

Der Weg der Energie von der Energiegewinnung bis zur Fortbewegung auf der Strasse.

Ein Vergleich zwischen einem Elektromofa und
einem Mofa mit Verbrennungsmotor.



Maturitätsarbeit von Sandro Beutler

7. Dezember 2021

Schule:	Kantonsschule Rychenberg
Klasse:	6b G
Fachbereich:	Physik
Betreuende Lehrkraft:	Oettli Michael
Zweitbeurteilende Lehrkraft:	Meier Trüllinger Matias

Inhaltsverzeichnis

1	Abstract	3
2	Vorwort.....	4
3	Einführung	5
3.1	Hypothesen.....	5
3.2	Relevante Antriebs-Bauteile	6
3.2.1	Benzinmofa	6
3.2.2	Elektromofa	8
3.3	Antriebs-Bauteile im Detail	10
3.3.1	Benzinmofa	10
3.3.2	Elektromofa	15
3.4	Definition Energieeffizienz	20
4	Material für Versuche.....	21
4.1	Benzinmofa	21
4.2	Elektromofa	21
4.3	Testapparatur	22
4.4	Zusatzmaterial	24
5	Methode	25
5.1	Hauptversuch.....	25
5.1.1	Benzinmofa	25
5.1.2	Elektromofa	27
5.2	Nebenversuch.....	29
6	Ergebnisse.....	31
6.1	Hauptversuch.....	31
6.1.1	Benzinmofa	31
6.1.2	Elektromofa	32
6.2	Nebenversuch.....	32
6.3	Berechnung der Effizienz	33
6.3.1	Benzinmofa	34
6.3.2	Elektromofa	35
6.3.3	Vergleich Benzinmofa und Elektromofa	36
7	Diskussion	38
8	Quellenverzeichnis	40
9	Abbildungsverzeichnis	41
10	Dank.....	43
11	Anhang.....	I

11.1 Ergänzungen	I
11.1.1 Bernoulli Gleichung	I
11.1.2 Ergebnisse des Hauptversuchs	II
11.1.3 Technische Zeichnungen	III
11.2 Weiterführende Informationen.....	V
11.2.1 Graue Energie	V
11.2.2 Graue Energie bei der Rohstoffgewinnung	V
11.2.3 Graue Energie bei der Herstellung	VII
11.2.4 Graue Energie bei der Gewinnung des Kraftstoffs und des Stroms	VII
11.2.5 Graue Energie beim Recycling	IX

1 Abstract

In dieser Arbeit untersuche ich die Energieeffizienz eines Benzinmofas und eines Elektromofas. Dazu verwende ich eine eigens für diesen Zweck gebaute Apparatur.

Um die Energieeffizienz der beiden Mofas bestimmen zu können, ist es nötig die abgegebene Leistung zu ermitteln. Dazu wird ein Nebenversuch durchgeführt. Dieser wird unter denselben Umständen wie der Hauptversuch durchgeführt.

Aus den Ergebnissen kann man herauslesen, dass das Elektromofa eine bessere Energieeffizienz hat als das Benzinmofa. Die erhaltenen Werte müssen jedoch auch kritisch betrachtet werden.

2 Vorwort

In der heutigen Zeit werden die Ökologie und damit auch die Ökonomie von Fahrzeugen immer wichtiger. Denn durch ökonomischere Fahrzeuge wird weniger Energie benötigt, um diese zu betreiben. Somit wird auch weniger nicht ökologischer Kraftstoff hergestellt. Die ersten Fahrzeuge, welche nicht von Muskelkraft betrieben werden mussten, besaßen einen Dampfmotor. Dieser war aber nach kurzer Zeit nicht mehr leistungsfähig genug. Durch Innovation und Erfindergeist wurde der Benzinmotor entwickelt. Etwa 20 Jahre später kam dann auch der Dieselmotor als Alternative dazu (Wikipedia-Autoren, Dieselmotor, 2021). Vor einigen Jahren wurde bekannt, dass diese Motoren umweltschädliche Abgase ausstossen. Durch die fortschreitende Sensibilisierung der Gesellschaft auf das Thema Umweltschutz, wurde die Nachfrage nach einer umweltschonenden Lösung immer grösser. So wurden in den letzten Jahren neben Elektromotoren mit Strom aus Wasserstoffbrennstoffzellen auch vermehrt Elektromotoren mit Strom aus Lithium-Ionen-Batterien in Fortbewegungsmittel eingebaut.

Diese Entwicklung der Fortbewegung finde ich eine faszinierende Sache. Ich habe mich gefragt, ob die Elektromotoren, mit den fortlaufenden Verbesserungen, ökologischer aber vor allem ökonomischer sind. Zusätzlich zu diesem Interesse, finde ich auch Mofas spannend. Als nun die ersten Elektromofas auf die Strassen kamen, war ich etwas skeptisch. Deshalb wollte ich die Energieeffizienz der Elektromofas der Energieeffizienz der Benzinmofas gegenüberstellen und auswerten.

Aufgrund dessen habe ich mich für das Thema

«Der Weg der Energie von der Energiegewinnung bis zur Fortbewegung auf der Strasse. Ein Vergleich zwischen einem Elektromofa und einem Mofa mit Verbrennungsmotor»

entschieden.

3 Einführung

In den nachfolgenden Kapiteln werde ich die Grundlagen erläutern, welche für diese Arbeit wichtig sind.

3.1 Hypothesen

- Das Elektromofa kann die gleiche Leistung wie das Benzinmofa aufbringen.
- Das Elektromofa ist bei der gleichen Leistungsabgabe energieeffizienter als das Benzinmofa.

Ich habe diese Hypothesen aufgestellt, da in der heutigen Zeit oft die Energieeffizienz von Elektrofahrzeugen angepriesen wird. Jedoch werden selten Aussagen über die Leistungsfähigkeit der Elektrofahrzeuge gemacht. Dies ist aber auch ein wichtiger Punkt, welcher berücksichtigt werden muss, wenn zwei Fahrzeuge miteinander verglichen werden.

Die Datenlage bezüglich der Energieeffizienz der Mofas ist spärlich. Deshalb kann hier noch keine Vermutung zum Ausgang des Experiments in Bezug auf die Energieeffizienz gemacht werden. Es kann aber aufgrund der Datenlage die Vermutung aufgestellt werden, dass das Elektromofa die gleiche Leistung erbringen kann, wie das Benzinmofa.

3.2 Relevante Antriebs-Bauteile

Im folgenden Kapitel wird der Aufbau des Benzin- und des Elektromofas beschrieben. Dabei liegt das Hauptaugenmerk auf den antriebsrelevanten Bauteilen.

3.2.1 Benzinmofa

Der Grundaufbau eines Benzinmofas ist bei allen Modellen sehr ähnlich. Alle Bauteile haben eine bestimmte Funktion (Abb. 1). Eines dieser Teile ist der Tank. Dieser wird verwendet, um den Kraftstoff lagern und transportieren zu können. Des Weiteren besitzt jedes mir bekannte Benzinmofa einen Zweitakt-Ottomotor, welcher mit Hilfe einer Verbrennungsreaktion, aus der im Kraftstoff gespeicherten chemischen Energie kinetische Energie macht. Zwischen dem Tank und dem Motor benötigt es aber noch ein Bauteil, welches den Kraftstoff gezielt dem Motor zuführen kann. Diese Aufgabe wird vom Vergaser übernommen. Ausserdem führt der Vergaser dem Motor auch Sauerstoff zu, welcher für die Verbrennung des Kraftstoffs benötigt wird. Um die kinetische Energie, welche der Motor liefert, auf die Strasse bringen zu können, wird auch eine Übersetzung benötigt, welche die gewünschte Kraft auf das Antriebsrad überträgt. Hierfür wird ein Getriebe verwendet, welches mit Hilfe einer Kette die Rotationsbewegung auf das Hinterrad überträgt. Neben der Energie entstehen im Motor auch gasförmige Abfallprodukte. Diese werden durch die Abgasanlage abgeleitet.

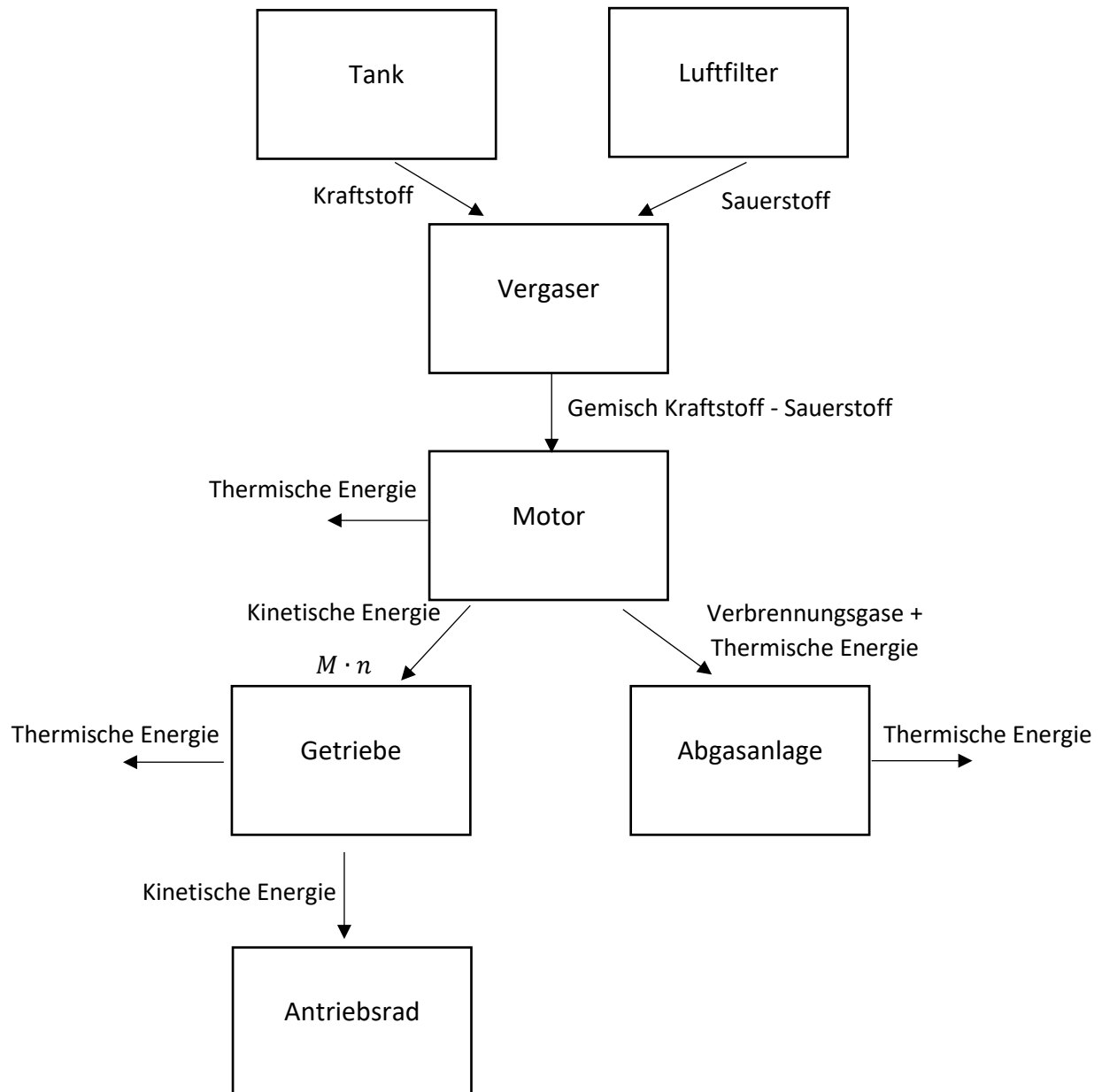
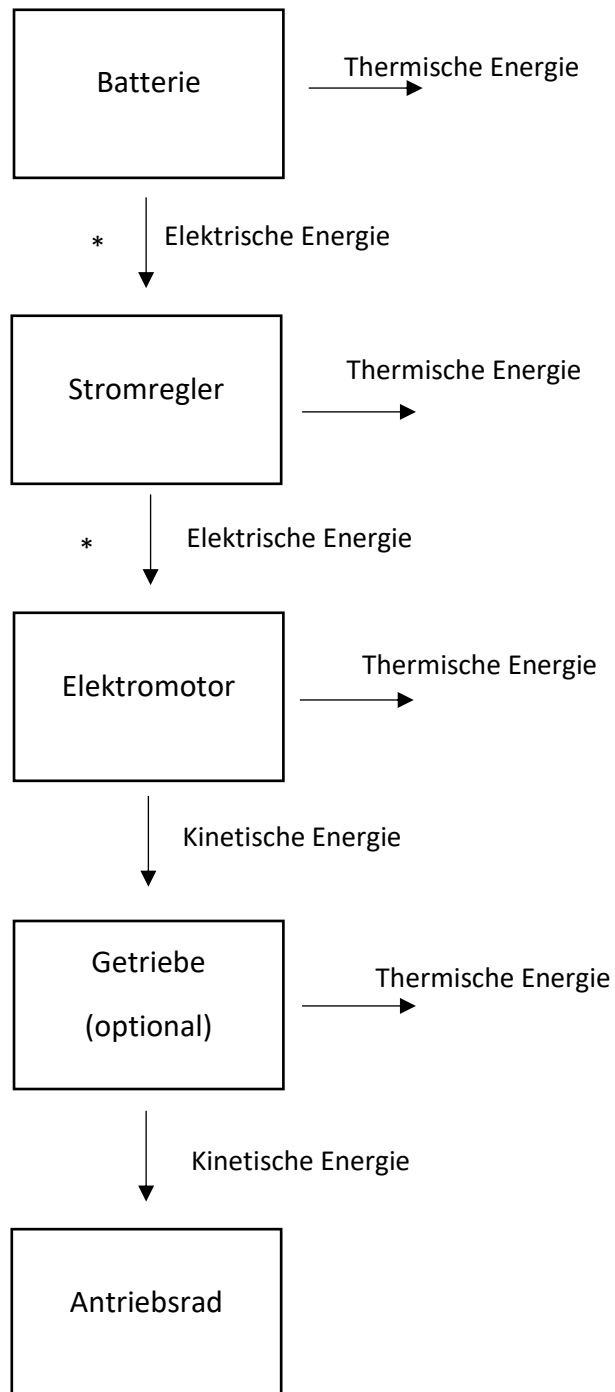


