

Die approbierte Originalversion dieser Diplom-/
Masterarbeit ist in der Hauptbibliothek der Tech-
nischen Universität Wien aufgestellt und zugänglich.

<http://www.ub.tuwien.ac.at>



The approved original version of this diploma or
master thesis is available at the main library of the
Vienna University of Technology.

<http://www.ub.tuwien.ac.at/eng>

TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN

Diplomarbeit

Ökologische Bewertung von Harnstoff als Ausgangsbasis für das Reduktionsmittel NH₃ in SCR-Systemen

*ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplomingenieurs der technischen Wissenschaften unter der Leitung von*

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Bernhard Geringer
und

Dr. techn. Werner Tober

Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik

E315

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Johannes Fuhrmann

0525383

Prielstraße 18A, 4600 Wels

Wien, 2013

Eidesstattliche Erklärung

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

**Ökologische Bewertung von Harnstoff als Ausgangsbasis für das
Reduktionsmittel NH₃ in SCR - Systemen**

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin. Ich erkläre weiters an Eides, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Arbeiten selbstständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur genannt habe.

Weiters erkläre ich, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch im Ausland (einer Beurteilerin/ einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Wien, am 19.06.2013

Fuhrmann Johannes

Vorwort

Vielen Dank an alle meine Studienkollegen, Freunde, Verwandte und weitere, die meine Studienzeit zu einer der aufregendsten, erlebnisreichsten und schönsten Zeiten meines Lebens gemacht haben. Ich werde die zahlreichen Tage auf der Bibliothek und die zahlreichen Erlebnisse in Wien immer in bester Erinnerung halten.

Diplomaufgabe

Herrn Johannes Fuhrmann, Matrikelnummer 0525383 wird folgende Diplomaufgabe gestellt:

Ökologische Bewertung von Harnstoff als Ausgangsbasis für das Reduktionsmittel NH₃ in SCR-Systemen

Die selektive katalytische Reduktion mit Ammoniak ist ein wirkungsvolles Verfahren zur Absenkung der Stickoxidemissionen im dieselmotorischen Abgas. Aufgrund der toxikologischen Eigenschaften von Ammoniak ist das Mitführen im Fahrzeug in Form eines Betriebsstoffes mit Risiken behaftet, sodass stattdessen eine Harnstoff-Wasserlösung als Vorläufersubstanz zur Ammoniakbildung zum Einsatz kommt.

Dieser zusätzliche Betriebsstoff wird über das reguläre Tankstellennetz vertrieben. Harnstoff wird industriell aus Erdgas hergestellt und dient neben der Anwendung in Fahrzeugen auch als Ausgangsprodukt für Dünger und Sprengstoff.

Ziel dieser Arbeit ist es, eine ökologische Bewertung der Harnstoffherstellung, dessen Distribution bis zum Endverbraucher sowie des Einsatzes im Fahrzeug mithilfe einer Ökobilanz durchzuführen. Nach der quantitativen Feststellung der einzusetzenden Stoffe für die Synthese und Verteilung (Erdgas, Energie,...) hat eine Gegenüberstellung mit dem ökologischen Nutzen der SCR-Technologie zu erfolgen.

Kennzahl: E 740

Kurzzusammenfassung

Die neuen EURO VI Abgasgrenzwerte, die ab Ende 2014 für PKW in Europa gültig sein werden, zwingen Automobilhersteller dazu, weitere Maßnahmen zu setzen, um die Emissionen von Fahrzeugen zu vermindern. Dazu müssen bekannte innermotorische Maßnahmen zur Emissionsminderung mit Abgasnachbehandlungssystemen kombiniert werden. Für dieselbetriebene PKW stellt dabei die drastische Reduktion des Grenzwertes für Stickoxide von 180 mg/km (EU V) auf 80 mg/km (EU VI) eine besondere Herausforderung dar. Als Nachbehandlungssysteme stehen dabei vor allem der NO_x Speicherkatalysator sowie der SCR (selektive katalytische Reduktion) Katalysator zur Verfügung.

Für die selektive katalytische Reduktion muss dabei ein weiterer Betriebsstoff, nämlich AdBlue, im Fahrzeug mitgeführt werden. Die durch den Herstellungsprozess dieser wässrigen Harnstofflösung anfallenden Emissionen werden in dieser Diplomarbeit untersucht.

Nach der Untersuchung des Produktionsprozesses von Harnstoff – auch weitere, angrenzende Produktionsprozesse wurden beleuchtet – mittels einer Ökobilanz zeigt sich, dass der Großteil der Emissionen immer noch bei der Nutzung im Fahrzeug entsteht. Auch die zusätzlich anfallenden Emissionen von Ammoniak resultieren zu einem überwiegenden Teil aus Ammoniakschlupf im Fahrzeug, nur ein geringer Teil entsteht bei der Herstellung von AdBlue. Durch das SCR System kann also, gesamthaft betrachtet, eine deutliche Reduktion der Stickoxidemissionen erreicht werden.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	III
Diplomaufgabe	IV
Kurzzusammenfassung	V
1 Einleitung und Problemstellung	1
1.1 Umweltbelastung durch den Straßenverkehr	1
1.2 Bildung von Stickoxiden bei der motorischen Verbrennung	3
2 Methodik	7
3 Stand der Technik	8
3.1 Katalysatoren	8
3.2 Möglichkeiten der NO _x Reduktion.....	9
3.2.1 Innermotortische Maßnahmen	10
3.2.2 Abgasnachbehandlung	14
3.3 SCR - Systeme.....	16
3.3.1 Aufbau eines mobilen SCR Systems	17
3.3.2 Diesel-Oxidationskatalysator (DOC)	18
3.3.3 Hydrolysekatalysator.....	20
3.3.4 Einspritzsysteme.....	22
3.3.5 SCR-Katalysator (SCR-Kats).....	23
3.3.6 NH ₃ -Sperr-Katalysator	25
3.3.7 Close-Coupled SCR Konzept (CC-SCR)	25
3.4 Herstellung von AdBlue®	26
3.4.1 Herstellung von Ammoniak	27
3.4.2 Gewinnung von Kohlendioxid	29
3.4.3 Herstellung von Harnstoff	30
4 Entwicklung des österreichischen Straßenverkehrs bis 2020	36
4.1 Personenkraftwagen	36
4.1.1 Neuzulassungen	36
4.1.2 Bestandsentwicklung	39
4.1.3 Laufleistungsentwicklung.....	40
4.2 Nutzfahrzeuge	42
4.2.1 Neuzulassungsentwicklung.....	42
4.2.2 Bestandsentwicklung	44
4.2.3 Laufleistungsentwicklung.....	46

4.3	<i>Laufleistung von SCR Fahrzeugen im Jahr 2020 für die Variante – Erwartete Marktdurchdringung des SCR Systems</i>	48
4.3.1	<i>Personenkraftwagen und leichte Nutzfahrzeuge</i>	48
4.3.2	<i>Schwere Nutzfahrzeuge und Busse</i>	49
5	Ökobilanz	51
5.1	<i>Theoretische Grundlagen</i>	51
5.2	<i>Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen</i>	52
5.3	<i>Sachbilanz für Harnstoff</i>	56
5.3.1	<i>Erdgasbereitstellung</i>	56
5.3.2	<i>Erdgastransport</i>	62
5.3.3	<i>Herstellung von AdBlue</i>	63
5.3.4	<i>Distribution an Tankstellen und Bereitstellung</i>	67
5.3.5	<i>Einsatz im Fahrzeug</i>	67
5.4	<i>Sachbilanz fossiler Dieselmotorkraftstoff</i>	67
5.4.1	<i>Rohstoff Bereitstellung</i>	68
5.4.2	<i>Rohstoff Transport</i>	73
5.4.3	<i>Diesel Herstellung</i>	73
5.4.4	<i>Kraftstoff Transport und Bereitstellung</i>	75
5.4.5	<i>Einsatz im Fahrzeug</i>	75
5.5	<i>Wirkungsabschätzung</i>	84
5.5.1	<i>Kohlendioxid</i>	84
5.5.2	<i>Methan</i>	85
5.5.3	<i>Partikel</i>	85
5.5.4	<i>Stickstoffoxide</i>	86
5.5.5	<i>Ammoniak</i>	86
5.6	<i>Auswertung</i>	87
5.6.1	<i>Variante 1 - Kein Einsatz von SCR Systemen</i>	87
5.6.2	<i>Variante 2 - Erwartete Marktdurchdringung des SCR Systems</i>	88
5.6.3	<i>Variante 3 – 100% Einsatz des SCR Systems</i>	90
5.6.4	<i>Ergebnis und Empfehlung</i>	92
6	Zusammenfassung	94
7	Literaturverzeichnis	97

1 Einleitung und Problemstellung

Individuelle Mobilität ist für den Menschen des 21. Jahrhunderts eine Selbstverständlichkeit geworden. Durch den steigenden Wohlstand nahm und nimmt auch die Zahl der Fahrzeuge, die mit Verbrennungsmotoren arbeiten, stetig zu. Die dadurch entstehenden Schadstoffe müssen, um eine saubere Luft garantieren zu können, deswegen von den gesetzgebenden Institutionen reglementiert werden. Mit der ab 2014 geltenden, neuen europäischen Abgasnorm werden die Hersteller dazu gezwungen, alle Möglichkeiten der Schadstoffminimierung auszuschöpfen, um die gesetzlichen Limits einhalten zu können. Im Zuge dieser Arbeit wird ein System zur NO_x Reduzierung auf den gesamten ökologischen Nutzen hin untersucht. Der dabei verwendete Zusatzstoff Harnstoff steht dabei im besonderen Fokus.

1.1 Umweltbelastung durch den Straßenverkehr

Durch die weltweit zunehmende Industrialisierung in den letzten Jahrzehnten und das Aufstreben bevölkerungsstarker Schwellenländer wie Indien oder China ist es zu einem starken Anstieg von Emissionen schädlicher Gase, verursacht durch die Industrie, den Verkehr, die Landwirtschaft u.v.m. gekommen. Der stetig steigende Wunsch nach Mobilität verursacht einen weltweiten Anstieg der neu zugelassenen Kraftfahrzeuge. So steigerte sich die Produktion von PKW von knapp 40 Mio. im Jahr 1999 auf über 58 Mio. im Jahr 2010 [1]. Die durch den Verbrennungsprozess fossiler Rohstoffe entstehenden Emissionen haben nicht nur einen gravierenden Einfluss auf die Umwelt sondern sind u.a. auch verantwortlich für die Verwitterung von Kulturgütern [2].

Die Gesamtemissionen lassen sich einerseits in natürlich auftretende und andererseits in vom Menschen verursachte (anthropogene) Emissionen unterscheiden. **Tab. 1.1.** zeigt den anthropogenen Anteil an den weltweiten Emissionen auf. Besonders die die Abschätzung der Emissionen von NO_x ist nur mit Unsicherheiten möglich. So schätzt eine andere Studie [3] den anthropogenen Anteil

an NO_x Emissionen auf ca. 80 % der Gesamtemissionen, wobei der Straßenverkehr wiederum ca. 13 % dieser 80 % ausmacht.

Tab. 1.1: Anthropogene Anteile an der Gesamtemission weltweit sowie Beiträge des Straßenverkehrs an den anthropogenen Emissionen [4]

Abgaskomponente	CO ₂ [%]	CH ₄ [%]	NMHC [%]	NO _x [%]	CO [%]	PM [%]
Anthropogener Anteil an der Gesamtemission	~3,5	~62	~9	~58	~59	~15
Anteil PKW an anthropogenen Emissionen	5,5	0,3	14	9	25	4
Anteil NFZ an anthropogenen Emissionen	6	0,2	4	11	4	5

Stickoxide (vor allem NO und NO₂, zusammengefasst unter NO_x) mit einem anthropogenen Anteil von ca. 58%, wirken sich sowohl direkt als auch indirekt auf die Umwelt und auch auf den Menschen aus. So können durch eine starke NO_x Belastung Atemwegserkrankungen zunehmen, darüber hinaus ist NO₂ gemeinsam mit Kohlenwasserstoffen an der Ozonbildung beteiligt. Weiters können Böden versauert werden, was zu Waldsterben führt und den Wasserhaushalt stört. [5] Mit gemeinsam 20% an denen vom Menschen verursachten Emissionen haben PKW und NFZ einen maßgeblichen Anteil an der hohen NO_x Belastung, deswegen kann durch verschärfte NO_x Grenzwerte ein erheblicher Beitrag dazu geleistet werden, die Atmosphäre reinzuhalten.

Aus diesem Grund wurden die Grenzwerte für den Ausstoß von Stickoxiden, aber auch von allen anderen Schadstoffen, in den letzten Jahren weltweit stark begrenzt, wobei dieser Trend sich auch in der Zukunft sukzessive fortsetzen wird. Einen Überblick über die geltenden und zukünftigen Grenzwerte für PKW mit Dieselmotoren gibt **Tab. 1.2**. Die Werte für die USA gelten für Fahrzeuge mit "full useful life", also Fahrzeuge, die nach der Typprüfung 120.000 Meilen oder 10 Jahre

benützt werden sollen. Darüber hinaus gibt es in Kalifornien und einigen anderen Bundesstaaten eigene, verschärfte Abgasvorschriften.

Tab. 1.2: Gültige und zukünftige Abgasnormen in der EU, USA und Japan für PKW

Abgasnormen	EU [mg/km]		USA [mg/mi]	Japan [mg/km]
	EU5 ab 09.2009	EU6 ab 09.2014	Tier 2 - Bin 5 ab 1.1.2007	ab 10.2009
(HC + NO _x)	230	170	-	-
NO _x	180	80	70	80
PM	5	4,5	10	5

Um die strengen Abgasgrenzwerte einhalten zu können, ist es erforderlich, alle Möglichkeiten zur NO_x-Emissionsminderung auszuschöpfen, d.h. die aktuell üblichen innermotorischen Maßnahmen wie die Abgasrückführung müssen durch ein Abgasnachbehandlung ergänzt werden. Neben dem NO_x Speicherkatalysator bietet sich hier durch die selektive katalytische Reduktion (SCR) eine ausgezeichnete Möglichkeit. [6]

1.2 Bildung von Stickoxiden bei der motorischen Verbrennung

Bei der motorischen Verbrennung werden von den unterschiedlichen Stickstoffoxiden lediglich die Verbindungen Stickstoffmonoxid (NO) und Stickstoffdioxid (NO₂) in nennenswerten Mengen erzeugt. NO, ein farbloses Gas, wird in sauerstoffhaltiger Atmosphäre zu NO₂ umgewandelt, das unter anderem zu Herzmuskel- und Lungenschädigungen führen kann. NO₂ wiederum ist ein stechend riechendes, rotbraunes Gas, das in der Atmosphäre, durch Verbindung mit Wasser, zu Salpetersäure (HNO₃) reagieren kann und damit zur Entstehung von saurem Regen führt. [7]

Im Brennraum ist vor allem die Bildung von thermischem NO von Bedeutung. Die **Gleichungen (1.1)** und **(1.2)** beschreiben hierbei die Zeldovich Kettenreaktion. Ist elementarer Sauerstoff (O) vorhanden, reagiert er mit Distickstoff (N_2) zu NO und molekularem Stickstoff (N). Im nächsten Schritt reagiert der Stickstoff wiederum mit O_2 zu NO und O. Damit ist der Kreislauf geschlossen und die Reaktion beginnt von vorne. Da elementarer Sauerstoff nur bei Temperaturen von über 2.200 K nach **Gleichung (1.3)** entsteht, sind sehr hohe Spitzentemperaturen im Brennraum die Grundbedingung für den Start der Zeldovich Kettenreaktion [8].



[8]

Abgesehen von den hohen Temperaturen ist es für die Bildung von thermischen NO notwendig, eine ausreichend große Menge an Sauerstoff zur Verfügung zu haben. Dies erklärt, wieso die maximale NO-Bildung nicht bei einem Luftkraftstoffverhältnis $\lambda = 0,9$, bei dem die höchsten Temperaturen auftreten, zu erwarten ist, sondern bei einem Luftkraftstoffverhältnis von etwa $\lambda = 1,1$. Die Sauerstoffzunahme führt bis zu $\lambda = 1,1$ zu einer erhöhten Emission von NO_x , über diesen Punkt hinaus nimmt die Emission aufgrund der sinkenden Temperaturen wieder ab. [7]

Der beschriebene Verlauf der NO_x Emissionen über dem Luftverhältnis λ wird in **Abb. 1.1.** dargestellt.

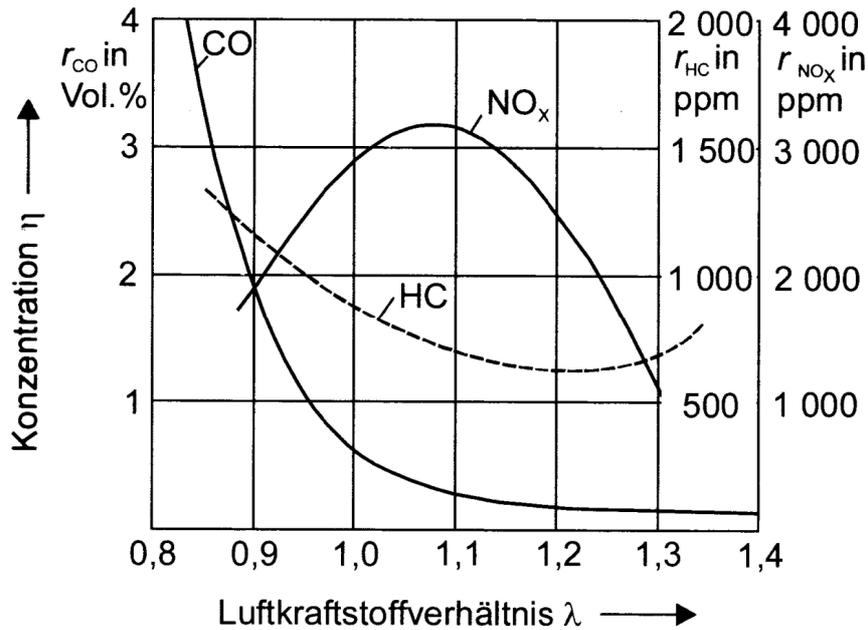


Abb. 1.1.: Auswirkung des Luftkraftstoffverhältnisses auf die Emissionen am Beispiel eines Ottomotors [9]

Folglich können die NO_x Rohemissionen direkt durch Beeinflussung der Parameter Spitztemperatur und Luftkraftstoffverhältnis gesenkt werden. Vor allem das Verdichtungsverhältnis, sowie der Zündwinkel, die Motorlast und eben das oben genannte Luft-Kraftstoff-Verhältnis sind dabei ausschlaggebend. [9]

Bei einem Dieselmotor beträgt der Anteil von NO_2 ca. 5- 15 % an den gesamten NO_x Rohemissionen, im unteren Teillastbereich und bei niedrigen Abgastemperaturen können auch höhere Konzentrationen gemessen werden [8].

Das Verhältnis von NO zu NO_2 spielt in weitere Folge eine entscheidende Rolle bei der Abgasnachbehandlung.

Durch den Einsatz des Dreiwegekatalysators war es bei Ottomotoren bereits seit Jahren möglich, Emissionen gezielt und effektiv zu reduzieren. [10] Bei modernen Otto Direkteinspritzungsmotoren kann allerdings, ähnlich dem Dieselmotor, ein global mageres Luftverhältnis vorherrschen, sodass der Dreiwegekatalysator bei diesen, mager betriebenen Otto Direkteinspritzungsmotoren, nicht eingesetzt werden kann [11]. Zur Reduzierung der Stickoxide werden hierzu allerdings Speicher-Reduktions-

Katalysatoren eingesetzt, weil diese einerseits ausreichen um die bei derzeitigen Anwendungen auftretenden NO_x Emissionen auf das gesetzliche Limit zu reduzieren und andererseits können v.a. Vanadium beschichtete SCR Katalysatoren durch die im Abgas vorherrschenden hohen Temperaturen geschädigt werden [12]. Bei dieselbetriebenen Motoren wird der SCR Katalysator allerdings nur mit maximal 650 bis 700 °C während der DPF Regeneration – im Gegensatz zu 900 bis 950 °C bei mager betriebenen Ottomotoren – belastet [13], sodass der Einsatz der SCR Technik durchaus möglich ist und durch aktuelle und zukünftige, sehr strenge NO_x Grenzwerte in den USA und Europa forciert wird [14].

Durch den zusätzlich mitgeführten Betriebsstoff, der für den Einsatz des SCR Systems notwendig ist, entsteht allerdings ein zusätzlicher Produktionsprozess – im konkreten Fall der Produktionsprozess von Harnstoff – der hinsichtlich der zusätzlich anfallenden Emissionen untersucht werden soll.

Im folgenden Kapitel wird auf die für diese Arbeit verwendete Methodik eingegangen.

2 Methodik

Für das Schreiben der Arbeit soll nach folgender Methodik vorgegangen werden. Eine ausführlichen Literaturrecherche zum Thema Stand der Technik der selektiven katalytischen Reaktion, mit besonderem Fokus auf den Einsatz in mobilen Systemen sowie eine Recherche über den Herstellungsprozess von Harnstoff, Ausgangsmittel von Ammoniak zur Stickoxidreduzierung in SCR Systemen, bildet den ersten Schritt dieser Arbeit.

Anschließend soll der Bedarf an Harnstoff für den Einsatz in Kraftfahrzeugen in Österreich für das Jahr 2020 abgeschätzt werden. Dabei werden die Gesamtleistungen für das Jahr 2020 der einzelnen Fahrzeugklassen, d.h. PKW und schwere Nutzfahrzeuge, unabhängig voneinander untersucht.

Um den Anteil des Produktlebensprozesses (d.h. von der Gewinnung des Rohstoffes bis zur Nutzung im Fahrzeug) von Harnstoff an den gesamten entstehenden Emissionen zu untersuchen, wird im Anschluss eine Ökobilanz durchgeführt. Dazu wird zuerst der Untersuchungsrahmen festgelegt. Besonders die Wahl des Harnstoff Herstellungsverfahrens ist dabei zu erörtern und zu begründen. Anschließend werden Sachbilanzen für die Herstellung von Harnstoff sowie anderen, für die Untersuchung relevanten Produkten, durchgeführt. Dabei ist der gesamte Lebensweg, von der Gewinnung des Rohstoffes bis zur Verwendung in den Fahrzeugen darzustellen.

In der abschließenden Auswertung der Ökobilanz werden die Emissionen der gewählten Schadstoffe aufgezeigt und die verschiedenen Einsatzszenarien miteinander verglichen.

Im folgenden Kapitel wird der Stand der Technik der Schadstoffreduzierung und des Herstellungsverfahrens von AdBlue beschrieben.

3 Stand der Technik

In diesem Kapitel werden die Möglichkeiten der Schadstoffreduzierung genauer beschrieben. Besonderes Augenmerk wird dabei auf das für diese Arbeit relevante SCR System gelegt. Im Anschluss wird noch der Stand der Technik der Herstellungsverfahren für den, für den Betrieb des SCR System notwendigen, Harnstoff beschrieben.

3.1 Katalysatoren

Beim Einsatz von Katalysatoren sollen chemische Reaktionen beschleunigt werden. In der Abgasnachbehandlung werden dafür Wabenkatalysatoren eingesetzt, bei denen hunderte Einzelkanäle dafür genutzt werden, eine größtmögliche Kontaktfläche von Katalysatorwand und Gas zu schaffen. Um die im Abgas befindlichen verschiedenen Schadstoffe in ökologisch unbedenkliche Substanzen zu konvertieren, werden auf der Washcoat genannten Beschichtung katalytisch aktive Komponenten wie Platin, Palladium o.a. aufgetragen. Diese Beschichtung sorgt dafür, dass die Katalysatorwand und das Gas eine möglichst große Kontaktfläche zueinander haben. [15] Die Aktivkomponente setzt dabei die Aktivierungsenergie der chemischen Reaktion herab, sodass die Reaktion beschleunigt wird. Die Aktivkomponente verbraucht sich dabei nicht. [16] Die Reaktionsabläufe sind oftmals sehr komplex und nicht immer vollständig verstanden. In welchem Ausmaß die Reaktionen stattfinden, hängt, abgesehen von der gewählten Aktivkomponente, sehr stark von den aktuellen Betriebsbedingungen wie Temperatur, Massenstrom und Gaszusammensetzung ab. [15] **Abb. 3.1.** zeigt den Aufbau eines üblichen Wabenkatalysators, in dem die beschriebene Washcoat Beschichtung samt den eingelagerten Aktivkomponenten abgebildet sind.

,

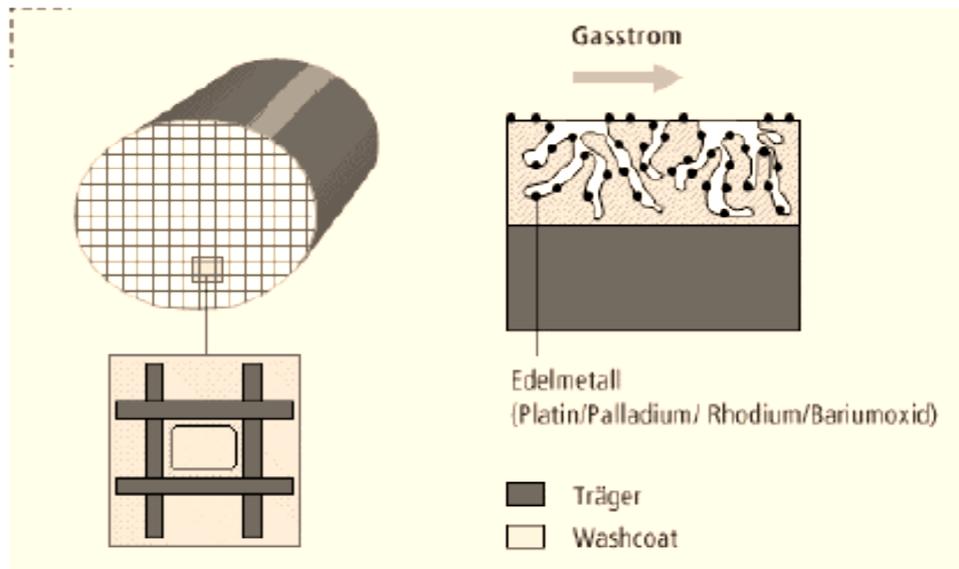


Abb. 3.1.: Aufbau eines Wabenkatalysators [16]

3.2 Möglichkeiten der NO_x Reduktion

Im Gegensatz zum Ottomotor kann das bewährte System des Dreiwegekatalysators bei Dieselaggregaten nicht eingesetzt werden, weil ein Einsatz dieses Katalysators ein annähernd stöchiometrisches Luft/Kraftstoffgemisch voraussetzt ($0,99 < \lambda < 1,01$). Dieselmotoren haben allerdings ein sehr mageres Abgas, d.h. im gesamten Betriebsbereich ergibt sich ein hoher Sauerstoffüberschuss ($1 < \lambda < 15$), der dazu führt, dass das Reduktionspotential nicht ausreichend groß ist, um NO und NO_2 zu reduzieren. Daher müssen bei Dieselmotoren andere Wege beschritten werden, wobei eine Kombination aus verschiedenen innermotorischen Maßnahmen und Abgasnachbehandlung zielführend ist. [10]

Da es bei der motorischen Verbrennung immer einen "Trade-off" von NO_x Emissionen und Emissionen von Partikeln gibt, können grundsätzlich zwei verschiedene Strategien verfolgt werden. Einerseits die Optimierung der Verbrennung hinsichtlich minimaler NO_x Rohemissionen, und gleichzeitiger Nachbehandlung der dadurch in einem höheren Maße entstehenden unverbrannten Anteile (CO , Kohlenwasserstoff, PM), oder andererseits die Optimierung der Verbrennung hinsichtlich geringer CO -, PM - und Kohlenwasserstoff Emissionen und

gleichzeitiges in Kauf nehmen von hohen NO_x Rohemissionen, die in weiterer Folge nachbehandelt werden müssen. [17]

Der Vorteil der zweiten Variante liegt im niedrigeren Kraftstoffverbrauch, der v.a. für viel genutzte NFZ einen erheblichen Betriebskostenvorteil mit sich bringt, dem gegenüber stehen allerdings die höheren Investitionskosten für das SCR System. [17]

Im Weiteren werden die üblichen Möglichkeiten zur Emissionsreduktion genauer beschrieben.

3.2.1 Innermotortische Maßnahmen

Tab. 3.1. gibt einen Überblick über die Auswirkungen verschiedener innermotorischen Maßnahmen auf die Emissionen. Im Anschluss werden einige dieser Maßnahmen genauer beschrieben.

Tabelle 3.1.: Maßnahmen zur Emissionsreduktion und Einfluss auf verschiedene Parameter für Dieselmotoren [8]

Maßnahme	NO_x	HC/CO	Ruß	Geräusch
später Spritzbeginn	+	-	-	+
Abgasrückführung	+	-	-	+
gekühlte AGR	+	-	+	0
Aufladung	-	+	+	0
Ladeluftkühlung	+	-	+	0
Piloteinspritzung	0	+	-	+
angelagerte Nacheinspritzung	+	0	+	0
Einspritzdruckerhöhung	0	+	+	0
abgesenktes Verdichtungsverhältnis	+	-	+	-

Legende:

- +..... positiver Einfluss auf jeweilige Emissionskomponente
-Negativer Einfluss auf jeweilige Emissionskomponente
- 0.....Kein Einfluss auf jeweilige Emissionskomponente

3.2.1.1 Brennverfahren

Beim Brennverfahren können die Emissionen vor allem durch die Variation von Einspritzbeginn und Einspritzdruck beeinflusst werden. Hier wird der in Kapitel 3.2. erwähnte Trade-off von NO_x und Partikel deutlich. Ein später gewählter Spritzbeginn bewirkt niedrigere NO_x - bei gleichzeitig ansteigenden Ruß Emissionen, bei früherer Einspritzung verhält es sich umgekehrt. Ähnlich verhält es sich beim Einspritzdruck. Wird bei konstantem Spritzbeginn der Druck erhöht, sinken zwar die Ruß Emissionen, auf der anderen Seite beeinflussen die durch den hohen Druck gestiegenen Temperaturen die NO_x Emissionen negativ. [8]

3.2.1.2 Abgasrückführung (AGR)

Die Abgasrückführung (AGR) ist ein sehr wirksames Mittel zur NO_x Reduktion und wird heutzutage bei PKW fast flächendeckend eingesetzt. Neben der internen AGR, bestimmt durch den Restgasanteil und durch Ventilsteuerzeiten beeinflusst, besteht die Möglichkeit einer externen AGR, bei der zusätzliche Leitungen und ein Regelventil benötigt werden. [18] Um die Effizienz der AGR zu erhöhen, kann die rückgeführte Abgasmenge zusätzlich gekühlt werden. Ziel der AGR ist, die maximalen, lokalen Spitzentemperaturen zu reduzieren, was einer Verminderung der NO_x Emissionen zur Folge hat. Dies erfolgt vor allem durch die langsamere Verbrennung, eine höhere spezifische Wärmekapazität und einem größeren Zündverzug. [19] Wird die AGR-Rate allerdings erhöht, steigt die Konzentration von HC und Ruß im Abgas an, weswegen der rückgeführte Anteil des Abgases begrenzt ist. [20] Ein weiterer negativer Effekt der AGR ist ein Anstieg des Kraftstoffverbrauches, bewirkt durch die bereits erwähnte langsamere Verbrennung. **Abb. 3.2.** zeigt den Einfluss der AGR auf Emissionen und Verbrauch. [18] Dabei sind die erwähnten Reaktionen von Emissionen und Kraftstoffverbrauch auf eine steigende AGR Rate abgebildet.

