
ALTERNATIVEN IM STADTBUSBETRIEB



ABSCHLUSSBERICHT

- Methanolversuch -



Mercedes Benz



Alternativen im Stadtbusbetrieb

Methanolversuch

Projektleitung: Winfried Schneider BVG

Redaktion: Gerhard Schockenhoff BVC

Projektmitarbeit:

Dieter Bartel	BVG
Rudi Tharmann	BVG
Günther Wollny	BVC
Armin Krickau	BVC
Klaus - D. Holloh	MB
Uwe Gärtner	MB
Richard Meier	M.A.N.
Dr. A. Blödorn	SNV
Peter Kinzel	SNV

Das diesem Bericht zugrundeliegende Forschungsvorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministers für Forschung und Technologie unter dem Förderkennzeichen "TV7911" und mit Mitteln des Senators für Wissenschaft und Forschung, Berlin gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Beteiligten und den Autoren.

G L I E D E R U N G

- 1.0 EINLEITUNG
- 1.1 ZUSAMMENFASSUNG

- I. RANDBEDINGUNGEN DES METHANOL-VERSUCHES
- 2.0 ALLGEMEINES
 - 2.1 BETRIEBSHOF/LINIEN/EINSATZ
 - 2.2 INFRASTRUKTUR (TANKSTELLE/WERKSTATT)
 - 2.3 FAHRZEUGKONZEPTE
 - 2.3.1 DAIMLER BENZ
 - 2.3.2 MAN
 - 2.3.2.1 BESCHREIBUNG EINZELNER KOMPONENTEN
 - 2.3.3 ÄNDERUNGEN AN DEN KONZEPTEN
 - 2.3.3.1 ÄNDERUNGEN AM DAIMLER BENZ-MOTORKONZEPT
 - 2.3.3.2 ÄNDERUNGEN AM MAN MOTOR-KONZEPT
 - 2.4 PERSONALSCHULUNG UND EINWEISUNG
 - 2.5 METHANOL-KRAFTSTOFF
 - 2.5.1 ALLGEMEINES
 - 2.5.2 KRAFTSTOFFQUALITÄT
 - 2.5.2.1 METHANOL-KRAFTSTOFF UND MOTOR-KONZEPT
 - 2.5.2.2 SPEZIFIKATION METHANOL-KRAFTSTOFF ÜM 100
 - 2.5.2.3 KONSEQUENZEN FÜR DEN VERSUCH
 - 2.6 PROBLEME DER VERSUCHSDURCHFÜHRUNG
 - 2.6.1 ALLGEMEINES
 - 2.6.2 AUSGANGSSITUATION
 - 2.6.3 RANDBEDINGUNGEN
 - 2.6.4 ERGEBNISERWARTUNGEN
 - 2.6.5 KONSEQUENZEN

- II. WISSENSCHAFTLICHE BEGLEITUNTERSUCHUNGEN
 - 3.0 ALLGEMEINES
 - 4.0 BETRIEBSDATENERFASSUNG
 - 4.1 ERHEBUNG DER BETRIEBSDATEN
 - 4.2 DATENVERARBEITUNG UND AUSWERTUNG
 - 4.3 ALLGEMEINE ERGEBNISSE
 - 4.4 SPEZIFISCHE ERGEBNISSE
 - 4.5 AUSWERTUNG MIT KORRELATION MEHRERER EINGANGSGRÖSSEN
 - 5.0 BETRIEBSSTOFFE
 - 5.1 KRAFTSTOFFVERBRAUCH
 - 5.1.1 DATENERHEBUNGEN
 - 5.1.2 AUSWERTUNG DER VERBRAUCHSDATEN
 - 5.2 MOTORÖLUNTERSUCHUNGEN
 - 5.2.1 VERWENDETE MOTORENÖLE
 - 5.2.2 UNTERSUCHTE KENNGRÖSSEN
 - 5.2.3 ÖLWECHSELFRISTEN
 - 5.2.4 BISHERIGE ERGEBNISSE
 - 5.2.5 AUSBLICK

