

C A P S T O N E P R O J E K T

Fahrrad-Kino
Projektbericht

Vorgelegt an
Prof. Herrn Waffenschmidt
im Studiengang
<Elektrotechnik>

ausgearbeitet von:

YASMIN ZIELKE
TOM LEONHARD
DANIEL GLADKA
TENG TIAN

Deutz, im April 2024

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
1.1	Motivation	3
1.2	Zielsetzung	3
1.3	Projektorganisation	3
2	Grundlagen	3
2.1	Messung von Körperleistung beim Radfahren	3
2.2	Gestaltung von Außenkino	4
2.3	Ermittlung von Energiebedarf	5
2.4	Prinzip der Energieumwandlung	5
3	Projektentwurf	6
3.1	Mechanische Teil	6
3.1.1	Fahrradständer	7
3.1.2	Kraftübertragung	7
3.1.3	Unterkonstruktion	8
3.2	Elektrische Teil	8
3.2.1	Lichtmaschine	9
3.2.2	Batterie	9
3.2.3	Spannungswandler	10
4	Projektausführung	10
4.1	Auswahl der Komponenten	10
4.2	Aufbau der Anlage	11
4.3	Testbetrieb	12
4.3.1	Testaufbau	12
4.3.2	Testergebnisse	13
5	Bedienungsanleitung	15
6	Zusammenfassung und Ausblick	15

1 Einleitung

1.1 Motivation

Das Forschungsinstitut Sinus hat die Ergebnisse der Online-Befragung "Fahrrad-Monitor-Deutschland"(Nov. 2021) veröffentlicht. Zum Zeitpunkt der Befragung hatten 17 Prozent der Befragten für das Jahr 2021 eine Radreise mit mindestens einer Übernachtung geplant. Dies entspricht ca. 11,2 Mio. Fahrradrulaubern (inkl. deren Kinder). Damit ist der Fahrradtourismus bei den Deutschen angekommen.

Natürlich kommt man auf die Überlegung, dass das Fahrrad nicht nur als Transportmittel zum Ausflugsziel genutzt werden kann, sondern auch als Energiequelle für die Freizeitgestaltung. Aus dieser Idee entsteht die Verbindung von Fahrrad und Kino. Diese Idee wird im Rahmen dieses Capstone-Projektes weiter verfolgt und in die Praxis umgesetzt.

1.2 Zielsetzung

Das Capstone Projekt „Fahrradkino“ im Wintersemester 23/24 basiert auf der Idee, in einer kleinen Gruppe einen Film möglichst umweltfreundlich auf einem Projektor vorzuführen. Hierfür wird die benötigte elektrische Energie von einzelnen Fahrrädern erzeugt, die von den Teilnehmern gemeinsam zu einem beliebigen Ort gebracht werden. Kurzum: Das Fahrradkino soll sowohl emissionsfrei als auch mobil sein und die Aufstellung ist nur für die Dauer der Filmvorführung fixiert. Es wird angestrebt, die eigentliche Aufstellung überall zu ermöglichen.

1.3 Projektorganisation

Projektbetreuer	Prof. Herr Waffenschmidt
Projektteam	Yasmin Zielke Tom Leonhard Daniel Gladka Teng Tian
Unterstützung	Zentralwerkstatt

2 Grundlagen

2.1 Messung von Körperleistung beim Radfahren

In der ersten Phase des Projekts geht es darum, die dauerhafte Leistungsfähigkeit von Personen beim Radfahren zu ermitteln. Hierfür wurden Fitnessbikes zur Messung eingesetzt. Die Leistungswerte können direkt aus dem OnBoard-Anzeiger abgelesen werden.

Die Testpersonen wurden gebeten, 15 bis 20 Minuten in einem entspannten Tempo zu fahren, um sicherzustellen, dass sie mindestens eine Stunde durchhalten können. Sieben Testpersonen erreichten einen Durchschnittswert von 92 Watt, jedoch mit einer großen Schwankungsbreite. Um auf der sicheren Seite zu sein, wurde ein Wert von 80 Watt mit einem Sicherheitszuschlag festgelegt.

