

Entwicklung der CO₂-Emissionen schwerer Güterfahrzeuge

***Berichtsverfasser
Dr. Luzi Bergamin
Res Isler
Dr. Peter Künzler***

Bericht Nr. 5035

***Auftraggeber
Alpen-Initiative
Hellgasse 23
6460 Altdorf***

Dezember 2018

Inhalt

Zusammenfassung	6
Résumé	8
Sintesi	11
1 Ziel der Studie	13
2 Entwicklung der Emissionen von 1990 bis heute	13
2.1 Quellen und Umfang der Betrachtung	13
2.2 Fahrzeugbestand und neue Inverkehrsetzungen	14
2.3 Transport- und Fahrleistungen	17
2.4 Emissionen des schweren Nutzfahrzeugverkehrs	22
2.4.1 Methodik	22
2.4.2 Emissionen im gesamtschweizerischen Kontext	23
2.4.3 Entwicklung der Emissionen des SNF im Detail	25
2.5 Beispiel: Die Emissionsfaktoren eines Sattelzuges 34-40t	30
2.6 Fazit Entwicklung 1990 bis 2020	34
3 Prognosen	35
3.1 Verkehrs- und Emissionsprognosen des Bundes	35
3.1.1 Rückblick auf frühere Berichte	35
3.1.2 Prognosen BAFU/ARE zur Entwicklung des Strassenverkehrs und seiner Emissionen	36
3.2 Situation EU	40
3.2.1 Einführung	40
3.2.2 Ziele	40
3.2.3 Monitoring	42
3.3 Forschung, Entwicklung	44
3.3.1 Vorbemerkung	44

3.3.2	<i>Einsparpotenziale</i>	45
3.3.3	<i>Einsparpotenziale vs. Motorenleistungen</i>	47
3.3.4	<i>Können die von der EU formulierten Emissionsziele erreicht werden?</i>	48
3.4	<i>Effektivität, Effizienz und Zieleffizienz</i>	48
3.4.1	<i>Vorüberlegungen zur Effizienz</i>	48
3.4.2	<i>Energieeffizienz und Kosteneffizienz</i>	49
3.4.3	<i>Warum sind die «low hanging fruits» bisher nicht geerntet worden? Eine Meinung aus der Industrie.</i>	50
3.4.4	<i>Zieleffizienz</i>	51
3.5	<i>Alternative Antriebssysteme</i>	53
3.5.1	<i>Elektromobilität</i>	53
3.5.2	<i>Komprimiertes Erdgas (CNG), Flüssiggas (LNG), Wasserstoff</i>	54
3.6	<i>Hemmnisse für die Verbreitung treibhausgasmindernder Technologien</i>	54
3.7	<i>Massnahmen zur Förderung und Verbreitung des Technologieeinsatzes</i>	55
3.8	<i>Rechtliche Regelung in der Schweiz</i>	57
3.8.1	<i>CO₂-Emissionsvorschriften für neue Personen- und Lieferwagen</i>	57
3.8.2	<i>CO₂-Gesetz</i>	58
3.8.3	<i>Leistungsabhängige Schwerverkehrsabgabe (LSVA)</i>	59
3.9	<i>Relativierung der technischen Möglichkeiten, Transport als gesellschaftliches Problem und Rebound Effekte</i>	60
3.9.1	<i>Technische Möglichkeiten</i>	60
3.9.2	<i>Transport als gesellschaftliches Problem</i>	61
3.9.3	<i>Rebound Effect</i>	61
3.10	<i>Fazit</i>	63
	<i>Literatur</i>	65
	<i>Glossar</i>	67

Zusammenfassung

Die Entwicklung des schweren Nutzfahrzeugverkehrs seit 1990 wird vor allem dominiert durch den Effekt der Aufhebung der 28t Limite (2001 bis 2004) und die starke Zunahme des grenzüberschreitenden Verkehrs. Insgesamt hat die Fahrleistung (Anzahl gefahrener Kilometer inländischer und ausländischer SNF in der Schweiz) seit 1990 um rund 10% zugenommen (grenzüberschreitender Verkehr bis 40% Zunahme), die Transportleistung (Produkt aus Transportdistanz und der Menge der transportierten Güter) jedoch um 50%. Seit 2007 verlaufen die Entwicklung von Fahr- und Transportleistung wieder parallel, d.h. die mittlere Ladung bleibt konstant. Trotz dieser Stagnation werden in der Schweiz immer grössere und stärkere Nutzfahrzeuge eingesetzt. So nahm der Anteil von Fahrzeugen über 18t zwischen 2005 und 2017 von 34% auf 42% zu; hatten 2005 nur 32% aller Fahrzeuge eine Motorenleistung von mehr als 300kW lag dieser Anteil 2017 schon bei 55%. Der Leerfahrtenanteil liegt seit 2003 praktisch konstant bei einem Viertel der Fahrleistung.

Fahrzeuge der neuesten Generation (Abgas-Normen) setzen sich im Fahrzeugbestand rasch durch und absolvieren überdurchschnittlich hohe Fahrleistungen. Begünstigt durch die LSVA, welche nur die besten verfügbaren Standards in die günstigste Abgabekategorie aufnimmt, sind neue Abgasnormen von der Industrie oft vorweggenommen worden. So wurde z.B. die Kategorie Euro-IV beinahe übersprungen, weil bereits die nächststrengere Kategorie Euro-V gleichzeitig festgelegt wurde. Dies hat sich positiv auf die Entwicklung der Luftschadstoffemissionen ausgewirkt. Da CO₂-Grenzwerte bis heute fehlen, hat diese Modernisierung die Treibhausgasemissionen aber nicht beeinflusst.

Die Entwicklung der CO₂-Emissionen schwerer Nutzfahrzeuge (SNF) geht parallel zur Entwicklung der Fahrleistung, sie liegt heute also rund 10% über dem Niveau von 1990. Demgegenüber haben die Emissionen der wichtigsten Luftschadstoffe (Stickoxide und Feinstaub) stark abgenommen, die Emissionen liegen heute unter einem Fünftel des Wertes von 1990. Betrachtet man den gesamten Strassenverkehr, liegt der Anteil der CO₂-Emissionen schwerer Nutzfahrzeuge seit den 90er Jahren konstant bei rund einem Achtel, der Anteil bei den Luftschadstoffen hat hingegen von fast einem Drittel auf etwa einen Achtel abgenommen. Im gesamtschweizerischen Kontext tragen schwere Nutzfahrzeuge heute knapp 4% zu den CO₂-Emissionen bei, 1990 lag dieser Wert bei knapp 3%. Gegenläufig ist die Entwicklung bei den Luftschadstoffen: War der schwere Nutzfahrzeugverkehr 1990 noch für rund 17% der Stickoxidemissionen verantwortlich, liegt dieser Wert heute nur noch bei gut 6%.

Bezogen auf ein Einzelfahrzeug zeigt sich, dass seit 1990 durch die Entwicklung der Motortechnologie durchaus Effizienzgewinne erzielt wurden. Um eine Tonne Güter einen Kilometer weit zu transportieren, werden heute gegenüber 1990 rund 30% weniger CO₂ freigesetzt. Bei den Luftschadstoffen beträgt diese Reduktion aber 85%. Dabei haben die CO₂-Emissionen v.a. im Verkehr innerorts abgenommen, bei den Luftschadstoffen wird die grösste Reduktion bei Fahrten auf der Autobahn erzielt. Einen Teil der erreichten Effizienzgewinne wird durch die höhere Motorisierung der Fahrzeuge wieder zunichte gemacht. So konnten in den 90er Jahren bei schweren Sattelzügen beachtliche Fortschritte erzielt werden, auf Autobahnen erreichte man damals eine

Verbesserung der CO₂-Emission von rund 15% gegenüber den älteren Modellen (Typ 80er Jahre). Im Flachen blieb dieser Wert seither praktisch konstant, in Steigungen ist heute rund die Hälfte der Reduktion wegen höherer Motorenleistung wieder verloren.

Gemäss Prognosen des Bundes (ARE und BAFU) werden die Treibhausgasemissionen des schweren Nutzfahrzeugverkehrs ca. 2025 ihr Maximum erreichen. Obwohl die Fahr- und Transportleistungen weiter zunehmen, sollen die Emissionen durch technologische Verbesserungen anschliessend leicht abnehmen. Elektromobilität und alternative Antriebskonzepte bleiben im schweren Nutzfahrzeugverkehr aber eine Randerscheinung (2% der Fahrleistung im Jahr 2035). Gemäss Referenzszenario bleibt die mittlere Ladung weiterhin nahezu konstant, d.h. Fahr- und Transportleistung entwickeln sich parallel. Da beim Personenverkehr wegen des vermehrten Einsatzes von Elektrofahrzeugen eine stärkere Reduktion der Treibhausgasemissionen vorhergesagt wird, steigt aber die Bedeutung schwerer Nutzfahrzeuge weiter an: Der Anteil der SNF an den gesamten CO₂-Emissionen des Strassenverkehrs soll von aktuell 13% bis 2035 auf 15% steigen. Obwohl in diesen Szenarien keine weitere Verschärfung der Abgasnormen angenommen wird, werden sich die Luftschadstoffemissionen durch die komplette Umstellung der Flotte auf Euro-VI-Fahrzeuge weiter verringern. Bei den Stickoxiden soll bis 2035 eine weitere Reduktion von 80% gegenüber 2015 möglich sein, beim Feinstaub (PN), dessen Regulierung erst ab Euro-IV effektiv einsetzte, sogar um 95%.

In der EU wird daran gearbeitet, die CO₂-Emissionen des schweren Güterverkehrs künftig zu reduzieren. Die Absenkpfade sehen bis 2025 Reduktionen von 15% und bis 2030 Reduktionen von 30% vor (Referenz 2019). Diese Absenkpfade werden sowohl von der Forschung als auch von der Industrie zwar als ambitioniert, aber doch realistisch eingeschätzt. Aufgrund einer Vielzahl von Studien ergibt sich, dass mittelfristig eine Emissionsreduktion zwischen 20 – 25% möglich ist und langfristig das Potenzial einer 40 – 45% Reduktion vorhanden ist. Die dafür nötigen Massnahmen sind sowohl nach der Kosteneffizienz (wieviel darf eine Massnahme kosten) und der Zieleffizienz (Verhältnis von Effektivität und Effizienz) zu überprüfen. In dieser Studie wird gezeigt, dass relativ einfache technische Massnahmen eine hohe Zieleffizienz haben, wobei sich komplexe Fragen zum Vollzug stellen. Um die CO₂-Reduktionsziele der EU verfahrensmässig durchsetzen zu können, werden mit einem Simulationsinstrument (VECTO) zunächst die CO₂-Emissionen von schweren Nutzfahrzeugen (inkl. alle Fahrzeugkomponenten) festgestellt. Ab 2019 müssen neu produzierte und zugelassene schwere Nutzfahrzeuge diesen VECTO-Wert ausweisen können. Basierend darauf wird vorgesehen, mittelfristig CO₂-Grenzwerte bzw. Zielvorgaben ähnlich derjenigen der Personenwagen zu definieren. In der Schweiz sind die schweren Nutzfahrzeuge aktuell nicht vom CO₂-Gesetz erfasst. D.h. für schwere Nutzfahrzeuge gibt es – gleich wie in der EU – noch keine CO₂-Zielwerte. Der Bundesrat zieht allerdings in Übereinstimmung mit den Entwicklungen in der EU auch eine Ausdehnung von CO₂-Zielwerte auf Fahrzeuge mit einem Gesamtgewicht von mehr als 3.5 Tonnen in Betracht.

Résumé

Depuis 1990, l'abandon de la limite de poids des 28 tonnes (de 2001 à 2004) et la forte augmentation du trafic transfrontalier dominant fortement l'évolution du trafic de véhicules utilitaires lourds. La prestation kilométrique (distance parcourue en kilomètres par les poids lourds indigènes et étrangers en Suisse) a augmenté de près de 10 % (le trafic transfrontalier jusqu'à 40 %) depuis 1990, la prestation de transport (produit de la distance parcourue et du volume de marchandises transportées) a progressé quant à elle de près de 50 %. Depuis 2007, l'évolution des prestations de transport et du kilométrage évoluent à nouveau en parallèle, ce qui signifie que la charge utile moyenne est restée constante. Cette stagnation cependant n'empêche pas l'utilisation de véhicules utilitaires toujours plus grands et plus puissants en Suisse. Ainsi, la part des véhicules d'un poids supérieur à 18 tonnes est passée de 34 % à 42 % entre 2005 et 2017 ; si en 2005, 32 % de tous les véhicules avaient une puissance de moteur supérieure à 300 kW, cette proportion était déjà de 55 % en 2017. Avec un quart de la prestation de transport, la part des trajets à vide est restée presque constante depuis 2003.

Les véhicules de la nouvelle génération (normes d'émission) s'imposent rapidement dans les parcs de véhicules et gèrent des prestations de transport supérieures à la moyenne. Favorisée par la RPLP qui n'intègre dans la catégorie de redevance la plus avantageuse que les meilleures normes disponibles, la catégorie d'émission Euro IV a rapidement été remplacée par la classe d'émission Euro V, cette dernière ayant été définie presque simultanément. Cette modernisation a eu un impact positif sur l'évolution des émissions de polluants atmosphériques mais n'a eu aucune influence sur les émissions de gaz à effet de serre puisque des valeurs limites pour les émissions de CO₂ font encore défaut actuellement.

L'évolution des émissions de CO₂ des véhicules utilitaires lourds progresse en parallèle à celle de la prestation kilométrique, elle se situe donc actuellement à 10 % au-dessus du niveau de 1990. En revanche, les émissions des principaux polluants atmosphériques (oxydes d'azote et poussières fines) ont chuté pour atteindre aujourd'hui moins d'un cinquième de la valeur de 1990. En tenant compte du trafic routier dans sa globalité, on constate que la part des émissions de CO₂ des utilitaires lourds se maintient constamment à un huitième depuis les années 1990, alors que celle des polluants atmosphériques a diminué de près du tiers, pour atteindre environ un huitième. Dans un contexte suisse global, les utilitaires lourds sont responsables de près de 4 % des émissions de CO₂ alors qu'en 1990, cette valeur n'atteignait tout juste que 3 %. L'évolution des émissions de polluants atmosphériques est inverse : si en 1990, le trafic lourd était responsable de près de 17 % des émissions d'oxydes d'azote, cette valeur n'atteint aujourd'hui que 6 %.

En se référant à un seul véhicule, on constate que depuis 1990, des gains en efficacité ont pu être réalisés grâce à l'évolution de la technologie des moteurs. Aujourd'hui, transporter une tonne de marchandises sur un kilomètre génère 30 % moins d'émissions de CO₂ qu'en 1990. Cette réduction atteint en revanche 85 % pour les polluants atmosphériques. Les émissions de CO₂ ont surtout baissé dans le trafic à l'intérieur des localités alors que la plus forte réduction de polluants atmosphérique est constatée sur l'autoroute. Une part des gains d'efficacité obtenue est

annihilée par la motorisation plus puissante des véhicules. Ainsi, grâce à la modernisation des camions à remorque dans les années 1990, on avait obtenu une amélioration de la valeur des émissions de CO₂ de 15 % par rapport aux modèles plus anciens (modèles des années 1980) sur les autoroutes. Sur les tronçons plats, cette valeur est restée constante depuis cette époque. Aujourd'hui, en montée, la puissance des moteurs annihile la moitié de la réduction obtenue alors.

Selon les prévisions de la Confédération (ARE et OFEV), le maximum des émissions de gaz à effet de serre émises par les utilitaires lourds sera atteint vers 2025. Bien que les prestations kilométriques et de transport continueront de croître, les émissions, elles, devraient baisser par la suite du fait des améliorations technologiques. La mobilité électrique et les concepts de transmission de remplacement cependant restent une exception dans le trafic lourd (2 % de la prestation kilométrique en 2035). Conformément au scénario de référence, la charge utile moyenne se maintiendra presque constante, ce qui signifie que les prestations kilométriques évoluent parallèlement aux prestations de transport. Alors que dans le transport de personnes, une réduction plus forte des émissions de gaz à effet de serre est prévue en raison de l'utilisation de véhicules électriques, chez les véhicules utilitaires lourds, celles-ci ne cesseront d'augmenter : la part des rejets de CO₂ des poids lourds, par rapport à celle de la totalité du trafic routier, devrait passer de 13 % actuellement à 15 % d'ici à 2035. Bien que dans ces scénarios, aucun durcissement supplémentaire des normes d'émissions n'est prévu, les émissions de polluants atmosphériques baisseront continuellement grâce au renouvellement complet du parc de véhicules par des véhicules conformes à la classe d'émission Euro VI.

Une réduction supplémentaire de 80 % des oxydes d'azote par rapport à 2015 est envisageable d'ici 2035, voire même de 95 % pour les poussières fines dont la réglementation n'a été appliquée efficacement qu'à partir de la classe Euro IV.

Des efforts sont entrepris au sein de l'UE pour réduire à l'avenir les émissions de CO₂ dans le trafic lourd de marchandises. Les courbes de réduction prévoient une baisse de 15 % d'ici à 2025 et de 30 % jusqu'en 2030 (référence 2019). Ces courbes de réduction sont considérées certes comme ambitieuses mais réalisables autant par la recherche que par l'industrie. Un grand nombre d'études montrent qu'à moyen terme, une réduction des émissions de 20 à 25 % est réalisable et qu'à long terme, un potentiel de réduction de 40 à 45 % existe. Les mesures requises à cet effet doivent être réexaminées aussi bien en termes d'efficacité économique (combien peut coûter une mesure) qu'en termes d'efficacité dans l'atteinte d'un objectif (rapport efficacité et impact). La présente étude révèle qu'il existe des mesures techniques relativement simples et efficaces pour atteindre l'objectif bien que des questions complexes quant à leur mise en application se posent. Afin de pouvoir mettre en application d'un point de vue procédural les objectifs de réduction du CO₂ de l'UE, les émissions de CO₂ des utilitaires lourds (tous les composants du véhicule inclus) doivent tout d'abord être déterminées au moyen de l'outil de simulation (VECTO). Les utilitaires lourds nouvellement fabriqués et immatriculés devront présenter ces valeurs VECTO dès 2019. Sur cette base, il est prévu de définir des valeurs limites de CO₂, resp. des objectifs à moyen terme similaires à ceux en vigueur pour les voitures de tourisme. En Suisse, les véhicules utilitaires lourds, ne relèvent actuellement pas de la loi sur le CO₂, ce qui signifie

qu'il n'existe pour eux - à l'instar de l'UE - encore aucune valeur cible d'émissions de CO₂. Pour être en accord avec l'évolution au sein de l'UE, le Conseil fédéral envisage toutefois d'étendre aussi les valeurs cibles CO₂ aux véhicules d'un poids total supérieur à 3,5 tonnes.

Sintesi

Dal 1990, lo sviluppo del traffico pesante dei veicoli commerciali (TPVC) è stato principalmente caratterizzato dall'aumento del limite di 28 tonnellate (dal 2001 al 2004) e dal forte aumento del traffico transfrontaliero. Complessivamente, il chilometraggio (numero di chilometri percorsi dal TPVC nazionale ed estero in Svizzera) è aumentato di circa il 10% dal 1990 (aumento del traffico transfrontaliero fino al 40%), ma le prestazioni di trasporto (prodotto di distanza di trasporto e quantità di merci trasportate) sono aumentate del 50%. Dal 2007, lo sviluppo delle prestazioni di guida e trasporto è stato di nuovo parallelo, cioè il carico medio è rimasto costante. Nonostante questa stagnazione, in Svizzera sono stati impiegati veicoli commerciali sempre più grandi e potenti. Così, dal 2005 al 2017, la percentuale di veicoli sopra le 18t è aumentata dal 34% al 42%; se nel 2005 solo il 32% di tutti i veicoli aveva una potenza del motore di oltre 300kW, questa percentuale nel 2017 si situava già al 55%. La porzione di viaggi a vuoto è praticamente costante a un quarto del chilometraggio fin dal 2003.

I veicoli di ultima generazione (quanto a norme sui gas di scarico) si impongono rapidamente nel parco veicoli e assolvono una percorrenza su strada superiore alla media. Favorita dalla TTPCP, che considera nella categoria di tassazione più favorevole solo i migliori standard disponibili, l'industria ha spesso anticipato le nuove disposizioni sui gas di scarico. Così, per es., la categoria Euro-IV è quasi stata saltata, poiché contemporaneamente si stava fissando la prossima, più severa categoria Euro-V. Ciò ha avuto un influsso positivo sullo sviluppo delle emissioni di inquinanti atmosferici. Poiché finora mancano valori-limite per il CO₂, questo ammodernamento non ha invece influito sulle emissioni di gas a effetto serra.

Lo sviluppo delle emissioni di CO₂ dei veicoli pesanti commerciali (VPC) va di pari passo con lo sviluppo delle prestazioni di guida; si situa quindi oggi circa del 10% al di sopra del livello del 1990. Per contro, le emissioni dei più importanti inquinanti atmosferici (ossidi d'azoto e polveri sottili) sono fortemente diminuite e si situano oggi a meno di un quinto del valore del 1990. Se si considera tutto il traffico stradale, dagli anni 90 la parte di emissioni di CO₂ dovute al traffico pesante commerciale è rimasta costante a circa un ottavo, la parte di inquinanti atmosferici è invece scesa da quasi un terzo a circa un ottavo. Nel contesto elvetico complessivo, i veicoli pesanti commerciali contribuiscono per un 4% scarso alle emissioni di CO₂, mentre nel 1990 questo valore era inferiore al 3%. Per gli inquinanti atmosferici l'evoluzione va nella direzione opposta: se nel 1990 il traffico pesante era ancora responsabile circa del 17% delle emissioni di ossidi d'azoto, questo valore oggi si situa ancora attorno al 6%.

Considerando il singolo veicolo, si vede che, grazie allo sviluppo della tecnologia dei motori, dal 1990 sono stati conseguiti guadagni di efficienza. Per trasportare una tonnellata di merci per un chilometro, oggi viene rilasciato circa il 30% meno di CO₂ rispetto al 1990. Per gli inquinanti atmosferici, tuttavia, questa riduzione è dell'85%. In questo contesto, va annotato che le emissioni di CO₂ sono scese soprattutto nelle aree urbane, mentre per gli inquinanti atmosferici, la riduzione maggiore si ottiene quando si guida in autostrada. Parte dei guadagni di efficienza raggiunti sono di nuovo annullati dal più alto grado di motorizzazione dei veicoli. Così negli

anni 90 per gli autotreni pesanti è stato possibile ottenere notevoli progressi; sulle autostrade allora si raggiunse un miglioramento delle emissioni di CO₂ del 15% rispetto ai modelli più vecchi (tipo anni 80). In pianura, questo valore è da allora rimasto praticamente costante. In salita, oggi circa la metà della riduzione va di nuovo persa per via della maggiore potenza dei motori.

Secondo le previsioni della Confederazione (ARE e UFAM), le emissioni di gas a effetto serra del traffico pesante commerciale raggiungeranno il loro massimo circa nel 2025. Sebbene le prestazioni di guida e trasporto continuano ad aumentare, le emissioni dovrebbero in seguito diminuire leggermente grazie ai miglioramenti tecnologici. La mobilità elettrica e i sistemi di propulsione alternativi restano tuttavia un fenomeno marginale nel campo del traffico pesante (2% della prestazione di guida nell'anno 2035). Secondo lo scenario di riferimento, il carico medio resta sempre ancora pressoché costante, cioè la prestazione di guida e quella di trasporto si sviluppano parallelamente. Poiché, per via del maggior ricorso a veicoli elettrici nel traffico delle persone, si prevede una più forte riduzione delle emissioni di gas-serra, l'importanza dei veicoli commerciali pesanti continuerà ad aumentare: la parte dei VPC per le emissioni complessive di CO₂ dovrebbe aumentare dall'attuale 13% al 15% entro il 2035. Sebbene in questi scenari non sia considerato un inasprimento delle norme sui gas di scarico, le emissioni di inquinanti atmosferici diminuiranno con l'intero ammodernamento della flotta a veicoli Euro-VI. Per gli ossidi d'azoto, dovrebbe essere possibile un'ulteriore riduzione dell'80% rispetto al 2015, per le polveri fini (PN), la cui regolamentazione è cominciata effettivamente solo da Euro-IV, persino del 95%.

Nell'UE si sta lavorando per ridurre, in futuro, le emissioni di CO₂ del traffico pesante delle merci. Gli scenari di riduzione prevedono entro il 2025 diminuzioni del 15% e, entro il 2030, diminuzioni del 30% (riferiti al 2019). Questi scenari sono considerati ambiziosi ma realistici sia dalla ricerca sia dall'industria. In base a molti studi, risulta che, a medio termine, è possibile una riduzione delle emissioni fra il 20 e il 25% e, a lungo termine, c'è un potenziale di riduzione del 40 – 45%. Le misure necessarie sono da verificare sia secondo l'efficienza dei costi (quanto può costare una certa misura?) sia per l'efficienza dell'obiettivo (rapporto fra effettività ed efficienza). In questo studio si mostra che misure tecniche relativamente semplici possono avere un'alta efficienza per conseguire gli obiettivi, che però si pongono questioni complesse quanto all'applicazione. Per poter applicare secondo le procedure dell'UE gli obiettivi di riduzione del CO₂, prima di tutto si rilevano le emissioni di CO₂ dei veicoli commerciali pesanti (incluse le loro componenti) con uno strumento di simulazione (VECTO). Dal 2019 i veicoli pesanti prodotti e ammessi alla circolazione devono rispettare questo valore VECTO. Su questa base è previsto di definire, a medio termine, valori-limite per il CO₂, rispettivamente valori-obiettivo, simili a quelli per le vetture da turismo. In Svizzera, i veicoli commerciali pesanti non sono attualmente considerati dalla legge sul CO₂. Perciò, per i veicoli commerciali non ci sono ancora obiettivi per i valori del CO₂ – analogamente all'UE. Tuttavia, il Consiglio federale considera, in accordo con lo sviluppo nell'UE, anche un'estensione degli obiettivi per il CO₂ ai veicoli con un peso complessivo superiore alle 3,5 tonnellate.

1 Ziel der Studie

In der vorliegenden Studie werden die Treibhausgasemissionen des schweren Nutzfahrzeugverkehrs in der Schweiz rückblickend seit 1990 dargestellt und mögliche Entwicklungen in der Zukunft diskutiert. Die Emissionen werden sowohl in ihrem Gesamtumfang als auch auf dem Niveau des Einzelfahrzeuges diskutiert. Sie werden einerseits mit den Emissionen des gesamten Strassenverkehrs wie auch der ganzen Schweiz verglichen, andererseits wird die Entwicklung der Treibhausgasemissionen denjenigen der Luftschadstoffe gegenübergestellt.

Die Darstellung des Zahlenmaterials fokussiert auf die Schweiz. Es werden die Emissionen aller in der Schweiz gefahrenen Kilometer unabhängig von der Herkunft des Fahrzeuges eingerechnet. Bei internationalen Fahrten bleibt die Fahrstrecke im Ausland aber unberücksichtigt (Territorialprinzip).

