

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 von CO₂-Ausstoss, versehen mit Kommentaren. Es zeigt sich, dass die Eisenbahn eine wesentlich grössere Rolle bekommen muss als heute der Fall ist.

Birger Tiberg ist Schwede und diplomierter Chemiker mit Interesse für die Eisenbahn seit seiner Kindheit.

Seit 1980 wohnt und arbeitet er in der Schweiz. Nach seiner Pensionierung engagiert er sich für schwedische Eisenbahnpolitik. Er hat u.a. mehrere konkrete Vorschläge ausgearbeitet zur Aufnahme des Verkehrs auf stillgelegten Bahnlinien, siehe www.jarnvag.ch

Zusammenfassung

Das folgende Dokument stellt technische Alternativen zusammen, welche die negative Einwirkung der Transporte auf das Klima eliminieren können. Es sind auch denkbare Möglichkeiten präsentiert, welche *nicht* verwendbar sind. Das Dokument ist eine deutschsprachige Version von der [schwedischen Originalversion](#) dieses Dokumentes [3].

Die kostengünstigste und einfachste Möglichkeit, den CO₂-Ausstoss vom Verkehr zu vermindern ist selbstverständlich die Transporte zu verringern. In diesem Dokument werden aber Alternativen präsentiert, wie die verbliebenen Transporte klimaneutral gemacht werden können. Die verschiedenen Verkehrstypen werden auf dieser und der nächsten Seite nur kurz präsentiert, ausführlicher ab Seite 3.

Betreffend **Flugverkehr** ist die Verlagerung der Reisenden auf den Zug in grösstmöglichem Umfang die realistischste Alternative. Biokraftstoff und fossilfreies synthetisches Flugkerosin sind leider nicht klimaneutral, wenn sie für den heutigen Flugverkehr verwendet werden. Batteriebetrieb ist unrealistisch so lange die Sicherheitsfrage (Kurzschluss) ungelöst ist. Wasserstoff und Sonnenkollektoren müssen leider als nicht verwendbare Alternative angesehen werden. Ob es möglich ist, den Flugverkehr überhaupt nachhaltig zu machen, ist somit fraglich. Im *heutigen* Ausmass des Flugverkehrs ist dies leider nicht möglich.

Die Zusammenfassung wird auf der nächsten Seite fortgesetzt

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

Zusammenfassung - Fortsetzung

Für **Personenautos** gilt die Umlagerung der Reisenden auf den öffentlichen Verkehr (vor allem auf den Zug) als eine sehr interessante Alternative. Auch Betrieb von Brennstoffzellen und Batterien ist interessant. Die Klimafreundlichkeit hängt jedoch davon ab, wieviel Fossilkraft für die Herstellung der Batterien und für den Antrieb noch verwendet wird. Das Hybridauto kann nur als eine Übergangslösung betrachtet werden. Autos selbstfahrend zu machen trägt kaum dazu bei, den Ausstoss von CO₂ und somit den negativen Einfluss auf das Klima zu verringern.

Für **Gütertransporte auf der Strasse** ist ebenfalls eine grösstmögliche Umlagerung auf die Eisenbahn die realistischste Alternative. Damit gemeint ist der Bahntransport auf der ganzen Transportstrecke oder eine Kombination des Transports Strasse/Schiene. Biokraftstoff für LKWs gibt es in nur beschränktem Umfang. Induktion in der Strasse und Brennstoffzellenbetrieb sind erst in der Probephase, wie auch die Kombination Batteriebetrieb und Betrieb ab Oberleitung. Für weite und schwere Transporte müssen reiner Batteriebetrieb und Betrieb ab Oberleitung als nicht einsetzbar betrachtet werden.

Für **Busse** auf langen Strecken gelten teilweise ähnliche Voraussetzungen wie für den Gütertransport auf der Strasse.

Die **Eisenbahn** ist demzufolge eine sehr wichtige Alternative. Aber man kann natürlich unmöglich sämtliche Transporte auf die Eisenbahn verlagern, sondern nur so viele wie praktisch durchführbar. Das oberste Ziel muss sein, das gesetzte Klimaziel zu erreichen. 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: schlecht unterhalten und vernachlässigt!

