

Wir erleben seit ein paar Jahrzehnten, dass es auf unserem Planeten immer wärmer wird. Es ist unbestritten, dass diese Erwärmung vom zunehmenden Ausstoss an Treibhausgasen verursacht wird, vor allem von CO₂. Ein grosser Anteil von diesem Ausstoss kommt vom Verkehr, und dieser Anteil wird immer grösser. Der Ausstoss vom Verkehr muss deshalb vermindert werden, falls wir das Klima schützen wollen. Die folgende Aufstellung behandelt verschiedene technische Alternativen zur Verminderung vom CO₂-Ausstoss, versehen mit Kommentaren.

Ich, Birger Tiberg, bin Schwede und diplomierter Chemiker mit Interesse für die Eisenbahn seit meiner Kindheit. Seit 1980 wohne und arbeite ich in der Schweiz. Nach meiner Pensionierung engagiere ich mich für die Eisenbahnpolitik, vor allem in Schweden. Ich habe u.a. mehrere konkrete Vorschläge ausgearbeitet zur Aufnahme des Verkehrs auf stillgelegten Bahnlinien, siehe www.jarnvag.ch

Es zeigt sich, dass die Eisenbahn eine wesentlich grössere Rolle bekommen muss als heute der Fall ist, damit das Klimaziel erreicht werden kann.

[Citat von Angela Merkel](#)¹⁷ : *”Only with rail we will achieve our climate goals”*

Inhalt

Seite

- 1 Zusammenfassung
- 3 Flugverkehr
- 5 Schiffsverkehr
- 6 Personenautos
- 8 Lastautos
- 10 Busse, Übriger motorisierter Strassenverkehr
- 11 Eisenbahn
- 12 Fossilfreie Kraftstoffe, allgem. Kommentare
- 13 Beilage 1 Batterieflug
- 19 Referenzen

Zusammenfassung

Sich darauf zu verlassen, dass es ausreichend sei, den Strassen- und den Flugverkehr klimafreundlich zu machen, ist leider dasselbe wie an das Unmögliche zu glauben. Der Strassen- und besonders der Flugverkehr müssen für das Klima reduziert werden. Wenn es keine anderen Transportmittel gibt, wie die Eisenbahn, würde dies die heutige Wirtschaft schädigen. Die Alternative dazu wäre das Klimaziel aufzugeben, dies würde aber die Lebensbedingungen für kommende Generationen erschweren oder sogar zerstören. Dies tönt vielleicht drastisch, ist aber leider die Realität!

Mir ist deshalb unerklärlich, warum Regierungen in vielen Ländern die Eisenbahn immer noch vernachlässigen.

Die Zusammenfassung wird auf der nächsten Seite fortgesetzt

Zusammenfassung - Fortsetzung

Die kostengünstigste und einfachste Möglichkeit, den CO₂-Ausstoss vom Verkehr zu vermindern ist selbstverständlich die Transporte zu verringern. In diesem Dokument werden jedoch Alternativen präsentiert, wie die verbliebenen Transporte klimaneutral gemacht werden können. Auch sind denkbare Möglichkeiten präsentiert, welche jedoch *nicht* verwendbar sind. Die verschiedenen Verkehrstypen werden auf den Seiten 1-2 nur kurz präsentiert, ausführlicher ab Seite 3. Das Dokument ist eine deutschsprachige Version von der [schwedischen Originalversion](#) dieses Dokumentes [3].

Betreffend **Flugverkehr** kann dieser im *heutigen* Ausmass leider nicht nachhaltig gemacht werden. Die Verlagerung der Reisenden auf den Zug in grösstmöglichem Umfang ist die realistischste Alternative. Biokraftstoff und fossilfreies synthetisches Flugkerosin sind leider nicht klimaneutral, wenn sie für den heutigen Flugverkehr verwendet werden. Ich habe Bedenken über die Verwendbarkeit von Wasserstoff für den Flugverkehr. *Nicht verwendbar* für den kommerziellen Flugverkehr sind Batteriebetrieb und Sonnenkollektoren

Für **Personenautos** gilt die Umlagerung der Reisenden auf den öffentlichen Verkehr (vor allem auf den Zug) als eine sehr interessante Alternative. Betrieb mit Brennstoffzellen und Batterien ist interessant, dies aber nur bedingt da die Klimafreundlichkeit davon abhängt, dass Fossilkraft weder für den Strom für Wasserstoffproduktion oder Batterieladung, noch für die Herstellung der Batterien verwendet wird. *Nicht verwendbar*, um den Autoverkehr klimafreundlich zu machen sind leider Hybridautos und die Technik Autos selbstfahrend zu machen.

Für **Gütertransporte auf der Strasse** ist ebenfalls eine grösstmögliche Umlagerung auf die Eisenbahn die realistischste Alternative, das heisst Bahntransport auf der ganzen Transportstrecke oder eine Kombination Strasse/Schiene. Nachhaltiger Biokraftstoff gibt es leider nur in beschränktem Umfang. Induktion in der Strasse und Brennstoffzellenbetrieb sind erst in der Probephase, wie auch die Kombination Batteriebetrieb mit Betrieb ab Oberleitung. *Nicht verwendbar* für weite und schwere Transporten sind reiner Batteriebetrieb und reiner Betrieb ab Oberleitung.

Für **Busse** auf langen Strecken gelten teilweise ähnliche Voraussetzungen wie für LKWs.

Die **Eisenbahn** ist demzufolge eine unverzichtbare Alternative. Aber man kann natürlich unmöglich sämtliche Transporte auf die Eisenbahn verlagern, sondern nur so viele wie praktisch durchführbar. Durch diese Umlagerung muss man mit einer vielfachen Zunahme der Bahntransporte rechnen. Die Eisenbahn muss deshalb für diese Zunahme eingerichtet werden, anstatt wie heute in vielen Ländern in der Realität leider der Fall ist: *vernachlässigt!*

Die Studie zeigt auch deutlich, dass es unrealistische Wunschträume sind, wenn man auf eine bis jetzt unbekannt neue revolutionierende Technik hofft, um weiter in derselben Art wie heute zu reisen und zu transportieren, aber gleichzeitig das Klima zu schonen. Denn, was machen wir, wenn diese unbekannt revolutionierende Technik nicht kommt? Mit Technik kann man zwar vieles machen, doch nicht alles. Es gibt Grenzen, sowohl physikalische als auch wirtschaftliche.

Je nachdem wie neue Fakten bekannt werden, werden diese hier einfließen.

Flugverkehr

Der Flugverkehr ist heute in vielen Ländern stark subventioniert: Befreiung von CO₂-Abgaben und von Brennstoffsteuer, u.a. Der Flugverkehr ist eine grosse Quelle für den Ausstoss von Treibhausgas. Dazu kommt, dass der Ausstoss auf Flughöhe (ca. 8-12 km) einen grösseren Einfluss auf das Klima hat als der Ausstoss von derselben Menge CO₂ in Bodennähe. Deshalb muss die Flughöhe reduziert werden, zusammen mit dem Ersatz von Kerosin als Brennstoff, um den klimaschädlichen Ausstoss zu eliminieren.

Auf Reisen zu verzichten, die man bisher mit dem Flugzeug unternommen hat, ist natürlich die billigste und einfachste Möglichkeit, den CO₂-Ausstoss zu vermindern. Dies kann tatsächlich eine bleibende Folge der Coronapandemie werden (virtuelle Treffen, Ferien im eigenen Land). In diesem Abschnitt werden jedoch Alternativen für die verbleibenden Reisen behandelt, und zwar wie man diese nachhaltig machen kann.

Die wichtigste Alternative ist die **Verlagerung** der Flugreisen über Land **auf die Eisenbahn**, eine erprobte Technik. Dort wo es Hochgeschwindigkeitszüge gibt, sind diese eine sehr gute Alternative. Für Abstände über 1000 km müssen Nachtzüge in viel grösserem Ausmass als heute verwendet werden, insbesondere auf internationalen Strecken. Solche Nachtzüge gab es früher viele, diese wurden aber vom nicht kostendeckenden Billigflug auskonkurriert. Auch das Desinteresse der Bahnverwaltungen trug dazu bei, Nachtzüge zu streichen. Die Möglichkeit, Zugreisen über lange Strecken in Europa machen zu können, wurde somit in den letzten 30 Jahren leider *immer schwieriger gemacht*.

