

Lernen'S ein bissl Physik¹!

29.7.2022

Die leichte Abwandlung des legendären Satzes eines bekannten österreichischen Politikers richte ich an Energiesparexperten [1]. Die aktuelle Krise bei der Beschaffung von Energieträgern ruft eine Vielzahl von Wortspenden energetischer Heilsapostel hervor. Der mögliche energetische Spareffekt wird dabei mit viel Begeisterung aber sehr oft mit geringem Verständnis der Physik einer breiten Öffentlichkeit kundgemacht. Als Physiker im Ruhestand werde ich nachfolgend exemplarisch versuchen rein auf physikalischen Gesetzen begründete Energiespartipps abzuleiten. Vorneweg, nicht alle der genannten Tipps empfehle ich zur Nachahmung. Da der Individualverkehr eine mit Liebe gepflegte Reibfläche verschiedener politischer Orientierungen ist möchte ich mein Beispiel auf den Personenkraftwagen, kurz das Auto eingrenzen.

Die physikalische und daher vorerst stark vereinfachte Darstellung des Problems um von einem Ort A zu dem Ort B zu gelangen ist wie folgt:

1. Ein Gegenstand (das Auto mit Inhalt) beschleunigt aus dem Stand auf seine Reisegeschwindigkeit
2. Die Reisegeschwindigkeit behält das Auto bei bis das Ziel der Fahrt erreicht wurde.
3. Das Auto wird verzögert, es bremst ab bis es zum Stillstand gekommen ist.

Während der 1. Phase wird zum Beschleunigen Energie benötigt die umso größer sein muss je größer die Masse des Autos ist. Umgangssprachlich wird anstelle von der Masse gerne von dem Gewicht gesprochen. Gewicht und Masse sind in der Physik zwei verschiedene Größen. Auf der Erdoberfläche stehen sie in einem annähernd festen Verhältnis. Den verbreiteten Gebrauch der Bezeichnung Gewichts anstelle der Masse kann ich daher im Alltag durchaus akzeptieren. Die aufzuwendete Energie wächst mit der Dauer des Beschleunigens.

Tip 1: je kleiner die zu beschleunigende Masse ist, desto weniger Energie ist erforderlich. Vermeiden sie daher das Mitführen von nicht benötigtem Ballast. Lassen sie den 50 kg Sack mit Fertigbeton den sie am Baumarkt eingeladen haben nicht im Kofferraum liegen. Diesen Tipp **empfehle** ich.

Behält das Auto während der 2. Phase seine Geschwindigkeit durchgehend bei so braucht es keine weitere Energie. Diese Erkenntnis ist unabhängig von der Geschwindigkeit. Das klingt vielleicht überraschend. In wie weit sich der ideal angenommene Betrieb von der Realität unterscheidet werde ich nachfolgend genauer erklären.

Tip 2: Vermeiden sie Geschwindigkeitsänderungen. Im Stau jedoch ist das keine gute Idee sofern sie einen Auffahrunfall vermeiden möchten. Verkehrsstaus haben ihre Ursache sehr oft in einer mangelhaften Verkehrsinfrastruktur. Das hat die öffentliche Hand zu verantworten. Da ein Stau das oftmalige Beschleunigen des Autos aus dem Stand erzwingt handelt es sich hierbei um eine Energievergeudende Situation. Daher folgt

Tip 3: Für die gewählten Repräsentanten der öffentlichen Hand: beseitigen sie durch Infrastruktur

¹ Übersetzung: Lernen Sie ein wenig Physik. Der ursprüngliche Satz lautete: „Lernen'S ein bissl Geschichte“.

bedingte Verkehrsstaus. Umfahrungen von Ballungsgebieten sind eine effiziente Energiesparmaßnahme. Leider warte ich bisher vergebens darauf, dass der Transitverkehr entlang der Bernsteinstraße um das Wiener Ballungsgebiet über eine leistungsfähige Straße einschließlich eigener Donauquerung geleitet wird [2]. Trotzdem **empfehle** ich den Tipp nachdrücklich.

In Phase 3 des Abbremsens wird Energie freigesetzt. Der Größe nach entspräche die freigesetzte Energie jenem Betrag der beim Beschleunigen aufgewendet wurde. Bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren erfolgt dies ausschließlich in Form von Wärme die an die Außenluft abgeführt wird. Im Fall eines Elektromotors kann diese Energie zum Teil für späteren Weitergebrauch zurück gewonnen werden.