Da die Entwicklung möglicher Instrumente zur Reduktion der Treibhausgasemissionen sowohl technisch wie rechtlich stark von den Entwicklungen in der EU abhängt, wird im Ausblick eine längere Darstellung der Aktivitäten in der EU präsentiert.

2 Entwicklung der Emissionen von 1990 bis heute

2.1 Quellen und Umfang der Betrachtung

Die Darstellung der Entwicklung der Emissionen von Treibhausgasen und Schadstoffen aus dem schweren Nutzfahrzeugverkehr in der Schweiz basiert auf qualitativ hochstehenden Daten vornehmlich des Bundes. Es sind dies insbesondere:

1. Bestand und Inverkehrsetzung von Fahrzeugen aufgeschlüsselt nach diversen Parametern vom Bundesamt für Statistik [1].
2. Transport- und Fahrleistungen nach Fahrzeugart, Immatrikulation und Verkehrsart vom Bundesamt für Statistik [2].
3. Emissionskoeffizienten in g/km für CO₂ und Luftschadstoffe aus HBEFA (Version 3.3, April 2017) [3].
4. Eine umfangreiche Dokumentation der Emissionen des Strassenverkehrs, welche auch auf den obigen Datenquellen beruht, ist der Bericht „Luftschadstoffemissionen des Strassenverkehrs 1990-2050“ des BAFU [4]. Dies ist der fünfte Bericht dieser Art (siehe [5]-[8]). In diesen Bericht fliessen die Resultate einer Pilotstudie zum Treibstoffverbrauch und den Treibhausgasemissionen des Strassenverkehrs des BAFU ein [9].

Als Emittenten werden CO₂ als wichtigstes Treibhausgas und vergleichend Stickoxide (NO_x) und Feinstaub (PN) als Luftschadstoffe betrachtet. Weitere klimarelevante Gase (insbesondere Methan und Lachgas) spielen bei den Emissionen aus dem Betrieb schwerer Nutzfahrzeuge eine untergeordnete Rolle. Mit dem Einsatz von Abgaskatalysatoren (sogenannte SCR) zur Stickoxidredukti-

on stiegen die Emissionen von Lachgas, deren Klimarelevanz erreicht aber auch 2015 nur etwa 1.5% der Emissionen von CO₂, bei Methan liegen die Werte unter 1 Promille [10].

HBEFA Version 3.3: Das Handbuch für Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs (HBEFA) wurde ursprünglich im Auftrag der Umweltbundesämter von Deutschland, der Schweiz und Österreich erstellt. Die erste Version (HBEFA 1.1) wurde 1995 veröffentlicht. Seither wird HBEFA regelmässig überarbeitet, die aktuelle Version 3.3 wurde 2017 herausgegeben.

HBEFA hat sich in der Schweiz zum allgemein anerkannten Instrument zur Abschätzung von Emissionen aus dem Strassenverkehr entwickelt. Es bildet die Basis der Berichte des BAFU zu den Luftschadstoffemissionen des Strassenverkehrs.

Das in HBEFA verwendete Datenmaterial wird mit dem Modell PHEM (Passenger car and Heavy duty vehicle Emission Model) der TU Graz ermittelt. Als Basis dienen Emissionsmessungen von realitätsnahen Fahrzyklen unabhängig von den für die Zulassung notwendigen Prüfstandmessungen. In der aktuellen Version 3.3 basieren die Emissionsfaktoren schwerer Nutzfahrzeuge bis und mit Euro-V auf umfangreichen Studien, die Werte für Euro-VI basieren ebenfalls auf Messungen, werden aber noch nicht als abschliessend betrachtet.

2.2 Fahrzeugbestand und neue Inverkehrsetzungen

Der Bestand an schweren Sachtransportfahrzeugen ist in der Schweiz seit 1990 recht konstant. 1990 betrug er rund 53'500 Fahrzeuge, 2017 lag er bei knapp 52'000 Fahrzeugen. Seit 2005 werden vom BFS detaillierte Statistiken zum Fahrzeugbestand und den neuen Inverkehrsetzungen geführt. Diese Daten zeigen daher die Situation nach Aufhebung der 28t Limite (2001 bis 2004).

Betrachtet man den Bestand aufgeteilt nach Euro-Normen in Abbildung 1 zeigt sich, dass sich neue Abgasnormen im Fahrzeugbestand rasch durchsetzen. Dabei ist zu beachten, dass die neuen Vorgaben teilweise schon lange vor Inkrafttreten bekannt waren. Sie wurden von der Industrie teilweise schon früher umgesetzt, was in der Schweiz durch die LSVA-Gesetzgebung unterstützt wird, da nur die besten verfügbaren Standards in die günstigste Abgabekategorie fallen.

So waren die Abgasvorschriften Euro-III bis Euro-V bereits ab dem Jahr 2000 bekannt. Entsprechend wurden bereits 2005 Fahrzeuge nach Euro-Norm V zugelassen, 2006 betrug ihr Anteil am Fahrzeugbestand erst 3%, aber bereits die Hälfte der neu in Verkehr gesetzten Fahrzeuge erfüllte diese Norm. Zum Zeitpunkt der verbindlichen Einführung von Euro-V (2009) machte ihr Anteil bereits mehr als ein Viertel des Fahrzeugbestandes aus. Diese Vorwegnahme neuer Normen führte auch dazu, dass die Euro-Norm IV praktisch übersprungen wurde. Ihr Anteil machte nie mehr als 10% der Fahrzeuge aus.

Ein ähnliches Bild zeigt sich bei den Fahrzeugen der neuesten Norm Euro-VI. Diese Norm war auch mehrere Jahre vor Inkrafttreten bekannt, 2013 entfielen bereits über 40% der Neuzulassungen auf diese Kategorie und 2017 erfüllt fast ein Drittel der Flotte diese Norm.

Abgasnormen Euro-I bis VI: Seit 1995 übernimmt die Schweiz für Motorfahrzeuge automatisch die Abgasnormen der EU (Euro-Normen). Die Abgasnormen waren ab folgenden Jahren für Neuinverkehrsetzungen verbindlich [11]:

Euro-Norm	I (CH: FAV 2-3 *)	II	III	IV	V	VI
Inverkehrsetzung ab	1993	1996	2001	2006	2009	2014

*: Die Norm Euro-I wurde in der Schweiz noch unabhängig als Norm FAV 2-3 implementiert.

Die Euro-Normen enthalten bis heute keine Vorgaben zu maximalen Emissionen von CO₂.

Bei der Aufteilung nach Gewichtsklassen (Abbildung 2) zeigt sich, dass die Kategorie 12t bis 18t (zweiachsige Lastwagen) klar am stärksten vertreten ist. Ihr Anteil hat aber von gut 51% im Jahr 2005 auf noch 42% im Jahr 2017 abgenommen. Dieser Rückgang ist praktisch ausschliesslich mit der Zunahme der höheren Gewichtsklassen zu erklären, der Anteil der Fahrzeuge über 18t nahm zwischen 2005 und 2017 von 34% auf 42% zu. Entsprechend ist auch die Zunahme der Motorenleistung (Abbildung 3): Hier nahm der Anteil der Fahrzeuge mit einer Motorenleistung von mehr als 300kW (rund 410PS) von 32% (2005) auf 55% (2017) zu. Die gleiche Entwicklung ist auch bei den neuen Inverkehrsetzungen in Abbildung 4 zu sehen.

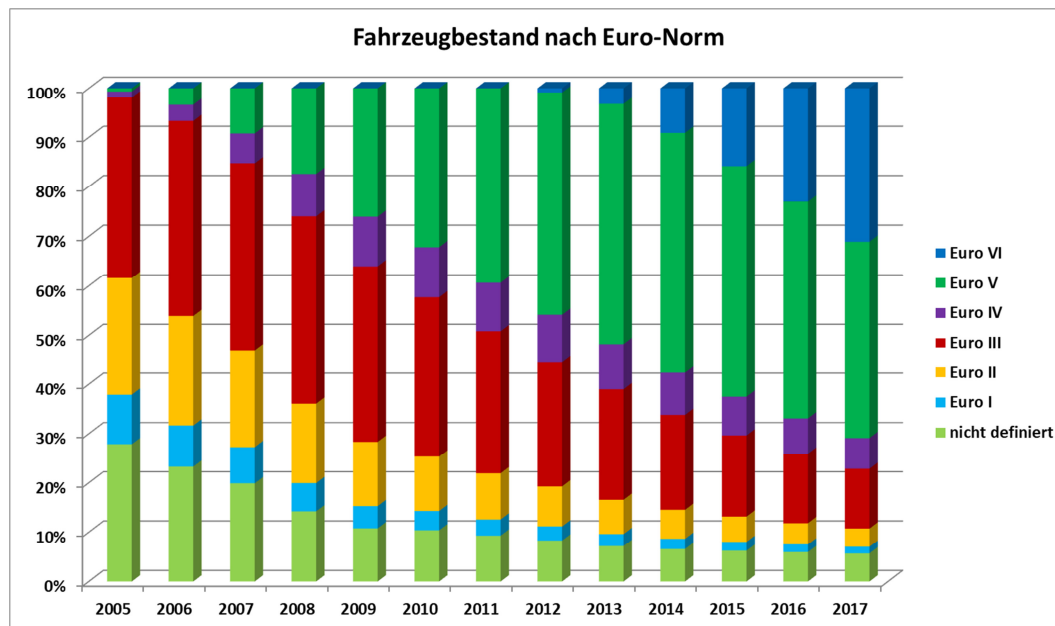


Abbildung 1: Prozentuale Aufteilung des Bestandes schwerer Sachtransportfahrzeuge nach Euro-Norm.
Quelle: Bundesamt für Statistik.

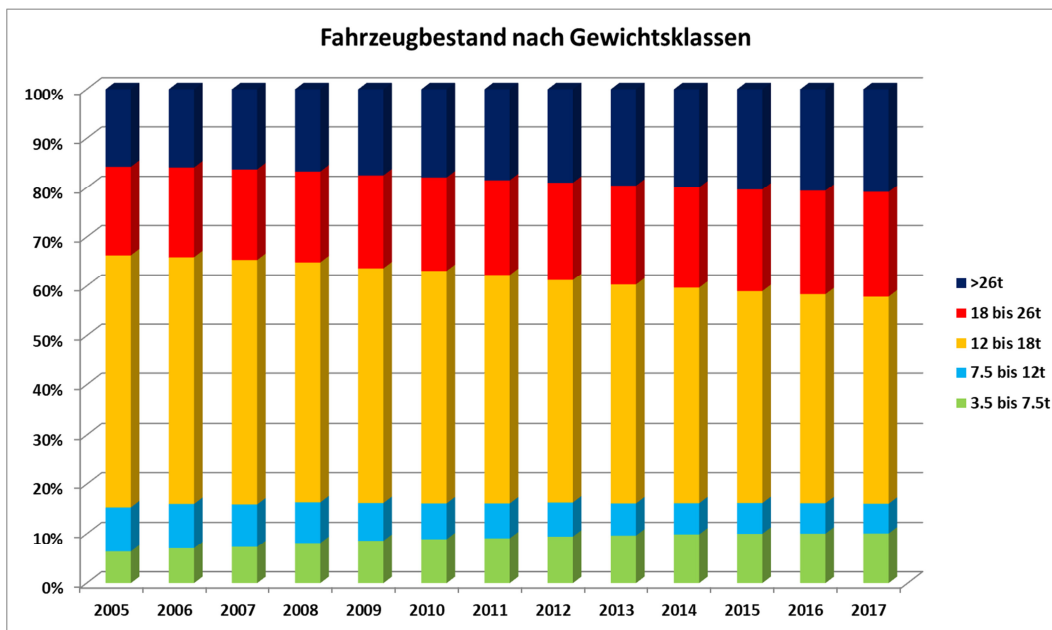


Abbildung 2: Prozentuale Aufteilung des Bestandes schwerer Sachtransportfahrzeuge nach Gewichtsklassen. Quelle: Bundesamt für Statistik.

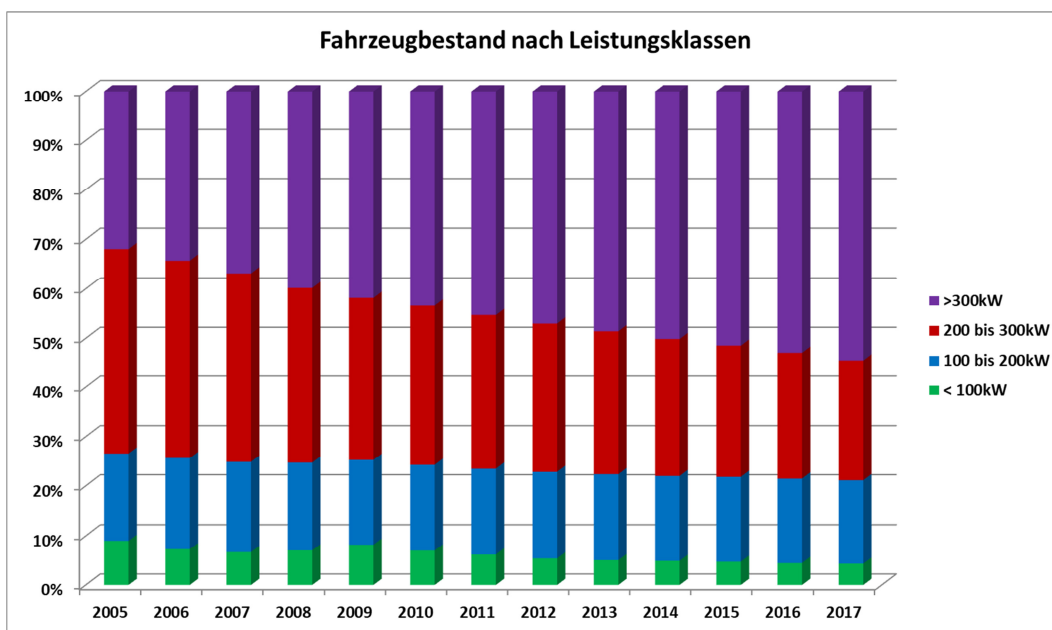


Abbildung 3: Prozentuale Aufteilung des Bestandes schwerer Sachtransportfahrzeuge nach Leistungsklassen. Quelle: Bundesamt für Statistik.

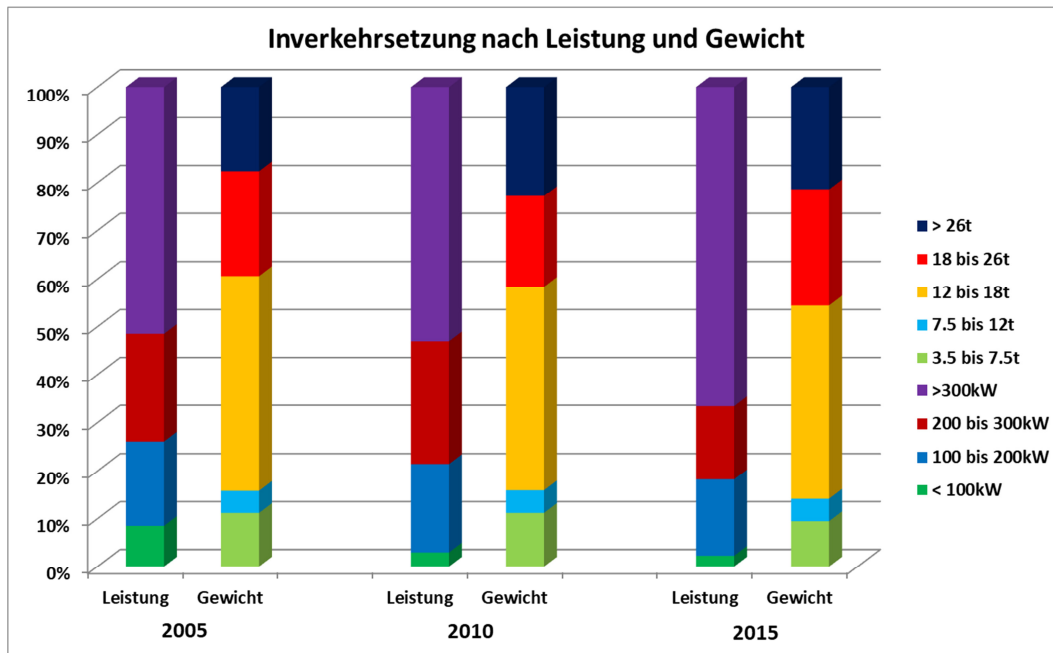


Abbildung 4: Prozentuale Aufteilung der neuen Inverkehrsetzungen schwerer Sachtransportfahrzeuge nach Leistungs- und Gewichtsklassen. Quelle: Bundesamt für Statistik.

2.3 Transport- und Fahrleistungen

Die Statistik der Transporte von schweren Nutzfahrzeugen wird im Wesentlichen auf zwei Arten dargestellt: einerseits die Statistik der *Transportleistung* (*Anzahl Tonnenkilometer pro Jahr*) und andererseits der *Fahrleistung* (*Anzahl gefahrene Kilometer pro Jahr*). Transportleistung und Fahrleistung sind über die mittlere Ladung verbunden. Diese gibt an, mit wie vielen Tonnen Güter ein Lastwagen im Durchschnitt beladen wird.

Für die Zeit vor 1993 liegen diese Daten nur für die Gesamtleistungen vor, aber nach 1993 schlüsselt sie das BFS nach Binnenverkehr, Import, Export und Transitverkehr auf. Daher wird die Auswertung in diesem Abschnitt ab 1993 präsentiert. Fahr- wie Transportleistung haben zwischen 1990 und 1993 je um rund 1.5% zugenommen, die Wahl des Referenzjahres 1993 hat daher auf die weiteren Betrachtungen keinen wesentlichen Einfluss.

Die Transportleistung (Abbildung 5) zeigt eine deutliche Zunahme seit 1993. Die Transportleistung liegt heute etwa 50% über dem Niveau von 1993, wobei die stärkste Zunahme zwischen 1999 und 2008 zu verzeichnen war. Der grenzüberschreitende Verkehr ist dabei überproportional gewachsen, seine Transportleistung liegt heute bei mehr als dem doppelten Wert der frühen Neunzigerjahre, beim Binnenverkehr beträgt die Zunahme in demselben Zeitraum nur etwa ein Drittel.

Die Fahrleistung hat im Vergleich zur Transportleistung weniger zugenommen (Abbildung 6). Auch bei der Fahrleistung hat der grenzüberschreitende Verkehr überproportional zugelegt, er liegt heute fast 30% über dem Wert von 1993. Spitzenjahre waren die Jahre 2000, 2001 und 2008, wo gegenüber 1993 eine Zunahme von fast 40% verzeichnet wurde. Gesamthaft hat die Fahrleistung hingegen nur um 10% zugenommen.

Der Hauptgrund für den Unterschied in der Entwicklung der Fahr- und Transportleistung liegt in der Aufhebung der 28t-Limite, die schrittweise in den Jahren 2001 bis 2004 erfolgte. Die mittlere Ladung im grenzüberschreitenden Verkehr hat in der Folge massiv zugenommen, von 6.5t im Jahr 2000 auf 11t im Jahr 2007 (siehe Abbildung 7). Im Binnenverkehr blieb der Effekt der Aufhebung hingegen bescheiden, die mittlere Ladung stieg von 5.3t im Jahr 2000 auf 6t in 2007. Im lokalen und regionalen Güterverkehr kann die höhere Zuladung meist gar nicht ausgenutzt werden. Im Gesamten liegt die mittlere Ladung seit 2007 beinahe konstant bei 7.3t.

Diese Entwicklung steht im Kontrast zur Entwicklung des Fahrzeugbestands seit 2005 in Abbildung 2 und Abbildung 3. Obwohl immer grössere und stärkere Fahrzeuge auf den Strassen unterwegs sind, transportieren diese pro gefahrenen Kilometer nicht mehr Güter. Interessant dabei ist, dass dies nicht auf eine Zunahme der Leerfahrten zurückzuführen ist. Der Leerfahrtenanteil betrug 2016 laut BFS im Inlandverkehr 26% [2], ein Wert, der sich seit 2003 kaum verändert hat [12].

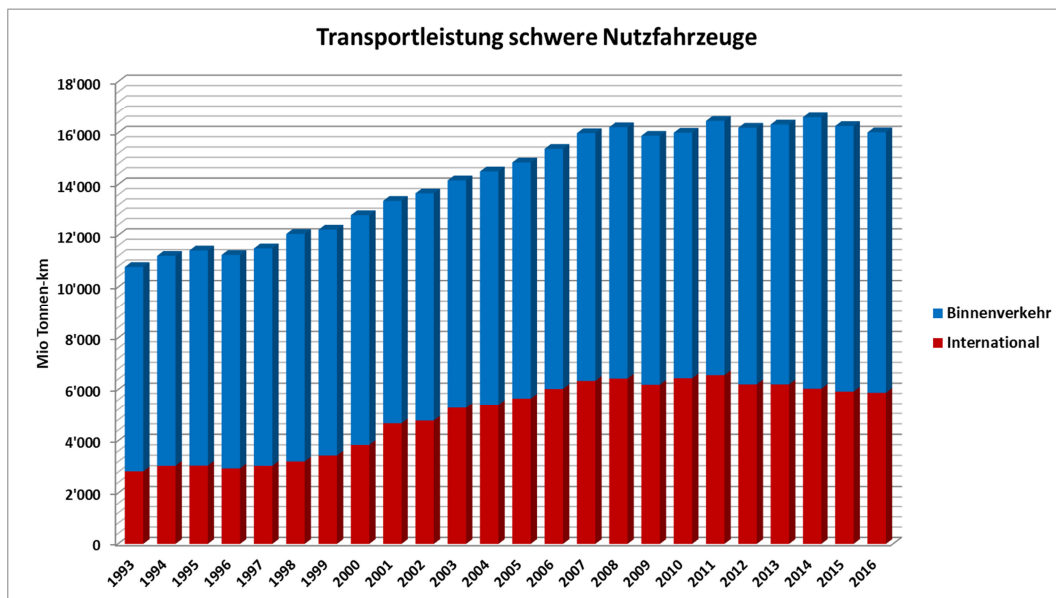


Abbildung 5: Entwicklung der Transportleistung schwerer Nutzfahrzeuge aufgeteilt nach Binnenverkehr und internationalem Verkehr (Import, Export, Transit). Quelle: Bundesamt für Statistik.

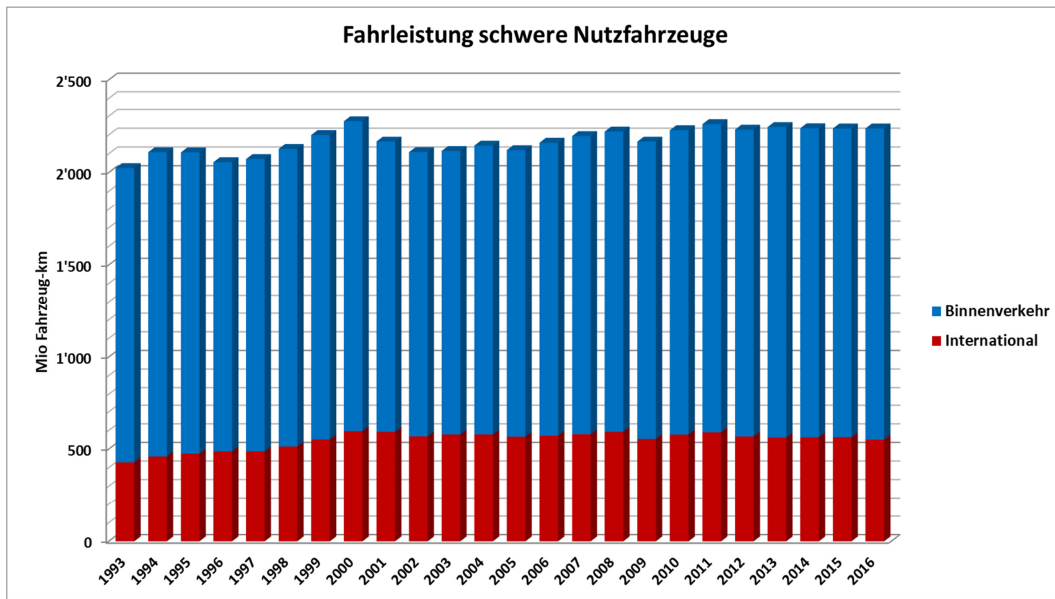


Abbildung 6: Entwicklung der Fahrleistung schwerer Nutzfahrzeuge aufgeteilt nach Binnenverkehr und internationalem Verkehr (Import, Export, Transit). Quelle: Bundesamt für Statistik.

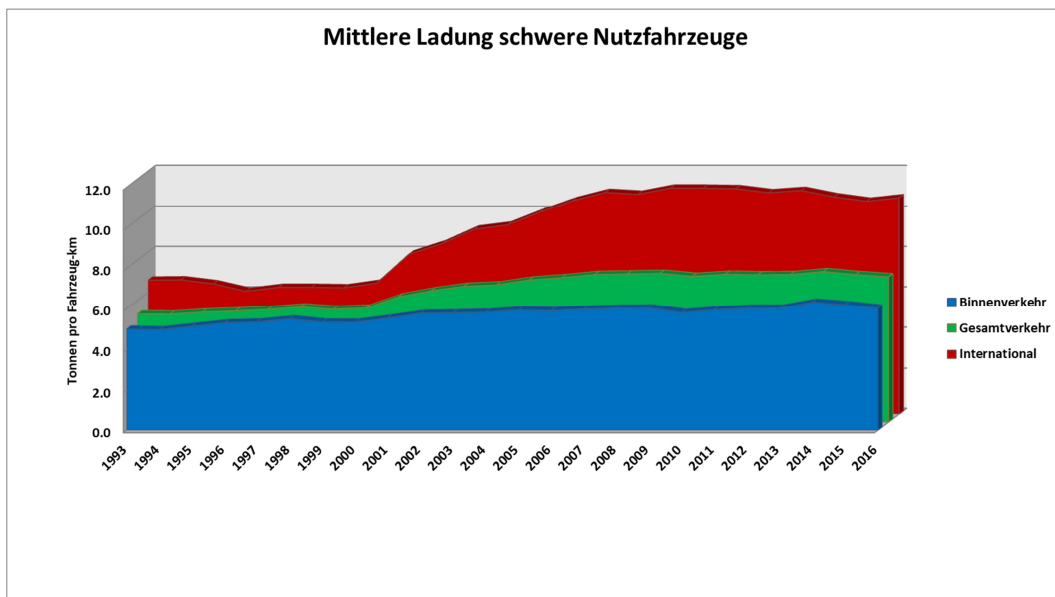


Abbildung 7: Entwicklung der mittlere Ladung schwerer Nutzfahrzeuge in Tonnen aufgeteilt nach Binnenverkehr und internationalem Verkehr (Import, Export, Transit). Grün die mittlere Ladung des Gesamtverkehrs. Datenbasis: Bundesamt für Statistik.

