



ifeu -
Institut für Energie-
und Umweltforschung
Heidelberg GmbH

**Erarbeitung von
Basisemissionsdaten
des dieselbetriebenen
Schienenverkehrs
unter Einbeziehung
möglicher
Schadstoffminderungs-
technologien**

Weiterführung und Auswertung des
UBA-FuE-Vorhabens 299 43 111

Endbericht

Wolfram Knörr
Jens Borken

Im Auftrag der Deutschen Bahn AG

Heidelberg, Dezember 2003

Zusammenfassung

Das Forschungsvorhaben „Erarbeitung von Basisemissionsdaten des dieselbetriebenen Schienenverkehrs unter Einbeziehung möglicher Schadstoffminderungstechnologien“ baut direkt auf dem Vorhaben des Umweltbundesamtes „Ermittlung von Basisemissionsdaten des dieselbetriebenen Schienenverkehrs“ (UFOPLAN Nr. 299 43 111) auf. Ziel des Vorhabens war es, die Ergebnisse des Messprogramms, das von WTZ Roßlau im ersten Teil des Vorhabens durchgeführt wurde, aufzubereiten, Emissionsfaktoren für den Realbetrieb abzuleiten, eine Emissionsberechnung für den dieselbetriebenen Schienenverkehr in Deutschland durchzuführen, Annahmen für die zukünftige Entwicklung abzuleiten und ein Szenario für eine mögliche zukünftige Entwicklung bis 2020 zu berechnen. Schließlich sollten die Ergebnisse der Untersuchung in das Emissionsmodell TREMOD integriert werden.

Die Emissionsfaktoren aus dem Messprogramm wurden dem IFEU von WTZ übergeben. Das Vorgehen in dem ersten Teil des Messprogramms ist in diesem Bericht dokumentiert, soweit es für das Verständnis des weiteren Vorgehens notwendig ist. Das genaue Vorgehen sowie die Interpretation der Ergebnisse (z.B. Abweichungen zu bisherigen Messungen, Schwankungsbreiten, Untersuchung der Partikelzusammensetzung) sind dem WTZ-Bericht /WTZ 2002a/ sowie der dort enthaltenen Zusammenfassung zu entnehmen.

Im Rahmen dieses Teils des Vorhabens wurden die folgenden Ergebnisse erarbeitet:

Ergänzung der Emissionsfaktoren

Das Messprogramm und die im ersten Teil des Vorhabens durchgeführte Anfrage bei den Motorherstellern lieferte Emissionsfaktoren für CO, HC, NO_x, Partikel und den Kraftstoffverbrauch für sechs Motortypen mit mehr als 560 kW und einem Motor für Rangierlokomotiven mit 480 kW, jeweils für neun verschiedene Lastpunkte. Für die übrigen Motoren, die bei der DB AG eingesetzt werden, liegen Mittelwerte aus der Motordatenbank des Bahn-Umwelt-Zentrums für den ISO-F-Zyklus vor. Diese Werte wurden für die Emissionsberechnung verwendet, da es nicht möglich war, weitere Daten von Herstellern zu erhalten.

Ursprünglich war vorgesehen, für die Motoren unter 560 kW die Emissionsfaktoren aus dem Bereich der schweren Nutzfahrzeuge zu verwenden. Es stellte sich jedoch heraus, dass die im Bahnbereich überwiegend eingesetzten Motoren nicht Bestandteil der Messungen im Straßenverkehr waren. Daher wurden auch für die kleinen Bahnmotoren die beim Bahn-Umwelt-Zentrum vorliegenden ISO-F-Werte verwendet.

Ableitung von Lastprofilen für den realen Zugbetrieb

Eine zentrale Frage in diesem Vorhaben war, inwieweit die Emissionen im realen Fahrbetrieb aufgrund eines anderen Lastverhaltens von den Werten abweichen, die im ISO-F gemessen werden. Dazu mussten Lastprofile aus dem realen Fahrbetrieb ermittelt werden.

Für die Beschreibung des Lastverhaltens im realen Betrieb liegen jedoch nur wenige Einzelmessungen sowie einige Standardzyklen vor. Tendenziell weisen diese Zyklen geringere Zeitanteile im Vollastbetrieb als der ISO-F-Zyklus auf sowie größere Anteile im Teillastbereich. Im Rangierbetrieb treten dabei die größten Abweichungen vom ISO F auf: Die vorliegenden Rangierzyklen von MTU und der EPA zeigen hohe Anteile im Leerlauf und in der unteren Teillast und nahezu keine Vollastanteile.

Es zeigte sich, dass es nicht möglich ist, auf Basis der vorliegenden Lastprofile den realen Zugbetrieb repräsentativ abzubilden. Daher wurden die vorliegenden Lastprofile verwendet um abzuschätzen, unter welchen veränderten Betriebsbedingungen Abweichungen in den Emissionsfaktoren gegenüber dem ISO-F-Zyklus auftreten.

Die vorliegenden Lastprofile wurden zu diesem Zweck so aufbereitet, dass sie mit den Emissionsfaktoren aus dem Messprogramm verknüpft werden konnten. Für die Berechnung wurden typische Leistungsprofile (Kombination Baureihe - Motor - Lastprofil) definiert. Je Leistungsprofil wurden die Emissionsfaktoren je kWh berechnet und den entsprechenden Emissionsfaktoren aus dem ISO-F-Zyklus gegenübergestellt. Wichtige Ergebnisse dieser Berechnung waren:

- Die größten Abweichungen im Emissionsverhalten gegenüber dem ISO-F treten dann auf, wenn das Lastprofil hohe Anteile im Leerlauf und der unteren Teillast sowie geringe Volllastanteile aufweist. Dies gilt vor allem für den Rangierbetrieb. Dort kommt es zu einer deutlichen Erhöhung der CO- und HC-Emissionen (bis zu Faktor 4 gegenüber dem ISO-F) aber auch bei den NOx- und Partikelemissionen (bis zu Faktor 2).
- Der Kraftstoffverbrauch je kWh unterscheidet sich in den meisten Profilen kaum vom entsprechenden ISO-F-Wert. Aus diesem Grund ist es vertretbar, die Emissionsberechnung - wie bisher üblich - auf Basis von kraftstoffbezogenen Emissionsfaktoren und dem Kraftstoffverbrauch, der meist auf andere Art ermittelt wurde (Simulationsrechnung, gemessen oder Gesamtverbrauch einer Zeitperiode) und oft die sicherste Randgröße der Emissionsberechnung ist, durchzuführen.

Berechnung der Emissionen des Schienenverkehrs der DB mit Dieselfahrzeugen

Die Emissionen des Schienenverkehrs der DB AG mit Dieseltriebfahrzeugen wurde für die Jahre 1994 bis 2002 berechnet auf Basis der Betriebsleistungsstatistik der DB und des Dieselmotorkraftstoffverbrauchs je Zugart. Zugrunde gelegt wurden Kraftstoff-bezogene Emissionsfaktoren nach dem ISO-F-Zyklus. In einer Sensitivitätsrechnung für 2001 wurden alternative Lastprofile für die Berechnung verwendet. Wie aufgrund der Berechnungen für die Lastprofile zu erwarten, ergeben sich wesentliche Unterschiede gegenüber der Berechnung auf Basis des ISO-F-Zyklus vor allem beim Rangieren.

Schlussfolgerungen aus den Berechnungen

Die Unterschiede im Ergebnis sprechen dafür, alternative Lastprofile aus dem Realbetrieb für die Emissionsberechnung zu verwenden. Dies sollte zukünftig angestrebt werden, denn zum gegenwärtigen Zeitpunkt ist dies aus verschiedenen Gründen nicht zu empfehlen:

- Eine differenzierte Emissionsberechnung ist im Augenblick nur für wenige Motoren möglich. Emissionsfaktoren für die Lastpunkte auf den Betriebskennlinien, wie sie in diesem Vorhaben verwendet wurden, sollten daher zumindest für alle neuen und zukünftigen Motoren verfügbar sein.
- Die vorliegenden Lastprofile aus dem Realbetrieb sind nicht repräsentativ. Um die Kenntnisse zum realen Lastverhalten zu verbessern könnten möglicherweise vorhandene Zugfahrt-Simulationsprogramme eingesetzt werden.
- Schließlich sollte das Verfahren zur Berechnung der Emissionen des Dieselschienenverkehrs zumindest im europäischen Rahmen abgestimmt sein, damit die Berechnungsergebnisse vergleichbar bleiben.

Ergänzung der Daten für TREMOD

TREMOD berechnet die Emissionen des gesamten Schienenverkehrs in Deutschland in der Zeitreihe 1960 bis 2020. Daher wurden die Emissionsfaktoren der Dieseltraktion für West- und Ostdeutschland vor 1994 anhand vorliegender Informationen zu Fahrzeugbeständen und Betriebsleistungen der Baureihen abgeschätzt und für die Berechnung verwendet.

Für den Bereich der sonstigen Bahnen in Deutschland liegen keine umfassenden Informationen über die Emissionsfaktoren der Fahrzeuge vor. Aufgrund des geringen Anteils der sonstigen öffentlichen Bahnen an den Verkehrsleistungen (Personenverkehr: unter 1%, Güterverkehr unter 0,5% Anteil) wurden daher die Durchschnittswerte der DB AG für die Emissionsberechnung verwendet.

Szenario zur möglichen zukünftigen Entwicklung bis 2020

Aufgrund von vorliegenden Angaben zur Entwicklung des Fahrzeugparks, der Betriebsleistung und der zukünftig zu erwartenden Emissionsgrenzwerte wurde ein Szenario zur Entwicklung der Emissionen der Dieseltriebfahrzeuge bis 2020 durchgeführt. Dabei wurden folgende Annahmen getroffen:

- Leicht rückläufige Betriebsleistungen der Dieseltraktion bis 2020
- Minderung des spezifischen Energieverbrauchs aufgrund betrieblicher und technischer Maßnahmen von 2002-2020 um 10 %.
- Weitere Remotorisierung und Beschaffung neuer Fahrzeuge ab 2006 bis ca. 2010 entsprechend der gültigen Abgasgesetzgebung.

Unter diesen Randbedingungen gehen die NO_x-Emissionen der Dieseltraktion zwischen 2002 und 2020 um 45 %, die Partikelemissionen um 65 % zurück. Weitere Minderungen sind möglich, wenn

- mehr ältere Fahrzeuge ersetzt werden als angenommen oder
- Fahrzeuge angeschafft werden, die deutlich niedrigere Emissionen verursachen als die vor 2012 gültige Emissionsgesetzgebung vorschreibt.

Inhalt

1 Ziel des Vorhabens.....	10
2 Ermittlung von Emissionsfaktoren für Bahndieselmotoren.....	11
2.1 Im Rahmen des Vorhabens untersuchte Bahnmotoren.....	11
2.1.1 Datenrecherche	11
2.1.2 Auswahl der Motoren.....	12
2.1.3 Vorgehen bei den nicht gemessenen Motoren.....	15
2.1.4 Festlegung der Prüfpunkte für die Schadstoffmessungen.....	15
2.1.5 Durchführung der Messungen	18
2.1.6 Verwendung der Emissionsfaktoren für die Emissionsberechnung.....	19
2.2 Sonstige Bahnmotoren mit einer Leistung von mehr als 560 kW	20
2.3 Bahnmotoren mit einer Leistung bis zu 560 kW	21
3 Abschätzung von Emissionsfaktoren für den realen Fahrbetrieb.....	24
3.1 Einführung	24
3.2 Aufbereitung der vorliegenden Lastprofile.....	24
3.3 Vergleich von Emissionsfaktoren für verschiedene Leistungsprofile.....	25
3.3.1 Auswahl von Leistungsprofilen	25
3.3.2 Vergleich der Emissionsfaktoren in verschiedenen Lastprofilen.....	27
3.3.3 Personenverkehr - Diesel-Elektrisch.....	27
3.3.4 Personenverkehr - Diesel-Hydraulisch.....	29
3.3.5 Personenverkehr - Berg- und Talfahrt	31
3.3.6 Güterverkehr - Diesel-elektrisch	33
3.3.7 Güterverkehr - Diesel-hydraulisch	35
3.3.8 Rangieren.....	37
3.3.9 Auswertung und Zusammenfassung.....	39
4 Energieverbrauch und Emissionen Deutschland 1980-2020	41
4.1 DB AG 1994-2002.....	41
4.1.1 Einleitung	41
4.1.2 Datengrundlagen und Berechnungsverfahren	41
4.1.3 Berechnung der Emissionen auf Basis alternativer Lastprofile	48
4.2 Deutsche Bundesbahn und Deutsche Reichsbahn bis 1993	49
4.3 Übrige Eisenbahnen bis 2002.....	50
4.4 Zukünftige Entwicklung.....	51
4.4.1 Annahmen zum Fahrzeugpark und den Emissionsfaktoren	51
4.4.2 Annahmen zur Entwicklung der Betriebsleistungen.....	52
4.4.3 Ergebnisse	54
5 Anhang.....	60
5.1 Grenzwerte für Bahnmotoren in Europa	60
5.2 Zusammenstellung von Lastprofilen.....	61
5.2.1 Prüfzyklen.....	61
5.2.2 Lastprofile der Industrie	61

5.2.3	Lastprofile der DB AG	62
5.2.4	Lastprofile der Deutschen Reichsbahn	64
5.2.5	Lastprofile der DSB	65
5.3	Aufbereitung der Lastprofile für die vermessenen Lastpunkte	66
5.4	Emissionsfaktoren der Lastprofile	68
5.5	Ableitung mittlerer Emissionsfaktoren für die Emissionsberechnung	73
5.5.1	Prinzipielles Vorgehen	73
5.5.2	Konkrete Ableitung für die DB AG 1994-2002	74
5.6	Szenarienannahmen	76
6	Begriffe und Abkürzungen	80
7	Literatur	81

Tabellen

Tab. 1	Motortypen in Streckenlokomotiven der DB AG im Jahr 2000	12
Tab. 2	Jährliche und gesamte Laufleistung der Motorentypen im Jahr 2000	13
Tab. 3	Motortypen zur Beurteilung von Schadstoffemissionen	15
Tab. 4	Prüfpunkte zur Schadstoffmessung von Bahndieselmotoren im dieselhydraulischen Betrieb	18
Tab. 5	Prüfpunkte zur Schadstoffmessung von Bahndieselmotoren im dieselelektrischen Betrieb	18
Tab. 6	Emissionsfaktoren im ISO-F-Zyklus für die untersuchten Bahnmotoren (in kg/h)	19
Tab. 7	Sonstige Bahnmotoren der DB AG mit einer Leistung von mehr als 560 kW	21
Tab. 8	Die am häufigsten im Schienenverkehr eingesetzten Motoren mit Leistungen < 560 kW im Jahr 2000	22
Tab. 9	Bahnmotoren ≤560 kW bei der DB AG	23
Tab. 10	Ausgewählte Leistungsprofile.....	27
Tab. 11	Entwicklung der Betriebsleistungen (Leistungstonnenkilometer) im Personennahverkehr je Motor bei der DB AG 1994-2002	42
Tab. 12	Entwicklung der Betriebsleistungen (Leistungstonnenkilometer) im Personenfernverkehr je Motor bei der DB AG 1994-2002.....	42
Tab. 13	Entwicklung der Betriebsleistungen (Leistungstonnenkilometer) im Güterverkehr je Motor bei der DB AG 1994-2002	43
Tab. 14	Entwicklung der Betriebsleistungen (Leistungstonnenkilometer) Rangieren je Motor bei der DB AG 1994-2002	43
Tab. 15	Entwicklung der Betriebsleistungen (Leistungstonnenkilometer) im Gesamtverkehr je Motor bei der DB AG 1994-2002	44
Tab. 16	Betriebsleistungen (Leistungstonnenkilometer) der Dieseltraktion der DB AG 1994-2002 (in Mrd. Ltkm/a)	45
Tab. 17	Energieverbrauch der Dieseltraktion der DB AG 1994-2002 (in t/a).....	45
Tab. 18	Berechnete Emissionsfaktoren der Dieseltraktion der DB AG 1994-2002 (in g/kg)	46
Tab. 19	Emissionen der Dieseltraktion der DB AG 1994-2002 (in t/a).....	47
Tab. 20	Lastprofile für alternative Emissionsberechnung 2001	48
Tab. 21	Berechnungsergebnisse für das Jahr 2001: Vergleich Berechnung mit alternativen Lastprofilen gegenüber der Berechnung mit ISO F (in t/a)	49
Tab. 22	Betriebsleistungsanteile verschiedener Motoren bei der DB 1987 und 1990	50

Tab. 23	Emissionsfaktoren aktueller neuer Bahnmotoren und Abschätzung für mögliche zukünftige Motoren (g/kWh)	52
Tab. 24	Vorausschätzung der Verkehrsleistungen des Eisenbahnverkehrs in Deutschland bis 2020	54
Tab. 25	Anteile der Betriebsarten an der Betriebsleistung bei der DB AG 1995, 2002 und im Basisszenario bis 2020.....	54
Tab. 26	Mittlere Emissionsfaktoren (g/kg) je Zugart und Leistungsart - Szenarienberechnung	55
Tab. 27	Emissionen der Dieseltraktion der DB AG 2002-2020 (in t/a).....	56
Tab. 28	Partikelemissionen der Dieseltraktion der DB AG 2005-2020 (in t/a)	57
Tab. 29	UIC-Grenzwertvorschläge (in g/kWh).....	60
Tab. 30	Vorschlag des Rates der EU vom 10. Oktober 2003 (in g/kWh).....	60
Tab. 31	Prüfpunkte im ISO-F- und im UIC-Zyklus	61
Tab. 32	Prüfpunkte der EPA Zyklen	61
Tab. 33	MTU/EUROMOT-Lastprofile	62
Tab. 34	Siemens-Lastprofil Rangieren	62
Tab. 35	Lastprofile DB Cargo AG 2000	62
Tab. 36	Lastkollektive BR 218 420-8 (TB11-Motor, abgasoptimiert).....	63
Tab. 37	Unterteilung der Lastanteile	63
Tab. 38	Lastprofile BR 218 231-9 mit TB11-Motor am 29.11.2000	64
Tab. 39	Lastprofile von Streckenloks der Deutschen Reichsbahn	64
Tab. 40	Rangierloks.....	64
Tab. 41	Lastprofile der DSB	65
Tab. 42	Zeitanteile von Lastprofilen bezogen auf die Lastpunkte (WTZ).....	67
Tab. 43	Emissionsfaktoren (in kg/h) für verschiedene Leistungsprofile	72
Tab. 44	Emissionsfaktoren (in g/kWh) für verschiedene Leistungsprofile	73
Tab. 45	Berechnungsbeispiel: NO _x -Emissionen des Güterverkehrs (Zugbetrieb) der DB AG im Jahr 2001	76
Tab. 46	Annahmen für die Entwicklung der Betriebsleistungen je Motor (Anteil an den Leistungstonnenkilometern) - Dieseltriebwagen 2003-2020	77
Tab. 47	Annahmen für die Entwicklung der Betriebsleistungen je Motor (Anteil an den Leistungstonnenkilometern) - Streckenlok (BA2) 2003-2020.....	78
Tab. 48	Annahmen für die Entwicklung der Betriebsleistungen je Motor (Anteil an den Leistungstonnenkilometern) - Rangierlok (BA2+3) 2003-2020.....	79

Abbildungen

Abb. 1 Wichtung der Motorentypen mit $P_e > 560$ kW in Streckenlokomotiven der DB AG auf der Grundlage der jährlichen Laufleistung14

Abb. 2 Wichtung der Motorentypen mit $P_e > 560$ kW in Streckenlokomotiven der DB AG auf der Grundlage der geschätzten Gesamtleistung14

Abb. 3 Motorenkennfeld bei dieselhydraulischem Betrieb16

Abb. 4 Motorenkennfeld bei dieselelektrischem Betrieb17

Abb. 5 Vergleich der Emissionsfaktoren (in g/kWh) von verschiedenen Lastprofilen gegenüber dem ISO F-Zyklus - BR 234, Motor 5D4928

Abb. 6 Vergleich der Emissionsfaktoren (in g/kWh) von verschiedenen Lastprofilen gegenüber dem ISO F-Zyklus - BR 21830

Abb. 7 Vergleich der Emissionsfaktoren (in g/kWh) von verschiedenen Lastprofilen gegenüber dem ISO F-Zyklus - BR 218, Motor 12V956TB11n/o32

Abb. 8 Vergleich der Emissionsfaktoren (in g/kWh) von verschiedenen Lastprofilen gegenüber dem ISO F-Zyklus - BR 232, Motor 5D4934

Abb. 9 Vergleich der Emissionsfaktoren (in g/kWh) von verschiedenen Lastprofilen gegenüber dem ISO F-Zyklus - BR 294, Motor 12V652TA/TZ10.....36

Abb. 10 Vergleich der Emissionsfaktoren (in g/kWh) von verschiedenen Lastprofilen gegenüber dem ISO F-Zyklus - BR 294, Motor 12V652TA/TZ10 und BR 360, Motor GTO6A.....38

Abb. 11 Annahmen zur Entwicklung der Betriebsleistungen (Mrd. Leistungstonnenkilometer) von Dieseltriebfahrzeugen bei der DB AG bis 202053

Abb. 12 Entwicklung des Kraftstoffverbrauchs (Tonnen Diesel) von Dieseltriebfahrzeugen bei der DB AG bis 2020.....55

Abb. 13 Emissionsfaktoren in g/h für verschiedene Motoren - Lastpunkte für die Kennlinie PmZEV (Personenverkehr)69

Abb. 14 Emissionsfaktoren in g/h für verschiedene Motoren - Lastpunkte für die Kennlinie PoZEV (Güterverkehr, Rangieren)70

Abb. 15 Relative Leistungen der Kennlinien PmZEV und PoZEV für dieselhydraulischen und diesel-elektrischen Antrieb71

1 Ziel des Vorhabens

Im Auftrag des Umweltbundesamtes wurde in den Jahren 2000 bis 2002 das Forschungsvorhaben „Ermittlung von Basisemissionsdaten des dieselbetriebenen Schienenverkehrs“ (UFOPLAN Nr. 299 43 111) vom WTZ Roßlau gGmbH in Zusammenarbeit mit dem IFEU Heidelberg durchgeführt. Ziel des Vorhabens war es, repräsentative Schadstoffemissionsdaten für den Schienendieselsverkehr in Deutschland zu ermitteln. Der Schwerpunkt der Arbeit lag dabei auf den Motoren mit einer Nennleistung von über 560 kW. Dafür wurden von den Auftragnehmern fünf Motoren in Abstimmung mit dem Umweltbundesamt und der DB AG ausgewählt. An den Motoren wurden die Schadstoffe Stickstoffoxide, Kohlenmonoxid, Kohlenwasserstoffe, Partikel sowie die Filterschwärzungszahl unter stationären Bedingungen auf Prüfständen gemessen.

Die Prüfpunkte für die Messungen wurden so festgelegt, dass eine spätere Berechnung von Emissionsfaktoren für die unterschiedlichsten Einsatzfälle und Streckenprofile möglich ist. Die Prüfstufen des ISO-F-Zyklus waren im Messprogramm enthalten. Die weiteren Prüfpunkte wurden von WTZ und IFEU nach Analyse von typischen Lastprofilen und Motorkennlinien vorgeschlagen und mit dem Umweltbundesamt und der DB AG abgestimmt. Insgesamt wurden je Motor 10 Punkte gemessen. Für 2 neuere Motoren stellte MTU detaillierte Emissionskennfelder zur Verfügung. Daraus konnten Emissionsfaktoren für die ausgewählten Prüfpunkte berechnet werden.

Arbeiten in der zweiten Projektphase

Das Ziel der zweiten Projektphase war die Aufbereitung und Ableitung von Emissionsfaktoren für den realen Fahrbetrieb, die Berechnung der Emissionen des Schienendieselsverkehrs in Deutschland bis 2002 sowie Ableitung von Szenarien bis 2020 unter Berücksichtigung zukünftiger Motorkonzepte. Dazu wurden die folgenden Arbeiten durchgeführt:

Berechnung von Emissionsfaktoren für typische Lastprofile aus den Messdaten:

Für typische Kombinationen in den relevanten Betriebszuständen wurden Lastprofile abgeleitet und mit den entsprechenden Emissionsfaktoren für die einzelnen Komponenten berechnet. Die Ergebnisse wurden analysiert sowie mit den Ergebnissen des ISO-F-Zyklus verglichen.

Berechnung der direkten Emissionen je Zugart und Leistungsart bzw. der Emissionen je Bezugsjahr:

Aus diesen Emissionsfaktoren-Sätzen wurden die direkten Emissionen der für die Deutsche Bahn typischen Züge berechnet. Für die nicht gemessenen Motoren wurden die Emissionsfaktoren aus der Motordatenbank des Bahn-Umwelt-Zentrums verwendet. Auf Grundlage des Kraftstoffverbrauchs, den Anteilen an der Betriebsleistung des Dieselbetriebs der Deutschen Bahn für die Jahre ab 1994 ermittelt. Für die Periode davor wurden plausible Schätzungen vorgenommen.

Erstellung eines Basisszenarios für die mögliche Entwicklung bis 2020: Aus den vorliegenden Informationen wurden erste Annahmen zur Entwicklung des Fahrzeugparks, der Betriebsleistungen und der Emissionsfaktoren zukünftiger Motoren abgeschätzt und ein Basisszenario berechnet.

Implementation des Verfahrens und der Emissionsfaktoren in das Modell TRE-MOD: Nach Abschluss aller Arbeiten wurden die Ergebnisse des Vorhabens in TRE-MOD integriert.

2 Ermittlung von Emissionsfaktoren für Bahndieselmotoren

2.1 Im Rahmen des Vorhabens untersuchte Bahnmotoren

2.1.1 Datenrecherche

Im ersten Teil des Vorhabens wurde der aktuelle Bestand an Lokomotivdieselmotoren mit einer Leistung größer als 560 kW bei der Deutsche Bahn AG ermittelt. Aus den Daten wurde ein Vorschlag für die bei den Schadstoffmessungen zu berücksichtigenden Motorentypen abgeleitet. Nach Beratungen zwischen IFEU Heidelberg, UBA Berlin und WTZ Roßlau wurde Kontakt zu den Fachabteilungen von DB Bahn-Umwelt-Zentrum (BUZ), DB Cargo und DB Regio aufgenommen, um die notwendigen Informationen zum Motorenbestand, geplanter Remotorisierung, Belastungsprofilen und Motorenkennfeldern zu erhalten. Zu den interessierenden Fragen wurde ein Fragenkatalog erarbeitet und der DB AG zugestellt. Im Ergebnis dieser Aktivitäten übergab die DB AG umfangreiches Datenmaterial.

Auf Wunsch des Umweltbundesamtes wurde die Recherche der verwendeten Bahnmotoren auf den Bereich der sonstigen Bahnen (NE-Bahnen) sowie der Frage der Remotorisierung von Schienendieselfahrzeugen mit Austauschmotoren ausgeweitet. Hierzu wurde eine Literaturrecherche durchgeführt und der Kontakt mit dem VDV, dem Verband der deutschen Bahnindustrie, einigen Herstellern (MTU, MAN) und dem Eisenbahnbundesamt hergestellt. Es zeigte sich, dass in diesem Bereich bislang keine Daten über Bestand und Motorisierung von Diesellokomotiven vorhanden sind. Wegen des geringen Anteils der NE-Bahnen wurde auf eine weitergehende Recherche verzichtet.

Weiterhin wurde auf Wunsch des Umweltbundesamtes die Zukunftsoption Hochgeschwindigkeitsdiesel untersucht. Im Auftrag der DB wurden die Triebwagen ICE-TD (BR 605, „Dieselversion“ der ICE-T BR 411/415 mit gleichem Aussehen und Konzeption) von Siemens/Duewag/ Bombardier entwickelt und gebaut. Jeder der vier Einzelwagen des ICE-TD verfügt über einen unterflur angeordneten Sechszylinder-Cummins-Dieselmotor vom Typ QSK 19-R. Die Motorleistung je Motor beträgt 560 kW, die Kraftübertragung erfolgt dieselelektrisch. Aufgrund der Unsicherheit des zukünftigen Einsatzes dieses Fahrzeuges wurde der Motor zunächst nicht in den Messvorschlag aufgenommen.

Der Berichtsband des UBA/DB-Workshops „Schadstoffemissionen der großen Bahnmotoren“ (10/99 in Berlin) wurde im Hinblick auf die Zielsetzung des laufenden F+E-Projekts ausgewertet. Dabei zeigen sich zwei wesentliche Aspekte:

- Neben der Frage der zu vermessenden Bahnmotoren war für das Messprogramm die Frage des zu verwendenden Kraftstoffs zu klären. In der Regel wird für Emissionsmessungen ein spezieller Referenzkraftstoff verwendet. Da die im Ergebnis zu entwickelnden Emissionsfaktoren einen größeren Zeitraum abdecken sollen (1990-2010), sollte die Entwicklung der Kraftstoffqualität in diesem Zeitraum berücksichtigt werden
- Im Rahmen einer verkehrsökologischen Bewertung der Emissionen von Schienendieselfahrzeugen könnte die lokale Luftbelastung an einzelnen hoch belasteten Punkten das größte Bewertungsgewicht erhalten. Hier können Rangierlokomotiven einen im Vergleich zu ihrer Fahrleistung überproportional hohen Anteil haben. Aus

diesem Grund sollte die Auswahl der zu vermessenden Dieselmotoren den Bereich der Rangierlokomotiven besonders berücksichtigen, auch wenn diese in der Regel über geringere Motorleistungen verfügen.

2.1.2 Auswahl der Motoren

Die Auswahl der für die Schadstoffmessungen zu berücksichtigenden Motorentypen sollte nach möglichst objektiven Gesichtspunkten erfolgen. Aus den zur Verfügung stehenden Daten kommen die jährliche Laufleistung und die voraussichtliche Gesamtlauflistung während der noch verbleibenden Motornutzungsdauer in Frage. Diese Parameter sind auch für die emittierte Schadstoffmasse relevant. In Tab. 2 wurden die entsprechenden Kennzahlen aus den Angaben in Tab. 1 und die entsprechenden prozentualen Anteile sowohl getrennt für den Cargo- und den Regio-Bereich als auch für den gesamten Motorenbestand berechnet.