Abbildung 1: Schematische Darstellung Abläufe Benzinmofa

3.2.2 Elektromofa

Wie die Benzinmofas besitzen auch die Elektromofas bestimmte Antriebsbauteile, welche für alle Elektromofas ähnlich sind (Abb. 2). Eines dieser Teile ist die Batterie. Diese ist das Pendant zum Tank beim Benzinmofa und wird benötigt, um die Elektrizität zu speichern und zu transportieren. Diese wird dann über ein Kabel zum Motor geleitet. Im Motor wird aus der elektrischen Energie kinetische Energie erzeugt, welche zur Fortbewegung benutzt wird. Wie beim Benzinmofa wird auch beim Elektromofa ein Bauteil, der Stromregler, benötigt, welches zwischen der Batterie und dem Motor eingesetzt wird, um den Stromzufluss zu steuern. Je nach Abstimmung des Elektromotors, kann oder muss zwischen dem Motor und dem Antriebsrad auch ein Getriebe eingesetzt werden, um eine höhere Drehzahl zu erreichen. Im Gegensatz zum Benzinmofa entstehen beim Elektromofa keine Abfallprodukte.



- * Auch bei der Energieübertragung treten thermische Verluste auf, die hier nicht näher untersucht werden

Abbildung 2: Schematische Darstellung Abläufe Elektromofa

3.3 Antriebs-Bauteile im Detail

3.3.1 Benzinmofa

3.3.1.1 Tank

Der Tank des Mofas besteht aus einem korrosionsresistenten Material. In ihm wird der Kraftstoff, das Benzin-Öl-Gemisch, aufbewahrt. Je nach Mofa-Typ variiert das Fassungsvermögen (Abb. 3). Durch den Verbrauch des Benzins während der Fahrt sinkt der Tankinhalt, was dazu beiträgt, dass das Mofa leichter wird.



Abbildung 3: Tank Benzinmofa

3.3.1.2 Luftfilter

Der Luftfilter (Abb. 4) wird, wie der Name schon verrät, dazu benötigt, die vom Motor angesaugte Luft zu filtern und von kleinen Partikeln zu säubern. Dies ist nötig, da sonst der Vergaser verstopfen oder der Motor Schaden nehmen könnte. So verlängert der Luftfilter die Lebensdauer der ebengenannten Bauteile und trägt deshalb auch zu einer längeren wartungsfreien Zeit des Mofas bei.

Die Grösse des Luftfilters hat einen Einfluss auf die Leistung des Motors. Ist der Luftfilter zu klein, kann der Motor nicht ausreichend Luft durch den Vergaser ansaugen und somit auch nicht seine volle Leistung erbringen. Bei einem zu grossen Luftfilter kann der Motor auch nicht seine volle Leistung erbringen, da dann auch das Luft-Benzin-Gemisch nicht stimmt.



Abbildung 4: Luftfilter aus Plastik

3.3.1.3 Vergaser

Die Aufgabe des Vergasers (Abb. 5) ist, der vom Motor angesaugten Luft die richtige Menge an Kraftstoff beizumischen, um ein optimales Mischverhältnis zu erhalten. Ein Vergaser arbeitet, ohne dass zusätzliche Energie zugeführt werden muss. Die Energie bezieht der Vergaser aus dem vom Motor angesaugten Luftstrom.



Abbildung 5: Vergaser mit Luftfilter (r) und Motor (l)

Für die Zweitakt-Ottomotoren von Mofas reichen einfache Vergaser aus. Diese bestehen aus zwei unterteilten Seiten (Abb. 6). Auf der einen Seite wird die Luft durch eine Verengung des Querschnitts angesogen, welche einen Differenzdruck gegenüber dem Kraftstoffeinlauf erzeugt. Dieser Einlauf besitzt ebenfalls eine Querschnittsverengung in Form einer Düse. Diese dient zur Regulierung und Förderung des Kraftstoffs innerhalb des Vergasers. Beide Seiten des Vergasers lassen sich mit der Bernoulli-Gleichung (für weiter Informationen siehe 11.1.1 Bernoulli Gleichung) der Strömungsmechanik beschreiben. Durch den Differenzdruck zwischen den zwei Seiten, kann das Benzin in die angesaugte Luft verstäubt werden. Dies ist ein passiver Vorgang, welcher von allein, also ohne Energieaufwand, abläuft. (van Basshuysen & Schäfer, 2006, S. 1006 f.)

Ebenfalls im Vergaser enthalten ist ein Schwimmer, welcher den Kraftstoffpegel in der Schwimmerkammer, dem Kraftstoffspeicher des Vergasers, reguliert. Der Luftstrom wird durch die Drosselklappe reguliert. (van Basshuysen & Schäfer, 2006, S. 1006 f.)

Der Vergaser muss präzise eingestellt werden, da eine Verbrennungsreaktion im Motor nur ablaufen kann, wenn sich der Volumenanteil des Benzins in der Luft zwischen der unteren und oberen Zündgrenze befindet.

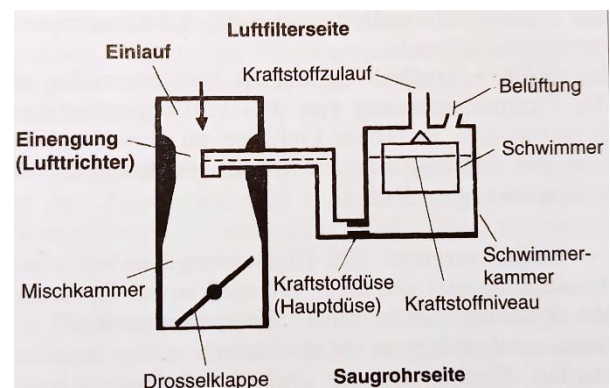


Abbildung 6: Vergaser schematische Darstellung

3.3.1.4 Zweitakt-Ottomotor

Der Zweitakt-Ottomotor (Zweitaktmotor) (Abb. 7) ist das Bauteil, welches die chemische Energie in kinetische Energie umwandelt. Ein Motor gilt dann als Zweitaktmotor, wenn ein Arbeitszyklus eine vollständige Kurbelwellenumdrehung, beziehungsweise einen Kolbenhub, umfasst. Dabei werden lediglich das Verdichten, also der Kompressionstakt, und die Ausdehnung, also der Expansionstakt, als separate Arbeitstakte bezeichnet. Der Spülvorgang, welcher sich in die Entfernung der verbrannten Ladung und das Einführen der Frischladung unterteilt, wird also nicht durch einen zusätzlichen Takt vorgenommen. Die einfachste Möglichkeit diesen Spülvorgang zu steuern, ist durch den Kolben, welcher abwechselnd Schlitze für den Ein- und Auslass abdichtet und wieder freigibt. Mofas besitzen Motoren mit maximal 50 ccm Hubraum. (van Basshuysen & Schäfer, 2006, S. 1069 f.)



Abbildung 7: Zweitakt-Ottomotor des Herstellers Puch

Der erste Takt enthält das Spülen und das Verdichten. Dabei bewegt sich der Kolben von seiner untersten Position zu seiner obersten und verkleinert so das Volumen im Zylinder (Abb. 8). Solange der Kolben die Ein- und Auslassschlitze nicht verdeckt, wird der Zylinder gespült. Nach dem Verschluss dieser Schlitze wird das Gasgemisch verdichtet. (Grohe & Russ, 2007, S. 52)

Der zweite Takt wird auch Arbeitstakt genannt. In diesem Takt wird das Luft-Kraftstoff-Gemisch gezündet. Dies geschieht im Zweitaktmotor mithilfe einer Zündkerze, welche am oberen Ende des Zylinders angebracht ist. Durch die Zündung dehnt sich das Gas aus, und der Kolben bewegt sich wieder nach unten. Sobald der Kolben den Auslassschlitz freigibt, strömt das verbrannte Benzingemisch aus dem Zylinder. Kurz darauf öffnet sich auch der Einlassschlitz, welcher den erneuten Spülvorgang einleitet. Nun beginnt ein neuer Arbeitszyklus. (Grohe & Russ, 2007, S. 52)

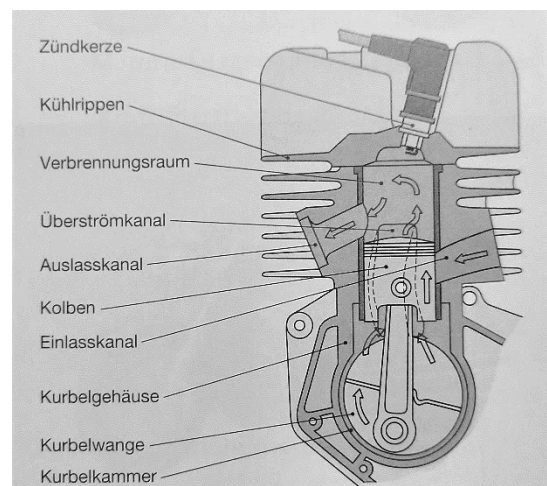


Abbildung 8: Zweitakt-Ottomotor schematische Darstellung

3.3.1.5 Getriebe

Das Getriebe ist, zusammen mit der Kupplung, für die Kraftübertragung vom Motor auf das Antriebsrad zuständig. Diese zwei Bauteile sind nötig, um eine möglichst hohe Transportleistung zu erreichen. (Gerigk, et al., 2009, S. 533 f.)

Die Art des Getriebes und der Kupplung hängt immer vom Mofa-Typ ab. Es gibt sowohl handgeschaltete als auch automatisch geschaltete Mofas. Erstere besitzen meistens zwei Gänge. Automatisch geschaltete Mofas besitzen je nach Typ einen oder zwei Gänge.

Der grösste Unterschied besteht aber in der Kupplung. Bei handgeschalteten Mofas wird die Kupplung von Hand mit Hilfe eines Hebels betätigt. Ein Zug des Hebels wird dann über Drahtseile zur Kupplung geleitet und trennt dort die Kupplungsscheiben voneinander.

Im Gegensatz dazu ist beim automatischen Modell die Kupplung von Anfang an gelöst. Sobald die Drehzahl des Motors die Drehzahl des Standgases überschreitet, werden die Kupplungsscheiben durch Fliehkräfte aneinandergedrückt. Bei zweigängigen Mofas ist es zusätzlich so, dass ab einer bestimmten Drehzahl des Getriebes, dieses automatisch durch die spezielle Mechanik in einen zweiten Gang wechselt. So kann eine höhere Endgeschwindigkeit erreicht werden.

3.3.1.6 Abgasanlage

Die Abgasanlage (Abb. 9) hat die Aufgabe die vom Motor kommenden Abgase abzuführen. Bei Fahrzeugen, welche neu hergestellt werden, wird darauf geachtet, dass die Abgase, welche produziert werden, gereinigt werden. Zusätzlich soll auch eine möglichst kleine Lärmbelastung und Wärmeabstrahlung erreicht werden. Diese Aufgaben werden alle von der Abgasanlage übernommen.

Der wichtigste Aspekt der Abgasanlage bei einem Zweitaktmotor ist die Verzögerung des Abgasausstosses. Diese Verzögerung wird durch den speziellen Aufbau des Auspuffs erreicht. Durch diese Verzögerung entsteht ein Rückstau bis zur Brennkammer des Zylinders. Dieser Stau ist nötig, damit im Zweitaktmotor das einströmende frische Gasgemisch nicht direkt wieder austritt, sondern durch die Abgase zurückgedrückt wird.

Somit lässt sich die Leistung und die Effizienz des Zweitaktmotors auch durch die Auspuffanlage indirekt steuern. Hat diese einen zu grossen Auslass, wird Kraftstoff verschwendet, da ein Teil des Frischgases wieder aus dem Motor entweicht, ohne zu verbrennen. Ist der Auslass zu klein, kann der Zylinder nicht ausreichend gespült werden und ein Rest des verbrannten Gases bleibt darin zurück. Dies hat zur Folge, dass der Motor nicht seine volle Leistung erbringen kann.

