

Bachelorarbeit

Akkubetriebene Züge

Matthias Urban

e1526765@student.tuwien.ac.at

Matr.Nr. 01526765

Datum: 9. August 2022

Kurzfassung

Alternative Antriebe sollen dafür sorgen langfristig von fossilen Brennstoffen unabhängig zu werden. Neben dem ökologischen Vorteil scheinen alternative Antriebe auch ökonomisch sinnvoll. Auch der Bahnsektor will in Zukunft in Abschnitten, die nicht elektrifiziert sind, Alternativen zu dieselbetriebenen Triebwagen finden. Die vorliegende Arbeit fokussiert sich deshalb auf Akkutechnologie und wie diese im Bereich der Bahn eingesetzt werden kann.

Zu Beginn der Arbeit werden die Grundlagen über elektrischen Strom, Energiespeicher und Elektromotoren zum Verständnis erläutert. Der Fokus fällt dabei vor allem auf Energiespeichersysteme und Elektromotoren. Nach einem kurzen Einstieg in die geschichtliche Entwicklung wird dann anhand eines Beispiels die Kombination aus Oberleitungs- und Batteriezug näher erläutert. Zum Abschluss wird die Energieeffizienz von Akkuzügen mit jener von dieselbetriebenen Zügen verglichen.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Grundlagen	4
2.1	Elektrischer Strom	4
2.1.1	Öffentliches Stromnetz in Österreich	4
2.1.2	Bahnstromnetz in Österreich	4
2.1.3	Gleichstrom, Wechselstrom und Drehstrom	4
2.2	Akkumulator	5
2.2.1	Aufbau	5
2.2.2	Funktionsweise	5
2.2.3	Kennzahlen von Batterien	5
2.3	Kondensator	6
2.3.1	Einsatzgebiet Heute vs. Morgen	7
2.3.2	Speicherfähigkeit	7
2.3.3	Superkondensator	7
2.4	Elektromotor	8
2.4.1	Aufbau und Funktionsweise	8
2.4.2	Reihenschlussmotoren	9
2.4.3	Drehstrommotoren	9
2.5	Kombination von Speichertechnologien und Elektromotoren	10
3	Historischer Einblick	11
4	'Cityjet eco' - Desiro ML Baureihe 4746	11
4.1	Technische Spezifikationen	12
4.2	Mögliche Einsatzgebiete	12
5	Energieeffizienz	13
5.1	Batterieelektrisch betriebenes Triebfahrzeug	15
5.2	Verbrennungstriebfahrzeug mit Diesel	15
6	Vergleich der Technologien	16
6.1	Diesel-/ Stromverbrauch und Reichweite	16
6.2	Fahrenergie pro Fahrgast	16
6.3	Effizienzvergleich	17
7	Fazit und Ausblick	18

1 Einleitung

Durch die heutige Wirtschaftsweise wird unsere Lebensgrundlage nach und nach zerstört. Die letzten Jahrzehnte, hat die Menschheit wirtschaftliches Wachstum auf Kosten des Planeten und der begrenzten Ressourcen betrieben [11]. Auf der Suche nach immer neuen Energiequellen sind fossile Energieträger im Laufe der Zeit immer mehr in den Fokus gerutscht, einerseits durch die gute Verfügbarkeit andererseits durch die hohe Energiedichte und die leichte Verarbeitbarkeit. Doch die Auswirkungen der Verbrennung dieser blieben lange Zeit unberücksichtigt - einerseits da man sich der Folgen damals kaum bewusst sein konnte, andererseits, da die Vorteile in Handhabung und Speicherung alternativen Energiequellen weit überlegen waren [36]. Die Folge: Durch den andauernden Ausstoß von Treibhausgasen während der Verbrennung, wird mehr Wärmestrahlung zur Erde zurückgeworfen und die globale Durchschnittstemperatur steigt an [21]. In Abb. 1 sieht man die Temperaturanomalie im Zeitraum von 1880 bis 2020 auf Basis der Durchschnittstemperatur von 1951 bis 1980 [21].

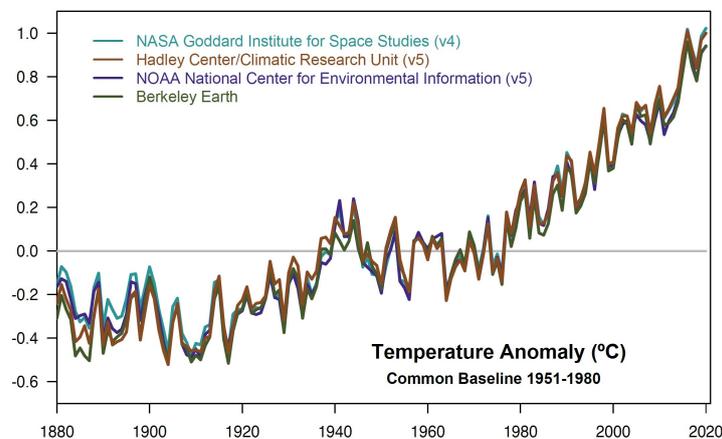


Abb. 1: Temperaturanomalie 1880 - 2020 [21]

Neben dem Klima- und Umweltgedanken sollte uns aber auch die aktuelle politische und geopolitische Situation in Europa (Einmarsch der russischen Streitkräfte in die Ukraine) dazu bringen, uns mit alternativen Energiequellen auseinanderzusetzen. Österreich ist wie viele andere europäische Länder von Gas und Öl aus dem Ausland abhängig [39]. Um die Abhängigkeit in Zukunft zu begrenzen, muss der Einsatz von fossilen Brennstoffen deutlich reduziert werden. Dazu müssen in vielen Bereichen des täglichen Lebens Alternativen geschaffen und gefunden werden, die schon in naher Zukunft umsetz- und finanzierbar sind. Beim Blick auf die Automobilindustrie sieht man, wie weit die Akkutechnologie bereits fortgeschritten ist. Die meisten der Überlegungen und Fortschritte beschränken sich jedoch auf den Straßenverkehr. Um in Zukunft auch den Schienenverkehr ökologischer und unabhängig von fossilen Brennstoffen zu gestalten, bedarf es aber auch in diesem Bereich Investitionen in den Einsatz von nachhaltigen Technologien.

Rund 75 % der Bahnstrecken in Österreich sind elektrifiziert [16]. Im Umkehrschluss bedeutet das, dass man auf 25 % der Streckenkilometer keine elektrisch betriebenen Züge im konventionellen Sinn (Triebfahrzeuge mit Stromabnehmer) einsetzen kann. Bei ca. 5600 Kilometern des Streckennetzes der Österreichischen Bundesbahnen (ÖBB), sind also 1400 Kilometer davon im Moment lediglich mit dieselbetriebenen Lokomotiven und Garnituren befahrbar [16].

In dieser Arbeit soll deswegen der Einsatz von akkubetriebenen Zügen hinsichtlich Technologie, Einsatzbereich und Kombination mit konventionellen Oberleitungs(OL)-Triebfahrzeugen näher

betrachtet werden. In Kapitel 2 wird zum besseren Verständnis der weiteren Arbeit zuerst auf die elektrotechnischen Grundlagen eingegangen bevor dann auf die Funktionsweise und das Prinzip von akkubetriebenen Schienenfahrzeugen eingegangen wird (ab Kapitel 3).

2 Grundlagen

2.1 Elektrischer Strom

2.1.1 Öffentliches Stromnetz in Österreich

Das österreichische Hochspannungs-Stromnetz wird von der Austrian Power Grid (APG) betrieben. Um die Versorgung mit Strom für ganz Österreich sicherzustellen betreibt die APG rund 7000 Kilometer an Stromleitungen [3]. Dieses Hochspannungsnetz besitzt 3 Phasen, hat eine Spannung zwischen 380 und 110 kV und eine Frequenz von 50 Hz . Diese hohe Spannung im Hochspannungs-Stromnetz ist erforderlich um die Leitungsverluste möglichst gering zu halten [3].

2.1.2 Bahnstromnetz in Österreich

Neben 9 Wasserkraftwerken, die die ÖBB-Infrastruktur in Österreich betreibt bezieht sie für das Bahnstromnetz auch Strom aus dem öffentlich Hochspannungsnetz. Über Umformerwerke wird die Spannung des Stroms aus dem Hochspannungsnetz auf einheitliche 110 kV reduziert und der Strom auf eine Phase mit 16,67 Hz für das Bahnstromnetz transformiert. In Unterwerken wird dann die Spannung noch einmal von 110 kV auf 15 kV für die Oberleitung reduziert. Ein elektrisch angetriebene Triebfahrzeug fährt in Österreich also mit 1-Phasen Wechselstrom bei einer Spannung von 15 kV [40].

