

Gedanken zur Zukunft des Automobils

Journal Article

Author(s):

Guzzella, Lino

Publication date:

2009-07

Permanent link:

<https://doi.org/https://doi.org/10.3929/ethz-c-000565214>

Rights / license:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#)

Originally published in:

at - Automatisierungstechnik 57(7), <https://doi.org/10.1524/auto.2009.0783>

Gedanken zur Zukunft des Automobils

Lino Guzzella, ETH Zürich

Zusammenfassung Eine intensive individuelle Mobilität ist ein typisches Merkmal einer wohlhabenden Gesellschaft. Den vielen Vorteilen dieser Mobilität stehen jedoch leider auch relevante Nachteile gegenüber. In diesem Aufsatz werden zwei daraus erwachsende zentrale Probleme, nämlich der Verbrauch an fossilen Energieträgern und der CO₂-Ausstoß, näher betrachtet. In allen Überlegungen wird versucht, ein möglichst ganzheitliches Bild zu skizzieren und technisch realistische Optionen für die Zukunft aufzuzeigen, wobei insbesondere die Rolle der Automatisierungstechnik hervorgehoben wird.

▶▶▶ Summary The level of individual mobility in our society is closely related to its affluence. Obviously, well-developed public and private transportation systems offer many benefits, but cause relevant problems as well. This article focuses on automobiles and on two closely related problems, i. e., the emission of carbon dioxide and the consumption of primary energy resources. A comprehensive description of the current situation is given and some of the most important options available for future improvements are described, highlighting the role automatic control systems can play in this development.

Schlagwörter Fahrzeugantriebssysteme, Verbrauchsreduktion, Schadstoffreduktion, Mechatronik im Automobil ▶▶▶

Keywords Vehicle propulsion systems, reduction of fuel consumption, reduction of pollutant emission, mechatronics for automobiles

Individuelle Mobilität – Fluch und Segen

Die individuelle Mobilität bringt jeder Gesellschaft enorme Vorteile, anders wäre die in den letzten hundert Jahren beobachtete Entwicklung des Automobilbestandes schlicht nicht zu erklären. Diese Beobachtung gilt dabei nicht nur für die Schweiz; denn wie Bild 1 zeigt, besteht offenbar in allen Weltgegenden ein klarer Zusammenhang zwischen Wirtschaftskraft und Automobildichte.

Dieser Zusammenhang zwingt aber eine beunruhigende Erkenntnis auf:

- Offenbar wird eine Sättigung des Automobilbestandes erst bei etwa 0,5 Fahrzeugen pro Person erreicht.
- Die heute weltweit etwa 800 Millionen betriebenen Fahrzeuge befinden sich vornehmlich in den OECD-Ländern, in denen etwa 1,2 Milliarden Menschen leben.
- Länder wie China, Indien, Brasilien und Russland, in denen heute etwa drei Milliarden Menschen leben, haben wirtschaftliche Wachstumsraten, welche sie in absehbarer Zeit auf ein ähnliches ökonomisches Niveau wie die OECD-Staaten bringen wird.

- Es ist deshalb zu erwarten, dass in den nächsten Jahren global betrachtet ein enormer Zuwachs an Automobilen zu verzeichnen sein wird.

Diese Entwicklung kann zu ökologischen und ökonomischen Verwerfungen führen. Welches sind nun die wichtigsten dieser Probleme? Spontan werden viele Befragte die Punkte „giftige Abgase“, „Unfälle“, „Lärmbelastung“, „Landschaftsverbrauch“, „Treibhauseffekt bzw. CO₂-Ausstoß“ und „Verbrauch endlicher (fossiler) Energiereserven“ nennen. Welche Elemente dieser Liste sind prioritär anzugehen und welche Probleme können in absehbarer Zukunft als gelöst betrachtet werden?

Die Antwort auf diese Frage ist nicht ganz einfach. Sicher ist, dass die Luftqualität in vielen Städten im OECD-Raum in den letzten Jahren spürbar verbessert wurde und dass mit den absehbaren weiteren Verschärfungen der Abgasnormen dieses Problem als gelöst betrachtet werden kann. Dieser Trend wird sich wohl mittelfristig auch in anderen Weltgegenden einstellen, da für die Lösung dieses Problems technisch machbare und wirtschaftlich tragbare Lösungen bekannt sind.

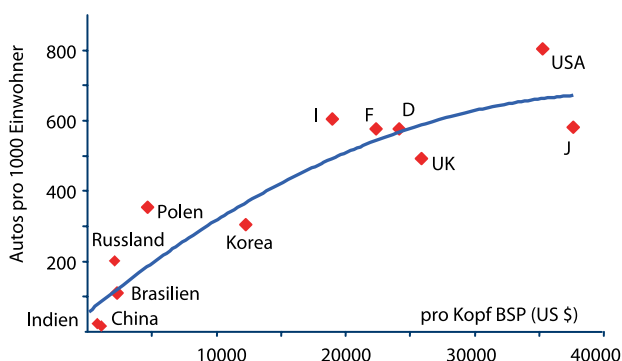


Bild 1 Autodichte als Funktion des Bruttoinlandprodukts in ausgewählten Ländern, Stand 2005. Quelle IEA, 2006.

Auch die Unfallzahlen weisen in einigen Ländern einen grundsätzlich positiven Trend auf (49 Unfälle pro Million Einwohner in der Schweiz im Jahr 2006 gegenüber 192 im Jahr 1980, Quelle BfU 2007). Es ist klar, dass dieser Trend mit Nachdruck und Engagement weiterverfolgt werden muss. Technische, bauliche und verkehrserzieherische Maßnahmen werden hier hoffentlich eine Fortsetzung dieser Entwicklung ermöglichen.

Der Lärm und der Landschaftsverbrauch sind unbestreitbar weitere Nachteile des Individualverkehrs. Für die direkt Betroffenen stellen sie große Probleme dar, auf einer globalen Skala spielen diese Nachteile allerdings eine weniger zentrale Rolle.

Zentral ist hingegen der Energieverbrauch im Individualverkehr und die damit verbundenen Probleme. Solange fossile Kohlenwasserstoffe die dominante Energiequelle des Individualverkehrs sind, können der unkontrollierte CO₂-Ausstoß und Ressourcenverbrauch zu großen globalen Problemen führen. Ökonomische und soziale Verwerfungen sind eine realistische Gefahr, wenn der „Energiehunger“ der Welt nicht gesättigt werden kann. In Anbetracht der oben gemachten Prognose über die Zunahme des globalen Automobilbestandes ist die von der Internationalen Energieagentur (IEA) prognostizierte Zunahme des Weltprimärenergiebedarfs um 100% in den nächsten 50 Jahren also ein absolut realistisches Szenario. Dieser Aufsatz konzentriert sich deshalb auf die Frage des Treibstoffverbrauchs im Individualverkehr.

Dem Motto „Sparsame Automobile sind unsere besten Ölquellen“ folgend soll dabei das Schwergewicht auf die technischen Optionen zur Reduktion des Treibstoffverbrauchs gelegt werden. Alternative Treibstoffe bzw. neue Primärenergiequellen werden ebenfalls behandelt, deren Bedeutung ist jedoch eher langfristig zu sehen.

