

UMWELTFREUNDLICHE FAHRZEUGANTRIEBE



auto-umwelt.at

Kapitel 5:

UMWELTFREUNDLICHE

FAHRZEUGANTRIEBE

verfügbare weitere Inhalte:

- Kapitel 1: EMISSIONEN
- Kapitel 2: LUFTQUALITÄT
- Kapitel 3: LÄRM
- Kapitel 4: FLÄCHENVERBRAUCH
- Kapitel 5: UMWELTFREUNDLICHE FAHRZEUGANTRIEBE
- Kapitel 6: KRAFTSTOFFE
- Kapitel 7: FAHRSTIL
- Kapitel 8: GESETZLICHE VORSCHRIFTEN

Österreichischer Verein für Kraftfahrzeugtechnik (ÖVK)
Elisabethstraße 26
1010 Wien

Tel.: +43 1 5852741 – 0
Fax.: +43 1 5852741 -99
E-Mail: info@oevk.at
Internet: www.oevk.at

© Inhalt: Österreichischer Verein für Kraftfahrzeugtechnik (ÖVK) 2010
© Umschlagfoto: Rainer Sturm/pixelio.de

INHALT

1.	WEITERENTWICKLUNG DES VERBRENNUNGSMOTORS	1
2.	ELEKTROMOBILITÄT	8
3.	EMMISSIONSVERMINDERUNG	17
3.1.	MASSNAHMEN ZUR NO _x -EMMISSIONSVERMINDERUNG –	17
	WAHL DES GEEIGNETEN SYSTEMS	17
3.2	3-WEGE-KATALYSATOR	20
3.3	PARTIKELFILTER	21
3.4	NO _x -SPEICHERKATALYSATOR (NSK)	23
3.5	SCR-SYSTEM	27

1. WEITERENTWICKLUNG DES VERBRENNUNGSMOTORS

Der klassische Verbrennungsmotor wird die automobilen Welt noch mindestens zwei bis drei Jahrzehnte begleiten. [1] Gleich ob Ottomotor, Dieselmotor, Hybrid oder Range-Extender, die kontinuierliche Verbesserung des Verbrennungsmotors ist von großer Bedeutung für unsere Umwelt.

Im Folgenden wird auf die umweltrelevanten Weiterentwicklungen von Otto- und Dieselmotor eingegangen. Im Fokus stehen dabei Maßnahmen zur Verbrauchs- und Emissionsreduktion. In Ergänzung zur Optimierung des Motors ist ein gesamtheitliches Effizienzkonzept anzustreben, welches sich wie folgt zusammensetzt:

- Motor
- Getriebe
- Nebenaggregate
- Energiemanagement
- Fahrwiderstand
- Assistenzsysteme

[2]

Neben der Ausschöpfung der Potenziale des Motors ist die Abgasnachbehandlung in Abstimmung mit den motorischen Maßnahmen als Einheit zu optimieren. [3]

An dieser Stelle nicht näher behandelt, dienen im Besonderen folgende Abgasnachbehandlungssysteme der Emissionsreduktion. Weiterführende Informationen finden sie auf den entsprechenden Seiten dieser Homepage.

- Oxidationskatalysator (Dieselmotor) bzw. Dreiwege-Katalysator (Ottomotor)
- Partikelfilter
- NO_x-Speicherkatalysator
- SCR-Katalysator

[4], [5]

Informationen zu den sowohl verbrauchs- als auch emissionsrelevanten Biokraftstoffen finden sich ebenfalls auf den entsprechenden Seiten dieser Homepage.

Abbildung 1 gibt nun einen Überblick der motorischen Maßnahmen zur Verbrauchs- und Emissionsreduktion.

Downsizing ist ein Konzept, welches sowohl beim Otto- als auch beim Dieselmotoren Anwendung findet. Hierbei wird der Hubraum des Motors verringert und die geforderten Motoreigenschaften (Leistung, Drehmoment,...) beispielsweise mittels Turboaufladung gewährleistet.

Abhängig davon, ob es sich um einen Otto- oder Dieselmotor handelt, werden unterschiedliche Brennverfahren in modernen Motoren eingesetzt.

Die Reduktion von Reibung und Gewicht ist bei Otto- und Dieselmotoren gleichermaßen von Bedeutung.

Auch die Optimierung des Thermo- und Luftmanagements ist für beide Motorentechnologien relevant, wengleich sich die Umsetzung unterschiedlich gestaltet.

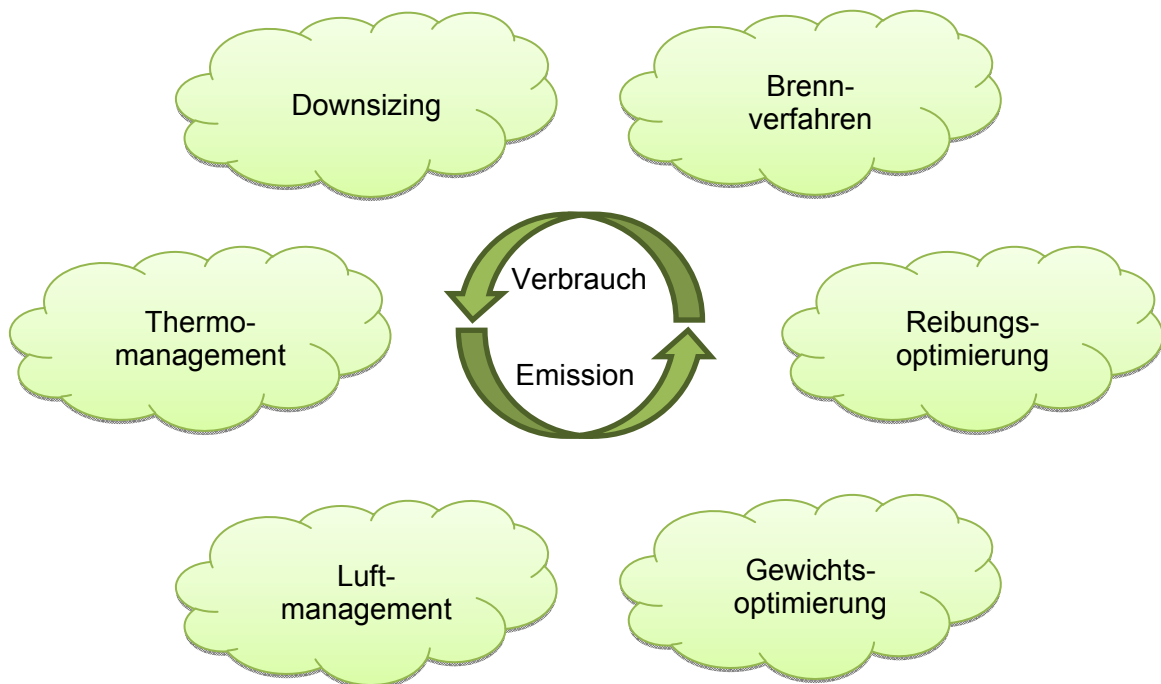


Abbildung 1: Motorische Maßnahmen zur Verbrauchs- und Emissionsreduktion [4]

OTTOMOTOR

Der Ottomotor hat heute die geringsten Schadstoff-Emissionen. Nachteilig ist jedoch sein ungünstiger Teillast-Wirkungsgrad und der damit verbundene höhere spezifische Verbrauch.

Primär wird, wie in [6] ausgeführt, die Entwicklung bei Ottomotoren zu folgenden Lösungen gelenkt:

- Direkteinspritzung mit homogener Gemischbildung und Hochaufladung
- Direkteinspritzung mit geschichteter Gemischbildung und damit möglichem Magerbetrieb. Dabei steht dem Vorteil der Verbrauchsreduktion eine aufwändige NO_x -Abgasnachbehandlung entgegen.

Auch neue Zündsysteme sind in Entwicklung. Die Laserzündung beispielsweise erlaubt ein verlässliches Zünden bei freier Wahl des Zündortes – angewendet bei Konzepten mit starker Gemisch-Abmagerung oder hoher Abgasrückführrate.

Homogene Brennverfahren (HCCI) weisen noch weiter in die Zukunft. Durch die Verdichtung des Kraftstoff-/Luftgemisches bis zur Selbstzündtemperatur ergibt sich eine Raumzündung ohne Zündkerze. Damit sind deutliche Verbrauchsreduktionen durch extremen Magerbetrieb erzielbar. Der Einsatz ist jedoch nur für niedrige Lastzustände geeignet. Im Volllastbereich wird zusätzlich eine Zündkerze benötigt.

Die Verbesserungspotenziale des heutigen Ottomotors werden in **Abbildung 2** zusammengefasst.

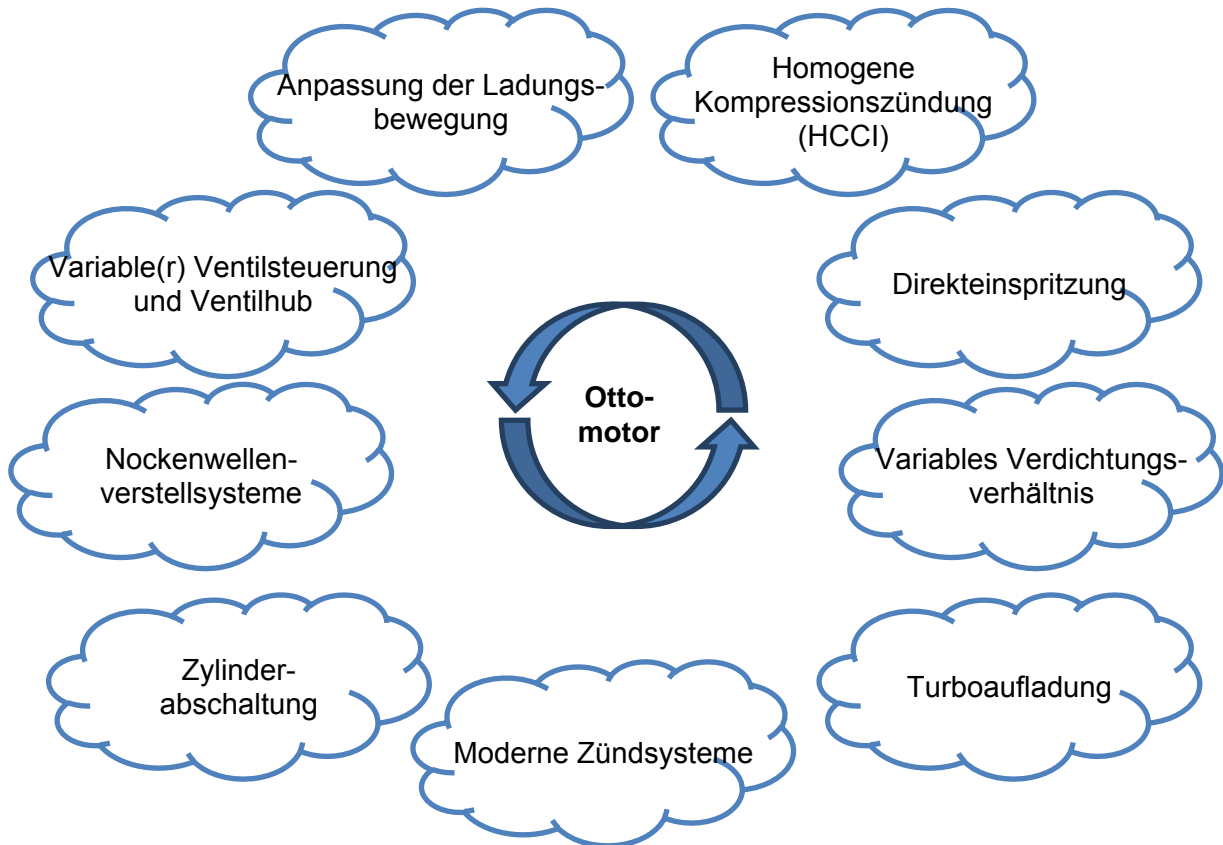


Abbildung 2: Technologieplattformen zur Umsetzung am Ottomotor [5], [6]

Das in **Abbildung 3** dargestellte Beispiel aus [7] zeigt die Potenziale zur Verbrauchsreduktion für einzelne Entwicklungsschritte auf.

Die Basisversion beschreibt einen 2-Liter, 4-Zylinder-Ottomotor mit Saugrohreinspritzung, Abgasgesetzgebungsstufe Euro 5, 1.400 kg Fahrzeugmasse, einer Leistung von 100 kW und einem Drehmoment von 200 Nm.

In Variante 1 wurden folgende Maßnahmen umgesetzt

- Direkteinspritzung
- Downsizing (auf 1,4 Liter; 200 Nm)
- Start/Stop
- Thermomanagement
- Turboaufladung

Dies führt zu einem Verbrauchsreduktionspotenzial von 22%.

In Variante 2 werden durch untenstehende Maßnahmen weitere 7%-Punkte Verbrauchsreduktion ausgewiesen.

- Downsizing (von 4 auf 3 Zylinder; 1,1 Liter; 204 Nm)
- Variabler Ventilhub

Weitere 10% Verbrauchsverbesserung sind in Variante 3 durch eine Hybridisierung des Antriebsstranges zu erwarten.