Biokraftstoff und **synthetisches Flugkerosin**, beide fossilfrei hergestellt, sind leider **nicht klimaneutral**, wenn sie auf Flughöhe (ca. 8-12 km) verwendet werden. Auf dieser Höhe trägt nicht nur die Menge (kg) an CO₂-Ausstoss zur Treibhauswirkung bei. Dies ist in einem [Bericht vom Deutschen Umweltbundesamt](#) [1] beschrieben. Es wird von einer 3-5 Mal grösseren Einwirkung auf das Klima berichtet, als wenn der Ausstoss in Bodennähe erfolgt. Genau wieviel grösser dieser Betrag ist wurde noch nicht klar festgestellt. Siehe auch den 2019 publizierte [Beitrag in Wissenschaft.de](#) [2]. Zusammengefasst kann man also nicht mit Bestimmtheit sagen, genau in welchem Ausmass der CO₂-Ausstoss auf Flughöhe die Klimaerwärmung verursacht, ausser dass die Einwirkung viel grösser ist als der Ausstoss derselben Menge CO₂ in Bodennähe. *Eventuell* kann der Flugverkehr nachhaltig gemacht werden, wenn fossilfreier Brennstoff verwendet wird **UND** die Flughöhe auf einem maximalen Niveau beschränkt wird. Wo dieses maximale Niveau liegt, müssen Wissenschaftler noch berechnen. Ich sehe dies als die einzige Möglichkeit, das kommerzielle Fliegen klimaneutral zu machen, und dies nur für einen kleineren Teil des heutigen Flugverkehrs.

Wasserstoff als Energiequelle für **Brennstoffzellen** oder direkt als **Brennstoff für Düsenbetrieb** sind in überschaubarer Zeit leider **unrealistisch**. Dies wird im Bericht [Slutsatser och Rekommendationer från Flygets Miljökommitté](#) [9] beschrieben. In diesem Bericht schliesst der Flugexperte Arne Karyd Wasserstoff für Flugzeugbetrieb sogar aus und gibt dafür vier verschiedene Gründe an:

1. Vermehrter Ausstoss von Wasserdampf auf Flughöhe, welcher, wie auch CO₂, eine negative Auswirkung auf das Klima hat.

Der Abschnitt Flugverkehr wird auf der nächsten Seite fortgesetzt

Flugverkehr - Fortsetzung

2. Die Schwierigkeit, flüssigen Wasserstoff bei -242°C bis -252°C zu lagern ohne dass allzu viel durch Verdunsten verschwindet.
3. Die hohen Kosten für Wasserstoff.
4. Die Sicherheit mit flüssigem Wasserstoff muss garantiert werden.

Sonnenkollektoren auf dem Verkehrsflugzeug für den Antrieb sind **vollkommen unrealistisch**. Dies würde eine Fläche erfordern, die x-Mal grösser ist als das Flugzeug selbst! Näheres dazu gibt es in der [schwedischen Version von diesem Dokument](#) [3]

Elektrischer Antrieb mit Batterien für den kommerziellen Flug auf längeren Distanzen ist völlig **unrealistisch**, solange das Risiko für einen Kurzschluss nicht mit 100% Sicherheit ausgeschlossen werden kann. Die Begründung für diese Aussage ist folgendes:

1. Batterien mit der heute besten Li-Technik haben viel zu wenig Lagerkapazität für Langstreckenflüge.
2. *Wenn* es aber gelingen würde, Batterien mit genügend Lagerkapazität für Langstreckenflüge zu entwickeln, dann wäre so viel Energie per kg Batterie gespeichert, dass bei einem Kurzschluss die Batterie explodieren würde.

Berechnungen dazu gibt es in der **Beilage 1**.

Dass bereits die heutigen Li-Batterien in einem Flugzeug gefährlich sind, zeigte sich drastisch in Dubai 2010 als ein Frachtflugzeug abstürzte. Die Lithiumbatterien hatten Feuer gefangen, [Artikel in flyingmag.com](#) [4] Zitat: *“Investigators say the crash highlights the risks posed by lithium batteries, which are prone to overheating leading to intense fires.”*

Ein [Youtube-film](#) [12] in NBC News zeigt eindrücklich was passiert, wenn Lithiumbatterien in einem Flugcontainer Feuer fangen.

IATA hat seit 2016 [strenge Vorschriften](#) [10] für Li-Batterien in Passagierflugzeugen. Siehe auch [Vorschriften von FAA](#) [11] Wie die Verfechter für kommerzielle Elektroflugzeuge diese Sicherheitsvorschriften mit den notwendigen mehr als tausendfach stärkeren Antriebsbatterien auf einen Nenner bringen sollen, dies ist mir ein totaler Rätsel.

Es ist bis jetzt eine ungelöste Frage wie sämtliche transkontinentale Reisen mit Flugzeugen klimafreundlich gemacht werden können. Vermutlich muss der Flugverkehr in der Zukunft sehr stark reduziert werden, wenn wir die Klimaziele erreichen wollen.

In vielen Ländern gibt es in der Politik Widersprüche in Bezug auf den Ausbau des Flugverkehrs und dem versprochenen Klimaschutz. Dies ist unter anderem in Schweden der Fall, wie in der [schwedischen Version von diesem Dokument](#) [3] beschrieben.

Schiffsverkehr

Personenverkehr: Es gibt Vorschläge, den Flugverkehr über den Atlantik durch Schiffsverkehr zu ersetzen, um die Reisen über das Meer nachhaltig zu machen. Folgende Aufstellung zeigt jedoch, dass das Gegenteil resultieren würde! Um dies zu zeigen, präsentiere ich zwei Beispiele, worin Flug- und Schiffsverkehr verglichen werden:

1. Das moderne Schiff [Queen Mary 2](#) [21] ist nach Angaben das einzige Schiff für den heutigen Passagierverkehr über den Atlantik, ausser für die Verwendung als Kreuzfahrtschiff. Das Schiff braucht gemäss Fahrplan 7-8 Tage für [Southampton – New York](#) [22], 6 000 km, und hat sechs Motoren mit total 117 320 kW. Das Schiff kann 2 695 Reisende mitnehmen
 Wenn wir voraussetzen, dass die Motoren mit 70 % Leistung laufen, kriegen wir Folgendes: 82 120 kW im Durchschnitt während 7 x 24 h oder 13 800 MWh Energieverbrauch für die Überfahrt, oder 5 120 kWh je Passagier = 18 430 GJ, oder **534 lt. Treibstoff je Pass.** (Ich rechne mit Umrechnungsfaktor 34.5 MJ/lt. für Treibstoff)
 Falls wir stattdem doppelt so viele Passagiere an Bord nehmen würden, wird theoretisch **267 lt. Treibstoff je Pass.** gebraucht. Dies ist immer noch mehr als der Verbrauch für einen Atlantikflug, siehe unten. Der Komfort vermindert sich stark: kleine Kabinen, Enge in Restaurants und in Baren, weniger Aktivitäten u.a. Ich sehe es als selbstverständlich, dass man sich einen ganz anderen Komfort wünscht, wenn man eine ganze Woche auf dem Meer verbringen soll, gegenüber nur einige Stunden bis zu einem Tag.
2. Dies vergleiche ich mit [Bristol Britannia](#) [23] einem Langstreckenflugzeug, Konstruktion 1952-60: Turboprop, Serie 310, 139 Passagiere, max. Reichweite 7 130 km, Flughöhe max. ca. 7 500 m, Treibstofftank 30 320 Liter Flugbenzin, gemäss [Airvectors: Bristol Britannina & Vickers Viscunthttps://airvectors.net/avbrtn.html](https://airvectors.net/avbrtn.html) [24]
 Ein Volltank reicht demnach für ca. 6 000 km Südengland – New York, was weniger als 30 320 lt. / 139 Pass. ausmacht = **weniger als 218 lt. Treibstoff je Pass.**
 Bemerkung: Ich habe mit einem älteren Flugzeugtyp gerechnet, ein modernerer Typ würde vermutlich weniger Treibstoff je Passagier verbrauchen.

