

19.08.2024

Elektro vs. Diesel: „Well to Wheel“-Vergleich der CO₂-Emissionen

Elektro-Schönrechnerei

Im Internet kursieren die tollsten Verbrauchsangaben für den Elektroantrieb im Vergleich zum Verbrennungsmotor. Fast immer handelt es sich um ein Plädoyer für den Elektroantrieb, ausgesprochen von Politikern, Umweltverbänden, Automobilmanagern und Medienschaffenden. Da ist dann vom fünf- bis 10-fachen CO₂-Ausstoß der Antriebe auf Basis fossiler Energie die Rede. Nicht selten muss man lesen, dass der Elektroantrieb überhaupt kein CO₂ emittiert. Da möchte der Techniker schier verzweifeln ob diesem Unverständnis gegenüber einfachsten technischen Zusammenhängen.

Wie kommen solche Zahlen zustande? Versetzen wir uns mal geistig in die Lage von Leuten, die uns den Elektroantrieb schmackhaft machen wollen, entweder weil sie daran verdienen, oder sich als besonders klimafreundlich positionieren wollen, oder weil sie mangels Phantasie nur dem Mainstream nachplappern. Nach dem Motto: Der Elektroantrieb ist die Zukunft.

Schlagen wir doch einfach mal *ams* auf, und sehen uns den Vergleich zweier ähnlicher Fahrzeuge an, einmal mit Diesel, einmal mit Elektroantrieb. Beim Diesel ist die Sache einfach. Verbrauch auf 100 Kilometer messen, und die Liter auf CO₂-Ausstoß umrechnen. Beim Elektroantrieb ist die Sache noch einfacher. Wir nehmen für unser Fahrzeug zu 100 Prozent Strom aus regenerativen Energien, und schon beträgt der CO₂-Output Null Komma Null.

So unfair geht nicht einmal *ams* vor. Sie gestehen den Stromern zu, dass sie sich aus dem aktuellen Stromnetz bedienen. Für jede Kilowattstunde benötigen die Kraftwerke eine bestimmte Menge an fossiler Energie, die ausschließliche Versorgung mit grüner Energie rückt in unabsehbar weite Ferne. Im Moment rechnet *ams* mit 400 Gramm CO₂ pro kWh Strom.

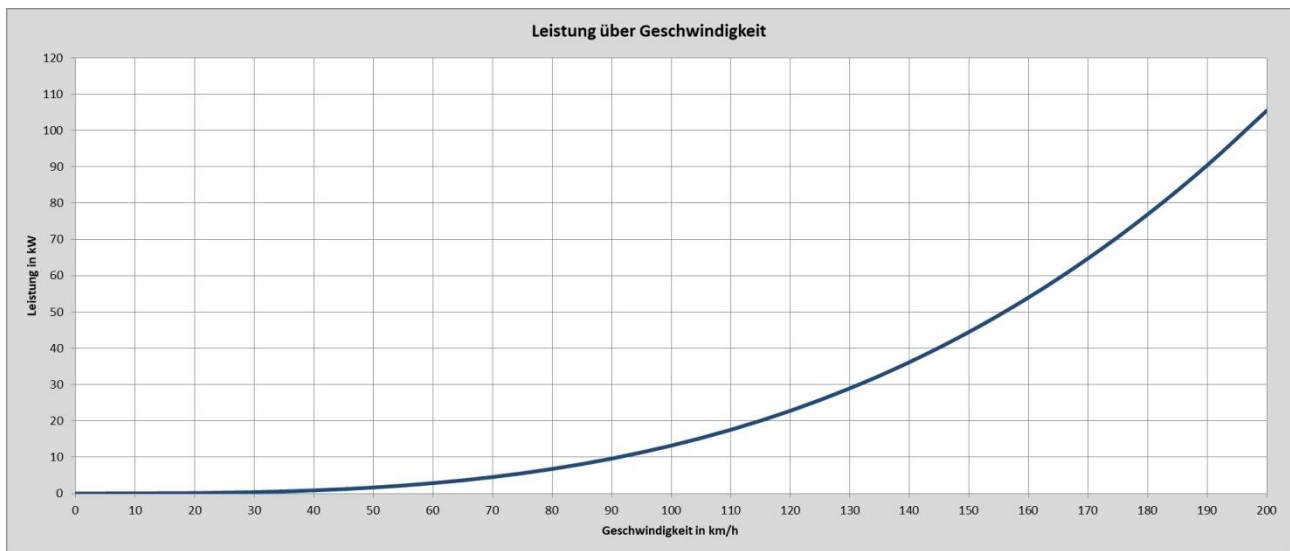
Ist damit alles in Ordnung? Leider nein. Diese Vorgehensweise berücksichtigt zwar die Ladeverluste, nicht aber die Transportverluste vom Kraftwerk zur Steckdose. Und die sind nicht unerheblich.