2.2 Gestaltung von Außenkino

Das Fahrradkino soll unterhaltsam sein und alle notwendigen Komponenten eines Open-Air-Kinos beinhalten, wie z.B. Leinwand, Beamer, Laptop und Musikanlage.

Mobile Leinwand: Es gibt verschiedene Arten von mobilen Leinwänden für Beamer, die sich in Größe, Material, Aufbau und Funktionalität unterscheiden. Für das Fahrrad-Kino wurden gängiger Leinwandtypen recherchiert.

- Faltleinwände
- Selbststehende Leinwand
- Aufblasbare Leinwand

Faltleinwände sind durch das Zusammenfallen oder Aufrollen komprimierbar und können in einer Tragetasche leicht transportiert werden. Sie werden bei Gebrauch aufgefaltet bzw. aufgerollt und können nach Gebrauch wieder zusammengerollt werden. Der Nachteil ist, dass ein Gegenstand zum Aufhängen der Leinwand gefunden werden muss, was im Freien nicht immer möglich ist.

Selbststehende Leinwände haben einen eingebauten Standfuß, der es ihnen ermöglicht, ohne zusätzliche Unterstützung aufrecht zu stehen. Sie sind ideal für den Einsatz in Situationen, in denen keine Wand oder kein Stativ zur Befestigung verfügbar ist. Sie sind jedoch etwas schwerer.

Aufblasbare Leinwände eignen sich besonders für den Einsatz im Freien. Sie bieten eine große Projektionsfläche und können mit Hilfe einer Luftpumpe schnell auf- und abgebaut werden. Die elektrische Leistung der Luftpumpe wird bei der Berechnung nicht berücksichtigt, da der Auf- und Abbau nicht gleichzeitig mit der Filmvorführung erfolgt.

Beamer: Handelsübliche tragbare Projektoren haben eine Leistungsaufnahme von 20 bis 200 Watt und können Bilddiagonalen von 30 bis 100 Zoll (ca. 254 cm) projizieren.

Video-Player: Für eine mobile Lösung eignet sich ein Laptop als Videoplayer. Seit der Einführung des USB-C-Anschlusses können auch Smartphones und Tablets über USB an Beamer angeschlossen und die Filme übertragen werden. Einige Beamer können auch über WLAN verbunden werden. Die Möglichkeiten sind vielfältig.

Musikanlage: Für das Projekt eignen sich besonders wasserdichte Bluetooth-Lautsprecher, da sie beim Einsatz im Freien Feuchtigkeit, Nässe und Spritzwasser ausgesetzt sein können. Diese Lautsprecher sind in der Regel auch robuster gebaut, sodass sie beim Transport nicht so schnell beschädigt werden. Die Verbindung zu den Lautsprechern erfolgt meist über Bluetooth und die Stromversorgung erfolgt über einen eingebauten Akku. Der Akku hat in der Regel eine längere Laufzeit als eine Filmvorführung. Bei der Klangqualität muss man etwas Abstriche machen, da die Filmvorführung im Freien stattfindet.

2.3 Ermittlung von Energiebedarf

Je nach Auslegung der Kinoausrüstung ist eine unterschiedliche elektrische Leistung für die Filmvorführung erforderlich. Wenn man alles auf ein Minimum reduziert, kann die Gesamtleistung auf ca. 300 Watt gesenkt werden. Dieser Wert setzt sich aus folgenden elektrischen Verbrauchern zusammen:

- Laptop: 80W
- Beamer: 200W
- Tonanlage: 20W

Bei einer aufblasbaren Leinwand benötigt die Luftpumpe noch ca. 30W Leistung, um den Innendruck aufrechtzuerhalten, damit die Leinwand formstabil bleibt.

2.4 Prinzip der Energieumwandlung

Die Umwandlung von mechanischer in elektrische Energie erfolgt durch verschiedene Prozesse, die im Blockschaltbild dargestellt sind.