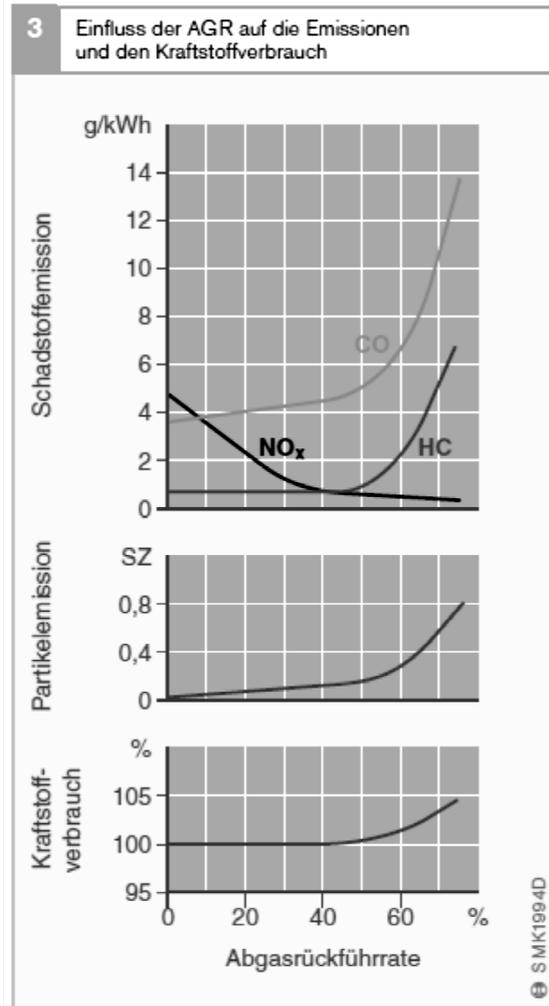


Abb. 3.2.: Einfluss der AGR-Rate auf Kraftstoffverbrauch und Emissionen [18]

3.2.1.3 Aufladung

Die Aufladung wird bei Dieselmotoren v.a. zur Leistungssteigerung genutzt. Durch eine Vorverdichtung der Luft wird erreicht, dass durch die größere Luftmasse im Motor bei gleichem Hubraum mehr Leistung erzielt werden kann. Folglich kann die gleiche Leistung mit kleinerem Hubraum erreicht werden, was wiederum zu Kraftstoffeinsparungen führt. Ausgeföhrt wird der Turbolader meist als Abgasturbolader, d.h. die Energie des Abgases treibt eine Turbine an, die wiederum mit dem Luftverdichter über eine Welle verbunden ist. Weitere Möglichkeiten der Ausführung sind der mechanische Lader, bei der die Leistung von der Motorkurbelwelle bezogen wird, oder ein elektrischer Lader. [19]

Wird die Ladeluft nun zusätzlich gekühlt, sinkt die Dichte der Luft, wodurch sich der Füllungsgrad im Zylinder weiter verbessert. Primär stellt die Aufladung eine Verbesserung für die Emissionen von Ruß und HC dar. [8]

Steht jedoch die Leistungssteigerung nicht im Mittelpunkt, können die Spitzentemperaturen durch Ausnutzung der höheren Wärmekapazität bei der Verbrennung gesenkt werden, was bekanntlich zu einer geringeren NO_x Entstehung führt. [16]

3.2.1.4 Homogene Brennverfahren (HCCI-Verfahren)

Durch den Einsatz von homogenen Brennverfahren (Homogeneous Charge Compression Ignition - HCCI-Verfahren) soll sowohl die Bildung von NO_x als auch Ruß vermieden werden. Grundlage dafür ist die Schaffung einer sehr homogenen Zylinderfüllung, d.h. die Gemischbildung soll in allen Bereichen möglichst gleich sein [19]. Da die thermische NO Bildung in einem Temperaturbereich oberhalb von 2.000 K stattfindet, Ruß sich im Gegensatz dazu bei Vorhandensein von fetten Gemischbereichen ($\lambda < 0,8$) und bei Temperaturen von über 1.400 K bildet, ist es für das HCCI-Verfahren wichtig, lokale Temperatur- und Luftverhältnisunterschiede zu vermeiden. [11] **Abb. 3.3** zeigt den beim HCCI-Verfahren angestrebten Temperatur- und Luftverhältnisbereich.

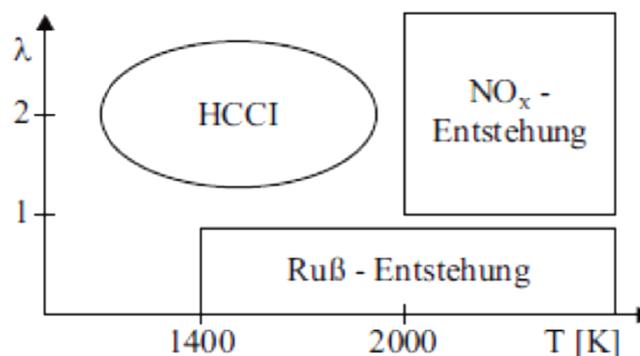


Abb. 3.3.: Der λ , T - Bereich des HCCI-Verfahrens [11]

Um dem Brennstoff die nötige Zeit für die Gemischbildung zu geben, wird beim HCCI-Verfahren einerseits sehr früh eingespritzt und durch eine sehr hohe

Abgasrückführungsrate der Zündverzögerung und die Brenngeschwindigkeit gesteuert. [19]

Da das entstandene magere Gemisch zeitgleich an sehr vielen Stellen zündet, brennt es sehr schnell durch. Dadurch wird erreicht, dass weder lokale Temperaturspitzen noch fette Bereiche entstehen und so praktisch keine thermische NO- und Rußbildung stattfindet. [11]

Die Homogenisierung wird allerdings bei höherer Last und damit einhergehenden hohen Brennraumtemperaturen und -drücken erschwert bzw. ist nicht mehr möglich. Daraus folgt, dass bei höheren Lasten ein Wechsel zur konventionellen Verbrennung notwendig wird. Außerdem ergeben sich durch die Verminderung der NO_x Emissionen beim HCCI-Verfahren auf der anderen Seite wiederum höhere HC- und CO-Emissionen, die durch ein geeignetes Nachbehandlungssystem reduziert werden müssen. [19]

3.2.2 Abgasnachbehandlung

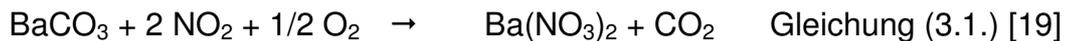
Neben dem in Kapitel 3.3 genauer betrachteten SCR System wird noch kurz auf die andere Möglichkeit der NO_x Reduktion in der Abgasnachbehandlung eingegangen.

3.2.2.1 NO_x-Speicherkatalysator (NSC)

Der NO_x Speicherkatalysator (NSC - NO_x Storage Catalyst) stellt eine Alternative zum SCR-System für die Nachbehandlung von Stickoxiden dar, jedoch weist er aus momentaner Sicht einen geringeren Konvertierungsgrad auf. [8]

Die Konvertierung von NO_x läuft dabei in zwei Phasen ab. Während der Beladungsphase, die abhängig vom Betriebspunkt zwischen 30 und 300 Sekunden andauert, wird im mageren Abgas NO_x kontinuierlich in die Speicherkomponente des Katalysators eingelagert. Während der Regenerationsphase (ca. 2 - 10 Sekunden) wird das eingespeicherte NO_x wiederum ausgespeichert und im fetten Abgas

reduziert. Die auf den Speicherkatalysatoren verwendeten Beschichtungen (meist Bariumcarbonat) gehen unter Anwesenheit von O₂ eine feste, aber chemisch reversible Verbindung mit den Stickoxiden ein, die in **Gleichung (3.1.)** beschrieben wird. Aus der Gleichung ist ersichtlich, dass für das Funktionieren des Systems zuerst NO₂ vorhanden sein muss. Dafür muss zuerst NO an einer geeigneten Beschichtung zu NO₂ oxidieren. [19]



Legende

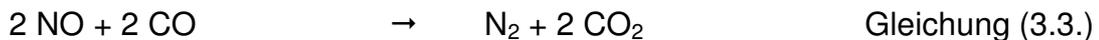
BaCO₃..... Bariumcarbomat

Ba(NO₃)₂... Bariumnitrat

Die Einspeicherung erfolgt nur in einem sehr engen, materialabhängigen Temperaturbereich zwischen 250 und 450 °C. Bei tieferen Temperaturen findet die Oxidation zu NO₂ zu langsam statt, darüber ist das Bariumnitrat instabil. Mit zunehmender Beladung kann der Katalysator kein NO_x mehr einspeichern, was zu erhöhten Emissionen führt. Durch einen Sensor nach dem NSC kann erkannt werden, zu welchem Zeitpunkt zu viel NO_x emittiert wird und wann folglich die Regeneration stattfinden muss. [19]

Diese periodisch stattfindende Regeneration läuft dabei in zwei getrennten Phasen ab, wobei am Ende Stickstoff und Kohlendioxid emittiert werden. Während der Regenerationsphase läuft der Motor in fetten Betriebsbedingungen ($\lambda < 1$), d.h. er läuft hier mit einem schlechteren Wirkungsgrad, und daraus folgend mit höherem Kraftstoffverbrauch. Deswegen muss sichergestellt werden, diese Phase so kurz wie möglich zu halten. **Gleichungen (3.2.) und (3.3.)** zeigen die Reaktionen bei der Ausspeicherung und Reduktion. [8]

Dabei wird das Bariumnitrat durch die im Abgas vorhandenen Kohlewasserstoffe oder Kohlenmonoxid zu NO und dem ursprünglichen Bariumcarbonat konvertiert. Das NO wird anschließend reduziert. Die dabei auftretenden Reaktionen entsprechen jenen im Dreiwegekatalysator. [8]



[8]

3.3 SCR - Systeme

Die selektive katalytische Reduktion wird in Großfeuerungsanlagen bereits seit Jahrzehnten erfolgreich angewandt und konnte in den letzten Jahren zuerst bei Nutzfahrzeugen, später auch bei Personenkraftwagen erfolgreich eingeführt werden.

Das Grundprinzip besteht darin, dass durch ein ausgewähltes Reduktionsmittel Stickoxide (NO_x) mit Hilfe von Sauerstoff reduziert werden. Wichtig dabei ist, dass die Oxidation des Reduktionsmittels nicht mit dem im Abgas in großer Menge verfügbaren molekularen Sauerstoff, sondern bevorzugt (also selektiv) mit dem Sauerstoff der Stickoxide stattfindet. Als Reduktionsmittel mit der höchsten Selektivität hat sich dabei Ammoniak (NH_3) herausgestellt. [19]

Die Problematik bei der Anwendung von SCR - Systemen in Fahrzeugen besteht darin, dass große Mengen NH_3 mitgeführt werden müssten (abhängig von den Rohemissionen zirka 0,3% - 1% der Kraftstoffmenge) [8], was sicherheitstechnisch äußerst bedenklich ist. Da Ammoniak auch sehr einfach aus toxisch unbedenklichen Trägersubstanzen im Fahrzeug hergestellt werden kann, einigte sich die europäische Automobilindustrie bereits in den 1990er Jahren darauf, Harnstoff als Trägersubstanz zu verwenden. Harnstoff ($\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$) wird in großen Mengen als Dünge- und Futtermittel verwendet, ist unter Umweltbedingungen chemisch stabil und unbedenklich für das Grundwasser. Desweiteren ist Harnstoff sehr gut wasserlöslich, und reagiert mit dem molekularen Sauerstoff nicht bei denen im Abgasstrang üblichen Temperaturen von unter 550 °C. Unter dem Markennamen AdBlue[®] wird in mobilen SCR Systemen eine 32,5 %ige Harnstofflösung zur Reduktion von NO_x verwendet. [8]

Allerdings ist bei diesem System zu beachten, dass der Aufwand, der betrieben werden muss, um den Harnstoff in Ammoniak zu zersetzen, relativ groß ist. Auf der einen Seite benötigt man im Fahrzeug eine komplette Dosiervorrichtung, d.h. ein Tank, Fördermodul, Dosiermodul und Steuergerät müssen eingebaut werden, auf der anderen Seite müssen im Abgasstrang zusätzliche Mischer und/oder Hydrolysekatalysatoren angebracht werden. Ziel ist es, die durch den Harnstoffverbrauch erhöhten Betriebskosten durch eine Motorapplikation auszugleichen, die weniger Kraftstoff verbraucht. Dabei soll der Motor bei höheren NO_x Rohemissionen betrieben werden, was zu einem geringeren Kraftstoffverbrauch führt. Durch Ausschöpfen des gesamten NO_x Konvertierungspotentials können die höheren Rohemissionen wiederum auf das gesetzliche Limit reduziert werden. [21]

3.3.1 Aufbau eines mobilen SCR Systems

Das SCR System setzt sich aus einem motornahen Oxidationskatalysator, dem Reduktionsmitteltank, sowie der Reduktionsmitteleinspritzdüse und dem eigentlichen SCR-Katalysator zusammen.

Außerdem können, je nach Aufbau oder Bedarf, ein Hydrolysekatalysators vor dem SCR-Kat, oder ein NH_3 Sperrkatalysator appliziert werden. **Abb. 3.4.** zeigt den schematischen Aufbau einer Abgasanlage mit SCR bevor in den folgenden Unterkapiteln genauer auf die einzelnen Teile eingegangen wird.

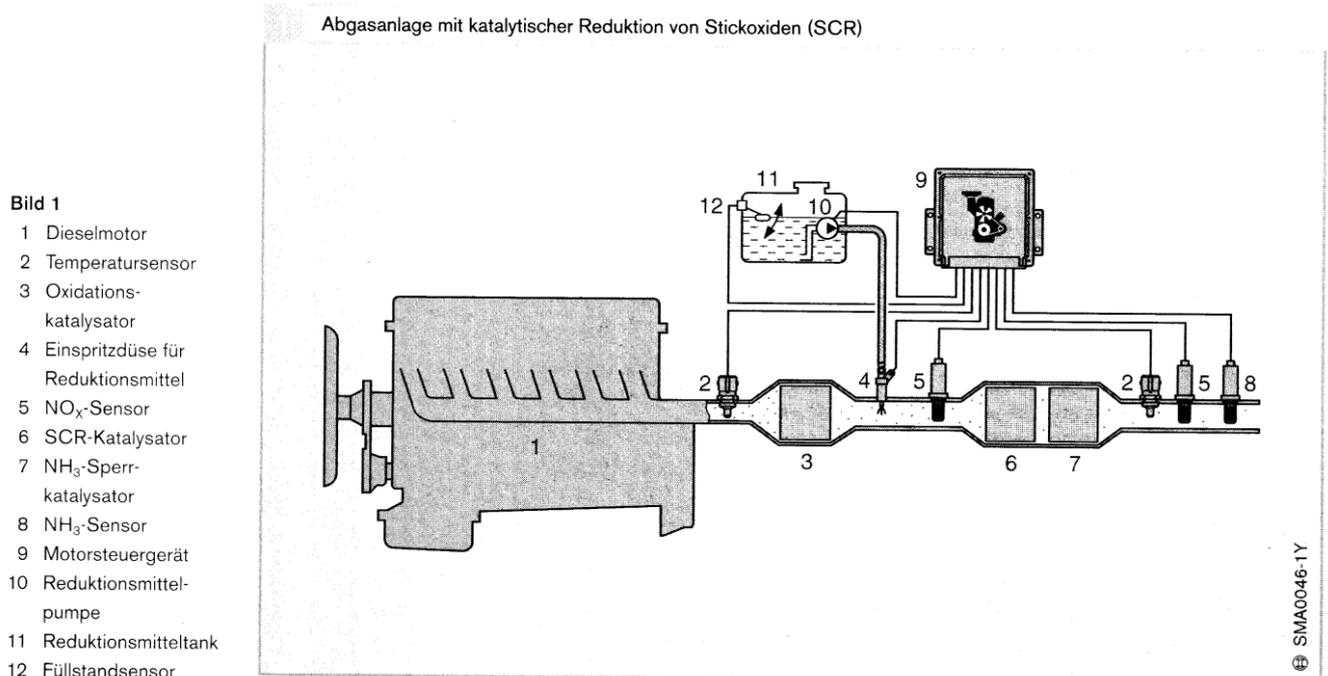


Abb. 3.4.: Aufbau einer Abgasanlage mit selektiver katalytischer Reduktion, [19]

3.3.2 Diesel-Oxidationskatalysator (DOC)

Die primäre Funktion des Diesel-Oxidationskatalysators (DOC) ist, die Kohlenmonoxid- und Kohlenwasserstoffemissionen, unter Zuhilfenahme des Restsauerstoffes, zu den nicht limitierten Gasen CO₂ und H₂O zu oxidieren [8]. Die dabei entstehende Reaktionswärme kann dazu genutzt werden, um die Abgastemperatur gezielt zu erhöhen, was die spätere Behandlung des Abgases im SCR Katalysator positiv beeinflusst [19].

Eine Einbindung des DOCs in ein SCR Katalysatorsystem ermöglicht es, neben den Grundfunktionen gleichzeitig eine deutliche Verbesserung der NO_x Konversion im dahinter befindlichen SCR Katalysator, besonders in dem Tieftemperaturbereich unter 250 °C zu erreichen [22]. Der Grund hierfür liegt darin, dass im Oxidationskatalysator nach dem gleichen Prinzip wie bei der Kohlenstoffoxidation, NO₂ aus NO generiert wird. Da die Rohemissionen nur ca. 5 - 15 % NO₂ enthalten, jedoch ein höherer Anteil an NO₂ für die optimale Funktion des SCR Katalysators gefordert ist, ist der DOC ein wichtiger Teil des gesamten SCR-Systems. Für die

optimale Funktionsweise des SCR Katalysators ist ein Mischverhältnis NO:NO₂ von 1:1 notwendig. Durch dieses Mischungsverhältnis kann im SCR Katalysator die in Kapitel 3.3.5. beschriebene schnelle SCR Reaktion ablaufen. [23]

Die beschriebenen Reaktionen, werden in den **Gleichungen (3.4.)** und **(3.5.)** dargestellt.

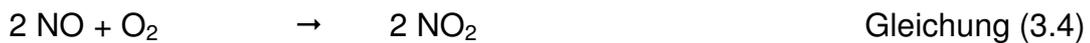


Abb. 3.5 veranschaulicht deutlich den Vorteil eines hohen NO₂ Anteils bei der NO_x Konvertierung, im Gegensatz zu einem Abgasstrom mit 0% Anteil NO₂. [23] Es ist ersichtlich, dass bereits bei Temperaturen von ca. 200°C durch das erwähnte 1:1 Verhältnis ein NO_x Umsatz von ca. 90% erreicht werden kann. Ist im Gegensatz dazu kein NO₂ im Abgasstrom, wird bei 300 °C weniger als 20 % NO_x umgesetzt, selbst bei 500 °C ist die Umsatzrate nur knapp über 80%.

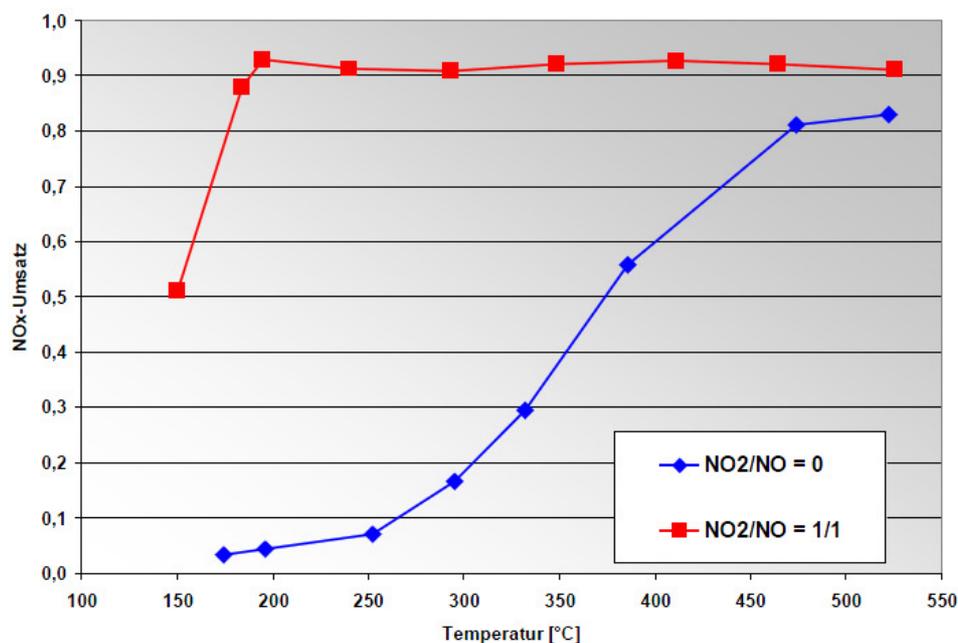
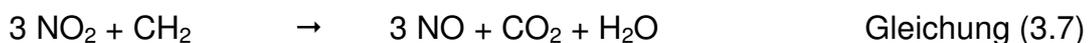


Abb. 3.5.: Auswirkung des NO:NO₂ Verhältnisses auf den NO_x Umsatz [23]

Ein weiterer Vorteil des DOC besteht darin, dass verhindert wird, dass die Kohlenwasserstoffe am SCR-Katalysator oxidieren, was zu einer Minderung des NO_x Umsatzes führen würde [24].

Der Körper des Katalysators besteht aus einer metallischen oder keramischen Wabenstruktur. In dieser Wabenstruktur wird das Abgas durch etwa 1 mm dünne Kanäle geleitet, die mit dem Washcoat, einer edelmetallhaltige Schicht, in diesem Fall für gewöhnlich Platin und/oder Palladium, überzogen sind. Durch Diffusion gelangen die Komponenten des Abgases an diese Schicht und werden oxidiert. Beeinflusst wird der Umsatz durch die Aktivität der Katalysatorschicht, die Verweildauer des Gases, die Katalysatortemperatur und durch die Konzentration der Reaktionspartner. [8]

DOCs sollten möglichst motornahe appliziert werden, um schnell aufgeheizt zu werden und somit die Anspringtemperatur ehestmöglich erreichen zu können. Bei zu niedrigen Temperaturen wird nämlich die NO_2 Bildung durch Anwesenheit von CO und HC verringert. Darüber hinaus wird bei niedrigen Temperaturen das bereits in den Rohemissionen vorhandene NO_2 durch CO und HC zu NO reduziert, was dem genauen Gegenteil der gewünschten Reaktion entspricht. **Gleichungen (3.6) und (3.7)** zeigen diesen Effekt, der nur bei niedrigen Temperaturen beobachtet werden kann. [25]



3.3.3 Hydrolysekatalysator

Laut Untersuchungen kann die Größe des SCR Katalysators, besonders bei niedrigen Temperaturen, stark vermindert werden, wenn die Hydrolysereaktion nicht, wie üblich, im Hauptstrom des Abgases abläuft, sondern ein eigener Hydrolysekat (H-Kat) als Nebenstrom eingesetzt wird. Der Grund dafür liegt in der längeren

Verweilzeit des Harnstoffs im H-Kat, sowie der im Hauptstrom stattfindenden Behinderung der Hydrolyse durch, im vorgeschalteten Oxidationskatalysator erzeugtem, NO_2 . [26] Angewandt wird der H-Kat allerdings nur bei NFZ, da im PKW Betrieb, aufgrund der niedrigeren vorherrschenden Raumgeschwindigkeiten, der SCR Katalysator die Aufgaben des H-Kats problemlos übernehmen kann. [16]

In dem H-Kat soll zunächst das Lösungswasser der mitgeführten Harnstofflösung vollständig verdampfen, sodass aus der mitgeführten Lösung Ammoniak und Kohlendioxid, im Idealfall im Verhältnis 2:1 entsteht. [10]

Bei der in **Gleichung (3.8)** beschriebenen Thermolyse entstehen aus Harnstoff ($(\text{NH}_2)_2\text{CO}$) Ammoniak (NH_3) und Isocyanensäure (HNCO). Bei dem Schmelzpunkt von Harnstoff, der bei 133 °C liegt, findet die Thermolyse nur sehr langsam statt, die Reaktionsgeschwindigkeit ist erst bei etwa 400 °C ausreichend hoch. Daher ist es für das SCR System essentiell, sehr aktive H-Kats zu verwenden, sodass eine rasche Harnstoffzersetzung bereits ab etwa 180 °C erreicht wird. [27] Sollte die Thermolyse nicht vollständig ablaufen, droht ein Harnstoff- bzw. HNCO -Schlupf, oder auch die Bildung von höher molekularen Stoffen, die sich im Abgassystem anlagern können oder emittiert werden [28].

Anschließend wird HNCO wiederum in Verbindung mit Wasser durch eine Hydrolysereaktion, dargestellt in **Gleichung (3.9)** in Ammoniak und Kohlendioxid umgewandelt.



[29]

Legende	$(\text{NH}_2)_2\text{CO}$	Harnstoff
	HNCO	Isocyanensäure

Der H-Katsträger besteht immer aus Metall, hat eine Mischerstruktur – um den Abgasstrom möglichst gut mit Harnstoff zu durchmischen - und ist, als Aktivkomponente, mit Titanoxid beschichtet. [29] Um den effizienten Einsatz des Reduktionsmittels zu garantieren, ist es wichtig, dieses möglichst gleichmäßig über den Rohrquerschnitt zu verteilen. Eine Überdosierung kann zur Verstopfung einzelner Kanäle führen. [27]

3.3.4 Einspritzsysteme

"Stand der Technik sind Einspritzsysteme mit mechanischer Einspritzung von Harnstoff in das Abgassystem. Aufgrund der kritischen Temperaturverhältnisse sollte die Einspritzung beheizt werden, um unter allen Betriebsbedingungen einen einwandfreien Betrieb gewährleisten zu können."
[30]

Die Einspritzung und die gleichmäßige Verteilung von AdBlue[®] ist ein kritisches Thema bei der Verwendung eines SCR-Systems. Falls zu große Tropfen in den Abgasstrom eingespritzt werden, kann das Verdampfen des Wasseranteils zu lange dauern, wodurch Konzentrationsunterschiede auf der Katalysatoroberfläche entstehen können, was sich wiederum negativ auf die Konvertierungsrate auswirkt. Die Eigenschaften des Einspritzvorgangs sind daher für die optimale Funktionsweise des SCR Systems elementar. Systeme lassen sich an der Anzahl der Düsenlöcher, an der Tropfengeschwindigkeit, am Sprühwinkel und dem Größenspektrum der Tropfen unterscheiden. [31]

Während für stationäre Anwendungen bereits Systeme mit mittleren Tropfendurchmesser von <30 µm mit einer sehr engen Verteilung verfügbar sind, basieren die aktuellen Einspritzsysteme für KFZ auf Niederdruck Injektoren, die einen wesentlich größeren mittleren Tropfendurchmesser von etwa 100 µm haben. Durch den Einsatz von turbulenten Katalysatorträgern kann zusätzlich ein Konzentrationsausgleich erzielt werden. [31]

3.3.5 SCR-Katalysator (SCR-Kats)

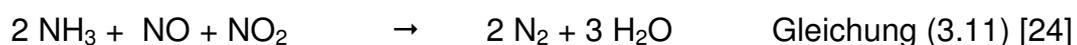
Am R-Kat findet die eigentliche Reduktion von NO_x statt. Je nach eingesetzter Aktivkomponente und vorherrschender Temperatur werden verschiedene Reaktionen hervorgerufen, die nachfolgend genauer beschrieben werden. Gemein ist sämtlichen Reaktion, dass durch den Einsatz von Ammoniak (NH_3) Stickoxide (NO , NO_2) zu Stickstoff (N_2) und Wasser (H_2O) konvertiert werden können.

Die in **Gleichung (3.10)** beschriebene Reaktion, genannt Standard SCR Reaktion, läuft nur an einem Beschichtungskatalysator, bei dem als Aktivkomponente Vanadiumpentoxid (V_2O_5) eingesetzt wird, ab. Zwar können bei diesen Katalysatoren in einem Temperaturbereich von $300\text{ °C} - 450\text{ °C}$ Umsatzraten von über 80 % erreicht werden, jedoch werden sie bereits ab einem Temperaturbereich von $550\text{ °C} - 650\text{ °C}$ geschädigt. [27]

Bei dieser Reaktion wird ausschließlich NO konvertiert. Dabei wird je konvertiertem NO auch ein NH_3 benötigt.



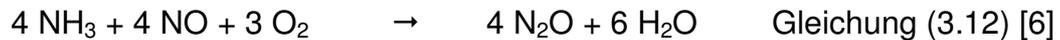
Bei der in **Gleichung (3.11)** beschriebenen Reaktion handelt es sich um die "schnelle SCR-Reaktion", die sowohl bei V_2O_5 Kats, als auch Zeolith-basierten Katalysatoren auftritt. Entscheidender Vorteil dabei ist das Anspringen der Reaktion bei bereits 200 °C . [6] Besonders bei Eisenzeolithen (Fe-Zeolith), die bis zu Temperaturen von max. 850 °C arbeiten können, erlaubt diese Reaktion ein breites Temperaturfenster. Zu sehen ist außerdem, dass die Aktivität des Katalysators bei steigendem NO_2 Anteil größer, denn bei der schnellen SCR Reaktion wird sowohl NO als auch NO_2 konvertiert. [24]



Durch **Gleichung (3.12)** können zwar mit Platinkatalysatoren sehr gute Tiefpunktaktivitäten erreicht werden, jedoch macht die Entstehung von Lachgas

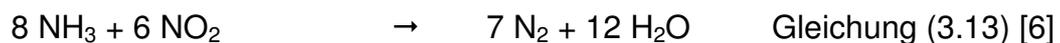
(N₂O), das als starkes Treibhausgas bekannt ist, den Einsatz von Platinkatalysatoren in SCR Systemen weitestgehend uninteressant.

