

Der CO₂-Rucksack sagt systemisch nichts - Warum wir Elektroauto und Verbrenner falsch vergleichen.

Teil 1: Warum der CO₂-Rucksack das System nicht erklärt Die Diskussion um Elektroauto versus Verbrenner wird seit Jahren entlang einer einzigen Kennzahl...

Abbildungen und interaktive Grafiken sind in der verlinkten Onlinefassung verfügbar.

**Digitale
Lesefassung**
Für Bildschirm
und Ausdruck

Original online
wirkungsoekonomie.de/blog/linkedin/2026-02-16-der-co2-rucksack-sagt-systemisch-nichts-warum-wir-elektroauto-und-verbrenner-falsch-vergleichen.html

Teil 1: Warum der CO₂-Rucksack das System nicht erklärt

Die Diskussion um Elektroauto versus Verbrenner wird seit Jahren entlang einer einzigen Kennzahl geführt: dem CO₂-Rucksack. Gemeint ist die Summe der Treibhausgasemissionen, die bei Produktion, Betrieb und Entsorgung eines Fahrzeugs entstehen.

Diese Perspektive ist nicht falsch. Aber sie ist unzureichend.

Sie reduziert ein komplexes sozio-technisches System auf eine einzige Dimension. Und genau darin liegt das Problem: Ein Fahrzeug ist kein isoliertes Produkt. Es ist eingebettet in Energieinfrastrukturen, Rohstoffketten, Machtstrukturen, Arbeitsmärkte, geopolitische Beziehungen und regulatorische Rahmenbedingungen. Wer ausschließlich CO₂ betrachtet, analysiert Emissionen - aber nicht das System.

Wenn wir ernsthaft vergleichen wollen, müssen wir daher eine grundlegendere Frage stellen: **Was ist eigentlich der Bewertungsmaßstab?**

1. Physikalische Grundlage: Thermodynamik als Ausgangspunkt

Bevor wir ökonomisch oder politisch argumentieren, müssen wir physikalisch korrekt bleiben.

Der erste Hauptsatz der Thermodynamik besagt: Energie kann weder erzeugt noch vernichtet werden. Der zweite Hauptsatz ergänzt: Jede Energieumwandlung erhöht die Entropie - nutzbare Energie (Exergie) nimmt ab.

Jede technische Mobilitätslösung ist daher eine Umwandlungskaskade.

Beim Verbrenner beginnt diese Kaskade mit der Förderung von Rohöl, gefolgt von Transport, Raffination, Distribution und schließlich der Verbrennung im Motor. Ein Ottomotor erreicht im Realbetrieb etwa 20-25 % Wirkungsgrad, ein Dieselmotor 25-35 %. Der Rest wird überwiegend als Wärme dissipiert.

Das ist keine politische Bewertung, sondern ein thermodynamischer Sachverhalt.

Das Elektrofahrzeug folgt einer anderen Kaskade: Stromerzeugung, Netzübertragung, Ladeinfrastruktur, Batterie, Elektromotor. Der Elektromotor selbst erreicht Wirkungsgrade von über 90 %. Selbst unter Einbeziehung von Umwandlungs- und Speicherverlusten liegt die direktelektrische Nutzung strukturell deutlich über dem Gesamtwirkungsgrad des Verbrennungssystems.

Das bedeutet nicht automatisch, dass das Elektrofahrzeug „besser“ ist. Es bedeutet lediglich: **Die Ausgangsstruktur der Energieumwandlung ist grundlegend unterschiedlich.**

Wer diese strukturelle Differenz nicht berücksichtigt, diskutiert ideologisch - nicht physikalisch.

2. Der CO₂-Rucksack: Methodisch sinnvoll - systemisch begrenzt

Lebenszyklusanalysen (Life Cycle Assessments, LCA) sind ein etabliertes Instrument zur Emissionsbilanzierung. Sie ermöglichen es, Treibhausgase entlang der gesamten Wertschöpfungskette zu erfassen. Für die Klimafrage sind sie unverzichtbar.

Doch LCAs haben inhärente methodische Begrenzungen:

1. Sie arbeiten häufig mit Durchschnittswerten (z. B. nationaler Strommix).

2. Sie setzen klare Systemgrenzen - und alles außerhalb bleibt unsichtbar.
3. Sie aggregieren komplexe Effekte zu einer einzigen Kennzahl.
4. Sie bilden Macht- und Abhängigkeitsstrukturen nicht ab.

Ein CO₂-Rucksack beantwortet die Frage: Wie viele Treibhausgase entstehen?

Er beantwortet nicht die Frage: Welches System ist langfristig resilienter, weniger abhängig oder demokratisch stabiler?

Genau hier beginnt die Erweiterung vom CO₂-Rucksack zum wirkungsökonomischen Rucksack.

3. Das Strommix-Argument - eine methodische Verkürzung

In vielen Debatten wird mit dem nationalen Strommix gerechnet. Formal ist das zulässig. Systemisch ist es häufig unpräzise.

Denn Fahrzeuge laden nicht im statistischen Jahresdurchschnitt. Produktionsstätten operieren nicht zwingend im nationalen Mittelwert. Industrie nutzt zunehmend standortspezifische Energieverträge, Power Purchase Agreements (PPA) oder eigene Erzeugungskapazitäten.

Eine differenzierte Analyse muss daher unterscheiden zwischen:

- Durchschnittswerten auf Makroebene
- realem Energiepfad auf Mikroebene
- zusätzlichem Ausbau erneuerbarer Kapazitäten (Additionality)

Wer diese Differenzierung unterlässt, vergleicht Modellannahmen - nicht reale Systeme.

Das gilt übrigens für beide Seiten der Debatte.

4. Produktion: Der vermeintlich „schwere“ Elektro-Rucksack

Die Batterieproduktion ist energieintensiv. Das ist unbestritten. Aber auch hier entscheidet die Systemgrenze.