Die Funktion des Lärmschutzes wird erreicht, indem die Schallwellen, welche vom Motor erzeugt werden, durch den Stau im Auspuff gedämpft werden. Zusätzlich ist oft noch ein Schalldämpfer eingebaut.



Abbildung 9: Auspuff mit Motor (I)

3.3.2 Elektromofa

3.3.2.1 Batterie

Die Lithium-Ionen-Batterie ist aufgrund ihrer hohen Energiedichte die meistverwendete Batterie für Elektrofahrzeuge. Je nach Hersteller besteht sie neben Lithium aus verschiedenen Zusatzmaterialien, somit handelt es sich bei der Lithium-Ionen-Batterie um eine sogenannte Batteriegattung. Jedoch funktionieren alle Typen dieser Gattung nach demselben Prinzip. (Doppelbauer, 2020, S. 146-159)

In den heutigen Zellen wird normalerweise metallisches Lithium als Kathodenmaterial und Graphit als Anodenmaterial verwendet. Metallisches Lithium ist in verschiedenen Legierungen vorhanden, so zum Beispiel in Verbindung mit Eisen, Chrom, Kobalt, Mangan oder Phosphat. Mit dieser Auswahl an Materialien lässt sich eine Batterie mit einer Spannung von rund 3,0 bis 4,2 V herstellen. Als Elektrolyt werden organische Lösungsmittel wie Ethylencarbonat oder Dimethylcarbonat mit einem Leitsalz wie Lithiumhexafluorophosphat (LiPF_6) verwendet. (Doppelbauer, 2020, S. 146-159)

Der Ablauf der Entladereaktion (Abb. 10) sieht folgendermassen aus. Die Lithium-Ionen (Li^+) bewegen sich im Anodenmaterial zur Grenzschicht und gehen dort in den Elektrolyten über. Dabei wird ein Elektron an der Kathode frei. Das Lithium-Ion bewegt sich dann durch den Separator auf die andere Seite der Batterie und lagert sich dort an das Kathodenmaterial an.

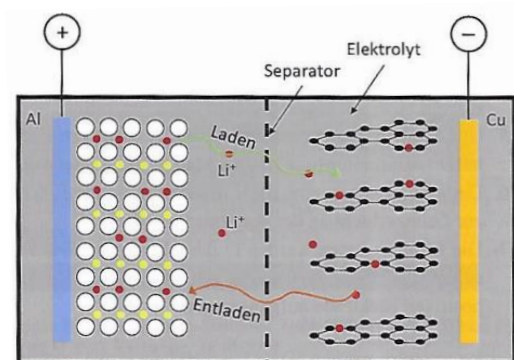


Abbildung 10: Schematische Chemische Reaktion

Gleichzeitig wandert das abgetrennte Elektron zur

Ableitfolie der Anode und über den Elektronenleiter bis zur Ableitfolie auf der anderen Seite der Batterie. Dort verbindet es sich dann mit einem Lithium-Ion, sodass die oben erwähnte Ablagerung des Ions passieren kann. (Doppelbauer, 2020, S. 146-159)

Die Elektronen, welche beim Entladevorgang von der Kathode durch den Elektronenleiter zur Anode fließen bilden den Strom, welcher dann genutzt werden kann. Somit führt der Elektronenleiter im Elektromofa von einem Pol der Batterie über den Motor zum anderen Pol der Batterie. (Doppelbauer, 2020, S. 146-159)

Beim Ladevorgang (Abb. 10) läuft die Reaktion analog zu der oben beschriebenen Reaktion in umgekehrter Reihenfolge ab. Dieser bildet also die Rückreaktion zum Ladevorgang. (Doppelbauer, 2020, S. 146-159)

3.3.2.2 Stromregler

Der Stromregler ist dafür zuständig, den Strom zu regulieren, welcher in den Motor geleitet wird. Durch ihn kann die Leistung des Motors geregelt werden. Wenn mehr Strom zugeführt wird, kann der Motor mehr Leistung erbringen. Stromregler bestehen je nach Anwendungsbereich aus unterschiedlichen elektronischen Komponenten. Jedoch haben alle gemeinsam, dass sie den Strom von der Batterie in die Wicklungen des Motors leiten. Dabei ist je nach Modell des Motors darauf zu achten, dass der Strom in zwei oder mehrere Phasen aufgeteilt wird, um die grösstmögliche Effizienz zu erreichen. Ebenfalls zu beachten ist, dass der Widerstand im Stromregler tief gehalten wird, um nicht unnötig elektrische Energie in Form von Wärme zu verbrauchen.

3.3.2.3 Motor

Die Anzahl verschiedener Motortypen, die mit Strom betrieben werden, ist gross. Jedoch funktionieren alle nach dem Drehstrom- oder dem Gleichstromprinzip. Hier wird der Fokus auf den bürstenlosen Gleichstrommotor gelegt, da dieser im getesteten Mofa verbaut ist. (Wikipedia-Autoren, Bürstenloser Gleichstrommotor, 2021)

Der bürstenlose Gleichstrommotor (Abb. 11) ist entgegen seinem Namen wie eine Drehstrom-Synchronmaschine aufgebaut. Dabei ist der Rotor permanent erregt und wird vom wechselnden Magnetfeld in den Wicklungen des Stators mitgezogen. Permanent erregt bedeutet in diesem Zusammenhang, dass der Rotor mit Permanent-Magneten versehen ist. Im Gegensatz dazu ist der Stator mit Wicklungen, meist aus Kupferdraht, versehen. Durch einen Stromfluss in einer dieser Wicklungen wird in ihr ein Magnetfeld erzeugt. Wird der Stromfluss unterbrochen, so ist auch kein Magnetfeld mehr vorhanden. Mit dieser Technik kann eine Wicklung nach der anderen angesteuert werden. (Wikipedia-Autoren, Bürstenloser Gleichstrommotor, 2021)



Abbildung 11: Bürstenloser Gleichstrommotor, Polarisierung des Rotors in Schwarz hervorgehoben

Die Wicklungen, meist sind es drei, werden gleichmässig um den Rotor verteilt. Nun wird der Strom von der Batterie durch den Stromregler, auch Kommutator genannt, geleitet. Dieser Kommutator bestand in alten Modellen aus Bürsten, die auf Kohlepolen gelitten. Da diese Methode der Stromumwandlung jedoch einen hohen Verschleiss der Pole und Bürsten hat und somit wartungsaufwändig ist, werden in den neuen Modellen elektronische Stromregler verbaut. Diese bestehen aus Halbleiterbauteilen. (Wikipedia-Autoren, Bürstenloser Gleichstrommotor, 2021)

Bei einem Modell mit drei Wicklungen ist immer jeweils eine Wicklung mit der Masse und eine mit der Versorgerspannung verbunden. Die dritte ist nicht angeschlossen und «schwimmt» (floating). Während der Rotation des Motors ist immer die Wicklung schwimmend, welche die Polarität wechselt. (Wikipedia-Autoren, Bürstenloser Gleichstrommotor, 2021)

Die Kommutierungsblöcke eines dreiphasigen Motors sind in Abbildung 12 aufgelistet. Im ersten Kommutierungsblock werden die Schalter V2 und V3 in Abbildung 13 geschlossen. So ist die Wicklung U und somit die Schalter V1/V2 an die Masse angeschlossen. Die Wicklung V und die Schalter V3/V4 sind an die Versorgungsspannung angeschlossen. Und die Wicklung W und die Schalter V5/V6 schwimmen. (Wikipedia-Autoren, Bürstenloser Gleichstrommotor, 2021)

	1	2	3	4	5	6
V1/V2	0	z	+1	+1	z	0
V3/V4	+1	+1	z	0	0	z
V5/V6	z	0	0	z	+1	+1

Abbildung 12: Tabelle Kommutierungsblöcke

Im zweiten Kommutierungsblock werden nun die Schalter V3 und V6 geschlossen, damit die Wicklung W an die Masse angeschlossen und die Wicklung V an die Versorgerspannung angeschlossen ist. Die Wicklung U wechselt zu diesem Zeitpunkt von der Masse aus dem Kommutierungsblock 1 zur Versorgerspannung im Kommutierungsblock 3. Aus diesem Grund schwimmt sie im Kommutierungsblock 2. Dieses Muster in den Kommutierungsblöcken wird fortgesetzt. So entsteht eine drehende Reihenfolge. (Wikipedia-Autoren, Bürstenloser Gleichstrommotor, 2021)

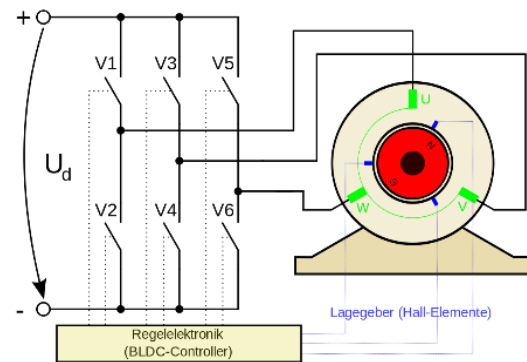


Abbildung 13: Schema Kommutator mit bürstenlosem Gleichstrommotor

In den Wicklungen, welche an die Masse beziehungsweise an die Verbraucherspannung angeschlossen sind, wird durch den Stromfluss ein magnetisches Feld erzeugt. Dieses magnetische Feld zieht den Rotor an oder stösst ihn ab. Die Abstossung tritt zwischen einer gleichgepolten Wicklung und einem gleichgepolten Magneten auf. Die Anziehung erfolgt zwischen einem unterschiedlich gepolten Magneten und einer unterschiedlich gepolten Wicklung. Durch diese Anziehung und Abstossung wird der Rotor in eine drehende Bewegung versetzt. (Wikipedia-Autoren, Bürstenloser Gleichstrommotor, 2021)

Mit Hilfe des Stromreglers und des Aufbaus des Motors kann jede Wicklung einzeln und präzise angesteuert werden. Sind im Motor zusätzlich Sensoren zur Messung des Magnetfeldes verbaut, kann zu jedem Zeitpunkt genau gesagt werden, an welchem Ort sich welche Wicklung befindet. Dies ist zum Beispiel von Vorteil für Servomotoren und Motoren, welche in Drohnen oder

Robotern verbaut sind. Denn dadurch lassen sich Umdrehungen um einen präzisen Winkel genauestens ausführen. (Wikipedia-Autoren, Bürstenloser Gleichstrommotor, 2021)

Die Spannung (U), welche an den Motor angesetzt wird ist proportional zur Motordrehzahl (f_{Motor}) und der Strom (I) durch den Motor ist proportional zum Drehmoment (M_{Motor}) des Motors. (Wikipedia-Autoren, Bürstenloser Gleichstrommotor, 2021)

$$U \propto f_{Motor}$$

$$I \propto M_{Motor}$$

3.3.2.4 Getriebe

Das Getriebe eines Elektromofas hat denselben Zweck wie das Getriebe eines Benzinmofas. Deshalb hat es auch einen ähnlichen Aufbau. In den modernen elektrischen Fahrzeugen werden das Getriebe und die Kupplung meistens in automatischer und nicht in handgeschalteter Form verbaut. Dies ist für viele Fahrzeugführer die komfortablere Variante. Für weitere Informationen siehe Kapitel 3.3.1.5 Getriebe.

3.4 Definition Energieeffizienz

Damit keine Verwirrungen um den Begriff Energieeffizienz auftreten, gebe ich hier eine Definition.

«Die Energieeffizienz ist das Verhältnis von Dienstleistungs-, Waren- oder Energieertrag (Output) zur zugeführten Energie (Input) (...). Unter Energieeffizienz wird somit also die rationelle Verwendung von Energie verstanden. Durch optimierte Prozesse sollen «die quantitativen und qualitativen Verluste die im Einzelnen bei der Wandlung, dem Transport und der Speicherung von Energie» entstehen, minimiert werden, «um einen vorgegebenen (energetischen) Nutzen bei sinkendem Primär- bzw. Endenergieeinsatz zu erreichen» (...).» (Wikipedia-Autoren, Energieeffizienz, 2021)

Wenn in dieser Arbeit von Energieeffizienz gesprochen wird, ist ein Energieertrag als Output gemeint. Des Weiteren werden nur quantitative und nicht qualitative Verluste betrachtet.

4 Material für Versuche

Als Testobjekt stellvertretend für die Benzinmofas wurde ein Mofa der Marke Pony ausgewählt.

Als Testobjekt stellvertretend für die Elektromofas wurde ein Mofa der Marke Super Soco ausgewählt.