Tipp 4: Der elektrische Antrieb hat gegenüber dem Verbrennungsmotor mehrere attraktive Vorteile. Dem steht der Nachteil der Treibstoffzufuhr entgegen. Aufladbare Batterien als Treibstoffspeicher erhöhen die zu beschleunigende Masse eines Autos erheblich und widersprechen damit der Empfehlung von Tipp 1.

Soweit zu der idealen Fortbewegung. Betrachten wir jetzt welche Widerstände dafür sorgen, dass auch einem, mit konstanter Geschwindigkeit bewegtem Auto kontinuierlich Energie zugeführt werden muss. Die folgenden 3 Gruppen an Verlusten bezeichnet man als Widerstände womit darauf hingewiesen wird, dass für deren Überwindung Energie zugeführt werden muss. Der Gesamtbedarf an Energie ergibt sich aus der Summe der nachfolgend genannten 3 Verluste:

1. Steigungswiderstand, vielleicht ist der Begriff Bergfahrten anschaulicher
2. Rollwiderstand, hervorgerufen an den Kontaktflächen zwischen Fahrzeug und Untergrund.
3. Strömungswiderstand, hervorgerufen durch die, das Fahrzeug umgebende Luft.

Im Fall einer Bergfahrt muss das Auto gegen die Erdbeschleunigung arbeiten. Es muss Energie aufgewendet werden um die Geschwindigkeit konstant halten zu können. Umgekehrt könnte bei einer Talfahrt mit konstanter Geschwindigkeit Energie zurückgewonnen werden. Die Situation ist ähnlich den Phasen von Beschleunigen und Verzögern im eingangs besprochenem Idealfall. Wiederum spielt die Masse des bewegten Gegenstands eine entscheidende Rolle. Die Fahrgeschwindigkeit hat keinen Einfluss auf den Steigungswiderstand. Sehr wohl aber die Steilheit des Anstiegs. In der Ebene fällt der Widerstand vollständig weg. Neben den bereits oben genannten Tipps zum Beschleunigen lassen sich noch weitere 2 Tipps anführen.

Tipp 5: Fahren sie nur in flachen Regionen wie sie etwa in den Niederlanden anzutreffen sind.

Tipp 6: Entscheiden sie sich bei der Routenwahl für jene Variante die möglichst wenig Höhenunterschied aufweist. Etwa indem sie den, möglicherweise mautpflichtigen Tunnel durch den Berg einer Straße über den Gebirgspass vorziehen. Hier handelt es sich um einen Tipp den ich im Sinne einer Energiesparmaßnahme **empfehle**.

Der Rollwiderstand erfordert in allen Phasen und allen sonstigen Bedingungen der Autofahrt eine permanente Energiezufuhr. Es sei denn sie verlieren die Bodenhaftung. Dieser Fall möge hoffentlich selten eintreffen. Auch der Rollwiderstand ist von der bewegten Masse abhängig. Nicht jedoch von der Fahrgeschwindigkeit. Eine mögliche Reduktion des Rollwiderstands lässt sich auf verschiedene Arten relativ leicht erreichen.

Tip 7: ein Vereisen der Fahrbahn verringert die Kräfte zwischen Reifen und Fahrbahnbelag deutlich. Ein Umstand den sie möglicherweise aus eigener Erfahrung kennen. Als Maßnahme betreffend der Verkehrsinfrastruktur wäre hier nochmals die öffentliche Hand gefordert.

Tip 8: Abgefahrene, profillose Reifen (Glatzen) sind nicht ganz so wirksam wie Tip 7 aber immer noch wirkungsvoll bei der Reduktion des Rollwiderstands. Ein Tip den ich im Alltag ausdrücklich **nicht empfehle**. Im Rennsport hingegen sind Slicks [3] durchaus gängig.