2.1.3 Gleichstrom, Wechselstrom und Drehstrom

Elektrischen Strom gibt es in verschiedenen Formen. Man unterscheidet dabei zwischen Gleichstrom (DC - Direct Current), Wechselstrom (AC - Alternating Current) und Drehstrom. Als Gleichstrom wird dabei Strom bezeichnet, dessen Spannung sich im zeitlichen Verlauf nicht ändert und der immer in die gleiche Richtung fließt. Als Wechselstrom wird Strom bezeichnet, der die Flussrichtung im zeitlichen Verlauf periodisch ändert (siehe Abb. 2). Drehstrom ist im Grunde ebenfalls Wechselstrom. Allerdings besitzt dieser aus drei Phasen, die jeweils um 120° Phasenverschoben sind (siehe Abb. 3) [43].

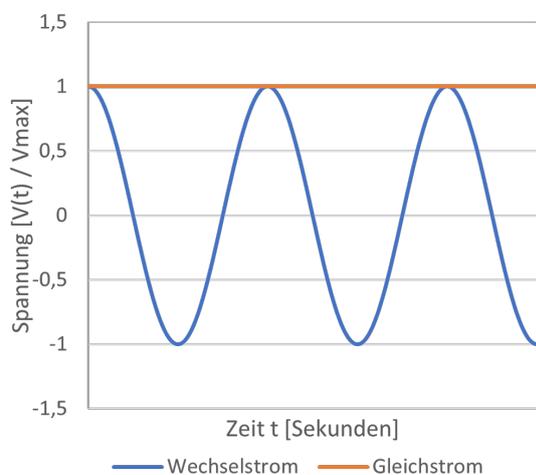


Abb. 2: Spannungsverlauf bei AC und DC

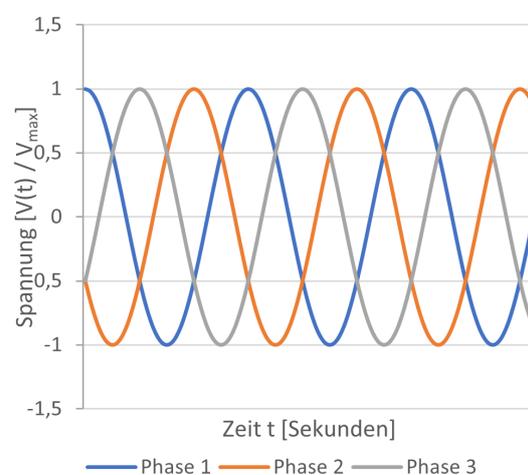


Abb. 3: Spannungsverlauf bei Drehstrom

2.2 Akkumulator

Sowohl Batterien, als auch Akkumulatoren bestehen aus galvanischen Zellen. Als galvanische Zelle bezeichnet man jede Vorrichtung zur spontanen Umwandlung von chemischer in elektrische Energie [19]. Die Unterteilung erfolgt dabei in primäre und sekundäre Batterien, wobei letztere im Volksmund auch Akkumulatoren bzw. Akkus genannt werden. Als maßgebliches Unterscheidungsmerkmal dient die Fähigkeit der Wiederaufladung. Primäre Batterien sind nicht wieder aufladbar, sekundäre hingegen schon [17]. Das Aufladen von Akkus erfolgt durch Gleichstrom. Dieser fließt dabei in die entgegengesetzte Richtung wie bei der Entnahme. Die Möglichkeit einen Akku wieder aufzuladen entsteht, weil sich die chemischen Reaktionen im inneren der Batterie wieder fast vollständig umkehren lassen [4].

2.2.1 Aufbau

Das galvanische Element bzw. die galvanische Zelle besteht immer aus zwei Elektroden die durch ein flüssiges oder festes Elektrolyt voneinander getrennt sind. Dieses Elektrolyt kann aus verschiedenen Materialien wie z.B. Lithium, Alkali-Mangan oder Blei bestehen. In Abb. 4 sieht man den beispielhaften Aufbau einer Batterie. Die eingesetzten Materialien der Elektroden beeinflussen dabei die Nennspannung der Batterie und das Elektrolyt die Energiedichte [17].

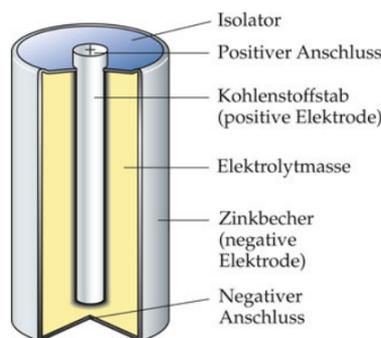


Abb. 4: Aufbau einer Kohle-Zink-Batterie [28, S. 770]

2.2.2 Funktionsweise

Die chemischen Reaktionen bei der Abgabe und dem Aufladen eines Akkus sind Redoxreaktionen, wobei beide zwangsläufig zeitgleich ablaufen. Die beiden Elektroden der Batterie stellen dabei sowohl das Oxidationsmittel als auch das Reduktionsmittel dar und die darin enthaltenen Elektroden wandern, sobald ein Stromverbraucher oder eine Stromquelle angeschlossen ist, von einer Elektrode zur anderen. An der Kathode findet dabei die Reduktion statt, die Anode wird oxidiert [4].

2.2.3 Kennzahlen von Batterien

Mithilfe von Kennzahlen lassen sich Eigenschaften von Batterien wie zum Beispiel der Energieinhalt oder die Leistung einer Batterie angeben. Dabei unterscheidet man folgende Kennzahlen[4]:

- | | |
|-----------------|---|
| Energiedichte | ... beschreibt die Menge an Energie die pro Gewicht oder pro Volumeneinheit in der Batterie gespeichert werden kann (kWh/kg oder kWh/cm^3). |
| Leistungsdichte | ... beschreibt die Leistung einer Batterie im Verhältnis zu ihrem Gewicht oder Volumen (W/kg oder W/cm^3). |

Preis	... Kosten pro kWh Speicherkapazität.
Lebensdauer	... erfolgt meistens unter Angabe von Ladezyklen bis die Batterie nur noch eine bestimmte Speicherkapazität besitzt. Meist wird bei Batterien die Grenze von 80 % eingesetzt. Daraus lässt sich ableiten wie oft eine Batterie getauscht werden muss. Diese Angabe ist daher zum berechnen der Lebenszykluskosten wichtig. Bei welcher Grenze die Batterie tatsächlich getauscht wird, hängt jedoch vor allem von der notwendigen Kapazität ab und kann nicht pauschal beantwortet werden.
Sicherheit	... Gibt Aufschluss über die Einsatzsicherheit der Batterie im Bezug auf Entflammbarkeit, Brandverhalten o.Ä..
Betriebstemperatur	... gibt an in welchem Temperaturfenster die Batterie ihre optimale Leistung entfalten kann (ca. 25 °C) bzw. in welchem Fenster sie eingesetzt werden darf.
Umweltverträglichkeit...	Gibt Aufschluss über die Recyclingfähigkeit der eingesetzten Materialien.
Ladegeschwindigkeit	... gibt an wie schnell die Batterie geladen werden kann. Die Angabe erfolgt meist in kW.
Energieeffizienz	... ist ein zunehmend wichtiger Punkt und gibt Aufschluss, wie viel Energie beim Laden und Entladen der Batterie verloren geht.

Um diese Kennzahlen deutlicher darzustellen und leichter zu vergleichen, erfolgt die Darstellung oft in Form eines Eigenschaftsnonagons (siehe Abb. 5).

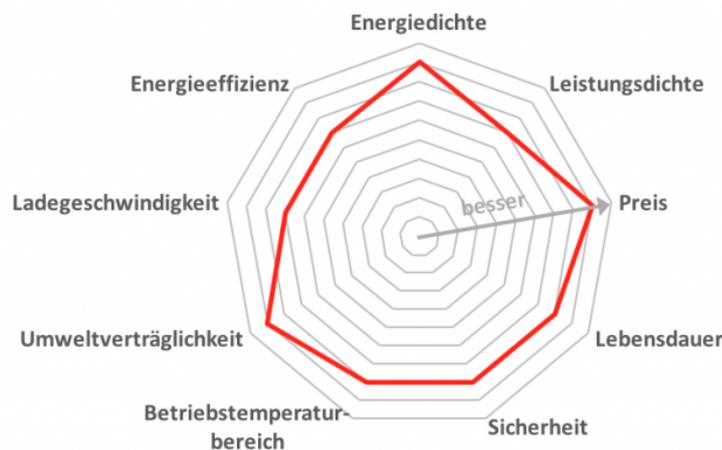


Abb. 5: Eigenschaftsnonagon einer Sekundärbatterie [4]

2.3 Kondensator

Ein Kondensator ist ein elektrisches Bauelement, das in der Lage ist elektrische Ladungen zu speichern. Er besteht aus 2 elektrisch leitenden Platten (=Elektroden) zwischen denen ein Dielektrikum herrscht. Die beiden Elektroden haben nach außen Kontaktanschlüsse. Legt man nun eine konstante Gleichspannung an, so fließt Strom und eine Elektrode wird positiv, die

andere negativ geladen. Trotz Entfall der anliegenden Spannung kann der Kondensator seine elektrische Ladung beibehalten. Theoretisch speichert der Kondensator die Energie verlustfrei, technisch ist dies durch eine sehr geringe Leitfähigkeit des Dielektrikums jedoch nicht umsetzbar. Der Widerstand des Dielektrikums liegt dabei ca. bei $250\text{ M}\Omega$ [6, 28].