Produktionsenergie ist standortspezifisch. Prozesswärme und Strom müssen getrennt betrachtet werden. Ausschussquoten sinken mit zunehmender Skalierung. Recyclinganteile steigen.

Zudem wird häufig übersehen, dass auch der Verbrenner energieintensive Komponenten benötigt: Motorblock, Getriebe, Abgasnachbehandlung, komplexe mechanische Systeme. Die Materialintensität verteilt sich anders - sie verschwindet nicht.

Eine faire Analyse muss daher nicht nur „Emissionen pro Fahrzeug“, sondern **Emissionen pro Lebenskilometer** vergleichen.

Erst dann entsteht Vergleichbarkeit.

5. Externe Effekte jenseits von CO₂

Mobilität erzeugt nicht nur Klimawirkung.

Sie beeinflusst:

- Luftqualität (NO_x, Feinstaub)
- Lärmemissionen
- Flächenverbrauch
- Gesundheitskosten
- urbane Lebensqualität

Diese Effekte sind systemisch relevant, aber im CO₂-Rucksack nicht enthalten.

Ein System, das thermodynamisch ineffizient arbeitet, benötigt dauerhaft hohe Primärenergiezufuhr. Hohe Primärenergiezufuhr erzeugt Importabhängigkeit. Importabhängigkeit schafft geopolitische Verwundbarkeit. Verwundbarkeit beeinflusst politische Stabilität.

Diese Kette ist nicht normativ, sondern strukturell.

6. Systemgrenzen entscheiden über die Wahrheit

Jede Bilanz ist nur so objektiv wie ihre Annahmen.

Zählt man Methan-Leakage in Förderregionen mit? Zählt man militärische Sicherung von Lieferketten? Zählt man Gesundheitskosten durch Luftverschmutzung? Zählt man Infrastrukturaufbau?

Je nach gewählter Systemgrenze verändert sich das Ergebnis erheblich.

Das bedeutet nicht, dass jede Zahl beliebig ist. Es bedeutet, dass Transparenz über Annahmen zentral ist.

Wissenschaftliche Redlichkeit liegt nicht im gewünschten Resultat, sondern in der Offenlegung der Modellstruktur.

7. Warum wir einen erweiterten Bewertungsrahmen brauchen

Wenn wir Mobilität nicht isoliert, sondern systemisch betrachten, erkennen wir: CO₂ ist eine notwendige, aber nicht hinreichende Größe.

Ein nachhaltiger Vergleich muss berücksichtigen:

- Energieeffizienz entlang der Umwandlungskette
- Rohstoffprofile und Recyclingfähigkeit
- Luft- und Gesundheitswirkungen
- Infrastrukturabhängigkeiten
- Macht- und Marktstrukturen
- Resilienz gegenüber externen Schocks

Erst dann entsteht ein vollständigeres Bild.

Nicht im Sinne von Aktivismus. Sondern im Sinne systemischer Analyse.

Fazit von Teil 1

Der CO₂-Rucksack erklärt Emissionen. Er erklärt nicht das System.

Wenn man Elektroauto und Verbrenner ausschließlich entlang einer Kennzahl vergleicht, wird die Analyse verkürzt und der Blick auf strukturelle Unterschiede in Energieeffizienz, Infrastruktur, Abhängigkeit und Resilienz verstellt.

Die eigentliche Frage lautet daher nicht:

Welches Fahrzeug stößt weniger CO₂ aus?

Sondern:

Welches System erzeugt langfristig die geringere Gesamtbelastung für Mensch, Planet und demokratische Stabilität?

Im nächsten Abschnitt entwickeln wir dafür den erweiterten Bewertungsrahmen: Den

wirkungsökonomischen Rucksack entlang von Vorbetrieb, Betrieb und Nachbetrieb - und zeigen, wie sich die Debatte dadurch grundlegend verschiebt.

Teil 2: Die drei Zeitachsen: Vor Betrieb, Während Betrieb, Nach Betrieb

Im ersten Teil haben wir gezeigt, warum der CO₂-Rucksack das System nicht erklärt. Er misst Emissionen - aber nicht Struktur, Resilienz oder Machtverhältnisse.

Wenn wir Mobilität systemisch bewerten wollen, müssen wir entlang der realen Lebenszeit eines Fahrzeugs denken. Nicht als statisches Objekt, sondern als Prozess.

Der wirkungsökonomische Rucksack folgt deshalb drei Zeitachsen:

1. **Vor dem Betrieb**
2. **Während des Betriebs**
3. **Nach dem Betrieb**

Erst diese zeitliche Differenzierung erlaubt eine konsistente Bewertung.

I. Vor dem Betrieb - Rohstoffe, Produktion, Infrastruktur

1. Rohstoffe: Materialprofil statt Schlagwort

Jedes Fahrzeug beginnt mit Geologie.

Der Verbrenner basiert primär auf:

- Stahl
- Aluminium
- Kupfer

- Kunststoffe
- fossile Energieträger (als Betriebsgrundlage)

Das Elektrofahrzeug benötigt zusätzlich:

- Lithium
- Nickel / Mangan / Kobalt (je nach Zellchemie)
- Graphit
- Seltene Erden (für bestimmte Motorvarianten)

Häufig wird hier verkürzt argumentiert: „Lithium ist problematisch.“

Systemisch korrekt ist:

- Öl ist ebenfalls ein Rohstoff mit geopolitischer Konzentration.
- Beide Systeme erzeugen Abhängigkeiten.
- Die Frage ist nicht „ob“, sondern **wie stark und wie diversifizierbar**.

Entscheidend sind:

- geographische Konzentration
- Substituierbarkeit
- Recyclingfähigkeit
- Materialintensität pro Lebensleistung

Lithium ist kein Energieträger. Es wird nicht verbrannt. Es ist ein zirkulierender Werkstoff.