Wichtig für die Beurteilung der Emissionen des Strassengüterverkehrs ist die Aufteilung der Fahrleistung auf die verschiedenen Strassentypen (Autobahn, ausserorts, innerorts), da die Emissio-

nen pro gefahrenen Kilometer stark davon abhängen. Die prozentuale Aufteilung ist in Abbildung 8 dargestellt¹. Deutlich sichtbar ist, dass der auf Autobahnen gefahrene Anteil seit 1990 stark zugenommen hat (von knapp 50% 1990 auf über 60% heute). Diese Zunahme geht ausschliesslich auf das Konto des Verkehrs ausserorts, innerorts werden seit 1990 immer 20% der Fahrleistung erbracht.

Abbildung 9 zeigt die Aufteilung der Fahrleistung nach Euro-Norm. Die neueste Fahrzeuggeneration ersetzt nicht nur rasch ältere Lastwagen, sie wird auch überdurchschnittlich oft eingesetzt. So betrug der Anteil an Euro-III Lastwagen 2005 34% der inländischen Flotte, es wurde aber bereits 61% der Fahrleistung mit diesem Typ absolviert, 2010 trugen die Euro-V Lastwagen schon mehr als 50% (inländischer Flottenanteil: 28%) und 2015 die Euro-VI schon fast ein Viertel (inländischer Flottenanteil: 14%) zur Fahrleistung bei.

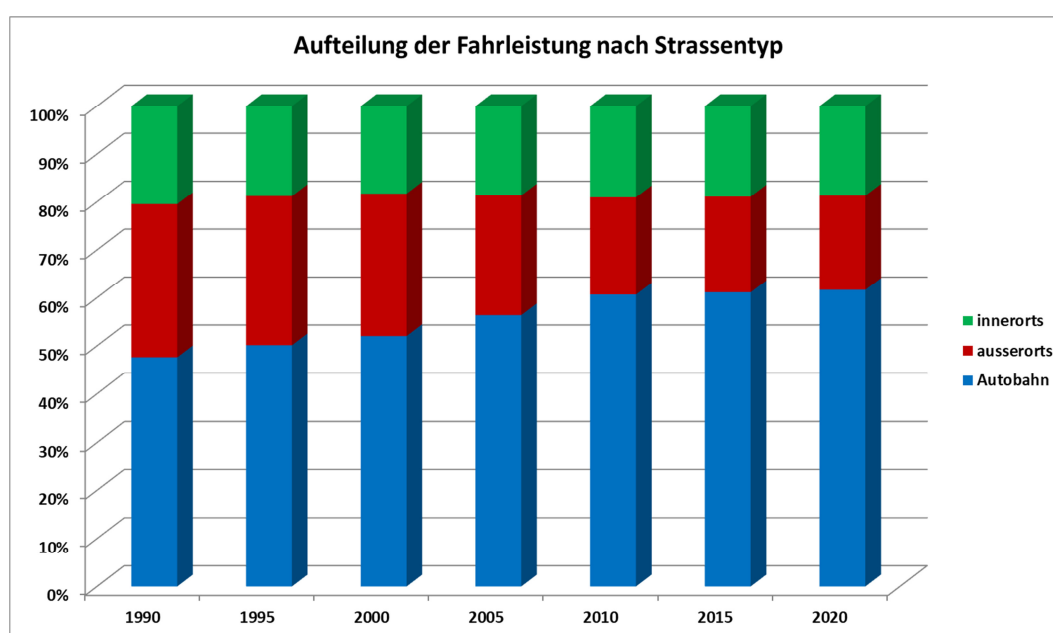


Abbildung 8: Prozentuale Aufteilung der Fahrleistung nach Strassentyp. Datenbasis: Bundesamt für Statistik, Bundesamt für Umwelt.

¹ Diese Aufteilung beruht auf einer Rückrechnung der Emissionen nach Strassentyp gemäss [4], die abgeleiteten Zahlen summieren zu den Fahrleistungen nach Angabe des Bundesamtes für Statistik.

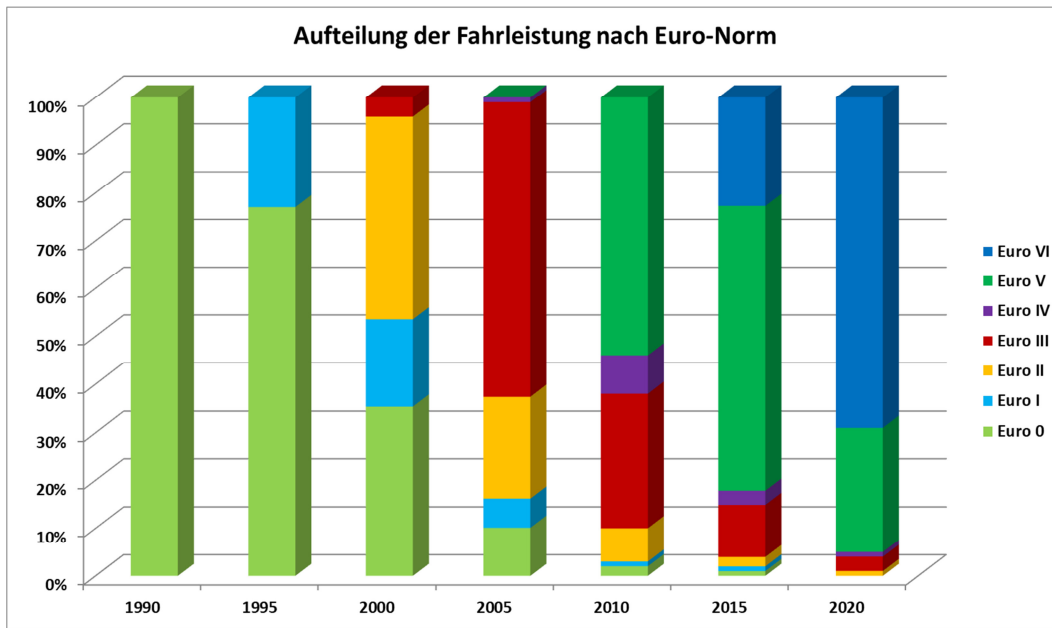


Abbildung 9: Prozentuale Aufteilung der Fahrleistung nach Euro-Norm. Datenbasis: Bundesamt für Statistik, Bundesamt für Umwelt.

Betrachtet man schliesslich die Fahrleistung nach Distanzklassen, ergibt sich für die letzten 10 Jahre ein sehr konstantes Bild. Im Jahr 2016 wird vom BFS folgende Aufteilung des nationalen Schwerververkehrs angegeben (nur nationaler Verkehr inländischer Fahrzeuge):

Tabelle 1: Prozentuale Aufteilung der Fahrleistung inländischer Fahrzeuge im nationalen Verkehr nach Distanzklassen für das Jahr 2016. Quelle: Bundesamt für Statistik.

Distanzklasse	bis 25km	25-50km	50-100km	100-150km	150-200km	> 200km
Anteil an Fahrleistung	18%	17%	25%	16%	10%	14%

Seit 2008 haben sich diese Zahlen kaum verändert (Schwankungen bis maximal 2%).

Ein nicht unwichtiger Beitrag zum Binnengüterverkehr sind die leichten Güterfahrzeuge (Fahrzeuge bis 3.5t, v.a. Lieferwagen). Die Anzahl Lieferwagen hat in den vergangenen Jahren zugenommen, ihre Fahrleistung liegt inzwischen fast doppelt so hoch wie diejenige der schweren Nutzfahrzeuge [13]. Sie erbringen damit aber nur rund 6% der Transportleistung im Strassengüterverkehr. Leichte Güterfahrzeuge werden in diesem Bericht nicht behandelt.

2.4 Emissionen des schweren Nutzfahrzeugverkehrs

2.4.1 Methodik

Die Darstellung der gesamten Emissionen des schweren Nutzfahrzeugverkehrs von 1990 bis heute stützt sich auf die Zahlen des Berichts [4]. Aus den umfangreichen Datenreihen des Berichtes wurden diejenigen Zahlen ausgewählt, welche die Entwicklung der Emissionen des schweren Nutzfahrzeugverkehrs exemplarisch darstellen. Die Emissionen des Treibhausgases Kohlendioxid (CO₂) werden vergleichend mit den Emissionen der Luftschadstoffe Stickoxid (NO_x) und Feinstaub (PN) dargestellt. Da die Emissionen dieser drei Stoffgruppen in absoluten Zahlen völlig unterschiedlich sind, wird in der grafischen Darstellung meist mit relativen Zahlen (Prozenten) gerechnet.

Anmerkung zum Feinstaub: Feinstaub kann entweder über seine Masse (PM gemessen in µg/m³) oder über die Anzahl (PN gemessen in # Partikel/m³) bestimmt werden. In der Schweiz wird der Feinstaub emissions- und immissionsseitig über Grenzwerte der Partikelmasse von PM10 (Staubpartikel mit weniger als 10 Mikrometer Durchmesser) reglementiert [14]. Es gibt aber deutliche Studienresultate, dass besonders feine Staubpartikel schädlich sind, die zur Masse kaum beitragen [15]. Der Bundesrat hat daher im Juni 2018 in der LRV neu einen Immissionsgrenzwert für PM2.5 (Partikel mit einem Durchmesser von weniger als 2.5 Mikrometer) aufgenommen. Da in den Studien des BAFU Emissionen von PM2.5 noch nicht ausgewiesen werden, wird im vorliegenden Bericht konsequent die Partikelanzahl von PM10 abgestützt.

Emissionen vs. Emissionsfaktoren: Im Bericht [4] werden die zwei üblichen Konzepte der Emissionen und Emissionsfaktoren aufgeschlüsselt nach diversen Kriterien aufgelistet. Die Emissionen geben an, wieviel CO₂ (bzw. NO_x oder PN) pro Jahr emittiert werden. Die Emissionsfaktoren geben die Emissionen auf dem Niveau des Einzelfahrzeuges in Gramm CO₂ pro gefahrenen Kilometer an. Die beiden Grössen hängen über die Fahrleistung zusammen:

$$\text{Emission} = \text{Emissionsfaktor} \times \text{Fahrleistung}$$

Die im Bericht [4] angegebenen Emissionsfaktoren und Emissionen hängen von folgenden Grössen ab:

- Verkehrssituation: Strassentyp, Umgebung (ländlich, Agglomeration, Stadt), Höchstgeschwindigkeit, Betriebszustand (flüssiger, dichter, gesättigter Verkehr, Stau)
- Gefälle
- Fahrzeugtyp: Art des Fahrzeuges (Solo-LKW, Lastenzug, Sattelzug), Gewichtsklasse und Beladung, Antriebskonzept (Euro-Norm)

In der Datenbank HBEFA (siehe Infobox auf Seite 14) wird für jede Kombination dieser Parameter ein Emissionsfaktor pro Emittenten (Treibhausgas, Schadstoff) hinterlegt. In einem „bottom-up“ Modell wird die Fahrleistung zu jedem Emissionsfaktor bestimmt und zu einer Gesamtemission

zusammengefügt. Auf dieselbe Weise können auch aggregierte Emissionsfaktoren (z.B. der mittlere Emissionsfaktor schwerer Nutzfahrzeuge auf der Autobahn) berechnet werden.

Biogene Treibstoffe: Alternative Treibstoffe aus erneuerbaren Quellen wie Biogas oder Biodiesel spielen in der Diskussion um die Reduktion der Treibhausgasemissionen des Strassenverkehrs eine wichtige Rolle. Gemäss Kyoto-Protokoll gelten diese Treibstoffe im Betrieb als CO₂-frei, ihre Herstellung ist aber auch mit Treibhausgasemissionen verbunden und kann zudem zu weiteren Umweltschäden führen.

Biogene Treibstoffe spielen heute in der Schweiz eine untergeordnete Rolle, ihr Anteil am gesamten Energieverbrauch des Verkehrs liegt unter 3%, bis 2035 wird ein Anstieg auf rund 6.5% prognostiziert [4]. Beim schweren Nutzfahrzeugverkehr stammen heute über 96% der CO₂-Emissionen aus fossilen Treibstoffen, bis 2035 soll dieser Anteil auf rund 91% sinken.

Die Berücksichtigung eines allfälligen Minderungspotentials von biogenen Treibstoffen ist nur über eine Gesamtschau möglich, die auch die Herstellung der Treibstoffe einbezieht. Dies sprengt den Rahmen der vorliegenden Studie. Daher wird im Folgenden immer auf die totalen CO₂-Emissionen abgestützt.

2.4.2 Emissionen im gesamtschweizerischen Kontext

Die Treibhausgasemissionen des Strassenverkehrs haben seit 1990 im gesamtschweizerischen Kontext an Bedeutung gewonnen. Abbildung 10 zeigt die Entwicklung der Emissionen des Strassenverkehrs (gemäss [4]) zusammen mit denen der ganzen Schweiz (gemäss [10]) für CO₂ und [16] für NO_x). Ergänzend zu dieser Abbildung ist folgendes anzumerken:

- Die in Abbildung 10 dargestellten CO₂-Emissionen machen rund 83% der gesamten Treibhausgasemissionen (gerechnet in CO₂-Äquivalenten gemäss IPCC) aus. Zwischen 2010 und 2015 ist dieser Wert leicht von 83% auf 81% gesunken. Betrachtet man die gesamten Treibhausgasemissionen, fällt die Abnahme der Gesamtemission zwischen 2010 und 2015 daher leicht geringer aus.
- Im gesamten Transportsektor (ohne internationalen Luftverkehr) stieg der Anteil der CO₂-Emissionen an den gesamten Treibhausgasemissionen von gut 98% auf über 99%. Andere Treibhausgase als CO₂ sind im Transportsektor also vernachlässigbar.
- Die vom Strassenverkehr verursachten CO₂-Emissionen trugen 1990 rund 30% zu den gesamten CO₂-Emissionen bei. Bis zum Jahr 2015 nahmen die Emissionen des Strassenverkehrs um knapp 1'500kt oder gut 10% der Emission von 1990 zu. Da die gesamten Treibhausgasemissionen abnahmen, beträgt der Anteil des Strassenverkehrs an den gesamten CO₂-Emissionen heute bereits 38%.
- Bei den Stickoxiden zeigt sich im Gegensatz zu den Treibhausgasen eine parallele Entwicklung der Gesamtemissionen und der Emissionen des Strassenverkehrs. In beiden Fällen liegen die Emissionen 2015 unter 50% der Emissionen von 1990. Der Beitrag des Strassenverkehrs zu den Gesamtemissionen blieb dabei recht konstant zwischen 50% und 60%.

- Betrachtet man die Zeitspanne 1990 bis 2020 liegt der Anteil der SNF an den CO₂-Emissionen des Strassenverkehrs praktisch konstant bei einem Achtel. Der Anteil der Personenwagen hat leicht von rund 80% auf rund 75% abgenommen, dies ist vor allem auf die Zunahme bei den leichten Nutzfahrzeugen zurückzuführen. Der Anteil des SNF an den gesamten CO₂-Emissionen hat also seit 1990 um ca. 1% von knapp 3% auf knapp 4% zugenommen.
- Wiederum gegenläufig ist die Entwicklung bei den Luftschadstoffen, hier hat die Relevanz des schweren Nutzfahrzeugverkehrs seit 1990 klar abgenommen. So trug der SNF 1990 noch rund 30% zu den NO_x- und PN-Emissionen des Strassenverkehrs bei, 2020 liegen diese Anteile nur noch bei rund 12%. Zugenommen haben hingegen die Anteile der Personenwagen und bei den Stickoxiden auch der leichten Nutzfahrzeuge. Entscheidend ist hier die heute weitere Verbreitung von Dieselmotoren bei leichten Motorfahrzeugen. Bezogen auf die gesamten Stickoxidemissionen der Schweiz hat der Anteil des schweren Nutzfahrzeugverkehrs also seit 1990 von rund 17% auf gut 6% abgenommen.

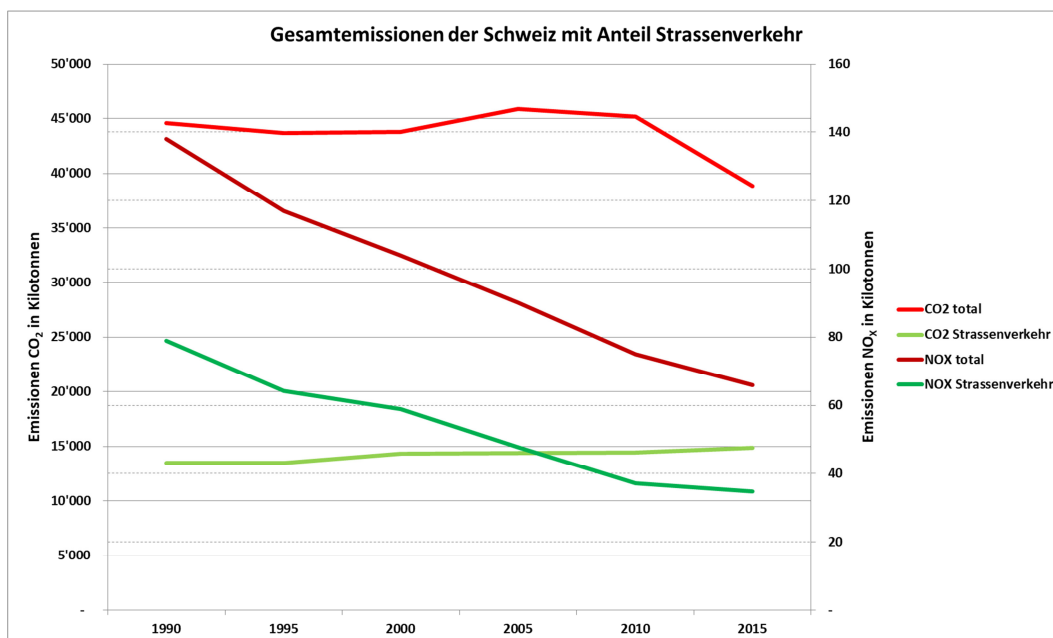


Abbildung 10: Entwicklung der gesamten Emissionen der Schweiz in Kilotonnen (rot) mit dem Anteil Strassenverkehr (grün). Helle Farben: CO₂, linke Skala. Dunkle Farben: NO_x, rechte Skala. Stand 1990 = 100%. Quelle: Bundesamt für Umwelt, Bundesamt für Statistik.

Der Vergleich der Emissionsfaktoren von Personenwagen und schweren Nutzfahrzeugen (Durchschnitt aller immatrikulierten Fahrzeuge und aller Betriebszustände) zeigt dasselbe Bild in verstärktem Ausmass. Beim CO₂ hat die durchschnittliche Emission pro gefahrenen Kilometer für Personenwagen seit 1990 um gut 20% abgenommen (von 250g/km im Jahr 1990 auf 196g/km im Jahr 2020). Bei den schweren Nutzfahrzeugen beträgt die Abnahme einzig gut 5% (von 830g/km auf 779g/km). Bei den Luftschadstoffen hingegen haben die Emissionsfaktoren der

SNF seit Mitte der Nullerjahre stark abgenommen, so dass die Reduktion gegenüber 1990 heute stärker ausfällt als bei den Personenwagen. So konnte die mittlere Emission von NO_x beim SNF von knapp 12g/km im Jahr 1990 um fast 80% auf unter 1.4g/km gesenkt werden. Bei den Personenwagen beträgt die Abnahme nur knapp 70% von rund 1.1g/km (1990) auf 0.33g/km (2020). Wiederum zeigt sich deutlich der Einfluss des höheren Anteils von Dieselfahrzeugen, welcher den Emissionsfaktor von Personenwagen zwischen 2010 und 2015 sogar ansteigen liess.

Die Diskrepanz zwischen den absoluten Emissionen und den Emissionsfaktoren liegt in der Entwicklung der Fahrleistung. Die Fahrleistung von Personenwagen hat seit 1990 von 42.6 Mrd Fahrzeugkilometern um fast ein Drittel auf 56.6 Mrd Fahrzeugkilometer in Jahr 2020 zugenommen. Demgegenüber beträgt die Zunahme bei den SNF weniger als 20% (von knapp 2 Mrd Fahrzeugkilometern auf knapp 2.4 Mrd Fahrzeugkilometer, siehe Abbildung 6).

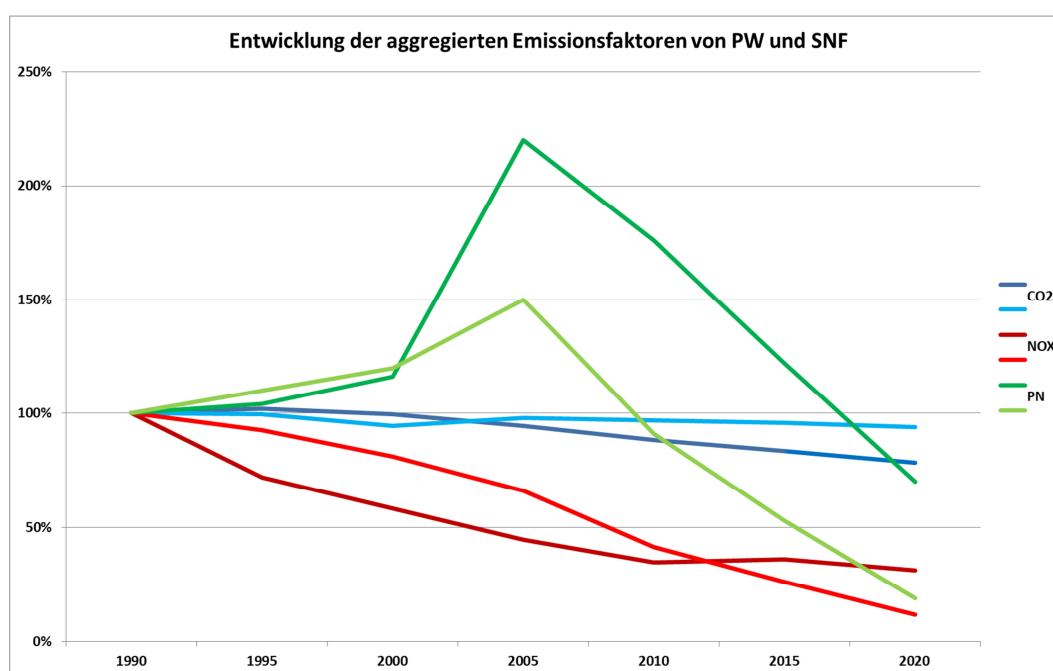


Abbildung 11: Entwicklung der über alle Parameter aggregierten Emissionsfaktoren von Personenwagen (dunkle Farben) und schweren Nutzfahrzeugen (helle Farben). Stand 1990 = 100%. Datenbasis: Bundesamt für Umwelt.

2.4.3 Entwicklung der Emissionen des SNF im Detail

Die Entwicklung der Gesamtemissionen schwerer Nutzfahrzeuge ist in Abbildung 12 dargestellt. Es zeigt sich, dass die CO₂-Emissionen zugenommen haben, sie liegen heute rund 10% über dem Wert von 1990. Die Emissionen von Stickoxiden haben seit 1990 dank verschärften Emissionsgrenzwerten und der Entwicklung der Motorentechnologie stark abgenommen. Sie liegen heute gesamtschweizerisch unter 20% des Wertes von 1990. Beim Feinstaub (Partikelzahl) kam es bis 2005 zu einer starken Zunahme der Emissionen. Verantwortlich dafür sind in erster Linie

die Lastwagen der Kategorie Euro-III. Mit der effizienteren Verbrennungstechnologie wurden in der Gesamtmasse weniger, dafür aber viel feinere Staubpartikel emittiert. Es kam daher zu einer Abnahme der Partikelmasse (PM) bei einer gleichzeitig starken Zunahme der Partikelanzahl (PN). Ab Euro-IV wurden die Abgasgrenzwerte soweit verschärft, dass wirksame Partikelfilter unumgänglich wurden. In der Folge sanken die Emissionen in relativ kurzer Zeit stark ab. Die PN-Emissionen liegen heute noch knapp über 20% der Emissionen von 1990.

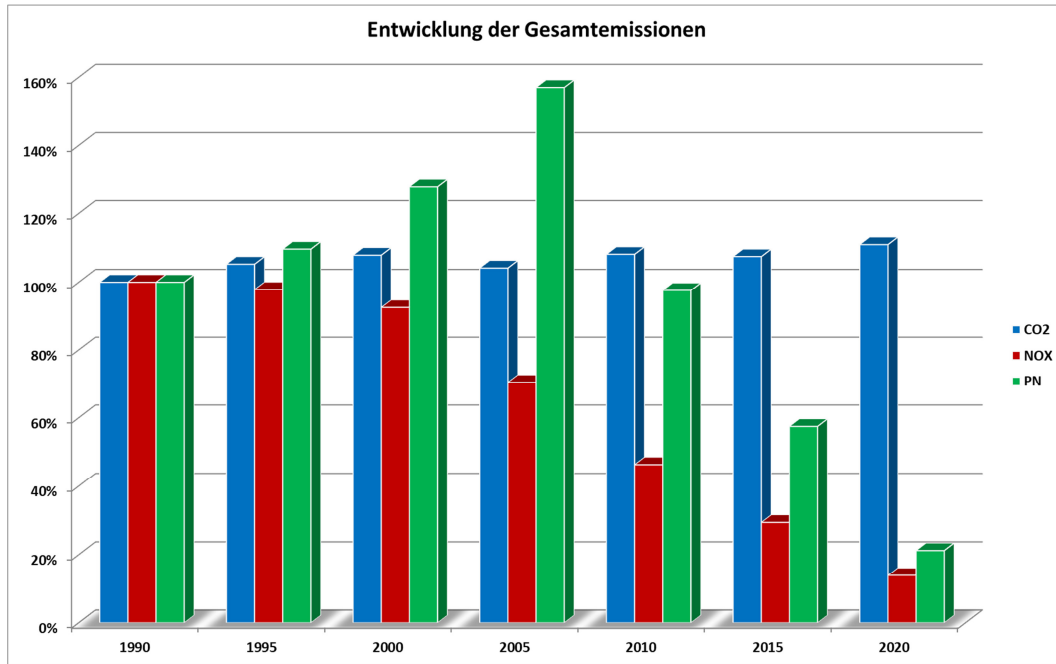


Abbildung 12: Entwicklung der gesamten Emissionen des schweren Nutzfahrzeugverkehrs. Stand 1990 = 100%. Quelle: Bundesamt für Umwelt.

Die Zunahme der Gesamtemissionen von CO₂ ist auch durch die Zunahme der Fahr- und Transportleistungen bedingt. Dies ist in Abbildung 13 sichtbar². Bezogen auf die Fahrleistung ist der Emissionsfaktor seit 1990 fast konstant geblieben, die CO₂-Emissionen nahmen also in derselben Masse zu, wie mehr Kilometer mit schweren Nutzfahrzeugen gefahren wurden. Allerdings hat die mittlere Ladung pro gefahrenen Kilometer wegen der Aufhebung der 28t Limite zugenommen, bezogen auf die Tonnenkilometer haben die Emissionen daher seit 1990 abgenommen. Um eine Tonne Güter einen Kilometer weit zu transportieren, wird 2020 nur noch rund 70% so viel CO₂ emittiert wie 1990. Diese Reduktion ist im Vergleich zu den Luftschadstoffen aber gering: bei den Stickoxiden liegt dieser Wert 2020 noch bei rund 10%, bei der Partikelzahl

² Die Emissionsfaktoren bezogen auf einen Tonnenkilometer wurden aus der Transportleistung gemäss BFS und den Gesamtemissionen berechnet. Da die Transportleistung 2020 im Bericht [4] nicht ausgewiesen wird, wurde in Übereinstimmung mit den Berichten [17], [9] davon ausgegangen, dass sich die mittlere Fracht zwischen 2015 und 2020 nicht verändert.

bei rund 15% (Transportleistung). Die Fortschritte beim CO₂ sind also um mindestens einen Faktor 2.5 kleiner als bei den Luftschadstoffen.