Well to Wheel – die prinzipielle Vorgehensweise

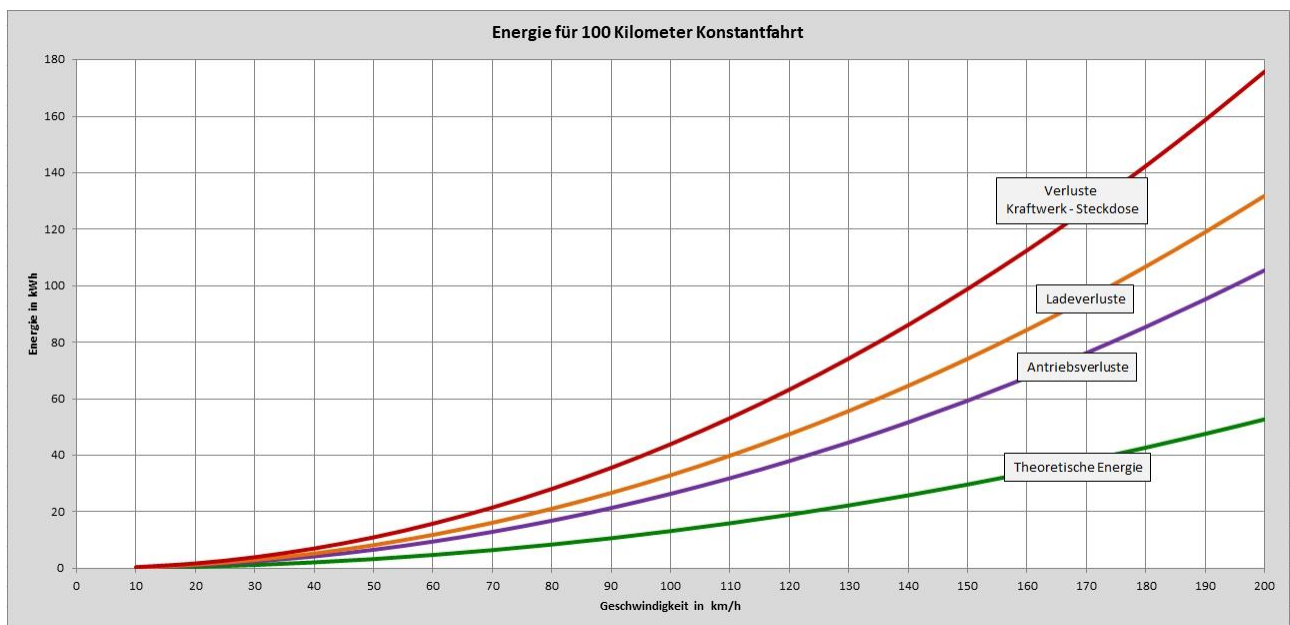
Wie muss man vorgehen, um den echten CO₂-Output von der Quelle bis zur Fahrbahn zu bekommen. Mit der einfachen Einrechnung der Transportverluste in die Verbrauchsangaben von *ams* geben wir uns nicht zufrieden. Wir wählen einen grundlegend anderen Ansatz und beginnen auf der Fahrbahn. Dank *ams* wissen wir von den meisten Fahrzeugen die für eine Geschwindigkeit von 130 km/h erforderliche Leistung. Damit können wir die Leistung für jede beliebige Geschwindigkeit umrechnen. Mit den typischen Verlusten und Wirkungsgraden erhalten wir dann die Leistung, die wir oben hineinstecken müssen, damit die Leistung unten am Rad herauskommt. Die erforderliche Energie erhalten wir, wenn wir über jeder Geschwindigkeit die Zeit für eine Konstantfahrt mit der Leistung multiplizieren. Das Ergebnis lautet dann **Tank to Wheel**, und wir müssen es „nur“ noch mit dem Betrag **Well to Tank** ergänzen.

