

## Technologiealternativen für eine emissionsminimierte Mobilität –

### Eine Bewertung der Technologieoptionen

Im Rahmen der „Academy for Future“ Klimakrise: Müssen wir jetzt handeln?

Heidelberger Akademie der Wissenschaften

Thomas Koch, Karlsruher Institut für Technologie

Die Ausführungen behandeln im wesentlichen Energie- und Emissionsfragestellungen des sehr vielschichtigen Themenfeldes des nachhaltigen Mobilitätssystem der Zukunft. Im Vordergrund steht hierbei das Emissionsverhalten von Fahrzeugantrieben. Selbstverständlich bedarf es eines ganzheitlichen Kraftaktes mit cleveren Lösungen für den öffentlichen Personennahverkehr, mit individueller Fahrradmobilität oder intelligenten weiterführenden Konzepten. So wird einleitend betont, dass eine ganzheitliche Optimierung nur durch eine Überlagerung von vielen Optimierungsansätzen gelingen kann. Die hohe PKW-Dichte, limitierte Transportmöglichkeiten aller vorhandener Verkehrswege und ein zugleich hoher Mobilitätsbedarf führen zu Herausforderungen. Verschiedene Technologiekonzepte ermöglichen den Weg in eine nachhaltige, CO<sub>2</sub> neutrale Zukunft der automobilen Mobilität. Wichtige weiterführende Aspekte der Mobilität wie Nutzfahrzeuge, Arbeitsmaschinen, Sonderfahrzeuge werden nicht gezielt diskutiert, obwohl deren Bedeutung natürlich ebenfalls sehr wichtig ist.

Rückblickend wird zunächst der Stand der Emissionstechnologie von verbrennungsmotorischen Fahrzeugantrieben beleuchtet. Selbstverständlich wird auf das Verhalten des Volkswagenkonzern ausdrücklich hingewiesen und die scharfe Kritik der Fachwelt an dessen Verhalten betont. Diese Kritik darf jedoch nicht den Blick auf die umfassenden Errungenschaften verbergen.

Die Schwefeldioxidimissionen (SO<sub>2</sub>) wurden durch die Entschwefelung des Kraftstoffes nahezu eliminiert. Der PKW-Beitrag zur SO<sub>2</sub> Immission ist mindestens um den Faktor 100 in den letzten 3 Jahrzehnten reduziert worden und kann als gelöst angesehen werden. Die städtischen SO<sub>2</sub>-Immissionen liegen ungefähr bei 2 mikrog/m<sup>3</sup> an befahrenen Straßen und damit um den Faktor 1000 unterhalb der maximalen Arbeitsplatzkonzentration. Es kann von einer Immissionsneutralität gesprochen werden. Natürlich ist die maximale Arbeitsplatzkonzentration nur für erwachsene, gesunde Menschen mit gleichzeitiger arbeitsmedizinischer Überwachung gedacht. Gleichwohl verdeutlicht der Faktor 100 bis 1000 der Unterschreitung die Größenordnung des Erreichten.

Die Kohlenmonoxidimissionen (CO) liegen heute in Städten bei circa 250 mikrog/m<sup>3</sup> und damit um den Faktor 100 unterhalb der maximalen Arbeitsplatzkonzentration. Die CO-Konzentration im Abgasstrang eines betriebswarmen Fahrzeuges nach ca. 1-2 Minuten Betriebszeit liegt deutlich unterhalb von 100 mikrog/m<sup>3</sup>, also ebenfalls typischerweise unterhalb der Umgebungsluft. Es kann von einer Immissionsneutralität gesprochen werden.

Die Kohlenwasserstoffemissionen (HC) der Stadtluft liegen heute etwa bei 400 mikrog/m<sup>3</sup>. Ein Vergleich mit der maximalen Arbeitsplatzkonzentration ist schwierig, da der Immissionswert die Summe aller HC-Moleküle umfasst und beim MAK-Wert einzelne Moleküle betrachten werden. Gleichwohl ist keine Emissionskomponente der Kohlenwasserstoffe als kritisch zu betrachten. Die HC-Gesamtkonzentration im Abgasstrang eines betriebswarmen Fahrzeuges, ebenfalls betrachtet nach spätestens 1-2 Minuten Betriebszeit, liegt wiederum deutlich unterhalb von 100 mikrog/m<sup>3</sup>. Auch hier erfolgt typischerweise kein relevanter Beitrag zur Umgebungsluft. Auch bei den Kohlenwasserstoffen kann daher von einer Immissionsneutralität gesprochen werden.