Tab. 1 Motortypen in Streckenlokomotiven der DB AG im Jahr 2000

Baureihe	Motortyp	Pe [kW]	Hersteller	Baujahr	Bestand [Stck]	Restnutzung [Jahre]	Laufleist. [km/TfzJahr]	Bemerkung
Regio								
202	12KVD21AL-4	900	KAB	1981	90	10	44347	
215	12V956TB10	1840	MTU	1968	133	6	72183	
218	16VPAV200	2060	Pielstick	1972	39	5	147920	wird laufend ersetzt
218	12V956TB10	1840	MTU	1971	119	5	147920	wird laufend ersetzt
218	12V956TB11	2060	MTU	1972	65	5	147920	
218	12V956TB11opt	2060	MTU	1995	108	10	146920	
218	12V956TB11neu	2060	MTU	1997	78	20	147920	
218	16V4000R40	2000	MTU	1997	4	20	147920	Remot.. 100 Stck
218	3516DI-TA	1940	CAT	1996	1	20	147920	Remot.. 100 Stck
219	12KVD21AL-5	2x1100	KAB	1984	320	18	94886	
229	12V396TE14	2x1240	MTU	1992	36	20	125695	
234	5D49	2208	Kolomna	1973	62	15	149588	
Cargo								
204	12KVD21AL-5	1100	KAB	1967	65	10	21883	konstant
212	12V652TA10	1000	MTU	1958	209	5	33671	rückläufig
216	16V652TB10	1300	MTU	1964	91	5	45481	rückläufig
217	16V652TB10	1430	MTU	1966	13	10	62966	konstant
232	5D49	2208	Kolomna	1973	441	10	60584	Remot. 12D49
241	2/5D49M	2940	Kolomna	1999	10	30	42855	
290	12V652TA10	810	MTU	1964	111	10	30383	konstant
291	8M282AKB	810	MaK	1973	30	10	30555	konstant
294	12V652TA10	810	MTU	1964	297	10	39418	konstant
295	8M282AKB	810	MaK	1973	73	10	42578	konstant
298	12KVD21A-5	750	KAB	1967	80	10	32297	konstant
Quelle: DB/WTZ/IFEU								

Tab. 2 Jährliche und gesamte Laufleistung der Motorentypen im Jahr 2000

Bereich	Motortyp	Jährliche Laufleistung B x L [100.000 km/Jahr]	Anteil [%]	Gesamtlaufleistung B x L x N [100.000 km]	Anteil [%]
Regio	12KVD21AL-5	304	25	5.465	38
	12V956TB11n/o	275	23	3.905	27
	12V956TB10	272	23	1.456	10
	12V956TB11	96	8	481	3
	5D49	93	8	1.391	10
	16VPAV200	58	5	288	2
	12V396TE14	45	4	905	6
	12KVD21AL-4	40	3	399	3
	16V4000R40	6	1	118	1
	3516DI-TA	1	-	30	-
Cargo	5D49	267	43	2.672	47
	12V652TA10	221	36	1.860	33
	8M282AKB	40	6	402	7
	16V652TB10	50	8	289	5
	12KVD21A-5	26	4	258	4
	12KVD21AL-5	14	2	142	2
	2/5D49M	4	1	129	2
	12KVD21AL-5	318	19	5.607	29
Gesamt	5D49	360	21	4.063	21
	12V956TB11n/o	275	15	3.905	20
	12V652TA10	221	12	1.860	10
	12V956TB10	272	15	1.456	8
	12V396TE14	45	3	905	5
	12V956TB11	96	5	481	3
	8M282AKB	40	2	402	2
	12KVD21AL-4	40	2	399	2
	16V652TB10	50	3	289	-
	16VPAV200	58	3	288	-
	12KVD21A-5	26	-	258	-
	2/5D49M	4	-	129	-
	16V4000R40	6	-	118	-
	3516DI-TA	1	-	30	-

Quelle:DB/WTZ/IFEU
Erläuterung: B: Motorenbestand; L: Laufleistung [km/Jahr]; N: voraussichtliche Nutzungsdauer [Jahr]

Abb. 1 und Abb. 2 verdeutlichen die ermittelten Verhältnisse grafisch. Beide Bewertungsverfahren führen hinsichtlich der vorrangig zu berücksichtigenden Motorentypen zu ähnlichen Aussagen. Leichte Verschiebungen ergeben sich nur hinsichtlich der prozentualen Anteile, wobei aber die Rangfolge der relevanten Motorentypen nicht wesentlich beeinflusst wird. Daraus wurden in Tab. 3 die zu berücksichtigenden Motorentypen abgeleitet.

Abb. 1 Wichtung der Motorentypen mit $P_e > 560$ kW in Streckenlokomotiven der DB AG auf der Grundlage der jährlichen Laufleistung

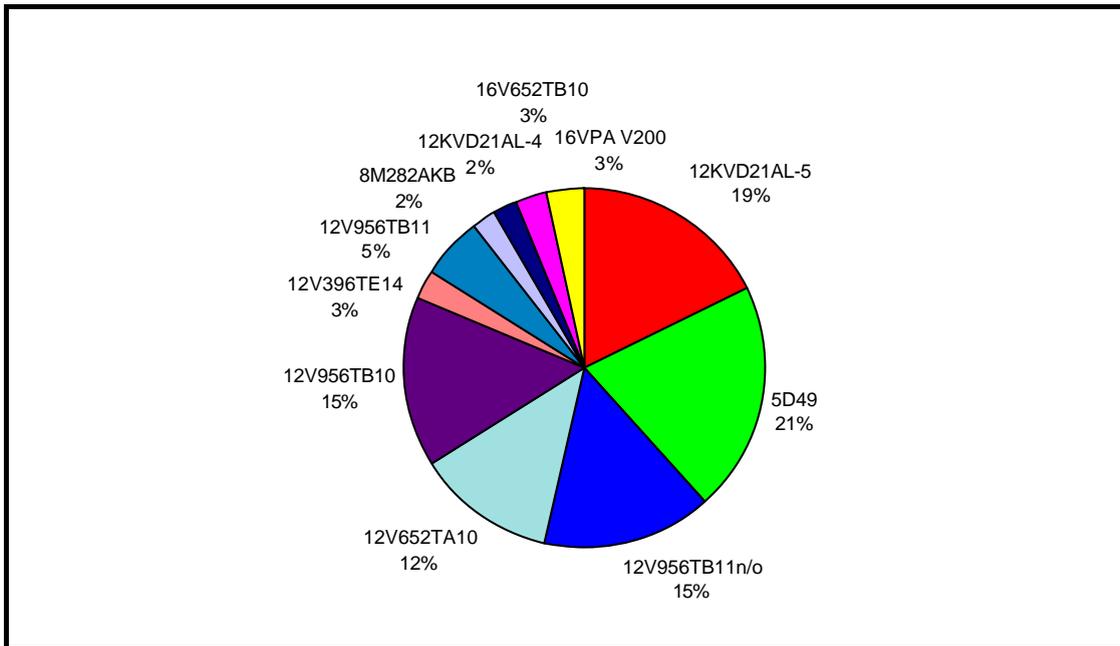
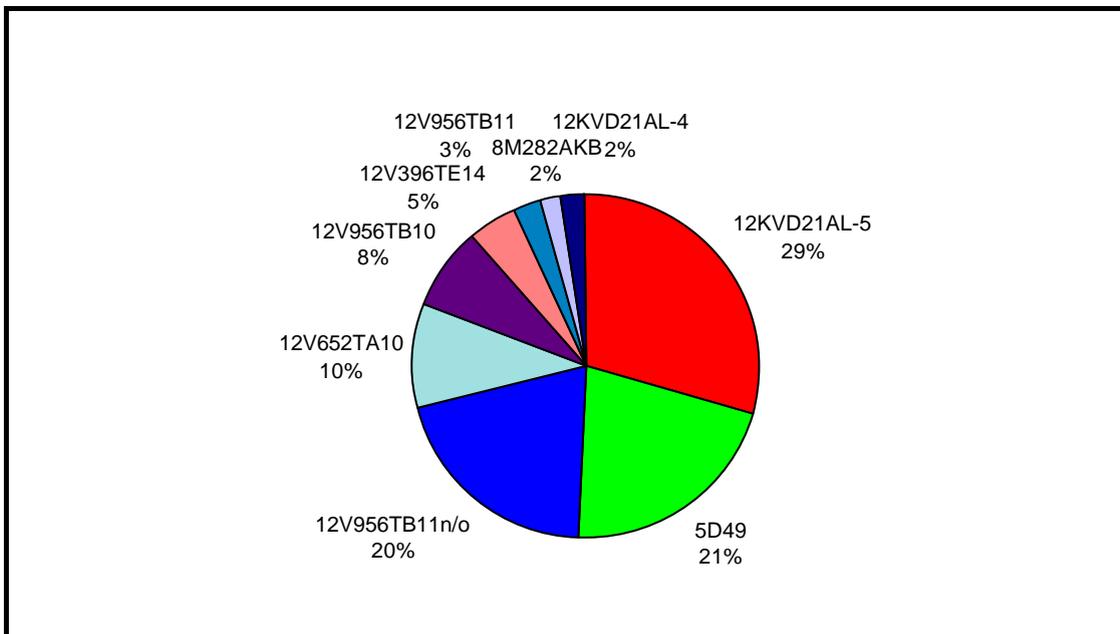


Abb. 2 Wichtung der Motorentypen mit $P_e > 560$ kW in Streckenlokomotiven der DB AG auf der Grundlage der geschätzten Gesamtleistung



Tab. 3 Motortypen zur Beurteilung von Schadstoffemissionen

Motortyp	Hersteller	Beschaffung	Nennleistung	Messung
GTO 6A	MTU	1956-1964	460 kW	Messung durch WTZ Roßlau
12V652TA/TZ10	MTU	1958-1966	810 kW	
12V956TB10	MTU	1964-1979	1810 kW	
12KVD21AL-5	KAB	1967-1985	1100 kW	ältere Motoren
5D49	KOL	1973-1983	2206 kW	
12V956TB11 n/o	MTU	ab 1985	2060 kW	Messwerte vom Hersteller neuere Motoren
16V4000R40	MTU	ab 1997	2000 kW	
3412EDI-TA	CAT	ab 1998	480 kW	

CAT: Caterpillar Inc., Peoria, USA; KAB: Kühlautomat, Berlin; KOL: AG Kolomnaer Werk, Kolomna, Russland; MTU: Motor- und Turbinen-Union Friedrichshafen GmbH

Es zeigt sich, dass mit den vier von WTZ für die Schadstoffmessung vorgesehenen Motorentypen (>560 kW) unabhängig von der Bewertungsmethode etwa zwei Drittel der Lauffleistung der im Jahr 2000 im Einsatz befindlichen Motoren abgedeckt werden kann. Neben den zum Bestand gehörenden Motoren sollten auch Motorentypen, die in naher Zukunft für die Remotorisierung von Triebfahrzeugen vorgesehen sind, berücksichtigt werden.

2.1.3 Vorgehen bei den nicht gemessenen Motoren

Die Motoren 12V956TB11n/o, 16V4000 R40 und 3412EDI-TA waren nicht für die Schadstoffmessung vorgesehen, sollen aber bei der späteren Berechnung von Emissionsfaktoren berücksichtigt werden. Daher wurden bei den Motorenherstellern MTU und Caterpillar für diese Motoren Schadstoffkennfelder angefragt.

MTU hat ausführliche Schadstoffkennfelder für die Motoren 12V956TB11 und 16V4000R40 geliefert. Diese umfassen die Schadstoffe NO_x, CO, HC und Ruß nach TA-Luft bzw. die Boschzahl. Messwerte für die Partikelemission sind offenbar nicht vorhanden. Für den Motor 12V956TB11 wurden die Partikelemissionen aus der Rußkonzentration und beim Motor 16V4000R40 aus der Filterschwärzungszahl abgeschätzt /WTZ 2002a/.

Zu der deutschen Vertretung von Caterpillar wurde, ergänzend zum UBA, der Kontakt aufgebaut. Die Reaktion auf die Anfrage war verhalten. Es wurden Messergebnisse für die Punkte des ISO-F-Zyklus, jedoch keine Kennfelder geliefert.

2.1.4 Festlegung der Prüfpunkte für die Schadstoffmessungen

2.1.4.1 Einleitung

Für die vorgesehenen Schadstoffmessungen waren die zu vermessenden Lastpunkte festzulegen. Folgende Kriterien wurden berücksichtigt:

- Erfassung eines möglichst großen Kennfeldbereiches des Motors
- Relevanz des Prüfpunktes für den tatsächlichen Motorenbetrieb bei der Bahn

- Relevanz des Prüfpunktes für die Schadstoffmassenemission
- Berücksichtigung der Prüfpunkte des F-Zyklus lt. ISO 8178/4
- Begrenzung des Messaufwandes auf maximal zehn Lastpunkte.

In Vorbereitung der zu treffenden Entscheidungen wurden die Kriterien zur Festlegung des ISO-F-Zyklus und vergleichsweise auch des UIC-Zyklus lt. UIC-Merkblatt 623-2 sowie die Leistungskennfelder der in Frage kommenden Motoren analysiert.

2.1.4.2 Motorenkennfelder

Um einen Überblick über den Betriebsbereich von Bahndieselmotoren zu erhalten, wurden die Leistungskennfelder der Motoren 16V4000R40, 12V956TB11, 12V956TB10, 12KVD21AL-5, 12V652TA10 und 5D49 analysiert. Als einziger der hier genannten Motoren wird der Motor 5D49 im dieselelektrischen Betrieb eingesetzt, was ein anderes Kennfeld erfordert als beim dieselhydraulischen Betrieb. Die beiden Kennfelder sind in Abb. 3 und Abb. 4 dargestellt.

Dargestellt über der Drehzahl sind die Leistung ohne Zusatzenergieversorgung (PoZEV), die Leistung mit Zusatzenergieversorgung (PmZEV), die Maximalleistung (Pmax) und die Prüfpunkte im Test sowie nach dem ISO-F-Zyklus.

Im dieselhydraulischen Betrieb folgt PoZEV einer Propellerkennlinie ($P \sim n^3$) für die maximale Leistung. Es zeigt sich, dass PmZEV etwa proportional zu n^2 verläuft. Der Prüfpunkt 2 des ISO-F-Zyklus liegt auf der PoZEV-Kennlinie und damit im unteren Kennfeldbereich. Bei einer dieselelektrischen Kraftübertragung folgen die Kennlinien, auf denen der Motor in der Lok betrieben werden kann, anderen Beziehungen. Während PoZEV etwa proportional zu n^2 verläuft, ist PmZEV etwa proportional zu $n^{1,5}$. Der Prüfpunkt 2 des ISO-F liegt außerhalb der Kennlinien und muss gesondert angefahren werden.

Abb. 3 Motorenkennfeld bei dieselhydraulischem Betrieb

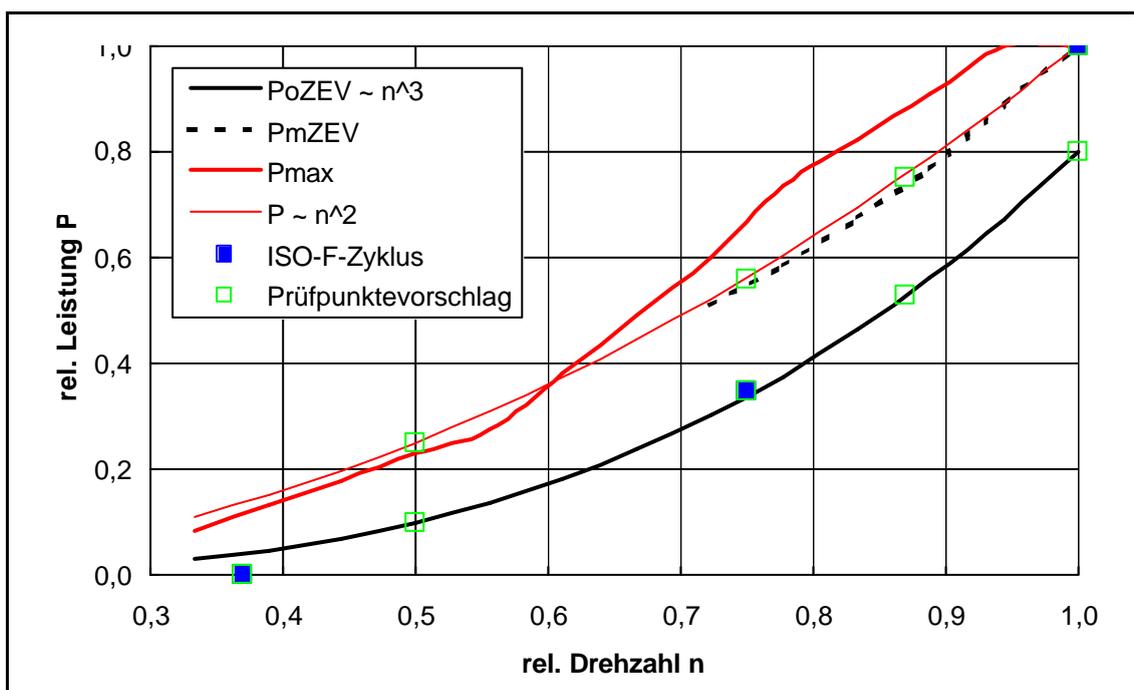
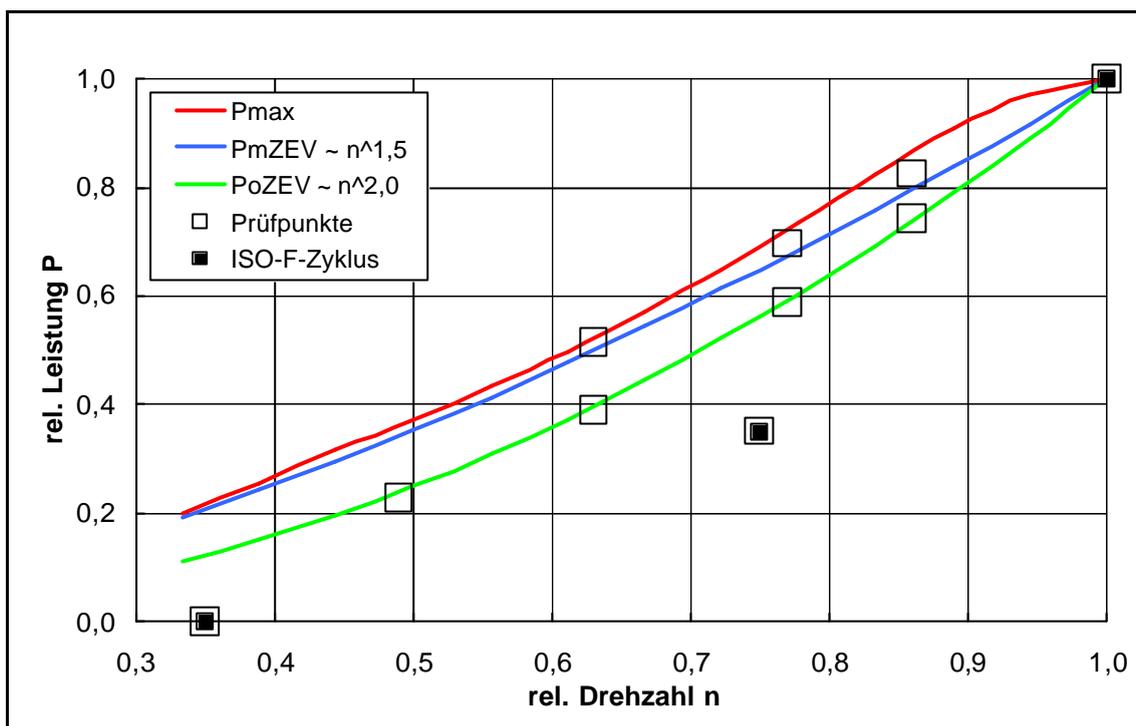


Abb. 4 Motorenkennfeld bei dieselektrischem Betrieb

2.1.4.3 Festlegung der Prüfpunkte zur Schadstoffmessung

Bezüglich der konkreten Lage der zu absolvierenden Prüfpunkte wurden in Abstimmung zwischen UBA, DB AG, WTZ und IFEU je vier Punkte auf der Kennlinie $P_{oZEV} \sim n^3$ und der Kennlinie $P \sim n^2$ vermessen, wobei die Prüfpunkte 1 und 2 nach ISO-F-Zyklus enthalten sein müssen. Ein zusätzlicher Messpunkt berücksichtigt den Leerlaufpunkt (Prüfpunkt 3 des ISO-F-Zyklus). Tab. 4 enthält die relativen Werte von Leistung und Drehzahl für die Prüfpunkte für Motoren im dieselhydraulischen Betrieb.

Der Motor 5D49 besitzt im Gegensatz zu allen anderen Motoren eine dieselektrische Kraftübertragung. Durch das Zusammenwirken von Fahrstufenschalter und Regler sind zwei Kennlinien vorgegeben, auf denen der Motor in der Lok nur betrieben werden kann. Abweichend vom allgemeinen Messprogramm, das in Tab. 4 beschrieben ist, gilt deshalb für den Motor 5D49 das spezielle Messprogramm in Tab. 5.

Tab. 4 Prüfpunkte zur Schadstoffmessung von Bahndieselmotoren im dieselhydraulischen Betrieb

Prüfpunkt	rel. Leistung	rel. Drehzahl	Kennlinie	Bemerkungen
1	1,000	1,00	$P \sim n^2$	ISO-F-Prüfstufe 1
2	0,750	0,87		-
3	0,560	0,75		-
4	0,380	0,62		-
5	0,800	1,00	$P \sim n^3$	-
6	0,530	0,87		-
7	0,340	0,75		ISO-F-Prüfstufe 2
8	0,100	0,50		-
9	0,422	0,75	-	ISO-F-Prüfpunkt (GTO6A)
	0,450	0,75		ISO-F-Prüfpunkt (3412EDI-TA)
10	0,000	Leerlauf	-	ISO-F-Prüfstufe 3
Quelle: WTZ				

Tab. 5 Prüfpunkte zur Schadstoffmessung von Bahndieselmotoren im die-selelektrischen Betrieb

Prüfpunkt	rel. Leistung	rel. Drehzahl	Kennlinie	Bemerkungen
1	1,000	1,00	$P \sim n^{1,5}$	ISO-F-Prüfstufe 1
2	0,824	0,86		-
3	0,696	0,77		-
4	0,513	0,62		-
5	0,740	0,86	$P \sim n^2$	-
6	0,588	0,77		-
7	0,388	0,62		-
8	0,222	0,49		-
9	0,350	0,75	-	ISO-F-Prüfstufe 2
10	0,000	Leerlauf	-	ISO-F-Prüfstufe 3
Quelle: WTZ				

Mit dieser Prüfpunkteverteilung wird unabhängig vom Einsatzfall ein breiter Betriebsbereich des Motors erfasst. Eine Interpolation der Messwerte, bzw. eine differenzierte Wichtung von Lastbereichen ist dadurch möglich.

2.1.5 Durchführung der Messungen

Nachdem die zu berücksichtigenden Motorentypen mit einer Nennleistung größer als 560 kW festgelegt worden waren und ein Meßprogramm für diese Motorenkategorie

erarbeitet wurde, konnte in Abstimmung mit den Werken der DB AG die Durchführung der Schadstoffmessungen erfolgen.

Die Schadstoffmessungen fanden in den Werken der DB AG in Bremen, Chemnitz und Cottbus statt und erfolgten nach Abnahmeläufen von überholten Motoren. Untersucht wurden fünf verschiedenen Motortypen, von denen jeweils drei Motoren vermessen wurden. Die Motoren wurden dem laufenden Betrieb entnommen, so dass keine unrealistischen Messergebnisse durch besonders eingestellte Motoren zu erwarten waren. Die Motoren sind zum Teil über 40 Jahre alt, die vor dem Messverfahren jedoch einer Grundüberholung unterzogen wurden, wobei Verschleißteile ausgewechselt wurden. Folglich sind sie als neuwertig anzusehen.

Die Messungen erfolgten unter stationären Bedingungen auf Prüfständen, so dass definierte Lastzustände eingestellt werden konnten, und umfassten die Schadstoffe Stickoxide, Kohlenmonoxid, Kohlenwasserstoffe, Partikel und die Filterschwärzungszahl. Gemessen wurden außerdem die Sauerstoffemission, der Kraftstoffverbrauch und die Abgastemperatur. Es wurden 10 Prüfpunkte vermessen, unter denen auch die Prüfpunkte des ISO-F-Zyklus liegen. Als Kraftstoff wurde handelsüblicher Dieselmotoren nach DIN EN 590 verwendet (Schwefelgehalt: max. 350 ppm).

Zusätzlich wurde für den Motor 5D49 eine weitergehende Analyse der Partikelzusammensetzung bei den drei Prüfstufen des ISO-F-Zyklus vorgenommen.

2.1.6 Verwendung der Emissionsfaktoren für die Emissionsberechnung

Die Ergebnisse der Messungen wurden von WTZ für jeden Prüfpunkt, jeden Motor und jede Komponente zu Emissionsfaktoren in kg je Stunde aufbereitet. Zusätzlich wurden von WTZ die Kennfelder der beiden MTU-Motoren 12V956TB11 n/o und 16V4000R40 hinsichtlich der im Messprogramm vorhandenen Prüfpunkte ausgewertet und in derselben Struktur wie die gemessenen Motoren aufbereitet, so dass insgesamt Emissionsfaktoren für 7 Motoren für die untersuchten Prüfpunkte vorliegen. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die Emissionsfaktoren, hier schon gewichtet für den ISO-F-Zyklus.

Tab. 6 Emissionsfaktoren im ISO-F-Zyklus für die untersuchten Bahnmotoren (in kg/h)

Motor	Pe(kW)	CO	HC	NOx	PT	KV
GTO6A	150	1,03	0,14	2,1	0,06	34
12V652TA/TZ10	244	0,67	0,1	2,0	0,05	63
12V956TB10	545	1,33	0,63	6,4	0,19	127
12KVD21AL-5	337	0,76	0,16	2,9	0,27	77
5D49	668	1,29	1,18	9,8	0,37	159
12V956TB11n/o	621	1,16	0,26	7,7	0,06	136
16V4000R40	603	0,63	0,37	7,0	0,07	124
Anmerkungen: PT für die Motoren 12V956TB11n/o und 16V4000R40 aus der Filterschwärzungszahl berechnet Quelle: WTZ						

Für die sieben untersuchten Motoren wurden von WTZ außerdem Polynomfunktionen

für die Schadstoffkennfelder, jedoch nicht für den Kraftstoffverbrauch abgeleitet. Mit den Näherungspolynomen lassen sich Emissionsfaktoren für jeden beliebigen Punkt im Kennfeld ableiten. Da es sich um Näherungsfunktionen handelt, ergeben sich Abweichungen von den gemessenen Werten. Die Polynomfunktionen wurden so optimiert, dass die Abweichungen in den oberen Leistungsbereichen i.d.R. sehr gering sind. In den unteren Lastbereichen werden die Abweichungen z.T. größer. Zur Bestimmung der Emissionen im Leerlauf lassen sich die Funktionen nicht verwenden. WTZ empfiehlt außerdem, die Funktionen vorzugsweise in dem Kennfeldbereich zu verwenden, in dem die Prüfpunkte liegen und sie vor allem nicht weit unterhalb der Kennlinie PoZEV anzuwenden.

Da bei Verwendung der Polynomfunktionen der Emissionsfaktor für den Leerlauf sowieso aus den Messungen direkt abgeleitet werden muss und eine Funktion für den Kraftstoffverbrauch fehlt, wurde eine andere Methode zur Ableitung von Emissionsfaktoren in den Bereich zwischen den gemessenen Prüfpunkten untersucht: Die lineare Interpolation zwischen den Prüfpunkten.

Voraussetzung für eine lineare Interpolation von Emissionsfaktoren für Lastpunkte, die zwischen den Prüfpunkten liegen ist, dass ein stetiger Verlauf der Emissionen zwischen den Prüfpunkten zu erwarten ist, der nicht weit vom linearen Verlauf abweicht. Dies gilt für die Interpolationen zwischen den Prüfpunkten 1 und 2, 2 und 3 bzw. 3 und 4 für die Kennlinie PmZEV sowie für die Interpolation zwischen den Prüfpunkten 5 und 5, 6 und 7 sowie 7 und 8 für die Kennlinie PoZEV zu (siehe /WTZ 2002/, Bild 11 bis 25) sowie in Anhang 5.4, Abb. 13 und Abb. 14. Zusätzlich kann der Prüfpunkt für den Leerlauf verwendet werden. Grundsätzlich bestehen auch bei diesem Verfahren größere Unsicherheiten für Kennfeldpunkte mit geringer Last in der Nähe der Leerlaufdrehzahl. Jedoch lässt sich für dieses Verfahren vollständig auf die Messergebnisse für die einzelnen Lastpunkte und damit auf einen homogenen Datensatz zurückgreifen.

In Absprache mit WTZ wurde daher beschlossen, für die weitere Emissionsberechnung das Verfahren der linearen Interpolation für jede der beiden Kennlinien anzuwenden.

2.2 Sonstige Bahnmotoren mit einer Leistung von mehr als 560 kW

Neben den im Rahmen des Vorhabens untersuchten Motoren gibt es eine Reihe älterer Motoren bzw. Motoren, die nur noch in geringer Stückzahl vorhanden sind, sowie neue Motoren, die aktuell für neue Fahrzeuge oder zur Remotorisierung verwendet werden. Für alle Motoren liegen beim Bahn-Umwelt-Zentrum Mess- oder Schätzwerte entsprechend dem ISO-F-Zyklus vor. Während bei den älteren Motoren, die nicht von WTZ vermessen wurden, eine genauere Bestimmung der Emissionswerte für die Berechnung der aktuellen und zukünftigen Emissionsfaktoren nicht notwendig ist, sind die Emissionswerte der neuen Motoren, sofern die Verwendung größerer Stückzahlen geplant ist, für die Emissionsberechnung von großem Interesse.

Daher wurde im Rahmen des Vorhabens versucht, von den Herstellern Emissionskennfelder für relevante Motoren zu erhalten. Die Reaktion war jedoch eher zurückhaltend. Somit verwenden wir die Daten, die das Bahn-Umwelt-Zentrum in einer Datenbank zusammengestellt hat /DB 2003a/. Diese enthält z.B. auch Mittelwerte für den ISO-F-Zyklus der neuen Motoren 8 V 4000; 3516 B DI-TA und 12D49. Für diese neuen sowie alle älteren Motoren ist damit keine Variation des Lastprofils möglich.

Die folgende Tabellen enthält eine Auflistung der Motoren, für die Emissionsfaktoren für den ISO-F-Zyklus beim Bahn-Umwelt-Zentrum vorliegen.

Tab. 7 Sonstige Bahnmotoren der DB AG mit einer Leistung von mehr als 560 kW

Baureihe	Eigentümer	Motor-Typ	Hersteller	Leistung [kW]	Baujahr Inbetriebn.
202, 298	R C	12KVD 21 AL-4	KVD	900	1981
215-217, 225	R C	16V652 TB 10	MTU	1.397	1968
218	R	16 PA 4 V 200	Pielstick	2.060	1968
218	R	12V956 TB11alt	MTU	2.060	1971
218	R	3516 B DI-TA	CAT	1.940	2000
229	R	12V396 TE 14	MTU	2x1.380	1992
233	C	12 D 49 M	Kolomna	2.460	2002
225	C	16V652 TB 10	MTU	1.397	1968
241	C	2-12 D 49 M	Kolomna	2.940	2000
290, 294	C	8 V 4000 R 41	MTU	1.000	2002
291, 295	C	8 M 282 AKB	MAK	810	1973

Anmerkungen: Die fettgedruckten Zeilen weisen auf neue Motoren hin

Quelle: Bahn-Umwelt-Zentrum, Februar 2003

2.3 Bahnmotoren mit einer Leistung bis zu 560 kW

In den 90er Jahren sind die Abgasemissionen von Motoren vermessen worden, die typischerweise in Nutzfahrzeugen auf der Straße eingesetzt wurden (RWTÜV 1993, TÜV Rheinland 1995). Es sind 29 Motoren gemessen worden, die für das Bezugsjahr 1986 über 90% des Bestandes bzw. den damaligen Stand der Technik repräsentiert haben. Das Leistungsspektrum lag zwischen 53 und 272 kW. Die Emissionen sind im 13-Stufen-Test, im US Transient Cycle, in einem instationären Zyklus (nach FIGE) sowie an 35 Kennfeldpunkten gemessen worden.

Keiner der damals vermessenen Motoren stimmt in der Bezeichnung exakt mit den Bahnmotoren überein. Eventuell sind die vermessenen Motoren MAN D 2566, 2866 und DB OM 442, 4471 für Analogieschlüsse geeignet. Allerdings werden unterschiedliche Bauformen (R- statt V-Motoren) und Zusatzbezeichnungen verwendet. Ferner werden damit keineswegs die wichtigsten in Triebwagen oder in Rangierlokomotiven eingesetzten Motoren abgedeckt. Auf der Basis von Bestandes- und Laufleistungsdaten von DB Regio wurde eine Übersicht über die Motoren mit einer Leistung kleiner als 560 kW im Schieneneinsatz erstellt (siehe Tab. 8).

¹ DB OM 447A entspricht eventuell MTU 6R 183 TA12. In den Triebwagen werden allerdings V-Motoren eingesetzt, während der vermessene Motor ein Reihen-Motor ist.

Tab. 8 Die am häufigsten im Schienenverkehr eingesetzten Motoren mit Leistungen < 560 kW im Jahr 2000

Hersteller	Motor-Typ	Bestand	Bestand Stück	B x L Mio km	B x L x N Mio. km
Rangierlokomotiven (BA 3)		Gesamt	1415	28	568
MTU	12V 493 AZ10 (GTO6/6A)	630	45 %	52 %	52 %
KAB	12KVD S-3	385	27 %	24 %	24 %
Triebwagen (BA 6 und 7)		Gesamt	1506	190	4490
MTU	12V 183 TC12 (TC 13 = OM 444 LA)	317	21 %	26 %	33 %
MTU	6V(12V) 183 TD13H (6R 183 TD13H = OM 447 hLA)	341	23 %	17 %	21 %
Daimler	OM 424A	247	16 %	22 %	16 %
MAN	D 3650 HM 12U (1U)	268	18 %	20 %	15 %
Bestände und Laufleistungen im April 2000 B: Bestand; L: durchschnittliche Laufleistung je Einheit und Jahr; N: angenommene Gesamtnutzungsdauer in Jahren.					
Quelle: DB Regio 4/2000					

Bezüglich Bestand, Laufleistung im Jahr 2000 und geschätzter Lebenslaufleistung dominieren vier Motorbaureihen zu mehr als 80 %: MTU 183 TC12, MTU 183 TD13H, Daimler OM 424A und MAN D 3650 HM 12U. Hinzu kommen die Motoren GTO 6/6A und 12KVD S-3, die in Stückzahlen von 400 bis 600 in Rangierlokomotiven eingebaut wurden.