2.3.1 Einsatzgebiet Heute vs. Morgen

Kondensatoren haben ein sehr breites Anwendungsfeld. Sie können sowohl in Gleichstromnetzen als auch in Wechselstromnetzen eingesetzt werden. In einem Gleichstromnetz verhalten sie sich dabei wie bereits in Kapitel 2.3 erwähnt wie ein Akkumulator und speichern elektrische Ladung. In Wechselstromnetzen hingegen wirkt der Kondensator wie ein Widerstand [6, S.119f].

"Bei Anschluss eines Kondensators an Wechselspannung ändert sich die Polarität der Spannungsquelle fortlaufend. Dadurch ändert sich auch die Bewegungsrichtung der Elektronen im Stromkreis und die beiden Platten des Kondensators werden abwechselnd positiv und negativ geladen. Obwohl kein Stromfluss durch den Isolator möglich ist, fließt in dem Stromkreis ein Wechselstrom. Der Kondensator wirkt hier wie ein Widerstand und diese Eigenschaft wird als kapazitiver Widerstand oder Wechselstrom-Widerstand bezeichnet." [6]

Im folgenden wird jedoch lediglich auf die Speicherfähigkeit von elektrischen Ladungen in Gleichstromnetzen näher eingegangen. Diese wird heutzutage vor allem für das kurzfristigen Speichern von Energie verwendet. Einer der bekanntesten Anwendungsfälle ist das sogenannte Kinetic Energy Recovery System (KERS) oder auch Motor Generator Unit - Kinetik (MGU-K) wie es seit 2009 in verschiedenen Varianten in der Formel 1 zum Einsatz kommt [15]. Auch in Personenkraftwagen (PKW) und Triebfahrzeugen kommt ein ähnliches System zur Bremsenergieerückgewinnung zum Einsatz. Durch die ständige Weiterentwicklung kann in Zukunft die Kapazität von Kondensatoren weiter erhöht und damit das Einsatzgebiet erweitert werden.

2.3.2 Speicherfähigkeit

Ein großer Vorteil von Kondensatoren liegt darin, Energie sehr schnell speichern und wieder abrufen zu können. Soll also in einem kurzen Zeitraum viel Energie gespeichert werden, z.B. bei der Bremsung eines Fahrzeuges, bietet sich ein Kondensator an. Als Nachteil soll jedoch die geringe Energiedichte erwähnt sein. Lithium-Ionen-Akkus bieten eine Energiedichte von ca. $200 - 500\text{ Wh/l}$ während moderne Kondensatoren lediglich eine Energiedichte von $5 - 8\text{ Wh/l}$ haben [45].

2.3.3 Superkondensator

Superkondensatoren unterscheiden sich von normalen Kondensatoren in ihrem Aufbau. Sie sind nicht durch ein Dielektrikum voneinander getrennt, sondern durch ein Elektrolyt miteinander verbunden [45].

Aktuelle Forschungsprojekte zeigen, dass man die Energiedichte von Kondensatoren noch deutlich erhöhen kann. So wurde ein Graphen-Superkondensator entwickelt der eine Energiedichte von $88,1\text{ Wh/l}$ aufweist. Das ist zwar noch deutlich weniger als ein Lithium-Ionen-Akku (bis zu 500 Wh/l) aber in etwa genauso viel wie eine Bleibatterie (ca. 80 Wh/l), wie sie beispielsweise in Elektroautos zum Einsatz kommt.[25]

Ein weiterer Vorteil ist die Beständigkeit der Energiedichte über viele Ladezyklen hinweg. Während ein Lithium-Ionen-Akku nach rund 500 Ladezyklen nur noch etwa 80 % der ursprünglichen Kapazität hat, so ist beim Superkondensator auch nach 10.000 Lade- und Entladezyklen immer

noch 88 % der Ursprungskapazität vorhanden [45].

Kondensatoren punkten gegenüber Batterien aber nicht nur mit besserer Speicherfähigkeit sondern ist auch ökologisch betrachtet klar im Vorteil, da man zur Herstellung keine seltenen Erden benötigt. Sowohl in der Erzeugung als auch in Sachen Effizienz schneidet ein Kondensator also besser ab als eine Batterie [25, 27].

2.4 Elektromotor

Elektromotoren wandeln elektrische Energie in mechanische um. Das grundsätzliche Funktionsprinzip von Elektromotoren beruht dabei auf Anziehungs- und Abstoßungskräften, die Magnetfelder aufeinander ausüben.

"Der erste Elektromotor, ein Gleichstrommotor, wurde bereits 1833 gebaut und in Betrieb genommen. Die Geschwindigkeitsregelung dieses Motors war sehr einfach und erfüllte die Anforderungen in verschiedenen mechanischen Anwendungen." [5, S.277]

Dieser Motor war sehr einfach, robust und günstig hatte lediglich eine Leistung von 15 W. Durch die technologische Weiterentwicklung konnten für verschiedene Anwendungsgebiete Elektromotoren entwickelt werden, die ihre Aufgaben besser und mit höherem Wirkungsgrad vollbringen konnten [5].

2.4.1 Aufbau und Funktionsweise

Zum Bau eines einfachen Elektromotors, der mit Gleichstrom funktioniert, benötigt man grundlegend folgende Bauteile:

- einen Kupferdraht,
- ein zylindrisches Stück Eisen,
- einen Permanentmagnet und
- eine Energiequelle.

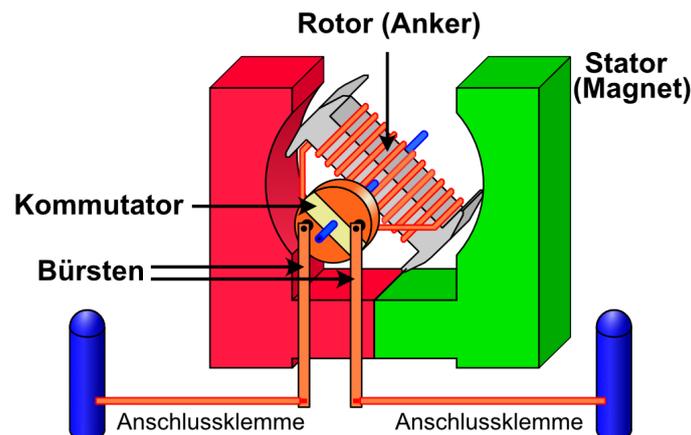


Abb. 6: Aufbau eines einfachen Elektromotors [13]

Wickelt man nun den Kupferdraht um das Eisenstück funktioniert dieses Bauteil als Rotor. Der Permanentmagnet wird auch als Stator bezeichnet. Verbindet man nun die Bauteile mit einer geeigneten Energiequelle (siehe Kapitel 2.2) so hat man bereits die einfachste Form eines

Elektromotors gebaut. In Abb. 6 sieht man einen solchen Aufbau. Wird die Spule unter Strom gesetzt so entsteht ein Magnetfeld. Durch dieses Magnetfeld stößt sich der Rotor vom Stator ab und beginnt sich zu drehen. Zusätzlich zu den bereits beschriebenen Bauteilen ist hier auch noch ein sogenannter Kommutator oder Polwender eingezeichnet. Dieser Polwender ist über Schleifkontakte mit der Energiequelle verbunden und sorgt dafür, dass sich die Stromrichtung innerhalb der Spule ändert. Durch Änderung der Stromrichtung ändert sich auch die Richtung des Magnetfeldes. Der Rotor, der nun eine halbe Umdrehung weiter ist, kann sich nun wieder vom Permanentmagneten abstoßen [5, 8, 13, 23].

Der oben beschriebene Motor funktioniert mit Gleichstrom. Im österreichischen Bahnstromnetz der Vollbahn findet man, wie in Kapitel 2.1 beschrieben, allerdings Wechselstrom mit 16,7 Hz vor. In modernen Lokomotiven kommen deshalb hauptsächlich Drehstrommotoren (siehe Kapitel 2.4.3).

2.4.2 Reihenschlussmotoren

Die nächste Entwicklungsstufe war der Reihenschlussmotor. Er kann sowohl mit Gleich- als auch mit Wechselstrom betrieben werden. Im Betrieb mit Wechselstrom ist die Motordrehzahl lastabhängig. Wird der Motor mit Gleichstrom betrieben, so ist das Drehmoment gleichbleibend [42].

Neben einem hohen Anlaufdrehmoment kann er auch ohne aufwendige Steuerungstechnik sehr einfach geregelt werden und erreicht dabei sehr hohe Drehzahlen. Vor allem, wenn ein geringes Gewicht und eine hohe Leistung gefordert ist, kam dieser Motor zum Einsatz. Bis ca. 1980 kam in Triebwägen vorrangig dieser Motor zum Einsatz, ehe er nach und nach vom Drehstrommotor abgelöst wurde[42].