- 6.0 WERKSTATTDATEN
 - 6.1 DURCHFÜHRUNG DER DATENERHEBUNG
 - 6.1.1 BEGRIFFSBESTIMMUNGEN 'BEANSTANDUNGEN'
 - 6.1.2 BEGRIFFSBESTIMMUNGEN 'WERKSTATTMASSNAHMEN'
 - 6.2 PROBLEME BEI DER ERHEBUNG DER WERKSTATTDATEN
 - 6.3 AUSWERTUNG DER ERHOBENEN DATEN
 - 6.3.1 ALLGEMEINE AUSWERTUNGEN
 - 6.3.2 SPEZIFISCHE AUSWERTUNGEN
 - 6.3.2.1 AUSWERTUNG VON BEANSTANDUNGEN
 - 6.3.2.2 AUSWERTUNG VON WERKSTATTMASSNAHMEN
 - 6.3.3 ZUSATZHEIZGERÄTE
 - 6.3.4 MOTORREPARATUREN
 - 6.3.5 WEITERFÜHRUNG DER VERSUCHSBEGLEITUNG
 - 6.4 STANDFESTIGKEIT
 - 6.4.1 ALLGEMEINES
 - 6.4.2 UNTERSUCHUNG ZUR STANDFESTIGKEIT
 - 6.4.3 ZUSAMMENFASSUNG ZUR STANDFESTIGKEIT
 - 6.5 BESTIMMUNG DES WERKSTATTAUFWANDES
 - 6.5.1 VORGEHENSWEISE
 - 6.5.2 ZUSAMMENFASSUNG UND KONSEQUENZEN
 - 6.6 VERFÜGBARKEIT DER FAHRZEUGE
 - 6.7 UMWELTEINWIRKUNGEN DURCH DIE METHANOL-BUSSE
 - 6.7.1 ABGASEMISSIONEN
 - 6.7.1.1 ALLGEMEINES
 - 6.7.1.2 DISKUSSIONEN VON MÖGLICHKEITEN
 - 6.7.1.3 ERGEBNISSE/KONSEQUENZEN
 - 6.7.1.4 LITERATURANHANG
 - 6.7.2 GERÄUSCHMESSUNGEN
 - 6.7.2.1 ALLGEMEINES
 - 6.7.2.2 DURCHFÜHRUNG DER MESSUNGEN
 - 6.7.2.3 AUSWERTUNG DER MESSUNGEN

- 7.0 AKZEPTANZUNTERSUCHUNGEN
- 7.1 RANDBEDINGUNGEN DER UNTERSUCHUNG
- 7.2 DURCHFÜHRUNG DER AKZEPTANZUNTERSUCHUNG
- 7.3 AUSWERTUNG DER AKZEPTANZUNTERSUCHUNG
 - 7.3.1 ALLGEMEINE AUSWERTUNGEN
 - 7.3.2 ZUSÄTZLICHER AUFWAND BEI DER BEDIENUNG
 - 7.3.3 STARTVERHALTEN DER METHANOL-BUSSE
 - 7.3.4 BEURTEILUNG WEITERER EIGENSCHAFTEN
 - 7.3.5 ZUSÄTZLICHE ANGABEN
 - 7.3.6 VERGLEICHENDE BEWERTUNG VON EIGENSCHAFTEN
 - 7.3.7 AKZEPTANZUNTERSUCHUNG WEITERER GRUPPEN
 - 7.3.8 ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE
- 8.0 BETRIEBSWIRTSCHAFTLICHE BEWERTUNG
 - 8.1 BERECHNUNG DER WIRTSCHAFTLICHKEIT
 - 8.1.1 AUSGABEN ZU BEGINN DES BUS-EINSATZES
 - 8.1.2 LAUFENDE AUSGABEN WÄHREND DES BUS-BETRIEBES
 - 8.1.3 ERGEBNIS