Von diesen wichtigen Motoren wurde keiner im Messprogramm „Nutzfahrzeugmotoren“ vermessen. Die Messergebnisse für Nutzfahrzeugmotoren können daher nicht direkt auf Motoren angewendet werden, die in Triebwagen eingesetzt werden.²

Im Rahmen dieses Vorhabens werden daher die aktuellen Werte der Motordatenbank des BUZ verwendet /DB 2003a/.

Die Motoren, für die Emissionsfaktoren beim Bahn- Umwelt-Zentrum vorliegen, sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

² Darüber hinaus sind die Zyklen ISO-F und der 13-Stufen-Test so verschieden, dass die gemessenen Emissionsfaktoren nicht ohne weiteres vergleichbar wären. Eine Untersuchung, die Ergebnisse des ISO-F mit dem 13-Stufen-Test vergleicht, ist uns nicht bekannt.

Tab. 9 Bahnmotoren ≤560 kW bei der DB AG

Baureihe	Eigentümer	Motor-Typ	Hersteller	Leistung [kW]	Baujahr Inbetriebn.
312	C	6 KVD 18/15-1	KVD	162	1970
332, 333, 335	C	RHS 518 A	MWM	170	1959
344-347, 351	C	12KVD-S-3	KVD	478	1961
362, 363	C	3412B DI TA	CAT	480	2000
605	F	QSK 19 R	Cummins	4x560	1999
610, 629	R	12V 183 TD 12	MTU	2x485	1992
611	R	12V 183 TD 13	MTU	2x 540	1996
612	R	QSK 19 R	Cummins	2x 560	1996
614	R	D 3650 HM 12U	MAN	2x 367	1975
624, 634	R	D 3650 HM 12U	MAN	2x 330	1960
640	R	6R 183 TD 13H	MTU	351	2000
641, 650	R	D 2866 LUH 21	MAN	2x 257	1996
642	R	6R 183 TD 13H	MTU	2x 275	2000
643, 648	R	6R 183 TD 13H	MTU	2x 315	2000
644	R	12V 183 TD 13	MTU	2x 257	1998
646	R	12V 183 TD 13	MTU	550	2001
670, 672	R	12V 183 TD 13	MTU	250	1985
771	R	D 2566 UH	MAN	150	1965
772	R	D 2866 UH	MAN	162	1965
627.0	R	OM 404	Daimler	287	1972
627.1	R	OM 424	Daimler	287	1972
628.0	R	OM 404	Daimler	2x 213	1974
628.1	R	OM 424	Daimler	357	1981
628.2	R	12V 183 TA 12	MTU	410	1986
628.4	R	12V 183 TD 12	MTU	485	1992
Anmerkungen: Die fettgedruckten Zeilen weisen auf neue Motoren hin					
Quelle: Bahn-Umwelt-Zentrum, Februar 2003					

3 Abschätzung von Emissionsfaktoren für den realen Fahrbetrieb

3.1 Einführung

Um Energieverbrauch und Emissionen im realen Zugbetrieb bestimmen zu können müssen die zeitlichen Anteile der verschiedenen Lastzustände während einer Zugfahrt bekannt sein. Diese Charakterisierung einer Zugfahrt wird hier als **Lastprofil** bezeichnet. Im günstigsten Fall liegt das Lastprofil so vor, dass jedem Lastpunkt ein Verbrauchswert bzw. ein Emissionsfaktor aus dem Motorkennfeld zugeordnet werden kann. Der Energieverbrauch und die Emissionen der Zugfahrt lässt sich in diesem Fall nach folgender Formel berechnen:

$$E = \sum (e_{Li} \cdot t_{Li})$$

- E: Energieverbrauch bzw. Emissionen in [kg]
 Li: Lastpunkt i
 e_{Li}: Verbrauchs- bzw. Emissionsfaktor in [kg/h] im Lastpunkt Li
 t_{Li}: Betriebszeit in [h] im Lastpunkt Li

Um den Energieverbrauch und die Emissionen für den Schienenverkehr in einer bestimmten Aggregation (z.B. die Emissionen des Personenfernverkehrs mit Dieseltriebfahrzeugen in Deutschland im Jahr 2002) berechnen zu können ist die Kenntnis typischer mittlerer Lastprofile notwendig. Idealerweise lassen solche repräsentativen Lastprofile aus einer ausreichenden Anzahl von Einzelmessungen mit Hilfe von statistischen Methoden ableiten.

Tatsächlich konnten im Rahmen dieses Vorhabens nur wenige einzelne Erhebungen von Lastprofilen herangezogen werden (siehe Anhang 5.2). Systematische Untersuchungen liegen bisher nicht vor. Aus diesem Grund ist eine differenzierte Erhebung von Fahrprofilen für verschiedene Fahrzeug-/Zugkonfigurationen, Zuggattungen und Streckenprofile im Rahmen dieses Vorhabens nicht möglich.

Die vorliegenden Lastprofile erlauben es, bestimmte Tendenzen der Lastverteilung bei verschiedenen Einsatzarten zu erkennen. Zur Abschätzung von Emissionsfaktoren für die vorliegenden Lastprofile gehen wir daher folgendermaßen vor:

- Auswertung der vorliegenden Messzyklen und Lastprofile hinsichtlich unterschiedlicher Einsatzarten.
- Berechnung von mittleren Energieverbrauchs- und Emissionsfaktoren für verschiedene Lastprofile auf Basis der im Rahmen dieses Vorhabens gemessenen bzw. aus Motorkennfeldern abgeleiteten Basisfaktoren.
- Vergleich der Emissionsfaktoren bei Verwendung unterschiedlicher Lastprofile. Von Interesse ist dabei insbesondere der Unterschied zwischen dem ISO-F-Zyklus und alternativen Lastprofilen.

3.2 Aufbereitung der vorliegenden Lastprofile

Im Rahmen dieses Vorhabens konnten verschiedene Lastprofile ermittelt werden, die im Detail im Anhang 5.2 dargestellt sind. Zum einen handelt es sich hierbei um Lastprofile für die gesetzlichen Testzyklen (Europa, USA), um Profile, die von der europäischen Motorindustrie verwendet werden sowie um einzelne Untersuchungen aus dem

Bereich der DB AG, der Deutschen Reichsbahn und der Dänischen Staatsbahnen DSB.

Bei den meisten Profilen ist eine direkte Zuordnung eines Verbrauchs- und Emissionsfaktors aus dem Motorkennfeld nicht möglich. Denn außer den definierten Prüfzyklen beschreibt kein Lastprofil die exakten Punkte im Kennfeld, der durch die aktuelle Leistungs-/Drehzahlkombination definiert wird.

Bei den Untersuchungen aus dem Realbetrieb wurden i.d.R. Lastbereiche angegeben. Der Grad der Differenzierung liegt hierbei zwischen 4 Lastbereichen (Leerlauf, Teillast 1, Teillast 2, Volllast) und 12 Lastbereichen. Bei keinem der vorliegenden Profile wurde zusätzlich zur Motorlast die zugehörige Motordrehzahl angegeben.

Für die Bestimmung von Emissionsfaktoren für die Lastprofile müssen daher Annahmen getroffen werden:

- Die Lastbereiche müssen konkreten Lastpunkten, für die Emissionsfaktoren vorliegen, zugeordnet werden.
- Zur Bestimmung der Lastpunkte im Motorkennfeld muss angenommen werden, dass der Motor entlang von definierten Kennlinien betrieben wird.

Aufgrund dieser Annahmen lassen sich die Lastprofile so aufbereiten, dass dazu passende Emissionsfaktoren für die Motortypen aus dem Messprogramm bestimmt werden können. Das Berechnungsverfahren ist im Detail in Anhang 5.3 dargestellt.

Für den Vergleich der Emissionsfaktoren verschiedener Lastprofile werden typische Einsatzprofile ausgewählt, die bei der DB AG im Jahr 2001 besonders häufig vorkamen.

3.3 Vergleich von Emissionsfaktoren für verschiedene Leistungsprofile

Im Rahmen dieser Betrachtung definieren wir den Begriff „Leistungsprofil“: Ein Leistungsprofil beschreibt hier eine Betriebsleistung einer bestimmten Baureihen/Motorkombination mit gleichem Lastprofil, z.B. Baureihe 218 mit 12V956TB11n/o-Motor im Personenverkehr, Fahrverhalten entsprechend dem Lastprofil DB-PV-1994.

3.3.1 Auswahl von Leistungsprofilen

Typische Leistungsprofile werden für den Personennah-, Personenfern- und Güterverkehr sowie für Rangiervorgänge abgeleitet. Es werden Baureihen und Motortypen ausgewählt, die Bestandteil des Messprogramms waren und die im Jahr 2001 bei der DB AG einen hohen Anteil an der Betriebsleistung hatten (siehe Kapitel 4.1.2.1):

Personenverkehr: Repräsentativ für den diesel-hydraulischen Betrieb wird die Baureihe 218 ausgewählt (Anteil an den Leistungstonnenkilometern 2001 im Personennahverkehr ca. 40 %, im Personenfernverkehr ca. 55 %). Es werden die beiden Motortypen 12V956TB10 (älterer Motor) und 12V956TB11n/o (neuer Motor) betrachtet. Für den diesel-elektrischen Betrieb wird die Baureihe 234 mit dem Motortyp 5D49 ausgewählt (Anteil an den Leistungstonnenkilometern 2001 im Personennahverkehr ca. 6 %, im Personenfernverkehr ca. 24 %).

Güterverkehr: Der Güterverkehr wird im Jahr 2001 dominiert von diesel-elektrischen Lokomotiven der Baureihe 232 mit 5D49 Motor (Anteil an den Leistungstonnenkilometern: 77 %). Daneben wurden am häufigsten die diesel-hydraulischen Lokomotiven der Baureihen 290/294 mit dem Motortyp 12V652TA/TZ10 eingesetzt (Anteil an den Leis-

tungstonnenkilometern: 5 %). Diese beiden Varianten werden hier betrachtet.

Rangieren: Rangierleistungen wurden im Jahr 2001 vorwiegend von den Baureihen 290/294 mit Motortyp 12V652TA/TZ10 (46% Anteil an Leistungstonnenkilometern) und den Baureihen 360/361/364/365 mit Motortyp GTO6A (11% Anteil) erbracht. Die Baureihe 232 mit dem Motor 5D49 folgt mit 9 % Anteil. Wir untersuchen alle drei Varianten.

Für die ausgewählten Baureihen/Motor-Kombinationen müssen nun geeignete Lastprofile bestimmt werden. Dabei werden die Lastprofile aus dem Realbetrieb möglichst für die Leistungsprofile verwendet, in denen sie erhoben wurden. Hauptkriterium für die Zuordnung ist somit die Zugart und Leistungsart sowie die Art der Kraftübertragung. Verwendet werden die entsprechend der WTZ-Systematik aufbereiteten Lastprofile (siehe Anhang 5.3).

Personenverkehr: Für den Personenverkehr liegen verschiedene Messfahrten mit der Baureihe 218 vor. In unserer Auswertung werden Ergebnisse der Messfahrten 1994 DB-PV-1994 und der Zyklus MTU-Standard berücksichtigt. Zusätzlich werden einzelne Abschnitte der Messfahrten DB-PV-2000 aus dem Jahr 2000 berechnet, um den möglichen Einfluss von Berg- und Talfahrten auf die Emissionen zu bestimmen. Passende Lastprofile für den diesel-elektrischen Betrieb sind die Fahrten der DSB 1999 sowie der DR für einen IC 1992. Ergänzt wird ebenfalls der Zyklus MTU-Standard.

Güterverkehr: Für den Güterverkehr liegt ein Lastprofil von DB Cargo (DB-GV-2000) vor. Dieses enthält einen relativ hohen Anteil an Teillastzuständen, vorwiegend im unteren Bereich und keine Volllastanteile. Dieses Lastverhalten passt am ehesten zum diesel-hydraulischen Betrieb, denn die Kennlinie PoZEV verläuft im gesamten Bereich unterhalb der Volllast, da der obere Lastbereich für die Zugenergieversorgung vorgehalten wird. Wir verwenden dieses Lastprofil daher für den diesel-hydraulischen Betrieb. Für den diesel-elektrischen Betrieb wird das Lastprofil der DSB DSB-GV-1999 ausgewählt. Bei beiden Kraftübertragungsarten werden zusätzlich die Emissionen im Zyklus MTU-Standard sowie im angepassten EPA-Line-Haul-Zyklus berechnet.

Rangieren: Als Lastprofile für Rangieren werden die beiden Zyklen MTU-Rangieren sowie der angepasste EPA-Switch eingesetzt.

Die folgende Tabelle fasst die ausgewählten Leistungsprofile zusammen:

Tab. 10 Ausgewählte Leistungsprofile

	BR	Motor	Lastprofil	P _{rel}	Kennlinie
Personenverkehr, diesel-elektrisch	234	5D49	MTU-Standard DSB-PV-1999 DR-IC-1992	39% 33% 51%	PmZEV ~ n ^{1,5}
Personenverkehr, diesel-hydraulisch	218	12V956TB11n/o 12V956TB10	MTU-Standard DB-PV-1994 Franken	39% 34%	PmZEV ~ n ²
Personenverkehr, diesel-hydraulisch	218	12V956TB11n/o	DB-PV-2000 Allgäu: Gesamte Messfahrt Abschnitt Bergauf Abschnitt Bergab	30% 45% 14%	PmZEV ~ n ²
Güterverkehr, diesel-elektrisch	232	5D49	MTU-Standard DSB-GV-1999 EPA-Line-Haul	39% 34% 31%	PoZEV ~ n ²
Güterverkehr, diesel-hydraulisch	294	12V652TA/TZ10	MTU-Standard DB-GV-2000 EPA-Line-Haul	39% 20% 31%	PoZEV ~ n ³
Rangieren diesel-hydraulisch	360 294	GTO6A 12V652TA/TZ10	MTU-Rangieren EPA-Switch	16% 10%	PoZEV ~ n ³
Rangieren diesel-elektrisch	232	5D49	MTU-Rangieren EPA-Switch	16% 10%	PoZEV ~ n ²
Alle			ISO-F	33%	

Anmerkungen: P_{rel}: mittlere Leistung des Motors im Lastprofil in Relation zur Motornennleistung; PmZEV: mit Zugenergieversorgung; PoZEV: ohne Zugenergieversorgung

3.3.2 Vergleich der Emissionsfaktoren in verschiedenen Lastprofilen

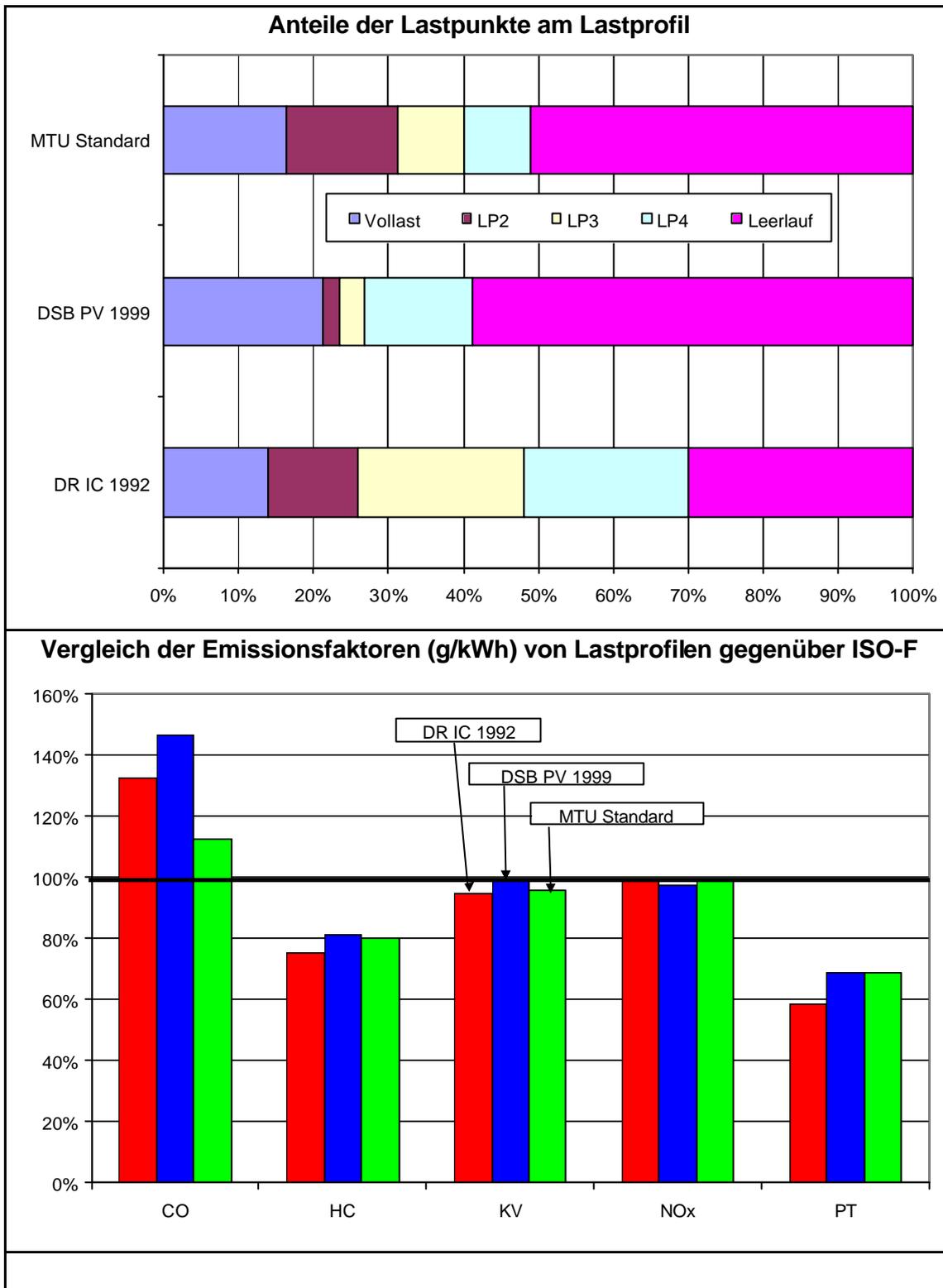
Für die verschiedenen Leistungsprofile wurden die Emissionsfaktoren in g/kWh berechnet. Die Berechnungsergebnisse für die einzelnen Lastprofile werden je Einsatzart und Kraftübertragungsart in Relation zu den Emissionsfaktoren des ISO-F-Zyklus dargestellt. Damit werden sowohl die Unterschiede gegenüber dem Standardzyklus ISO F als auch die Unterschiede zwischen den alternativen Lastprofilen deutlich.

3.3.3 Personenverkehr - Diesel-Elektrisch

Untersucht wurden die Emissionen der Baureihe 234 mit dem Motortyp 5D49. Es wurden Emissionsfaktoren für die aufbereiteten Lastprofile MTU-Standard und die aus dem Realbetrieb mit diesel-elektrischen Lokomotiven abgeleiteten Lastprofile DSB-PV-1999 und DR-IC-1992 berechnet.

Die mittlere Motorleistung liegt beim Lastprofil DSB-PV-1999 mit 34 % am niedrigsten, beim Lastprofil DR-IC-1992 mit 51 % am höchsten. Das Profil DSB-PV-1999 hat gleichzeitig den höchsten Leerlauf- und Vollastanteil. Dies liegt zum Teil an der Lage der Lastpunkte im Original-Profil, das relativ differenziert im unteren Lastbereich ist, während die Lastpunkte von WTZ keine relativen Leistungen im unteren Lastbereich auf der Kennlinie PmZEV abbilden. Daher werden mehrere Lastpunkte des DSB-Profiles bei der Umwandlung dem Leerlaufpunkt und dem WTZ-Lastpunkt 4 zugeordnet.

Abb. 5 Vergleich der Emissionsfaktoren (in g/kWh) von verschiedenen Lastprofilen gegenüber dem ISO F-Zyklus - BR 234, Motor 5D49



Ergebnisse

Trotz der deutlich unterschiedlichen Anteile der Lastpunkte sind die Emissionsfaktoren der alternativen Lastprofile im Vergleich zum ISO-F-Zyklus relativ ähnlich. So sind beim

Kraftstoffverbrauch und bei den NO_x-Emissionen kaum Unterschiede zum ISO-F-Zyklus feststellbar. Die Partikelemissionen liegen zwischen 31 % und 41 % niedriger als im ISO-F-Zyklus. Die CO-Emissionen liegen tendenziell höher mit der größten Schwankungsbreite, die HC-Emissionen rund 1/5 niedriger.

Ein Grund für die Abweichung der Partikelemissionen zum ISO-F-Zyklus ist der im ISO-F-Zyklus für das Emissionsverhalten bei Teillast verwendete Lastpunkt 9, der weit unterhalb der Kurve PmZEV liegt. Dieser weist einen relativ hohen Partikelwert gegenüber den Lastpunkten 2, 3 und 4 auf.

Der geringe Unterschied der alternativen Zyklen untereinander lässt sich z.T. damit begründen, dass sich die Emissionsfaktoren je kWh der Lastpunkte 1, 2, 3 und 4 bei diesem Motor nicht sehr stark voneinander unterscheiden (siehe Bericht /WTZ 2002a/, Bild 20).

3.3.4 Personenverkehr - Diesel-Hydraulisch

Der Personenverkehr mit Diesellokomotiven wurde im Jahr 2001 überwiegend mit der Baureihe 218 durchgeführt. Wir untersuchen das Emissionsverhalten der beiden Motortypen 12V956TB10 und 12V956TB11n/o, jeweils im Zyklus MTU-Standard sowie in dem Lastprofil DB-PV-1994 aus dem Realbetrieb. Das auch in Frage kommende Lastprofil DB-PV-2000 weist eine ähnliche Lastverteilung auf wie das 1994er Profil und wurde daher nicht in den folgenden Vergleich einbezogen.

Die mittlere Motorleistung liegt beim Profil DB-PV-1994 mit 34 % in der Größenordnung des ISO-F-Zyklus (MTU-Standard: 39 %). Sowohl der Zyklus MTU-Standard als auch der DB-PV-1994 haben höhere Teillastanteile als der ISO-F-Zyklus.

Ergebnisse

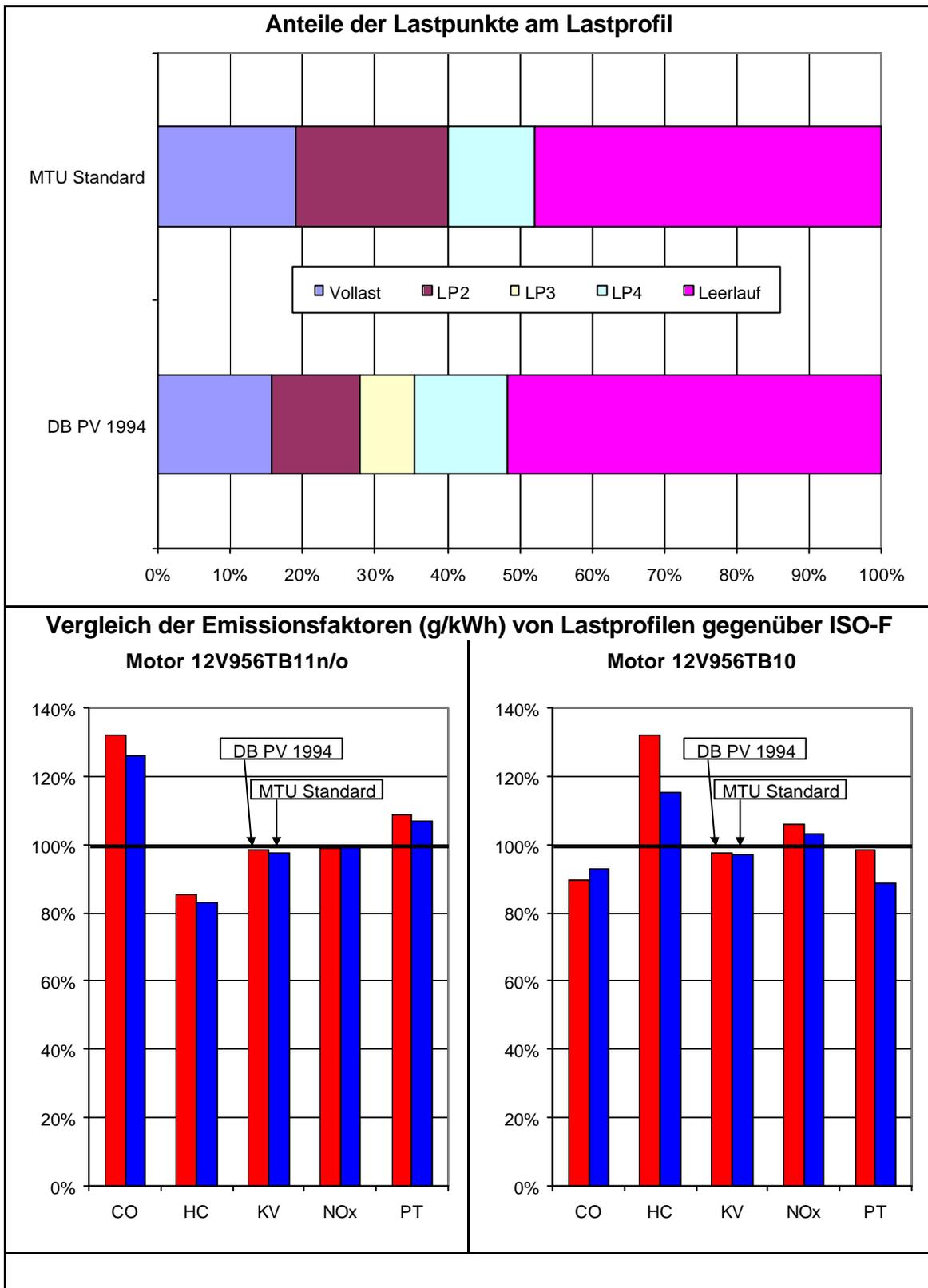
Beide Motoren weisen bei den NO_x-Emissionen sowie im Kraftstoffverbrauch bei beiden alternativen Lastprofilen nur geringe Unterschiede gegenüber dem ISO-F-Zyklus auf. Die Partikelemissionen liegen beim Motor 12V956TB11n/o etwas höher, beim Motor 12V956TB10 etwas niedriger als im ISO-F-Zyklus.

Größere Unterschiede gibt es bei den CO- und HC-Emissionen. Hier zeigen die Motoren jeweils gegenläufige Tendenzen. Die Abweichungen gegenüber dem ISO-F-Zyklus sind dabei tendenziell höher als die Abweichung der beiden Alternativzyklen untereinander.

Insgesamt führt somit die Verwendung von alternativen Lastprofilen bei den wichtigen NO_x- und Partikelemissionen sowie beim Kraftstoffverbrauch zu keinen signifikanten Unterschieden gegenüber dem ISO-F-Zyklus in diesem im lokbespannten Personenverkehr der DB 2001 dominierenden Leistungsprofil.

Der Grund für dieses Verhalten ist, dass sich die Emissionsfaktoren je kWh für die verwendeten Lastpunkte 1, 2, 3 und 4 auf der Kennlinie PmZEV bzw. der Lastpunkt 7 des ISO-F-Zyklus für die betrachteten Motoren wenig voneinander unterscheiden (siehe Bericht /WTZ 2002a/, Bild 16 und Bild 23). Insbesondere beim Motor 12V956TB11n/o (Bild 23) fällt auf, dass die Emissionsfaktoren der Lastpunkte auf der Kennlinie PmZEV alle auf ähnlichem Niveau liegen. Die Abweichungen bei HC und CO gegenüber den ISO-F-Zyklus sind bei diesem Motor dadurch begründet, dass der Lastpunkt 7 aus dem ISO-F-Zyklus von den Werten der Lastpunkte 2, 3 und 4 abweicht.

Abb. 6 Vergleich der Emissionsfaktoren (in g/kWh) von verschiedenen Lastprofilen gegenüber dem ISO F-Zyklus - BR 218



3.3.5 Personenverkehr - Berg- und Talfahrt

Die Messfahrt vom November 2000 im Allgäu erlaubt eine Differenzierung von Fahrabschnitten im Personenverkehr, die überwiegend bergauf bzw. überwiegend bergab verlaufen. Wir haben daher die Emissionsfaktoren für die Baureihe 218 mit dem Motor 12V956TB11n/o für die gesamte Messfahrt sowie für zwei Teilabschnitte, die überwiegend bergauf (München-Buchlohe) und überwiegend bergab (Oberstdorf-Immenstadt) verlaufen, berechnet.

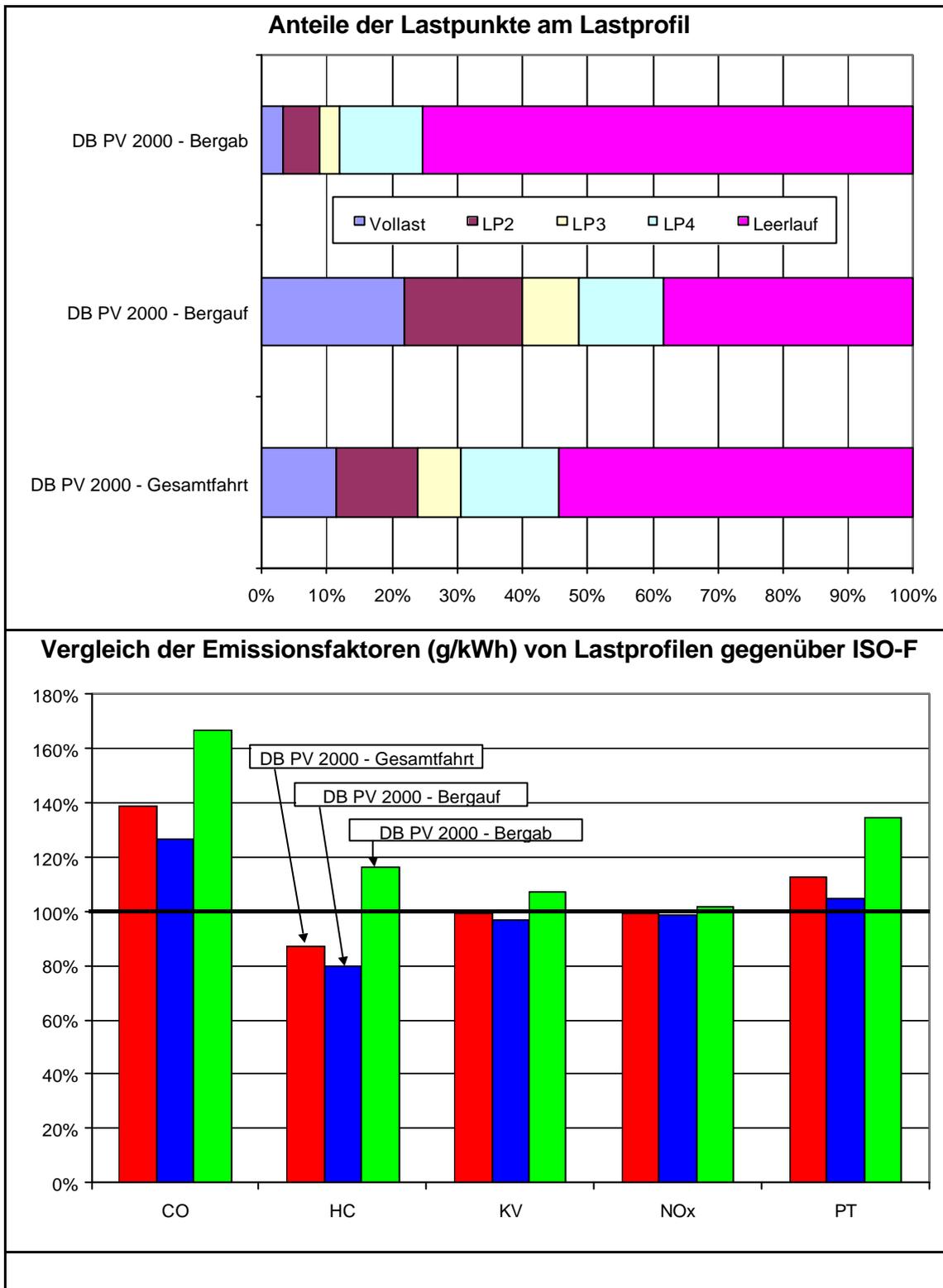
Die beiden Lastprofile unterscheiden sich deutlich im Lastverhalten. So beträgt die mittlere relative Leistung der Bergauffahrt 45 % und der Bergabfahrt 14 %. Der Leerlaufanteil liegt bei der Bergauffahrt bei 38 %, bei der Bergabfahrt bei 75 %. Der Vollastanteil liegt umgekehrt bei 22 % bzw. 3 %.