4.1 Benzinmofa

Das Benzinmofa (Abb. 14) der Marke «Pony» wurde mir von meiner Schwester zur Verfügung gestellt. Es besitzt einen Sachs Zweitaktmotor mit 50ccm Hubraum. Es handelt sich um ein Automatikgetriebe-Mofa mit einer maximalen Geschwindigkeit von 35 km/h. Es handelt sich um ein Mofa mit der Typenbezeichnung «Pony, 503 GTA»



Abbildung 14: Benzinmofa des Herstellers Pony

4.2 Elektromofa

Das Elektromofa (Abb. 15) wurde mir von der Firma «Grandjean Diffusion SA» zur Verfügung gestellt. Es hat einen Bosch-Motor mit 3 elektronisch begrenzten Fahrstufen verbaut. Der Motor hat eine Nennleistung von 1.6 kW und ein Drehmoment von 115 Nm. Die Stromversorgung besteht aus einer Lithium-Ionen-Batterie von Panasonic mit 60 V und 30 Ah. Das Batteriegewicht beträgt 10 kg. Des Weiteren hat das Mofa eine Maximalgeschwindigkeit von 45 km/h. Das Leergewicht beträgt 74 kg. (vmototsoco, kein Datum)



Abbildung 15: Elektromofa Super Soco CUX

Es handelt sich um ein Mofa mit der Typenbezeichnung «SUPER SCOCO CUX».

4.3 Testapparatur

Die Testapparatur (Abb. 18) besteht aus einem Antriebsrad, einem Bremsrad und einem Bremsarm. Das Bremsrad und das Antriebsrad sind auf einer Achse angebracht, welche in drei Kugellagern dreht. Von diesen Kugellagern sind zwei kleinere mit Hilfe von je einem Flansch pro Kugellager an den Stützen befestigt. Das dritte, etwas grössere Kugellager, ist in die Stütze eingelassen, da dieses nicht gleich hohe Kräfte aufnehmen muss wie die anderen zwei.



Abbildung 16: Antriebsrad mit Metallrad und Flansch mit Kugellager

Das Antriebsrad (Abb. 16) besteht aus Holz und ist gedreht, damit es möglichst rund läuft. Um dieses zu befestigen, wird von beiden Seiten ein Metallrad angeschraubt. In dieses Metallrad ist eine sechseckige Öffnung eingefräst, in welche genau eine Sechskantmutter passt. Mithilfe dieser Öffnungen wird dann das Antriebsrad auf der Achse mit zwei Sechskantmuttern gekontert. Die Achse besteht aus einer M20 Gewindestange. Eine technische Zeichnung des Antriebsrades ist im Anhang zu finden.

Das Bremsrad (Abb. 17) ist eine metallene Traktorfelge. An diese wird eine Metallplatte geschraubt. Auf diese Metallplatte wird dann eine Sechskantmutter geschweisst. Nun wird die Felge über diese Mutter auf die Achse geschraubt und ebenfalls von beiden Seiten gekontert.



Abbildung 17: Bremsrad mit Metallplatte

Um eine gewisse Stabilität zu gewährleisten, wird dieser Aufbau auf eine Schalungstafel geschraubt. Auf diese Platte aus gepresstem Holz wird auch die Halterung für die Mofas geschraubt. Diese bestehen aus verschiedenen Brettern und Winkeln, welche das Mofa anheben und verhindern, dass es nach vorne entweichen kann. Diese Befestigung ist individuell auf das jeweilige Mofa angepasst, da jedes Mofa etwas anders aufgebaut ist und andere Dimensionen hat.

Um das Bremsrad bremsen zu können wird noch ein Bremsarm benötigt (Abb. 18). Dieser besteht aus Weichholz, da dieses einen grösseren Reibungskoeffizienten hat und somit mehr Bremsleistung erzeugt werden kann. Dieser Bremsarm wird mit Hilfe eines Scharniers an einem

senkrechten Vierkantholz befestigt. So ergibt sich ein galgenförmiger Aufbau. Dieser wird durch eine Querstrebe noch verstärkt. Um das Bremsmoment noch weiter zu erhöhen, wird am Ende des Bremsarms eine Ringschraube eingedreht, an welche nun ein Gewicht angehängt werden kann. Dieses Gewicht besteht aus einem kleinen Eimer, welcher mit Gewichten einer Waage gefüllt wird.



Abbildung 18: Testapparatur

4.4 Zusatzmaterial

Wassergeeichte Messflasche:

0.5 l Flasche, Volumenmarkierungen mit Wasser geeicht (Abb. 19)

Strommessgerät:

«Energiesmessgerät» der Firma «brennstuhl» (Abb. 20)

Seil

Material: synthetisch

Umlenkrolle:

Metall, Durchmesser: ca. 20 cm

Eimer:

Material: Eisen

Sand:

Grob- und feinkörniges Gemisch

Meter:

im Handel erhältlicher Doppelmeter

Klebeband:

Malerklebeband für Markierung auf dem Eimer

Videoanalysetool:

«VidAnalysis free» kostenlos erhältlich bei Google Play Store (Abb. 21)

Fahrradcomputer:

«Pure 1» der Firma «Sigma», Datenübertragung via Kabel (Abb. 22)

Abbildung 19:
MessflascheAbbildung 20:
Energiesmessgerät

Abbildung 21: Videoanalysetool

Abbildung 22: Fahrradcomputer,
Bildschirm (l), Sensor (m), Magnet (r)

5 Methode

5.1 Hauptversuch

5.1.1 Benzinmofa

Im Folgenden werde ich das Vorgehen mit dem Benzinmofa während des Experiments, welches dazu dienen soll, die Energieeffizienz des getesteten Benzinmofas zu ermitteln, genauer beschreiben.

Schritt 1: Vorbereitung

Das Benzinmofa wird auf der Testapparatur befestigt. Das Hinterrad wird auf die Antriebsrolle gestellt und das Vorderrad wird an den Anschlag gefahren (Abb. 23). Da das Mofa nun in einem bestimmten Winkel und nicht horizontal steht, wird erst jetzt das Benzin abgelassen. Dies geschieht, indem man den Benzinschlauch, welcher vom Tank in den Vergaser führt, beim Vergaser abzieht und in einen Kanister hält. Jetzt wird der Benzinhahn geöffnet und erst wieder geschlossen, wenn kein Benzin mehr nachläuft. Der Schlauch wird wieder angeschlossen. Nun werden 5dl Benzin in einer Messflasche, welche mit Wasser geeicht wurde, abgemessen und in den Tank eingefüllt.

Danach wird am Mofa ein Fahrradcomputer angebracht, welcher sowohl die gefahrene Geschwindigkeit, die gefahrene Distanz als auch die benötigte Zeit anzeigt. Dieser Computer wird nun zurückgesetzt.

Schritt 2: Start des Versuchs

Das Mofa wird auf der Apparatur angelassen und der Hebelarm mit dem Gewicht wird abgesenkt. Nun wird das Mofa auf 15 km/h beschleunigt und auf dieser Geschwindigkeit gehalten. Der Versuch wird so lange durchgeführt, bis eine Distanz von 3 Kilometern abgefahren wurde.

Schritt 3: Ende des Versuchs

Sobald die Distanz von 3 Kilometern erreicht wird, wird das Mofa ausgeschaltet. Ebenfalls wird der Benzinhahn des Mofas geschlossen, damit kein weiteres Benzin nachfliessen kann.



Abbildung 23: Benzinmofa auf Testapparatur

Schritt 4: Messen

Nun wird der Benzinschlauch, welcher aus dem Tank in den Vergaser führt, am Vergaser abgezogen. Dieses Ende wird nun in die Messflasche gehalten und der Benzinahn wieder geöffnet, damit das Benzin in die Flasche läuft. Das Mofa darf dabei auf keinen Fall von der Testapparatur entfernt werden, sodass der gleiche Winkel beibehalten wird. Jetzt wird die Menge des noch vorhandenen Benzins, die Distanz, die Geschwindigkeit und die dafür benötigte Zeit notiert.

Schritt 5: Nächster Versuch

Danach wird der Benzinschlauch wieder angeschlossen und in den Tank werden wieder 5dl Benzin gefüllt. Nachdem der Velocomputer zurückgesetzt wird, ist der Aufbau bereit für den nächsten Testdurchlauf.

5.1.2 Elektromofa

Im Folgenden werde ich das Vorgehen mit dem Elektromofa während des Experiments, welches dazu dienen soll, die Energieeffizienz des getesteten Elektromofas zu ermitteln, genauer beschreiben.

Schritt 1: Vorbereitung

Das Mofa wird eingeschaltet, um die gefahrene Distanz zurückzusetzen. Danach wird die Batterie aus dem Mofa entfernt und vollständig aufgeladen.

Schritt 2: Befestigung

Das Mofa wird auf die dafür vorgesehene Rampe gestellt (Abb. 24). Dabei wird darauf geachtet, dass der Ständer des Mofas ausgeklappt ist, damit es einen sicheren Stand hat. Ebenfalls sorgfältig kontrolliert wird das Aufliegen des Hinterrades auf dem Antriebsrad der Prüfapparatur. Wichtig dabei ist, dass zwischen diesen zwei Rädern kein Schlupf entstehen kann. Danach wird die volle Batterie wieder in das Mofa gelegt und angeschlossen. Das Gewicht wird an den Hebelarm angehängt, welcher darauf langsam abgesenkt wird.

Schritt 3: Start des Versuchs

Das Mofa wird gestartet. Nun wird beschleunigt, bis das Zweirad eine Geschwindigkeit von 15 km/h erreicht. Sobald dies der Fall ist, wird der Tempomat eingeschaltet, damit eine konstante Geschwindigkeit gehalten werden kann. Gleichzeitig mit dem Beginn der Beschleunigung wird manuell eine Stoppuhr gestartet, welche die Zeit bis zum Ende des Durchlaufs misst.

Schritt 4: Ende des Versuchs

Der Tempomat des Mofas und das Fahrzeug werden ausgeschaltet, sobald dieses eine Strecke von 3 Kilometern zurückgelegt hat. Dann wird auch die Stoppuhr angehalten und sowohl die Prozentzahl der verbleibenden Batterieladung als auch die benötigte Zeit notiert.



Abbildung 24: Elektromofa auf Testapparatur

Schritt 5: Ladevorgang

Nun wird die Batterie des Mofas wieder entfernt, ohne das Mofa von der Apparatur zu entfernen. So kann sichergestellt werden, dass das Mofa bei allen Tests gleich befestigt ist. Die Batterie wird nun an das Ladekabel angeschlossen, welches über das Energiemessgerät mit der Steckdose verbunden wird. Zuvor muss dieses Messgerät jedoch zurückgesetzt werden. Sobald der Stromkreislauf geschlossen ist, wird manuell eine Stoppuhr gestartet (Abb. 25).



Abbildung 25: Ladevorgang

Schritt 6: Beenden des Testzyklus

Sobald die Batterie über ihre eingebauten Lichter signalisiert, dass sie vollgeladen ist, wird das Ladekabel aus der Steckdose gezogen und die Zeit der Stoppuhr gestoppt. Nun wird diese Zeit und der Wert für die benötigte Leistung für das Laden notiert. Nun wird die Batterie erneut in das Mofa eingesetzt. Nachdem die gefahrene Distanz wieder zurückgesetzt ist, kann ein neuer Testzyklus beginnen.

5.2 Nebenversuch

Um die Leistungsabgabe der Mofas zu ermitteln wird ein zweiter Versuch gemacht. Er dient dazu, die von den Mofas aufgebrauchte Kraft zu ermitteln. Der Versuch wird nach dem folgenden Schema durchgeführt.

Schritt 1: Aufbau

Eine Umlenkrolle wird an einem Balken über der Testapparatur befestigt. Dann wird ein Seil an der Holzrolle der Testapparatur mit Klebeband so befestigt, dass das Seil kein Schlupf hat. Dieses Seil wird über die Umlenkrolle gelegt. Am anderen Ende wird ein Eimer befestigt. Am Eimer wird eine Markierung angebracht, welche die Videoanalyse vereinfacht (Abb. 26).

Schritt 2: Justierung

Der Eimer wird mit Sand gefüllt und das Seil auf die Holzrolle aufgewickelt. Dem Eimer wird ein kleiner Schubser gegeben, um die statische Reibung zu überwinden. Bei der Abwärtsbewegung wird darauf geachtet, ob der Eimer beschleunigt oder verzögert. Bei einer Beschleunigung des Eimers wird ihm Sand entnommen. Bei einer Verlangsamung der Fallbewegung, wird dem Eimer Sand hinzugegeben. Dieses Vorgehen wird wiederholt, bis der Eimer mit einer konstanten Geschwindigkeit sinkt.



Abbildung 26:
Versuchsaufbau
Nebenversuch

Schritt 3: Dokumentation

Wenn das Bremsmoment und das Gewicht des Eimers so im Gleichgewicht sind, dass der Eimer mit einer konstanten Geschwindigkeit sinkt, wird von diesem Fall ein Video gemacht. Dabei wird darauf geachtet, dass ein Meter als Referenz im Videoausschnitt zu sehen ist. Anschliessend wird der Eimer mit Inhalt gewogen und das Gewicht auf 100g genau notiert.