Es ist klar, dass der Individualverkehr nicht der einzige „Schuldige“ an der Energieproblematik ist (Schätzungen gehen davon aus, dass weltweit etwa 15% des gesamten vom Menschen verursachten CO₂-Ausstoßes aus dem Straßenverkehr stammen). Es ist jedoch unbestritten, dass ein spürbarer Anteil der Umweltprobleme durch diese Mobilität verursacht wird. Daher ist es eine Selbstverständlichkeit, dass große Anstrengungen

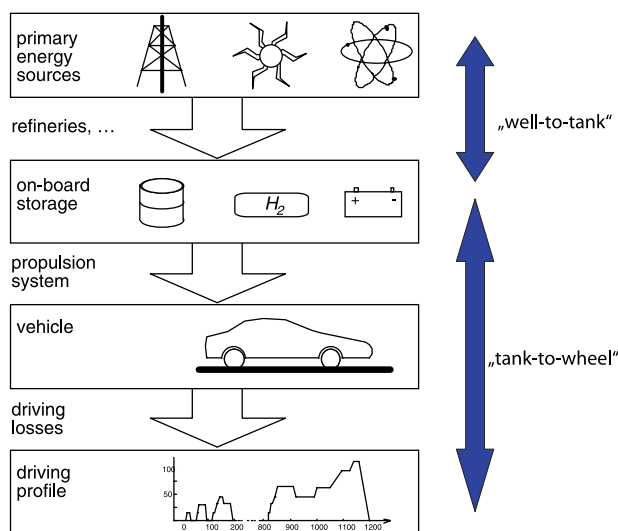


Bild 2 Energiewandlungsstufen von den Primärenergiequellen, über die Treibstoffe, die mechanische Energie im Fahrzeug und die Energieverluste im Fahrzyklus.

zur Verbesserung der Situation gemacht werden müssen. Da der Individualverkehr wohl am schwersten von der „Droge Erdöl“ zu entwöhnen sein wird, ist die Entwicklung sparsamer Fahrzeuge von großer Bedeutung. Dieser Aufsatz soll die wichtigsten dafür zur Verfügung stehenden technischen Optionen aufzeigen. Es sei aber an dieser Stelle nicht verschwiegen, dass rein technische Maßnahmen nicht ausreichen werden. Ein verändertes Mobilitätsverhalten, welches die Vermeidung bzw. die Umlagerung auf weniger energieintensive Transportmittel betont, wird in Zukunft unumgänglich sein.

Die Analyse des Treibstoffverbrauchs von Automobilen umfasst viele Aspekte. In dem vorliegenden Aufsatz werden nur die im Betrieb anfallenden Treibstoffverbräuche betrachtet, da die zur Herstellung und Rezyklierung des Fahrzeugs benötigte „graue“ Energie im Regelfall deutlich unter 20% dieses Werts bleibt. Um ein einigermaßen vollständiges Bild der Zusammenhänge zu erhalten, muss man mindestens die in Bild 2 dargestellten Zwischenschritte in Betracht ziehen. Im Folgenden werden die einzelnen Aspekte „bottom up“ diskutiert.

Fahrprofil und Fahrzeuge

Eine erste wichtige Fragestellung betrifft das gewählte Fahrprofil. Selbstverständlich muss eine normierte („pro 100 km Fahrdistanz“) Betrachtungsweise gewählt werden. Aber das ist noch nicht ausreichend, da es einen erheblichen Unterschied ausmacht, ob man eine gegebene Strecke in der gleichen Zeit mit konstanten 60 km/h oder durch ständiges Beschleunigen auf 120 km/h und Abbremsen auf 0 km/h durchfährt.

Im vorliegenden Aufsatz wird deshalb der so genannte „Neue Europäische Fahrzyklus“ (NEFZ, Fachbezeichnung MVEG-95) als einzige Basis gewählt. Dieser Zyklus, der in Bild 2 unten angedeutet ist, wird bei allen Zulassungsprüfungen in der EU verwendet. Er wurde

ursprünglich zur Erfassung der ausgestoßenen Schadstoffmenge definiert, später aber auch für die Messung des Treibstoffverbrauchs verwendet.

Alltagsfahrprofile weichen zum Teil stark vom NEFZ ab, so dass typischerweise höhere Verbräuche resultieren. Wenn alle Hersteller den NEFZ verwenden und somit Vergleichbarkeit herrscht und wenn kein „cycle beating“ stattfindet¹, ist dies jedoch kein grundsätzliches Problem.

An dieser Stelle sei kurz auf den wohl kosteneffizientesten Ansatz zum Treibstoffsparen hingewiesen: In der Tat könnten in der Schweiz sofort und ohne irgendwelche Investitionen in die Straßeninfrastruktur oder in die Fahrzeugflotte tätigen zu müssen, jährlich über 100 Millionen Liter Benzin oder Diesel eingespart werden, wenn sämtliche Automobilisten ihren Fahrstil konsequent auf „Eco-driving“ umstellen würden.²

Etwas bewegen heißt mechanische Energie einsetzen. Ist das Fahrprofil einmal gewählt, so stellt sich die Frage, wie viel mechanische Energie zur Bewältigung dieses Fahrprofils benötigt wird. Die folgenden Kenngrößen sind in dieser Analyse wichtig:

- Aerodynamische Verluste definiert durch die Größe der Fahrzeugfrontfläche A_f und den Widerstandsbeiwert c_w des Fahrzeugs.
- Rollreibungsverluste definiert durch den Reifenreibbeiwert c_r und durch die Fahrzeugmasse m .
- Beschleunigungsverluste alleine definiert durch die Fahrzeugmasse m .

Die folgende Gleichung liefert einen Schätzwert für die mechanische Energie, die benötigt wird, um 100 km im NEFZ zu durchfahren:

$$E \approx A_f \cdot c_w \cdot 19.000 + m \cdot c_r \cdot 840 + m \cdot 11 \text{ kJ}/100 \text{ km} \quad (1)$$

Tabelle 1 zeigt für vier Fahrzeugkategorien die Energiemengen, die sich aus diesem Schätzwert ergeben. Es fällt auf, dass besonders die Fahrzeugmasse einen entscheidenden Einfluss auf den Energieverbrauch hat. In der Tat lässt sich aus der Gleichung (1) herleiten, dass die Sensitivität des Energieverbrauchs bezüglich der Fahrzeugmasse etwa doppelt so groß ist wie bezüglich der anderen beiden Parameter. Dies bedeutet, dass etwa 0,7% der benötigten mechanischen Energie eingespart werden kann, wenn die

¹ Unter „cycle beating“ versteht man das Optimieren eines Antriebssystems mit dem einzigen Ziel, im Testzyklus gut abzuschneiden.

² Unter „Eco-driving“ versteht man einen vorausschauenden und sparsamen Fahrstil, der einfach zu erlernen ist und auch noch den Motor schont und die Sicherheit erhöht. Mehr Informationen dazu finden sich z. B. auf der Website <http://www.eco-drive.ch/>.