Ergebnisse

Trotz der unterschiedlichen Lastprofile unterscheiden sich die NO_x-Emissionsfaktoren und der Kraftstoffverbrauch bezogen auf die Motorleistung kaum vom ISO-F-Zyklus. Die Partikelemissionen bei allen Alternativzyklen sind etwas höher als im ISO-F-Zyklus. Dies galt bei diesem Motor schon für die beiden Lastprofile DB-PV-1994 und MTU-Standard (siehe vorangegangenes Kapitel). Bei HC und CO sind die Unterschiede wie schon in den vorangegangenen Beispielen höher.

Hierbei ist zu beachten, dass gleiche Emissionsfaktoren je kWh nicht bedeuten, dass auf gleichlangen Berg- und Talfahrten gleiche Emissionsmengen entstehen. Denn Energieverbrauch und NO_x-Emissionen sind pro Stunde entsprechend dem Verhältnis der mittleren Leistung der Lastprofile bei der Bergauffahrt dreimal höher als bei der Bergabfahrt. Unterstellt man gleiche Fahrzeiten für eine Strecke unabhängig von der Fahrtrichtung, gelten die zeitbezogenen Verhältnisse auch für den Bezug auf die zurückgelegte Strecke.

Abb. 7 Vergleich der Emissionsfaktoren (in g/kWh) von verschiedenen Lastprofilen gegenüber dem ISO F-Zyklus - BR 218, Motor 12V956TB11n/o



3.3.6 Güterverkehr - Diesel-elektrisch

Für den Güterverkehr mit diesel-elektrischer Kraftübertragung unterstellen wir eine Lok der Baureihe 232 mit 5D49-Motor. Für die Berechnung werden Lastprofile aus dem Güterverkehr verwendet. Die Lastpunkte der angepassten Lastprofile liegen auf der Kennlinie PoZEV.

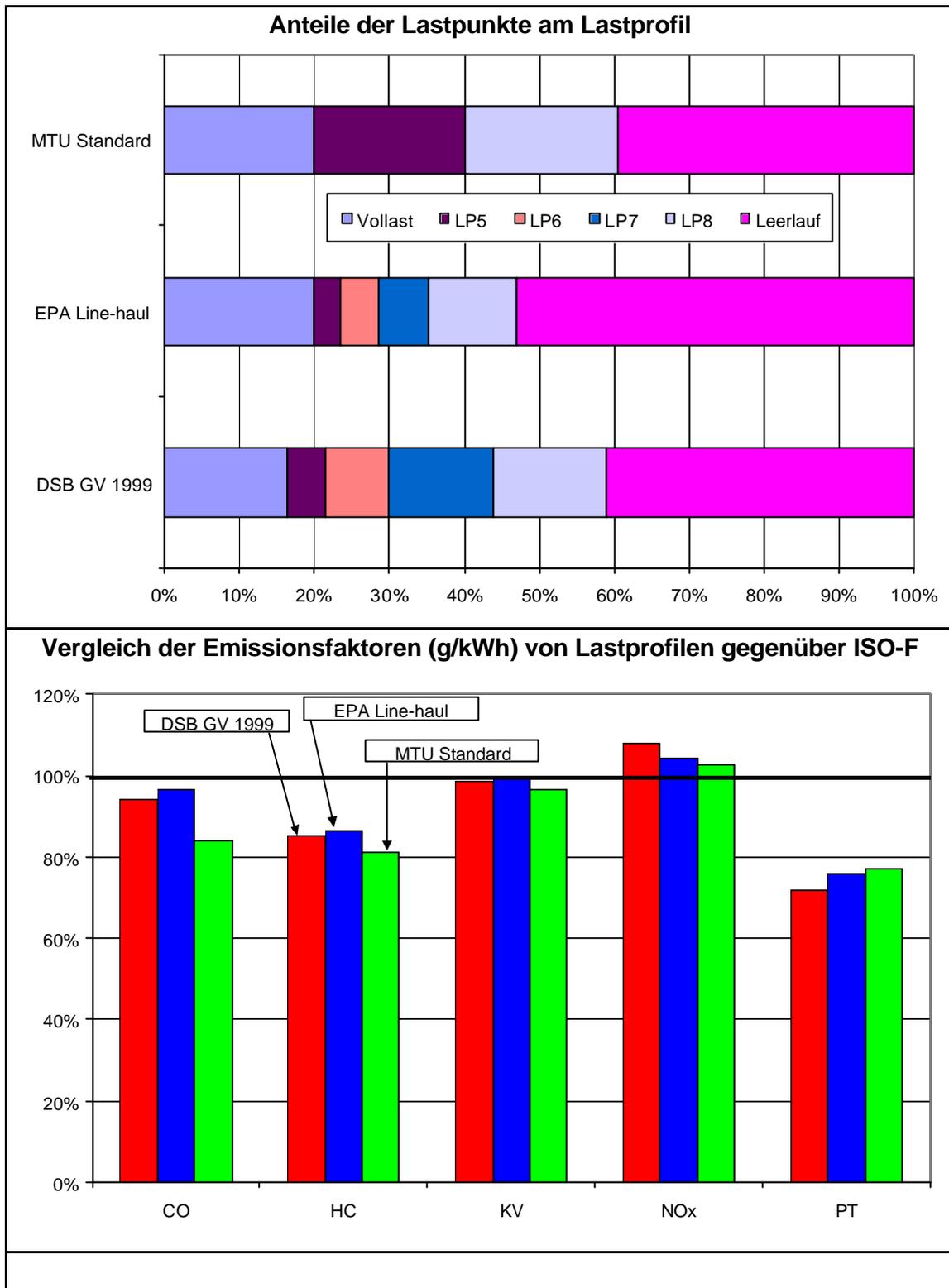
Betrachtet wird zum einen der Zyklus MTU-Standard mit einer mittleren relativen Leistung von 39 %, ein an den EPA-Line-Haul angepasster Zyklus mit einer relativen Leistung von 31 % und ein an die DSB-Messungen angelehntes Lastprofil mit einer mittleren Leistung von 34 %.

Ergebnisse:

Gegenüber dem ISO-F-Zyklus ergeben sich bei den NO_x-Emissionen und dem Kraftstoffverbrauch kaum Unterschiede bei den alternativen Zyklen. Die Partikelemissionen sind um etwa 1/4 niedriger, die CO- und HC-Emissionen um bis zu knapp 1/5 niedriger als im ISO-F-Zyklus.

Vergleicht man diese Differenzen mit den Berechnungen für den Personenverkehr beim gleichen Motor (Kapitel 3.3.4) fällt auf, dass sich die Relationen beim Kraftstoffverbrauch sowie bei den NO_x- und Partikelemissionen sehr ähnlich sind. Die Gründe dafür sind ähnlich wie bei der Kennlinie PmZEV: Bei NO_x und KV unterscheiden sich die Emissionsfaktoren je kWh der einzelnen Lastpunkte nicht so deutlich voneinander, bei den Partikelemissionen ist vor allem der hohe Wert für den Teillastpunkt 9 im ISO-F-Zyklus entscheidend für die geringeren Partikelwerte in den alternativen Lastprofilen.

Abb. 8 Vergleich der Emissionsfaktoren (in g/kWh) von verschiedenen Lastprofilen gegenüber dem ISO F-Zyklus - BR 232, Motor 5D49



3.3.7 Güterverkehr - Diesel-hydraulisch

Beim Güterverkehr mit diesel-hydraulischer Kraftübertragung wird eine Lok der Baureihe 294 mit dem Motor 12V652TA/TZ10 betrachtet. Diese Baureihe kommt im leichten Güterzugdienst zum Einsatz. Berücksichtigt werden die Zyklen MTU-Standard, EPA-Line-Haul und DB-GV-2000, alle umgerechnet auf die WTZ-Lastpunkte auf der Kennlinie PoZEV für diesel-hydraulischen Antrieb.

Der Zyklus MTU-Standard hat eine mittlere relative Leistung von 39 % und der EPA Line-Haul 31 %. Auffällig ist der DB Cargo-Zyklus DB-PV-2000 mit einer mittleren Leistung von 20 %. Der Originalzyklus enthält keine Zeitanteile für die Volllast (siehe Anhang 5.2.3.1). Der geringe Anteil von 1,4 % resultiert im angepassten Zyklus aus den notwendigen Interpolationen bei der Umrechnung. Dieses Profil passt gut zur Kennlinie PoZEV für den diesel-hydraulischen Antrieb, da hier der Bereich zwischen der Kennlinie und der Volllastlinie für die Zugenergieversorgung reserviert ist, die im Güterverkehr nicht benötigt wird.

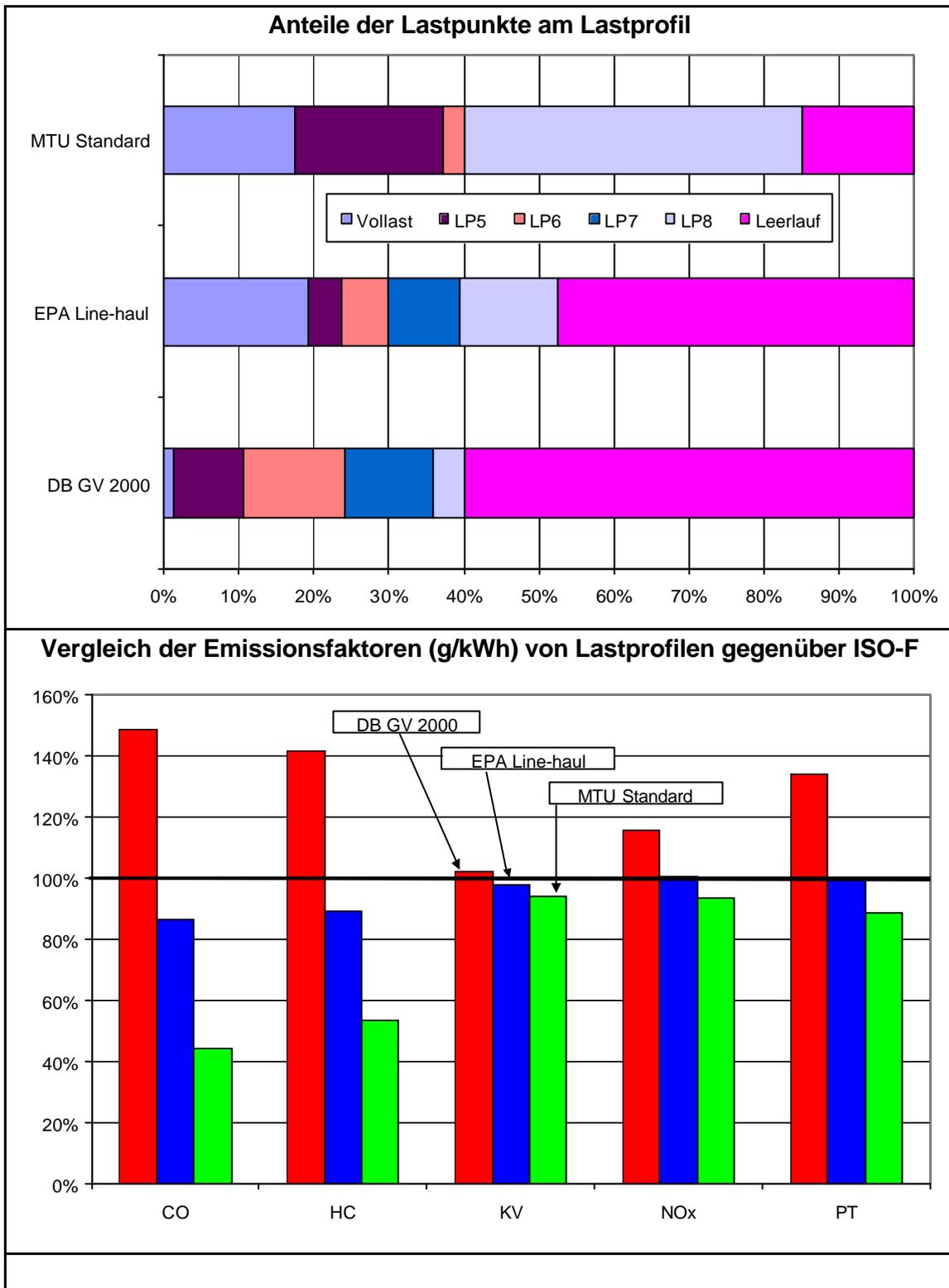
Ergebnisse

Mit dem angepassten EPA Line-Haul kommt man bei diesem Motor im Kraftstoffverbrauch sowie den NO_x- und Partikelemissionen relativ nahe an den ISO-F-Zyklus heran. Beim Zyklus DB-GV-2000 erhält man bei allen Emissionen z.T. deutlich höhere Werte, während der Kraftstoffverbrauch kaum Unterschiede aufweist. Beim Zyklus MTU-Standard liegen die Werte für NO_x, Partikel und den Kraftstoffverbrauch etwas, bei CO und HC deutlich niedriger als der ISO-F-Zyklus.

Wegen der deutlich abweichenden Werte des Lastprofils DB-GV-2000 wurde ein weiterer Motor durchgerechnet (nicht in die Abbildung aufgenommen): Beim Motor 12V956TB11n/o sind die NO_x-Emissionen im Zyklus DB GV 2000 gegenüber dem ISO-F um 10 % geringer, die Partikelemissionen um 60 % höher.

Die gezeigten Unterschiede sind so signifikant, dass es hier lohnenswert erscheint, das Emissionsverhalten bzw. das zugrundeliegende Lastverhalten der dieselhydraulischen Kraftübertragung im Güterverkehr näher zu untersuchen. Dabei muss jedoch auch der geringe Anteil dieses Leistungsprofils am Güterverkehr der DB AG mit Diesellokomotiven beachtet werden.

Abb. 9 Vergleich der Emissionsfaktoren (in g/kWh) von verschiedenen Lastprofilen gegenüber dem ISO F-Zyklus - BR 294, Motor 12V652TA/TZ10



3.3.8 Rangieren

Zur Bestimmung der Emissionsfaktoren für den Rangierbetrieb wurden die Motoren GTO6A der Kleinlok BR 360 und 12V652TA/TZ10 der schweren Rangierlok BR 294 verwendet und für die beiden auf die WTZ-Lastpunkte angepassten Zyklen EPA-Switch und MTU-Rangieren berechnet. Beide Zyklen weisen eine deutlich geringere mittlere relative Leistung als der ISO-F-Zyklus auf (ISO F: 33 %, EPA-Switch: 10 %, MTU-Rangieren 14 % für den Motor 12V652; beim GTO6A weichen die Werte aufgrund anderer Wahl der Lastpunkte etwas ab). Der Leerlaufanteil ist etwas höher als im ISO F-Zyklus, der Volllastanteil deutlich geringer.

Ergebnisse

Beim Motor 12V652TA/TZ10 liegen alle Emissionsfaktoren über den Werten des ISO-F, beim EPA-Switch sogar nochmals deutlich höher als beim MTU-Zyklus. Sogar der Kraftstoffverbrauch ist deutlich erhöht.

Sehr große Unterschiede treten bei den CO- und HC-Emissionen auf. Diese sind bis zu 4mal höher als im ISO-F-Zyklus. Grund dafür sind die hohen Zeitanteile des Leerlauf und der Lastpunkte in der unteren Teillast.

Die immer noch deutlich höheren Werte bei NO_x und Partikel resultieren auf den höheren spezifischen Emissionen je kWh bei diesem Motor in den niedrigeren Lastbereichen (siehe /WTZ 2002a/, Bild 13). Diese sind bei anderen Zyklen mit geringeren Anteilen der unteren Teillast vernachlässigbar, da sie an den Gesamtemissionen des Lastprofils nur einen geringen Anteil haben. Bei solch dominierenden Anteilen der unteren Teillast wie in diesem Fall nimmt der Einfluss dieser Zustände zu und es kommt zu einer deutlichen Erhöhung des Emissionsfaktors je kWh.

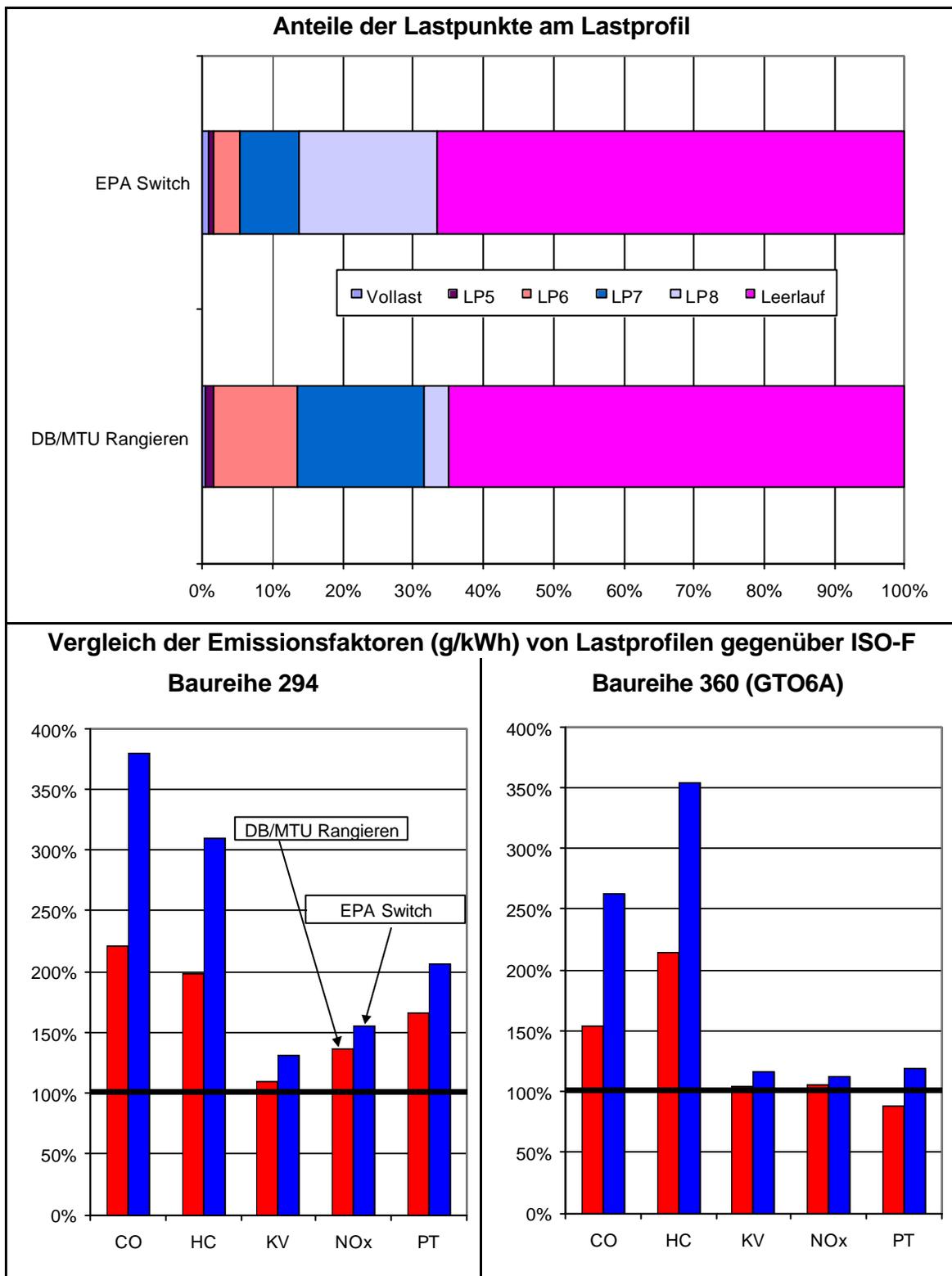
Im Unterschied dazu ist beim Motor GTO6A auffällig, dass die Werte für den Kraftstoffverbrauch sowie die NO_x- und Partikel-Emissionen deutlich näher bei den Werten des ISO-F-Zyklus liegen, wobei die Abweichung beim EPA-Switch für NO_x immerhin 13 %, bei den Partikeln 20 % beträgt.

Die Ergebnisse zeigen, dass mit den vorliegenden Rangierzyklen signifikante Unterschiede im Emissionsverhalten gegenüber dem ISO-F-Zyklus berechnet werden.

Die Emissionen in den Rangierzyklen wurden auch für den Motor 5D49 berechnet. Diese Berechnung kommt zu folgenden Ergebnissen (grafisch nicht dargestellt).

- Die NO_x-Emissionen je kWh erhöhen sich gegenüber dem ISO-F deutlich um 33 % (MTU-Rangieren) bzw. 49 % (EPA-Switch).
- Die Partikelemissionen liegen um 17 % niedriger (MTU-Standard) bzw. 10 % höher (EPA-Switch).
- der spezifische Kraftstoffverbrauch steigt um 7 % (MTU-Standard) bzw. um 17 % (EPA-Switch).

Abb. 10 Vergleich der Emissionsfaktoren (in g/kWh) von verschiedenen Lastprofilen gegenüber dem ISO F-Zyklus - BR 294, Motor 12V652TA/TZ10 und BR 360, Motor GTO6A



3.3.9 Auswertung und Zusammenfassung

Lastprofile aus dem Realbetrieb weisen gegenüber dem ISO-F-Zyklus tendenziell geringere Zeitanteile im Volllastzustand auf. Der Leerlaufanteil ist bei den meisten Lastprofilen ebenfalls geringer als im ISO-F Zyklus, außer bei den vorliegenden Rangierzyklen.

Die Zeitanteile der **Teillast** sind dementsprechend höher als beim ISO-F-Zyklus. Die Messergebnisse von WTZ erlauben darüber hinaus, im Teillastbereich ein wesentlich differenzierteres Lastverhalten abzubilden:

- Auf der Kennlinie PmZEV (hier eingesetzt für den Personenverkehr) stehen drei Lastpunkte, vor allem im oberen Lastbereich zur Verfügung
- Auf der Kennlinie PoZEV (hier eingesetzt für den Güterverkehr) stehen 4 Lastpunkte zur Verfügung.
- Demgegenüber wird das Teillastverhalten beim ISO-F von einem Punkt abgebildet, der bei der diesel-hydraulischen Kraftübertragung auf der Kennlinie PoZEV, bei der diesel-elektrischen Kraftübertragung außerhalb der beiden Kennlinien unterhalb der Linie PoZEV liegt.

Für verschiedene Leistungsprofile (Baureihe-Motor-Lastprofil) wurden die Emissionen je kWh berechnet und den entsprechenden Emissionsfaktoren des ISO-F-Zyklus gegenübergestellt. Folgende Tendenzen für die einzelnen **Komponenten** wurden bei diesem Vergleich sichtbar:

- Die **CO-** und **HC-Emissionen** weichen bei Verwendung alternativer Lastzyklen am stärksten vom ISO-F-Zyklus ab. Besonders stark sind die Abweichungen in Zyklen mit hohen Anteilen im Leerlauf und in der unteren Teillast (z.B. Rangieren).
- Der **Kraftstoffverbrauch** und die **NOx-Emissionen** zeigen unabhängig vom Zyklus meist keine oder geringe Abweichungen (<10 %) gegenüber dem ISO-F-Zyklus. Ausnahmen sind bei einigen Motoren Zyklen mit hohen Anteilen im Leerlauf bzw. der unteren Teillast (Rangieren sowie der DB Cargo-Zyklus DB-GV-2000).
- Bei den **Partikelemissionen** gibt es Abweichungen, die in vielen Fällen motorspezifisch sind. So hat der Motor 5D49 in den meisten Lastprofilen deutlich niedrigere (meist ca. ein viertel) Emissionen als im ISO-F-Zyklus. Der Hauptgrund liegt in diesem Fall in dem hohen Emissionsfaktor für den Teillastpunkt im ISO-F-Zyklus, der außerhalb der Kennlinien liegt. Tendenziell steigen jedoch auch die Partikelemissionen in den meisten Fällen mit abnehmender Belastung an.

Aus den Ergebnissen können folgende wichtige Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Es gibt einzelne Fälle, in denen beim ISO-F die Emissionen eines Motors grundsätzlich anders berechnet werden als mit den WTZ-Lastpunkten, weil der ISO-F-Teillastpunkt nicht auf der zugrunde gelegten Kennlinie liegt (Beispiel: Partikelemissionen im Teillastverhalten des 5D49).
- Die vorliegenden Lastprofile, die in ihrer mittleren effektiven Leistung nicht weit vom ISO-F abweichen, weichen auch beim Kraftstoffverbrauch und den NOx-Emissionen in der Regel nicht sehr stark vom ISO-F-Zyklus ab.
- Bei Lastprofilen mit geringer mittlerer effektiver Leistung (Rangieren, Güterverkehr nach DB Cargo 2000, Bergabfahrt) sind die Abweichungen zum ISO-F größer, z.T. sehr groß.
- Der **durchschnittliche Kraftstoffverbrauch** je kWh erweist sich als sehr stabile

Größe. Daher erscheint es uns unproblematisch, die Emissionsberechnung auch weiterhin, wie es bisher üblich war, mit kraftstoffbezogenen Emissionsfaktoren durchzuführen. **Der spezifische Energieverbrauch für eine bestimmte Zugfahrt oder der gesamte Energieverbrauch für alle Zugfahrten einer Zeitperiode können daher weiterhin als die wichtigsten Grundlagengrößen für eine Emissionsberechnung verwendet werden.**

- Die vorliegenden Ergebnisse legen nahe, insbesondere bei Leistungsprofilen mit geringer Belastung (Rangieren, z.T. Güterverkehr), vom ISO-F als Berechnungsgrundlage abzuweichen. Das gilt insbesondere für das Rangieren, bei dem auch die mögliche lokale Emissionsbelastung, z.B. in Bahnhöfen, sehr relevant sein kann.

Gegen die Verwendung alternativer Lastprofile - auch in den Bereichen, in denen sie die Qualität des Ergebnisses gegenüber der pauschalen Anwendung des ISO-F verbessern würden, sprechen jedoch folgende Randbedingungen:

- Emissionsfaktoren für die differenzierten Lastpunkte liegen nur für einige aktuelle Motoren vor. Ein alternatives Berechnungsverfahren ist jedoch nur sinnvoll, wenn es mittel- bis langfristig auf alle Motoren anwendbar ist. Dies bedeutet, dass zukünftig zumindest bei allen neuen Motoren die Emissionsfaktoren nicht nur für den ISO-F-Zyklus sondern für die relevanten Punkte auf den Motorkennlinien ermittelt werden müssen.
- Die Datenbasis für Lastprofile aus dem Realbetrieb ist sehr schwach, so dass sie nicht als repräsentativ angesehen werden können. Um die Datenbasis zu verbessern, könnten eventuell vorhandene Simulationsprogramme eingesetzt werden (z.B. ZFSim, der DB Systemtechnik, Frankfurt/M). Die Durchführung einer solchen Arbeit bedeutet jedoch einen Aufwand (genaue Definition der Aufgabe und der Ziele, Analyse der Schnittstellen und Erarbeitung der Inputdaten, Durchführung der Berechnung und Interpretation der Ergebnisse), der nicht im Rahmen dieses Vorhabens geleistet werden konnte.
- Schließlich sollten alternative Berechnungsverfahren für die Emissionen des Bahndieselvekehrs zumindest innerhalb der EU einheitlich sein, damit die Ergebnisse vergleichbar sind. Entsprechende Arbeiten zur Schaffung einheitlicher Berechnungsgrundlagen für den Verkehrsbereich mit dem Schwerpunkt auf den Straßenverkehr werden gerade erarbeitet /ARTEMIS/.

4 Energieverbrauch und Emissionen Deutschland 1980-2020

4.1 DB AG 1994-2002

4.1.1 Einleitung

Für die Emissionsberechnung wurde das bisherige in TREMOD verwendete Verfahren modifiziert. Das Verfahren wurde im Rahmen der Kooperation DB AG - Umweltbundesamt im Jahr 1999 abgeleitet /DB 1999a/. Dabei werden, ausgehend von Betriebsleistungen, mittlere verbrauchsbezogene Emissionsfaktoren für den Zugbetrieb der Bereiche Personennahverkehr, Personenfernverkehr und Güterverkehr sowie für Rangierleistungen für jedes Bezugsjahr berechnet. Diese Emissionsfaktoren werden mit dem jährlichen Energieverbrauch je Zugart verknüpft.

4.1.2 Datengrundlagen und Berechnungsverfahren

4.1.2.1 Betriebsleistungen

Grundlage der Berechnungen sind Betriebsleistungsdaten aus verschiedenen internen Statistiken der DB /DB 2003b/. Die Statistiken enthalten jeweils für die drei Zugarten Personennahverkehr, Personenfernverkehr und Güterverkehr die Betriebsleistungen in verschiedenen Aufgliederungen (z.B. Streckenkilometer nach Baureihen, Leistungstonnenkilometer nach Betriebsarten).

Aufgrund dieser Daten konnten für jede Zugart die Anteile der Baureihen und Motoren an der jeweiligen Betriebsleistung bestimmt werden. Dabei wurden folgende Annahmen getroffen:

- Bei Baureihen, die mit verschiedenen Motoren ausgerüstet sind, wird angenommen, dass die Betriebsleistungen je Motor gleich sind. Entsprechend sind die Betriebsleistungen je Motor und Baureihe proportional zum Bestand.
- Die Anteile der Baureihen an der Betriebsleistung je Betriebsartgruppe werden für jede Zugart und separat für Rangierleistungen bis 1999 aufgrund der angegebenen Streckenkilometer berechnet, ab 2000 aufgrund der Leistungstonnenkilometer
- Die Leistungstonnenkilometer liegen für jede Zugart für den Zugbetrieb und für Rangierleistungen differenziert nach Betriebsartgruppen vor.

Die Verknüpfung der genannten Informationen ergibt die Betriebsleistung (Leistungstonnenkilometer), differenziert nach Zugarten (Zugbetrieb) und separat für Rangieren. Damit lassen sich für jedes Bezugsjahr mittlere Emissionsfaktoren je Zugart und für Rangieren ableiten. Das Verfahren ist im Detail im Anhang 5.5 dargestellt. Die Berechnungsergebnisse für die Betriebsleistungen sind in den Tabellen Tab. 11 bis Tab. 15 dargestellt.

