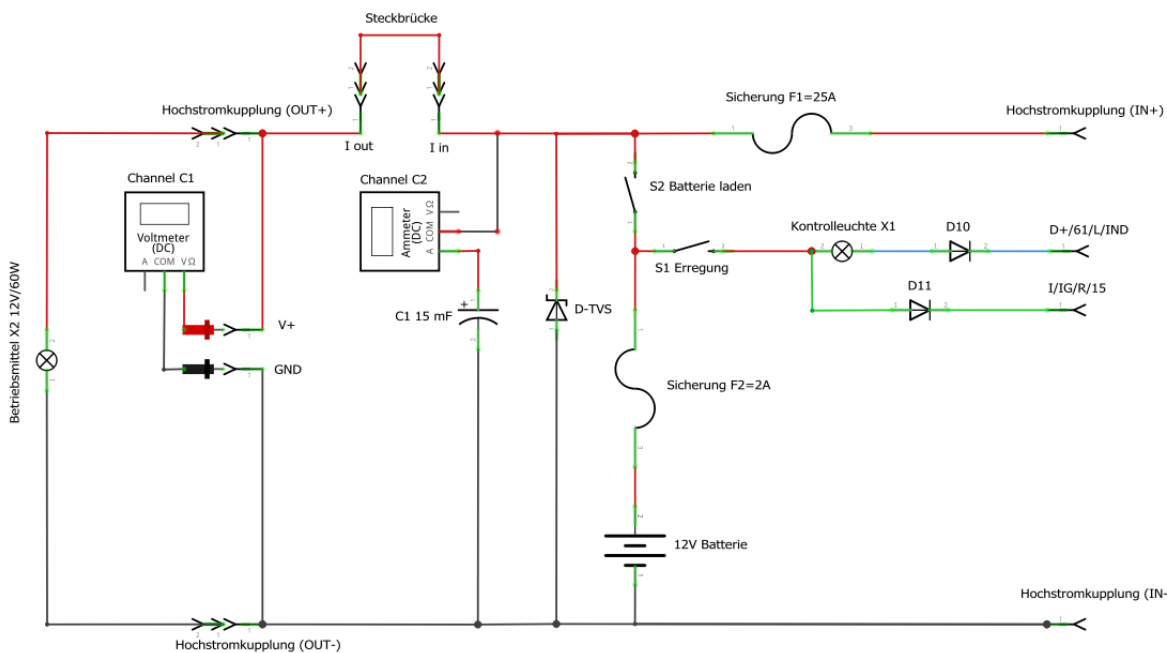


Abbildung 6-3: Versuchsaufbau; Überprüfung des Kondensators (vereinfachte Darstellung ohne Lichtmaschine)

Als Betriebsmittel wird ein 12V/60W-Leuchtmittel (X2) an das Energiefahrrad angeschlossen. Dieses hat aufgrund der höheren Ausgangsspannung eine Leistung von etwa 85 W und stellt

eine typische Belastungssituation dar. Die Lichtmaschine ist zur Vereinfachung nicht gezeigt. Sie ist über die Kontakte IN+ und In- sowie D+ an die Elektrobox angeschlossen.

Das Oszilloskop ist mit Channel 1 (C1) an die Spannungsbuchsen V+ und GND angeschlossen. Channel 2 (C2) misst den Kondensatorstrom wie in Abbildung 6-3 gezeigt. Das Oszilloskop ist wie folgt eingestellt:

Tabelle 6-1: Oszilloskop Einstellungen zur Überprüfung des Kondensators

	Time		CH C1	CH C2	CH C3	CH C4		Trigger
Time/Div	200E-5 s	Coupling	DC1M	DC			Source	C1
Samplerate	250E+7 /s	Volt/Div	5 V	1 A			Coupling	DC
Offset	0 s	Offset	-15 V	0 A			Type	Edge
		BWlimit	Full	200MHz			Slope	Positive
		Filter	None	None			Level	32,9
		Probe	x10	CP030				

Nachdem der Erregerschalter S1 an der Elektrobox eingeschaltet ist, beginnt eine Person mit dem Fahrradfahren. Das Fahrrad treibt die Lichtmaschine an und das angeschlossene Betriebsmittel (X2) leuchtet. Die nachstehende Abbildung 6-3 zeigt die Bildschirmaufnahme des Oszilloskops. Der grüne Verlauf zeigt die Ausgangsspannung (C1). Der magentafarbige Graf zeigt den Kondensatorstrom.

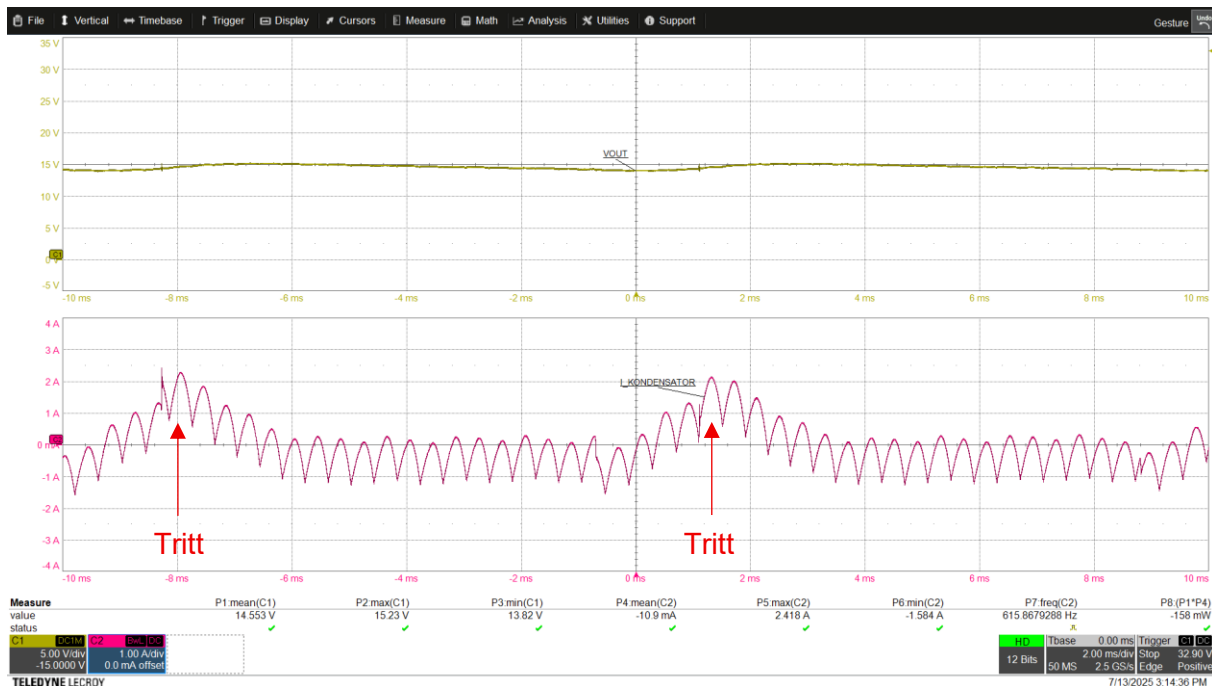


Abbildung 6-4: Oszillogramm zur Überprüfung des Kondensators

Das Oszillogramm der Ausgangsspannung (C1) zeigt eine gut geglättete Ausgangsspannung. Die Ausgangsspannung hat einen Mittelwert von $P1: mean(C1) = 14,553 \text{ V}$, vgl. Abbildung 6-4. Die Spannung schwankt bei der angeschlossenen Last um lediglich $-0,733 \text{ V}$ und $+0,677 \text{ V}$. Die Glättungsfunktion des Kondensators ist damit bestätigt. Zum Vergleich ohne Kondensator siehe Abbildung 4-17 (S.57).

Wird nun der Kondensatorstrom in Abbildung 6-4 betrachtet (C2), so kann die Trittfrequenz als überlagerte Schwingung erkannt werden. Die Tritte sind als positive Berge zu erkennen, in denen Energieüberschuss herrscht. Der Kondensator wird geladen. Zwischen den Tritten dient der Kondensator als Energiespeicher, die Kurve ist im Mittel negativ (unterhalb der X-Achse). Die Grundschiwingung resultiert aus dem gleichgerichteten Drehstromsystem und dem 12-poligen Läufer der Lichtmaschine, vgl. Abschnitt 3.3. Um zu verifizieren, ob der Kondensator der Belastung standhält, wird der maximale Lade- bzw. Entladestrom abgelesen. Das Oszilloskop zeigt einen maximalen Lade- bzw. Entladestrom von $P5: \max(C2) = 2,418 \text{ A}$.

Im Datenblatt des Kemet-ALS31A153DB040-Glättungskondensators ist ein maximaler Ripple-Strom von 9,5 A bei 100 Hz und 10 A bei 10 kHz angegeben, vgl. [61]. Im Oszillogramm (Abbildung 6-4) ist eine Frequenz von $P7: \text{freq}(C2) \approx 615 \text{ Hz}$ gezeigt. Der maximal zulässige DC-Ripplestrom wird daher mit 9,5 A angenommen.

Der maximal zulässige DC-Ripple-Strom von 9,5 A ist damit deutlich über dem gemessenen Wert $P5: \max(C2) = 2,418 \text{ A}$. Der Ripple-Strom steigt allerdings proportional zur Belastung des Energiefahrrades. Die gemessenen 2,418 A sind für eine Anschlussleistung von etwa 85 W aufgenommen worden. Bei einer Betriebsmittelleistung von 300 W würden sich somit ein DC-Ripple Strom von etwa $I_{\text{Ripple-max}} = 8,5 \text{ A}$ ergeben. Dieser Wert liegt weiterhin unterhalb des maximal zulässigen Wertes. Eine Zerstörung des Kondensators durch Überlastung ist damit ausgeschlossen.

Das vollständige Messprotokoll der Vorrangegangenen Messungen ist im Anhang A, im Inhalt des USB-Sticks, zu finden.

Überprüfung des Schutzdiode

Um die Funktion der Schutzdiode zu überprüfen, wird die Lichtmaschine im Leerlauf betrieben. Leerlauf bedeutet, dass kein Betriebsmittel angeschlossen ist. Dies wird gemacht, da die Spannungsspitzen, die die Diode kurzschließen soll, besonders im Leerlauf auftreten. Da Bosch-Lichtmaschinen bereits über Z-Dioden im Gleichrichter verfügen und keine Spannungsspitzen hervorrufen, wird die Messung an der Mitsubishi-A1T25097-Lichtmaschine vorgenommen. Dies bedeutet nicht, dass die Diode an Bosch-Lichtmaschinen weggelassen werden darf, vgl. Abschnitt 4.2.4.

Für die Überprüfung der Diodenfunktion wird der Strom durch die Diode und die Spannung an der Diode mittels Oszilloskop gemessen. Zur Strommessung wird erneut die Strom-Sonde verwendet. Da die Diode direkt zwischen Plus-Potential und Masse geschaltet ist, entspricht die Dioden-Spannung gleichzeitig der Ausgangsspannung ($U_{\text{Diode}} = U_{\text{out}}$). Die nachstehende Abbildung 6-5 zeigt den vereinfachten Versuchsaufbau.

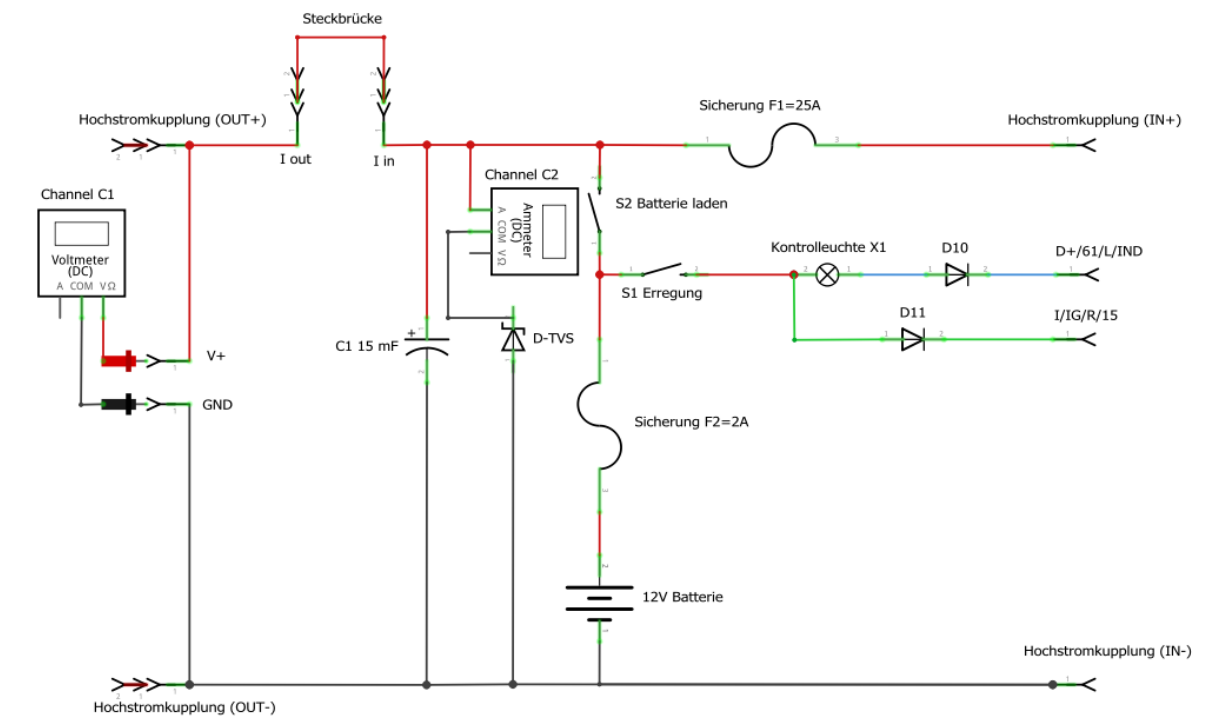


Abbildung 6-5: Versuchsaufbau; Überprüfung des TVS-Diode (vereinfachte Darstellung ohne Lichtmaschine)

Wie in Abbildung 6-5 zu erkennen ist, wird über den Chanel 1 (C1) die Spannung gemessen. Der Elektronenstrom durch die Diode wird am Chanel 2 gemessen. Das Oszilloskop wurde wie folgt eingestellt:

Tabelle 6-2: Tabelle 6-3: Oszilloskop Einstellungen zur Überprüfung des Kondensators								
	Time		CH C1	CH C2	CH C3	CH C4		Trigger
Time/Div	100E-5 s	Coupling	DC1M	DC			Source	C1
Samplerate	500E+7 /s	Volt/Div	5 V	0,05 A			Coupling	DC
Offset	0 s	Offset	-15 V	-0,15 A			Type	Edge
		BWlimit	Full	200MHz			Slope	Positive
		Filter	None	None			Level	32,9
		Probe	x10	CP030				

Die Lichtmaschine wird durch das Fahrrad angetrieben und die Lichtmaschine liefert die Ausgangsspannung V_{out} . Die nachstehende Abbildung zeigt das Oszillogramm der Ausgangsspannung und des Diodenstroms.



Abbildung 6-6: Oszillogramm zur Überprüfung der TVS-Schutzdiode

Die Abbildung 6-6 zeigt die Ausgangsspannung in Grün. Die zweite grüne Kurve zeigt den stark vergrößerten Zoom auf eine verbleibende Spannungsspitze. Im Leerlauf hat die Spannung einen Mittelwert von $P1: mean(C1) = 18,084 \text{ V}$. Diese recht hohe Spannung kann darin begründet werden, dass der Regler der Lichtmaschine erst ab einem gewissen Betriebsstrom ordnungsgemäß regeln kann. Das Maximum der noch verbleibenden Spannungsspitzen beträgt $P2: max(C1) = 18,51 \text{ V}$. Da beide Spannungswerte weit unterhalb des vorherigen Niveaus liegen, kann die Funktion der Diode bestätigt werden. Zudem liegen die Werte weit unterhalb des berührungsgefährlichen Bereichs.

Besonders stark wird der Effekt der Diode sichtbar, wenn die oberste Messkurve aus Abbildung 6-6 mit dem Oszilloskop-Bild ohne Kondensator und ohne Schutzdiode (Abbildung 4-17) verglichen wird. In Abbildung 4-17 reichten die Spannungsspitzen noch bis $42,64 \text{ V}$. Mit Schutzdiode betragen diese nur noch $18,51 \text{ V}$.

Um zu überprüfen, ob die Diode den Spannungsspitzen einer Lichtmaschine standhalten kann, wird der Dioden-Strom in Abbildung 6-6 (Magenta) betrachtet. Der obere magentafarbene Verlauf zeigt diesen Elektronenstrom. Er hat einen Mittelwert von $P4: mean(C2) = 23,6 \text{ mA}$ und einen Spitzenwert von $P5: max(C2) = 282,2 \text{ mA}$. Der unterste Verlauf zeigt den Zoom auf eine Stromspitze, hervorgerufen durch eine Spannungsspitze. Es sei erwähnt, dass die beiden Zooms eine gemeinsame Zeitachse (X-Achse) besitzen.

Aus der gemeinsamen Zeitachse ist ersichtlich, dass der Strom durch die Diode zeitgleich mit der Spannungsspitze sprunghaft ansteigt. Dies liegt daran, dass durch den sprunghaften Spannungsanstieg die Diode in Sperrrichtung niederohmig wird und somit einen Kurzschluss darstellt, vgl. Abschnitt 4.2.4. Durch den Stromfluss durch die Diode sinkt die Spannung etwas

und die Diode wird langsam hochohmiger. Während Spannung und Strom sinken, wird Energie in der Diode in Form von Wärme umgesetzt. Diese Wärmeenergie kann die Diode zerstören.