- Hybrid (inkl. Automatikgetriebe; 204 + 140 Nm)
- Batterie mit 1kWh
- Elektromotor mit 25kW

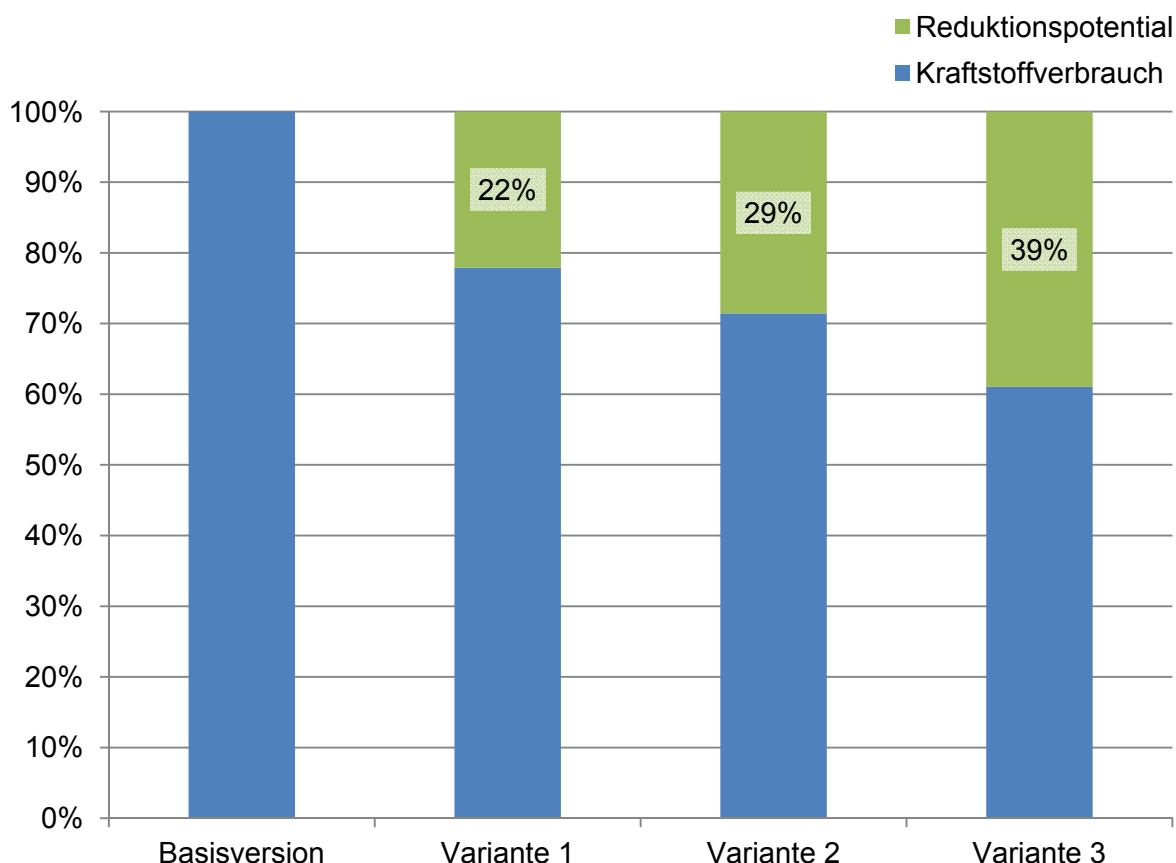


Abbildung 3: Potenzial zur Verbrauchsreduktion bei Ottomotoren [7]

DIESELMOTOR

Hohe Effizienz und damit geringster Verbrauch bei hohem Drehmoment durch Aufladung begründen den derzeitigen Erfolg des Dieselmotors. Die Vermeidung seiner Nachteile, wie die aufwändige NO_x-Nachbehandlung und die hohen Kosten, sind die Hauptentwicklungsziele der Zukunft.

Entwicklung bei Dieselmotoren:

- Innermotorische Optimierungen im Brennverfahren (variabler Drall etc.),
- Verbesserte Einspritzung: mehr und exaktere Einspritzimpulse durch Piezotechnik, höhere Drücke u.a.m.,
- Homogene Brennverfahren (HCCI): Wurde bereits beim Ottomotor genannt und ist speziell beim Dieselmotor für die NO_x-Absenkung und Partikelvermeidung von besonderem Interesse; allerdings auch hier nur für den Teillastbetrieb einsetzbar.

[6]

In **Abbildung 4** werden technologische Ansätze zur Optimierung des Dieselmotors angeführt.

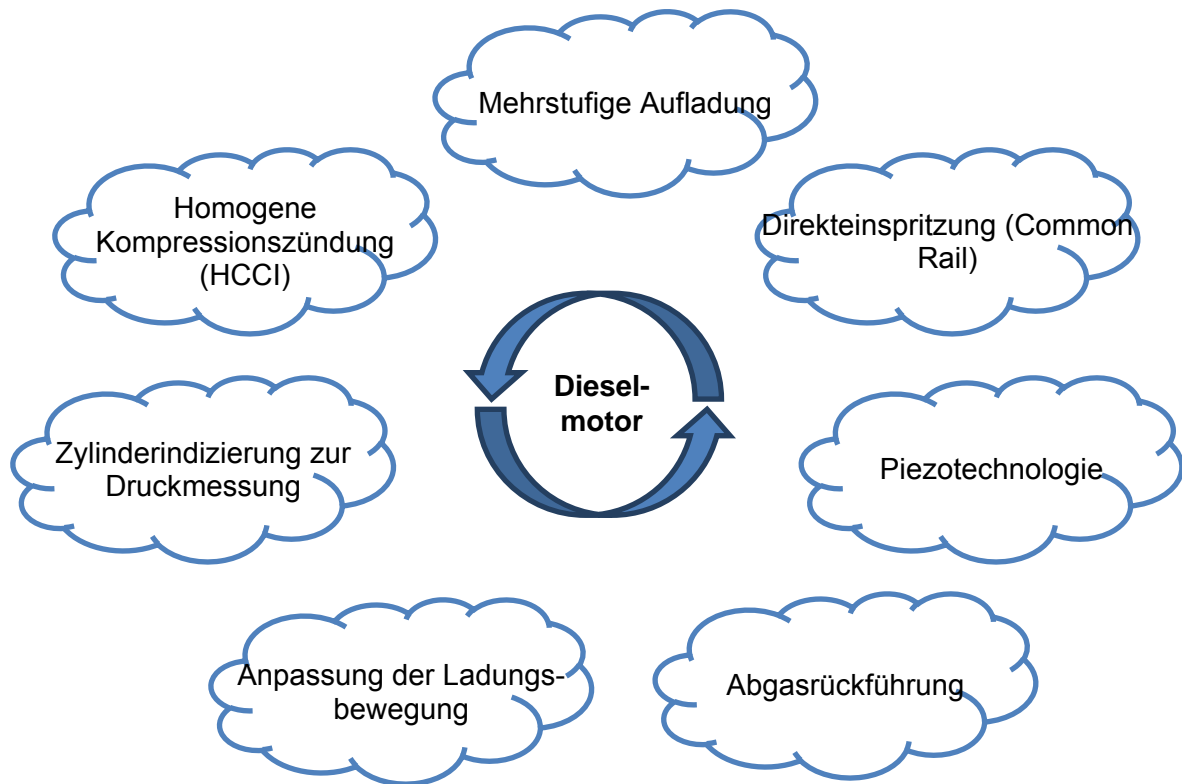


Abbildung 4: Technologieplattformen zur Umsetzung am Dieselmotor [5], [6], [8]

Das aus [7] entnommene Umsetzungsbeispiel zeigt für den untersuchten Dieselmotor analog zum betrachteten Ottomotor ein Verbrauchsreduktionspotenzial von ca. 30%.

Die einzelnen Entwicklungsschritte und Potenziale werden in **Abbildung 5** dargestellt.

Die Basisversion beschreibt einen 2-Liter, 4-Zylinder Dieselmotor mit Common Rail Direkteinspritzung, Turboaufladung, Abgasgesetzgebungsstufe Euro 5 und einem Drehmoment von 340 Nm.

In Variante 1 führen folgende Maßnahmen zu einer Verbrauchsreduktion von 22%.

- Verbrennungsoptimierung
- Start/Stop
- Thermomanagement
- Downsizing (1,6 Liter; 340 Nm)

Variante 2 beschreibt eine außermotorische Maßnahme. Diese ermöglicht über weitere Verbrennungsoptimierungen eine ergänzende Verbrauchsreduktion um 6%.

- NO_x-Abgasnachbehandlungssystem

In Variante 3 erfolgt eine weitere Verbrauchsreduktion um 5% durch

- Downsizing (von 4 auf 3 Zylinder; 1,2 Liter; 290 Nm)

Variante 4 beschreibt mittels Hybridisierung ein zusätzliches Verbrauchsreduktionspotenzial von 7%.

- Hybrid (inkl. Automatikgetriebe; 290 + 140 Nm)
- Batterie mit 1kWh
- Elektromotor mit 25kW

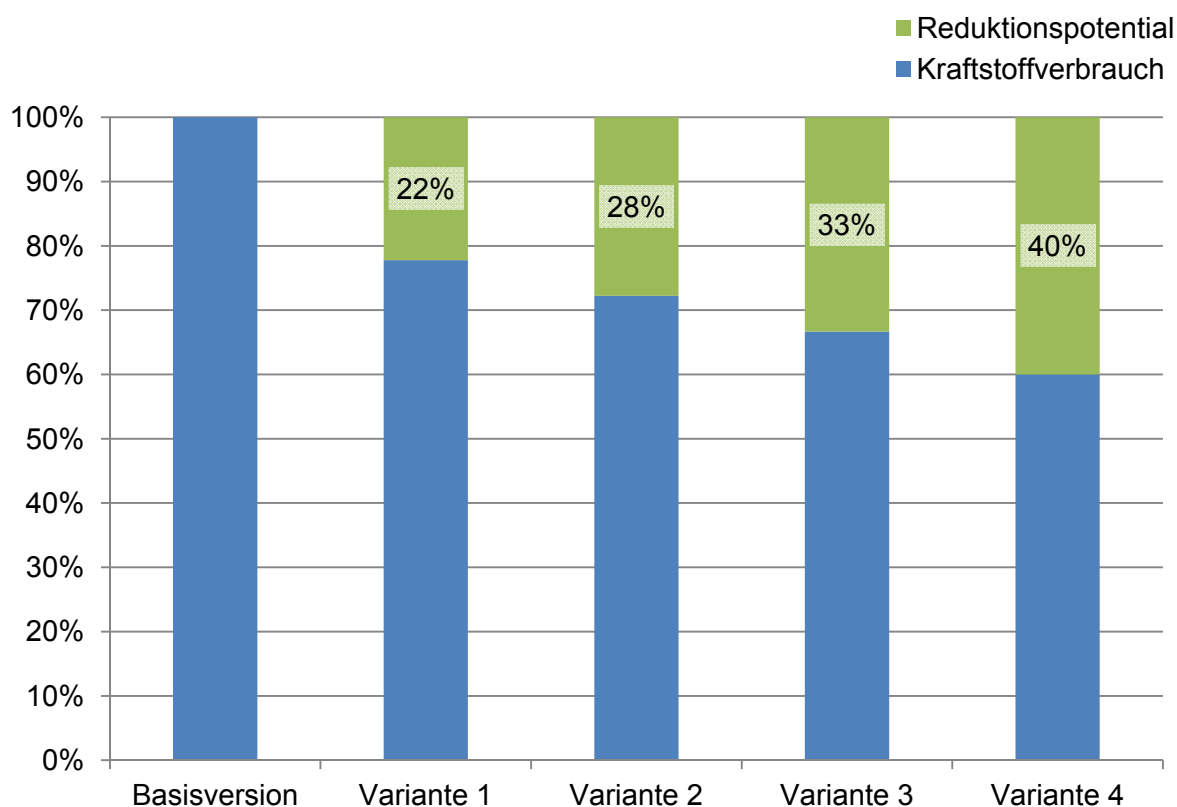


Abbildung 5: Potenzial zur Verbrauchsreduktion bei Dieselmotoren [7]

Ein Beispiel der konsequenten Umsetzung zahlreicher angeführter Maßnahmen wird in **Abbildung 6** dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, wie Drehmoment und Leistung kontinuierlich bei sinkendem Kraftstoffverbrauch steigen.

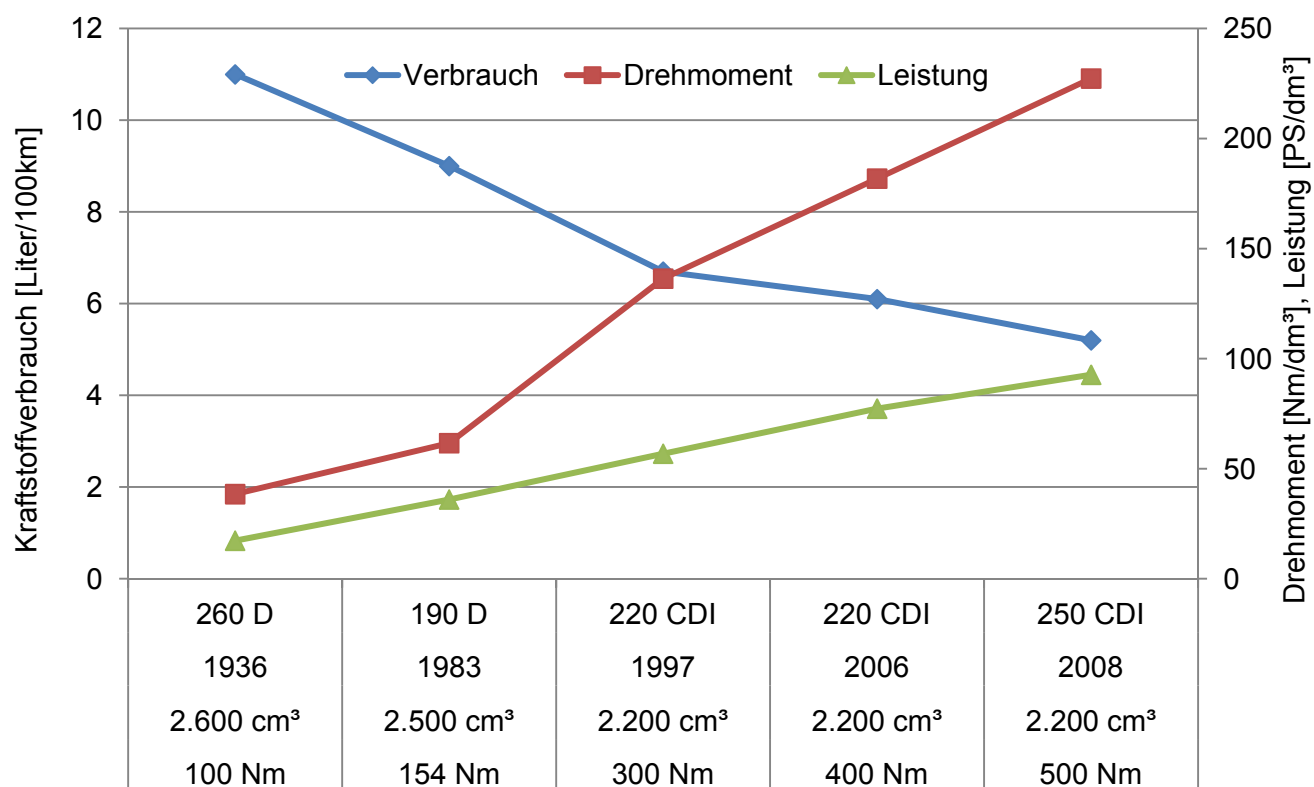


Abbildung 6: Entwicklung der Dieselmotoren bei Mercedes-Benz [1]

Aufgrund der aufgezeigten Verbesserungsmöglichkeiten kann davon ausgegangen werden, dass der Verbrennungsmotor unter Berücksichtigung aller Rahmenbedingungen das führende Antriebskonzept für die Zukunft bleiben wird.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] **Mikulic, L.:** Antriebstechnologie zur nachhaltigen Mobilität bei Mercedes-Benz. *Tagungsband zum 30. Internationalen Wiener Motorensymposium*. Düsseldorf : VDI-Verlag GmbH, 2009. VDI Fortschritt-Berichte Band 697.
- [2] **Stadler, R.:** Souveräne Effizienz - wegweisende Antriebskonzepte für die Spitze im Premium-Automobilbau. *Tagungsband zum 31. Internationalen Wiener Motorensymposium*. Düsseldorf : VDI-Verlag GmbH, 2010. VDI Fortschritt-Berichte Band 716.
- [3] **Heil, B.:** Der Dieselmotor im Nutzfahrzeug - Perspektiven und Herausforderungen. *7. Dresdner Motorenkolloquium*. Dresden : Forschungsinstitut Fahrzeugtechnik der HTW Dresden, 2007.
- [4] **Rudolph, F.:** Herausforderungen an den Dieselmotor im Spannungsfeld Verbrauch, CO₂ und Emissionsanforderungen. *8. Dresdner Motorenkolloquium*. Dresden : Forschungsinstitut Fahrzeugtechnik der HTW Dresden, 2009.
- [5] **Mikulic, L.:** Powertrain im Wandel. *MTZ-Konferenz "Ladungswechsel im Verbrennungsmotor"*. Stuttgart : ATZlive und MTZ-Motortechnische Zeitschrift, 2008.
- [6] **Geringer, B.:** Biokraftstoffe in der Fahrzeuganwendung. *Ländlicher Raum*. Wien : Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, 2008. Online-Fachzeitschrift.
- [7] **Bohr, B.:** Antriebsstrangvielfalt und Elektrifizierung: Herausforderungen und Chancen für die Automobilindustrie. *Tagungsband zum 31. Internationalen Wiener Motorensymposium*. Düsseldorf : VDI-Verlag GmbH, 2010. VDI Fortschritt-Berichte Band 716.
- [8] **Stephens, T.:** GM's Advanced Propulsion Technology Strategy - Lösungen zur Reduzierung der CO₂-Emissionen und zur Nutzung von vielfältigen Energiequellen. *Tagungsband zum 29. Internationalen Wiener Motorensymposium*. Düsseldorf : VDI-Verlag GmbH, 2008. VDI Fortschritt-Berichte Band 672.