Große Anstrengungen wurden bei der Reduzierung der Partikelemissionen erzielt. Die typischen mittleren Partikelemissionen eines filtergereinigten Fahrzeuges betragen rund 0,2 bis 0,5 mikrog/km. Der Vergleich mit einer mittleren Verschleißemission einer Fahrradfelge in der Größenordnung von circa 2-5 mg/km durch Bremsenabnutzung oder 20-50 mg/km einer mittleren PKW-

Fahrzeugbremsenemission verdeutlicht die Nebensächlichkeit der dieselmotorischen Abgaspartikelkonzentration. Durch die Partikelfilter werden auch kleinste Partikel bis unterhalb von 20nm Durchmesser wirkungsvoll aus dem Abgasstrom gefiltert.

Große mediale Aufmerksamkeit erregten die Stickstoffoxidemissionen ( $\text{NO}_x$ ), die durch lokale  $\text{NO}_2$  Immissionen ein hohes Maß an regulatorische Bedeutung erhielten.  $\text{NO}_x$ -Emissionen können bei modernsten Fahrzeugantrieben nicht vollständig eliminiert werden. Die Konzentration im Abgas modernster Dieselmotoren liegt oberhalb der Umgebungsluft. So sind typische Werte im Abgastrakt circa 3 bis 20mal höher als die maximale Arbeitsplatzkonzentration. Natürlich wird dieser Anteil unmittelbar beim Entweichen in die Umwelt verdünnt. So liegt der Immissionsbeitrag einer modernsten PKW-Flotte (Annahme: alle Fahrzeuge sind mit modernster Technologie ausgestattet) an hochbelasteten Straßen bei einer direkt straßennahen Messung rund 1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . In den Gebäuden reduziert sich dieser Beitrag nochmals um mindestens 50%. Dieser Wert kann im Vergleich zum Langzeitfahrenwert (Richtwert II) des Ausschusses für Innenraumrichtwerte von  $\text{NO}_2$  von 60  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  aus dem Jahr 2019 betrachtet werden. Der  $\text{NO}_2$ -Verkehrsbeitrag in Gebäude liegt also ungefähr um den Faktor 100 unterhalb dieses Langzeitfahrenwertes und um den Faktor 1000 unterhalb der maximalen Arbeitsplatzkonzentration.

Die Emissionsthematik kann also als weitestgehend gelöst angesehen werden. Die kommende EURO7 Norm wird Sonderfahrzustände noch präziser regeln und Ergänzungen der sehr guten realfahrorientierten EURO6<sub>dfinal</sub> Abgasemissionsgesetzgebung vornehmen. Die Kaltstartphase wird nochmals reduziert werden, obgleich deren Immissionsbeitrag bereits heute minimal ist. Verbrennungsmotorische und Hybridantriebe können als quasi immissionsneutral eingestuft werden.

Somit liegen die Treibhausgasemissionen im Fokus. Zu diesen zählen auch Lachgas ( $\text{N}_2\text{O}$ ) und Methan ( $\text{CH}_4$ ). Der Verkehrsbeitrag von  $\text{N}_2\text{O}$  und  $\text{CH}_4$  zu den äquivalenten gesamten Treibhausgasemissionen von ca. 800 Millionen Tonnen pro Jahr beträgt nach Ausführungen des Umweltbundesamtes lediglich 0,25%. Eine weitere Regulierung ist sinnvoll und wird angestrebt, gleichwohl ist dies nicht die vordringlichste Herausforderung.

Entscheidend ist aus regulatorischer Sicht die Reduktion der  $\text{CO}_2$ -Emissionen, welche im Rahmen des EU Green Deals und des deutschen Klimaschutzgesetzes niedergeschrieben ist. In Deutschland wird eine gesamte  $\text{CO}_2$  Reduktion von 65% bis zum Jahr 2030 im Vergleich mit 2020 angestrebt. In den Ausführungen wird nun auf die Potentiale der individuellen automobilen Mobilität eingegangen. Im Kern sind drei Antriebskonzepte der Zukunft ersichtlich.