Innerhalb der Oszilloskop-Software konnte die mittlere in der Diode umgesetzte Energie berechnet werden. Das Oszilloskop zeigt $P_8 = (P_1 * P_4) = 426,8 \text{ mW}$. Im Datenblatt der Littelfuse-1,5KE18A-Diode ist eine Dauerleistung von $P_D = 6,5 \text{ W}$ angegeben, vgl. [60]. Die tatsächliche Energie der Spannungsspitzen ist also deutlich geringer als die dauerhaft zulässige Leistung. Die Diode ist demnach nicht gefährdet, durch die Spannungsspitzen zerstört zu werden. Insgesamt kann gezeigt werden, dass Diode und Kondensator sowohl im Leerlauf als auch mit angeschlossenem Betriebsmittel für eine gut geglättete Gleichspannung sorgen.

Beurteilung der Spannung auf Berührungsgefährdung

Um die Ausgangsspannung des Energiefahrrades als nichtberührungsgefährlich einstufen zu können, ist es notwendig, dass **mindestens einer** der folgenden Punkte erfüllt wird:

- Die Spannung darf $60 \text{ V} - \text{DC}$, gemessen mit einem hochohmigen ($< 50 \text{ k}\Omega$) Spannungsmesser, nicht überschreiten.
- Bei Spannungen über $60 \text{ V} - \text{DC}$ darf der Fehlerstrom (über einen Körperwiderstand von $2 \text{ k}\Omega$) 12 mA nicht überschreiten.
- Die mögliche Entladungsenergie bei einem Kurzschluss darf 350 mJ nicht überschreiten.

[14, S. 91].

Der erste dieser Punkte kann bereits durch die vorangegangenen Messungen (zumindest bedingt) bestätigt werden. Jedoch bestätigen die Messungen nicht, dass im Falle eines Reglerausfalls die Spannung unterhalb von $60 \text{ V} - \text{DC}$ bleibt. Da ein Reglerausfall nicht sicher ausgeschlossen werden kann, bedarf es einer zweiten Schutzeinrichtung. Im Abschnitt 4.2.1 wurde bereits beschrieben, dass die TVS-Diode auch in diesem Fall schützen kann.

Um diese Funktion zu erfüllen, muss die Diode in der Lage sein, die Spannung auf ein ungefährliches Maß zu begrenzen, ohne dabei zerstört zu werden. Da die Energie hierbei vermutlich höher sein wird als in der vorangegangenen Messung, ist eine weitere Prüfung notwendig. Erst wenn sichergestellt werden kann, dass die Diode dies erfüllt, kann das Energiefahrrad als nichtberührungsgefährlich eingestuft werden.

Da die Bosch-0123-120-001 bereits über eine interne Schutzeinrichtung verfügt, vgl. [41, S. 142], und die Spannung der Mitsubishi-A1T25097 bei Belastung einbricht, wird die Lichtmaschine unbekannten Typs verwendet. Die Lichtmaschine wurde dazu auseinandergebaut und der Regler zerstört. Die Schleifringkontakte des Klauenpolläufers wurden mit zwei Drähten kontaktiert und nach außen geführt. Anschließend wurde die Lichtmaschine wieder zusammengebaut. Die Lichtmaschine ist nun eine unregelte Lichtmaschine mit nach außen geführttem Erregerstromkreis. Über ein Labornetzteil oder eine

Batterie mit Vorwiderstand kann die Spannung bzw. der Strom durch den Läufer (Elektromagneten) eingestellt werden. Die Ausgangsspannung der Lichtmaschine ist jetzt drehzahlabhängig.

Um zu überprüfen, ob die Schutzdiode ausreichend schützt, werden die beiden Drähte des Läufers an eine 12 V-Batterie angeschlossen. Als Vorwiderstand dient ein 2W/12V-Leuchtmittel. So wird der Reglerausfall am Energiefahrrad simuliert.

Nun wird das Energiefahrrad ohne angeschlossenes Betriebsmittel angetrieben. Der Strom durch die Diode sowie die Spannung über der Diode werden wie in Abbildung 6-5 gemessen. Die Spannung steigt ohne Regler schnell auf über 20 V. Die Diode wird niederohmig und es fließt ein Strom von bis zu 10 A. Die Leistung über der Diode überschreitet die maximal zulässigen 5 W und die Diode wird zerstört. Die Zerstörung der Diode äußert sich in einem leisen Klickgeräusch und in einem abrupten Abbremsen des Rades. Die Diode stellt nun einen dauerhaften Kurzschluss dar, vgl. Abbildung 6-7.

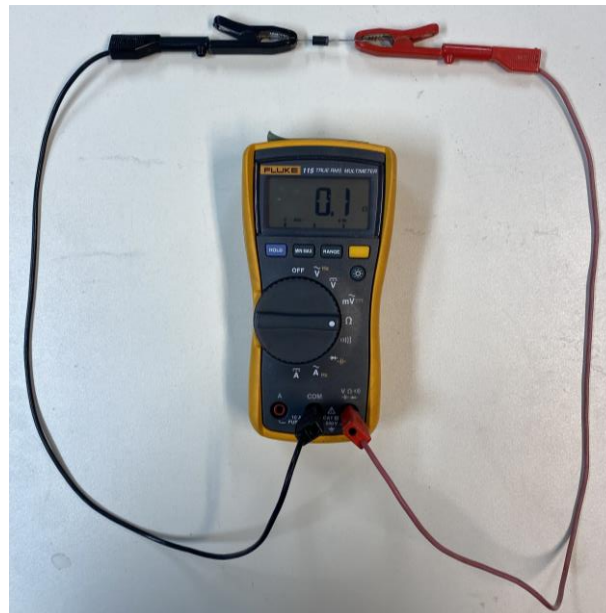


Abbildung 6-7: Widerstandsmessung an einer defekten TVS-Diode in Sperrrichtung

Die Abbildung 6-7. zeigt, dass die Widerstandsmessung in Sperrrichtung einen Widerstand von $R = 0,1 \Omega$ ergibt. Die auf dem Fahrrad sitzende Person kann sich nun mit ihrem ganzen Körpergewicht auf die Pedale stellen, ohne dass sich das Hinterrad drehen lässt.

Es wurden insgesamt drei Tests durchgeführt, bei denen die Diode jedes Mal einen Kurzschluss herstellte. Alle drei Dioden sind nach den Tests dauerhaft kurzgeschlossen und zeigten feine Haarrisse im Gehäuse. Dieses Verhalten ist trotz der Zerstörung der Diode wünschenswert, da sie durch ihren Defekt die Ausgangsspannung des Energiefahrrades auf ein nicht berührungsgefährdendes Maß begrenzt. So stellt die TVS-Diode eine Sicherung vor Überspannung dar, die im Falle einer Überspannung einfach ausgetauscht werden kann.

Im Datenblatt der Diode ist das Kurzschlussverhalten sogar explizit ausgeschrieben. Konkret steht im Datenblatt „*Typical failure mode is short from over-specified voltage or current*“ [60].

Da dies Kurzschlussverhalten nur „typisch“ ist und nicht garantiert werden kann, wird versucht, ohne Diode an der unregelmäßig (defekten) Lichtmaschine eine möglichst hohe Spannung zu erreichen. Die Elektrobox wird in diesem Versuch nicht verwendet, um den internen Kondensator nicht zu zerstören. Die Lichtmaschine wird weiterhin im Leerlauf betrieben. Zur Erregung wird weiterhin eine 12 V-Batterie verwendet. Die nachstehende Abbildung 6-8 zeigt den Versuchsaufbau.

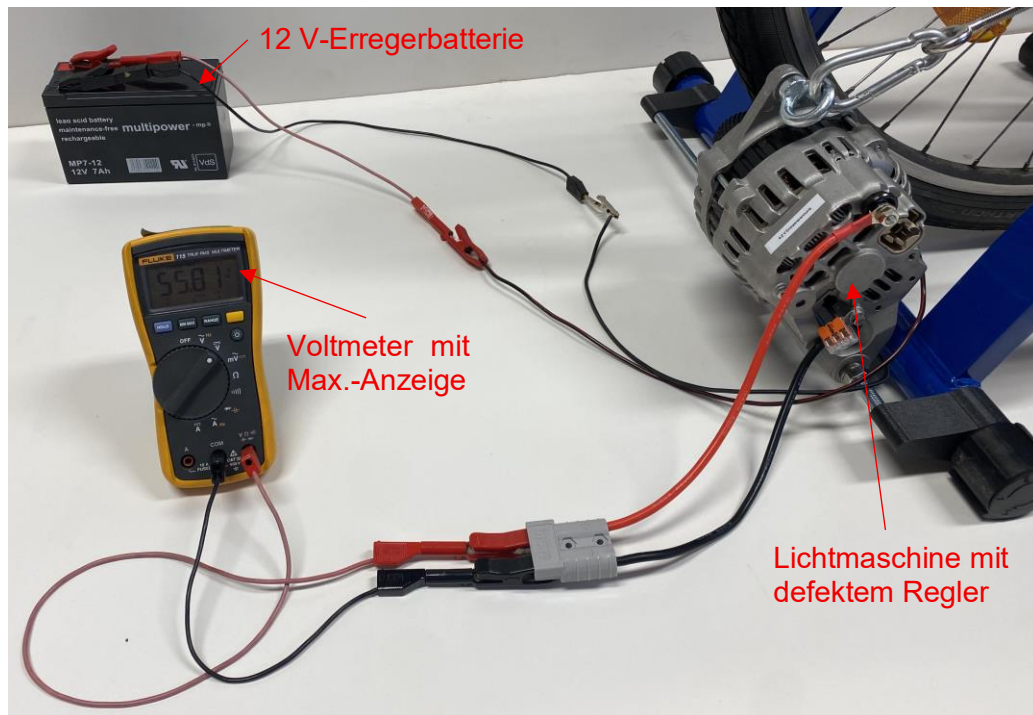


Abbildung 6-8: Versuchsaufbau zur Bestimmung der maximal möglichen Ausgangsspannung einer defekten unregelmäßig Lichtmaschine

Das in Abbildung 6-8 gezeigte, gelbe Multimeter wird in den Maximal-Modus gestellt, um den maximal erreichten Wert der Ausgangsspannung zu erhalten. Mit großer Anstrengung ließ sich so eine maximale Leerlauf-Ausgangsspannung von $U_{out} = 55,81 \text{ V} - \text{DC}$ erreichen, vgl. Abbildung 6-8. Dieser Wert ist zwar nah an der maximal zulässigen Spannung von $60 \text{ V} - \text{DC}$, jedoch nur im Leerlauf und mit großer Anstrengung möglich. Sobald ein Betriebsmittel angeschlossen wird, sinkt die maximal mögliche Spannung.

Da ein Reglerausfall eher unwahrscheinlich ist, die TVS-Diode typischerweise kurzschließt und auch sonst keine Spannungen über $60 \text{ V} - \text{DC}$ möglich sind, kann die Ausgangsspannung des Energiefahrrades als nicht berührungsgefährlich eingestuft werden. Somit kann das Energiefahrrad auch von Schülerinnen und Schülern unterhalb der 10. Jahrgangsstufe verwendet werden, vgl. [7]. Die Aufsicht einer Lehrperson ist aufgrund mechanischer Gefährdungen (z.B. Quetschungen) dennoch notwendig.

6.2 Wirkungsgrad

Bereits bei ersten Vergleichen zwischen Oekotrainer und Energiefahrrad wurde festgestellt, dass der Wirkungsgrad des Energiefahrrades geringer ist. Bei gleichen angeschlossenen Betriebsmitteln erforderte das Energiefahrrad eine größere körperliche Anstrengung. Dieses subjektive Empfinden wird in diesem Abschnitt untersucht. Die Methode zur Bestimmung des Wirkungsgrades kann in dieser Form auch mit Schülerinnen und Schülern durchgeführt werden. Es ist jedoch ein modernes E-Bike erforderlich.

Um den Wirkungsgrad des Energiefahrrades, des Oekotrainers und des Wechselrichters bestimmen zu können, wird ein E-Bike mit Leistungsmessung verwendet. Das verwendete E-Bike zeigt auch bei ausgeschalteter Unterstützung die durchschnittliche zugeführte mechanische Leistung sowie die momentane Leistung an. Leider konnten keine Informationen zur Messgenauigkeit des E-Bike-Systems gewonnen werden. Es wird daher davon ausgegangen, dass die angezeigten Werte lediglich eine grobe Einschätzung der tatsächlichen Leistung erlauben. Die Werte werden wie folgt auf dem E-Bike-Display angezeigt:



Abbildung 6-9: E-Bike Display bei ausgeschalteter Unterstützung und im Stillstand nach einer Fahrt

Um zu überprüfen, ob der schlechtere Wirkungsgrad des Energiefahrrades bereits bei Leerlauf vorhanden ist, wird zunächst die benötigte Leerlaufleistung der beiden Generatoren bestimmt. Zur einfacheren Differenzierung wird das Energiefahrrad im Folgenden mit EF und der Oekotrainer mit ÖT abgekürzt.

Die Messungen ergaben, dass das EF eine durchschnittliche Leerlaufleistung von $P_{\text{Leerlauf-EF}} = 112 \text{ W}$ benötigt. Der ÖT benötigte $P_{\text{Leerlauf-ÖT}} = 113 \text{ W}$. Diese Leistungen sind ausschließlich Verluste, da keine Energie in eine gewünschte Energieform umgewandelt wird. Es ist kein Betriebsmittel angeschlossen, der Wirkungsgrad beträgt Null. Einen solchen Null-

Wirkungsgrad mit Schülerinnen und Schülern zu diskutieren kann an dieser Stelle durchaus Sinn ergeben.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Verluste bereits im Leerlauf sehr hoch sind und sich nicht zwischen ÖT und EF unterscheiden. Die hohen Leerlaufverluste lassen sich durch hohe Reibungsverluste zwischen Hinterrad und den Laufrollen erklären. Lagerverluste durch Kugellager und elektromagnetische Eisenverluste in den Generatoren kommen hinzu.

Um den Wirkungsgrad bei Belastung zu identifizieren, wird zunächst die Elektrobox an das EF angeschlossen. An den Out-Anschluss der Elektrobox wird der Wechselrichter angeschlossen. Dieser betreibt abwechselnd Leuchtmittel unterschiedlicher Leistungen.

An der Elektrobox wird der Spannungsfall über den Shunt (U_{shunt}) mittels Wireless-Voltage-Sensor der Firma Pasco gemessen. Die Ausgangsspannung U_{out} wird ebenfalls über einen solchen Bluetooth-Sensor gemessen. Über die Software SPARKvue kann dann die elektrische Leistung P_{el1} berechnet und angezeigt werden. Die Leistung berechnet sich wie folgt:

$$P_{el1} = U_{out} \cdot \frac{U_{shunt}}{0,01 \text{ V/A}} \quad 6-1$$

Die elektrische Leistung P_{el2} hinter dem Wechselrichter wird über ein Steckdosen-Leistungsmessgerät bestimmt. Die Abbildung 6-10 zeigt diesen Versuchsaufbau.

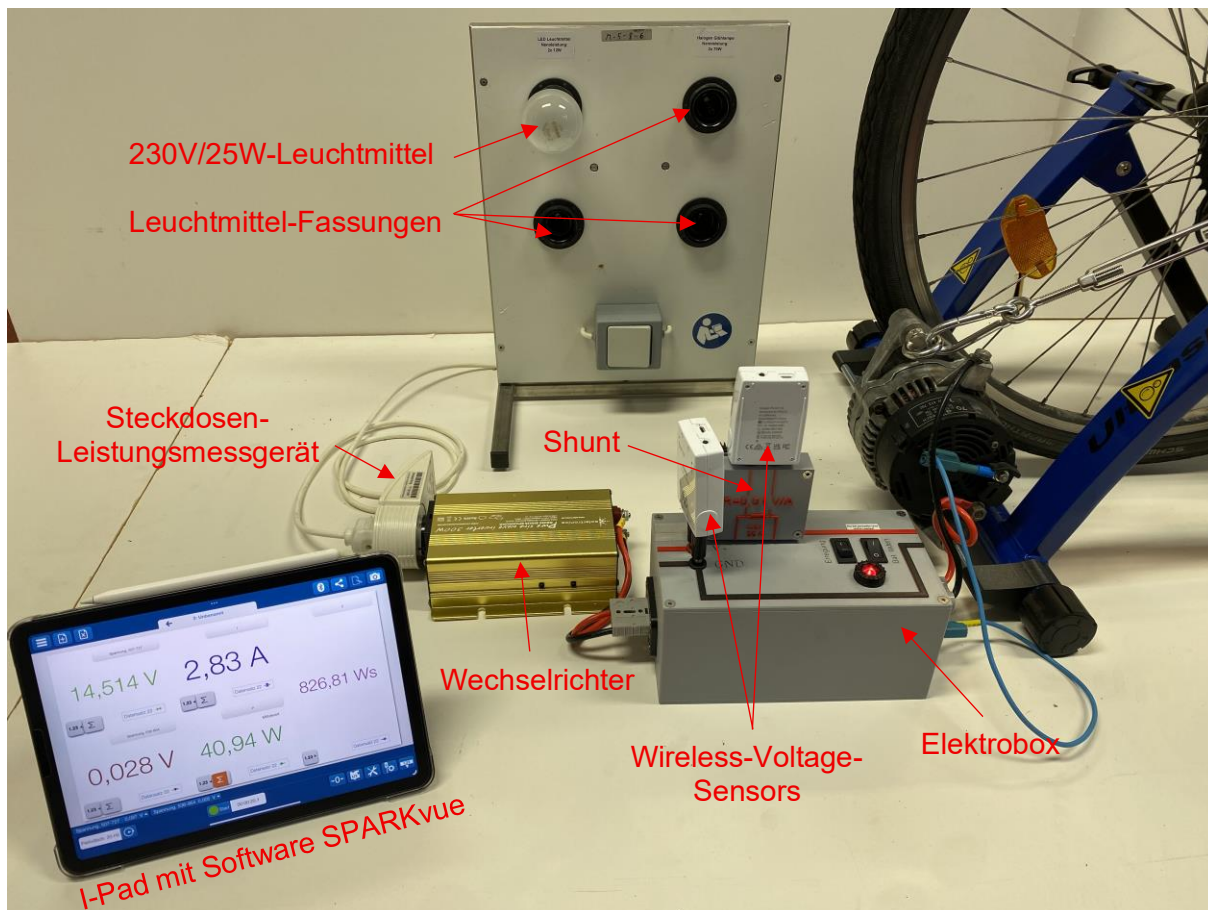


Abbildung 6-10: Versuchsaufbau zur Bestimmung des Wirkungsgrades

In die Leuchtmittelfassung wird ein 230V/25W-Leuchtmittel geschraubt. Das Energiefahrrad wird durch einen Schüler oder eine Schülerin angetrieben. Das Leuchtmittel fängt an zu leuchten. Am Display des E-Bikes wird die zugeführte mechanische Leistung abgelesen und notiert. Die elektrischen Leistungen P_{el1} und P_{el2} werden ebenfalls notiert.