Zunächst wird durch das Treten in die Pedale das Hinterrad des Fahrrades in eine Drehbewegung versetzt. Diese Drehbewegung wird über ein Getriebe in ein Drehmoment an der Welle des Generators umgesetzt. Im Generator ist die Welle mit dem Elektromagnet verbunden, der am Anfang durch die Batteriespannung erregt wird. Durch die Rotation der Welle wird das elektromagnetische Feld verändert. Dies erzeugt in der Statorspule aufgrund des Induktionsgesetzes eine Spannung. Diese induzierte Spannung versorgt

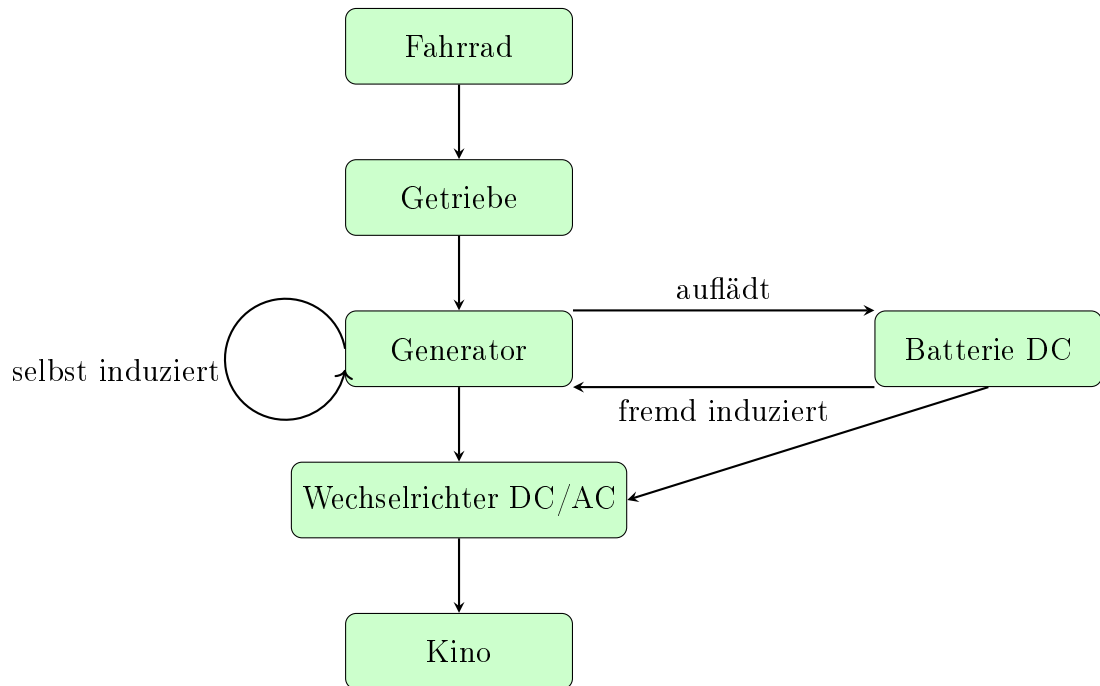


Abbildung 1: Darstellung des Energieflusses

dann die Erregerspule, die Batterie und den Wechselrichter. Der Wechselrichter wandelt den Gleichstrom in Wechselstrom um und erhöht die Spannung auf 230 V, für ähnliche Verhältnisse zur Steckdose. Dadurch erhöht sich die Kompatibilität mit den Endgeräten.

3 Projektentwurf

Das Gesamtsystem lässt sich anhand der Energieumwandlung in zwei Funktionsteile unterteilen. Der mechanische Teil umfasst das Rad, das Getriebe und die Welle des Generators, wo die mechanische Übertragung stattfindet. Der elektrische Teil beginnt an den Klemmen des Generators, beinhaltet die Batterie und bis zum Wechselrichter. Hier findet die elektrische Umformung statt.

3.1 Mechanischer Teil

Der mechanische Teil besteht aus vielen Komponenten. Der Fahrradständer ermöglicht das Treten der Pedale, ohne das Fahrrad fortzubewegen. Die Wellenkupplung und das Getriebe stellen die Verbindung zwischen dem Hinterrad und der Welle des Generators her. Zur Befestigung aller anderen Komponenten ist ein Unterkonstruktion vorhanden.