Betrachtet man die Emissionsfaktoren nach Strassentyp, sieht man bei CO₂ eine recht flache Entwicklung (Abbildung 14). Im Verkehr auf der Autobahn und ausserorts haben sich die Emissionsfaktoren gar nicht verändert, innerorts ist eine leichte Abnahme zu verzeichnen (2020 noch gut 90% des Wertes von 1990; bezogen auf die Transportleistung ergibt sich auch auf der Autobahn eine Abnahme, da die mittlere Ladung dort stark zugenommen hat, s. oben). Im Gegensatz dazu nahmen die Emissionen von Stickoxiden auf der Autobahn am stärksten ab, sie betragen heute noch rund 10% des Wertes von 1990. Die Fortschritte in der Motorentechnologie sowie die Abgasreinigung kommen bei der relativ gleichmässigen Fahrweise auf der Autobahn am stärksten zum Tragen.

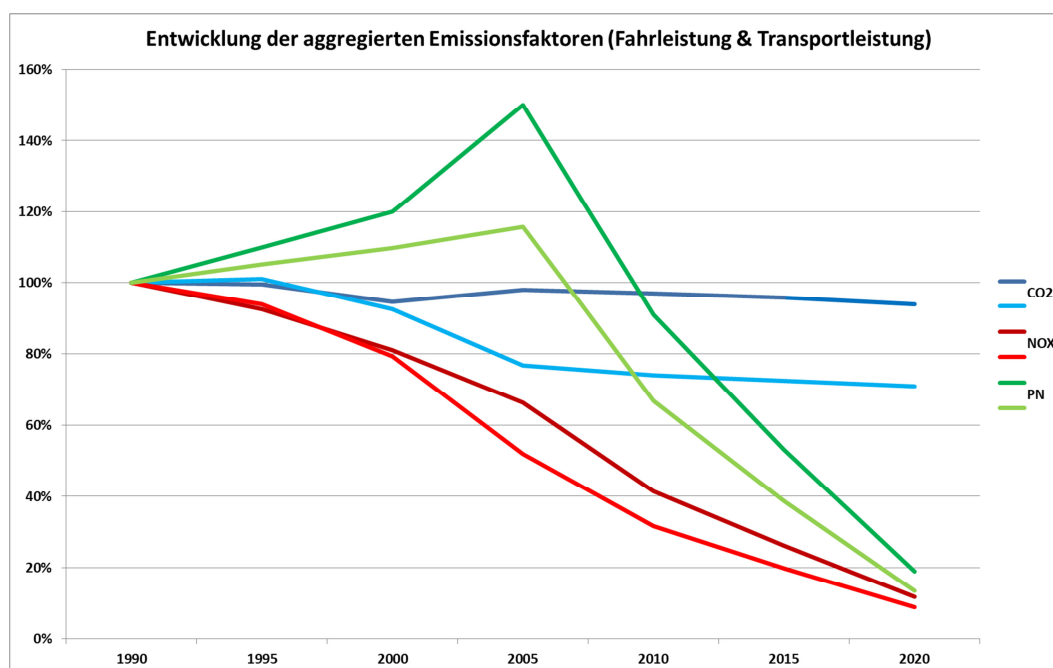


Abbildung 13: Entwicklung der über alle Parameter aggregierten Emissionsfaktoren bezogen auf die Fahrleistung (dunkle Farben) und die Transportleistung (helle Farben). Stand 1990 = 100%. Datenbasis: Bundesamt für Umwelt, Bundesamt für Statistik.

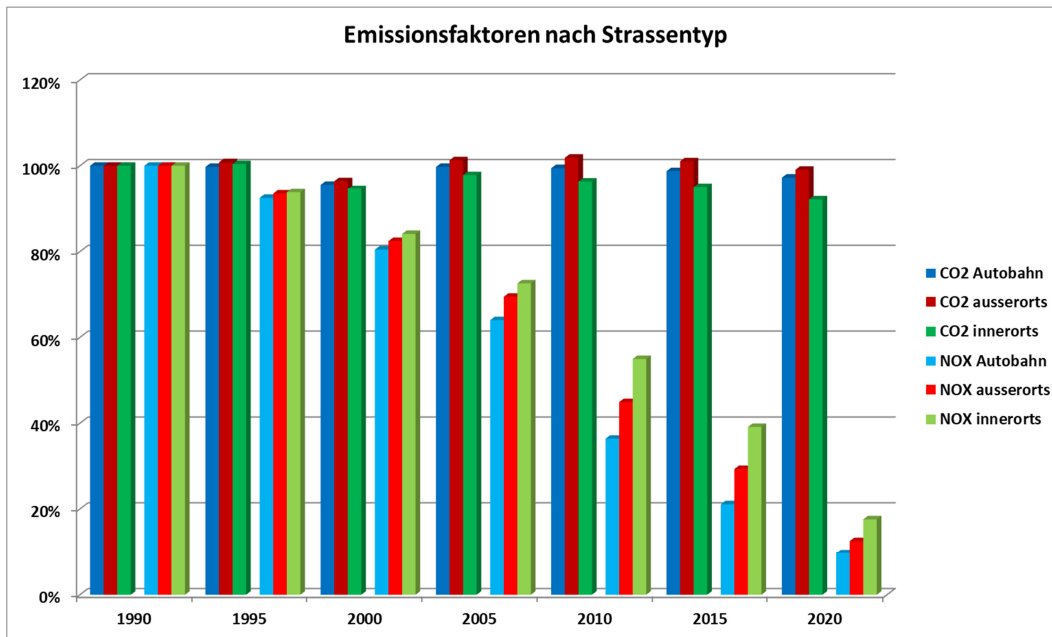


Abbildung 14: Entwicklung der Emissionsfaktoren aufgeteilt nach Strassentyp. CO₂=dunkle Farben, NO_x=helle Farben. Stand 1990 = 100%. Quelle: Bundesamt für Umwelt.

Die Minderung der Schadstoffemissionen wurde durch die Verschärfung der Emissionsgrenzwerte (Euro-Normen) forciert. Die Aufteilung der Emissionen nach Euro-Normen (Abbildung 15) zeigt auf, dass sich neue Euro-Normen rasch durchsetzen und damit zu einer Abnahme der Luftschadstoffemissionen beitragen. Vergleicht man den Fahrzeugbestand (Abbildung 1), die Fahrleistung (Abbildung 9) und die Emissionen von CO₂ und NO_x für die Jahre 2005, 2010 und 2015 ergibt sich folgendes Bild:

Tabelle 2: Anteile verschiedener Euro-Normen am Fahrzeugbestand, der Fahrleistung und den Emissionen für die Jahre 2005, 2010 und 2015. Da Fahrzeuge der Kategorie Euro-IV nie mehr als 10% des Fahrzeugbestandes ausmachten, wurden sie in der Tabelle weggelassen. Quelle: Bundesamt für Statistik, Bundesamt für Umwelt.

		2005	2010	2015
Euro-III	Bestand	37%	32%	16%
	Fahrleistung	61%	28%	11%
	Emission CO ₂	62%	27%	11%
	Emission NO _x	55%	37%	24%
Euro-V	Bestand		32%	47%
	Fahrleistung		54%	60%
	Emission CO ₂		55%	60%
	Emission NO _x		36%	62%
Euro-VI	Bestand			16%
	Fahrleistung			23%
	Emission CO ₂			24%
	Emission NO _x			3%

Wie schon bei der Fahrleistung festgestellt, zeigt diese Tabelle erneut, dass Lastwagen der jeweils neusten Abgasnorm nicht nur rasch im Bestand zunehmen, sondern auch häufiger eingesetzt werden als ältere Lastwagen. Die anteilmässigen CO₂-Emissionen stimmen dabei mit dem Anteil der Fahrleistung überein. Dies zeigt erneut, dass die Emissionsfaktoren bezogen auf die Fahrleistung beim CO₂ kaum Fortschritte machen. Demgegenüber sind die anteilmässigen NO_x-Emissionen bei den Fahrzeugen der jeweils neusten Generation unterdurchschnittlich.

Die Entwicklung lässt sich gut anhand der Euro-III Lastwagen aufzeigen: 2005 waren deren NO_x-Emissionen leicht unterdurchschnittlich, da diese Fahrzeuge besser waren als die älteren Euro-0 bis Euro-II. Nach der Einführung der Euro-IV und Euro-V Normen reduzierte sich die Gesamtemission von Stickoxiden (Abbildung 12), so dass die Euro-III Fahrzeuge nun bereits für einen überdurchschnittlichen Anteil am Luftschadstoff verantwortlich waren. Dies verschärfte sich nochmals mit Einführung von Euro-VI. Demgegenüber bleibt die Entwicklung beim CO₂ flach, dessen Anteil entspricht über die zehn Jahre immer dem Anteil der Fahrleistung.

Besonders deutlich ist der Unterschied zwischen Treibhausgas- und Schadstoffemissionen bei den Euro-VI Lastwagen, die 2015 bei einem Fahrleistungsanteil von 23% nur 3% des gesamten NO_x aber fast ein Viertel des CO₂ emittieren. Die Diskrepanz zwischen Schadstoffen und Treibhausgasen hat sich also stark vergrössert, von einem fast gleichen Beitrag bei den Euro-III im Jahr 2005 zu einem Faktor 8 bei den Euro VI zugunsten der Luftschadstoffe im Jahr 2015.

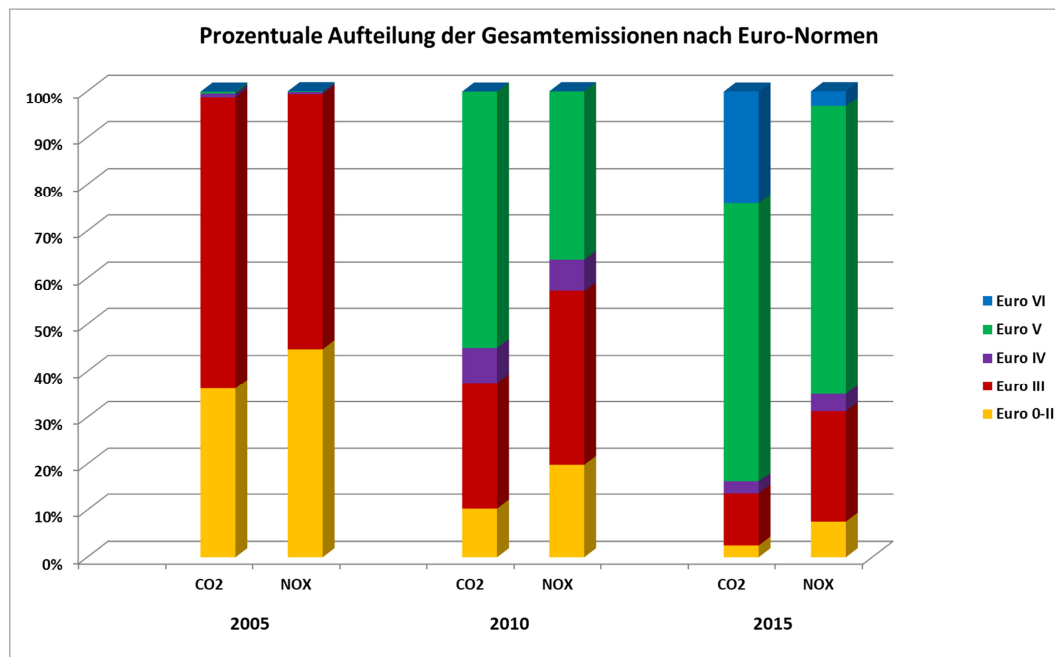


Abbildung 15: Aufteilung der gesamten Emissionen auf die verschiedenen Euro-Normen. Quelle: Bundesamt für Umwelt.

Der Verdacht, dass sich die Diskrepanz zwischen CO₂ und NO_x-Emissionen von einer Euro-Norm zur nächsten vergrössert, bestätigt sich auch mit Blick auf die Emissionsfaktoren. Tabelle 3

zeigt die Emissionsfaktoren der wichtigsten Euro-Normen der Bezugsjahre 2005, 2010 und 2015. Die CO₂-Emissionen bleiben im Wesentlichen konstant, beim NO_x zeigt sich eine beschleunigte Abnahme. So emittierte ein Euro IV 2005 und 2010 noch rund zwei Drittel der Stickoxide eines Euro III, ein Euro V 2010 noch die Hälfte eines Euro III oder 80% eines Euro IV. Euro VI bringt demgegenüber eine noch grössere Reduktion, er verbessert sich gegenüber dem Euro V um einen Faktor 7!

Tabelle 3: Ausgewählte aggregierte Emissionsfaktoren der Bezugsjahre 2005, 2010 und 2015. Quelle: Bundesamt für Umwelt. Die Emissionsfaktoren derselben Euro-Norm sind zeitlich nicht konstant, da sich die Gewichtungsfaktoren der aggregierten Emissionen (Aufteilung nach Gewichtsklassen, Strassentyp, Betriebszustand etc.) verändern.

Bezugsjahr	CO ₂ [g/km]			NO _x [g/km]		
	2005	2010	2015	2005	2010	2015
Euro III	829	789		6.9	6.5	
Euro IV	851	762		4.6	4.1	
Euro V		822	796		3.3	3.2
Euro VI			813			0.43

2.5 Beispiel: Die Emissionsfaktoren eines Sattelzuges 34-40t

Die obigen Betrachtungen lassen ausser Acht, dass sich moderne Fahrzeuge in der obersten Gewichtsklasse (Sattelzüge) schneller durchsetzen als bei leichteren Fahrzeugen [13]. Es werden daher beispielhaft die Emissionsfaktoren eines Lastenzuges oder Sattelzuges der Gewichtsklasse 34-40t für verschiedene Euro-Normen verglichen. Diese Fahrzeugklasse ist im Verkehr über lange Distanzen besonders wichtig, sie macht aktuell ca. 40% der Fahrleistung des schweren Nutzfahrzeugverkehrs aus [3].

Abbildung 16 zeigt die Emissionsfaktoren dieser Fahrzeugklasse aufgeteilt nach Strassentyp und Euro-Norm. Die Faktoren sind immer noch aggregiert über die verschiedenen Steigungen, Betriebszustände der Strasse sowie die Beladung des Lastenzuges. Abbildung 17 zeigt dieselben Faktoren relativ bezogen auf die Emissionen eines Fahrzeuges Typ 80er Jahre (Euro-0) derselben Klasse.

Abbildung 16 zeigt, dass die Lastenzüge am effizientesten auf der Autobahn fahren. Die tendenziell ruhige Fahrweise führt trotz höherer Geschwindigkeit zu geringerem Dieserverbrauch und teils markant geringerem Stickoxidausstoss. Betrachtet man die Entwicklung über die verschiedenen Euro-Normen, schneiden beim CO₂ die ältesten Fahrzeuge (Euro-0) klar am schlechtesten ab, zwischen den anderen Normen gibt es keine grösseren Unterschiede. Im Gegensatz dazu ist die Entwicklung bei den Stickoxiden sehr deutlich sichtbar, wobei einige Situationen herausstechen. So schneiden Lastwagen der Kategorie Euro-IV und Euro-V mit Abgaskatalysator (SCR) innerorts vergleichsweise schlecht ab, haben dafür auf der Autobahn geringere Emissionen als die alternative Technologie der Abgasrückführung (EGR).

Auch die prozentuale Darstellung derselben Faktoren in Abbildung 17 zeigt, dass insgesamt nur bescheidene Effizienzgewinne erzielt werden konnten, die zu einer Minderung der CO₂-Emissionen führen könnten. Der rechnerisch beste Wert wird innerorts mit einem Lastwagen Euro-IV mit SCR-Technologie erreicht³ (80% der Emissionen eines Euro-0 Lastenzuges auf derselben Strasse), auf der Autobahn mit einem Euro-V mit SCR-Technologie (85% des Wertes eines Euro-0). Beim NO_x liegen die Werte eines Euro-VI dagegen im tiefen einstelligen Prozentbereich verglichen mit dem Euro-0.

EGR und SCR: Bei den Lastwagen des Typs Euro-IV und Euro-V werden zwei Technologien zur Reduktion der Stickoxide eingesetzt. Bei dem häufigeren SCR (selective catalytic reduction) wird Harnstoff (Markenname „AdBlue®“) in den Abgasstrahl eingedüst und mit dessen Hilfe die Stickoxide in einem Katalysator abgebaut. Beim EGR (exhaust gas recirculation) wird ein Teil der Abgase gekühlt zurück in den Zylinder geführt. Dadurch reduziert sich die Verbrennungstemperatur, was die Entstehung von Stickoxiden vermindert. EGR hat den Vorteil, dass das System in sich geschlossen ist, es führt aber gegenüber dem SCR zu einem erhöhten Treibstoffbedarf und erhöhten PM-Emissionen (letztere werden aber im Abgasfilter wieder gemindert). Die Abgasnorm von Euro-VI kann mit EGR nicht mehr erfüllt werden, die SCR-Technologie ist daher heute Standard.

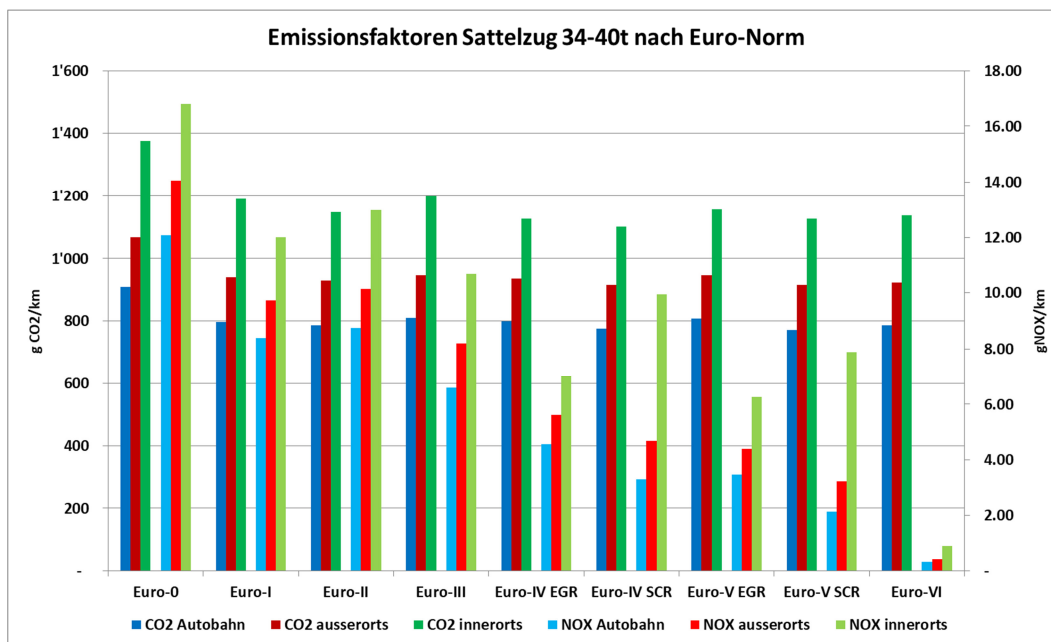


Abbildung 16: Emissionsfaktoren eines Sattelzuges 34-40t aufgeteilt nach Euro-Norm und Strassentyp. Dunkle Farben und linke Achse: CO₂. Helle Farben und rechte Achse: NO_x. Bezugsjahr: 2015. Quelle: HBEFA Version 3.3.

³ Obwohl die Effizienzgewinne innerorts grösser sind als ausserorts oder auf Autobahnen, bleiben die absoluten Werte innerorts auf jeden Fall am grössten (vgl. Abbildung 16).

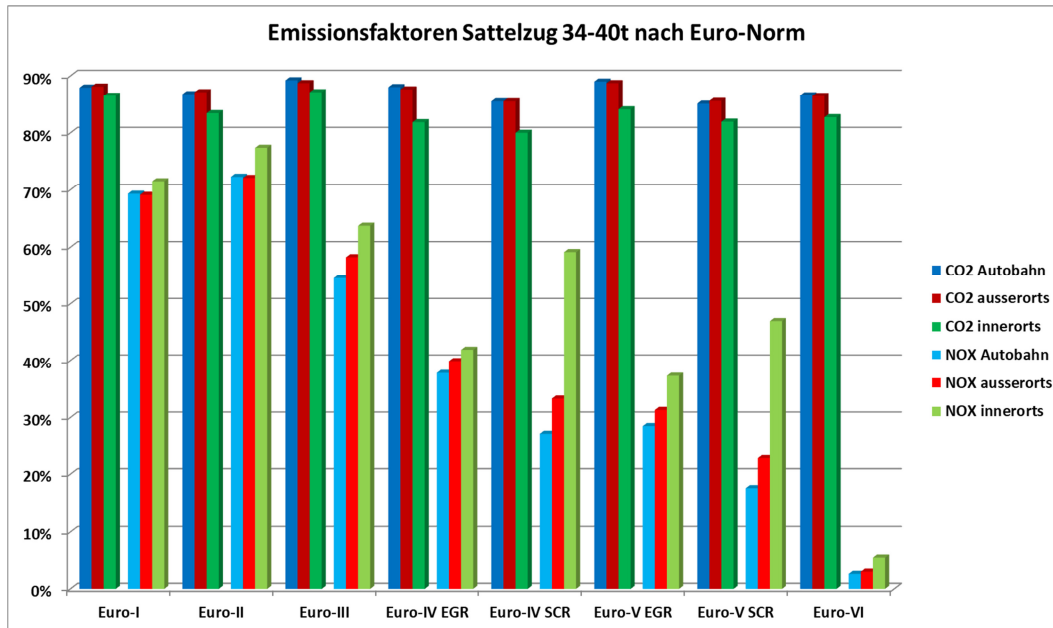


Abbildung 17: Emissionsfaktoren eines Sattelzuges 34-40t aufgeteilt nach Euro-Norm und Strassentyp.
 Bezugsjahr: 2015. 100% = Emissionsfaktor des Strassentyps für Euro-0 (Lastwagen Typ 80er Jahre). Quelle: HBEFA Version 3.3.

Die Emissionsfaktoren von Abbildung 16 und Abbildung 17 sind immer noch über diverse Untertypen von Strassen und Verkehrssituationen aggregiert. Die Situation soll mit einem spezifischen Emissionsfaktor noch genauer analysiert werden. Als Szenario wurde für den Langstreckenverkehr eine Autobahn in ländlicher Gegend mit signalisierter Höchstgeschwindigkeit von 120km/h und flüssigem Verkehr gewählt. Gemäss aggregierter Verkehrssituation von HBEFA Version 3 [3] „CH-Autobahnen“ entfallen über 40% der Fahrleistung des schweren Nutzfahrzeugverkehrs auf Autobahnen auf diese Situation. Die Faktoren werden weiter nach der Steigung (nur flach und bergauf) differenziert. Als Fahrzeug wird weiterhin ein Sattelzug 34-40t bei mittlerer Beladung betrachtet.

Abbildung 18 zeigt, dass anfänglich (Euro-I) gerade in der Steigung recht gute Effizienzgewinne erzielt wurden. Euro-I ist gegenüber Euro-0 um 13% (flach) bis über 15% (4% Steigung) effizienter. Im Flachen blieb die Situation danach im Wesentlichen unverändert, in der Steigung hat sie sich ab Euro-III wieder klar verschlechtert. Dort ist heute rund die Hälfte der Gewinne von Euro-III zu Euro-0 wieder verschwunden.

Einen Grund für dieses Verhalten zeigt sich mit Blick auf die durchschnittlich gefahrenen Geschwindigkeiten, die im HBEFA angegeben werden: während bei einem Euro-0 oder Euro-I Lastwagen bei 4% Steigung noch eine Geschwindigkeit von ca. 64km/h angenommen wird, soll

dieser Wert bei einem Euro-V 73km/h und bei einem Euro-VI sogar 77km/h betragen⁴. Die in der Motorentechnologie durchaus erzielten Effizienzgewinne werden also teilweise durch eine stärkere Motorisierung wieder zunichtegemacht.

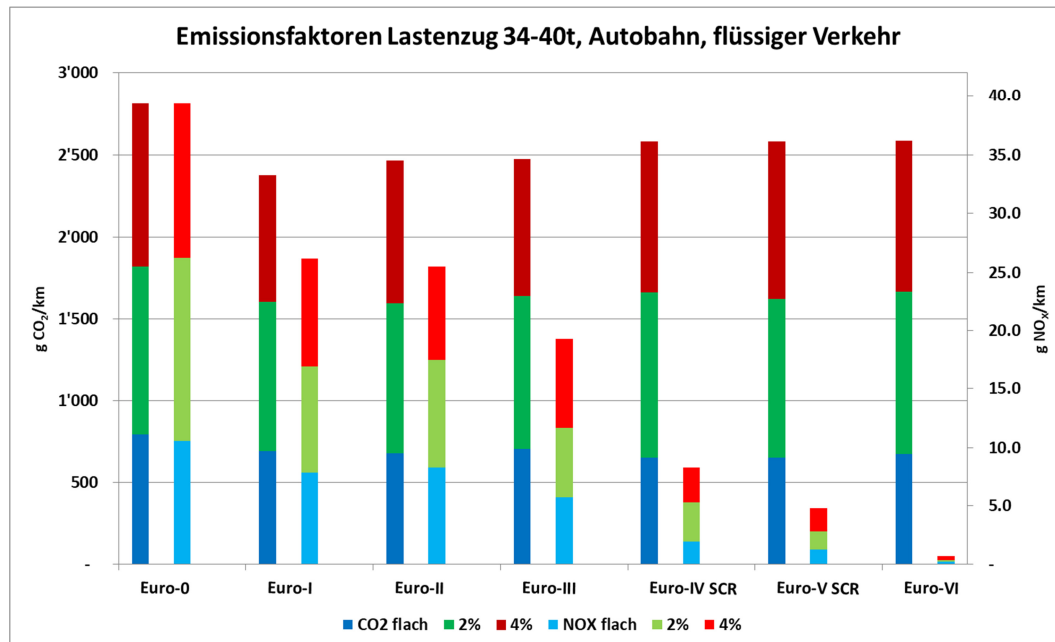


Abbildung 18: Emissionsfaktoren eines Lastenzuges 34-40t auf der Autobahn bei flüssigem Verkehr und mittlerer Beladung. Blau=flach, grün=2% Steigung, rot=4% Steigung. Linke Skala, dunkle Farben=CO₂, rechte Skala, helle Farben=NO_x. Quelle: HBEFA Version 3.3.