Tab. 11 Entwicklung der Betriebsleistungen (Leistungstonnenkilometer) im Personennahverkehr je Motor bei der DB AG 1994-2002

	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
Mrd. Ltkm	31,4	30,4	29,6	29,6	27,0	28,1	29,9	28,2	25,9
Relativ zu 1994	1,00	0,97	0,94	0,94	0,86	0,90	0,95	0,90	0,82
davon Anteil Motoren									
1) GTO6A	0%	0%	0%	0%	0%	0%	-	-	-
2) 12V652TA/TZ10	5%	5%	5%	4%	4%	3%	2%	0%	0%
3) 12V956TB10	10%	9%	9%	9%	12%	10%	11%	8%	7%
4) 12KVD21AL-5	7%	7%	7%	7%	10%	11%	12%	8%	3%
5) 5D49	14%	13%	13%	13%	12%	8%	10%	6%	3%
6) 12V956TB11n/o	-	-	3%	7%	10%	14%	17%	31%	23%
7) 16V4000R40	-	-	-	-	-	-	-	-	5%
Übrige Motoren	64%	67%	63%	60%	52%	54%	48%	47%	59%
- Loks	45%	42%	35%	31%	28%	23%	19%	7%	4%
- Triebwagen	19%	25%	29%	29%	24%	31%	29%	40%	55%
Von WTZ gemessene Motoren									
Motor 1-5	36%	33%	34%	33%	37%	33%	35%	23%	13%
Schadstoffkennfelder vom Hersteller									
Motor 6-7	-	-	3%	7%	10%	14%	17%	31%	28%
Quelle: Bahn-Umwelt-Zentrum; Annahmen BUZ und IFEU					IFEU Heidelberg 2003				

Tab. 12 Entwicklung der Betriebsleistungen (Leistungstonnenkilometer) im Personenfernverkehr je Motor bei der DB AG 1994-2002

	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
Mrd. Ltkm	10,1	9,0	6,8	5,0	5,0	5,9	4,3	3,2	2,1
Relativ zu 1994	1,00	0,89	0,67	0,50	0,49	0,58	0,43	0,32	0,21
davon Anteil Motoren									
1) GTO6A	0%	0%	0%	0%	0%	0%	-	-	-
2) 12V652TA/TZ10	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
3) 12V956TB10	22%	22%	22%	24%	19%	18%	17%	12%	9%
4) 12KVD21AL-5	0%	0%	0%	0%	1%	0%	0%	0%	0%
5) 5D49	35%	35%	39%	36%	38%	36%	39%	24%	12%
6) 12V956TB11n/o	-	-	6%	12%	16%	24%	28%	43%	31%
7) 16V4000R40	-	-	-	-	-	-	-	-	7%
Übrige Motoren	42%	42%	33%	27%	26%	21%	16%	20%	41%
- Loks	42%	42%	33%	26%	25%	21%	16%	5%	4%
- Triebwagen	0%	0%	1%	0%	0%	-	-	15%	37%
Von WTZ gemessene Motoren									
Motor 1-5	58%	58%	61%	61%	58%	55%	57%	36%	21%
Schadstoffkennfelder vom Hersteller									
Motor 6-7	-	-	6%	12%	16%	24%	28%	43%	38%
Quelle: Bahn-Umwelt-Zentrum; Annahmen BUZ und IFEU					IFEU Heidelberg 2003				

Tab. 13 Entwicklung der Betriebsleistungen (Leistungstonnenkilometer) im Güterverkehr je Motor bei der DB AG 1994-2002

	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
Mrd. Ltkm	31,4	29,3	26,1	16,7	15,2	18,1	16,1	15,7	13,2
Relativ zu 1994	1,00	0,93	0,83	0,53	0,49	0,58	0,51	0,50	0,42
davon Anteil Motoren									
1) GTO6A	2%	2%	3%	3%	2%	2%	0%	0%	0%
2) 12V652TA/TZ10	16%	13%	14%	16%	14%	10%	5%	5%	5%
3) 12V956TB10	6%	7%	7%	5%	6%	2%	2%	1%	0%
4) 12KVD21AL-5	4%	4%	3%	3%	4%	2%	0%	0%	0%
5) 5D49	38%	40%	35%	37%	39%	60%	72%	77%	75%
6) 12V956TB11n/o	-	-	2%	4%	6%	3%	3%	2%	1%
7) 16V4000R40	-	-	-	-	-	-	-	-	0%
Übrige Motoren	34%	34%	36%	31%	30%	20%	18%	15%	18%
Von WTZ gemessene Motoren									
Motor 1-5	66%	66%	62%	64%	64%	77%	80%	83%	81%
Schadstoffkennfelder vom Hersteller									
Motor 6-7	-	-	2%	4%	6%	3%	3%	2%	1%
Quelle: Bahn-Umwelt-Zentrum; Annahmen BUZ und IFEU						IFEU Heidelberg 2003			

Tab. 14 Entwicklung der Betriebsleistungen (Leistungstonnenkilometer) Rangieren je Motor bei der DB AG 1994-2002

	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
Mrd. Ltkm	16,8	14,9	14,9	14,9	14,9	17,6	17,8	14,9	14,5
Relativ zu 1994	1,00	0,89	0,89	0,89	0,89	1,05	1,06	0,89	0,86
davon Anteil Motoren									
1) GTO6A	21%	21%	21%	21%	20%	19%	17%	11%	10%
2) 12V652TA/TZ10	27%	27%	27%	27%	27%	37%	39%	46%	42%
3) 12V956TB10	0%	0%	0%	0%	0%	1%	1%	0%	0%
4) 12KVD21AL-5	1%	1%	1%	1%	1%	2%	2%	0%	1%
5) 5D49	2%	2%	2%	2%	2%	8%	8%	9%	9%
6) 12V956TB11n/o				0%	0%	1%	1%	1%	1%
7) 16V4000R40									0%
Übrige Motoren	49%	49%	49%	48%	49%	33%	33%	33%	37%
Von WTZ gemessene Motoren									
Motor 1-5	51%	51%	51%	51%	51%	66%	66%	66%	62%
Schadstoffkennfelder vom Hersteller									
Motor 6-7	-	-	-	0%	0%	1%	1%	1%	1%
Quelle: Bahn-Umwelt-Zentrum; Annahmen BUZ und IFEU						IFEU Heidelberg 2003			

Tab. 15 Entwicklung der Betriebsleistungen (Leistungstonnenkilometer) im Gesamtverkehr je Motor bei der DB AG 1994-2002

	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
Mrd. Ltkm	89,6	83,7	77,5	66,2	62,2	69,7	68,2	61,9	55,7
Relativ zu 1994	1,00	0,93	0,86	0,74	0,69	0,78	0,76	0,69	0,62
davon Anteil Motor									
1) GTO6A	5%	4%	5%	5%	5%	5%	4%	3%	3%
2) 12V652TA/TZ10	13%	11%	12%	12%	12%	13%	12%	12%	12%
3) 12V956TB10	8%	8%	8%	7%	8%	6%	6%	5%	4%
4) 12KVD21AL-5	4%	4%	4%	4%	5%	6%	6%	4%	2%
5) 5D49	22%	23%	20%	18%	18%	24%	26%	26%	22%
6) 12V956TB11n/o			2%	5%	7%	8%	10%	17%	13%
7) 16V4000R40									3%
Übrige Motoren	48%	49%	49%	48%	44%	37%	35%	34%	43%
Von WTZ gemessene Motoren									
Motor 1-5	52%	51%	49%	47%	49%	54%	55%	49%	42%
Schadstoffkennfelder vom Hersteller									
Motor 6-7	0%	0%	2%	5%	7%	8%	10%	17%	15%
Quelle: Bahn-Umwelt-Zentrum; Annahmen BUZ und IFEU					IFEU Heidelberg 2003				

Vor allem folgende Entwicklungen sind relevant für die Emissionen:

- **Entwicklung der Betriebsleistungen:** In dem betrachteten Zeitraum 1994-2002 gingen die Leistungstonnenkilometer des Schienendieselvekehrs insgesamt um knapp 40 % zurück. Der Rückgang war je Zugart unterschiedlich: Im Personenfernverkehr schrumpfte die Leistung um fast 80 %, im Güterverkehr um nahezu 60 %. Deutlich geringer war die Abnahme bei den Rangierleistungen (-14 %) und beim Personennahverkehr (-18 %).
- **Anteil der im Rahmen dieses Vorhabens untersuchten Motoren:** Mit den untersuchten Motoren wird im gesamten Zeitraum mehr als die Hälfte der Betriebsleistungen erbracht. Der höchste Anteil wurde im Jahr 2000 mit 65 % erreicht. Seitdem zeichnet sich aufgrund des zunehmenden Einsatzes neuerer Motoren ein Rückgang ab.
- **Entwicklungstendenzen Güterverkehr und bei Rangierleistungen:** Im betrachteten Zeitraum gewann der Motor 5D49 (Baureihe 232) zunehmende Bedeutung im Zugbetrieb und erreichte im Jahr 2001 einen Anteil von 77 %. Beim Rangieren nahmen die Leistungen mit schweren Rangierloks zu. Der Motor 12V652TA/TZ10 erreichte dabei im Jahr 2001 einen Anteil von 46 %. Dagegen nahm der Anteil der Kleinlokomotiven und damit des Motors GTO6A ab.
- **Entwicklungstendenzen Personenverkehr:** Im Personenverkehr dominiert bei lokbespannten Zügen die Baureihe 218 mit ihren verschiedenen Motoren, wobei der Anteil der neueren Motoren aufgrund der Remotorisierungsprogramme zunimmt. Sowohl im Personenfernverkehr als auch im Nahverkehr ist der Anteil der lokbespannten Züge und damit der großen Dieselmotoren stark rückläufig. So wurden im Personenfernverkehr im Jahr 2002 schon 37 % der Leistungstonnenkilometer mit Triebwagen erbracht, beim Personennahverkehr waren es 55 %.

4.1.2.2 Energieverbrauch und Emissionsberechnung

Die jährlichen Emissionen des Dieselbetriebs bei der DB AG je Zugart und Leistungsart werden auf Basis der folgenden Informationen berechnet::

- Betriebsleistungen (Leistungstonnenkilometer) je Motor, differenziert nach Zugarten und Leistungsarten (wie im vorigen Kapitel beschrieben),
- Emissionsfaktoren und spezifischer Energieverbrauch (in g/kWh) je Lastprofil und Motor
- Energieverbrauch (in t/a) je Zugart und Leistungsart (aus der DB-Statistik /DB 2003b,c/).

Wie in Kapitel 3.3.9 dargelegt, kann die Berechnung der Emissionen weiterhin auf Basis des Kraftstoffverbrauchs als wichtigste Randgröße und kraftstoffbezogener Emissionsfaktoren durchgeführt werden. Zunächst werden je Zugart und Leistungsart mittlere Verbrauchs- und Emissionsfaktoren je kWh berechnet. Die mittleren Emissionsfaktoren (in g/kWh) werden umgerechnet in verbrauchsbezogene Emissionsfaktoren (in g/kg Kraftstoff). Die gesamten Emissionen ergeben sich schließlich durch die Verknüpfung der kraftstoffbezogenen Emissionsfaktoren mit dem gesamten Kraftstoffverbrauch des Bezugsjahres. Das Berechnungsverfahren ist im Anhang 5.5 dargestellt.

In der Basisvariante der Berechnung wird für alle Motoren der ISO-F-Zyklus zugrunde gelegt. Nicht berücksichtigt wurde in dieser Berechnung der mögliche Einfluss eines geänderten Schwefelgehaltes auf die Emissionen, insbesondere Partikel. In den folgenden Tabellen sind die Betriebsleistungen, Dieselkraftstoffverbräuche und die gewichteten Emissionsfaktoren für die Emissionsberechnung DB AG 1994-2002 dargestellt.

Tab. 16 Betriebsleistungen (Leistungstonnenkilometer) der Dieseltraktion der DB AG 1994-2002 (in Mrd. Ltkm/a)

Zugart	Leistungsart	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
PNV	Zugfahrt	31,4	30,4	29,6	29,6	27,0	28,1	29,9	28,2	25,9
PFV	Zugfahrt	10,1	9,0	6,8	5,0	5,0	5,9	4,3	3,2	2,1
GV	Zugfahrt	31,4	29,3	26,1	16,7	15,2	18,1	16,1	15,7	13,2
Alle	Rangieren	16,8	14,9	14,9	14,9	14,9	17,6	17,8	14,9	14,5

Quelle: DB AG, Bahn-Umwelt-Zentrum

Tab. 17 Energieverbrauch der Dieseltraktion der DB AG 1994-2002 (in t/a)

Zugart	Leistungsart	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
PNV	Zugfahrt	401.169	393.442	386.498	351.699	334.119	310.267	334.008	278.723	249.523
PFV	Zugfahrt	93.222	84.412	65.196	56.200	68.141	40.918	35.627	27.098	18.454
GV	Zugfahrt	78.244	75.071	70.401	70.800	61.466	53.337	59.650	84.032	46.943
Alle	Rangieren	105.431	100.149	98.958	102.368	85.349	103.608	73.847	80.809	81.208

Quelle: DB AG, Bahn-Umwelt-Zentrum

Tab. 18 Berechnete Emissionsfaktoren der Dieseltraktion der DB AG 1994-2002 (in g/kg)

Zugart	Leistungsart	Komp	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
PNV	Zugfahrt	CO	11,2	11,0	10,8	10,7	11,0	10,6	10,5	8,7	7,5
PFV	Zugfahrt	CO	14,3	14,3	13,0	11,9	11,7	11,4	10,9	8,9	7,8
GV	Zugfahrt	CO	11,5	11,5	11,7	11,2	11,1	10,3	9,2	8,9	8,9
GV	Rangieren	CO	17,7	17,7	17,7	17,7	17,6	15,6	15,1	13,2	12,9
PNV	Zugfahrt	HC	4,2	4,1	4,1	4,1	4,1	3,8	3,8	3,0	2,8
PFV	Zugfahrt	HC	6,8	6,8	6,5	6,0	5,9	5,6	5,6	4,2	3,6
GV	Zugfahrt	HC	5,1	5,3	5,0	4,9	5,0	5,7	6,3	6,4	6,3
GV	Rangieren	HC	2,9	2,9	2,9	2,9	2,8	3,0	3,0	2,8	2,8
PNV	Zugfahrt	NOx	49,5	50,6	52,1	52,7	52,3	53,0	53,8	52,6	52,0
PFV	Zugfahrt	NOx	60,0	60,0	59,3	58,3	58,3	58,0	58,1	55,3	52,0
GV	Zugfahrt	NOx	49,5	50,3	49,2	49,0	49,7	53,4	55,7	56,8	56,3
GV	Rangieren	NOx	48,8	48,8	48,8	48,8	48,7	45,5	44,9	42,2	42,4
PNV	Zugfahrt	PT	1,98	1,92	1,76	1,63	1,61	1,52	1,52	1,16	0,95
PFV	Zugfahrt	PT	1,77	1,77	1,74	1,70	1,69	1,58	1,54	1,25	1,17
GV	Zugfahrt	PT	1,86	1,88	1,76	1,74	1,70	1,89	1,96	2,03	2,00
GV	Rangieren	PT	1,83	1,83	1,83	1,83	1,82	1,68	1,67	1,66	1,62

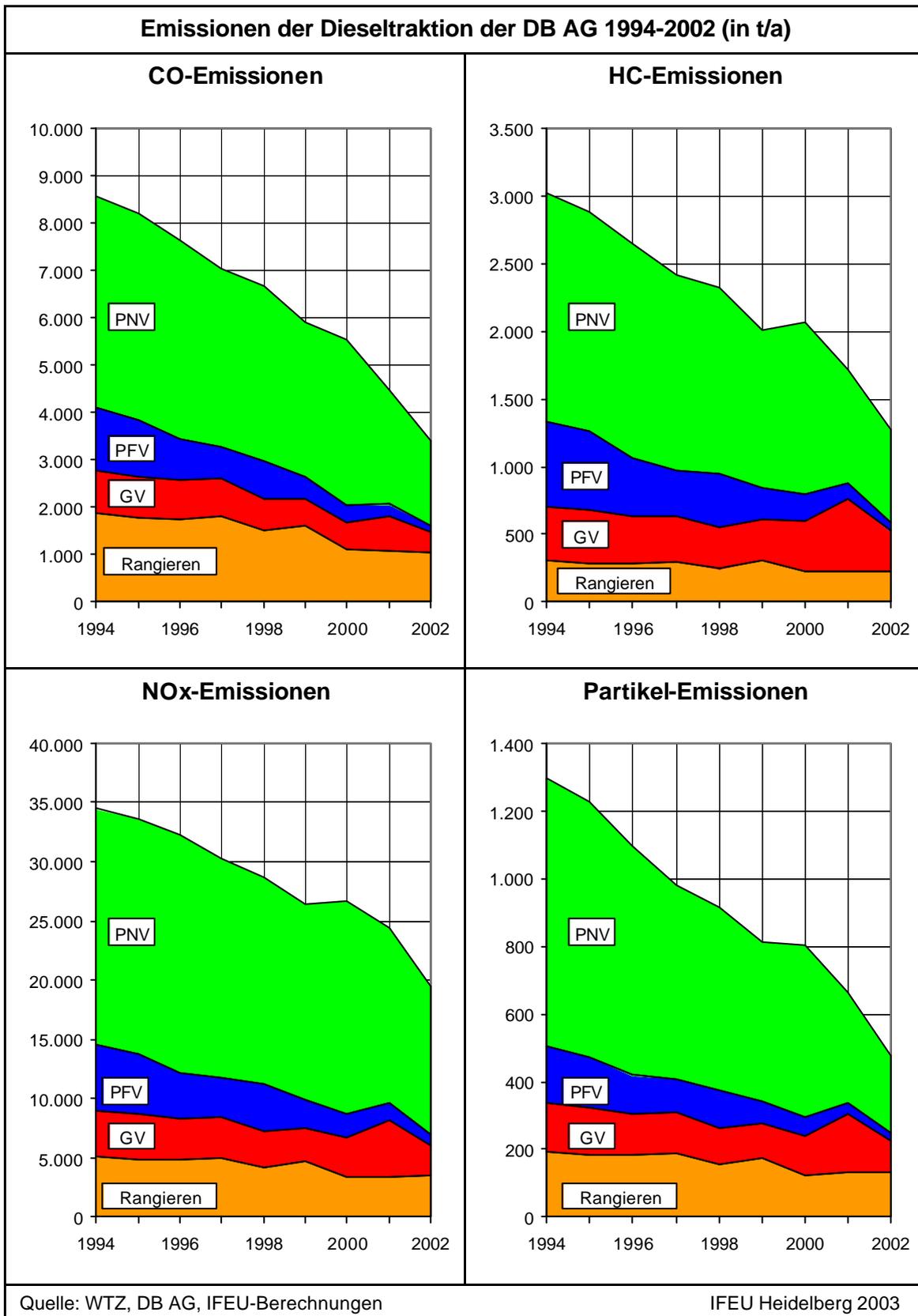
Quelle: DB AG, Bahn-Umwelt-Zentrum, IFEU-Berechnungen

Folgende Ergebnisse lassen sich festhalten:

- Die kraftstoffbezogenen Emissionsfaktoren des Personenverkehrs sind zwischen 1994 und 2002 – außer bei NO_x - deutlich zurückgegangen. Grund für den Rückgang sind die eingeleiteten Remotorisierungen der Baureihe 218 sowie der zunehmende Einsatz moderner Dieseltriebwagen.
- Beim Güterverkehr kam es im gleichen Zeitraum - außer bei CO - zu einem leichten Anstieg der kraftstoffbezogenen Emissionsfaktoren. Dies ist auf die zunehmende Dominanz der Baureihe 232 und somit des Motors 5D49 zurückzuführen.
- Bei den Rangierleistungen gab es einen leichten Rückgang der kraftstoffbezogenen Emissionsfaktoren.

Schaut man auf die Gesamtentwicklung in folgender Abbildung, ergibt sich aufgrund der rückläufigen Betriebsleistungen (Tab. 16) zwischen 1994 und 2002 durchgehend ein Rückgang der Emissionen der Dieseltraktion der DB AG: Mehr als halbiert haben sich die CO (-60 %), HC (-58 %) und Partikelemissionen (-63 %). Die NO_x-Emissionen gingen um 43 % zurück.

Tab. 19 Emissionen der Dieseltraktion der DB AG 1994-2002 (in t/a)



4.1.3 Berechnung der Emissionen auf Basis alternativer Lastprofile

In Kapitel 3.3 wurden für typische Baureihen/Motor-Kombinationen mittlere Emissionsfaktoren für vorliegende Lastprofile abgeleitet. Um den Einfluss veränderter Lastprofile auf die Emissionsergebnisse abzuschätzen wurde eine Alternativberechnung durchgeführt, die für verschiedene Zugarten und für Rangieren unterschiedliche Lastprofile verwendet. Diese Berechnung konnte nur für die sieben Motortypen, für die ein vollständiger Satz an Emissionsfaktoren für die einzelnen Lastpunkte aus dem WTZ-Messprogramm vorlag, durchgeführt werden. Folgende Annahmen wurden für die Berechnung getroffen.

- Die Berechnung wurde für das Jahr 2001 durchgeführt, da in diesem Jahr die sieben Motoren den größten Anteil an den Betriebsleistungen hatten.
- Für die Zugarten Personennahverkehr, Personenfernverkehr und Güterverkehr sowie für Rangieren wurde ein typisches Lastprofil jeweils für Diesel-elektrischen und Diesel-hydraulischen Antrieb ausgewählt.
- Die Emissionen der sieben Motortypen wurden mit den alternativen Lastprofilen berechnet, die Emissionen der übrigen Motoren mit dem ISO-F-Zyklus.

Die folgende Tabelle zeigt die jeweiligen Lastprofile, die bei der Berechnung verwendet wurden.

Tab. 20 Lastprofile für alternative Emissionsberechnung 2001

	Diesel-hydraulisch	Diesel-elektrisch
Personennahverkehr	DB PV 1994	DB PV 1994
Personenfernverkehr	DB PV 1994	DR IC 1992
Güterverkehr	DB GV 2000	DSB GV 1999
Rangieren	DB/MTU Rangieren	DB/MTU Rangieren

Bei der Berechnung werden die kraftstoffbezogenen Emissionsfaktoren je Zugart und für Rangieren entsprechend dem Gewichtungsverfahren nach Anhang 5.5 unter Berücksichtigung der alternativen Lastprofile abgeleitet und zur Berechnung der Gesamtemissionen mit den vorgegebenen Gesamtkraftstoffmengen verknüpft.

Die folgende Tabelle zeigt das Ergebnis der Berechnung, auf der einen Seite für die gesamte Dieseltraktion, auf der anderen Seite die Ergebnisse für die sieben Motortypen aus dem WTZ-Vorhaben.

Tab. 21 Berechnungsergebnisse für das Jahr 2001: Vergleich Berechnung mit alternativen Lastprofilen gegenüber der Berechnung mit ISO F (in t/a)

Zugart	Leistungsart	Komp	Alle Motoren			Motoren des Vorhabens		
			ISO F	alternative Lastprofile	Differenz	ISO F	alternative Lastprofile	Differenz
GV	Rangieren	CO	1.070	1.625	+52%	733	1.288	+76%
GV	Rangieren	HC	224	321	+43%	154	251	+63%
GV	Rangieren	NOx	3.412	3.837	+12%	2.248	2.673	+19%
GV	Rangieren	PT	134	144	+7%	61	71	+16%
GV	Zugfahrt	CO	746	742	-1%	599	594	-1%
GV	Zugfahrt	HC	538	478	-11%	497	436	-12%
GV	Zugfahrt	NOx	4.770	5.144	+8%	4.256	4.630	+9%
GV	Zugfahrt	PT	171	131	-23%	158	118	-25%
PFV	Zugfahrt	CO	242	295	+22%	192	246	+28%
PFV	Zugfahrt	HC	113	105	-7%	91	83	-9%
PFV	Zugfahrt	NOx	1.500	1.539	+3%	1.257	1.296	+3%
PFV	Zugfahrt	PT	34	28	-17%	27	21	-21%
PNV	Zugfahrt	CO	2.411	2.661	+10%	1.387	1.637	18%
PNV	Zugfahrt	HC	844	837	-1%	465	458	-1%
PNV	Zugfahrt	NOx	14.671	14.790	+1%	8.091	8.210	+1%
PNV	Zugfahrt	PT	322	299	-7%	201	177	-12%

Folgende Ergebnisse lassen sich - immer unter alleiniger Berücksichtigung der sieben variierten Motortypen - festhalten:

- Die größten Unterschiede ergeben sich beim Rangierbetrieb. Hier kommt es durchgehend zu einer Erhöhung der Emissionen. Bei den besonders relevanten NOx- und Partikelemissionen liegen die Erhöhungen bei +19 % bzw. +16 %. Die Ursache der Erhöhung liegt im wesentlichen in den hohen Unterschieden des Motortyps 12V652TA/TZ10 (siehe Kapitel 3.3.8). im DB/MTU-Rangierzyklus gegenüber dem ISO-F-Zyklus.
- Beim Güterverkehr kommt es zu einer Zunahme der NOx-Emissionen um 9 % und zu einer Abnahme der Partikelemissionen um 25 %. Dieser Unterschied ist allein auf das Verhalten des Motortyps 5D49 der Baureihe 232 zurückzuführen. Bei den Motoren im diesel-hydraulischen Betrieb sind die NOx-Emissionen im DB-GV-2000-Zyklus gegenüber dem ISO-F nahezu unverändert und die Partikelemissionen höher, doch hat dies insgesamt aufgrund der Dominanz der Baureihe 232 kaum einen Einfluss auf das Gesamtergebnis.

4.2 Deutsche Bundesbahn und Deutsche Reichsbahn bis 1993

Die Emissionsfaktoren der Deutschen Bundesbahn bis 1993 wurden aufgrund der Betriebsleistungen aus der Gesamtkostenrechnung 1987 und 1990 abgeleitet. In diesen Jahren dominierten die Motoren GTO6A, 12V652TA/TZ10, 12V956TB10 und 16V652TB10 die Betriebsleistung. Aus den Emissionsfaktoren dieser Motoren und ihren Anteilen an der Betriebsleistung wurde ein mittlerer Emissionsfaktor für die DB für die Zugarten Personennah-, -fern- und Güterverkehr sowie für Rangieren im Jahr 1987 und 1990 abgeleitet. Alle anderen Motoren wurden nicht berücksichtigt. Die folgende Tabelle listet die verwendeten Anteilswerte auf.

Tab. 22 Betriebsleistungsanteile verschiedener Motoren bei der DB 1987 und 1990

	Baureihe	260	212	218	215	Alle
	Motor	GTO6A	12V652TA/TZ10	12V956TB10	16V652TB10	
PNV	1987		27%	49%	24%	100%
	1990		19%	56%	25%	100%
PFV	1987			86%	14%	100%
	1990			94%	6%	100%
GV	1987		24%	42%	35%	100%
	1990		22%	44%	34%	100%
Rangieren	1987	42%	58%			100%
	1990	33%	67%			100%

Anmerkungen: die übrigen Baureihen/Motoren wurden nicht berücksichtigt.

Quelle: Gesamtkostenrechnung der DB, Abschätzungen des IFEU

Die resultierenden Emissionsfaktoren des Jahres 1987 werden auch für alle vorangegangenen Jahre verwendet. Die Emissionsfaktoren zwischen 1987 und 1990 werden linear interpoliert. Zwischen 1990 (Deutsche Bundesbahn) und 1994 (DB AG) werden die Werte ebenfalls linear interpoliert

Für die **Deutsche Reichsbahn** liegen uns keine Betriebsleistungsdaten für einzelne Motoren und Baureihen vor. Es wurden daher folgende vereinfachte Annahmen getroffen:

- Für den Personennahverkehr werden die Emissionsfaktoren des Motors 12KVD21AL-5 verwendet.
- Für den Personenfern- und den Güterverkehr werden die Emissionsfaktoren des Motors 5D49 angesetzt.
- Für Rangieren wird hilfsweise der Motor GTO6A verwendet.

Diese Annahmen gelten für die Jahre 1990 und früher. Zwischen 1990 und 1993 werden die Emissionsfaktoren linear interpoliert.

Der Emissionsberechnung für die DB und DR vor 1993 liegen ansonsten die bisherigen TREMOD-Daten zugrunde /IFEU 2002a/. Die Ergebnisse der Berechnung werden im Rahmen der TREMOD-Aktualisierung im Jahr 2004 /IFEU 2004a/ dargestellt werden.

4.3 Übrige Eisenbahnen bis 2002

Die übrigen öffentlichen Eisenbahnen haben bisher einen sehr geringen Anteil an der Betriebsleistung der Bahnen (unter ein Prozent). Die statistischen Grundlagen sind schlecht, die Vielfalt der Fahrzeuge ist groß, die Veränderungen in den vergangenen Jahren ebenfalls. Es ist daher nicht möglich, den Dieselbetrieb der übrigen Eisenbahnen realistisch abzubilden. Daher werden keine eigenen Emissionsfaktoren abgeleitet sondern hilfsweise die Emissionsfaktoren der DB AG verwendet. In der aktuellen TREMOD-Version /IFEU 2004a/ wird der Eisenbahnverkehr der übrigen Bahnen neu berechnet. Dabei werden auch die Hafen- und Werksbahnen berücksichtigt werden,

die im Rahmen des Forschungsvorhabens zu mobilen Maschinen und Geräten /IFEU 2003a/ abgeleitet wurden.

4.4 Zukünftige Entwicklung

Zur Abschätzung der zukünftigen Emissionsentwicklung müssen Annahmen zu folgenden möglichen Entwicklungen getroffen werden:

- Emissionsfaktoren zukünftiger Motorgenerationen
- Entwicklung der Anteile der Betriebsarten, Baureihen und Motoren an der Betriebsleistung
- Entwicklung der Betriebsleistungen (Leistungstonnenkilometer)
- Änderungen der Zugkonfigurationen und des Wagenmaterials (Zuglängen, Gewicht etc.)
- Änderungen im Betriebsablauf

Die Entwicklung der Betriebsleistungen ist darüber hinaus abhängig von der Verkehrsentwicklung und den realisierten Auslastungsgraden.

4.4.1 Annahmen zum Fahrzeugpark und den Emissionsfaktoren

Zur möglichen zukünftigen Entwicklung des zukünftigen Schienenverkehrs mit Dieseltriebfahrzeugen gibt es nur sehr wenig Informationen, denn es ist nicht absehbar, welche Eisenbahnverkehrsunternehmen in welchem Umfang zukünftig Schienenverkehr mit welchen Fahrzeugen durchführen werden. Die getroffenen Annahmen sind daher Abschätzungen, die eine derzeit eine gewisse Wahrscheinlichkeit haben, jedoch aufgrund der verkehrlichen Entwicklung und vor allem unternehmerischen Entscheidungen der Eisenbahnunternehmen jederzeit in eine andere Richtung verlaufen können. Die Annahmen basieren ausschließlich auf den Verkehren der DB AG.

Erneuerung des Fahrzeugbestands

Die Entwicklung des Fahrzeugbestands ist hauptsächlich von den Beschaffungs- und Einsatzentscheidungen der DB AG abhängig. Aufgrund verschiedener Publikationen gibt es bei der DB AG derzeit folgende Planungen bis 2010:

- Weitere Remotorisierungen bei der Baureihe 218, 232, 290/294 und 364/65 /DB Themendienst 2003a/.
- Ersatz vorhandener/Anschaffung neuer Lokomotiven in größeren Stückzahlen ab 2006; dabei sind drei Fahrzeugkonzepte geplant: kleine Rangierlok mit 500 kW, schwere Rangierlok mit 1000 kW und eine universelle Streckenlok mit 2200 kW /Bahntech 2003a/; Langfristig Halbierung des Fahrzeugbestands.

Unsere Annahmen berücksichtigen die Erneuerung des Triebfahrzeugbestands mit neuen Fahrzeugen ab 2006. Weitere Fahrzeugbeschaffungen in nachfolgenden Jahren werden nicht berücksichtigt.

Emissionsgrenzwerte für neue Motoren

Am 10. Oktober 2003 hat der Rat der EU einen Vorschlag für neue Grenzwerte für den Schienenverkehr mit Dieseltriebfahrzeugen vorgestellt /EU 2003a/. Dieser Vorschlag ergänzt die entsprechenden Vorschläge für mobile Maschinen und Geräte. Relevant sind die Stufe III A, die ab 2006/2007 gelten soll und sowie die Stufe III B, die ab 2012/2013

gelten soll (siehe Anhang 5.1).

Die Grenzwerte der Stufe III A sind so gestaltet, dass sie mit motorischen Maßnahmen eingehalten werden können. So liegen aktuelle neue Motoren bereits nahe bei diesen Werten oder sogar darunter (siehe Tab. 23).

Die Grenzwerte der Stufe III B sind nun so angesetzt, dass wahrscheinlich für die Erreichung Partikelfilter erforderlich sein werden. Dagegen ist die ursprünglich vorgeschlagene deutliche Verschärfung der NOx-Grenzwerte nicht mehr konkret vorgesehen. Vielmehr soll bis Ende 2007 nochmals über neue Grenzwerte für große Bahnmotoren unter Berücksichtigung der technischen Möglichkeiten beraten werden.