1. Mit elektrischer Energie kann direkt eine Batterie aufgeladen werden. Diese liefert über einen Elektromotor die Energie zum Vortrieb des Fahrzeuges. Die Elektromobilität hat überaus eindruckliche Fortschritte in den letzten Jahren erzielt und wird durch konsequente Technologieverbesserung in den nächsten Jahren weitere wichtige Fortschritte erzielen.
2. Alternativ kann aus der elektrischen Energie Wasserstoff mit Hilfe der Elektrolyse erzeugt werden. Dieser Wasserstoff kann unter Druck oder verflüssigt oder in einer Kombination aus beidem einem Fahrzeug zugeführt werden. Entweder über eine Brennstoffzelle mit Hilfe eines Elektromotors oder über einen Wasserstoffmotor kann die chemische Energie des Wasserstoffs schlussendlich auch in mechanische Energie überführt werden. In den Ausführungen wird auf diesen Weg der Nutzung des Wasserstoffes nicht vertieft eingegangen. Vor allem für schwere Nutzfahrzeugantriebe ist der Wasserstoffmotor eine wichtige Option der Zukunft.
3. Die dritte Option ist die Nutzung  $\text{CO}_2$ -neutraler Kohlenwasserstoffe reFuels. Hierbei muss zusätzlich zum Wasserstoff auch ein Kohlenstoff der Kraftstoffsynthese zugeführt werden, um einen Kohlenwasserstoff zu bilden. Auch heutige fossile Kraftstoffe sind Kohlenwasserstoffe. Die Kohlenstoffzufuhr kann entweder durch die Entnahme von  $\text{CO}_2$  aus der Luft erfolgen, oder aus Punktquellen (Zementwerk) oder mit Hilfe von biogenen Quellen, welche nicht im Wettstreit mit der Nahrungsmittelerzeugung oder sonstiger Flächennutzung stehen. Rund ein Viertel des Energiegehaltes könnte in Deutschland über biogene Quellen beigesteuert werden, was einen wertvollen Teilbeitrag darstellt. Für die Energiewandlung im thermodynamischen

Motor ist es nicht relevant, über welchen Pfad der reFuel Bestandteil gewonnen wurde. Es ist aufgezeigt worden, dass rund 25% CO<sub>2</sub> Reduktion über eine Teilbeimischung (z.B. R33 Kraftstoff für Diesel - 7% FAME, 26% paraffinisch. reFuel - ; G40 Kraftstoff für Benzin - 10% Ethanol, 30% MtG reFuel) möglich ist, ohne die heutigen komplizierten Kraftstoffspezifikationen zu verletzen. Es gibt sehr vielversprechende Analysen, so dass über den Kraftstoff über 50% CO<sub>2</sub>-Reduktionspotential abgebildet werden kann, ohne die heutigen Kraftstoffspezifikationen (Diesel EN590, Benzin EN228) zu verlassen. Somit ist eine Kompatibilität mit der Bestandsflotte möglich.

Ein Mobilitätssystem der Zukunft muss sehr vielschichtige Kriterien erfüllen. Dies trifft insbesondere auf die automobilen Mobilität zu. Wichtige Kriterien sind beispielsweise in Abbildung 1 dargestellt.



- Ganzheitliche Ökobilanz
- Gesellschaftliche Aspekte
- Europaweite Abstimmung
- Ertüchtigung der Infrastruktur
- Verfügbarkeit der benötigten Energie
- Verfügbarkeit der benötigten Rohstoffe
- Risikominimierung
- Finanzierbarkeit (Steuereinnahmen, Subventionen)
- Volkswirtschaftliche Aspekte
- Technische Umsetzbarkeit / Zeitleisten
- Energieeffizienz
- Marktkompatibilität in Europa / Bestandsflotte
- Weltweite Wettbewerbsfähigkeit
- Einsatz 365/24/7 unter allen Randbedingungen

**Eine vieldimensionale Optimierungsmatrix unter Berücksichtigung zahlreicher Aspekte ist zu lösen.**



### Abbildung 1: Anforderungen an ein Mobilitätssystem der Zukunft

Die batterieelektrische Mobilität wird politisch präferiert und intensiv gefördert. Moderne Antriebe der Zukunft werden jedoch zu einem hohen Anteil auch aus Hybridantrieben bestehen, für die nachhaltige reFuels zur Verfügung gestellt werden müssen.

Es wird eine Notwendigkeit der batterieelektrischen Mobilität als auch von chemischen Energieträgern für die individuelle Mobilität in der Zukunft gesehen.

Folgende Kernaussagen zu reFuels lassen sich zusammenfassen. Für eine korrekte Betrachtung der CO<sub>2</sub>-Emissionen eines elektrischen Verbrauchers ist der Mittelwertansatz nicht zulässig. Im Sinne der Grenzstrombetrachtung ist auch im Jahr 2030 an über 6000 Stunden im Jahr die Notwendigkeit gegeben, dass fossile Kraftwerke zur Stützung des Stromnetzes benötigt werden. So ist die Bilanz dieser Grenzverbraucher heranzuziehen und nicht die Bilanz eines Strommittelwertes. Der Fehler beträgt mehr als den Faktor 2 für die CO<sub>2</sub> Bilanz in Deutschland. Energiespeicherung in Überschussstunden hilft, löst aber das Problem nicht!