1.0

EINLEITUNG

Störungen in der Versorgung, politische Demonstration von Abhängigkeiten und wissenschaftliche Prognosen zur absehbaren Erschöpfung des Energieträgers 'Mineralöl' haben in den 70er Jahren weltweit zu einer verstärkten Untersuchung von Energie-Alternativen geführt. Besonders deutlich wurden die Konsequenzen für den zu annähernd 100 % vom Mineralöl abhängigen Kraftfahrzeugverkehr. Die daraufhin von der Industrie eingeleiteten Entwicklungsschwerpunkte umfaßten nicht nur Maßnahmen zur Minderung des Energie- bzw. Kraftstoffverbrauchs, sondern auch verstärkt Maßnahmen zur Verwendung anderer Energieformen und Antriebe. In den 80er Jahren wurde in zunehmendem Maße als eine weitere Forderung an das Kraftfahrzeug seine Umweltverträglichkeit gestellt. Im Rahmen der heutigen Mobilität, insbesondere des Personennahverkehrs, nimmt der Stadtbus neben dem Individualverkehr eine besondere Stellung ein. Sein Einsatz selbst in Umweltsituationen, in denen der Individualverkehr nur noch eingeschränkt möglich ist, soll aufrechterhalten bleiben, ohne damit eine Beeinträchtigung der Umwelt zu verstärken. Die Industrie war somit aufgefordert, nach Lösungen zu suchen, die sowohl alternative Kraftstoffe als auch optimierte Antriebssysteme umfaßten. Um die Alltagstauglichkeit der von der Industrie entwickelten Lösungen im realen Liniendienst zu demonstrieren, wurde mit Hilfe des Bundesministers für Forschung und Technologie, des Senators von Berlin und der Berliner Verkehrs-Betriebe (BVG) ein Forschungsvorhaben mit

dem Titel 'Alternativen im Stadtbusbetrieb' initiiert. Vornehmliche Zielsetzung dieses Vorhabens war die Praxiserprobung von Versuchsträgern und die parallele Erhebung und Auswertung von Erfahrungen zu ihrem technischen Stand. Als Vergleichsbasis war der heute verwendete Diesel-Bus zu sehen.

Als erster Teilaspekt innerhalb des Forschungsvorhabens wurde der Methanol-Versuch durchgeführt. Zwei voneinander unterschiedliche Motorkonzepte, die mit Methanol-Kraftstoff betrieben wurden, waren in je 7 Bussen im Linieneinsatz bei der BVG über einen Zeitraum von 3 Jahren zu erproben. Schwerpunkte der vergleichenden Bewertungen sollten in den aufzuwendenden laufenden Kosten, der Akzeptanz dieser Konzepte durch alle Beteiligten und einer Bewertung der Fahrzeuge im Gesamtzusammenhang des Fahrzeugverkehrs liegen. Betriebsbegleitend waren alle relevanten Daten zu erheben und auszuwerten, so daß im Erprobungszeitraum eine ausreichende Datenbasis für eine abschließende Beurteilung geschaffen werden konnte.

Durch den sehr hohen Entwicklungsstand der heutigen Diesel-Busse konnte für die in vergleichbar geringer Entwicklungszeit gebauten Antriebs-Alternativen ein nicht gleichwertiger technischer Standard erwartet werden. Dennoch konnte nur durch eine Praxiserprobung der noch bestehende Unterschied ermittelt bzw. aufgezeigt werden.

1.1

ZUSAMMENFASSUNG

Schwindende Ressourcen des heute zu hohem Anteil eingesetzten Energieträgers Mineralöl, aber auch zunehmende Belastungen unserer Umwelt, machen eine Untersuchung alternativer Möglichkeiten für einen Ersatz des Mineralöls erforderlich. Bei einer Verknappung würde von allen Verbrauchern an Mineralöl besonders der Straßenverkehr betroffen sein, da er zu annähernd 100 % abhängig vom Energieträger Mineralöl ist. So ist es logische Konsequenz, daß Forschungsleistung gerade hier eingesetzt werden muß. Aber selbst innerhalb des Sektors Straßenverkehr müssen Prioritäten gesetzt werden, um auch für die Zukunft eine Mobilität der Menschen sicherzustellen. Damit kommt gerade dem Stadtbus im öffentlichen Nahverkehr im Rahmen von Untersuchungen alternativer Kraftstoffe und alternativer Antriebe eine wichtige Rolle zu.

Mit der Zielsetzung, von der Industrie bereits realisierte Lösungsansätze aus dem Forschungsstadium herauszunehmen und in einem realen Praxisbetrieb zu erproben, wurde in einem Zeitraum von 3 Jahren mit der Unterstützung des Bundesministers für Forschung und Technologie (BMFT), des Senats von Berlin und der Berliner Verkehrs-Betriebe (BVG) sowie der Hersteller DB und MAN ein Linienbetrieb mit Stadtbussen, die mit Methanol-Motoren angetrieben wurden, durchgeführt. Eine Flotte von insgesamt 14 Bussen (je 7 Busse der Herstellerfirmen DB und MAN) wurde in den normalen Betriebsablauf der BVG, dies bedeutet Linieneinsatz sowie Wartung und Reparatur, integriert. Die Erfahrungen sollten den technischen Stand der Fahrzeuge auf-

zeigen und die aufzuwendenden Betriebskosten gegenüber dem Diesel-Bus ermittelt werden.