2. ELEKTROMOBILITÄT

Die Elektromobilität wird stark propagiert, weil sie mit

- lokaler Emissionsfreiheit,
- der Nutzung erneuerbarer Energien (statt fossilbasierenden Kraftstoffen) und
- höherer Energieeffizienz

wirbt [1].

Den propagierten Nutzen stehen jedoch Nachteile wie

- hohe Batteriekosten,
- geringe Reichweite,
- lange Ladezeiten, schlechte diesbezügliche Infrastrukturen

gegenüber. [1].

Das Interesse an alternativen Antriebskonzepten führte dazu, dass alle großen Hersteller an Hybridkonzepten bzw. Elektrofahrzeugen arbeiten. Am Anfang steht stets die Optimierung des Verbrennungsmotors. Mit zunehmender Elektrifizierung der Kraftfahrzeuge wird der Verbrennungsmotor zunehmend verkleinert. [2]

Die einzelnen Entwicklungsstufen der Elektromobilität werden in **Tabelle 1** zusammengefasst dargestellt. Mit zunehmender Elektrifizierung steigen der Funktionsumfang und die elektrisch mögliche Reichweite. Kritisch zu betrachten sind jedoch die damit einhergehenden Mehrkosten, die Notwendigkeit des Aufbaues einer neuen Infrastruktur sowie eine lange Tankdauer bei derzeit vergleichsweise kurzer Fahrdauer (-strecke).

Funktionsumfang	Micro-Hybrid	Mild-Hybrid	Full-Hybrid	Plug-In-Hybrid	Elektrofahrzeug
Kurz-Beschreibung	Leistungsfähiger Anlasser und regelbarer Generator	Kurbelwellen-Starter-Generator	Trennkupplung zum Verbrennungsmotor, meist mehrere Elektromotoren	Elektroantrieb mit Verbrennungsmotor (VKM) oder Brennstoffzelle (BZ) als Range Extender	Batterieelektrisches Fahrzeug ohne Verbrennungsmotor (VKM) oder Brennstoffzelle (BZ)
Start/Stop	✓	✓	✓	✓	(✓)
Rekuperation	eingeschränkt	✓	✓	✓	✓
Generatorbetrieb	-	✓	✓	✓	✓
Boosten	-	✓	✓	✓	(-)
Externes Nachladen	-	-	-	✓	✓
Elektrisches Fahren	-	Eingeschränkt elektrisches Fahren bei niedrigen Geschwindigkeiten	Elektrisches Fahren für kurze Strecken	Elektrisches Fahren für mittlere Strecken (Längere Strecken mit Range Extender)	Rein elektrisches Fahren

Tabelle 1: Entwicklungsstufen der Elektromobilität [2]

Die in Tabelle 1 angeführten Funktionen der Elektromobilität können nach [2] beschrieben werden:

- Start/Stopp Funktion
 - Bei Stillstand des Fahrzeuges wird der Verbrennungsmotor abgestellt.
 - Beim Anfahren startet der Verbrennungsmotor für den Fahrer nicht merkbar automatisch und verzögerungsfrei.
- Rekuperation
 - Verzögerungsenergie wird in elektrische Energie umgewandelt.
 - Der Elektromotor arbeitet im Generatorbetrieb und speist die Batterie.
- Boosten
 - Bei Anfahr- und Beschleunigungsphasen unterstützt der Elektromotor den Verbrennungsmotor.
- Elektrisches Fahren
 - In diesem Betriebszustand ist die Verbrennungskraftmaschine abgestellt.
 - Das Fahrzeug wird ausschließlich elektrisch bewegt.
- Externes Nachladen
 - Die Batterie des Fahrzeuges wird über ein externes Stromnetz geladen.

Mit dem Grad der Elektrifizierung des Fahrzeuges steigen insbesondere die Anforderungen an das Batteriesystem. In **Tabelle 2** wird eine Auswahl wesentlicher Kennwerte der Batterieauslegung wiedergegeben. Abhängig vom Antriebskonzept stellen diese einen Kompromiss aus den angestrebten Eigenschaften

- hohe Energiespeicherfähigkeit,
- geringes Gewicht,
- niedriges Volumen,
- gute Haltbarkeit und
- niedriger Preis

dar, da die gleichzeitige Erfüllung aller Eigenschaften nicht möglich ist. [3]

Kennwerte	Einheit	Micro-Hybrid	Mild-Hybrid	Voll-Hybrid	Plug-In-Hybrid	Elektrofahrzeug
Spannungsbereich	V	12-14	100-200	200-300	200-300	200-300
Entladeleistung	kW	> 5	> 15	> 35	> 40	> 50
Energieinhalt	kWh	0,5-1	0,7-1	1,5-2	> 6	> 10
Lebensdauer	Jahre	> 3	> 10	> 10	> 10	> 10

Tabelle 2: Ausgewählte Anforderungen an das Batteriesystem in Abhängigkeit vom Grad der Elektrifizierung [3]

Abbildung 1 gibt den Zusammenhang zwischen Leistungs- und Energiebedarf in Abhängigkeit vom Elektrifizierungsgrad grafisch wieder. Es ist festzustellen, dass von Micro- bis Full-Hybrid der Energiebedarf stetig aber moderat ansteigt. Plug-In-Hybride bzw. rein elektrische Fahrzeuge hingegen benötigen aufgrund der höheren, rein elektrisch zu bewältigenden Reichweite deutlich mehr Energiereserven, jedoch nicht mehr elektrische Leistung als ein Full-Hybrid.

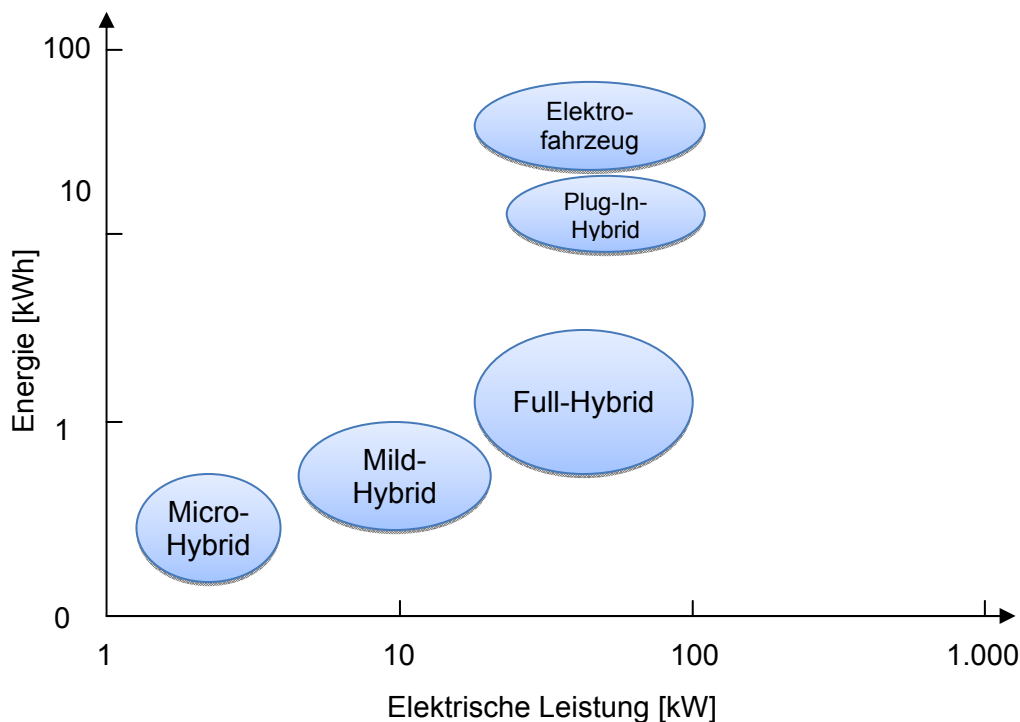


Abbildung 1: Energie- und Leistungsanforderungen an das Batteriesystem in Abhängigkeit vom Grad der Elektrifizierung [3]

Neben den hohen Anforderungen an die Auslegung der Batterie und die Wahl des geeigneten Elektromotors ist die Auslegung der Leistungselektronik von großer Bedeutung für den Wirkungsgrad eines Elektrofahrzeuges. Die Leistungselektronik dient der effizienten Steuerung und Umformung der elektrischen Energie. Die technischen Anforderungen können wie folgt zusammengefasst werden.

- Funktionssicherheit in einem großen Temperaturbereich
- Resistent gegen hohe Beschleunigungskräfte
- Beständigkeit gegen hohe Temperaturwechselbelastungen (von -40°C bis 150°C)
- Hohe Zuverlässigkeit und Lebensdauer
- Erreichen einer hohen Anzahl an Lastzyklen
- Minimierung der Verluste

[4]

Als ergänzende Literatur zum breiten Themengebiet der Hybridfahrzeuge kann [2] empfohlen werden.

In untenstehender Auflistung werden die wesentlichen technischen Unterscheidungsmerkmale zwischen einem klassischen Personenkraftwagen mit Verbrennungsmotor und einem elektrifizierten PKW angeführt.

Einige der gelisteten Punkte, wie beispielsweise der Antrieb, Energiespeicher oder die Betankung, stellen gänzlich neue Herausforderungen dar. Andere, wie Leichtbau, werden durch die Elektromobilität gefördert, werden jedoch auch im klassischen, mit Verbrennungsmotor betriebenen Fahrzeug stetig vorangetrieben.

- Antrieb
 - Elektromotor (zentral. Radnabenmotor)
 - Brennstoffzelle
 - Nebenaggregate
- Energiespeicher
 - Batterie (Zellen, Batterie/-management, Ladestrategie)
 - Kondensator
 - Wasserstofftank
- „Betankung“
 - Tankstellen und Infrastruktur
- Fahrwerk
- Bremssystem
- Soundmanagement
 - Lärm
 - Sound
 - Verkehrssicherheit
 - Isolierung
- Antriebsstrang
 - Getriebe
 - Antriebswelle und Achsgetriebe
- Leichtbau
- Steuerungs- und Leistungselektronik
- Energie- und Thermomanagement (inkl. Klimatisierung - warm & kalt - des Innenraums)
- Design inkl. Raumkonzept und Crashverhalten

Die große Bandbreite der Mobilität führt im Bereich der Elektromobilität zu Herausforderungen, welche mit einem einzigen Konzept nicht umgesetzt werden können. Eine hohe Variantenvielfalt ist erforderlich.

Zur Frage: „Stellt die Elektromobilität die Lösung der zukünftigen Mobilität dar?“ gibt [7] eine umfassende Antwort:

Nachhaltigkeit und Klimaschutz werden nur dann verbessert, wenn 100% der Elektrizitätserzeugung eines Landes CO₂-neutral, also durch Wasser-, Wind-, oder Kernkraft bzw. solar erfolgt.

Der **Umweltschutz** wird durch die Elektromobilität kaum verbessert. Zu dem Zeitpunkt, zu dem Elektrofahrzeuge in größeren Stückzahlen zur Verfügung stehen, werden Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor zwar nicht die Nullemissionen eines Elektrofahrzeuges erreichen, jedoch im Bereich der Messgenauigkeit vergleichbar sein.

Selbst optimistische **Kostenschätzungen** batterieelektrischer PKW zeigen, dass die kundenseitig tolerierten höheren Anschaffungskosten nicht eingehalten werden können. Die Abschätzungen der Betriebskosten sind mit einem hohen Unsicherheitsfaktor behaftet.

Ein weiteres Kriterium für den Erfolg oder Misserfolg batterieelektrischer Fahrzeuge ist deren **Benutzerfreundlichkeit**. Die Tatsache, dass batterieelektrische Fahrzeuge eine Reichweite von etwa 150 km erzielen, lässt ein eingeschränktes Kaufinteresse erwarten, da die kundenseitig geforderten Reichweiten deutlich höher liegen. Fahrzeuge mit Range-Extender können hier Verbesserungen bringen.

Zudem ist derzeit die Gewährleistung von mit konventionellen Fahrzeugen vergleichbarem Fahrkomfort nur mit Einbußen im Bereich der Reichweite möglich, da Aggregate wie Klimaanlage und Heizung elektrisch betrieben werden müssen.

Erschwerend wirkt sich aus, dass Tankvorgänge des batterieelektrischen PKW im Vergleich zum klassischen Tankvorgang Stunden statt Minuten dauern. Es ist davon auszugehen, dass dies käuferseitig nicht akzeptiert wird. Die Speicherung elektrischer Energie und die Betankung batterieelektrischer Fahrzeuge erfordern folglich noch weitreichende Entwicklungen. Die Bereitstellung der elektrischen Energie ist hingegen als gesichert zu betrachten.