Der gleiche Ablauf wird mit zwei 230V/25W-Leuchtmitteln durchgeführt. Anschließend wird der Versuch mit einem 230V/70W-Leuchtmittel und einem 230V/100W-Leuchtmittel wiederholt. Im Unterricht können die Versuche mit beliebig vielen Leuchtmittel wiederholt werden. Die Ergebnisse der Messungen können der Tabelle 6-4 entnommen werden.

Tabelle 6-4: Messergebnisse zur Bestimmung des Wirkungsgrades des Energiefahrrades

Leuchtmittel:	P_{mech} [W]	P_{el1} [W]	P_{el2} [W]
1x 230V/25W	190	39	26
2x 230V/25W	240	66	52
1x 230V/70W	252	86	71
1x 230V/100W	320	121	100

Um den Wirkungsgrad des Energiefahrrades und des Wechselrichters zu bestimmen, müssen nun die jeweiligen abgeführten durch die zugeführten Leistungen geteilt werden. Für das Energiefahrrad gilt demnach $\eta_{EF} = P_{el1}/P_{mech}$. Für den Wechselrichter gilt entsprechend $\eta_{WR} = P_{el2}/P_{el1}$. Um den Wirkungsgrad in Prozent zu erhalten, müssen die Quotienten mit der Zahl 100 multipliziert werden. Die Tabelle 6-5 zeigt diese Ergebnisse der drei Messungen und deren Mittelwert.

Tabelle 6-5: Berechnete Wirkungsgrade für das Energiefahrrad, den Wechselrichter und beide zusammen für unterschiedlichen Anschlussleistungen

Leuchtmittel:	Wirkungsgrad des Energiefahrrades η_{EF} [%]	Wirkungsgrad des Wechselrichters η_{WR} [%]	Gesamtwirkungsgrad η_{ges} [%]
1x 230V/25W	21	67	14
2x 230V/25W	27	79	22
1x 230V/70W	34	81	28
1x 230V/100W	38	82	31
Mittelwert:	30	77	24

Die Tabelle 6-5 zeigt, dass die berechneten Wirkungsgrade sowohl beim EF als auch beim Wechselrichter mit zunehmender Last steigen. Dies liegt daran, dass elektrische Betriebsmittel für eine höchstmögliche Effizienz bei Nennleistung ausgelegt sind. Werden Betriebsmittel deutlich unterhalb ihrer Nennlast betrieben, so sinken häufig die Wirkungsgrade. Dies liegt unter anderem an höheren relativen Verlusten im Vergleich zur nutzbaren Leistung.

Im Datenblatt des Wechselrichters ist der Wirkungsgrad mit etwa 85 % angegeben, vgl. [46, S. 10]. Der berechnete mittlere Wirkungsgrad liegt bei 77 %. Angesichts der einfachen Messmethoden und der Teillast erscheint der ermittelte Wirkungsgrad als akzeptabel und realistisch.

Der für das Energiefahrrad bzw. die Lichtmaschine ermittelte Wirkungsgrad erscheint mit 30 % zunächst katastrophal. Immerhin bedeutet dies, dass 70 % der zugeführten Leistung verloren gehen. In der Literatur sind für Lichtmaschinen Wirkungsgrade bis zu 60 % angegeben, vgl. [41, S. 149]. Es finden sich jedoch auch realistischere Rechnungen für Teillastzustände, die Wirkungsgrade $\eta_{Lima} \leq 40$ % angeben, vgl. [41, S. 149], [51, S. 67]. Angesichts dieser schlechten Prognose erscheint der festgestellte mittlere Wirkungsgrad von 30 % nicht unrealistisch. Besonders der Wirkungsgrad für das 230V/100W-Leuchtmittel liegt mit 38 % sehr nahe am realistischen Literaturwert. Die hohen Verluste setzten sich zusammen aus:

mechanischen Verlusten, Kupferverlusten im Ständer, Eisen- und Zusatzverluste, Gleichrichterverluste und Erregerverluste, vgl. [41, S. 149]. Eisen- und Zusatzverluste entstehen durch Hysterese und Wirbelströme im Metall. Kupferverluste sind ohmsche Verluste in den Kupferwicklungen. Zu den mechanischen Verlusten zählen z.B. Lager- und Lüfterverluste. Gleichrichterverluste entstehen durch den Spannungsfall an den Gleichrichterdioden. Erregerverluste sind Verluste, die für den Feldaufbau des Läufers benötigt werden [41, S. 149].

Durch all diese Verluste kommt ein sehr schlechter mittlerer Gesamtwirkungsgrad von nur 24 % zustande.

Um einen Vergleich des EF zum ÖT zu erhalten, wurde der Versuch mit dem ÖT wiederholt. Die mittlere elektrische Leistung P_{el1} wurde mittels Poweranalysers des ÖT ermittelt. Um den Umfang an dieser Stelle zu reduzieren, werden direkt die berechneten Wirkungsgrade angegeben. Die ermittelten Messwerte können dem Anhang J entnommen werden. Die nachstehende Tabelle 6-6 zeigt die berechneten Wirkungsgrade und deren Mittelwert.

Tabelle 6-6: Berechnete Wirkungsgrade für das Energiefahrrad, den Oekotrainer und beide zusammen für unterschiedliche Anschlussleistungen

Leuchtmittel:	Wirkungsgrad des Oekotrainers $\eta_{\text{ÖT}}$ [%]	Wirkungsgrad des Wechselrichters η_{WR} [%]	Gesamtwirkungsgrad η_{ges} [%]
1x 230V/25W	28	68	19
2x 230V/25W	40	78	31
1x 230V/70W	48	79	38
1x 230V/100W	52	84	43
Mittelwert:	42	77	33

Wird die Tabelle 6-6 mit der Tabelle 6-5 verglichen, so fällt auf, dass die Wirkungsgrade des Wechselrichters sehr ähnlich ausfallen. Dies spricht für das Messverfahren und bestätigt die zuvor ermittelten Werte für den Wechselrichter.

Werden die Wirkungsgrade für das EF mit denen für den ÖT verglichen, so fällt auf, dass der ÖT bei allen Messungen einen besseren Wirkungsgrad aufweist. Der Mittelwert des Wirkungsgrades ist beim ÖT mit 42 % etwa 12 % besser als der des EF. Für das 230V/100W-Leuchtmittel bedeutet dies, dass beim EF 320 W mechanische Leistung zugeführt werden muss, während der ÖT nur 230 W benötigt. Dies entspricht für das EF eine Mehrleistung von

90 W bei einer elektrischen Anschlussleistung von 100 W. Insgesamt lässt sich sagen, dass der Wirkungsgrad des EF deutlich schlechter ist als der des ÖT.

Im schulischen Kontext können die Wirkungsgrade nun diskutiert werden. Für Schulen, die bereits ein ÖT besitzen, könnte der direkte Vergleich zwischen ÖT und EF spannend sein. Schülerinnen und Schüler könnten so am eigenen Leib erfahren, was ein schlechterer Wirkungsgrad für die körperliche Anstrengung bedeutet.

Die ermittelten Wirkungsgrade können auch in ein Energieflussdiagramm eingetragen werden, um darauf aufbauend die Bedeutung von Wirkungsgraden bei der Energieübertragung zu thematisieren. Ein Energieflussdiagramm für das EF könnte wie in Abbildung 6-11 dargestellt aussehen und gemeinsam mit Schülerinnen und Schülern an der Tafel erarbeitet werden.

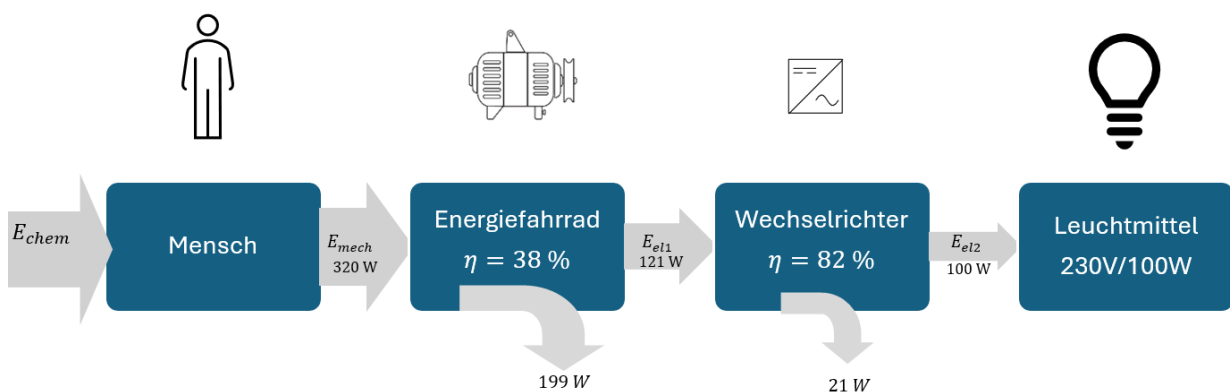


Abbildung 6-11: Energieflussdiagramm des Energiefahrrades mit Verlustleistungen bei einem 230V/100W-Leuchtmittel

Mithilfe des Energiefahrrades und ein solches Energieflussdiagramm lassen sich Wirkungsgrade visuell darstellen und physiologisch erfahrbar machen. Schülerinnen und Schülern kann so die Relevanz für gute Wirkungsgrade handlungs- und erlebnisorientiert nähergebracht werden. Der schlechte Wirkungsgrad des Energiefahrrades ist somit eine Chance, schlechte Wirkungsgrade zu thematisieren. Auf der anderen Seite stellt der schlechte Wirkungsgrad ein Problem dar. Sollen Energieumsätze erfahrbar gemacht werden, können falsche Eindrücke entstehen. Energiemengen werden in der größer wahrgenommen als sie sind. Wie mit diesem Problem umgegangen werden kann, wird im Abschnitt 6.3.1 beschrieben.

6.3 Schülerversuche

In diesem Abschnitt werden kurze Versuchsaufbauten gezeigt und beschrieben, die in einem schulischen Umfeld mit dem Energiefahrrad durchgeführt werden können. Die nachfolgenden Experimente sollen somit einen Rückbezug zu den in 2.3 und 2.4 beschriebenen Inhalten geben. Es sei auch erwähnt, dass sich mit dem EF noch zahlreiche andere Versuche durchführen lassen, die jedoch nicht Teil dieser Arbeit sind. Konkrete Unterrichtsentwürfe mit dem EF könnten Teil folgender Abschlussarbeiten sein.

6.3.1 Energie erfahrbar machen

Im Abschnitt 2.3.2 wurde bereits beschrieben, wie es das Energiefahrrad ermöglichen kann, Energieumsätze erfahrbar zu machen. Auch die Begriffe der elektrischen Leistung und der elektrischen Energie können über das Energiefahrrad leicht differenziert werden.

Ein praktisches Beispiel ist das Betreiben einer Küchenmaschine zur Herstellung eines Puddings mit dem EF. Für 4 Portionen der bekannten Paradiescreme des Herstellers Dr. Oetker werden 300 ml Milch benötigt. Für eine Klasse bräuchte es demnach mindestens 3 Beutel des Instantpuddings und 900 ml Milch. So lägen die Zutaten für die Unterrichtsstunde bei einem Preis von unter 5 €.

Aufgabe der Schülerinnen und Schüler ist es, den Pudding aus drei Beuteln des Instantpuddings mit körpereigener Energie herzustellen. Sie dürfen diesen im Nachgang natürlich essen. Auf der Packung des Puddings steht, dass das Puddingpulver bei kleinster Stufe in die kalte Milch eingerührt werden soll. Anschließend muss der Pudding auf höchster Stufe für etwa 3 Minuten aufgeschlagen werden. Da diese Anstrengung für einen Lernenden allein zu viel ist, sollen die Schülerinnen und Schüler sich abwechseln, wenn sie nicht mehr können. Es ist davon auszugehen, dass mindestens 3 oder mehr Schülerinnen und Schüler strampeln müssen.

Während die Lernenden die Küchenmaschine mit Muskelkraft betreiben, kann die elektrische Leistung gemessen und angezeigt werden. Auch die dabei umgesetzte Energiemenge kann in unterschiedlichen Einheiten gemessen und angezeigt werden. In der Elektrizitätslehre ist es vermutlich am sinnvollsten, die Energiemenge in kWh anzuzeigen.

Die Messung der elektrischen Größen kann an unterschiedlichen Stellen vorgenommen werden. Zum einen können die elektrischen Größen auf der 230V-Seite, also hinter dem Wechselrichter gemessen werden. Hierfür würde sich ein einfaches Steckdosenmessgerät eignen. Zum anderen können die elektrischen Größen auf der 14V-DC-Seite gemessen werden, also vor dem Wechselrichter, an der Elektrobox. Wo und wie die elektrischen Größen gemessen werden, hängt von den vorhandenen Messgeräten und der Unterrichtsplanung ab. Es sei an dieser Stelle jedoch erwähnt, dass die Wirkungsgrade der Energiekette nicht unberücksichtigt bleiben sollten, vgl. Abschnitt 6.2. Der nachfolgend gezeigte Versuchsaufbau zeigt, wie die Wirkungsgrade korrigiert werden können, so dass die tatsächliche geleistete Energie angezeigt wird. Die nachstehende Abbildung 6-12 zeigt den Versuchsaufbau.

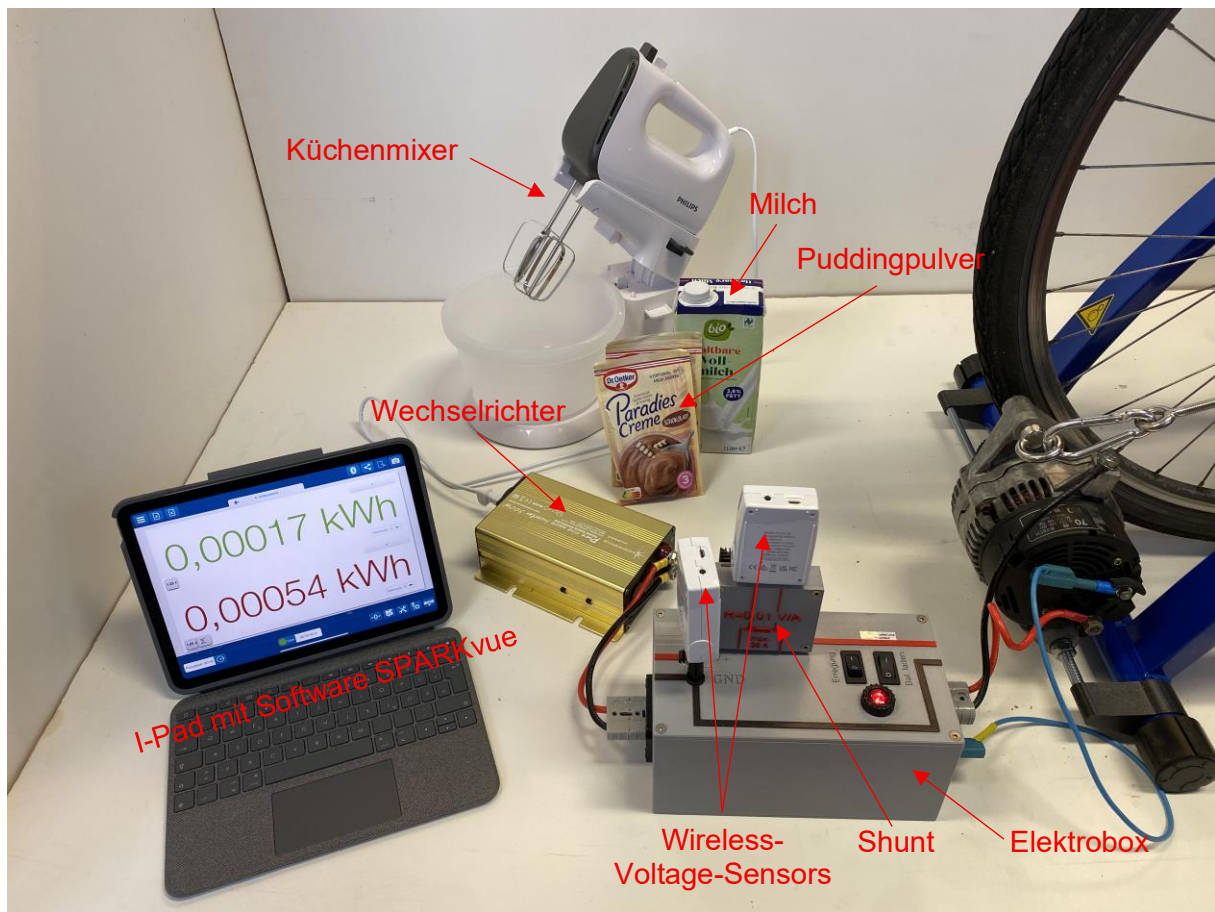


Abbildung 6-12: Versuchsaufbau zum Erfahrbarmachen von elektrischer Energie

Genau wie im Abschnitt 6.2 beschrieben, messen die kabellosen Voltmeter die Ausgangsspannung sowie den Spannungsfall über den Shunt. Über die Gleichung 6-1 kann dann die elektrische Leistung berechnet werden. Die Berechnung findet innerhalb der Software SPARKvue statt. Die gemessene Leistung kann, falls erwünscht, auf dem Display des I-Pads angezeigt werden.