Diese zwei Beispiele zeigen Folgendes:

1. Für eine Reise über den Atlantik ist der Treibstoffverbrauch je Passagier niedriger oder viel niedriger in einem Flugzeug als in einem Motorschiff.
2. Vorausgesetzt fossilfreier Treibstoff und reduzierte Flughöhe ist das Fliegen somit klimafreundlicher als die Reise mit einem Motorschiff, Im Gegensatz zu was vielleicht viele glauben...

Auch wenn es sich hier nur um zwei Beispiele handelt, ist das Ergebnis so deutlich, dass es als repräsentativ betrachtet werden kann.

Personenautos

Weniger Autofahren ist selbstverständlich die billigste und einfachste Möglichkeit, den CO₂-Ausstoss zu vermindern. Hier werden jedoch Alternativen für die verbleibenden Reisen behandelt, und zwar wie man diese Reisen nachhaltig machen kann.

Batteriebetrieb für die Umstellung von Personenautos auf fossilfreien Antrieb hat bereits angefangen. In diesem Zusammenhang sind die folgenden Punkte sehr wichtig zu beachten:

1. Wie kommt man zu den Rohstoffen für die Batterien?
2. Wie werden die Batterien hergestellt?
3. Woher kommt der Ladungsstrom für die Batterien?
4. Was soll mit den ausgedienten Batterien geschehen?

Wenn man hier nicht aufpasst, kommt die Energie zu einem oder mehreren dieser Punkte von Kohle-, Öl- oder Gaskraftwerken. Dadurch hat man durch den Wechsel zum Batteriebetrieb für das Klima vielleicht nur minimal oder gar nichts gewonnen oder im schlimmsten Fall sogar indirekt einen vermehrten Ausstoss von Treibhausgas verursacht. Der Wechsel an sich zu Batteriebetrieb ist somit *keine Garantie* für verminderten Ausstoss total von Treibhausgas! Mehr Information dazu in einem [Bericht von IVL](#) [5] Der Bericht zeigt, welcher Einfluss die Produktion der Batterien für Elektroautos auf das Klima hat. Zusammengefasst fehlen aber noch ausreichende Angaben für ein klares Statement, wie die Umstellung der Personenautos auf Batteriebetrieb den gesamten Ausstoss von CO₂ verringert. Es gibt auch eine [Studie von Agora-Verkehrswende](#) [6] mit etwa derselben Schlussfolgerung, und zwar dass:

Es sichergestellt werden muss, dass die Punkte 1. bis 4. oben keinen CO₂-Ausstoss verursachen ... damit die Umstellung auf Batteriebetrieb für den Klimaschutz sinnvoll wird.

Es ist leider höchst zweifelhaft, ob dies heute der Fall ist!

Es muss auch auf Umweltschutz und Menschenrechte Rücksicht genommen werden, Diese Rücksicht ist bei den Batterieherstellern jedoch in vielen Fällen leider sehr mangelhaft, was der VCS-Bericht [Die Batterie: Knackpunkt der Mobilität](#) [16] zeigt. In der Studie werden Autobatteriehersteller bezüglich Menschenrechts und Umweltschutz beurteilt. Es zeigt sich, dass es in diesen Bereichen leider meistens Mängel gibt, vor allem beim weltweit grössten Autobatteriehersteller, dem chinesischen CATL.

Man muss zudem in Betracht ziehen, dass es genügend *nachhaltigen* Strom für die geplanten Ladestationen geben muss.

Das Elektroauto ist demzufolge *nicht automatisch* klima- und umweltfreundlich! Dies wird aber als Argument hervorgehoben, um den Autoverkauf zu fördern und die häufigen Nachteile für das Klima und die Umwelt werden allzu oft verschwiegen.

Der Abschnitt Personenautos wird auf der nächsten Seite fortgesetzt

Personenautos - Fortsetzung

Das Umsteigen auf **Zug, Bus** oder **Fahrrad** gehört natürlich zu den besten Alternativen, den Ausstoss an Treibhausgas zu verringern. Dies setzt jedoch voraus, dass diese Alternativen attraktiv sind: Fahrplan, Zuverlässigkeit, Fahrkomfort und Preis, samt separate Fahrradwege. Ein schöner Nebeneffekt vom Umsteigen auf den öffentlichen Verkehr (und natürlich auch auf das Fahrrad) ist, dass die Gesundheit davon profitiert, was wissenschaftlich bewiesen ist.

Biotreibstoff (ganz oder teilweise) für Autos wird bereits heute zu einem kleinen Anteil verwendet. Wie dieser Anteil erhöht werden kann, hängt vom Angebot an Biotreibstoff ab, und mit der Bedingung, dass dieser nachhaltig hergestellt wird. Siehe Abschnitt «Biotreibstoff».

Die Umstellung auf **Brennstoffzellen** mit fossilfrei hergestelltem Wasserstoff ist eine Technik, die sich erst in der Anfangs- oder Probephase befindet. Der Wasserstoff wird mit Hilfe Elektrizität hergestellt, welche nachhaltig produziert werden muss. Dies kann in Ländern, welche zurzeit von Öl- oder Kohlekraftwerken abhängig sind, zum Problem werden, wenn es darum geht den CO₂-Ausstoss zu senken. Zudem ist die Gesamtwirkungsgrad Strom → Wasserstoff → → Brennstoffzellen → Strom niedrig, was den totalen Stromverbrauch höher macht.

Das Hybridauto ist in diesem Zusammenhang keine Technik, um den Autoverkehr klimaneutral zu machen. Die ganze Energiemenge für das Auto kommt vom Verbrennungsmotor!

Die Umstellung auf **selbstfahrende Autos** würde den Ausstoss an Treibhausgas nicht verringern, denn es spielt für den Ausstoss kaum eine Rolle wer am Steuerrad sitzt, ein Fahrer aus Fleisch und Blut oder ein Roboter. Eine [Studie von TA-Swiss](#) [13] beleuchtet u.a. Chancen und Risiken von selbstfahrenden Autos. Für eine kritische Betrachtung zu selbstfahrenden Strassenfahrzeugen siehe unter «Selbstfahrende Minibusse» unter dem Abschnitt «Busse».

Auch **selbstfahrende Minibusse** werden als eine zukünftige Alternative zu Personenautos präsentiert, mehr darüber unter der Rubrik «Busse».

Für die Alternativen E-Bikes und E-Trotтинetten gelten dieselben Vorbehalte bez. Batterie wie für Personenautos, siehe oben.

Lastautos

LKWs fahren heute fast ausschliesslich mit Dieselöl, was klimaschädlich ist. Der LKW-Verkehr ist in der Praxis stark subventioniert, da dessen Kosten nicht gedeckt sind. Ausserdem wird in vielen Ländern illegale Kabotage geduldet, was einheimische Transportunternehmen schädigt.

Die wichtigste Massnahme für das Klima ist jedoch eine Verminderung des Verbrauchs an Dieselöl. Die beste Art ist selbstverständlich eine Verringerung der Gütertransporte. Nach dieser Massnahme kommt an nächster Stelle, die Gütertransporte klimaneutral zu machen. Hierfür gibt es verschiedene mögliche Alternativen:

Die Umlagerung der Gütertransporte **auf die Eisenbahn** soweit möglich. Dies ist nach verminderten Transporten die **interessanteste** Alternative, da es sich um eine etablierte Technik mit überschaubaren Kosten handelt. Diese Umlagerung kann entweder mit Bahnfracht auf der ganzen Strecke oder in Kombination mit kürzerem Strassentransport gemacht werden.

Dabei kann der ganze LKW oder nur der Anhänger auf den Autotransportwagen aufgeladen werden, oder werden Container oder nur das Ladegut zwischen Zug und LKW umgeladen. In diesem Zusammenhang muss darauf hingewiesen werden, dass in vielen Ländern Bahntransporte benachteiligt werden, eine Praxis, die sofort aufhören muss: Schlechter Unterhalt, hohe Trassengebühren und die Einführung von ETCS mit oft zweifelhaftem Nutzen. Ausserdem müssen viele Gleisanschlüsse zu den Güterkunden wiederaufgebaut werden.