2.4.3 Drehstrommotoren

Der erste Drehstrommotor wurde 1889 konstruiert. Im Vergleich mit Gleichstrommotoren sind diese wesentlich einfacher und robuster. Neben einer festen Drehzahl haben Drehstrommotoren auch ein festes Moment, weshalb sie lange Zeit für viele Bereiche nicht einsetzbar waren [7].

Drehstrommotoren besitzen mindestens drei - bzw. ein Vielfaches davon - elektromagnetische Spulen die, wie die Phasen des Drehstroms um 120° versetzt angeordnet sind. Werden die drei Spulen nun mit der Drehstromquelle verbunden, entsteht in jeder Spule ein Magnetfeld, das um eine Drittelperiode versetzt ist. Mit den drei Elektromagneten ergibt sich dann ein drehendes Magnetfeld, das einen Magneten, der in der Mitte gelagert ist, in eine Drehbewegung versetzt [12, 35]. Dieses Magnetfeld dreht sich, wie in (1) und (2) Beispielhaft beschrieben, in Abhängigkeit des Rhythmus der Netzfrequenz und der Anzahl der Spulenpaare.

$$50 \text{ Hz} \times 60 \frac{\text{Sekunden}}{\text{Minute}} = 3000 \frac{\text{Umdrehungen}}{\text{Minute}} \quad (1)$$

$$3000 \frac{\text{Umdrehungen}}{\text{Minute}} \div 4 \text{ Spulenpaare} = 750 \frac{\text{Umdrehungen}}{\text{Minute}} \quad (2)$$

Der zum Betrieb notwendige Drehstrom kommt allerdings nicht aus der Oberleitung, da hier wie in Kapitel 2.1 lediglich Ein-Phasen-Wechselstrom vorliegt. Zum Umwandeln zwischen einer und drei Phasen wird ein sogenannter Frequenzumrichter verwendet. Der Frequenzumrichter ist außerdem noch in der Lage die Frequenz des Stromes zu ändern. Dadurch ist die Motordrehzahl nicht mehr fixiert, Schlupf im Motor wird verringert und er kann ohne Zwischengeschaltetes Getriebe für jede Fahrsituation des Zuges optimal verwendet werden [5].

2.5 Kombination von Speichertechnologien und Elektromotoren

Akkumulatoren und Kondensatoren geben beim Entladen lediglich Gleichspannung ab. Ein Reihenschlussmotor könnte mit diesem Strom bereits arbeiten. Heutzutage kommen aber wie in Kapitel 2.4.2 vornehmlich Drehstrommotoren zum Einsatz. Das heißt, der Gleichstrom muss in Drehstrom gewandelt werden. Diese Umwandlung erfolgt mit einem Wechselrichter der Gleichstrom zu Wechselstrom wandelt. Der zweite Betriebszustand einer Batterie ist der Ladevorgang. Dabei muss der 1-Phasen-Wechselstrom aus der Oberleitung in Gleichstrom gewandelt werden um den Akku möglichst effizient laden zu können. Dies geschieht mithilfe eines Gleichrichters. Abbildung 7 zeigt das Schaltbild eines Brückengleichrichters und Abbildung 8 den zugehörigen Spannungsverlauf. Wenn man dieses Schaltbild noch um einen Kondensator ergänzt, so kann man die Bereiche zwischen den Spannungsspitzen puffern und der Spannungsverlauf ähnelt eher dem einer Gleichspannung [9].

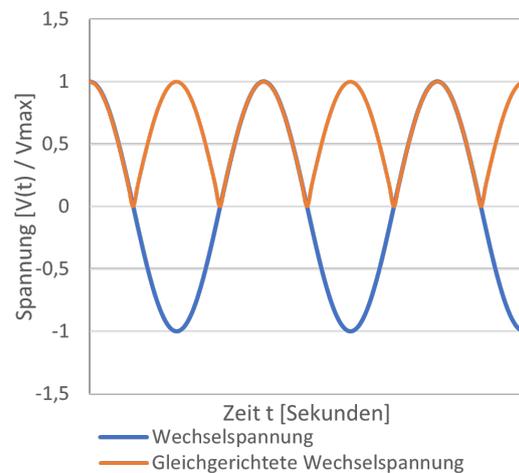
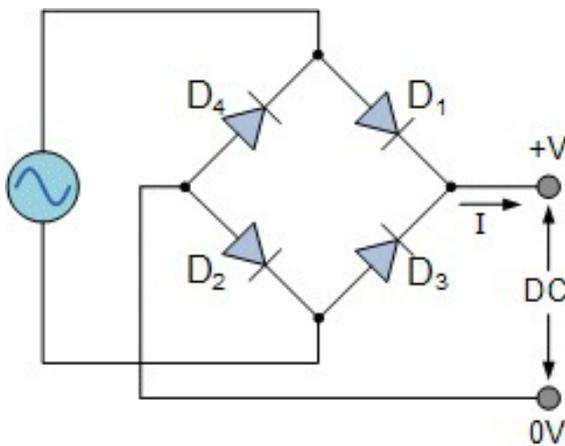


Abb. 7: Schaltbild eines Brückengleichrichters **Abb. 8:** Spannungsverlauf vor und nach dem Durchlaufen des Brückengleichrichters

Mit einem geeigneten Schaltbild muss also sichergestellt sein, dass sowohl das Laden der Batterie aus der Oberleitung, als auch der Fahrbetrieb des Zuges mit der Batterie gewährleistet ist.

3 Historischer Einblick

Bereits 1887 wurde in Bayern erstmals ein sogenannter 'Speicherwagen' in Betrieb genommen. Die Fahrleistungen dieses ersten Fahrzeuges waren mit einer Reichweite von rund 70 Kilometern und einer Höchstgeschwindigkeit von 45 km/h angegeben. Durch technische Weiterentwicklung konnten die Fahrleistungen bis 1900 verbessert werden, sodass für die Bahnverwaltung wirtschaftliche Bereiche erreicht wurden. Bis 1915 waren in ganz Deutschland bereits 182 solcher Speicherwagen in Betrieb. Das Laden der Speicherwägen erfolgte in der Nacht mit vergleichsweise günstigem Nachstrom [41].



Abb. 9: Speicherwagen der Reichsbahnbauart 613/614 in Gotha [41]

In Gotha wurde ein erster Speicherwagen im Sommer 1907 in Betrieb genommen um auf den Strecken nach Großenbehringen und Tambach zu verkehren [41]. Beide Strecken weisen ein flaches Höhenprofil auf und waren so optimal für den Einsatz von akkubetriebenen Triebwagen. Die Fahrstrecke betrug in beiden Fällen rund 25 Kilometer. Auf Abbildung 9 ist ein Speicherwagen der Reichsbahnbauart 613/614 zu sehen.

Die Fahrzeuge in Gotha blieben bis 1964 in Betrieb und wurden nach und nach ausgemustert. Durch die Entwicklung leistungsstarker Dieselmotoren und günstigen Dieselmotorkraftstoff wurden die Speicherwägen durch Triebfahrzeuge mit Dieselmotor ersetzt [41].

4 'Cityjet eco' - Desiro ML Baureihe 4746

Die ÖBB Personenverkehr AG hat 2018 gemeinsam mit Siemens einen bestehenden Cityjet der Baureihe Desiro ML (Baureihe 4746) für einen Batteriebetrieb umgerüstet. Am Dach des Zuges befindet sich ein Batteriesystem, das auf elektrifizierten Bahnstrecken geladen werden kann [10]. Der Zug wurde von Siemens speziell für das österreichische Streckennetz entwickelt und hat 2019 als erster elektrohybrider Zug im Sommer 2019 die behördliche Zulassung erhalten [37].

Durch ein Fahrer-Assistenz-System wurden dem Fahrer zusätzlich Informationen zur Reichweite und Empfehlungen für eine möglichst energieeffiziente Fahrweise angezeigt.

Seit 2019 wurde dieser Zug im Fahrbetrieb mit Fahrgästen getestet. Dabei wurden mehr als 50.000 Kilometer auf Haupt- und Nebenstrecken zurückgelegt. Im Vergleich zu Triebfahrzeugen mit Dieselmotor konnten so 140 Tonnen CO₂ eingespart werden [37].

Berechnungen der FH St.Pölten haben gezeigt, dass man durch den flächendeckenden Einsatz des Cityjet eco im Schienenpersonenverkehr in Niederösterreich die CO₂-Emissionen um 24 Prozent senken kann [37].