Schlussfolgerung: Batterieelektrische Fahrzeuge bieten nur in Kombination mit 100% CO₂-neutraler Stromerzeugung Vorteile in den Bereichen Nachhaltigkeit, Klimaschutz und Versorgungssicherheit.

Eine Markteinführung von batterieelektrischen Fahrzeugen vor Lösung dieser und der anderen Herausforderungen führt nicht zu den gewünschten positiven Effekten.

Eine **Studie des Österreichischen Vereins für Kraftfahrzeugtechnik (ÖVK)** und des Österreichischen Automobil-, Motorrad und Touring Clubs (ÖAMTC), durchgeführt am Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik der Technischen Universität Wien, untersucht die Vor- und Nachteile von batterieelektrisch betriebenen Fahrzeugen gegenüber einem modernen konventionellen Diesel-PKW. [8]

Neben realen Betriebsbedingungen findet die Energiebereitstellung von Elektrizität und Dieselkraftstoff Berücksichtigung. Darüber hinaus werden die realisierbaren Reichweiten und Energiekosten ermittelt.

Dazu wurden vier aktuelle batterieelektrische PKW und ein moderner dieselbetriebener PKW untersucht:

- Mitsubishi i-MiEV
- Mercedes Benz A-Klasse E-Cell
- Smart Fortwo Electric Drive
- Nissan Leaf
- Volkswagen Polo BlueMotion (Diesel-PKW)

Der Kraftstoffverbrauch und die Treibhausgasemissionen des Diesel-PKW sowie die Energieflüsse der E-PKW wurden auf einem klimatisierten Rollenprüfstand ermittelt. Durch die Bestimmung der Fahrwiderstände der Fahrzeuge, die Variation der Umgebungstemperatur (Heizen/Kühlen des Innenraumes) und das Absolvieren verschiedener Fahrsituationen (Stopp-and-Go, Innerorts, Außerorts und Autobahn) bei unterschiedlichen Fahrbahnneigungen (-2 %, 0 % und +2 %) konnte ein **realitätsnaher Energiebedarf** je Fahrzeug ermittelt werden.

In Ergänzung zu den Fahrzeuguntersuchungen wurden der **Energiebedarf und die Treibhausgasemissionen der Energiebereitstellung** (Herstellung von Elektrizität und Dieselkraftstoff) anhand von Literaturangaben berücksichtigt.

Aufgrund der unterschiedlichen durchschnittlichen Temperaturen und der abweichenden Herstellungspfade von Elektrizität und Dieselkraftstoff erfolgte die Berechnung des jährlichen Energiebedarfs und der daraus resultierenden jährlichen Treibhausgasemissionen für Österreich als auch für die Europäische Union jeweils getrennt. Weiters wurde in Stadtfahrer/-in und Überlandfahrer/-in unterschieden.

Energetischer Nutzen

Der durchschnittliche Energiebedarf für den reinen Fahrbetrieb wird in **Tabelle 3** wiedergegeben. Berücksichtigt wurde dabei die Energie für das Fahren bei durchschnittlicher Fahrbahnneigung, für die Klimatisierung des Fahrzeuginnen-raumes (Heizen und Kühlen in Abhängigkeit von der durchschnittlichen monatlichen Umgebungstemperatur) und für die Lade- bzw. Entladeverluste der Hochvoltbatterie.

Der **Energiebedarf für den Fahrbetrieb eines E-PKW liegt in einer europäischen Stadt bei 53 % eines Diesel-PKW**. Bei dieser Betrachtung lässt sich der energetische Vorteil batterieelektrischer Fahrzeuge im reinen Fahrbetrieb erkennen.

Energiebedarf in kWh/100km		StadtfahrerIn		ÜberlandfahrerIn	
Österreich	Diesel-PKW	42,9	100 %	42,1	100 %
	E-PKW	24,5	57 %	25,5	61 %
Europäische Union	Diesel-PKW	42,8	100 %	42,0	100 %
	E-PKW	22,8	53 %	24,2	58 %

Tabelle 3: Durchschnittlicher Energiebedarf für den Fahrbetrieb (exkl. Energiebereitstellung) in kWh/100km

Wird dagegen auch der **Energiebedarf für die Stromherstellung in Europa berücksichtigt**, benötigt der städtisch betriebene **E-PKW 95 % der Energie des Diesel-PKW**. Wie **Tabelle** entnommen werden kann, führt die Berücksichtigung der Energiebereitstellung zu einer drastischen Reduktion des energetischen Vorteiles. Bei **Überlandbetrieb** dreht sich der Vorteil in einen **Nachteil** um und der E-PKW benötigt in Europa **3% mehr Energie als der Diesel-PKW**.

Energiebedarf in kWh/100km		StadtfahrerIn		ÜberlandfahrerIn	
Österreich	Diesel-PKW	93,9	100 %	92,4	100 %
	E-PKW	62,4	66 %	64,9	70 %
Europäische Union	Diesel-PKW	91,1	100 %	89,5	100 %
	E-PKW	87,0	95 %	92,3	103 %

Tabelle 4: Durchschnittlicher Energiebedarf für den Fahrbetrieb (inkl. Energiebereitstellung) in kWh/100km

Die derzeit noch energieintensive Produktion von E-PKW (zufolge der Hochvoltbatterie) wurde in diesen Kalkulationen mangels ausreichender Daten nicht berücksichtigt bzw. nur exemplarisch betrachtet. Die Herstellung der Hochvoltbatterie dürfte aber zur Zeit bei etwa 10 % des jährlichen Energiebedarfs eines E-PKW liegen [9], [10]

Klimatischer Nutzen

Die durch den Fahrbetrieb und die Energiebereitstellung emittierten **Treibhausgasemissionen** (als CO₂-Äquivalent) liegen **in Österreich** aufgrund des hohen regenerativen Energieanteiles in der Stromerzeugung **für den städtisch betriebenen E-PKW bei 38 % des Diesel-PKW**. Auf **europäischer Ebene** ist der darstellbare **Vorteil mit 83 % deutlich geringer**. **Tabelle 5** gibt hierzu einen Überblick. Auch hier gilt es festzuhalten, dass die Fahrzeugproduktion und im Speziellen die Herstellung der Hochvoltbatterie nicht berücksichtigt wurde.

Treibhausgasemissionen in g CO ₂ e/km		StadtfahrerIn		ÜberlandfahrerIn	
Österreich	Diesel-PKW	128	100 %	126	100 %
	E-PKW	48	38 %	50	40 %
Europäische Union	Diesel-PKW	132	100 %	129	100 %
	E-PKW	109	83 %	116	90 %

Tabelle 5: Durchschnittliche Treibhausgasemissionen für den Fahrbetrieb (inkl. Energiebereitstellung) in g CO₂e/km

Reichweite und Komfort

Bei einer durchschnittlichen Fahrweise und einer geringen Fahrbahnneigung können die in **Tabelle 6** dargestellten Reichweiten realisiert werden.

Der Betrieb der Klimaanlage bei einer Umgebungstemperatur von +30 °C reduziert die Reichweite durchschnittlich um 14 %. Durch die Beheizung des Innenraumes bei einer Umgebungstemperatur von 0 °C erfolgt eine Reichweitenreduktion von durchschnittlich 27 %.

Reichweite abzüglich einer Reservereichweite von 25 km	Umgebungstemperatur		
	20 °C ohne Heizung und Klimaanlage	0 °C inkl. Heizung	-10 °C inkl. Heizung
Fahrzeug			
Mitsubishi i-MiEV	83 km	48 km	41 km
Mercedes Benz A-Klasse E-Cell	150 km	101 km	85 km
Smart Fortwo Electric Drive	100 km	64 km	52 km
Nissan Leaf	76 km	53 km	41 km
Volkswagen Polo BlueMotion	1.090 km	1.036 km	989 km

Tabelle 6: Realisierbare Reichweiten

Energiekosten

Die **Energiekosten** des **E-PKW** (für den Endkunden) sind aufgrund der aktuellen Steuern und Abgaben für Elektrizität bzw. Dieselkraftstoff **geringer als jene des Diesel-PKW**.

Eine von Steuern und Abgaben **bereinigte Betrachtung** zeigt jedoch einen **Kostennachteil für E-PKW im Stadtverkehr** auf.

Die **Anschaffungskosten** eines E-PKW liegen auch mittelfristig **über** den **kundenseitig tolerierten Mehrkosten**. Bei einer späteren Großserienproduktion muss mit Mehrkosten von über € 6.000.- gerechnet werden [7] Derzeit liegen die Mehrkosten der uns bekannten, verfügbaren E-PKW bei rund dem Doppelten von vergleichbaren, konventionellen PKW.

Was erwartet potentielle Kunden, wenn sie einen batterieelektrischen PKW kaufen?

1. Die **Anschaffungskosten** liegen auch mittelfristig über den kundenseitig tolerierten Mehrkosten. Derzeit muss mit dem doppelten Preis, verglichen mit einem konventionellen PKW gerechnet werden.
2. Die **Energiekosten** für den Betrieb eines E-PKW sind bei den aktuellen Steuern und Abgaben auf Elektrizität bzw. Dieselmotorkraftstoff geringer als jene eines Diesel-PKW.
3. Die **Reichweite** der untersuchten, derzeit regulär im Handel erhältlichen E-PKW ist verglichen mit herkömmlichen Fahrzeugen stark begrenzt und von der Umgebungstemperatur abhängig. Eine Änderung dieses Umstandes ist auch längerfristig nicht zu erwarten.

4. **Laden und Komfort**

Wesentlich für den Betrieb bzw. die Aufladung des E-PKW ist eine Strom-Steckdose im Nahebereich des Fahrzeugparkplatzes. Der Batterieladeprozess macht dabei eine zusätzliche technische Manipulation (An- und Abstecken) erforderlich.

5. **Klimawirksamkeit und Energiebedarf**

Wird ein E-PKW in einem Land betrieben, welches im Bereich der Energiebereitstellung einen hohen regenerativen Anteil aufweist (wie z.B. Österreich) können mit einem E-PKW sowohl der Energiebedarf als auch die Treibhausgasemissionen dieses Landes reduziert werden.

Betrachtet man die gesamte Europäische Union, so ist kaum ein Vorteil zu sehen. In Ländern mit einem geringen regenerativen Energieanteil, niedrigen durchschnittlichen Temperaturen oder hohen Fahrleistungen bei mittleren Geschwindigkeiten kann der Diesel-PKW sogar einen geringeren Energiebedarf bzw. geringere Treibhausgasemissionen aufweisen.

Detaillierte Datensätze

Die detaillierten Datensätze dieser Studie stehen aufgrund des Umfanges auf der Homepage www.oevk.at zum Download bereit. Ein Direktdownload ist unter folgendem Link möglich: http://www.xn--vk-eka.at/aktuelles/2012/bev_data.pdf.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] **bmvit**: *Strategie und Instrumente sowie prioritäre Anwender-und Einsatzbereiche für den Nationalen Einführungsplan Elektromobilität*. Wien: BMVIT - Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, 2010.
- [2] **Hofmann, P.**: *Hybridfahrzeuge*. Wien : Springer-Verlag, 2010. ISBN: 978-3-211-89190-2.
- [3] **Köhler, U.**: Batteriesysteme für Elektro- und Hybridfahrzeuge. *Handbuch Elektromobilität*. Frankfurt am Main : EW Medien und Kongresse GmbH, 2010.
- [4] **Schwingshackl, M.**: *Simulation von elektrischen Fahrzeugkonzepten für PKW*. Graz : Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik der TU Graz, 2009. Diplomarbeit.
- [5] **Hofmann, L., et al**: twinDRIVE® - Ein Schritt in Richtung Elektromobilität. 6. VDI-Tagung "Innovative Fahrzeugantriebe". Dresden: VDI, 2008.
- [6] **bmvit**: *Strategie und Instrumente sowie prioritäre Anwender-und Einsatzbereiche für den Nationalen Einführungsplan Elektromobilität*. Wien: BMVIT - Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, 2010.
- [7] **Geringer B., Tober W.K.**: Zukünftige Mobilität: Elektromobilität als Lösung? Wien: Publikation des Österreichischen Vereins für Kraftfahrzeugtechnik, 2010
- [8] **Geringer B., Tober W.K.**: Batterieelektrische Fahrzeuge in der Praxis - Kosten, Reichweite Umwelt, Komfort. Wien: Publikation des Österreichischen Vereins für Kraftfahrzeugtechnik, 2012
- [9] **Wagner, U., et al.**: Ganzheitliche Bewertung alternativer Kraftstoffe und innovativer Fahrzeugantriebe. [Buchverf.] D. Naunin. *Hybrid-, Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge*. Renningen: Expert Verlag, 2007. ISBN-10: 3-8169-2625-8
- [10] **Althaus, H. et al.**: *Vergleichende Ökobilanz individueller Mobilität: Elektromobilität versus konventionelle Mobilität mit Bio- und fossilen Treibstoffen*. Dübendorf: EMPA, 2010

3. EMISSIONSVERMINDERUNG

Die Absenkung der CO- und HC-Emissionen sind erfolgreich und ausreichend abgeschlossen. Aufgrund der verschärften Emissions- und Immissionsgrenzwerte sind bei NO_x- und bei den Partikelemissionen noch weitere Anstrengungen erforderlich.

3.1. MASSNAHMEN ZUR NO_x-EMISSIONSVERMINDERUNG – WAHL DES GEEIGNETEN SYSTEMS

Im Folgenden werden die Möglichkeiten zur Verminderung der NO_x-Emissionen und die Auswahlkriterien der geeigneten Technologie diskutiert.

Die kontinuierliche Absenkung der zulässigen Abgasemissionen führt zu einer Vielzahl an Abgasnachbehandlungsmethoden und motorischen Optimierungen. **Abbildung 1** gibt hierzu einen Überblick.

Die Auswahl der geeigneten technischen Lösungen zur Einhaltung gesetzlich vorgeschriebener Grenzwerte – in dem hier betrachteten Fall NO_x – obliegt den Kraftfahrzeugherstellern. So werden die NO_x-Grenzwerte der Abgasnorm Euro 5 primär durch die Optimierung der Aufladung, Abgasrückführung und Einspritzung innermotorisch erreicht. Die Einhaltung der Euro 6-Grenzwerte erfordert jedoch in zunehmendem Maße moderne Abgasnachbehandlungstechnologien [1].

Dies ist damit zu begründen, dass verbrauchsoptimierte Diesel- und Mager-Konzept-Ottomotoren 5 bis 20 Vol.% Sauerstoff im Abgas enthalten. In dieser mageren ($\lambda > 1$) Atmosphäre können Stickstoffoxide nicht reduziert werden. Im ungünstigsten Fall werden diese zu Lachgas umgesetzt [2].