Die Umlagerung von Gütertransporten von der Strasse auf den **Schiffstransport** ist auch sehr interessant - dort wo dies möglich ist.

Der Ersatz von Dieselöl durch **Biodiesel** ist eine verwendbare Alternative, aber nur dort, wo genügend Biodiesel vorhanden ist. Siehe unter dem Abschnitt «Biotreibstoff»

Die Umstellung auf **Brennstoffzellenbetrieb** mit fossilfrei hergestelltem Wasserstoff ist eine Technik, die noch **in Entwicklung** ist. Der Strombedarf ist jedoch ein Vielfaches höher als bei Bahntransport

Elektrischer Antrieb mit Energieübertragung mittels **Induktion in der Strasse** ist noch in der **Versuchsphase**. Unter anderem muss abgeklärt werden, wie diese Technik bei Schnee und Eis funktioniert. Auch müssen Sicherheitsaspekte berücksichtigt werden.

Der Abschnitt Lastautos wird auf der nächsten Seite fortgesetzt

Lastautos - Fortsetzung

Reiner Batteriebetrieb für schwere und weite Transporte würden am hohen Batteriegewicht scheitern.

Die **Kombination Batterie/Oberleitung** ist noch in der **Versuchsphase**.

Elektrischer Antrieb von LKWs **vollständig unter Oberleitung** kann für längere Strecken als vollkommen **unrealistisch** betrachtet werden, ausser für gewisse kürzere Abschnitte. Dies wegen der horrenden Kosten für das Aufstellen der Oberleitung auf allen Hauptstrassen. Dadurch würde man leider nur einen Teil des CO₂-Ausstosses vom gesamten Strassenverkehr verringern und es muss abgeklärt werden, wie man mit ausländischen LKWs umgeht. Soll man die Fuhrhalter *zwingen*, ihre LKWs auf elektrischem Betrieb unter Oberleitung zu fahren? Eine Überschlagsberechnung für Schweden zeigt, dass die Höhe der Kosten für die Oberleitung in etwa der gleichen Grössenordnung wäre, wie wenn man das jetzige Eisenbahnnetz in Schweden komplett neu aufbauen würde. Dies wird näher beschrieben in der [schwedischen Version von diesem Dokument](#) [3]. Ausserdem würde allein die Montage der Oberleitung die Kapazität auf der Strasse *nicht erhöhen*. Es muss in diesem Zusammenhang auch erwähnt werden, dass zwei Bahngleise erfahrungsgemäss mehr Kapazität als etwa zehn Fahrspuren auf der Strasse aufweisen.

In Wikipedia gibt es einen Artikel über [Oberleitungslastkraftwagen](#)¹⁸. Die Technik ist über 100 Jahre alt, wird aber nur für kurze Strecken verwendet. Im Artikel gibt es auch Fotos von Strassen mit Oberleitung.

An **Energie**, als kWh je Tonne Güter und km berechnet, braucht es auf der Bahn viel weniger als auf der Strasse: Dies aufgrund viel niedrigen Rollwiderstands mit Stahlrad auf Stahlschiene als mit Gummi auf Asphalt

Dazu kommt bei der Brennstoffzellentechnik, dass die meiste elektrische Energie verloren geht, durch die Umwandlung Strom → Wasserstoff → Brennstoffzelle → Strom

Wenn es um elektrische Energie geht, soll dies dort eingesetzt werden, wo man den grössten Nutzen erreicht. Dies ist besonders wichtig, dort wo das Angebot an nachhaltigem Strom begrenzt ist.

Kernkraft soll in der EU ev. als nachhaltig bezeichnet werden. Dies ist mir aber sehr erstaunlich, da wir nach mehr als einem halben Jahrhundert immer noch nicht wissen, wie der Abfall richtig endgelagert werden soll. D.h. so dass kommende Generationen sich um *unseren* Abfall nicht kümmern müssen. Zudem gibt es das Unfallrisiko, was uns in zwei krassen Fällen vorgeführt wurden: Tschernobyl, Fukushima.

Busse

Die Busse fahren heute vor allem mit **Dieselöl** und **Erdgas** welche klimaschädlich sind und deshalb ersetzt werden müssen.

Ethanol wird schon heute zum Teil für Busse verwendet. Die Voraussetzung in diesem Zusammenhang, d.h. klimafreundlich, ist dass das Ethanol ohne Verwendung von Fossilrohstoff hergestellt werden muss.

Biokraftstoff ist eine denkbare Alternative zu Diesel, vorausgesetzt dass genügend davon verfügbar ist, und dass es nachhaltig hergestellt wird, siehe unter dem Abschnitt «Biokraftstoff»

Synthetisches Dieselöl kann, wenn fossilfrei hergestellt, CO₂-neutral sein. Dies ist z.Zt. im Versuchsstadium.

Der Oberleitungsbus ist eine alte bewährte Technik, jedoch nur in Städten verwendbar, dies aufgrund der hohen Kosten für die Oberleitung, siehe auch unter dem Abschnitt «Lastautos».

Der Batteriebetrieb ist in der Anfangsphase für kurze Strecken in Städten. Damit die Verwendung von Batterien keinen indirekten CO₂-Ausstoss verursachen soll gibt es mehrere Bedingungen, siehe unter dem Abschnitt «Personenautos».

Die Kombination Oberleitung/Batterie für Busbetrieb ist in der Einführungsphase.

Der Wechsel des Verkehrsmittels zu elektrisch angetriebenen Schienenfahrzeugen ist ein sehr guter Weg, um den Ausstoss von CO₂ zu vermindern. In grösseren Städten bedeutet dies der Wechsel zu Strassenbahn und U-Bahn. In diesem Zusammenhang kann der Begriff «Strassenbahn» aufgeteilt werden: 1. in reine Strassenbahn, d.h. Stahlräder auf Stahlschienen, und 2. in spurgelenkten Bus auf Gummirädern. Das letztere verlangt Lenkschiene und Oberleitung und wird u.a. in Paris verwendet. Auch der Wechsel vom Dieselbus zum Oberleitungsbus verringert den CO₂-Ausstoss. Dort wo es ausserhalb grösserer Städte eine Bahnlinie gibt, sind elektrische Züge die beste Alternative zu langen Buslinien. Für kürzere Strecken und kurze Abstände zwischen den Haltepunkten kann aber der Bus die beste Alternative sein, dann aber mit fossilfreiem Antrieb.

Selbstfahrende Minibusse sind noch in der Probephase. Es gibt Hoffnungen, dass dieses Verkehrsmittel in der Zukunft eine Alternative zu gewöhnlichen Bussen in normalem Verkehr werden kann. Zweifel sind jedoch aufgekommen, wie folgendes zeigt: In der Schweiz wurden in sechs Städten selbstfahrende Busse getestet, bis jetzt mit negativen Ergebnissen. Falls es überhaupt möglich werden soll, diese Busse wie beabsichtigt einzusetzen, werden es mehr als zehn Jahre dauern [14] Es muss betont werden, dass normaler Strassenverkehr sehr komplex ist und von den Verkehrsteilnehmern viel abverlangt. Ein Computerprogramm ist kaum möglich zu entwickeln, um dies zu bewältigen, wenigstens innerhalb überschaubarer Zeit. **Selbstfahrende Minibusse sind damit heute für den normalen Strassenverkehr uninteressant.**

Übriger motorisierter Strassenverkehr

...wird hier nicht behandelt: Motorräder, Mopeds, Traktoren, usw.