3.1.1 Fahrradständer

Der Fahrradständer hat die Aufgabe, das Fahrrad in einer festen Position zu fixieren, so dass man über einen längeren Zeitraum in die Pedale treten kann. Hierfür eignet sich besonders ein Rollentrainer, da dieser mobil und vergleichsweise kostengünstig ist. Das Fahrrad wird über die Hinterachse auf zwei Klemmhebel am Rahmen gehoben und gesichert, so dass sich das Hinterrad frei drehen kann. Mit einer Feststellschraube wird die Rolle gegen den Reifen gedrückt. Dreht sich das Hinterrad, dreht sich auch die Rolle mit. Ursprünglich ist die Welle der Rolle mit einer Magnetbremse ausgestattet. Diese wird demontiert und der Fahrradständer ist für den weiteren Umbau bereit.



Abbildung 2: Rollentrainer als Fahrradgestell

3.1.2 Kraftübertragung

Grundsätzlich gibt es zwei Möglichkeiten der Kraftübertragung. Die erste Möglichkeit besteht darin, den Generator über eine Wellenkupplung direkt mit der Welle des Ständers zu verbinden. Diese Verbindung weist die geringsten Übertragungsverluste auf. Allerdings ist bei dieser Anordnung keine Anpassung des Übersetzungsverhältnisses möglich.

Die alternative Methode besteht darin, die Welle des Ständers und den Generator über einen Riemen zu verbinden. Durch die Reibung zwischen dem Riemen und den Riemenscheiben entstehen bei dieser Variante vergleichsweise höhere Verluste. Sie bietet jedoch mehr Flexibilität bei der Auswahl und Montage des Generators. Die Riemenlösung wurde

nach eingehender Beratung mit den Mitarbeitern der Zentralwerkstatt und unter Berücksichtigung der Fertigungsgenauigkeit der Fahrradständer bevorzugt.

Mit Hilfe eines speziell angefertigten Adapters kann eine Riemenscheibe auf die Welle des Fahrradständers montiert werden, während die andere Riemenscheibe direkt am Generator befestigt wird. Über diese beiden Riemenscheiben wird ein Riemen gespannt. Wichtig ist, dass die Riemenspannung je nach Situation nachgestellt werden kann.

3.1.3 Unterkonstruktion

Die Unterkonstruktion besteht aus einer Grundplatte, einer Montageschiene für den Generator sowie Arretierungen für den Fahrradständer. Die Grundplatte wird direkt auf dem Boden platziert, während der Fahrradständer mithilfe von Bolzen und Schellen sicher auf der Grundplatte befestigt wird. Der Generator kann in der Montageschiene gleiten, um die richtige Riemenspannung zu gewährleisten.

3.2 Elektrischer Teil

Die elektrischen Komponenten sind für die Erzeugung und Umwandlung der elektrischen Energie notwendig. Das Bild 3 stellt einen Stromkreis mit allen Bauteilen dar.