4.1 Technische Spezifikationen

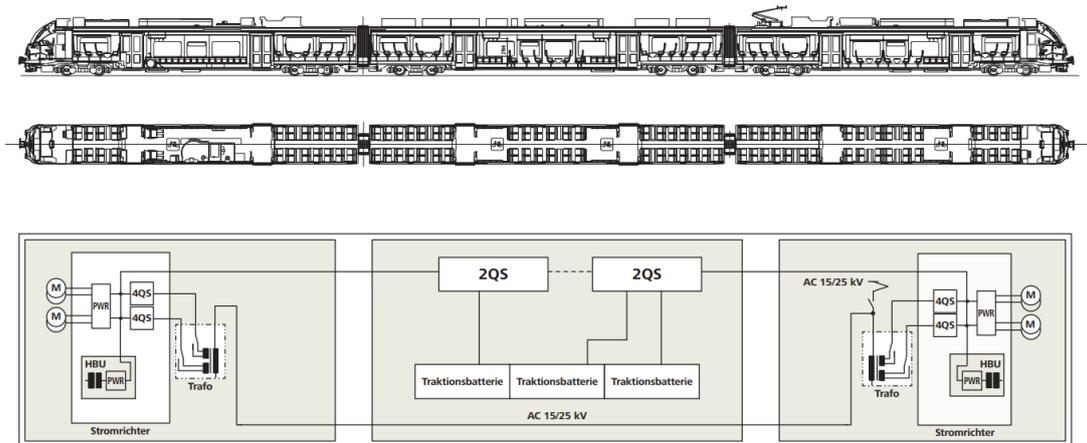


Abb. 10: Schaltkreis des Cityjet eco [37]

Wie in Abb. 10 ist der Schaltkreis des Cityjet eco zu sehen. Die äußerste Umrandung bildet im Schaltbild den kompletten Zug ab. Darüber ist zum besseren Verständnis der komplette Zug und Grund- und Aufriss, passend zum Schaltbild, dargestellt. Die 3 grau hinterlegten Kästchen stellen die Abschnitte des Zuges dar. Der Cityjet eco ist am mittleren Wagenkasten mit drei einzelnen Batterien (=Traktionsbatterie in Abb. 10) ausgestattet. Diese Batterien haben einen Energieinhalt von 528 kWh. Die Reichweite wird damit mit mindestens 90 Kilometern angegeben. Trotz des hohen Gewichts der Batterien von 14 Tonnen, kann der Zug auf Strecken der Klasse B verkehren. Diese Strecken haben eine maximale Achslast von 18 Tonnen [20].

Es wird an einem Beispiel erklärt, wie sich der Ladezustand der Batterie während einer Fahrt verhält. Die Fahrt geht dabei von St.Pölten Hauptbahnhof nach Horn und wieder retour. Der minimale Ladestand auf der Strecke beträgt rund 40%. Der längste nicht elektrifizierte Abschnitt ist mit einer Strecke von rund 70 Kilometern jener von Hadersdorf nach Horn und zurück. In Abb. 11 ist ein Graph des Ladezustandes der Batterie abgebildet. Graue Bereiche besitzen dabei eine Oberleitung, in grünen Bereichen ist der Zug batterie-elektrisch gefahren [20].

In Abbildung 12 sieht man Komponenten am Dach des Cityjet eco. Neben der Batterie gibt es einen DC/DC-Steller oder Wandler. Dieser wandelt Gleichspannung in Gleichspannung mit einem anderen Spannungsniveau. Der Chiller wird benötigt um für die optimale Temperatur in der Batterie zu sorgen [20].

In Tabelle 1 sind die technischen Daten in tabellarischer Form dargestellt. Bo'Bo' steht dabei für je zwei einzeln angetriebene Achsen in zwei separaten Rahmendrehtgestellen [1]. 2'2' sind jeweils 2 nicht angetriebene Achsen in einem beweglichen Drehgestell [1]. Die Lebensdauer der Akkus wird mit 15 Jahren angegeben, wobei die Kapazität dann noch bei 80 % liegt. Die Lebensdauer des Zuges beträgt ca. 30 Jahre. Das bedeutet, dass die Akkus im Lebenszyklus eines Zuges einmal getauscht werden müssen. Die Kosten für neue Akkus betragen derzeit rund 1,5-2,0 Millionen Euro pro Zug (3 Stück). Generell werden die Mehrkosten für die Umrüstung inkl. Akkus gegenüber einem normalen Cityjet mit rund 25 % angegeben [29].

4.2 Mögliche Einsatzgebiete

Wie bereits in 1 Einleitung erwähnt sind in Österreich rund 25% des Bahnnetzes nicht elektrifiziert. Bis 2035 soll der Anteil auf 89% erhöht werden. Von den 5000 Streckenkilometern sind

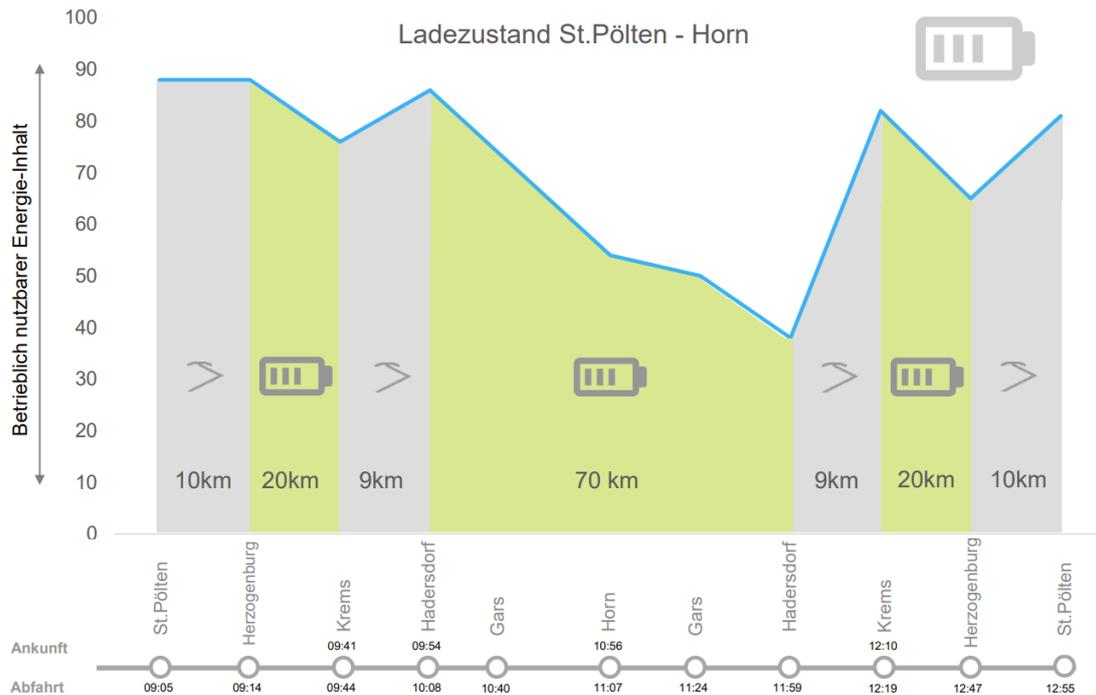


Abb. 11: Ladezustand des Cityjet eco im Fahrtverlauf [20, S.10]

Tab. 1: Technische Daten des Cityjet eco

Technische Daten	AC-Modus	Batterie-Modus
Achsfolge	Bo'Bo' + 2'2' + Bo'Bo'	
Spurweite	1 435 mm	
Höchstgeschwindigkeit	140 km/h	100 km/h
Antriebsleistung	bis zu 2 600 kW	
Installierte Batteriekapazität		528 kWh
Masse der Batterieanlage		14 t
Anfahrbeschleunigung	1,0 m/s	0,77 m/s
Energieversorgung	15 kV AC / 25 kV AC	
Länge (über Kupplung)	75 125 mm	
Max. Achslast	17 t inkl. Traction Battery Pack	

dann knapp 4500 Elektrifiziert. Für die restlichen 500 Kilometer soll nach 2035 noch einmal eine Elektrifizierung evaluiert werden [2].

Der Cityjet eco könnte jedoch schon auf fast allen Streckenabschnitten ohne Oberleitung verkehren um schon jetzt dieselgetriebene Triebfahrzeuge und Garnituren abzulösen. In Tabelle 2 sind die Strecken die bis 2035 elektrifiziert werden sollen aufgelistet [2]. Wie man aus der Tabelle ablesen kann, ist keine der Strecken über 90 Kilometer lang und könnte somit auch mit einem Cityjet eco befahren werden.