Fahrzeugmasse um 1% reduziert wird. Reduziert man hingegen die aerodynamischen oder die rollreibungsbedingten Verluste um 1%, so spart man nur etwa 0,3% der Fahrenergie ein.

Wie Tabelle 1 zeigt, liegt der Schlüssel zu deutlich kleineren Energieverbräuchen also primär in der Wahl des Fahrzeugs. Das als „Ecomobil“ bezeichnete Fahrzeug ist heute zwar machbar, aber nur zu höheren Kosten und bei geringeren Sicherheitsstandards (mehr dazu siehe unten). Das mit „Kompakt“ bezeichnete Fahrzeug ist hingegen wirtschaftlich herstellbar und entspricht den heutigen Sicherheitsstandards.

Obwohl es also eine Binsenwahrheit zu sein scheint, geht dieser Aspekt in den Diskussionen um sparsame Antriebe oft unter: Der einfachste Ansatz, um Treibstoff zu sparen, besteht darin, ein leichteres und kleineres Fahrzeug zu kaufen.

Antriebssysteme heute und morgen

Gemäß dem in Bild 2 aufgespannten Rahmen besteht der nächste Umwandelungsschritt darin, aus dem mitgeführten Treibstoff in einem geeigneten Antriebssystem mechanische Energie bereitzustellen. Würden in diesem Energiewandlungsschritt keine Verluste auftreten, so könnte das Mittelklasseauto aus Tabelle 1 mit etwa 1,4 l Diesel 100 km weit fahren. Tatsächlich wird ein solches Auto, mit einem guten Dieselmotor ausgerüstet, jedoch eher um die 7 l Treibstoff pro 100 km benötigen. Offenbar können also nur 20% des Energieinhalts des Treibstoffs in mechanische Energie umgewandelt werden, d. h. der durchschnittliche Wirkungsgrad ist nur etwa 20%. Dieser problematische Aspekt soll im folgenden Abschnitt diskutiert werden.

Heutige Verbrennungsmotoren weisen im *Bestpunkt* eigentlich viel bessere Wirkungsgrade auf: etwa 37% für Benzin-, bzw. über 40% für Dieselmotoren. Diese Kennwerte werden in den nächsten Jahren kaum spürbar ansteigen. Das größte Potential liegt im so genannten „Teillastproblem“, welches in Bild 3 illustriert ist. In der Tat haben moderne Benzinmotoren im Teillastbereich (grau schattiert in Bild 3), in welchem sie die meiste Zeit betrieben werden, einen Wirkungsgrad von nur etwa 17% (dieser Wert liegt für Dieselmotoren bei etwa 20%). Dieses Potential (Faktor 2 im Treibstoffverbrauch) gilt es in Zukunft – mindestens teilweise – zu erschließen.

Um das Teillastproblem vollständig zu erfassen, muss man sich jedoch noch klar werden, wieso heutige Motoren überhaupt die meiste Zeit bei relativ kleinen

Tabelle 1 Vergleich diverser Fahrzeugklassen bezüglich deren Verbrauch an mechanischer Energie (in MJ/100 km NEFZ).

	Sport-Utility	Mittelklasse	Kompakt	Ecomobil
Fahrzeugmasse m (kg)	2500	1500	1200	800
Aerodynamik $A_f \cdot c_w$ (m ²)	1,22	0,80	0,66	0,42
Rollreibung c_r (-)	0,015	0,013	0,012	0,008
Energie E (MJ/100 km)	80	48	37	22

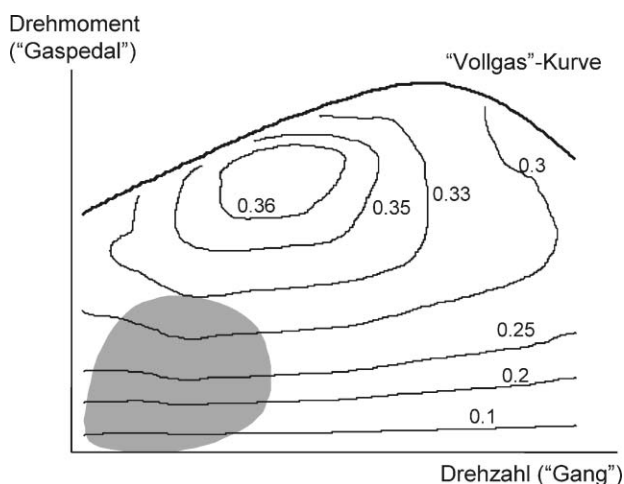


Bild 3 Motorkennfeld eines modernen Benzinmotors. Die Drehzahl des Motors wird auf der Abszisse, das Drehmoment („Rotationskraft“) auf der Ordinate aufgetragen. Die dicke Kurve zeigt das maximale Drehmoment an. Die dünnen Kurven verbinden alle Punkte mit gleichem Wirkungsgrad (0,36 bedeutet, dass 36% der Treibstoffenergie in mechanische Energie umgewandelt werden). Die meiste Zeit wird jedoch in der grau schattierten Zone gefahren. In diesem „Teillastbereich“ sind die Wirkungsgrade der Motoren viel schlechter.

Drehmomenten betrieben werden. Die Hauptursache dafür liegt in dem heute von vielen Käufern geforderten hohen Beschleunigungsvermögen, der so genannten „Fahrbarkeit“ oder „Sportlichkeit“ der Automobile. In der Tat ist es so, dass etwa 110 kW (150 PS) Motorenleistung benötigt werden, um ein Mittelklasseauto (siehe Tabelle 1) in etwa 10 s aus dem Stillstand auf 100 km/h zu beschleunigen. Im Durchschnitt des NEFZ benötigt dasselbe Fahrzeug aber nur etwa 7 kW (10 PS) Leistung und die Leistungsanforderung übersteigt im ganzen Zyklus nie den Wert von 30 kW (40 PS). Mit anderen Worten: Die heutigen Motoren laufen die meiste Zeit in einem ungünstigen Betriebszustand nur damit in seltenen Momenten hohe Beschleunigungswerte erreicht werden können. Ein weiterer sofort wirksamer Ansatz zur Reduktion des Treibstoffverbrauchs besteht also darin, beim Kauf eines Automobils die jeweils kleinste Motorvariante zu wählen. Diese wird für den Alltagsgebrauch immer noch mehr als genügend Leistung aufweisen, aber besonders im Stadtverkehr deutlich weniger Treibstoff verbrauchen als die leistungsstärkste Motorvariante.

Das Teillastproblem zeigt auch eine der Hauptrichtungen auf, welche zu deutlich besseren Motoren führen kann. Kleinere, aber mit einem Turbolader hoch aufgeladene Benzinmotoren sind ein dazu heute bereits verwendeter Ansatz. Dieselmotoren,³ welche in der Teillast prinzipbedingt bessere Verbrauchswerte aufweisen, stellen eine andere interessante Lösung dar, besonders wenn der Anteil an Hochlastfahrten groß ist. Nutz-

³ Dieselmotoren können gleich „sauber“ wie Benzinmotoren sein. Dies bedingt zwar einen höheren technischen Aufwand und führt damit zu höheren Herstellungskosten, die Technik dazu ist aber im Wesentlichen ausgereift. Mit den (voraussichtlich) im Jahr 2012 in Kraft tretenden Abgasnormen wird dieser Zustand erreicht sein.

fahrzeuge, welche vor allem im Fernverkehr operieren, werden deshalb noch lange mit (in Zukunft sauberen) Dieselmotoren ausgerüstet werden.