Schritt 4: Kontrolle

Das Video der Dokumentation wird in das Videoanalysetool importiert. In diesem Tool wird der Meter als Referenzlänge markiert. Dann wird in jedem Frame des Videos die Markierung auf dem Eimer markiert. Das Ergebnis der Videoanalyse sind die Werte der Veränderung des Ortes im Laufe der Zeit. Dies sind numerische Werte. Zur einfacheren Analyse werden diese in eine Exceltabelle eingefügt und daraus wird ein Diagramm gefertigt. Wenn dieses Diagramm einen linearen Verlauf der Änderung des Ortes zur Änderung der Zeit aufweist, beweist dies, dass die Menge an Sand die korrekte ist. Und somit ist auch bewiesen, dass die Gewichtskraft des Sandes im Gleichgewicht mit der Gleitreibung des Bremsrades ist.

6 Ergebnisse

Beide Mofas werden je 4-mal auf dem Prüfstand getestet. In diesem Kapitel werden die Ergebnisse aufgeführt. Die Ergebnisse des Nebenversuchs sind am Ende des Kapitels zu finden.

6.1 Hauptversuch

Gleichbleibende Parameter	
Gefahrene Geschwindigkeit	15 km/h
Gefahrene Distanz	3.00 km
Umfang Antriebsrad	1.00 m
Umfang Bremsrad	1.12 m
Länge Bremsarm gesamt	0.84 m
Länge Bremsarm Scharnier bis Auflagepunkt	0.21 m
Gewicht am Bremsarm	3.7 kg

Abbildung 27: Gleichbleibende Parameter

Diese Parameter (Abb. 27) werden im Laufe aller Versuche beibehalten. So kann garantiert werden, dass die Tests alle unter den gleichen Bedingungen ablaufen.

6.1.1 Benzinmofa

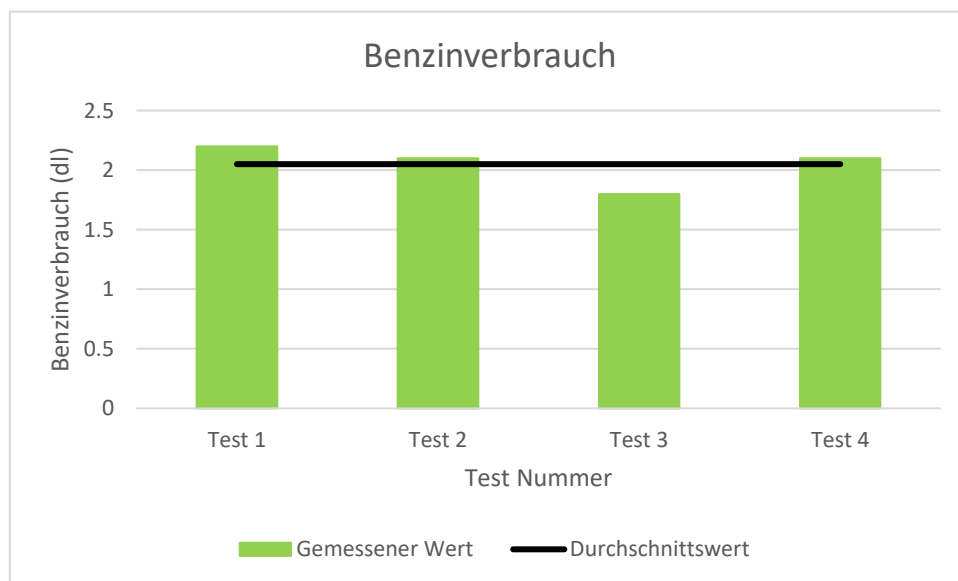


Abbildung 28: Verbrauch vom Benzinmofa auf 3 km

Das Benzinmofa verbraucht im Durchschnitt 2.05 dl Benzin auf 3 Kilometer (Abb. 28).

6.1.2 Elektromofa

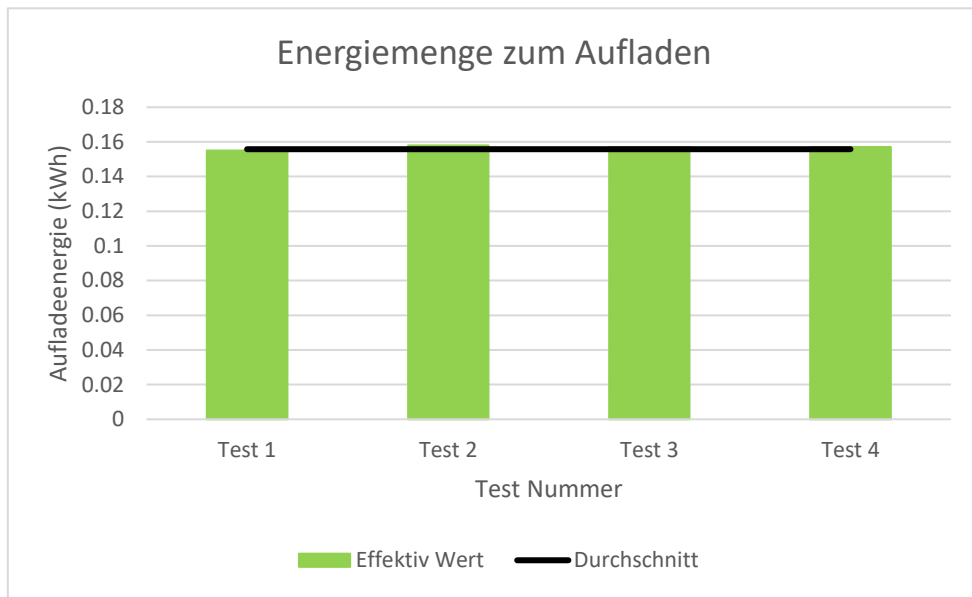


Abbildung 29: Versuch Elektromofa

Das Elektromofa wandelt im Durchschnitt 0.158 kWh Energie auf 3 Kilometer um (Abb. 29).

6.2 Nebenversuch

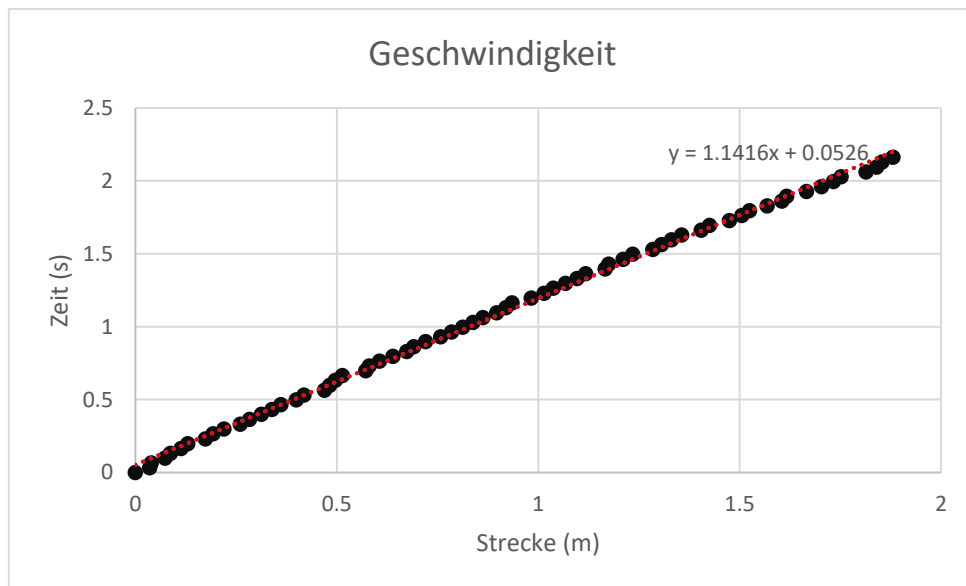


Abbildung 30: Kontrolle der Beschleunigung

Die Werte des Nebenversuchs zeigen in diesem Diagramm, dass ein linearer und Bewegungsablauf ohne Beschleunigung oder Verlangsamung erreicht wird. Die Trendlinie y (Abb. 30) ist der Graph einer linearen Funktion auch dies illustriert die gleichbleibende Geschwindigkeit.

6.3 Berechnung der Effizienz

Um die Resultate der Mofas vergleichen und eine Aussage bezüglich der Effizienz der beiden Mofas machen zu können müssen noch einige Werte berechnet werden.

Für die Berechnungen wurden folgende Symbole verwendet:

Symbole	Einheit	Bedeutung
η_B	keine	Wirkungsgrad Benzinmofa
η_E	keine	Wirkungsgrad Elektromofa
E_{Bab}	J	Vom Benzinmofa abgegebene Energie
E_{Bauf}	J	Vom Benzinmofa aufgenommene Energie
E_{Eab}	J	Vom Elektromofa abgegebene Energie
E_{Eauf}	J	Vom Elektromofa aufgenommene Energie
F_E	N	Vom Eimer ausgehende Kraft im Nebenversuch
H_S	kWh/l	Brennwert von Benzin
V_B	l	Verbrauchtes Benzinvolumen
a_g	m/s^2	Erdbeschleunigung
F	N	Vom Mofa aufgebrachte Kraft
P	W	Abgegebene Leistung
W	J	Vom Mofa verrichtete Arbeit
m	kg	Gewicht des Eimers im Nebenversuch
q	keine	Verhältnis der beiden Wirkungsgrade der Mofas
s	m	Gefahrene Strecke
t	s	Benötigte Zeit für den Versuch

6.3.1 Benzinmofa

Um die Effizienz beziehungsweise den Wirkungsgrad des Benzinmofas (η_B) berechnen zu können, muss zuerst die abgegebene Energie (E_{Bab}) und die aufgenommene Energie (E_{Bauf}) berechnet werden. (Wikipedia-Autoren, Wirkungsgrad, 2021)

Die aufgenommene Energie ist die Energie, welche dem Mofa über den Kraftstoff zugeführt wurde. Diese Energie berechnet sich aus dem Benzinvolumen (V_B) und dem Brennwert (H_S) von Benzin. Es muss jedoch auch in miteinbezogen werden, dass das Benzin mit Motorenöl im Verhältnis 1:40 gemischt wird, deshalb wird das Benzinvolumen mit dem Faktor $\frac{40}{41}$ multipliziert. Ebenfalls beachtet werden muss, dass die aufgenommene Energie in Joule und nicht in kWh ausgedrückt werden muss. Dafür muss ein Umrechnungsfaktor von $3.6 \cdot 10^6 \frac{\text{J}}{\text{kWh}}$ genommen werden (Wikipedia-Autoren, Wattstunde, 2021). Somit kann die aufgenommene Energie des Benzinmofas folgendermassen ausgedrückt werden.

$$E_{Bauf} = V_B \cdot \frac{40}{41} \cdot H_S \cdot 3.6 \cdot 10^6 \frac{\text{J}}{\text{kWh}} \quad (1)$$

V_B wurde im Hauptversuch gemessen; $H_S = 9,7 \text{ kWh/l}$

Die abgegebene Energie (E_{Bab}) des Benzinmofas wird aus der konstant gehaltenen Leistung (P) und der Zeit (t), über welche diese Leistung erbracht wird, berechnet. (Wikipedia-Autoren, Energie, 2021)

$$E_{Bab} = P \cdot t \quad (2)$$

Die Leistung (P), welche durch das Mofa abgegeben wird, berechnet sich aus der Arbeit (W), welche das Mofa verrichtet und der Zeit (t). (Wikipedia-Autoren, Leistung (Physik), 2021)

$$P = \frac{W}{t} \quad (3)$$

Die Arbeit (W), welche vom Benzinmofa verrichtet wird, berechnet sich aus der aufgewendeten Kraft (F) und der gefahrenen Strecke (s). (Wikipedia-Autoren, Arbeit (Physik), 2021)

$$W = F \cdot s \quad (4)$$

Bei der Substitution der Formeln (2)-(4) erhält man folgende Formel für die abgegebene Energie des Benzinmofas.

$$E_{Bab} = \frac{F \cdot s}{t} \cdot t \quad (5)$$

Diese Formel lässt sich zu folgender Form vereinfachen.

$$E_{Bab} = F \cdot s \quad (6)$$

Um die aufgewendete Kraft (F) zu ermitteln kann der Nebenversuch mit dem Eimer hinzugezogen werden. Damit der Eimer die Gleitreibung überwinden kann muss er dieselbe Kraft aufbringen wie die Mofas im Hauptversuch. Diese Kraft des Eimers (F_E) wird mit dessen Gewicht (m) und der Erdbeschleunigung (a_g) berechnet. Damit erhält man folgende Formel für die aufgewendete Kraft.

$$F = F_E = m \cdot a_g \quad (7)$$

Daraus ergibt sich folgende finale Formel für die abgegebene Energie.

$$E_{Bab} = m \cdot a_g \cdot s \quad (8)$$

Nun lässt sich der Wirkungsgrad des Benzinmofas (η_B) wie folgt berechnen.

$$\eta_B = \frac{E_{Bab}}{E_{Bauf}} = \frac{m \cdot a_g \cdot s}{V_B \cdot \frac{40}{41} H_S \cdot 3.6 \cdot 10^6 \frac{J}{kWh}} \quad (9)$$

6.3.2 Elektromofa

Um den Wirkungsgrad des Elektromofas berechnen zu können muss nur noch die abgegebene Energie berechnet werden, da die aufgenommene Energie bereits mit dem Energiemessgerät gemessen werden konnte. Es muss jedoch auch hier darauf geachtet werden, dass die gemessene Energie in Joule und nicht in kWh angegeben werden muss. Dafür wird auch hier ein Umrechnungsfaktor von $3.6 \cdot 10^6 \frac{J}{kWh}$ verwendet.