Die Studie zeigt auch deutlich, dass es unrealistische Wunschträume sind, wenn man auf eine bis jetzt unbekannte neue revolutionierende Technik hofft. Diese würde es ermöglichen, weiter in derselben Art wie heute zu reisen und zu transportieren, aber gleichzeitig das Klima zu schonen. Denn, was machen wir, wenn diese unbekannte 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 zum 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. Fliegen mit Kerosin als Brennstoff muss deshalb durch etwas anderes ersetzt werden, um den klimaschädlichen Ausstoss zu eliminieren bzw. zu reduzieren. Auf Reisen zu verzichten, die man bisher mit dem Flugzeug unternommen hat, ist natürlich die billigste und einfachste Möglichkeit, den CO₂-Ausstoss zu vermindern. In diesem Abschnitt werden jedoch Alternativen für die verbleibenden Reisen behandelt, und zwar um diese nachhaltig zu machen.

Die wichtigste Alternative ist die **Verlagerung** der Flugreisenden **auf die Eisenbahn**, einer erprobten 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 erschwert.

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 nämlich 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, ist noch nicht klar festgestellt. Siehe auch den 2019 publizierte [Beitrag in Wissenschaft.de](#) [2],. Zusammengefasst kann man also nicht mit Bestimmtheit sagen, in genau 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.

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. Im Bericht schliesst der Flugexperte Arne Karyd Wasserstoff für Flugzeugbetrieb aus und gibt verschiedene Gründe an: 1. Vermehrter Ausstoss von Wasserdampf auf Flughöhe hat, wie auch CO₂, eine negative Auswirkung auf das Klima; 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.

Der Abschnitt Flugverkehr wird auf der nächsten Seite fortgesetzt

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

Flugverkehr - Fortsetzung

Sonnenkollektoren auf dem Flugzeug 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 folgende: 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 2010 in Dubai 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 Lithiumbatterie in einem Flugkontainer 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 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.

Personenautos

Die Umstellung von Personenautos auf **Batteriebetrieb** hat bereits angefangen. In diesem Zusammenhang sind die folgenden Punkte wichtig:

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 der Strom in Zusammenhang mit 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 von Treibhausgas! Mehr Information dazu in einem [Bericht von IVL](#) [5] Der Bericht zeigt, welchen 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 ist. Man muss auch in Betracht ziehen, dass es genügend Strom für die geplanten Ladestationen geben muss.

Als Autos noch in den Kinderschuhen steckten war Elektroantrieb mit Batterien üblich, dieser Antrieb wurde jedoch später durch Verbrennungsmotoren auskonkurriert. Die Situation wäre heute vielleicht ganz anders, falls der Elektroantrieb geblieben und weiterentwickelt worden wäre...

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 Anfangsphase befindet.

Das Hybridauto muss in diesem Zusammenhang nur als eine kleine Teillösung betrachtet werden, um den Autoverkehr klimaneutral zu machen.

Der Abschnitt Personenautos wird auf der nächsten Seite fortgesetzt

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

Personenautos - Fortsetzung

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.

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 Fahrradwegen. Auch selbstfahrende Minibusse werden als eine zukünftige Alternative zu Personenautos präsentiert, mehr darüber unter der Rubrik «Busse». Für die Alternativen E-Bikes und E-Trottinetten 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 natürlich eine Verringerung der Gütertransporte. Nach dieser Massnahme kommt an nächster Stelle, die Gütertransporte klimaneutral zu machen. Hierfür gibt es verschiedene 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. Als Alternative 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 zweifelhaftem Nutzen. Ausserdem müssen viele Gleisanschlüsse zu den Güterkunden wiederaufgebaut werden.

Der Abschnitt Lastautos wird auf der nächsten Seite fortgesetzt

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

Lastautos - Fortsetzung

Die Umlagerung von Gütertransporten von der Strasse auf den **Schifftransport** 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.

Die Umstellung auf **Brennstoffzellenbetrieb** mit fossilfrei hergestelltem Wasserstoff ist eine Technik, die noch **in Entwicklung** ist.

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.

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 als ganz **unrealistisch** betrachtet werden, ausser für gewisse kürzere Abschnitte. Dies wegen der horrenden Kosten für das Aufstellen der Oberleitung auf allen Hauptstrassen. Dadurch könnte man leider nur einen Teil des CO₂-Ausstosses von der Strasse 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 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 zehn Fahrspuren auf der Strasse aufweisen. Weiter braucht es auf der Bahn viel weniger elektrischer Energie, um den gleichen Transport durchzuführen, als auf der Strasse.