[6]

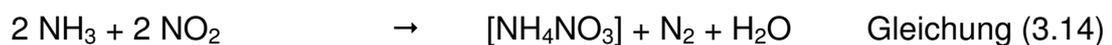


Ist der NO₂ Anteil im Abgas größer als 50 %, tritt die Reaktion nach **Gleichung (3.13)** auf. Hier wird ausschließlich NO₂ konvertiert. Sie verläuft insbesondere am V₂O₅ Katalysator sehr langsam, und verbraucht deutlich mehr Reduktionsmittel als die schnelle SCR Reaktion.

[6]



Bei Temperaturen von unter 200 °C wird nach **Gleichung (3.14)** Ammoniumnitrat (NH₄NO₃) gebildet, das die Katalysatoroberfläche belegt. Folglich sollten diese Temperaturen am R-Kat vermieden werden. Bildet sich dennoch NH₄NO₃, wird es bei höheren Temperaturen nach **Gleichung (3.15)** wiederum in N₂ zersetzt. Zusammengesetzt ergeben die beiden Gleichungen (3.14) und (3.15) wiederum die schnelle SCR Reaktion nach Gleichung (3.11). [6]

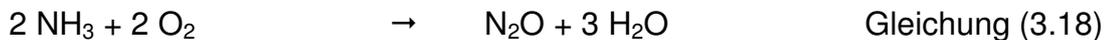
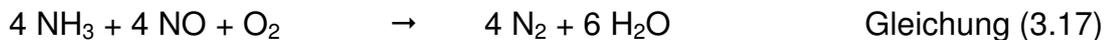
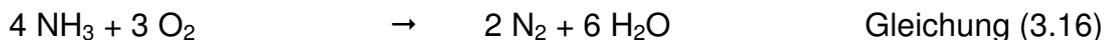


[6]

3.3.6 NH₃-Sperr-Katalysator

Der NH₃-Sperr-Katalysator hat die Funktion, überschüssiges Reduktionsmittel zu oxidieren. Es handelt sich also um einen Oxidationskatalysator. Ammoniakschlupf tritt auf, wenn der Katalysator vollständig beladen ist und gleichzeitig eine NH₃ Überdosierung bei unmittelbar auftretenden Last- und Temperatursprüngen entsteht. Der Beschichtung des Katalysators kommt dabei eine entscheidende Rolle zu. Untersuchungen haben etwa gezeigt, dass die Reduzierung des Wolframtrioxidanteils (WO₃) im SCR-Kat ein Ansteigen des NH₃-Schlups bereits bei tiefen NO Umsätzen bewirkt. [32]

Um bereits im niedrigen Temperaturbereich hohe NH₃ Umsätze erreichen zu können, kann deswegen Platin als Aktivkomponente eingesetzt werden. Die Reaktionswege werden in den **Gleichungen (3.16) bis (3.18)** dargestellt. Ersichtlich ist, dass es zu einer unerwünschten Entstehung von Lachgas (N₂O) kommen kann. [16]



3.3.7 Close-Coupled SCR Konzept (CC-SCR)

Um die für zukünftige Abgasnormen sehr hohen Konvertierungsraten erreichen zu können, ist es erforderlich, das SCR System beim Kaltstart und im Niedrigtemperaturbereich zu verbessern. Eine Möglichkeit ist dabei, zum bestehenden SCR System einen kleinvolumigeren Katalysator motornahe anzubringen, der die hohen Temperaturen nutzt und sich dadurch schnell erwärmt. **Abb. 2.7** zeigt dabei eine mögliche Applikation.

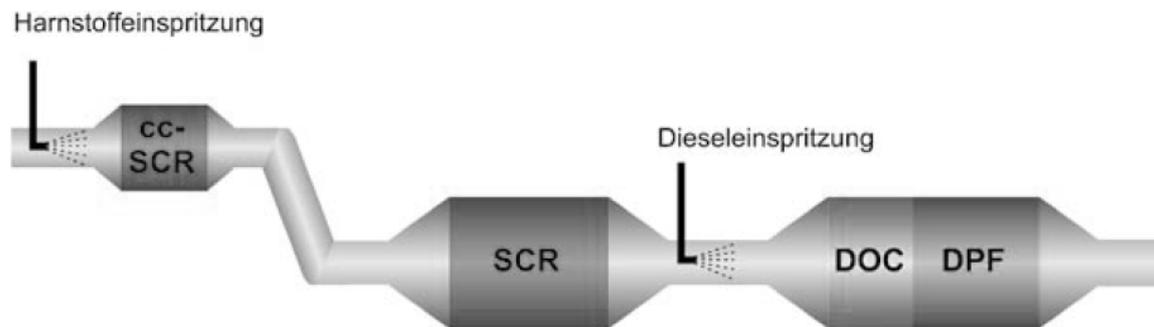


Abb. 3.7: Möglicher Aufbau eines CC-SCR Systems [33]

Die Harnstoffeinspritzung erfolgt dabei an nur einer Stelle, um Kosten und Raum zu sparen. Untersuchungen an einem 6,7 l, 165 KW NFZ-Motor haben gezeigt, dass beim Kaltstart im WHTC (World Harmonized Transient Cycle) Konvertierungsraten von knapp 90% erreicht werden. [33]

Damit kann der CC-SCR ein wichtiger Baustein im gesamten SCR-System werden, um zukünftige Abgasnormen erfüllen zu können.

3.4 Herstellung von AdBlue®

AdBlue® ist eine wässrige Harnstofflösung, deren Zusammensetzung in der DIN70070/ISO 22241 spezifiziert ist. Um AdBlue® herstellen zu können, wird, nachdem wie in Kapitel 3.4.3 beschrieben Harnstoff gewonnen wurde, auf die spezifizierete Konzentration von 32,5 % mit verdünnt. Dafür wird Dampfkondensat verwendet. [34] **Abb. 3.8** zeigt schematisch das Herstellungsverfahren von AdBlue, das in den anschließenden Unterkapiteln genauer erklärt wird.

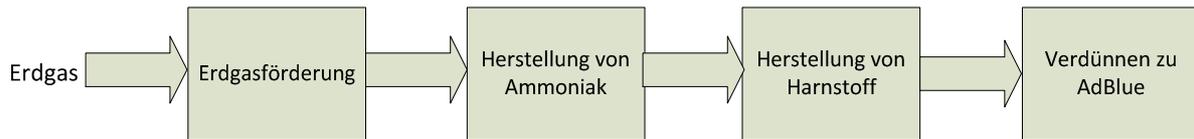


Abb. 3.8: Herstellungsverfahren von AdBlue [35]

3.4.1 Herstellung von Ammoniak

Ammoniak wird als Ausgangsprodukt für Harnstoff zur späteren Herstellung von AdBlue[®] benötigt. Die Herstellung von Ammoniak wird durch das Haber-Bosch Verfahren, benannt nach den beiden Erfindern Fritz Haber (1868 – 1934) und Carl Bosch (1874 – 1940), realisiert.

Durch Dampfreformierung von Kohlenwasserstoffen wird, zumeist aus dem Rohstoff Erdgas, Ammoniak gewonnen. Dabei muss das eingesetzte Erdgas in einem ersten Schritt entschwefelt werden, da die nachher verwendeten Katalysatoren durch Schwefel geschädigt werden können. [36]

Im nachfolgenden Primärreformer wird das gereinigte Erdgas, unter Zuhilfenahme von Wasserdampf, an einem Nickelkatalysator in Wasserstoff (H_2) umgewandelt. Das dabei entstehende Kohlenmonoxid reagiert wiederum unmittelbar mit Wasser (H_2O) zu Kohlendioxid (CO_2) und H_2 . Die im Primärreformer stattfindenden Reaktionen sind in **Gleichungen (3.19)** und **(3.20)** zusammengefasst. [37]



Nachdem im Primärreformer ca. 30 - 40 % des CH_4 umgesetzt wurde, wird im Sekundärreformer dem Gasmisch verdichtete Luft zugeführt, die auch den Stickstoff (N_2) für die anschließende Ammoniaksynthese bereitstellt. Nach dem Sekundärreformer, der wie der Primärreformer nach den Gleichungen (3.19) und

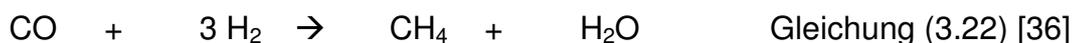
(3.20) funktioniert, beträgt die Temperatur des Gasgemisches ca. 1.000 °C und der Restgehalt an Methan beträgt 0,2 – 0,3 %. [36]

Das Gasgemisch enthält nach dem Sekundärreformer noch ca. 12 – 15 % CO, das möglichst vollständig in CO₂ umgewandelt werden muss, bevor dieses vom Gasgemisch abgetrennt werden kann. Diese Reaktion, dargestellt in **Gleichung (3.21)**, läuft bei ca. 400 °C ab. Danach befinden sich noch ca. 3 % CO im Gasgemisch. [36]



Das vorhandene CO₂ wird anschließend mittels eines Lösungsmittels ausgewaschen. Vielfach wird dabei die organische Base Methyl-di-Ethanolamin eingesetzt. Das dadurch abgetrennte CO₂ kann in weiterer Folge in verschiedenen Prozessen, z.B. in der Harnstoffherstellung, verwendet werden. [37]

Die übriggebliebenen Anteile von CO und CO₂ werden an einem Nickel Katalysator wiederum zu CH₄ umgewandelt. Dieser „Methanisation“ genannte Prozessschritt findet bei etwa 300 °C statt. Dargestellt wird die Reaktion in den **Gleichungen (3.22)** und **(3.23)**, es handelt sich dabei um die umgekehrte Reaktion des Primärreformers. [36]



Anschließend findet die eigentliche NH₃ Reaktion statt. Nach einer Kompression des Gasgemisches findet diese nach **Gleichung (3.24)** an einem Eisen Katalysator bei einem Druck von 100 – 250 bar und einer Temperatur von 350 – 550 °C statt. [36]



Nach einmaligem Passieren des Katalysators beträgt der NH₃ Anteil im Gasgemisch etwa 20 – 30 %. Das gewonnene Ammoniak wird durch Abkühlen und Kondensation

abgetrennt, das übrige Gasgemisch wird wiederum mit noch nicht abreagierten H_2 und N_2 wieder dem Katalysator zugeführt. **Abb. 3.9** zeigt das Prozessschaubild des beschriebenen Prozesses. [36]

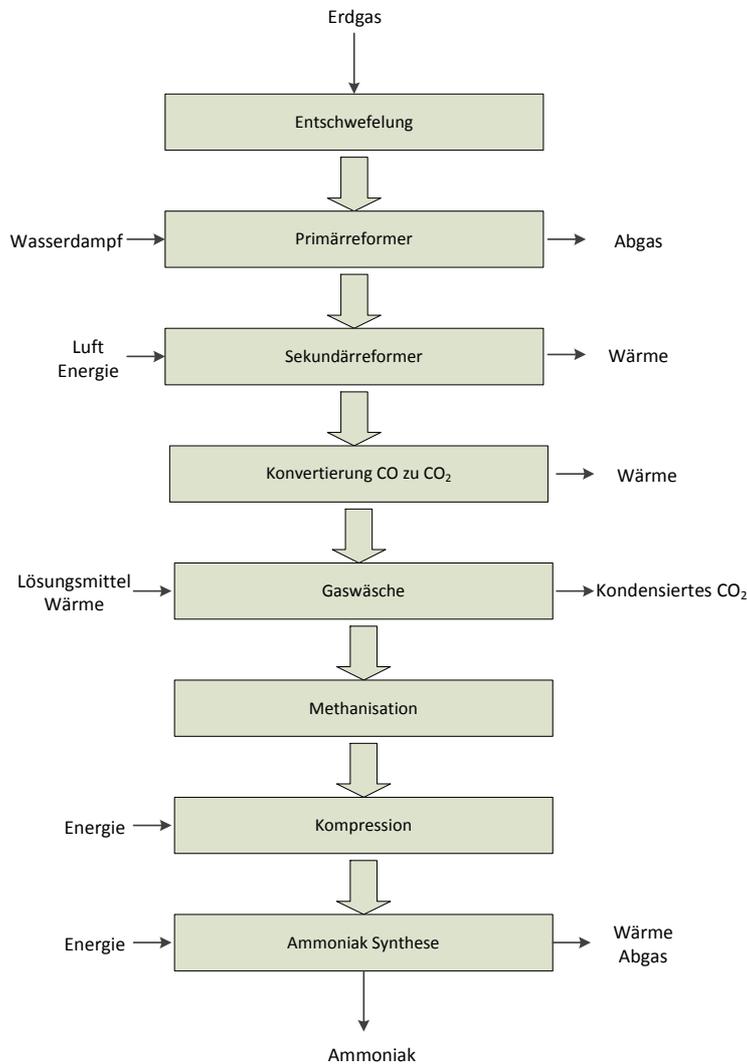


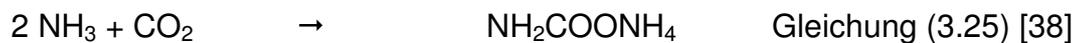
Abb.3.9: Prozessschaubild des Haber Bosch Verfahrens [36], [eigene Darstellung]

3.4.2 Gewinnung von Kohlendioxid

Kohlendioxid, im späteren Verlauf für die Herstellung von Harnstoff benötigt, wird aus der Anlage zur Herstellung von Ammoniak, gewonnen. Das CO_2 wird vor der Weiterverwendung noch mit Hilfe von elektrischer Energie komprimiert. [34]

3.4.3 Herstellung von Harnstoff

Harnstoff wird durch eine Reaktion von NH_3 und CO_2 , unter der Mithilfe des Zwischenproduktes Ammoniumcarbamat ($\text{NH}_2\text{COONH}_4$) hergestellt. Die Effizienz des Herstellungsprozesses ist abhängig von der richtigen Temperatur, dem richtigen Druck und dem korrekten $\text{NH}_3:\text{CO}_2$ Verhältnisses. Die **Gleichungen (3.25)** und **(3.26)** zeigen den chemischen Ablauf der Harnstoff Gewinnung. Die Reaktionen laufen dabei in flüssiger Phase in einem Reaktor ab. [38]



Legende: $\text{NH}_2\text{COONH}_4$ Ammoniumcarbamat
 $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$ Harnstoff

Die Herstellung von Harnstoff läuft im Prinzip in vier Stufen ab:

- Harnstoffsynthese
- Abtrennen von nicht umgesetzten Ausgangsstoffen
- Aufkonzentrierung
- Weiterverarbeitung

Die Verfahrensschritte Harnstoffsynthese, Aufkonzentrierung von Harnstoff sowie die Weiterverarbeitung laufen bei allen Produktionsprozessen im Prinzip gleich ab. Lediglich bei der Trennung des Harnstoffs von nicht umgesetzten Ausgangsmaterialien kann zwischen konventionellen Prozessen und Stripping Prozessen unterschieden werden. [38] Der Vorteil der Stripping Prozesse ist dabei, dass die Energieeffizienz besser als bei konventionellen Prozessen ist. Darüber hinaus treten bei Stripping Prozessen NH_3 und CO_2 gasförmig auf, sodass kein großer Wasseranteil vorhanden ist. [35]

Im Folgenden werden die wichtigsten Prozesse zur Abtrennung des Harnstoffes von nicht umgesetzten Ausgangsstoffen beschrieben. Bei dem Lösungs-Kreislauf-Verfahren handelt es sich um einen konventionellen Prozess, anschließend werden noch zwei Stripping Prozesse beschrieben.

3.4.3.1 Lösungs-Kreislauf-Verfahren

Beim Lösungs-Kreislaufverfahren, das zu den älteren Herstellungsverfahren von Harnstoff gehört, herrscht beim Reaktoreingang ein $\text{NH}_3:\text{CO}_2$ Verhältnis von 4:1 vor [38]. Der Vorteil besteht darin, dass es zu einer fast vollständigen Rückführung der Einsatzstoffe kommt [35].

Unter einem Druck von ca. 200 bar wird in einem Reaktor Carbamat und Harnstoff gewonnen, die entstandene Lösung wird anschließend in drei Stufen entspannt. In diesen drei Zersetzern wird durch Wärmezufuhr sowohl das restliche Carbamat, als auch das überschüssige Ammoniak abgetrennt. [38]

3.4.3.2 SNAM-Progetti Ammonia and Self Stripping Process (NH_3 stripping process)

Bei dem Snam Progetti Ammonia and Self stripping process, in weiterer Folge zur besseren Lesbarkeit NH_3 stripping process genannt, findet die Herstellung von Harnstoff in einem Synthesereaktor bei Temperaturen von ca. 170 °C, einem Druck von 150 bar und einem molaren $\text{NH}_3:\text{CO}_2$ Verhältnis von 3,5 statt. Nach dem Synthesereaktor werden die Harnstoff-Lösung und das überschüssige Carbamat über einen Stripper geleitet, in dem das überschüssige Carbamat Großteils zersetzt wird. In älteren Versionen des Prozesses wurde dabei Ammoniak als Stripping-agent verwendet, inzwischen wird der Prozess thermisch ausgeführt, d.h. als Lösungsmittel dient Hitze. Dadurch sind inzwischen auch Temperaturen von 200 °C – 210 °C notwendig. Nach dem Stripper wird Ammoniak verdampft und das restliche Carbamat sowie CO_2 in einem Abbauprozess entfernt. Carbamat und CO_2 werden dafür zwei Zersetzern, wobei der erste unter einem Druck von etwa 15 bar, der

zweite unter einem Druck von 5 bar arbeitet, zugeführt. Das dadurch entstehende CO_2 und NH_3 werden kondensiert und wiederum im Stripper als gewonnene Carbamatlösung mit den CO_2 und NH_3 Dämpfen vermischt. Dieses Gemisch wird wiederum über einen Carbamat Kondensator und einen Separator in den Reaktor zurückgeführt. [35] Die NH_3 Dämpfe, die in dem Zersetzer nicht kondensieren, gelangen in einen NH_3 Kondensator, von dem aus das NH_3 , zusammen mit frisch zugeführten NH_3 , dem Reaktor zugeführt wird [38]. **Abb. 3.10** zeigt das vereinfachte Prozessschaubild des NH_3 stripping processes. Nach den Zersetzern wird der Harnstoff konzentriert und anschließend noch weiterverarbeitet, in diesem Fall geprillt (s. Kap. 3.4.3.4).

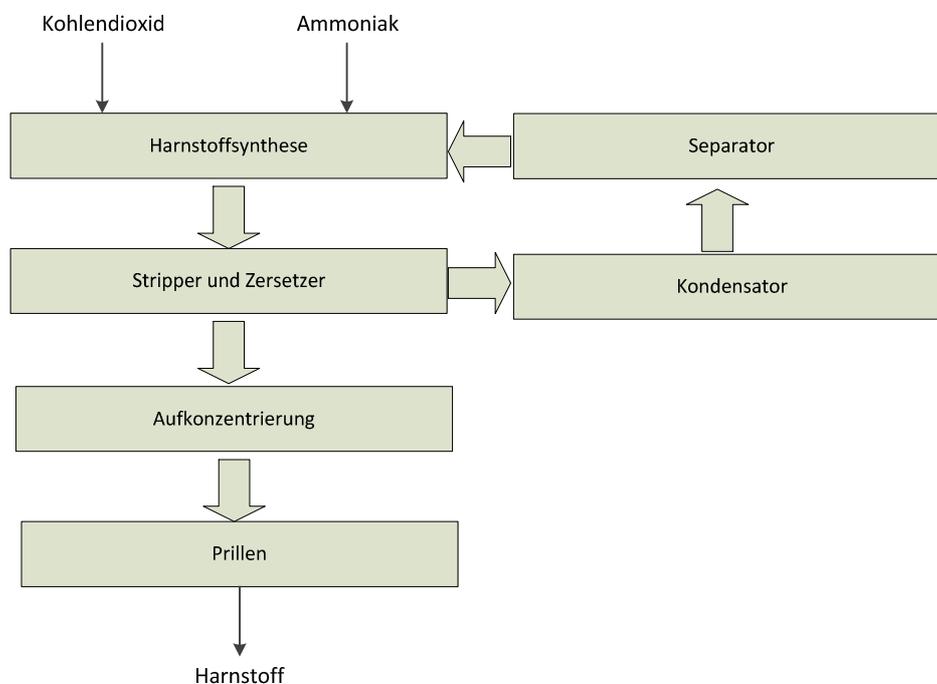


Abb. 3.10: Prozessschaubild des NH_3 stripping processes [38], [eigene Darstellung]

Abb. 3.11 zeigt die Entstehungsquellen der Emissionen beim NH_3 stripping process. Die Zahlenwerte passen dabei nicht zu 100% zu den in der Ökobilanz verwendeten Daten, da die für das Rechenmodell verwendeten Daten aktueller sind. Ersichtlich ist, dass der Großteil der NH_3 und Staubemissionen in die Luft erst bei der weiteren Behandlung des Harnstoffes, also dem Prillen, entstehen. Während der

Aufkonzentration und der Carbamatzeretzung entstehen zusammengezählt weniger NH_3 Emissionen als beim Prillen. Staub fällt ausschließlich beim Prillen an.

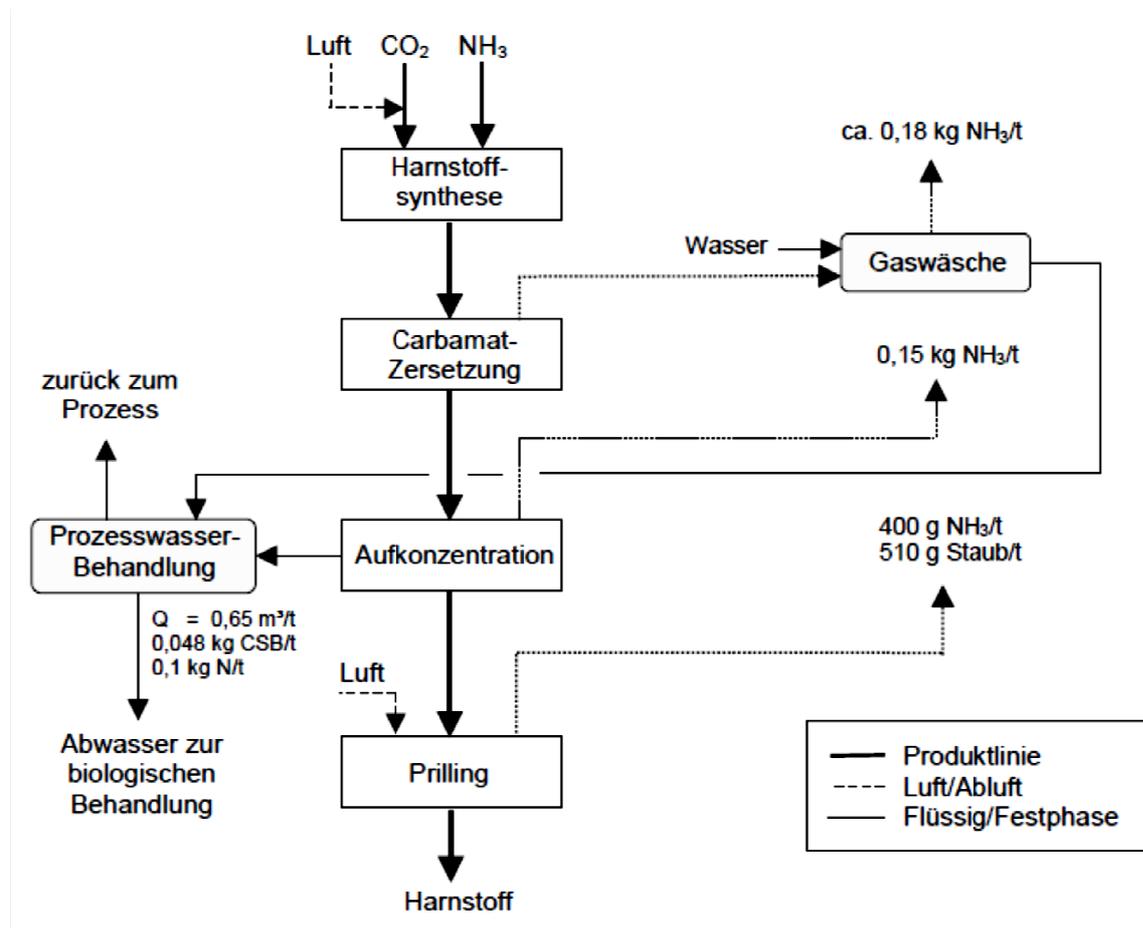


Abb. 3.11: Emissionsquellen und typische Mengen des NH_3 stripping processes [38]

3.4.3.3 CO_2 -Stripping Process

Die Harnstoff Herstellung läuft beim CO_2 Stripping Process bei einer Temperatur zwischen 180 °C und 185 °C, einem Druck von 140 bar und einem molaren $\text{NH}_3:\text{CO}_2$ Verhältnis von 3:1 optimal ab. Das Carbamat wird in einem Hochdruck Stripper abgebaut, der Stripping Effekt wird dabei durch die Gegenströmung von der Harnstoff-Lösung und frischem CO_2 erreicht. Um das übrige Carbamat aus der Harnstoff-Lösung zu entfernen, ist nur mehr ein Prozess notwendig, der unter niedrigem Druck abläuft. [35]

Die drei beschriebenen Herstellungsprozesse unterscheiden sich wesentlich im Rohstoffbedarf. **Tab. 3.2.** gibt einen Überblick über die eingesetzten Ressourcen der einzelnen Harnstoff Herstellungsverfahren. Die verschiedenen Quellen beim Lösungs-Kreislaufverfahren und dem CO₂ Stripping Process beziehen sich auf den gleichen Produktionsprozess im gleichen Unternehmen, und können daher kombiniert werden.

Tab. 3.2.: Ressourcenbedarf bei der Harnstoffherstellung

Rohstoffbedarf der verschiedenen Harnstoffproduktionsverfahren				
	NH ₃ [kg/t]	CO ₂ [kg/t]	Wasserdampf [kg/t]	spez. Energiebedarf [kWh/t]
Lösungs-Kreislaufverfahren	580 – 600 [39]	K.A.	1300 [38]	70 [38]
NH ₃ Stripping Process	567 [35]	735 [35]	760 [35]	21,1 [35]
CO ₂ Stripping Process	567 [39]	733 [39]	920 [38]	43 [38]

3.4.3.4 Prillen

Das Prillen ist ein Prozess, um Wasser aus der Harnstoff-Lösung zu entfernen. Dazu ist zweistufiges Verdampfen notwendig. Pro Tonne Harnstoff-Lösung werden dabei ca. 300 kg Wasser produziert. Die Verweilzeit der Harnstoff-Lösung im Verdampfer muss dabei möglichst kurz sein, weil bei den vorherrschenden Temperaturen die Gefahr besteht, dass Harnstoff abgebaut wird und Biuret (C₂H₅N₃O₂) entsteht. Das entstandene Kondensat enthält Harnstoff und Ammoniak, die in den Prozess zurückgeführt werden können.

Beim Prillen wird die Harnstoff-Lösung durch eine Zentrifuge am oberen Ende des Prillturmes in flüssigen Tropfen eingebracht, die sich verfestigen, während sie den Turm hinunterfallen. Zur Kühlung wird dabei natürlicher, oder künstlich erzeugter Aufwind verwendet. [35]

Im folgenden Kapitel wird die Entwicklung des österreichischen Straßenverkehrs bis ins Jahr 2020 untersucht, um in der Ökobilanz eine Abschätzung über den Einfluss des Einsatzes von Harnstoff als Reduktionsmittel treffen zu können.

4 Entwicklung des österreichischen Straßenverkehrs bis 2020

Zur Ermittlung des Bedarfs an AdBlue wird in verschiedenen Szenarien eine Abschätzung für das Straßenverkehrsaufkommen von PKW und LKW im Jahr 2020 durchgeführt. Dafür wird sowohl für PKW als auch für LKW eine Prognose über den künftigen Bestand und die durchschnittlich gefahrenen Kilometer durchgeführt. In der Auswertung der Ökobilanz werden anschließend die drei Szenarien

- Keine Einführung des SCR Systems
- Erwartete Marktdurchdringung des SCR Systems im Jahr 2020
- Vollständige Marktdurchdringung des SCR Systems

anfangs getrennt für den PKW und LKW Bereich berechnet um anschließend ein gesamthafes Bild über den Einfluss des SCR Systems auf die Emissionen des Straßenverkehrs geben zu können.

Wie in Kapitel 1 erörtert sind für die Einführung des SCR Systems dieselbetriebene Fahrzeuge entscheidend, weil die magerbetriebenen Otto Direkteinspritzmotoren, die ebenfalls eine NO_x Nachbehandlung benötigen, NO_x Speicherkatalysatoren zur Reduzierung verwenden. (s. Kap. 1.2) Auf diese konzentriert sich folglich auch die Auswertung der Entwicklung des österreichischen Straßenverkehrs bis 2020

4.1 Personenkraftwagen

4.1.1 Neuzulassungen

Um die Bestandsentwicklung im PKW Bereich abschätzen zu können werden Realdaten der Statistik Austria über Bestand und Neuzulassungen der letzten Jahre herangezogen. In weiterer Folge wird über eigene Berechnungen der Bestand bis zum Jahr 2020 abgeschätzt.