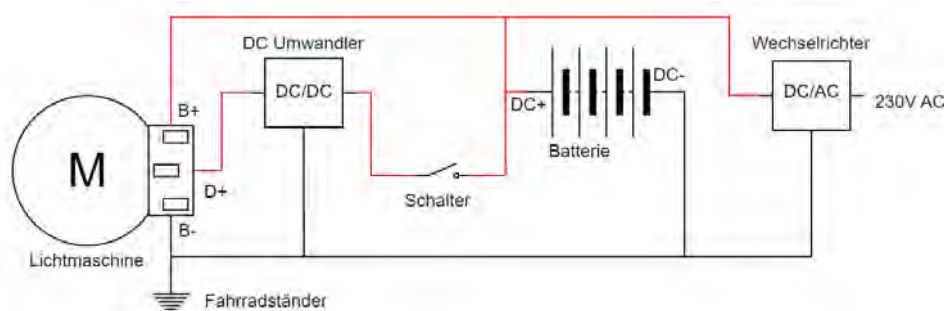


Abbildung 3: Darstellung der elektrischen Komponenten

Links ist die Lichtmaschine (Generator) mit drei Klemmen zu sehen. Die Klemme B^+ ist die Verbindung zwischen dem Pluspol der Batterie und dem Wechselrichter. Die Klemme B^- ist mit dem Fahrradständer verbunden, der als Bezugspotential für die Erdung dient. Die Minuspole der Batterie und des Wechselrichters sind ebenfalls mit dem Fahrradständer verbunden. Von der D^+ Klemme der Lichtmaschine wird über den Gleichspannungswandler, der als Tiefsetzsteller arbeitet, der Pluspol der Batterie angeschlossen. Über diese

Schaltung wird die Erregerspannung für den Start bereitgestellt.

Der Tiefsetzsteller reduziert die Batteriespannung auf 1,5 V. Dadurch wird der Energieverlust im Stillstand (Standby) minimiert. Diese Spannung reicht aus, um die Lichtmaschine zu starten.

3.2.1 Lichtmaschine

Die Lichtmaschine ist ein Generator, wie man ihn typischerweise in Autos findet. Ihr Name rührt darauf, dass sie ursprünglich vor allem die Scheinwerfer des Fahrzeugs mit Strom versorgte. Eine Lichtmaschine besteht aus drei Hauptkomponenten: dem Generator, dem Gleichrichter und dem Laderegler.

Der Generator arbeitet nach dem Asynchrongeneratorprinzip. Sein Rotor besitzt keine Permanentmagnete und muss seinen Magnetisierungsstrom aus der Zuleitung beziehen. Dies geschieht über zwei Schleifringe, die auf der Welle angebracht sind. Wenn der Rotor mit Strom versorgt wird, erzeugt er bei seiner Rotation eine Wechselspannung in der Statorwicklung, die dann andere Teile mit Strom versorgt.

Der Gleichrichter wandelt den Wechselstrom der Ständerwicklung in einen unregelmäßigen Gleichstrom um. Dieser wird durch die nachgeschaltete Batterie geglättet.

Der Laderegler überwacht ständig die Spannung an der Klemme B^+ und regelt den Magnetisierungsstrom so, dass die Ausgangsspannung des Generators konstant bei ca. 14 Volt bleibt.

3.2.2 Batterie

Zwischen dem Generator und dem Spannungswandler ist eine Blei-Säure-Batterie eingebaut. Ihre Hauptfunktion besteht darin, beim Anlassen des Motors als Spannungsquelle für die Erregerwicklung zu dienen. Darüber hinaus kann sie als Puffer überschüssige Energie aufnehmen und bei Bedarf wieder abgeben. Die Kombination mit der Lichtmaschine ist im Fahrzeugbau Standard und in der Praxis erprobt.

Im Vergleich zu den heute viel gepriesenen Lithium-Ionen-Batterien ist die Blei-Säure-Batterie kostengünstiger, robuster und leichter zu entsorgen.

3.2.3 Spannungswandler

Ein Spannungswandler ist ein elektronisches Gerät, das eine Gleichspannung von 12 V in eine Wechselspannung von 230 V umwandelt. Das Gerät verwendet leistungselektronische Bauteile wie z.B. einen Hochsetzsteller. Der Hochsetzsteller erhöht die Eingangsspannung auf das für die Ausgangswechselspannung erforderliche Niveau. Durch die Steuerung des Schaltverhältnisses des Hochsetzstellers wird die Ausgangsspannung so geregelt, dass der erforderliche sinusförmige Verlauf der Wechselspannung wiederhergestellt wird.

Zur Gewährleistung der Sicherheit sind im Spannungswandler Über- und Unterlastschutzfunktionen integriert. Überlastschutzmechanismen überwachen den Stromfluss und schalten den Wandler ab, wenn ein kritischer Wert überschritten wird, um Schäden zu vermeiden. Der Unterlastschutz schützt den Wandler, indem er ihn abschaltet, wenn die Last zu gering ist, um einen sicheren Betrieb zu gewährleisten oder um Energieverschwendung zu vermeiden.