Nach Auskunft des Bahn-Umwelt-Zentrums sollen die geplanten Neubeschaffungen den jeweils gültigen Grenzwerten entsprechen. Darüber hinausgehende Maßnahmen zur Minderung sind nicht geplant. Aufgrund des Beschaffungszeitraums 2006 bis 2010 unterstellen wir daher, dass die Fahrzeuge die Grenzwerte der Stufe III A einhalten werden.

Wir schätzen für die Szenarienberechnung Emissionsfaktoren für zukünftige Motoren der Stufe III A aufgrund der Werte aktueller neuer Motortypen und der Grenzwerte ab. Da Fahrzeugbeschaffungen für die Jahre nach 2010 bisher nicht vorgesehen sind, werden keine Fahrzeuge mit weiter abgesenkten Emissionen berücksichtigt. Die für die Berechnung verwendeten Emissionsfaktoren sind in der folgenden Tabelle dargestellt.

Tab. 23 Emissionsfaktoren aktueller neuer Bahnmotoren und Abschätzung für mögliche zukünftige Motoren (g/kWh)

Motoren	Baureihe	CO	HC	KV	NOx	PT
Motoren >560 kW						
12V956TB11neu	Remot. 218	1,88	0,42	219	12,4	0,10
16V4000R40	Remot. 218	1,04	0,61	207	11,6	0,12
3516BDI-TA	Remot. 218	1,07	0,17	212	7,9	0,07
8 V4000R41	Remot. 290/294	0,51	0,48	219	7,1	0,11
12D49	Remot. 233	2,42	0,56	210	11,2	0,09
EU III A>560	Szenario	1,0	0,40	210	5,5	0,08
EU III A>2000	Szenario	1,0	0,30	210	7,0	0,08
Motoren <560 kW						
3412EDI-TA	Remot. 262,263	1,01	0,06	205	8,4	0,10
QSK19R	Neu 605, 612	1,07	0,61	201	8,7	0,28
EU III A<560	Szenario	1,0	0,40	200	3,5	0,08
Quelle: WTZ, EU, IFEU-Abschätzung						

4.4.2 Annahmen zur Entwicklung der Betriebsleistungen

Verhältnis lokbespannte Züge/Triebwagen im Personenverkehr

Für den Personenverkehr unterstellen wir, dass die eingeleitete Umstellung von lok-

bespannten Zügen auf Triebwagen weiter fortgesetzt wird. Wir setzen folgende Anteile an (2002 Werte aus der DB Statistik):

Personenfernverkehr: 2002: 37%, ab 2005 50% der Leistungstonnenkilometer

Personennahverkehr: 2002:55%, ab 2007 80% der Leistungstonnenkilometer

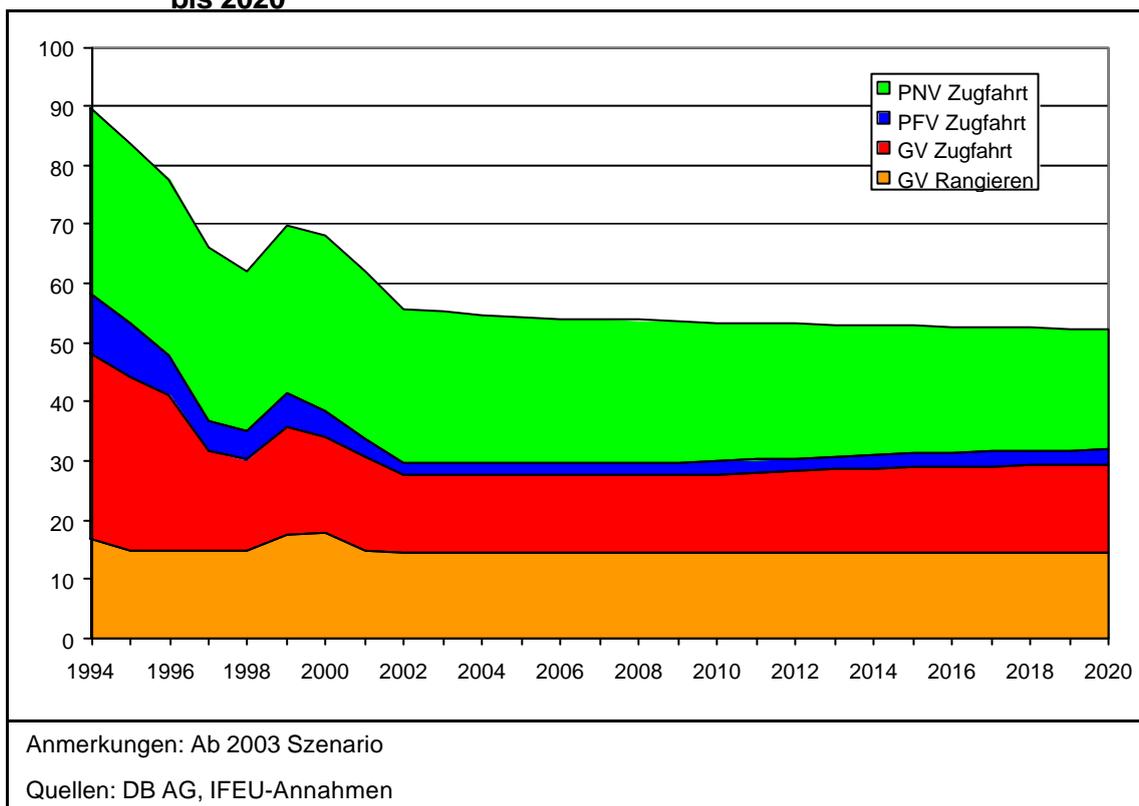
Anteile der Motortypen an der Betriebsleistung

Für das Szenario wurden Anteile der Motoren an den zukünftigen Betriebsleistungen abgeschätzt (siehe Anhang 5.6 in Tab. 46, Tab. 47 und Tab. 48). Es wird angenommen, dass neue Motoren der Stufe EU III A ab 2006 eingesetzt werden. Die neuen Motoren erreichen je nach Betriebsart und Leistungsart Anteile zwischen 50 und 60 % an der Betriebsleistung bis zum Jahr 2020:

Entwicklung der Betriebsleistungen je Zugart

Für die Emissionsentwicklung relevant ist die absolute Entwicklung der Betriebsleistungen. Diese wurde auf Basis des aktuellen TREMOD-Basisszenarios /TREMODO 2002a/ ermittelt (siehe folgende Abbildung).

Abb. 11 Annahmen zur Entwicklung der Betriebsleistungen (Mrd. Leistungstonnenkilometer) von Dieseltriebfahrzeugen bei der DB AG bis 2020



Das **TREMODO-Basisszenario** beruht auf folgenden Annahmen:

Zur Fortschreibung der **Verkehrsleistungen** bis 2020 wurden die Werte des Trend-Szenarios aus der Verkehrsprognose 2015 /BMVBW 2001/ zu Grunde gelegt. Es wird unterstellt, dass die Verkehrsleistungen bis 2020 weiterhin zu über 99 % von der DB AG erbracht werden

Tab. 24 Vorausschätzung der Verkehrsleistungen des Eisenbahnverkehrs in Deutschland bis 2020

Mrd. Pkm..tkm	1997	2015	2020
Personennahverkehr	37,1	36,8	36,7
Personenfernverkehr	35,2	48,4	52,0
Gesamt	72,3	84,2	88,7
Güterverkehr	72,7	92,2	94,6

Anmerkungen: In TREMOD leichte Abweichungen wg. anderer Abgrenzung im Basisjahr
 Quellen: Arbeitsgemeinschaft BVU-ifo-ITP-Planco-Prognos;
 DB; DIW; IFEU-Annahmen IFEU Heidelberg 2003

Bei den **Anteilen der Betriebsarten** Diesel- und Elektrotraktion wurde unterstellt, dass sich die Tendenz zur Zunahme des Anteils elektrisch betriebener Züge fortsetzt. Neben der Elektrifizierung bzw. des Neubaus weiterer Strecken spielt hierbei auch die Bündelung der Verkehrsleistungen auf den Hauptverkehrsstrecken eine Rolle.

Tab. 25 Anteile der Betriebsarten an der Betriebsleistung bei der DB AG 1995, 2002 und im Basisszenario bis 2020

Zuggattung	Betriebsart	DB AG 1995	DB AG 2002	DB AG 2010	DB AG 2020
GV	Diesel	14,9%	6,9%	6,0%	6,0%
GV	Elektrisch	85,1%	93,1%	94,0%	94,0%
PFV	Diesel	10,2%	2,6%	2,5%	2,0%
PFV	Elektrisch	89,8%	97,4%	97,5%	98,0%
PNV	Diesel	30,7%	25,0%	23,0%	20,0%
PNV	Elektrisch	69,3%	75,0%	77,0%	80,0%

Quelle: DB AG, IFEU-Annahmen IFEU Heidelberg 2003

Bei der Entwicklung des betriebsleistungsbezogenen **spezifischen Energieverbrauchs** wird für den Zeitraum 2002-2020 eine Minderung von 10 % angenommen. Damit werden vor allem Einsparungen im betrieblichen Ablauf und technische Verbesserungen unterstellt.

4.4.3 Ergebnisse

Unter den hier getroffenen Annahmen kommt es bei allen betrachteten Emissionskategorien zu einer Absenkung der spezifischen Emissionen. Besonders deutlich ist der Rückgang der Partikelemissionen im Güter- und Rangierverkehr. Die Ergebnisse für die kraftstoffbezogenen Emissionsfaktoren sind in der folgenden Tabelle aufgeführt.

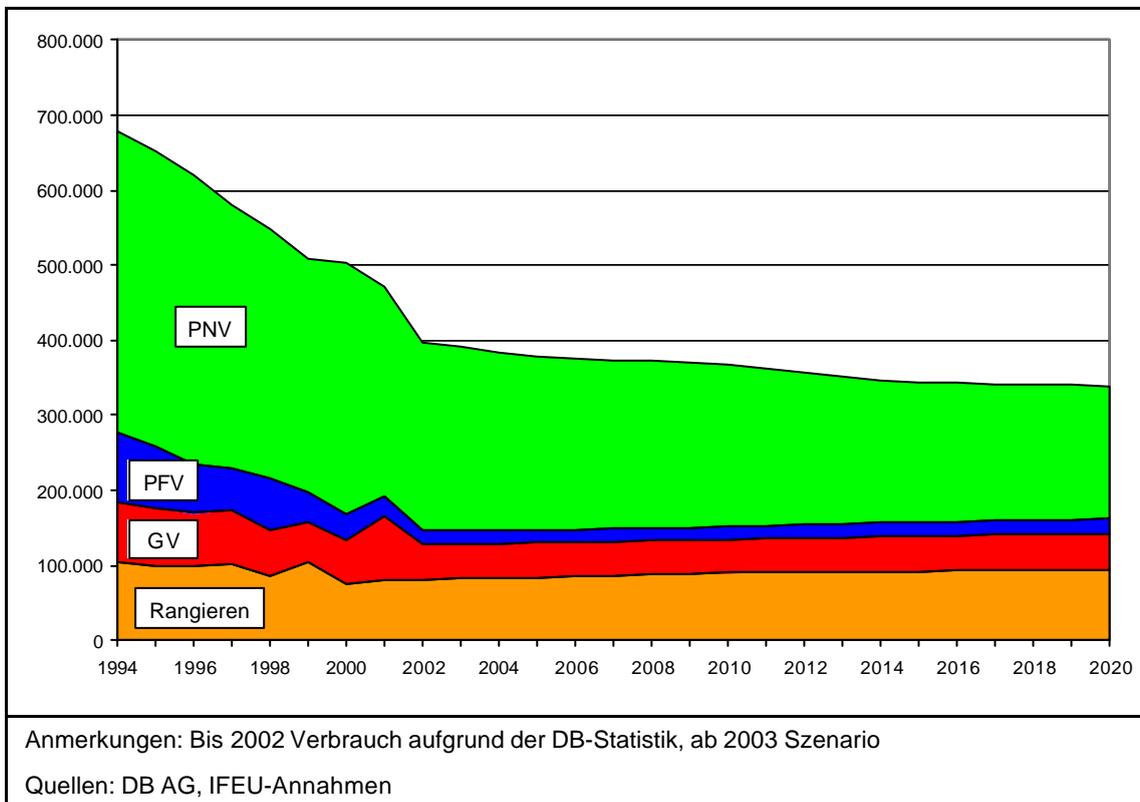
Tab. 26 Mittlere Emissionsfaktoren (g/kg) je Zugart und Leistungsart - Szenarienberechnung

Kategorie	Komp	1995	2002	2003	2005	2006	2008	2010	2015	2020
Rangieren	CO	18	13	13	12	11	9,2	6,8	4,3	4,4
Rangieren	HC	2,9	2,8	2,6	2,5	2,4	2,3	2,1	1,8	1,8
Rangieren	NOx	49	42	42	42	41	39	35	30	29
Rangieren	PT	1,8	1,6	1,5	1,4	1,2	0,98	0,78	0,44	0,43
Zug GV	CO	12	8,9	8,8	9,3	9,0	8,4	8,1	7,1	7,1
Zug GV	HC	5,3	6,3	5,9	5,0	4,5	4,0	3,4	1,9	1,9
Zug GV	NOx	50	56	56	55	53	51	48	41	41
Zug GV	PT	1,9	2,0	1,8	1,4	1,3	1,1	0,92	0,40	0,40
Zug PFV	CO	14,3	7,8	7,1	6,5	6,4	6,2	6,1	5,9	5,4
Zug PFV	HC	6,8	3,6	3,3	3,0	2,8	2,5	2,5	2,5	2,4
Zug PFV	NOx	60	52	51	49	49	48	47	46	43
Zug PFV	PT	1,8	1,2	1,1	1,1	1,0	0,92	0,91	0,91	0,90
Zug PNV	CO	11	7,5	6,7	6,2	5,5	94,9	4,8	4,8	4,7
Zug PNV	HC	4,1	2,8	2,6	2,5	2,5	2,3	2,2	2,1	2,0
Zug PNV	NOx	51	52	51	51	49	44	40	34	30
Zug PNV	PT	1,9	0,95	0,88	0,83	0,82	0,77	0,72	0,63	0,56

Anmerkungen: bis 2002 Berechnung aufgrund der DB-Statistik, ab 2003 Szenario

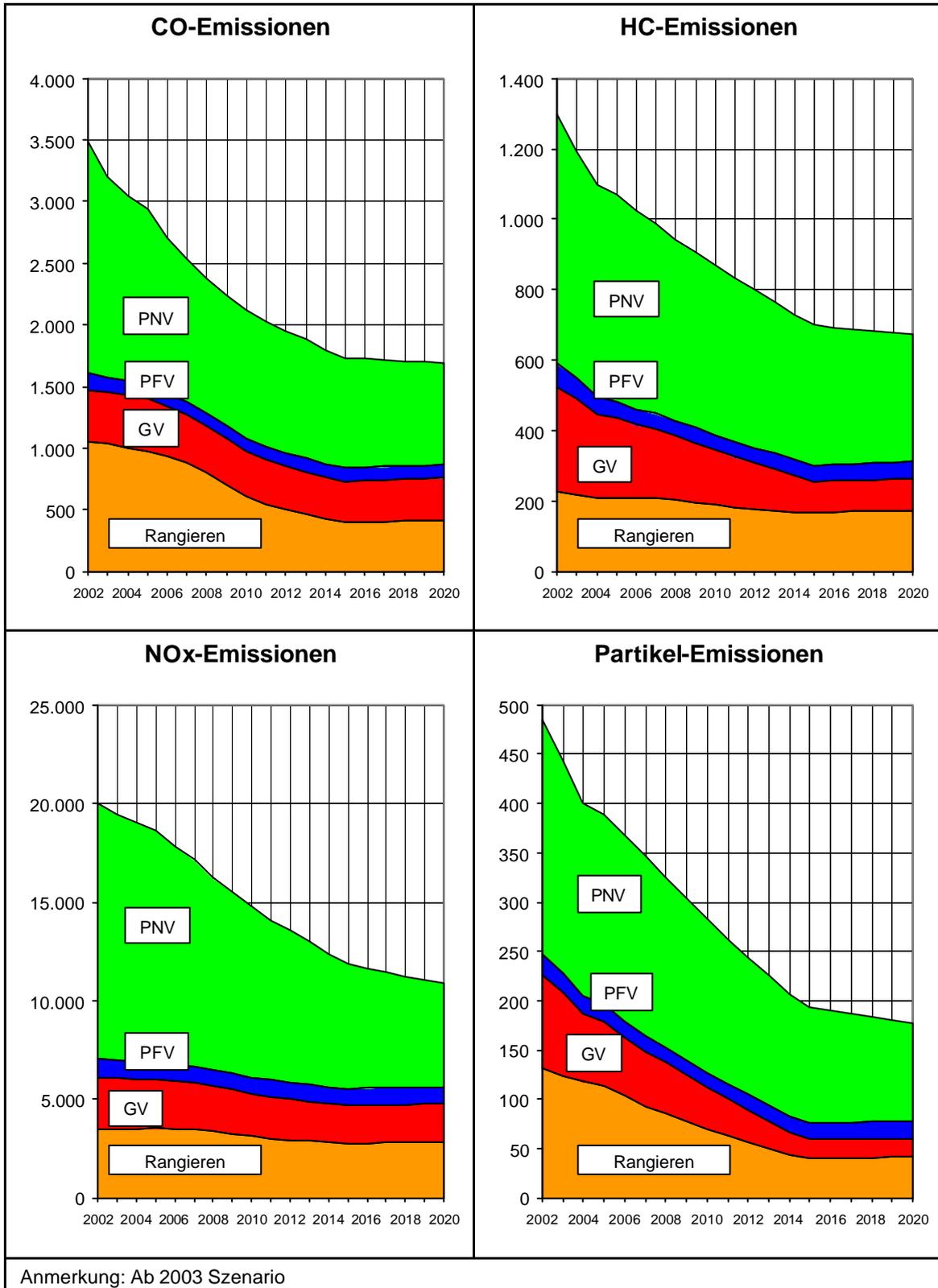
Folgende Abbildung zeigt die Entwicklung des gesamten Kraftstoffverbrauchs 1994-2002 (Realdaten) und 2003-2020 (Szenario)

Abb. 12 Entwicklung des Kraftstoffverbrauchs (Tonnen Diesel) von Dieseltriebfahrzeugen bei der DB AG bis 2020



Der Kraftstoffverbrauch geht aufgrund der rückläufigen Betriebsleistungen und der angenommenen Verbrauchsminderung bei neuen Motoren zurück. Deshalb und aufgrund der etwas rückläufigen Entwicklung der Betriebsleistungen gehen die Gesamtemissionen stärker zurück als die spezifischen Emissionen: Bei NOx von 2002 bis 2020 um rund 45 %, bei Partikeln um rund 65 %.

Tab. 27 Emissionen der Dieseltraktion der DB AG 2002-2020 (in t/a)



Senstivität: neue Fahrzeuge mit Partikelfilter

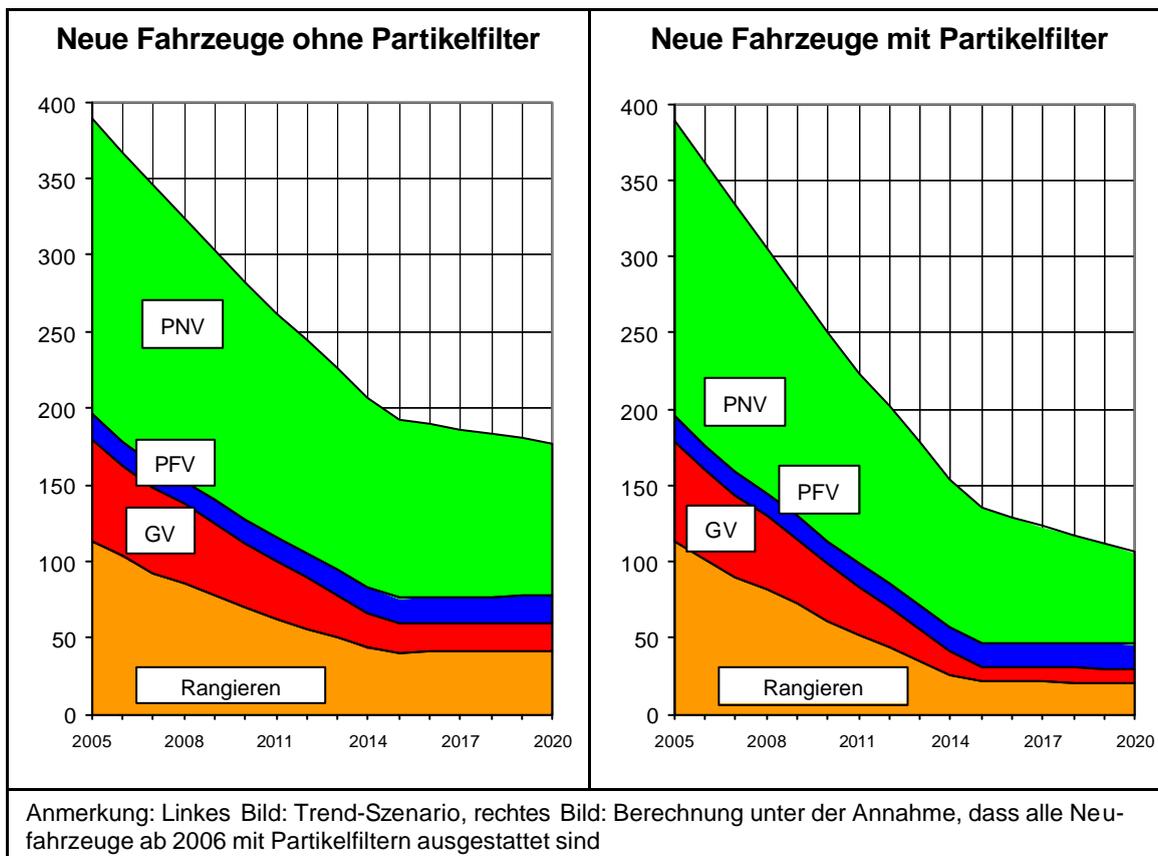
Die Emissionsberechnungen berücksichtigen keine über die Grenzwerte der Stufe III A hinausgehende Emissionsminderung. Eine solche Entwicklung bedeutet, dass die Emissionsminderungen bis 2020 durch Einführung neuer Motoren erreicht werden, die mit der Standard nach EU III°A nahezu dem technischen Standard aktueller neuer Motoren entsprechen.

Eine weitergehende Minderung könnte erreicht werden, wenn alle neuen Fahrzeuge ab 2006 mit Partikelfilter ausgerüstet würden. Dazu wurde eine Sensitivitätsberechnung durchgeführt. Im Unterschied zum Basisszenario wird hier davon ausgegangen, dass alle Neubeschaffungen ab 2006 mit Partikelfilter ausgerüstet sind, die die spezifischen Partikelemissionen um weitere 90% verringern (von 0,08 g/kWh auf 0,008 g/kWh).

Die Ergebnisse dieser Berechnung sind in der folgenden Abbildung im Vergleich zum Basisszenario dargestellt. Es deutlich zu sehen, dass mit dieser Maßnahme eine weitere deutliche Minderung der Partikelemissionen erreicht werden könnte.

Bei dem angenommenen Betriebsleistungsanteil der neuen Motoren von 50-60 % in 2020 ist damit das Minderungspotenzial weitgehend ausgeschöpft, denn die neuen Motoren verursachen nach dieser Berechnung nur noch 7 % der Partikelemissionen im Jahr 2020. Eine weitergehende Minderung ließe sich nur durch schnelleren Austausch der alten Motoren bzw. Fahrzeuge oder durch Nachrüstung erreichen.

Tab. 28 Partikelemissionen der Dieseltraktion der DB AG 2005-2020 (in t/a)



Zusammenfassung und Bewertung der Szenarienergebnisse

Die weitere Entwicklung der Emissionen des Schienenverkehrs mit Dieseltriebfahrzeugen wird im wesentlichen bestimmt durch die Entwicklung der Verkehrs- bzw. Betriebsleistungen, das Emissionsniveau neuer Bahnmotoren und den Umfang des Ersatzes alter durch neue Motoren bzw. Fahrzeuge.

Die zukünftige Entwicklung ist relativ schwer vorzuschätzen, da unternehmerische Entscheidungen über Beschaffung und Einsatz der Fahrzeuge mittelfristig einen weit aus größeren Einfluss auf das Emissionsniveau haben als gesetzliche Vorgaben wie Emissionsgrenzwerte. Denn anders als im Straßenverkehr werden Eisenbahnfahrzeuge nicht kontinuierlich ersetzt. Gründe hierfür sind die Langlebigkeit der Fahrzeuge und die geringe Anzahl der Akteure, deren Entscheidungen über Fahrzeugbeschaffung und -einsatz das Emissionsniveau auf einzelnen Eisenbahnstrecken oder ganzen Netzen bestimmen. Aufgrund dieser Randbedingungen wurden folgende Annahmen getroffen:

Die Szenarienberechnung beschränkt sich auf die Verkehre der DB AG, wobei unterstellt wird, dass deren Anteil am Eisenbahnverkehr von über 99 % im wesentlichen bestehen bleibt, da die weitere Entwicklung der Marktanteile im Bahnsektor ist nicht vorhersehbar ist.

Ein wesentliches Eckdatum für die Entwicklung des Eisenbahnverkehrs ist die Entwicklung der **Verkehrsleistungen**. Im hier verwendeten Trend-Szenario der Bundesverkehrswegeplanung werden vor allem im Personenfern- und Güterverkehr noch Zuwächse erwartet. Der zukünftige Anteil der **Dieseltraktion** an den **Betriebsleistungen** wird in den Szenarien als leicht abnehmend abgeschätzt. Grund dafür ist die unterstellte weitere Zunahme des Anteils der Elektrotraktion, die damit den Zuwachs der Verkehrsleistungen übernimmt.

Aufgrund der Planungen der DB AG zur **zukünftigen Fahrzeugbeschaffung** könnten in den Jahren ab 2006 zahlreiche Neufahrzeuge für alle Einsatzzwecke in Dienst gestellt werden, die ältere Fahrzeuge ersetzen. Diese Fahrzeuge könnten bis 2020 50-60% der Betriebsleistung erbringen. Ob dieser Wert deutlich übertroffen oder auch nicht erreicht wird, kann nicht vorausgesagt werden.

Die neuen Motoren werden nach jetzigem Planungsstand die **Grenzwerte** nach EU III A einhalten. Dies ist wahrscheinlich, da diese Werte bereits von aktuellen neuen Motoren nahezu eingehalten werden. Weitergehende Maßnahmen zur Emissionsminderung sind derzeit nicht geplant.

Unter diesen Randbedingungen kommt es zu einem Rückgang der **NOx-Emissionen** zwischen 2002 und 2020 um 45 %. Die **Partikelemissionen** gehen um 65 % zurück. Diese Minderungen werden ausschließlich durch den Einsatz moderner Motoren ohne weitere Abgasminderungstechnik erreicht.

Mit dem Einsatz **zusätzlicher Minderungstechniken** ließen sich die Emissionen weiter deutlich reduzieren. Der Einsatz von Partikelfiltern in Neufahrzeugen wird jedoch nach den aktuellen Grenzwertvorschlägen erst mit der Stufe III B ab 2011 erforderlich sein. Über eine deutliche Verschärfung der NOx-Grenzwerte wird erst bis Ende 2007 entschieden werden. Nach den jetzigen Beschaffungsplänen der DB AG kann außerdem nicht davon ausgegangen werden, dass bis 2020 Fahrzeuge entsprechend der Stufe III B oder weiterer Stufen beschafft werden. Für andere Eisenbahnunternehmen ist das ebenfalls nicht absehbar. Im Trend muss daher davon ausgegangen werden, dass das Emissionsniveau der zukünftigen Motoren bis 2020 nur wenig unter dem Niveau aktueller neuer Motoren liegen wird. Damit würde das Emissionsniveau der Die-

seltraktion der Eisenbahn in Deutschland, nach dem Ersatz der alten Motoren ab dem Jahr 2010 nur noch geringfügig abnehmen und bezogen auf die Transportleistungen ein deutlich höheres Niveau als der Straßenverkehr haben.

5 Anhang

5.1 Grenzwerte für Bahnmotoren in Europa

Für Bahnmotoren gibt es bisher keine festgelegten Emissionsgrenzwerte. Die UIC hat in der Vergangenheit Grenzwertvorschläge erstellt. Die aktuellen Werte für neue Motoren sind in folgender Tabelle dargestellt:

Tab. 29 UIC-Grenzwertvorschläge (in g/kWh)

			CO	HC	NOx	PT
Stufe 1	ab 2003	$P_{en} < 560 \text{ kW}$	2,5	0,6	6,0	0,25
Stufe 2	ab 2008	$P_{en} < 560 \text{ kW}$	2,0	0,5	4,5	0,15
Stufe 1	ab 2003	$P_{en} > 560 \text{ kW}$	3,0	0,8	9,5 / 9,9*	0,25
Stufe 2	ab 2008	$P_{en} > 560 \text{ kW}$	2,0	0,5	6,0	0,20

Quelle: WTZ 2002

Am 10. Oktober 2003 hat der Rat der EU einen Vorschlag für die Emissionsfaktoren neuer Bahnmotoren vorgestellt /EU 2003a/. Dieser Vorschlag soll die entsprechende Richtlinie zu den Grenzwerten bei mobilen Maschinen und Geräten ergänzen. Die Grenzwerte sollen in zwei Stufen (Stufe III A und Stufe III B) eingeführt werden (siehe folgende Tabelle).

Tab. 30 Vorschlag des Rates der EU vom 10. Oktober 2003 (in g/kWh)

	Gültig ab	Kategorie	CO	HC	NOx	PT
Triebwagen						
Stufe III A	7/2005	alle	3,5	4,0		0,2
Stufe III B	1/2011	Alle	3,5	0,19	2,0	0,025
Lokomotiven						
Stufe III A	1/2006	$P_{en} < 560 \text{ kW}$	3,5	4,0		0,2
Stufe III A	1/2008	$P_{en} > 560 \text{ kW}$	3,5	0,5	6,0	0,2
Stufe III A	1/2008	$P_{en} > 2000 \text{ kW}$	3,5	0,4	7,4	0,2
Stufe III B	1/2011	alle	3,5	4,0		0,025

Anmerkungen: Gültigkeit für neue Typen; für alle Neufahrzeuge meist ein Jahr später
Quelle: EU 2003a

Der Vorschlag Stufe III A entspricht bei Motoren $> 560 \text{ kW}$ dem Vorschlag der UIC (Stufe 2 ab 2008) und gilt als unproblematisch. Der Vorschlag für die Stufe III B sieht eine deutliche Verschärfung der Grenzwerte für Partikel ab dem Jahr 2011 vor. Er bezieht sich dabei auch auf den aktuellen Entwurf der EPA zur Beschränkung der Emissionen von mobilen Maschinen und Geräten /EPA 2003a/. Eine weiter gehende Entwicklung der Grenzwerte soll bis Ende 2007 beraten werden.

5.2 Zusammenstellung von Lastprofilen

Im Rahmen des Vorhabens wurden verschiedene Untersuchungen zu Lastprofilen ausgewertet. Von DB Regio wurden uns zahlreiche Informationen zusammengestellt und übergeben. Einzelne Angaben wurden uns von der Fahrzeugindustrie zur Verfügung gestellt. Von der DSB erhielten wir die Auswertungen von Fahrten im Personen- und Güterverkehr.

5.2.1 Prüfzyklen

Der Prüfzyklus für Eisenbahnfahrzeuge in Europa beruht auf dem ISO 8178-4 Testzyklus F. Er enthält 3 Messpunkte. Zusätzlich ist im UIC-Zyklus ein vierter Lastpunkt für die Messung der Boschzahl vorgesehen. Tab. 31 zeigt eine Zusammenstellung der Prüfpunkte.