Um die reale mechanische Leistung zu erhalten, sollte die gemessene Leistung mit einem Faktor zwischen 2,5 und 3,5 multipliziert werden. Die Wahl des Faktors hängt stark von der Messmethode und der Leistung des angeschlossenen Betriebsmittels ab. Die tatsächliche, zugeführte mechanische Leistung kann demnach nur abgeschätzt werden. Es sei an dieser Stelle noch einmal auf die unpräzise Bestimmung des Wirkungsgrades hingewiesen, vgl. Abschnitt 6.2. Im hier gezeigten Experiment wurde sich für einen Faktor von 2,5 entschieden, da sich der Wirkungsgrad bei höheren Anschlussleistungen verbessert. Der Küchenmixer benötigt eine Leistung von etwa 100 W. An der Elektrobox werden dabei etwa 120 W gemessen.

Um aus der gemessenen elektrischen Leistung eine Energiemenge zu erhalten, ist es notwendig, die Zeit t in die Berechnung mit aufzunehmen. Für die elektrische Energiemenge gilt:

$$W = \int P(t) dt \quad 6-2$$

In der SPARKvue-Software kann diese Berechnung vorgenommen werden. P ist darin die gemessene oder die bereits um den Wirkungsgrad korrigierte Leistung. W ist die Energiemenge in Wattsekunden [Ws]. Um auf die präzentere Einheit der Kilowattstunde [kWh] zu kommen, muss der mit Gleichung 6-2 berechnete Wert noch durch die Zahl 3.600.000 geteilt werden. Es empfiehlt sich, die Energiemenge in kWh mit 5 Nachkommastellen anzuzeigen, vgl. Abbildung 6-12.

Über die Software kann nun die gemessene bzw. die um den Wirkungsgrad korrigierte Energiemenge angezeigt werden. Wenn der Wirkungsgrad explizit thematisiert werden soll, sollten wie in Abbildung 6-12 beide Werte angezeigt werden. Zur Herstellung des Puddings (3 Minuten auf höchster Stufe rühren), werden ca. 0,00605 kWh am Energiefahrrad gemessen. Dafür müssen die Schülerinnen und Schüler ungefähr 0,01575 kWh mechanische Energie investieren. Die Energiedifferenz von 0,0097 kWh ist verloren gegangen.

Die aufgenommenen Energieumsätze können nun mit den Schülerinnen und Schülern diskutiert werden. Sie bekommen durch dieses Experiment ein Gefühl für Energieumsätze und ein Gespür für die Einheit kWh. Die Fähigkeit, Energieumsätze einordnen zu können, bildet den Grundstein für die Bildung für nachhaltige Entwicklung. Zudem macht dieser Versuch klar, wie wichtig ein guter Wirkungsgrad ist. Das Experiment zeigt, dass mehr als die Hälfte der Energie Verluste sind, für die sich die Schülerinnen und Schüler umsonst angestrengt haben. Wenn vier Lernende für die Herstellung des Puddings benötigt werden, bedeutet dies, dass sich mehr als zwei Personen umsonst angestrengt haben. Die Verbesserung des Wirkungsgrades könnte die Anzahl der benötigten „elektrischen Sklaven“ reduzieren.

Beeinträchtigt die Thematisierung des Wirkungsgrades die Unterrichtsziele, kann dieser im Unterricht umgangen und später behandelt werden. Um ein Gefühl für die Energiemenge $W = 1$ kWh zu bekommen, genügt es, die um den Wirkungsgrad korrigierte Energiemenge zu berechnen und anzuzeigen.

Insgesamt bietet das Energiefahrrad mit diesem Experiment eine motivierende Möglichkeit, Schülerinnen und Schülern Energiemengen näherzubringen. Durch den Einsatz des Küchenmixers ist der in 2.1.1 beschriebene Alltagsbezug gegeben. Das Experiment ist handlungs- und erlebnisorientiert. Auch Schülerinnen und Schüler, die nicht selbst auf dem Energiefahrrad sitzen, können den strampelnden Personen die Anstrengung ansehen. Die Handlungsorientierung bleibt dadurch erhalten, vgl. [27, S. 2].

Abschließend ist zu erwähnen, dass die gezeigten Messungen auch mit anderen Messwerterfassungssystemen (z.B. CASSY) durchgeführt werden können.

6.3.2 Definition der Spannung nach Muckenfuss und Walz

Durch den Anschluss des 12 V DC/230 V AC-Wechselrichters an das Energiefahrrad können die Elektronen- (I) und Energieströme (P) von Haushaltsgeräten bis zu 300 W aufgenommen werden. Es können allerdings auch P und I von 12 V-Campinggeräten bis 300 W aufgenommen werden. Ziel ist es, so die elektrische Spannung gemäß $U = P/I$ einzuführen. Für mehr Informationen hierzu vgl. Abschnitt 2.3.4.

Im Folgenden wird gezeigt, wie $U = P/I$ mit unterschiedlichen Leuchtmitteln am 230 V-Wechselrichter bestimmt werden kann. Für einen besseren Alltagsbezug empfiehlt sich jedoch die Verwendung von Haushaltsgeräten.

Der Versuchsaufbau ist ähnlich wie in Abbildung 6-10. Auf der 230 V-Seite wird noch ein Amperemeter ergänzt, um den Elektronenstrom I messen zu können. Der Energiestrom P wird mittels Steckdosen-Leistungsmessgerät auf der 230V-Seite bestimmt. Zusätzlich wird auch der Elektronenstrom I_{EB} an der Elektrobox gemessen.

Zunächst werden P , I und I_{EB} für ein 230V/25W-Leuchtmittel aufgenommen, weiterführend für zwei dieser Leuchtmittel, anschließend für ein 230V/70W-Leuchtmittel und dann für ein 230V/100W-Leuchtmittel. Abschließend werden zwei 230V/70W-Leuchtmittel verwendet. Die benötigte Anstrengung für das 230V/25W-Leuchtmittel ist noch leicht. Mit steigender elektrischer Anschlussleistung steigt auch die nötige körperliche Leistung. Die nachstehende Tabelle 6-7 zeigt die auf der 230V-Seite aufgenommenen Elektronen- und Energieströme sowie den jeweils dazugehörigen Elektronenstrom an der Elektrobox I_{EB} .

Tabelle 6-7: Für unterschiedliche Leuchtmittel aufgenommene Energie- und Elektronenströme

Leuchtmittel:	Energiestrom P [W]	Elektronenstrom I [A]	Elektronenstrom durch die Elektrobox I_{EB} [A]
1x 230V/25W	25,7	0,111	2,6
2x 230V/25W	52,3	0,221	4,6
1x 230V/70W	75,1	0,319	6,4
1x 230V/100W	100,8	0,429	8,2
2x 230V/70W	149,6	0,641	11,6

An dieser Stelle schlägt das im Abschnitt 2.3.4 beschriebene Unterrichtskonzept vor, die jeweiligen Quotienten aus P und I zu bestimmen. Alternativ können die Wertepaare direkt in ein Diagramm eingetragen und die Steigung mittels Steigungsdreieck bestimmt werden. Die nachstehende Abbildung 6-13 zeigt letzteres.

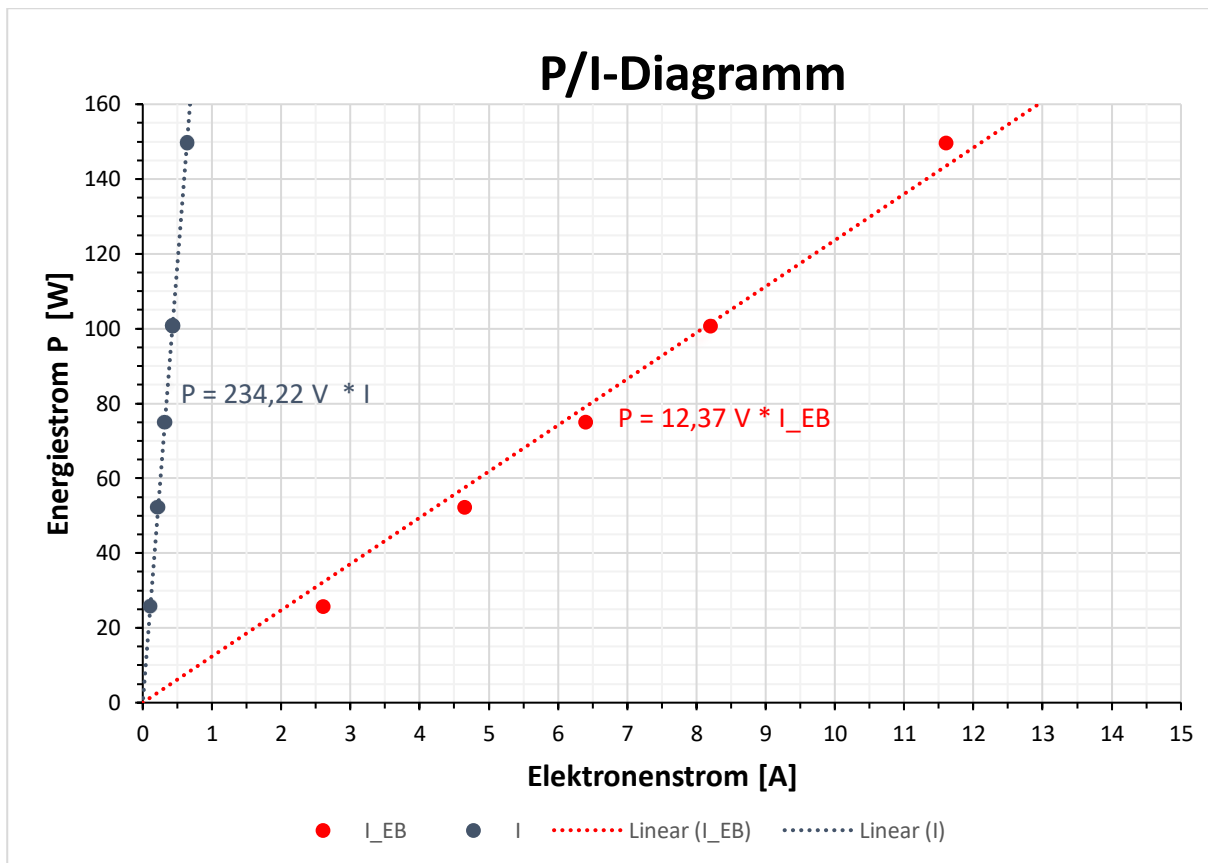


Abbildung 6-13: Energieströme unterschiedlicher Leuchtmittel, aufgetragen über den Elektronenstrom hinter und vor dem Wechselrichter

Wie in Abbildung 6-13 gut zu erkennen ist, wurden für die beiden Messreihen I und I_{EB} lineare Regressionen durchgeführt. Der Nullpunkt wurde dabei als Festpunkt definiert. Für die Regressionen wurde die Geradengleichung bestimmt. Die Steigung für die Messreihe I ist wie zu erwarten in etwa Netzspannung ($U = 234,22 \text{ V}$). Zudem liegen die Messpunkte alle auf der Geraden. Die Zahl 230 sollte den meisten Schülerinnen und Schülern aus vorangegangenen Unterrichtseinheiten bereits bekannt sein. Berechnen sie die einzelnen Quotienten P/I der jeweiligen Messpunkte, so erhalten sie jeweils einen Wert von etwa 230 W/A .

Die Steigung der Messreihe I_{EB} ist mit $U_{EB} = 12,37 \text{ V}$ etwas geringer als erwartet. Die Steigung sollte in etwa 14 V betragen. Die geringere Steigung und die Abweichung der Messpunkte von der Geraden sind auf den Wirkungsgrad des Wechselrichters zurückzuführen. Hierbei ist auch zu erkennen, dass mit steigender Anschlussleistung der Wirkungsgrad des Wechselrichters steigt. Während die ersten drei Messpunkte noch unterhalb der Geraden liegen, liegt der oberste Messpunkt über der Geraden. Der Quotient P/I_{EB} steigt mit jedem Wertepaar. Würde der Elektronen- und Energiestrom an der Elektrobox gemessen werden, so würde sich dieser Fehler korrigieren. Für den Unterricht bedeutet dies, dass die Messungen entweder ausschließlich am Wechselrichter oder an der Elektrobox durchgeführt werden sollten.

Sofern die Schülerinnen und Schüler die Quotienten aus Energie- und Elektronenstrom bestimmen und die Regression wie in Abbildung 6-13 durchgeführt haben, können weitere

Geräte untersucht werden. Die Messpunkte weiterer Betriebsmittel liegen immer auf der Geraden. Wurde zuvor eingeführt, dass Spannungsquellen i.d.R. Konstantspannungsquellen sind, können die Lernenden ableiten, dass die Spannung ein Maß dafür ist, wie hoch der Energiestrom pro Ampere ist, vgl. [1, S. 140]. Hat eine Batterie eine Spannung von 1,5 V, so fließen bei einem Ampere 1,5 W von der Batterie zum Betriebsmittel, vgl. [1, S. 140-141]. Das Energiefahrrad liefert pro Ampere einen Energiestrom von 14 W. Der Wechselrichter liefert pro Ampere einen Energiestrom von etwa 230 W.

Dank des Energiefahrrades ist es so möglich, die Spannung nach $U = P/I$ einzuführen und so ein konkretes Lernziel der Haupt-, Real, und Oberschule zu erfüllen. In den KCs heißt es „*Die Schülerinnen und Schüler identifizieren die el. Spannung U als Verhältnis von el. Energiestromstärke und el. Stromstärke*“ [2], [3], [4]. Dieses Experiment ist zwar auch an einer Steckdose oder einer Batterie durchführbar, das Energiefahrrad steigert jedoch die Erlebnisorientierung und fördert somit das situative Interesse.

6.3.3 Wasser kochen mit dem Energiefahrrad

Die zuvor beschriebenen Versuche lassen sich bereits gut in ein BNE-Konzept integrieren. Die Thematisierung des Wirkungsgrades wurde bereits in 6.2 und 6.3.1 beschrieben. Andere mögliche Versuche für ein BNE-Unterricht wurden bereits im Abschnitt 2.4 beschrieben. Da das Kochen von Wasser die wohl energieaufwändigste Haushaltstätigkeit ist, wird im Folgenden beschrieben, wie sich Wasser mit dem Energiefahrrad kochen lässt. Ziel ist die Verdeutlichung der großen Wärmekapazität von Wasser und der damit verbundene Energieaufwand beim Kochen. Daraus kann dann abgeleitet werden, dass es sinnvoll ist, nur so viel Wasser zu kochen, wie es wirklich notwendig ist. Die Konsequenz soll ein verantwortungsbewusster Umgang mit elektrischer Energie sein.

Im Unterrichtskonzept von Muckenfuss und Walz beschreiben die Autoren, wie mit einem handgetriebenen Generator versucht wird, Wasser zu kochen, vgl. [1, S. 139]. Ziel ist es, 150 ml Wasser zum Sieden zu bringen, um Suppenpulver darin zu lösen. Um die Schülerinnen und Schüler zu motivieren, wird den Lernenden gesagt, dass sie die Suppe am Ende auslöffeln dürfen. Ergebnis ist, dass dies nicht möglich ist, vgl. [1, S. 139].

Im Anschluss an dieses Experiment kann versucht werden, das Wasser mit dem Energiefahrrad zum Kochen zu bringen. Um die Motivation weiter zu erhöhen, empfiehlt es sich, das Suppenpulver durch Instant-Götterspeise zu ersetzen. Auf der Rückseite der Dr. Oetker-Instant-Götterspeise steht, dass für 4 Portionen 500 ml Wasser zum Kochen gebracht werden müssen. M.E. nach würde es an dieser Stelle reichen, die halbe Menge, also nur zwei Portionen herzustellen. Dies bedeutet, dass nur 250 ml zum Kochen gebracht werden müssen. Mit einem Camping-Tauchsieder und dem Energiefahrrad kann dies versucht werden. Benötigt wird dazu der nachfolgende Aufbau, vgl. Abbildung 6-14.