Die Technologielösung der reFuels ist auch kostenseitig attraktiv. Synthetische reFuels, die aus elektrischer Energie gewonnen werden, hängen kostenseitig vor allem an den Stromgestehungskosten. Bei großflächig bereits erreichten 1 €-Cent/kWh sind Kraftstoffkosten deutlich unterhalb von 1 €/l kommuniziert. Biogene Kraftstoffe wie HVO kosten ebenfalls deutlich weniger als 1 €/l. Dies sind die Kosten für reFuels Reinstoffe, die natürlich auch dem fossilen Kraftstoff beigemischt werden können.

Die Energiebilanz der synthetischen Kraftstoffe, die mit Hilfe von elektrischer Energie gewonnen werden, ist ebenfalls nicht unattraktiv. In den meisten Studien wird keine umfassende Bilanzierung zugrunde gelegt. Im Vergleich der Reichweite einer Kilowattstunde an elektrischer Energie kann man im Mittel 2 bis <https://www.youtube.com/watch?v=XR1MmTbskog3> mal größere Distanzen bei der direkten Nutzung im Batteriefahrzeug zurücklegen, als über den Zwischenschritt einer reFuels Produktion und Umwandlung in einem modernen Hybrid. Bei der elektrischen Bilanz sind Hoch- bis Niederspannungsverluste im Stromnetz, Wallboxverluste, Ladeverluste, Thermomanagement- und Konstantstromverluste bis hin zu weiteren Realfahrteffekten wie mittleren Heizungsverlusten zu berücksichtigen. Die wissenschaftliche Gesellschaft für Kraftfahrzeugtechnik und Motorenbau hat neben anderen Institutionen auf diesen Bilanzvergleich hingewiesen. Werden Photovoltaik- oder Windkraftanlagen an Gunststandorten der Erde aufgebaut, so ist wiederum deren Erntefaktor um das 2 bis 4 fache besser als beim Standort in Baden-Württemberg. Es ergibt sich somit kein relevanter Bilanzunterschied zwischen batterieelektrischer und reFuels-getriebener Mobilität. Energiespeicherfähigkeit, also zeitlich und örtlich unabhängige Verfügbarkeit der Energie, ist ein entscheidendes Kriterium.

Das Emissionsverhalten von reFuels getriebenen Fahrzeugen ist, wie einleitend bereits für fossile Kraftstoffe aufgezeigt, auf einem sehr niedrigen Niveau und kann als quasi immissionsneutral angesehen werden, so dass hier kein Grund zur Sorge besteht.

So liegen reFuels noch nicht im ausreichenden Maße vor, weshalb Produktionsanlagen realisiert werden müssen. Bei der reFuels Produktion fallen Koppelprodukte an, je nach Anlagenauslegung mit unterschiedlichen Anteilen an kurzkettigen Kohlenwasserstoffen und Mitteldestillaten. Eine Nutzung für die Luftfahrt (Mitteldestillat Kerosin) kann nur über eine gleichzeitige Querfinanzierung durch landgebundene Mobilitätsbestandteile realisiert werden. Eine einseitige Nutzung der reFuels nur für Luft- und Schifffahrt ist nicht realisierbar. Beide Mobilitätssegmente bedingen sich hier gegenseitig.

China setzt auf reFuels als eine wichtige Säule der Zukunftsstrategie. So hat sich die chinesische Regierung sowohl zur Nutzung von Wasserstoff als auch von Kohlenwasserstoffen in der Mobilität ausgesprochen. Es ist also nur noch die Frage, ob der europäische Markt die CO<sub>2</sub>-neutralen Energieträger ebenfalls in Zukunft erhalten wird, oder aufgrund der bisherigen, weitestgehend distanzierten Bewertung kaum Berücksichtigung bei der internationalen Zulieferung findet.

Es wird auch auf volkswirtschaftliche Aspekte hingewiesen, da ein Großteil der Zulieferbetriebe mit großer Sorge in die Zukunft blicken, obgleich oftmals noch eine weltweite Technologieführerschaft vorliegt.

Mit noch größerer Sorge wird die intensive Abhängigkeit der Rohstoffe gesehen. Insbesondere Rohstoffe für Elektromotoren kommen fast ausschließlich aus dem chinesischen Raum. Eine Abhängigkeit von wenigen Lieferanten wird wie bei der Energiefrage als kritisch erachtet.

Auf soziale Aspekte und insbesondere auf die Fragestellung, wie sich Menschen im unteren Bereich des Einkommensspektrums eine kostengünstige automobilen Langstreckenmobilität leisten können, wird ebenfalls hingewiesen.

In Summe wird ein ausgewogener Mix an Technologien angeregt, welche in Zukunft die individuelle Mobilität je nach Kundenpräferenz befriedigen sollten. Nachhaltig werden alle Technologien mittelfristig sein.

Der Primärenergieträger ist hierbei entscheidend und nicht die Energiewandlung im Fahrzeug!