

Schadstoffemissionen und Kraftstoffverbrauch bei kurzzeitiger Motorabschaltung

Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen

Fahrzeugtechnik Heft F 22

bast

Schadstoffemissionen und Kraftstoffverbrauch bei kurzzeitiger Motorabschaltung

von

Bernd Bugsel
Christoph Albus
Wolfgang Sievert

Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen

Fahrzeugtechnik Heft F 22

bast

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

A - Allgemeines
B - Brücken- und Ingenieurbau
F - Fahrzeugtechnik
M- Mensch und Sicherheit
S - Straßenbau
V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, daß die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Referat Öffentlichkeitsarbeit.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt beim Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bgm.-Smidt-Str. 74-76, D-27568 Bremerhaven, Telefon (04 71) 9 45 44 - 0, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in Kurzform im Informationsdienst **BAST-Info** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos abgegeben; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Referat Öffentlichkeitsarbeit.

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt 96510:
Auswirkungen der Motorabschaltung bei zeitweisem Fahrzeugstillstand auf Kraftstoffverbrauch und Schadstoffemissionen

Herausgeber:
Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon (02204) 43 - 0
Telefax (02204) 43 - 674

Redaktion:
Referat Öffentlichkeitsarbeit

Druck und Verlag:
Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Postfach 10 11 10, D-27511 Bremerhaven
Telefon (0471) 9 45 44 - 0
Telefax (0471) 9 45 44 77

ISSN 0943-9307
ISBN 3-89429-995-9

Bergisch Gladbach, Juli 1997

Kurzfassung · Abstract · Résumé

Schadstoffemissionen und Kraftstoffverbrauch bei kurzzeitiger Motorabschaltung

Um festzustellen, ob bei vorübergehendem Fahrzeugstillstand kurzzeitige Motorabschaltungen gegenüber konstantem Leerlaufbetrieb eine Reduzierung oder aber aufgrund des Startvorganges eine Zunahme der Kraftstoffverbräuche und Schadstoffemissionen zur Folge haben, wurde mit dem Emissions-Meß-Fahrzeug (EMF) der BAST ein entsprechendes Untersuchungsprogramm realisiert. Dabei war auch der Fragestellung nachzugehen, was dem Autofahrer an einer roten Ampel oder einem Bahnübergang (oder den Kommunen bei entsprechender Beschilderung) zu empfehlen ist, das heißt ob der Motor abgeschaltet werden soll oder nicht.

Im ersten Abschnitt des Projektes wurde anhand einzelner Motorstopp-/Startvorgänge untersucht, wie lange der Motor mindestens ausgeschaltet werden muß, damit Einsparungen möglich sind. Es stellte sich heraus, daß die Standzeiten, ab wann aus der vorübergehenden Motorabschaltung Vorteile für die Umwelt entstehen, für die verschiedenen Abgaskomponenten sehr weit auseinander liegen: bei Kraftstoffverbrauch und Stickoxidemissionen etwa ab zehn Sekunden, bei Kohlenwasserstoff- und Kohlenmonoxid-Emissionen erst ab etwa fünf Minuten.

Im zweiten Projektabschnitt wurden Meßfahrten im Straßenverkehr durchgeführt, die einen definierten, 20 Sekunden dauernden Fahrzeugstillstand in Form einer Ampelstopp-Simulation beinhalteten. Mit diesem realitätsnahen Versuchskonzept sollten die Ergebnisse aus den Motorstopp-/Startversuchen überprüft werden. Es zeigte sich, daß die unter idealen Bedingungen erarbeiteten Resultate des ersten Abschnitts auch auf reale Verhältnisse angewendet werden können.

Alle Ergebnisse beziehen sich auf das Meßfahrzeug mit warmem Motor. Die Übertragbarkeit auf andere Fahrzeuge – insbesondere solche mit anderen Motor- bzw. Gemischaufbereitungs- und Abgasreinigungskonzepten – ist daher nicht oder nur eingeschränkt zulässig. Die Größenordnungen der Ergebnisse können aber vermutlich auf vergleichbare, mit Katalysator ausgestattete Fahrzeuge übertragen werden.

Pollutant emission and fuel consumption with short-term engine shutoff

In order to establish whether, in the event of temporary vehicle standstill, short-term engine

shutoff causes fuel consumption and pollutant emissions to be reduced or, due to engine starting, increased, a corresponding test programme was completed using the BAST emission measuring vehicle. The question as to what course of action should be recommended to drivers at a red light or level crossing (or to local authorities with regard to the appropriate signposting), i.e. whether the engine should be turned off or not, was also investigated.

In the first stage of the project, individual engine stop/start procedures were examined to find out how long the engine has to be switched off in order to reduce consumption and emissions. It emerged that the minimum stationary periods benefiting the environment as a result of temporary engine shutoff vary considerably for the different exhaust-gas components: above about ten seconds for fuel consumption and nitrogen oxide emissions and only above about five minutes for hydrocarbon and carbon monoxide emissions.

In the second stage of the project, test drives were carried out in road traffic including a defined 20-second vehicle stop in the form of a simulated stop at traffic lights. This realistic test concept was designed to examine the results of the engine start/stop tests. It was revealed that the results from the first stage which were obtained in ideal conditions can also be applied to real situations.

All results were obtained using the measuring vehicle with a warm engine. It is therefore not possible, or only possible to a limited extent, to apply them to other vehicles - especially those with other engine or mixture preparation and emission control concepts. Presumably, however, the scale of the results can be applied to comparable vehicles with catalytic converter.

Pollution atmosphérique et consommation de carburant en cas de court arrêt du moteur

Un programme d'études a été réalisé à partir de mesures prises par le véhicule de mesure d'émissions (VME) de l'Institut fédéral des recherches routières (BAST). Il s'agissait de déterminer si, en cas d'arrêt provisoire du véhicule, couper le moteur pour une courte durée au lieu de le laisser tourner au ralenti permettait de réduire la consommation de carburant ou si, au contraire la phase de redémarrage faisait augmenter la consommation d'énergie et les émissions nocives. Il s'agissait également d'envisager quel conseil donner à l'automobiliste (ou aux communes en ce

qui concerne l'équipement en panneaux correspondants) bloqué à un feu rouge ou un passage à niveau, à savoir s'il devrait couper ou non le moteur de son véhicule.

La première partie du projet d'étude a consisté à déterminer, à partir de l'exemple de quelques arrêts/démarrages de moteur, combien de temps le moteur devait être au minimum coupé pour que des économies soient possibles. Il s'est avéré que les temps d'arrêt, à partir de quand une coupure provisoire du moteur pouvait apporter des avantages pour l'environnement, variaient énormément selon les différents composants des gaz d'échappement. Pour ce qui est de la consommation de carburant et les émissions d'oxyde d'azote, environ dix secondes; pour les émissions d'hydrocarbure et d'oxyde de carbone, seulement à partir de cinq minutes.

Au cours de la deuxième partie du projet, des mesures ont été prises dans la circulation réelle prévoyant un temps d'arrêt du véhicule d'une durée de 20 secondes matérialisé par une simulation d'arrêt à un feu de circulation. Cette conception de tests se rapprochant au maximum de la réalité devait permettre de vérifier les résultats obtenus lors des essais coupure de moteur/démarrage. On a pu constater que les résultats obtenus dans des conditions idéales lors de la première phase pouvaient également s'appliquer à des circonstances réelles.

Tous les résultats se basent sur un véhicule test dont le moteur est chaud. L'application de ces résultats à d'autres véhicules est donc impossible ou seulement partielle - notamment pour des voitures à moteur, composition de mélange et épuration des gaz d'échappement de conception différente. Il est cependant probable que ces résultats peuvent en gros s'appliquer à des véhicules comparables, équipés d'un catalyseur.

Inhalt

1	Einleitung	7
2	Aufgabenstellung	7
3	Angaben in der Literatur	7
4	Ausrüstung des Emissions- meßfahrzeugs	8
5	Versuchsdurchführung und Auswertung von Motorstopp-/ Startvorgängen	9
5.1	Qualitative Betrachtung der Stopp-/Startvorgänge	9
5.1.1	Verlauf des Kraftstoffverbrauchs.....	10
5.1.2	Verlauf der Schadstoffkonzentrationen..	10
5.2	Quantitative Auswertung der Stopp-/ Startversuche	11
5.2.1	Ergebnisse der Kraftstoffverbrauchs- messung.....	12
5.2.2	Ergebnisse der Emissionsmessung/- berechnung	13
6	Meßfahrten mit Simulation eines Ampelstopps	13
6.1	Versuchsziel.....	14
6.2	Versuchsbeschreibung und Auswertung	14
6.3	Ergebnisse der Meßfahrten mit Simulation eines Ampelstopps	15
7	Bemerkungen zum Anlasser- Energiebedarf	18
8	Diskussion der Ergebnisse	18
9	Zusammenfassung	19
10	Literatur	21

1 Einleitung

Durch die Einführung katalytischer Abgasreinigungskonzepte in Form von lambdageregelten 3-Wege-Katalysatoren wurde ein bedeutender Schritt bei der Nachbehandlung von Autoabgasen vollzogen. Gegenüber Fahrzeugen ohne Schadstoffreinigung (nach Schätzung der Bundesregierung, gibt es davon noch etwa 37% /1/) ist in modernen Pkw mit Hilfe der Katalysator-Technologie eine Reduzierung der limitierten Schadstoffkomponenten Kohlenmonoxid, Stickoxide und Kohlenwasserstoffe mit einem Wirkungsgrad von ca. 80 - 90% realisierbar.

Um auch zukünftig den steigenden Anforderungen sich verschärfender Schadstoffgrenzwerte bei den Typzulassungen zu genügen, werden insbesondere verbesserte Konzepte zur Reduzierung der Kaltstartemissionen (Startkatalysatorkonzepte, Katalysatorvorheizung etc.) verstärkt zur Anwendung gelangen /2, 3, 4/. Darüber hinaus ermöglicht der weitere ansteigende Einsatz von Elektroniksystemen durch schnelleres und genaueres Erfassen bzw. Ausregeln von dynamischen Betriebszuständen eine präzisere Gemischbildung mit dem Ziel, die Rohemissionen zu reduzieren /3, 5/. Durch spezielle Elektronik für intermittierenden Motorbetrieb, d.h. Abschaltung des Motors bei Fahrzeugstillstand sowie während der Fahrt, sollen weitere Potentiale zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs erschlossen werden /6/.

Aber nicht nur allein in fahrzeugseitigen Verbesserungen bei Motormanagement und Abgaskonzept, durch Gewichtseinsparung, Antriebsstrangoptimierung usw., sondern gerade auch in der Kundenhand, d.h. im richtigen Umgang mit dem Produkt Auto, liegen beachtliche Potentiale zur Reduzierung von Kraftstoffverbrauch und Schadstoffemissionen.

Dazu zählt auch die Frage, ob der Fahrer bei einem vorübergehenden Fahrzeugstillstand den Motor kurzzeitig abschalten oder besser im Leerlauf belassen sollte.

Wie sich der zeitweise Motorstopp auf den Kraftstoffverbrauch, sowie insbesondere auch auf die Schadstoffemissionen auswirkt, ist so gut wie nicht bekannt.