Tip 9: Ein korrekter Druck der Reifen ist sicher der beste Kompromiss zwischen dem Ziel einer Energieeinsparung durch möglichst geringem Rollwiderstand und der für alle Lenk- und Bremsmanöver bitter notwendigen Bodenhaftung des Fahrzeuges. Die Fläche des Kontakts zwischen Autoreifen und Fahrbahn wird durch den optimalen Reifendruck so klein gehalten, dass die entsprechend konstruierten Reifen gerade noch genügend Bodenhaftung für den sicheren Betrieb des Fahrzeugs gewährleisten. Also eine Maßnahme die ich **empfehle**.

Kommen wir zur letzten Verlustgröße. Es ist die einzige bei der eine Geschwindigkeit tatsächlich von Bedeutung ist. Der Strömungswiderstand oder genauer seine Geschwindigkeitsabhängigkeit ermöglicht Energiesparpropheten den größten Spielraum für ihre Weissagungen. Bei der relevanten Geschwindigkeit handelt es sich jedoch nicht um die Fahrgeschwindigkeit des Autos. Zur Erklärung ein kleines Gedankenexperiment. Nehmen sie an, es weht Nordwind mit einer Geschwindigkeit von 50 km/h. Zunächst fährt ihr Auto mit einer Geschwindigkeit von 50 km/h genau nach Norden dem Wind entgegen. Die, für die Berechnung des Strömungswiderstands relevante Geschwindigkeit ergäbe sich dann aus $50 \text{ km/h} + 50 \text{ km/h} = 100 \text{ km/h}$. Nachdem unser fiktives Auto wendet und genau nach Süden fährt müsste für die Berechnung des Strömungswiderstands ein Wert von $50 \text{ km/h} - 50 \text{ km/h} = 0 \text{ km/h}$ eingesetzt werden. Wiederholen wir die Fahrt bei Windstille errechnet sich der Strömungswiderstand für beide Fahrtrichtungen aus einer Geschwindigkeit von 50 km/h. Also der tatsächlichen Fahrgeschwindigkeit. Im Fall des Gegenwinds trägt der Strömungswiderstand deutlich zum Gesamtwiderstand bei. Im Fall des Rückenwinds hingegen ist er nicht vorhanden. Ohne Wind hängt er ausschließlich von der Fahrgeschwindigkeit des Fahrzeugs ab. Für jede Windrichtung und Windgeschwindigkeit ergibt sich ein anderer Strömungswiderstand und damit ein stark unterschiedliches Einsparpotential für den nötigen Energieaufwand. Außer der soeben diskutierten Relativgeschwindigkeit geht noch die Dichte der Luft und die Form des Fahrzeugs in die Berechnung des Strömungswiderstands ein. Die Masse des Autos spielt hier ausnahmsweise keine Rolle. Aus dem Gesagtem lassen sich folgende Tipps herleiten:

Tip 10: Fahren sie nur in Windrichtung oder warten sie bis sich der Wind in ihre Fahrtrichtung dreht. Dieses Verhalten ist besonders effizient in Regionen mit starkem Wind.

Tip 11: Fahren sie bevorzugt in großer Höhe weil hier die Dichte der Luft deutlich geringer ist. Also umrunden sie bevorzugt den Kilimandscharo am Kraterrand.

Tip 12: Vermeiden sie alle Gegenstände die die äußere Form ihres Fahrzeugs verändern wie etwa Rad- Koffer- oder Skiträger. Autokonstrukteure geben sich viel Mühe ihr Fahrzeug möglichst „windschlüpfig“ zu gestalten. Diesen Tip **empfehle** ich ihnen.

Wenn sie glauben, dass die letzten 3 Tipps lediglich aus Witz und Tollerei angeführt wurden überlegen sie sich bitte warum der Pilot eines Flugzeugs

1. Unmittelbar nach dem Start das Fahrwerk des Flugzeuges einzieht.
2. Bevorzugt in einer Höhe fliegt in der die Luftdichte nur noch $\frac{1}{4}$ ihres Wertes auf Meeresebene hat.
3. Flugrouten so anlegt, dass Luftströmungen einen möglichst großen positiven Beitrag zur Flugbewegung leisten können.

Kurz zusammengefasst

- Bei einer Autofahrt trägt die zu bewegende Masse mit einer Ausnahme immer zu Energieverlusten bei. Die, zu bewegende Masse ist die Summe der Masse des Kraftfahrzeugs, der Masse der Mitfahrenden und der Masse der beförderten Güter.
- Die Geschwindigkeit eines Autos hat demgegenüber lediglich in einem Fall Einfluss auf einen möglichen Energieverlust. Die Größe des Verlusts variiert sehr stark weil er von äußeren Luftbewegungen abhängig ist. Im Ausnahmefall existiert er nicht.