Eisenbahn

Das bereits Erwähnte zeigt auf, dass eine *umfassende Umlagerung zur Eisenbahn notwendig wird*, falls wir das Klimaziel erreichen sollen, und dies gleichzeitig mit Mobilität auf etwa heutigem Niveau. Dies wird zu einer sehr grossen Verkehrszunahme auf der Eisenbahn führen, was einen guten Unterhalt und, wo erforderlich, Aufrüstung verlangt. Auch ein grösserer Ausbau wird notwendig sein, um die vermehrten Transporte zu bewältigen. Zwei Beispiele aus Schweden:

1. Falls 20% der Autoreisenden auf den Zug umsteigen, werden die Zugreisen *mehr als verdoppelt*.
2. Falls 50% der Autoreisenden auf den Zug umsteigen, werden die Zugreisen *vervierfacht*.

Näheres ist in der [schwedischen Version von diesem Dokument](#) [3] beschrieben.

Züge mit Stahlrädern auf Stahlschienen haben einen viel tieferen Rollwiderstand als Gummiräder auf Asphalt. Für den Transport braucht es deshalb viel weniger Energie auf der Eisenbahn als auf der Strasse. Die elektrische Energie kann dadurch viel effizienter auf der Eisenbahn eingesetzt werden als auf der Strasse, besonders wichtig wo das Angebot an nachhaltiger Elektrizität begrenzt ist.

Ein einengender Faktor seit dem Beginn der Eisenbahn ist jedoch, dass man Schienen nicht überall auslegen kann. Daher wird sehr oft eine Kombination aus Bahn- und Strassentransport benötigt, mit Umsteigen oder Umladen dazwischen. Heutzutage geschieht dieses Umladen meistens mit ganzen Containern, die umgeladen werden. Der Transport von LKWs und Anhängern auf Tieftransportwagen wird auch seit langem verwendet.

Die bekannten verwendbaren Antriebsystemen auf der Eisenbahn sind heutzutage:

Elektrischer Antrieb ab Oberleitung oder Stromschiene, elektrischer Antrieb ab Batterien oder ab Brennstoffzellen (Wasserstoff mit Elektrolyse hergestellt). Der Strom muss selbstverständlich von fossilfreien Quellen kommen, d.h. vor allem von Wasserkraftwerken, Sonnenkollektoren oder Windrädern. Kernkraft belastet selbstverständlich nicht das Klima, hat jedoch andere bekannte grosse Nachteile: Radioaktiver Abfall und Katastrophenrisiko (Tschernobyl, Fukushima).

Thermischer Antrieb mit Dieselöl oder Biodiesel.

Ich nehme hier keine «exotischen» Techniken auf, wie z.B. [Magnetschwebetechnik](#) [8] Diese Technik ist zwar seit langem bekannt, ist aber noch nicht für lange Strecken und hohe Geschwindigkeiten zur praktischen Verwendung gekommen.

Die Eisenbahn ist somit eine sehr wichtige Alternative für die Transporte, um das Klimaziel zu erreichen. Man muss deshalb damit aufhören, Eisenbahnstrecken stillzulegen. Diese Praxis ist eine Fehlentwicklung und wird leider immer noch u.a. in Schweden betrieben wie in der [schwedischen Version von diesem Dokument](#) [3] beschrieben ist.

Fossilfreie Kraftstoffe

Diese können aufgeteilt werden, in synthetischen Kraftstoffen:

Methanol und Ethanol – nachhaltig hergestellt

Wasserstoff nachhaltig hergestellt

... samt Biokraftstoffe

Biokraftstoffe aus zweifelhaften Rohstoffen – wie Palmöl – sind *nicht nachhaltig*. Die Ursache bei Palmöl ist, dass für die Plantagen Wälder abgeholzt werden, was für das Klima negativ ist.

Weiter soll Biokraftstoff nicht aus Pflanzen hergestellt werden, welche dann für die Lebensmittelproduktion fehlen.

Biokraftstoff sollte nicht importiert werden, weil dadurch dieser in anderen Ländern für die Umstellung auf fossilfreie Transporte fehlen würde, Damit würde am Ende der totale Ausstoss an Klimagasen auf unserem Planeten nicht verringert werden.

Das Angebot an Biokraftstoff ist in den meisten Ländern beschränkt. Biotreibstoff kann deshalb nur eine Teillösung sein, um den Ausstoss an Klimagasen zu verringern. Für Schweden wird dies in der [schwedischen Version von diesem Dokument](#) [3] beschrieben.

Allgemeine Kommentare

Es ist leider unmöglich, den Flugverkehr im heutigen Umfang nachhaltig zu machen!

Betreffend Batterien als Antrieb für Landverkehr müssen Herstellung, Aufladung und Entsorgung haltbar sein. Aber, es ist nicht sicher, dass es genügend nachhaltige Elektrizität gibt, um den gesamten Strassenverkehr elektrisch zu machen, ob mit Batterien oder mit Brennstoffzellen.

Wenn ein Land auf Transporte ohne Fossilkraftstoffe umstellt, wird es weniger verwundbar auf seinem wichtigen Transportsektor. Es soll auch erwähnt werden, dass immer mehr Öl eingesetzt werden muss, nur um jenes Öl zu gewinnen, das am Ende zur Verwendung kommt. Die Ölgewinnung wird dadurch immer weniger effektiv und damit teurer, und das Klima wird immer mehr belastet.

*Abschliessend muss gesagt werden, dass bei den Politikern und anderen Entscheidungsträgern ein Umdenken stattfinden muss, wenn Transporte nachhaltig werden sollen. In vielen Ländern erhalten immer noch Strassen- und Flugverkehr im Transportwesen den Vorzug bei gleichzeitiger Vernachlässigung der Bahn. Künftig muss die **Bahn mehr Gewicht bekommen**.*

Je nachdem wie neue Fakten bekannt werden, werden diese hier einfließen.

Diese Beilage soll aufzeigen, ob Verkehrsflug mit Batterien theoretisch möglich ist.

Zusammengefasst zeigen die Berechnungen, dass kommerzieller Flugverkehr auf längeren Flugdistanzen, mit Batteriebetrieb klimafreundlich *nicht* gemacht werden kann! Die Gründe dazu:

1. Die Batterien von heute haben zu wenig Ladungsdichte für kommerziellen Flugverkehr auf längeren Distanzen.
2. Falls es möglich werden soll, Batterien mit genügend Ladungsdichte für diesen Verkehr zu bauen, würden diese explodieren, bei einem eventuellen Kurzschluss. Ein Kurzschluss muss deshalb zu 100% ausgeschlossen werden, falls kommerzieller Batterieflug auf längeren Distanzen ermöglicht werden soll! Diese 100% Sicherheit sehe ich als aussichtslos!

Im Teil 1 dieser Beilage wird die heutzutage beste Batterietechnik vorausgesetzt, während im Teil 2 eine fiktive Batterie mit 15.5-Mal höhere Ladungsdichte (Wh/kg) behandelt wird.

Für die Berechnungen wurde Propellerflug gewählt, da es nicht möglich ist, Düsenflugzeuge mit Elektrizität zu betreiben. Ein Flugzeugtyp wurde gewählt: Propellerflugzeug **Fokker 50-300** mit max. Motorenleistung 2'050 kW. Die Angaben für Fokker 50-300 stammen von Arne Karyd, wie auch die übrigen Angaben unten. In den Berechnungen wird das gleiche Gewicht für die Elektromotore wie für die heutigen Düsenmotoren vorausgesetzt.

Eine totale Flugstrecke 700 km wird vorausgesetzt.

Start: 300 km/h x 2 min = 10 km

Steigung: 350 km/h x 8 min = 47 km

Landung: 520 km/h x 10 min = 87 km

Start + Steigung + Landung: 144 km (=10+47+87)

Marschfahrt 520 km/h: 700 km – 144 km = 556 km → 64 min (=556km / 520km/h)

Energiebedarf für jeden Motor für den ganzen Flug:

Start: 2050 kW x 100% x 2 min = 68 kWh (=2050 x 2/60)

Steigung: 2050 kW x 80% x 8 min = 219 kWh (=2050 x 80% x 8/60)

Marschfahrt: 2050 kW x 70% x 64 min = 1'530 kWh (=2050 x 70% x 64/60)

Landung: 2050 kW x 50% x 10 min = 171 kWh (=2050 x 50% x 10/60)

Totaler Energiebedarf für einen Motor **1'988 kWh** (=68 + 219 + 1530 + 171)

Totaler Energiebedarf für zwei Motoren + 33% Reserve: 1988 kWh x 2 + 33 % = **5'300 kWh**

Einfachhalber wird 100% Wirkungsgrad bei den Elektromotoren angenommen, und dass dessen Gewicht gleich hoch ist wie für die Motoren für Flugbrennstoff. Dies stimmt zwar nicht ganz, der Wirkungsgrad bei Elektromotoren liegt etwas unter 100% und sie sind eher schwerer als die Brennstoffmotoren. Dazu kommt Energie für Heizung, Enteisierung, Ruderservo, Beleuchtung und Avionik. All dies verstärkt die negative Beurteilung von Elektroantrieb in Flugzeugen, über was hier theoretisch berechnet wird.