4 Projektausführung

Die Ausführungsphase umfasst die Auswahl der erforderlichen Komponenten, den Zusammenbau und die Durchführung von Testläufen.

4.1 Auswahl der Komponenten

Für den ***Spannungswandler*** steht ein fertiges Modul der Marke Cartrend¹ zur Verfügung. Es hat eine Ausgangsnennleistung von 300W und kann kurzzeitig mit bis zu 600W belastet werden. Als Kurzschlussschutz verfügt das Modul über eine Kfz-Sicherung von 35A. Außerdem verfügt das Modul über einen Batteriewächter. Ist die Batteriespannung zu niedrig, ertönt ein Pfeifton. Die Netzseite (230V AC) des Spannungswandlers kann über einen Schalter ein- und ausgeschaltet werden. Dieser Wechselrichter ist nicht für den direkten Anschluss an die Steckdose geeignet (siehe Solarwechselrichter).

Es wird eine ***Blei-Säure-Batterie*** der Marke HeyVolt² zur Verfügung gestellt. Sie hat eine Kapazität von 5Ah und kann beim Kaltstart mit 100A belastet werden. Außerdem ist die Batterie mit nur 1,6 kg sehr leicht zu transportieren und hat einen Formfaktor von

¹Art.-Nr.: 7740300

²Model: YB4L-B 50411

ca. 12x9x7 cm.

Die eingesetzte **Lichtmaschine** stammt aus der Marke AS-PL³ und verfügt über eine max. Ausgangsleistung von 1689W. Die Es ist auch eine Einschaltgeschwindigkeit von 1886RPM angegeben. Die bezieht sich auf die minimale Drehzahl, die erforderlich ist, damit die Lichtmaschine effizient mit der Erzeugung elektrischer Energie beginnt.

4.2 Aufbau der Anlage

Der Fahrrad-Kino-Kit besteht aus zwei Teilen:

- einem mechanischen Teil, bestehend aus Fahrradgestell, Grundplatte Lichtmaschine und Riemenantrieb, und
- elektrischen Anschlüssen in einem wetterfesten Gehäuse.



Abbildung 4: Darstellung des mechanischen Teils

Die Grundplatte wurde in der Werkstatt der Hochschule nach einer Entwurfsskizze gefertigt. Auf der Grundplatte sind 4 Spannklötze positioniert, mit denen das Fahrradgestell im ausgeklappten Zustand fixiert werden kann. Der Generator sitzt auf einer Montageschiene und kann in den Schlitzen verschoben und fixiert werden, um die Spannkraft zu justieren. Die Gehäuse der Lichtmaschine, des Fahrradgestells und der Aluminiumgrundplatte sind mit Metallschrauben miteinander verbunden und dienen als Bezugspunkt für die Erdung der Elektrik. Das folgende Bild zeigt den mechanischen Teil.

³Model: A3023

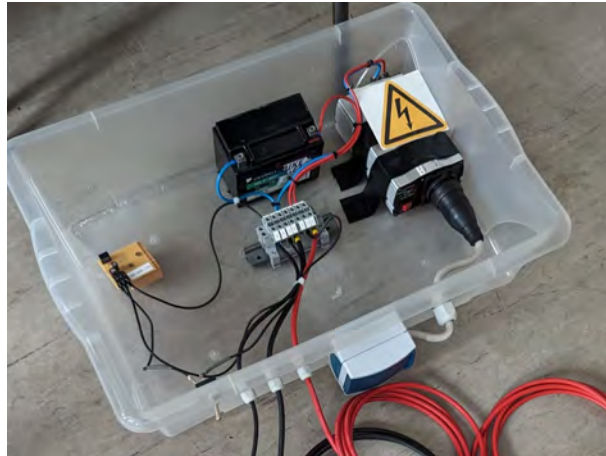


Abbildung 5: Darstellung des Anschlusskastens

Die elektrischen Komponenten wurden in einem wetterfesten Kasten untergebracht. Von links nach rechts: DC-DC Wandler, 12V Batterie, Anschlussklemmen und Wechselrichter. An der Seitenwand des Kastens befindet sich ein Wippschalter und eine Steckdose mit Schutzkappe IP40. Alle Kabeldurchführungen sind mit Kabelverschraubungen zugentlastet. Der Anschlusskasten ist mit einem Deckel versehen, so dass alle elektrischen Teile vor Witterungseinflüssen geschützt sind. Alle Kabel sind mit Steckern einer Photovoltaikanlage versehen. Das Verbinden und Trennen erfolgt mit einem Klick.