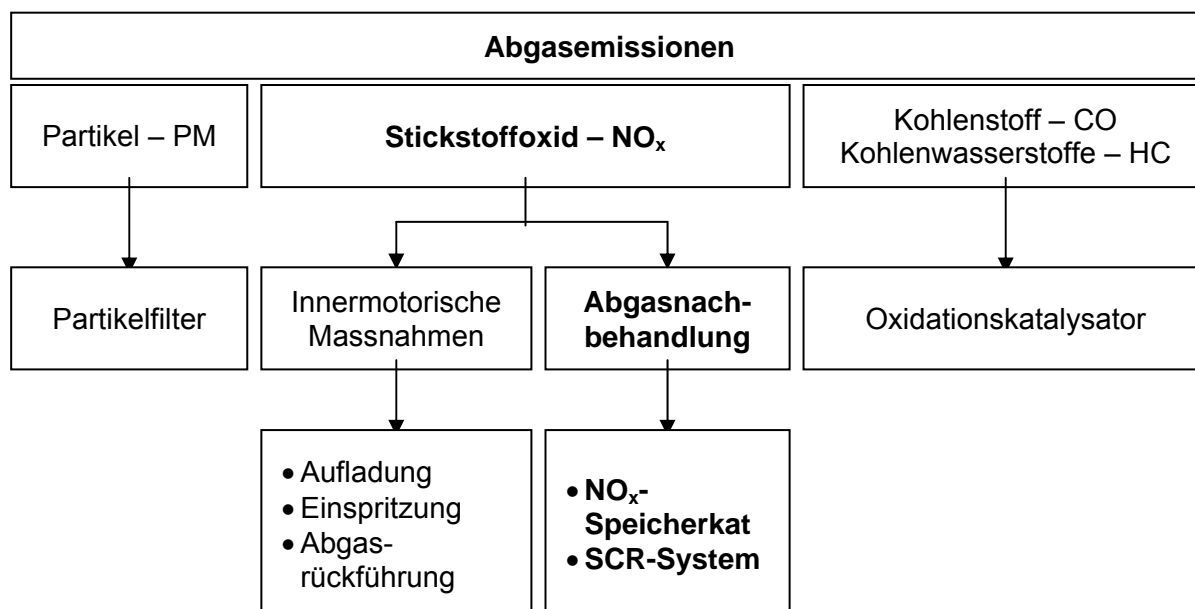


Abbildung 1: Maßnahmen der Emissionsreduktion [1]

Die zwei bedeutsamsten Abgasnachbehandlungstechnologien zur NO_x-Reduktion sind der NO_x-Speicherkatalysator (NSK) und das SCR-System. Die Auswahl der für einen speziellen Anwendungsfall geeigneten Technologie ist von mehreren Faktoren abhängig.

Die emissionsorientierte Optimierung des Systems Motor/Abgasnachbehandlung führt im Allgemeinen zu Zielkonflikten.

Abbildung 2 zeigt auf, dass ausgehend von einer Euro 4-Applikation mit Dieselpartikelfilter eine Optimierung der Verbrennung einerseits zu sinkenden NO_x -Emissionen führt, andererseits steigende HC-Emissionen verursacht. Die innermotorische Maßnahme der Verschleppung der Verbrennung nach hinten führt zwar zu einer Senkung der Spitzentemperaturen und dadurch zu einer Reduktion der NO_x -Emissionen, verursacht jedoch auch eine Verschlechterung des Motorwirkungsgrades und somit eine Erhöhung des Kraftstoffverbrauchs und der HC-Emissionen.

Dieser Konflikt kann auch mit einem NO_x -Speicherkatalysator, bei welchem es im Zuge der Regeneration zu einem höheren Kraftstoffbedarf kommt, nicht gelöst werden.

Durch den Einsatz eines SCR-Systems wird hingegen eine von den HC-Emissionen unabhängige Absenkung der NO_x -Emissionen möglich, da dieses System eine verbrauchs- und emissionsoptimale Abstimmung des Motors erlaubt. Etwaige erhöhte NO_x -Emissionen werden im äußerst effizienten SCR-System zu N_2 reduziert [3].

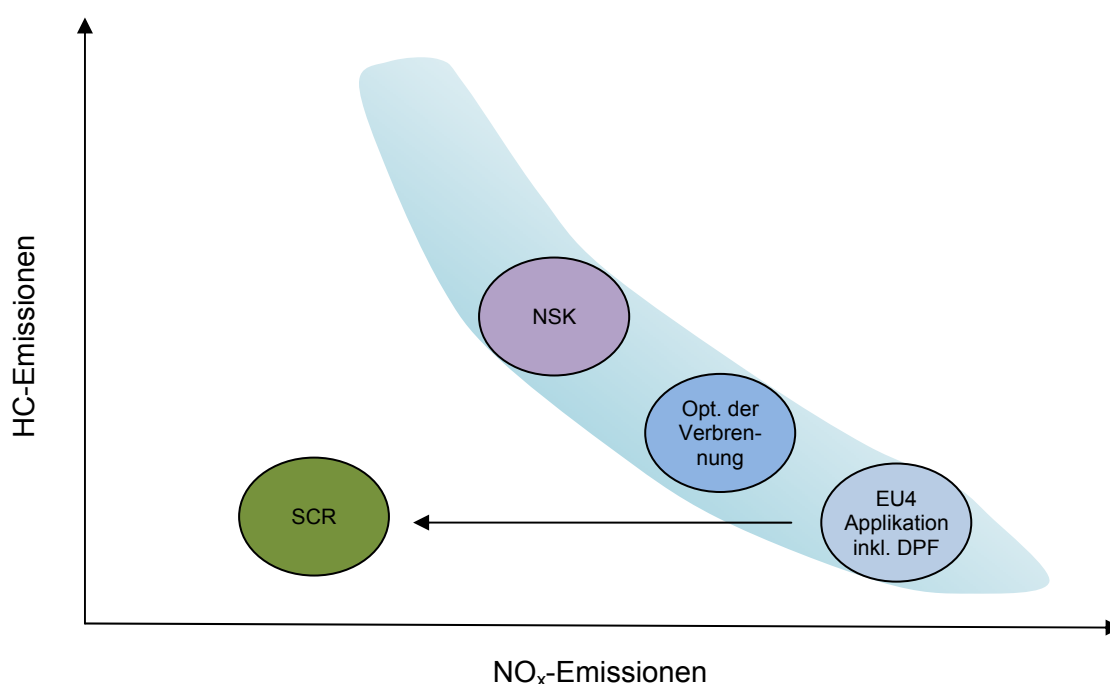


Abbildung 2: Zielkonflikt zwischen HC- und NO_x -Emissionen für Diesel-PKW [3]

Eine Reduktion der NO_x -Emissionen durch die innermotorische Maßnahme der Absenkung der vorherrschenden Temperaturen durch Homogenisierung wirkt sich, wie in **Abbildung 3** dargestellt, weiters negativ auf die CO_2 -Emissionen bzw. den Kraftstoffverbrauch aus, da das Temperaturniveau für den Wirkungsgrad des thermischen Prozesses entscheidend ist.

Es entsteht ein Zielkonflikt zwischen den CO_2 -Emissionen (Kraftstoffverbrauch) und den NO_x -Emissionen. Die regelmäßig erforderliche Regeneration des NO_x -Speicherkatalysator beeinflusst die CO_2 -Emissionen ebenfalls negativ. Durch den Einsatz eines SCR-System wird dieser Zielkonflikt weitgehend gelöst, sodass eine Reduktion der NO_x -Emissionen nahezu ohne Anstieg der CO_2 -Emissionen gewährleistet wird [3].

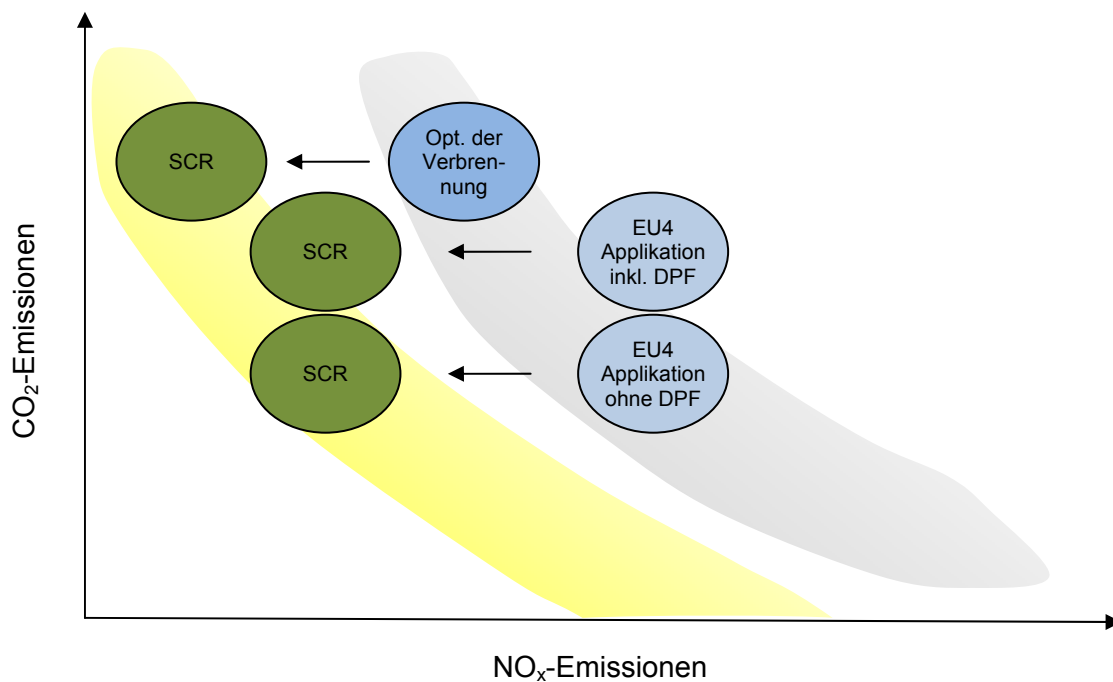


Abbildung 3: Zielkonflikt zwischen CO₂- und NO_x-Emissionen für Diesel-PKW [3]

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] **Honeder, J., et al:** Herausforderung des Dieselmotors zur Erfüllung zukünftiger Abgasnormen. *Tagungsband zur 12. Tagung - Der Arbeitsprozess des Verbrennungsmotors*. Graz: Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik - TU Graz, 2009, S. 156-171. BMW Motoren GmbH, Entwicklung Dieselmotoren, Steyr.
- [2] **Walz, C.:** *NO_x-Minderung nach dem SCR-Verfahren: Untersuchungen zum Einfluss des NO₂-Anteils (Dissertation)*. Karlsruhe: Universität Karlsruhe - Fakultät für Chemie, 2000.
- [3] **Enderle, C., et al:** Selective Catalytic Reduction mit Harnstoff - Der effektive Weg zur Stickstoffminderung am PKW-Dieselmotor. *Tagungsband zum 26. Internationalen Wiener Motorensymposium*. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, 2005, S. 280-296. VDI Fortschritts-Berichte Band 595.

3.2 3-WEGE-KATALYSATOR

Nach der Einführung des Drei-Wege-Katalysators für Ottomotoren, Abbildung 1, dem man eine enorme Senkung der Emissionen in den letzten Jahren zu verdanken hat, und der ständigen Emissionsminderung durch innermotorischen Maßnahmen bildet die Einführung des Partikelfilters bzw. Partikelkatalysators die Lösung der Partikelproblematik von Dieselmotoren.

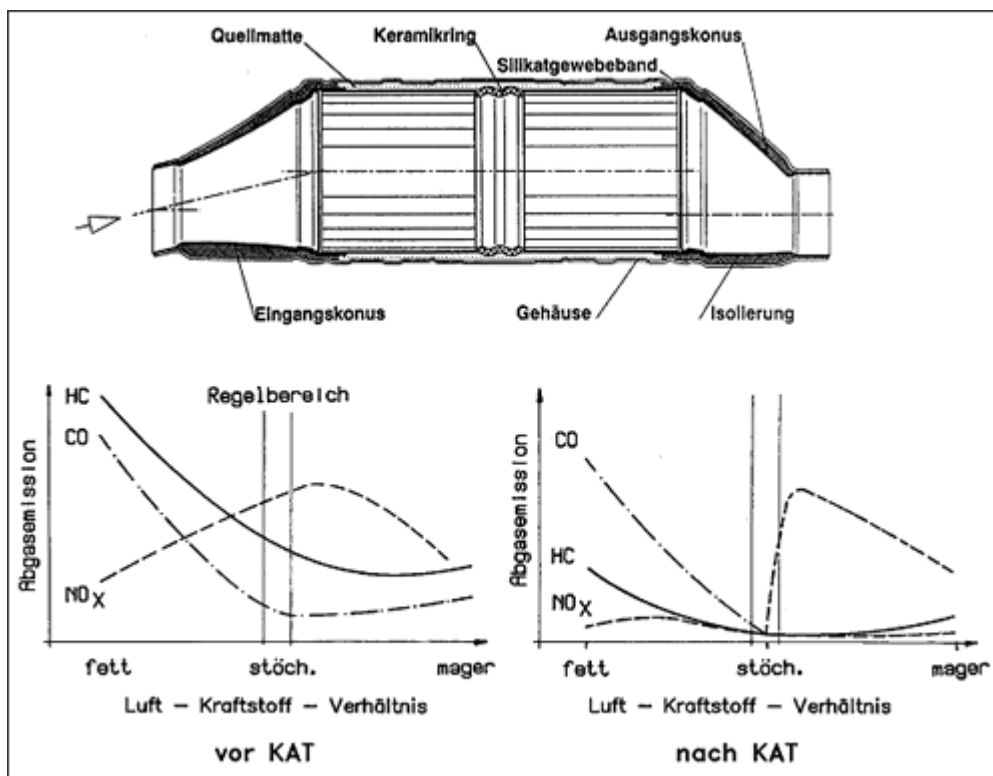


Abbildung 1: Aufbau (oben) und Wirkung (unten) des Dreiweg-Katalysators [1]

Hohen Konvertierungsgrad für alle drei Schadstoffe erzielt man in einem schmalen Luftzahlbereich, genannt λ -Fenster, daher ist eine genaue Regelung erforderlich.

LITERATURVERZEICHNIS:

[1] Lenz, H.P.: *Skriptum zur Vorlesung Verbrennungskraftmaschinen Vertiefung*, 13. verbesserte Auflage 2000, Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Kraftfahrzeugbau, Technische Universität Wien; Wien, Jänner 2000, B2649.