Die abgegebene Energie des Elektromofas berechnet sich in der gleichen Weise wie die des Benzinmofas, da beide Mofas auf demselben Prüfstand unter denselben Bedingungen getestet wurden. Die Formel für die abgegebene Energie des Elektromofas (E_{Eab}) lautet also wie folgt.

$$E_{Eab} = m \cdot a_g \cdot s \quad (10)$$

Der Wirkungsgrad des Elektromofas berechnet sich demzufolge wie folgt.

$$\eta_E = \frac{E_{Eab}}{E_{Eauf} \cdot 3.6 \cdot 10^6 \frac{\text{J}}{\text{kWh}}} = \frac{m \cdot a_g \cdot s}{E_{Eauf} \cdot 3.6 \cdot 10^6 \frac{\text{J}}{\text{kWh}}} \quad (11)$$

6.3.3 Vergleich Benzinmofa und Elektromofa

Nun lässt sich das Verhältnis der beiden Wirkungsgrade des Elektromofas und des Benzinmofas berechnen. Dazu wird der Wirkungsgrad des Elektromofas durch den Wirkungsgrad des Benzinmofas geteilt. So erhält man folgende Formel.

$$q = \frac{\eta_E}{\eta_B} = \frac{\frac{m \cdot a_g \cdot s}{E_{Eauf} \cdot 3.6 \cdot 10^6 \frac{\text{J}}{\text{kWh}}}}{\frac{V_B \cdot \frac{40}{41} H_S \cdot 3.6 \cdot 10^6 \frac{\text{J}}{\text{kWh}}}{m \cdot a_g \cdot s}} \quad (12)$$

Diese Formel lässt sich wie folgt vereinfachen.

$$q = \frac{m \cdot a_g \cdot s}{E_{Eauf} \cdot 3.6 \cdot 10^6 \frac{\text{J}}{\text{kWh}}} \cdot \frac{V_B \cdot \frac{40}{41} H_S \cdot 3.6 \cdot 10^6 \frac{\text{J}}{\text{kWh}}}{m \cdot a_g \cdot s} \quad (13)$$

Nun können die Parameter für die Masse des Eimers (m), die Erdbeschleunigung (a_g) und der zurückgelegte Weg (s) aus der Gleichung gestrichen werden. Dies macht auch Sinn, wenn man in Betracht zieht, dass diese Parameter sowohl beim Test mit dem Elektromofa als auch bei dem Test mit dem Benzinmofa gleich sind und deshalb auch jeweils den gleichen Einfluss auf den Versuch ausüben. Auch der Umrechnungsfaktor kann gestrichen werden, da dieser einmal über und einmal unter dem Bruchstrich vorkommt.

Nun erhält man die folgende finale Formel für das Verhältnis (q) der Wirkungsgrade des Elektro- und des Benzinmofas.

$$q = \frac{V_B \cdot \frac{40}{41} H_S}{E_{Eauf}} \quad (14)$$

Setzt man nun die Zahlen der Versuche in diese Formel ein, erhält man folgende Ergebnisse. Wie oben erwähnt wird für H_S der Wert 9.7 kWh verwendet.

Tabelle 1: Berechnung Verhältnis der Wirkungsgrade

	Verbrauch Benzin (dl) V_B	Verbrauch Elektro (kWh) E_{Eauf}	η_E	η_B	Verhältnis Wirkungsgrade q
Versuch 1	2.2	0.155	0.701	0.052	13.42
Versuch 2	2.1	0.158	0.688	0.055	12.57
Versuch 3	1.8	0.157	0.692	0.064	10.84
Versuch 4	2.1	0.157	0.693	0.055	12.65
Mittelwert	2.05	0.157	0.694	0.056	12.37

Das Verhältnis der Wirkungsgrade sagt aus wie viel effizienter das eine Mofa im Verhältnis zum anderen ist.

Um diese Ergebnisse zu unterstützen habe ich Referenzwerte recherchiert. Dabei ergab sich, dass ein Ottomotor im Durchschnitt einen Wirkungsgrad von 30% besitzt. (Energy-Contest: Motor- vs. E-Roller, S. 1)

Der Wirkungsgrad eines Elektromotors liegt bei fast 100% (Energy-Contest: Motor- vs. E-Roller, S. 2)

7 Diskussion

Bei Testfahrten auf einer vorgegebenen Strecke hat das Elektromofa, mit dem gleichen Fahrer wie das Benzinmofa, mindestens dieselbe, meist sogar eine deutlich höhere Geschwindigkeit erreicht als das Benzinmofa. Daraus kann man schliessen, dass das Elektromofa mindestens dieselbe, wenn nicht sogar eine grössere Leistung wie das Benzinmofa abgeben kann.

Aus der Tabelle 1 kann man entnehmen, dass das Elektromofa im Durchschnitt etwa 12-mal so energieeffizient ist, wie das Benzinmofa. Dieses Ergebnis muss jedoch kritisch betrachtet werden. Denn beide Mofas wurden nur bei einer Geschwindigkeit getestet. So kann es sein, dass das Elektromofa näher an dessen optimaler Geschwindigkeit getestet wurde als das Benzinmofa.

Ebenfalls zu beachten gilt, dass das Elektromofa nicht nur eine, sondern 3 Fahrstufen hat. Um konstante Ergebnisse zu erhalten, wurde das Elektromofa jedoch nur auf der ersten der 3 Fahrstufen getestet.

Die Diskrepanz zwischen dem errechneten Wirkungsgrad und dem recherchierten Wirkungsgrad des Zweitakt-Ottomotors, lässt sich damit erklären, dass die Mofas nur bei einer bestimmten Leistungsabgabe und einer bestimmten Drehzahl getestet wurden. Die Drehzahl hat bei einem Zweitakt-Ottomotor einen sehr grossen Einfluss auf den Wirkungsgrad. Je höher diese ist, desto tiefer ist der Wirkungsgrad. (Energy-Contest: Motor- vs. E-Roller, S. 3)

Der Unterschied zwischen den Referenzwerten und den Berechnungen zum Wirkungsgrad des Elektromofas lassen sich hauptsächlich darauf zurückführen, dass nicht nur der Motor, sondern die gesamte Antriebskette getestet wurde. Dabei fallen vor allem Reibungsverluste im Getriebe und zwischen den Rädern und der Strasse an. Diese führen dazu, dass der Wirkungsgrad des gesamten Mofas sinkt. Die Drehzahl hat einen viel kleineren Einfluss auf den Wirkungsgrad des Elektromofas als beim Benzinmofa. (Energy-Contest: Motor- vs. E-Roller, S. 3)

Zusammenfassend kann man sagen, dass das Elektromofa, obwohl einige Schwierigkeiten während den Tests auftraten, definitiv energieeffizienter ist.

Weiter wäre es wichtig die Mofas umfassenderen Tests zu unterziehen, bei welchen die Mofas an verschiedenen Betriebspunkten getestet werden, da die Energieeffizienz vor allem beim

Benzinmofa stark vom Betriebspunkt abhängt. So könnte eine umfassendere Aussage über die Energieeffizienz gemacht werden.

8 Quellenverzeichnis

Doppelbauer, M. (2020). *Grundlagen der Elektromobilität*. Wiesbaden: Springer Fachmedien.

Energy-Contest: Motor- vs. E-Roller. (kein Datum). Von https://www.bing.com/search?q=energy-contest+motor+vs+elektromofa&qs=n&form=QBRE&msbsrank=0_0_0&sp=-1&pq=energy-contest+motor+vs+elektromofa&sc=0-35&sk=&cvid=94CC5EC5144E4B0E9EE853916BF19D8E abgerufen

Gerigk, P., Bruhn, D., Danner, D., Girnus, C., Göbert, J., Kruse, D., . . . Volkenheimer, R. (2009). *Kraftfahrzeugtechnik, 7. Auflage*. Bildungshaus Schulbuchverlage.

Grohe, H., & Russ, G. (2007). *Otto- und Dieselmotoren, 14. Auflage*. Würzburg: Vogel Industrie Medien GmbH & Co. KG.

van Basshuysen, R., & Schäfer, F. (2006). *Lexikon Motorentchnik, 2. Auflage*. Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, GWV Fachverlag GmbH.

vmototsoco. (kein Datum). Abgerufen am 12. 10 2021 von <https://www.vmotosoco.ch/de/models/super-soco-cux.html>

VSE. (kein Datum). Abgerufen am 13. 10 2021 von <https://www.strom.ch/de/energiewissen/produktion-und-handel/produktion-strommix>

Wikipedia-Autoren. (26. September 2021). „*Well-to-Tank*“. (W. –D. Enzyklopädie., Herausgeber) Abgerufen am 13. 10 2021 von <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Well-to-Tank&oldid=215902586>

Wikipedia-Autoren. (22. 10 2021). *Arbeit (Physik)*. Von [https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Arbeit_\(Physik\)&oldid=216578291](https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Arbeit_(Physik)&oldid=216578291) abgerufen

Wikipedia-Autoren. (29. März 2021). *Bürstenloser Gleichstrommotor*. Abgerufen am 15. 10 2021 von https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=B%C3%BCrstenloser_Gleichstrommotor&oldid=210360304

Wikipedia-Autoren. (4. Oktober 2021). *Dieselmotor*. Abgerufen am 31. 10 2021 von <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Dieselmotor&oldid=216113089>

Wikipedia-Autoren. (28. 10 2021). *Energie*. Von <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Energie&oldid=216758068> abgerufen

Wikipedia-Autoren. (17. September 2021). *Energieeffizienz*. Abgerufen am 16. 10 2021 von <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Energieeffizienz&oldid=215662567>

Wikipedia-Autoren. (25. Juni 2021). *Graue Energie*. Abgerufen am 21. 10 2021 von https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Graue_Energie&oldid=213271253

Wikipedia-Autoren. (13. Oktober 2021). *Kraft-Wärme-Kopplung*. Abgerufen am 21. 10 2021 von <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Kraft-W%C3%A4rme-Kopplung&oldid=216338013>

Wikipedia-Autoren. (19. 10 2021). *Leistung (Physik)*. Von [https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Leistung_\(Physik\)&oldid=216506612](https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Leistung_(Physik)&oldid=216506612) abgerufen

Wikipedia-Autoren. (1. 11 2021). *Metallurgie*. Abgerufen am 6. 11 2021 von <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Metallurgie&oldid=216877537>

- Wikipedia-Autoren. (27. 5 2021). *Polymerisation*. Abgerufen am 6. 11 2021 von
<https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Polymerisation&oldid=212417105>
- Wikipedia-Autoren. (28. 4 2021). *Wattstunde*. Von
<https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Wattstunde&oldid=211394486> abgerufen
- Wikipedia-Autoren. (7. 9 2021). *Wirkungsgrad*. Von
<https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Wirkungsgrad&oldid=215387893> abgerufen
- Young, D., & Stadler, S. (2015). *Introduction to Physics, 10. Ausgabe*. John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd.