Hybridfahrzeuge verwenden in der heute gebräuchlichen Konfiguration zur Verbesserung des Teillastwirkungsgrades zwei Antriebsmotoren. Der Verbrennungsmotor wird deutlich kleiner und damit sparsamer dimensioniert als in vergleichbaren konventionellen Automobilen. Die fehlenden Beschleunigungsreserven werden dann im Bedarfsfall von einem Elektromotor geliefert. Da dieser nur kurze Zeit aktiv ist, spielt die relativ kleine Energiedichte der Batterien (siehe unten) keine Rolle. Ein solches hybrides Antriebssystem weist auch weitere Vorteile auf: die Möglichkeit, extreme Schwachlastzustände (Stillstand, Kriechen etc.) rein elektrisch und damit viel effizienter zu fahren, und die Möglichkeit, beim Bremsen einen Teil der im Fahrzeug gespeicherten mechanischen Energie zu rekuperieren und in den Batterien zwischenzulagern. Besonders im Stadtverkehr stellen deshalb Hybridfahrzeuge eine sinnvolle Alternative dar.

Fasst man die in diesem Abschnitt gemachten Aussagen zusammen, kann man feststellen, dass in den nächsten fünf bis zehn Jahren wohl keine radikalen Änderungen an den Fahrzeugkonzepten zu erwarten sind. Stetige kleine Schritte könnten jedoch heute den Flottendurchschnittsverbrauch in der Schweiz von etwa 7,6 l/100 km um etwa 20% reduzieren, falls der Trend zu immer größeren und leistungsstärkeren Automobilen gebrochen werden kann.

Treibstoffe und vorgelagerte Prozesse

Das vielleicht etwas ernüchternde Fazit des letzten Abschnitts motiviert die Industrie und die Forschung immer wieder dazu einen Ausweg zu suchen und neue Treibstoffe vorzuschlagen. Die bekanntesten davon sind: Erdgas, Agro-Treibstoffe, Wasserstoff, und Elektrizität. Diese Alternativen werden im folgenden Abschnitt weiter unten kurz diskutiert.

Heutige Antriebssysteme bestehen zu fast 100% aus Verbrennungsmotoren, welche flüssige Kohlenwasserstoffe (Benzin und zunehmend Dieselloil) als Treibstoffe verwenden. Es ist durchaus interessant sich zu fragen, wieso dies eigentlich so ist. In der Tat gab es kurz vor dem Beginn des zwanzigsten Jahrhunderts andere Ansätze, welche in vielen Aspekten den damaligen Verbrennungsmotoren überlegen waren: Dampfantriebe konnten deutlich größere Drehmomente aus dem Stand erzeugen und Elektroantriebe waren zuverlässiger, bequemer und leistungsfähiger. Dampfantriebe erwiesen sich jedoch als zu schwer und die Tatsache, dass man ein paar Stunden vor der Abfahrt den Kessel einheizen musste, erwies sich ebenfalls als ein nicht besonders gutes Verkaufsargument. Der Konkurrent „Elektroantrieb“ hingegen war da schon ernster zu nehmen. Solange die Distanzen und die Geschwindigkeiten klein blieben, waren diese Systeme den Verbrennungsantrieben überlegen. Wollte man aber weitere Strecken mit höheren Geschwin-

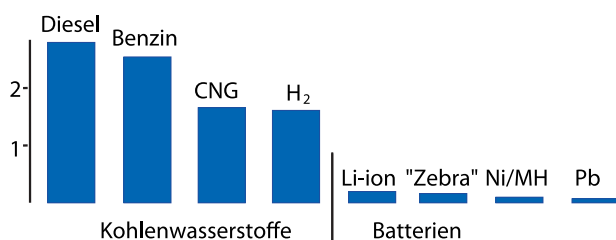


Bild 4 Netto-Energiedichten diverser Bordenergeträger in kWh/kg („netto“ bedeutet, dass die mittleren Wirkungsgrade der Antriebssysteme berücksichtigt sind). CNG = komprimiertes Erdgas, H₂ = komprimierter Wasserstoff, „Zebra“ = Nickel-Metallchlorid Hochtemperaturbatterien, Ni/MH = Nickel Metallhydrid, Pb = Blei-Gel-Batterien.

digkeiten fahren, dann zeigte sich bald, dass die Batterien dafür nicht geeignet waren.

An dieser Situation hat sich, trotz großer Anstrengungen, in den letzten hundert Jahren, nicht viel geändert. Wie Bild 4 zeigt, weisen flüssige Kohlenwasserstoffe eine gegenüber Batterien mindestens fünfzehnfach höhere Energiedichte auf. Dies auch, wenn man die gegenüber Elektromotoren⁴ deutlich größeren Wandlungsverluste der Verbrennungsmotoren berücksichtigt (mehr dazu unten). Diese Tatsache und die Ende des neunzehnten Jahrhunderts gefundenen großen Erdöllager waren die für den Durchbruch der Verbrennungsmotoren ausschlaggebenden Gründe.

Erdgas ist eine durchaus interessante Alternative, welche einen Beitrag zur CO₂-Problematik leisten kann.⁵ Wenn dieser Treibstoff durch Vergärung von Biomasse gewonnen wird, dann ergibt sich eine sehr günstige „well-to-wheel“-Bilanz (siehe Bild 2). Die Wirkungsgrade von Erdgasmotoren und die Energiedichten der Erdgastanks sind aber eher schlechter als die der entsprechenden konventionellen Systeme. Zudem ist Erdgas eine fossile Ressource, die für diverse andere Zwecke, insbesondere die Stromerzeugung, sehr gut genutzt werden kann.

Auch Agro-Treibstoffe sind eine durchaus interessante Alternative. Allerdings sind die Potentiale beschränkt⁶ und es sind zudem andere, daraus entstehende Nachteile zu beachten wie zum Beispiel schlechte „well-to-wheel“-Bilanzen, Landverbrauch, lokale Schadstoffe, Preisdruck auf Nahrungsmittel, wenn Zucker-basierte Verfahren eingesetzt werden etc. Wenn Agro-Treibstoffe überhaupt

⁴ Der Film „Who killed the electric car?“ (2006, Regie Chris Paine) versuchte eine Verschwörungstheorie zu konstruieren, in der die Firma GM beschuldigt wurde, ihren „erfolgreichen“ EV-1 Elektrofahrzeug-Prototyp bewusst torpediert zu haben. Die korrekte Antwort auf die im Filmtitel gestellte Frage lautet aber ganz lapidar: „The batteries ...“

⁵ Benzin und Diesel weisen ein Verhältnis von Kohlenstoff zu Wasserstoff von etwa 1 : 2 auf, bei Erdgas ist dieses Verhältnis etwa 1 : 4. Aus diesem Grund entsteht bei der Verbrennung von Erdgas mehr Wasser und weniger Kohlendioxid als bei der Verbrennung von Benzin oder Diesel. Da zudem pro kg Masse bei Erdgas 15% mehr Energie freigesetzt wird, reduziert sich der totale CO₂-Ausstoß um etwa 20–25%.