Busse

Die Busse fahren heute mit u.a. **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 Kosten für die Oberleitung, siehe auch unter dem Abschnitt «Lastautos».

Der Batteriebetrieb ist in der Anfangsphase für kurze Strecken in Städten, jedoch auch probeweise für eine längere Strecke in Frankreich. Damit die Verwendung von Batterien keinen indirekten CO₂-Ausstoss verursacht, gibt es mehrere Bedingungen, siehe unter dem Abschnitt «Personenautos».

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

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 den Wechsel zu Strassenbahn und U-Bahn. Der Begriff «Strassenbahn» in diesem Zusammenhang kann aufgeteilt werden, in die reine Strassenbahn, d.h. Stahlräder auf Stahlschienen, und in den 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 der Bus die beste Alternative sein, aber dann mit fossilfreiem Antrieb.

Selbstfahrende Minibusse sind noch in der Probephase und können in der Zukunft eine Alternative zu Bussen mit Fahrer sein. Aber hier muss u.a. die Sicherheit bedacht werden, sowohl für andere Verkehrsteilnehmer als auch für die Passagiere im Bus. Bei letzteren betr. schnelles Abbremsen, eventueller Kollisionen oder aggressiver mitfahrender Passagiere.

Übriger motorisierter Strassenverkehr

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

Schiffsverkehr

...wird hier nicht behandelt, ausser im folgenden Link (auf Schwedisch):

<https://www.expressen.se/allt-om-resor/kryssning-varre-an-flyg-enligt-ny-undersokning/> [7]

Eisenbahn

Das bereits Erwähnte zeigt auf, dass eine *umfassende Umlagerung zur Eisenbahn vermutlich notwendig wird*, falls wir das Klimaziel erreichen sollen. 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 effektiver auf der Eisenbahn eingesetzt werden, als auf der Strasse. Dies ist dann besonders wichtig, falls das Angebot an 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 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 ab Elektrolyse). Der Strom muss selbstverständlich von fossilfreien Quellen kommen, vor allem von Wasserkraftwerken, Sonnenkollektoren oder Windturbinen. Kernkraft belastet natürlich 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, um das Klimaziel zu erreichen, wenn auch nicht die einzige. Man muss deshalb damit aufhören, Eisenbahnstrecken stillzulegen. Diese Praxis ist eine Fehlentwicklung und wird u.a. in Schweden betrieben wie in der [schwedischen Version von diesem Dokument](#) [3] beschrieben ist.

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

Biotreibstoff

Auch Ethanol – nachhaltig hergestellt – gehört zu den Biokraftstoffen.

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

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 Biotreibstoff 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.

Kommentare

Wenn ein Land auf Transporte ohne Fossilkraftstoffe umstellt, wird es weniger verwundbar auf seinem wichtigen Transportsektor. Es sollte 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 pro Liter Öl 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 bis jetzt Strassen- und Flugverkehr im Transportwesen den Vorzug bei gleichzeitiger Vernachlässigung der Bahn. Künftig muss **die Bahn im Verkehr mehr Gewicht** bekommen.

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

21.02.2020 Birger Tiberg

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] Birger Tiberg, Hållbara transporter, 29.6.2019, auf Internetseite [Abgerufen 25.7.2019]:
http://www.jarnvag.ch/hallbar_trafik.pdf
- [4] Stephen Pope, 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 26.7.2019]:
<https://www.ivl.se/download/18.5922281715bdaebede9559/1496046218976/C243%20The%20life%20cycle%20energy%20consumption%20and%20CO2%20emissions%20from%20lithium%20ion%20batteries%20.pdf>
- [6] Publikation från 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] Måns Ivarsson, 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>

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

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

Zusammengefasst zeigen die Berechnungen, dass kommerzieller Flugverkehr auf längeren Flugdistanzen mit Batteriebetrieb kaum klimafreundlich 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!

Im Teil 1 dieser Beilage wird die heutzutage beste Batterietechnik vorausgesetzt, während im Teil 2 eine fiktive Batterie mit 23-Mal höhere Ladungsdichte (Wh/kg) behandelt wird.