Öl hingegen ist ein Energieträger, der irreversibel oxidiert wird.

Das ist ein fundamentaler struktureller Unterschied.

2. Produktion: Standort entscheidet

Batterieproduktion ist energieintensiv. Aber Produktionsenergie ist kein Naturgesetz - sie ist standortabhängig.

Entscheidend sind:

- Stromquelle des Werks
- Prozesswärmequelle
- Effizienz der Anlagen
- Ausschussquote
- Recyclinganteil im Input

Eine Fabrik mit fossiler Strombasis hat einen anderen Rucksack als eine Fabrik mit erneuerbarer Versorgung oder PPA-Struktur.

Dasselbe gilt für Verbrennungsmotorenwerke.

Wer pauschal mit nationalem Durchschnitt rechnet, ignoriert reale Produktionsentscheidungen.

3. Infrastruktur: Der unsichtbare Rucksack

Ein Fahrzeug ist immer Teil eines Energiesystems.

Beim Verbrenner bedeutet das:

- Förderung
- Pipelines
- Tanker
- Raffinerien
- Tankstellen
- strategische Reserven

Beim Elektrofahrzeug:

- Kraftwerke
- Netze
- Transformatoren
- Ladeinfrastruktur
- Speicher

Beide Systeme benötigen Infrastruktur. Der Unterschied liegt in der Struktur:

Fossile Infrastruktur ist hochzentralisiert und kontinuierlich primärenergieabhängig.

Elektrische Infrastruktur ist netzbasiert und potenziell dezentral erweiterbar.

Diese Differenz wirkt langfristig auf Marktstrukturen und Resilienz.

II. Während des Betriebs - Energiepfad und externe Effekte

Hier entstehen die größten Missverständnisse.

1. Energie im Betrieb: Nicht Strommix, sondern realer Ladepfad

Ein Elektrofahrzeug lädt nicht im statistischen Mittelwert.

Entscheidend ist:

- Heimladen mit PV
- Quartierslösungen

- Flottenladen
- Schnellladen mit Ökostromvertrag
- Additionality (wird zusätzlicher EE-Ausbau ausgelöst?)

Das bedeutet nicht, dass der Strom immer emissionsfrei ist. Aber es bedeutet, dass eine pauschale Strommix-Betrachtung analytisch grob ist.

Beim Verbrenner ist die Energiequelle hingegen fix: fossiler Kraftstoff.

Hier existiert keine strukturelle Dekarbonisierungsoption ohne vollständigen Systemwechsel.

2. Wirkungsgrad im Alltag

Die thermodynamische Differenz aus Teil I wirkt sich hier konkret aus:

Ein ineffizientes System benötigt dauerhaft hohe Primärenergiezufuhr.

Hohe Primärenergiezufuhr bedeutet:

- hohe Importmengen
- hohe Preissensitivität
- hohe geopolitische Verwundbarkeit

Effizienz ist daher nicht nur eine technische, sondern eine systemische Größe.

3. Externe Effekte

Während des Betriebs entstehen:

- NOx-Emissionen
- Feinstaub (auch nicht nur aus Auspuff, sondern Reifen und Bremsen)
- Lärmemissionen
- Wärmeverluste

Elektrische Antriebe eliminieren lokale Abgasemissionen, reduzieren Lärm und verändern urbane Belastungsstrukturen. Diese Effekte tauchen im CO₂-Rucksack nicht auf - sind aber gesellschaftlich relevant.

Neben direkter Elektrifizierung existiert mit synthetischen Kraftstoffen (eFuels) ein alternativer Energiepfad, der gesondert betrachtet werden muss.

III. Nach dem Betrieb - Zirkularität oder Verlust?

Der dritte Zeitabschnitt wird häufig unterschätzt.

1. Verbrenner-System

- Verschrottung
- Metallrecycling

- Reststoffe
- irreversible Verbrennung der Energieträger

Der Energieträger ist vollständig dissipiert.

2. Elektrofahrzeug-System

- Second Life (z. B. stationäre Speicher)
- Remanufacturing
- Materialrückgewinnung

Entscheidend ist hier nicht die Recyclingquote allein, sondern:

- Rückgewinnungsrate einzelner Elemente
- Reinheit
- tatsächliche Rückführung in neue Zellproduktion

Zirkularität ist kein Marketingbegriff. Sie ist ein struktureller Unterschied zwischen Verbrauch und Kreislauf.

IV. Die systemische Verschiebung

Wenn wir die drei Zeitachsen zusammenführen, erkennen wir:

Der Verbrenner basiert auf einem kontinuierlichen Primärenergiefluss mit irreversibler Oxidation.

Das Elektrofahrzeug basiert auf einem potenziell zirkulären Materialsystem mit veränderbarem Energieinput.

Das heißt nicht, dass das Elektrofahrzeug automatisch optimal ist.

Es heißt lediglich:

Die Systeme sind strukturell unterschiedlich organisiert.

Und genau deshalb kann ein reiner CO₂-Rucksack diese Unterschiede nicht vollständig abbilden.

Fazit von Teil II

Eine seriöse Analyse muss entlang der drei Zeitachsen differenzieren:

- Vor Betrieb
- Während Betrieb
- Nach Betrieb

Und sie muss Standort, Energiepfad, Materialprofil und Zirkularität berücksichtigen.

Erst dann wird sichtbar, dass wir nicht nur Fahrzeuge vergleichen - sondern zwei unterschiedliche Energie- und Industriesysteme.

Teil 3: Exkurs: eFuels im wirkungsökonomischen Bewertungsrahmen

In der Debatte um Verbrenner und Elektromobilität taucht regelmäßig ein Argument auf: Mit synthetischen Kraftstoffen - sogenannten eFuels - könne der bestehende Verbrennungsmotor klimaneutral betrieben werden.