2 Aufgabenstellung

An Bahnübergängen und Ampeln kann man gelegentlich Hinweisschilder mit der Aufforderung fin-

den, bei geschlossenen Schranken bzw. während der Rot-Phase den Motor abzuschalten. Hinter diesem Appell steckt die Absicht, bei vorübergehendem Fahrzeugstillstand zur Vermeidung von Abgasemissionen und zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs beizutragen.

Unklarheit herrscht allerdings darüber, ab wann sich (im Vergleich zum ununterbrochenen Leerlaufbetrieb) die kurzfristige Motorabschaltung im Hinblick auf die gewünschten Einsparungen überhaupt lohnt, da nach der verbrauchs- und emissionsfreien Stillstandphase zur Weiterführung der Fahrt ein erneuter verbrauchs- und emissionsintensiver Anlaßvorgang des Motors erforderlich wird.

Ziel des Forschungsprojektes ist es daher, Klarheit zu schaffen, ob bei vorübergehenden Fahrzeugstopps bereits kurze Motorstandzeiten im Gegensatz zum ununterbrochenen Motorleerlauf eine Reduzierung oder aber aufgrund der anschließend erforderlichen Anlaßvorgänge einen Anstieg der Kraftstoffverbräuche zur Folge haben. Weiterhin soll der Kenntnisstand über die Auswirkung kurzzeitiger Motorstopps auf das Abgasverhalten verbessert werden.

Eine differenzierte Betrachtung der verschiedenen Schadstoffkomponenten auf der einen Seite und des Kraftstoffverbrauchs auf der anderen Seite ist daher erforderlich, wenn man eine sachgerechte Beurteilung der umweltrelevanten Aspekte dieser Thematik vornehmen möchte.

Die Untersuchungen wurden mit dem Emissionsmeßfahrzeug der BASt durchgeführt. Das Meßsystem wird im nachfolgenden Kapitel 4 beschrieben.

3 Angaben in der Literatur

In der einschlägigen Literatur wird selten oder kaum über die Auswirkungen von kurzzeitigen Motorabschaltungen berichtet und wenn, dann beziehen sich die dort gefundenen Angaben überwiegend auf den Kraftstoffverbrauch /6, 13, 14, 15, 16, 17/. Informationen über das durch die Motorabschaltung und den nachfolgend erforderlichen Wiederanlaßvorgang des Motors verursachte Emissionsverhalten von Kraftfahrzeugen, sind diesen Publikationen jedoch nicht zu entnehmen.

Einer Quelle mit Spartips /16/, die angibt wie der Fahrer mit seinem Fahrzeug umgehen sollte, ist beispielsweise folgendes zu entnehmen: "An Ampeln, Bahnschranken und Staus gilt: Stellen Sie

den Motor immer ab, denn schon ab 20 Sekunden Stillstand beginnen Sie zu sparen." In einer anderen Publikation werden ebenfalls Tips zum Energiesparen aufgezählt /14/. Die dort genannten Zeiten, ab wann es sich lohnt den Motor anzustellen, erreichen sogar 30 bis 40 Sekunden. In einer anderen Veröffentlichung werden für einen Pkw mit einem 55 kW Motor Standzeiten von 5 Sekunden angegeben /13/. Da diese Publikation aus dem Jahre 1981 stammt, ist wahrscheinlich davon auszugehen, daß es sich bei diesem Pkw um ein Fahrzeug ohne Katalysator handelt.

Weiterhin wurde in der Literatur /15/ ein Versuchskonzept vorgestellt, bei dem der Motor unablässig gestartet und direkt wieder abgeschaltet wurde. Selbst bei der denkbar kürzesten d.h. ungünstigsten Stoppdauer des Motors führte das Experiment zu dem Ergebnis, daß gegenüber konstantem Leerlaufbetrieb die Motorabschaltung günstiger sei. Anhand eigener Meßergebnisse konnte nachgewiesen werden, daß die in /15/ formulierte Aussage zwar stimmt, aber von völlig praxisfremden Voraussetzungen ausgeht. Bei diesem Versuchskonzept wird die Anfangsphase der intensiven Benzineinspritzung beim Motorstart (vergl. Abschnitt 5.1, Bild 4) nicht vollständig berücksichtigt. Unmittelbar nach dem Anspringen des Motors wird dieser sofort wieder abgestellt, so daß bei diesen Messungen der Kraftstoffverbrauch im Fall des unablässigen Stopp-/Startbetriebs immer günstiger ist.

4 Ausrüstung des Emissionsmeßfahrzeugs (EMF)

Das Emissionsmeßfahrzeug (EMF), ein Pkw der oberen Mittelklasse mit Ottomotor, 92 kW Leistung, 5-Gang-Handschaltgetriebe und geregelter Katalysator, ist mit einem mobilen Abgas- und Kraftstoffmeßsystem ausgerüstet.

Die in das EMF installierten Gasanalysatoren entnehmen für die Messung der NO_x -, bzw. HC-, CO -, und CO_2 -Abgaskonzentrationen kontinuierlich (Meß)gas aus dem Abgasstrang. Die Entnahmestelle liegt hinter dem Katalysator zwischen Haupt- und Nachschalldämpfer.

Die beiden in das EMF eingebauten Gasanalysegeräte sind:

- 1) NO_x -Analysator Binos 2000 der Fa. Rousemount (Bild 1)
Meßgenauigkeit: kleiner gleich 2% vom Meßbereichsendwert
- 2) Viergastester PGA 9000 der Fa. Sensors Europe (CO , HC, CO_2 , O_2) (Bild 2)
Meßgenauigkeit: HC: 12 ppm oder 5% vom Meßwert
CO: 0,06 Vol.-% oder 5% vom Meßwert
CO₂: 0,5 Vol.-% oder 5% vom Meßwert.

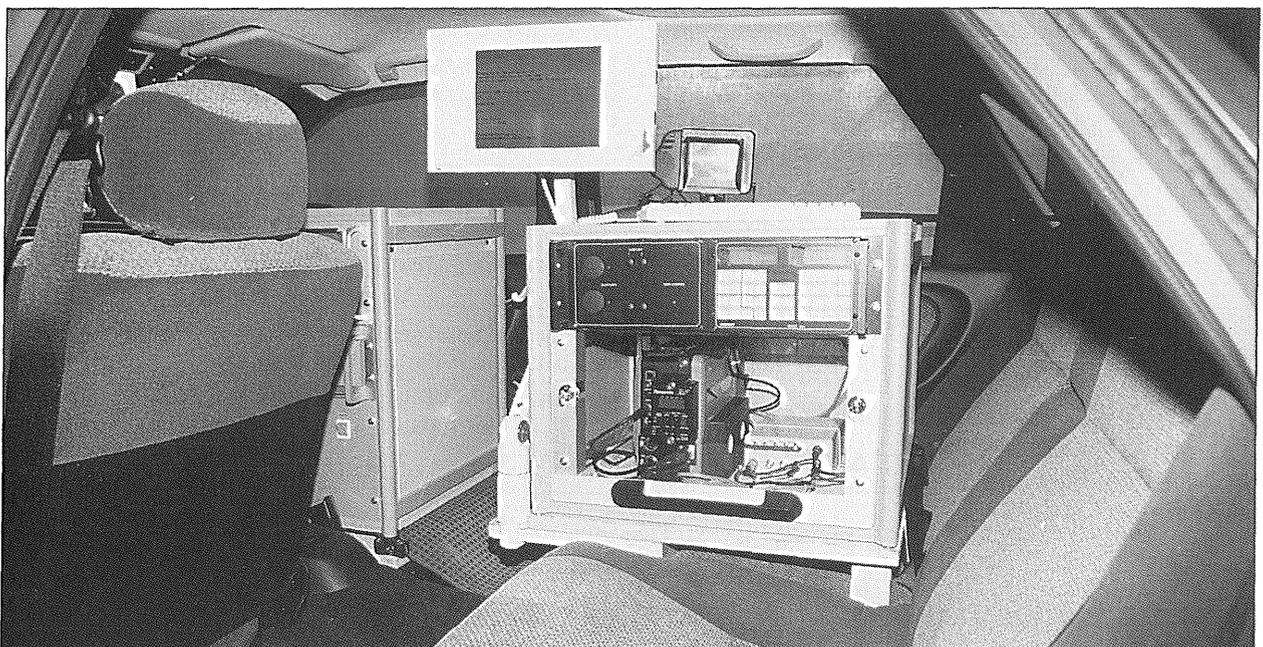


Bild 1: Emissions-Meßfahrzeug (EMF)
Blick auf den NO_x -Analysator und das Datenspeichersystem

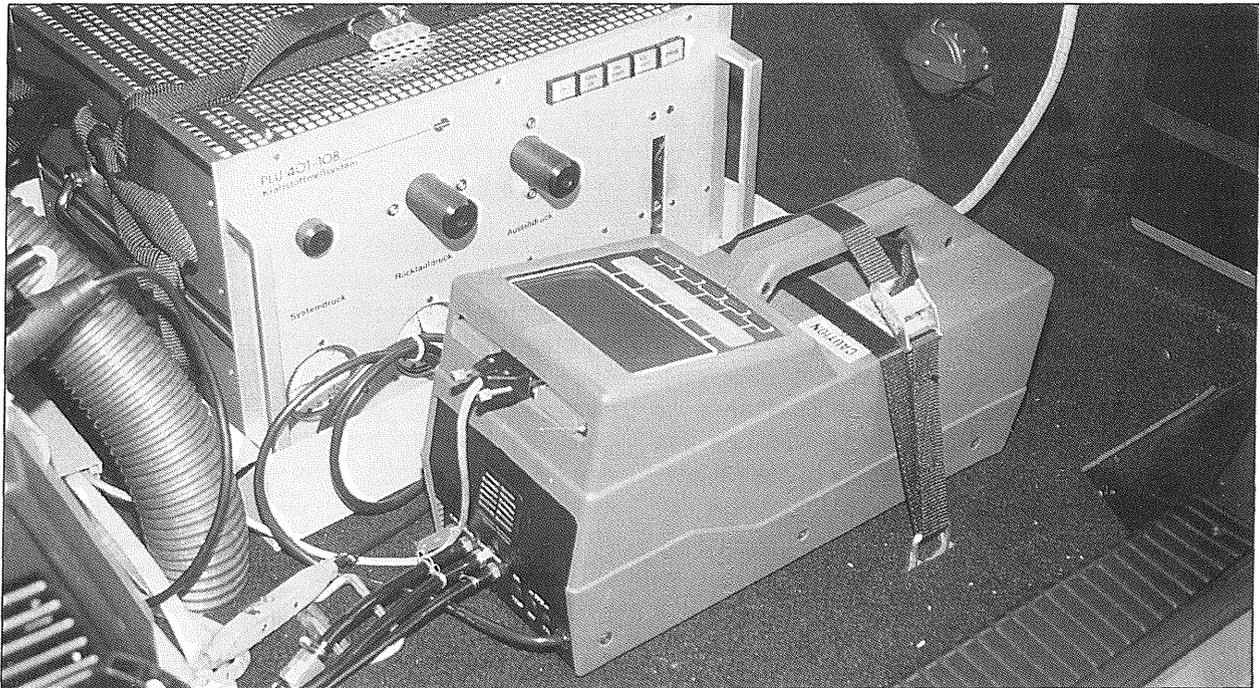


Bild 2: Emissions-Meßfahrzeug (EMF)
Blick auf das Kraftstoffmeßsystem und den 4-Gas Tester (HC, CO, CO₂, O₂)

Neben den Abgaskonzentrationen ist der Kraftstoffverbrauch die bedeutendste Meßgröße. Dieser wird mit dem Kraftstoff-Meßsystem PLU 401/108 der Fa. Pierburg bestimmt. Das auf dem Prinzip der kontinuierlichen volumetrischen Messung beruhende Durchflußmeßgerät (PLU 116) liefert ein dem Durchfluß proportionales Ausgangssignal mit einer auf den Meßwert bezogenen Fehlergrenze von +/- 1%.