Elektroantrieb

Zum Vergleich nehmen wir Fahrzeuge der Kompaktklasse, also in der Größe eines VW-Golf. Das grundlegende Diagramm Leistung über Geschwindigkeit sieht folgendermaßen aus:



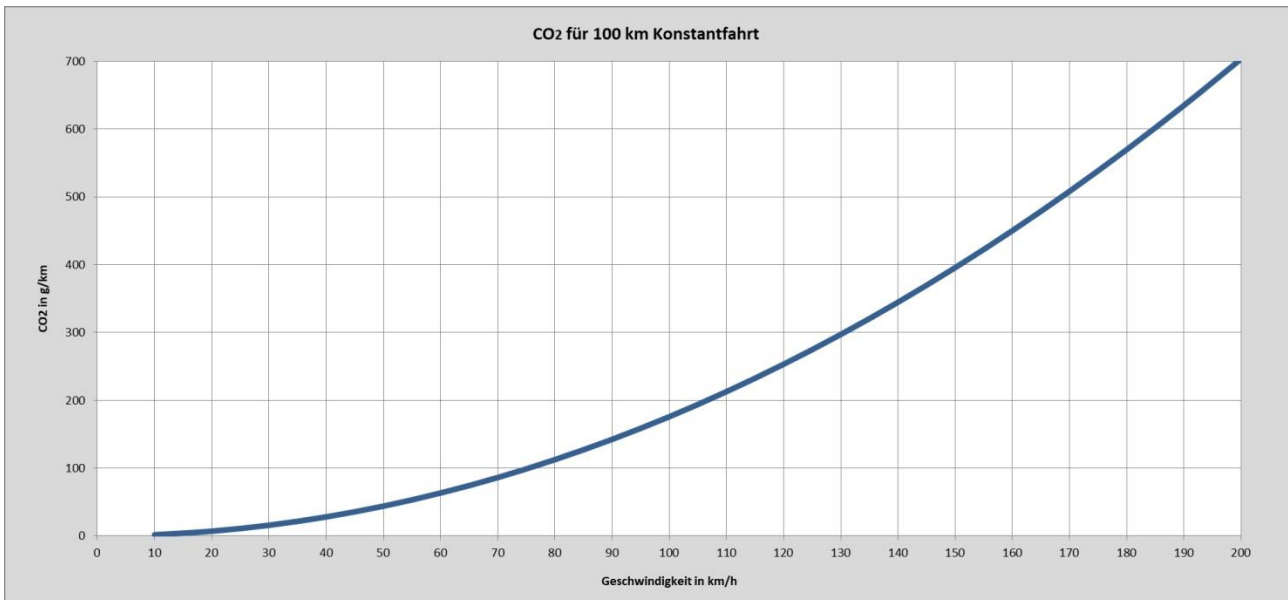
Das ist die Leistung, die wir für die entsprechende Geschwindigkeit auf die Straße bringen müssen. Wenn wir dann mit dieser Leistung mit einer konstanten Geschwindigkeit 100 Kilometer weit fahren, benötigt man eine bestimmte Energie. Sie hängt ab von der Zeitdauer, die wir für 100 Kilometer benötigen, und von der benötigten Leistung. Wir nennen sie theoretische Energie: **Grüne Kurve**



Bevor vom Kraftwerk ausgehend die Energie an den Rädern ankommt, sind einige Hindernisse zu überwinden.