Abb. 4.1 gibt einen Überblick über die Neuzulassungen der letzten Jahre aus historischen Daten der Statistik Austria [40] und eine Abschätzung für die Jahre bis 2020. In den Jahren 2000 bis 2011 wurden durchschnittlich 308.863 PKW neu zugelassen. Dabei ist erkennbar, dass es erst ab dem Jahr 2009 mit 319.403 Neuzulassungen im Gegensatz zu 293.697 im Jahr 2008, zu einer deutlichen Steigerung der Neuzulassungen gekommen ist. Der Absatzeinbruch 2008 wurde allerdings bedingt durch die weltweite Finanzkrise. Im Vergleich mit dem Jahr 2007 erhöhten sich die PKW Neuzulassungen in zwei Jahren um ca. 7%. Damit das Krisenjahr 2008 keinen Einfluss auf die verwendeten Berechnungen nimmt, wird für die Jahre 2013 bis 2020 davon ausgegangen, dass die Neuzulassungen jährlich dem Durchschnitt der Jahre 2009 – 2011 betragen. Das entspricht 334.704 PKW. Der Anteil der dieselbetriebenen Fahrzeuge erreichte im Jahr 2003 mit 71% der gesamt zugelassenen Fahrzeuge einen ersten Höhepunkt. Nach der Abkühlung des Trends zu Dieselfahrzeugen bis ins Jahr 2009 (46%) stieg der Anteil 2011 wieder auf 55%. e [41] geht davon aus, dass der Anteil der dieselbetriebenen PKW bis 2020 auf 40% zurückgehen wird. Da es keine genaueren Daten gibt, wird in der weiteren Berechnung der Abfall des Anteils der neuzugelassenen PKW mit Dieselmotor als konstant von den derzeitigen 55% auf 40 % angenommen.

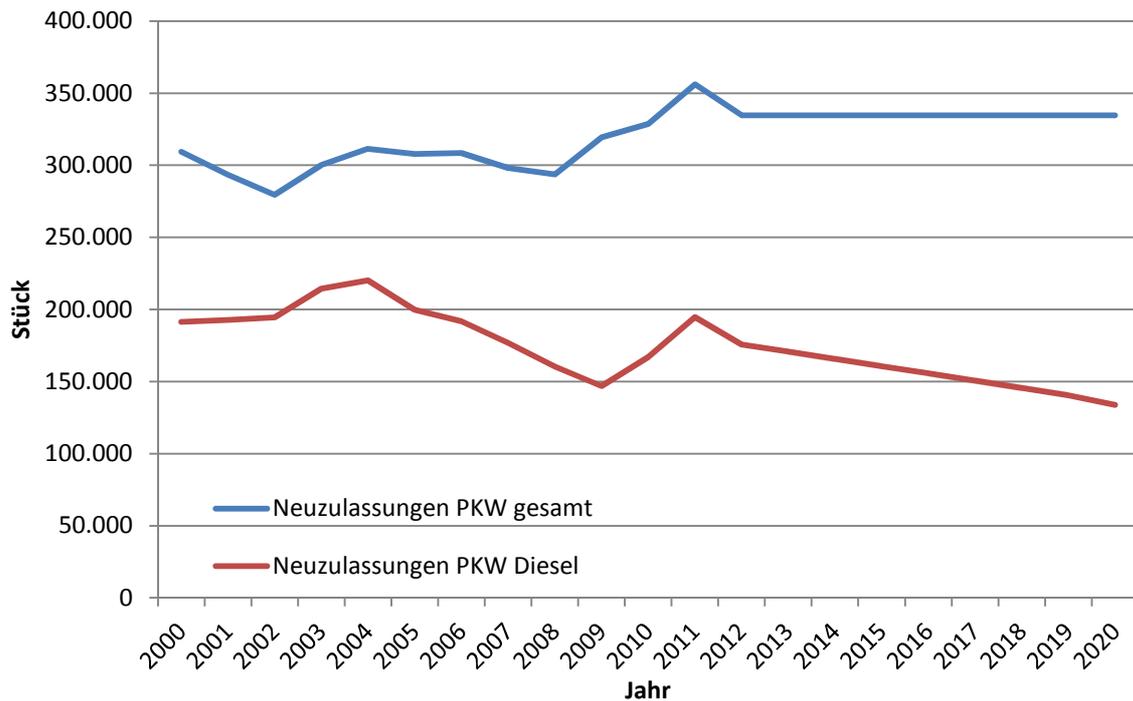


Abb. 4.1.: Neuzulassungen PKW Gesamt und Diesel [40], [eigene Berechnungen]

Abb. 4.2. zeigt den Anteil der zugelassenen PKW mit mindestens 90 kW Leistung von allen zugelassenen PKW. Der Einsatz des SCR Systems in verschiedenen Fahrzeugklassen ist für die Zukunft sehr schwierig vorauszusagen, weil bei jeder Fahrzeug-Motorkombination individuell entschieden wird, ob es sinnvoller ist, ein SCR System oder einen NSC zur Nachbehandlung von NO_x Emissionen einzusetzen. Tendenziell kann nur gesagt werden, dass das SCR System eher bei schwereren und leistungsstärkeren Fahrzeugen eingesetzt werden wird. [42]

Deswegen wird für die Variante der erwarteten Marktdurchdringung in der Ökobilanz davon ausgegangen, dass Diesel PKW mit dieser Leistung von mindestens 90 kW mit einem SCR System ausgestattet werden. Aus der Abb. 4.2 geht hervor, dass der Anteil an PKW mit einer Leistung ≥ 90 kW, bei denen die statistischen Daten erst seit 2005 erhoben werden, während der letzten Jahre von 24% im Jahr 2005 gestiegen ist und 2011 das bisherige Maximum von knapp über 32% erreicht hat. Da ein Ende der Entwicklung zu leistungsstärkeren Fahrzeugen nicht absehbar ist, wird für die Jahre 2012 – 2020 davon ausgegangen, dass die Steigerung in gleichem Maße weitergeht und der Anteil der PKW, mit einer Leistung von mindestens 90 kW, im Jahr 2020 43% aller neu zugelassener PKW ausmacht. Aufgrund fehlender Juni 2013

statistischer Daten kann dabei keine Unterscheidung zwischen diesel- und benzinbetriebenen Fahrzeugen gemacht werden. Deswegen wird davon ausgegangen, dass die Verteilung auf die beiden Antriebstypen gleich ist.

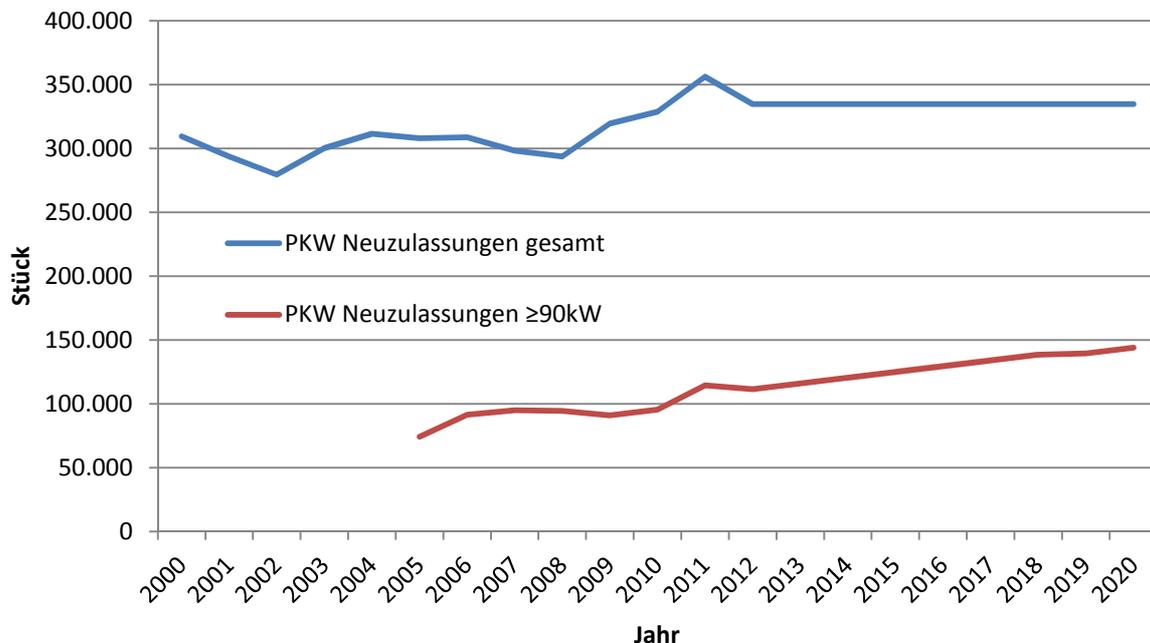


Abb. 4.2.: Neuzulassungen PKW gesamt und PKW ≥ 90 kW [40], [ab 2012 eigene Berechnungen]

4.1.2 Bestandsentwicklung

Für die Bestandsentwicklung werden einerseits die angeführten Werte für Neuzulassungen, andererseits historische Bestandswerten der Statistik Austria [43] herangezogen und durchschnittliche Ausfallraten errechnet. Die Ausfallrate beschreibt dabei lediglich die Differenz zwischen Fahrzeugbestand am Ende des Jahres und Fahrzeugbestand am Anfang des Jahres zuzüglich den Neuzulassungen des gesamten Jahres. Zusätzliche Faktoren wie Fahrzeugimporte und -exporte bleiben unberücksichtigt.

Über die letzten Jahre hat sich dabei eine durchschnittliche Ausfallrate von 5,974% des Altbestandes ergeben. Für die Jahre 2012 bis 2020 wird deshalb weiterhin mit einer konstanten, gerundeten, Ausfallrate von 6% gerechnet. Daraus ergibt sich für Juni 2013

die kommenden Jahre die in **Abb. 4.3.** dargestellte Entwicklung des Bestandes. Im Jahr 2020 werden Diesel betriebene Personenkraftwagen ca. 51% aller PKW bzw. ca. 2,5 Mio. Stück ausmachen. Auf diese 2,5 Mio. Stück entfallen ca. 31% auf Fahrzeuge mit einer Leistung von mindestens 90 kW, also ca. 780.000.

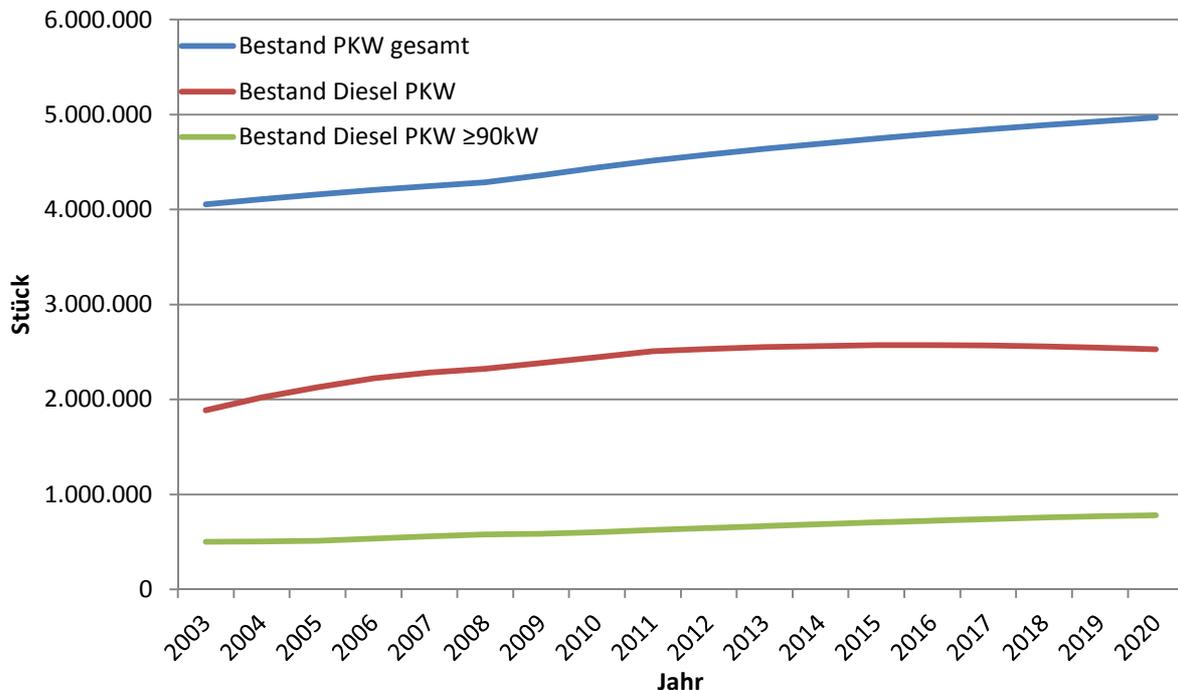


Abb. 4.3.: Bestandsentwicklung PKW [43], [eigene Berechnungen]

4.1.3 Laufleistungsentwicklung

Für die Laufleistungsentwicklung werden Daten des Umweltbundesamtes herangezogen [44], die für die Studie [45] eine Untersuchung zur Laufleistungsentwicklung von Kraftfahrzeugen bis ins Jahr 2020 erstellt hat.

Aus **Abb. 4.4.** ist ersichtlich, dass für Diesel PKW im Jahr 2020 mit einer jährlichen Laufleistung von 14.456 Kilometer pro Fahrzeug gerechnet wird. Eine genauere Differenzierung nach Leistungsklassen ist nicht möglich, deswegen wird für alle Diesel PKW die gleiche jährliche Laufleistung angenommen. Der Abfall der Laufleistungsentwicklung ist ein modellbedingtes Ergebnis, der auf dem vermehrten Einsatz von Dieselfahrzeugen in Privathaushalten beruht [44].

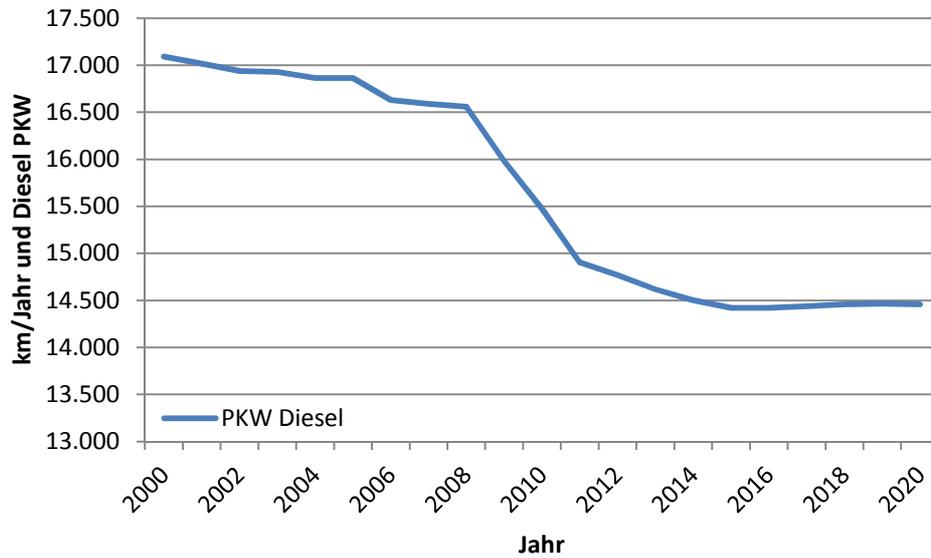


Abb. 4.4.: Laufleistungsentwicklung von PKW [44]

Für das Jahr 2020 ergibt sich daraus für alle dieselbetriebenen PKW eine Gesamtlauflistung von ca. 39,7 Mrd. Kilometer, wobei ca. 12,5 Mrd. Kilometer auf PKW mit einer Leistung von $\geq 90\text{kW}$ entfallen. Die Entwicklung der Gesamtlauflistung bis ins Jahr 2020 kann aus **Abb. 4.5.** entnommen werden.

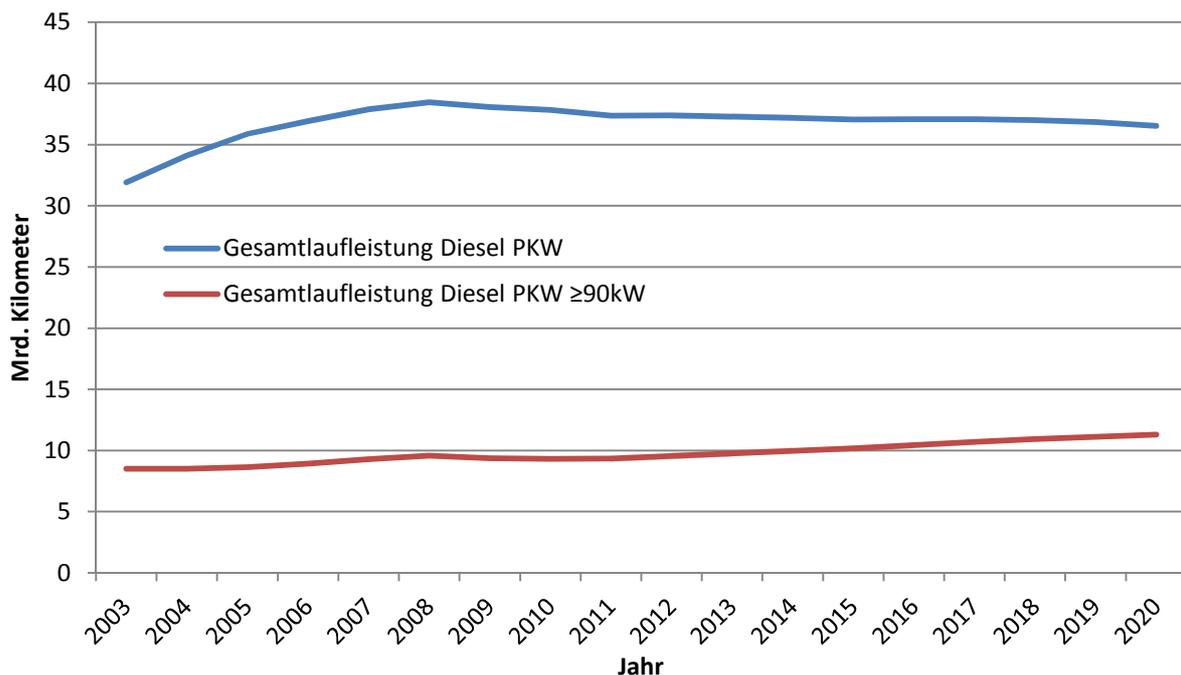


Abb. 4.5.: Gesamtlauflistung PKW

4.2 Nutzfahrzeuge

Bei Nutzfahrzeugen wird zwischen den Klassen N1, N2 und N3 unterschieden. Dabei steht die Klasse N1 für leichte Nutzfahrzeuge (LNF) bis zu einem zulässigen Gesamtgewicht von 3.500 kg, der Klasse N2 sind Fahrzeuge mit einem zulässigen Gesamtgewicht zwischen 3.500 kg und 12.000 kg zugeteilt, der Klasse N3 Fahrzeuge mit über 12.000 kg. Die Klassen N2 und N3 werden in weiterer Folge als schwere Nutzfahrzeuge (SNF) bezeichnet. Zusätzlich zur Klasse N wird in diesem Kapitel auch die Klasse M2 und M3, also Omnibusse behandelt. In der Statistik wird für benzinbetriebene Nutzfahrzeuge keine Differenzierung zwischen den Klassen N1, N2 und N3 gemacht. Da in der Literatur [46] aufgezeigt wird, dass benzinbetriebene Nutzfahrzeuge fast ausschließlich der Klasse N1 angehören, wird zur Vereinfachung davon ausgegangen, dass sämtliche Benzinbetriebene Nutzfahrzeuge in die Klasse N1, leichte Nutzfahrzeuge, gehören. Schwere Nutzfahrzeuge werden, ausgenommen von Regionen mit sehr tiefen Temperaturen, in der Regel mit Diesel betrieben. Da benzinbetriebene Motoren für diese Arbeit irrelevant sind, wird nicht weiter auf sie eingegangen.

4.2.1 Neuzulassungsentwicklung

Die Daten für die Neuzulassungen bei LKW werden seit 2004 von der Statistik Austria getrennt für die LKW Klassen N1, N2 und N3 erstellt. [40] Bei der Klasse N1 ist bis 2008 ein stetiger Anstieg an Neuzulassungen zu beobachten. Nach den Krisenjahren 2009 und 2010 befindet sich die Klasse N1 bereits wieder auf Vor-Krisenniveau. Es wird davon ausgegangen, dass sich bis 2020 der Trend einer leichten Steigerung weiter fortsetzt. Als Steigerungsrate für die Jahre 2012 - 2020 wird dabei die durchschnittliche Steigerung zwischen 2004 und 2011 herangezogen, wobei das Jahr 2009 als statistischer Ausreißer unberücksichtigt bleibt. Dadurch ergibt sich eine jährliche Steigerung der Neuzulassungen um 3,2%. **Abb. 4.6** zeigt die Entwicklung der Neuzulassungen von LNF.

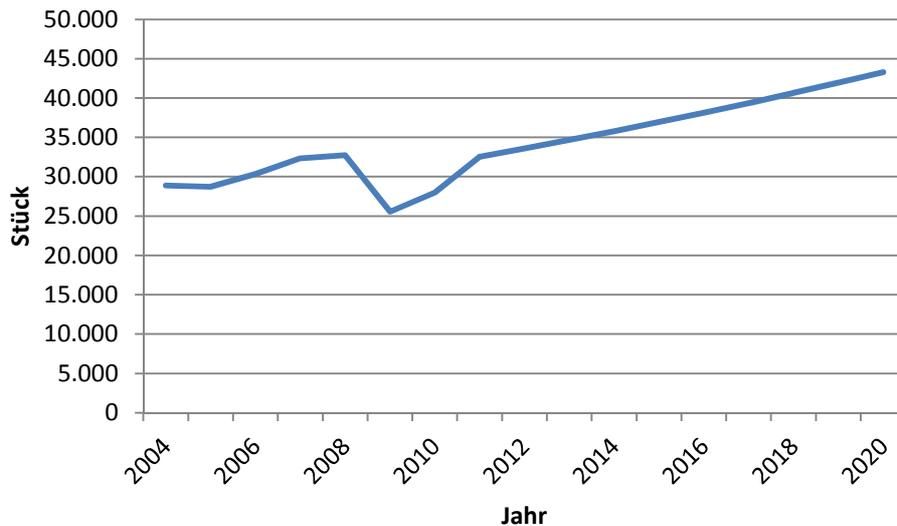


Abb. 4.6: Neuzulassungen LNF [40], [eigene Berechnungen]

Die Daten zu den Neuzulassungen von SNF werden nach dem gleichen Prinzip wie bei den LNF gewonnen. Für die Klasse N3 ergibt sich aus dem Durchschnitt der Jahre 2005 - 2011 eine durchschnittliche Steigerungsrate von 1,6 %, wobei die Jahre 2009 (-38 % Neuzulassungen) und 2011 (+18 % Neuzulassungen) als statistische Ausreißer nicht berücksichtigt werden. Die Neuzulassungen der Klasse N2 verringern sich zwischen 2005 und 2011 jährlich um durchschnittlich 2,7 %. Die Steigerung von 1,6 % für die Klasse N3 sowie die Verminderung um 2,7 % für die Klasse N2 werden folglich als weiterer Trend für die Jahre 2012 – 2020 herangezogen. Für die Neuzulassungen von Bussen zeigt sich zwischen 2004 und 2011 eine Schwankung zwischen ca. 600 und 900 zugelassenen Fahrzeugen pro Jahr. Da kein Trend in positive oder negative Richtung beobachtet werden kann, wird davon ausgegangen, dass die Neuzulassungen zwischen 2012 und 2020 dem langjährigen Durchschnitt (2004 – 2011), nämlich 769 Fahrzeuge entsprechen. Die Entwicklung kann aus **Abb. 4.7** abgelesen werden.

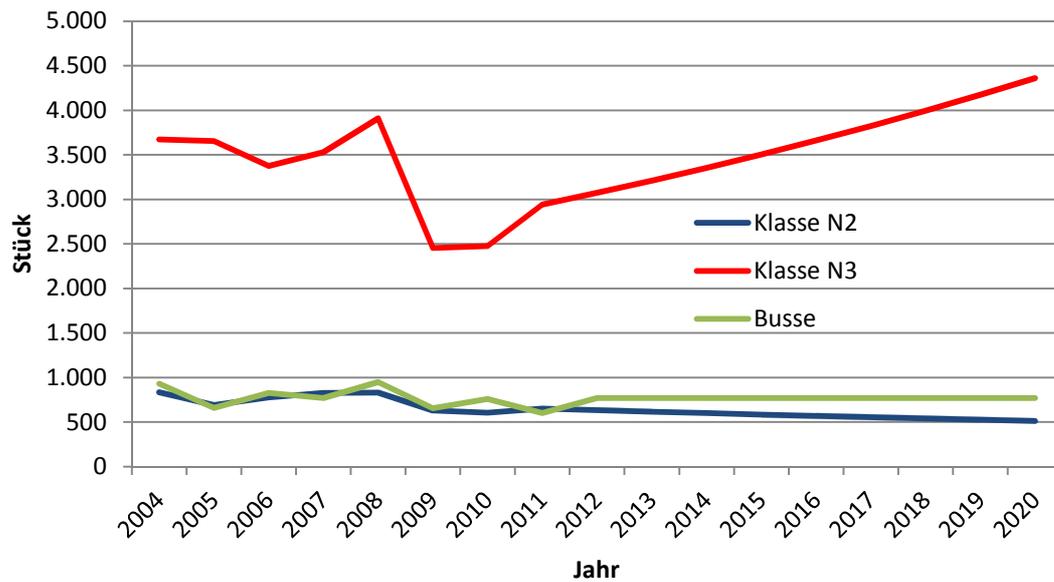


Abb. 4.7: Neuzulassungen SNF [40], [eigene Berechnungen]

4.2.2 Bestandsentwicklung

Nachfolgend wird die Bestandsentwicklung für Nutzfahrzeuge und Busse der vergangenen Jahre beleuchtet und eine Prognose über diese bis zum Jahr 2020 abgegeben.

4.2.2.1 Leichte Nutzfahrzeuge

Die Bestandsentwicklung von LNF ergibt sich aus historischen Werten der Statistik Austria für Bestand [43], den im vorigen Kapitel errechneten Neuzulassungen sowie den zugehörigen Ausfallraten. Diese lag in den vergangenen Jahren im Schnitt bei 7,2%.

Bei der Bestandsentwicklung für leichte Nutzfahrzeuge wird zwischen Diesel und Benzin betriebenen Fahrzeugen unterschieden. Während der Bestand für benzinbetriebene Fahrzeuge von ca. 23.000 im Jahr 2002 auf ca. 15.000 im Jahr

2006 abnahm, blieb er in den Folgejahren annähernd konstant. Somit wird auch in der Zukunft ein konstanter Bestand von 15.000 Fahrzeugen angenommen. Leichte Nutzfahrzeuge mit Dieselantrieb zeigen hingegen eine konstante Steigung über die letzten Jahre. Auf ein Aussetzen dieses Trends weißt im Moment nichts hin, so wird von einem weiteren, gleichmäßigen Anstieg bis ins Jahr 2020 auf 409.500 Fahrzeugen ausgegangen. **Abb. 4.8** zeigt die Bestandsentwicklung für leichte Nutzfahrzeuge.

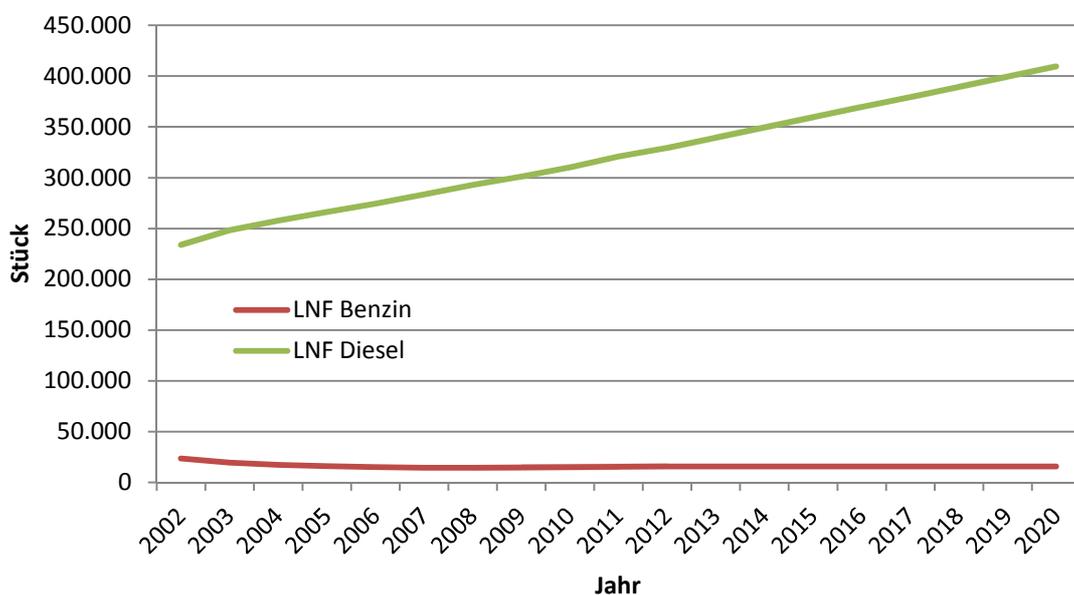


Abb. 4.8.: Bestandsentwicklung leichte Nutzfahrzeuge [43], [eigene Berechnungen]

4.2.2.2 Schwere Nutzfahrzeuge und Busse

Bei SNF wird für die Bestandsentwicklung zwischen den Klassen N2 und N3 unterschieden. Während in der Klasse N2 eine stetige Abnahme des Bestandes von ca. 19.000 im Jahr 2002 auf ca. 13.500 im Jahr 2011 erkennbar ist, bleibt der Bestand in der Klasse N3 von 2002 bis 2011 annähernd konstant (-1,3%). So wird für die Zukunft davon ausgegangen, dass diese Trends weiterhin gleichmäßig bleiben. So nimmt die Klasse N2 weiter ab und im Jahr 2020 sind nur noch 9.000 Fahrzeuge der Klasse N2 zugelassen. In der Klasse N3 wird weiterhin konstant bei 41.000 Fahrzeugen gerechnet. Der Bestand von Bussen ist zwischen 2004 und 2011

annähernd mit knapp unter 10.000 Stück konstant. Deswegen wird auch für die Jahre 2012 bis 2020 mit einem konstanten Bestand, dem Mittelwert zwischen 2004 und 2011, gerechnet. Aus **Abb. 4.9.** kann die Bestandsentwicklung für schwere Nutzfahrzeuge abgelesen werden.