⁴ Diese mittleren Geschwindigkeiten stammen aus dem in HBEFA verwendeten Modell PHEM (siehe Infobox auf Seite 6) und basieren auf Messungen der Motorencharakteristik der getesteten Fahrzeuge. Die Geschwindigkeiten sind als Durchschnittswerte technisch realistisch, berücksichtigen aber keine Eigenheiten der Strasse im Einzelfall.

2.6 Fazit Entwicklung 1990 bis 2020

- Die CO₂-Emissionen des schweren Nutzfahrzeugverkehrs haben seit 1990 um ca. 10% zugenommen, die Emissionen der wichtigsten Luftschadstoffe (NO_x und PN) haben in demselben Zeitrahmen um 80% und mehr abgenommen.
- Die Bedeutung der CO₂-Emissionen der SNF nahm tendenziell zu, diejenige der Schadstoffe eindeutig ab:
Der Anteil des schweren Nutzfahrzeugverkehrs an den CO₂-Emissionen des Strassenverkehrs liegt konstant bei einem Achtel, bei den Luftschadstoffen wurde dieser Anteil von 30% auf 12% gesenkt.
Gemessen an den gesamten CO₂-Emissionen der Schweiz hat der Anteil der SNF um ca. 1% von knapp 3% (1990) auf knapp 4% (2020) zugenommen, bei den Stickoxiden hat dieser Wert von 17% auf 6% abgenommen.
- Die CO₂ Emissionen sind pro gefahrenen Kilometer (Fahrleistung) seit 1990 konstant geblieben, pro transportierte Tonne (Transportleistung) haben sie um rund 30% abgenommen (Durchschnitt inklusive Leerfahrten). Diese Entwicklung ist fast ausschliesslich auf die Aufhebung der 28t-Limite zurückzuführen.
- Die Motoren sind seit 1990 effizienter geworden, v.a. im Verkehr innerorts (rund 20% weniger CO₂) und bei hoher Motorauslastung in Steigungen. Allerdings wird ein Teil der Gewinne durch höhere Motorisierung wieder kompensiert. So nimmt der Emissionsfaktor innerorts seit der Euro-IV Norm wieder zu, auf der Autobahn in Steigungen sogar seit Euro-I (rund die Hälfte von rund 15% Gewinn gegenüber Euro-0 ist wieder verloren).
- Auch nach der Phase der Aufhebung der 28t Limite (2001 bis 2004) werden schwere Güterfahrzeuge in der Schweiz immer grösser und stärker. Trotz der Zunahme der Nutzlast steigt die mittlere Ladung seit 2007 aber nicht mehr. Der Leerfahrtenanteil liegt seit 2003 praktisch konstant bei rund einem Viertel der Fahrleistung.

3 Prognosen

„Prognosen sind äusserst schwierig, vor allem wenn sie die Zukunft betreffen“.⁵

3.1 Verkehrs- und Emissionsprognosen des Bundes

Verkehrsperspektiven werden vom Bund in regelmässigen Abständen vom Bundesamt für Raumentwicklung (ARE) in Zusammenarbeit mit anderen Bundesämtern erstellt. Der letzte Bericht des ARE wurde im August 2016 herausgegeben [17]. Aufbauend auf diesen Perspektiven wurde im Hinblick auf die Botschaft zur Totalrevision des CO₂-Gesetzes die „Pilotstudie zum Treibstoffverbrauch und den Treibhausgasemissionen im Verkehr 1990-2050“ [9] im Auftrag des BAFU verfasst. Dieselben Daten werden weiter im Bericht „Luftschadstoffemissionen des Strassenverkehrs der Schweiz 1990-2050“ [4] verwendet, um zukünftige Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen des Strassenverkehrs abzuschätzen.

Mit diesen drei Berichten liegt eine aktuelle und fundierte Prognose der künftigen Emissionen des Strassenverkehrs in der Schweiz vor. Die Qualität von Prognosen hängt aber von vielen Faktoren ab und daher soll ein kurzer Blick auf vergangene Prognosen des Bundes zu den Emissionen des schweren Nutzfahrzeugverkehrs geworfen werden.

3.1.1 Rückblick auf frühere Berichte

Da der Bericht [4] bereits der fünfte in einer Reihe ist, lassen sich Aussagen darüber machen, wie zuverlässig die Prognosen der Emissionen von Luftschadstoffen und Treibhausgasen des schweren Nutzfahrzeugverkehrs in der Vergangenheit waren.

Betrachtet man die Prognosen des Berichtes von 1995 [6] für die Jahre 2000, 2005 und 2010 fällt auf, dass die Emissionen gegenüber den heute präsentierten Zahlen dieser Jahre massiv überschätzt wurden. So liegen die Werte der Gesamtemission von CO₂ im Jahr 2010 fast doppelt so hoch wie heute angegeben, bei den Stickoxiden mehr als beim Zweieinhalbfachen. Bei den Emissionsfaktoren wurden die Emissionen von CO₂ sehr gut vorhergesagt (Abweichung kleiner 10%), die Faktoren für Stickoxide wurden in einem Szenario mit zusätzlichen Verschärfungen der Abgasgrenzwerte („Euro-III“ Szenario) für 2010 ebenfalls gut abgeschätzt, im Basisszenario hingegen um 50% überschätzt.

Die Gründe für die teils massiven Abweichungen sind:

1. Im Verkehrsmodell wurde in den 1990er-Jahren generell die Fahrleistung des schweren Nutzfahrzeugverkehrs überschätzt. Erst mit der Einführung der LSVA wurde diese Überschätzung bemerkt und korrigiert (vgl. [7]).
2. Die Weiterentwicklung der Abgasgrenzwerte und die damit verbundenen Innovationen in der Motorentechnologie und der Abgasbehandlung waren 1995 noch sehr unsicher.

⁵ Mark Twain, Winston Churchill, Kurt Tucholsky...

Die Abgasnorm Euro-III war noch nicht beschlossen. Entsprechend ging das Basisszenario von zu hohen Stickoxidemissionen aus.

3. Die Ableitung der Verkehrsentwicklung erfolgte unter der Annahme unveränderter ordnungspolitischer Rahmenbedingungen. Entsprechend wurde die Fortführung der 28t-Limite angenommen.

Betrachtet man den nachfolgenden Bericht des Jahres 2004 [7], zeigt sich, dass die Prognosen bis zum Jahr 2020 für die Fahrleistung und die Treibhausgase (Emissionen und Emissionsfaktoren) sehr gut mit den heute berechneten Zahlen übereinstimmen (Abweichungen bis 10%). Bei den Prognosen der Stickoxidemissionen liegen die Werte weiterhin zu hoch, die Emissionsfaktoren wurden für 2015 um rund 25%, für 2020 um mehr als 100% überschätzt. Dies erklärt sich daraus, dass in der Prognose die weitere Verschärfung der Abgasnorm ab 2013 (Euro-VI, beschlossen 2009) nicht berücksichtigt wurde.

Insgesamt kann ausgesagt werden, dass in der Vergangenheit die Vorhersage der Treibhausgasemissionen v.a. auf Niveau des Einzelfahrzeuges zuverlässig war, bei den Luftschadstoffen hingegen namhafte Abweichungen (v.a. Überschätzungen) auftraten. Entscheidend für eine gute Prognose sind neben der Kenntnis des aktuellen Zustandes klare politische Vorgaben für die Weiterentwicklung der gesetzgeberischen Massnahmen, die dann natürlich auch einzuhalten sind. Zu letzterem ist anzumerken, dass die gesetzliche Begrenzung der Luftschadstoffe in den Abgasen von schweren Nutzfahrzeugen später einsetzte als bei den PW, aber von den Herstellern konsequenter umgesetzt wurde. Entsprechend liegen die tatsächlichen Emissionsfaktoren im täglichen Betrieb beim SNF näher an den auf dem Prüfstand einzuhaltenden Emissionsgrenzwerten als bei den PW.

3.1.2 Prognosen BAFU/ARE zur Entwicklung des Strassenverkehrs und seiner Emissionen

Die hier dargestellten Emissionszahlen der Pilotstudie [9] bzw. des Berichts [4] basieren auf den Annahmen zur Verkehrsentwicklung gemäss Referenzszenario⁶ der Verkehrsperspektive [17]. Dieses Szenario geht im Wesentlichen von stabilen Verhältnissen aus und schreibt die bereits absehbaren Entwicklungen fort. Die wichtigsten Annahmen sind:

- Die Attraktivität von Agglomerationen und Metropolitanräumen bleibt hoch, die Reurbanisierung setzt sich fort. Die damit verbundenen Entwicklungen werden fortgeschrieben.
- Der Schienengüterverkehr kann seine Attraktivität gegenüber der Strasse sowohl bei der Transportgeschwindigkeit wie bei den Kosten leicht steigern.

⁶ Im den Verkehrsperspektive [17] werden diverse Alternativszenarien entwickelt. Diese unterscheiden sich in der Fahrleistung der SNF nur unwesentlich vom Referenzszenario, in Bezug auf die Transportleistung liegt ein Szenario (Fokus) deutlich höher. In der Pilotstudie [9] wird auf das Referenzszenario von [17] abgestützt, zusätzlich werden ein Alternativszenario (S1) und zwei Sensitivitäten (S2 und S3) gerechnet. In Bezug auf die SNF ergeben sich einzig bei der Sensitivität S3 wesentliche Abweichungen, da dieses Szenario von einer leicht höheren Fahrleistung schwerer Nutzfahrzeuge ausgeht. Entsprechend liegen die totalen CO₂-Emissionen 2035 gut 10% über dem Wert des Standardszenarios.

- Als Logistiktrends werden identifiziert:
 1. Steigende Bedeutung der Zuverlässigkeit
 2. Sinkende Sendungsgrößen bei gleichbleibender Gesamtmenge
 3. Steigende Anforderungen an die Transportqualität

Entsprechend dieser Trends wird mit einer weiteren Zunahme des Stückgüterverkehrs und vermehrten „hub-and-spoke“ Systemen anstelle von Linienverkehr gerechnet.
- Bei den PW und LNF wird eine Fortschreibung der CO₂ Zielwertentwicklung auch nach 2025 angenommen. Bei den schweren Nutzfahrzeugen werden keine weitergehenden Massnahmen unterstellt, insbesondere auch keine weitere Verschärfung der Abgasgrenzwerte und keine Einführung von CO₂-Grenzwerten. Es wird aber von einer jährlichen Abnahme des Dieserverbrauchs im Bereich von 0.2% bis 1.2% als Folge von technischen Innovationen zur Effizienzsteigerung ausgegangen (siehe [18] und Abschnitte 3.3 bis 3.7 unten).

Da das BFS die Verkehrszahlen laufend auch rückwirkend korrigiert, war das Szenario aus dem Bericht [17] nicht mehr aktuell und musste aus Konsistenzgründen für die Pilotstudie [9] leicht angepasst werden. Daher weichen die Verkehrszahlen in der Pilotstudie wie auch im Bericht [4] leicht von denjenigen des ARE aus dem Jahr 2016 ab.

Bei der Entwicklung der Fahrleistung (Abbildung 19) gehen die Prognosen des ARE von einer weiteren Steigerung aus. Gegenüber 2015 wird bis 2035 eine Zunahme von 30% prognostiziert. An der Verteilung auf die Strassentypen ändert sich aber nichts: 60% der Fahrleistung werden auf Autobahnen und je 20% innerorts und ausserorts gefahren.

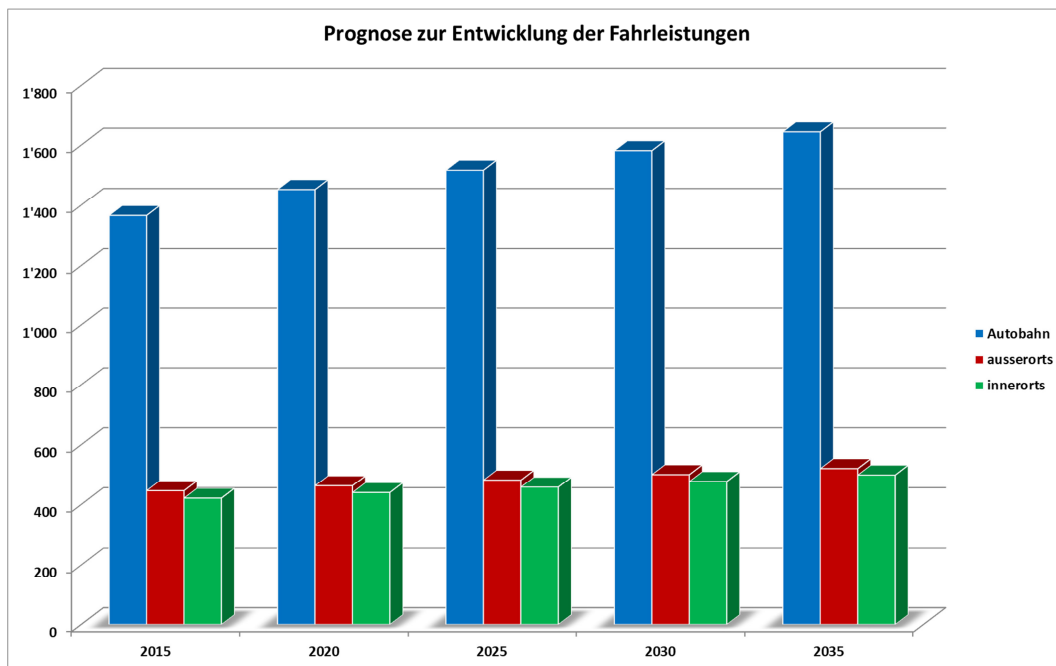


Abbildung 19: Prognose der Fahrleistungen des schweren Nutzfahrzeugverkehrs in Mio. Fahrzeugkilometer gemäss BAFU/ARE.

Die Transportleistung soll sich weiterhin parallel zur Fahrleistung entwickeln, d.h. es wird davon ausgegangen, dass die mittlere Ladung eines schweren Nutzfahrzeuges auch in Zukunft nahezu konstant bleibt. Auf eine Darstellung der Entwicklung der Transportleistung kann daher verzichtet werden.

Bei den Gesamtemissionen soll es trotz weiterer Zunahme der Fahrleistung zu keiner Zunahme der CO₂-Emissionen mehr kommen, diese liegen gemäss Szenario 2035 noch bei 90% des Wertes von 2015 (Abbildung 20). Wiederum reduzieren sich die Luftschadstoffe wesentlich schneller. Bei den Stickoxiden, die bereits in der Vergangenheit stark gemindert wurden, soll nochmals eine Reduktion von über 80% gegenüber 2015 möglich sein. Bei der Partikelanzahl setzte die Reduktion erst ab Euro-Norm IV ein, hier soll nun eine weitere Reduktion von mindestens 95% gegenüber dem Wert von 2015 möglich sein.

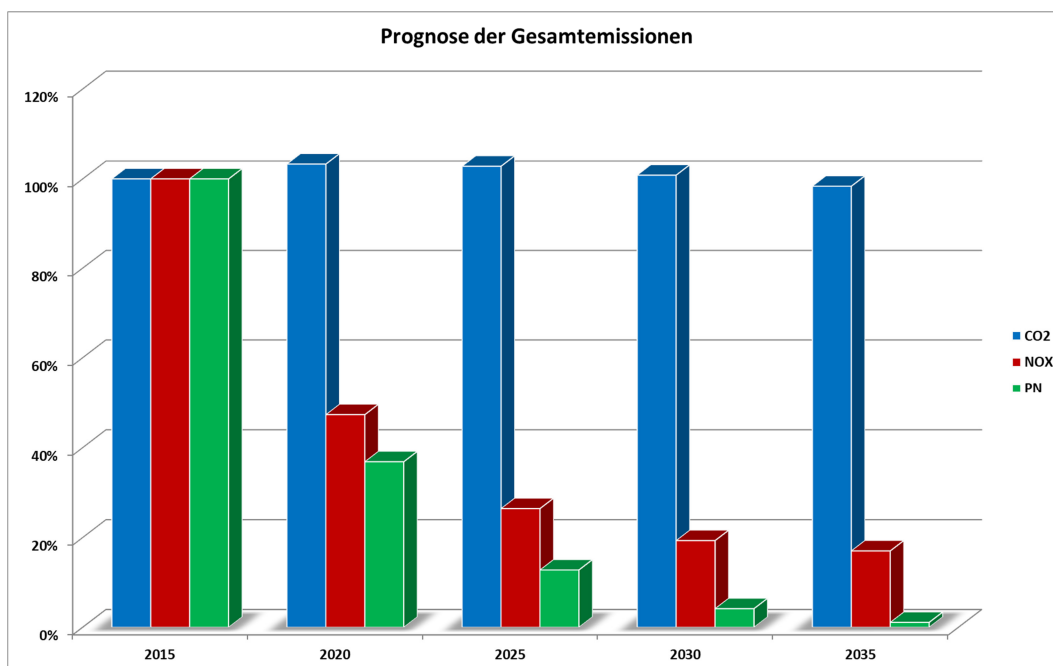


Abbildung 20: Prognose der jährlichen Gesamtemissionen des schweren Nutzfahrzeugverkehrs gemäss BAFU. 2015=100%.

Die leichte Reduktion der Treibhausgasemissionen und weitere markante Reduktion der Luftschadstoffe nimmt weder eine Einführung (CO₂) bzw. Verschärfung (Luftschadstoffe) der aktuellen Abgasgrenzwerte nach Euro-VI an. Auch alternative Antriebstechnologien spielen bis 2035 in Betrachtungen des BAFU kaum eine Rolle. Elektro-LKW sollen 2035 nur 2% der Fahrleistung der SNF bewältigen, alternative Antriebstechnologien unter 1%. Zum Vergleich: bei den PW wird für 2035 ein Fahrleistungsanteil von 16% für Elektrofahrzeuge und 2% für alternative Technologien prognostiziert. Die Reduktion beim CO₂ basiert auf den erwarteten Effizienzgewinnen, bei den Luftschadstoffen auf der fast kompletten Umstellung auf Euro-VI Fahrzeuge.

In Bezug auf den Flottenmix geht das Szenario von einer raschen Durchdringung des Marktes mit Euro-VI Lastwagen aus. 2025 sollen bereits 88% der Fahrleistung bzw. 90% der CO₂ Emissionen aus Euro-VI Lastwagen stammen, bei den Stickoxiden soll dieser Wert 2025 bei rund der Hälfte der Emissionen liegen.

Betrachtet man die Emissionen im Kontext des gesamten Strassenverkehrs, so wird bei den Treibhausgasen eine zunehmende Bedeutung des schweren Nutzfahrzeugverkehrs prognostiziert. Der Anteil des SNF an den gesamten CO₂-Emissionen des Strassenverkehrs soll von aktuell 13% bis 2035 auf 15% steigen, dies vor allem, weil bei den PW eine Reduktion von aktuell 11Mio t CO₂ (76% der Gesamtemission) auf rund 8Mio t (71% der Gesamtemission) im Jahr 2035 vorausgesagt wird.

Bei den Luftschadstoffen wird eine andere Entwicklung erwartet. Bei den Stickoxiden soll der Anteil des SNF am gesamten Ausstoss des Strassenverkehrs in den kommenden Jahren noch leicht sinken (2025 10%) und ab 2030 wieder ansteigen, so dass 2035 mit 13% etwa derselbe Wert erreicht wird wie heute. Beim Feinstaub (PN) wird weiter mit einer klaren Abnahme des Anteils des SNF gerechnet, er soll 2035 noch 2% ausmachen, 82% sollen dann von den PW stammen.

Da trotz steigender Fahrleistung die Gesamtemissionen beim CO₂ wie bei den Luftschadstoffen sinken sollen, müssen die Emissionsfaktoren einer noch grösseren Reduktion unterliegen. Abbildung 21 zeigt die prognostizierte Entwicklung der aggregierten Emissionsfaktoren aufgeteilt nach Strassentyp. Aufgrund der Effizienzgewinne wird erwartet, dass ein LKW 2035 nur noch rund 80% des Dieselverbrauchs eines LKWs von 2015 aufweist.

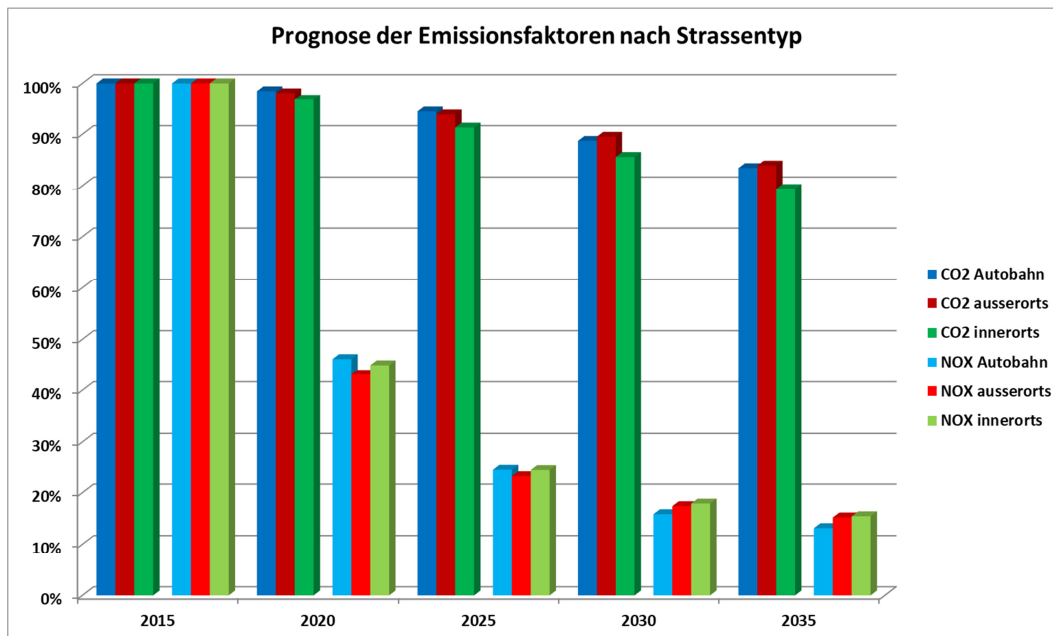


Abbildung 21: Prognose der Emissionsfaktoren nach Strassentyp gemäss BAFU. 2015=100%.

Da die Studie von keiner weiteren Verschärfung der Emissionsgrenzwerte ausgeht, ist eine Darstellung der Daten auf dem Niveau Einzelfahrzeuge wenig interessant. Die Emissionskoeffizienten von 2035 entsprechen dem Wert eines Euro-VI Lastwagens. Weitere Reduktionen ergeben sich einzig aus den angenommenen Effizienzgewinnen (Reduktion des Dieselerbrauchs).

3.2 Situation EU

3.2.1 Einführung

Die EU hat bei der Umweltgesetzgebung zu den Auswirkungen des Strassenverkehrs eine Pionierrolle übernommen. Dies zeigt sich zum Beispiel an der Übernahme der EURO-Emissionsstandards in vielen nicht EU-Ländern, unter anderem auch in der Schweiz. Trotz dieser Vorreiterrolle bei den Luftschadstoffen haben die europäischen Entscheidungsträger die Treibstoff-Effizienz des schweren Güterverkehrs über Jahrzehnte vernachlässigt bzw. haben die damit einhergehenden Fragen gar nicht behandelt [19].

In der Zeit von 1990 – 2014 war der Strassenverkehr die einzige CO₂-Quelle, die keine Emissionsreduktionen erzielte [20]. In dieser 24jährigen Periode nahmen die CO₂-Emissionen des Strassenverkehrs um 17% zu und stellten 24% der europäischen CO₂-Emissionen im Jahr 2014 dar [21]. Weiter hat die Zunahme der CO₂-Emissionen von kommerziellen Fahrzeugen diejenigen der Privatfahrzeuge überholt: von 1990 bis 2014 haben die CO₂-Emissionen von kommerziellen Fahrzeugen (Lastwagen und Busse) um 25% zugenommen, währenddessen diejenigen der Privatfahrzeuge nur um 12% zugenommen haben [22]. Dieselmotorenbetriebene schwere Güterfahrzeuge machen rund ein Viertel der gesamten CO₂-Emissionen des Strassenverkehrs der EU aus [22], [18] (und damit rund 6% der gesamten CO₂-Emissionen in der EU [23]). Zudem wird angenommen, dass ihr Emissionsanteil bis 2030 etwa 45% der gesamten Strassenverkehrsemissionen in der EU betragen wird [24]. Diese Emissionszunahme ist nicht vereinbar mit den europäischen Zielen, die Treibhausgase bis 2050 um 60% zu reduzieren (Referenz 1990) [25].

3.2.2 Ziele

Am 17. Mai 2018 hat die Europäische Kommission einen Gesetzesvorschlag vorgestellt, welcher die ersten CO₂-Emissionsstandards für den schweren Güterverkehr umfasst. Die Zielwerte für CO₂ Emissionen für neue Lastwagen wurden wie folgt definiert [23]:

- Bis 2025 eine Reduktion von 15% im Vergleich mit 2019
- Bis 2030 mindestens eine Reduktion von 30% im Vergleich mit 2019

Das Ziel bis 2025 wurde als obligatorisch („mandatory“) definiert und soll durch die Anwendung von Technologien erreicht werden, die bereits auf dem Markt verfügbar sind. Der Wert für 2030 wird als erstrebenswert („aspirational“) beschrieben und soll die langfristigen Ziele definieren. Dieser wird im Jahr 2022 überprüft, indem zusätzliche Informationen über neue Technologien verarbeitet und integriert werden, welche nötig sind, um das Ziel zu erreichen. In einem

ersten Schritt wurden die CO₂ Emissions-Standards für grosse Lastenfahrzeuge definiert, welche 65% – 70% der CO₂-Emissionen von Lastenfahrzeugen emittieren. Im Jahr 2022 wird der Geltungsbereich der Standards auf kleinere Lastenfahrzeuge ausgeweitet.

Die dabei angestrebten Vorteile werden wie folgt definiert:

- Beitrag zum Erreichen der EU Verpflichtungen unter dem Übereinkommen von Paris.
- Reduktion der Treibstoff-Kosten für Transportunternehmungen und Konsumenten. Ersparnis von rund 25'000 Euro in den ersten fünf Jahren, wenn ein neuer Lastwagen im Jahr 2025 gekauft wird und bis zu 55'000 Euro in den ersten fünf Jahren, wenn der Lastwagen im Jahr 2030 gekauft wird.
- Aufrechterhaltung der technologischen Führung von europäischen Produzenten und Lieferanten.
- Reduktion von rund 54 Millionen Tonnen CO₂ in der Periode von 2020 – 2030. Dies entspricht den jährlichen Gesamtemissionen Schwedens.
- Einsparungen von rund 170 Millionen Tonnen Öl in der Periode von 2020 – 2030, was einem Preis von rund 95 Milliarden Euro entspricht.
- Vergrösserung des Bruttosozialproduktes durch das Schaffen von rund 25'000 neuen Arbeitsstellen bis 2025.

Ein weiterer Schritt wird die Einführung von Lastwagen sein, die nur noch teilweise oder gar nicht mehr mit fossilen Treibstoffen angetrieben werden. Aktuell fahren 98% der Lastwagen mit Diesel. D.h., auf den europäischen Strassen sind praktisch keine Lastwagen unterwegs, die keine CO₂-Emissionen verursachen, auch in den Ballungszentren ist ihr Anteil noch sehr gering. Die EU-Kommission schlägt vor, neue Antriebstechnologien zu unterstützen und die Innovation und Forschung durch Anreize zu fördern.