5 Energieeffizienz

In folgendem Kapitel soll die Energieeffizienz von akkubetriebenen und dieselbetriebenen Triebfahrzeugen näher erläutert werden. Dabei wird vor allem näher auf den Wirkungsgrad der Motoren, aber auch Verluste beim Energiespeicher eingegangen. Auf Verluste durch Luftwiderstand, Bögen,

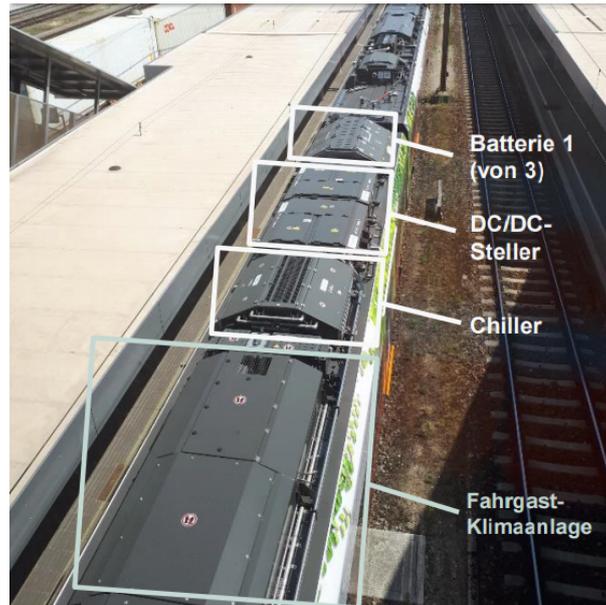


Abb. 12: Komponenten am Dach des Cityjet eco [20]

Tab. 2: Elektrifizierungsprojekte entlang des Bestandsnetzes

Strecke	Elektrifizierung bis	Länge
Linz Stadthafen	2027	3 km
Steindorf bei Straßwalchen - Friedburg	2027	5 km
Friedburg - Braunau	2025	33 km
Wien - Marchegg	2025	33 km
Koralmbahn	2023	40 km
Klagenfurt - Weizelsdorf	2023	12 km
Herzogenburg - Krems	2028	20 km
Wiener Neustadt - Loipersbach-Schattendorf	2027	25 km
Steirische Ostbahn	2027	75 km
Pöchlarn - Scheibs	2028	27 km
St.Pölten - Traisental - Hainfeld/Freiland	2026	39 km
Neumarkt - Kallham - Braunau am Inn	2028	57 km
Zeltweg - Pöls	2025	14 km
St.Valentin - St.Nikola-Struden	2028	40 km

Tunnel, etc. wird in dieser Betrachtung nicht eingegangen, da diese alle Schienenfahrzeuge gleichermaßen betreffen.

Die Energieeffizienz ist dabei eine beschreibende Größe, die beschreibt, wie viel Energie die in ein System fließt auch wieder aus dem System entnommen werden kann. Als Kenngröße der Energieeffizienz kann man dabei den Wirkungsgrad heranziehen. Der Wirkungsgrad η ist dabei der Quotient aus entnommener und zugeführter Energie und bewegt sich zwischen 0 und 1.

Energieeffizienz kann man entweder 'Well 2 Wheel' oder 'Tank 2 Wheel' darstellen. 'Well 2 Wheel' steht dabei für die Energieeffizienz von der Verarbeitung des Rohmaterials (z.B. Rohöl) inkl. Verteilung bis hin zum angetriebenen Rad - verfolgt also den gesamten Weg der Energie. Spricht man von 'Tank 2 Wheel' so ist nur die Energieeffizienz ab dem Laden der Energie in das Fahrzeug gemeint. Bei einem Diesel-PKW wäre das zum Beispiel ab der Zapfsäule, bei einem

Elektro-PKW ab der Steckdose [18].

In den folgenden Kapiteln 5.1 und 5.2 wird aufgrund der je nach Quelle sehr unterschiedlichen Daten für die Energieeffizienz 'Well 2 Wheel' nur auf jene Energieeffizienz vom spezifischen Energiespeicher bis zum Rad eingegangen - also 'Tank 2 Wheel'. Die Erzeugung und Verteilung der Energie im Energienetz bleibt dabei unberücksichtigt.

5.1 Batterieelektrisch betriebenes Triebfahrzeug ohne kontinuierliche Stromversorgung

Bei Akkumulatoren oder Batterien gibt es je nach betrachtetem System 2 verschiedene Wirkungsgrade [44]:

coulomb'scher Wirkungsgrad... Entspricht dem Verhältnis von entnommenen zu geladenen Amperestunden.

energetischer Wirkungsgrad... Schließt nicht nur Ladungsverluste sondern auch thermische und Spannungsverluste ein. Der energetische Wirkungsgrad kann dabei als Gesamtwirkungsgrad der Batterie gesehen werden.

Wirkungsgrad bezieht sich im weiteren Verlauf dabei immer auf den energetischen Wirkungsgrad. Die Verluste, die bei batterie-elektrisch betriebenen Fahrzeugen dabei auftreten sind [24]:

- Aufladen der Batterie: Beim Laden der Batterie gehen durch Widerstände der Ladesäule und der Kabel ca. 10 % der Energie verloren.
- Entladen der Batterie: Beim Entladen gehen durch Erwärmung der Batterie und Widerstände in der Batterie rund 6 % der Energie verloren.
- Verbraucher: Der Verlust durch Heizung, Klimaanlage, Licht und Bordcomputer beträgt ca. 5 % der Energie.
- Leistungselektronik: ca. 3 % der Verluste entstehen durch Umformung in Wechselstrom bzw. Anpassung der Spannung und Frequenz des Stromes.
- Elektromotor: der Wirkungsgrad im Elektromotor liegt bei ca 90 %. Es gehen also etwa 10 % durch Reibung verloren.

Durch Multiplikation der Faktoren ($1 - \text{Verluste}$) ergibt sich der 'Tank 2 Wheel'-Wirkungsgrad η vom Laden der Batterie bis zum Rad zu:

$$\eta = (1 - 0,10) \cdot (1 - 0,06) \cdot (1 - 0,05) \cdot (1 - 0,03) \cdot (1 - 0,10) = 70,1 \% \quad (3)$$

5.2 Verbrennungstriebfahrzeug mit Diesel

In den letzten Jahren wurden erhebliche Verbesserungen bei der Energieeffizienz von Verbrennungsmotoren angestrengt. Neben der Reduktion des Kraftstoffverbrauches stand auch die Reduktion des Ausstoßes von CO₂, NO_x und weiteren Luftschadstoffen, Partikeln und Treibhausgasen im Vordergrund [31]. Maßnahmen wie:

- Reduktion von Reibungsverlusten,
- Reduktion des Motorgewichts,
- Abgasrückführung,
- Anpassung der Kraftstoff-Luft-Verhältnisse beim Lastwechsel und

- verbesserte Katalysatortechnik

haben zu einer Steigerung des Wirkungsgrades des Motors auf bis zu 0,43 geführt. Im Umkehrschluss bedeutet das, dass 57 % der Energie, die im Kraftstoff enthalten ist, in Form von Abwärme verloren geht bzw. der Umgebung zugeführt wird [38].

Im Allgemeinen kommt es beim Betrieb eines Fahrzeuges mit Verbrennungsmotor jedoch nicht nur zu einem 'Verlust' von Energie im Verbrennungsmotor selbst. Neben Verlusten im Getriebe von rund 6 % gehen durch Standzeiten, die Lichtmaschine und vor allem durch verlorene Bremsenergie noch einmal ca. 10 % verloren [26]. Beim Tankvorgang selbst treten hingegen keine Verluste auf. Durch Berechnung des Produktes $\prod(1 - \text{Verluste})$ ergibt sich der 'Tank 2 Wheel'-Wirkungsgrad η zu:

$$\eta = (1 - 0,43) \cdot (1 - 0,06) \cdot (1 - 0,10) = 36,4 \% \quad (4)$$

6 Vergleich der Technologien

6.1 Diesel-/ Stromverbrauch und Reichweite

Im Punkt Reichweite haben dieselgetriebene Triebwagen gegenüber akkubetriebenen einen klaren Vorteil. Auf Nebenbahnen ohne Oberleitung setzten die ÖBB derzeit meist Triebwagengarnituren der Baureihe 5047 ein. Diese Triebwagengarnitur kommt mit einer Tankladung von 700 Litern rund 600 Kilometer weit. Das entspricht einem Verbrauch von $700 \div 600 \approx 1,17 \text{ l/km}$ [33].

Im Vergleich dazu schafft ein Cityjet eco mit einer vollen Akkuladung lediglich 90 Kilometer. Bei 528 kWh Batteriekapazität entspricht das einem Verbrauch von $528 \text{ kWh} \div 90 \text{ km} = 5,85 \text{ kWh/km}$.

6.2 Fahrenergie pro Fahrgast

Um die Effizienz der Fahrzeuge zu verdeutlichen wird der Energieverbrauch pro 100 Kilometer und Fahrgast herangezogen. Laut Datenblatt passen in einen Cityjet eco 240 Fahrgäste [10]. In einem dieselbetriebenen Triebwagen der Baureihe 5047 haben 62 Personen platz [32]. Gezählt werden hierbei nur die Sitzplätze.