Dieses Argument verdient eine sachliche Analyse.

Denn eFuels verändern nicht den Motor - sie verändern den Energiepfad.

Um sie systemisch einzuordnen, müssen wir fünf Ebenen betrachten: Thermodynamik, Effizienz-kaskade, Strombedarf, Opportunitätskosten und sinnvolle Einsatzfelder.

1. Thermodynamik: Der Motor bleibt ein Wärmekraftprozess

Ein Verbrennungsmotor ist ein Wärmekraftprozess. Er wandelt chemische Energie in mechanische Arbeit um - mit unvermeidbaren Entropieverlusten.

Unabhängig davon, ob der Kraftstoff fossilen Ursprungs oder synthetisch hergestellt ist, gilt:

Der Wirkungsgrad eines Ottomotors liegt realistisch bei etwa 20-25 %, ein Dieselmotor bei 25-35 %.

Das bedeutet: Ein Großteil der eingesetzten Energie wird als Abwärme dissipiert.

eFuels ändern daran nichts. Sie verändern lediglich die Herkunft der chemischen Energie.

Thermodynamisch bleibt der Prozess identisch.

2. Die Effizienz-kaskade bei eFuels

Die Herstellung synthetischer Kraftstoffe erfolgt typischerweise in mehreren Schritten:

1. Erzeugung erneuerbaren Stroms
2. Elektrolyse → Wasserstoff
3. Synthese (z. B. Fischer-Tropsch oder Methanolroute)
4. Aufbereitung und Transport
5. Verbrennung im Motor

Methodischer Hinweis: Für alle drei Energiepfade gilt: Der Vergleich beginnt nicht im Tank und nicht an der Steckdose, sondern bei der jeweiligen Primärenergiequelle - also bei Rohöl im Boden bzw. bei erneuerbarer Stromerzeugung an der Anlage - und endet bei der mechanischen Bewegung am Rad.

Jede Umwandlungsstufe entlang dieser Kette erzeugt Verluste.

Grob betrachtet - je nach Technologie und Annahmen - liegt der Gesamtwirkungsgrad von erneuerbarem Strom bis zur mechanischen Bewegung im Fahrzeug bei etwa 10-15 %.

Zum Vergleich:

Direktelektrische Nutzung im batterieelektrischen Fahrzeug erreicht typischerweise 65-75 % vom Strom bis zur Bewegung.

Das bedeutet:

Für die gleiche Fahrleistung wird bei Nutzung von eFuels ein Vielfaches an erneuerbarer Primärenergie benötigt. Das ist kein normatives Argument. Es ist eine Konsequenz der Umwandlungskette.

3. Strombedarf und Skalierungsfrage

Die Effizienzdifferenz führt unmittelbar zur Skalierungsfrage.

Wenn erneuerbarer Strom eine begrenzte Ressource ist - sei es aufgrund von Flächenverfügbarkeit, Netzausbau oder Investitionskapazität - dann stellt sich die Frage der Priorisierung.

Ein System mit niedrigem Gesamtwirkungsgrad benötigt:

- größere Erzeugungskapazitäten
- größere Flächen
- höhere Investitionen
- höhere Netz- und Transportleistungen

eFuels sind technisch herstellbar. Aber sie sind stromintensiv.

Je größer der Anteil synthetischer Kraftstoffe im Straßenverkehr, desto größer wird der Bedarf an erneuerbarer Stromerzeugung. Damit verschiebt sich die Debatte von der Motorentechnologie zur Energieinfrastruktur.

4. Systemische Opportunitätskosten

Hier wird der wirkungsökonomische Blick entscheidend.

Wenn eine Kilowattstunde erneuerbarer Energie direkt in einem Elektromotor genutzt werden kann - oder alternativ in einem energieintensiven Syntheseprozess gebunden und anschließend mit hohen Verlusten verbrannt wird -, dann entsteht eine Opportunitätsentscheidung.

Die Frage lautet: Wo erzielt hochwertige elektrische Energie die größte Systemwirkung?

In einem Wärmekraftprozess? Oder in direkter elektrischer Nutzung?

Opportunitätskosten sind keine moralische Kategorie. Sie sind eine Allokationsfrage.

In einem Energiesystem mit begrenzten Ausbaugeschwindigkeiten kann die Wahl des Energiepfads strukturelle Auswirkungen auf Geschwindigkeit und Kosten der Transformation haben.

5. Zentralisierung und Infrastrukturstruktur

eFuels werden in der Regel in großindustriellen Anlagen produziert, häufig dort, wo erneuerbare Energie im Überschuss vorhanden ist - etwa in sonnen- oder windreichen Regionen.

Das bedeutet:

- hohe Kapitalintensität

- großskalige Produktionsanlagen
- internationale Transportketten
- Importabhängigkeit

In dieser Hinsicht ähneln eFuel-Strukturen fossilen Lieferketten stärker als dezentralen Stromnetzen.

Sie verändern den CO₂-Fußabdruck potenziell - aber nicht zwingend die Zentralisierungsstruktur. Auch das ist kein Werturteil, sondern eine strukturelle Beobachtung.

6. Sinnvolle Anwendungsfelder

Eine systemische Analyse bedeutet nicht, eFuels pauschal abzulehnen.

Im Gegenteil: Sie haben klare Einsatzfelder, in denen direkte Elektrifizierung technisch oder physikalisch schwierig ist:

- Luftfahrt
- Hochseeschifffahrt
- bestimmte Industrieprozesse
- Bestandsflotten in Übergangsphasen

In diesen Bereichen kann synthetischer Kraftstoff eine Brückentechnologie oder langfristige Lösung darstellen.