Teil 1: Heute beste Batterietechnik (330 Wh/kg), soweit mir bekannt (2020)

Mit dem Skalfaktor 60% wird die verwendbare Ladungsdichte 200 kWh/kg, dies wird in den Beispielen 1A und 1B verwendet.

Beispiel 1A

Für das Beispiel Fokker 30-500 mit 700 km Flugdistanz würde der Batteriegewicht 5300 kWh / 200 Wh/kg = **26.5 Tonnen** betragen. Dies ist mit dem totalen Gewicht **20.82** Tonnen für Fokker 50-300, gemäss <https://www.airliners.net/aircraft-data/fokker-50/218> [19] zu vergleichen.

Es ist selbstredend, dass dies eine Unmöglichkeit ist!

Beispiel 1B

Wenn man den Brennstoffgewicht 1750 lt für 700 km und die Hälfte (25) der Sitzplätze entfernt, kann man stattdessen ca. 4500 kg Batterien (=1750 lt + Brennstofftank + 25 x 110 kg/Sitzplatz) laden.

4'500 kg Batterien können 900 kWh lagern. (= 200 Wh/kg x 4'500 kg)

Start, Steigung und Landung bedarf gemäss vorheriger Seite $68 + 219 + 171 = 458$ kWh
(Flugstrecke $10 + 47 + 87 = 144$ km)

900 kWh soll theoretisch für den ganzen Flug reichen, wovon 458 kWh für Start + Steigung + Landung, der Rest $900 - 458 = 442$ kWh für Flug in Marschfahrt $\rightarrow 160$ km ($= 520 \times 442 / 1435$)

Theoretisch wird die totale Flugstrecke somit $144 + 160 = \mathbf{304}$ km

Die tatsächliche Flugstrecke ist somit weniger als 304 km. In der Berechnung der tatsächlichen Flugstrecke muss noch Reserveenergie wie im Beispiel 1 C mitberechnet werden, um auf eine Reserveflughafen landen zu können, über den Flughafen drehen zu können und dazu noch 10% Reserveenergie. Die geplante Flugstrecke wird deshalb viel kürzer als die theoretische 304 km. D.h. so kurz, dass diese uninteressant wird, ausser vielleicht in Spezialfällen.

Schlussfolgerung: Mit der heutzutage besten Batterietechnik ist Batteriebetrieb für kommerziellen Verkehrsflug auf längeren Flugdistanzen eine Unmöglichkeit!

Bemerkung: Die Firma Pipistrel in Slowenien stellt Sportflugzeuge mit Batteriebetrieb her [15]. Es handelt sich aber nur um sehr kleine Flugzeuge und nur für kurze Distanzen. In Norwegen möchte man mit so einem Flugzeug Erfahrungen sammeln, für den späteren Einsatz grosser Flugzeuge auf längeren Distanzen, dann mit dem Einsatz von viel leistungsstärkeren Batterien, welche noch zu entwickeln wären. Wie im Teil 2 in dieser Beilage gezeigt wird, sind aber solche Flugzeuge illusorisch, solange Kurzschluss nicht zu 100% ausgeschlossen werden kann!

Beispiel 1 C

In 10 Jahren wird es vielleicht gelingen, die Ladungsdichte auf 500 Wh/kg zu erhöhen, mit Skalfaktor 80 %. Mit einer Berechnung analog Beispiel 1B bekommt man eine *theoretische* Flugstrecke von maximal **630 km**. Dies mit einem Flugzeug mit nur *der Hälfte der Sitzplätze*. 4.5 Tonnen Batterien mit Ladungsdichte 500 Wh/kg und Skalfaktor 80% ergibt 1800 kWh Ladung.

Dies würde für Arlanda – Visby theoretisch ausreichen, Abstand auf der Karte **230 km**. Dazu kommt genügend Ladung für einen Reserveflughafen, in diesem Fall Skavsta, Abstand **150 km** von Visby. Dazu noch Reserve damit das Flugzeug während 45 min über einem Flughafen drehen kann, in diesem Fall entspricht dies 150 km mit reduzierter Leistung auf 2/3 umgerechnet 100 km in Marschfahrt.

Schliesslich 10 % Flugreserve von 230 + 150 + 100 km = **48 km**. Total braucht es damit genügend Energie für **ca. 530 km** Flugstrecke. Die erwähnte 4.5 Tonnen schwere Batterie mit ladungsdichte 500 Wh/kg würde dann für einen Flug Arlanda – Visby ausreichen, inkl. Reserven.

Nach der Landung muss die Batterie wieder aufgeladen werden. Wir nehmen an, die Batterie wird, während 1 Stunde Ladezeit, mit bis zu 2 000 kWh geladen (= 4500 kg x 500 Wh/kg x 80% + 10% Verlusten), was somit bis ca. 2 MW ergibt. Mit 400 V Ladungsspannung braucht es sehr dicke Kabel für 5000 A. Vermutlich muss der Flughafen ein Energielager bauen, um den momentanen Energiebedarf vom Netz zu reduzieren. Dies macht in der Praxis noch ein Hindernis für den Batterieflug. Zu betonen ist, dass diese Berechnung gemacht wurde, um eine grobe Schätzung vom Energiebedarf zu bekommen.

In einem zukünftigen Verkehrsflugzeug sind sehr dicke Kabel erforderlich, um die Energie von der Batterie zu den Motoren zu leiten, Stromstärke mindestens mehrere tausend A. Diese Kabel werden deshalb sehr schwer, das Kabelgewicht muss von Fall zu Fall berechnet werden. Gegenüber der theoretischen Berechnung oben muss deshalb die Anzahl Passagiere und/oder die Reichweite begrenzt werden, damit das Flugzeug nicht zu schwer wird.

Und noch ein Hindernis gegen den Batterieflug: Die Ladungsdichte 500 Wh/kg = 1800 kJ/kg bewirkt, dass 1800 kJ per kg in einer vollgeladenen Batterie auf Einmal freigesetzt wird, bei einem Kurzschluss. Wenn man in gleicher Art, wie im Beispiel 2 rechnet, erhält man:

Lithium und **Aluminium** fangen in der Luft Feuer, die Reaktionsprodukte heizen weiter auf
Mangan, Eisen, Kobalt, Nickel und **Kupfer** schmelzen, heizen weiter auf bis Siedepunkt

Die gemachten Berechnungen gelten zwar nur für reine Metalle, es kann aber auf gutem Grund erwartet werden, dass andere Metalle, nicht-Metalle und chemische Verbindungen in so einer starken Batterie in einer ähnlichen Art reagieren würden. Falls die Batterie eine Flüssigkeit, wie Wasser, enthalten würde, würde diese sofort verdampfen, was zur Explosion führen würde! Es kann auch eintreffen, dass chemische Verbindungen zerfallen, mit noch unbekanntem Folgen. Und, es muss darauf hingewiesen werden, dass ein Brand oder Explosion in einer Batterie höchstwahrscheinlich einer Kettenreaktion zu den anderen Batterien kommt. Siehe auch den [Youtube-Film](#) [12] in NBC News

Auch wenn die Konsequenzen dadurch nicht so gross werden, wie im Beispiel 2, muss man damit rechnen, dass die Wirkungen so gross sind, dass das Flugzeug abstürzt!