⁶ Schätzungen gehen davon aus, dass in der Schweiz höchstens 10% des Treibstoffverbrauchs durch im Inland produzierte Agro-Treibstoffe gedeckt werden könnten.

einen spürbaren Einfluss haben sollen, dann müssen Wege gefunden werden, wie Zellulose-basierte Verfahren wirtschaftlich betrieben werden können.

Bei Wasserstoff muss man zuerst einmal festhalten, dass diese Substanz keine Energiequelle, sondern ein Energieträger ist. Bisher hat man nämlich auf der Erde keine nennenswerten Vorkommen an freiem Wasserstoff gefunden. Nur in gebundener Form (in Wasser, in Kohlenwasserstoffen etc.) kommt diese Substanz in großen Mengen vor. Die Abspaltung des Wasserstoffs aus diesen Substanzen benötigt aber große Energiemengen, welche in der Gesamtbilanz berücksichtigt werden müssen.

Bild 5, links, zeigt ein mögliches Szenario wie Wasserstoff mittels Brennstoffzellen und Elektroantriebe relativ rasch eingesetzt werden könnte.⁷ Das Ergebnis fällt je nach Stromerzeugungsart stark unterschiedlich aus: Stehen CO₂-neutrale Primärenergiequellen zur Verfügung (Wind, Kernkraft etc.), dann entsteht im Betrieb natürlich kein CO₂. Werden hingegen fossile Energieträger zur Stromerzeugung eingesetzt, so ergibt sich ein eher ernüchterndes Bild: Ein Mittelklassefahrzeug, welches 48 MJ mechanische Energie pro 100 km benötigt, würde im besten Fall etwa 150 g CO₂ pro km ausstoßen, im schlechtesten Fall⁸ aber 570 g CO₂ pro km, also deutlich mehr als die 180 g CO₂ pro km welche ein Fahrzeug mit Dieselmotor in etwa ausstoßen würde.

Interessanter ist die direkte Nutzung der einmal produzierten Energie in Elektrofahrzeugen. Wie Bild 5, rechts, zeigt, wird mit diesem Ansatz aus der gleichen Menge an Primärenergie etwa doppelt so viel mechanische Energie erzeugt, bzw. bei fossilen Primärenergiequellen halb so viel CO₂ ausgestoßen. Natürlich ist das Problem dieses Ansatzes die gegenüber einem Wasserstoffspeicher relativ kleine Energiedichte der Batterie.

Dieses Problem ist in einem Hybridfahrzeug nicht relevant. Es ist deshalb zu erwarten, dass schon bald so genannte „plug-in“ Hybridfahrzeuge angeboten werden. Diese Fahrzeuge besitzen genügend Batteriekapazität, um einen typischen Arbeitsweg rein elektrisch fahren zu können. Die Batterien werden dann zuhause und am Arbeitsort mit kleinen Leistungen (< 1 kW) und damit effizient und batterieschonend geladen. Ist der Arbeitsweg 20 km lang und wird ein Kompaktauto benutzt (siehe Tabelle 1), dann müssten mit heutiger Technologie (Ni-MH) etwa 50 kg Batterien vorgesehen werden. Wenn in Zukunft Li-Ionen-Batterien auch für den Automobileinsatz zur Verfügung stehen werden, dann wird sich dieser

⁷ Der Wasserstoff würde mittels Elektrolyse direkt an der Tankstelle erzeugt und danach mit elektrisch angetriebenen Kompressoren verdichtet. Besser wäre es, Wasserstoff in großen Raffinerien aus Erdgas chemisch herzustellen, dies bedingt aber eine große Investition in diese Anlagen und in das Verteilsystem.

⁸ In der Tat ist der schlechteste Fall als Vergleichsbasis zu wählen. Dies entspricht einer *Grenzstrombetrachtung*, bei der jede zusätzliche kWh elektrische Energie aus dem schlechtesten Kraftwerk in einem Verbundnetz kommen muss. Schließlich wäre es ja genau dieses Kraftwerk, das man als erstes abschalten würde, wenn ein Energieüberschuss vorhanden wäre.

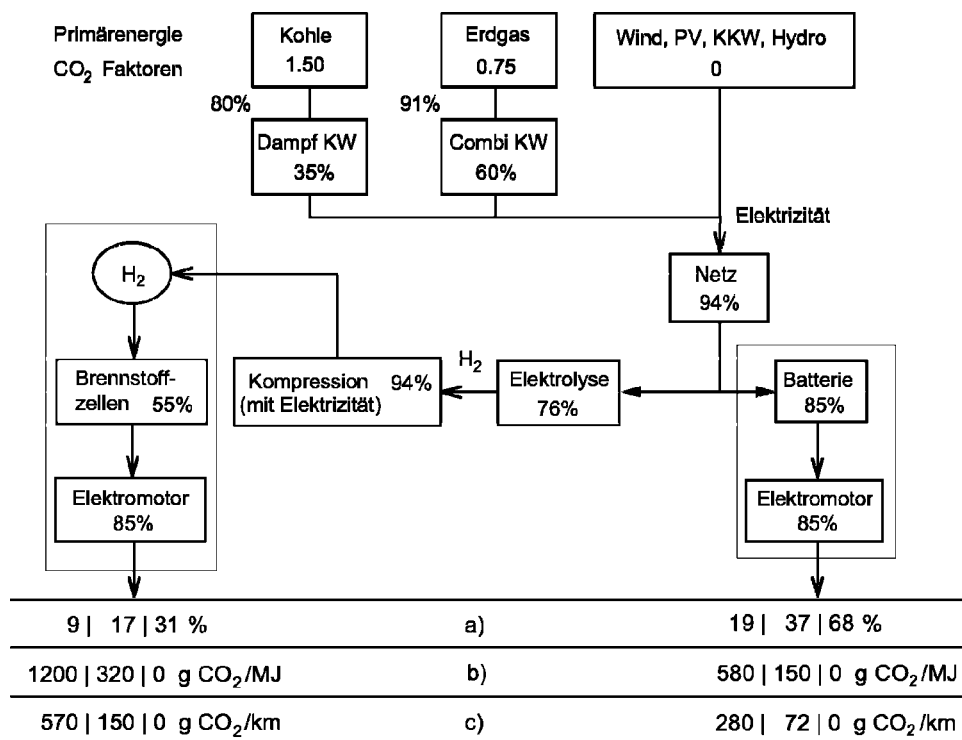


Bild 5 „Well-to-wheel“-Analyse eines Elektrofahrzeugs mit Wasserstoff-Brennstoffzellen (links) und mit Batterien (rechts). Resultate: Zeile a) totale Primärenergieausnutzung, Zeile b) totaler CO₂-Ausstoß pro produzierte mechanische Energieeinheit, Zeile c) totaler CO₂-Ausstoß pro km für ein Mittelklassefahrzeug. Die Prozentzahlen geben mittlere Wirkungsgrade der Energiewandlungen an. Die beiden Faktoren 1,5 bei Kohle und 0,75 bei Erdgas zeigen an, dass diese Primärenergieträger 150% bzw. 75% der CO₂-Menge pro Energieeinheit erzeugen, die bei der Verbrennung von Erdöl (ca. 73 g/MJ) entstehen würde.