Die entscheidende Frage ist daher nicht:

„Sind eFuels gut oder schlecht?“

Sondern:

„In welchem Systemsegment erzeugen sie die höchste Gesamtwirkung?“

7. Einordnung im wirkungsökonomischen Rucksack

Im Bewertungsraster des wirkungsökonomischen Rucksacks erscheinen eFuels daher als:

- potenziell klimaneutral bei ausreichendem erneuerbaren Input
- thermodynamisch ineffizient im Vergleich zur direkten Elektrifizierung
- infrastrukturell eher zentralisierend
- ressourcenintensiv im Strombedarf

Sie sind technisch möglich. Aber ihre systemische Wirkung hängt stark vom Einsatzbereich und vom Energieangebot ab.

Fazit zu eFuels:

eFuels lösen nicht das Effizienzproblem des Verbrennungsmotors. Sie verschieben es in die Energieerzeugung.

Sie sind eine Option - aber keine universelle Lösung. In einem wirkungsökonomischen Bewertungsrahmen müssen sie daher differenziert eingeordnet werden: Nicht als Ersatz für jede Form der Elektrifizierung, sondern als gezielte Ergänzung dort, wo Alternativen physikalisch begrenzt sind.

Im nächsten Abschnitt kehren wir zurück zur systemischen Gesamtbetrachtung und analysieren, wie unterschiedliche Energiepfade Macht-, Markt- und Resilienzstrukturen langfristig verändern.

Teil 4: Macht, Resilienz und die demokratische Dimension von Mobilität

In Teil 1 haben wir gezeigt, dass der CO₂-Rucksack das System nicht erklärt. In Teil 2 haben wir die drei Zeitachsen - Vorbetrieb, Betrieb, Nachbetrieb - strukturiert.

Nun folgt die Dimension, die in klassischen Lebenszyklusanalysen vollständig fehlt:

Mobilität ist ein Macht- und Infrastruktursystem.

Und jedes Energiesystem erzeugt spezifische Abhängigkeitsstrukturen.

1. Energie ist immer Macht

Energiesysteme sind nie neutral.

Wer Energie kontrolliert, kontrolliert:

- Preisbildung
- Versorgungssicherheit
- industrielle Wettbewerbsfähigkeit
- geopolitische Hebel

Historisch waren fossile Systeme hochzentralisiert:

- Förderung in wenigen Regionen
- vertikal integrierte Konzerne
- Oligopolstrukturen
- strategische Abhängigkeiten

Die Struktur ist nicht zufällig. Sie ergibt sich aus der Natur des Energieträgers.

Öl und Gas sind lagerfähig, transportfähig, handelbar und global konzentriert. Das schafft Markt- und Machtkonzentration.

2. Primärenergieabhängigkeit vs. Elektrifizierung

Der Verbrenner benötigt kontinuierlich neue Primärenergie.

Jeder gefahrene Kilometer verbraucht irreversibel oxidierten Energieträger.

Das bedeutet:

- dauerhafte Importabhängigkeit
- dauerhafte Preissensitivität
- dauerhafte Exposition gegenüber geopolitischen Konflikten

Elektrische Antriebe verändern diese Struktur.

Sie verlagern die Abhängigkeit:

- weg vom kontinuierlichen Primärenergieimport
- hin zu Infrastruktur, Netzen und Materialkreisläufen

Der Energieinput wird potenziell diversifizierbar.

Strom kann erzeugt werden aus:

- Wind
- Sonne
- Wasser
- Biomasse
- Geothermie
- konventionellen Quellen

Die strukturelle Frage lautet daher nicht: „Ist Strom heute sauber?“

Sondern:

„Ist das System transformierbar?“

3. Zentralisierung vs. Dezentralisierung

Fossile Systeme sind inhärent zentralisiert:

- Förderung → Raffinerie → Distribution
- hohe Kapitalintensität
- hohe Eintrittsbarrieren

Elektrische Systeme sind netzbasiert.

Netze können zentral oder dezentral organisiert sein. Photovoltaik auf Dächern, Quartiersspeicher, kommunale Energiegenossenschaften - all das sind strukturelle Optionen.

Das bedeutet nicht, dass Elektrizität automatisch dezentral ist.

Aber sie ist strukturell dezentralisierbar.

Diese Option existiert im fossilen System nicht.

4. Resilienz gegenüber Schocks

Systemresilienz beschreibt die Fähigkeit, Störungen zu absorbieren.

Ein System mit:

- hoher Importabhängigkeit
- wenigen Lieferanten
- geopolitischer Konzentration

ist vulnerabler gegenüber externen Schocks.

Ein diversifiziertes, elektrifiziertes System kann:

- Last verschieben
- Speicher einsetzen
- lokale Erzeugung integrieren
- Energiequellen austauschen

Resilienz ist daher keine moralische Kategorie. Sie ist eine systemtheoretische Eigenschaft.

5. Marktstruktur und Wettbewerb

Fossile Wertschöpfungsketten sind historisch geprägt durch:

- vertikale Integration
- starke Konzentration
- langfristige Investitionszyklen

Elektrifizierung erzeugt neue Marktsegmente:

- Ladeinfrastruktur
- Software
- Speicher
- Energiemanagement

Das verschiebt Wettbewerbsebenen. Gleichzeitig entstehen neue Konzentrationsrisiken - etwa bei Batterieproduktion oder Rohstoffraffination.

Der wirkungsökonomische Rucksack muss daher nicht nur Emissionen, sondern auch Marktstrukturentwicklung bewerten.

6. Demokratie als Systemvariable

Demokratische Stabilität hängt unter anderem von:

- wirtschaftlicher Planbarkeit

- sozialer Gerechtigkeit
- Versorgungssicherheit
- Preisstabilität

Energiepreisschocks wirken politisch destabilisierend.

Je höher die strukturelle Abhängigkeit von extern kontrollierten Ressourcen, desto größer die Verwundbarkeit.

Ein System, das diversifizierbar und transformierbar ist, besitzt strategische Handlungsoptionen.