4.3 Testbetrieb

4.3.1 Testaufbau

Um die Funktionalität der Anlage zu überprüfen, wurde unter der Unterstützung von Prof. Herrn Waffenschmidt ein Versuchsstand aufgebaut:

Erregerstrom Die Klemme D+ des Generators wird von einem Labornetzteil mit einer konstanten Spannung versorgt. Der momentane Strom und die momentane Leistung können direkt am Labornetzteil abgelesen werden.

Ladespannung Die Ladespannung wurde über einen Tastkopf gemessen und auf Kanal 2 des Oszilloskops angezeigt.

Ladestrom Der Ladestrom wurde über einer Stromzange gemessen und auf Kanal 1 des Oszilloskops als Spannungswert angezeigt.

Ladeleistung Die Ladeleistung ergibt sich aus der Multiplikation der Effektivwerte von Spannung und Strom.



Abbildung 6: Aufnahme während des Testversuchs

4.3.2 Testergebnisse

Insgesamt wurden drei Messungen durchgeführt. Die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle dargestellt:

Messung	eff. Ladespannung [V]	eff. Ladestrom [A]	Ladeleistung [W]
1	13,8	4,69	64,7
2	13,6	4,83	65,6
3	13,0	4,11	53,4

Die gemessenen Leistungen sind sehr unterschiedlich und hängen stark von der Kraft und Ausdauer des Probanden ab. Betrachtet man die zeitlichen Verläufe, so ist eine deutliche Wellenform zu erkennen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass nur beim Treten der Fahrradpedale Strom erzeugt wird. In den Zeitintervallen zwischen dem Treten mit beiden Füßen reicht die Trägheit des Rades nicht aus, um den Generator anzutreiben.

Im Vergleich zu den Messungen auf dem Fitnessbike wurde hier eine wesentlich geringere Leistung gemessen. Dies deutet auf höhere mechanische Verluste im System hin.

Während der Prüfung wurde die Spannung an der Erregerspule auf 1,0 V eingestellt. Im Ruhezustand fließt ein Strom von 312,0 mA. Daraus ergibt sich eine Standby-Verlustleistung von 312 mW.