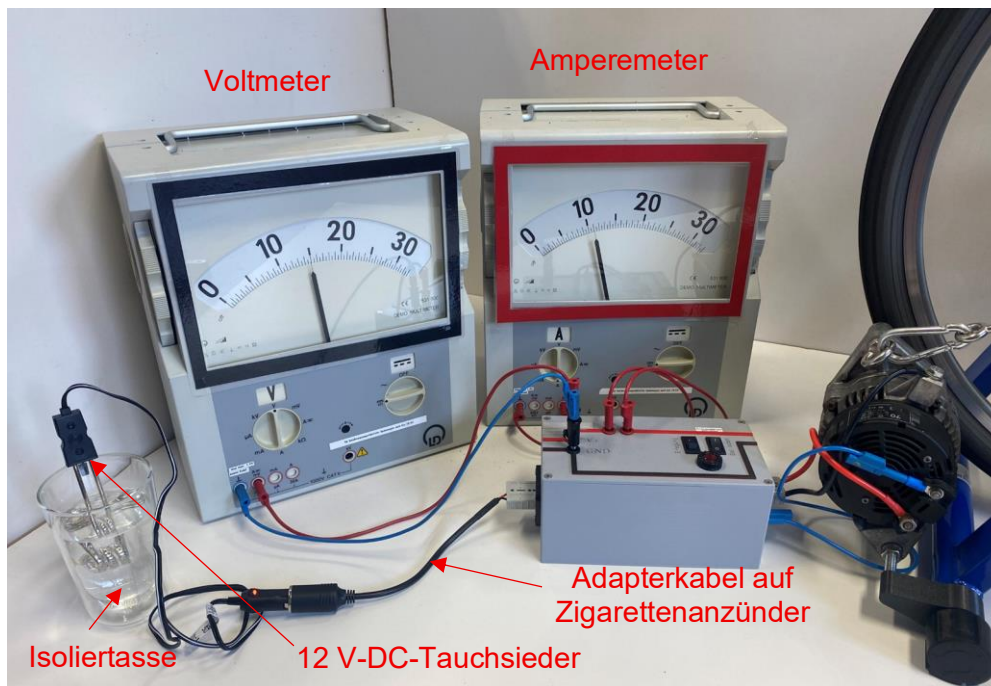


Abbildung 6-14: Versuchsaufbau zum Kochen von 250 ml Wasser

Der in Abbildung 6-14 gezeigte Campingtauchsieder hat eine Nennleistung von 108 W und eignet sich gut für diesen Versuch. Aufgrund der höheren Spannung strömt ein Energiestrom von etwa 150 W vom Energiefahrrad in das Wasserglas. Der Tauchsieder ist als Zubehör im Anhang I aufgeführt. Ergänzt werden kann der Versuchsaufbau noch durch ein Thermometer.

Den Lernenden wird nun gesagt, dass sie dafür sorgen müssen, dass Wasser kocht. Ergebnis ist, dass nach einiger Zeit und mit zahlreichen Schülerinnen und Schülern das Wasser zum Kochen gebracht werden kann. Es bedarf also sehr vieler „elektrischen Sklaven“. Da zwei Portionen Götterspeise für eine Klasse nicht reichen, kann nun die zweite Hälfte auf einer 230 V-Kochplatte zubereitet werden. Die Kochplatte schafft es an einer Netzsteckdose innerhalb weniger Minuten, die 250 ml zum Kochen zu bringen. Es können ohne Anstrengungen weitere Portionen Götterspeise gekocht werden. Die Götterspeise kann in den Kühlschrank gestellt und in der nächsten Physikstunde gegessen werden.

Weiterführend kann die Bedeutung der Spannung für den Energiestrom nach Abschnitt 6.3.2 behandelt werden. Auch energiepolitische Betrachtungen und Diskussionen würden sich im Nachgang des Versuchs anbieten. Beispielsweise kann der Energieaufwand beim Wäschewaschen thematisiert werden. Auch ökonomische Betrachtungen bieten sich im Nachgang des Experimentes an. Die Autoren Muckenfuss und Walz geben hierfür einige gute Beispiele, vgl. [1, S. 142-146].

6.4 Kostenanalyse

Zentrales Ziel der vorliegenden Arbeit ist, dass das Energiefahrrad kostengünstig nachbaubar ist. Die für einen Nachbau benötigten Materialien sind bis zur kleinsten Schraube in den

Stücklisten (Anhang D bis Anhang G) aufgeführt. Die Preise sind in den Stücklisten nicht aufgeführt, um Verwirrungen bei Preisänderungen zu vermeiden.

Die im Inhalt des USB-Sticks (Anhang A) angehängte Stückliste ist umfangreicher und zeigt auch aktuelle (08.10.2025) Preise. Um den Umfang zu reduzieren, werden im Folgenden die Zwischensummen für: Mechanik, Lichtmaschine, Wechselrichter, Elektrobox sowie Gehäuse und 3D-Druck aufgeführt. In der Zwischensumme für das Gehäuse sind 20 € für 3D-Druck-Filament inkludiert. Die Preise sind kaufmännisch auf ganze Euros gerundet. Da der Shunt und Zubehör optional sind, fallen diese aus der Kostenanalyse heraus. Die nachstehende Tabelle 6-8 zeigt die Zwischen- und die Gesamtsumme für das Energiefahrrad.

Tabelle 6-8: Kostenrechnung für das Energiefahrrad

Kategorie	Preis
Mechanik	71 €
Lichtmaschine	100 €
Wechselrichter	48 €
Elektrobox	121 €
Gehäuse und 3D-Druck	32 €
Gesamtsumme	372 €

Wird davon ausgegangen, dass die Lichtmaschine kostenlos bei einem Verwerter beschafft werden kann, so beträgt die Summe nur noch 272 €. Dieser Preis ist vermutlich für die meisten Schulen finanzierbar und kann daher als Erfolg der mit dieser Arbeit verfolgten Bemühungen betrachtet werden. Dieser Erfolg wird deutlicher, wenn das Energiefahrrad mit dem Preis des Oekotrainers verglichen wird.

Um die Kosten für das Energiefahrrad mit dem des Oekotrainers vergleichen zu können, wird das Zubehör zum Oekotrainer hinzugerechnet, welches notwendig ist, um die gleichen Funktionen zu erhalten. Die nachstehende Tabelle 6-9 zeigt diese Preise nach aktuellem Stand (08.10.2025). Die Preise können unter <https://oekotrainer.de/> nachgesehen werden.

Tabelle 6-9: Kostenrechnung für den Oekotrainer

Kategorie	Preis
Oekotrainer	450 €
PowerAnalyzer	275 €
Spannungsregler	154 €
Wechselrichter	48 €
Gesamtsumme	927 €

Werden nun die beiden Gesamtsummen miteinander verglichen, so fällt auf, dass das Energiefahrrad deutlich günstiger ist. Genau genommen ist das Energiefahrrad 555 € günstiger als der Oekotrainer. Dieser Preisvorteil rechtfertigt m.E. nach den Aufwand eines Nachbaus. Immerhin lassen sich mit den Kosten für einen Oekotrainer etwa 2,6 Energiefahrräder bauen.

Gegen den Bau eines Energiefahrrades und für den Oekotrainer könnte sprechen, dass das Energiefahrrad keine drehzahlabhängige Spannung ausgeben kann. Dies ist allerdings nur bedingt richtig. Im Abschnitt 6.1.2 wurde bereits gezeigt, dass eine Lichtmaschine so manipuliert werden kann, dass diese eine drehzahlabhängige Spannung ausgeben kann. Da nicht davon ausgegangen werden kann, dass jede Lehrkraft in der Lage ist eine Lichtmaschine entsprechend umzubauen, muss eine Alternative gefunden werden.

Da es Lichtmaschinen gibt, die einen externen Regler haben, könnten diese ggf. ohne Regler betrieben werden. Ein Betrieb mit einer unregelmäßigen Lichtmaschine wurde in dieser Arbeit nicht vollumfänglich getestet. Es kann jedoch gezeigt werden, dass die manipulierte Lichtmaschine in der Lage ist, spannungsabhängiges Zubehör des Oekotrainers zu betreiben. Die nachstehende Abbildung zeigt, wie die manipulierte Lichtmaschine das HitTheBlub-Zubehör des Oekotrainers betreibt.



Abbildung 6-15: Betrieb einer ungeregelten Lichtmaschine am Zubehör des Oekotrainers

Die Abbildung 6-15 soll weitestgehend unkommentiert bleiben, da der Betrieb nur mit einigem Aufwand möglich ist. Untersuchungen mit ungeregelten Lichtmaschinen könnten Bestandteil folgender Arbeiten sein.

Insgesamt konnte gezeigt werden, dass das Energiefahrrad deutlich kostengünstiger ist als handelsübliche Alternativprodukte. Das Energiefahrrad hat zwar einen schlechteren Wirkungsgrad (vgl. 6.2), bietet jedoch andere Vorteile. Beispielsweise lassen sich anders als beim Oekotrainer handelsübliche Messgeräte an der Elektrobox anschließen.

6.5 Prüfung der Nachbaubarkeit

Im Zuge dieser Arbeit wurde das Energiefahrrad durch eine Lehrkraft am Graf-Adolf-Gymnasium in Tecklenburg nachgebaut. Die Lehrkraft, die das Fahrrad nachgebaut hat, unterrichtet die Fächer Mathematik und Physik. Zudem besitzt die Lehrkraft eine Zusatzqualifikation im Bereich des Technikunterrichts. Diese Lehrkraft wurde ausgewählt, da sie bereits einige handwerkliche Erfahrungen mitbringt, jedoch keine handwerkliche Ausbildung besitzt. Die Lehrkraft entspricht somit einer Person mit durchschnittlichen heimwerklichen Fähigkeiten. Der Nachbau des Energiefahrrades ist für Personen ohne jegliche handwerkliche Erfahrungen nicht zu empfehlen.

Damit die Lehrkraft das Fahrrad nachbauen konnte, wurde ihr zuvor ein Auszug aus dieser Arbeit ausgehändigt. Konkret verfügte die Lehrkraft vor dem Bau über die Kapitel 3, 4 und 5.

Die Lehrkraft hat diese Kapitel zuvor gelesen und sich so mit der Konstruktion vertraut gemacht. Da die Schule noch über keinen 3D-Drucker verfügte, wurden ihr alle Komponenten von der Universität Osnabrück gespendet. Eine Beurteilung über die Komplexität des 3D-Druckes ist daher nicht Bestandteil dieses Abschnitts. Die Umsetzung erfolgte im Technik Fachraum der Schule, welcher über eine standardmäßige Ausstattung verfügte. Eine Crimpzange für isolierte Kabelschuhe musste angeschafft werden. Eine Lichtmaschine wurde von einem örtlichen Verwerter beschafft. Zur Prüfung der Nachbaubarkeit wurde die Lehrkraft bei der Fertigung beobachtet, ohne ihr Hilfestellung zu geben. Die Fertigung des Shunts wurde aufgrund von Zeitmangel nicht durchgeführt.

Nachdem alle Materialien und Werkzeuge zusammengetragen wurden, begann die Lehrkraft mit der mechanischen Konstruktion. Diese funktionierte problemlos und konnte innerhalb von 90 min durchgeführt werden. Diese kurze Fertigungsdauer war sicherlich nur möglich, da die Lehrkraft zuvor die Anleitung studierte. Es zeigt jedoch auch, wie simpel die mechanische Konstruktion gehalten ist.

Bei der Bestimmung der Lichtmaschinen-Drehrichtung haderte die Lehrkraft. Sie war zwar in der Lage, die Drehrichtung korrekt zu bestimmen, fragte diese jedoch mit großer Unsicherheit nach. Da die Unsicherheit mit einigen zusätzlichen Informationen verschwand, wurden umgehend entsprechende Anpassungen im Abschnitt 5.1 vorgenommen.

Bei der elektrotechnischen Umsetzung gab es mehrere Schwierigkeiten. Das Lötten der großen Anderson-Stecker stellte sich als schwierig heraus. Aufgrund der hohen Wärmekapazität der großen Kontakte schafften die leistungsschwachen LötKolben es nicht, diese ausreichend zu erhitzen. Dies gelingt erst recht nicht, wenn die Kontakte in einem Schraubstock eingespannt werden. Nachdem die Lehrkraft das Video <https://www.youtube.com/watch?v=6ljG6-PxNBs> schaute, gelang es mit einem Gasbrenner, die Kontakte zu verlöten. Das Video ist im Abschnitt 5.3 ebenfalls verlinkt.

Ein weiteres Problem bei der Fertigung der elektrotechnischen Konstruktion bestand darin, dass die Lehrkraft zunächst glaubte, die Leitungslängen in der Explosionszeichnung (Abbildung 5-27) seien identisch mit realen Leitungslängen. Dies ist jedoch nicht der Fall. Bei der Abbildung 5-27 wurden die Leitungslängen so dimensioniert, dass sie ein zusammenhängendes Bild ergeben. Die Leitungslängen müssen individuell an bzw. in der Elektrobox angepasst werden. Entsprechende Hinweise wurden ebenfalls im Abschnitt 5.3 übernommen.

Abgesehen von den zuvor beschriebenen Problemen war die Lehrkraft in der Lage, die Elektrobox herzustellen und schloss alle Leitungen fehlerfrei an. Für die Fertigung wurden etwa 120 min benötigt. Für den Wechsel der Laufrolle, den Anschluss der Lichtmaschine und des Wechselrichters sowie für Aufräumarbeiten wurden weitere 60 min benötigt. Hierbei kam es zu keinen weiteren Problemen.

Bei der abschließenden Erprobung stellte sich heraus, dass das Energiefahrrad nicht funktioniert. Nach einiger Zeit der Fehlersuche konnten keine Probleme und Fehler in der Elektrobox gefunden werden. Es konnten keine Fehlerquellen gefunden werden, so dass beschlossen wurde, eine andere Lichtmaschine zu beschaffen.

Glücklicherweise konnte schnell eine Bosch-0-986-045-320-Lichtmaschine aus einem VW-Polo beschafft werden. Diese funktionierte elektrotechnisch und es konnten Betriebsmittel an die Elektrobox angeschlossen und betrieben werden. Jedoch verfügte die genannte Lichtmaschine über eine andere Bauform mit etwas anderer Schwenkarmkonstruktion. Für den Betrieb dieser Lichtmaschine wären geringfügige mechanische Anpassungen notwendig gewesen. Es wurde sich dazu entschlossen, eine der beiden empfohlenen Lichtmaschinen zu beschaffen, vgl. Anhang E. Mit der neuen Lichtmaschine funktionierte das Energiefahrrad tadellos. Es ist daher zu ratsam, ausschließlich eine der beiden empfohlenen Lichtmaschinen zu verwenden.

Das Ergebnis war abschließend zufriedenstellend und die Lehrkraft setzte das Energiefahrrad bereits im Unterricht ein. Insgesamt wurden etwa 5 Stunden ohne 3D-Druck für die Fertigung benötigt. Werkzeuge mussten bis auf die Crimpzange keine beschafft werden. Es ist angesichts der beschriebenen Probleme jedoch dringend zu empfehlen, die Anleitung vor Beginn der Fertigung zu lesen. Erfahrungen im 3D-Druck sind ebenfalls Voraussetzung. Falls eine Schule an einem Nachbau interessiert ist und keinen 3D-Drucker besitzt, können benachbarte Schulen ggf. aushelfen.

7 Fazit

In diesem Kapitel wird das Energiefahrrad von der Idee über die Konzeptionierung und Fertigung bis hin zur Erprobung und Analyse reflektiert. Die Ergebnisse werden zusammengefasst und es wird ein Ausblick für mögliche weitere Schritte gegeben.

7.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Zum Beginn dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass es didaktisch wertvoll sein könnte, ein kostengünstiges und einfach nachzubauendes Energiefahrrad zu entwickeln. Dieses soll es Schülerinnen und Schülern ermöglichen, Energie physiologisch zu erfahren. Durch die einfache Nachbaubarkeit und den günstigen Preis wird es auch finanziell schlechter dargestellten Schulen ermöglicht, den Zugang zu einem Energiefahrrad zu erhalten. Denn handelsübliche Energiefahrräder sind meist kostenintensiv, haben sicherheitstechnische Schwierigkeiten oder sind didaktisch schlecht geeignet. Vorhandene Nachbaukonzepte sind technisch aufwändig, schlecht dokumentiert oder unpraktikabel. Diese Lücken zu schließen und ein didaktisch wertvolles Energiefahrrad zu entwickeln, ist Aufgabe dieser Arbeit gewesen. Neben der Entwicklung waren die didaktische Einordnung, das Prototyping und die Erstellung eines Nachbaukonzepts zentrale Aufgaben.

Didaktischer Ausgangspunkt für das Energiefahrrad war das Unterrichtskonzept „*Neue Wege im Elektrikunterricht*“ von Muckenfuss und Walz aus dem Jahr 1997, vgl. [1]. Dieses Unterrichtskonzept stellt die energieübertragende Funktion elektrischer Kreisläufe in den Mittelpunkt. Dabei sollen die elektrischen Größen nicht abstrakt über quantitative Zusammenhänge eingeführt, sondern physiologisch erfahrbar gemacht werden. Handlungs- und Erlebnisorientierung sowie ein durchgängiger Alltagsbezug sind Leitlinien des Unterrichtskonzepts. Um die elektrischen Größen erfahrbar zu machen, nutzten die Autoren häufig handgetriebene Generatoren (DynaMots). Diese Idee greift das Energiefahrrad auf und ermöglicht das Erfahren größerer elektrischer Leistungen.

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wurden die technischen Anforderungen an ein solches Energiefahrrad erarbeitet. Grundlage dieser Erarbeitung war die vorangegangene didaktische Analyse. Auch die Betrachtung bereits bestehender Energiefahrräder wie des Oekotainers halfen bei der Anforderungsanalyse. Zudem wurden die Problematiken bei bestehenden Nachbaukonzepten durchleuchtet und Literatur zur Sicherheit im Schulunterricht herangezogen. Aus den Betrachtungen wurde geschlossen, dass ein modulares Energiefahrrad mit konstanter Ausgangsspannung notwendig ist, welches in der Lage ist, elektrische Betriebsmittel bis 300 W zu betreiben. Gleichzeitig soll das Energiefahrrad eine nicht berührungsgefährliche Spannung ausgeben und auch vor mechanischen Quetschungen warnen.