Auf den oben angeführten physikalischen Erkenntnissen basiert das Konzept des Hyperloops [4]. In einer evakuierten, horizontal und gerade geführten Röhre wird eine Transportkapsel nahezu ohne Reibungsverluste mit hoher Geschwindigkeit bewegt. Das erlaubt zum einen sehr hohe Reisegeschwindigkeiten zum anderen muss nur sehr noch ein Minimum an Energie aufgewendet werden.

Bisher habe ich das Problem behandelt ohne dass es notwendig gewesen wäre die Antriebsart des Fahrzeugs zu kennen. Auf dem Markt sind eine große Anzahl von technischen Lösungen zu den einzelnen Antriebsarten zu finden. Die Konstruktion eines Autos legt daher den Energiebedarf während des Betriebs weitgehend fest. Weder können sie die, in obiger Betrachtung als sehr wichtig kennengelernte Masse des leeren Fahrzeugs ändern noch können sie die Motorleistung an ihre momentane Fahrsituation anpassen. Vornehmlich bei der Kaufentscheidung haben sie Handlungsmöglichkeiten. Der Spielraum für individuelle Energiesparmaßnahmen während des Betriebs ist jedoch stark eingegrenzt. Ein Beispiel dazu sei hier genannt. Jeder Verbrennungsmotor hat die Eigenschaft, dass er bei genau einer Drehzahl seinen besten Leistungswert erreicht². Die Umdrehungszahl der Antriebsräder hingegen bestimmen die Fahrtgeschwindigkeit. Eine Geschwindigkeitsänderung erfordert daher eine Änderung der Umdrehungszahl der Antriebsachse. Um die Drehzahl der Räder an die optimale Drehzahl des Motors anzupassen werden Getriebe verwendet. Da es beliebig viele Fahrgeschwindigkeiten gibt, sollte idealerweise eine Vielzahl unterschiedlicher Anpassungen vorgenommen werden. Das geschieht bei Getrieben mit Gangschaltung allerdings lediglich grob angenähert in wenigen Stufen. Das bedingt, dass die Motordrehzahl aus dem Optimum verschoben wird. Bei manueller Gangschaltung liegt es in der Verantwortung des Fahrers mittels Gangschaltung den bestmöglichen Angleich der beiden Umdrehungszahlen zu erreichen. Im Automatikgetriebe erledigt diese Aufgabe das Fahrzeug. In beiden Fällen ist handelt es sich jedoch um eine grundsätzlich unbefriedigende Näherung. Physikalisch gesehen ist eine stufenlose (daher schaltungsfreie) und permanente Anpassung beider Drehzahlen die beste Lösung. Die Umsetzung stößt allerdings an technische Grenzen. Tatsächlich wurde diese Form der Anpassung im Antrieb eines Autos bereits 1958 realisiert und wird unter der Bezeichnung *Variomatic* weiterhin im Fahrzeugbau verwendet [5].

2 Das gilt nicht für Elektromotoren

Für all jene, die der Physik weiterhin nicht trauen wollen oder können. Auch der viel strapazierte Hausverstand kann manchmal helfen. Als Beispiel können sie sich überlegen warum Kochtopf-Hersteller ihre Ware meistens nur zusammen mit einem Deckel verkaufen.

Bibliografie:

- [1] Aufzeichnung des Interviews von Bruno Kreisky am 24.2.1981 durch den ORF
<https://tvthek.orf.at/history/Die-Aera-Kreisky/6284171/Kreisky-LernenS-ein-bissl-Geschichte/6565177>
- [2] „Bernsteinstraße“, Wikipediaeintrag unter <https://de.wikipedia.org/wiki/Bernsteinstra%C3%9Fe> zu finden
- [3] „Slicks“, Wikipediaeintrag unter <https://de.wikipedia.org/wiki/Slick> zu finden
- [4] Project Pegasus <https://virginhyperloop.com/>
- [5] „Variomatic“, Wikipediaeintrag unter <https://en.wikipedia.org/wiki/Variomatic> zu finden.