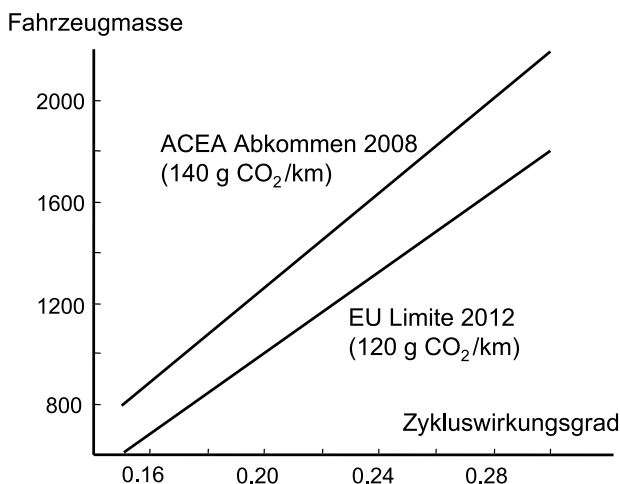


Bild 6 Maximal erlaubte Fahrzeugmasse als Funktion der mittleren Wirkungsgrade des Antriebssystems („tank-to-wheel“), um die Selbstverpflichtung der europäischen Automobilhersteller (ACEA) bezüglich CO₂-Ausstoß (obere Gerade, entspricht etwa 61 Benzin pro 100 km), bzw. die Vorgaben der EU zu erreichen (untere Gerade, entspricht etwa 51 Benzin pro 100 km).

Wert weiter verkleinern. Dieser Weg scheint also durchaus interessant zu sein.

Wohin geht die Reise?

In den nächsten zehn Jahren werden grundsätzlich zwei Trends zu beobachten sein: erstens leichtere und kleinere

Fahrzeuge und zweitens effizientere Antriebssysteme. Bild 6 zeigt den Zusammenhang zwischen diesen beiden Eckwerten und den erreichbaren CO₂-Grenzwerten. Die ACEA (ursprünglich für das Jahr 2008 eingegangen) und besonders die EU-Grenzwerte (ursprünglich für das Jahr 2012 vorgegeben, mittlerweile ist dieses Datum nach hinten geschoben worden) stellen große Herausforderungen dar, die nur erreicht werden können, wenn bei den Automobilherstellern *und* bei deren Kunden ein Umdenken stattfindet. Es ist fraglich, ob dies alleine durch Marktkräfte geschehen kann. Eher ist zu erwarten, dass staatliche Maßnahmen (fiskalische, aber auch regulatorische) diesen Umdenkprozess werden fördern müssen.

Es ist zu erwarten, dass die Vielfalt der gekauften Fahrzeuge wachsen wird. Bei den Antriebssystemen werden saubere Diesel, hoch aufgeladene kleine Benziner, Hybridfahrzeuge mit oder ohne „plug-in“ Möglichkeit, Erdgasautos, reine Elektromobile etc. am Markt bestehen. Auch die Fahrzeugtypen werden zunehmen, wobei aber das traditionelle Anforderungsprofil (zwei Erwachsene, zwei Kinder, gut für den Alltag, aber auch brauchbar für die Ferienreise) weiterhin dominieren wird. Zusammen mit einem kleinen Beitrag der Agro-Treibstoffe ist es deshalb denkbar, dass innerhalb der nächsten 10 Jahre die EU-Richtlinien tatsächlich eingehalten werden können.

Leider wird selbst der 120 g/km Grenzwert, wenn er dann einmal eingehalten wird, die eingangs aufgezeigte Problematik nicht entschärfen können. Wenn sich der

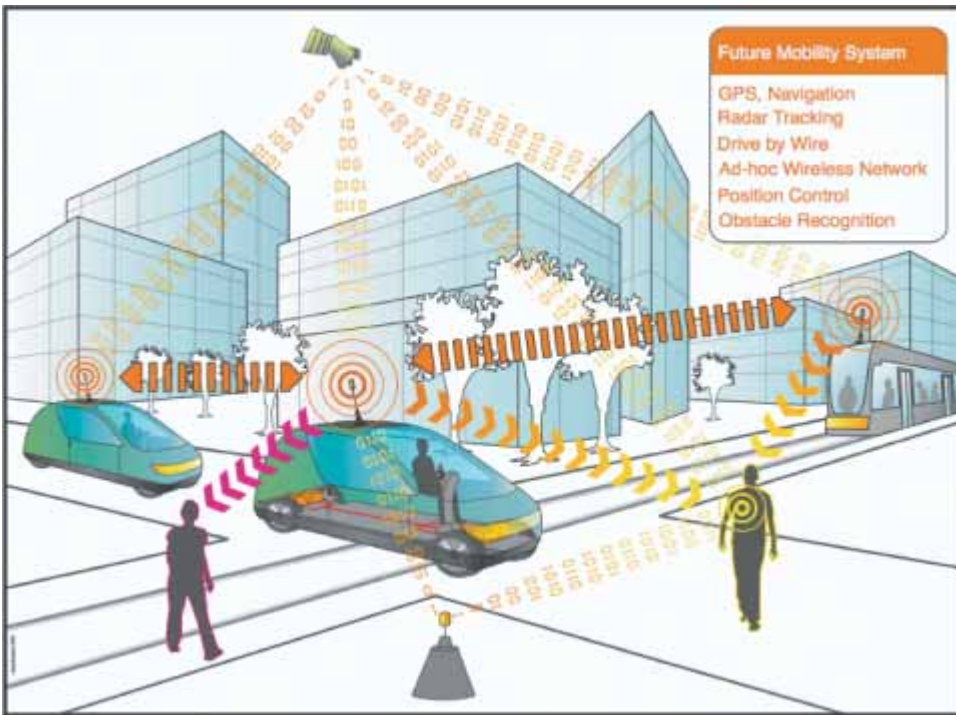


Bild 7 Kommunikation, Navigation und elektronische Steuerungen: Ein Weg zur unfallfreien und umweltschonenden individuellen Mobilität?

globale Mobilitätsbedarf dem heute im OECD-Raum angetroffenen Wert annähert, dann werden radikale Änderungen nötig sein, um den Verbrauch um Faktoren zu reduzieren. Benutzt man das Leitbild der 2-kW-Gesellschaft als eine Zielvorgabe, dann lässt sich daraus ableiten, dass für die individuelle Mobilität Automobile nötig sind, deren durchschnittlicher Flottenverbrauch nicht mehr als etwa 21 Benzin pro 100 km entspricht.

Solche Fahrzeuge werden viel kleinere Massen als heutige Automobile haben (maximal 800 kg), kleinere aerodynamische und rollreibungsbedingte Verluste aufweisen und ein hocheffizientes Antriebssystem enthalten (mittlerer „well-to-wheel“ Zykluswirkungsgrad um die 30%). All diese Zielvorgaben widersprechen keinem physikalischen oder technischen Grundprinzip, sie stellen aber enorme Herausforderungen an die Ingenieurwissenschaften dar, da sie mit den im Automobilbau üblichen Kosteneinschränkungen zu erreichen sind.