Auf Basis der Anforderungsanalysen entstand die Idee, eine KFZ-Lichtmaschine an einen handelsüblichen Fahrradrollentrainer zu montieren. Die Lichtmaschine sollte ohne Riemen und Kette direkt vom Hinterrad angetrieben werden. Die Lichtmaschine wurde dabei als gut geeigneter Generator identifiziert, da diese selbsterregte Drehstromgeneratoren sind, die bereits über einen internen Spannungs-Regler und Gleichrichter verfügen. Zudem sind Lichtmaschinen leistungsstark, robust und kostengünstig. Der Rollentrainer ermöglicht das Einspannen der meisten handelsüblichen Fahrräder. Ein 12 V-DC/230 V-AC-Wechselrichter erlaubt den Anschluss von Haushaltsgeräten mit Schutzkontaktstecker.

Für die mechanische Konstruktion wurde sich auf einfache baumarktübliche Materialien beschränkt. Die Lichtmaschine wird über eine Gewindestange an den Rollentrainer geschraubt. Mithilfe eines Seilspanners wird die Lichtmaschine dann an das Hinterrad gepresst. Insgesamt muss für die mechanische Konstruktion nur zwei Mal gebohrt werden. 3D-gedruckte Abstandhalter sorgen für mehr Stabilität und einen optischen Abschluss. Eine 3D-gedruckte Laufrolle optimiert die mechanische Konstruktion noch weiter.

Im elektrotechnischen Teil dieser Arbeit wurde ein Betriebsstromkreis entwickelt, der es ermöglicht, die elektrotechnischen Größen über einfache Laborbuchsen zu messen. So können auch den Schülerinnen und Schülern bekannte Messgeräte verwendet werden. Ein Kondensator glättet die Gleichspannung und eine TVS-Schutzdiode eliminiert Spannungsspitzen im Betriebsstromkreis. Über Hochstromstecker wird die Lichtmaschine mit dem Betriebsstromkreis verbunden. Eine Hochstromsteckdose an der Ausgangsseite erlaubt den Anschluss leistungsstarker Betriebsmittel. Der Vorerregerstromkreis sorgt mit einer kleinen 12 V-Batterie für die Vorerregung des Elektromagneten in der Lichtmaschine. Zudem ist ein Leuchtmittel verbaut, welches die Vorerregung anzeigt. Über zwei Schalter lassen sich die Vorerregung einschalten und die Batterie laden. Um die elektrotechnischen Komponenten in einem Gehäuse (Elektrobox) unterzubringen, wurde ein solches entwickelt. Dieses kann mittels 3D-Drucker hergestellt werden.

Die praktische Fertigung des Energiefahrrades wurde in Form einer Nachbauanleitung geschrieben. Während der Herstellung des Energiefahrrades wurden Fotos der einzelnen Arbeitsschritte gemacht und dokumentiert. Die einzelnen Arbeitsschritte sind kleinschrittig beschrieben und werden durch die Fotos weiter verdeutlicht. Die notwendigen Werkzeuge und Materialien sind ebenfalls aufgelistet. Insgesamt funktionierte die Konstruktion durch die intensive vorangegangene Planung gut, so dass ein möglichst einfaches Nachbaukonzept entstanden ist.

Während der Erprobung konnte festgestellt werden, dass der gebaute Prototyp mechanisch gut funktioniert. Einzig etwas Verschleiß an der 3D-gedruckten Laufrolle nach zahlreichen Tests konnte erkannt werden. Elektrotechnisch konnte gezeigt werden, dass Kondensator und Schutzdiode funktionieren und ihren Zweck erfüllen. Zudem konnte bestätigt werden, dass

Kondensator und Diode den Beanspruchungen standhalten. In mehreren Worts-Case-Tests wurde festgestellt, dass selbst bei einem Reglerausfall die Ausgangsspannung nicht berührungsgefährlich wird. Das Energiefahrrad ist somit für alle Jahrgangsstufen zugelassen. Es müssen keine Laborleitungen und Betriebsmittel mit Basisschutz-Isolierung verwendet werden. Die Ausgangsspannung des Energiefahrrades beträgt in etwa 14 V – DC. Der Wechselrichter kann problemlos an das Energiefahrrad angeschlossen werden. Dieser liefert 230 V – AC Netzspannung. Beim Experimentieren mit Netzspannung muss schutzisoliertes Laborequipment verwendet werden.

Weitere Tests haben ergeben, dass das Energiefahrrad einen schlechten Wirkungsgrad von etwa 30% aufweist. Dies ist auf der einen Seite Herausforderung und auf der anderen Seite Chance, genau diesen im Unterricht zu thematisieren. Weiterführend konnte gezeigt werden, dass das Energiefahrrad funktioniert und den Betrieb von kleineren Haushaltsgeräten sowie von Campingequipment ermöglicht. So kann Schülerinnen und Schülern elektrische Energie nähergebracht werden, indem Sie diese selbst erzeugen. Diese Möglichkeit fördert das Verständnis für Energie und ermöglicht einen von Muckenfuss und Walz geforderten handlungs- und erlebnisorientierten Elektrikunterricht in einem sinnstiftenden Kontext. Das Energiefahrrad ermöglicht Unterrichtseinheiten zur:

- Differenzierung des Elektronen- und Energiestroms
- Verdeutlichung der Energiemenge 1 kWh
- Demonstration von Energieumwandlungsketten
- Definition der Spannung über $U = P/I$
- Thematisierung des Wirkungsgrades

Mit Hinblick auf die curriculare Leitlinie Energie und die Bildung für nachhaltige Entwicklung (BNE) eröffnet das Energiefahrrad zahlreiche Möglichkeiten. Die Lernenden können Energieumwandlungsketten praktisch erleben und lernen Energiemengen einzuordnen. So können die Schülerinnen und Schüler ihren eigenen Energiebedarf reflektieren und einen verantwortungsbewussten Umgang mit elektrischer Energie erlernen.

Abschließende Betrachtungen ergaben, dass das Energiefahrrad mit etwa 372 € kostengünstig herzustellen ist. Wird davon ausgegangen, dass die Lichtmaschine bei einem Verwerter kostenlos zu beschaffen ist, liegt der Preis bei nur noch 272 €. Damit ist das Energiefahrrad deutlich günstiger als handelsübliche Alternativprodukte. Die Prüfung der Nachbaubarkeit zeigte wenig Probleme. Schwachstellen in der Bauanleitung wurden bereits angepasst. Jedoch sollten unbedingt nur die in dieser Arbeit empfohlenen Lichtmaschinen verwendet werden. Das Funktionieren mit anderen Lichtmaschinen ist wahrscheinlich, jedoch nicht garantiert. Die Menge an unterschiedlichen Lichtmaschinen mit unterschiedlichen Bauformen ist ein noch ungelöstes Problem.

Insgesamt konnte gezeigt werden, dass das entwickelte Energiefahrrad den Anforderungen entspricht. Sowohl technisch als auch didaktisch scheint das Energiefahrrad gelungen. Das in dieser Arbeit entwickelte Energiefahrrad ist sicher, didaktisch wertvoll, kostengünstig und mit einigem handwerklichen Talent nachbaubar.

7.2 Ausblick und weitere Schritte

Es konnte gezeigt werden, dass das Energiefahrrad den gestellten Anforderungen entspricht. Es besteht jedoch die Möglichkeit, das hier entwickelte Konzept weiterzuentwickeln. Beispielsweise ließe sich die Lichtmaschine durch eine moderne, effizientere permanenterregte Lichtmaschine austauschen. Diese sind zwar noch nicht in der breiten Fahrzeugmasse vertreten, spielen jedoch in Zukunft eine wahrscheinlich immer größere Rolle. Auch andere Generator-Typen könnten getestet und evaluiert werden. Zudem besteht die Möglichkeit, Microcontroller mit entsprechender Sensortechnik in die Elektrobox zu integrieren. Dieser könnte eine einfache, kostengünstige Messwerterfassung ermöglichen. Der Mikrocontroller berücksichtigt den dynamischen Wirkungsgrad und berechnet die tatsächlich geleistete Arbeit. Die Anzeige könnte über Bluetooth, W-Lan oder ein kleines Display erfolgen. Die Energieversorgung des Microcontrollers wäre über die Batterie in der Elektrobox möglich.

Didaktisch bietet das Energiefahrrad zahlreiche Möglichkeiten. Es könnten konkrete Unterrichtssituationen geplant und evaluiert werden. Eine empirische Untersuchung zur Lernwirksamkeit des Energiefahrrades wäre ebenfalls denkbar. Es könnte untersucht werden, ob das erlebnisorientierte Erzeugen von Energie zu einem tieferen, langanhaltendem Verständnis führt. Auch die Auswirkungen des Energiefahrrades auf das situative Interesse im Elektrikunterricht sind möglicher Gegenstand von weiteren Untersuchungen. Ein gesteigertes Fach- oder Sachinteresse könnte ggf. die Folge sein.

Es wäre zudem wünschenswert, aktiv Werbung für das Energiefahrrad zu machen, um möglichst vielen Schülerinnen und Schülern einen erlebnisorientierten Elektrikunterricht anbieten zu können. Die Verbreitung der in dieser Arbeit angefertigten Materialien obliegt der Universität Osnabrück und dem Fachbereich der Physikdidaktik. Es wäre schön, wenn diese Arbeit viele Menschen erreicht und das Energiefahrrad zahlreich nachgebaut werden würde.

IV. Literatur

- [1] H. Muckenfuß und A. Walz, Hg. *Neue Wege im Elektrikunterricht: Vom Tun über die Vorstellung zum Begriff*, 2. Aufl. (Unterrichtshilfen Naturwissenschaften). Köln: Aulis-Verl. Deubner, 1997.
- [2] Niedersächsisches Kultusministerium. "Kerncurriculum für die Hauptschule Schuljahrgänge 5-10 Naturwissenschaften." Zugriff am: 15. Mai 2025. [Online.] Verfügbar: <http://www.cuvo.nibis.de/>
- [3] Niedersächsisches Kultusministerium. "Kerncurriculum für die Oberschule Schuljahrgänge 5 - 10 Naturwissenschaften." Zugriff am: 15. Mai 2025. [Online.] Verfügbar: <http://www.cuvo.nibis.de/>
- [4] Niedersächsisches Kultusministerium. "Kerncurriculum für die Realschule Schuljahrgänge 5 – 10 Naturwissenschaften." Zugriff am: 15. Mai 2025. [Online.] Verfügbar: <http://www.cuvo.nibis.de/>
- [5] Niedersächsisches Kultusministerium. "Kerncurriculum für das Gymnasium Schuljahrgänge 5-10 Naturwissenschaften." Zugriff am: 15. Mai 2025. [Online.] Verfügbar: <http://www.cuvo.nibis.de/>
- [6] Niedersächsisches Kultusministerium. "Kerncurriculum für das Gymnasium – gymnasiale Oberstufe die Gesamtschule – gymnasiale Oberstufe das Berufliche Gymnasium das Abendgymnasium das Kolleg Physik." Zugriff am: 15. Mai 2025. [Online.] Verfügbar: <http://www.cuvo.nibis.de/>
- [7] Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV). "Sicher experimentieren mit elektrischer Energie in Schulen: Grundlagen – Gefährdungsbeurteilung – Experimentieren." BG/GUV-SI. Zugriff am: 16. Mai 2025. [Online.] Verfügbar: <https://publikationen.dguv.de/widgets/pdf/download/article/2603>
- [8] Sinus Markt- und Sozialforschung GmbH. "Fahrrad-Monitor Deutschland 2021: Ergebnisse einer repräsentativen Online-Befragung." Zugriff am: 20. Mai 2025. [Online.] Verfügbar: https://www.bmv.de/SharedDocs/DE/Anlage/StV/fahrrad-monitor-2021.pdf?__blob=publicationFile
- [9] Sächsische Mitmach-Fonds, "Stroom erzeugen mit einem Fahrradgenerator," 2020. Zugriff am: 28. Mai 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.mitmachfonds-sachsen.de/stroom-erzeugen-mit-einem-fahrradgenerator/>
- [10] CorEdu, "Workshop Fahrradgenerator. Berufsorientierung für nachhaltige Entwicklung praktisch," Zugriff am: 28. Mai 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.youtube.com/watch?v=UA6krEKDno4>
- [11] Baudermann Tim, "Strom erzeugen mit dem Fahrrad - Fahrradkino und Oekotrainer!," Markkleeberg. [Online]. Verfügbar unter: <https://oekotrainer.de/>
- [12] Bernhard Lang Sportmarketing & Eventsupport, "Herzlich Willkommen bei Bernhard Lang Sportmarketing & Eventsupport," Windischeschenbach. Zugriff am: 28. Mai 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.fahrradsimulator.de/>
- [13] Baudermann Tim, "PowerAnalyzer," Zugriff am: 28. Mai 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://oekotrainer.de/PowerAnalyzer>
- [14] Kultusministerkonferenz. "Richtlinie zur Sicherheit im Unterricht (RiSU): Empfehlung der Kultusministerkonferenz. Beschluss der KMK vom 09.09.1994 i. d. F. vom 21.09.2023." Zugriff am: 22. Mai 2025. [Online.] Verfügbar: https://www.kmk.org/fileadmin/veroeffentlichungen_beschluesse/1994/1994_09_09-Sicherheit-im-Unterricht.pdf
- [15] Freie und Hansestadt Hamburg. "Förderung der Motivation und der Selbstständigkeit im naturwissenschaftlichen Anfangsunterricht. Klasse 7/8. Physik im Kontext (PiKo): Bau eines elektrifizierten Zimmermodells (Elektrik 1)." [Online.] Verfügbar: https://www.schulphysik.de/downloads/QI/PiKo7_NWQuali.pdf
- [16] H. Muckenfuß, "Vorstellungen zu Energieströmen als Grundlage in der Elektrizitätslehre. Ein pädagogisch begründetes Unterrichtskonzept," [Online]. Verfügbar unter: https://www.physikdidaktik.uni-osnabrueck.de/fileadmin/user_upload/ptd08/ptd2008_vortragsfolien_muckenfuss.pdf
- [17] H. Muckenfuß. "Elektrizitätslehre: Ein pädagogisch begründetes Unterrichtskonzept. Begriffsbildung mit Hilfe handgetriebener Generatoren: Manuskript eines Vortrages, der vom Verfasser im 5. Oktober 1994 auf einer Tagung in Heidelberg." Zugriff am: 26. Mai

2025. [Online.] Verfügbar: <http://www.mathe-physik.de/physik/klasse%206%208/Klasse%208/Elektrizitaet/Material/elektrik%20muck.PDF>
- [18] H. Schecker, T. Wilhelm, M. Hopf und R. Duit, Hg. *Schülervorstellungen und Physikunterricht: Ein Lehrbuch für Studium, Referendariat und Unterrichtspraxis*, 1. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018. [Online]. Verfügbar unter: <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-epflicht-1607336>
- [19] E. Kircher, R. Girwidz und P. Häußler, *Physikdidaktik: Theorie und Praxis*, 3. Aufl. (SpringerLink Bücher). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015.
- [20] Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen, *Kernlehrplan für die Gesamtschule – Sekundarstufe I in Nordrhein-Westfalen: Naturwissenschaften: Biologie, Chemie, Physik*, 2013.
- [21] P. Häußler, L. Hoffmann, R. Langeheine, J. Rost und K. Sievers, "Qualitative Unterschiede im Interesse an Physik und Konsequenzen für den Physikunterricht," *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, S. 57–69.
- [22] E. Kircher, *Physikdidaktik: Theorie und Praxis*, 2. Aufl. (Springer-Lehrbuch). Berlin: Springer, 2010. [Online]. Verfügbar unter: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=3064812>
- [23] H. Muckenfuß, *Lernen im sinnstiftenden Kontext: Entwurf einer zeitgemäßen Didaktik des Physikunterrichts* (Zugl.: Kurzfassung von: Weingarten, Pädag. Hochsch., Diss., 1995), 1. Aufl. Berlin: Cornelsen, 2006.
- [24] L. Hoffmann, P. Häußler und M. Lehrke, "Die IPN-Interessenstudie Physik," Kiel, Rep. IPN 158, 1998.
- [25] H.-O. Camesin, J. Kahle, U. Konrad, T. Trumme und L. Witte, *Universum Physik*, 9. Aufl. Berlin: Cornelsen, 2015.
- [26] *Physik für Gymnasien: Sekundarstufe I*, 1. Aufl. Berlin: Cornelsen, 2007.
- [27] H.-H. Kremer, "Handlungs- und Fachsystematik im Lernfeldkonzept," *bwp@ Berufs- und Wirtschaftspädagogik*. Zugriff am: 11. Juni 2025. [Online.] Verfügbar: https://www.bwpat.de/ausgabe4/kremer_bwpat4.shtml
- [28] MLV GmbH Mitteldeutscher Lehrmittelvertrieb, "Demonstrations-Gerätesatz „DynaMot“,“ Thale. Zugriff am: 26. Juni 2025. [Online]. Verfügbar unter: http://www.mlv-gmbh.de/epages/MLV-GmbH.mobile/de_DE/;ClassicView=1?ObjectPath=/Shops/MLV-GmbH/Products/54852
- [29] Johannes Gutenberg-Universität Mainz – Institut für Physik der Atmosphäre, "BNE – Bildung für Nachhaltige Entwicklung am Institut für Physik der Atmosphäre," Mainz, 2024. Zugriff am: 12. Juni 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bne-portal.de/SharedDocs/Publikationen/de/bne/roadmap-zur-umsetzung-des-weltaktionsprogramms.pdf?__blob=publicationFile&v=4
- [30] UNESCO, *UNESCO-Roadmap zur Umsetzung des Weltaktionsprogramms Bildung für nachhaltige Entwicklung*, 4. Aufl. Bonn: Dt. UNESCO-Kommision, 2016.
- [31] Engagement Global gGmbH, "Ziel 7: Bezahlbare und saubere Energie – 17 Ziele für nachhaltige Entwicklung," Zugriff am: 12. Juni 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://17ziele.de/ziele/7.html>
- [32] Engagement Global gGmbH, "Ziel 13: Umgehend Maßnahmen zur Bekämpfung des Klimawandels – 17 Ziele für nachhaltige Entwicklung," Zugriff am: 12. Juni 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://17ziele.de/ziele/13.html>
- [33] M. Kommert, "Naturwissenschaften/Sachunterricht," *Fördermagazin Sekundarstufe 1*.
- [34] R. Duit, "Energie. Ein zentraler Begriff der Naturwissenschaften und des naturwissenschaftlichen Unterrichts," *Naturwissenschaften im Unterricht. Physik*, S. 4–7.
- [35] co2online gGmbH, "Stromspiegel für Deutschland 2025," Berlin, 2025. Zugriff am: 13. Juni 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.stromspiegel.de/fileadmin/ssi/stromspiegel/Downloads/stromspiegel-flyer-2025-web.pdf>
- [36] M. Kittelmann, L. Adolph, A. Michel, R. Packroff, M. Schütte und S. Sommer. "Handbuch Gefährdungsbeurteilung." Zugriff am: 20. Juni 2025. [Online.] Verfügbar: <https://www.baua.de/gefaehrungsbeurteilung>
- [37] Ultrasport / Summary GmbH, "Bedienungsanleitung Ultrasport Fahrradrollen Trainer (Modell: 330900000027): Bike Trainer," Itzehoe.