Im Hinblick auf die Abgasmessung mit dem EMF ist zu erwähnen, daß die Schadstoff-Massenemissionen, die üblicherweise in der Einheit [g/km] oder [g/Zeiteinheit] angegeben werden, nicht direkt meßbar sind. Lediglich die Volumenkonzentrationen der Abgaskomponenten können unmittelbar analysiert werden. Daraus folgt, daß die Massenemissionen aus den gemessenen Abgaskonzentrationen und dem ebenfalls zu bestimmenden Abgasvolumen berechnet werden müssen [7, 8, 9]. Der Kraftstoffverbrauch wird direkt gemessen.

5 Versuchsdurchführung und Auswertung von Motorstopp-/Startvorgängen

Um die Auswirkung der Motoranlaßvorgänge auf Kraftstoffverbrauch und Schadstoffemissionen zu beurteilen, wurden einzelne Stopp-/Startereignisse

des betriebswarmen Motors analysiert. Ausgehend vom konstanten Leerlauf wurde der Motor für eine definierte Zeit (10, 15, 20 oder 30 Sekunden) abgestellt und nachfolgend ohne Betätigung des Gaspedals wieder gestartet und im Leerlaufbetrieb belassen.

5.1 Qualitative Betrachtung der Stopp-/Startvorgänge

Damit einige Phänomene, die bei der Untersuchung der Stopp-/Startversuche auftraten, leichter beschrieben werden können, wird der quantitativen Versuchsauswertung eine qualitative Betrachtung vorangestellt.

Die Bilder 3 und 4 zeigen die charakteristischen Signalverläufe der wichtigsten Meßgrößen von zwei abgeschlossenen Motorstopp-/Startversuchen mit unterschiedlichen Motorstoppzeiten von 15 bzw. 20 Sekunden Dauer. In den Bildern sind als Funktion der Zeit Motordrehzahl, Kraftstoffverbrauch sowie die Konzentrationsverläufe der Schadstoffkomponenten Kohlenmonoxid, Kohlenwasserstoffe und Stickoxide aufgetragen. Die Leerlauf-, Motorstopp- und Motorstartphase sind entsprechend gekennzeichnet.

Anhand des Drehzahl-Signalverlaufs ist feststellbar, daß unmittelbar nach dem Anspringen des

Motors (nach ca. 1 Sekunde) die Motordrehzahl nicht sofort wieder auf das ursprüngliche Leerlaufniveau von ca. 850 Umdrehungen pro Minute zurückfällt, sondern für einen Zeitraum von ca. 30 Sekunden auf einem höheren Niveau von ca. 1100 Umdrehungen pro Minute bleibt. Die Ursache liegt wahrscheinlich im Motormanagement des Fahrzeugs.

In welchem Ausmaß sich ein Motor-Startereignis auf Kraftstoffverbrauch oder Schadstoffemissionen auswirkt, ist an der Intensität der Konzentrations- bzw. Verbrauchsspeaks und an der Zeitspanne zu erkennen, die vergeht, bis nach dem Starten des Motors wieder das ursprüngliche Leerlaufverbrauchs- bzw. Leerlaufkonzentrationsniveau erreicht wird.

5.1.1 Verlauf des Kraftstoffverbrauchs

Der Kraftstoffverbrauch erreicht unmittelbar nach dem Startbeginn seinen Maximalwert. Danach klingt das Verbrauchssignal relativ schnell wieder ab und verbleibt für ca. 30 Sekunden in einem Bereich, der sich geringfügig oberhalb des Leer-

laufverbrauchs-niveaus befindet. Die Ursache dafür liegt in der beschriebenen Anhebung der Leerlaufdrehzahl während der Startphase. Insgesamt vergehen im Mittel ungefähr 34 Sekunden bevor die Verbrauchskurve wieder das ursprüngliche Leerlaufniveau erreicht.

Bei genauer Betrachtung der Bilder 3 und 4 sind weiterhin leichte Ausschläge beim Kraftstoff-Signalverlauf während der Motorabschaltung bzw. Stillstandzeit zu beobachten. Obwohl in dieser Zeit der Motor zweifelsfrei keinen Kraftstoff verbraucht, wird davon ausgegangen, daß beim Abschaltvorgang des Motors fahrzeugseitig begründete Routinen aktiviert werden, die ein Auffüllen diverser kleiner Kraftstoff- bzw. Druckspeicher im Benzineinspritzsystem zur Konsequenz haben. Die "Stillstandverbräuche" wurden zum Startvorgang addiert.

5.1.2 Verlauf der Schadstoffkonzentrationen

Bei allen Schadstoffkomponenten führt der Startvorgang zu Konzentrationsanstiegen, die ebenfalls deutlich oberhalb der entsprechenden Leerlauf-niveaus liegen.

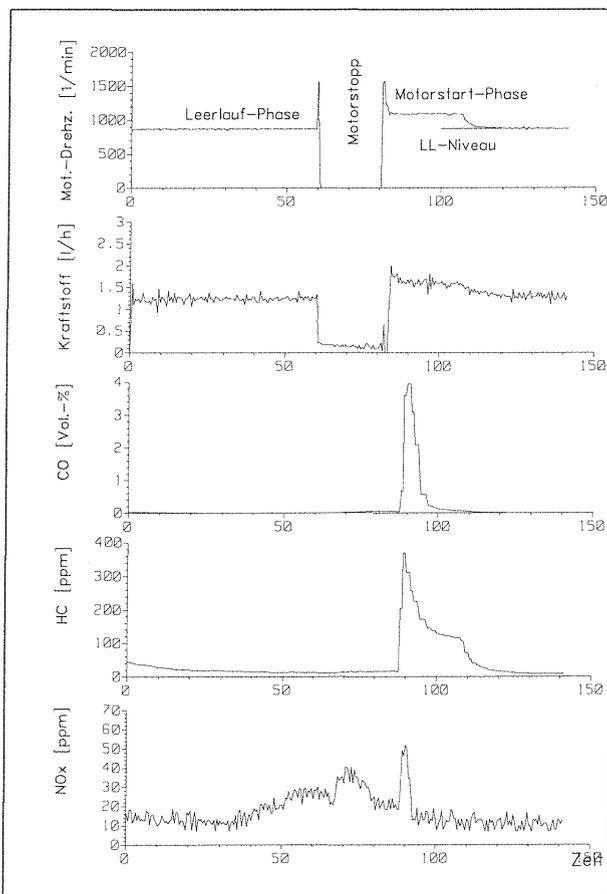


Bild 3: Signalverlauf eines Motorstopp- bzw. Anlaßvorganges, Stoppdauer: 20 Sekunden

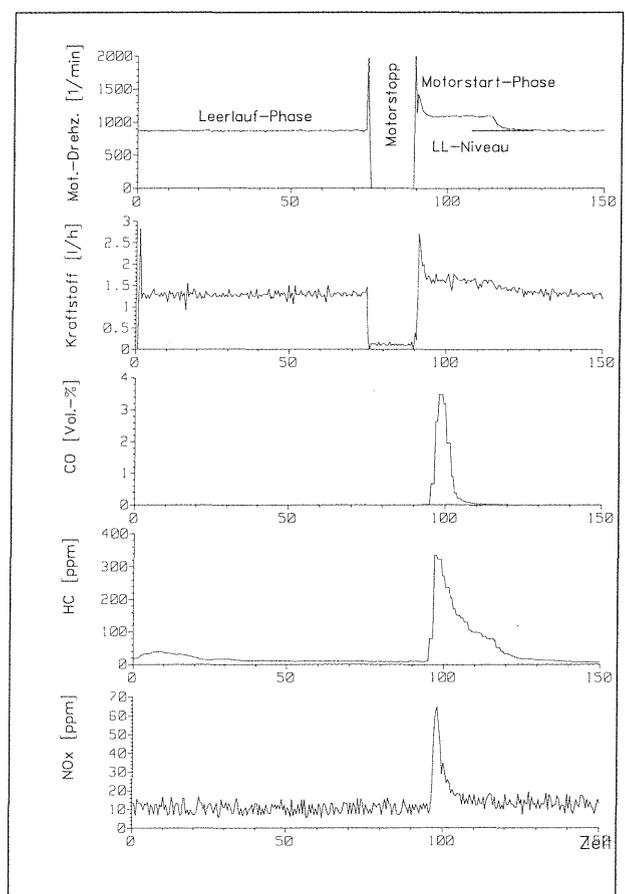


Bild 4: Signalverlauf eines Motorstopp- bzw. Anlaßvorganges, Stoppdauer: 15 Sekunden

Der Kohlenstoff-Konzentrationsverlauf (CO) ist dadurch gekennzeichnet, daß im Anschluß an einen sehr steilen Anstieg zunächst ein deutlicher, dann aber flacher verlaufender Konzentrationsabfall bis auf den Leerlauf-Ausgangswert folgt. Die Peak-Gesamtzeit beträgt durchschnittlich 30 Sekunden. Im Hinblick auf die nachfolgend durchzuführende Auswertung ist bedeutsam, daß im Leerlaufbetrieb die sehr kleinen CO-Konzentrationen nicht mehr erfaßt und ausgewertet werden konnten.

Beim Kohlenwasserstoff Signalverlauf (HC) ist nach dem Motorstart ein ähnliches Verhalten sichtbar. Der durch den Anlaßvorgang verursachte ausgeprägte Konzentrationspeak erreicht sehr schnell den Maximalwert, bevor er langsam abfallend wieder auf den ursprünglichen Leerlauf-Ausgangswert von ca. 10 - 15 ppm zurückfällt. Der Peak ist insgesamt ungefähr 34 Sekunden lang.

Leicht abweichend davon zeigt sich der Signalverlauf der Stickoxid-Konzentration (NO_x). Gleichfalls wird auch hier die Reaktion auf das Ereignis des Motorstarts durch einen charakteristischen Kurvenzug mit steilem Flankenanstieg aber auch -abfall dokumentiert. Die zeitliche Ausprägung des Peaks fällt deutlich kürzer aus. Auffällig ist das bei den NO_x -Werten zu beobachtende instabile Leerlaufverhalten (siehe Bilder 3 und 4). Darunter ist nicht der aufgrund des kleinen Ordinatenmaßstabes erkennbare unstetige Kurvenverlauf im 1 Hz-Bereich, sondern der über den Zeitraum von Versuchsbeginn bis Motorstopp registrierbare Konzentrationsanstieg zu verstehen. Darüber hinaus zeichnete sich ein uneinheitliches Verhalten der NO_x -Konzentrationsverläufe während der Leerlaufphasen vor und nach dem Stopp-/Startvorgang bei verschiedenen Versuchen ab. In einigen Fällen – wie auch im hier dargestellten Beispiel (Bild 3) – stellte sich nach dem Stopp- bzw. Wiederanlaßvorgang des Motors eine geringere Leerlaufkonzentration ein als vorher. Ursache dieser Phänomene könnten u.a. thermodynamische und chemische Vorgänge im Motorraum bzw. Abgasstrang (Katalysator) sein, auf die die Schadstoffkomponente NO_x empfindlich reagiert.