3.3 PARTIKELFILTER

Bei Dieselmotoren ist die Filtertechnologie eine wirksame Maßnahme um die sich laufend verschärfenden Emissionsgrenzwerte einhalten zu können.

GESCHLOSSENE SYSTEME

Der monolithische Partikelfilter ist ähnlich wie ein Zellenkatalysator aufgebaut, jedoch mit wechselweise verschlossenen Zellen und porösen Wänden.

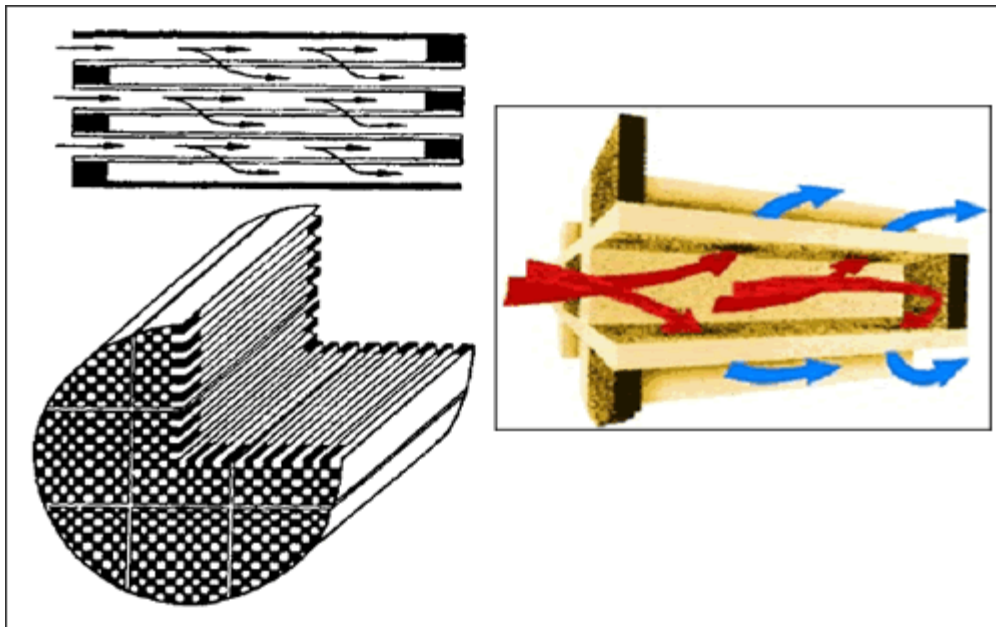


Abbildung 2: Monolithischer Zellenfilter mit wechselweise verschlossenen Zellen [3]

Der Filterwerkstoff ist üblicherweise Cordierith. Der mittlere Porendurchmesser hat eine Größenordnung von $10\ \mu\text{m}$. Die Filtrationsfläche pro Filtervolumen ist sehr groß. Die daraus resultierenden niedrigen Gasgeschwindigkeiten durch die porösen Wände bewirken eine gute Filterwirkung mit hohem Abscheidungsgrad. Abgeschieden werden Partikel, die sich bei der herrschenden Temperatur im festen oder flüssigen Zustand befinden. Das heißt: Rußagglomerate bleiben haften, viele Kondensate gehen aber durch und bilden nach dem Filter viele flüssigen Nanopartikel. Abgeschieden werden auch Aschepartikel aus der Verbrennung von Motoröl.

Der Filter verstopft sich allmählich, wobei der Motor gegen einen immer höheren Gegendruck arbeitet. Bei Überschreitung eines bestimmten Wertes wird die Regeneration des Filters eingeleitet und der im Filter vorhandene Ruß verbrannt.

Der Wirkungsgrad (gravimetrisch) ist außerhalb der Regeneration höher als 90%.

OFFENE SYSTEME

Anstatt durch Verbrennung kann man abgeschiedene Partikel mittels im Abgas vorhandenem NO_2 oxidieren, wobei NO_2 zu NO reduziert wird.

Der PM-Filterkatalysator ist ein Oxidationskatalysator mit Partikelverminderungsfunktion. Die Rußpartikel werden durch gezielte Umlenkung der Strömung in den offenen Katalysatorkanälen an einer porösen Schicht abgelagert und mit NO_2 zu CO_2 oxidiert. **Abbildung 3** zeigt das Funktionsprinzip des PM-Filterkatalysators.

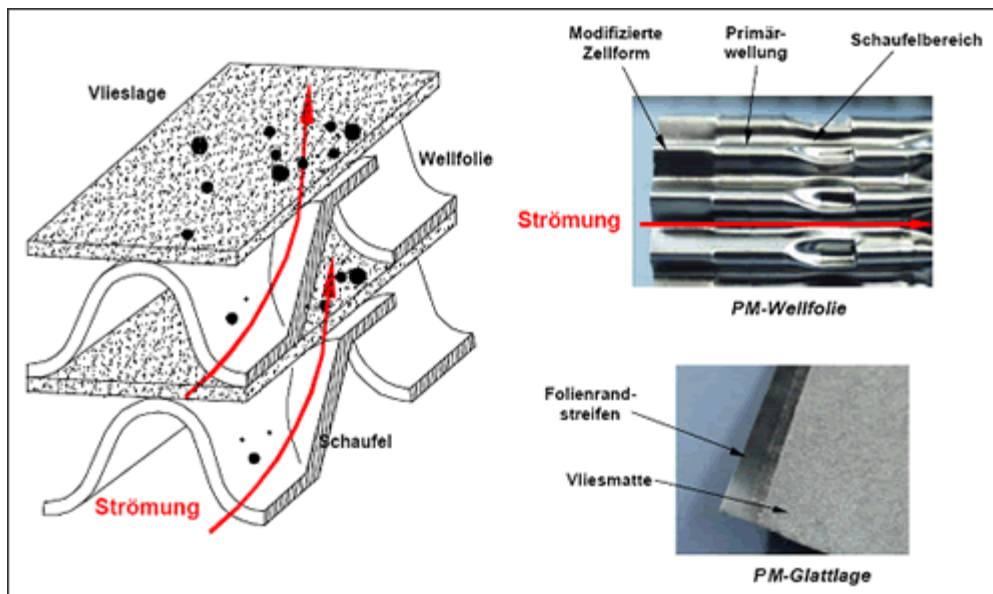


Abbildung 3: Aufbau und Funktionsprinzip des PM-Filterkatalysators [4]

Die Effektivität des PM-Filterkatalysators hängt von der Oxidationsrate der eingelagerten Partikel ab. Diese ist von der Temperatur und vom $\text{NO}_2/\text{Ruß}$ -Verhältnis abhängig. Die Abscheideeffektivität der Rußpartikel ist direkt von dessen Länge und von der Strömungsgeschwindigkeit, d.h. dem Katalysatordurchmesser, abhängig. Die Filterleistung ist bei kleineren Durchmessern aufgrund der höheren Kanalgeschwindigkeit größer.

Die signifikanten Vorteile des PM-KAT-Systems gegenüber Partikelfiltern sind der durch offene Kanalstruktur bedingte niedrige Gegendruck, selektive Abscheidung von Ruß und Durchlässigkeit für Motoren-Ölasche.

In Abhängigkeit des $\text{NO}_2/\text{Ruß}$ -Verhältnisses im Abgas lassen sich im PKW Wirkungsgrade von 30 – 60 % und im Nutzfahrzeug von 60 – 85 % realisieren [6].

LITERATURVERZEICHNIS:

- [1] **Lenz, H.P.:** *Skriptum zur Vorlesung Verbrennungskraftmaschinen Vertiefung*, 13. verbesserte Auflage 2000, Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Kraftfahrzeugbau, Technische Universität Wien; Wien, Jänner 2000, B2649
- [2] **Henn, J.; Lüders, H.:** Dieselpartikelfilter – Potential und Chancen moderner Filtermaterialien für künftige Abgasnachbehandlungskonzepte, *7. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik 1998*
- [3] **Siegmann, H.C.; Burtscher, H.; Czerwinski, J.; Matter, U.; Kasper, M.; Wyser, M.; Hofer, L.; Schegk, C.D.:** *Glossar zur Begriffsfamilie „Partikel“ aus der motorischen Verbrennung*, TTM, 12.4.2000
- [4] **Zelenka, P.:** *Regenerations-Methoden für Diesel-Partikelfilter*, Tagung Nr. H030060291, 28.06-29.06.2001 Haus Technik E.V., Außeninstitut d. Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, 2001
- [5] **Ebener St.; Flörchinger P.:** *Druckverlustmodell für keramische Dieselpartikelfilter*. MTZ Motortechnische Zeitschrift 61 (2000) Nr. 6, S. 414-422
- [6] **Brück, R.; Diringer, J.:** *Der PM-Filterkatalysator: Ein Diesel-Oxidationskatalysator mit Partikelminderung der nächsten Generation*, Januar 2005
- [7] **Jacob, E.:** *Ammoniakgeneratoren für GD-KAT-Systeme*, Januar 2005

3.4 NO_x-SPEICHERKATALYSATOR (NSK)

Der NO_x-Speicher-katalysator basiert auf einer dem Partikelfilter ähnlichen Idee. Die zu reduzierende chemischen Komponente, hier NO_x, wird in einem Katalysator eingelagert. Nach Erreichen eines definierten Füllgrades wird das eingelagerte NO_x wieder ausgelagert und dabei zu Stickstoff (N₂) konvertiert. Im Detail kann der Prozess folgendermaßen beschrieben werden:

Die im Magerbetrieb¹ des Dieselmotors entstehenden Stickstoffoxide (NO_x) bestehen zum überwiegenden Teil aus Stickstoffmonoxid (NO), welches zunächst zu Stickstoffdioxid (NO₂) oxidiert wird. In weiterer Folge reagiert das NO₂ mit den im NO_x-Speicher-katalysator vorhandenen Alkali- oder Erdalkalikomponenten in einer Säure-Base-Reaktion zu Nitraten (NO₃⁻), welche im NO_x-Speicher-katalysator eingelagert werden. Sowohl die Oxidation von NO zu NO₂ als auch die Bildung von Nitraten wird durch die katalytische Wirkung der Beschichtung² des Katalysators unterstützt [1], [2].

Der Temperaturbereich eines NSK, in welchem die Einspeicherung³ erfolgt, liegt zwischen 150°C und 500°C mit einem Maximum bei 300°C bis 400°C. Zu niedrigen Temperaturen hin sinkt die Reaktionsgeschwindigkeit der Oxidation NO zu NO₂, welche jedoch für die Nitratbildung erforderlich ist. Die Einlagerung bei höheren Temperaturen wird dagegen durch die Speichereffizienz des Katalysatormaterials und dem thermischen Zerfall der Nitrate beeinflusst [2].

Nach Erreichen des definierten Füllgrades wird der NSK wieder entleert. Diese Ausspeicherung⁴ erfolgt durch den kurzzeitigen Betrieb des Motors in einem Bereich mit Kraftstoffüberschuss. Dadurch werden die erforderlichen Reduktionmittel (Wasserstoff H₂, Kohlenmonoxid CO und Kohlenwasserstoffe HC) bei gleichzeitigem Sauerstoffmangel zur Verfügung gestellt. Die eingespeicherten Nitrate reagieren in einem Temperaturbereich von 280 bis 440°C (Umsatzmaximum bei 350°C) mit den Reduktionsmitteln zu Stickstoff N₂, Wasser H₂O und Kohlendioxid CO₂ [3], [1].

Aufgrund der zyklischen Ein- und Ausspeicherung wird dieses System als diskontinuierlich bezeichnet.

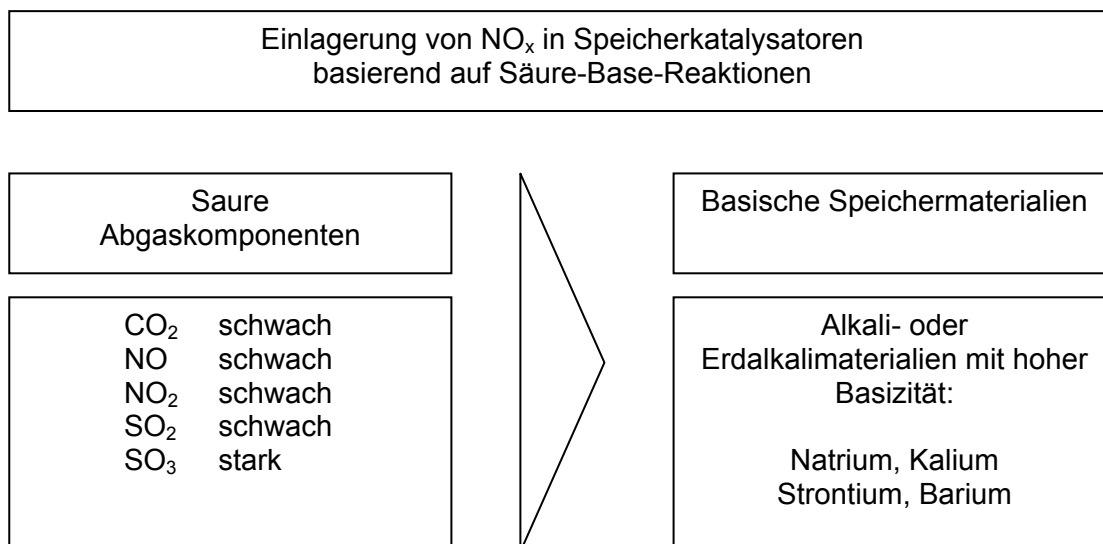
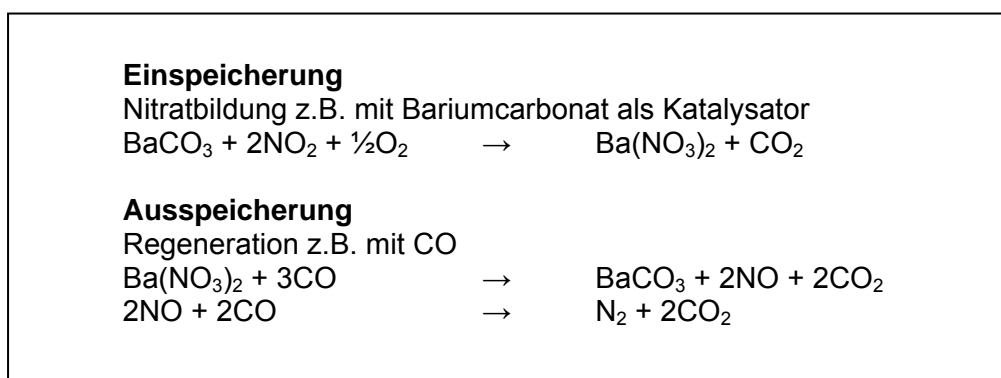
Die chemischen Grundlagen werden in **Abbildung 1** und **Abbildung 2** zusammengefasst.

