

09.03.2025 Die Elektronen: Wo kommen sie her – wo gehen sie hin?

ams will's wissen

Die Wege des Stroms sind NICHT unergründlich. Viele Menschen – Techniker und Wissenschaftler - beschäftigen sich mit dem elektrischen Strom. Wie kann man ihn erzeugen, transportieren, speichern, verwerten usw. **ams** richtet den Fokus naturgemäß darauf, was der Strom in einem reinen Elektrofahrzeug alles anstellen muss, bevor er sein eigentliches Werk – den Vortrieb - verrichten kann.

Leider ist der Weg vom Akku auf die Straße nur die halbe Miete – wenn überhaupt. Jedem Techniker heutzutage sollte der Begriff **Well to Wheel** bekannt sein. So wichtig die Frage auch ist, wieviel Strom ein BEV unter wechselnden Bedingungen verbraucht, wichtiger noch ist die Frage, wie der Strom in den Akku reinkommt. Genau diesen Betrag wollen wir versuchen abzuschätzen.

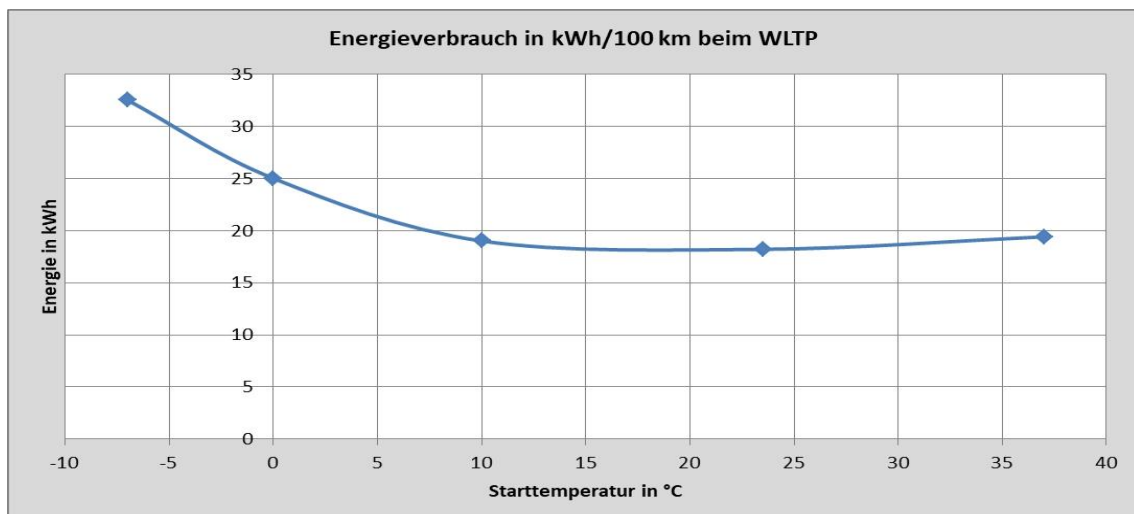
Wir dröseln deshalb das Well to Wheel folgendermaßen auf:

1. Stromerzeugung ->
2. Stromtransformation und -transport ->
3. Laden des Akkus ->
4. vom Akku auf die Straße.

Akku to Wheel

ams wollte im Detail wissen, wieviel Strom von den diversen Nebenverbrauchern Heizung und Klimatisierung abgezweigt wird, und wieviel für das Aufheizen der Batterie auf Betriebstemperatur benötigt wird. Und das bei unterschiedlichen Temperaturen, vor allem bei Tief- und Hochtemperaturen. Für das Tieftemperaturverhalten wurden -7°C gewählt, als Hochtemperatur $+37^{\circ}\text{C}$. Des Weiteren wurden noch Versuche bei $+23^{\circ}\text{C}$ durchgeführt.

Anmerkung: Zwischen -7°C und $+23^{\circ}\text{C}$ klafft eine große Lücke. Warum wurden bei 0°C und $+10^{\circ}\text{C}$ keine Versuche durchgeführt? Es handelt sich doch dabei um die häufigsten Starttemperaturen, über die man liebend gerne Bescheid wüsste. Wir versuchen, die fehlenden Stützstellen bestmöglich zu interpolieren.



Der große Verbrauch bei Minusgraden resultiert zum Teil aus dem Verbrauch von Batterie- und Fahrzeugheizung, zum Teil aus dem schlechten Wirkungsgrad des Elektroantriebs. Jetzt müssten wir nur noch wissen, wie die Verteilung der Starttemperaturen über ein Jahr betrachtet aussieht, und schon hätten wir den durchschnittlichen Jahresverbrauch in einer annähernd praxistauglichen Größenordnung. Machen wir es uns nicht zu schwer, und rechnen mit Ein Drittel 0°C und Zwei Drittel 10°C, dann erhalten wir ziemlich genau **21 kWh/100 km**.