- Da sind z.B. die Antriebsverluste. Die Entladeverluste der Batterie, die Verluste im Steuergerät, die Leitungsverluste, und die elektrischen und mechanischen Verluste in der Elektromaschine: sie addieren sich in Summe auf etwa 50 Prozent: **Violette Kurve**.
- Beim Laden der Batterie entsteht Wärme im Ladegerät und in der Batterie, wir rechnen mit einem Verlust von 20 Prozent: **Orangefarbige Kurve**.
- Die Verluste vom Kraftwerk zur Steckdose belaufen sich auf etwa 25 Prozent. Wenn man sie berücksichtigt erhält man die **Rote Kurve**.

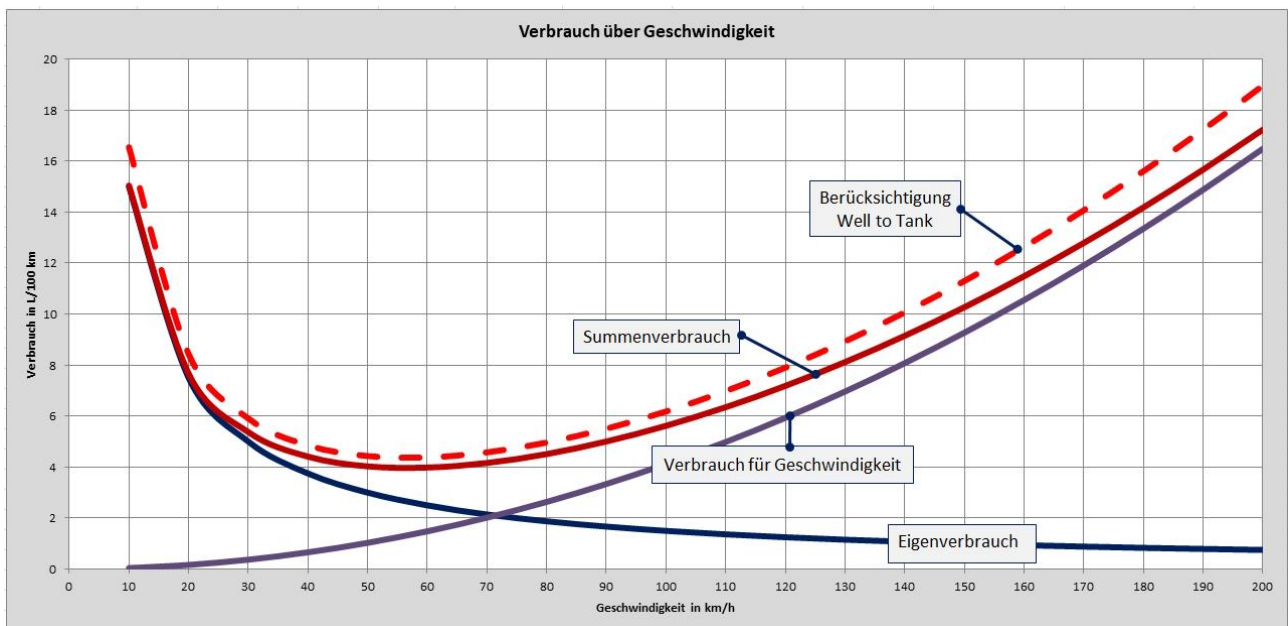
Jetzt wissen wir, wieviel Energie wir erzeugen müssen. Wir wissen auch, wieviel CO₂ dabei entsteht, nämlich 400 Gramm CO₂ pro Kilowattstunde laut aktuellem Strommix. Wir multiplizieren die Energie für jede Geschwindigkeit mit diesem Wert, und erhalten folgendes Diagramm:



Zum Vergleich auf CO₂-Basis benötigen wir nur noch die entsprechenden Daten für das Dieselfahrzeug.