Bei Betrachtung der HC- und NO_x -Schadstoffkonzentrationen wird der Anschein erweckt, daß während der Motorstillstandphase Abgase emittiert werden, da die Signalverläufe nicht auf den Wert "Null" zurückgehen, sondern auf Leerlaufniveau verharren. Dazu ist anzumerken, daß meßsystembedingt die Gasanalysegeräte während des gesamten Versuches, also auch während des Motorstillstands, Abgase aus dem Auspuffrohr ent-

nehmen. Folgerichtig werden die Schadstoffkonzentrationen auch erfaßt und gespeichert. Bei der späteren Umrechnung werden sie natürlich nicht berücksichtigt.

5.2 Quantitative Auswertung der Stopp-/Startversuche

Es war zu berechnen, wie lange der Motorstillstand z.B. bei einer Ampelrot-Phase mindestens sein muß, damit sich die Abschaltung lohnt. Damit diese Zeit berechnet werden kann, sind neben den Leerlaufwerten auch diejenigen Kraftstoff- bzw. Emissionsmengen zu bestimmen, die beim Startvorgang zusätzlich erzeugt bzw. verbraucht werden.

Die Vorgehensweise zur Berechnung der erforderlichen Standzeiten des Motors wird exemplarisch für den Kraftstoff anhand von Verbrauchskurven erläutert. In Bild 5 werden die Motordrehzahl (Kurve 1), der Kraftstoffverbrauch eines Stopp-/Startvorganges (Kurve 2), der Leerlaufverbrauch

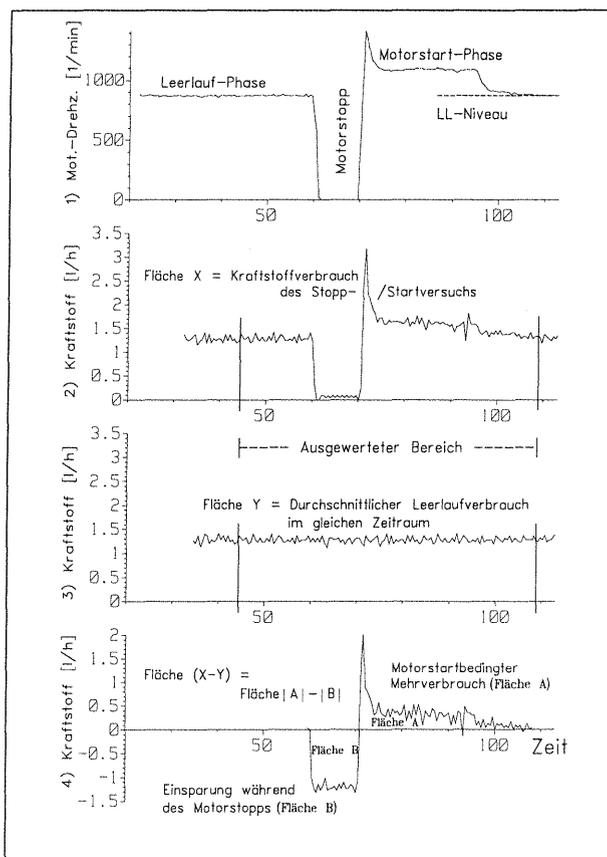


Bild 5: Bestimmung der Kraftstoff-Integralwerte

Fläche A: (gegenüber Leerlaufbetrieb) durch den Startvorgang zusätzlich verbrauchte Kraftstoffmenge

Fläche B: während der Standzeit (gegenüber Leerlaufbetrieb) eingesparte Kraftstoffmenge

(Kurve 3) und die Differenz zwischen Kurve 2 und 3 (Kurve 4) dargestellt. Die Leerlauf-, Motorstopp- und Startphase sind deutlich erkennbar. Betrachtet man nun einen Zeitabschnitt, der vor der Motorstopp-Phase beginnt und der frühestens dann abgeschlossen sein darf, wenn nach dem Motorstart der Verbrauch wieder auf das ursprüngliche Leerlaufniveau zurückgefallen ist (vergl. Bild 5: "Ausgewerteter Bereich"), so ist die in dieser Zeitspanne insgesamt verbrauchte Kraftstoffmenge des Stopp-/Startvorganges identisch mit dem Integralwert X der Kurve 2. Im Vergleich dazu zeigt Kurve 3 den Kraftstoff-Signalverlauf im Leerlaufbetrieb; der Integralwert Y entspricht dem Leerlaufverbrauch. Zieht man nun die Integralwerte X und Y (bzw. die beiden Kurvenzüge 2 und 3) voneinander ab, so erhält man als Differenz die Teilflächen A und B (bzw. Kurvenzug 4). Der durch den Startvorgang gegenüber Leerlaufbetrieb verursachte Mehrverbrauch entspricht der Fläche A und die während der Motorstillstandphase gegenüber Leerlauf eingesparte Kraftstoffmenge der Fläche B.

Bezogen auf die beiden Ampelstoppalternativen bedeutet dies: Nimmt die Differenz aus Einsparung und Mehrverbrauch (Fläche B minus Fläche A) positive Werte an, so würde sich die Motorabschaltung im Vergleich zum ununterbrochenen Leerlaufbetrieb rentieren, da insgesamt die Einsparungen größer wären. Nimmt dagegen im umgekehrten Fall die Differenz negative Werte an, so wäre die zeitweise Abschaltung des Motors unwirtschaftlicher und der Leerlaufbetrieb vorzuziehen.

Die Größe der Fläche B ist proportional zur Länge der Abschaltedauer. Je länger diese dauert, desto größer wird die Fläche B und damit auch die Einsparung. Bei einer bestimmten Standzeit des Motors, d.h. genau dann, wenn die Flächen A und B exakt gleich groß sind, kompensieren sich der startbedingte Mehrverbrauch und die standbedingten Einsparungen. Diese Größe wird als Mindeststandzeit bezeichnet. Einsparungen sind folglich nur dann möglich, wenn vor roten Ampeln oder geschlossenen Bahnschranken die tatsächliche Wartezeit größer ist als die oben definierte Mindeststandzeit.

Für die Schadstoffkomponenten erfolgte die Berechnung der Mindeststandzeit des Motors nach der grundsätzlich gleichen Systematik wie beim Kraftstoffverbrauch. Zunächst wurde für jede Komponente die Höhe der Leerlaufemissionen bestimmt und wie hoch im Vergleich dazu die beim Startvorgang zusätzlich erzeugten Emissionen (über dem Leerlaufniveau) sind. Es wurde jeweils der Bereich ausgewertet, in dem ein Konzentrati-

onsanstieg analysiert werden konnte, bis zu dem Zeitpunkt, an dem das Niveau der Leerlaufkonzentrationen wieder erreicht wurde. Um die anlaßbedingten Mehremissionen (Emissionen oberhalb des Leerlaufniveaus) und die Einsparungen während des Motorstillstands zu bestimmen, wurden von den Gesamtemissionen die entsprechenden im gleichen Zeitraum erzeugten Leerlaufemissionen abgezogen. Auf der Basis dieser Berechnungsgrößen erfolgte dann die Ermittlung der Mindeststandzeiten des Motors.

5.2.1 Ergebnisse der Kraftstoffverbrauchsmessung

Zunächst wurde berechnet, wie hoch der Leerlauf-Kraftstoffverbrauch ist und welche Menge Kraftstoff im Vergleich dazu bei einem Startvorgang zusätzlich benötigt wird. Der durchschnittliche Leerlaufbedarf des EMF beträgt ca. 1,27 [l/h] und der bei einem Startvorgang zusätzlich gegenüber Leerlauf verbrauchte Kraftstoff im Mittel ca. 3,39 [ml] bzw. 2,5 [g]. In Tabelle 1 ist weiterhin die berechnete Mindeststandzeit des Motors aufgeführt, ab wann mit dem EMF Kraftstoff eingespart werden kann. Die Zeitangabe schließt die in Abschnitt 5.1.1 beschriebenen "Stillstandverbräuche" ein. Sollen diese dagegen unberücksichtigt bleiben, so wären von der Mindeststandzeit ca. 1,25 Sekunden abzuziehen.

	Kraftstoffverbrauch
Leerlaufverbrauch [l / h] [ml / s]	1,27 0,35
Stopp-/startbedingter Mehrverbrauch (Kraftstoffverbrauch oberhalb des Leerlaufniveaus) [ml] [g] Peakdauer [s]	3,39 2,54 34
Mindeststandzeit [s]	10

Tab. 1: Erforderliche Mindeststandzeiten des Motors bezüglich Kraftstoffverbrauch (Mittelwerte aus allen Versuchen)

Ab einer Standzeit von im Mittel mindestens 10 Sekunden ist eine Kraftstoffeinsparung möglich. Das würde für den Fahrer eines solchen Fahrzeu-

ges bedeuten, daß es bei Ampelstopps, die länger als 10 Sekunden dauern, empfehlenswert wäre, den Motor während der Wartezeit an der Ampel abzuschalten.

5.2.2 Ergebnisse der Emissionsmessung/ -berechnung

Welche Auswirkungen zeitweise Motorabschaltungen auf Abgase haben, kann für die untersuchten Schadstoffkomponenten im einzelnen wie folgt erläutert werden (Tabelle 2):

	HC	NO _x
Leerlaufemissionen [g / min] 10 ⁻³	7,4	6,9
Stopp-/startbedingte Mehremissionen (Emissionen oberhalb des Leerlaufniveaus) [g] 10 ⁻³	35,5	0,53
Peakdauer [s]	33,5	3,5
Mindeststandzeit [s]	287	4,5

Tab. 2: Erforderliche Mindeststandzeiten des Motors bezüglich HC und NO_x (Mittelwerte aus allen Versuchen)

Kohlenwasserstoffe: Die Mindeststandzeiten des Motors zum Ausgleich der startbedingten Kohlenwasserstoffemissionen sind sehr lang. Sie dauern durchschnittlich fast 300 Sekunden bzw. 5 Minuten. Das würde bedeuten, daß es bei kurzen Ampelstopps ratsam ist, den Motor im Leerlauf eingeschaltet zu lassen. Erst bei sehr langen Wartezeiten über 5 Minuten, wäre die Motorabschaltung zu empfehlen (z.B. an einigen Bahnübergängen).

Stickoxide: Bezüglich der Stickoxide ist festzuhalten, daß die durch den Anlaßvorgang erzeugten Mehremissionen deutlich geringer ausfallen. Die Berechnung ergibt relativ kurze Mindeststandzeiten von durchschnittlich 4,5 Sekunden. Daraus läßt sich ableiten, daß es an Ampeln auch rund 5 Sekunden vor der Grün-Phase noch ratsam ist, den Motor auszuschalten.