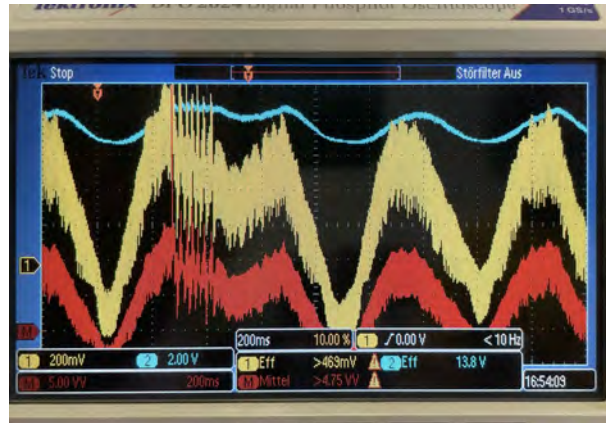


Abbildung 7: Messung 1 am Oszilloskop

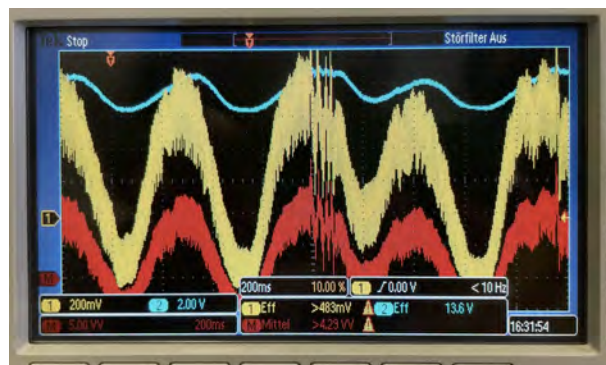


Abbildung 8: Messung 2 am Oszilloskop

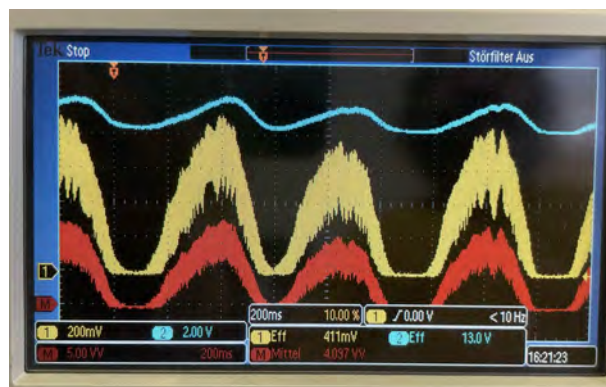


Abbildung 9: Messung 3 am Oszilloskop

Kanal 1 in Gelb zeigt den zeitlichen Verlauf des Ladestroms während der Fahrbewegung.
Kanal 2 in cyan zeigt den zeitlichen Verlauf der Ladespannung.

5 Bedienungsanleitung

Die Lichtmaschine und der Fahrradgestell können wie folgt zusammengebaut werden:

Schritt 1 Fahrradgestell ausklappen und mit vier Spannklotzen an der Grundplatte befestigen. Die Befestigung des Generators lösen, so dass sich der Generator in der Montageschiene frei bewegen kann.

Schritt 2 Riemen vorsichtig über zwei Riemenscheiben ziehen.

Schritt 3 Jetzt das Fahrrad auf den Fahrradrahmen spannen. Die Rollen des Fahrradgestells an das Hinterrad anlegen und die Schraube über dem Sterngriff anziehen, bis genügend Druck auf der Rolle ist.

Schritt 4 Nun die Lichtmaschine in den Schlitz schieben, bis der Riemen gespannt ist. Die Spannung ist ausreichend, wenn sich der Riemen nur noch ca. 1 cm auf und ab bewegen lässt. Dann die Lichtmaschine in dieser Position festziehen.

Die Kabel sind farblich gekennzeichnet. Man muss nur die Kabel mit der gleichen Farbe finden und die Stecker mit den Buchsen zusammenstecken, bis sie hörbar einrasten. Zum Starten muss der Wechselrichter eingeschaltet und die Kippschalter auf **ÖN** gestellt werden. Nun wird die Erregerspule bestromt und es kann in die Pedale getreten werden.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Das Fahrradkino stellt derzeit ein funktionsfähiges Proof of Concept dar. Allerdings ist derzeit nur eine Person in der Lage, gleichzeitig zu treten, was den Aufwand für die Stromerzeugung erheblich erhöht. Dies führt dazu, dass der Energieaufwand für die Darstellung eines kompletten Films zu hoch ist.

Dennoch bleibt das Fahrradkino ein vielversprechender Ansatz, der demonstriert, wie man mit handelsüblichen Komponenten emissionsfreien Strom erzeugen kann. Diese Idee lässt sich rasch auf andere Anwendungen übertragen, beispielsweise indem Fitnessgeräte zu Stromerzeugern umgerüstet werden. So können sie auch im Alltag zur Energieerzeugung genutzt werden. Das Fahrradkino fördert nicht nur die soziale Interaktion, sondern auch die Gesundheit durch mehr Bewegung. Im Vergleich zum Autokino ist es umweltfreundlicher, flexibler und kostengünstiger.

Das Projekt zeigt jedoch seine Komplexität durch die Abstimmung von mechanischen und elektrischen Komponenten sowie die hohen Anforderungen an Mobilität und Benutzerfreundlichkeit. In Zukunft sind weitere Optimierungen erforderlich, um das Potenzial des Fahrradkinos voll auszuschöpfen und seine breitere Anwendung zu ermöglichen.