9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung Abläufe Benzinmofa	7
Abbildung 2: Schematische Darstellung Abläufe Elektromofa	9
Abbildung 3: Tank Benzinmofa	10
Abbildung 4: Luftfilter aus Plastik	10
Abbildung 5: Vergaser mit Luftfilter (r) und Motor (l)	11
Abbildung 6: Vergaser schematische Darstellung	11
Abbildung 7: Zweitakt-Ottomotor des Herstellers Puch	12
Abbildung 8: Zweitakt-Ottomotor schematische Darstellung	12
Abbildung 9: Auspuff mit Motor (l)	14
Abbildung 10: Schematische Chemische Reaktion	15
Abbildung 11: Bürstenloser Gleichstrommotor, Polarisierung des Rotors in Schwarz hervorgehoben	17
Abbildung 12: Tabelle Kommutierungsblöcke	18
Abbildung 13: Schema Kommutator mit bürstenlosem Gleichstrommotor	18
Abbildung 14: Benzinmofa des Herstellers Pony	21
Abbildung 15: Elektromofa Super Soco CUX	21
Abbildung 16: Antriebsrad mit Metallrad und Flansch mit Kugellager	22
Abbildung 17: Bremsrad mit Metallplatte	22
Abbildung 18: Testapparatur	23
Abbildung 19: Messflasche	24
Abbildung 20: Energiemessgerät	24
Abbildung 21: Videoanalysetool	24
Abbildung 22: Fahrradcomputer, Bildschirm (l), Sensor (m), Magnet (r)	24
Abbildung 23: Benzinmofa auf Testapparatur	26
Abbildung 24: Elektromofa auf Testapparatur	28
Abbildung 25: Ladevorgang	28
Abbildung 26: Versuchsaufbau Nebenversuch	29
Abbildung 27: Gleichbleibende Parameter	31
Abbildung 28: Verbrauch vom Benzinmofa auf 3 km	31
Abbildung 29: Versuch Elektromofa	32
Abbildung 30: Kontrolle der Beschleunigung	32
Abbildung 31: Technische Zeichnung der Antriebsrolle des Prüfstandes	III
Abbildung 32: Schematische Darstellung des Nebenversuchs	IV

Abbildung 33 Schematische Darstellung der Zusammensetzung der Grauen Energie IX

Es handelt sich bei allen Abbildungen um eigene ausser bei den Folgenden:

- Abb. 6: Vergaser schematische Darstellung
(van Basshuysen & Schäfer, 2006, S. 1007)
- Abb. 8: Zweitakt-Ottomotor schematische Darstellung
(Gerigk, et al., 2009, S. 498)
- Abb. 10: Schematische Chemische Reaktion
(Doppelbauer, 2020)
 - Abb. 11: Bürstenloser Gleichstrommotor, Polarisierung des Rotors in Schwarz hervorgehoben
(Wikipedia-Autoren, Bürstenloser Gleichstrommotor, 2021)
 - Abb. 12: Tabelle Kommutierungsblöcke
(Wikipedia-Autoren, Bürstenloser Gleichstrommotor, 2021)
 - Abb. 13: Schema Kommutator mit bürstenlosem Gleichstrommotor
(Wikipedia-Autoren, Bürstenloser Gleichstrommotor, 2021)

10 Dank

Ich möchte mich bei den folgenden Personen und Institutionen bedanken:

- Ich möchte mich bei meiner Betreuungsperson, Herr Oettli bedanken. Er hatte jederzeit ein offenes Ohr und unterstützte mich laufend während meiner Arbeit.
- Ich möchte mich bei Mario Schulz bedanken. Er hat mich bei der Planung, der Durchführung als auch bei Fragen zu den Experimenten tatkräftig unterstützt.
- Ein weiterer Dank geht an die Firma Grandjean Diffusion SA, welche mir das Elektromofa zur Verfügung gestellt hat.
- Weiter möchte ich mich auch noch speziell bei Herr Damian Raemy für die Hilfe und das Vermitteln des Elektromofas bedanken.
- Auch möchte ich mich bei Markus Beutler, Roland Beutler und Dominique Beutler für das Korrekturlesen und die hilfreichen Inputs bedanken.
- Ich möchte mich bei Corinne Beutler bedanken, die mich bei Fragen tatkräftig unterstützt hat.
- Zum Schluss möchte ich mich bei Pascal Weilenmann, Walter Müller und allen weiteren Personen bedanken, welche mir die Materialien für die Experimente zur Verfügung gestellt haben.

11 Anhang

In diesem Kapitel finden sich zusätzliche Informationen zu den in der Arbeit verwendeten Begriffen, die genauen Testergebnisse, technische Zeichnungen zu den Versuchen und zusätzliche Informationen, welche ebenfalls wichtig für den Energiekreislauf der Mofas sind.

11.1 Ergänzungen

11.1.1 Bernoulli Gleichung

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g y_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g y_2$$

Dies ist die Bernoulli-Gleichung. Sie beschreibt die Zusammenhänge der Dichte (ρ), des Drucks (P), der Flussgeschwindigkeit (v) und des Höhenunterschieds ($y_2 - y_1$) in einem konstanten Strom einer idealen Flüssigkeit. Die zwei Seiten der Gleichung, und somit auch die Parameter der ersten und der zweiten Flüssigkeit, werden durch die Indexziffern 1 und 2 in der Gleichung unterschieden. Aus der Bernoulli Gleichung lässt sich ablesen, dass bei gleichbleibender Höhe eines Flüssigkeitsflusses, der Druck an einer Querschnittsverengung zunehmen muss. (Young & Stadler, 2015, S. 275)

11.1.2 Ergebnisse des Hauptversuchs

11.1.2.1 Benzinmofa

Was?	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4
Zeit (s)	860	726	792	720
Distanz (km)	3	3	3	3
Geschwindigkeit (km/h)	12.56	14.88	13.64	15.00
Benzin rein (dl)	5	5	5	5
Benzin raus (dl)	2.8	2.9	3.2	2.9
Verbrauch (dl)	2.2	2.1	1.8	2.1
Brennwert (kWh/L)	9.7	9.7	9.7	9.7
Energie verbraucht (Brennwert) (kWh)	2.134	2.037	1.746	2.037
Umfang Holzrolle (m)	1	1	1	1
Umfang Metallfelge (m)	1.12	1.12	1.12	1.12
Gewicht angehängt (kg)	3.7	3.7	3.7	3.7
Verhältnis Hebelarm	4/1	4/1	4/1	4/1

11.1.2.2 Elektromofa

Was?	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4
Geschwindigkeit (km/h)	15.32	14.59	14.59	14.59
Distanz (km)	3	3	3	3
Zeit bis erreichte Distanz (s)	705	740	740	740
Batterieladung übrig (%)	92	92	92	92
Zeit bis aufgeladen (min)	43	43	43	43
Energie für Laden (kWh)	0.155	0.158	0.157	0.157
Umfang Holzrolle (m)	1	1	1	1
Umfang Metallfelge (m)	1.12	1.12	1.12	1.12
Gewicht angehängt (kg)	3.7	3.7	3.7	3.7
Verhältnis Hebelarm	4/1	4/1	4/1	4/1

11.1.3 Technische Zeichnungen

11.1.3.1 Technische Zeichnung der Antriebsrolle des Prüfstandes

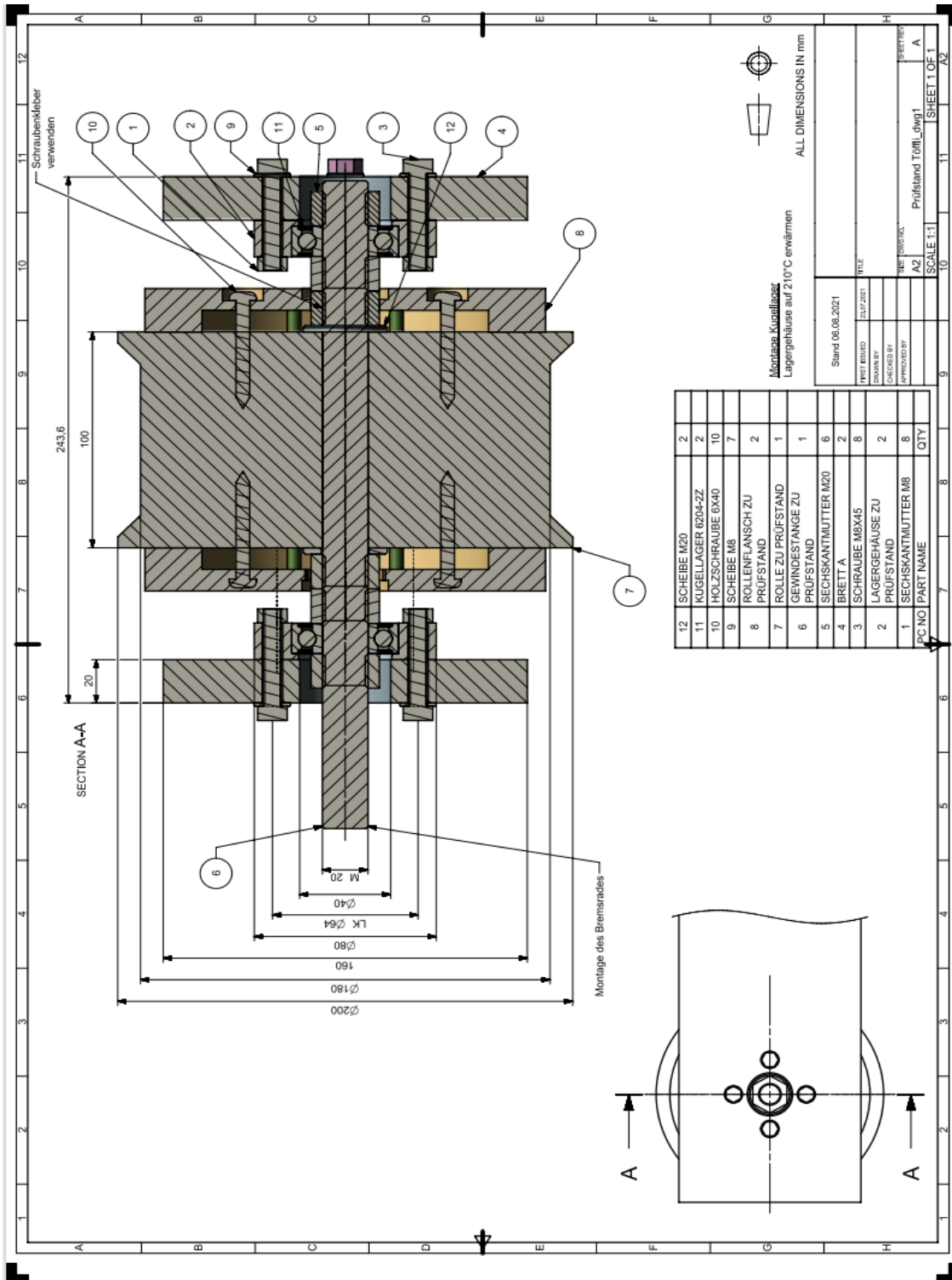


Abbildung 31: Technische Zeichnung der Antriebsrolle des Prüfstandes

Zeichnung wurde von Mario Schulz angefertigt.

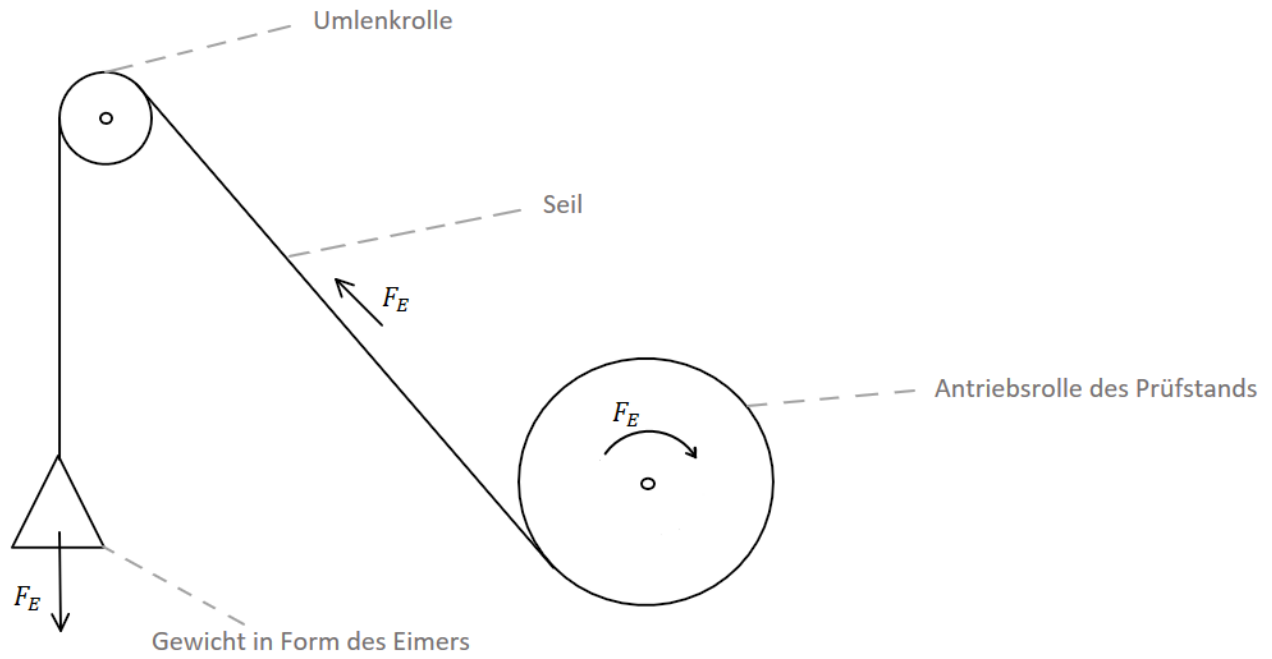


Abbildung 32: Schematische Darstellung des Nebenversuchs

Zeichnung wurde von Sandro Beutler angefertigt.

11.2 Weiterführende Informationen

11.2.1 Graue Energie

Essenziell für die Betrachtung der gesamten Energiekette ist die sogenannte graue Energie. Unter diesem Begriff wird die gesamte benötigte Energie für die Herstellung, die Lagerung und die Entsorgung eines Produkts zusammengefasst. Dabei wird auch die Energie, welche für die Produktion von Vorprodukten und Maschinen, sowie die Energie, welche für deren Instandhaltung benötigt wird, berücksichtigt. Auch die für den Transport aufgewendete Energie wird mit einberechnet (Abb. 33, S. IX). (Wikipedia-Autoren, Graue Energie, 2021)

Diese graue Energie ist sehr schwer zu bestimmen. Dennoch werde ich hier den Versuch unternehmen, einen Teil der benötigten Energie zusammenzufassen, um somit einen Überblick über den gesamten Energiekreislauf zu ermöglichen.