Cityjet eco

Bei einem Energieverbrauch von $5,85 \text{ kWh/km}$ und einer Kapazität von 240 Fahrgästen ergibt sich der Energieverbrauch zu

$$5,85 \text{ kWh/km} \div 240 \text{ Fahrgäste} \cdot 100 \text{ km} = 2,43 \text{ kWh}/100 \text{ km}/\text{Person} \quad (5)$$

Baureihe 5047

Der Energieinhalt von einem Liter Diesel beträgt $9,8 \text{ kWh/l}$ [34]. Der Energieverbrauch ergibt sich mit einem Dieserverbrauch von $1,17 \text{ l/km}$ und 62 Fahrgästen damit zu

$$1,17 \text{ l/km} \cdot 100 \text{ km} \div 62 \text{ Fahrgäste} \cdot 9,8 \text{ kWh/l} = 18,49 \text{ kWh}/100 \text{ km}/\text{Person} \quad (6)$$

Ein direkter Vergleich der Ergebnisse ist aufgrund der unterschiedlichen Größen der Züge jedoch nicht möglich. Hierbei kommen dem Cityjet eco Skalierungsfaktoren zu gute. Die oben angeführten Gleichungen (5) und (6) sollen lediglich die Energieeffizienz eines akkubetriebenen Zuges verdeutlichen.

6.3 Effizienzvergleich

Ein Vergleich der beiden Wirkungsgrade zeigt, dass selbst sehr effiziente Dieselmotoren nicht mit der Effizienz eines Elektromotors mithalten können. In Abbildung 13 sieht man, dass der Anteil, der zum Fahren nutzbarer Energie, bei akkubetriebenen Fahrzeugen in etwa doppelt so groß ist wie bei Dieselfahrzeugen.

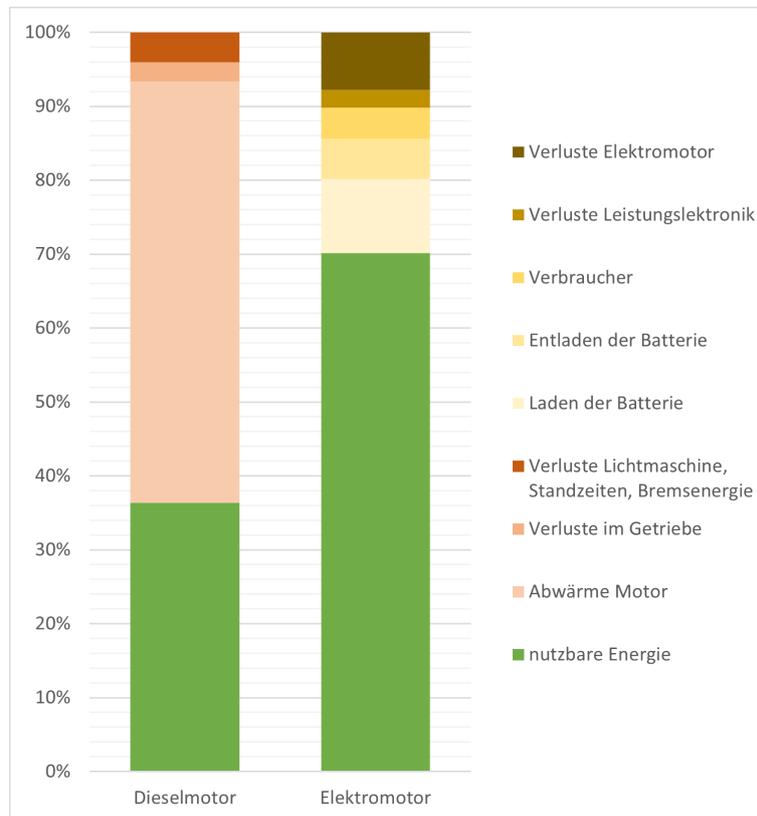


Abb. 13: Vergleich der nutzbaren Energie bei Diesel- und Elektromotoren

Neben der Betrachtung der Energieeffizienz darf man den größeren Wartungsaufwand bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor nicht außer Acht lassen. Für Motor und andere Bauteile sind regelmäßige Überprüfungen und Wartungen notwendig. Neben diesen braucht man zum Betreiben eines dieselbetriebenen Triebfahrzeuges auch noch etwaige andere Betriebsstoffe wie z.B. Öl [26].

Fahrzeuge mit Elektromotor sind in der Erhaltung deutlich günstiger, da man keine bis wenige Schmierstoffe benötigt und die Wartungsintervalle der E-Motoren deutlich länger ausfallen [26].

7 Fazit und Ausblick

Diese Arbeit zeigt am Beispiel der Strecke St.Pölten-Horn-St.Pölten, dass der Einsatz von akkubetriebenen Zügen sinnvoll und auch möglich ist (Vgl. Kap. 4). Laut einer Studie der FH St.Pölten kann vor allem in Niederösterreich der Einsatz von hybriden Zügen aufgrund des Höhenprofils und der Streckenlängen, die nicht elektrifiziert sind, als sinnvoll erachtet werden [37]. Der Einsatz von hybriden Zügen ist aber auch im restlichen Österreich möglich, denn der Cityjet eco wurde gemeinsam vom Siemens und der ÖBB-Personenverkehr AG an das österreichische Streckennetz angepasst[37].

Die Elektrifizierung der Bahnstrecken in Österreich schreitet zwar voran, doch sie ist mit erheblichen Investitionskosten verbunden. Pro Kilometer Strecke, der elektrifiziert wird, ist je nach Topografie mit Investitionskosten zwischen € 1,4 und 3,6 Mio. pro Kilometer [30]. Um die Bahn in Österreich schneller und kostengünstiger an das Ziel der kompletten Emissionsfreiheit zu bringen, bietet sich der Einsatz elektro-hybrider Technologien sehr gut an, weil die meisten Strecken in Österreich, die nicht elektrifiziert sind, unterhalb der 90-Kilometer-Grenze - der Reichweite eines Cityjet eco - liegen (siehe Tab. 2)[2]. Dabei gilt es aber genau zu evaluieren, wie sich die Kosten von Errichtung und Instandhaltung im Vergleich zu den höheren Anschaffungs- bzw. Erhaltungskosten beim Cityjet eco verhalten.

Auch im Bereich der Effizienz von Akkus und Elektromotoren ist die Entwicklung in den letzten Jahren deutlich vorangeschritten. Durch den Einsatz neuer Materialien kann einerseits die Leistungsdichte von Akkus erhöht, andererseits die Ladeleistung gesteigert werden [14]. Dadurch wird sich auch die Reichweite von Akkuzügen und Akku-Triebfahrzeugen erhöhen.

Die Batterien am Cityjet eco lassen Beispielsweise bereits ein Schnellladen in den Bahnhöfen zu, ohne einen Einfluss auf die Lebensdauer des Akkus zu haben. Dadurch können zusätzlich zu den Strecken, für die die Akkuladung des Cityjet-eco ohnehin ausreichend ist, auch längere Strecken befahren werden, wenn zwischendurch Bahnhöfe mit Oberleitung ausgestattet werden [29]. Dadurch müssen nicht ganze Abschnitte elektrifiziert werden und die Kosten können gesenkt werden. Auch die Deutsche Bahn treibt derzeit die Elektrifizierung von Nahverkehrsstrecken mit Oberleitungsinseln voran. Statt der gesamten Strecke werden dabei nur einzelne Bahnhöfe oder kurze Teilstücke elektrifiziert [22].