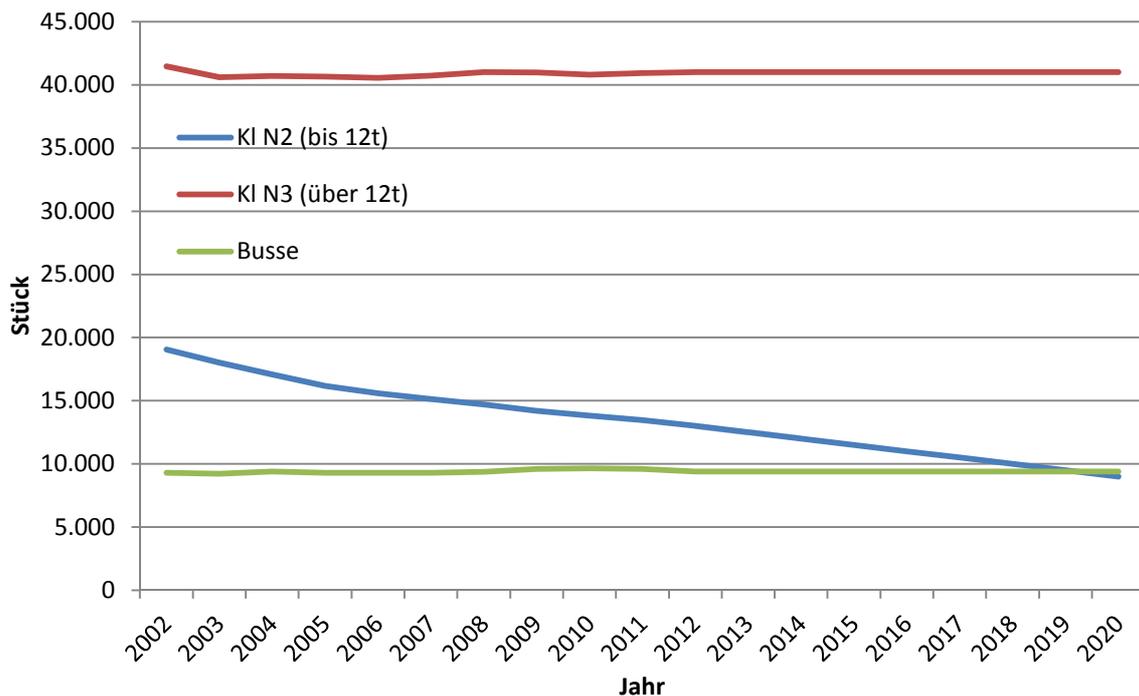


Abb. 4.9.: Bestandsentwicklung für schwere Nutzfahrzeuge und Busse [43], [eigene Berechnungen]

4.2.3 Laufleistungsentwicklung

Die Daten zur spezifischen Laufleistungsentwicklung wurden vom Bundesumweltamt zur Verfügung gestellt und stammen aus der Studie [45]. LNF zeigen über die letzten Jahre dabei eine stabile Laufleistung von ca. 20.000 km pro Jahr. Bei SNF wird von einer Steigerung der jährlichen Laufleistung auf 63.600 km im Jahr 2020 ausgegangen. Die Laufleistung für die Klassen N2 und N3 werden dabei als gleich angenommen. Für Busse zeigt sich eine relativ konstante Laufleistung, in Zukunft

wird mit einer jährlichen Laufleistung von ca. 53.000 km gerechnet. Einen Überblick über die jährliche Laufleistung gibt **Abb. 4.10**

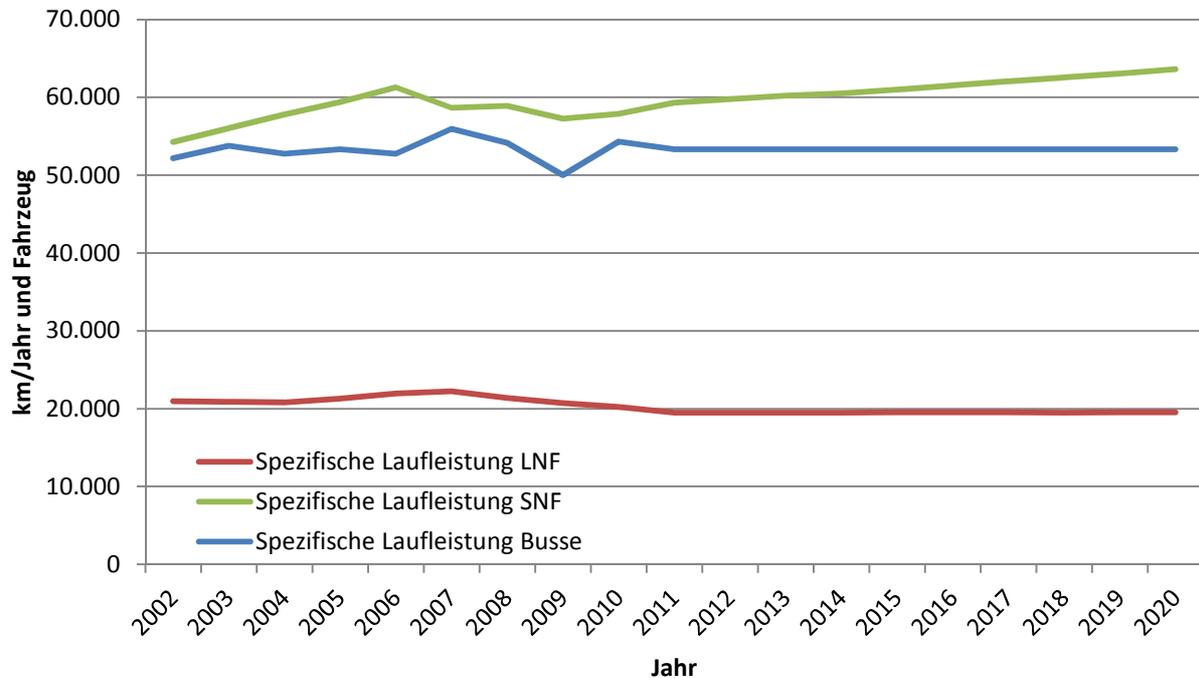


Abb. 4.10: Spezifische Laufleistung von Nutzfahrzeugen [44]

Als Gesamtleistung ergeben sich daher im Jahr 2020 für Dieselbetriebene, leichte Nutzfahrzeuge ca. 8 Mrd. km, für SNF ca. 3,2 Mrd. km und für Busse ca. 500 Mio. km. Die genaue Entwicklung der Gesamtleistung kann **Abb. 4.11** entnommen werden.

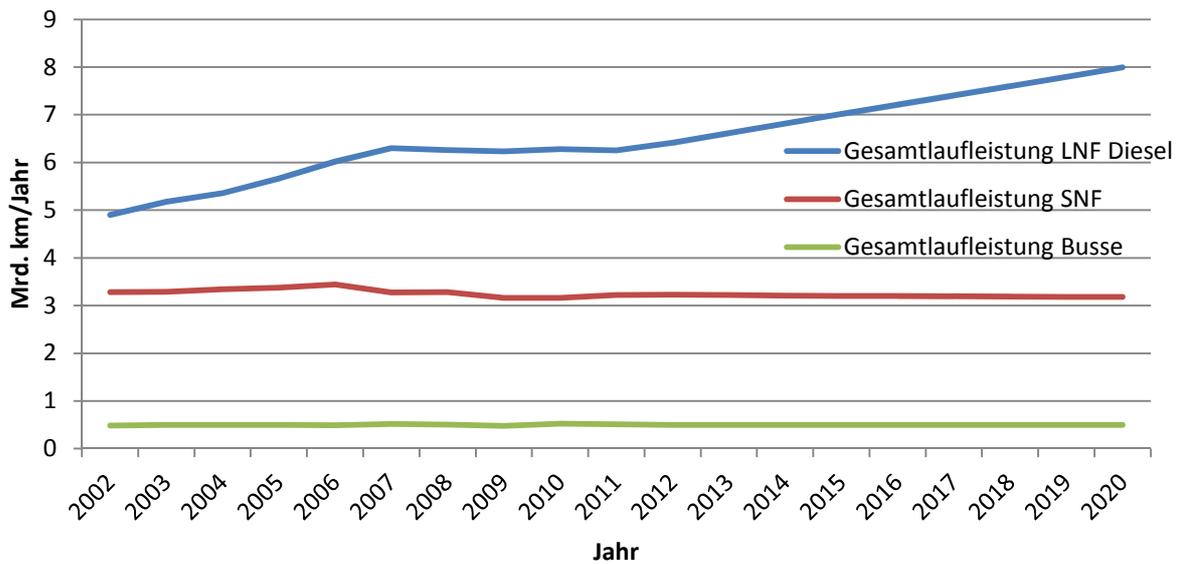


Abb. 4.11.: Gesamtleistung für Nutzfahrzeuge

4.3 *Laufleistung von SCR Fahrzeugen im Jahr 2020 für die Variante – Erwartete Marktdurchdringung des SCR Systems*

4.3.1 **Personenkraftwagen und leichte Nutzfahrzeuge**

Um abschätzen zu können wie viele PKW tatsächlich im Jahr 2020 mit dem SCR System ausgestattet sein werden, wird berechnet wie viel Prozent der Fahrzeuge im Jahr 2011 eine Leistung von $\geq 90\text{kW}$ haben und höchstens sechs Jahre alt ist. Grund dafür ist, dass ab dem Jahr 2015 zugelassene Fahrzeuge – also Fahrzeuge die 2020 höchstens sechs Jahre alt sind - in dieser Berechnungsvariante mit dem SCR System ausgestattet sein werden, falls sie eine Leistung von $\geq 90\text{kW}$ haben. Das Jahr 2015 ergibt sich aus der Schrittweisen Einführung der neuen Abgasnorm EURO VI zwischen September 2014 – ab diesem Zeitpunkt müssen alle neuen Typprüfungen EURO VI erfüllen – und September 2015 – ab diesem Zeitpunkt müssen alle neu zugelassenen Fahrzeuge diese Norm erfüllen. Der Prozentsatz, der sich aus dem Jahr 2011 ergibt, wird dann als Wert für die erwartete Marktdurchdringung herangezogen. Bei leichten Nutzfahrzeugen (LNF) wird,

aufgrund der höheren Leistung davon ausgegangen, dass alle Fahrzeuge, die höchstens 6 Jahre alt sind, mit einem SCR System ausgestattet sein werden.

Von den gesamten PKW Fahrzeugen mit Dieselantrieb 2011 (2,5 Mio.) sind ca. 312.000 Fahrzeuge zwischen 2006 und 2011 zugelassen worden, die eine Leistung von $\geq 90\text{kW}$ haben. Dies entspricht einer Quote von 12,5%. Von den 336.000 LNF im Jahr 2011 wurden zwischen 2006 und 2011 ca. 181.500 neu zugelassen, das entspricht 54%. [40]

Folglich ergibt sich im Jahr 2020 eine Kilometerlaufleistung für PKW bzw. LNF mit SCR System von 4,5 Mrd. km (PKW) bzw. 4,3 Mrd. km (LNF).

4.3.2 Schwere Nutzfahrzeuge und Busse

Bei SNF und Bussen wird davon ausgegangen, dass ab Einführung der EURO 6 Norm im Jahr 2013 sämtliche Fahrzeuge mit dem SCR System ausgestattet sein werden. Für die Jahre 2005 (Einführung der EURO 4 Norm) bis 2012 setzen bereits alle Hersteller abgesehen von MAN und Scania auf das SCR System. Um diese beiden Hersteller herauszurechnen, werden in erster Näherung die Marktanteile von MAN und Scania für die Neuzulassungen 2011 herangezogen. MAN kommt dabei auf einen Marktanteil von 23,5% in der Klasse N2, sowie 41,5% in der Klasse N3. Scania hat 2011 einen Marktanteil von 11,4% in der Klasse N3. [40] Zusammen kommen diese beiden Marken, die das SCR System noch nicht verwenden, 2011 auf einen Marktanteil von 52,9% in der Klasse N3.

Daraus folgt, dass 2020 alle SNF und Busse, die höchstens 8 Jahre alt sind auf jeden Fall ein SCR System verwenden. Darüber hinaus ist dieses bereits in 47,1 % der älteren Fahrzeuge der Klasse N3 – aufgrund fehlender, genaueren Daten wird dieser Wert auch für Busse herangezogen - sowie in 76,5 % der Fahrzeuge der Klasse N2 verbaut. Somit ergibt sich für dieses Szenario im Jahr 2020, dass SNF

und Busse, die mit einem SCR System ausgestattet sind, ca. 2,9 Mrd. km zurücklegen werden.

Im folgenden Kapitel 5 wird die Ökobilanz zur Herstellung von Harnstoff abgearbeitet und anschließend die ökologische Bewertung von Harnstoff als Ausgangsbasis von NH_3 in SCR Systemen durchgeführt.

5 Ökobilanz

Im Folgenden soll der, für das Betreiben des beschriebene SCR Systems notwendige Harnstoff mittels einer Ökobilanz (Life Cycle Assessment - LCA) bewertet werden. Es werden dabei nach ISO 14040 ff Produkte auf dem gesamten Lebensweg, von der Gewinnung der Rohstoffe bis zu den Abfallbeseitigungen also "von der Wiege bis zur Bahre" alle wesentlichen Inputs in das System, dem schlussendlich folgenden Output, in diesem Fall also der Minderung der NO_x Emissionen, gegenübergestellt.

5.1 Theoretische Grundlagen

Die Erstellung einer Ökobilanz ist nach ISO 14040 ff auf europäischer Ebene genormt und stellt eine anerkannte Methode im Umweltmanagement dar.

Die Ökobilanz soll vor allem dabei helfen, Verbesserungspotentiale von Produkten in den unterschiedlichen Phasen des Lebensweges hinsichtlich ihrer Umwelteigenschaften aufzuzeigen, sowie Entscheidungsträger in allen beteiligten Bereichen wie Industrie oder Politik besser zu informieren. [47]

Die Ökobilanz besteht nach ISO 14040 [47] im Wesentlichen aus den folgenden vier Phasen:

1. Phase der Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen

Zu Beginn wird die Fragestellung und damit einhergehend das Ziel der Arbeit abgeklärt. Um das Ziel eindeutig festlegen zu können, ist es wichtig, die beabsichtigte Anwendung, die Zielgruppe der Studie sowie die Gründe für die Durchführung genau festzulegen. Weiters werden die Systemgrenze und der Detaillierungsgrad beschrieben.

2. Sachbilanz Phase

Während der Sachbilanz Phase werden die Input- und Outputdaten des zuvor festgelegten Systems ermittelt.

3. Phase der Wirkungsabschätzung

In der Phase der Wirkungsabschätzung *"wird die Beurteilung der Bedeutung potenzieller Umweltwirkungen mit Hilfe der Ergebnisse der Sachbilanz angestrebt"*.

4. Phase der Auswertung

Um Ergebnisse zu bekommen, die mit dem Ziel der Ökobilanz übereinstimmen, werden zum Abschluss die Ergebnisse der Sachbilanz zusammengefasst und mit der Wirkungsabschätzung die ökologischen Effekte abgeleitet. Aus den vorhandenen Ergebnissen sollen schließlich Schlüsse gezogen und Empfehlungen ausgesprochen werden.

5.2 Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen

Ziel der Untersuchung ist es, Harnstoff als Reduktionsmittel im SCR System ökologisch zu bewerten. Dabei soll beleuchtet werden, wie groß der Anteil der Herstellung und Distribution von Harnstoff an den gesamten Emissionen – untersucht werden die Emissionen von NO_x , NH_3 , CH_2 , CH_4 sowie PM - ist, die beim Betrieb von Diesel Fahrzeugen entstehen. Außerdem sollen die bei der Herstellung und Distribution angefallenen Emissionen dem ökologischen Nutzen des SCR Systems gegenübergestellt werden. Da das SCR Systeme auch Auswirkungen auf den Kraftstoffverbrauch von Fahrzeugen hat, soll außerdem der Lebensweg der Dieselherstellung in die Ökobilanz kurz dargestellt werden. Jedoch bleibt der Hauptfokus der Arbeit auf der Ökobilanz der Harnstoffherstellung. Abschließend soll abgeschätzt werden, welche Auswirkungen die Einführung des SCR Systems auf die Emissionen des Straßenverkehrs in Österreich haben werden.

Dadurch soll sowohl der Automobilindustrie als auch den gesetzgebenden Institutionen, als Zielgruppe der Ökobilanz, eine gesamtheitliche Betrachtung über eine auf dem Markt noch weitgehend neue Technologie, der SCR Technologie und der dafür notwendigen Herstellung von Harnstoff ermöglicht werden.

Als Systemgrenze wird der österreichische Markt im Jahr 2020 festgelegt. Für die Untersuchung wird von der Produktion von Harnstoff mittels des Snam-Progetti

stripping process ausgegangen, da diese Art der Produktion die einzige ist, die momentan in Österreich eingesetzt wird. Darüber hinaus verbraucht dieses Herstellungsverfahren signifikant weniger Energie als andere Verfahren (s. Kap. 3.4.3.). Als Ort der Distribution wird folglich Linz gewählt, da dort das Produktionswerk der Linzer Agro Trade GmbH, St.-Peter-Strasse 25, 4021 Linz steht. Der Rohstofftransport sowie der Vertrieb des Produktes AdBlue findet daher auch nach und von Linz statt. Die Produktion von Dieselkraftstoff findet in der Raffinerie Schwechat statt, die Distribution an die Tankstellen erfolgt von dort aus. Für die Rohstoffe Erdöl und Erdgas wird der österreichische Mix des Jahres 2010 herangezogen.

Da für die Herstellung von Harnstoff auch elektrische Energie notwendig ist, wird für den Einsatz von dieser der aktuelle österreichische Energiemix 2011 [48] herangezogen.

Tab. 5.1. gibt einen Überblick über den in der Ökobilanz verwendeten Strommix.

Tab. 5.1.: Strommix Österreich 2011 [48]

Strommix Österreich 2011 (GWh)		
Wasserkraft	37.701	51,0%
Wind und Photovoltaik	1.985	2,7%
Steinkohle und Derivate	7.320	9,9%
Erdöl	1.009	1,4%
Erdgas	12.362	16,7%
Biogene Kraftstoffe	4.555	6,2%
Sonstige	756	1,0%
Netto Importe	8.195	11,1%

Um die Reduktion im SCR Katalysator quantifizieren zu können werden für PKW und LNF zwei bereits in Europa mit SCR Systemen ausgestattete Fahrzeuge sowie die gleichwertigen Fahrzeuge ohne SCR System herangezogen und miteinander verglichen. Für SNF wird ein Modellfahrzeug aus [49] gewählt. Bei diesem Fahrzeug handelt es sich um einen LKW ohne SCR System. Durch die recherchierten

Auswirkungen des SCR Systems auf die untersuchten Emissionen wird anschließend errechnet, wie hoch die Emissionen des Fahrzeuges wären, wenn es mit einem SCR System ausgestattet wäre. Das gewählte Modellfahrzeug wird sowohl für Busse, als auch für LKW herangezogen, da sich diese beiden Fahrzeugklassen die gleichen Antriebsstränge, die auf einem Motorenprüfstand typisiert werden, teilen.

Der Lebensweg des in dieser Studie vorrangig betrachteten Produktsystems AdBlue wird in **Abb. 5.1** dargestellt.

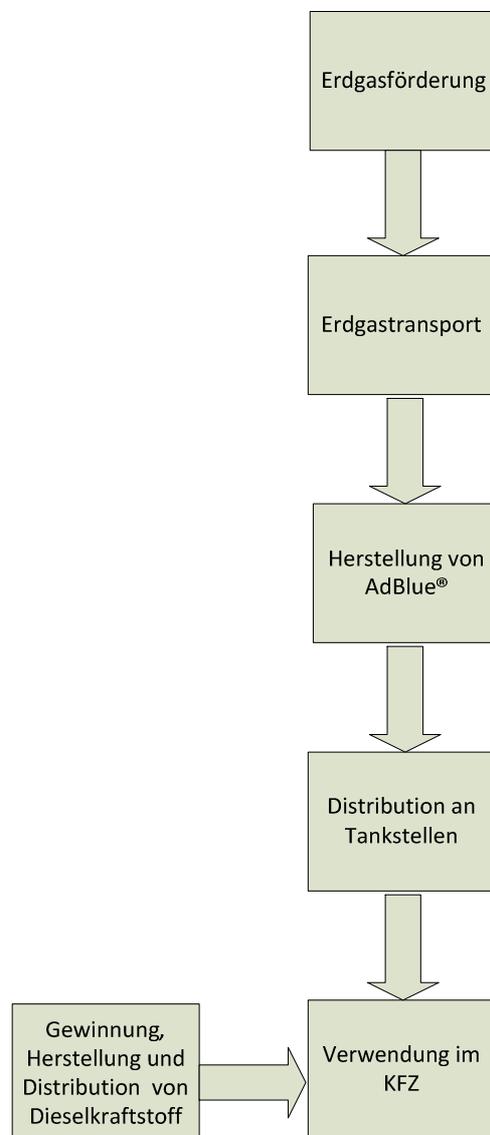


Abb. 5.1.: Lebensweg von AdBlue sowie Einbindung des Lebensweges von Dieseldieselkraftstoff

Untersucht werden nacheinander alle dargestellten Stufen des Lebensweges von Harnstoff, folglich also

- die Erdgasförderung
- der Transport des Erdgases zur chemischen Industrie
- die Herstellung von AdBlue[®] durch Industriebetriebe
- die Distribution an Tankstellen
- die Verwendung im PKW

Zusätzlich dazu wird der Lebensweg des Dieselkraftstoffes dargestellt und fließt bei der Verwendung im Fahrzeug mit ein.

Als funktionelle Einheit des Produktsystems AdBlue[®] wird Kilometer (km) verwendet. Daraus folgt, dass die ökologischen Auswirkungen auf die von den KFZ zurückgelegte Strecke, in Kilometer, bezogen werden.

Laut der geltenden Norm [47] werden, falls bei Prozessen neben dem Hauptprodukt gewisse Nebenprodukte entstehen, die Massen- bzw. Stoffströme nach folgenden Kriterien auf die einzelnen Produkte aufgeteilt:

- physikalische Eigenschaften (z.B. Masse)
- ökonomische Werte (z.B. Marktwert)
- die Anzahl der späteren Nutzungen des wiederverwerteten Materials

Neben den für diese Studie hauptsächlich relevanten Stickoxiden (NO_x) sowie Ammoniak (NH₃) wird die Auswirkung des Produktsystems AdBlue auf die Emissionen von Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄) und Partikel (PM) betrachtet.

Als Datenbasis werden für die Harnstoff Produktion verschiedene Quellen über BAT (Best available technique) bzw. state of the art herangezogen. Bei der Verwendung von anderen Quellen wird auf die Nachvollziehbarkeit und Plausibilität der Daten geachtet. An entsprechender Stelle wird auf die Arbeiten verwiesen.

Um gröbere Abschätzungen zu vermeiden, wird darauf verzichtet, die Herstellung von Anlagen, Gebäuden und Pipelines in die Ökobilanz mit einzubeziehen. Die Produktion von Fahrzeugen wird ebenfalls nicht berücksichtigt, weil der Produktionsprozess eines Fahrzeuges nur etwa 10% der im Lebenszyklus anfallenden Emissionen ausmacht [46], und der Fokus der Arbeit weiterhin auf der Produktion des Reduktionsmittels Harnstoff bleibt.

Für das Zieljahr 2020 werden die Marktdurchdringungsszenarien

- Keine Einführung des SCR Systems
- Erwartete Marktdurchdringung des SCR Systems
- Vollständige Marktdurchdringung des SCR Systems

5.3 Sachbilanz für Harnstoff

In der folgenden Sachbilanz wird das Reduktionsmittels AdBlue[®] während aller Phasen seines Lebensweges nicht nur auf die Emissionen von NO_x und NH₃, sondern auch auf die Treibhausgase CO₂ und CH₄, sowie auf PM untersucht.

5.3.1 Erdgasbereitstellung

Die Erdgasbereitstellung umfasst sowohl die Förderung von Erdgas als auch die Aufbereitung des Rohstoffes. Im Jahr 2010 betrug die Erdgasaufbringung in Österreich gesamt 11,624 Mrd. Normkubikmeter (m³n). Neben der Inlandsförderung von 1,704 Mrd. m³n wurden 9,92 Mrd. m³n aus Norwegen, den GUS Staaten¹ und auch sonstigen Ländern importiert. Außerdem wurden 2,787 Mrd. m³n exportiert, sodass sich die in Österreich verbliebene Erdgasmenge auf 8,837 Mrd. m³n beläuft. Der österreichische Erdgasmix kann aus **Tab. 5.3.** entnommen werden. [50]

¹ GUS – Gemeinschaft unabhängiger Staaten: Armenien, Aserbaidshan, Weißrussland, Kasachstan, Kirgisistan, Moldawien, Russland, Tadschikistan, Turkmenistan, Ukraine, Usbekistan
Juni 2013

Tab. 5.3.: Österreichischer Erdgasmix 2010 [50]

Lieferregion	Anteil %
Österreich	14,66%
Norwegen	11,57%
Russland	47,63%
Andere	26,14%

Da die Importe aus "Anderen Ländern" nicht näher zugeordnet werden können, wird dieser Anteil für die Berechnung auf die gesicherten Herkunftsgebiete Österreich, Norwegen und Russland gewichtet aufgeteilt. Es ergibt sich daher für das Rechenmodell ein österreichischer Erdgasmix nach **Tab. 5.4.**

Tab. 5.4.: In der Berechnung verwendeter Erdgasmix

Lieferregion	Anteil %
Österreich	19,85%
Norwegen	15,67%
GUS	64,48%

Im Folgenden wird die Erdgasbereitstellung der einzelnen Lieferregionen getrennt voneinander betrachtet. Die Daten dafür werden aus dem globalen Emissions-Modell Integrierter Systeme [49] übernommen.

Bei der Erdgasbereitstellung fällt von den untersuchten Emissionen fast ausschließlich CH₄ direkt an. Andere untersuchten Emissionen, v.a. CO₂, NO_x und PM entstehen hauptsächlich durch vorgelagerte Prozesse, die zur Bereitstellung der zur Förderung benötigten Energie benötigt werden. [51] Diese Emissionen werden vom verwendeten Rechenmodell direkt mitgerechnet. Da es keine genauen Daten zu den direkten Emissionen von CO₂, NO_x und PM für die Erdgasbereitstellung

existieren, werden diese nicht berücksichtigt. Der zu erwartende Fehler in der Berechnung ist klein.

5.3.1.1 Erdgasbereitstellung Österreich

Die Erdgasförderung in Österreich wird On-Shore – d.h. auf Festland - und hauptsächlich unter dem Einsatz von elektrischer Energie durchgeführt. Zirka 80% der Gesamtmenge werden im Wiener Becken gefördert, die übrigen 20% in der Molassezone [50].

Abb. 5.2. zeigt die auftretenden In- und Outputs. Während als Inputs neben der elektrischen Energie noch die Prozesswärme steht, fallen als Output Erdgas sowie entwichenes Methan an. Die anfallenden CO₂ Emissionen um Prozesswärme zu generieren werden direkt im Rechenmodell mittels einer Kohlenstoffbilanz errechnet.

Tab. 5.5. liefert die zur Erdgasbereitstellung gehörigen Zahlenwerte.

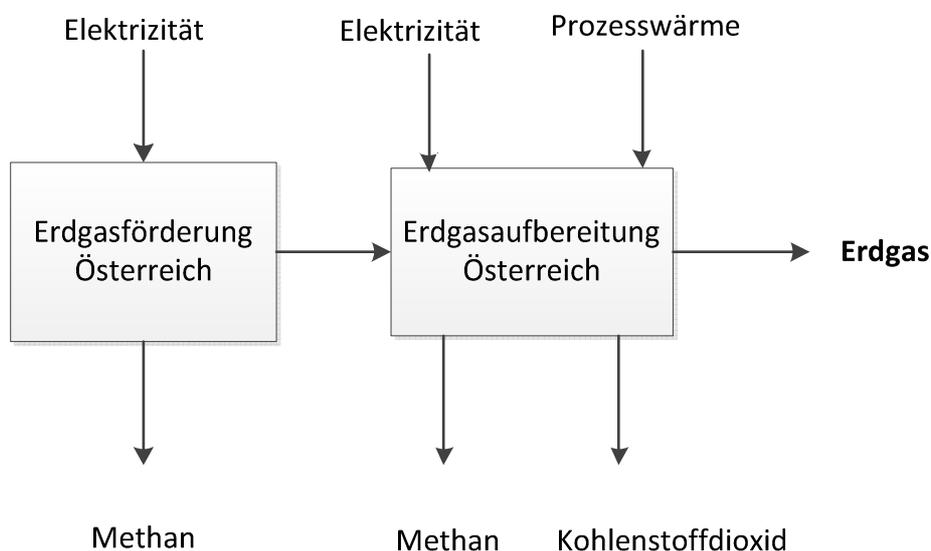


Abb. 5.2.: Förderung und Aufbereitung von Erdgas in Österreich - Prozessschaubild [49], [eigene Darstellung]

Tab. 5.5.: Erdgasbereitstellung Österreich - Datensatz [49]

Erdgasbereitstellung in Österreich	
Input	Bezogen auf 1 MJ Erdgas-Output
Elektrizität	$2,15 \cdot 10^{-3}$ MJ/MJ
Prozesswärme	$1 \cdot 10^{-3}$ MJ/MJ

Output	Bezogen auf 1 MJ Erdgas Output
CH ₄	$25,2 \cdot 10^{-6}$ kg/MJ
NH ₃	0 kg/MJ
CO ₂	-
NO _x	-
PM	-

5.3.1.2 Erdgasbereitstellung in Norwegen

Die Erdgasförderung findet in Norwegen Off Shore – d.h. die Lagerstätten befinden sich unter Gewässern - statt. Die dabei eingesetzte mechanische Energie wird aus Gasturbinen gewonnen. Bei der Aufbereitung des Erdgases werden außerdem wiederum elektrische Energie und Prozesswärme benötigt.