Dieselfahrzeug

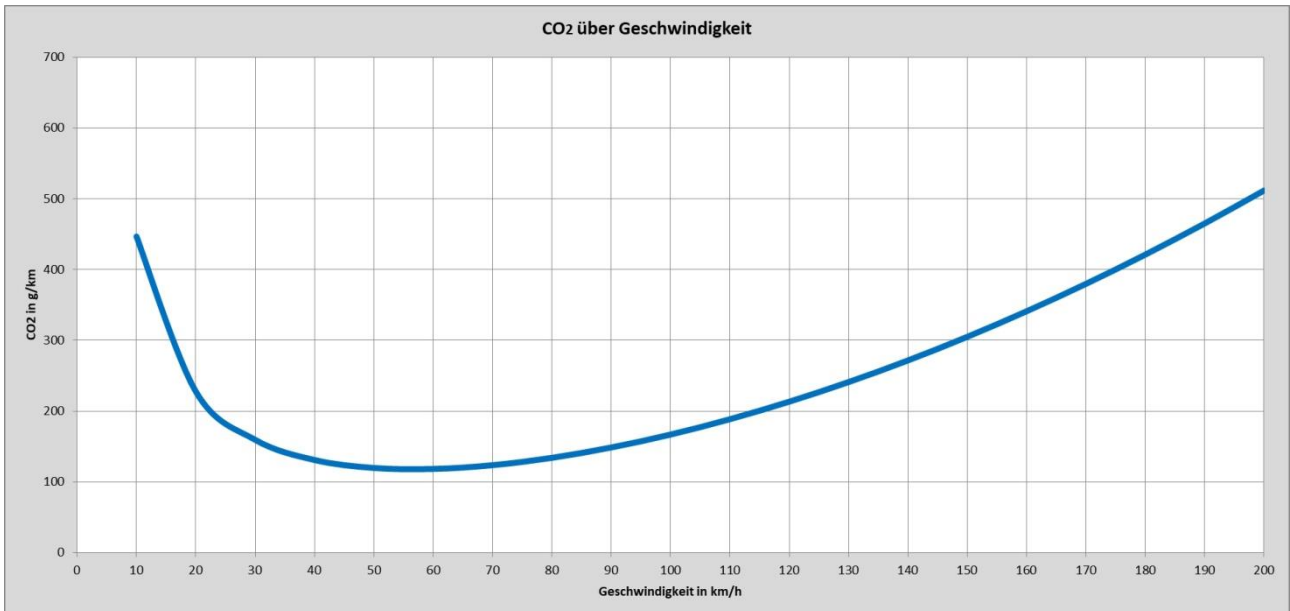
Der Verbrauch eines Verbrennungsmotors setzt sich aus zwei Faktoren zusammen: Dem Eigenverbrauch (blau) und dem Verbrauch für den Vortrieb (violett).



- Was ist unter Eigenverbrauch zu verstehen? Ein Verbrennungsmotor verbraucht eine gewisse Menge Kraftstoff, um sich selbst am Leben zu erhalten. Im Leerlauf z.B. 1,5 Liter pro Stunde. Fährt man mit 10 km/h eine Strecke von 100 Kilometern benötigt man 10 Stunden. Multipliziert mit dem Verbrauch im Leerlauf erhält man 15 L/100 km. Führt man diese Berechnung über das gesamte Geschwindigkeitsspektrum durch, ergibt das den Eigenverbrauch, die **blaue Kurve**.
- Natürlich ist es mit dem Eigenverbrauch allein nicht getan. Die jeweilige Geschwindigkeit erfordert ebenfalls Leistung. Sie steigt exponentiell mit der Geschwindigkeit, die **violette Kurve**.
- Eigenverbrauch und Geschwindigkeitsverbrauch ergeben zusammen den Fahrzeugverbrauch, bzw. in obigem Diagramm genannt Summenverbrauch, die **rote Kurve**.