Von Wind, Sonne, Acker, Gas und Kohle ins Stromnetz

Alles schön und gut. Wir wissen jetzt, was sich auf dem Weg von der Batterie zum Elektromotor abspielt. Als Nächstes beschäftigen wir uns mit dem Abschnitt „Well to Akku“. Welche Strommenge muss durch Kraftwerke erzeugt werden, um die Elektrofahrzeuge zu versorgen, und wieviel CO₂ entsteht dabei.

Im Prinzip können wir es uns ganz einfach machen. Wir laden unser Wägelchen nur mit grünem Strom. Dann erzeugen wir NullKommaNull CO₂.

Es gibt nur leider keinen grünen Strom. Der Strom aus der Steckdose ist mit schmutzigem Strom verseucht. Der Anteil des schmutzigen Stroms gegenüber dem grünen Strom schlägt sich im sog. Strommix nieder. Dieser pendelt seit Jahren um ca. 400 gCO₂/kWh. Dieser Wert angewandt auf die obigen 21 kWh/100 km ergibt ein CO₂ von 8,8 kg/100 km.

Diese Methode enthält zwei Fehler.

1. Bei der Berechnung des Strommix wird von der gesamten Strommenge eines Jahres die Menge an Erneuerbarer Energie abgezogen. Übrig bleibt die Menge an Strom, die durch Kohle-, Gas- und Ölkraftwerke erzeugt wird. Von diesen kennt man die Wirkungsgrade und deshalb auch die Menge an CO₂, die dabei entsteht.
Was soll daran falsch sein? Die erzeugte Strommenge aller Beteiligten einfach über das Jahr aufzusummieren ist blanker Unsinn.
 - Im Sommer wird von den Grünstromerzeugern Sonnenenergie und Windkraft sehr häufig mehr Strom erzeugt als benötigt. Dieser Überschuss muss weg. Er wird an der Strombörse verkauft, nicht selten mit Verlust. Diesen Überschuss müsste man von den Erneuerbaren Energien abziehen.
 - Im Winter liefern Sonne und Wind oftmals zu wenig, und es muss Strom teuer eingekauft werden. Diesen Strom müsste man in der Bilanz dem schmutzigen Strom zuschlagen.
2. Beim Laden eines Elektrofahrzeugs wird nicht unterschieden, ob es im Sommer oder Winter, oder bei Tag oder Nacht passiert. Das ist aber von entscheidender Bedeutung für den beim Laden relevanten Strommix.

Dieses Thema ließe sich zu beliebiger Komplexität aufblasen. Wir entscheiden uns aber in solchen Situationen immer für ein pragmatisches Vorgehen. Folgende Annahmen:

- Die allermeisten Ladungen finden zuhause über Nacht an der heimischen Steckdose statt.
- Ein Elektrofahrzeug wird häufiger im Sommer als im Winter bewegt. Wir legen ein Verhältnis Sommer/Winter von 60/40 Prozent zugrunde.
- Im Sommer finden 30 Prozent der Ladungen am Tag statt, mit einem Strommix von 350 gCO₂/kWh. Sonne und Wind verbessern den Strommix.
70 Prozent der Ladungen geschehen bei Nacht, bei einem geschätzten Strommix von 500 gCO₂/kWh. Ohne Sonnenenergie sinkt der Anteil Erneuerbarer Energien.

- Im Winter finden nur 10 Prozent der Ladungen am Tag statt, bei einem Strommix von 450 gCO₂/kWh. Im Winter ist die Sonneneinstrahlung auch tagsüber eingeschränkt. 90 Prozent der Ladungen geschehen bei Nacht bei einem denkbar schlechten Strommix von 600 gCO₂/kWh.

Matrix:

Verteilung Sommer/Winter	Verteilung Tag/Nacht	Anteil auf ein Jahr bezogen	Strommix in CO ₂ /kWh	Strommix auf ein Jahr bezogen
Sommer 60 %	Tag 30%	18 %	300	54
	Nacht 70 %	42 %	500	210
Winter 40 %	Tag 10 %	4 %	450	18
	Nacht 90 %	36 %	600	216
Durchschnittlicher Strommix über ein Jahr gerechnet in CO₂/kWh:				500

Vom Stromkraftwerk bis zur Steckdose

Jetzt wissen wir, wie sich der Strom aus grünen und schmutzigen Anteilen zusammensetzt. Jetzt müssen wir ihn nur noch von den Kraftwerken zum Verbraucher transportieren. Um die Verluste möglichst gering zu halten, wird der Strom aus den fossilen Kraftwerken hochtransformiert bis auf 380 kV, und in Überlandleitungen auf die Reise geschickt. Bei der Annäherung an die Verbraucher wird er dann schrittweise wieder runtertransformiert auf Hochspannung 110 kV, Mittelspannung 10 kV und Niederspannung 0,4 kV. Jede Transformation ist mit Verlusten von etwa 5% behaftet. Auch der Transport geschieht nicht ohne Verluste von etwa 20 %. Wir erhalten also einen Wirkungsgrad von $(0,95 \times 0,95 \times 0,95 \times 0,8 = 0,7)$ 70 Prozent. Man muss also vom Kraftwerk aus die 1,4fache Menge auf die Reise schicken, damit die geforderten Mengen beim Verbraucher ankommen.