- [38] G. Kiefer, *VDE 0100 und die Praxis: Wegweiser für Anfänger und Profis*, 10. Aufl. Berlin, Offenbach: VDE-Verl., 2001.
- [39] *Unfallverhütungsvorschrift Elektrische Anlagen und Betriebsmittel*, Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV), Berlin, 2005. [Online]. Verfügbar unter: <https://publikationen.dguv.de/widgets/pdf/download/article/1457>
- [40] fahrrad.de Bikester GmbH, "Kinderfahrrad Berater: Die optimale Kinderradgröße finden," Stuttgart. Zugriff am: 24. Juni 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.fahrrad.de/pages/kaufberatung-kinderfahrrad>
- [41] U. Adler, Hg. *Autoelektrik, Autoelektronik*, 3. Aufl. Braunschweig: Vieweg, 1998.
- [42] Robert Bosch GmbH, Hg. *Technische Unterrichtung Generatoren: VDT-UEB301/1*, 1. Aufl. Stuttgart, 1974.
- [43] Europa-Lehrmittel, Hg. *Fachkunde Kraftfahrzeugtechnik*, 31. Aufl. Haan-Gruiten: Europa-Verlag, 2024.
- [44] JZ Car-Solutions, "Klemmenbezeichnung, Anschlüsse der Lichtmaschine (Generator) und Regler für Bosch, Valeo, Hitachi, Magneti Marelli, Motorola etc.," Besigheim. Zugriff am: 15. August 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.lima-shop.de/ratgeber/schaltplan-fuer-den-anschluss-eines-kfz-trennrelais/>
- [45] Tim Baudermann. "Wechselrichter." [Online.] Verfügbar: <https://oekotrainer.de/Wechselrichter>
- [46] Jörg Windolf-von Meding e.K. "TS SERIE PURE SINE WAVE INVERTER: Users Manual." [Online.] Verfügbar: <https://solartronics.de/media/pdf/59/3f/4c/TS-DE80D-DE-EN.pdf>
- [47] Michael Yi. "Bicycle tire and wheel assembly." Zugriff am: 7. August 2025. [Online.] Verfügbar: <https://grabcad.com/library/bicycle-tire-and-wheel-assembly-1>
- [48] Helmut Felder, "Autoelektrik: Generatoren Generatorkennlinien," Wuppertal, 2001. Zugriff am: 11. August 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.fahrzeug-elektrik.de/Edee.htm>
- [49] Jan von linexo, "Fahrrad-Übersetzung: Wie wichtig ist das Drehzahlverhältnis beim Fahrradfahren?," Hannover, 2020. Zugriff am: 12. August 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.linexo.de/magazin/teile-komponenten/fahrrad-uebersetzung-wie-wichtig-ist-das-drehzahlverhaeltnis-beim-fahrradfahren>
- [50] Santafixie, "Trittfrequenz im Radsport: Was ist das und wie den Pedalrhythmus verbessern?," Zugriff am: 12. August 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.santafixie.de/blogde/trittfrequenz-fahrrad/>
- [51] R. Gscheidle, Hg. *Fachkunde Kraftfahrzeugtechnik*, 27. Aufl. (Europa-Fachbuchreihe für Kraftfahrzeugtechnik). Haan-Gruiten: Verl. Europa-Lehrmittel, 2001.
- [52] Hugo Fischer, Thomas Mössner, Marlies Kittelmann, Martin Schatte, Matthias Karl, Stephan Gabriel, Regine Hofert. "Handbuch Gefährdungsbeurteilung - Teil 2: 1 Mechanische Gefährdungen." Zugriff am: 15. August 2025. [Online.] Verfügbar: <https://www.baua.de/DE/Themen/Arbeitsgestaltung/Gefaehrdungsbeurteilung/Handbuch-Gefaehrdungsbeurteilung/Expertenwissen/Mechanische-Gefaehrdungen/Mechanische-Gefaehrdungen.html?view=pdfViewExt>
- [53] FWU Institut für Film und Bild in Wissenschaft und Unterricht gemeinnützige GmbH, "Stromrichtige und Spannungsrichtige Messung," Grünwald. Zugriff am: 21. August 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.leifiphysik.de/elektronik/halbleiterdiode/grundwissen/stromrichtige-und-spannungsrichtige-messung>
- [54] ISABELLENHÜTTE Heusler GmbH KG. "ISA-PLAN® Precision Resistor Type PBV: Spec Sheet R361-1/2 July 97." Zugriff am: 26. August 2025. [Online.] Verfügbar: <https://asset.conrad.com/media10/add/160267/c1/-/en/000447323DS01/datenblatt-447323-isabellenhuette-pbv-001-messwiderstand-001-10-w-l-x-b-x-h-22-x-4-x-17-mm-1-st.pdf>
- [55] Conatex-Didactic Lehrmittel GmbH. "Smart Spannungssensor: Bestellnummer 116.4028 Bedienungsanleitung." Zugriff am: 26. August 2025. [Online.] Verfügbar: https://www.conatex.com/out/media/BADE_1194063.pdf?srltid=AfmBOoq0UkLekWhE-kRMeEC-V-gJwZjtf8hyjINpmEQEJ35fluvzYbRP
- [56] Konstantin Rohé. "Wie viel Watt treten die Profis?: Tour de France Leistungscheck." Zugriff am: 27. August 2025. [Online.] Verfügbar: <https://www.tour-magazin.de/profi-radsport/tour-de-france/tour-de-france-leistungscheck-wie-viel-watt-treten-die-profis/>

- [57] Anderson Power Products. "SB® 50 Connectors." Zugriff am: 27. August 2025. [Online.] Verfügbar: <https://docs.rs-online.com/cf13/0900766b81714eef.pdf>
- [58] Lüdeke Elektronik. "UNIVAL® 19mm standard KFZ Flachstecksicherung Sicherung." Zugriff am: 28. August 2025. [Online.] Verfügbar: <https://www.luedeke-elektronik.de/unival-19mm-standard-kfz-flachstecksicherung-sicherung-1a-2a-3a-4a-5a-7-5a-10a-15a-20a-25a-30a-40a-mta.html>
- [59] Victron Energy B.V. "Gleichstromverkabelung: Faustregel." Zugriff am: 28. August 2025. [Online.] Verfügbar: https://www.victronenergy.com/media/pg/The_Wiring_Unlimited_book/de/dc-wiring.html#UUID-858a1acc-1148-ff8a-7400-1d8f3cc0e1cb
- [60] Littelfuse, Inc. "Transient Voltage Suppression Diodes: Axial Leaded – 1500W > 1.5KE series." Zugriff am: 29. August 2025. [Online.] Verfügbar: https://cdn-reichelt.de/documents/datenblatt/A400/LITTELFUSE_TVS_DIODE_1_5KE_DATASHEET.pdf
- [61] KEMET Electronics Corporation. "ALS30/31 Series, +85°C: Screw Terminal Aluminum Electrolytic Capacitors." Zugriff am: 2025. [Online.] Verfügbar: https://cdn-reichelt.de/documents/datenblatt/B300/KEM_ALS30_31_DB-EN.pdf
- [62] SKS Kontakttechnik GmbH. "SEB 2600 G M4: Datenblatt." Zugriff am: 28. August 2025. [Online.] Verfügbar: <https://asset.conrad.com/media10/add/160267/c1/-/de/000735051DS00/datenblatt-735051-sks-hirschmann-seb-2600-g-m4-sicherheits-laborbuchse-buchse-einbau-vertikal-stift-o-4-mm-rot-1-st.pdf>
- [63] GS YUASA Battery Germany GmbH. "Yuasa Technisches Datenblatt: Yuasa NP1.2-12 Industrial VRLA Battery." Zugriff am: 28. August 2025. [Online.] Verfügbar: <https://www.yuasa.de/batterien/industrie/np-vrla/np1-2-12.html>
- [64] reichelt elektronik GmbH. "RL201 ~ RL207&2A01~2A07: 2.0Amp General Purpose Rectifiers." Zugriff am: 1. September 2025. [Online.] Verfügbar: https://cdn-reichelt.de/documents/datenblatt/A400/RL201-RL207_LUNSURE.pdf
- [65] Alexander Pusch und Nils Haverkamp, *3D-Druck für Schule und Hochschule*. Berlin: Springer Spektrum, 2021.
- [66] PROTIQ GmbH, "Gewinde bei 3D-gedruckten Bauteilen," Zugriff am: 2. September 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.protiq.com/3d-druck/anwendungsgebiete/gewinde/?srsltid=AfmBOopf2THfVRVMjAVBe2yWHgEHwl-d2opCYT3sO6p3V53P8rYO0dYi>
- [67] db-shop24, "2er-Set Anderson Stecker SB 50 Grau 4-8mm² inkl. Kontaktstifte," Zugriff am: 5. September 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.db-shop24.de/2er-Set-Anderson-Stecker-SB-50-Grau-4-8mm-inkl-Kontaktstifte>

V. Anhänge

Anhang A	Inhalt des USB-Sticks.....	i
Anhang B	Zielbestimmungen aus dem Pflichtenheft	iii
B.1	Musskriterien.....	iii
B.2	Wunschkriterien.....	iv
B.3	Abgrenzungskriterien.....	iv
Anhang C	Prüfliste für die Sichtprüfung an Elektrogeräten.....	v
Anhang D	Stückliste Mechanik.....	i
Anhang E	Stückliste WR und Lichtmaschinen	i
Anhang F	Stückliste Elektrobox	ii
Anhang G	Stückliste Gehäuse und 3D-Druck.....	iii
Anhang H	Stückliste Shunt.....	iv
Anhang I	Stückliste Zubehör	v
Anhang J	Messprotokoll zur Bestimmung des Wirkungsgrades	i

Anhang A Inhalt des USB-Sticks

Auf dem beigefügten USB-Stick sind folgende Dateien gespeichert. Der USB-Stick ist auf der Innenseite der Coverrückseite zu finden.

Name	Ordner-Pfad
Masterarbeit_Krause.pdf	\Masterarbeit\
Masterarbeit_Krause.docx	\Masterarbeit\
Abstandshalter.3mf	\CAD-Dateien\
Elektrobox.3mf	\CAD-Dateien\
Elektrobox-Batterieklammer.3mf	\CAD-Dateien\
Elektrobox-Deckel eingelassen.3mf	\CAD-Dateien\
Elektrobox-Deckel extruiert.3mf	\CAD-Dateien\
Energiefahrrad.3mf	\CAD-Dateien\
Laufrolle 3,8 Zoll.3mf	\CAD-Dateien\
Laufrolle M15.3mf	\CAD-Dateien\
Laufrolle M16.3mf	\CAD-Dateien\
Laufrolle M17.3mf	\CAD-Dateien\
Laufrolle M15.3mf	\CAD-Dateien\
Laufrollen-Abstandshülse 3,8 Zoll.3mf	\CAD-Dateien\
Laufrollen-Abstandshülse M15.3mf	\CAD-Dateien\
Laufrollen-Abstandshülse M16.3mf	\CAD-Dateien\
Laufrollen-Abstandshülse M17.3mf	\CAD-Dateien\
Shunt-Gehäuse.3mf	\CAD-Dateien\
Shunt-Gehäuse Deckel.3mf	\CAD-Dateien\
Materialliste_mit_Preise.xlsx	\Materialliste\

Oszilloskopaufnahmen.pdf	\Messprotokolle\
Spannung_Drehzahl_ungeregelte_Lichtmaschine.xlsx	\Messprotokolle\
Messprotokoll_U=P_durch_I.xlsx	\Messprotokolle\
Poster_DIN_A0_Energiefahrrad.pdf	\Plakat Physics Teachers Day\
Spannungswandler_NP_NM_NS_DE_01_2018.pdf	\Datenblätter und Handbücher\
DA_Isabellenhuetten-PBV.pdf	\Datenblätter und Handbücher\
KEM_ALS30_31_DB-EN.pdf	\Datenblätter und Handbücher\
Littelfuse-TVS-Diode-1-5KE-Datasheet.pdf	\Datenblätter und Handbücher\
MAXX miniOTO fuse.pdf	\Datenblätter und Handbücher\
NP1.2-12_DATASHEET-1.pdf	\Datenblätter und Handbücher\
RL201-RL207_LUNSURE Gleichrichterdiode.pdf	\Datenblätter und Handbücher\
Rollentrainer.pdf	\Datenblätter und Handbücher\
SKS Hirschmann SEB 2600 G M4.pdf	\Datenblätter und Handbücher\

Anhang B Zielbestimmungen aus dem Pflichtenheft

Die nachfolgenden Muss-, Wunsch- und Abgrenzungskriterien wurden selbstständig erarbeitet. Das Pflichtenheft wurde selbstständig und ohne Hilfe Dritter erstellt. Basis für die Erstellung des Pflichtenheftes waren vorausgegangene Untersuchungen.

B.1 Musskriterien

Die Musskriterien bestimmen die für das Projekt wichtigen Kriterien. Für ein vollständiges Konzept darf auf keinen der folgenden Punkte verzichtet werden:

M1/ Material

- a. Selbstständige Materialbestimmung
- b. Analyse des Kosten-Nutzen-Verhältnisses für die ausgewählten Materialien
- c. Anfertigung einer allumfänglichen Stückliste, inkl. Kostenrechnung

M2/ Didaktik

- a. Einbindung didaktischer Analysen in die einzelnen Entwicklungsschritte
- b. Abschätzung der Eignung des Energiefahrads für den Technik- und Physikunterricht
- c. Einbindung des Energiefahrades in das Unterrichtskonzept von Muckenfuss und Walz „Neue Wege im Elektrikunterricht“
- d. Analyse der Nachbaufähigkeit des Energiefahrads in Bezug auf Kosten, Schwierigkeitsgrad und didaktischer Eignung.

M3/ Sicherheit

- a. Analyse möglicher sicherheitsrelevanter Problematiken
- b. Nennung möglicher Auswege

M4/ Entwicklung eines Prototyps für ein Energiefahrrad

- a. Mechanische Konstruktion, Fertigung und Dokumentation eines Energiefahrades für den Schulunterricht
- b. Elektrische Konstruktion, Fertigung und Dokumentation eines Energiefahrades für den Schulunterricht in Form einer netzunabhängigen Inselanlage
- c. Konstruktion und/oder Auswahl von Lasten
- d. Konstruktion eines Gehäuses für die Elektronik

M5/ Dokumentation

- a. Anfertigung einer allumfänglichen Dokumentation in Form einer Masterarbeit und Abgabe dieser in Print- sowie Digitalversion
- b. Anfertigung von Stücklisten, Konstruktionsplänen und Schaltplänen zur Dokumentation
- c. Erstellung von CAD-Dateien, die zur Fertigung des Energiefahrades benötigt werden

- d. Bereitstellung der Berechnungen und Messprotokolle

B.2 Wunschkriterien

Im Nachfolgenden aufgelistete Kriterien sind nicht zwingend Bestandteil der Konzeptionierung. Die Nicht-Realisierung einzelner Kriterien führt nicht zu einem vollständigen Scheitern des Projektes.