Tab. 31 Prüfpunkte im ISO-F- und im UIC-Zyklus

Prüfstufe	1	2	3	4
Drehzahl	Nennndrehzahl	Zwischendrehzahl	Leerlaufdrehzahl	Zwischendrehzahl
Rel. Drehmoment	1,00	0,50	0,00	1,00
Wichtungsfaktor	0,25	0,15	0,60	-
Messung ISO	Stickoxide, Kohlenmonoxid, Kohlenwasserstoffe, Partikel			-
Messung UIC	Stickoxide, Kohlenmonoxid, Kohlenwasserstoffe			Boschzahl

Die amerikanische Umweltbehörde verwendet zwei Zyklen mit 9 Messpunkten. Der Zyklus Line-Haul soll den Zugbetrieb, der Zyklus Switch den Rangierbetrieb abbilden /EPA 1998a/.

Tab. 32 Prüfpunkte der EPA Zyklen

Throttle notch	Idle	D.b.	1	2	3	4	5	6	7	8
Rated Power (%)			4,5	11,5	23,5	35,0	48,5	64,0	85,0	100
Percent weighting per notch:										
Line-Haul	38,0	12,5	6,5	6,5	5,2	4,4	3,8	3,9	3,0	16,2
Switch	59,8	-	12,4	12,3	5,8	3,6	3,6	1,5	0,2	0,8
D.b.: Dynamik brake Source: EPA 1998										
IFEU Heidelberg 2003										

5.2.2 Lastprofile der Industrie

Von der Industrie werden als typische Lastprofile für Strecken- und Rangierloks die folgenden Verteilungen angegeben:

Tab. 33 MTU/EUROMOT-Lastprofile

	Nennleistung (%)	<15	30	50	60	75	90	100
Streckenlok	Zeitanteil	60%				15%	15%	10%
	Nennleistung (%)	0	30	50	60	75	90	100
Rangierlok*	Zeitanteil	65%	20%	10%	4,5%			0,5%

Anmerkungen: *wie DB Cargo
Quelle: /MTU 2000a/, /Euromot 2000a/

Gegenüber dem ISO-F-Zyklus weisen die Lastprofile einen geringeren Volllast- und einen höheren Teillastanteil auf. Beim Rangierzyklus liegen 95 % des Lastanteils im Bereich bis 50 %.

Beide Profile werden im Rahmen dieser Untersuchung für die Berechnung von Emissionsfaktoren verwendet (siehe Anhang 5.3 und 5.4 sowie Kapitel 3)

Ein weiteres Lastprofil wurde uns von Siemens übermittelt:

Tab. 34 Siemens-Lastprofil Rangieren

	Nennleistung (%)	0%	0-5	5-10	10-15	15-30	30-50	>50
Rangierlok*	Zeitanteil	33%	41%	8%	6%	6%	3%	3%

* bei Mannesmann Hüttenwerke (nach Siemens KraussMaffei, Hr. Jung)
Quelle: /Siemens 2000a/

5.2.3 Lastprofile der DB AG

5.2.3.1 Lastprofile von DB Cargo

Von DB Cargo wurden uns die folgenden Lastprofile übermittelt:

Tab. 35 Lastprofile DB Cargo AG 2000

Streckenlok							
Anteil Last (%)	LL	27	50	63	77	87	100
Zeitanteil (%)	60	14	11	6	5	4	0
Rangierlok							
Anteil Last (%)	LL	30	50	60	100		
Zeitanteil (%)	65	20	10	4,5	0,5		

Quelle: DB 2000b

Das Profil für die Streckenlok enthält hohe Anteile der Zustände Leerlauf und untere Teillast und keine Volllastanteile. Es passt gut zur Leistungskennlinie PoZEV der dieselhydraulischen Kraftübertragung (siehe Kapitel 2.1.4.3, Abb. 3), die keinen Volllastzustand vorsieht. Es wird daher in dieser Untersuchung zur Ableitung von Emissionsfaktoren im Realbetrieb für den Güterverkehr mit dieselhydraulischer Lokomotive ver-

wendet (siehe Anhang 5.3 und 5.4 sowie Kapitel 3)

Das Lastprofil für Rangieren entspricht dem Rangierzyklus von MTU.

5.2.3.2 Messfahrt BR 218 im November 1994 in Franken

Im Rahmen der Emissionsuntersuchungen am abgasoptimierten TB11-Motor fanden im November 1994 Messfahrten im Raum Regensburg-München-Nürnberg statt /MTU 1996a/. Das folgende Profil ist gemittelt aus drei Zugumläufen.

Tab. 36 Lastkollektive BR 218 420-8 (TB11-Motor, abgasoptimiert)

Leistung (MW)	<0,2	0,2-0,4	0,4-0,6	0,6-0,8	0,8-1,0	1,0-1,2	1,2-1,4	1,4-1,6	1,6-1,8	1,8-1,9	1,9-2,0	>2,0
Zeitanteil (%)	47,6	5,4	1,2	7,0	5,3	3,7	3,6	4,2	9,1	0,3	11,6	1,2
Anmerkung: Werte gemittelt aus drei Zugläufen (D-, E- und IR-Züge), Raum Regensburg-München-Nürnberg, 1994 Quelle: MTU 1996a												

Dieses Lastprofil aus dem Realbetrieb wird in dieser Untersuchung zur Ableitung von Emissionsfaktoren im Realbetrieb für den Personenverkehr mit diesel-hydraulischer Lokomotive verwendet (siehe Anhang 5.3 und 5.4 sowie Kapitel 3)

5.2.3.3 Messfahrt BR 218 im November 2000 im Allgäu

Am 29.11.2000 fand eine Messfahrt im Auftrag von DB Regio statt. Die Messungen wurden der von der Fa. GUTMANN MESSTECHNIK durchgeführt. Aufgezeichnet wurden verschiedene Zugfahrten der 218 231-9 mit dem abgasoptimierten TB11-Motor.

Es wurden verschiedene Züge zwischen München, Oberstdorf und Lindau gefahren. Dabei handelt es sich um bergiges Gelände. Bei den Messungen wurden 4 Lastbereiche unterschieden.

Tab. 37 Unterteilung der Lastanteile

Lastbereich	Drehzahl	Regelstangenweg	Motorleistung	rel. Motorleistung
Leerlauf	≥ 450 min ⁻¹	< 10 %	175 kW	0 - 8,50%
untere Teillast	≥ 450 min ⁻¹	10 – 50 %	175 – 900 kW	8,50 - 43,69%
obere Teillast	≥ 450 min ⁻¹	50 – 90 %	900 – 1750 kW	43,69 - 84,95%
Volllast	≥ 450 min ⁻¹	≥ 90 %	1750 – 1975 kW	84,95 - 95,87%

Tab. 38 Lastprofile BR 218 231-9 mit TB11-Motor am 29.11.2000

Anteil Last	Leerlauf <10 %	untere Teillast 50-10%	obere Teillast 90-50 %	Volllast > 90%
RE München-Oberstd.	40,4%	18,6%	19,9%	21,1%
RB Oberst.-Immenst.	70,4%	17,5%	7,9%	4,1%
RB Immenst.-Oberstd.	59,3%	26,9%	9,6%	4,2%
IR Oberstd.-München	44,4%	19,5%	14,3%	21,7%
EC München Lindau	49,2%	20,0%	16,0%	14,9%
EC Lindau-München	54,3%	22,1%	19,4%	4,2%
Gesamt	49,0%	20,4%	16,4%	14,2%

Quelle: Gutmann 2001a

Aus dieser Untersuchung wird das mittlere Profil sowie jeweils ein Abschnitt für bergauf- und Bergabfahrt zur Ableitung von Emissionsfaktoren im Realbetrieb für den Personenverkehr mit diesel-hydraulischer Lokomotive verwendet (siehe Anhang 5.3 und 5.4 sowie Kapitel 3), um den Einfluss des Längsneigungsprofils auf die Emissionen abzuschätzen.

5.2.4 Lastprofile der Deutschen Reichsbahn

Die folgenden beiden Tabellen enthalten einige ältere Lastprofile der Deutschen Reichsbahn, die uns von DB Regio zur Verfügung gestellt wurden.

Tab. 39 Lastprofile von Streckenloks der Deutschen Reichsbahn

Lok-BR	Meßzeit / Einsatz	Leerlauf (%)	Teillast 1 (%)	Teillast 2 (%)	Vollast (%)
220	1972 / Güterzug	45,0	16,4	30,0	8,6
228	1972 / D-Zug	32,1	14,7	39,3	13,9
228	1973 / D-Zug	28,4	6,3	43,0	22,3
234	1992 / IC-Züge	30,0	44,0	12,0	14,0

Tab. 40 Rangierloks

Lok-BR	Meßzeit	Leerlauf (%)	Teillast (%)	Vollast (%)
202	1980	50	42,5	7,5
298	1982	47	41	12
312	1991	78	14	8

Wir verwenden von diesen Profilen das neueste Profil für den IC für die Berechnung von Emissionsfaktoren für den Realbetrieb (siehe Anhang 5.3 und 5.4 sowie Kapitel 3).

5.2.5 Lastprofile der DSB

Von der dänischen Staatsbahn DSB liegen eine Reihe von Messwerten vor, die unterteilt sind nach den Zugarten Personenzug, Güterzug und Railcar. Personen- und Güterzug werden von einer dieselelektrischen Lokomotive gezogen, während es sich beim Railcar um einen Triebwagen handelt.

Bei den Messfahrten wurden die Zeit- und die Streckenanteile von verschiedenen Lastpunkten festgehalten. Für die Lokomotiven wurden acht Lastpunkte festgelegt, für den Triebwagen sieben; hinzu kommt der Leerlauf. Die absolute und die relative Leistung in den Lastpunkten ist in Tabelle (Tab. 41) dargestellt.

Tab. 41 Lastprofile der DSB

Railcar										
	Lastpunkt	0		1	2	3	4	5	6	7
rel. Leistung	P_e/P_{ne} (%)	0		17	25	38	52	65	80	100
Zeitanteil	%	41,1		6,0	5,6	6,8	9,2	7,3	2,6	21,5
Personenzug										
	Lastpunkt	0	1	2	3	4	5	6	7	8
rel. Leistung	P_e/P_{ne}	0	4	13	25	34	46	61	79	100
Zeitanteil	%	48,2	3,3	3,6	3,6	6,5	5,7	4,9	2,9	21,3
Güterzug										
	Lastpunkt	0	1	2	3	4	5	6	7	8
rel. Leistung	P_e/P_{ne}	0	4	13	25	34	46	61	79	100
Zeitanteil	%	33,6	6,1	6,7	8,0	10,4	8,3	6,4	5,1	15,5
Quelle: DSB 2000a										

Wir verwenden für die Ableitung von Emissionsfaktoren im Realbetrieb die Lastprofile für den lokbespannten Personenzug und den Güterzug (siehe Anhang 5.3 und 5.4 sowie Kapitel 3).

5.3 Aufbereitung der Lastprofile für die vermessenen Lastpunkte

Im Rahmen des Vorhabens wurde der Einfluss verschiedener Lastprofile auf das Emissionsverhalten untersucht. Dabei wurden die in Anhang 5.1 dargestellten Lastprofile zugrunde gelegt. Diese mussten für die Berechnung so angepasst werden, dass sie mit den Lastpunkten aus dem Messprogramm beschrieben werden konnten. Jedem Lastpunkt oder Lastbereich eines Profils musste also ein Lastpunkt aus dem Messprogramm zugeordnet werden. Dabei wurden folgende Annahmen getroffen:

- Die Motoren werden entlang der Kennlinien PoZEV (Güterverkehr, Rangieren) bzw. PmZEV (Personenverkehr) betrieben (siehe Kapitel 2.1.4).
- Das Emissionsverhalten zwischen den gemessenen Lastpunkten lässt sich durch lineare Interpolation hinreichend genau beschreiben. Diese Annahme lässt sich vertreten, wie die Bilder 11-22 im Bericht /WTZ 2002/ sowie in diesem Bericht im Anhang 5.4, Abb. 13 und Abb. 14 zeigen.

Die im Vorhaben /WTZ 2002/ abgeleiteten Polynomfunktionen zur Beschreibung der Motorkennfelder wurden nicht verwendet, da diese Funktionen im unteren Teillastbereich und vor allem beim Leerlauf hohe Abweichungen von den Messergebnissen aufweisen und da für den Kraftstoffverbrauch keine Kennfeldfunktionen abgeleitet wurden.

Bei der Zuordnung der Lastprofile zu den Lastpunkten aus dem Messprogramm muss außerdem unterschieden werden nach diesel-hydraulischen und diesel-elektrischen Fahrzeugen, da sich deren Betriebsverhalten deutlich voneinander unterscheiden. Bei den aufgrund von Einzelfahrten aufgezeichneten Lastprofilen wurde daher auch die verwendete Kraftübertragungsart berücksichtigt.

Das grundsätzliche Verfahren für die Zuordnung wird in den folgenden Tabellen anhand dem Fahrprofil der DSB für den Personenverkehr dargestellt

Schritt 1:

Die für einen mit einer dieselektrischen Lokomotive gezogenen Personenzug relevanten Messpunkte von WTZ sind - neben Leerlauf und Vollast - die Lastpunkte 2 bis 4 (diselelektrisch, Kurve PmZEV). Die Leistungsrelation P/P_n der Lastpunkte der DSB-Messfahrten werden im ersten Schritt aus der Leistungsrelation der Messpunkte nach WTZ durch Linearkombination der jeweils größeren und kleineren Leistungsrelation der Lastpunkte (WTZ) ermittelt.

DSB	P	0,02	100	325	625	825	1125	1500	1950	2460	
Personenverkehr	P_e/P_{en}	0,00	0,041	0,132	0,254	0,335	0,457	0,61	0,79	1,00	
	LP	0	1	2	3	4	5	6	7	8	
	Anteil	48,2%	3,3%	3,6%	3,6%	6,5%	5,7%	4,9%	2,9%	21,3%	100%
Lastpunkte WTZ		Anteile LP (WTZ) an LP (DSB)									
P_e/P_{en}	LP										
1,000	1										100%
0,824	2								73%	0%	
0,696	3							53%	27%		
0,513	4	8%	26%	49%	65%	89%	47%				
0,000	10	100%	92%	74%	51%	35%	11%				
Gesamt		100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	

Lesebeispiel: Der Lastpunkt (DSB) 1 hat eine relative Leistung P_e/P_{en} von 0,041. Die Lastpunkte (WTZ) die dieser relativen Leistung am nächsten liegen sind der Leerlauf und der Lastpunkt 4. Die relative Leistung des Lastpunktes (DSB) 1 lässt sich aus der relativen Leistung der Lastpunkte (WTZ) berechnen, indem 0,08mal die relative Leistung des Lastpunktes (WTZ) 1 und 0,92mal die relative Leistung des Leerlaufs genommen wird: $0,08 * 0,513 + 0,92 * 0 = 0,041$

Schritt 2:

Durch Gewichtung der in Schritt 1 bestimmten Anteile mit den Zeitanteilen der Lastpunkte der DSB am gesamten Fahrprofil der DSB erhält man die Anteile je Lastpunkt (DSB) und je Lastpunkt (WTZ) am Gesamtprofil und - summiert über alle Lastpunkte (DSB) - die Anteile der Lastpunkte (WTZ) am Fahrprofil.

LP (DSB)		0	1	2	3	4	5	6	7	8	
P_e/P_{en}	LP (WTZ)										Anteil
1,000	1									21,3%	21,3%
0,824	2								2,1%		2,1%
0,696	3							2,6%	0,8%		3,3%
0,513	4		0,3%	0,9%	1,8%	4,2%	5,1%	2,3%			14,6%
0,000	10	48,2%	3,0%	2,7%	1,9%	2,3%	0,6%				58,7%
Anteil		48,2%	3,3%	3,6%	3,6%	6,5%	5,7%	4,9%	2,9%	21,3%	100%

Folgende Lastprofile wurden nach diesem Verfahren abgeleitet und für die Berechnung von Emissionen im realen Fahrbetrieb verwendet:

Tab. 42 Zeitanteile von Lastprofilen bezogen auf die Lastpunkte (WTZ)

Personenverkehr			Zeitanteile Lastpunkte (WTZ)					
Zyklus	Kraftüb.	P_{rel}	1	2	3	4	10	
MTU-Standard	DE	39%	16,5%	14,9%	8,7%	9,0%	51,0%	
DR-IC-1992	DE	51%	14,0%	12,0%	22,0%	22,0%	30,0%	
DSB-PV-1999	DE	33%	21,3%	2,1%	3,3%	14,6%	58,7%	
MTU-Standard	DH	39%	19,0%	21,0%	0,0%	12,0%	48,0%	
DB-PV-1994 Franken	DH	34%	15,7%	12,3%	7,5%	12,7%	51,7%	
DB-PV-2000 Allgäu - gesamt	DH	30%	11,4%	12,7%	6,6%	14,9%	54,5%	
Allgäu - München-Buchlohe (bergauf)	DH	45%	21,8%	18,2%	8,5%	13,1%	38,3%	
Allgäu - Oberstdorf-Immenstadt (bergab)	DH	14%	3,3%	5,6%	3,2%	12,8%	75,2%	
Güterverkehr/Rangieren			Zeitanteile Lastpunkte (WTZ)					
Zyklus	Kraftüb		1	5	6	7	8	10
MTU-Standard	DE	39%	19,9%	20,1%	0,0%	0,0%	20,4%	39,6%
DSB-GV-1999	DE	34%	16,5%	5,1%	8,3%	14,1%	14,9%	41,2%
EPA-Line-Haul	DE	31%	20,0%	3,5%	5,1%	6,7%	11,9%	52,9%
MTU-Standard	DH	39%	17,5%	19,7%	2,9%	0,0%	45,0%	15,0%
DB-GV-2000	DH	20%	1,4%	9,3%	13,6%	11,7%	4,1%	60,0%
EPA-Line-Haul	DH	31%	19,4%	4,4%	6,1%	9,6%	12,9%	47,5%
MTU-Rangieren	DH	16%	0,5%	1,2%	11,7%	18,2%	3,4%	65,0%
EPA-Switch	DH	10%	0,9%	0,8%	3,8%	8,3%	19,7%	66,6%

Vergleicht man die Lastprofile mit dem ISO-F-Zyklus, fallen folgende Unterschiede auf:

- Der Volllastanteil ist bei allen Lastprofilen geringer als beim ISO F, der Teillastanteil

höher. In vielen Fällen ist der Leerlaufanteil geringer.

- Viele Profile liegen bei der mittleren Belastung (P_{rel}) in der Nähe des ISO-F-Zyklus von 33 %. Deutlich höhere Belastungen ergeben sich bei zwei Einzelwerten: DR-IC-1992 und ein Abschnitt für die Befahrt auf der Strecke München-Buchlohe.
- Deutlich geringere Belastungen als im ISO-F treten bei den Zyklen DB-GV-2000 sowie bei den Rangierzyklen MTU-Rangieren und EPA-Switch auf. Diese Zyklen weisen hohe Leerlaufanteile, hohe Anteile in der unteren Teillast sowie nahezu keine Volllastanteile auf.

5.4 Emissionsfaktoren der Lastprofile

Die Berechnung der mittleren Emissionsfaktoren für die aufbereiteten Lastprofile erfolgt durch Verknüpfung der Emissionsfaktoren je Lastpunkt (in kg/h) mit den Zeitanteilen der Lastpunkte am Lastprofil. Die Emissionsfaktoren in g/kWh ergeben sich aus den mittleren Emissionsfaktoren dividiert durch die mittlere Leistung des Lastprofils:

$$\text{EFA [kg/h]} = ? (e_{Li} * t_{Li})$$

$$\text{EFA [g/kWh]} = \text{EFA [kg/h]} / P_m * 1000$$

EFA: Emissionsfaktor des Lastprofils

L_i : Lastpunkt i

e_{Li} : Verbrauchs- bzw. Emissionsfaktor in [kg/h] im Lastpunkt L_i

t_{Li} : Zeitanteil in [%] im Lastpunkt L_i

P_m mittlere Leistung des Lastprofils

Die mittlere Leistung des Lastprofils P_m nach dem gleichen Verfahren aus den Zeitanteilen der Lastpunkte und der aktuellen Leistung in den Lastpunkten berechnet.

In den folgenden Abbildungen sind die Emissionsfaktoren in g/h für verschiedene Motoren und die beiden Kennlinien P_mZEV (Abb. 13) und P_oZEV (Abb. 14) grafisch dargestellt.

Abb. 13 Emissionsfaktoren in g/h für verschiedene Motoren - Lastpunkte für die Kennlinie PmZEV (Personenverkehr)

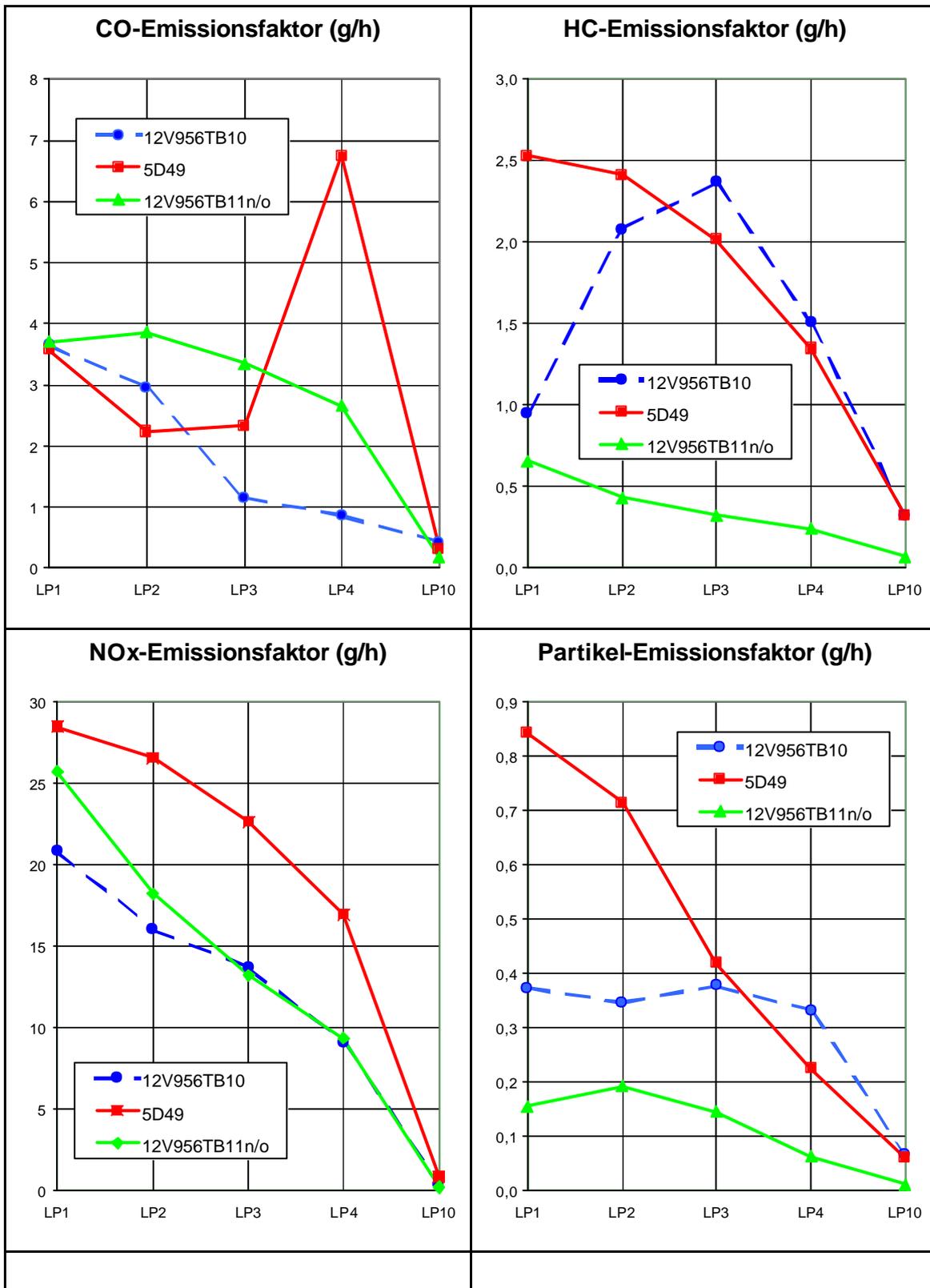
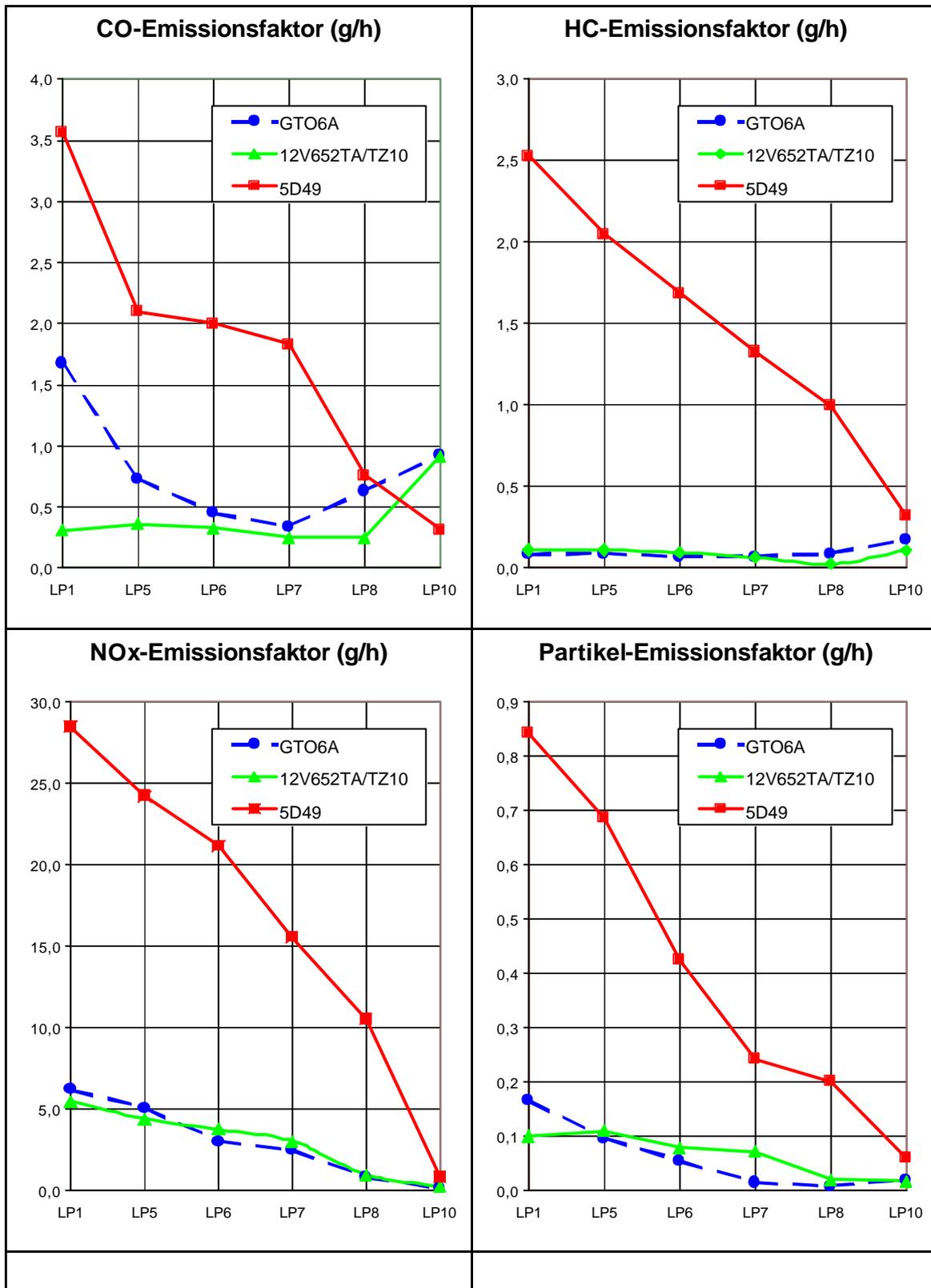
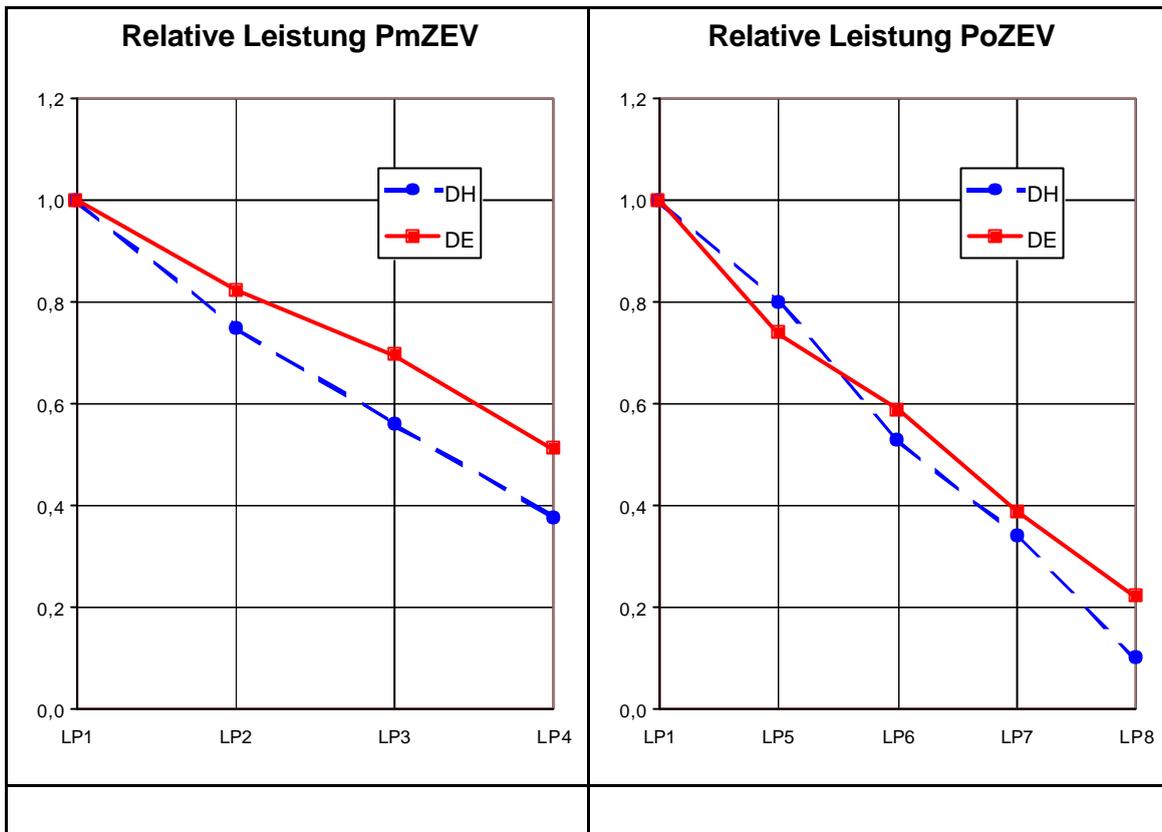


Abb. 14 Emissionsfaktoren in g/h für verschiedene Motoren - Lastpunkte für die Kennlinie PoZEV (Güterverkehr, Rangieren)



In der folgenden Abbildung ist die relative Motorleistung bezogen auf die Nennleistung je Lastpunkt (**Fehler! Ungültiger Eigenverweis auf Textmarke.**) dargestellt.

Abb. 15 Relative Leistungen der Kennlinien PmZEV und PoZEV für diesel-hydraulischen und diesel-elektrischen Antrieb



Die resultierenden Emissionsfaktoren für die Lastprofile sind in Tab. 43 (kg/h) und Tab. 44 (g/kWh) dargestellt. Sie ergeben sich aus den Zeitanteilen je Lastprofil (Tab. 42), den Emissionsfaktoren je Lastpunkt in kg/h (Abb. 13 und Abb. 14), sowie der mittleren Motorleistung (berechnet aus der relativen Leistung je Lastpunkt aus Abb. 15, der Nennleistung des Motors und den Zeitanteilen je Lastpunkt aus Tab. 42).