Dieser Gesetzesvorschlag der Kommission muss noch vom Europäischen Parlament und dem Rat der EU gebilligt werden. Er kann dabei auch noch Änderungen erfahren.

Gesetzgebungsverfahren EU [26]: Die meisten EU-Rechtsvorschriften werden im Rahmen des ordentlichen Gesetzgebungsverfahrens verabschiedet, bei dem das Europäische Parlament (direkt gewählt) und der Rat der EU (Vertreter/-innen der 28 EU-Länder) dasselbe Mitspracherecht haben. Die Kommission legt dem Parlament und dem Rat einen Legislativvorschlag vor. Beide Institutionen müssen sich auf dessen Wortlaut einigen, damit dieser Vorschlag EU-Recht wird.

Ein Legislativvorschlag kann von Parlament und Rat in mehreren Lesungen behandelt werden. Sobald sich die beiden Institutionen auf einen gemeinsamen (Gesetzes-)Text geeinigt haben, wird der Vorschlag angenommen. Sollten sich Parlament und Rat in der ersten Lesung nicht einigen, findet eine zweite Lesung statt. Kommt auch in der zweiten Lesung keine Einigung zustande, so wird der Vorschlag an einen Vermittlungsausschuss weitergeleitet. Dieser ist einerseits paritätisch aus Vertretern des Rates sowie des Parlaments zusammengesetzt. Andererseits hat auch die Kommission darin Einsitz und vermittelt zwischen den beiden Kammern. Hat der Vermittlungsausschuss eine Einigung erzielt, wird der Gesetzesvorschlag in einer dritten Lesung von Parlament und Rat verabschiedet und in Kraft gesetzt. In den seltenen Fällen, in denen es zu keiner Einigung kommt, entsteht auch kein Gesetz.

3.2.3 Monitoring

Eine der grössten Herausforderungen bei der Umsetzung des Gesetzesvorschlages der EU liegt darin, dass noch keine Zielwerte für die einzelnen Fahrzeugtypen festgelegt worden sind. Aufgrund der grossen Variantenvielfalt bei schweren Nutzfahrzeugen ist es aufwändig und teuer, Endenergieverbrauch und direkte CO₂-Emissionen von jedem Modell zu messen. So gibt es z.B. von einem Verteiler-LKW 12t weit über 1000 Varianten in der Baureihe: Motorengrösse, Radstände, Kabinengrössen, Federungsarten, Zusatztanks, Klimageräte, Geschwindigkeitsbegrenzer etc. können in einem Baukastensystem nahezu beliebig kombiniert werden [33] [27]. Zudem liegen bislang keine zertifizierten und vergleichbaren Angaben zum Treibstoffverbrauch und den CO₂-Emissionen schwerer Nutzfahrzeuge vor. Dies reduziert die Transparenz für künftige Fahrzeug-Käufer auf dem europäischen Markt. Ein solcher Mangel an Wissen ist ein Hindernis, wenn es darum geht, effizientere Lastfahrzeuge zu kaufen. Die Erfahrungen aus der Luftreinhaltung (Luftschadstoffe) zeigen im Übrigen, dass es zu einer beträchtlichen Differenz zwischen den Reduktionen gemäss normierten Messkonzepten und dem realen Betrieb kommen kann. Der stetig zunehmende Gütertransport zeigt zudem, dass die bestehende Konkurrenzsituation in diesem Markt bisher nicht dazu geführt hat, die Treibstoff-Effizienz bei den schweren Güterfahrzeugen zu verbessern.

Aufgrund der oben erwähnten Vielfalt schwerer Nutzfahrzeuge und des breiten Einsatzspektrums war die Entwicklung eines neuen Verfahrens notwendig. Deshalb wurde von der Europäischen Kommission im Jahr 2009 der Auftrag erteilt, eine standardisierte Testmethode zur Bestimmung der CO₂-Emissionen zu entwickeln. Die resultierende Methode besteht aus einer Kombination von Komponenten-Tests mit einem Simulationsinstrument, welches VECTO (Vehicle Energy Consumption Calculation Tool) heisst [19]. Damit werden erstmals die CO₂-Emissionen von Gesamtfahrzeugen, also von Zugmaschinen mit Auflieger oder Anhänger und Reifen inklusive aller relevan-

ten Fahrzeugkomponenten ermittelt. Auf der Basis gemessener und zertifizierter Inputdaten und realistischer Fahrzyklen können im Ergebnis Treibstoffverbrauch und CO₂-Emissionen individuell für alle Fahrzeugkombinationen und konkrete Einsatzprofile bestimmt werden.

Um alle möglichen Kombinationen von Kabinen, Motor, Getriebe etc. handhaben zu können, ist VECTO modular aufgebaut. Für jede Komponente werden physikalische Tests durchgeführt. Für jeden Motor wird der Verbrauch gemessen, für jede Kabine wird der Luftwiderstand getestet und so weiter. Auf diese Weise erhalten alle Hersteller individuelle Werte für ihre Produktpalette. Die Messwerte werden dann bei der Simulation in VECTO angewendet. Durch die Modularität kann jedes Fahrzeug einen individuellen CO₂/VECTO-Wert erhalten, der die reale Spezifikation widerspiegeln sollte [27].⁷



Abbildung 22: Vereinfachter Ablauf des Erhebens und Prozessierens von Daten im VECTO [27]

Ab 01.01.2019 müssen alle neu produzierten Fahrzeuge mit den Achsenkonfigurationen 4x2, 6x2, 6x2/2, 6x2/4 und 6x2*2 ihren individuellen CO₂-Wert gemäß der neuen Gesetzgebung angeben. Ab 01.07.2019 müssen alle neu zugelassenen Fahrzeuge mit derselben Achsenkonfiguration ihren individuellen CO₂-Wert gemäß der neuen Gesetzgebung angeben. Ab 2020 folgen die Konfigurationen 6x4, 8x2, 8x4 und ab 2021 auch alle Busse [27].

⁷ Scania geht davon aus, dass es Kunden gibt, die bereits ab 2019 an ihrem VECTO-Wert interessiert sind, da die VECTO-Werte voraussichtlich als Grundlage für die Steuern, Maut und LSWA verwendet werden.

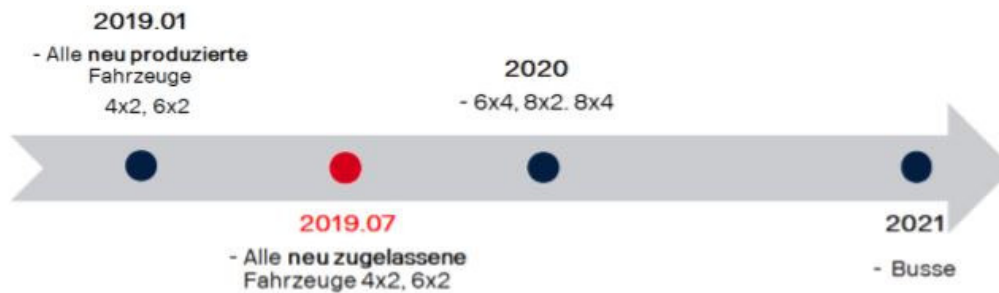


Abbildung 23: Zeitlicher Ablauf der VECTO Einführung [27]

In der Verordnung 2017/2400 der Europäischen Kommission wurde das Typengenehmigungsverfahren so ergänzt, dass die Emissions- und Verbrauchswerte erfasst werden können, die u.a. mit VECTO modelliert sind [28].

VECTO wird von Forschung und Industrie kritisch kommentiert. Einerseits, weil im Moment unklar, ist, wie die generierten Daten weiterverarbeitet werden. Andererseits können die Resultate von VECTO aufgrund der Berechnungsmethode ungenau sein bzw. eine gewisse Unschärfe haben. Entsprechend kann es eine Differenz zwischen der virtuellen Erhebung und dem realen Fahrverhalten geben. Die Ergebnisse hängen stark davon ab, wie die Technologien und ihre Interaktion im Model erfasst wurden. Dazu kommt noch, dass die Summe von kleinen Toleranzen am Schluss eine grössere Differenz ergeben können [32][33].

Weiter wurde die Verordnung des Europäischen Parlamentes und des Rates über die Überwachung und Meldung der CO₂-Emissionen und des Kraftstoffverbrauchs neuer schwerer Nutzfahrzeuge am 25. Juni 2018 angenommen (2017/0111). Diese Verordnung soll die Überwachung und Meldung der CO₂-Emissionen und des Kraftstoffverbrauchs neuer schwerer Nutzfahrzeuge regeln. Diese dafür zu erfassenden technischen Fahrzeugdaten basieren auf der Rahmenrichtlinie für die EG-Typengenehmigung 2007/46 sowie auf den Vorgaben für die Emissionsmessung gemäss VO 595/2009; diese Erlasse sind mit der Verordnung 2017/2400 revidiert worden [30].

3.3 *Forschung, Entwicklung*

3.3.1 *Vorbemerkung*

Aufgrund verschiedener Interviews[32][33] zeigt sich, dass bisher viel getan wurde, um die Treibstoffeffizienz bei Lastwagen möglichst nach dem Stand der Technik zu verbessern. Dies aus dem einfachen Grund, weil der Treibstoff rund einen Drittel der Gesamtkosten für den Gütertransport auf der Strasse ausmacht [33][18]. D.h. die Relevanz von Treibstoffeinsparungen ist gegenüber dem privaten Strassenverkehr viel höher. Angesprochen auf die ambitionierten Ziele

der EU gehen eigentlich alle davon aus, dass diese aufgrund des technologischen Spielraumes grundsätzlich erreicht werden können (vgl. dazu Kap. 3.3.4)[32][33].

3.3.2 Einsparpotenziale

Über das Potenzial von technischen Verbesserungen beim schweren Güterverkehr gibt es eine Vielzahl von Studien. Einen guten Überblick bietet die Publikation vom „International Council on Clean Transportation (ICCT)“ [19]. Dieser Bericht fasst die Ergebnisse aus einer Serie von Fahrzeugsimulationen zusammen. Einerseits wird der aktuelle Stand der CO₂-Emissionen heutiger LKW in der EU gezeigt, andererseits das technische Potenzial zur Verringerung des Kraftstoffverbrauchs und der CO₂-Emissionen mit Blick auf den Zeitraum 2020 bis 2030. Die Analyse konzentriert sich hierfür auf zwei Fahrzeugsegmente des Güterverkehrs-Einsatzspektrums: Sattel-schlepper-LKW für den Einsatz auf der Langstrecke sowie kleinere LKW für den städtischen Verteilerverkehr. Beide Segmente zusammen sind für etwa 85% der CO₂-Emissionen von LKW und Bussen verantwortlich.

Zusammenfassend lassen sich die folgenden Kategorien erwähnen, wo Potential vorhanden ist, den Treibstoffverbrauch künftig zu reduzieren:

- Motorentechnologie
 - Verbrennungsoptimierung: Hier geht es insbesondere um eine optimierte Einspritzung des Treibstoffes.
 - Wärmeverlust und Wärme Rückgewinnung: Möglichst hohe Reduktion des Energieverlustes durch verlorene Wärme.
 - Reduzierter Energieverbrauch für Motorenzubehör: Motorenzubehör, das mit Energie des Motors angetrieben wird, sind z.B. Treibstoff- und Ölpumpe. Alternativ kann Motorenzubehör mit elektrischer Energie betrieben werden.
 - Reduktion von Reibungsverlusten im Motor: In einem Motor gibt es eine grosse Zahl von beweglichen Teilen, welche bei suboptimaler Wartung in der Summe zu erheblichen Reibungsverlusten führen können.
 - Verbesserung der Nachbehandlung: Hier geht es um das komplexe Zusammenspiel der Abgas-Nachbehandlung im Zusammenhang mit einer möglichst effizienten Verbrennung.
 - Turbo Systeme: Dabei geht es darum, ungenutzte Abgasenergie zu extrahieren.
 - Verbindung verschiedener Motorentechnologien: Die Wirksamkeit von einzelnen Technologien lässt sich kaum isolieren, weil die Interaktion zwischen verschiedenen Motorsystemen sehr gross ist. Entsprechend wird versucht, die Motorentechnologie mittels aller relevanten Bereiche zu optimieren.
- Übertragungstechnologie: Hier geht es um eine Vielzahl von Massnahmen, welche die Energieübertragung vom Motor auf die Achsen bzw. die Räder verbessern und Energie aus Bremsvorgängen zurückgewonnen wird.
- Fracht- und Beladungstechnologie
 - Aerodynamik: Reduktion des Luftwiderstandes
 - Reifen: Reduktion der Reibungsverluste

- Massenreduktion: Reduktion von Masse und Leergewicht des LKW
- Systeme zur Unterstützung des Fahrers: Technologien, welche es dem Fahrer ermöglichen, möglichst effizient zu fahren.
- Zubehör: Hydraulische Steuerung, Kühlung, Lüftung etc.

Die Kernergebnisse des Treibstoffspar-Potentials lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Aktuelle Ausgangslage:
Im Jahr 2017 lag der Kraftstoffverbrauch einer typischen europäischen 40-Tonnen 4x2 Sattelzugmaschine im so genannten Long Haul Testzyklus bei rund 33.1 L/100 km. Der Kraftstoffverbrauch eines typischen europäischen 12-Tonnen 4x2 Verteiler-LKW im so genannten Urban Delivery Testzyklus liegt bei etwa 21.4 L/100 km.
2. Mittelfristiges Verbesserungspotenzial für Sattelzug-LKW:
Im Vergleich mit dem Stand heute kann der Kraftstoffverbrauch im Betrieb auf der Langstrecke um rund 27% gesenkt werden. Dies entspricht einer Reduktion des Kraftstoffverbrauchs von 33.1 L/100 km auf 24.0 L/100 km. Die entsprechende durchschnittliche jährliche Reduktion beträgt 3.1% im Zeitraum 2015 bis 2025.
3. Langfristiges Verbesserungspotenzial für Sattelzug-LKW:
Im Vergleich zum Stand heute kann, mit Hilfe heute bereits bekannter, jedoch noch nicht weit verbreiteter Technologien, der Kraftstoffverbrauch im Betrieb auf der Langstrecke um ca. 43% gesenkt werden. Dies entspricht einer Reduktion des Kraftstoffverbrauchs auf 18.9 L/100 km. Die entsprechende durchschnittliche jährliche Reduktion beträgt 3.6% im Zeitraum 2015 bis 2030.
4. Mittelfristiges Verbesserungspotenzial von Verteiler-LKW:
Unter Verwendung heute verfügbarer Technologien kann der Kraftstoffverbrauch eines 12-Tonnen-Verteiler-LKW um ca. 23% gesenkt werden. Dies entspricht einer Reduktion des Kraftstoffverbrauchs von 21.4 L/100 km auf 16.5 L/100 km. Die entsprechende durchschnittliche jährliche Reduktion beträgt 2.6% im Zeitraum 2015 bis 2025.
5. Langfristiges Verbesserungspotenzial von Verteiler-LKW:
Das in der Studie betrachtete fortschrittliche Technologiepaket besteht, mit Ausnahme des Hybrid-Antriebs, zumeist aus Technologien, die heute noch nicht kommerzialisiert sind. Bei Einsatz entsprechender Technologien kann der Kraftstoffverbrauch um 43% gesenkt werden, was einer jährlichen Verbesserung um rund 3.6% im Zeitraum 2015 bis 2030 entspricht. Der Kraftstoffverbrauch reduziert sich von 21.4 L/100km auf 12.1 L/100 km bis 2030.

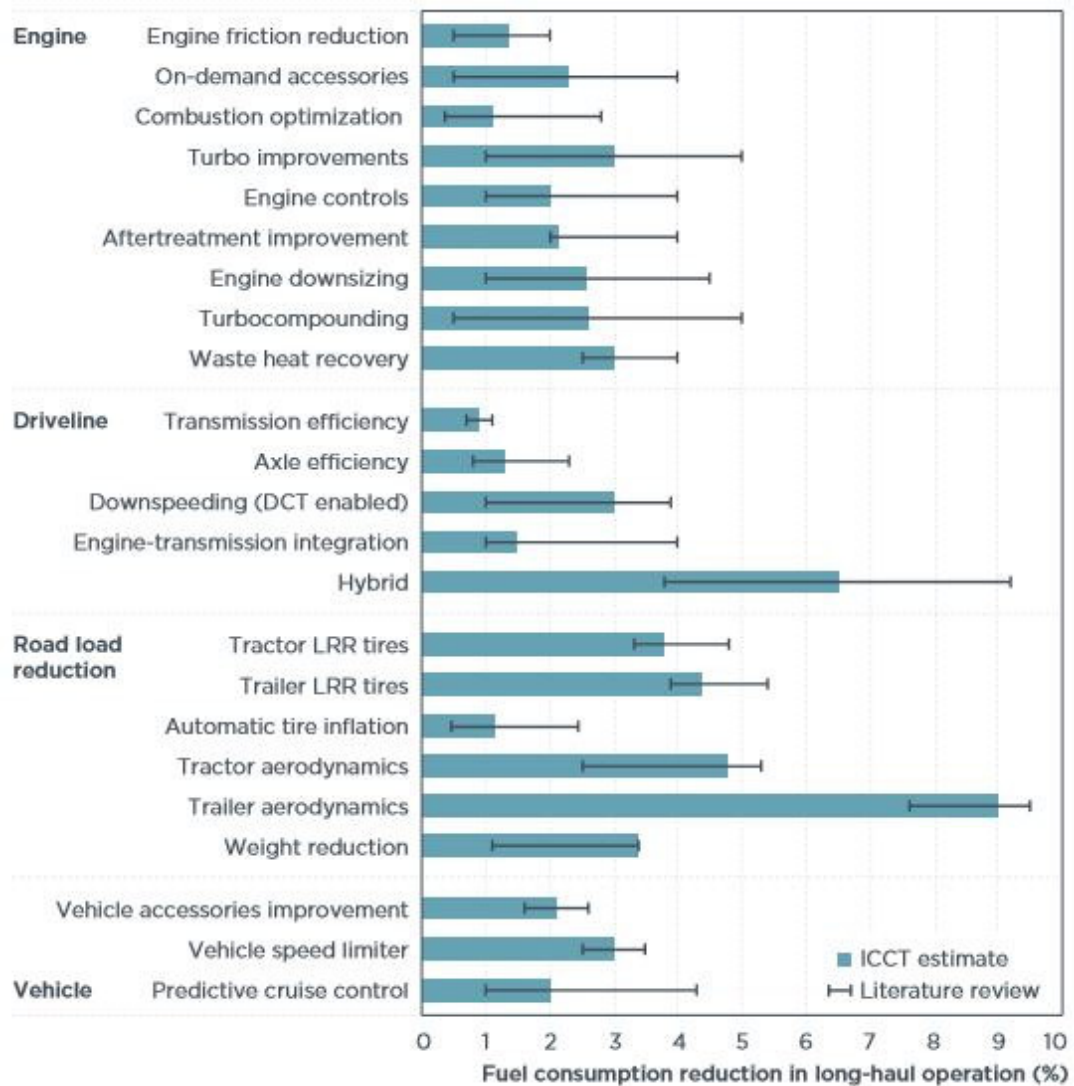


Abbildung 24: Treibstoff Reduktionspotenzial der verschiedenen Technologien für Sattelschlepper auf langen Distanzen. Die statistische Unsicherheit bezieht sich auf die unterschiedlichen Resultate, die in der Literatur gefunden wurden [19].

Aus der Abbildung 24 wird ersichtlich, dass Hybridisierung, Aerodynamik, Reifenqualität und -druck die höchsten Energieeinsparungen mit sich bringen.

3.3.3 Einsparpotenziale vs. Motorenleistungen

Was in den untersuchten Studien interessanterweise nicht erwähnt wird, sind die Entwicklungen der Motorenleistungen. Diese haben in den letzten Jahrzehnten kontinuierlich zugenommen. Wie bereits dargestellt, hat zwar der Verbrauch von Treibstoff bzw. die Emission von CO₂ pro kW Motorenleistung in den letzten Jahren abgenommen. Da letztere aber kontinuierlich zugenommen hat, stagnieren die CO₂-Emissionen seit längerer Zeit. Insbesondere im Zusammenhang mit

der möglichen Definition von CO₂-Zielwerten für LKWs stellt sich entsprechend natürlich auch die Frage nach der «idealen» Leistung eines schweren Nutzfahrzeuges. Gemäss Aussagen aus der Industrie ist es wichtig, dass beim Kauf eines Lastenfahrzeuges mit einem Transporteur/Logistiker eine fundierte Streckenanalyse durchgeführt wird, um die ideale Leistungsfähigkeit des benötigten Nutzfahrzeuges zu bestimmen. Unabhängig davon stellt sich die Frage, ob heutzutage – ähnlich wie bei den Personenwagen – nicht zu leistungsstarke und damit wenig energieeffiziente Lastenfahrzeuge unterwegs sind. Dies ist insbesondere unter dem Aspekt der Tempolimits von 80 km/h zu analysieren.

3.3.4 Können die von der EU formulierten Emissionsziele erreicht werden?

Die Fachleute aus Industrie und Forschung erachten die Ziele der EU als ambitioniert, aber mit entsprechendem Aufwand grundsätzlich erreichbar. Die bereits erwähnten, vielfältigen Optimierungsmöglichkeiten lassen sich so addieren und kombinieren, dass sich schliesslich ein grosses Reduktionspotenzial ergibt. Dafür müssen aber alle Technologien (inkl. Wärmerückgewinnung und Elektrifizierung des Verbrennungsmotors), die man heute kennt, in die Optimierung einfließen[32]. Angesprochen darauf, warum dieses Reduktionspotenzial bisher nicht ausgeschöpft worden ist, ist man sich einig, dass der Markt bei diesen Bestrebungen – noch – zu wenig mithilft. Bisher wurde bereits viel gemacht – auch im Rahmen von Luftreinhalte-Massnahmen – für den effizienten und sparsamen Treibstoffverbrauch des Antriebsstrangs, deshalb sind die jetzt noch zu ergreifenden technischen Massnahmen aufwändig und teuer [32][33]. Diese Technologien sind teilweise vorhanden, werden aber noch nicht eingesetzt, weil die hohen Kosten bei der aktuellen Marktsituation nicht auf die Kunden überwälzt werden können ohne Nachteile gegenüber anderen Anbietern zu erleiden. Weil der Markt diesen „First-Mover-Nachteil“ nicht auszugleichen vermag, braucht es gesetzliche Grundlagen, um allen Akteuren „gleich lange Spiesse“ zu geben. Dies könnte zum Beispiel gemacht werden, in dem Emissionszielwerte (ähnlich wie bei den PWs) verbindlich erklärt werden[32].

Neben den Optimierungen des Fahrzeugstranges (alle Komponenten, die im Fahrzeug die Leistung für den Antrieb generieren und auf die Strasse übertragen) bestehen vor allem bei den Fahrzeugen viele Verbesserungsmöglichkeiten[32][33]. Dazu gehören insbesondere Aerodynamik, optimale Bereifung, optimaler Reifendruck und Achsenkonfiguration. Schliesslich gibt es neben den technisch komplexen Optimierungen relativ einfache Massnahmen im Betrieb und Unterhalt der Fahrzeuge (vgl. dazu Kapitel 3.4.3), welche jedoch komplexe Fragen zum Vollzug aufwerfen.

3.4 Effektivität, Effizienz und Zieleffizienz

3.4.1 Vorüberlegungen zur Effizienz

Wie oben dargestellt, sind experimentelle Nachweise vorhanden, welche das Effizienzsteigerungspotenzial schwerer Nutzfahrzeuge darlegen. Dazu gibt es folgendes zu bedenken:

- Momentan ist noch offen, wie gut sich das Instrument VECTO eignen wird, die Emissionswerte der verschiedenen Lastwagenkategorien zu erfassen.
- Beim langfristigen Verbesserungspotenzial ist die Rede von Technologien, die noch nicht etabliert sind. Entsprechend stellt sich die Frage, wie gut man sich auf solche Szenarien abstützen kann.
- Die vorliegenden Daten zeigen, dass sich relevante Effizienzsteigerungen aus einer Vielzahl von Massnahmen zusammensetzen. Entsprechend stellt sich die Frage, wie verlässlich sich ein Monitoring künftig gestaltet und inwieweit die Testergebnisse mit dem realen Einsatz und Fahren korrelieren.
- Die dargelegten Testergebnisse beziehen sich i.d.R. auf lange Distanzen im flachen Gebiet. In der Schweiz, das topographisch anspruchsvoll, die Strecken kurz und die Verkehrsstaus häufig sind, treffen diese Optimierungspotenziale nicht unbedingt zu.
- Die dargelegten Effizienzgewinne erscheinen beträchtlich. Allerdings führen diese nur zu einer Reduktion der Klimagasemissionen, wenn sie nicht durch anderweitigen Mehrverbrauch (z.B. höhere Motorenleistung, erhöhtes Transportvolumen durch zusätzliche Nutzlast etc.) wieder kompensiert werden. Rein auf die Technologie konzentrierte Prognosen können daher zu optimistisch ausfallen, weil sie den Einfluss des Technologiewandels auf die Akteure nicht berücksichtigen.

3.4.2 **Energieeffizienz und Kosteneffizienz**

In der Publikation „Zukünftige Massnahmen zur Kraftstoffeinsparung und Treibhausgasminde- rung bei schweren Nutzfahrzeugen“ des Umweltbundesamtes [18] wurde ebenfalls dargelegt, mit welchen Massnahmen die CO₂-Emissionsreduktionen bei schweren Nutzfahrzeugen erreicht werden können. Die darin beschriebene Methode bzw. die Referenzszenarien sind dabei anders als in [19], die Ergebnisse sind allerdings vergleichbar. Was in [18] unter anderem interessant ist, sind die Ausführungen zur Marktfähigkeit bestimmter Massnahmen: Wesentliche Voraussetzung für eine Verbreitung energiesparender und treibhausgasmindernder Fahrzeugtechnologien ist deren Kosteneffizienz. Damit ist die Analyse von Änderungen der Fahrzeugkosten eine wichtige Fragestellung in der Bewertung der untersuchten Technologien.

- Für die Fahrzeugbetreiber lohnt sich der Einsatz betriebswirtschaftlich nur, wenn die Zusatzkosten für den Einsatz der Technologien maximal so hoch sind wie die Einsparungen bei den Kraftstoffkosten.
- Aus gesellschaftlicher Perspektive stellt sich die Frage, welche Minderungen an Treibhausgasen heute bzw. perspektivisch zu welchen Kosten möglich ist.

In der Kostenanalyse wurden heute anfallende zusätzliche Anschaffungskosten für ein Fahrzeug mit den untersuchten zusätzlichen kraftstoffsparenden Technologien abgeschätzt. Bei einem Sattelzug mit 40t zulässigem Gesamtgewicht bewegen sich die mittleren zusätzlichen Anschaffungskosten für verschiedene Technologien bis zu 60'000 Euro (Parallel-Hybrid) und können damit die gesamten Anschaffungskosten für einen Sattelzug um mehr als 50% erhöhen[18].