Kohlenmonoxid: Aufgrund der gegen Null strebenden Leerlaufemissionen mußte auf die Bestimmung der Standzeit für die CO-Komponente verzichtet werden, da diese den unrealistischen Wert "unendlich" erreichen würde. Bezogen z.B. auf einen Ampelstopp würden im Vergleich zum Leerlaufbetrieb die durch den Motorstart verursachten Emissionen in keinem Fall aufgewogen werden können. D.h. es wäre immer günstiger, während der Wartezeit an der Ampel den Motor im Leerlauf zu belassen. Andererseits wies der durch den Startvorgang des Motors ausgelöste Konzentrations-Peak auf eine intensive Reaktion hin, die sich vom qualitativen Verlauf eher an den Kohlenwasserstoffen, als an den Stickoxiden orientiert. Eine Abschätzung führt zu der Empfehlung, daß es bei kurzen Ampelstopps günstiger ist, den Motor anzulassen und erst bei Wartezeiten, die im Bereich von mehreren Minuten liegen, den Motor abzuschalten.

6 Meßfahrten mit Simulation eines Ampelstopps

Im Gegensatz zu den "statischen" Untersuchungen des Abschnitts 5, wurden bei diesem Versuchskonzept Meßfahrten im realen Straßenverkehr durchgeführt, die einen 20 Sekunden dauernden Fahrzeugstillstand in Form einer Ampelstopp-Simulation beinhalten. Bei diesem Untersuchungsansatz wird der Motorstopp-/Startvorgang bzw. Leerlaufbetrieb nicht isoliert betrachtet, sondern integriert in einen reproduzierbaren, realen Fahrversuch, dessen Randbedingungen während aller Einzelversuche weitestgehend konstant gehalten wurden. Die interessierenden ampelstoppbedingten Emissionen respektive Kraftstoffverbräuche überlagern sich bei diesem Versuchskonzept mit den nachfolgend im Fahrbetrieb produzierten Abgasmengen bzw. Verbräuchen. Diese (fahrbedingten Mengen) sollten im Idealfall, d.h. wenn bei allen Messungen die Reproduktion der Versuchsfahrt exakt gelingt, immer gleich groß sein. Bei einer vergleichenden Beurteilung der Ergebnisse von zwei Meßfahrten – einmal mit ampelstoppbedingtem Motorleerlauf und das andere Mal mit Motorabschaltung und Motorstart – kann damit der störende Einfluß der im Fahrbetrieb produzierten Massenemissionen / Verbräuche weitgehend vernachlässigt werden. Da also nicht die Absolutwerte von Bedeutung sind, sondern vielmehr die relativen Veränderungen, sollte auf dieser Basis ein Vergleich der Emissionen bzw. Kraftstoffverbräuche stattfinden.

6.1 Versuchsziel

Ziel des Versuchskonzeptes ist es daher festzustellen, ob auch bei diesem Versuchsansatz die Auswirkungen von kurzzeitigen Motorabschaltungen im Vergleich zum ununterbrochenen Leerlaufbetrieb quantifizierbar sind, bzw. ob – bezogen auf die Ergebnisse aus Kapitel 5 – eine 20 Sekunden dauernde Ampelstopp-Simulation zu Reduzierungen bei Stickoxiden und Kraftstoffverbrauch sowie Zuwächsen bei Kohlenwasserstoffen und Kohlenmonoxid führt.

Weiterhin soll mit diesem Ansatz überprüft werden, ob die Art und Weise der Annäherung an die Ampel, d.h. die Phase vor dem Ampelstopp, Einfluß auf die nachfolgenden Verbrauchs- und Emissionswerte hat. Um zu beurteilen, ob zeitlich weit vorgelagerte Situationen Auswirkungen auf deutlich spätere Emissionen haben, erfolgte die Reduzierung der Fahrzeuggeschwindigkeit bis zum Stillstand an der "Ampel" anhand drei unterschiedlicher Verzögerungsstrategien (Leerlauf, Schiebetrieb mit bzw. ohne Gangwechsel).

Durch die Kombination der drei Verzögerungsvarianten mit zwei unterschiedlich simulierten Ampelstopps in Form von: a) ununterbrochenem Leerlaufbetrieb bzw. b) Motorstopp mit nachfolgend erforderlichem Wiederanlaßvorgang gelangten somit 6 voneinander abweichende Meßreihen zur Auswertung.

6.2 Versuchsbeschreibung und Auswertung

Die Versuche wurden auf einem 2,5 km langen Rundkurs im öffentlichen Straßennetz durchgeführt, bei dem etwa in der Mitte der Fahrstrecke auf einem Parkplatz in Form einer Ampelstopp-Simulation ein definierter Fahrzeugstillstand erfolgte. Dabei wurde der Motor entweder abgeschaltet und nach 20 Sekunden wieder gestartet oder aber er lief 20 Sekunden im Leerlauf. Um die Versuche weitgehend reproduzierbar zu gestalten, wurden alle Meßfahrten von ein und demselben Fahrer durchgeführt. Mit dem Ziel, unrealistisch hohe Anfahrbeschleunigungen zu vermeiden, wurde für die Meßfahrten in das EMF ein Drosselklappenanschlag eingebaut, der eine kontinuierliche Verstellung von 0% bis 100% erlaubt. Der Anschlag wurde auf maximal 40% Drosselklappenstellung fixiert, um ausreichende Beschleunigungen realisieren zu können, die ein "mitschwimmen" im Verkehr erlauben. Der Fahrer erhielt die Anweisung, unter Ausnutzung dieser

maximal zur Verfügung stehenden Gaspedalstellung in Verbindung mit frühzeitigem "Hochschalten" der Gänge, im Bereich der für diese Strecke zulässigen Höchstgeschwindigkeit ($V_{\max} = 70 \text{ km/h}$) zu fahren.

Versuche, bei denen die Meßfahrt durch andere Verkehrsteilnehmer oder aufgrund der aktuellen Verkehrssituation behindert wurde, blieben unberücksichtigt bzw. wurden von der Auswertung ausgeschlossen.

Die Bilder 6 und 7 spiegeln den Verlauf der Meßfahrten wider. Bild 7 zeigt einen Versuch mit Motorabschaltung während der Ampelstopp-Phase und Bild 6 das entsprechende Leerlauf-Pendant. Zur leichteren Identifizierung der verschiedenen Strecken- bzw. Versuchsabschnitte wurden in die Bilder 6 und 7 entsprechende Kennzeichnungen eingefügt. Die Reduzierung der Fahrzeuggeschwindigkeit bis zum Stillstand vor der "Ampel" erfolgte bei diesen beiden Versuchen anhand der Variante "Rollen im Leerlauf".

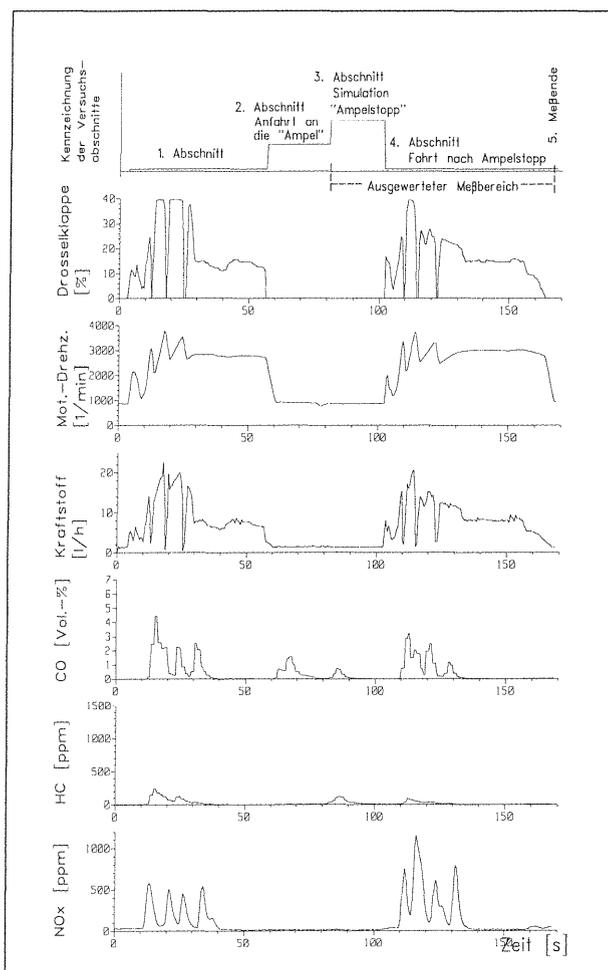


Bild 6: Meßfahrt mit 20 Sekunden Leerlaufbetrieb während des "Ampelstopps"

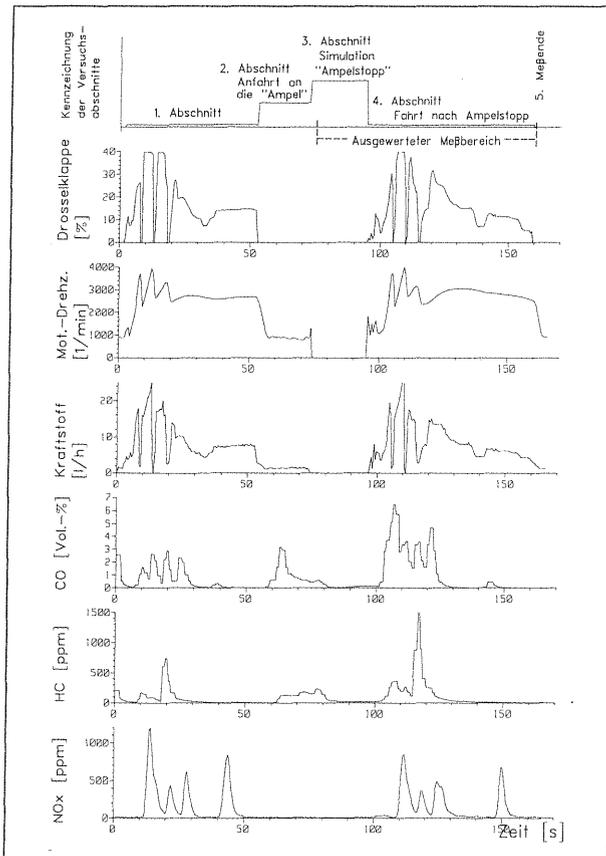


Bild 7: Meßfahrt mit 20 Sekunden Motor aus während des "Ampelstopps"

Die abgebildeten Meßsignale sind Drosselklappenstellung, Motordrehzahl, Kraftstoffverbrauch, CO-, HC- und NO_x-Emissionen. Versuchsabschnitt 1 markiert den ersten Teil der Meßstrecke bis zu dem Punkt, an dem die Fahrzeugverzögerung d.h. die Anfahrt an die "Ampel" beginnt. Die Verzögerungsphase, Versuchsabschnitt 2, endet mit dem Fahrzeugstillstand an der "Ampel". Daran schließt sich Versuchsabschnitt 3, die Ampelstopp-Phase an. Mit Abschnitt 4 wird die Versuchsfahrt fortgesetzt. Das Ende der Meßfahrt wird durch die Position 5 gekennzeichnet.