Tab. 43 Emissionsfaktoren (in kg/h) für verschiedene Leistungsprofile

Motor	Zyklus	P _e (kW)	CO	HC	KV	NO _x	PT
GTO6A	ISO-F	150	1,03	0,14	34	2,1	0,06
GTO6A	MTU-Rangieren	72	0,76	0,14	17	1,0	0,02
GTO6A	EPA-Switch	45	0,81	0,15	12	0,7	0,02
12V652TA/TZ10	ISO-F	244	0,67	0,10	63	2,0	0,05
12V652TA/TZ10	PoZEV DB-GV-2000	166	0,67	0,10	44	1,6	0,04
12V652TA/TZ10	PoZEV EPA-Line-Haul	249	0,59	0,09	64	2,1	0,05
12V652TA/TZ10	PoZEV MTU-Standard	318	0,39	0,07	78	2,4	0,05
12V652TA/TZ10	DB/MTU-Rangieren	115	0,70	0,10	33	1,3	0,04
12V652TA/TZ10	EPA-Switch	68	0,70	0,09	23	0,9	0,03
12V956TB10	ISO-F	545	1,33	0,63	127	6,4	0,19
12V956TB10	PmZEV DB-PV-1994	615	1,35	0,94	140	7,7	0,21
12V956TB10	PmZEV MTU-Standard	711	1,62	0,95	161	8,6	0,22
5D49	ISO-F	668	1,29	1,18	159	9,8	0,37
5D49	PmZEV DR-IC-1992	1.114	2,86	1,48	251	16,1	0,36
5D49	PmZEV DSB-PV-1999	725	2,06	1,04	171	10,3	0,28
5D49	PmZEV MTU-Standard	869	1,89	1,23	198	12,6	0,33
5D49	PoZEV DSB-GV-1999	748	1,36	1,13	176	11,8	0,30
5D49	PoZEV EPA-Line-Haul	679	1,27	1,04	161	10,3	0,29
5D49	PoZEV MTU-Standard	867	1,41	1,25	200	13,0	0,37
5D49	MTU-Rangieren	314	0,76	0,68	80	6,1	0,14
5D49	EPA-Switch	183	0,55	0,54	51	4,0	0,11
12V956TB11n/o	ISO-F	621	1,16	0,26	136	7,7	0,06
12V956TB11n/o	PmZEV DB-PV-1994	701	1,74	0,25	151	8,6	0,07
12V956TB11n/o	PmZEV MTU-Standard	810	1,92	0,28	173	10,0	0,08
12V956TB11n/o	PmZEV DB-PV-2000	623	1,62	0,23	135	7,6	0,07
12V956TB11n/o	PmZEV DB PV2000 bergauf	933	2,21	0,31	198	11,4	0,09
12V956TB11n/o	PmMZEV DB PV2000 bergab	291	0,91	0,14	68	3,7	0,04

Tab. 44 Emissionsfaktoren (in g/kWh) für verschiedene Leistungsprofile

Motor	Zyklus	P _e (kW)	CO	HC	KV	NOx	PT
GTO6A	ISO-F	150	6,9	0,92	225	13,7	0,39
GTO6A	MTU-Rangieren	72	10,5	1,96	234	14,5	0,35
GTO6A	EPA-Switch	45	18,1	3,26	261	15,4	0,47
12V652TA/TZ10	ISO-F	244	2,7	0,42	260	8,2	0,19
12V652TA/TZ10	PoZEV DB GV 2000	166	4,1	0,59	265	9,5	0,26
12V652TA/TZ10	PoZEV EPA Line Haul	249	2,4	0,37	255	8,2	0,19
12V652TA/TZ10	PoZEV MTU Standard	318	1,2	0,22	244	7,7	0,17
12V652TA/TZ10	MTU-Rangieren	115	6,0	0,83	284	11,2	0,32
12V652TA/TZ10	EPA-Switch	68	10,4	1,30	340	12,7	0,39
12V956TB10	ISO-F	545	2,4	1,16	233	11,8	0,34
12V956TB10	PmZEV DB-PV-1994	615	2,2	1,53	228	12,5	0,34
12V956TB10	PmZEV MTU Standard	711	2,3	1,34	226	12,1	0,30
5D49	ISO-F	668	1,9	1,77	238	14,6	0,56
5D49	PmZEV DR-IC-1992	1.114	2,6	1,33	225	14,5	0,33
5D49	PmZEV DSB-PV-1999	725	2,8	1,44	236	14,3	0,38
5D49	PmZEV MTU-Standard	869	2,2	1,42	228	14,5	0,38
5D49	PoZEV DSB-GV-1999	748	1,8	1,51	235	15,8	0,40
5D49	PoZEV EPA-Line Haul	679	1,9	1,53	237	15,2	0,42
5D49	PoZEV MTU-Standard	867	1,6	1,44	230	15,0	0,43
5D49	MTU-Rangieren	314	2,4	2,17	256	19,4	0,45
5D49	EPA-Switch	183	3,0	2,94	279	21,8	0,61
12V956TB11n/o	ISO-F	621	1,9	0,42	219	12,4	0,10
12V956TB11n/o	PoZEV DB-PV-1994	701	2,5	0,36	216	12,3	0,11
12V956TB11n/o	PmZEV MTU-Standard	810	2,4	0,34	214	12,3	0,10
12V956TB11n/o	PmZEV DB-PV-2000	623	2,6	0,36	217	12,3	0,11
12V956TB11n/o	PmZEV DB PV2000 bergauf	933	2,4	0,33	212	12,2	0,10
12V956TB11n/o	PmZEV DB PV2000 bergab	291	3,1	0,48	235	12,6	0,13

5.5 Ableitung mittlerer Emissionsfaktoren für die Emissionsberechnung

5.5.1 Prinzipielles Vorgehen

Die Emissionsfaktoren für den Betrieb von Diesellokomotiven liegen in der Einheit g/h bzw. g/kWh für einzelne Lastpunkte (für die im Rahmen dieses Vorhabens untersuchten Motoren) bzw. für einen bestimmten Zyklus oder ein Lastprofil vor. Theoretisch lassen sich somit der gesamte Energieverbrauch bzw. die Emissionen des Schienenverkehrs mit Dieselfahrzeugen (z.B. für ein Jahr) berechnen, indem für alle Motoren die Betriebsdauer (h) je Lastpunkt ermittelt, mit den jeweiligen Emissionsfaktoren (in g/h) verknüpft und zum Gesamtergebnis (g Emissionen pro Jahr) aufsummiert werden.

In der Praxis scheitert dieses Verfahren an der derzeitigen Datenlage und am Aufwand, den es bedeuten würde, die Datenlage zu verbessern:

- Aus dem Realbetrieb liegen nur sehr wenige Lastprofile vor, die zum einen statistisch nicht repräsentativ, zum anderen in ihrer Differenzierung nach Lastpunkten z.T. zu grob sind um eine verlässliche Hochrechnung zu erlauben.
- Differenzierte Emissionsfaktoren nach Lastpunkten liegen nur für die Motoren vor, die im Rahmen dieses Vorhabens untersucht wurden. Für die übrigen Motoren liegen nur mehr oder weniger zuverlässige Werte, in der Regel Mittelwerte für den ISO-F-Zyklus, vor. Andere Lastprofile als den ISO-F-Zyklus lassen sich für diese

Motoren somit nicht zugrunde legen.

Aus diesem Grunde wählen wir für die Berechnung folgendes Verfahren:

- Zugrunde gelegt werden die Emissionsfaktoren in g/kWh je Motor für ein repräsentatives Lastprofil
- Die Emissionsfaktoren werden für ein bestimmtes Einsatzprofil (z.B. eine bestimmte Baureihe oder Betriebsartgruppe im Einsatz vor einer bestimmten Zuggattung bzw. im Rangierbetrieb bei gleichem Lastprofil) - entsprechend ihrem Anteil an der jeweiligen Betriebsleistung gewichtet - aggregiert.
- Für die Emissionsberechnung des Betriebs eines bestimmten Einsatzprofils in einer Zeitperiode muss der Energieverbrauch des Einsatzprofils in der betrachteten Zeitperiode bekannt sein. Dann lassen sich die Emissionen in zwei Schritten berechnen:

$$(1) \quad \text{EFA [g/g Kraftstoff]} = \text{EFA [g/kWh]} / \text{EV}_{\text{spez}} [\text{g/kWh}]$$

$$(2) \quad \text{Emission [g/Zeitperiode]} = \text{KV [g/Zeitperiode]} * \text{EFA [g/g Kraftstoff]}$$

EFA: mittlerer Emissionsfaktor für ein Einsatzprofil

EV_{spez}: mittlerer Energieverbrauch für ein Einsatzprofil

KV: Kraftstoffverbrauch

Für die Basisberechnung verwenden wir als repräsentatives Lastprofil den ISO-F-Zyklus für alle Betriebszustände, da nur für den ISO-F-Zyklus Emissionsfaktoren für alle Motoren vorliegen. Für die Aggregation und Gewichtung der Emissionsfaktoren verwenden wir, wenn möglich, die Betriebsleistung in Leistungstonnenkilometern. Damit wird unterstellt, dass jeder Motor in einem bestimmten Einsatzprofil pro Leistungstonnenkilometer auf den Motor bezogen die gleiche Arbeit (kWh) verrichtet.

5.5.2 Konkrete Ableitung für die DB AG 1994-2002

Für die Emissionsberechnung des Schienenverkehrs der DB wurden verschiedene Statistiken der DB AG für die Jahre 1994-2002 zu Beständen, Betriebsleistungen und Energieverbrauch aufbereitet /DB 2003a, b, c/. Dabei stellte sich heraus, dass eine sinnvolle Differenzierung nach den drei Zugarten Personennahverkehr, Personenfernverkehr und Güterverkehr möglich ist. Unterschieden werden kann außerdem nach den Leistungsarten „Zugleistungen“ und „Rangierleistungen“.

Die vorliegenden Statistiken wurden vom Bahn-Umwelt-Zentrum aufbereitet und dem IFEU für die Emissionsberechnung im Rahmen dieses Vorhabens zur Verfügung gestellt. Dabei handelt es sich um folgende Daten:

- Mittlere Emissionsfaktoren aller Bahnmotoren im ISO-F-Zyklus (in g/kWh)
- Fahrzeugbestände differenziert nach Baureihen und Motoren
- Betriebsleistungen (Zug-Kilometer und/oder Leistungstonnenkilometer) je Baureihe und/oder Betriebsartgruppe, Zugart und Leistungsart je Bezugsjahr
- Dieselkraftstoffverbrauch je Zugart, Leistungsart und Bezugsjahr.

Ziel der nachfolgend beschriebenen Aufbereitung der Daten war es, mittlere Emissionsfaktoren je Bezugsjahr für jede Zugart und Leistungsart zu bestimmen um sie zur Berechnung der gesamten Emissionen mit dem Dieselkraftstoffverbrauch zu verknüpfen. Das Verfahren lehnt sich an die bisherige TREMOD-Methode an, wurde jedoch etwas modifiziert.

Mittlere Emissionsfaktoren je Baureihe

Bei Baureihen, die mit einem Motortyp ausgestattet sind, liegen die mittleren Emissionsfaktoren (ISO F-Zyklus, in g/kWh) direkt vor. Bei Baureihen mit verschiedenen Motortypen wird zunächst ein mittlerer Emissionsfaktor je Baureihe aufgrund der Bestandszahlen bestimmt. Damit wird angenommen, dass die Baureihen - unabhängig von ihrer Motorenausstattung - im Jahresdurchschnitt in gleicher Häufigkeit und zu den gleichen Zwecken eingesetzt werden. Der Anteil der Motoren je Baureihe im Bestand entspricht somit auch den Anteilen der Motoren an der Laufleistung und den Leistungstonnen-km der gesamten Baureihe.

Mittlere Emissionsfaktoren je Zugart und Leistungsart

Für die Jahre 1994-1999 ließen sich die Laufleistungen je Baureihe, Zugart und Leistungsart ermitteln. Die Leistungstonnenkilometer liegen für diese Periode differenziert nach Betriebsartgruppen vor. Für die Jahre ab 2000 lassen sich die Leistungstonnenkilometer differenziert nach Baureihe, Zugart und Leistungsart ableiten. Aufgrund der statistischen Situation wählen wir für die Jahre 1994 bis 1999 ein zweistufiges Gewichtungsverfahren:

- Zunächst je Betriebsartgruppe, Zugart und Leistungsart eine Gewichtung der Emissionsfaktoren je Baureihe nach Streckenkilometern,
- anschließend je Zugart und Leistungsart eine Gewichtung der Emissionsfaktoren je Betriebsartgruppe nach Leistungstonnenkilometern.
- Für die Jahre 2000-2002 erfolgt die Gewichtung je Zugart und Leistungsart direkt über den Anteil der Baureihen an den Leistungstonnenkilometern.

Die so berechneten Betriebsleistungen sind in Kapitel 4.1.2.1, Tab. 11 bis Tab. 15 dargestellt.

Die Emissionsberechnung erfolgt nun direkt durch Verknüpfung der gewichteten Emissionsfaktoren und dem spezifischen Energieverbrauch je Zugart und Leistungsart (in g/kWh) mit dem gesamten Kraftstoffverbrauch der Zugart und Leistungsart je Bezugsjahr. Das Verfahren wird am Beispiel der Emissionsberechnung für 2001 (Güterverkehr, Zugbetrieb) in folgender Tabelle dargestellt.

Tab. 45 Berechnungsbeispiel: NO_x-Emissionen des Güterverkehrs (Zugbetrieb) der DB AG im Jahr 2001

Berechnung der mittleren Emissionsfaktoren je Zugart und Leistungsart (Beispiel für Güterverkehr, Zugbetrieb 2001)						
BAGruppe	Motor	Mio. Ltkm	Anteil Ltkm	NO _x (g/kWh)	KV (g/KWh)	NO _x (g/kg)
Spalten-Nr		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Kleinlok	12KVD-S-3	7	0,04%	15,9	236	
Kleinlok	3412EDI-TA	7	0,04%	8,4	205	
Kleinlok	GTO6A	28	0,18%	13,7	225	
Kleinlok	RHS518A	0	0,00%	9,2	225	
Rangierlok(BA2)	12KVD21AL-4	47	0,30%	6,1	228	
Rangierlok(BA2)	12V652TA/TZ10	375	2,39%	8,2	260	
Rangierlok(BA2)	8M282AKB	148	0,94%	13,5	211	
Streckenlok(BA2)	12KVD21AL-4	0	0,00%	6,1	228	
Streckenlok(BA2)	12KVD21AL-5	57	0,36%	8,5	229	
Streckenlok(BA2)	12V652TA/TZ10	353	2,25%	8,2	260	
Streckenlok(BA2)	12V956TB10	83	0,53%	11,8	233	
Streckenlok(BA2)	12V956TB11alt	16	0,10%	15,8	231	
Streckenlok(BA2)	12V956TB11n/o	311	1,98%	12,4	219	
Streckenlok(BA2)	16PA4V200	15	0,10%	11,0	221	
Streckenlok(BA2)	16V652TB10	1.595	10,16%	8,5	238	
Streckenlok(BA2)	2-1249M	545	3,47%	11,7	206	
Streckenlok(BA2)	5D49	12.114	77,15%	14,6	238	
Ergebnis	Summe Gewichteter Wert	15.701	100,0%	13,5	237	56,8
Berechnung		Summe (1)	Summe (2)	Summe [(2) * (3)]	Summe [(2) * (4)]	Ergebnis (3) / Ergebnis (4) * 1000
Berechnung der Emissionen je Zugart und Leistungsart						
Energieverbrauch 2001		Emissionsfaktor NO _x (aus (5))			NO _x -Emissionen 2001	
84032 t		56,8 g/kg			4.770 t/a	

5.6 Szenarienannahmen

Die folgenden Tabellen dokumentieren die in der aktuellen Berechnung angenommenen Anteile der Motoren an der Betriebsleistung. Die Werte resultieren aus einer ersten IFEU-Abschätzung aufgrund der vorliegenden Informationen (siehe Kapitel 4.4.1)

Tab. 46 Annahmen für die Entwicklung der Betriebsleistungen je Motor (Anteil an den Leistungstonnenkilometern) - Dieseltriebwagen 2003-2020

Dieseltriebwagen, Zugfahrt, Personennahverkehr									
	2002	2003	2005	2006	2008	2010	2013	2015	2020
12V183TD13	14%	14%	14%	14%	10%	3%	0%	0%	0%
6R183TD13H	29%	30%	30%	30%	30%	30%	27%	25%	20%
QSK19R	15%	20%	20%	20%	20%	20%	19%	17%	12%
12V183TD12	21%	20%	20%	20%	18%	16%	13%	11%	6%
Sonstige	21%	16%	16%	12%	7%	5%	2%	0%	0%
EU Stufe III A <560kW	0%	0%	0%	4%	15%	26%	39%	47%	62%
Gesamt	100%								
Dieseltriebwagen, Zugfahrt, Personenfernverkehr									
	2002	2003	2005	2006	2008	2010	2013	2015	2020
QSK19R	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
EU Stufe III A <560kW	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Gesamt	100%								
Anmerkungen; 2002 = letzte verfügbare DB-Statistik, ab 2003 IFEU-Schätzung									

Tab. 47 Annahmen für die Entwicklung der Betriebsleistungen je Motor (Anteil an den Leistungstonnenkilometern) - Streckenlok (BA2) 2003-2020

Streckenlok, Zugfahrt, Personennahverkehr									
	2002	2003	2005	2006	2008	2010	2013	2015	2020
12V956TB10	15%	14%	10%	8%	2%	0%	0%	0%	0%
12KVD21AL-5	7%	3%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
5D49	6%	5%	3%	2%	0%	0%	0%	0%	0%
12V956TB11n/o	52%	55%	55%	50%	50%	50%	50%	40%	15%
16V4000R40	11%	15%	22%	25%	25%	25%	25%	25%	25%
3516BDI-TA	1%	5%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%
Sonstige	9%	3%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
EU Stufe III A>560kW	0%	0%	0%	5%	13%	15%	15%	25%	50%
Gesamt	100%								
Streckenlok, Zugfahrt, Personenfernverkehr									
	2002	2003	2005	2006	2008	2010	2013	2015	2020
12V956TB10	14%	12%	8%	6%	2%	0%	0%	0%	0%
5D49	20%	19%	10%	5%	0%	0%	0%	0%	0%
12V956TB11n/o	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	40%	15%
16V4000R40	10%	14%	22%	25%	25%	25%	25%	25%	25%
3516BDI-TA	1%	5%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%
Sonstige	5%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
EU Stufe III A>560kW	0%	0%	0%	4%	13%	15%	15%	25%	50%
Gesamt	100%								
Streckenlok, Zugfahrt, Güterverkehr									
	2002	2003	2005	2006	2008	2010	2013	2015	2020
5D49	79%	71%	50%	43%	35%	25%	10%	0%	0%
16V652TB10	12%	9%	5%	3%	0%	0%	0%	0%	0%
2-1249M	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%
3516BDI-TA	0%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%
12D49	0%	10%	35%	35%	35%	35%	35%	35%	35%
Sonstige	4%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
EU Stufe III A>560kW	0%	0%	0%	9%	20%	30%	45%	55%	55%
Gesamt	100%								
Streckenlok, Rangieren, Güterverkehr									
	2002	2003	2005	2006	2008	2010	2013	2015	2020
5D49	66%	60%	45%	43%	35%	25%	10%	0%	0%
12V956TB11n/o	7%	8%	10%	8%	8%	6%	0%	0%	0%
16V652TB10	13%	13%	5%	3%	0%	0%	0%	0%	0%
12D49	0%	11%	35%	35%	35%	35%	35%	35%	35%
3516BDI-TA	0%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%
Sonstige	14%	3%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
EU Stufe III A>560kW	0%	0%	0%	6%	17%	29%	50%	60%	60%
Gesamt	100%								
Anmerkungen; 2002 = letzte verfügbare DB-Statistik, ab 2003 IFEU-Schätzung									

Tab. 48 Annahmen für die Entwicklung der Betriebsleistungen je Motor (Anteil an den Leistungstonnenkilometern) - Rangierlok (BA2+3) 2003-2020

Rangierlok, Zugfahrt, Güterverkehr									
	2002	2003	2005	2006	2008	2010	2013	2015	2020
12V652TA/TZ10	66%	58%	51%	45%	35%	25%	10%	0%	0%
8M282AKB	22%	22%	18%	16%	12%	8%	2%	0%	0%
12KVD21AL-4	5%	4%	2%	1%	0%	0%	0%	0%	0%
8 V4000R41	7%	16%	25%	30%	40%	45%	45%	45%	40%
Eu Stufe III A>560kW	0%	0%	4%	8%	13%	22%	43%	55%	60%
Gesamt	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Rangierlok, Rangieren, Güterveker									
	2002	2003	2005	2006	2008	2010	2013	2015	2020
12V652TA/TZ10	64%	58%	51%	45%	35%	25%	10%	0%	0%
8M282AKB	18%	17%	18%	16%	12%	8%	2%	0%	0%
12KVD21AL-4	13%	10%	6%	3%	0%	0%	0%	0%	0%
8 V4000R41	5%	15%	25%	30%	40%	45%	45%	45%	40%
EU Stufe III A>560kW	0%	0%	0%	6%	13%	22%	43%	55%	60%
Gesamt	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Kleinlok, Rangieren, Güterverkehr									
	2002	2003	2005	2006	2008	2010	2013	2015	2020
GTO6A	43%	45%	36%	34%	25%	5%	0%	0%	0%
3412EDI-TA	27%	30%	45%	50%	50%	50%	47%	45%	40%
12KVD-S-3	16%	13%	9%	7%	3%	0%	0%	0%	0%
RHS518A	13%	12%	10%	9%	7%	5%	2%	0%	0%
EU Stufe III A<560kW	0%	0%	0%	0%	15%	40%	51%	55%	60%
Gesamt	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Anmerkungen; 2002 = letzte verfügbare DB-Statistik, ab 2003 IFEU-Schätzung									

6 Begriffe und Abkürzungen

Begriff	Abkürzung	Beschreibung
Baureihe	BR	Baureihe entsprechend der Bezeichnung der DB AG
Betriebsart	BA	Betriebsarten nach Angrenzung der DB AG; bei der Dieseltraktion werden folgende Betriebsarten unterschieden: BA2: schwere Lokomotive BA3: Kleinlok BA6: Dieseltriebwagen BA7: Schienenomnibus
Betriebsartgruppe	BAG	Unterteilung der -> Betriebsart in der DB-Statistik: BA2 wird weiter unterteilt nach Streckenlok und Rangierlok; sonst wie -> Betriebsarten
Betriebsleistung	BL Tfz-km Zug-km Ltkm Btkm	Es werden folgende Betriebsleistungsarten verwendet: Laufleistung : Fahrleistung der Triebfahrzeuge Zugkilometer oder Streckenkilometer : Fahrleistungen der Züge Leistungstonnenkilometer : Gesamte bewegte Zugmasse incl. Lokomotiven Bruttotonnenkilometer : gesamte bewegte Zugmasse ohne Lokomotive
Bruttotonnenkilometer	Btkm	Siehe Betriebsleistung
Diesel-elektrisch	DE	Kraftübertragung diesel-elektrisch
Diesel-hydraulisch	DH	Kraftübertragung diesel-hydraulisch
Drehzahl	N	
Einsatzprofil		Beschreibt in dieser Untersuchung eine Kombination von Baureihe oder Betriebsart, Zugart und Leistungsart mit identischen Lastprofil
Kennlinie mit ZEV	PmZEV	Leistungskennlinie mit Zugenergieversorgung; hier verwendet für Lastprofile im Personenverkehr
Kennlinie ohne ZEV	PoZEV	Leistungskennlinie ohne Zugenergieversorgung; hier verwendet für Lastprofile im Güterverkehr und für Rangiervorgänge
Kohlenmonoxid	CO	
Kohlenwasserstoffe	HC	
Kraftstoffverbrauch	KV	
Laufleistung	Tfz-km	Siehe Betriebsleistung
Leistung, effektiv	P_e	
Leistungsart	LA	Art des Einsatzes: In dieser Untersuchung wird unterschieden nach Zugbetrieb und Rangieren
Leistungsprofil		Beschreibt in dieser Untersuchung eine Kombination von Motor, Baureihe, Einsatzbereich und Lastprofil
Leistungstonnenkilometer	Ltkm	Siehe Betriebsleistung
Nennleistung	P_{en}	
Partikel	PT	
Stickstoffoxide	NOx	
Zugart	ZA	Zugarten: Personennahverkehr, Personenfernverkehr, Güterverkehr
Zugkilometer	Zug-km	Siehe Betriebsleistung

7 Literatur

- /ARTEMIS/ Assessment and Reliability of Transport Emission Models and Inventory Systems; see <http://www.trl.co.uk/artemis/introduction.htm>
- /Bendel 1994a/ Helmut Bendel: Die elektrische Lokomotive – Aufbau, Funktion, neue Technik, Berlin 1994
- /BMVBW 2001/ Arbeitsgemeinschaft BVU, ifo, ITP, Planco, Prognos: Verkehrsprognose 2015 für die Bundesverkehrswegeplanung; im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen; München/Freiburg/Essen April 2001
- /Bahntech 2003a/ „Neues Rollenspiel“ und „Ende der Diesellokvielfalt“ in: Bahntech 1/2003 – Das Technikmagazin der Deutschen Bahn AG
- /DB 1981a/ Herrmann, E. (BZA München): Kraftstoffeinsparung bei Diesellanglokomotiven - Einfluß der Kraftübertragungsart; in: Eisenbahningenieur 32 (1981) 7
- /DB 1985a/ BZA München, 01.10.85: Schadstoffemissionen der Dieselmotoren in Brennkrafttriebfahrzeugen der DB
- /DB 1989a/ Hahn, J. (BZA München): Schadstoffmindernde Maßnahmen an den Dieselmotoren von Schienenfahrzeugen; in: ETR 38 (1989) Heft 6
- /DB 1999a/ DB AG: Emissionsfaktoren im Schienenverkehr mit Dieseltriebfahrzeugen - Dokumentation der DB AG von Emissionsfaktoren im Schienenverkehr zur Verwendung in Rechenmodellen; internes Arbeitspapier im Rahmen des Kooperationsabkommens zu TREMOD
- /DB 2000a/ Hoerl, F., Klimmer, C. (DB AG, Research and Technology Center): Examples for the Improvement of the Quality of the Exhaust Emissions of Diesel Traction Vehicles
- /DB 2000b/ Verschiedene Informationen zu Lastkollektiven (1982-1992), Kraftstoffspezifikation, u.a.
- /DB 2003a/ DB AG: Interne Motordatenbank des Bahn-Umwelt-Zentrum: Angaben über Bau-reihen, Motoren und Emissionsfaktoren im ISO-F-Zyklus; aktuelle Version vom Februar 2003
- /DB 2003b/ Verschiedene interne Statistiken der DB AG
- /DB Themendienst 2003a/ DB Themendienst, Pressemitteilung vom April 2003: Europas sauberste Diesellok - Investition in die Zukunft
- /DR 1969a/ Greifenberg, G.: Die Belastungshäufigkeit der Diesellokomotiven im Betriebseinsatz bei der Deutschen Reichsbahn; in: Schienenfahrzeuge 2/1969
- /DSB 2000a/ DSB: Datenblätter zu Lastprofilen für verschiedene Zugfahrten im Personenverkehr (Railcar und Lokomotive) und Güterverkehr, 2000
- /EM 2002a/ Tietze, C.: 232 plus 1 gleich 233 - Die „Ludmilla aus Reichsbahn-Zeiten fährt mit neuem Herz; in: eisenbahn-magazin 10/2002
- /EM 2002b/ Neue, alte 218; in: eisenbahn magazin 11/2002
- /EPA 2003a/ U.S. Environmental Protection Agency: Draft Regulatory Impact Analysis: Control of Emissions from Nonroad Diesel Engines; EPA420-R-03-008; April 2003
- /EPA 1998a/ Environmental Protection Agency (EPA): Emissions Standards for Locomotives and Locomotive Engines; Final Rule; Federal Register / Vol. 63, No 73 / Thursday, April 16, 1998 / Rules and Regulations
- /EU 2003a/ Rat der Europäischen Union: Billigung eines Kompromisspakets im Hinblick auf eine Einigung in erster Lesung über den Vorschlag für eine Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates zur Änderung der Richtlinie 97/68/EWG zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedsstaaten über Maßnahmen zur Bekämpfung der Emission von gasförmigen Schadstoffen und luftverunreinigenden Partikeln aus Verbrennungsmotoren für mobile Maschinen und Geräte; 13412/03; Brüssel, den 10. Oktober 2003

- /Euromot 2000a/ Schreiner, K. et al. Consideration on Exhaust Emission Optimisation of Diesel Engines for Rail Traction; Railway Energy Efficiency Conference International Union of Railways (UIC) 10/11 May 2000, Paris
- /EWS 1998a/ Martin Nicholson (English Welsh & Scottish Railway): Diesel Engine Exhaust Emissions, Nottingham, Dec. 1998
- /Feihl 1982a/ Feil, J., Hochschule für Verkehrswesen „Friedrich List“ Dresden: Optimierung der Auslegung von Kraftübertragungsanlagen für Rangierlokomotiven; in: DET - Die Eisenbahntechnik 30 (1982) 1
- /Feihl 1997a/: Johannes Feihl: Die Diesellokomotive - Aufbau, Technik, Auslegung, Stuttgart 1997
- /Gutmann 2001a/: Kurt Gutmann, Bernhard Schwab: Lastprofil im Regelbetrieb, Triebfahrzeug BR 218 der DB AG; Bericht zur Messung am 29.11.2000, Umlauf München – Oberstdorf – Lindau, Oktober 2001
- /Herrmann 1981a/: Elias Herrmann: Kraftstoffeinsparung bei Dieselerlokomotiven, in Eisenbahningenieur 32 (1981) 7
- /IFEU 2002a/ Knörr, W: et al., IFEU: Aktualisierung des „Daten- und Rechenmodells“: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1980-2020; Softwaretool TREMOD (Transport Emission estimation Model), Version 3.0; im Auftrag des Umweltbundesamtes, UFOPLAN Nr. 201 45 112; Heidelberg, Oktober 2002
- /IFEU 2004a/ Aktualisierung des TREMOD-Modells; in Vorbereitung; Abschluss 2004
- /Kirbach 1977a/, Kirbach, H., Hochschule für Verkehrswesen „Friedrich List“ Dresden: Fahrstufen- und Leistungsuntersuchungen an Strecken-Diesellokomotiven der DR; in: Schienenfahrzeuge 9/1977
- /MTU 1996a/ Schmidt, R.-M. (MTU): Emissionsoptimierung an MTU-Motoren der Deutschen Bahn AG; in: ETR 45(1996) Heft 1-2
- /MTU 1998a/ Günther, C. (MTU): Dieselantriebstechnik für den Schienenpersonennahverkehr - Potential und Tendenzen; Vortrag bei der Jahrestagung der Deutschen Maschinentechnischen Gesellschaft (DMG) am 10. Oktober 1997 in Kiel; in: ZEV + DET Glas. Ann. 122 (1998) Nr. 1
- /MTU 2000a/ Persönliche Mitteilung zu Lastprofilen und Emissionen für BR 4000 im ISO-F-Zyklus, Herr Geiselman, 19.06.00
- /RWTÜV 1993/ Heine, P. et al., RWTÜV: Ermittlung des Abgasemissionsverhaltens von Nutzfahrzeugen mit Dieselmotor über 3,5 t zul. Gesamtgewicht im Bezugsjahr 1986; im Auftrag des TÜV Rheinland; Entwurf Februar 1993
- /Siemens 2000a/: Lastkollektiv der Lok Nr. 05 der Mannesmann AG Hüttenwerke
- /TÜV Rheinland 1994/ Hassel, Deutschland. et al., TÜV Rheinland: Abgas-Emissionsfaktoren von Nutzfahrzeugen in der Bundesrepublik Deutschland - Abgasemissionsfaktoren von Dieselmotoren bis Baujahr 1990; im Auftrag des Umweltbundesamtes; 1995
- /UBA 2001a/ Mönch, L. (Umweltbundesamt): Schadstoffemissionen von Lokomotiven, Triebwagen und Rangierlokomotiven mit Dieselmotor; Arbeitspapier, Mai 2001
- /UIC 1999a/ UIC Ad Hoc Group on Limits of Pollutants of New Diesel Engines for Tractive Units; Final Report; 1999
- /WTZ 2002a/ Pittermann, R. (WTZ): Ermittlung von Basisemissionsdaten des dieselpbetriebenen Schienenverkehrs; Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben 299 43 111; im Auftrag des Umweltbundesamtes; Januar 2002