Teil 2 – Beispiel C: Theoretische Ladungsdichte 15.5-Mal höher (3105 Wh/kg) als die heutzutage besten Batterietechnik

Wie im Teil 1 ersichtlich, muss eine bedeutend höhere Ladungsdichte entwickelt werden, damit die Batterietechnik für Verkehrsflug auf längeren Distanzen interessant wird. In diesem Teil 2 wird deshalb mit einer fiktiven Ladungsdichte 15.5-Mal höher als die heutzutage beste Batterietechnik gerechnet: $15.5 \times 200 \text{ Wh/kg} = 3100 \text{ Wh/kg}$. (Bem. 15.5-Mal wurde gewählt, um eine theoretische Flugdistanz von 700 km zu erreichen)

Das eingesparte Gewicht von 1750 lt. Brennstoff und Brennstofftank kann ganz für Batterien verwendet werden. Wir kriegen dann ca. $1750 \text{ kg Batterie} \times 3105 \text{ Wh/kg} = 5433 \text{ kWh}$ Lagerkapazität. Gemäss Seite 1 genügt dies für 700 km Flugdistanz.

ABER, es geht um eine sehr grosse Energiemenge je kg Batterie, die langsam abgezapft wird. Falls stattdessen ein Kurzschluss in der Batterie auftreten würde, wird die ganze Energiemenge auf einmal freigesetzt, die dadurch sofort aufgeheizt wird. Folgende Berechnung zeigt, was dann in dieser fiktiven Batterie passieren würde.

Ein Vergleich: Flugbenzin enthält 43 MJ/kg, also knapp vielmal so viel Energie je kg als in diesem Beispiel 11.2 MJ/kg Batterie (3105 Wh/kg). Trotzdem ist Flugbenzin nicht speziell gefährlich, im Gegensatz zur fiktiven Batterie, was hier erklärt wird. Der Korrektheit wegen soll erwähnt werden, dass jede MJ von der Batterie mehr Arbeit verrichten kann als jede MJ Flugbenzin, was jedoch an der Aussage nicht gross ändert.

Die Folge eines Kurzschlusses in einer vollgeladenen Batterie, Ladungsdichte 3105 Wh/kg

Es ist natürlicherweise unmöglich vorauszusagen, wie diese Batterien aussehen würden, weil man dann schon heute solche Batterien herstellen könnte. Für die Berechnung wurde deshalb vorausgesetzt, dass die Batterie ein oder mehrere Metalle enthalten würde, welche in den heutigen Lithiumbatterien vorkommen oder aus einem anderen Material mit ähnlichen Eigenschaften wie diese: Lithium, Aluminium, Mangan, Eisen, Kobalt, Nickel und Kupfer. Diese anderen Materiale können chemische Verbindungen von diesen oder von anderen Metallen sein. Die Berechnungen auf der nächsten Seite sind bewusst eine sehr grosse Vereinfachung, aber weisen trotzdem sehr deutlich darauf hin was in der Batterie bei einem Kurzschluss passieren würde.

Die Tabelle unten zeigt die Eigenschaften für die Metalle:

	Wärmekapazität J/(kg-K)	Schmelz- punkt	Siede- punkt	Schmelzwärme kJ/kg	Verdampfungswärme MJ/kg	Zünd- temperatur
Litium	3600	180.5 °C	1342 °C	432	21.0	180 °C
Aluminium	900	660 °C	2467 °C	386	10.5	555 °C
Mangan	480	1246 °C	2061 °C	219	4.85	
Eisen	440	1538 °C	2861 °C	247	6.27	
Kobalt	420	1495 °C	2927 °C	275	6.39	
Nickel	440	1455 °C	2913 °C	298	6.31	
Kupfer	380	1085 °C	2527 °C	206	4.73	

Quelle: nuclear-power.net, nuclearpowerradiation.tpub.com [20]

Eine in etwa gleichbleibende Wärmekapazität bis zum Siedepunkt wird hier angenommen

Bei einem Kurzschluss wird 3105 Wh/kg = 11200 kJ/kg Energie freigegeben, was eine extreme Temperatursteigerung verursachen würde.

Berechnung der Energiemenge für das Aufheizen bis zum Schmelzpunkt, Schmelzen, weiter aufheizen bis zum Siedepunkt und als Schluss verdampfen der Metalle:

Lithium

...bis Schmelz- und Zündtemperatur 180 °C: $(180-0) \times 3.6 \text{ kJ/kg} = 648 \text{ kJ/kg}$

Das Metall fängt beim Schmelzen Feuer und die Reaktionsprodukte werden weiter erhitzt

Falls das Metall keine Feuer fangen würde, passiert folgendes:

...bis Siedepunkt: $(180.5-0) \times 3.6 \text{ kJ/kg} + 432 \text{ kJ/kg} + (1'342-180.5) \times 3.6 \text{ kJ/kg} = 5263 \text{ kJ/kg}$

...bis Siedepunkt + vollständiges Verdampfen = $5263 \text{ kJ/kg} + 21000 \text{ kJ/kg} = \mathbf{25263 \text{ kJ/kg}}$

Aluminium

...bis Zündtemperatur 550 °C: $(555-0) \times 0.9 \text{ kJ/kg} = 500 \text{ kJ/kg}$

Das Metall fängt bei 555 °C Feuer und die Reaktionsprodukte werden weiter erhitzt

Falls das Metall keine Feuer fangen würde, passiert folgendes:

...bis Siedepunkt: $(660-0) \times 0.9 \text{ kJ/kg} + 386 \text{ kJ/kg} + (2467-660) \times 0.9 \text{ kJ/kg} = 2606 \text{ kJ/kg}$

...bis Siedepunkt + vollständiges Verdampfen = $2506 \text{ kJ/kg} + 10500 \text{ kJ/kg} = \mathbf{13106 \text{ kJ/kg}}$

Mangan

...bis Siedepunkt: $(1246-0) \times 0.48 \text{ kJ/kg} + 219 \text{ kJ/kg} + (2061-1246) \times 0.48 \text{ kJ/kg} = 1208 \text{ kJ/kg}$

...bis Siedepunkt + vollständiges Verdampfen = $1'208 \text{ kJ/kg} + 4'850 \text{ kJ/kg} = 6058 \text{ kJ/kg}$

Überschüssige Energie nach vollständigem Verdampfen **5142 kJ/kg** (=11200-6058)

Eisen

...bis Siedepunkt: $(1538-0) \times 0.44 \text{ kJ/kg} + 247 \text{ kJ/kg} + (2861-1538) \times 0.44 \text{ kJ/kg} = 1506 \text{ kJ/kg}$

...bis Siedepunkt + vollständiges Verdampfen = $1508 \text{ kJ/kg} + 6270 \text{ kJ/kg} = 7776 \text{ kJ/kg}$

Überschüssige Energie nach vollständigem Verdampfen **3424 kJ/kg** (=11200-7776)

Kobalt

...bis Siedepunkt: $(1495-0) \times 0.42 \text{ kJ/kg} + 275 \text{ kJ/kg} + (2927-1495) \times 0.42 \text{ kJ/kg} = 1504 \text{ kJ/kg}$

...bis Siedepunkt + vollständiges Verdampfen = $1504 \text{ kJ/kg} + 6390 \text{ kJ/kg} = 7894 \text{ kJ/kg}$

Überschüssige Energie nach vollständigem Verdampfen **3306 kJ/kg** (=11200-7894)

Nickel

...bis Siedepunkt $(1455-0) \times 0.44 \text{ kJ/kg} + 298 \text{ kJ/kg} + (2913-1455) \times 0.44 \text{ kJ/kg} = 1'580 \text{ kJ/kg}$

...bis Siedepunkt + vollständiges Verdampfen = $1580 \text{ kJ/kg} + 6310 \text{ kJ/kg} = 7890 \text{ kJ/kg}$

Überschüssige Energie nach vollständigem Verdampfen **3310 kJ/kg** (=11200-7890)

Kupfer

...bis Siedepunkt: $(1085-0) \times 0.38 \text{ kJ/kg} + 206 \text{ kJ/kg} + (2527-1085) \times 0.38 \text{ kJ/kg} = 1166 \text{ kJ/kg}$