Diese Option ist selbst ein Wert.

7. Vom Produkt zur Systemscheidung

Die Debatte wird häufig auf Fahrzeugebene geführt.

Doch tatsächlich vergleichen wir:

- ein System kontinuierlicher fossiler Primärenergieabhängigkeit mit
- einem System potenziell elektrifizierter Infrastruktur und zirkulierender Materialien.

Der Unterschied liegt nicht nur im Auspuff. Er liegt in der Struktur des Energiesystems.

8. Keine Idealisierung - nur Strukturvergleich

Das bedeutet nicht:

- dass Elektromobilität perfekt ist
- dass Batterieproduktion keine ökologischen Belastungen erzeugt
- dass es keine neuen Abhängigkeiten gibt

Es bedeutet lediglich:

Die Systeme erzeugen unterschiedliche Macht- und Resilienzprofile.

Und diese Profile sind im CO₂-Rucksack unsichtbar.

Fazit von Teil 4

Mobilität ist kein reines Emissionsthema. Sie ist eine infrastrukturelle und machtsstrukturelle Entscheidung.

Ein wirkungsökonomischer Rucksack muss deshalb neben Klima und Ressourcen auch berücksichtigen:

- Abhängigkeitsstrukturen
- Markt- und Machtkonzentration
- Resilienz gegenüber Schocks
- Transformierbarkeit des Systems

eFuels erzeugen ebenfalls:

- große zentrale Produktionsanlagen
- globale Transportstrukturen
- Importabhängigkeit (Sonnen-/Windreiche Regionen)

Damit wird klar:

eFuels verändern das CO₂-Profil, aber nicht zwingend die Zentralisierungsstruktur.

Erst wenn diese Dimension einbezogen wird, entsteht eine vollständige Bewertung.

Im nächsten Abschnitt führen wir die drei Ebenen - Zeitachsen, physikalische Struktur und demokratische Wirkung - zusammen und entwickeln einen konsistenten Bewertungsrahmen entlang von Mensch, Planet und Demokratie (MPD).

Teil 5: Methodik, Systemgrenzen und Bewertungslogik

In den ersten drei Teilen haben wir gezeigt:

- CO₂ allein erklärt nicht das System.
- Mobilität ist eine zeitlich gestaffelte Prozesskette.
- Energiesysteme erzeugen Macht- und Resilienzstrukturen.

Nun stellt sich die entscheidende Frage: **Wie bewertet man das konsistent - ohne normativen Bias?**
Denn jede Bewertung steht und fällt mit ihrer Methodik.

1. Die zentrale Herausforderung: Systemgrenzen

Jede Analyse beginnt mit einer Grenzziehung.

Zählt man nur Fahrzeugproduktion? Oder auch Infrastruktur? Oder geopolitische Sicherung? Oder Gesundheitsfolgekosten?

Die Systemgrenze entscheidet über das Ergebnis stärker als die Einzelzahl.

Eine wissenschaftlich saubere Bewertung muss daher:

1. Die Systemgrenze explizit offenlegen
2. Mehrere Grenzvarianten vergleichen
3. Sensitivitäten darstellen

Transparenz ist wichtiger als das Resultat.

2. Die drei Zeitachsen als Strukturrahmen

Die Bewertung erfolgt entlang der bereits entwickelten Zeitachsen:

- Vor Betrieb
- Während Betrieb

- Nach Betrieb

Innerhalb jeder Phase werden Wirkungen entlang dreier Dimensionen erfasst:

- **Mensch (M)**
- **Planet (P)**
- **Demokratische Resilienz (D)**

Damit entsteht eine 3×3-Matrix pro Phase.

Das verhindert die Reduktion auf eine einzige Kennzahl.

3. Erweiterung im Bewertungsraster: Drei Energiepfade im Betriebsabschnitt

Im methodischen Raster des wirkungsökonomischen Rucksacks wird die Phase „Während des Betriebs“ explizit nach Energiepfaden differenziert. Denn die strukturellen Unterschiede liegen nicht primär im Fahrzeug, sondern in der Umwandlungskette der eingesetzten Energie.

Methodische Klarstellung (Systemgrenze): Für alle drei Energiepfade wird der Gesamtwirkungsgrad konsequent entlang der gesamten Umwandlungskette - von der Primärenergiequelle bis zur mechanischen Bewegung am Rad - betrachtet (Well-to-Wheel).

Beim fossilen Pfad beginnt die Bilanz bei der Rohölförderung. Beim direkten elektrischen Pfad bei der Stromerzeugung an der Erzeugungsanlage. Beim eFuel-Pfad ebenfalls bei der erneuerbaren Stromerzeugung vor Elektrolyse und Synthese.

Damit gelten für alle drei Pfade identische Systemgrenzen.

Für eine konsistente Bewertung sind drei Energiepfade zu unterscheiden:

1. Fossiler Kraftstoff

Primärenergie (Rohöl) wird gefördert, transportiert, raffiniert und im Verbrennungsmotor oxidiert. Der reale Gesamtwirkungsgrad von der im Kraftstoff enthaltenen chemischen Energie bis zur mechanischen Bewegung im Fahrzeug liegt typischerweise bei:

ca. 20-30 %

Das bedeutet: Rund 70-80 % der eingesetzten Energie gehen als Wärme verloren.

Der Energiepfad ist kontinuierlich primärenergieabhängig.

2. Direktelektrischer Antrieb

Die Bilanz beginnt bei der Stromerzeugung an der Primärenergiequelle (z. B. Wind-, Solar- oder konventionelle Kraftwerksanlage). Der erzeugte Strom wird über Netz, Ladeinfrastruktur, Batterie und Elektromotor in mechanische Bewegung überführt.