Zusammenfassend sehen die Kostenkategorien wie folgt aus:

- Der Einsatz von Leichtlaufreifen sowie die Massnahmen zur Verbesserung des Motorenwirkungsgrades und zur Verringerung von Achs- und Getriebeverlusten kosten unter 1'000 Euro pro Fahrzeug.
- Etwa 2'000 bis 8'000 Euro kosten die Optimierung von Aerodynamik und Nebenverbrauchern sowie begrenzter Leichtbau (Leergewichtsreduktion um 3%). Für eine Abgaswärmenutzung (ORC) wurden zusätzliche Anschaffungskosten bei Markteinführung von durchschnittlich 11'000 Euro abgeschätzt.
- Am teuersten ist die Beschaffung von Fahrzeugen mit alternativem Antriebskonzept. Sattelzüge mit Erdgasmotor und LNG-Tank sind heute erhältlich, dagegen gibt es bisher noch keine serienreifen Hybrid-Sattelzüge. Die angegebenen zusätzlichen Anschaffungskosten entsprechen daher einem angenommenen Preis bei Markteinführung, der sich zukünftig deutlich reduzieren kann[18].

D.h. die kosteneffizientesten Massnahmen (Aerodynamik, Bereifung) sind wahrscheinlich auch energetisch die effizientesten. Die Analysen der Kosteneffizienz zur Treibhausgasreduzierung zeigen [18] für alle untersuchten Fahrzeugklassen, dass viele Einzelmassnahmen unter heutigen Rahmenbedingungen negative Vermeidungskosten (zusätzliche Kosten bzw. Ersparnisse, die sich durch den Einsatz einer Technologie mit geringer Treibhausgasintensität gegenüber dem jeweils vorherrschenden Stand der Technik ergeben) haben. Insbesondere Massnahmen zur Reduktion der Fahrwiderstände amortisieren sich oft schon in den ersten drei Jahren und erfüllen somit prinzipiell auch die wirtschaftlichen Erwartungen vieler Fahrzeugbetreiber. Bei Akzeptanz längerer Amortisationszeiten kämen weitere Technologien mit effektiven Kostenminderungen hinzu. Die zeitliche Perspektive, unter der die Kosteneffizienz von Treibhausgasreduzierungsmaßnahmen betrachtet wird, hat somit erhebliche Relevanz zur Einstufung der Kosteneffizienz einer Technologie.

Über die mittlere Fahrzeuglebensdauer haben die meisten untersuchten Technologien negative Vermeidungskosten (d.h. der Einsatz ist auch ein ökonomischer Vorteil). Wichtigste Ausnahmen sind Hybrid- und Elektrofahrzeuge, die mit den aktuellen hohen Preisen auch über das komplette Fahrzeugleben noch zusätzliche Kosten verursachen, d.h. positive Vermeidungskosten haben. Allerdings haben die Szenarienrechnungen gezeigt, dass bei entsprechender zukünftiger Reduktion der Technologiekosten (Lern- und Skaleneffekt mit steigenden Produktionsmengen) auch für diese Technologien negative Vermeidungskosten denkbar sind.

3.4.3 Warum sind die «low hanging fruits» bisher nicht geerntet worden? Eine Meinung aus der Industrie.

Wie oben dargelegt, sind die kosteneffizientesten und zugleich emissionseffizientesten Massnahmen relativ einfach umzusetzen: Aerodynamik und Bereifung. Es stellt sich deshalb die Frage, warum diese Massnahmen nicht schon längst ergriffen worden sind bzw. ob das diesbezügliche theoretische Einsparpotenzial in der Praxis tatsächlich umgesetzt werden kann.

Seitens Industrie wird dazu betont, dass das Potenzial für höhere Treibstoffeffizienz tatsächlich vorhanden ist. Einerseits wird im Rahmen der oben erwähnten technischen Verbesserungen geforscht, wobei dort eine grosse Rolle spielt, wie das Verhältnis der Optimierungskosten zu den

tatsächlichen Einsparungen ist (Kosteneffizienz). Grosses Potenzial wird auch seitens Industrie der richtigen Bereifung, dem optimalen Reifendruck sowie dem Fahrverhalten der Chauffeure gesehen[32][33]. Dies mag auf den ersten Blick banal klingen, aber offenbar geht es hier um die richtige Zuweisung der Verantwortung. Gemäss den Erfahrungen der Industrie ist es oft so, dass Chauffeure sich nicht verpflichtet fühlen, den Reifendruck zu prüfen oder tatsächlich ihr Fahrverhalten zu ändern. Nur wenn dies in einem umfassenden Servicepaket, intensiver Schulung und der Klärung im Rahmen des Verkaufs oder des Leasings eines Lastenfahrzeugs geschieht, kann davon ausgegangen werden, dass die Optimierungen schliesslich erreicht werden können. Die Effizienz solcher Optimierungen im Hinblick auf die Reduktionsziele der EU zu überprüfen, wirft jedoch viele Vollzugsfragen auf.

Eine weitere relativ einfache Optimierung wäre bei der Aerodynamik zu machen. Dort wurde aber schon viel herausgeholt. Noch aerodynamischere Fahrerkabinen mit langen Vorbauten, so genannte „Haubenfahrzeuge“, wurden wieder aus der Produktion genommen, weil deren Länge auf Kosten der möglichen Nutzlänge geht[33].

3.4.4 Zieleffizienz

In diesem Zusammenhang muss schliesslich gefragt werden, wie sich das Verhältnis zwischen Effektivität und Effizienz einer Umweltschutzmassnahme interpretieren lässt. Aus diesen Überlegungen resultieren schliesslich Bewertungsprinzipien von Massnahmen, die unter dem Begriff „Zieleffizienz“ zusammengefasst werden [35]:

- Die *Effektivität* einer Massnahme bezeichnet die *Wirkungskraft*, ihren absoluten Erfolg. Die Untersuchung der Effektivität einer Massnahme beantwortet also die Frage: Welchen Ertrag liefert eine Massnahme?
- Die *Effizienz* einer Massnahme bezeichnet die *Wirksamkeit*. Die Bewertung einer Massnahme in Hinsicht auf die Effizienz gibt also Antwort auf die Frage: In welchem Verhältnis stehen Aufwand und Ertrag einer Massnahme?

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass Massnahmen dann zieleffizient sind, wenn:

1. Die Massnahmen genügend Effekt besitzen, um einen merkbaren Beitrag zur Verminderung der Gesamtemissionen zu leisten.
2. Unter diesen Massnahmen diejenigen ausgewählt wurden, deren Umsetzung am wenigsten Aufwand erfordert.

Massnahmen werden zum Beispiel als zieleffizient gewürdigt:

- Wenn sie sowohl effektiv als auch effizient sind.
- Wenn sie eine klar erkennbare Wirkung erzielen, auch wenn diese nicht direkt quantifizierbar ist.
- Wenn ähnliche Massnahmen sich in anderen Massnahmenbereichen bewährt haben (Analogieschluss).

Massnahmen sind nicht zieleffizient:

- Wenn sie nachweisbar ineffektiv sind.
- Wenn der zeitliche, politische oder finanzielle Aufwand für ihre Umsetzung als unverhältnismässig beurteilt wird.

Mit Bezug auf die oben beschriebenen technischen Möglichkeiten, um die Treibstoffeffizienz zu verbessern bzw. den Treibstoffverbrauch zu senken stellt sich zunächst die Frage der Effektivität, d.h. ob eine Massnahme eine Wirkungskraft hat. Glaubt man den oben zitierten Studien [19], [18] sowie den Aussagen von [32][33], so sollte die Effektivität grundsätzlich gegeben sein. Gefragt werden sollte einzig, wie sich ein Monitoring schliesslich ausgestaltet, damit die auf dem Papier ausgewiesenen Reduktionen im Transport-Alltag schliesslich auch erreicht werden. Komplexer ist die Frage nach der Effizienz bzw. nach dem Aufwand, der betrieben werden muss, um ein bestimmtes Resultat zu erzielen. Wie oben erläutert, stellen sich hier einerseits die Fragen nach der Kosteneffizienz. Glücklicherweise scheinen insbesondere diejenigen Massnahmen besonders effektiv zu sein, welche auch eine gute Kosteneffizienz aufweisen (Aerodynamik, Bereifung, Reifendruck).

Diese Massnahmen müssen allerdings unter dem Aspekt der oben erwähnten Zieleffizienz betrachtet werden:

Zieleffizienz gegeben?

- Effektivität: Wahrscheinlich gegeben, aber im Vollzug unklar.
- Effizienz: gegeben, gutes Kosten/Nutzen-Verhältnis.
- Wenn ähnliche Massnahmen sich in anderen Bereichen bewährt haben: Analogieschlüsse können sicher zu den Personenwagen gezogen werden.

Zieleffizienz nicht gegeben?

- Die Zieleffizienz kann in Frage gestellt werden, weil der zeitliche, politische oder finanzielle Aufwand für ihre Umsetzung als unverhältnismässig beurteilt wird. Verhältnismässig ist eine Massnahme gemäss dem in der Schweiz angewandten Verhältnismässigkeitsprinzip, wenn diese *geeignet, erforderlich* und *zumutbar* (Verhältnismässigkeit im engeren Sinne) ist [36].
Es ist davon auszugehen, dass der zeitliche, politische oder finanzielle Aufwand für die Einführung der analysierten technischen Massnahmen bzw. der damit zusammenhängenden CO₂-Emissionsreduktionen sehr gross wird. In Anbetracht der hohen Relevanz, die eine CO₂-Reduktion des schweren Güterverkehrs mit sich bringen würde, müssen technische Massnahmen aus unserer Sicht unbedingt als verhältnismässig betrachtet werden.

3.5 **Alternative Antriebssysteme**

3.5.1 **Elektromobilität**

Situation Schweiz

Elektrisch betriebene schwere Nutzfahrzeuge werden in der Schweiz noch sehr selten eingesetzt. Aufgrund der aktuellen Reichweiten der E-Nutzfahrzeuge (100 – 400 km) eignen sie sich bisher nur für den Nahverkehr.

In der Schweiz hat die Firma E-Force diesbezüglich eine Pionierrolle übernommen. Momentan sind von E-Force allerdings erst 19 Fahrzeuge (18 t) unterwegs, 15 davon in der Schweiz. Aktuell sind die ersten 40-Tonnen-Fahrzeuge in Produktion. Haupthindernisse für die breitere Einführung solcher Fahrzeuge sind einerseits der Preis und andererseits die Ladeinfrastruktur („Tankstellen“ für Elektro-Lastwagen). Im Moment ist ein Elektro-Lastwagen rund dreimal so teuer wie ein herkömmliches dieselbetriebenes Lastenfahrzeug [18][33], die dabei anfallenden Kosten können momentan kaum auf die Kunden überwältigt werden [34], obwohl die Elektromobilität grundsätzlich nachgefragt wird. D.h. die Logistikbranche betrachtet die Elektromobilität als Produkt momentan eher als Marketing-Statement. Seitens [33] wird allerdings betont, dass die Preise sinken können, sobald der Markt lebendiger und die Stückzahlen höher werden. Zudem geht er davon aus, dass elektrisch betriebene Nutzfahrzeuge durchaus im ähnlichen ökonomischen Rahmen betrieben werden können, wie herkömmliche Fahrzeuge, weil der Betrieb in verschiedenen Bereichen günstiger ist (momentane Befreiung von der LSVA, tiefere Treibstoffpreise). Um den Betrieb der E-Nutzfahrzeuge flexibler zu gestalten, sind insbesondere seitens Alpiq E-Mobility Bestrebungen im Gang, die Ladeinfrastruktur (IONITY) zu verbessern. Dabei geht es auch darum, den Ladeprozess so zu beschleunigen, so dass er zeitlich vergleichbar ist mit dem Tanken eines dieselbetriebenen Lastwagens.

CO₂-Belastung Elektrizität

Hauptargument elektrisch betriebener Nutzfahrzeuge ist insbesondere die Verminderung von Lärm- und CO₂-Emissionen. Dabei stellt sich natürlich die Frage, wie hoch die CO₂-Belastung einerseits der eingesetzten Antriebssysteme und andererseits der eingesetzten Antriebselektrizität ist. Die von E-Force eingesetzten Batterien werden vor allem in China, Taiwan und Japan produziert. Dabei wird Elektrizität aus Kohlekraftwerken eingesetzt, was in einer hohen CO₂-Belastung der eingesetzten Hardware resultiert (48 gCO₂/km). Wie diese Belastung im Kontext der Einsatzperiode sowie im Vergleich mit Diesel zu bewerten ist, kann aufgrund der Komplexität nicht in dieser Studie diskutiert werden. Ebenfalls komplex ist die Frage, wie hoch die CO₂-Belastung der eingesetzten Elektrizität ist. Laut [33] beträgt die CO₂ Belastung bei einem durchschnittlichen dieselbetriebenen Lastwagen 800 – 900 Gramm CO₂ pro Kilometer. Beim Einsatz des am CH-Netz verfügbaren europäischen Strommix beträgt die Belastung zwischen 400 – 500 Gramm CO₂ pro Kilometer, und wenn ein Strommix aus erneuerbaren Quellen eingesetzt wird, so liegt die Belastung bei noch rund 8 g pro Kilometer. Diese Zahlen sollten jedoch nur als grobe Schätzung betrachtet werden, weil das Berechnen der CO₂-Belastungen der Elektrizität aus unterschiedlichen Quellen bekanntlich komplexe Fragen aufwirft.

Ausblick

Gemäss [4] ist künftig nicht mit einer starken Zunahme des elektrisch betriebenen schweren Güterverkehrs zu rechnen. In den Jahren 2045 bis 2050 wird der Anteil am gesamten schweren Güterverkehr erst auf 5 – 6 % prognostiziert. Diese Aussage wird seitens Industrie nicht unbedingt unterstützt. Dort geht man von einem Anteil von rund 30% bis 2050 aus. Dies, weil die Distanzen innerhalb der Schweiz relativ kurz sind und sich die Elektromobilität dafür - insbesondere auch für die Feinverteilung - eignet.

3.5.2 Komprimiertes Erdgas (CNG), Flüssiggas (LNG), Wasserstoff

Alternativen zum Diesel stellen Erdgas und Flüssiggas dar. Komprimiertes Erdgas wird schon seit längerer Zeit für den Betrieb von Erdgasfahrzeugen eingesetzt. Hier wird das Erdgas mit einem Druck von 200 bar im Tank gespeichert. Eine Alternative stellt das verflüssigte Erdgas dar, welches gegenüber dem komprimierten Erdgas eine höhere Energiedichte aufweist. Zudem lässt es sich leichter dorthin transportieren, wo kein Erdgasleitungsnetz vorhanden ist.

Ob sich allerdings Fahrzeuge, die mit Flüssiggas betrieben werden, durchsetzen werden, ist fraglich [4]. Mit komprimiertem Erdgas fahren bereits über eine Million Fahrzeuge weltweit. Die Reichweite solcher Fahrzeuge ist allerdings begrenzt. Das Flüssiggas könnte dieses Problem – auch für grosse Nutzfahrzeuge – lösen [18]. Allerdings muss dabei bedacht werden, dass Flüssiggas nichts anderes als Erdgas ist, das durch Zufuhr von Kälte in den flüssigen Zustand überführt wird. Aber selbst bei gut isolierten Kryotanks wird durch Erwärmung Erdgas entweichen, wenn keine Rückkühlung existiert. Da Methan ein sehr klimaschädliches Treibhausgas ist, wird das CO₂-Emissionsreduktionspotenzial durch solche Methan-Emissionen natürlich in Frage gestellt.

Zudem muss im Vergleich von Emissionswerten Berücksichtigung finden, dass für das Verflüssigen von Erdgas Energie aufgewendet werden muss. Das verteuert das Flüssiggas gegenüber dem komprimierten Erdgas und verschlechtert ausserdem die Gesamtenergiebilanz.

Ausblick

Gemäss [4] ist künftig nicht damit zu rechnen, dass sich komprimiertes Erdgas und Flüssiggas als Treibstoff für den schweren Güterverkehr etablieren wird. Der Anteil am Gesamtverkehr wird mittel- und langfristig auf 0% geschätzt [18]. Auch diese Aussage wird seitens Industrie nicht unbedingt unterstützt. Dort wird davon ausgegangen, dass Erdgas und Flüssiggas zum Diesel konkurrenzfähig werden, wenn das Tankstellennetz genügend gross ist.

3.6 Hemmnisse für die Verbreitung treibhausgas-mindernder Technologien

Die Einführung energiesparender Nutzfahrzeugtechnologien wird gemäss [18] durch verschiedene Hemmnisse erschwert:

- *Technologiespezifische Hemmnisse* ergeben sich aus Eigenschaften (z.B. Abmessungen, Gewicht) einer bestimmten Technologie oder bestimmten Voraussetzungen, welche der

Einsatz einer Technologie erfordert. Wesentliche technologiespezifische Hindernisse betreffen insbesondere

- Reduzierte Anwenderfreundlichkeit (z.B. Fahrerkomfort, zeitaufwändige Ablauf-routinen).
 - Reduktion des Fahrzeugnutzens zur Einhaltung gesetzlicher Vorgaben (z.B. für bauliche Veränderungen) oder durch verringerte Kompatibilität zu weltweiten Standards.
 - Fehlende Versorgungsinfrastruktur und Service-Netze (z.B. für Erdgas- und Elektrofahrzeuge).
- *Finanzielle Hemmnisse* ergeben sich aus den absoluten Kosten (z.B. hohe Anschaffungskosten) oder aus der Bewertung des Kosten-Nutzen-Verhältnisses einer Technologie (z.B. Beurteilung von Ausfallwahrscheinlichkeiten, Amortisationserwartungen, Wiederverkaufswert). Insbesondere kleinere Unternehmen haben oft zu geringe Personalkapazität zur Einschätzung der Kosteneinsparpotenziale, verfügen nur über begrenzte eigene finanzielle Mittel und haben einen schlechteren Zugang zu Krediten.
 - *Strukturelle Hemmnisse* ergeben sich aus den vorherrschenden Strukturen und Abläufen innerhalb der Logistik-Branche. Zentrale Frage in diesem Zusammenhang ist die Bedeutung der Treibstoffkosten für die Fahrzeugbetreiber, abhängig einerseits vom Anteil der Treibstoffkosten an den Gesamtkosten des Betriebs und andererseits von der „Treibstoff-Verantwortlichkeit“, d.h. wer letztlich die Treibstoffkosten der Transportdienstleistung zu tragen hat. Treibstoffkosten spielen insbesondere im Regional- und Fernverkehr mit einem Anteil von 20-30% an den Gesamtkosten eine wichtige Rolle. Allerdings gibt es verschiedene Mechanismen, mit denen Fuhrunternehmer ihre Treibstoff-Kosten an den Auftraggeber weitergeben können. Je weiter diese Verantwortlichkeit abgegeben wird, desto geringer wird der Anreiz für Effizienzmassnahmen im Fuhrpark des Fuhrunternehmers. Umgekehrt hat ein kleiner Auftraggeber einem grossen Auftragnehmer gegenüber weniger Möglichkeiten zur Einflussnahme hinsichtlich der Verwendung von Energieeffizienz-Technologien.
 - *Informationsdefizite* ergeben sich aus der Komplexität des Themas, insbesondere aus der Herausforderung, Minderungspotenziale und Kosten adäquat zu bestimmen und zu kommunizieren.

3.7 Massnahmen zur Förderung und Verbreitung des Technologieeinsatzes

Ausgehend von der oben dargestellten Hemmnisanalyse wurden ebenfalls von [18] untersucht, wie die Einführung energiesparender Nutzfahrzeugtechnologien und deren Durchdringung der Fahrzeugflotte gefördert werden kann. Insbesondere wurden politische Anreize zur grundsätzlichen Steigerung der Treibstoffeffizienz im Strassengüterverkehr beleuchtet. Die Massnahmen wurden nach ihrem Wirkungsansatz in drei Gruppen eingeordnet:

- *Information* umfasst Massnahmen zur Bereitstellung und Verbreitung von Informationen;
- *Förderung* umfasst Massnahmen, die auf eine finanzielle Unterstützung hinauslaufen;
- *Regulierung* umfasst Massnahmen, welche auf Änderungen im Gesetz hinwirken.

Sowohl die Hemmnisanalyse als auch die Massnahmenanalyse zeigen, dass eine Kombination verschiedener Massnahmen angestrebt werden sollte, die unterschiedliche Hemmnisse und Zielgruppen adressieren.

Information: Potenzielle Käufer sind auf zuverlässige und transparente Informationen zu Einsparpotenzialen und Kosten einer Technologie angewiesen, um Wirtschaftlichkeitsberechnungen durchführen zu können. Um den Bedarf an zuverlässigen und transparenten Informationen zum Kosten-Nutzen-Verhältnis von Effizienztechnologien zu befriedigen, ist in einem ersten Schritt die Einführung eines standardisierten CO₂-Testverfahrens notwendig, sowohl für komplette Fahrzeuge als auch für Einzeltechnologien. Mit dem im Auftrag der Europäischen Kommission entwickelten Simulationsmodell VECTO wird dieser Ansatz bereits verfolgt. Aufgrund der Vielfalt von Technologien können derzeit aber noch nicht alle Technologien und deren Kombinationen simuliert werden. Eine Weiterentwicklung von VECTO bzw. die Entwicklung ergänzender Verfahren für nicht mit VECTO simulierbare Technologien ist daher erforderlich, mit dem Ziel, möglichst alle heute verfügbaren aber auch zukünftigen Technologien nach klaren Standards modellieren zu können.

Standardisierte Testverfahren bilden die Grundlage für eine Reihe weiterer Massnahmen. Eine zentrale Massnahme ist die CO₂-Zertifizierung von Nutzfahrzeugen bzw. Einzeltechnologien, um die Informationen zum Einsparpotenzial transparent und verständlich darzustellen. Für neue Nutzfahrzeuge sollte eine verpflichtende Verbrauchs- und CO₂-Kennzeichnung angestrebt werden. Ergänzend sollte eine freiwillige Zertifizierung bei (insbesondere nachrüstfähigen) Einzeltechnologien möglich sein, mit der die Hersteller den Einspareffekt ihrer Technologien belegen können. Eine solche Zertifizierung ermöglicht das Auflegen von zielgerichteten Förderprogrammen, um das Hemmnis hoher Investitionskosten bei der Anschaffung neuer Fahrzeuge bzw. Nachrüstung des Fahrzeugbestands mit energieverbrauchs- und treibhausgasmindernden Technologien zu reduzieren.

Auch bei entsprechender Informationsverfügbarkeit ist deren Zusammenstellung und die Erstellung von Amortisationsberechnungen insbesondere für kleinere Unternehmen weiterhin ein erheblicher Aufwand. Herstellerunabhängige Effizienzberater können Fuhrunternehmer bei der Anschaffung effizienter Fahrzeuge bzw. der Nachrüstung von Effizienz-Technologien unterstützen. Über allgemeine Informationsveranstaltungen (Messen, Road-Shows), auf denen Erfolge bei der Verbrauchsreduktion durch verfügbare oder neu entwickelte Effizienztechnologien den Fahrzeugbetreibern vorgestellt werden, besteht zudem die Möglichkeit, eine stärkere Wahrnehmung für das grundsätzliche Thema Energieeffizienz von Nutzfahrzeugen sowie für vorhandene Möglichkeiten zur Energieeinsparung zu schaffen.

Förderung: Auch bei grundsätzlich gegebener Wirtschaftlichkeit können hohe Anschaffungskosten ein Hinderungsgrund für die Investition in zusätzliche energiesparende Technologien beim Fahrzeugkauf sein. Geeignete Fördermassnahmen können helfen, diese Hemmnisse abzubauen. Das können beispielsweise vergünstigte Investitionskredite für zertifizierte Technologien sein. Denkbar sind auch Umweltprämien für die Stilllegung alter Nutzfahrzeuge bei gleichzeitiger Anschaffung neuer Fahrzeuge mit vorgegebenen Effizienzstandards. Mit Förderprogrammen

kann gezielt die Einführung von heute noch nicht wirtschaftlichen, aber politisch gewollten Technologien unterstützt werden. Die damit erreichbare Steigerung der Produktionszahl und damit verbundene Lerneffekte können zu einer Verringerung der spezifischen Herstellungskosten und damit längerfristig zur Senkung der Anschaffungskosten führen. Auch Forschung und Entwicklung bei Technologie-Herstellern können gefördert werden, um Marktverfügbarkeit, Funktions-Zuverlässigkeit und wirtschaftliche Preise früher zu erreichen.

Regulierung: Einige technische Massnahmen werden bisher nicht umgesetzt, da die Technologien grösser oder schwerer sind als der Dieselantrieb und somit Nutzlast bzw. -volumen stark einschränken würden. Auch wenn zukünftig technische Entwicklungen diesbezüglich Optimierungen bringen können, wird empfohlen, für solche Technologien Anpassungen der gesetzlichen Rahmenbedingungen zu prüfen, die den Herstellern mehr Spielraum bei der Entwicklung zusätzlicher Effizienztechnologien geben.

Handlungsdruck kann weiterhin durch verpflichtende Effizienzklassen einzelner Technologien aufgebaut werden, z.B. eine weitere Verschärfung zukünftiger Anforderungen an den Rollwiderstand von Reifen über die bereits von der EU beschlossene Regelung hinaus. Dies kann dazu führen, dass zum einen Fahrzeuge auf energieeffizientere Technologien umgerüstet werden und zum anderen Fahrzeugbetreiber bei Verbrauchsteilen (z.B. Reifen, Öle, Beleuchtung) nicht nachträglich auf ineffiziente Klassen wechseln.

Fazit: Informations- und Fördermassnahmen sind wichtig, damit sowohl auf Hersteller- als auch auf Anwenderseite auf die CO₂-Emissionsreduktionspotenziale hingewiesen bzw. hingearbeitet wird. Für einen verbindlichen Vollzug mit klaren Rahmenbedingungen („gleich lange Spiesse“) ist unabdingbar, dass mittelfristig analog zum PW-Sektor CO₂-Zielwerte für den schweren Nutzfahrzeugverkehr definiert werden. Wie das Monitoring der einzelnen Reduktionsbereiche ausgestaltet werden muss, damit alle Betroffenen im Vollzug gleichbehandelt werden, wird im Rahmen der anstehenden Gesetzgebung noch viele Fragen aufwerfen.