Als Output entsteht einerseits das norwegische Erdgas sowie das Treibhausgas CH₄. Die beim Betreiben der Gasturbinen anfallenden CO₂ Emissionen gehen wiederum direkt in das Rechenmodell ein. **Abb. 5.3.** gibt einen Überblick über das Prozessschaubild, **Tab. 5.6.** über die dazugehörigen Zahlenwerte. [49]

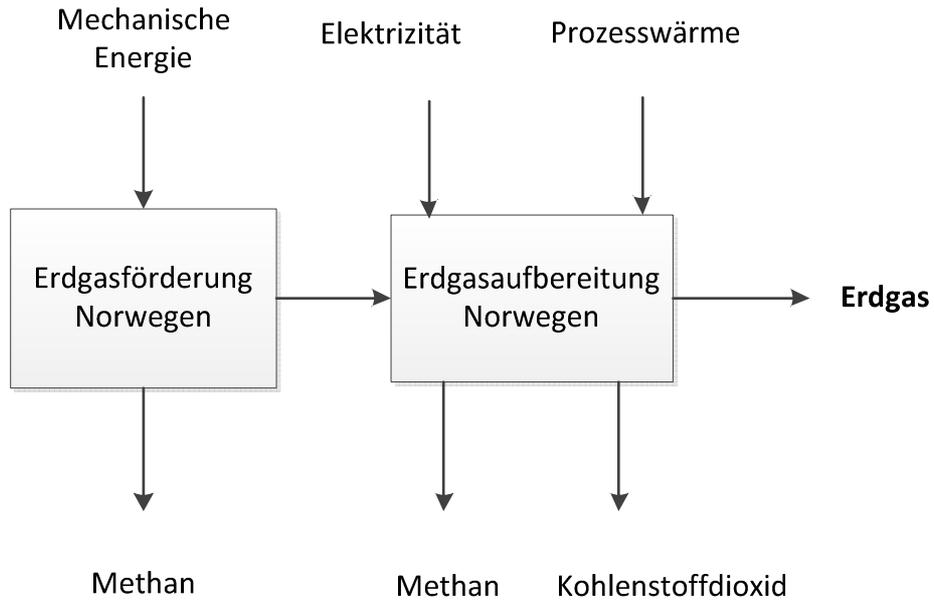


Abb. 5.3.: Förderung und Aufbereitung von Erdgas in Norwegen - Prozessschaubild [49], [eigene Darstellung]

Tab. 5.6.: Erdgasbereitstellung Norwegen - Datensatz [49]

Erdgasbereitstellung in Norwegen	
Input	Bezogen auf 1 MJ Erdgas-Output
Elektrizität	$1 \cdot 10^{-3}$ MJ/MJ
Mechanische Energie	$1,15 \cdot 10^{-3}$ MJ/MJ
Prozesswärme	$1 \cdot 10^{-3}$ MJ/MJ

Output	Bezogen auf 1 MJ Erdgas Output
CH ₄	$47,5 \cdot 10^{-6}$ kg/MJ
NH ₃	0 kg/MJ
CO ₂	-
NO _x	-
PM	-

5.3.1.3 Erdgasbereitstellung in Russland

Wie aus **Abb. 5.4.** ersichtlich, wird die Erdgasförderung in Russland mithilfe von elektrischer Energie bewerkstelligt. Zur Aufbereitung ist zusätzlich noch Prozesswärme, gewonnen aus Gasturbinen, notwendig.

Outputseitig stehen wiederum das Erdgas sowie das treibhausrelevante Gas CH_4 . Die in der Gasturbine entstehenden CO_2 Emissionen werden wiederum direkt im Rechenmodell berücksichtigt. In **Tab. 5.7.** werden die zugehörigen Zahlenwerte aufgeführt.

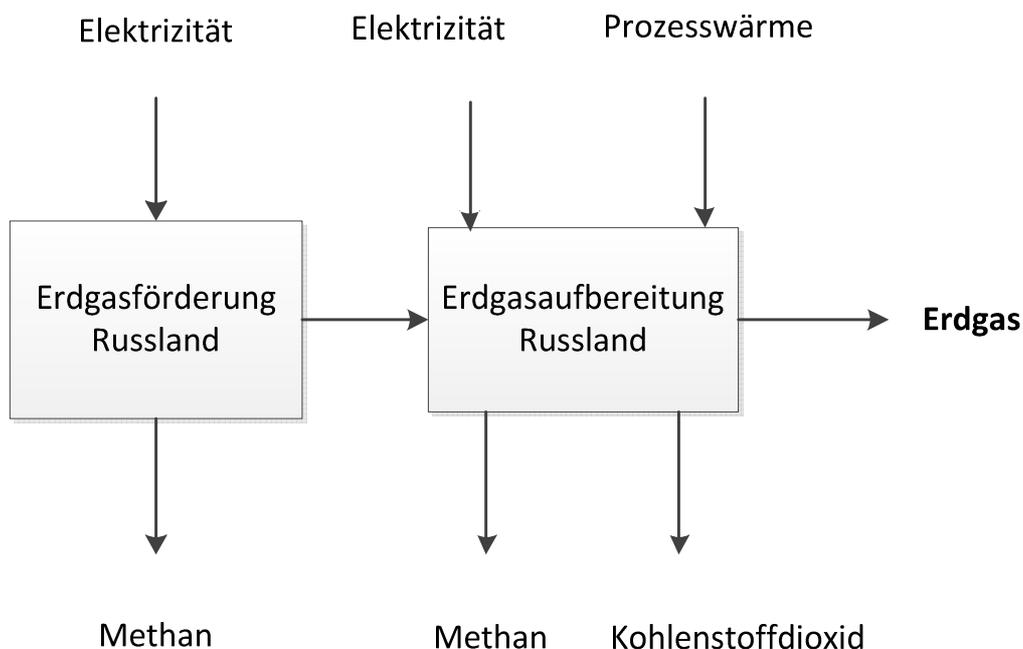


Abb. 5.4.: Förderung und Aufbereitung von Erdgas in Russland - Prozessschaubild [49], [eigene Darstellung]

Tab. 5.7.: Erdgasbereitstellung Russland - Datensatz [49]

Erdgasbereitstellung in Russland	
Input	Bezogen auf 1 MJ Erdgas-Output
Elektrizität	$3,2 * 10^{-3}$ MJ/MJ
Prozesswärme	$6,4 * 10^{-3}$ MJ/MJ

Output	Bezogen auf 1 MJ Erdgas Output
CH ₄	$116,7 * 10^{-6}$ kg/MJ
NH ₃	0 kg/MJ
CO ₂	-
NO _x	-
PM	-

5.3.2 Erdgastransport

Das Erdgas aus den unterschiedlichen Lieferregionen wird über ein Pipelinenetz nach Österreich transportiert und in der Raffinerie Schwechat gesammelt. Anschließend wird der österreichische Erdgasmix über die West-Austria-Gasleitung (WAG) nach Linz transportiert. [50] Pipelineverluste in Österreich bleiben aufgrund fehlender Daten unberücksichtigt.

Gas aus Russland kommt aus Westsibirien und wird über eine zirka 4.000 km lange Leitung nach Österreich gebracht. [50] Die Pipelineverluste wurden dabei nach [49] mit 0,018 %/100 km angenommen.

Das in der Nordsee auf Förderplattformen gewonnene Erdgas wird zuerst über Unterwasserpipelines an die deutsche Nordseeküste gebracht und anschließend

über das europäische Fernleitungsnetz nach Österreich geführt [52]. Die Beförderungsdistanz wird aus [49] entnommen. Die Zahlenwerte sind in **Tab. 5.8.** zusammengefasst. Pipelineverluste von Norwegen bleiben aufgrund fehlender Daten unberücksichtigt.

Tab. 5.8.: Erdgastransport

Lieferregion	Entfernung - Pipeline
Russland	4000 km [49]
Norwegen	1700 km [49]
Österreichischer Erdgasmix	245 km [50]

5.3.3 Herstellung von AdBlue

Der technische Ablauf der Herstellung von AdBlue wird in Kapitel 3.4. beschrieben. Nachfolgend werden für die einzelnen Produktionsschritte die Input und Output Faktoren dargestellt.

5.3.3.1 Herstellung von Ammoniak

Die Ammoniakherstellung – beschrieben in Kap. 3.4.1. - und die anfallenden Emissionen werden in **Abb. 5.5** dargestellt. Die Emissionswerte dieses Prozesses sind reale Werte der Linzer Firma Agro Trade GmbH des Jahres 2010 [34] und werden anschließend in **Tab. 5.9.** dargestellt. Bei den angegebenen Werten für Input und Output handelt es sich um gemittelte Werte der beiden Herstellungsanlagen, die am Standort der Linzer Agro Trade GmbH zur Ammoniakproduktion eingesetzt werden, um ein möglichst realistisches Bild des Herstellungsprozesses darstellen zu können. Die angegebenen Werte werden so in das Modell übernommen.

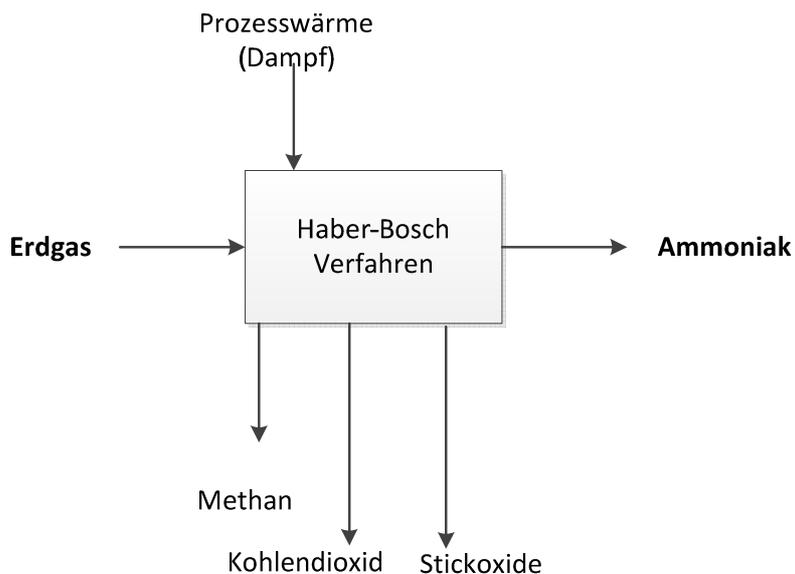


Abb.: 5.5. Herstellungsverfahren von Ammoniak [36], [eigene Darstellung]

Tab. 5.9. Herstellung von Ammoniak [34]

Herstellung von Ammoniak	
Input	Bezogen auf 1 t Ammoniak
Erdgas	0,6565 t/t
Prozesswärme	3049,5 MJ/t

Output	Bezogen auf 1 t Ammoniak
CH ₄	0,121 kg/t
CO ₂	946,927 kg/t
NO _x	0,399 kg/t
NH ₃	4,02 * 10 ⁻⁵ kg/t
PM	0

Anzumerken ist, dass neben den beschriebenen CO₂ Emissionen ein weiterer Teil des CO₂ komprimiert wird und in nachfolgenden Prozessen eingesetzt wird. [34], [35]

5.3.3.2 Komprimieren von Kohlendioxid

Das bei der Herstellung von Ammoniak gewonnene Kohlendioxid wird mit elektrischer Energie zur späteren Weiterverwendung, z.B. für die Produktion von Harnstoff, verdichtet. Die Verdichtung von Kohlendioxid, das für die Herstellung von einer Tonne Harnstoff benötigt wird, fallen dabei 93,9 kWh elektrische Energie an. [38]

5.3.3.3 Herstellung von Harnstoff

Wie bereits in Kapitel 3.4.3 beschrieben gibt es verschiedene Verfahren zur Herstellung von Harnstoff.

Für diese Ökobilanz wird der NH_3 stripping process (s. Kap. 3.4.3.2) ausgewählt, da es sich einerseits, im Gegensatz zum beschriebenen Lösungs-Kreislaufverfahren, um keine veraltete Technologie handelt und andererseits, im Gegensatz zum CO_2 Stripping Verfahren, auch in Österreich angewendet wird. Darüber hinaus braucht das gewählte Verfahren signifikant weniger Energie als die beiden anderen genannten Produktionsprozesse. [38]

Abb. 5.6. stellt den Prozess zur Herstellung von Harnstoff mit allen relevanten Inputs und Outputs dar.

Als Input- und Outputdaten dienen die Emissionsaufzeichnungen der Agro Trade GmbH aus dem Jahr 2010, sowie der vom Umweltbundesamt beschriebene Stand der Technik [34], [35] und [38]. Der notwendige CO_2 Input stammt aus dem Produktionsprozess von Ammoniak. Die Daten können aus **Tab. 5.10.** entnommen werden.

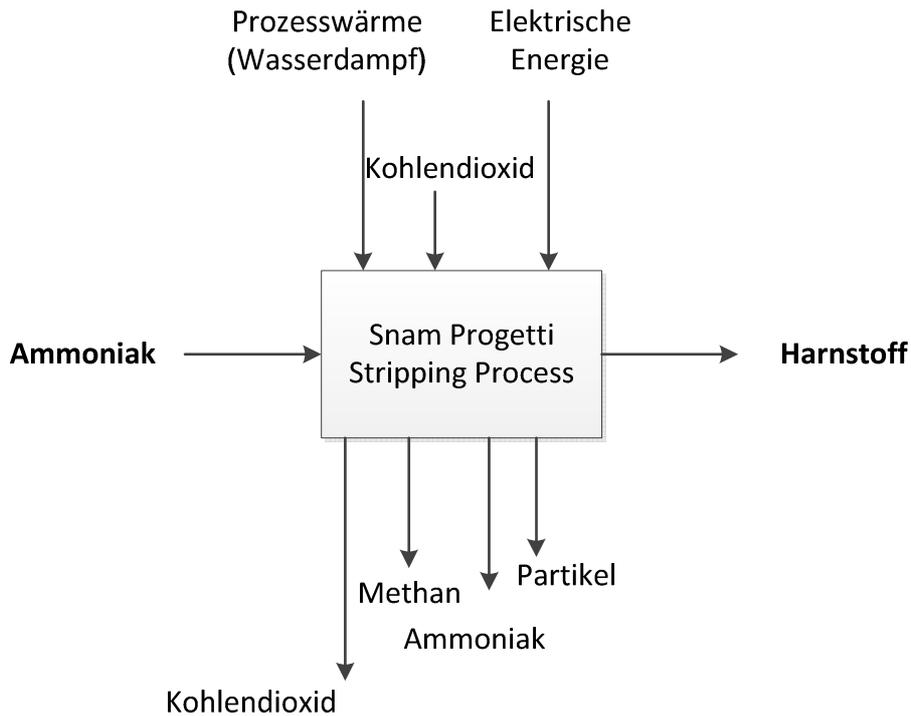


Abb. 5.6.: Herstellungsprozess von Harnstoff [35], [eigene Darstellung]

Tab. 5.10.: Herstellung von Harnstoff – Zahlenwerte

Herstellung von Harnstoff	
Input	Bezogen auf 1 t Harnstoff
Ammoniak	567 kg/t [35]
Prozesswärme	1610 MJ/t [38]
CO ₂	735 kg/t [35]
elektrische Energie	21,1 kWh/t [35]

Output	Bezogen auf 1 t Harnstoff
Partikel	0,510 kg/t [38]
CH ₄	0,371 kg/t [34]
CO ₂	1.067 kg/t [34]
NH ₃	0,730 kg/t [38]
NO _x	0 kg/t [34]

5.3.4 Distribution an Tankstellen und Bereitstellung

Für die Distribution der Harnstoff-Wasser-Lösung vom Standort Linz an die österreichischen Tankstellen wird eine durchschnittliche Transportentfernung, dargestellt in **Tab. 5.11**, von 100 km angenommen. Von Linz aus liegen knapp 90% der österreichischen Bevölkerung innerhalb einer Entfernung von 200 km. Als durchschnittliche Transportentfernung wird daher die Hälfte, also 100 km angenommen. Für den Rückweg des Transporters fallen wiederum 100 km an, wodurch der gesamte zurückgelegte Weg 200 km beträgt. Die Auslieferung erfolgt mittels eines durchschnittlichen LKW ohne Anhänger.

Tabelle 5.11: Transport AdBlue [49]

Transportart	Durchschnittliche Entfernung
LKW solo	200 km

5.3.5 Einsatz im Fahrzeug

Siehe Kapitel 5.4.5

5.4 Sachbilanz fossiler Dieselkraftstoff

Da der Einsatz des SCR Systems auch einen Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch der Fahrzeuge hat, wird nachfolgend der Lebensweg von fossilem Diesel, von der Gewinnung des Erdöls bis zur Nutzung im Fahrzeug dargestellt. Da der Hauptfokus dieser Arbeit allerdings auf dem Einsatz von Harnstoff im SCR System liegt, wird in der Ökobilanz einfachheitshalber davon ausgegangen, dass sämtliches Rohöl fossilen Ursprunges ist und in der Raffinerie Schwechat zu Dieselkraftstoff

verarbeitet wird. **Abb. 5.11** gibt einen Überblick über den Lebensweg von fossilem Dieselkraftstoff.

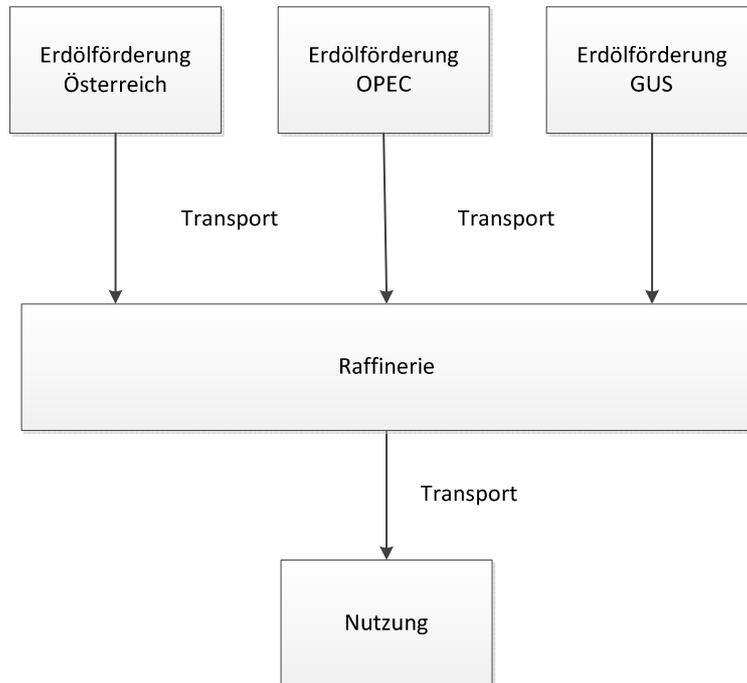


Abb. 5.11: Lebensweg fossiler Dieselkraftstoff [50], [eigene Darstellung]

5.4.1 Rohstoff Bereitstellung

In Österreich verarbeitetes Rohöl wurde 2010 zum Teil (ca. 0,88 Mio t) direkt in Österreich gefördert und zum größten Teil (ca. 7,65 Mio t) importiert. Hauptlieferanten waren dabei Kasachstan, Libyen, Nigeria und Iran. **Tab 5.15** gibt einen Überblick zu dem in Österreich verarbeiteten Rohöl und den zugehörigen wesentlichen Lieferregionen. [50] Die Lieferregion „Sonstige“ wird in der weiteren Berechnung gewichtet auf die Hauptlieferregionen aufgeteilt. Um den Umfang der Arbeit nicht zu sprengen, wird in der weiteren Ökobilanz die Förderung in den GUS Staaten, den OPEC Ländern und in Österreich genauer beschrieben und als Rechengrundlage verwendet. Eine Studie [53] hat ergeben, dass über den gesamten Lebenszyklus betrachtet, der Großteil (80 % - 90 %) der NO_x , CO_2 , und PM-Emissionen auf der letzten Stufe, d.h. bei der Verbrennung, in diesem Fall bei der Verbrennung im KFZ, entstehen. Da es keine näheren Daten zu NO_x und PM

Emissionen gibt und der Fehler in der Gesamtbetrachtung sehr gering bleibt, werden diese bei der Rohstoffbereitstellung nicht berücksichtigt.

Tab. 5.15: Ursprung des verarbeiteten Rohöls [50]

Ursprung des verarbeiteten Rohöls	
Lieferregion	% Anteil
Österreich	11,5 %
GUS Länder	35,2 %
OPEC Länder	43,1 %
Sonstige	10,2 %

5.4.1.1 Erdölförderung in Österreich

In Österreich erfolgt die Förderung von Rohöl über den Einsatz von mechanischer Energie (Dieselmotor), elektrischer Energie für Nebenprozesse sowie Prozesswärme (Ölkessel). Der Aufwand für die Exploration des Erdöls ist dabei miteinbezogen.

Abb. 5.12 gibt einen Überblick über die relevanten In- und Outputs, **Tab. 5.16** liefert die dazugehörigen Zahlenwerte. Neben dem Hauptoutput Rohöl fallen CH₄ und CO₂ Emissionen an. Diese treten durch das Abfackeln von freigesetztem Erdgas auf. Dabei handelt es sich um einen Nebenprodukt der Erdölförderung. [49]

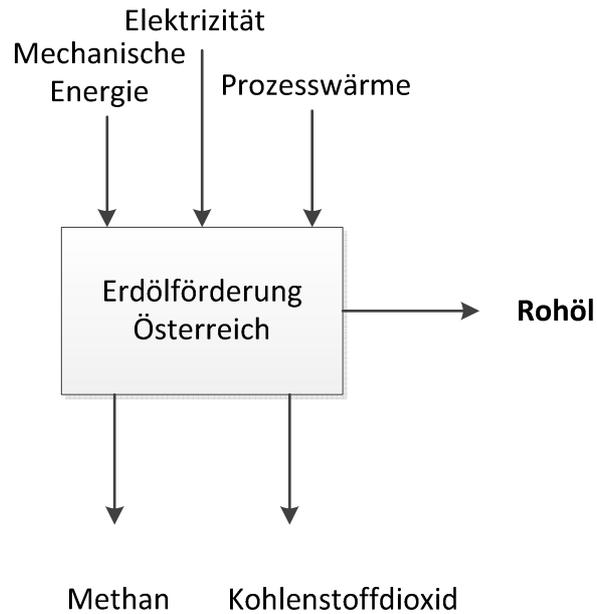


Abb. 5.12: Erdölförderung in Österreich – Prozessschaubild [49], [eigene Darstellung]

Tab. 5.16: Erdölförderung in Österreich – Zahlenwerte [49]

Erdölförderung Österreich	
Input	Bezogen auf 1 MJ Rohöl
Mechanische Energie	0,0008 MJ/MJ
Elektrizität	0,004 MJ/MJ
Prozesswärme	0,005 MJ/MJ
Output	Bezogen auf 1 MJ Rohöl
CH ₄	0,0000029 kg/MJ
CO ₂	0,000451 kg/MJ
NH ₃	0 kg/MJ
NO _x	-
Partikel	-

5.4.1.2 Erdölförderung GUS Länder

In den GUS Ländern wird für die Förderung von Rohöl mechanische Energie, elektrische Energie sowie Prozesswärme eingesetzt. Als Output entstehen neben Rohöl wiederum CH₄ und CO₂. **Abb. 5.13** zeigt das Prozessschaubild der Erdölförderung in den GUS Ländern, **Tab. 5.17** zeigt die zugehörigen Zahlenwerte.

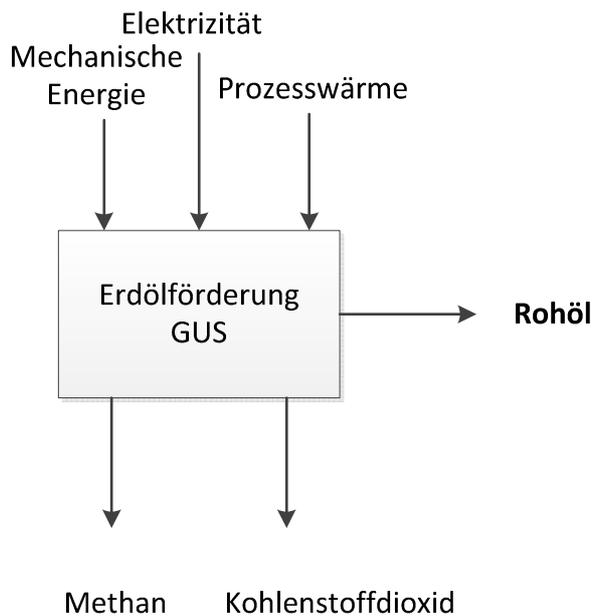


Abb. 5.13: Erdölförderung GUS Länder – Prozessschaubild [49], [eigene Darstellung]

Tab. 5.17: Erdölförderung in GUS Länder – Zahlenwerte [49]

Erdölförderung GUS	
Input	Bezogen auf 1 MJ Rohöl
Mechanische Energie	0,0025 MJ/MJ
Elektrizität	0,0055 MJ/MJ
Prozesswärme	0,011 MJ/MJ
Output	Bezogen auf 1 MJ Rohöl
CH ₄	0,0000210 kg/MJ
CO ₂	0,002455 kg/MJ
NH ₃	0 kg/MJ
NO _x	-
Partikel	-

5.4.1.3 Erdölförderung OPEC

Zur Rohölförderung wird in der OPEC keine elektrische Energie verwendet, Inputs sind daher lediglich mechanische Energie, bereitgestellt durch einen Dieselmotor, sowie Prozesswärme, gewonnen aus einem Heizkessel. Als Output fallen neben Rohöl wiederum CH₄ und CO₂ an. **Abb. 5.14** zeigt das Prozessschaubild der Erdölförderung in den OPEC Ländern, **Tab. 5.18** liefert die zugehörigen Zahlenwerte.

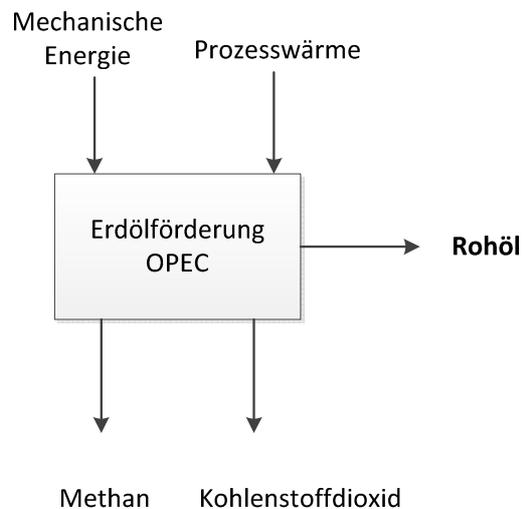


Abb. 5.14: Erdölförderung OPEC – Prozessschaubild [49], [eigene Darstellung]

Tab. 5.18: Erdölförderung OPEC – Zahlenwerte [49]

Erdölförderung OPEC	
Input	Bezogen auf 1 MJ Rohöl
Mechanische Energie	0,004 MJ/MJ
Prozesswärme	0,005 MJ/MJ
Output	Bezogen auf 1 MJ Rohöl
CH ₄	0,0000079 kg/MJ
CO ₂	0,001052 kg/MJ
NH ₃	0 kg/MJ
NO _x	-
Partikel	-

5.4.2 Rohstoff Transport

Die Transportwege zur Raffinerie in Schwechat werden in **Tab. 5.19** dargestellt. Während das Rohöl aus den GUS Staaten direkt per Pipeline nach Schwechat transportiert wird, muss das Rohöl von der OPEC zuerst via Tanker in den Hafen Triest transportiert werden und gelangt anschließend per Adria-Wien Pipeline nach Schwechat.

Tab. 5.19: Rohöltransport – Entfernungen [49], [50]

Rohöltransport in die Raffinerie Schwechat		
Lieferregion	Entfernung	Transportmittel
Österreich	150 km	Pipeline
GUS	5000 km	Pipeline
OPEC	8800 km	Tanker
	420 km	Pipeline

5.4.3 Diesel Herstellung

Abb. 5.15 zeigt das Prozessschaubild zur Herstellung von Dieselkraftstoff in der Raffinerie. Der eigentliche Herstellungsprozess steht nicht im Fokus der Arbeit und wird daher nicht genauer beschrieben.

Zusätzlich zu Rohöl werden dabei Prozesswärme, Elektrizität und diverse Hilfsstoffe als Input benötigt. An Output entsteht neben Diesel die direkte Emission von CH₄ [49]. Für NO_x Emissionen gibt es verschiedene Daten aus europäischen Raffinerien, die zwischen 0,12 kg/t und 1 kg/t liegen [53]. Für dieses Modell wird der Mittelwert daraus herangezogen. Die Partikelemissionen liegen laut dieser Studie [53] im Mittel bei 2,4 g/t Output. **Tab. 5.20** zeigt die zugehörigen Zahlenwerte. [49]

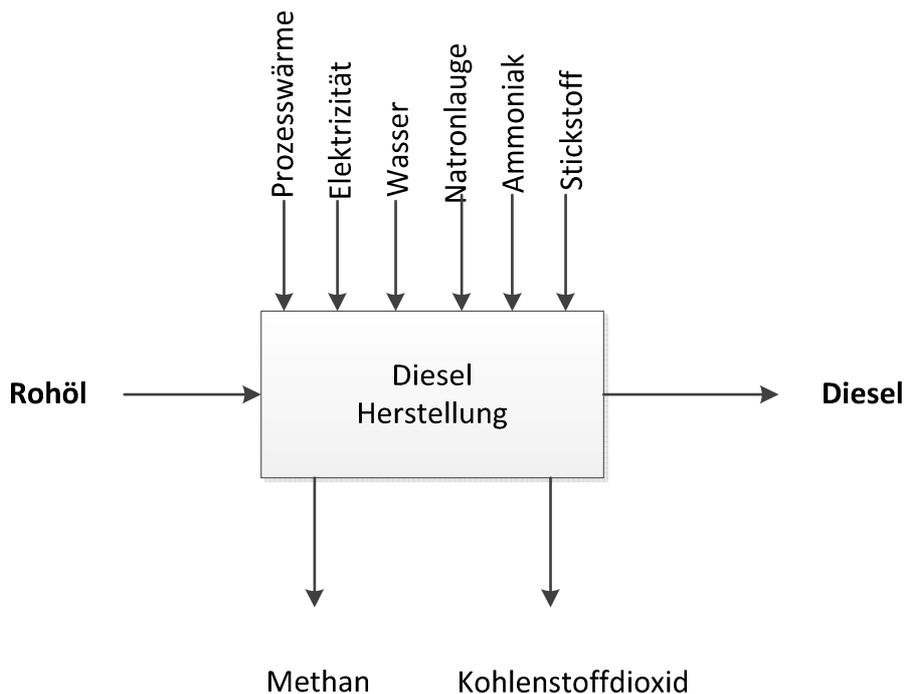


Abb. 5.15: Diesel Herstellung – Prozessschaubild [49], [eigene Darstellung]

Tab. 5.20: Diesel Herstellung – Zahlenwerte [49]

Diesel Herstellung	
Input	Bezogen auf 1 MJ Diesel
Rohöl	1,005 MJ/MJ
Prozesswärme	0,0772 MJ/MJ
Elektrizität	0,0003 MJ/MJ
Wasser	0,041 kg/MJ
Natronlauge	0,00000109 kg/MJ
Ammoniak	0,00000005 kg/MJ
Stickstoff	0,00000197 kg/MJ
Output	Bezogen auf 1 MJ Diesel
CH ₄	0,24 * 10 ⁻⁶ kg/MJ
CO ₂	0 kg/MJ
NH ₃	0 kg/MJ
NO _x	0,00001233 kg/MJ
Partikel	5,3 * 10 ⁻⁸ kg/MJ

5.4.4 Kraftstoff Transport und Bereitstellung

Ca. 90% der österreichischen Bevölkerung können von Schwechat aus innerhalb von 350 km erreicht werden. Als durchschnittlicher Transportweg für Diesel per LKW von der Raffinerie Schwechat in das österreichische Tankstellennetz werden deshalb 175 km angenommen, die Hälfte der 350 km. Inklusive dem Weg zurück zur Raffinerie ergibt sich damit wieder eine zurückgelegte Wegstrecke von 350 km. Die eingesetzte Energie für die Bereitstellung des Kraftstoffes kann **Tab 5.23** entnommen werden.