Literatur

- [1] *Achsfolgen*. 2022. URL: <https://www.bahnstatistik.de/Achsfolge.htm> (Zugriff am 19.07.2022).
- [2] Ö.-H. AG. *Nachhaltigkeitsbericht 2021*. 2021. URL: <https://static.web.oebb.at/konzern/nhb21/144/index.html> (Zugriff am 03.08.2022).
- [3] APG - Austrian Power Grid. 2022. URL: <https://www.apg.at/de/%5C%C3%5C%9Cber-Uns> (Zugriff am 29.03.2022).
- [4] *Batterieforum Deutschland - Lexikon*. 2022. URL: <https://www.batterieforum-deutschland.de/infoportal/lexikon/> (Zugriff am 20.07.2022).
- [5] H. Bernstein. *Angewandte Leistungselektronik: Drehstrom: Elektromotor und Antriebstechnik in der Praxis*. 2. Aufl. 2021. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2021.
- [6] H. Bernstein. *Elektrotechnik in der Praxis*. Berlin, Boston: Berlin, Boston: De Gruyter, 2016, S. 146.
- [7] H. Bernstein. *Elektrotechnik/Elektronik für Maschinenbauer: Einfach und praxisgerecht*. 3. Aufl. 2018. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018.
- [8] A. Binder. *Elektrische Maschinen und Antriebe: Grundlagen, Betriebsverhalten*. Springer, 2017.
- [9] *Brückengleichrichterschaltung*. URL: <https://www.elektronik-kompodium.de/sites/slt/1807181.htm> (Zugriff am 12.07.2022).
- [10] *Datenblatt Cityjet eco*. 2022. URL: <https://www.oebb.at/dam/jcr:b697320b-4493-48f2-a9f4-b8ff3af4d4ec/datenblatt-cityjet-eco.pdf> (Zugriff am 05.07.2022).
- [11] T. Döring. *Alternativen zum umweltschädlichen Wachstum*. 2019. URL: <https://www.wirtschaftsdienst.eu/inhalt/jahr/2019/heft/7/beitrag/alternativen-zum-umweltschaedlichen-wachstum.html> (Zugriff am 03.08.2022).
- [12] *Elektroantrieb | Mein Autolexikon*. 2022. URL: <https://www.mein-autolexikon.de/e-mobilitaet/elektroantrieb.html> (Zugriff am 11.05.2022).
- [13] *Elektromotor*. 2022. URL: <https://www.leifiphysik.de/elektrizitaetslehre/kraft-auf-stromleiter-e-motor/grundwissen/elektromotor> (Zugriff am 03.08.2022).
- [14] *Feststoffbatterie: Ist das die Zukunft im Elektroauto*. 2022. URL: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/elektromobilitaet/info/feststoffbatterie/> (Zugriff am 04.08.2022).
- [15] FIA. *2022 Formula 1 Technical Regulations*. 2022.
- [16] S. Flödl Matthias Treytl. *ÖBB kompakt 2020/21*. ÖBB-Holding AG, Konzernkommunikation, Mag. Robert Lechner, 1100 Wien Am Hauptbahnhof 2, 2022, S.13, 29. URL: https://presse.oebb.at/dam/jcr:8ec7b268-630d-40f2-bbd0-38b5d7531d84/OEBB%5C_Zahlen%5C_2021-1%5C_web.pdf.
- [17] O. Frey. *Unterschiede zwischen Batterie und Akku*. ZVEIorg, 2018.
- [18] G. Fröhlich. *Well-to-Wheel - Verbrenner versus E-Mobil*. 2019. URL: <https://energiewende.eu/well-to-wheel/> (Zugriff am 03.08.2022).
- [19] *Galvanische Zelle*. 2022. URL: https://www.chemie.de/lexikon/Galvanische_Zelle.html%5C#:~:text=Eine%5C%20galvanische%5C%20Zelle%5C%2C%5C%20galvanisches%5C%20Element,in%5C%20Batterien%5C%20und%5C%20Akkumulatoren%5C%20verwendet. (Zugriff am 03.08.2022).

- [20] T. Grasl. *Projekt Cityjet eco*. 2019. URL: https://www.pvaustria.at/wp-content/uploads/Grasl%5C_Tag%5C_2%5C_Block%5C_2.pdf (Zugriff am 19.07.2022).
- [21] T. Greene und P. Jacobs. *2020 Tied for Warmest Year on Record*. NASA, 2021. URL: <https://www.nasa.gov/press-release/2020-tied-for-warmest-year-on-record-nasa-analysis-shows>.
- [22] S. Grüner. *Bahn treibt Elektrifizierung mit Oberleitungsinseln voran*. 2022. URL: <https://www.golem.de/news/akkuzug-bahn-treibt-elektrifizierung-mit-oberleitungsinseln-voran-2203-163835.html> (Zugriff am 04.08.2022).
- [23] R. Hagl. *Elektrische Antriebstechnik*. München: München: Hanser, 2021.
- [24] H. Hayashiya und K. Kondo. *Recent trends in power electronics applications as solutions in electric railways*. Bd. 15. IEEJ transactions on electrical and electronic engineering. Hoboken, USA: Hoboken, USA: John Wiley und Sons, Inc, 2020, S. 645.
- [25] R. Higgelke. *Neuartiger Superkondensator: Energiedichte wie eine Bleibatterie - Energiespeicher - Elektroniknet*. 2020.
- [26] M. Hohnhorst Lukas Hohnhorst. *Die Elektrifizierung der Mobilität: Warum die Zukunft elektrisch fahren wird—und das schneller...* 2018. URL: <https://vonhohnhorst.medium.com/die-elektrifizierung-der-mobilitaet-warum-die-zukunft-elektrisch-fahren-wird-und-das-schneller-e21e0d98a5f6> (Zugriff am 20.07.2022).
- [27] K. Jayaramulu, H. Michael, S. Micheal, H. Saini, B. Aristides, V. Ranc, P. Martin und V. Stavila. *Covalent Graphene-MOF Hybrids for High-Performance Asymmetric Supercapacitors*. 2020-12-04. Advanced Materials. 2020.
- [28] C. Karaali. *Grundlagen der Elektrotechnik: Elektrisches und magnetisches Feld, Gleichstrom- und Wechselstromkreis, Drehstrom in der Antriebstechnik, Einführung mit Übungen*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2021.
- [29] M. Kessler. *14-Tonnen-Akku statt Diesel: ÖBB testen Öko-Zug ab 2019*. 2018. URL: <https://futurezone.at/b2b/14-tonnen-akku-statt-diesel-oebb-testen-oeko-zug-ab-2019/400114013> (Zugriff am 03.08.2022).
- [30] *Kostenvergleich: Streckenelektrifizierung versus alternative Antriebe*. 2020. URL: [http://www.bahnzauber-europa.at/eisenba_02.htm](https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/E/schiene-aktuell/kostenvergleich-streckenelektrifizierungen-versus-einsatz-alternative-antriebe.html%5C#:~:text=Je%5C%20nach%5C%20Topografie%5C%20(Flachland%5C%20bis, EUR%5C%2Fkm%5C%20. (Zugriff am 03.08.2022).</p><p>[31] D. Kreyenberg. <i>Fahrzeugantriebe Für Die Elektromobilität: Total Cost of Ownership, Energieeffizienz, CO₂-Emissionen und Kundennutzen</i>. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2016.</p><p>[32] M. Müller. <i>Dieseltriebwagen Baureihe 5047</i>. URL: <a href=) (Zugriff am 03.08.2022).
- [33] *ÖBB-Zug konnte nicht mehr weiterfahren*. URL: <https://www.derstandard.at/story/1231152598347/leere-tanks-oebb-zug-konnte-nicht-mehr-weiterfahren> (Zugriff am 03.08.2022).
- [34] R. Paschotta. *Dieselmotoren*. 2022. URL: <https://www.energie-lexikon.info/dieselmotoren.html> (Zugriff am 27.07.2022).
- [35] S. Redaktion. *Asynchronmotor: Aufbau, Funktionsweise, Vorteile*. 2018. URL: <https://info.sycotec.eu/asynchronmotor/> (Zugriff am 11.05.2022).
- [36] K. Schmitt. *Fossile Energieträger im Fokus*. 2022. URL: <https://www.bauredakteur.de/fossile-energietraeger-im-fokus/> (Zugriff am 03.08.2022).

- [37] *Siemens Mobility Batteriezug Desiro ML: „Cityjet eco“ sparte 140 Tonnen CO₂ ein* | Pressemitteilungen | Siemens Mobility Austria. 2020. URL: <https://www.mobility.siemens.com/at/de/unternehmen/newsroom/pressemitteilungen/siemens-mobility-batteriezug-desiro-ml-cityjet-eco-sparte-140-tonnen-co2-ein-.html> (Zugriff am 12.07.2022).
- [38] C. Stan. *Alternative Antriebe Für Automobile*. 5. Aufl. 2020. Berlin, Heidelberg: Berlin, Heidelberg: Springer Berlin / Heidelberg, 2020.
- [39] M. Strebl. *Wie der Ukraine-Krieg die Energiemärkte auf den Kopf stellt*. 2022. URL: <https://oesterreichsenergie.at/aktuelles/neuigkeiten/detailseite/preis-krieg> (Zugriff am 03.08.2022).
- [40] *Strom für die Bahn*. 2022. URL: <https://infrastruktur.oebb.at/de/projekte-fuer-oesterreich/bahn-dreh-strom/strom-fuer-die-bahn> (Zugriff am 02.08.2022).
- [41] G. Walter. *Akkumulatorentriebwagen in Gotha*. Bd. 57. Eisenbahningenieur. Hamburg: Hamburg: Tetzlaff, 2006, S. 50.
- [42] *Was leistet der Universal- oder Reihenschlussmotor?* 2021. URL: <https://kem.industrie.de/elektromotoren/was-leistet-der-universal-motor-oder-reihenschlussmotor/> (Zugriff am 12.05.2022).
- [43] *Wechselstrom, Drehstrom & Gleichstrom*. 2022. URL: <https://www.conrad.at/de/ratgeber/technik-einfach-erklart/wechselstrom-drehstrom-gleichstrom.html> (Zugriff am 03.08.2022).
- [44] *Wirkungsgrad - Deutschland*. 2022. URL: <https://www.batterieforum-deutschland.de/infoportal/lexikon/wirkungsgrad/> (Zugriff am 20.07.2022).
- [45] A.-D. Ziems. *Energiespeicher: Superkondensatoren statt Akkus*. mdr-wissen. 2021. URL: <https://www.mdr.de/wissen/faszination-technik/neuer-superkondensator-tu-muenchen-100.html> (Zugriff am 21.04.2022).