...bis Siedepunkt + vollständiges Verdampfen = $716 \text{ kJ/kg} + 4730 \text{ kJ/kg} = 5896 \text{ kJ/kg}$

Überschüssige Energie nach vollständigem Verdampfen **5304 kJ/kg** (=11200-5896)

Schlussfolgerung: Die Berechnung zeigt, dass Lithium und Aluminium beide Feuer fangen würden und dass die Reaktionsprodukte weiter aufgeheizt werden. Die anderen Metalle werden ganz verdampfen. Das Ganze geschieht sehr schnell, warum es zu gravierenden Konsequenzen kommt, d.h. Explosion. Die Berechnung gilt zwar nur für reine Metalle, aber es kann mit gutem Grund erwartet werden, dass auch andere Metalle, nicht-Metalle und chemische Verbindungen in so einer starken Batterie ähnlich reagieren würden. Falls ein flüssiger Stoff, wie z.B. Wasser, in der Batterie sich befindet, würde diese Flüssigkeit sofort verdampfen, was auch zur Explosion führt! Auch chemische Zersetzung kann eintreffen, mit noch unbekanntem Folgen. Und zuletzt muss darauf hingewiesen werden, dass es mit grösster Wahrscheinlichkeit zu einer Kettenreaktion kommt: Ein Kurzschluss mit nachfolgender Explosion in einer Batterie würde sich äusserst schnell zu den anderen Batterien verbreiten.

Eine derart kräftige Batterie kann somit eher als eine Bombe betrachtet werden, aus der man langsam Energie abzapft. Bei einem Kurzschluss würde ein Flugzeug mit solchen Batterien nicht abstürzen, sondern in der Luft explodieren! Niemand würde dies überleben.

*Falls Kurzschluss nicht zu 100% ausgeschlossen werden kann,
ist kommerzieller Flugverkehr auf längeren Distanzen mit
Batterieantrieb unmöglich!*

Birger Tiberg 12. Juli 2022

Referenzen

- [1] Umweltbundesamt 2012, Klimawirksamkeit des Flugverkehrs - Aktueller wissenschaftlicher Kenntnisstand, auf Internetseite [Abgerufen 23.7.2019]:
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/377/dokumente/klimawirksamkeit_des_flugverkehrs.pdf
- [2] Wissenschaft.de 2019: Klimawirkung von Kondensstreifen verdreifacht sich, [Abgerufen 25.7.2019]:
https://www.wissenschaft.de/erde-klima/klimawirkung-von-kondensstreifen-verdreifacht-sich/?utm_source=newsletter&utm_medium=email&utm_campaign=wissenschaft.de_01-07-2019&fbclid=IwAR30h66n2exj3L5WvV06WM3kqQa1pD6oFXynZMEmgWrh6P2qiRc7X-ADU_0
- [3] Tiberg B, Hållbara transporter, 29.6.2019, auf Internetseite [Abgerufen 25.7.2019]:
http://www.jarnvag.ch/hallbar_trafik.pdf
- [4] Pope S, UPS 747 Crash Highlights Lithium Battery Danger, 25.7.2013, Flying, auf Internetseite [Abgerufen 1.8.2019]
<https://www.flyingmag.com/news/ups-747-crash-highlights-lithium-battery-danger/>
- [5] Pressemitteilung von IVL 2017-05-29 "The Life Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions from Lithium-Ion Batteries" auf Internetseite [Abgerufen 25.7.2021]:
<https://www.ivl.se/download/18.5922281715bdaebede95a9/1496136143435/C243.pdf>
- [6] Publikation von Agora Verkehrswende April 2019: «Klimabilanz von Elektroautos - Einflussfaktoren und Verbesserungspotenzial», auf Internetseite [Abgerufen 20.5.2019]:
<https://www.agora-verkehrswende.de/veroeffentlichungen/klimabilanz-von-elektroautos/>
- [7] Ivarsson M, Notiz ini Expressen 2018-11-27: "Kryssning värre än flyg enligt ny undersökning", auf Internetseite [Abgerufen 20.5.2019]:
<https://www.expressen.se/allt-om-resor/kryssning-varre-an-flyg-enligt-ny-undersokning/>
- [8] Wikipedia – Maglev, daterad 2019-05-11, auf Internetseite [Abgerufen 20.5.2019]:
<https://en.wikipedia.org/wiki/Maglev>
- [9] Slutsatser och Rekommendationer från Flygets Miljökommitté, Hösten 2007:
<https://www.svensktflyg.se/wp-content/uploads/2011/05/slutsatser-och-rekommendationer-fran-flygets-miljokommitte.pdf>
- [10] Strenge Vorschriften von IATA bez. Li-Batterien in Flugzeugen [Abgerufen 28.1.2020]:
<https://www.iata.org/contentassets/05e6d8742b0047259bf3a700bc9d42b9/lithium-battery-update.pdf>
- [11] Strenge Vorschriften von FAA bez. Li-Batterien in Flugzeugen [Abgerufen 28.1.2020]:
https://www.faa.gov/hazmat/packsafe/resources/media/Airline_passengers_and_batteries.pdf
- [12] Youtube-Film von NBC News 2016: Lithium Batteries Threaten Cargo Planes [Abgerufen 21.1.2020]:
<https://www.youtube.com/watch?v=1Sp-zjRm3Q8>
- [13] TA-Swiss-Studie Selbstfahrende Autos in der Schweiz, 2020 [Abgerufen 26.2.2020]:
<https://vdf.ch/automatisiertes-fahren-in-der-schweiz-das-steuer-aus-der-hand-geben-e-book.html>
- [14] «Notstopp wegen ein paar Mücken», K-Tipp Nr. 18 2020, Seiten 8-9
- [15] Flugzeughersteller Pipistrel, Slowenien: <https://www.pipistrel-aircraft.com/>
- [16] Die Batterie: Knackpunkt der Mobilität, VCS, [Abgerufen 6.11.2020]:
https://www.verkehrsclub.ch/fileadmin/user_upload/30_ratgeber/43_auto/e-mobility/Batterien_D_DEF.pdf

Die Referenzen werden auf der nächsten Seite fortgesetzt

jarnvag.ch	Nachhaltige Transporte Personen- und Güterverkehr
-------------------	--

Referenzen - Fortsetzung

- [17] Merkel A, in railtech.com [Abgerufen 2021-02-20] :
<https://www.railtech.com/policy/2021/01/11/angela-merkel-only-with-rail-we-will-achieve-our-climate-goals/>
- [18] Oberleitungslastkraftwagen, Wikipedia [Abgerufen 2021-07-16]:
<https://de.wikipedia.org/wiki/Oberleitungslastkraftwagen>
- [19] Fokker 50, Wikipedia [Abgerufen 2021-07-22]:
<https://www.airliners.net/aircraft-data/fokker-50/218>
- [20] Melting, boiling, and ignition temperatures of pure metals in solid form,
NFPA Handbook, [Abgerufen 2021-07-22]:
<https://nuclearpowerradiation.tpub.com/hdbk1081/Table-2-Melting-Boiling-And-Ignition-Temperatures-Of-Pure-Metals-In-Solid-Form-33.htm>
- [21] Wikipedia: Queen Mary 2 [Abgerufen 2021-02-14]:
https://en.wikipedia.org/wiki/Queen_Mary_2
- [22] Cunard's Queen Mary 2 [Abgerufen 2021-02-14]:
<https://www.seat61.com/queen-mary-2-transatlantic.htm>
- [23] Wikipedia: Bristol Britannia [Abgerufen 2021-02-14]:
https://en.wikipedia.org/wiki/Bristol_Britannia
- [24] Airvectors: Bristol Britannia & Vickers Viscount [Abgerufen 2021-02-14]:
<https://airvectors.net/avbrtn.html>

Persönliche Information von Doktorand Sten-Erik Björling, Luleå Tekniska Universitet

Persönliche Information von Prof. Patrik Johansson, Chalmers Tekniska Högskola, bez. Batterien

Persönliche Information von Flugexperte und Ermittler Arne Karyd, bez. Flugverkehr