Betrachtet man die Konzentrations-Signalverläufe der beiden Bilder und achtet dabei insbesondere auf den Bereich nach dem Ampelstart (Versuchsabschnitt 4) so fällt auf, daß – trotz der Überlagerung mit den Beschleunigungsvorgängen nach der Abfahrt von der "Ampel" – die HC- und CO-Schadstoffkonzentrationen in Bild 7 (Versuchsfahrt mit Motorabschaltung) höhere Werte erreichen als in Bild 6. Die Reaktionen dieser Abgaskomponenten auf das Motorstartereignis sind mithin so groß, daß sie ungeachtet der emissions- und verbrauchintensiven Beschleunigungsphase nach dem "Ampelstart" deutlich erkennbar bleiben. Bereits qualitativ deutet sich damit an, daß auch bei den

Meßfahrten mit integriertem "Ampelstopp" zwischen beiden Ampelstopp-Varianten meßbare Differenzen bei diesen Schadstoffkomponenten existieren. Vergleicht man dagegen die Signalverläufe der Stickoxidkonzentrationen miteinander, so sind zwischen beiden Ampelstoppvarianten qualitativ kaum Unterschiede erkennbar. Gleiches gilt für den Kraftstoffverbrauch.

Die anschließende Berechnung der Massenemissionen bzw. Kraftstoffverbräuche stützt sich nicht auf die gesamte Meßfahrt ab. Nicht einbezogen wurde der erste Teil (Versuchsabschnitt 1). Er diente insbesondere der Konditionierung des Motors und Katalysators, um zu erreichen, daß für die nachfolgenden Versuchsabschnitte bei allen Meßfahrten identische Ausgangsbedingungen vorherrschten. Lediglich der maßgebliche Bereich der Meßfahrt gelangte zur Auswertung. Er schließt den simulierten Ampelstopp (Versuchsabschnitt 3) und den darauf folgenden Abschnitt nach dem "Ampelstart" (Versuchsabschnitt 4) in einer Länge von 60 Sekunden ein, um möglichst alle Auswirkungen, die auf die Motorabschaltung bzw. auf den Wiederanlaßvorgang zurückzuführen sind, auch vollständig zu erfassen. Die Zeitspanne nach dem "Ampelstart" wurde aus zwei Gründen so lang gewählt: Einerseits hat sich bei den Auswertungen in Kapitel 5 gezeigt, daß die durch den Anlaßvorgang verursachten Reaktionen bis zu ca. 36 Sekunden dauern (Kohlenwasserstoff-Peak). Andererseits erreichten die Meßsignale ca. 60 Sekunden nach dem "Ampelstart" relativ stationäre Werte.

6.3 Ergebnisse der Meßfahrten mit Simulation des Ampelstopps

In Tabelle 3 sind der Kraftstoffverbrauch sowie die Massenemissionen der Komponenten CO, HC, NO_x und CO₂ in Abhängigkeit von den verschiedenen Fahrzeugverzögerungsstrategien differenziert nach beiden Ampelstopp-Varianten aufgelistet.

Als Ergebnis ist festzuhalten, daß zwischen den verschiedenen Fahrzeugverzögerungsstrategien und der Höhe der Schadstoffemissionen/ Kraftstoffverbräuche kein Zusammenhang festgestellt werden konnte. Betrachtet man separat für jede Komponente ausschließlich die Ergebnisse einer der beiden Ampelstoppvarianten, so erkennt man, daß die relativen Unterschiede, die mit den verschiedenen Verzögerungsstrategien erzielt wurden, so gering sind, daß sich daraus kein Einfluß ableiten läßt. Vergleicht man dagegen die Resultate der beiden Ampelstoppvarianten untereinander, so sind zum Teil erhebliche Abweichungen quantifizierbar.

	CO [g/Test]	HC [g/Test]	NO _x [g/Test]	CO ₂ [g/Test]	Verbrauch [l/Test]
Anfahrt an die "Ampel" im Motorleerlauf					
Motor aus / an	16,91	1,076	0,191	282,1	0,144
Motor-Leerlauf	8,14	0,178	0,292	335,5	0,161
Anfahrt an die "Ampel" im "Schiebebetrieb"					
Motor aus / an	18,79	0,905	0,233	287,6	0,148
Motor-Leerlauf	8,85	0,166	0,277	343,8	0,161
Anfahrt an die "Ampel" mit "Zurückschalten" der Gänge					
Motor aus / an	18,64	0,982	0,269	294,0	0,148
Motor-Leerlauf	8,52	0,221	0,302	338,1	0,159

Tab. 3: Ergebnisse der Meßfahrten mit Ampelstopp-Simulation

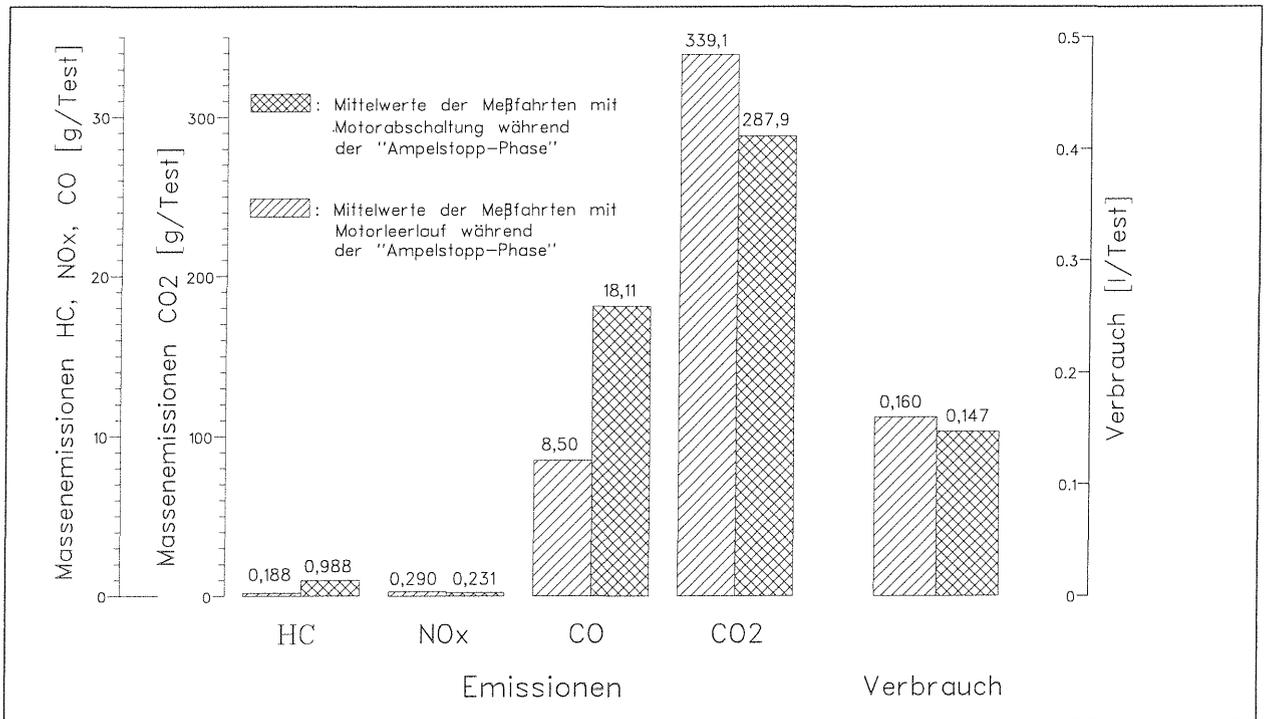


Bild 8: Mittelwerte der Versuchsfahrten mit 20 Sekunden Ampelstopp-Simulation

Anschließend wurden aus den Einzelwerten der Tabelle 3 für jede Komponente die Mittelwerte aller Meßfahrten mit Motorabschaltung bzw. Leerlaufbe-

trieb berechnet und in den Bildern 8 und 9 bzw. Tabelle 4 gegenübergestellt.

	CO	HC	NO _x	CO ₂	Verbrauch
Motor aus / an Mittelwert	18,11 [g/Test]	0,988 [g/Test]	0,231 [g/Test]	287,9 [g/Test]	0,147 [l/Test]
Motor-Leerlauf Mittelwert	8,50 [g/Test]	0,188 [g/Test]	0,290 [g/Test]	339,1 [g/Test]	0,160 [l/Test]
Relative Veränderungen	+113 %	+426 %	-20 %	-15 %	-8 %

Tab. 4: Emissions- bzw. Kraftstoffverbrauchs-Mittelwerte der Versuchsfahrten mit 20 Sekunden Ampelstopp-Simulation und die relativen Verbrauchs- und Emissionsveränderungen

Obwohl die bereits erwähnte Überlagerung mit den im Fahrbetrieb erzeugten Emissionen zu berücksichtigen ist, treten deutliche Unterschiede zutage. Der für die Umwelt erzielbare Nutzen bzw. Schaden des in die Meßfahrt integrierten 20 Sekunden dauernden Ampelstopps kann insbesondere durch die relativen Verbrauchs- und Emissionsreduzierungen bzw. Erhöhungen in Bild 9 deutlich gemacht werden.

Im Fall der Meßfahrten mit vorübergehender Motorabschaltung sind die Massenemissionen der Schadstoffkomponenten CO und HC signifikant höher als bei den Versuchen mit der Leerlauf-Alternative. Die Auswirkungen auf die NO_x- und

CO₂-Emissionen bzw. auf den Kraftstoffverbrauch sind dagegen bedeutend geringer und weisen zudem in die andere Richtung bzw. sind mit einem anderen Vorzeichen versehen. Bei den Versuchsfahrten mit Motorabschaltung wurden Reduzierungen von 8% beim Kraftstoffverbrauch, 15% beim Kohlendioxid und 20% bei den Stickstoffoxiden gemessen. Dem stehen allerdings Steigerungen von 113% beim Kohlenmonoxid und 426% bei den Kohlenwasserstoffen gegenüber.

Bezogen auf die berechneten Standzeiten aus Kapitel 5, war zu überprüfen, ob auch bei einer realen Meßfahrt mit Ampelstopp-Simulation eine 20 Sekunden lange Motorabschaltung zu Reduzierun-

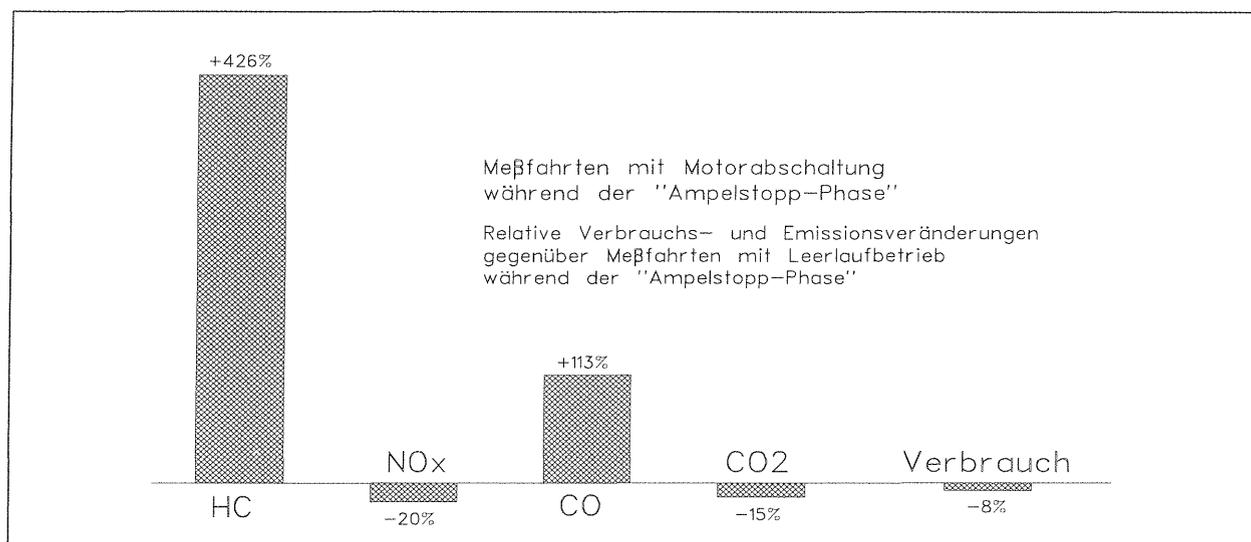


Bild 9: Relative Veränderungen von Schadstoffemissionen und Kraftstoffverbrauch bei 20 Sekunden Motorabschaltung

gen bei den Stickoxiden und beim Kraftstoffverbrauch bzw. Zuwächsen bei den Kohlenwasserstoffen und Kohlenmonoxiden führen würde. Anhand der Resultate konnte bestätigt werden, daß die unter idealen Bedingungen erarbeiteten Ergebnisse aus Kapitel 5 auch auf Situationen im Straßenverkehr übertragbar sind.