Tab. 5.23: Kraftstoff Bereitstellung an der Tankstelle

Bereitstellung an der Tankstelle	
Input	Bezogen auf 1 MJ Erdgas-Output
Elektrizität	$1 \cdot 10^{-4}$ MJ/MJ

5.4.5 Einsatz im Fahrzeug

Nachfolgend werden die Auswirkungen des SCR Systems auf die Emissionen und den Kraftstoffverbrauch in den Fahrzeugen beschrieben.

5.4.5.1 Personenkraftwagen und leichte Nutzfahrzeuge

Für PKW und LNF werden zwei Fahrzeuge mit SCR System gewählt, die bereits in Österreich zugelassen sind. Diese werden mit den baugleichen Euro V Fahrzeugen verglichen um die Auswirkung des SCR Systems im Fahrzeugbetrieb quantifizieren zu können. Gewählt wurde dabei ein Fahrzeug, das sich am unteren Ende des für das SCR System relevanten Leistungsspektrums von 90 kW befindet, sowie ein leistungsmäßig wesentlich stärkeres Fahrzeug. Beide Fahrzeuge gehen in der Juni 2013

Ökobilanz mit je 50% der Gesamtleistung ein, um eine möglichst gleichmäßige Verteilung über das gesamte Leistungsspektrum zu bekommen.

Da es zu den Emissionen von NH_3 lediglich veröffentlichte Untersuchungen gibt, die als Zieleinheit ppm haben, kann nur eine Abschätzung über die NH_3 Emissionen in g/km getroffen werden. Zwar gibt es Untersuchungen an der Universität Stuttgart und an der Technischen Universität Graz zu den Emissionen von NH_3 mit der Zieleinheit g/km, jedoch können die Ergebnisse aus Geheimhaltungsgründen nicht für diese Arbeit zur Verfügung gestellt werden [54], [55].

Es kann gesagt werden, dass der durch das SCR System bedingte Schlupf an NH_3 durch Lernfunktionen des SCR Kats äußerst gering gehalten werden kann. D.h. sollte der NO_x Sensor einen NH_3 Schlupf – dies geschieht über die Querfunktion des Sensors - erkennen, erlernt das System für die Zukunft eine verbesserte Dosierung. [42] Für NH_3 Emissionen gilt auf alle Fälle die Schlupfgrenze von 10 ppm, da es sich dabei um einen On- Board Diagnostics (OBD) Grenzwert handelt. Darüber hinaus wird NH_3 ab dieser Grenze für den Menschen geruchsauffällig. [56] Auf der anderen Seite wird in der Literatur berichtet, dass während eines Testzyklus im NEFZ überhaupt keine Emissionen von NH_3 anfallen [57]. Deswegen wird in weiterer Folge für die Abschätzung der NH_3 Emissionen bei PKW der Mittelwert von 5 ppm herangezogen.

Um die NH_3 Emissionen abschätzen zu können, wird aus dem durchschnittlichen Kraftstoffverbrauch der Fahrzeuge mit SCR System in grober Näherung die Abgasmasse berechnet. Über die Dichte und die Volumenkonzentration werden daraufhin die NH_3 Emissionen abgeschätzt. Wird bei Variablen der Wert in einer Bandbreite angegeben, wird für die folgende Berechnung immer der Mittelwert verwendet.

Die Abgasmasse berechnet sich dabei nach **Gleichung (5.1)**, sie setzt sich aus der Masse des Kraftstoffes und der Masse der Luft zusammen:

$$m \left[\frac{\text{kg}}{100\text{km}} \right] = m_k \left[\frac{\text{kg}}{100\text{km}} \right] + m_l \left[\frac{\text{kg}}{100\text{km}} \right] \quad \text{Gleichung (5.1)}$$

Der Masse an Kraftstoff in Kilogramm ergibt sich dabei aus dem Kraftstoffverbrauch in Liter und der Dichte von Diesel in Gleichung (5.2).

$$m_k \left[\frac{\text{kg}}{100\text{km}} \right] = m_k \left[\frac{\text{l}}{100\text{km}} \right] * \rho_{\text{Diesel}} \left[\frac{\text{kg}}{\text{l}} \right] \quad \text{Gleichung (5.2)}$$

Mit $\rho_{\text{Diesel}} = 0,820 \dots 0,845 \frac{\text{kg}}{\text{l}}$ [58]

Die Masse der Luft ergibt sich aus der Masse des Kraftstoffs, dem stöchiometrischen Luftbedarf des Kraftstoffs und dem Luftverhältnis in **Gleichung (5.3)**. Der stöchiometrische Luftbedarf, d.h. die Luftmenge, die notwendig ist, um den Dieselkraftstoff vollständig zu verbrennen, beträgt 14,6 kg Luft pro Kilogramm Dieselkraftstoff. Da Dieselmotoren mit Luftüberschuss betrieben werden, muss außerdem mit dem Luftverhältnis λ multipliziert werden. Dieses schwankt bei Dieselmotoren, je nach Betriebszustand, zwischen $\lambda = 1,3$ (Vollast) und $\lambda = 5$ (Leerlauf).

$$m_l \left[\frac{\text{kg}}{100\text{km}} \right] = m_k * L_{st} * \lambda \quad \text{Gleichung (5.3)}$$

Mit $\lambda = \frac{L_{zug}}{L_{st}} = 1,3 \dots 5$ [59]

$$L_{st} = 14,6 \frac{\text{kg Luft}}{\text{kg Kraftstoff}} \quad [59]$$

Anschließend ergibt sich die Massenkonzentration einer Emissionskomponente nach **Gleichung (5.4)**, bereits umgerechnet auf kg/km. Das Molvolumen wird idealisiert mit dem Wert für ideales Gas angenommen.

$$E_m \left[\frac{kg}{km} \right] = \frac{M_m \left[\frac{g}{mol} \right]}{M_v \left[\frac{l}{mol} \right]} * E_v [ppm] * \frac{m \left[\frac{kg}{km} \right]}{\rho_{Abgas} \left[\frac{kg}{m^3} \right]} * \frac{1000}{10^6} \quad \text{Gleichung (5.4)}$$

Mit $M_m = 17,031 \frac{g}{mol}$ Gültig für NH₃

$M_v = 22,414 \frac{l}{mol}$ Gültig für ideales Gas

$\rho_{Abgas} = \rho_{Luft} = 1,293 \frac{kg}{m^3}$

Legende:	m_k	Masse Kraftstoff
	m_l	Masse Luft [kg/100km]
	λ	Luftverhältnis
	L_{zug}	Zugeführte Luft [kg Luft/ kg Kraftstoff]
	L_{st}	Stöchiometrischer Luftbedarf [kg Luft / kg Kraftstoff]
	ρ_{Diesel} ...	Dichte Dieselkraftstoff [kg/l]
	E_m	Massenkonzentration [kg/km]
	E_v	Volumenkonzentration [ppm]
	M_m	Molare Masse [g/mol]
	M_v	Molvolumen [l/m ³]

Um einerseits für die Kunden einen wartungsfreien Betrieb des SCR Systems zwischen den Serviceintervallen ermöglichen zu können, und um andererseits den Tank für AdBlue möglichst klein halten zu können, wird von Herstellerseite ein maximaler AdBlue Verbrauch von 1 l/1.000 km angestrebt. Dabei handelt es sich bereits um einen worst case Wert, der von keinem Fahrzeug überschritten werden wird. [42] Dies entspricht bei einer Dichte von ca. 1,09 g/cm³ einem Verbrauch von 1,09 kg/1000km. Dieser Wert, der auch bei im Einsatz befindlichen Fahrzeugen bereits erreicht wird, wird in weiterer Folge in der Berechnung der Ökobilanz als Verbrauch für PKW angenommen.

Als erstes Fahrzeug wird der VW Passat 2,0l TDI mit 6-Gang Handschaltung und einer Leistung von 103 kW gewählt. Dieses Fahrzeug wird einerseits als Euro V Version ohne SCR System unter dem Namen „VW Passat 1,6l BlueMotionTechnology“ und andererseits als Euro VI Version mit SCR System unter dem Namen „Passat 1,6l TDI Blue“ vertrieben. Aus **Tab. 5.24** können die Emissionswerte bei der Typzulassung der beiden Fahrzeugtypen entnommen werden, die auf der Seite des Kraftfahrtbundesamtes veröffentlicht werden. [60] Im europäischen Zulassungsverfahren für Diesel PKW werden die Emissionen von CH₄ nicht extra ausgewiesen. Die US amerikanische Umweltbehörde EPA (Environmental protection agency) geht bei PKW von CH₄ Emissionen von 20 mg/mi, bzw. 12,5 mg/km im Realbetrieb aus. [61] Auch wenn der Realbetrieb eine Verfälschung zu den sonstigen verwendeten Werten, die auf der Abgasrolle ermittelten wurden, darstellt, wird dieser Wert in weiterer Folge im Rechenmodell für alle PKW Fahrzeugtypen herangezogen; die Emissionen von CH₄ spielen, verglichen mit den CO₂ Emissionen, im Fahrbetrieb ohnehin eine untergeordnete Rolle.

Für den VW Passat ergeben sich bei einem Kraftstoffverbrauch von 4,7 l/100km [60] nach **Gleichung (5.5)** eine Luftmasse von 179 kg/100km

$$m_l \left[\frac{kg}{100km} \right] = 3,91 \left[\frac{kg}{100km} \right] * 14,6 * 3,15 \quad \text{Gleichung (5.5)}$$

$$m_l = 179,95 \left[\frac{kg}{100km} \right]$$

und folglich für die Abgasmasse nach **Gleichung (5.6)** 183,86 kg/100km

$$m \left[\frac{kg}{100km} \right] = 3,83 \left[\frac{kg}{100km} \right] + 176,12 \left[\frac{kg}{100km} \right] \quad \text{Gleichung (5.6)}$$

$$m = 183,86 \left[\frac{kg}{100km} \right] \equiv 1,8386 \left[\frac{kg}{km} \right]$$

Mit der gewählten, mittleren Konzentration von 5 ppm NH₃ im Abgas ergeben sich demnach nach **Gleichung (5.7)** NH₃ Emissionen von 0,0054 g/km

$$E_m = \frac{17,031 \left[\frac{g}{mol} \right]}{22,414 \left[\frac{l}{mol} \right]} * 5 [ppm] * \frac{1,8385 \left[\frac{kg}{km} \right]}{1,293 \left[\frac{kg}{m^3} \right]} * \frac{1000}{10^6} \text{ Gleichung (5.7)}$$

$$E_m = 0,0054 \left[\frac{g}{km} \right] = 5,4 \left[\frac{mg}{km} \right]$$

Tab. 5.24: Emissionswerte des VW Passat 2.0l TDI [60]

VW Passat 2.0l TDI		
	Blue	BMT
CO ₂	123 g/km	119 g/km
NO _x	61,8 mg/km	94,1 mg/km
PM	0,15 mg/km	0,32 mg/km
CH ₄	12,5 mg/km	12,5 mg/km
NH ₃	5,4 mg/km	0 mg/km

Als zweites Fahrzeug wird der Audi A6 allroad quattro 3,0l TDI mit einer Leistung von 180 kW und s-tronic 7 Gang Getriebe gewählt. Dieser ist wiederum als Euro V Version sowie als Euro VI Version mit SCR System unter dem Namen „cleandiesel“ erhältlich. Die Emissionsdaten stammen wiederum vom Kraftfahrtbundesamt, und können **Tab. 5.25** entnommen werden. Für die Emissionen von CH₄ gelten dieselben Regeln wie beim VW Passat. Ebenso werden die Emissionen von NH₃ analog zum VW Passat nach Gleichungen (5.1) bis (5.4) berechnet und einer Volumenkonzentration von 5 ppm. Aus dem Kraftstoffverbrauch von 6,3 l/100km [60] ergeben sich demnach NH₃ Emissionen von 7,2 mg/km.

Tab. 5.25: Emissionswerte des Audi A6 allroad quattro 3,0ITDI [60]

AUDI A6 allroad quattro 3.0 TDI		
	cleandiesel	normal
CO ₂	165 g/km	165 g/km
NO _x	72,8 mg/km	157 mg/km
PM	1,4 mg/km	0,46 mg/km
CH ₄	12,5 mg/km	12,5 mg/km
NH ₃	7,2 mg/km	0 mg/km

Auffallend bei den beiden Fahrzeugkonfigurationen von VW und Audi ist, dass sich durch den Einbau eines SCR Systems nicht alle Emissionen in gleichem Maße verändern. Dies wird einerseits durch mögliche unterschiedliche Lieferanten für die Systeme sowie die unterschiedlichen Möglichkeiten der Applikation bei SCR Systemen hervorgerufen. Besonders offensichtlich wird dies bei den Emissionen von Partikel, die beim VW Passat durch den Einsatz des SCR Systems deutlich zurückgehen, beim AUDI allerdings deutlich zunehmen. Allerdings muss festgehalten werden, dass alle Emissionswerte von Partikel deutlich unter dem gesetzlichen Limit von 4,5 mg/km (EURO VI) liegen.

5.4.5.2 Schwere Nutzfahrzeuge und Busse

Bei SNF setzen die meisten Hersteller bereits seit Einführung der EURO IV Vorschriften im Jahr 2005 auf das SCR System. Lediglich zwei Hersteller (Scania, MAN) verwenden auch bei der Abgasvorschrift EURO V andere Systeme. Mit der Einführung von EURO VI ab 2013 werden voraussichtlich alle Hersteller die vorhandenen Möglichkeiten (AGR, Partikelfilter, SCR) ausschöpfen müssen, um die Grenzwerte einhalten zu können. [62]

Über die Auswirkungen des SCR Systems auf die Emissionen von schweren Nutzfahrzeugen gibt es verschiedenste Studien und Ergebnisse. Die Akademie des deutschen Kraftfahrzeuggewerbes geht davon aus, dass durch den Einsatz des SCR

Systems die NO_x Emissionen um etwa 85 % gesenkt werden können. [62] Zusätzlich kann der Motor in einem verbrauchsoptimierten Bereich betrieben werden, was zu einer Kraftstoffersparnis und damit auch zu einer Verminderung der CO₂ Emissionen um ca. 5 % führt. Gleichzeitig können dadurch die Partikelemissionen in diesem Betriebsbereich um ca. 40 % reduziert werden. Auswirkungen auf sonstige Emissionen sind nicht zu erwarten. [62]

Diese Einschätzung wird auch in [57] bekräftigt. Hier wird von einer Reduktion von NO_x von bis zu 75 %, von PM bis zu 30 %, bei einem geringeren Kraftstoffverbrauch von 6 % gesprochen.

Auf der anderen Seite gibt es Studien, die den Einsatz des SCR Systems wesentlich weniger optimistisch sehen. So geht aus Messungen von [63] hervor, dass die NO_x Reduktion lediglich 42 % ausmacht und der Kraftstoffverbrauch gleichzeitig um fast 5 % ansteigt.

Da NH₃ Emissionen momentan noch nicht reguliert sind konnten analog zu den PKW keine kilometerbezogenen Daten erhoben werden. Die bisher durchgeführten Untersuchungen beschränken sich auf die Messung von ppm und ein kilometerbezogener Wert kann deshalb nur abgeschätzt werden. Durch den Einsatz von Sperrkatalysatoren ist es allerdings möglich, die Emissionen auf ein sehr niedriges Level zu bringen. Eine Studie zeigt allerdings, dass die Emissionen während eines gesamten European stationary cycle (ESC) Testzyklus den Wert von 5 ppm nicht überschreiten. [64] Um auch dynamische Effekte abschätzen zu können, wird dieser Maximalwert von 5 ppm in weiterer Folge als grobe Abschätzung für die Emissionen im Realbetrieb herangezogen. Höhere NH₃ Emissionen (über 10 ppm) würden außerdem schnell auffallen, da Ammoniak bereits in sehr kleinen Dosen einen stark stechenden Geruch verbreiten. [42]

Für das Rechenmodell werden dabei die Durchschnittswerte der betrachteten Veröffentlichungen [57], [62] und [63] herangezogen. Der Kraftstoffverbrauch, und damit auch die CO₂ Emissionen werden daher durch den Einsatz des SCR Systems um 2 % sinken, bei den anderen Emissionswerten verringert sich das NO_x um 66%. Die Partikelemissionen verringern sich demnach 35 %. Der Verbrauch von AdBlue

beträgt, je nach Quelle, in SNF zwischen 4 % [57] und 5 % [62] des Kraftstoffverbrauches. Für das Rechenmodell wird daher ein Verbrauch von 4,5 % angenommen.

Da Antriebsstränge für Nutzfahrzeuge lediglich auf dem Motorprüfstand zertifiziert werden und es daher keine fahrzeugspezifischen Typprüfwerte gibt, kann nicht analog zu PKW Fahrzeugen vorgegangen werden. Daher wird als Modellfahrzeug, das sowohl für LKW als auch für Busse verwendet wird (s. Kap. 5.2) für die folgende Ökobilanz ein 16,5 t LKW mit einem durchschnittlichen Kraftstoffverbrauch von 32,57 l/100km aus [49] gewählt. Für diese Art LKW, der ohne SCR System betrieben wird, gibt es einerseits validierte Emissions- und Kraftstoffverbrauchsdaten in [49] und andererseits liegt dieser LKW mit seinem höchstzulässigen Gesamtgewicht von 16,5 t in der Gewichtsklasse von 15 – 26 t, die ca. 60 % aller SNF ausmacht. [43] **Tab. 5.14** fasst die Emissionsdaten des Modellfahrzeuges sowohl mit als auch ohne SCR zusammen.

Die Emissionswerte für das Fahrzeug mit SCR ergeben sich durch die Einbeziehung der in den Veröffentlichungen [57], [62] und [63] ermittelten Faktoren – die den Einfluss des SCR Systems auf die Emissionen und den Kraftstoffverbrauch beschreiben. D.h. für die Emissionen und den Kraftstoffverbrauch des Modellfahrzeuges mit SCR System werden die Emissionen des Fahrzeuges ohne SCR System mit den aus den Studien erhaltenen, gemittelten Faktoren, wie oben bereits erwähnt, multipliziert. Die anfallenden CO₂ Emissionen werden von der Rechensoftware direkt aus dem Kraftstoffverbrauch errechnet.

Für das Modellfahrzeug wird für die NH₃ Emissionen folgende Abschätzung getroffen. Aus dem Kraftstoffverbrauch und der abgeschätzten Volumenkonzentration von 5 ppm NH₃, ergeben sich nach Gleichung (5.1.) bis (5.4) NH₃ Emissionen von 0,0367 g/km.

Tab. 5.14: Emissionen von SNF mit und ohne SCR System [49], [62]

	SNF Emissionen [g/km]	
	ohne SCR	mit SCR
CO ₂	860,5	843,5
PM	0,375	0,244
NO _x	7,770	2,564
CH ₄	0,030	0,030
NH ₃	0,0367	0

Der Verbrauch von AdBlue – angenommen mit 4,5 % des Kraftstoffverbrauchs – entspricht für das Rechenmodell 14,4 l/1,000 km, oder 15,696 kg/1,000 km. Der Wert für den AdBlue Verbrauch ergibt sich als Mittelwert aus den Veröffentlichungen [57] und [62].

5.5 Wirkungsabschätzung

Im Folgenden werden die Wirkungen der behandelten Emissionen auf Mensch und Umwelt beschrieben.

5.5.1 Kohlendioxid

Anthropogen emittiertes Kohlendioxid entsteht vor allem durch die Verbrennung von fossilen Rohstoffen wie Erdgas, Erdöl oder Kohle. [65]

An sich ist CO₂ für Menschen ungiftig, lediglich durch lokale Ansammlungen, die z.B. in Kellern entstehen können, weil CO₂ schwerer als O₂ ist, kann es zum Erstickten von Menschen führen. Da es sich bei CO₂ um ein Treibhausgas handelt, trägt der Anstieg der Konzentration in der Atmosphäre allerdings zur weltweiten

Juni 2013 B13011

Klimaerwärmung bei. Wie stark der Einfluss des anthropogenen Treibhauseffektes - er macht ca. 1% des gesamten Treibhauseffektes aus - auf das Weltklima tatsächlich ist, ist allerdings strittig. [59]

5.5.2 Methan

Methan ist ein hochwirksames Treibhausgas aus der Gruppe der unverbrannten Kohlenwasserstoffe. Der anthropogene Ursprung von Methan ist einerseits die Land- und Forstwirtschaft und andererseits das industrielle Nutzen von z.B. Erdgas.

Methan wird in der Gruppe der Treibhausgase als ca. 25-mal wirksamer als CO₂ eingestuft. [66]

5.5.3 Partikel

Als Partikel wird ein heterogenes, komplexes Gemisch aus flüssigen und festen Stoffen bezeichnet. Diese Stoffe unterscheiden sich chemischer Zusammensetzung, Größe und Form voneinander. [67] Den größten Anteil mit ca. 60 – 70 % macht dabei Ruß aus. Größe und Form von Ruß spielen beim Einfluss auf den Menschen eine entscheidende Rolle, weil davon die Eindringtiefe in das menschliche Atemsystem abhängt. **Abb. 5.16** zeigt die Eindringtiefe in das menschliche Atemsystem in Abhängigkeit von der Korngröße. Die Partikel, die bereits in den oberen Atemwegen abgeschieden werden, können schon nach kurzer Zeit wieder mit Schleim aus dem Körper entfernt werden. Gelangen Partikel allerdings in die Aveolen, können sie nicht mehr rasch ausgeschieden werden und machen verschiedene Umwandlungsprozesse durch. Daraus folgt, dass kleinste Partikel – also Nano Partikel – gesundheitliche Schäden hervorrufen können. [59]

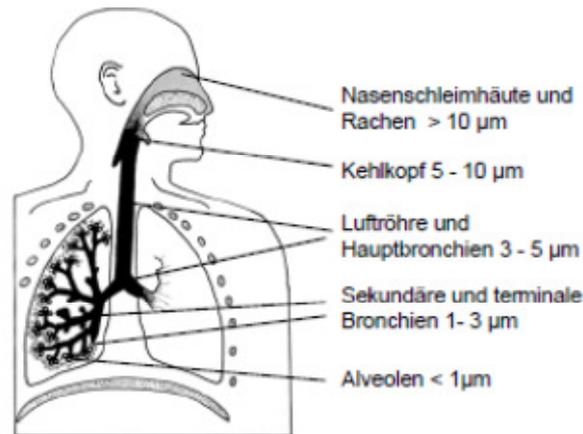


Abb. 5.16: Eindringtiefe von Ruß im menschlichen Atemsystem [59]

5.5.4 Stickstoffoxide

Unter Stickstoffoxid versteht man einen Sammelbegriff für Gasverbindungen, die aus Stickstoff (N) und Sauerstoff (O) bestehen. Stickoxide sind sehr giftig, und können bei ausreichender Konzentration zum Tod führen. Beim Menschen treten vor allem Reizungen von Schleimhäuten an Augen und im Atmungssystem auf. Außerdem spielen Stickstoffoxide eine Rolle bei der Bildung von bodennahem Ozon und können den Boden durch eine überdüngende und übersäuernde Wirkung schädigen. Stickstoffmonoxid reagiert an der Luft fast vollständig zu Stickstoffdioxid, das als das schädlichere der beiden Verbindungen gilt. [68]

5.5.5 Ammoniak

Ammoniak ist ein stechend riechendes, farbloses Gas, das wasserlöslich ist [69]. Beim Menschen kann Ammoniak zu Reizungen sowohl der Schleimhäute als auch der Augen führen. Besteht eine chronische Belastung, kann Ammoniak zu Asthma oder Atemnot führen. [70]

Darüber hinaus schädigt Ammoniak die Wasser- und Landökosysteme, indem es vor allem versauernd auf den Boden wirkt, und ist eine Vorläufersubstanz von Feinstaub.

5.6 Auswertung

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Ökobilanz dargestellt. Diese leiten sich aus den vorangegangenen Sachbilanzen ab und beinhalten die dargestellten Inputs mit den zugehörigen Vorketten sowie sämtliche dargestellte Outputs.

Unterteilt werden die Ergebnisse in Emissionen, die durch die Herstellung von fossilem Diesel sowie der Nutzung im Fahrzeug entstehen und Emissionen, die durch die Herstellung des Reduktionsmittels AdBlue entstehen.

Für die Ergebnisse werden dabei die in Kapitel 4 ermittelten Laufleistungen für das Jahr 2020 herangezogen. Anschließend werden die anfallenden Emissionen im Jahr 2020 getrennt für PKW und LNF sowie SNF und Busse dargestellt.

Es wird darauf hingewiesen, dass bei sämtlichen Rohstoffgewinnungs- und Produktionsprozessen keine technischen Verbesserungen bis 2020 berücksichtigt werden.

5.6.1 Variante 1 - Kein Einsatz von SCR Systemen

Durch die prognostizierten zurückgelegten Kilometer (s. Kap. 4.1.3. bzw. 4.2.3.) und den Emissionswerten pro Fahrzeugkilometer (s. Kap. 5.4.5) ergeben sich für das Jahr 2020 die in **Tab. 5.15** zusammengefassten Emissionen. Die für PKW und LNF anfallenden Kilometer werden dabei zu je 50 % auf die beiden gewählten Modellfahrzeuge aufgeteilt. Es handelt sich dabei um theoretische Werte, falls kein Fahrzeug mit einem SCR System ausgestattet wird. In weiterer Folge werden diese Ergebnisse als 100% Referenz für die übrigen Varianten verwendet.

Tab. 5.15: Gesamtemissionen Dieselfahrzeuge 2020 bei Nicht-Einführung des SCR Systems

		Emissionen bei Variante 1 [t]				
		CO ₂	CH ₄	NO _x	Partikel	NH ₃
PKW / LNF	E. Fahrzeugeinsatz und Dieselherstellung	7.606.854	2.540	10.717	494	0,508
	E. Adblue Herstellung	0	0	0	0	0,0
	SUMME PKW und LNF	7.606.854	2.540	10.717	494	0,508
SNF / Busse	E. Fahrzeugeinsatz und Dieselherstellung	3.805.949	1.104	31.173	1.623	0,254
	E. Adblue Herstellung	0	0	0	0	0,0
	SUMME SNF und Busse	3.805.949	1.104	31.173	1.623	0,254
SUMME		11.412.803	3.644	41.890	2.117	0,762

5.6.2 Variante 2 - Erwartete Marktdurchdringung des SCR Systems

Für die erwartete Marktdurchdringung des SCR Systems in Österreich werden für PKW und LNF die Annahmen getroffen, dass ab 2015 - ab diesem Zeitpunkt gelten die neuen Abgasvorschriften - alle neu zugelassenen Diesel PKW mit einer Leistung ≥ 90 kW sowie alle LNF werden in diesem Szenario mit dem SCR System ausgestattet werden. Kleinere PKW werden den NO_x Speicherkatalysator (NSC) als Nachbehandlungssystem einsetzen. Diese werden in der Ökobilanz in der Gruppe der PKW ohne SCR System berücksichtigt. Auf die Auswirkungen des NSC auf Emissionen wird dabei nicht eingegangen.

Der AdBlue Bedarf ergibt sich aus dem spezifischen Verbrauch (s. Kap. 5.4.5) und den gesamt gefahrenen Kilometern (s. Kap. 4.3) und beträgt etwa 9.700 t für PKW und LNF sowie 45.800 t für SNF und Busse.

Aus **Tab. 5.16** sind die Emissionen für die erwartete Marktdurchdringung des SCR Systems ersichtlich. Im Vergleich mit der Variante 1 sind die deutlich höheren Emissionen von NH₃ besonders auffallend. Diese steigerten sich von 762 kg auf ca. 177 t. Dieser massive Anstieg wird vor allem durch den angenommenen Schlupf im SCR System hervorgerufen. Von den genannten 177 t entfallen lediglich 13 t an NH₃ Emissionen auf den Lebensweg von Harnstoff.

Tab. 5.16: Gesamtemissionen Dieselfahrzeuge 2020 bei erwarteter Marktdurchdringung des SCR System

Emissionen bei Variante 2 [t]						
		CO ₂	CH ₄	NO _x	Partikel	NH ₃
PKW / LNF	E. Fahrzeugeinsatz und Dieselherstellung	7.626.510	2.545	10.213	496	56
	E. Adlue Herstellung	2.960	14	4	2	2
	SUMME PKW und LNF	7.629.469	2.559	10.217	498	59
SNF / Busse	E. Fahrzeugeinsatz und Dieselherstellung	3.746.456	1.087	15.919	1.237	107
	E. Adlue Herstellung	14.017	66	19	8	11
	SUMME SNF und Busse	3.760.473	1.153	15.938	1.245	118
SUMME		11.389.943	3.712	26.155	1.743	177

Nachfolgend werden die Emissionen aus der Variante 2 mit der Variante 1 verglichen.