Wie steht es bei dieser Betrachtung um die Erneuerbaren Energien? Im Prinzip genauso. Auch sie müssen in spannungs- und phasengleiche Werte umgewandelt werden, bevor sie ins Hochspannungsnetz eingespeist werden.

Ergebnis: **Wirkungsgrad vom Kraftwerk bis zur Steckdose: 70 Prozent.**

Von der Steckdose in den Akku

So kommt der Strom an der Steckdose an. Aber wie kommt er in den Akku rein? Jede Batterie besitzt einen Innenwiderstand. Bei den Li-Ion-Batterien hängt er stark ab von der Temperatur, speziell Tieftemperatur. Das bereitet uns, wie oben schon ausgeführt, bei der Entnahme ein Problem, beim Laden begegnet uns aber das gleiche Problem nur aus der entgegengesetzten Richtung. Wieder gehen wir davon aus, dass 1/3 der Ladungen bei einer Temperatur von 0 °C stattfinden, 2/3 bei 10 °C. Der Wirkungsgrad bei 0 °C beträgt etwa 80 Prozent, bei 10 °C etwa 90 Prozent. Umgelegt auf die Verbräuche bei 0 °C von 25 kWh und bei 10 °C von 19 kWh ergibt sich ein Strombedarf von **24,5 kWh**.

Zusammenfassung:

1. **Realistischer Verbrauch: 21 kWh/100 km**
2. **Realistische Ladeverluste: 17 Prozent**
3. **Realistische Stromtransportverluste 30 Prozent**
4. **Realistischer Strommix: 500 gCO₂/kWh**
5. **CO₂-Endergebnis:**
 $21 \text{ kWh}/100 \text{ km} * 1,2 * 1,42 * 0,5 \text{ kgCO}_2/\text{kWh} = \underline{\underline{18 \text{ kgCO}_2/100 \text{ km}}}$
6. **Vergleich mit Werksangaben:**
Werksangaben: $17,0 \text{ kgCO}_2/100 \text{ km} * 400 \text{ gCO}_2/\text{kWh} = \underline{\underline{6,8 \text{ kg CO}_2/100 \text{ km}}$
Realistische Verbräuche sind mehr als doppelt so hoch wie die Werksangaben!
7. **Vergleich mit Benziner:**
Als Verbrauch setzen wir einen realistischen Praxisverbrauch von 6,0 Liter/100 km an.
Dazu brauchen wir noch den CO₂-Ausstoß für 1 Liter Benzin von 2,4 kg
Schließlich müssen wir fairerweise noch den Wirkungsgrad von der Erdölquelle bis zum Tank von 80 Prozent berücksichtigen.
Ergebnis: $6,0 \text{ L}/100 \text{ km} * 2,4 \text{ kgCO}_2/\text{L} * 1,25 = \underline{\underline{18 \text{ kg CO}_2/100 \text{ km}}}$
In der Praxis sind Elektromobile keinen Deut besser als vergleichbare Verbrenner.

Fazit:

Eigentlich sind Elektrofahrzeuge reine Sommerfahrzeuge und für unsere Breitengrade völlig ungeeignet. Leider begreifen selbst Ingenieure die Problematik des Elektroantriebs nicht zur Gänze, geschweige denn Leute aus den Vorständen, dem Vertrieb oder den Medien. Selbst seit den Herstellern und ihren Zulieferern das Wasser bis zur Halskrause steht, behaupten sie immer noch steif und fest: Am Elektroantrieb führt kein Weg vorbei. Da haben sie vermutlich die Rechnung ohne ihre Kunden gemacht. Wie es halt bei Firmen so der Brauch ist, die in der Vergangenheit auf hohen Rössern saßen, und sich keinen Deut um die Klientel mit schmalen Geldbeutel scherten. Sie kennen nur Premiumkunden.

Sind Sie ein solcher Premiumkunde? Gehören Sie zu den glücklichen ein Prozent, die eine beheizte Doppelgarage plus ein Verbrennerfahrzeug ihr Eigen nennen? Die einen Firmenparkplatz mit Ladestation besitzen? Dann kaufen Sie sich getrost ein BEV. Für die anderen 99 Prozent heißt das: **Finger weg.**

Den uneinsichtigen Managern, Politikern und Medien kann man nur die alte Indianerweisheit ans Herz legen:

„Wenn dein Pferd tot ist, steig ab!“