Es ist zu beachten, daß die hier berechneten Absolut- bzw. Prozentwerte das Ergebnis einer Meßfahrt und nicht eines isoliert betrachteten Stopp-/Startversuchs sind. Daraus folgt, daß die Höhe des erzielbaren Nutzens bzw. Schadens einer 20 Sekunden dauernden Motorabschaltung abhängig ist von der Art bzw. Länge der Meßfahrt. Je länger der ausgewertete Bereich der Messung ist, desto geringer wird der Einfluß der Ampelstoppalternativen. Darunter ist zu verstehen, daß die Höhe der Balken in Bild 9, d.h. die relative Verbrauchs- bzw. Emissionsreduzierung von der Art bzw. Länge der Meßfahrt abhängig ist. Nicht aber die Orientierung bzw. das Vorzeichen der Balken. Vielmehr hängt die Orientierung, d.h. ob eingespart oder mehr verbraucht bzw. emittiert wird, ausschließlich von der Dauer des Ampelstopps ab.

7 Bemerkungen zum Anlasser -Energiebedarf

Die für den zusätzlich erforderlichen Startvorgang benötigte Energie muß zu 100% von der Fahrzeugbatterie bereitgestellt werden. Bei einer zugrunde gelegten Nennleistung des Anlassers von 750 W /10/ und einer durchschnittlichen Dauer für den Anlaßvorgang eines betriebswarmen Motors

von ca. 1,5 Sekunden /10/ wird eine Energie von $750 \text{ W} \times 1,5 \text{ s} = 1,125 \text{ [kWs]}$ verbraucht.

Um die Gesamtbilanz wieder auszugleichen, muß diese aus der Batterie entnommene Energie wieder vom Motor über die Lichtmaschine an die Batterie zurückgeführt werden. Unter Berücksichtigung des Motorwirkungsgrads, des Lichtmaschinenwirkungsgrads /11/ und des Batterie-Energiewirkungsgrads /12/ ergibt sich eine Wirkungsgradkette von:

$$\begin{aligned} \eta_{\text{ges}} &= \eta_{\text{Mot}} \times \eta_{\text{Li}} \times \eta_{\text{Bat}} \\ &= 0,30 \times 0,5 \times 0,7 \\ &= 0,105. \end{aligned}$$

Mit einem spezifischen Heizwert von 43500 [kJ/kg] bzw. 32600 [kJ/l] für Superkraftstoff /11/ folgt daraus, daß zur Erzeugung dieser Batterieenergie eine Kraftstoffmenge von:

$$\begin{aligned} m_{\text{Kr.}} &= 1,125 \text{ [kWs]} / (0,105 \times 32.600 \text{ [kWs/l]}) \\ &= 0,33 \text{ [ml]} \text{ bzw. } 0,25 \text{ [g]} \end{aligned}$$

erforderlich ist. Diese Menge entspricht in etwa dem durchschnittlichen Leerlaufverbrauch von einer Sekunde. D.h. diese Sekunde müßte zu der Mindest-Standzeit des Motors hinzugerechnet werden.

8 Diskussion der Ergebnisse

In den Kapiteln 5 und 6 wurde ausgeführt, welchen Einfluß ein Motorstopp/Startereignis auf den Kraftstoffverbrauch und die Schadstoffe NO_x, HC und CO hat. Für die einzelnen Komponenten wurde berechnet, wie lange der Motor mindestens ausgeschaltet werden muß, damit Einsparungen möglich

Wartezeit an Ampeln/Bahnübergängen	Auswirkungen bei zeitweiser Motorabschaltung			
	Kraftstoff	NO _x	HC	CO
kleiner 5 Sekunden	-	-	-	-
5 Sekunden bis 10 Sekunden	-	+	-	-
10 Sekunden bis 5 ca. Minuten	+	+	-	-
größer 5 Minuten	+	+	+	+

+ : Sinkende Emissionen / Verbräuche gegenüber Leerlaufbetrieb
 - : Steigende Emissionen / Verbräuche gegenüber Leerlaufbetrieb

Tab. 5: Empfehlungen für die zeitweise Motorabschaltung

sind. Eine Empfehlung, ab wann vor Ampeln oder Bahnübergängen die zeitweise Motorabschaltung sinnvoll ist, kann Tabelle 5 entnommen werden.

Anhand der Matrix in Tabelle 5 ist zu erkennen, daß es bei Wartezeiten vor Ampeln oder Bahnübergängen die kürzer als 5 Sekunden sind, gegenüber Leerlaufbetrieb immer besser ist, den Motor anzulassen, da keine Einsparungen realisierbar sind. Dagegen können auf der anderen Seite durch Motorabschaltungen, die 5 Minuten überschreiten, Reduzierungen bei allen Komponenten erreicht werden, d.h. ein Nutzen für die Umwelt wäre immer gegeben.

Für die Zeiträume die dazwischen liegen (ca. 5 Sekunden bis 5 Minuten), ist eine Formulierung, ob die zeitweise Motorabschaltung insgesamt Vorteile oder Nachteile für die Umwelt bringt, nicht möglich. Es konnte zwar festgestellt werden, daß z.B. bei einer Motorabschaltung von 20 Sekunden Länge, Reduzierungen bei den Stickoxiden und beim Kraftstoffverbrauch sowie steigende Emissionen bei den Kohlenwasserstoffen und Kohlenmonoxiden zu erwarten sind. Da jedoch das toxische Potential der einzelnen Schadstoffkomponenten nicht hinreichend bekannt ist, kann auch nicht gefolgert werden, ob z.B. x Gramm weniger Stickoxide für die Umwelt höher zu bewerten sind, als y Gramm zusätzlich emittierte Kohlenwasserstoffe bzw. Kohlenmonoxide. Dazu müßte ein Bewertungssystem existieren, aus dem hervorgeht, wie schädlich die einzelnen Abgasbestandteile für die Umwelt sind.

Allgemeine Anmerkungen zu den Ergebnissen

Die berechneten Verbrauchs- und Schadstoffemissionswerte sowie die daraus bestimmten Mindeststandzeiten beziehen sich auf dieses eine Fahrzeug und warmen Motor. Eine Übertragbarkeit der Absolutwerte auf andere Fahrzeuge - insbesondere solche mit anderen Motoren bzw. Gemischaufbereitungs- und Abgasreinigungskonzepten - ist daher nicht oder nur eingeschränkt zulässig. Die Größenordnungen der Ergebnisse können aber vermutlich auf vergleichbare, mit geregelter Katalysator ausgestattete Fahrzeuge übertragen werden.

Darüber hinaus ist zu den Ergebnissen der Emissionsberechnung und den daraus ermittelten Mindeststandzeiten anzumerken, daß diese als Richtwerte zu verwenden sind, weil sie im streng meßtechnischen Sinne fehlerbehaftet sein können. Dafür sind im wesentlichen zwei Gründe zu nen-

nen. Einerseits ist die Messung kleiner Abgaskonzentrationen hinter dem Katalysator sehr schwierig und andererseits ist die Methode zur Umrechnung der Abgaskonzentrationen in Massenemissionen mit den bekannten Unsicherheiten verbunden.

Die Resultate, die im Rahmen dieser Untersuchung gewonnen wurden, setzen das korrekte Starten des Motors voraus. Fehlbedienungen des Motors, z.B. durch Betätigung des Gaspedals während des Startvorgangs würden die Kraftstoffverbräuche und damit auch Emissionen erhöhen. Dies hätte zur Folge, daß die erforderlichen Mindeststandzeiten ebenfalls ansteigen würden.

9 Zusammenfassung

Um festzustellen, ob bei vorübergehendem Fahrzeugstillstand kurzzeitige Motorabschaltungen gegenüber konstantem Leerlaufbetrieb eine Reduzierung oder aber aufgrund des erneut anfallenden Startvorganges eine Zunahme der Kraftstoffverbräuche respektive Schadstoffemissionen zur Folge haben, wurde mit dem Emissions-Meß-Fahrzeug (EMF) ein entsprechendes Untersuchungsprogramm realisiert. Dabei war auch der Fragestellung nachzugehen, was dem Autofahrer an einer roten Ampel oder einem Bahnübergang (oder den Kommunen bei entsprechender Beschilderung) zu empfehlen ist, d.h. ob der Motor abgeschaltet werden soll oder nicht.

Im ersten Abschnitt des Projektes wurden einzelne Motorstopp-/Startereignisse analysiert. Ausgehend von stationären Leerlaufzuständen wurde der betriebswarme Motor für einen definierten Zeitraum abgeschaltet und nachfolgend ohne Betätigung des Gaspedals wieder gestartet und im Leerlaufbetrieb belassen. Damit der Einfluß der zeitweisen Motorabschaltung im Vergleich zum ununterbrochenen Leerlaufbetrieb quantifiziert werden kann, war es erforderlich, die Ergebnisse beider Alternativen gegenüberzustellen. Dazu waren für die Schadstoffkomponenten und den Kraftstoffverbrauch jeweils die Leerlaufwerte und die im Vergleich dazu durch den Startvorgang des Motors zusätzlich erzeugten Emissionen bzw. Verbräuche zu bestimmen. Anhand dieser Werte konnte berechnet werden, ab welcher Standzeit des Motors eine zeitweise Abschaltung vorteilhafter ist.

Für die Schadstoffkomponenten und den Kraftstoffverbrauch können folgende Hinweise formuliert werden:

Kohlenwasserstoffe: Die Abgaskomponente HC reagiert sehr heftig auf den Stopp-/Startvorgang. Es ist zweckmäßiger bei kurzzeitigen Ampelstopps den Motor nicht abzustellen, sondern im Leerlaufbetrieb zu belassen. Erst bei sehr langen Wartezeiten, die im Bereich von fast 5 Minuten liegen, ist es vorteilhafter den Motor vorübergehend abzuschalten.

Stickoxide: Die Stickoxide zeigen wesentlich geringere Auswirkungen auf das Stopp-/Startereignis. Schon bei kurzzeitigen Stopps – in der Größenordnung von ca. 5 Sekunden – ist es vernünftiger, den Motor abzuschalten.