Für die Berechnungen wurde Propellerflug gewählt, da es kaum 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 (=60x556/520)

Energiebedarf für jeden Motor für den ganzen Flug:

Start: 2050 kW x 100% x 2 min = 68 kWh (=2050x2/60)

Steigung: 2050 kW x 80% x 8 min = 219 kWh (=2050x80%x8/60)

Marschfahrt: 2050 kW x 70% x 64 min = 1'530 kWh (=2050x70%x64/60)

Landung: 2050 kW x 50% x 10 min = 171 kWh (=2050x50%x10/60)

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 wurde 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 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.

Teil 1: Heute beste Batterietechnik (135 Wh/kg), soweit mir bekannt (2019)

Heute sind die besten Batterien auf Lithiumbasis, max. Ladungsdichte 135 Wh/kg.

Beispiel 1A

Für das Beispiel Fokker 30-500 oben mit 700 km Flugdistanz würde der Batteriegewicht $5'300 \text{ kWh} / 135 \text{ Wh/kg} = \mathbf{39.3 \text{ ton}}$ betragen. Dies ist mit dem totalen Gewicht **20.82** Tonnen für Fokker 50-300, gemäss <https://www.airliners.net/aircraft-data/fokker-50/218> zu vergleichen.

Es ist selbstredend, dass dies eine Unmöglichkeit ist!

Beispiel 1B

Wenn man den Brennstoffgewicht 1'750 lt für 700 km und die Hälfte (25) der Sitzplätze entfernt, kann man stattdessen ca. 4'500 kg Batterien (=1'750 lt + Brennstofftank + 25 x 110 kg/Sitzplatz) laden. 4'500 kg Batterien können 607.5 kWh lagern. (= 135 Wh/kg x 4'500 kg)

Um eine grobe Schätzung zu erhalten wird keine Rücksicht auf Start und Landung genommen. Einfachhalber rechnen wir deshalb nur mit Flug in Marschfahrt was die Leistung 1'435 kW erfordert. (= 2'050 kW x 70%).

607.5 kWh reicht demzufolge für theoretisch 25 min Flug in Marschfahrt
(=607.5 kWh / 1'435 kW)

Mit Marschfahrt 520 km/h erhält man dann 220 km Flugdistanz (= 520 km/h x 25/60 h)

Die tatsächliche Flugdistanz einschliesslich Start und Landung ist somit weniger als 220 km.

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

Teil 2: Theoretische Ladungsdichte 23-Mal höher (3'105 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 23-Mal höher als die heutzutage beste Batterietechnik gerechnet: $23 \times 135 \text{ Wh/kg} = 3'105 \text{ Wh/kg}$. (Bem. 23-Mal wurde gewählt, um eine Flugdistanz von 700 km zu erreichen)

Das eingesparte Gewicht von 1'750 lt. Brennstoff und Brennstofftank kann ganz für Batterien verwendet werden. Wir kriegen dann ca. $1'750 \text{ kg Batterie} \times 3'105 \text{ Wh/kg} = 5\,433 \text{ kWh}$ 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.

Die Folge eines Kurzschlusses in einer vollgeladenen Batterie, Ladungsdichte 3'105 Wh/kg

Es ist natürlich 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, 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 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	3'600	180.5 °C	1'342 °C	432	21.0	180 °C
Aluminium	900	660 °C	2'467 °C	386	10.5	555 °C
Mangan	480	1'246 °C	2'061 °C	219	4.85	
Eisen	440	1'538 °C	2'861 °C	247	6.27	
Kobalt	420	1'495 °C	2'927 °C	275	6.39	
Nickel	440	1'455 °C	2'913 °C	298	6.31	
Kupfer	380	1'085 °C	2'527 °C	206	4.73	

Quellen: nuclear-power.net, nuclearpowerradiation.tpub.com

Eine in etwa gleichbleibende Wärmekapazität bis zum Siedepunkt wird hier angenommen

Bei einem Kurzschluss wird $3'105 \text{ Wh/kg} = 11'200 \text{ kJ/kg}$ Energie freigegeben, was eine extrem starke 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 Siedepunkt: $(180.5-0) \times 3.6 \text{ kJ/kg} + 432 \text{ kJ/kg} + (1'342-180.5) \times 3.6 \text{ kJ/kg} = 5'263 \text{ kJ/kg}$