Das Grundproblem dieses Ansatzes ist, dass diese leichten Fahrzeuge ohne Einsatz von teuren Materialien und Fertigungsverfahren nicht den hohen, passiven Sicherheitsstandard erreichen können, den heutige Automobile aufweisen. Eine mögliche Idee, wie dieses Problem angegangen werden könnte, ist in Bild 7 illustriert. Durch Kommunikation (Autos, öffentliche Verkehrsmittel, Fußgänger etc.), Navigation (Satelliten, Straßenmarken, Odometrie etc.) und elektronische Steuerungen werden Unfälle von Anfang an ausgeschlossen. Wenn dies gelingen würde, könnten Automobile ohne jegliche passive Sicherheitsmaßnahmen und damit sehr leicht gebaut werden. Die Fahrer haben zwar immer noch eine gewisse Kontrollfunktion, ihre Befehle werden aber

vom Fahrzeug nur insofern ausgeführt, wenn dadurch keine gefährlichen Situationen entstehen können.

Dieser Ansatz ist, zugegebenermaßen, recht utopisch und viele technische, soziale und psychologische Schwierigkeiten müssen auf dem Weg zu seiner Realisierung überwunden werden. Klar ist aber, dass das Automobil, wenn es seinen zweihundertsten Geburtstag erleben will, neu erfunden werden muss.

Die Rolle der Automatisierungstechnik

Bei diesem Erneuerungsprozess wird die Automatisierungstechnik eine entscheidende Rolle spielen. Dieser Prozess hat sich in den letzten Jahren bereits ange-

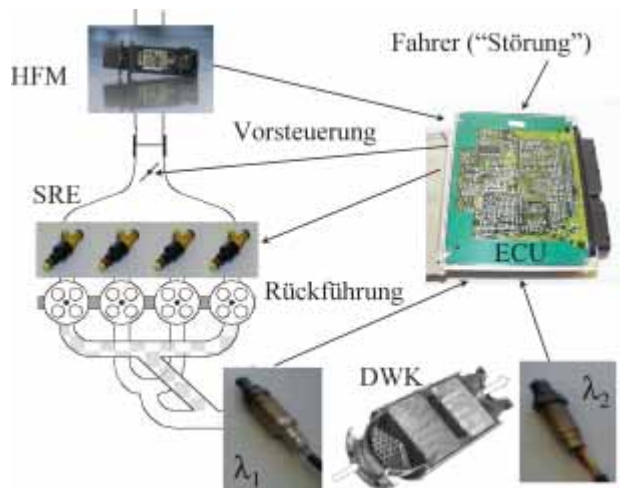


Bild 8 Steuerungs- und Regelungskreise in einem Ottomotor mit DWK = Dreiweg-Katalysator-System; HFM = Luftmengenmesser, SRE = Saugrohreinjection, ECU = Motorsteuergerät, $\lambda_{1/2}$ = Lambdasonde 1/2.

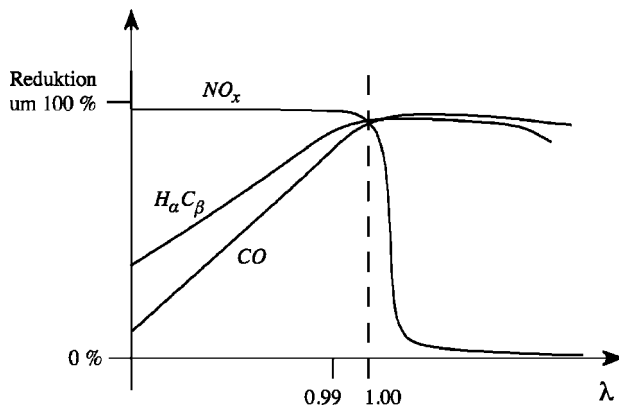
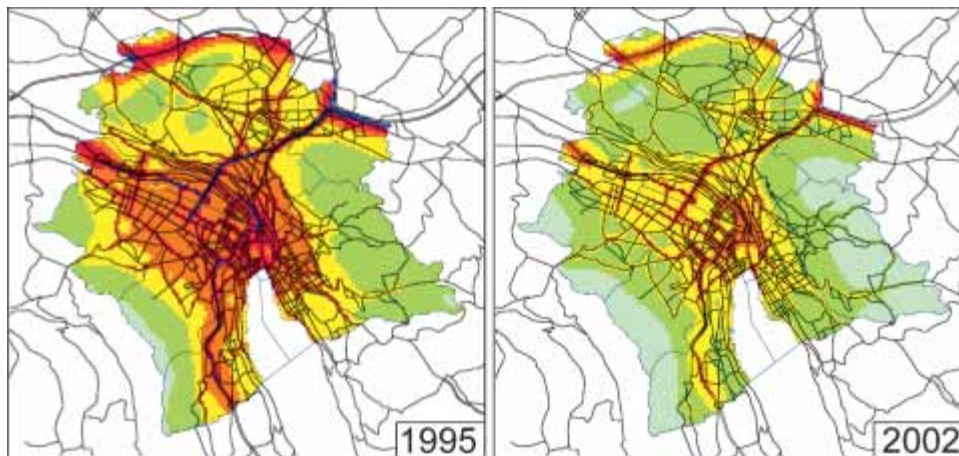


Bild 9 Konversionswirkungsgrad eines Dreiwege-Katalysators als Funktion des Luft/Kraftstoff-Verhältnisses λ ; die NO_x werden zu N_2 reduziert, CO und H_aC_β werden zu H_2O und CO_2 oxidiert.

bahnt. In der Tat gleicht ein Auto des Modelljahrgangs 2009 in seinen äußeren Merkmalen in vielen Punkten einem zwanzig Jahre älteren Modell. Unter der Motorhaube aber hat in dieser Zeit eine eigentliche Revolution

stattgefunden. Moderne Fahrzeuge haben mehrere Mikroprozessoren und Bussysteme an Bord, die diverse Funktionen ermöglichen. Schätzungen gehen davon aus, dass heute etwa ein Viertel der Herstellkosten eines Fahrzeugs auf elektronische und elektrische Komponenten fallen. Dieser Trend wird sich fortsetzen und der Zeitpunkt ist absehbar, wo die Automatisierungstechnik der kostenrelevanteste Anteil an einem Fahrzeug sein wird. Ein, zugegebenermaßen, eher futuristisches Beispiel für diese Entwicklung wurde im vorhergehenden Abschnitt vorgestellt. Das folgende Beispiel zeigt einen heute in allen modernen Ottomotoren bereits installierten Steuerungs- und Regelkreis.