3.8 Rechtliche Regelung in der Schweiz

3.8.1 CO₂-Emissionsvorschriften für neue Personen- und Lieferwagen

Für schwere Nutzfahrzeuge gibt es bisher keine CO₂-Emissionsvorschriften. Die bestehende Regelung für Personenwagen soll als Beispiel dienen, wie eine zukünftige Regelung für schwere Nutzfahrzeuge aussehen könnte:

Gestützt auf das CO₂-Gesetz [39] und die CO₂-Verordnung [40] gelten seit Juli 2012 in der Schweiz, analog zur EU, CO₂-Emissionsvorschriften für neue Personenwagen (PW). Erstmals zum Verkehr in der Schweiz zugelassene Personenwagen dürfen im Durchschnitt maximal 130 Gramm CO₂ pro Kilometer ausstossen. Diese Zielvorgabe gilt bis Ende 2019. Ab dem Jahr 2020 gilt für Personenwagen ein Zielwert von 95 Gramm CO₂ pro Kilometer. Ab dem Jahr 2020 werden zusätzlich CO₂-Emissionsvorschriften für Lieferwagen und leichte Sattelschlepper (leichte Nutzfahrzeuge, LNF) eingeführt. Sie müssen einen Zielwert von 147 Gramm CO₂ pro Kilometer

einhalten (Art. 10 CO₂-Gesetz). Auf Basis des Zielwerts muss die Flotte jedes Importeurs eine individuelle Zielvorgabe einhalten. Überschreitet er diese, wird eine Sanktion fällig. D.h. es handelt sich nicht um einen Grenzwert im eigentlichen Sinne, sondern um einen Zielwert, der nicht unbedingt eingehalten werden muss. Die CO₂-Vorschriften betreffen alle Importeure von neuen PW und/oder LNF (letztere ab dem Jahr 2020).

Bei den Emissionsvorschriften richtet sich die Schweiz grundsätzlich nach der EU. Das EU-Fahrzeugrecht wird somit im Rhythmus der periodischen Gesetzes- und Ordnungsrevisionen bzw. im Rahmen der bilateralen Übereinkommen übernommen. In der Schweiz sind insbesondere die Verordnung über die technischen Anforderungen an Strassenfahrzeuge (VTS) und die Verordnung über die Typgenehmigung von Strassenfahrzeugen (TGV) davon betroffen.

3.8.2 CO₂-Gesetz

Wie oben dargestellt, gilt das geltende CO₂-Gesetz lediglich für Personen- und Lieferwagen sowie Sattelschlepper bis zu einem Gesamtgewicht von 3.5 t (leichte Sattelschlepper).

Auch im Entwurf für ein neues CO₂-Gesetz befasst sich Artikel 10 nur mit Personenwagen, Lieferwagen und leichten Sattelschleppern bis 3.5 Tonnen. Der schwere Güterverkehr wird somit (vorerst) wieder ausgelassen. Gemäss [30] nimmt der Bund (BAFU) zur Kenntnis, welche Reduktionsziele von der EU Kommission vorerst definiert worden sind und welche Schritte (Monitoring, Zielwerte/Absenkpfade, Sanktionsmechanismen) nötig sind, um solche Ziele schliesslich in einem konkreten Regulierungsvorschlag zu verankern.

Gemäss [42] sollen ab 2025 die CO₂-Emissionsvorschriften für neue Fahrzeuge wiederum in Anlehnung an die EU-Vorschriften weiterentwickelt werden. Ursprünglich wurde in der EU für Personenwagen eine Bandbreite von 68 – 78 Gramm CO₂ Äquivalent pro Kilometer diskutiert, für Lieferwagen und leichte Sattelschlepper (< 3.5 t) eine Bandbreite von 105 – 120 Gramm. Aufgrund neuer Messverfahren (WLTP) wurden in der EU bereits neue Zielwerte formuliert; diese sollen bis 2025 um 15 Prozent und bis im Jahr um 2030 um 30 Prozent abgesenkt werden. Diese Vorschläge sind allerdings noch nicht rechtsgültig und müssen noch von EU-Parlament und Rat beraten und verabschiedet werden.

Falls in der EU Zielwerte verabschiedet werden, ist die Schweiz – als nicht EU Mitglied – grundsätzlich nicht verpflichtet, diese Zielwerte zu übernehmen. Die Verpflichtung im Rahmen des Übereinkommens von Paris können in anderen klimagas-relevanten Bereichen erfüllt werden [30]. Der schwere Strassengüterverkehr stellt jedoch einen Bereich dar, der auch zur Erreichung der internationalen Klimaziele geeignet ist und deshalb auch unter diesem Aspekt sinnvollerweise in das CO₂-Gesetz übernommen werden sollte.

Der Bundesrat wird analog zur heutigen Regelung der Bundesversammlung rechtzeitig weitergehende Zielwerte für Fahrzeuge für die Zeit nach 2024 vorschlagen. Interessant ist zudem folgendes: Der Bundesrat zieht in Übereinstimmung mit den Entwicklungen in der EU auch eine Ausdehnung der CO₂-Vorschriften auf Fahrzeuge mit einem Gesamtgewicht von mehr als 3.5 Tonnen in Betracht ([42] S. 31). Sobald ein solcher Vorschlag der EU vorliegt, wird dieser vom Bund

(BAFU, BFE) aufgenommen und darauf geprüft, inwieweit die Vorgaben mit der Schwerverkehrsabgabe kombinierbar sind [30].

3.8.3 Leistungsabhängige Schwerverkehrsabgabe (LSVA)

Die LSVA ist eine vom *Gesamtgewicht*, der *Emissionsstufe* sowie den *gefahrenen Kilometern* in der Schweiz und dem Fürstentum Liechtenstein abhängige eidgenössische Abgabe. Wichtig dabei ist, dass es sich beim massgebenden Gesamtgewicht um das höchstzulässige Gesamtgewicht gemäss Fahrzeugausweis handelt. Entsprechend muss ein 40-Tonnen-Lastwagen die LSVA für dieses Gewicht bezahlen, auch wenn er leer oder halbleer unterwegs ist.

Sie wird für alle Motorfahrzeuge und deren Anhänger entrichtet, die ein zulässiges Gesamtgewicht von mehr als 3,5 Tonnen aufweisen, dem Gütertransport dienen, im In- oder Ausland immatrikuliert sind und das öffentliche Strassennetz der Schweiz befahren. Die LSVA ist ein klassisches Instrument gemäss dem Verursacherprinzip und sollte eine Lenkungsfunktion übernehmen.

Das Verursacherprinzip ist ein reines Kostenzurechnungsprinzip (Internalisierung von externen Kosten). Es sagt nichts darüber aus, ob eine Umweltbelastung zu vermeiden, nach ihrer Entstehung zu beseitigen oder zu dulden ist. Aus dem Verursacherprinzip können nach herrschender Auffassung insbesondere keine Verhaltenspflichten abgeleitet werden [43]. Ob ein Gesetz, das gemäss dem Verursacherprinzip konzipiert ist, eine Lenkungsfunktion hat, hängt selbstverständlich mit der Höhe der erhobenen Abgabe zusammen. Wenn man die Entwicklung auf den Schweizer Strassen betrachtet (vgl. Zahlen in Kapitel 2) kann man monieren, dass die Lenkungsabgabe eine zu wenig grosse Kostenhürde darstellt, um die schweren Nutzfahrzeuge in die Schranken zu weisen bzw. auf die Bahn zu bringen.

Falls es dazu kommt, dass in der EU CO₂-Zielwerte für Lastwagen eingeführt werden, so wäre die Schweiz gefordert, diese in ihr CO₂-Gesetz zu übernehmen [42]. Die Verankerung solcher Zielwerte würde eine wichtige Ergänzung zur LSVA darstellen. Durch die Zielwerte bzw. die Emissionsvorschriften würden Vorgaben über den technischen Standard von neuen Lastenfahrzeugen festgelegt (grundsätzliche *Verhaltenspflicht*); durch die LSVA werden weiterhin diejenigen belohnt, welche möglichst wenig, möglichst effizient und möglichst auf dem neusten technischen Stand unterwegs sind (*Verhaltensanreiz*). Wie am Beispiel der Personenwagen erläutert wurde, ist damit zu rechnen, dass CO₂-Emissionsvorschriften in Form der erwähnten Zielwerte formuliert würden. D.h. diese könnten überschritten werden, wenn die entsprechenden Bussen bezahlt werden. Entsprechend gibt es zwischen einer künftigen Regelung im Sinne eines CO₂-Gesetzes und der LSVA einen überlappenden „Lenkungsbereich“. Dieser umfasst einerseits die Abgaben gemäss der LSVA und andererseits eine Gebühr, wenn die CO₂-Emissionsvorschriften nicht eingehalten werden können.

Weiter ist davon auszugehen, dass sich die technischen Verbesserungen, welche für das Erreichen der angestrebten CO₂-Emissionswerte nötig sind, indirekt auf die LSVA bzw. die erhobenen Gebühren auswirken werden:

- *Emissionsstufen:* Die bestehenden EURO-Klassifizierung könnten allenfalls durch die CO₂-Vorgaben ergänzt werden. Somit würden neue CO₂-Zielwerte unmittelbar in die LSVA-Berechnungen einfließen.
- *Gesamtgewicht:* Ein Faktor, der den Treibstoffverbrauch beim Güterverkehr beeinflusst, ist das Gewicht der Fahrzeuge. Falls es gelingt, das Leergewicht eines Lastwagens zu senken, so hat dies auf die Berechnung der LSVA grundsätzlich keinen Einfluss. Aufgrund der erhöhten Ladekapazität (Verbesserung des Verhältnisses von Leergewicht zum potenziellen Ladegewicht) würden die LKWs im Rahmen der bisherigen LSVA-Regelung die gleichen Abgaben bezahlen.
- *Gefahrene Kilometer:* Falls – wie oben dargelegt – die Fahrzeuge leichter werden und dadurch insgesamt eine höhere Transportleistung pro Lastwagen erreicht wird, kann damit gerechnet werden, dass insgesamt weniger Kilometer zurückgelegt werden müssen (bei gleichbleibendem Gütervolumen).

Einer Reduktion der gefahrenen Kilometer pro Tonne transportiertes Gut hätte unter Umständen einen Einfluss darauf, wie die LSVA künftig ausgestaltet werden muss, damit sie ihre Lenkungsfunction behalten kann. In jedem Fall würde die Einführung von Zielwerten für die CO₂-Emissionen die Frage mit sich bringen, wie die LSVA als Verhaltensanreiz mit den CO₂-Emissions-Zielwerten als grundsätzliche Verhaltenspflicht kombiniert werden muss, damit einerseits die CO₂-Emissionen des schweren Strassengüterverkehrs mittelfristig zurückgehen und andererseits die bisher erzielten finanziellen Erträge aus der LSVA weiterhin zur Verfügung stehen.

3.9 Relativierung der technischen Möglichkeiten, Transport als gesellschaftliches Problem und Rebound Effekte

3.9.1 Technische Möglichkeiten

Die von der EU Kommission skizzierten CO₂-Reduktionsziele sind zu begrüßen. Denn der schwere Strassengüterverkehr verursacht einen wesentlichen Teil der CO₂-Emissionen und wird in Zukunft weiter anwachsen.

Es gilt jedoch folgendes zu bedenken: Wie oben kurz skizziert, sind die technischen Möglichkeiten sehr vielfältig. Die einzelnen Massnahmenschnitte bewegen sich mehrheitlich im tiefen Prozentbereich. Ob diese Massnahmen künftig nun tatsächlich so aufsummiert werden können, wie dies aufgrund von Teststudien vermutet wird, ist im Moment noch nicht klar. Wie oben dargelegt, sind die Ziele ehrgeizig aber nicht unrealistisch, weil das Verbesserungspotential tatsächlich vorhanden ist.

Auf die Schweiz bezogen stellt sich zudem die Frage, wie massgebend das Einsparpotenzial moderner Lastwagen in einem Land sind, wo die Transportstrecken relativ kurz sind, durchschnittlich tiefe Tempi gefahren werden und teilweise erhebliche Höhenmeter bewältigt werden müssen. In der Literatur ist oft die Rede von „Langdistanzbedingungen“ (und wahrscheinlich mehrheitlich

flachen Strecken), welche für die Schweiz (und Österreich, Norditalien sowie den Südosten Frankreichs) nicht unbedingt massgebend sind. Entsprechend stellt sich die Frage, ob beim technischen Verbesserungspotenzial nicht auch ein Augenmerk auf die Topographie im Alpenraum gelegt werden sollte.

3.9.2 Transport als gesellschaftliches Problem

Unter Beachtung der technischen und politischen Komplexität der Ziele der EU-Kommission muss parallel zu den angestrebten Reduktionszielen aufgrund von Effizienzsteigerungen auch die Frage gestellt werden, warum so viele Güter transportiert werden und ob allenfalls das Transportvolumen verkleinert werden könnte. Gemäss [44] hat der weltweite Paketversand zwischen 2015 und 2018 um 20% zugenommen. Hauptgrund für diese enorme Zunahme sind der Ecommerce und die Online-Einkäufe. Das fast 150jährige Postabkommen (geregelt durch den Weltpostverein, WPV/Universal Postal Union, UPU), welches den grenzüberschreitenden Verkehr mit Briefen und Paketen regelt, ist durch diese Marktveränderung (früher ging es vor allem um den Briefversand) mit komplexen Fragen konfrontiert. Grundsätzlich geht es darum, wie der Ausgleich der grenzüberschreitenden Versandkosten zwischen den verschiedenen Mitgliedstaaten erfolgt⁸[31]. D.h. die Folgekosten einer solch gigantischen Logistik wird mit der Bereitstellung der Transport- (Strasse und Schiene) und Zustell-Infrastruktur den jeweiligen Ländern überantwortet. Dies führte dazu, dass die USA aus dem UPU-Abkommen ausgestiegen sind. Gerade in der Schweiz sind sowohl Strasse als auch Bahn oft an ihren Kapazitätsgrenzen, und der Ruf nach weiteren Ausbautetappen wird laut. Die Kosten dafür sind jedoch enorm. Dabei stellt sich die Frage, ob diese überhaupt auf die kommenden Generationen abgewälzt werden dürfen bzw., ob ein solcher Ausbau längerfristig nicht nur ökologisch, sondern auch ökonomisch fragwürdig ist. Bei der Frage, ob der weltweite Versand von Paketen nicht verteuert und damit das Volumen verkleinert werden könnte, hat die Universal Postal Union (UPU) nur beschränkt Einfluss, weil der grenzüberschreitende Postverkehr durch die Mitgliedstaaten geregelt wird. Zudem werden grosse internationale Logistikfirmen (FedEx, DHL, UPS) immer relevanter, und diese fallen nicht unter die Regeln der UPU. Entsprechend komplex ist es, diese Paketflut zu regulieren [31].

3.9.3 Rebound Effect

Es fragt sich zudem, ob die angestrebte Effizienzsteigerung durch den Rebound-Effekt nicht zu einem wesentlichen Teil wieder „aufgefressen“ würde. Als Rebound-Effekt bezeichnet wird der Anstieg des Energieverbrauchs aufgrund einer Effizienzsteigerung.

- Wenn effizientere Motoren gebraucht werden, so haben diese allenfalls eine höhere Leistung bzw. es wird – vor allem am Berg – schneller gefahren (vgl. Kap. 2.4).

⁸ Seit einigen Jahren kommen aus China riesige Mengen von Postsendungen in alle Welt (in Russland kommen 94% der Importpakete aus China). Gleichzeitig wird China von der UPU als Entwicklungsland eingestuft. Das hat zur Folge, dass die chinesische Seite einen vergleichsweise kleinen Anteil an die Post in all den Ländern überweisen muss, die dann die Päckchen auszutragen hat.

- Wenn weniger Treibstoff gebraucht wird, so können die Transportkosten gesenkt werden; dadurch wird die Nachfrage nach Transport u.U. stimuliert (direkter Rebound).
- Wenn weniger Geld für Treibstoff ausgegeben werden muss, so wird dieses Geld für ein anderes Gut eingesetzt, das in der Produktion oder im Betrieb ebenfalls energieintensiv ist (indirekter Rebound).
- Wenn weniger Treibstoff gebraucht wird, so kann dies Auswirkungen auf den Treibstoffpreis haben. Wenn das Angebot grösser wird, so kann die Nachfrage steigen. D.h. der Treibstoff wird sonst irgendwo auf der Welt verbrannt, wo er sonst zu teuer wäre (Makroökonomischer Rebound-Effekt).

Mit diesen Rebound-Szenarien hängt auch die Frage nach der Entwicklung des weltweiten Gütertransportes zusammen. Wenn dieser weiterhin günstig ist, so ist mit einer kontinuierlichen Ausweitung der Transportvolumina zu rechnen [31][44]. Diese Entwicklung ist in den kommenden Jahren wahrscheinlich so gross, dass die Reduktion durch die aufwändigen technologischen Errungenschaften als relativ kleine Reduktionsmassnahme von der starken Zunahme des Gütertransportes (über)kompensiert wird.

3.10 Fazit

Prognosen des Bundes

- Der Maximalwert der CO₂-Emissionen des schweren Nutzfahrzeugverkehrs soll zwischen 2020 und 2025 erreicht sein, anschliessend wird eine leichte Abnahme angenommen.
- Gegenüber den Luftschadstoffen bleibt die Abnahme bei den Treibhausgasemissionen weiterhin gering.
- Die Bedeutung der schweren Nutzfahrzeuge an den gesamten CO₂-Emissionen des Strassenverkehrs wird zunehmen, dies weil bei den PW ein höherer Anteil Elektromobilität vorausgesagt wird.
- E-LKW und alternative Antriebssysteme für schwere Nutzfahrzeuge bleiben eine Randerscheinung.
- Diese Schlussfolgerungen gelten unter der Voraussetzung, dass beschlossene oder absehbare Entwicklungen weitergeführt bzw. umgesetzt werden. Insbesondere gilt dies für die CO₂ Zielwertentwicklung von Personenwagen und leichten Nutzfahrzeugen sowie die Attraktivität der Güterbahn gegenüber der Strasse, welche gleichbleiben oder leicht ansteigen soll.

Technologische Entwicklung und VECTO

- VECTO muss sich in den kommenden Jahren etablieren und in realen Verkehrs- und Transportszenarien bewähren.
- VECTO Resultate müssen auch für typische Transportstrecken in der Schweiz verifiziert werden, falls relevante Zielwerte entwickelt werden sollen.
- Aufgrund der VECTO-Daten müssen die kosteneffizienten bzw. die zieleffizienten Massnahmen und der dazu nötige Vollzug definiert werden.
- Es muss geprüft werden, ob das nachgewiesene Optimierungspotenzial unter realen Transportbedingungen vorhanden ist. Bzw. es muss nachgewiesen werden, mit welchen Reduktionen durchschnittlich gerechnet werden kann.
- Es müssen CO₂-Zielwerte für LKWs definiert werden, welche sich nach dem Stand der Technik richten.
- In diesem Zusammenhang stellt sich auch die Frage der Zieleffizienz von Massnahmen.
- Die Sanktionen in den Fällen, wo diese Zielwerte überschritten werden, müssen eine Verhaltenspflicht nach sich ziehen.

Rechtliche Regelung

- Am 17. Mai 2018 hat die Europäische Kommission einen Gesetzesvorschlag vorgestellt, welcher die ersten CO₂-Emissionsstandards für den schweren Güterverkehr umfasst (bis 2025 Reduktion von 15%, bis 2030 mindestens eine Reduktion von 30% mit Referenzjahr 2019).

- Falls die EU-Zielvorgaben für schwere Nutzfahrzeuge verabschiedet werden, ist momentan noch unklar, ob und im Rahmen welcher rechtlichen Grundlage diese in der Schweiz übernommen werden. Die Schweiz ist rechtlich und klimapolitisch nicht verpflichtet, solche Zielwerte zu übernehmen, weil sich die Klimaziele auf den Gesamtausstoss und nicht auf einzelne Quellen beziehen. Sie ist hingegen verpflichtet, die technischen Anforderungen der EU als Zulassungskriterien zu übernehmen.
- Der Bundesrat hat in der Botschaft zur Gesamtrevision des CO₂-Gesetzes festgehalten, dass er in Übereinstimmung mit der Entwicklung in der EU auch eine Ausdehnung auf Fahrzeuge mit einem Gesamtgewicht von mehr als 3.5 Tonnen in Betracht zieht.
- Falls CO₂-Emissions-Zielwerte (grundsätzliche Verhaltenspflicht) von der Schweiz nachvollzogen werden, müssen diese mit der LSVÄ (Verhaltensanreiz) so abgestimmt werden, dass sie sich sinnvoll ergänzen.
- Einsparungen aufgrund technischer Entwicklungen werden möglicherweise durch die generelle Zunahme der Transportleistungen und verschiedene Rebound-Effekte relativiert.
- Neben den technischen Fragen müssen die gesellschaftlichen Fragen im Zusammenhang mit der weltweiten Logistik gestellt werden bzw. es müssen Anreize geschaffen werden, um «unnötige» Transporte einzudämmen.

Literatur

- [1] Bundesamt für Statistik, interaktive Tabellen STAT-TAB, <http://www.pxweb.bfs.admin.ch/pxweb/de/>
- [2] Bundesamt für Statistik, Schwere Strassengüterfahrzeuge, <http://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/mobilitaet-verkehr/gueterverkehr/schwere-strassengueterfahrzeuge.html>.
- [3] Handbuch für Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs HBEFA, Version 3.3, April 2017, <http://www.hbefa.net>
- [4] Luftschadstoffemissionen des Strassenverkehrs der Schweiz 1990-2050, Bundesamt für Umwelt, 2017.
- [5] Schadstoffemissionen des privaten Strassenverkehrs 1950-2000, Schriftenreihe Umwelt Nr. 55, BUWAL, 1986.
- [6] Luftschadstoffemissionen des Strassenverkehrs 1950-2010, Schriftenreihe Umwelt Nr. 255, BUWAL, 1995.
- [7] Luftschadstoffemissionen des Strassenverkehrs 1980-2030, Schriftenreihe Umwelt Nr. 355, BUWAL, 2004.
- [8] Luftschadstoffemissionen des Strassenverkehrs 1990-2035, Umwelt-Wissen Nr. 1021, BAFU, 2010.
- [9] Pilotstudie zum Treibstoffverbrauch und den Treibhausgasemissionen im Verkehr 1990-2050: Szenarien für den Strassenverkehr, BAFU/INFRAS, Schlussbericht 21.08.2017.
- [10] Switzerland's Greenhouse Gas Inventory 1990-2016, BAFU, April 2018.
- [11] Entwicklung der schweizerischen Gesetzgebung im Bereich der Abgasemissionen von Motorfahrzeugen und Maschinen, BAFU, 2013.
- [12] BFS aktuell, Güterverkehr in der Schweiz 2009, 2010.
- [13] BFS aktuell, Güterverkehr in der Schweiz 2016, 2017.
- [14] Luftreinhalteverordnung, 418.318.142.1 vom 16.12.1985 (Stand 01.06.2018).
- [15] Feinstaub in der Schweiz 2013, Statusbericht der Eidgenössischen Kommission für Lufthygiene, 2013.
- [16] Switzerland's Informative Inventory Report 2018, Submission under the UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution, BAFU, März 2018.
- [17] Perspektiven des Schweizerischen Personen- und Güterverkehrs bis 2040, Hauptbericht, ARE, 2016.
- [18] Umwelt Bundesamt: Zukünftige Massnahmen zur Kraftstoffeinsparung und Treibhausgasminderung bei schweren Nutzfahrzeugen (2015)
- [19] Fuel Efficiency Technology in European Heavy-Duty Vehicles: Baseline and Potential for the 2020 – 2030, The International Council on Clean Transportation (icct), Juli 2017
- [20] Analysis of key trends and drivers in greenhouse gas emissions in the EU between 1990 and 2014, European Environment Agency, 2016
- [21] Annual European Union greenhouse gas inventory 1990 – 2014 and inventory report 2016, EEA Report No 15/2016, European Environment Agency, 2016.

- [22]Data on greenhouse gas emissions and removals, sent by countries to UNFCCC and the EU Greenhouse Gas Monitoring Mechanism. Directorate-General for Environment (DG ENV), United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), European Environment Agency, 2016.
- [23]Reducing CO₂ emissions from heavy-duty vehicles, https://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/heavy_en
- [24]Façanha, C., Miller, J., & Shao, Z., Global Transportation Roadmap Model (Version V 1.0). International Council on Clean Transportation, 2014.
- [25]White Paper – Roadmap to a Single European Transport Area – Towards a Competitive and Resource Efficient Transport System, European Commission, 2011.
- [26]Annahme von EU-Rechtsvorschriften, https://ec.europa.eu/info/law/law-making-process/adopting-eu-law_de
- [27]Neue CO₂ Gesetzgebung und VECTO, Scania Schweiz AG, 06. April 2018.
- [28]Verordnung 2017/2400 der Kommission vom 12.12.2017, <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2017/2400/oj>
- [29]Europäisches Parlament P8_TA-PROV(2018)0246
- [30]Interview Eidgenössische Behörde (Referenzen sind der Alpen-Initiative bekannt)
- [31]Interview Internationale Behörde (Referenzen sind der Alpen-Initiative bekannt)
- [32]Interview Forschung (Referenzen sind der Alpen-Initiative bekannt)
- [33]Interview Industrie (Referenzen sind der Alpen-Initiative bekannt)
- [34]Interview Logistiker (Referenzen sind der Alpen-Initiative bekannt)?
- [35>Weiterentwicklung des Luftreinhaltekonzepts, Stand, Handlungsbedarf, mögliche Massnahmen; Schriftenreihe Umwelt Nr. 379, BUWAL 2005
- [36]Alain Griffel, die Grundprinzipien des schweizerischen Umweltrechts, Schulthess 2001
- [37]Diesel oder alternative Antriebe – womit fahren LKW und Bus morgen? Fakten, Trends und Perspektiven bis 2040, Shell Nutzfahrzeug-Studie, 2016
- [38]Effizienz- und Wirtschaftlichkeitsanalyse des elektrischen 18 t Lastwagens E-FORCE von Feldschlösschen Getränke AG, ETH Zürich/IWF, 2014.
- [39]Bundesgesetz über die Reduktion der CO₂-Emissionen, 641.71 vom 23.11.2011 (Stand 01.01.2018).
- [40]Verordnung über die Reduktion der CO₂-Emissionen, 641.711, vom 30.11.2012 (Stand 01.01.2018).
- [41]Entwurf: Bundesgesetz über die Verminderung von Treibhausgasemissionen, Version 01.12.2017.
- [42]Botschaft zur Totalrevision des CO₂-Gesetzes nach 2020.
- [43]Heribert Rausch, Arnold Marti, Alain Griffel, Umweltrecht, Schulthess, 2004
- [44]Pitney Bowes Parcel Shipping Index, <https://www.pitneybowes.com/us/shipping-index.html>

Glossar

ARE	Bundesamt für Raumentwicklung
BAFU	Bundesamt für Umwelt
BFS	Bundesamt für Statistik
CNG	„compressed natural gas“, komprimiertes Erdgas
EGR	„exhaust gas recirculation“, Abgasrückführung
HBEFA	Handbuch für Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs
icct	The International Council on Clean Transportation
LNG	„liquified natural gas“, Flüssiggas
LRV	Luftreinhalteverordnung
LSVA	Leistungsabhängige Schwerverkehrsabgabe
PM	„particulate matter“, Partikelmasse von Feinstaub
PN	„particle number“, Partikelanzahl von Feinstaub
PW	Personenwagen
SCR	„selective catalytic reduction“, selektive katalytische Reduktion
SNF	schwere Nutzfahrzeuge
LNF	leichte Nutzfahrzeuge
VECTO	„Vehicle Energy Consumption Calculation Tool“