W1/ Vollumfängliche Erfüllung sicherheitsrelevanter Standards nach:

- a. DGUV Vorschrift 4
- b. BetrSichV
- c. GUV-SI 8070
- d. RiSU-KMK (nicht-berührungsgefährliche Spannung)

W2/ Erfolg und Funktionen

- a. Die mechanische Konstriktion des Energiefahrrades ist vollumfänglich funktionsfähig, stabil und sicher
- b. Das Energiefahrrad generiert stabile und sichere 12 V DC-Spannung und bis zu 300 W Leistung
- c. Das Energiefahrrad generiert mithilfe des zugekauften Wechselrichters stabile und sichere 230 V AC-Spannung bis zu 300 W Leistung
- d. Das Energiefahrrad ist kostengünstig und eignet sich für den Nachbau an Schulen
- e. Konstruktion Stufen-Lastbank, welche selbstständig die Last in 20 W-Schritten erhöht und mit Leuchten die jeweilige Stufe anzeigt

W3/ Bestimmung des Wirkungsgrades

- a. Bestimmung des Wirkungsgrades des Menschen
- b. Bestimmung des Wirkungsgrades des Energiefahrrades

B.3 Abgrenzungskriterien

Die nachstehenden Punkte sind nicht Bestandteil dieser Arbeit

- A1/ Approbation und Zulassung des Gerätes
- A2/ Betrachtungen zur Produzierbarkeit in großen Stückzahlen
- A3/ Das Fahrrad, 3D-Druck Filament, Planungs- und Werkstattkosten gehen nicht in die Kostenrechnung mit ein
- A4/ Sicherheit des 230 V-AC Teils. Die Verantwortung obliegt dem Wechselrichterhersteller.

Anhang C Prüfliste für die Sichtprüfung an Elektrogeräten

Die nachfolgenden Prüfungen wurden entnommen aus GUV-SI 8040, vgl. [7, S. 41].

„Sichtbare Mängel an Elektrogeräten betreffen typischerweise

an Steckern, Kupplungen und Buchsen:

- *gelockerte, verbogene oder verschmorte Steckkontakte*
- *gerissene, verformte oder abgeplatzte Gehäuse bzw. Gehäuseteile*
- *abgelöster bzw. beschädigter Knickschutz*
- *gelockerte bzw. gelöste Zugentlastung*
- *unsachgemäß ausgeführte Reparaturen*

an den Leitungen:

- *Flickstellen*
- *schadhafte Leitungsisolierungen*
- *Versprödungen (z. B. durch UV-Einstrahlung oder Wärmewirkungen)*
- *fühlbare Deformationen, die auf Leitungsbrüche oder Knickstellen im Inneren der Leitungen hinweisen*

am Gerätegehäuse:

- *gebrochene oder abgeplatzte Gehäuseteile*
- *Schmorstellen*
- *leitfähiger Schmutz oder Feuchtigkeit*
- *unsachgemäß ausgeführte Reparaturen*
- *Deformationen*
- *verstopfte oder verschmutzte Lüftungsöffnungen“*

[7, S. 41].

Anhang D Stücliste Mechanik

Die nachstehende Tabelle zeigt die Stücliste der für das Energiefahrrad benötigten, mechanischen Komponenten mit Ausnahme der 3D-gedruckten Bauteile. Die 3D-gedruckten Komponenten sind im Anhang G gezeigt. Die Stücliste zeigt die wichtigsten kaufmännischen Daten, die für die Beschaffung notwendig sind. Im Anhang A, im Inhalt des USB-Sticks, ist eine ausführlichere Tabelle mit Preisen und möglichen Bezugsquellen im XLSX-Dateiformat zu finden.

Pos.	Bezeichnung	ASIN/ EAN / Hersteller Nr.	Menge
1	Relaxdays Fahrrad Rollentrainer	B00LEE6BB8 / 4052025038168 / 04052025038168	1 Stück
2	M10-Gewindestange 1000 mm	B0C8JCTX3N / x / PG0008	1 Stück
3	M10-Sechskantmutter	x/ x / 499180005	6 Stück
4	M10-Unterlegscheibe	x / x / 499210005	6 Stück
5	Ringmutter M8	x / x / 299360001	2 Stück
6	8x40 mm Sechskantschraube	x / x / 499160012	2 Stück
7	Unterlegscheibe M8	x / x / 499210004	2 Stück
8	Karabiner 8 mm verzinkt	x / x / 264030002	1 Stück
9	Seilspanner 8 mm x 110 mm verzinkt	x / x / 265050010	1 Stück
10	Warnzeichen W025	B0CTZBN8GQ / x / BLKWZ50	2 Stück

Anhang E Stücliste WR und Lichtmaschinen

Da die Bosch-0123-120-001-Lichtmaschine nicht mehr als Neuware erhältlich ist, zeigt die Stücliste eine alternative Lichtmaschine. Zudem wird der empfohlene Wechselrichter aufgeführt. Die Stücliste zeigt die wichtigsten kaufmännischen Daten, die für die Beschaffung notwendig sind. Im Anhang A, im Inhalt des USB-Sticks, ist eine ausführlichere Tabelle mit Preisen und möglichen Bezugsquellen im XLSX-Dateiformat zu finden. Die Positionsnummern (Pos.) werden entsprechend der vorausgegangenen Nummerierung weitergeführt, um eine konkrete, durchgängige Positionsbezeichnung zu erhalten.

Pos.	Bezeichnung	ASIN/ EAN / Hersteller Nr.	Menge
11	BOSCH 0 986 041 820 Lichtmaschine	x / x / 4G0069 / OE-Ref.Nr. 90534472, 93175784, 6204069, 6204129, 93175863	1 Stück
12	Spannungswandler Wechselrichter 300 Watt 12V 230V reiner Sinus Inverter GE	x / 4260464591599 / 0212031GE	1 Stück

Anhang F Stückliste Elektrobox

Die nachstehende Tabelle zeigt die für die Elektrobox benötigten Komponenten mit Ausnahme der 3D-gedruckten Bauteile. Die 3D-gedruckten Komponenten sind im Anhang G aufgeführt. Im Anhang A, im Inhalt des USB-Sticks, ist eine ausführlichere Tabelle mit Preisen und möglichen Bezugsquellen im XLSX-Dateiformat zu finden. Die Positionsnummern (Pos.) werden entsprechend der vorausgegangenen Nummerierung weitergeführt, um eine konkrete, durchgängige Positionsbezeichnung zu erhalten.

Pos.	Bezeichnung	ASIN/ EAN / Hersteller Nr.	Menge
13	Batterieanschluss Stecker 50A 600V 10AWG mit 30cm O-Ring-Batterieanschlusskabel, Anderson Steckerkabel	B0DKTNVQHX / x / x	2 Stück
14	50-Ampere-Batteriesteckdose mit Montageplatte für Anderson SB50 Plug	B0CTFRZF69 / x / x	2 Stück
15	YUASA Blei-Vlies-Akku, 12 V, 1,2 Ah, VdS	x / 9900001569999 / YU NP1,2-12	1 Stück
16	FASTON-Adapter, 4,8 <> 6,3	x / 9900002859747 / x	2 Stück
17	Becher-Elko, radial, 15 mF, 40 V, 85°C, 20000h, 20%	x / 9900002062857 / ALS31A153DB040	1 Stück
18	Zylinderschraube 5x10 mm Innensechskant DIN912 galvanisch verzinkt	x / x / 499260031	2 Stück
19	Unterlegscheibe M5 aus Stahl galvanisch verzinkt	x / x / 499210001	2 Stück
20	Federringe M5 B-Form aus rostfreiem A2 Edelstahl	x / x / 499760012	2 Stück
21	Offgridtec 6mm ² Flachsicherungshalter für Kfz-Bladesicherungen, isoliertes Gummigehäuse mit wasserdichtem Deckel, 40A, 25cm Kabel	B00X9XDKSY / 4260297859606 / 1385	1 Stück
22	KFZ-Sicherungshalter, miniOTO, 32 V, IP56, rt	x / 8719392004108 / H7335	1 Stück
23	TVS-Diode, unidirektional, 18 V, 1500 W, DO-201	x / 9900000418595 / 1,5KE18A	1 Stück
24	HELLA 2AA 008 592-031 Kontrollleuchte - Halogen - geschraubt	x / 4082300188684 / 2AA 008 592-031	1 Stück
25	OSRAM 3796 Signal Leuchtmittel Original Line BA9S 2 W 12 V	x / 4050300891309 / 3796	1 Stück
26	MTA Automotive 340032 Standard Flachsicherung 25 A Weiß 1 St.	x / 2050000320125 / 340032	1 Stück
27	TRU COMPONENTS 8551176 Kfz Mini Flachsicherung 2 A Grau 1 St.	x / 2050006376256 / 8551176	1 Stück
28	SKS Hirschmann SEB 2600 G M4 Sicherheits-Laborbuchse Buchse, Einbau vertikal Stift-Ø: 4 mm Rot 1 St.	x / 4250260212422 / 972354101	3 Stück
29	SKS Hirschmann SEB 2600 G M4 Sicherheits-Laborbuchse Buchse, Einbau vertikal Stift-Ø: 4 mm Schwarz 1 St.	x / 4002044197926 / 972354100	1 Stück
30	SKS Hirschmann SEB 2600 G M4 Sicherheits-Laborbuchse Buchse, Einbau vertikal Stift-Ø: 4 mm Blau 1 St.	x / 4250260213832 / 972354102	1 Stück
31	SKS Hirschmann SEB 2600 G M4 Sicherheits-Laborbuchse Buchse, Einbau vertikal Stift-Ø: 4 mm Grün 1 St.	x / 4250260213894 / 972354104	1 Stück

32	Wippschalter EIN - AUS, 2 polig, schwarz	x / 9900002571304 / 01552.3112-00	2 Stück
33	Flachsteckhülse, Breite: 6,35mm, blau	x / 9900000079093 / 0	2 Stück
34	Flachsteckerhülse, Breite: 6,35mm, rot	x / 9900000079130 / FSH-R-6,35	4 Stück
35	Vogt Verbindungstechnik 3925 Flachsteckhülse mit Abzweig Steckbreite: 6.3 mm Steckdicke: 0.8 mm 180 ° Teilisoliert Rot	x / 2050000242700 / 3925	1 Stück
36	Ring-Kerbschuhe, für M4, gelb	x / 9900000152550 / RK-G-4	6 Stück
37	Ring-Kerbschuhe, für M5, gelb	x / 9900000152567 / RK-G-5	2 Stück
38	Wago Verbindungsklemme, 6 mm ² , 5-Leiter	x / 4055143715478 / 221-615	2 Stück
39	Wago Verbindungsklemme, 3-Leiteranschluss	x / 4050821808442 / 221-413	1 Stück
40	Einzelader H07V-K 1 x 6 mm ² Schwarz Meterware	x / 2050004721348 / 29177	2 Meter
41	Einzelader H07V-K 1 x 6 mm ² Rot Meterware	x / 2050004723724 / 29181	2 Meter
42	Einzelader H07V-K 1 x 2.50 mm ² Schwarz Meterware	x / 2050004723564 / 29145	1 Meter
43	Einzelader H07V-K 1 x 1.50 mm ² Rot Meterware	x / 2050004723465 / 29133	2 Meter
44	Diode		

Anhang G Stückliste Gehäuse und 3D-Druck

Die nachstehende Tabelle zeigt die für das Energiefahrrad benötigten 3D-gedruckten Bauteile. Die CAD-Dateien können dem Inhalt des USB-Sticks (Anhang A) entnommen werden. Zusätzlich können die CAD-Dateien auf der neuen Universitätswebsite unter www.uos.de/fb6/physik/physikdidaktik abgerufen werden. Die alte URL lautet <https://www.physikdidaktik.uos.de/materialien/elektrizitaetslehre.html>. Die Positionsnummern (Pos.) werden entsprechend der vorausgegangenen Nummerierung weitergeführt, um eine konkrete, durchgängige Positionsbezeichnung zu erhalten.

Pos.	Bezeichnung	Menge
45	Abstandshalter	2 Stück
46	Laufrolle passend zur Lichtmaschine z.B. Laufrolle-M17 für BOSCH 0 986 041 820	1 Stück
47	Gehäuse	1 Stück
48	Gehäusedeckel	1 Stück
49	Batterieklammer	1 Stück
50	Ruthex Gewindeeinsatz RX- M4x8.1 GE-M4x81-001	8 Stück
51	Senkschrauben 4x16 mm Kreuzschlitz mit Muttern	16 Stück
52	Unterlegscheibe M4 aus Stahl galvanisch verzinkt	8 Stück

Anhang H Stückliste Shunt

Die nachstehende Tabelle zeigt die Stückliste der für den Shunt benötigten Komponenten. Im Anhang A, im Inhalt des USB-Sticks, ist eine ausführlichere Tabelle mit Preisen und möglichen Bezugsquellen im XLSX-Dateiformat zu finden. Die Positionsbezeichnung (Pos.) wurde nicht weitergeführt, da der Shunt nicht direkt zum Energiefahrrad gehört und für dessen Funktion nicht zwingend erforderlich ist. Der Shunt wird somit als neue Konstruktion angesehen.

Die CAD-Dateien können dem Inhalt des USB-Sticks (Anhang A) entnommen werden, zusätzlich können die CAD-Dateien auf der neuen Universitätswebsite unter www.uos.de/fb6/physik/physikdidaktik abgerufen werden. Die alte URL lautet <https://www.physikdidaktik.uos.de/materialien/elektrizitaetslehre.html>.

Die grün hinterlegten Positionen (Pos. 8-11) sind bereits in der Stückliste Elektrobox und der Stückliste Gehäuse und 3D-Druck enthalten, sie müssen nicht zusätzlich beschafft werden.

Pos.	Bezeichnung	ASIN/ EAN / Hersteller Nr.	Menge
1	SKS Hirschmann SEB 2600 G M4 Sicherheits-Laborbuchse Buchse, Einbau vertikal Stift-Ø: 4 mm Rot 1 St.	x / 4250260212422 / 972354101	1 Stück
2	Isabellenhütte PBV 0,01 Messwiderstand 0.01 Ω 10 W (L x B x H) 22 x 4 x 17 mm 1 St.	x / 2050000124235 / PBV 0,01	1 Stück
3	Fischer Elektronik 10020610 SK 48 50 SA Kühlkörper 2.8 K/W (L x B x H) 50 x 65 x 20 mm	x / 2050000072277 / 10020610	1 Stück
4	Conrad Components CTCM78-1 Wärmeleitpaste 7.8 W/mK 2.1 g Temperatur (max.): 150 °C	x / 2050003083041 / CTCM78-1	1 Stück
5	Bananenstecker, 4mm, für Plattenmontage	x / 3760122592940 / 1052-12	2 Stück
6	Ring-Kerbschuhe, für M3, blau	x / 9900000152529 / RK-B-3	2 Stück
7	Linsenschrauben Kreuzschlitz M3x16 verzinkt mit Muttern	x / x / 199770089	1 Stück
8	Senkschrauben 4x16 mm Kreuzschlitz mit Muttern	x / x / 199770107	4 Stück
9	Ruthex Gewindeeinsatz RX- M4x8.1 GE-M4x81-001	x / 4260528720910 / GE-M4x81-001	4 Stück
10	Einzelader H07V-K 1 x 2.50 mm ² Schwarz Meterware	x / 2050004723564 / 29145	0,5 Meter
11	Einzelader H07V-K 1 x 1.50 mm ² Rot Meterware	x / 2050004723465 / 29133	0,5 Meter
12	Shunt-Gehäuse (3D-Druck)	x	1 Stück
13	Deckel für Shunt-Gehäuse (3D-Druck)	x	1 Stück

Anhang I Stückliste Zubehör

Die nachstehende Tabelle zeigt mögliche Zubehöerteile für das Energiefahrrad. Im Anhang A, im Inhalt des USB-Sticks, ist eine ausführlichere Tabelle mit Preisen und möglichen Bezugsquellen im XLSX-Dateiformat zu finden. Die Positionsbezeichnung (Pos.) wurde nicht weitergeführt, da die Zubehöerteile nicht zwingend für die Funktion des Energiefahrrades notwendig sind.

Pos.	Bezeichnung	ASIN/ EAN / Hersteller Nr.	Menge
1	ELFCULB Anderson Verlängerungskabel, 10AWG Anderson Stecker 50A auf Anderson Stecker 45A	B0D9J7NWR4 / x / SB-AN-61	1 Stück
2	Offgridtec Anderson SB 50 auf Zigarettenanzünder Adapter	B0BMVSZC7M / 4260737983427 / 014795	1 Stück
3	Offgridtec 20cm 9 AWG Adapterkabel für Parallelschaltung, Anderson-Stecker 50A	B09BCY6CVY / 4260737980228 / 013365	1 Stück
4	Offgridtec Anderson SB 50 auf MC4 Stecker	B08SL3FHQK / 4250983258462 / 012660	1 Stück
5	Sicherheitskurzschlussstecker, rot	x / 4250260224494 / 932200101	1 Stück
6	Kabelschuh-Adapter, 4 mm Bananenbuchse / Kabelschuh, blau	x / 3665349010485 / ADA3034-BL	1 Stück
7	Leybold Klemmstecker	x / x / 590 011	2 Stück
8	TVS-Diode, unidirektional, 47,8X V, 1500 W, DO-201	x / 9900002728142 / 1,5KE56A	1 Stück
9	VCELINK GJ707 Crimpzange Kabelschuhzange mit Ratschenfunktion für Isolierte Kabelschuhe	B08RNJNPZY / x / NGJ707-1P-US	1 Stück
10	All Ride scaldabevande 871125202160 Tauchsieder – 12 V	B00123ET88 / 5050520143225 / 871125202160	1 Stück

Anhang J Messprotokoll zur Bestimmung des Wirkungsgrades

Die nachstehende Tabelle zeigt die Rohdaten, die zur Ermittlung des Wirkungsgrades für den Oekotrainer erhoben worden sind.

Leuchtmittel:	P_{mech} [W]	P_{el1} [W]	P_{el2} [W]
1x 230V/25W	138	38	26
2x 230V/25W	168	67	52
1x 230V/70W	185	89	71
1x 230V/100W	230	119	100