Das eigentliche „Einfallstor“ für die Automatisierungstechnik in die Motorentechnik war die Einführung der Dreiwege-Katalysatoren für die Abgasreinigung in Ottomotoren. Das in Bild 8 dargestellte recht komplexe System stellt sicher, dass das Luft/Kraftstoff-Verhältnis im Mittel sehr nahe beim stöchiometrischen Wert von $\lambda = 1$ liegt. Wie in Bild 9 dargestellt, erfolgt nämlich nur dann die gleichzeitige Konversion aller giftigen



Quelle: Umwelt- und Gesundheitsschutz Zürich (UGZ)

■	$\leq 15 \mu\text{g}/\text{m}^3$	■	$> 25 \text{ bis } \leq 35 \mu\text{g}/\text{m}^3$	■	$> 45 \text{ bis } \leq 55 \mu\text{g}/\text{m}^3$
■	$> 15 \text{ bis } \leq 25 \mu\text{g}/\text{m}^3$	■	$> 35 \text{ bis } \leq 45 \mu\text{g}/\text{m}^3$	■	$> 55 \mu\text{g}/\text{m}^3$

Bild 10 Stickoxid-Immissionen 1995 und 2002 in der Stadt Zürich.

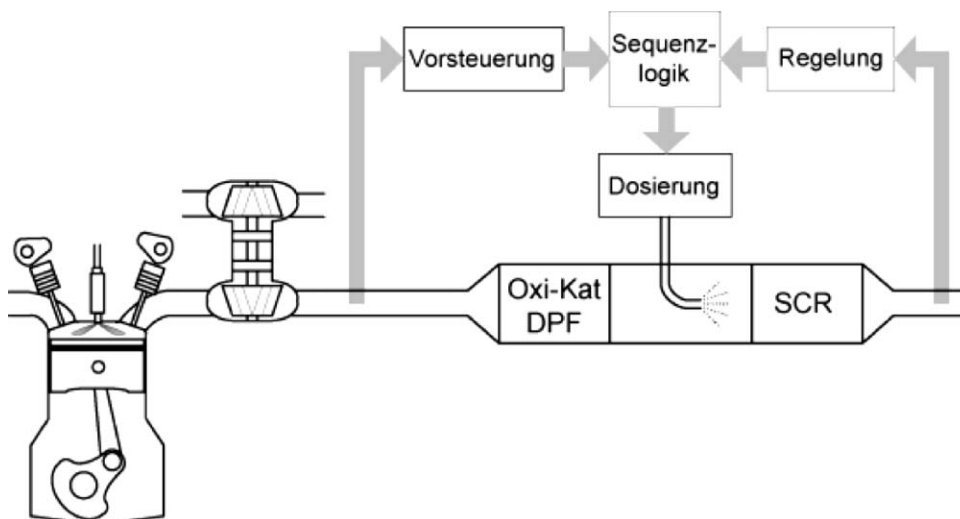


Bild 11 Abgasreinigung bei einem Dieselmotor; Oxi-Kat = Oxidations-Katalysator, DF = Diesel-Partikel-Filter, SCR = „selective catalytic reaction“ zur Reduzierung der Stickoxide.

Abgaskomponenten in die harmlosen Spezies Stickstoff, Wasser und Kohlendioxid. Die Vorsteuerung misst die angesaugte Luft (HFM-Sensor) und berechnet aus diesem Signal die notwendige Menge einzuspritzenden Kraftstoffs (SRE) mittels einer Streckeninversion. Unvermeidliche Modellfehler und andere Störeffekte führen dazu, dass die damit erreichten Genauigkeiten im Luft/Kraftstoffverhältnis ungenügend sind. Der Katalysator kann zwar kurzfristige (Größenordnung 1 s) Abweichungen tolerieren, im Mittel müssen aber diese Fehler ausgeglichen werden. Diese Aufgabe übernehmen die kaskadierten Rückführungen der gemessenen Luft/Kraftstoffverhältnisse λ_1 und λ_2 .

Die oben beschriebenen Steuer- und Regelkreise werden heute modellbasiert ausgelegt. Eine Möglichkeit besteht darin, die Aufgaben als LPV-Probleme (linear parameter varying) zu formulieren und somit eine betriebspunktunabhängige Charakteristik zu erhalten. Ausgefeilte Überwachungsalgorithmen detektieren und melden Fehlfunktionen und stellen so das korrekte Funktionieren des Systems über einen langen Zeitraum sicher. Adaptive Regelungen passen die Kreise zudem an die unvermeidlichen Alterungseffekte an.

Dieser nicht unerhebliche Aufwand kann zu deutlichen Verbesserungen der Luftqualität führen. Bild 10 zeigt die Entwicklung der NO_2 -Immissionen in der Stadt Zürich. Eine deutliche Verbesserung der Luftqualität ist also technisch möglich. Allerdings müssen die technischen Möglichkeiten ausgeschöpft werden, indem z. B. entsprechende Gesetzesvorschriften erlassen und durch griffige Überprüfungen auch durchgesetzt werden.

Weitere Verbesserungen der Luftqualität sind möglich, allerdings werden diese schwieriger zu erreichen sein, da nun die Dieselmotoren in die Pflicht genommen werden müssen. Prinzipbedingt können Dreiwegen-Katalysatoren hier nicht eingesetzt werden (Dieselmotoren arbeiten immer mit einem Luft/Kraftstoffverhältnis λ über 1). Partikelfilter zusammen mit Oxidationskatalysatoren können relativ einfach spürbare Verbesserungen erbrin-

gen, allerdings muss mittelfristig eine Entstickungsstufe dazu kommen. Mit der absehbaren weiteren Verschärfung der Gesetzesvorschriften (EURO 6 Grenzwerte) werden diese Ziele vorgegeben werden. Wie diese erreicht werden, ist heute noch nicht ganz klar. Eine viel versprechende Möglichkeit besteht im Einsatz eines Reduktionsmittels (Harnstoff) und spezieller Katalysatoren. Wiederum wird eine exakte Dosierung des Reduktionsmittels nur durch eine aufwendige Automatisierungstechnik möglich sein.

Zusammenfassend lässt sich also sagen, dass die Automatisierungstechnik entscheidend zur Verbesserung der Luftqualität beigetragen hat und weiterhin beitragen wird. Dies zeigt, wie in vielen anderen Fällen auch, dass Steuerungen und Regelungen sowohl eine „hidden technology“ als auch eine „enabling technology“ sind, ohne die es keinen Durchbruch gibt.

Literatur

- [1] Neue Erneuerbare Energien und neue Nuklearanlagen: Potenziale und Kosten, Stefan Hirschberg et al., PSI Bericht 05-04, 2005.
- [2] Ökobilanzierung von Bioenergie: Ökologische Bewertung der Treibstoffnutzung, Rainer Zah et al., Empa Bericht 2007.
- [3] Vehicle Propulsion Systems – Introduction to Modeling and Optimization, Lino Guzzella, and Antonio Sciarretta, Springer Verlag, 2nd ed., 2007.



Prof. Dr. Lino Guzzella ist Professor an der ETH. Mit seiner Gruppe lehrt und forscht er im Gebiet der Systemmodellierung und der Regelungstechnik. Das Hauptinteresse liegt dabei im Gebiet der sparsamen und sauberen Antriebssysteme.

Adresse: ETH Zürich, Institut für Mess- und Regeltechnik, 8092 Zürich, Schweiz,
E-Mail: guzzella@imrt.mavt.ethz.ch