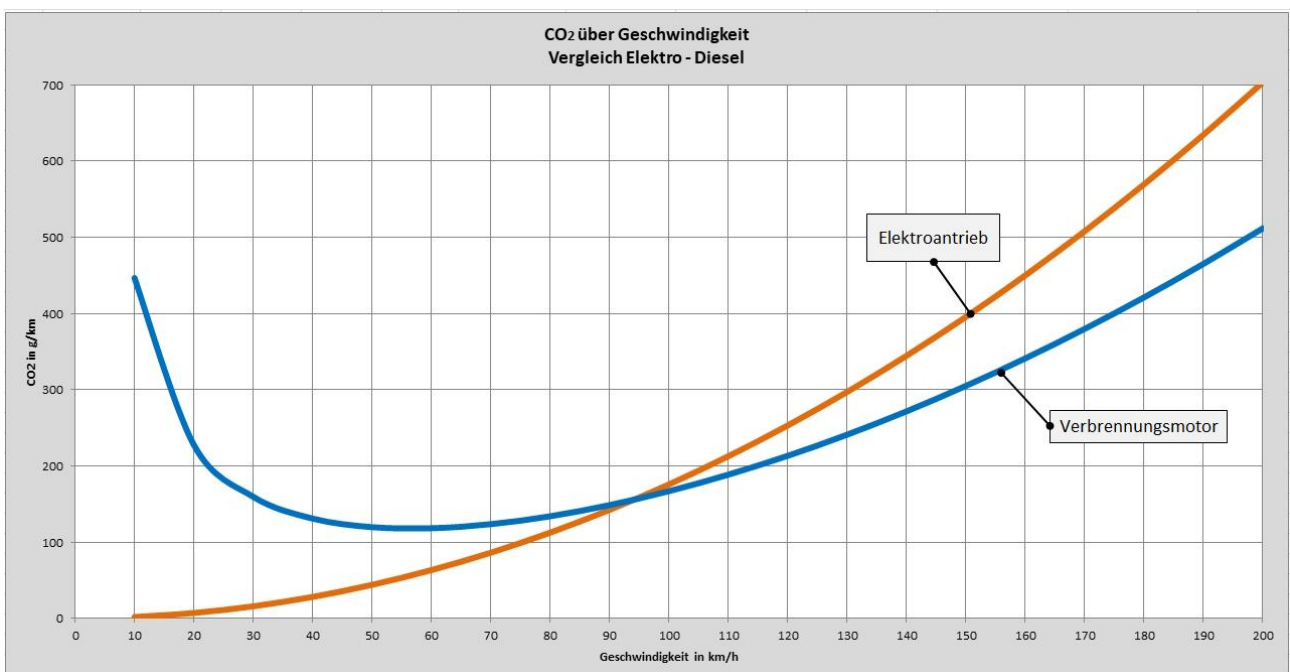
- Jetzt fehlt nur noch der Verlust vom Bohrloch (Well) zum Tank. Er beträgt beim Diesel etwa 10 Prozent, beim Benzinern etwa 20 Prozent. Wir rechnen für unseren Dieselmotor 10 Prozent oben drauf und erhalten die **gestrichelte hellrote Kennlinie**.

Der nächste Schritt ist einfach. Ein Liter Diesel pro 100 Kilometer entspricht 27 Gramm CO₂ pro Kilometer. Das untenstehende Diagramm zeigt das Ergebnis dieser Multiplikation.



Vergleich:

Im direkten Vergleich offenbaren sich die Stärken und Schwächen der jeweiligen Antriebsart.



Im niedrigen Geschwindigkeitsbereich ist der Elektroantrieb dem Verbrenner deutlich überlegen. Er benötigt keine Energie, um sich selbst am Leben zu erhalten. Bei etwa 90 km/h kehrt sich das Verhältnis um, der Verbrennungsmotor erzeugt bei höheren Geschwindigkeiten weniger CO₂.