¹ Motorbetriebsmodus indem Luftüberschuss ($\lambda > 1$) vorherrscht.

² Aktivkomponente (Beschichtung): Oxide der Alkali- (Na, K, Rb, Cs), Erdalkali- (Mg, Ca, Sr, Ba) und in begrenztem Umfang Seltenerdelemente (z.B. La) [1], [6]

³ oder auch Einlagerung

⁴ oder auch Regeneration

Abbildung 1: Chemische Grundlagen der NO_x Einspeicherung bei NO_x-Speicherkatalysatoren [1]Abbildung 2: Basisreaktionen im NO_x-Speicherkatalysator [4]

Diese Abgasnachbehandlungstechnologie erfordert einen schwefelfreien Kraftstoff, da im Kraftstoff enthaltener Schwefel (S) ebenfalls im NSK eingespeichert wird. Die Beseitigung des als Sulfat ($[SO_4]^{2-}$) eingelagerten Schwefels mittels Konvertierung zu Schwefeldioxid (SO₂) ist im Vergleich zur Entfernung des Stickstoffnitrates nur bei höheren Temperaturen von 600 bis 750°C möglich.

Wird aber neben der eigentlichen Regeneration nicht ergänzend eine Desulfatisierung durchgeführt, blockiert das Sulfat die Einlagerung von Stickstoffnitrat, da es eine höhere thermodynamische Stabilität aufweist [3], [2].

Diese eben beschriebene Funktionsbeeinträchtigung durch den Schwefelanteil des Kraftstoffes (bzw. der Schmiermittel) und die thermisch bedingte Alterung des NSK führen zu einer Reduktion der NO_x-Konversionsrate. Im Auslieferungszustand ist von Reduktionsraten im Bereich von 90% auszugehen. Bereits nach 20.000 km kann die Konversionsrate auf 40 bis 60% sinken, bleibt jedoch danach weitgehend stabil [1].

Der NSK eignet sich vorwiegend für die Erfüllung der Euro 6 Grenzwerte leichter bis mittelschwerer Kraftfahrzeuge.

In **Abbildung 3** ist der Aufbau einer modernen Abgasnachbehandlungsanlage mit NO_x-Speicherkatalysator wiedergegeben. Der zum schnellen Erreichen der optimalen Betriebstemperatur motornah verbaute Oxidationskatalysator wurde mit dem daran

anschließenden Partikelfilter im selben Gehäuse verbaut. Der NO_x -Speicherkatalysator befindet sich im Unterboden des Fahrzeuges. Zudem wurde ein Schwefelwasserstoff- (H_2S)-Katalysator vorgesehen, welcher mögliche H_2S -Emissionen während der Desulfatisierung verhindert [5].

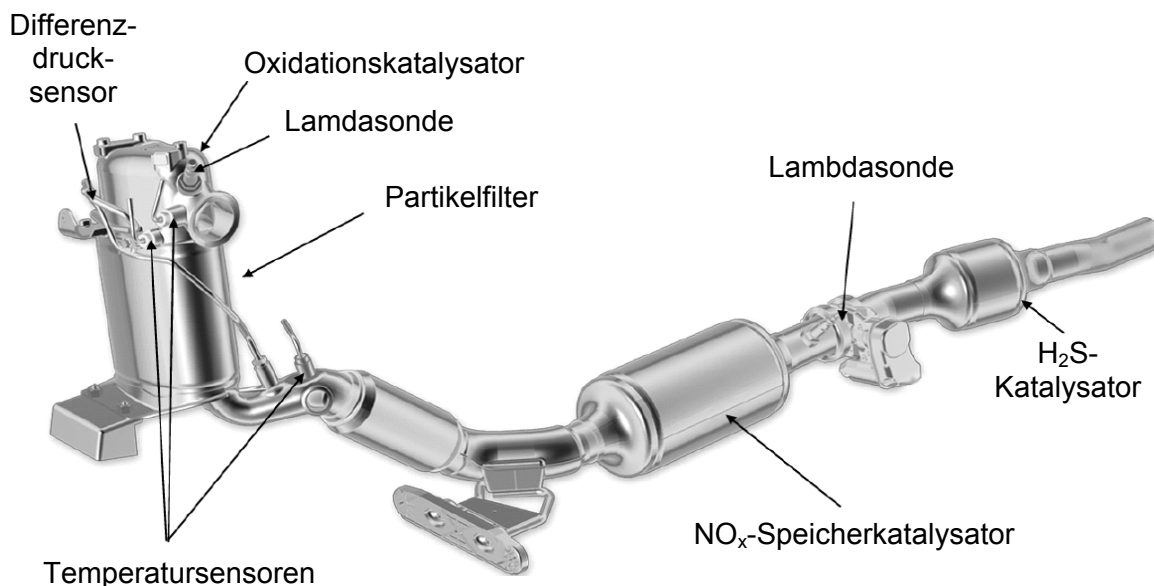


Abbildung 3: Ausgeführtes Beispiel einer NSK-Abgasanlage von Volkswagen für einen Dieselmotor [5]

Das in **Abbildung 4** dargestellte Ausführungsbeispiel zeigt ebenfalls eine motornahen Anordnung des Katalysators. Dieser arbeitet aufgrund seiner relativ hohen Edelmetallbeschichtung als NO_x -Speicherkatalysator und im Normalbetrieb des Motors zusätzlich als Oxidationskatalysator. Der Partikelfilter befindet sich im selben Gehäuse unmittelbar darauffolgend. Durch die Wirkung des NO_x -Speicherkatalysators als Oxidationskatalysator kann die Partikelmasse vermindert werden. Zusätzlich wird nach dem NO_x -Speicherkatalysator verbleibendes NO_2 im Partikelfilter zu NO reduziert.

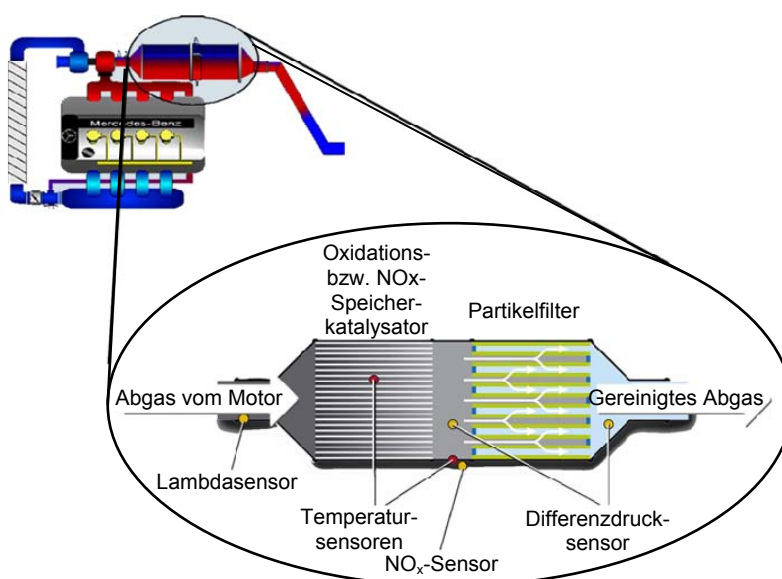


Abbildung 4: Ausgeführtes Beispiel einer NSK-Abgasanlage von Mercedes Benz für einen Dieselmotor [1]

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] **Breitbach, H, et al:** Potenziale und Grenzen der Abgasnachbehandlung durch NOx-Speicherkatalysatoren. *Tagungsband zum 14. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik*. Aachen : Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen Aachen, Institut für Kraftfahrzeugwesen, 2005, S. 1023-1044.
- [2] **Rohr, F. et al:** Untersuchungen zur Dauerhaltbarkeit von NOx-Nachbehandlungssystemen für Dieselmotoren. *Tagungsband zum 16. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik*. Aachen : Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen Aachen, Institut für Kraftfahrzeugwesen, 2007, S. 265-278.
- [3] **Honedler, J., et al:** Herausforderung des Dieselmotors zur Erfüllung zukünftiger Abgasnormen. *Tagungsband zur 12. Tagung - Der Arbeitsprozess des Verbrennungsmotors*. Graz : Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik - TU Graz, 2009, S. 156-171. BMW Motoren GmbH, Entwicklung Dieselmotoren, Steyr.
- [4] **Mayer, Th.:** *Feststoff-SCR-System auf Basis von Ammoniumcarbamat*. Kaiserslautern : Universität Kaiserslautern, 2005. Dissertation.
- [5] **Göbel, U. et al:** Diesel NOx-Abgasnachbehandlungssysteme für Nordamerika. *Tagungsband zum 29. Internationalen Wiener Motorensymposium*. Wien : VDI-Verlag GmbH, 2008, S. 183-201. VDI Fortschritt-Berichte Band 672.
- [6] **Müller, W., et al:** Innovative Abgasnachbehandlungskonzepte mit NOx-Speicherkatalysatoren für die strahlgeführte Benzindirekteinspritzung. *Tagungsband zum 27. Internationalen Wiener Motorensymposium*. Düsseldorf : VDI-Verlag GmbH, 2006, S. 265-279. VDI Fortschritt-Berichte Band 622.

3.5 SCR-SYSTEM

Im Folgenden werden die Funktionsweise eines SCR-Systems erörtert und Anwendungsbeispiele vorgestellt.

Die Unterschreitung der Euro 6-Grenzwerte bei schweren Kraftfahrzeugen, welche aufgrund ihrer höheren Masse höhere Rohemissionen aufweisen, erfordert neben den innermotorischen Maßnahmen den Einsatz sogenannter SCR-Systeme. Insbesondere die Einhaltung US-amerikanischer Grenzwerte bedingt aus heutiger Sicht diese Technologie [1].

SCR steht dabei für Selektive katalytische Reduktion. SCR-Katalysatoren werden in Kombination mit Oxidationskatalysatoren und Partikelfiltern in verschiedenen Varianten dargestellt. Das in **Abbildung 1** wiedergegebene Schema zeigt die prinzipiellen Zusammenhänge und chemischen Abläufe eines derartigen Systems.

Im Gegensatz zum NO_x-Speicherkatalysator arbeitet das SCR-System kontinuierlich. In einem Vorkatalysator¹ wird laufend das sich primär aus Stickstoffmonoxid (NO) und Stickstoffdioxid (NO₂) zusammensetzende Stickstoffoxid (NO_x) in ein Verhältnis von 1:1 gebracht.

Daran anschließend wird Harnstoff in wässriger Lösung² (NH₂)₂CO in berechneter erforderlicher Menge über eine separate Düse in den heißen Abgasstrom eingebracht, wo die Verdampfung in Harnstoff und Wasser erfolgt.

Die Instabilität des molekularen Harnstoffs führt am Harnstoffzersetzungskatalysator³ in weiterer Folge spontan zu einem Zerfall in Isocyanäure (HNCO) und Ammoniak (NH₃). In einem zweiten Schritt zerfällt das hochreaktive HNCO durch katalytische Hydrolyse in NH₃ und CO₂ [2].

Die entsprechenden chemischen Reaktionen werden in **Abbildung 2** wiedergegeben.

¹ Aktivkomponente (Beschichtung): z.B. Platin [2]

² AbBlue®... kommerzielle Bezeichnung. 32,5% Harnstoff in Wasser gelöst. Farblose, klare Flüssigkeit mit einem Gefrierpunkt von -11°C [8].

³ Aktivkomponente (Beschichtung): z.B. Titandioxid (TiO₂) [9].

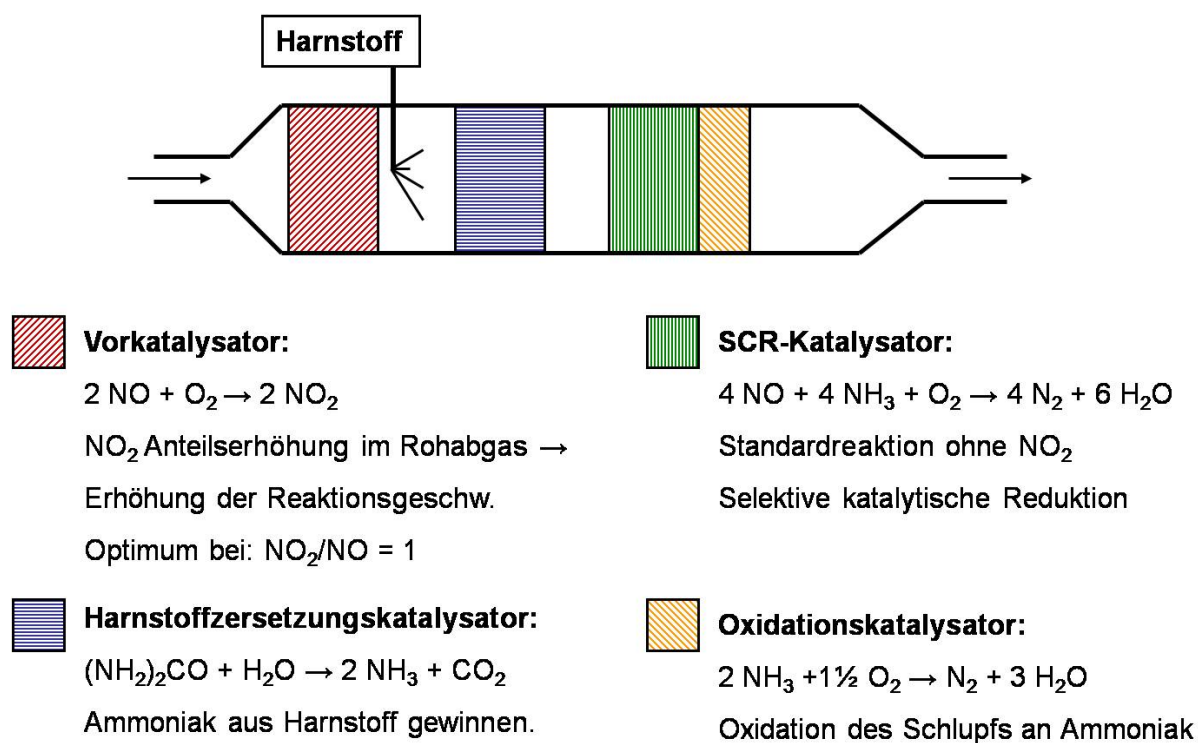


Abbildung 1: Schema eines aufwändigen SCR-Systems [3]

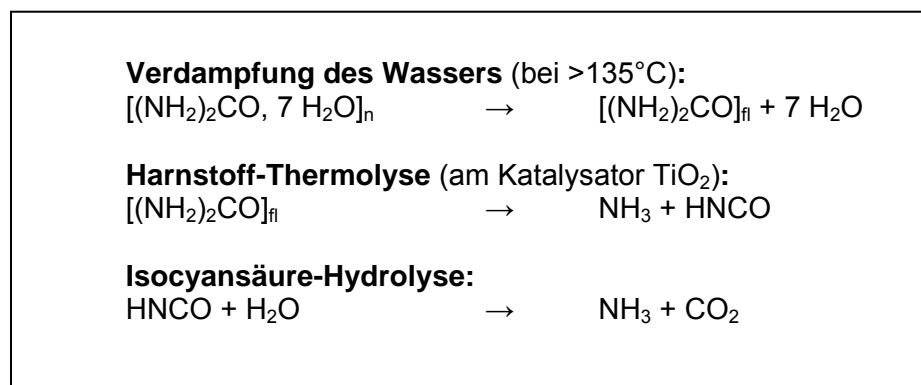


Abbildung 2: Zweistufige Harnstoffzersetzung [2]

Ammoniak dient im SCR-Katalysator⁴ als Reaktionsmittel. NH_3 reagiert dabei mit NO bzw. NO_2 zu Stickstoff (N_2) und Wasser (H_2O). Die NH_3 -Gleichverteilung über den gesamten Querschnitt des SCR-Katalysators ist für dessen Wirkungsgrad von essentieller Bedeutung [3]. Um diese gleichmäßige Verteilung zu erreichen, werden aufgrund der kurzen Durchmischungsstrecke zwischen Eindüsung und SCR-Katalysator meist Mischerelemente eingesetzt.