Auffallend ist dabei, dass im Bereich PKW und LNF aufgrund der sehr langsamen Durchsetzung des Systems nicht einmal 10 % der NO_x Emissionen eingespart werden können, während sich diese Emissionen im SNF Bereich um ca. 50 % reduzieren. Jedoch muss angemerkt werden, dass auch durch den Einsatz von Speicherkatalysatoren in PKW Fahrzeugen eine NO_x Reduktion erfolgt, die im Modell nicht dargestellt wird. Die dargestellten 10 % NO_x Einsparungen beziehen sich also lediglich auf Effekte, die durch den Einsatz von SCR Systemen in PKW erzielt werden. Auch bei den Emissionen von Partikel ist ersichtlich, dass im Bereich der SNF eine deutliche Reduzierung (> 20 %) erreicht werden kann, während sich bei PKW und LNF die Partikel Emissionen sogar leicht erhöhen. Dabei handelt es sich allerdings um keinen Effekt aus dem Herstellungsprozess von Ammoniak, sondern wird durch ein anderes Motormanagement bei Einsatz des SCR Systems verursacht. Durch den niedrigeren Kraftstoffverbrauch bei SNF sinken zudem die CO₂ Emissionen etwas, wohingegen die CH₄ Emissionen durch den Herstellungsprozess von AdBlue gesamt leicht steigen. **Abb. 5.17** zeigt die Veränderung der einzelnen Emissionen durch den Einsatz des SCR Systems in Variante 2. 100 % stellen dabei die Emissionen der Variante 1 dar.

Nicht dargestellt in dem Diagramm sind die Emissionsveränderungen von NH_3 . Diese bewegen sich in einem wesentlich höheren prozentuellen Bereich und würden deshalb die Darstellung verzerren.

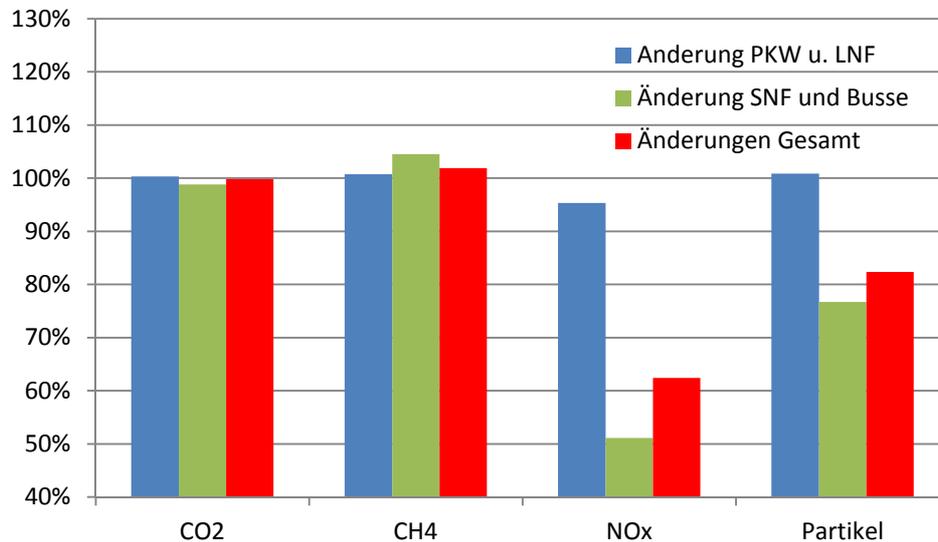


Abb. 5.17: Vergleich realistischer Einsatz – 0% Variante

5.6.3 Variante 3 – 100% Einsatz des SCR Systems

In der 100 % Variante wird davon ausgegangen, dass sämtliche auf der Straße befindlichen, dieselbetriebenen LKW und PKW, also auch jene mit einer Leistung von weniger als 90 kW, mit dem SCR System ausgestattet sind. Herangezogen werden – analog zu den Varianten 1 und 2 - die errechnete gesamte Laufleistung sowie die spezifischen Verbräuche von AdBlue.

Für die Variante 3 ergibt sich ein Verbrauch von 53.733,5 t für SNF sowie 52.033,9 t für PKW und LNF an AdBlue. In **Tab. 5.17.** sind die dabei entstehenden Emissionen ersichtlich. Wiederum sind die deutlich gestiegenen NH_3 Emissionen auffällig. Von den gesamt 442 t an NH_3 Emissionen entfallen allerdings wiederum lediglich 26 t auf den Lebensweg von Harnstoff.

Tab. 5.17.: Gesamtemissionen Dieselfahrzeuge 2020 bei Variante 3

Emissionen bei Variante 3 [t]						
		CO ₂	CH ₄	NO _x	Partikel	NH ₃
PKW / LNF	E. Fahrzeugeinsatz und Dieselherstellung	7.705.390	2.565	8.189	506	281
	E. Adlue Herstellung	14.835	70	20	9	12
	SUMME PKW und LNF	7.720.225	2.635	8.209	515	293
SNF / Busse	E. Fahrzeugeinsatz und Dieselherstellung	3.731.003	1.083	11.955	1.137	135
	E. Adlue Herstellung	17.661	83	24	10	14
	SUMME SNF und Busse	3.748.664	1.166	11.978	1.147	149
SUMME		11.468.889	3.802	20.188	1.662	442

Beim Vergleich mit der 0 % Variante zeigt sich, dass die NO_x Emissionen im PKW und LNF um lediglich ca. 25 % reduziert werden können, bei SNF liegt dieser Wert bei über 60 %. Der Grund dafür liegt darin, dass bei PKW ohne SCR System die NO_x Emissionen nur zu etwas mehr als 50 % im Fahrzeug entstehen, der Rest entsteht schon bei der Dieselherstellung samt zugehöriger Vorkette. Bei SNF entstehen hingegen über 90 % der NO_x Emissionen bei der Verwendung im Fahrzeug, wodurch sich, gesamt betrachtet, ein wesentlich höheres Verminderungspotential ergibt. Der Grund für das große Reduktionspotential liegt natürlich auch in den deutlich höheren Rohemissionen – d.h. die Emissionen vor der Abgasnachbehandlung - des SNF Modellfahrzeuges im Vergleich zu den beiden gewählten PKW Modellfahrzeugen.

Auch bei den Partikel Emissionen ist zu beobachten, dass diese bei SNF deutlich reduziert werden können, während sie sich im PKW Sektor, bedingt durch den gestiegenen Diesel Verbrauch bei einem der beiden Modellfahrzeuge und die AdBlue Herstellung leicht erhöhen. **Abb. 5.18** gibt einen Überblick über die Veränderung der Emissionen im Vergleich zur Variante 1, wobei 100% den Emissionen dieser Variante entsprechen. Zu beachten ist noch der Anstieg an CH₄ Emissionen um einige Prozent, der vor allem durch die AdBlue Herstellung hervorgerufen wird.

In dem Diagramm wird die Veränderung der NH₃ Emissionen wiederum nicht dargestellt, um das Diagramm nicht zu verzerren.

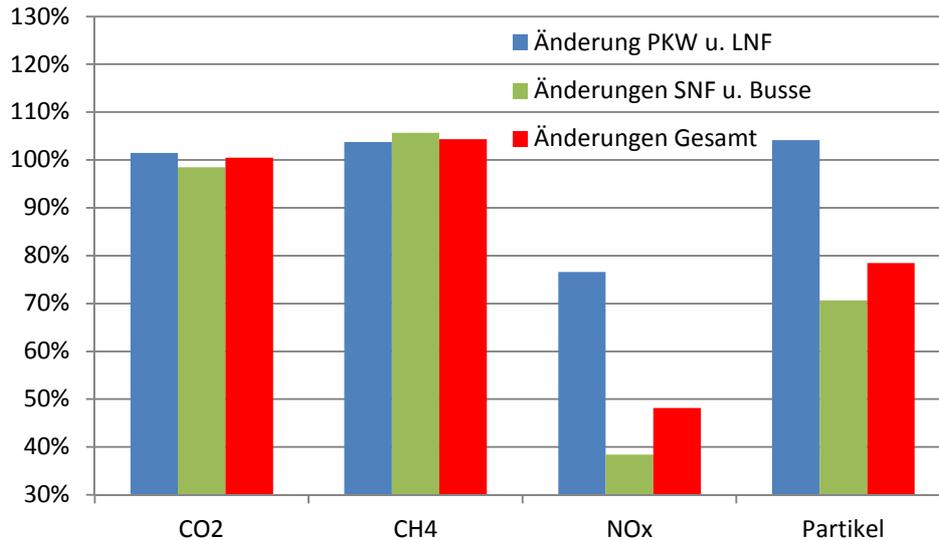


Abb. 5.18: Vergleich Variante 3 – Variante 1

5.6.4 Ergebnis und Empfehlung

Die in den vorigen Kapiteln durchgerechneten Ergebnisse zeigen, dass das SCR System zur Reduktion von NO_x in dieselbetriebenen Fahrzeugen eine deutliche Verminderung der Emissionen bewirken kann. Besonders für SNF ist davon auszugehen, dass durch die Großteils bereits erfolgte Einführung des Systems Emissionen von NO_x deutlich gesenkt werden können. Dem gegenüber steht die durch das SCR System notwendig gewordene Produktion von AdBlue als Reduktionsmittel. Abgesehen von 14 t Ammoniak Emissionen, berechnet in der Variante 3, für alle SNF, entstehen dabei allerdings, verglichen mit den Emissionen, die beim Betrieb des Fahrzeugs und der Herstellung von Dieselkraftstoff entstehen, keine signifikanten Emissionen. Das heißt, die Emissionen, die bei der Herstellung von AdBlue entstehen bewegen sich nur auf einem niedrigen einstelligen Prozentbereich im Vergleich zu den Emissionen, die bei der Herstellung von Diesel und dem Einsatz im Fahrzeug entstehen.

Somit lautet die Empfehlung, für SNF diese Technik weiterhin großflächig einzusetzen um die aufgezeigten Einsparungspotentiale möglichst vollständig

ausnützen zu können. Wie gezeigt wurde, entsteht durch die zusätzliche Produktion von AdBlue nur eine geringe zusätzliche Belastung durch Emissionen, die durch verbesserte Emissionswerte in den Fahrzeugen bei weitem wieder kompensiert werden können.

Bei PKW bzw. LNF werden die Emissionen von NO_x in einem weitaus geringeren Ausmaß reduziert, andere Emissionen steigen hingegen sogar leicht an. Allerdings muss angemerkt werden, dass der Einfluss der Herstellung von AdBlue auf die Gesamtemissionen nur sehr gering ist (s. Tab. 5.15 – 5.17). Neben den entstehenden NH_3 Emissionen von ca. 12 t in der Variante 3 ist der noch größte Emissionsfaktor CH_4 .

Alles in allem können am PKW Sektor lediglich die Emissionen von NO_x gesenkt werden, alle anderen betrachteten Emissionen steigen sogar leicht an. Insofern muss v.a. auf dem PKW Sektor noch zusätzliche Forschungsarbeit betrieben werden, um andere Emissionskomponenten durch das SCR System zumindest nicht ansteigen zu lassen.

6 Zusammenfassung

Durch die strenger werdende Abgasgesetzgebung, insbesondere für Stickoxide (NO_x), sind Automobilhersteller gezwungen, bestehende innermotorische Maßnahmen zur Emissionsminderung mit Abgasnachbehandlungssystemen zu kombinieren. Für dieselbetriebene PKW Fahrzeuge stellt dabei die drastische Reduktion des Grenzwertes von 180 mg/km auf 80 mg/km für Stickoxide mit der EURO VI Norm eine besondere Herausforderung dar. Als Nachbehandlungssysteme stehen dabei vor allem der NO_x Speicherkatalysator sowie der SCR-Katalysator zur Verfügung. Für schwere PKW und LKW wird sich der SCR-Kat voraussichtlich durchsetzen.

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurden die ökologischen Auswirkungen der Einführung der selektiven katalytischen Reduktion (SCR) als Abgasnachbehandlungssystem für Dieselfahrzeuge untersucht. Dabei wurde mittels einer Ökobilanz die zu erreichenden Emissionsminderungen durch die Einführung bei PKW und LKW in Österreich für das Jahr 2020 abgeschätzt.

Auf der einen Seite wurden die Emissionen des Herstellungsprozesses von Harnstoff, der als Reduktionsmittel in dem SCR System eingesetzt wird, sowie des Herstellungsprozesses von Dieselmotorkraftstoff – dies war notwendig, da ein SCR System sich auch auf den Kraftstoffverbrauch eines Fahrzeuges auswirkt – untersucht, auf der anderen Seite wurden Modellfahrzeuge gewählt, die den Einsatz des SCR Systems im Fahrzeug widerspiegeln. Für den Bereich von PKW und leichten Nutzfahrzeugen wurden zwei bereits typisierte Fahrzeuge, die ein SCR System verwenden, mit den baugleichen Fahrzeugen (gleiches Fahrzeug, gleicher Motor), die kein SCR System verwenden, verglichen. Für schwere Nutzfahrzeuge und Busse wurde ein Fahrzeug aus der Literatur verwendet und untersucht, inwieweit das SCR System die Emissionen dieses Fahrzeuges verändern.

Nach dem Durchführen der Ökobilanz für drei verschiedenen Szenarien über die Marktdurchdringung des SCR Systems im Jahr 2020 kann zuallererst festgehalten werden, dass ein Durchsetzen einer neuen Technologie relativ lange dauern kann.

So zeigt die 2. gerechneten Variante - die darauf beruht, dass mit Einführung der neuen EURO VI Abgasnorm ab 2015 alle dieselbetriebenen PKW mit höherer Leistung (≥ 90 kW) ein SCR System benutzen werden - dass bis 2020 lediglich 12% der auf der Straße fahrenden PKW, tatsächlich ein SCR System installiert haben. Leistungsschwächere Fahrzeuge werden in diesem Szenario allerdings mit einem Speicherkatalysator (NSC) zur NO_x Nachbehandlung ausgerüstet. Das Reduktionspotential des NSC wurde in dieser Arbeit auch nicht bewertet.

Desweiteren ist ersichtlich, dass der Herstellungsprozess des in dem SCR System eingesetzten Reduktionsmittel AdBlue, eine wässrige Harnstofflösung, nur einen sehr geringen Anteil an den insgesamt entstandenen Emissionen verursacht. Der Großteil der Emissionen entsteht weiterhin bei der Herstellung von Dieselkraftstoff sowie der Verwendung im Fahrzeug. Der Einsatz des Reduktionsmittels, bzw. dessen Herstellungsprozess, erhöht lediglich die Emissionen an Ammoniak signifikant. Alle anderen entstandenen Emissionen bewegen sich, im Vergleich zur Dieselherstellung und der Verwendung im Fahrzeug, auf einem einstelligen Prozentbereich.

Das bedeutet darüber hinaus, dass vor allem die Auswirkungen des SCR Systems auf die Fahrzeugemissionen sowie den Kraftstoffverbrauch den Ausschlag dafür geben, ob das SCR System, ökologisch gesehen, ein wirkungsvolles Abgasnachbehandlungssystem darstellt. Über die Emissionen von Ammoniak im Fahrzeug, bedingt durch Schlupf, gibt es bis dato nur wenig Untersuchungen, v.a. auch weil Ammoniak bis jetzt keine regulierte Abgaskomponente ist. Deswegen können die Emissionen von Ammoniak, die im Fahrzeug entstehen momentan nur abgeschätzt werden. Weitere Messungen in diese Richtung sind unbedingt erforderlich.

Das SCR System soll besonders bei schweren Nutzfahrzeugen weiterhin großflächig eingesetzt werden, um die in dieser Diplomarbeit aufgezeigten Einsparungspotentiale weitestgehend vollständig ausnützen zu können.

Auch bei PKW und leichten Nutzfahrzeugen zeigt sich eine positive Entwicklung der Emissionen, allerdings wird es einige Jahre dauern, bis diese Technologie auch

großflächig auf der Straße unterwegs ist. Aufgrund der positiven Effekte auf die Emissionen, soll die Einführung des Systems allerdings weiter forciert werden.

7 Literaturverzeichnis

1. <http://oica.net>. [Online] [Zitat om: 26.07 2012.] <http://oica.net/category/production-statistics/>.
2. **Heinrich, F.** *Selektive katalytische Reduktion von Stickstoffmonoxid mit Kohlenwasserstoffen an eisenmodifizierten Zeolithen*. Fakultät für Chemie, Ruhr-Universität Bochum. Bochum : 2002. Dissertation.
3. **Kraftfahrzeugtechnik, ÖVK - Österreichischer Verein für.** www.auto-umwelt.at. [Online] 2010. [Zitat vom: 15. 06 2013.] http://www.auto-umwelt.at/_print/1_Emissionen.pdf.
4. **Lenz, H.P. und Prüller, S.** *Emissions and Air Quality of Exhaust Gas Components*. VDI Fortschrittsberichte, Reihe 12, Nr. 542. Düsseldorf : 2003.
5. **Berlin, Umweltbundesamt.** *Future Diesel - Abgasgesetzgebung Pkw, leichte Nfz und LKW - Fortschreibung der Grenzwerte bei Dieselfahrzeugen*. Berlin : 2003.
6. **Jacob, E.** Perspektiven der mobilen SCR-Technik. s.l. : 15. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 2006.
7. **Holderbaum, B.** *Dossierstrategie für ein SCR-System zur NOx-Reduktion im Diesel-PKW*. Fakultät für Maschinenwesen. Aachen : Technische Hochschule Aachen, 2009. Dissertation.
8. **Mollenhauer K., Tschöke H. (Hrsg.)**. *Handbuch Dieselmotoren*. 3. Auflage. s.l. : Springer Verlag, 2007. ISBN 978-3-540-72164-2.
9. **Schwister, K. (Hrsg.)**. *Taschenbuch der Umwelttechnik*. München : Carl Hanser Verlag, 2010. ISBN 978-3-446-41999-5.
10. **Buchholz, F.** *Einsatz von festem Harnstoff als Reduktionsmittel für die NOx Minderung nach dem SCR-Verfahren*. Fakultät für Chemie, Universität Karlsruhe. Karlsruhe : 2010. Dissertation.
11. **Merker, G., et al.** *Verbrennungsmotoren - Simulation der Verbrennung und Schadstoffbildung*. 3., überarbeitete und aktualisierte Auflage. Wiesbaden : Teubner Verlag, 2006.
12. **Glück, Karl-Heinz, et al.** Die Abgasreinigung der FSI-Motoren von Volkswagen. *MTZ - Motortechnische Zeitschrift*. 2000, Bd. 61, 06/2000.
13. **Fierl, Rudolf und Wegmann, Andreas.** SCR Technologie am mager betriebenen DI-Ottomotor. *MTZ - Motortechnische Zeitschrift*. 2007, Bd. 09/2007.

14. **Zueco, Silvia Calvo, et al.** Harnstoff SCR Systeme im Fokus - Neue Herausforderungen bei der Entwicklung von Abgasanlagen. *MTZ - Motortechnische Zeitschrift*. 2007, 09/2007.
15. **Merker, G. und Schwarz, Ch. (Hrsg.)**. *Grundlagen der Verbrennungsmotoren - Simulation der Gemischbildung, Verbrennung, Schadstoffbildung und Aufladung*. 4., überarbeitete und aktualisierte Auflage. Wiesbaden : Vieweg+Teubner, 2009.
16. **Lacroix, A.** *Untersuchung eines Harnstoff-SCR-Systems zur Sickingoxidminderung im Diesel-PKW-Einsatz*. Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik. Kaiserslautern : TU Kaiserslautern, 2005. Dissertation.
17. **Koebel, M., Elsener, M. und Madia, G.** NO_x-Minderung in Dieselabgasen mit Harnstoff-SCR bei tiefen Temperaturen. *MTZ - Motortechnische Zeitschrift*. 2001, 02/2001.
18. **Reif, K. (Hrsg.)**. *Dieselmotor-Management im Überblick einschließlich Abgastechnik*. Wiesbaden : Vieweg+Teubner, 2010. Bd. 1. Auflage.
19. **Robert Bosch GmbH**. *Dieselmotor-Management*. 4. Auflage. s.l. : Friedr. Vieweg & Sohn, 2004. ISBN 3-528-23873-9.
20. **Gauthier, Y.** *Einspritzdruck bei modernen PKW-Dieselmotoren*. Wiesbaden : Vieweg+Teubner, 2009. Bd. 1. Auflage.
21. **Weißbäck, M., et al.** Erfüllung zukünftiger Emissions-Anforderungen für Diesel SUVs. Aachen : 15. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik 2006, 2006.
22. **Walz, Ch.** *NO_x Minderung nach dem SCR-Verfahren: Untersuchungen zum Einfluß des NO₂-Anteils*. Fakultät für Chemie. Karlsruhe : Universität Karlsruhe, 2000. Dissertation.
23. **Mußmann, L., et al.** *Entwicklung hochtemperaturstabiler SCR-Katalysatoren für zukünftige Konzepte zur Diesel Abgasnachbehandlung*. Hanau-Wolfgang : Umicore AG & Co. KG, Automotive Catalysts.
24. **Burkardt, A.** *Stickstoffminderung nach dem SCR-Verfahren: Untersuchung zur Struktur und Acidität vanadiumoxidhaltiger Katalysatoren*. Fakultät für Chemie. Karlsruhe : Universität Karlsruhe, 2001. Dissertation.
25. **Weisweiler, W., et al.** *Entwicklung eines GD-Kat-Systems für PKW mit festem Harnstoff als Reduktionsmittel: Laboruntersuchungen mit Modellabgas*. Aachen : 9. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 2000.

26. **Maus W., Brück R., EMITEC GmbH.** *Die Abgasnachbehandlung für Nutzfahrzeuge - Technologien und Strategien für die Zukunft.* 2007.
27. **Jacob, E., et al.** *Hochleistungs-SCR-Katalysatorensystem: Garant für niedrigste NO_x Emission.* Wien : 27. internationales Winer Motorensymposium, 2006.
28. **Waldbüßer, N.** *NO_x Minderung am PKW-Dieselmotor mit einem Kombinationssystem zur Abgasnachbehandlung.* Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik, Technische Universität Kaiserslautern. Kaiserslautern : 2005. Dissertation.
29. **Jacob, E.** Ammoniakgeneratoren für GD-KAT-Systeme. [Online] [Zitat vom: 28. 9 2011.]
http://www.emitec.com/fileadmin/user_upload/Bibliothek/Vortraege/paper_man_dresden_04_d.pdf.
30. **Schöpf, H.-J.** persönliche Information
31. **Kaiser, R. und Rusch, K.** Auslegung von SCR-Systemen zur Stickoxidreduktion bei Dieselmotoren. *MTZ - Motortechnische Zeitschrift.* 2007, 12/2007.
32. **Kleemann, P.** *Beschichtung von Cordierit-Wabenkörpern für die selektive katalytische Reduktion von Stickoxiden.* : ETH Zürich, 1999. Dissertation. ETH Nr. 13401.
33. **Cloud, R., et al.** SCR-basiertes Konzept für Euro VI bei schweren Nutzfahrzeugen. *MTZ - Motortechnische Zeitschrift.* 2009, 09/2009.
34. **Doberer, J.** Linzer Agro Trade GmbH, persönliche Information
35. **Wiesenberger, H.** *State of the Art for the production of fertilisers with the regard to the IPPC-directive.* Wien : Umweltbundesamt Österreich, 2002. Band 105.
36. **EFMA - European Fertilizer Manufacturers Association.** *Best Available Techniques for Pollution Prevention and Control in the European Fertilizer Industry.* Bruxelles : EFMA - European Fertilizer Manufacturers Association, 2000.
37. **BASF.** www.BASF.com. [Online] [Zitat vom: 15. 06 2013.]
https://www.basf.com/group/corporate/site-ludwigshafen/de/function/conversions:/publish/content/about-basf/worldwide/europe/Ludwigshafen/Education/Lernen_mit_der_BASF/ammoniaksynthese/data/Ammoniaksynthese.pdf.
38. **Umweltbundesamt.** *German Notes on BAT for the production of Large Volume Solid Inorganic Chemicals - Harnstoff.* Witten : Institut für Umwelttechnik und Management, Universität Witten/Herdecke, 2001.

39. **Commission, European.** *Reference Document on Best Available Techniques for the Manufacture of Large Volume Inorganic Chemicals - Ammonia, Acids and Fertilisers.* Brüssel : European Commission, 2007.
40. **Austria, Statistik.** *Statistik der Kraftfahrzeuge, Neuzulassungen.* Wien : Bundesanstalt Statistik Österreich, erscheint jährlich, 2002 - 2011.
41. **Shell Austria Ges.m.b.H.** *Noch mehr Autos - bis 2020 keine Wachstumsgrenzen; Szenarien des PKW Bestands und der Neuzulassungen in Österreich bis 2020.* Wien : 2003.
42. **Gert Barnstedt, BMW AG.** Persönliche Information. 2012.
43. **Austria, Statistik.** *Statistik der Kraftfahrzeuge, Bestand am xx.xx.xxxx.* Wien : Bundesanstalt Statistik Österreich, erscheint jährlich, 2002 - 2011.
44. **Stranner, Gudrun.** persönliche Information.
45. **Umweltbundesamt.** *Energiewirtschaftliche Inputdaten und Szenarien als Grundlage zur Erfüllung der Berichtspflichten des Monitoring Mechanismus.* Wien : Umweltbundesamt, 2009. REP-0237.
46. **Grießhammer, Rainer et.al.** *CO2 Einsparpotenziale für Verbraucher.* Freiburg : Öko Institut e.V., 2010.
47. **Normung, DIN Deutsches Institut für.** DIN EN ISO 14040, Umweltmanagement-Ökobilanz-Grundsätze und Rahmenbedingungen. 2009.
48. **Energie-Control Austria.** [Online] 2011. [Zitat vom: 15. 08 2012.] <http://www.e-control.at/de/statistik/strom/betriebsstatistik>.
49. **e.V., Öko-Institut.** Globales Emissions-Modell integrierter Systeme (GEMIS). Freiburg : Öko-Institut e.V., 2010. Datenbasis GEMIS 4.5.
50. **Fachverband der Mineralölindustrie (FVMI).** *Mineralölbericht 2010.* s.l. : Wirtschaftskammer Österreich (WKO), 2010.
51. **Swiss Center for Life Cycle Inventories.** *ecoinvent report 6 - Teil V Erdgas; Data v2.0.* Villigen : Swiss Center for Life Cycle Inventories, 2007.
52. **ÖVGW - Österreichische Vereinigung für das Gas- und Wasserfach.** [Online] [Zitat vom: 10. 11 2011.] <http://www.ovgw.at/gas/themen/?uid:int=354>.
53. **Jungbluth, Niels.** *Erdöl. In: Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz. ecoinvent report No. 6-IV.* Duebendorf : Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2007.

54. **Prof. Dr.-Ing. Michael Bargende, Universität Stuttgart.** persönliche Information, 2012.
55. **Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Stefan Hausberger, TU Graz.** persönliche Information, 2013.
56. **DI Herbert Gertl, TU Wien.** persönliche Information, 2013.
57. **Müller, W., et al.** *Selective Catalytic Reduction - Europe's NOx Reduction Technology* : SAE Technical Paper Series, 2003. 2003-01-2304.
58. **Holborn Europa Raffinerie.** Spezifikation Diesel (schwefelfrei) nach EN 590. 2012.
59. **Geringer, Bernhard.** Skriptum zur Vorlesung - Verbrennungskraftmaschinen Grundzüge. Wien : Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Kraftfahrzeugbau, 2006. SS 2006.
60. **Kraftfahrbundesamt.** [Online] [Zitat vom: 01. 03 2013.]
http://www.kba.de/cln_031/DE/Home/homepage__node.html?__nnn=true.
61. **Lipman, Timothy und Delucchi, Mark.** *Emissions of Nitrous Oxide and Methane from Conventional and alternative fuel motor vehicles.* Netherlands : Kluwer Academic Publishers, 2002.
62. **Akademie des deutschen Kraftfahrzeuggewerbes GmbH.** *Handbuch zur AU Schulung von verantwortlichen Personen und Fachkräften, Schulungsphase 2011 - 2014.* Bonn : Vogelbuch Verlag. 10. Auflage 2011.
63. **Lee, Jong-Sun und Baik, Doo Sung.** *Evaluation of SCR System in Heavy Duty Diesel Engines.* s.l. : SAE Technical Paper Series, 2008. 2008-01-1320.
64. **Ardanese, Michelangelo, et al.** *Emissions of NOx, NH3 and Fuel Consumption Using High and Low Engine-Out NOx Calibrations to Meet 2010 Heavy Duty Diesel Engine Emission Standards* : SAE International, 2009. 2009-01-0909.
65. **Umweltbundesamt.** Umweltbundesamt - Treibhausgase. [Online] [Zitat vom: 02. 10 2012.]
<http://www.umweltbundesamt.at/umweltsituation/luft/treibhausgase/kohlendioxid/>.
66. **Change), IPCC (Intergovernmental Panel on Climate.** *Climate Change 2007 - The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC.* New York : Cambridge University Press, 2008. ISBN 978 0521 88009-1.
67. **umweltbundesamt.at.** [Online] [Zitat vom: 24. 10 2012.]
<http://www.umweltbundesamt.at/umweltsituation/luft/luftschaedstoffe/staub/>.

-
68. **Umweltbundesamt.de.** umweltbundesamt.de. [Online] [Zitat vom: 23. 10 2012.] <http://www.umweltbundesamt.de/luft/schadstoffe/no.htm>.
69. **Bayerisches Landesamt für Umwelt.** *UmweltWissen - Ammoniak und Ammonium.* Augsburg : Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2004.
70. **Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg.** [Online] [Zitat vom: 13. 11 2012.] <http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/20247/>.
71. **Moser, F.-X.** Skriptum Dieselmotorentchnik. Wien : TU Wien - IFA, Aktualisierung SS2011.
72. **Normung, DIN Deutsches Institut für.** DIN EN ISO 14044, Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen. 2006.
73. **Umweltbundesamt.** [Online] [Zitat vom: 01. 09 2012.] <http://www.umweltbundesamt.at/umweltsituation/luft/luftschaedstoffe/co/>.
74. **Lebensministerium.** *Erneuerbare Energie 2020 - Potenziale und Verwendung in Österreich.* Wien : Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, 2009.
75. **US Environmental Protection Agency.** [Online] [Zitat vom: 15. 09 2012.] <http://www.epa.gov/otaq/crttst.htm>.
76. **Feßler, Dirk Klaus.** *Modellbasierte On-Board Diagnose Verfahren für Drei-Wege-Katalysatoren.* Karlsruhe : Karlsruher Institut für Technologie, 2010. ISBN 978-3-86644-593-2.