Kohlenmonoxid: Aufgrund der gegen Null strebenden CO-Leerlaufkonzentrationen konnte für diese Komponente die Mindest-Standzeit des Motors nicht quantifiziert werden. Andererseits wies der durch den Startvorgang des Motors ausgelöste Konzentrations-Peak auf eine intensive Reaktion hin, die sich vom qualitativen Verlauf eher an den Kohlenwasserstoffen als an den Stickoxiden orientiert. Eine Abschätzung führt zu der Empfehlung, daß es bei kurzen Stopps günstiger ist, den Motor laufen zu lassen und ihn erst bei Wartezeiten, die im Bereich von mehreren Minuten liegen, abzuschalten.

Kraftstoffverbrauch: In bezug auf den Kraftstoffverbrauch wurde festgestellt, daß sich eine Motorabschaltung dann lohnt, wenn die Wartezeit länger als ca. 10 Sekunden ist.

Im zweiten Versuchsteil wurden Meßfahrten im Straßenverkehr durchgeführt, die einen definierten 20 Sekunden dauernden Fahrzeugstillstand in Form einer Ampelstopp-Simulation beinhalteten. Damit sollte überprüft werden, ob dieses realitätsnahe Versuchskonzept die Ergebnisse aus den Motorstopp-/Startversuchen bestätigt. Da bei diesem Untersuchungsansatz die Ampelstopp-Phase in eine Meßfahrt integriert wurde, d.h. eine Überlagerung mit den im Fahrbetrieb auftretenden Schadstoffemissionen bzw. Kraftstoffverbrauchswerten zu berücksichtigen war, erfolgte der Vergleich auf der Basis relativer Veränderungen. Bezogen auf die im ersten Versuchsteil ermittelten Ergebnisse war zu überprüfen, ob auch bei einer realen Meßfahrt mit Ampelstopp-Simulation eine 20 Sekunden dauernde Motorabschaltung zu ähnlichen Resultaten führen würde. Anhand dieser Versuche konnte bestätigt werden, daß die unter idealen Bedingungen erarbeiteten Ergebnisse des ersten Versuchsteils auch auf realitätsnahe Situationen übertragbar sind.

Eine Empfehlung, ab wann eine vorübergehende Motorabschaltung sinnvoll ist, kann nur für jede Schadstoffkomponente separat erfolgen, da für die verschiedenen Abgasbestandteile unterschiedlich lange Mindeststandzeiten des Motors erforderlich sind. Will man eine Empfehlung formulieren, die gleichzeitig alle Komponenten einschließt, so müßte dies auf der Basis eines Bewertungssystems erfolgen, aus dem hervorgeht, wie schädlich jeweils die einzelnen Abgasbestandteile für die Umwelt sind, um sie gegeneinander abzuwägen zu können. Ein derartiges Bewertungssystem für den Straßenverkehr ist nicht bekannt.

Zu den Ergebnissen dieses Projektes ist folgendes anzumerken:

Die Untersuchungen wurden ausschließlich mit dem EMF und mit warmem Motor durchgeführt. Alle Resultate beziehen sich auf dieses eine Fahrzeug. Die Übertragbarkeit der Absolutwerte auf andere Fahrzeuge – insbesondere solche mit anderen Motor- bzw. Gemischaufbereitungs- und Abgasreinigungskonzepten – ist daher nicht oder nur eingeschränkt zulässig. Die Größenordnungen der Ergebnisse können aber vermutlich auf vergleichbare, mit Katalysator ausgestattete Fahrzeuge übertragen werden.

10 Literatur

- /1/ N.N.: Deutschland: noch 37% ohne Kat. aus: Automobil Revue, Nr. 42, 1995
- /2/ MAUS., W.; BRÜCK, R.: Katalysatorkonzepte für zukünftige Abgasgesetzgebungen und deren Auswirkungen auf Motor und Fahrzeug AVL-Proceedings zum Congress in Graz, August 1995
- /3/ PFALZGRAF, B.; OTTO, E.; WIRTH, A.; KÜPER, P.F.; HELD, W.; DONNERSTAG, A.: The System Development of Electrically Heated Catalyst (EHC) for the LEV and EU-III Legislation SAE Technical Paper Series 951072
- /4/ N.N.: Technik Abgasreinigung aus: Auto Motor Sport, Nr. 26, 1995
- /5/ FERSEN VAN, O.: Honda schon im 3. Jahrtausend aus: Automobil Revue, Nr. 42, 1995
- /6/ BERTRAM, M.: Antrieb mit intermittierendem Motorbetrieb ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 98, 1996
- /7/ STAAB, J.; PFLÜGER, H.; SCHRÖTER, D.; SCHÜRMAN, D.: Ein kompaktes Abgasmeßsystem zum Einbau in Personenkraftwagen für Messungen bei Straßenfahrten Automobil-Industrie, Nr. 1, 1988
- /8/ SCHÄFER, F.; BASSHUYSEN VAN, R.: Schadstoffreduzierung und Kraftstoffverbrauch von Pkw-Verbrennungsmotoren Springer-Verlag, Wien, 1993
- /9/ HAUSCHUTZ, G.; WINKLER, J.; RASCHKE, J.; WALDEYER, H.; LEISEN, P.; HEICH, H.J.: Emissions- und Immissionstechnik im Verkehrswesen Verlag TÜV Rheinland GmbH, Köln 1983
- /10/ N.N.: Technische Unterrichtung: Elektrische Startanlagen Bosch, 1974
- /11/ N.N.: Kraftfahrtechnisches Taschenbuch Bosch, 22. Auflage, 1995
- /12/ N.N.: Technische Unterrichtung: Batterien Bosch, 1974
- /13/ SCHUSTER, E.; PAGEL, E.O.: Die Stop-Start-Anlage ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 83, 1981
- /14/ N.N.: Kraftstoff Sparbuch: Mehr Kilometer mit weniger Kraftstoff Informationsbroschüre des Bundesministerium für Wirtschaft
- /15/ N.N.: Auto und Klimaschutz – Weniger Kohlendioxid durch energiesparende Fahrweise Presse-Information Mercedes-Benz, 1995
- /16/ N.N.: Gas geben und sparen – Die Spartips von Mercedes Broschüre der Mercedes-Benz AG
- /17/ GREVE, P.; LIESER, W.P.: Der neue VW Golf Ecomatic ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 95, 1993

Schriftenreihe

**Berichte der Bundesanstalt
für Straßenwesen**

Unterreihe „Fahrzeugtechnik“

- F 1: **Einfluß der Korrosion auf die passive Sicherheit von Pkw**
von E. Faerber und G.-D. Wobben
88 Seiten, 1993 DM 23,50
- F 2: **Kriterien für die Prüfung von Motorradhelmen**
von W. König, H. Werner, E. Schuller, G. Beier und W. Spann
80 Seiten, 1993 DM 25,50
- F 3: **Sicherheit von Motorradhelmen**
von H. Zellmer
52 Seiten, 1993 DM 21,00
- F 4: **Weiterentwicklung der Abgassonderuntersuchung**
Teil 1: Vergleich der Ergebnisse aus Abgasuntersuchung und Typprüfverfahren
von A. Richter und G. Michelmann
Teil 2: Praxiserprobung des vorgesehenen Prüfverfahrens für Fahrzeuge mit Katalysator
von Chr. Albus
80 Seiten, 1993 DM 26,00
- F 5: **Nutzen durch fahrzeugseitigen Fußgängerschutz**
von R. Bamberg und H. Zellmer
56 Seiten, 1994 DM 21,00
- F 6: **Sicherheit von Fahrradanhängern zum Personentransport**
von G.-D. Wobben und H. Zahn
64 Seiten, 1994 DM 24,00
- F 7: **Kontrastwahrnehmung bei unterschiedlicher Lichttransmission von Pkw-Scheiben**
Teil 1: Kontrastwahrnehmung im nächtlichen Straßenverkehr bei Fahrern mit verminderter Tagesschärfe
von P. Junge
Teil 2: Kontrastwahrnehmung in der Dämmerung bei Fahrern mit verminderter Tagesschärfe
von M. Chmielarz und B. Siegl
Teil 3: Wirkung abgedunkelter Heckscheiben - Vergleichsstudie -
von H. Derkum
88 Seiten, 1994 DM 27,00
- F 8: **Anforderungen an den Kinnschutz von Integralhelmen**
von D. Otte, G. Schroeder, J. Eidam und B. Kraemer
32 Seiten, 1994 DM 20,00
- F 9: **Kraftschlußpotentiale moderner Motorradreifen unter Straßenbedingungen**
von M. Schmieder, D. Bley, M. Spickermann und V. von Zettelmann
40 Seiten, 1994 DM 21,00
- F 10: **Einsatz der Gasentladungslampe in Kfz-Scheinwerfern**
von J. Damasky
52 Seiten, 1995 DM 24,00
- F 11: **Informationsdarstellung im Fahrzeug mit Hilfe eines Head-Up-Displays**
von H. Mutschler
124 Seiten, 1995 DM 32,00
- F 12: **Gefährdung durch Frontschutzbügel an Geländefahrzeugen**
Teil 1: Gefährdung von Fußgängern und Radfahrern
von H. Zellmer und M. Schmid
Teil 2: Quantifizierung der Gefährdung von Fußgängern
von H. Zellmer
44 Seiten, 1995 DM 23,00
- F 13: **Untersuchung rollwiderstandsarmer Pkw-Reifen**
von K. Sander
40 Seiten, 1995 DM 22,50
- F 14: **Der Aufprall des Kopfes auf die Fronthaube von Pkw beim Fußgängerunfall**
Entwicklung eines Prüfverfahrens
von K.-P. Glaeser
100 Seiten, 1996 DM 30,00
- F 15: **Verkehrssicherheit von Fahrrädern**
Teil 1: Möglichkeiten zur Verbesserung der Verkehrssicherheit von Fahrrädern
von C. Heinrich und E. von der Osten-Sacken
Teil 2: Ergebnisse aus einem Expertengespräch „Verkehrssicherheit von Fahrrädern“
von F. Nicklisch
220 Seiten, 1996 DM 43,50
- F 16: **Messung der tatsächlichen Achslasten von Nutzfahrzeugen**
von R. Sagerer, K. Wartenberg und D. Schmidt
52 Seiten, 1996 DM 24,00

F 17: Sicherheitsbewertung von Personenkraftwagen

- Problemanalyse und Verfahrenskonzept
von D. Grunow, G. Heuser, H.J. Krüger und
Chr. Zangemeister
136 Seiten, 1996 DM 33,50

F 18: Bremsverhalten von Fahrern von Motorrädern mit und ohne ABS

von J. Präckel
84 Seiten, 1996 DM 28,00

F 19: Schwingungsdämpferprüfung an Pkw im Rahmen der Hauptuntersuchung

von E. Pullwitt
44 Seiten, 1996 DM 22,50

F 20: Vergleichsmessungen des Rollwiderstands auf der Straße und im Prüfstand

von K. Sander
60 Seiten, 1996 DM 24,50

F 21: Einflußgrößen auf den Kraftschluß bei Nässe

von M. Fach
80 Seiten, 1996 DM 27,00

F 22: Schadstoffemissionen und Kraftstoffverbrauch bei kurzzeitiger Motorabschaltung

von B. Bugsel, Chr. Albus und W. Sievert
24 Seiten, 1997 DM 20,00

Zu beziehen durch:
Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Postfach 10 11 10
D-27511 Bremerhaven
Telefon (0471) 9 45 44 - 0, Telefax (0471) 9 45 44 88