Abhängig von der NH_3 -Gleichverteilung, der Abgastemperatur, der Raumgeschwindigkeit und dem Verhältnis von NO zu NO_2 werden unterschiedliche Konversionsraten erreicht. Das Temperaturoptimum liegt dabei zwischen 200 und 300°C [1]. Die maximalen Temperaturen heutiger Systemen erreichen zwischen 500 und 600°C . Für zukünftige Anwendungen werden kurzfristige Spitzentemperaturen von bis zu 800°C erwartet, sodass der Einsatz temperaturstabiler Komponenten zu einem der primären Entwicklungsziele wird [4].

⁴ Aktivkomponente (Beschichtung): z.B. Fe-Zeolith, Cu-Zeolith, Vanadium [4].

Die je nach NO zu NO₂ Verhältnis unterschiedlichen chemischen Reaktionen im SCR-Katalysator werden in **Abbildung 3** wiedergegeben. Es sind dabei drei Basisreaktionen zu unterscheiden. Als Standardreaktion wird jene chemische Umsetzung bezeichnet, welche ohne NO₂, also nur unter Anwesenheit von NO und NH₃ bzw. Sauerstoff (O) erfolgt. Eine schnellere und aktivere Umsetzung wird bei einem Verhältnis von 1:1 zwischen NO und NO₂ erreicht. Herrscht NO₂-Überschuss (liegt also ein Verhältnis zwischen NO₂ und NO von über 1 vor) läuft die Reaktion langsamer ab und führt zeitgleich zu NH₃-Verlusten (erhöhter NH₃-Verbrauch). Das bedeutet, dass die Konvertierung von NO bzw. NO₂ zu N₂ mehr NH₃ erfordert als im Fall der Standardreaktion bzw. der schnellen Reaktion.

Demnach besteht das Ziel darin, das NO- zu NO₂-Verhältnis mittel Vorkatalysator stets am Optimum von 1:1 zu halten [5].

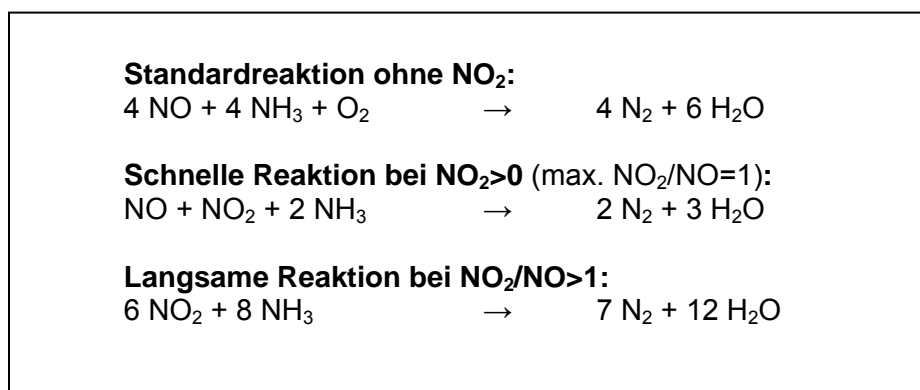


Abbildung 3: Basisreaktionen im SCR-Katalysator [5]

Neben den Basisreaktionen sind weitere unerwünschte Reaktionen möglich. Diese wurden in **Abbildung 4** zusammengefasst und können in die drei Kategorien Lachgas (N₂O)-Bildung, NO-Bildung und NH₃-Verlust gegliedert werden. In allen Fällen erfolgt eine ineffiziente Verwertung des Reaktionsmittels Ammoniak und eine fehlende Reduktion bzw. Erhöhung der Stickstoffoxide [2], [6].

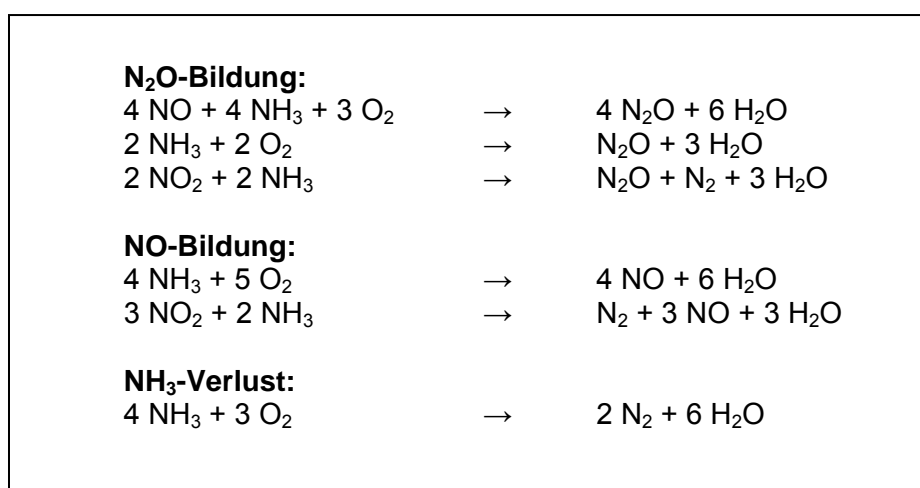


Abbildung 4: Unerwünschte Reaktionen [2], [6]

Die letzte Stufe des SCR-Systems stellt ein Oxidationskatalysator^{5,6} dar. Nicht benötigtes Ammoniak wird in diesem vor dem Austritt in die Atmosphäre zu N_2 und H_2O konvertiert [3]. Der beschriebene Aufbau eines SCR-Systems entspricht dem maximalen Detaillierungsgrad. Wie den folgenden Beispielen zu entnehmen ist, werden Seriumsetzungen weniger komplex dargestellt.

In **Abbildung 5** ist der Aufbau einer modernen Abgasnachbehandlungsanlage mit SCR-Katalysator wiedergegeben. Analog zu den Konzepten mit NO_x -Speicherkatalysator wird zum schnellen Erreichen der optimalen Betriebstemperatur der Oxidationskatalysator und der Partikelfilter motornah verbaut.

Das Dosierventil zur Eindüsung des Harnstoffs befindet sich unmittelbar nach dem Partikelfilter, da hier die Temperaturen, welche für die Verdampfung der Harnstoffwasserlösung notwendig sind, vorherrschen und eine möglichst lange Durchmischungs- und Gleichverteilungsstrecke bis zum am Unterboden angeordneten SCR-Katalysator gewährleistet wird. Der im Bereich der Hinterachse untergebrachte Harnstofftank beinhaltet eine ausreichende Menge an Harnstoff, um diesen lediglich bei den Fahrzeugservices füllen zu müssen [7].

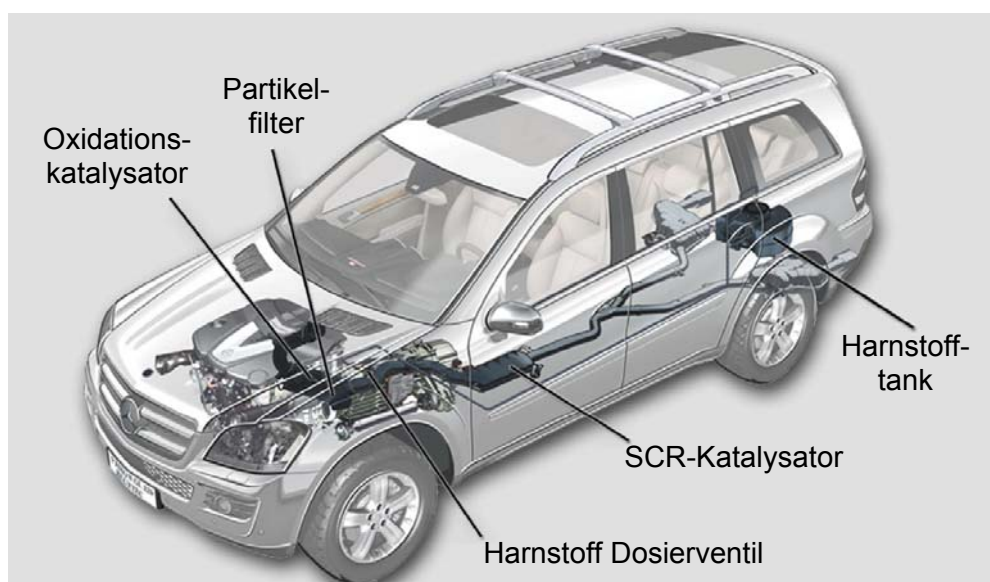


Abbildung 5: Konzept einer SCR-Abgasanlage von Mercedes Benz für einen Dieselmotor [7]

⁵ oder auch Sperrkatalysator

⁶ Aktivkomponente (Beschichtung): z.B. Platin [2]

Das in **Abbildung 6** dargestellte Konzept beruht auf zu Abbildung 5 analogen Überlegungen.

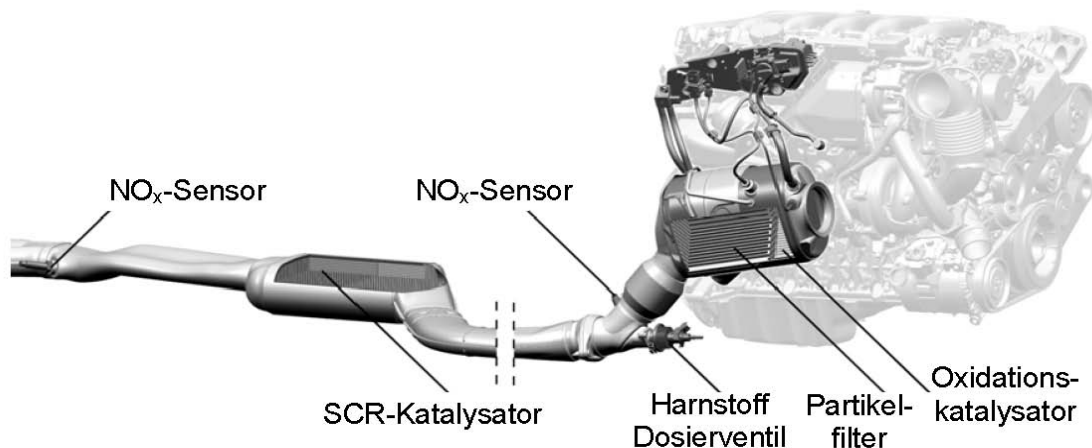


Abbildung 6: Konzept einer SCR-Abgasanlage von BMW für einen Dieselmotor [1]

Ein SCR-System wird zur Erfüllung der scharfen US-Grenzwerte und vorzugsweise bei schweren Fahrzeugen zur Erfüllung der Euro 6 Grenzwerte gewählt.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] **Honedner, J., et al:** Herausforderung des Dieselmotors zur Erfüllung zukünftiger Abgasnormen. *Tagungsband zur 12. Tagung - Der Arbeitsprozess des Verbrennungsmotors*. Graz : Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik - TU Graz, 2009, S. 156-171. BMW Motoren GmbH, Entwicklung Dieselmotoren, Steyr.
- [2] **Jacob, E.:** Perspektiven der mobilen SCR-Technik. *Tagungsband zum 15. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik*. Aachen : Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen Aachen, Institut für Kraftfahrzeugwesen, 2006, S. 1303-1336. Emitec GmbH.
- [3] **Walz, C.:** *NO_x-Minderung nach dem SCR-Verfahren: Untersuchungen zum Einfluss des NO₂-Anteils (Dissertation)*. Karlsruhe : Universität Karlsruhe - Fakultät für Chemie, 2000.
- [4] **Müller, W., et al:** Abgasnachbehandlungssysteme für Nutzfahrzeuge in On- und NonRoad-Anwendungen. *Tagungsband zum 30. Internationales Wiener Motorensymposium*. Düsseldorf : VDI-Verlag GmbH, 2009, S. 256-277. VDI Fortschritt-Berichte Band 697.
- [5] **Burkardt, A.:** *Stickstoffoxidminderung nach dem SCR-Verfahren: Untersuchungen zur Struktur und Acidität vanadiumoxidhaltiger Katalysatoren (Dissertation)*. Karlsruhe : Universität Karlsruhe - Fakultät für Chemie, 2001.
- [6] **Mußmann, L.:** Entwicklung hochtemperaturstabiler SCR Katalysatoren für zukünftige Konzepte zur Diesel Abgasnachbehandlung. *3. Emission Control*. Dresden : Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrzeuge, 2006. Umicore AG & Co. KG.
- [7] **Schommers, J. et al:** Weltweite Emissionsstrategie mit BLUETEC für Pkw-Diesel-Antriebe. *Tagungsband zum 15. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik*. Aachen : Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen Aachen, Institut für Kraftfahrzeugwesen, 2006, S. 223-244. DaimlerChrysler AG.
- [8] **Danielsson, P, et al:** Volvo Technologie für Euro 4 und 5 – SCR und AdBlue. *VÖV-Fachtagung*. Baden : Verband öffentlicher Verkehr, 2005.
- [9] **Jacob, E., et al:** "Turbulente" SCR-Katalysatorsysteme. *3. Emission Control*. Dresden : Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrzeuge, 2006. Emitec GmbH.