11.2.2 Graue Energie bei der Rohstoffgewinnung

Jedes Mofa besteht aus verschiedenen Rohstoffen. Diese lassen sich in die groben Klassen Metalle, Polymere (Plastik, Gummi), Textilien und Leder unterteilen. Dabei werden sich die folgenden zwei Kapitel auf die Polymere und die Metalle konzentrieren, da diese einen Grossteil der grauen Energie der Gewinnung der Rohstoffe ausmachen. Textilien und Leder sind spärlich verbaut und meist nur im Sattel zu finden. Deshalb tragen sie, wenn überhaupt, nur zu einem kleinen Teil der grauen Energie bei.

11.2.2.1 Benzinmofa

Beim Benzinmofa sind hauptsächlich Metalle verbaut. Polymere sind oft nur im Luftfilter, im Vergaser, in den Pneus und manchmal in der Verkleidung zu finden.

11.2.2.1.1 Metalle

Metalle kommen in der Erdkruste meist in Verbindung mit anderen Elementen vor. Um nun diese Metalle in ihrer Reinform zu erhalten, müssen diese Verbindungen abgebaut, von den Unreinheiten befreit und in Form gebracht werden. Beim Abbau der Metalle wird schon eine beträchtliche Menge an Energie eingesetzt. Bei der «Reinigung» werden je nach Metall, verschiedene Verfahren angewendet. Die meisten von diesen sind ebenfalls sehr energieaufwändig. Ein Beispiel dafür ist die Gewinnung von Aluminium, welches oft wegen seiner

geringen Dichte verwendet wird. Das Aluminium wird erhitzt, sodass es flüssig wird. Danach wird es mithilfe eines Elektrolyseverfahrens von anderen Elementen befreit. Dafür muss das Aluminium konstant im flüssigen Aggregatzustand gehalten werden. Dies verbraucht enorme Mengen an Energie. Zum Schluss wird jedes Metall noch in eine Form gebracht. Dies kann entweder mechanisch geschehen oder indem die Metalle gegossen werden. Es wird auch hier wieder viel Energie benötigt. (Wikipedia-Autoren, Metallurgie, 2021)

11.2.2.1.2 Polymere

Polymere werden meist mit Hilfe einer Kettenpolymerisationsreaktion aus Stoffen mit kleinen Molekülen gewonnen. Dafür wird Energie eingesetzt, um diese Stoffe in reiner Form zu erhalten. Danach wird bei der Kettenwachstumsreaktion ein Initiator benötigt, welcher die Reaktion in Gang setzt. Bei der Stufenwachstumsreaktion wird dieser Initiator nicht zwingend benötigt. Die Reaktion beider Reaktionstypen läuft danach grössten Teils selbstständig ab. Somit wird für die Reaktion nur wenig zusätzliche Energie benötigt. Am Schluss werden die Polymere auch in Form gebracht. Dies geschieht meist durch die Erhitzung der erhaltenen Produkte. So werden diese weicher und lassen sich leichter formen. (Wikipedia-Autoren, Polymerisation, 2021)

Im Vergleich zur Gewinnung der Metalle lässt sich sagen, dass für die Gewinnung der Polymere im Grossen und Ganzen weniger Energie benötigt wird. Dies ist auch darauf zurückzuführen, dass man diese nicht auf sehr hohe Temperaturen erhitzen muss, um sie zu verflüssigen. Es reichen meist schon geringe Temperaturen, um die Polymere formbar zu machen.

11.2.2.2 Elektromofa

Auch im Elektromofa sind Metalle verbaut. Jedoch sind im Elektromofa auch viele Teile aus Polymeren verbaut. Dies ist auf die Verkleidung zurückzuführen, welche möglichst leicht sein muss, da die restlichen Teile des Mofas schon schwer sind.

11.2.2.2.1 Metalle

Beim Elektromofa steckt ein Grossteil der grauen Energie in der Batterie. Die Betrachtung dieser wird in dieser Arbeit nicht miteinbezogen, da es den Umfang sprengen würde.

Die Metalle des Elektromofas werden auf die gleiche Weise gewonnen, wie die des Benzinmofas und haben deshalb die gleiche Energiekette. Für weitere Informationen siehe Kapitel 11.2.2.1.1 Metalle.

11.2.2.2.2 Polymere

Die Polymere des Elektromofas werden auf die gleiche Weise hergestellt wie die des Benzinmofas. Deshalb haben sie die gleiche Energiekette. Für weitere Informationen siehe Kapitel 11.2.2.1.2 Polymere.

11.2.3 Graue Energie bei der Herstellung

Die Herstellung der Mofas aus den gewonnenen Rohstoffen trägt auch zur grauen Energie der Mofas bei (Abb. 33, S. IX). Es ist jedoch sehr schwierig genaue Informationen zum Energieaufwand bei der Herstellung zu finden, denn dieser ist von Hersteller zu Hersteller und selbst von Mofa-Typ zu Mofa-Typ unterschiedlich. Faktoren, welche den Energieaufwand beeinflussen sind zum Beispiel der Produktionsstandort, die Produktionswege, Produktionsmaschinen und die Transportwege. Deshalb können keine genaueren Angaben zum Energieverbrauch in der Produktion gemacht werden.

11.2.4 Graue Energie bei der Gewinnung des Kraftstoffs und des Stroms

Ebenfalls essenziell für die Betrachtung der gesamten Energiekette ist die Gewinnung des Kraftstoffs für das Benzinmofa und die Gewinnung des Stroms für das Elektromofa. Da speziell die Gewinnung des Stroms stark variiert, werde ich hier den Fokus auf den Strommix der Schweiz legen. Der Strommix in anderen Ländern kann stark von dem der Schweiz abweichen.

11.2.4.1 Kraftstoff

Für die Betrachtung der Energiekette eines Benzinmofas ist die «Well-to-tank» Betrachtungsweise am geeignetsten. Diese behandelt den Energieaufwand von der Primärenergiegewinnung bis zur Bereitstellung der Energie für das Fahrzeug. (Wikipedia-Autoren, „Well-to-Tank“, 2021)

In Deutschland wird von einem Well-to-tank Wirkungsgrad von 82% bei Benzin ausgegangen. Eine Recherche aus der Schweiz geht jedoch von einem Wirkungsgrad von 77,5% bei der Gewinnung des Benzins aus. Dabei muss aber noch der Transport eingerechnet werden. Das heisst der Well-to-tank Wirkungsgrad würde dann noch tiefer liegen. (Wikipedia-Autoren, „Well-to-Tank“, 2021)

Dieser Wirkungsgrad schwankt stetig. Er wird in Zukunft dramatisch fallen, da auf der einen Seite die Reserven der Fossilen Brennstoffe immer knapper werden. So müssen immer aufwendigere

Verfahren zur Gewinnung des Benzins angewendet werden. Andererseits werden immer neue Umweltvorschriften gemacht, welche immer «saubereres» Benzin verlangen. Auch dadurch wird der Aufwand zur Benzingewinnung erhöht. Ein guter Indikator für diese Erhöhungen in den Energieaufwendungen ist der Preis. Steigt der Energieaufwand, so steigt auch der Preis.

(Wikipedia-Autoren, „Well-to-Tank“, 2021)

Zusammenfassend kann man sagen, dass der «Well-to-tank» Wirkungsgrad von Benzin im besten Fall bei 82% liegt. Man kann jedoch annehmen, dass dieser heute massiv tiefer liegt.

11.2.4.2 Strom

Der in der Schweiz produzierte Strom stammte im Jahr 2020 von folgenden Energiequellen. Wasserkraft (58%), Kernenergie (33%), Biomasse (2.7%), Photovoltaik (3.7%), Wärme-Kraft-Kopplung (2.1%), Windenergie (0.2%). Auch beim Strom kann die «Well-to-tank» Betrachtungsweise zu Hand genommen werden. (VSE, kein Datum)

Auch hier kann der «Well-to-tank-Wert» des Stroms betrachtet werden. Dabei beträgt der Wirkungsgrad von Strom aus Wasser-, Windkraft und Photovoltaik 100%, da für die Erzeugung dieses Stroms keine Energie eingesetzt werden muss. Bei Biomasse wird von einem Wirkungsgrad von 90% ausgegangen, da deren Erzeugungs- und Bereitstellungsaufwand miteinbezogen werden müssen. Bei Kernenergie wird meist ein willkürlich festgelegter Wirkungsgrad von 33% angegeben. (Wikipedia-Autoren, „Well-to-Tank“, 2021) Für Strom aus Wärme-Kraft-Kopplung liegt der Wirkungsgrad bei 85% und höher. (Wikipedia-Autoren, Kraft-Wärme-Kopplung, 2021)

Zusätzlich zu den Energieaufwänden müssen in Deutschland für den Transport des Stroms noch 6% des Wirkungsgrades abgezogen werden. In der Schweiz liegt dieser Wert etwas unter 6%, da die Transportwege kürzer sind und somit weniger Energie beim Transport in Wärme umgewandelt wird. (Wikipedia-Autoren, „Well-to-Tank“, 2021)

Wenn nun mit 6% Transportverlust und einem 85% Wirkungsgrad bei der Kraft-Wärme-Kopplung gerechnet wird, erhält man folgenden Wert für den Wirkungsgrad vom Schweizer Strommix:
77.6327%

Dies bedeutet, dass zum Beispiel für den Verbrauch von 77.6327 W Strom 22.3673 W an grauer Energie anfallen. Dies ist jedoch das schlechteste Szenario, da mit einem hohen Verlust beim

Transport und dem tiefst möglichen Wirkungsgrad bei der Stromgewinnung durch Kraft-Wärme-Kopplung gerechnet wurde.

11.2.5 Graue Energie beim Recycling

Um den gesamten Energieverbrauch eines Mofas zu senken, ist es essenziell, die Langlebigkeit und das Recycling ebendieser zu fördern. Durch die Langlebigkeit der Mofas kann verhindert werden, dass viele neue Mofas unter grossem Energieaufwand hergestellt werden müssen. Das Recycling ist insofern wichtig, dass der energieaufwändige Schritt der Rohstoffgewinnung ausgelassen oder mindestens mit einem kleineren Energieaufwand verbunden durchgeführt werden kann.

Da die Energieeffizienz des Recyclings auf die verwendete Methode sowie das zu recycelnde Fahrzeug ankommt, ist es schwierig hier genaue Zahlen zu nennen.

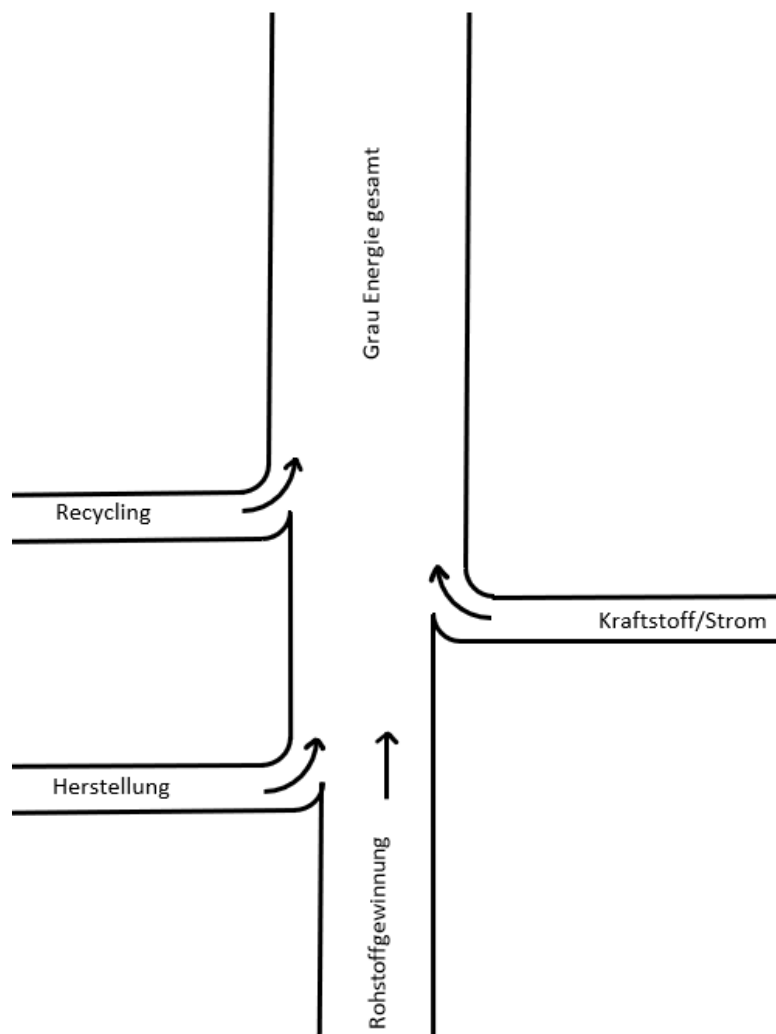


Abbildung 33 Schematische Darstellung der Zusammensetzung der Grauen Energie