Fazit:

Im Hinblick auf CO₂ ist ein Hybridantrieb vorteilhaft, der die Vorteile des Elektroantriebs mit den Vorteilen des Verbrennungsmotors kombiniert. Es zeigt sich, dass das bevorzugte Revier des Elektromotors eindeutig die geschlossenen Ortschaften und alle Situationen mit Geschwindigkeitsbeschränkung auf 70 km/h oder weniger sind. Innenstädte können allein mit dem Elektromotor bewältigt werden, einschließlich Rangieren und Stop & Go. Dadurch entfallen der erste und der Rückwärtsgang für das Verbrennergetriebe. Wie schon vermutet sind höhere Geschwindigkeiten nicht die Stärke des „Elektrikers“, deshalb begrenzt man sinnvollerweise die Höchstgeschwindigkeit auf 100 km/h. Das erleichtert die Auslegung und verbessert Wirkungsgrad und Leistung. Zusätzlich wirkt es sich auch positiv auf die Kosten aus.

Erst bei Geschwindigkeiten ab 70 km/h schaltet sich der Verbrennungsmotor ein. Er ist der bevorzugte Antrieb auf schnellen Landstraßen und Autobahnen. Auch dabei ergeben sich Synergieeffekte, denn der Elektroantrieb kann beim Beschleunigen bis 100 km/h unterstützend eingreifen. Dadurch und durch eine geschickte Getriebeauslegung kann der Verbrenner auf aufwändige Hilfsmittel zur Verbesserung des Verbrauchs im Teillastbereich verzichten, z.B. auf aufwändige und teure Ventil- und Nockenverstellungen. Bei kostenoptimierten Fahrzeugen kann sogar die Abgasturboaufladung entfallen, mit allerhand günstigen Nebeneffekten im Gefolge.

Die Grenze von 70 km/h ist keine harte Marke. Sie kann bei Bedarf vom Fahrer ignoriert werden, z.B. beim Beschleunigen mit Vollgas. Andere Auslöser des Verbrennungsmotors sind Heizen des Fahrzeugs oder Laden der Antriebsbatterie. Bei der Auswahl der aktuell passenden Antriebsart kann eine KI dem Fahrer unterstützend zur Hand gehen.

Die bereits bekannten Vorteile eines Hybridantriebs wie z.B. Rekuperation oder Segeln bleiben selbstverständlich in vollem Umfang erhalten.

Beim Vergleich der beiden Antriebsarten waren einige Annahmen zu treffen. Dabei stützte man sich im Wesentlichen auf Erfahrungswerte. Die Berechnungen erheben deshalb keinen Anspruch auf absolute Genauigkeit, das war nicht das Ziel der Übung. Es geht einzig und allein darum, die prinzipiellen Unterschiede herauszuarbeiten. Sie gelten ausnahmslos für alle Fahrzeuggrößen, für Diesel- und Benzinmotoren und für alle Leistungsklassen.

Die Zukunft gehört dem bezahlbaren Hybridantrieb!

Dem Elektromotor gehört die Zukunft, heißt es landauf landab. Verbunden meistens mit der Forderung nach kostengünstigen Ausführungen. Eine signifikante Kostenreduzierung ist aber nur durch Verkleinerung der Batterie möglich, was sich wiederum fatal auf die Reichweite auswirkt. In Anbetracht der schwindenden Verkaufszahlen mag man nicht so recht auf eine glorreiche Zukunft dieser Antriebsart glauben.

Wie wäre es damit: Die Zukunft gehört dem Hybridantrieb. Und zwar dem bezahlbaren Hybridantrieb. Man muss nur den Übermut der Ingenieure dämpfen, insbesondere der promovierten, alles immer zu Tode entwickeln zu wollen, und mit High-Tech und unnötigem Firlefanz zu überladen. Getreu dem Motto von Antoine de Saint-Exupéry:

**Perfektion ist nicht dann erreicht, wenn es nichts mehr hinzuzufügen gibt,
sondern wenn man nichts mehr weglassen kann.**