Typische Wirkungsgrade:

- Netz + Ladeverluste: 90-95 %
- Batterie (inkl. Umrichter): 90-95 %

- Elektromotor: > 90 %

Gesamtwirkungsgrad vom Strom bis zur Radbewegung:

ca. 65-75 %

Damit benötigt dieser Energiepfad für die gleiche Fahrleistung nur etwa ein Drittel bis ein Viertel der Primärenergie eines Verbrenners.

3. Synthetischer Kraftstoff (eFuel)

Der Energiepfad lautet:

Erneuerbarer Strom → Elektrolyse (ca. 65-75 %) → Synthese + Aufbereitung (ca. 60-80 %) → Transport → Verbrennung im Motor (20-30 %)

Multipliziert man diese Wirkungsgrade, ergibt sich vom eingesetzten Strom bis zur Radbewegung:

ca. 10-15 % Gesamtwirkungsgrad

Das bedeutet:

Für die gleiche Fahrleistung wird im Vergleich zur direkten Elektrifizierung etwa das **4- bis 6-Fache an erneuerbarer Stromerzeugung** benötigt.

Methodische Konsequenz

Im MPD-Raster muss daher neben Emissionen auch erfasst werden:

- Primärenergiebedarf pro Kilometer
- Strombedarf pro Kilometer
- Skalierungsbedarf erneuerbarer Erzeugungskapazitäten
- Infrastruktur- und Flächenbedarf

Die Differenz zwischen fossilem Kraftstoff, direkter Elektrifizierung und eFuel liegt strukturell im **Gesamtwirkungsgrad der Umwandlungskette** und im daraus resultierenden **Systemaufwand pro Mobilitätseinheit**.

Diese Differenz ist physikalisch bedingt - nicht politisch.

4. Quantitativ vs. qualitativ - was ist messbar?

Nicht alles ist direkt monetarisierbar. Und nicht alles sollte monetarisiert werden.

Quantifizierbar:

- CO₂-Emissionen
- Energieverbrauch
- Materialintensität
- Recyclingquoten

- Luftschadstoffe

Bedingt quantifizierbar:

- Gesundheitsfolgekosten
- Preisvolatilität
- Importabhängigkeit

Strukturell qualitativ:

- Transformierbarkeit des Systems
- Machtkonzentration
- Dezentralisierbarkeit

Eine seriöse Bewertung kombiniert daher:

- harte physikalische Daten
- ökonomische Indikatoren
- systemtheoretische Kriterien

5. Sensitivitätsanalyse statt Absolutheit

Ein häufiges Problem in Mobilitätsdebatten sind fixe Zahlen:

„Ein Elektroauto amortisiert sich nach X Kilometern.“ „Ein Verbrenner ist unter Y Bedingungen effizienter.“

Solche Aussagen hängen extrem von Annahmen ab:

- Lebensdauer
- Fahrprofil
- Stromquelle
- Produktionsstandort
- Recyclingrate

Wissenschaftlich korrekt ist daher:

Keine fixe Zahl, sondern Bandbreiten.

Eine robuste Bewertung zeigt:

- Best-Case
- Worst-Case
- Real-Case

Und sie macht transparent, welche Variable das Ergebnis am stärksten beeinflusst.

6. Diskontierung und Zeitdimension

Emissionen heute und Emissionen in 20 Jahren wirken nicht identisch.

Die Bewertung hängt davon ab:

- ob man zukünftige Effekte diskontiert
- wie man Übergangsphasen bewertet
- wie schnell ein System transformierbar ist

Ein fossiles System mit hohem Lock-in erzeugt langfristige Pfadabhängigkeit. Ein elektrisches System mit steigendem EE-Anteil verändert seine Bilanz dynamisch.

Das bedeutet:

Die Bewertung ist keine statische Momentaufnahme. Sie ist eine dynamische Systemanalyse.

7. Das MPD-Raster - Struktur statt Ideologie

Um Vergleichbarkeit herzustellen, wird jede Phase entlang von:

- **Mensch** (Arbeitsbedingungen, Gesundheit, soziale Stabilität)
- **Planet** (Klima, Ressourcen, Schadstoffe, Biodiversität)
- **Demokratie** (Abhängigkeit, Resilienz, Marktstruktur, Machtkonzentration)

bewertet.

Wichtig: Dieses Raster ist kein moralischer Filter. Es ist ein WirkungsfILTER.

Er fragt nicht: „Was gefällt uns?“ Er fragt: „Welche systemische Wirkung entsteht?“

8. Warum ein einzelner Score problematisch ist

Eine aggregierte Gesamtzahl ist kommunikativ attraktiv - aber analytisch gefährlich.

Warum?

Weil Gewichtungen implizite Wertentscheidungen enthalten.

Ist Klima wichtiger als Resilienz? Ist kurzfristige Effizienz wichtiger als langfristige Transformierbarkeit? Jede Aggregation versteckt normative Prioritäten.

Deshalb ist Transparenz über Gewichtung zwingend erforderlich.

Eine Möglichkeit:

- separate Teilindikatoren
- offene Gewichtungslogik
- Szenarien mit alternativen Gewichtungen

So bleibt die Analyse überprüfbar.

9. Wissenschaftliche Redlichkeit

Eine methodisch saubere Bewertung bedeutet:

- keine selektive Datenauswahl
- keine idealisierten Extremfälle
- keine pauschalen Annahmen
- Offenlegung von Unsicherheiten

Ziel ist nicht, ein System zu „gewinnen“ zu lassen. Ziel ist, strukturelle Unterschiede sichtbar zu machen.

Fazit von Teil 5

Ein wirkungsökonomischer Rucksack ist kein Meinungsinstrument. Er ist ein Bewertungsrahmen.

Er kombiniert:

- Physik
- Ökonomie
- Systemtheorie

Und er ersetzt die Reduktion auf CO₂ durch eine multidimensionale Betrachtung.

Damit wird Mobilität nicht ideologisch, sondern strukturell vergleichbar.