...bis Siedepunkt + vollständiges Verdampfen = $5'263 \text{ kJ/kg} + 21'000 \text{ kJ/kg} = \mathbf{25'263 \text{ kJ/kg}}$

ABER, Zündtemperatur $180 \text{ }^\circ\text{C}$ d.h. gleich wie der Schmelzpunkt, das Metall wird somit beim Schmelzen verbrennen und die neue Verbindung wird weiter aufgeheizt

Aluminium

...bis Siedepunkt: $(660-0) \times 0.9 \text{ kJ/kg} + 386 \text{ kJ/kg} + (2'467-660) \times 0.9 \text{ kJ/kg} = 2'606 \text{ kJ/kg}$

...bis Siedepunkt + vollständiges Verdampfen = $2'506 \text{ kJ/kg} + 10'500 \text{ kJ/kg} = \mathbf{13'106 \text{ kJ/kg}}$

ABER, Zündtemperatur $550 \text{ }^\circ\text{C}$ d.h. $110 \text{ }^\circ\text{C}$ unterhalb des Schmelzpunktes, das Metall wird bei $550 \text{ }^\circ\text{C}$ verbrennen und die neue Verbindung wird weiter aufgeheizt

Mangan

...bis Siedepunkt: $(1'246-0) \times 0.48 \text{ kJ/kg} + 219 \text{ kJ/kg} + (2'061-1'246) \times 0.48 \text{ kJ/kg} = 1'208 \text{ kJ/kg}$

...bis Siedepunkt + vollständiges Verdampfen = $1'208 \text{ kJ/kg} + 4'850 \text{ kJ/kg} = 6'058 \text{ kJ/kg}$

Überschüssige Energie nach vollständigem Verdampfen $\mathbf{5'142 \text{ kJ/kg}}$ ($=11'200-6'058$)

Eisen

...bis Siedepunkt: $(1'538-0) \times 0.44 \text{ kJ/kg} + 247 \text{ kJ/kg} + (2'861-1'538) \times 0.44 \text{ kJ/kg} = 1'506 \text{ kJ/kg}$

...bis Siedepunkt + vollständiges Verdampfen = $1'508 \text{ kJ/kg} + 6'270 \text{ kJ/kg} = 7'776 \text{ kJ/kg}$

Überschüssige Energie nach vollständigem Verdampfen $\mathbf{3'424 \text{ kJ/kg}}$ ($=11'200-7'776$)

Kobalt

...bis Siedepunkt: $(1'495-0) \times 0.42 \text{ kJ/kg} + 275 \text{ kJ/kg} + (2'927-1'495) \times 0.42 \text{ kJ/kg} = 1'504 \text{ kJ/kg}$

...bis Siedepunkt + vollständiges Verdampfen = $1'504 \text{ kJ/kg} + 6'390 \text{ kJ/kg} = 7'894 \text{ kJ/kg}$

Überschüssige Energie nach vollständigem Verdampfen $\mathbf{3'306 \text{ kJ/kg}}$ ($=11'200-7'894$)

Nickel

...bis Siedepunkt $(1'455-0) \times 0.44 \text{ kJ/kg} + 298 \text{ kJ/kg} + (2'913-1'455) \times 0.44 \text{ kJ/kg} = 1'580 \text{ kJ/kg}$

...bis Siedepunkt + vollständiges Verdampfen = $1'580 \text{ kJ/kg} + 6'310 \text{ kJ/kg} = 7'890 \text{ kJ/kg}$

Überschüssige Energie nach vollständigem Verdampfen $\mathbf{3'310 \text{ kJ/kg}}$ ($=11'200-7'890$)

Kupfer

...bis Siedepunkt: $(1'085-0) \times 0.38 \text{ kJ/kg} + 206 \text{ kJ/kg} + (2'527-1'085) \times 0.38 \text{ kJ/kg} = 1'166 \text{ kJ/kg}$

...bis Siedepunkt + vollständiges Verdampfen = $716 \text{ kJ/kg} + 4'730 \text{ kJ/kg} = 5'896 \text{ kJ/kg}$

Überschüssige Energie nach vollständigem Verdampfen $\mathbf{5'304 \text{ kJ/kg}}$ ($=11'200-5'896$)

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 deshalb kommerzieller Flugverkehr auf längeren Distanzen mit Batterieantrieb unmöglich!

Birger Tiberg 23. Okt. 2019