Im nächsten und letzten Teil führen wir alles zusammen: Was bedeutet diese Analyse für politische Entscheidungen, industrielle Strategien und individuelle Kaufentscheidungen?

Teil 6: Was folgt daraus für Politik, Industrie und individuelle Entscheidungen?

Wir haben gesehen:

- Der CO₂-Rucksack misst Emissionen - aber nicht Struktur.
- Mobilität verläuft entlang von drei Zeitachsen.
- Energiesysteme erzeugen Macht- und Abhängigkeitsprofile.
- Eine seriöse Bewertung braucht transparente Systemgrenzen und Sensitivitätsanalysen.

Nun stellt sich die entscheidende Frage: **Was folgt daraus praktisch?** Denn Analyse ohne Konsequenz bleibt akademisch.

1. Politik: Systementscheidungen statt Symbolpolitik

Wenn Mobilität Teil eines Energiesystems ist, dann ist die Wahl des Antriebs keine reine Technologiefrage, sondern eine Strukturentscheidung.

Politik entscheidet damit über:

- Importabhängigkeit
- Infrastrukturpfade
- Investitionszyklen
- industrielle Wertschöpfung
- Resilienz gegenüber geopolitischen Schocks

Ein fossiles System bedeutet dauerhafte Primärenergieabhängigkeit. Ein elektrifiziertes System bedeutet Infrastrukturaufbau und Materialkreisläufe. Beides kostet Kapital. Aber nur eines ist strukturell transformierbar.

Politische Bewertung sollte daher nicht fragen: „Welcher Antrieb ist heute günstiger?“

Sondern: „Welches System erzeugt langfristig geringere systemische Risiken?“

2. Industrie: Wettbewerbsfähigkeit in einer transformierenden Welt

Industrie denkt in Skaleneffekten, Innovationszyklen und globalen Märkten.

Thermodynamisch effizientere Systeme haben langfristig einen strukturellen Vorteil:

- geringerer Primärenergiebedarf
- geringere operative Kosten
- höhere Integration in digitale Systeme

Elektrifizierung ist nicht nur ein Klimathema. Sie ist ein Effizienz- und Wettbewerbsthema.

Gleichzeitig entstehen neue Abhängigkeiten - etwa bei Batterierohstoffen oder Zellfertigung.

Die strategische Frage lautet daher: Wie diversifiziert und zirkulär kann ein System gestaltet werden?

Industriepolitik muss hier zwischen kurzfristiger Stabilität und langfristiger Strukturverschiebung abwägen.

3. Infrastruktur als langfristiger Lock-in

Infrastrukturen haben Lebensdauern von Jahrzehnten.

Wer heute in:

- Raffinerien
- Verbrennermotorwerke
- fossile Logistik

investiert, bindet Kapital langfristig an ein System mit irreversibler Energieoxidation.

Wer in:

- Netze
- Speicher

- Ladeinfrastruktur
- erneuerbare Erzeugung

investiert, bindet Kapital an ein System, dessen Emissionsprofil mit dem Energiemix sinken kann.

Das ist ein fundamentaler Unterschied.

4. Individuelle Kaufentscheidung - was ist rational?

Auf individueller Ebene wird die Debatte häufig emotional geführt.

Rational betrachtet hängt die Entscheidung von mehreren Faktoren ab:

- reale Fahrleistung
- Zugang zu Ladeinfrastruktur
- Stromquelle
- Lebensdauer
- Kostenstruktur

Aber auch hier gilt: Man entscheidet nicht nur für ein Fahrzeug. Man entscheidet sich für die Teilnahme an einem System. Ein Fahrzeug ist eine Infrastrukturentscheidung im Kleinen.

5. Übergangsphase und Realität

Wichtig ist: Systeme transformieren nicht über Nacht.

Während der Übergangsphase existieren Mischsysteme:

- Strom mit fossilem Anteil
- Produktion mit unterschiedlichen Energiequellen
- globale Lieferketten

Das bedeutet:

Es gibt keine perfekte Lösung im Hier und Jetzt. Aber es gibt strukturell unterschiedliche Entwicklungsrichtungen. Und genau diese Richtung ist entscheidend.

6. Was der Wirkungsökonomische Rucksack sichtbar macht

Der CO₂-Rucksack beantwortet eine Frage:

Wie hoch sind die Emissionen?

Der wirkungsökonomische Rucksack beantwortet mehrere:

- Wie effizient ist die Energieumwandlung?
- Wie zirkulär ist das Materialsystem?
- Wie abhängig ist das System von externen Primärenergiequellen?

- Wie resilient ist es gegenüber geopolitischen Schocks?
- Wie transformierbar ist seine Emissionsstruktur?

Er erweitert den Blick von einer Emissionskennzahl hin zu einer Systembewertung.

7. Keine Ideologie, sondern Strukturvergleich

Diese Analyse bedeutet nicht:

- dass Elektromobilität automatisch optimal ist
- dass fossile Systeme keinerlei Vorteile haben
- dass es keine offenen Fragen bei Rohstoffen gibt

Sie bedeutet:

Wir vergleichen zwei unterschiedliche Organisationsformen von Energie und Mobilität.

Und diese Organisationsformen erzeugen unterschiedliche langfristige Wirkungen auf:

- Mensch
- Planet
- demokratische Stabilität

Schlussgedanke

Die Debatte um Elektroauto versus Verbrenner wird häufig emotional geführt. Doch jenseits von Lagerdenken bleibt eine nüchterne Erkenntnis:

- Mobilität ist kein Produktvergleich. Sie ist eine Systementscheidung.
- Der CO₂-Rucksack erklärt Emissionen. Der wirkungsökonomische Rucksack erklärt Struktur.
- Und wer über Zukunftsfähigkeit spricht, muss Struktur analysieren - nicht nur Zahlen addieren.

[Zurück zum Blog](#)