Im Rahmen des 3-jährigen Betriebseinsatzes der Methanol-Busse konnten insgesamt ca. 2 Mio. km im Liniendienst zurückgelegt werden, dies sind ca. 80 % der vergleichbaren Laufstrecken, die von den Diesel-Bussen im Liniendienst der BVG im gleichen Zeitraum erbracht werden. Bei einer eingrenzenden Betrachtung von Reparaturen am Motor lag im Zeitraum des Betriebseinsatzes die Verfügbarkeit der Methanol-Busse im Mittel bei 92,5 %. Unter gleichen Randbedingungen lag die Verfügbarkeit eines Diesel-Busses bei 94,5 %.

Trotz einer Vorerprobung der Methanol-Motorkonzepte, die ebenfalls bei der BVG durchgeführt wurde, war der 3-jährige Betriebseinsatz der Busflotte begleitet von Problemen und Ausfällen einzelner Baugruppen und -teile. Überwiegend waren es Bauteile, die gegenüber dem Methanol-Kraftstoff oder seinen Dämpfen nicht ausreichend resistent waren. Qualitätsprobleme einer Kleinserie, aufgrund schlechter Prioritäten im Produktionsablauf, wurden bei Zulieferteilen erkennbar, so daß eine beachtliche Anzahl von Störungen (teilweise auch wissentlich) in Kauf genommen werden mußte, bis ein Bauteil eine tragbare Standfestigkeit aufwies. In Einzelfällen zeigte sich darüber hinaus eine hohe Sensibilität der erprobten Systeme bei Ausfällen bestimmter Bauteile. Durch Störungen in Baugruppen, die vor oder hinter dem Brennraum des Motors montiert waren, entstanden Folgeschäden an Kolben und Zylindern. Durch schrittweise Analyse der Zusammenhänge konnte Abhilfe für die Störungen gefunden werden.

Obwohl die Integration der Methanol-Busse in den Betriebsablauf der BVG zunächst auf Probleme stieß, weil keinerlei Erfahrungen mit diesem Kraftstoff vorlagen, bestanden nach der Überwindung der ersten Einwände kaum noch Unterschiede im Umgang zu den Diesel-Bussen. Ein Arbeitsplatz innerhalb des Werkstattbereiches wurde mit einer Absauganlage mit Umluftfilter zur Absaugung der Abgase bei Einstellarbeiten mit laufendem Motor ausgerüstet. Aus einer kleinen Gruppe von Mechanikern, die zunächst zur Reparatur der Busse eingesetzt war, wuchs durch Personalfluktuation der Kreis der für die Reparatur von Methanol-Bussen geschulten Mechaniker im Verlauf des Betriebszeitraumes.

Der Auswertung einzelner Angaben zur Akzeptanz der Methanol-Busse durch die Fahrer kann eine hohe Zustimmung entnommen werden. Anfängliche Vorbehalte wurden im Laufe des Betriebseinsatzes gegenstandslos. Ein subjektiver Vergleich verschiedener Fahrzeugeigenschaften beim Methanol-Bus und beim Diesel-Bus führte weitgehend zu positiven Angaben für den Methanol-Bus. Lediglich beim Startverhalten mit kaltem Motor geht der Vergleich zu Lasten der Methanol-Busse.

Der unmittelbare Umgang mit dem Methanol-Kraftstoff an der eigens für das Vorhaben errichteten Methanol-Tankstelle bereitete keine nennenswerten technischen Probleme. Lediglich bei der Einführung einer halbautomatischen Tankdatenerfassung kam es durch ungewohnte Eingabemodalitäten zu häufigen Störungen. Eine im Verlauf des Vorhabens verbes-

serte vollautomatische Datenübergabe mit Buserkennung stellte eine spürbare Entlastung für das Tankstellenpersonal dar. Im Zuge der für Vergaserkraftstoffe an Tankstellen vorgesehenen Verminderungen von Kohlenwasserstoffemissionen erscheint auch für die Betankung mit Methanol-Kraftstoff ein Beitrag zum Umweltschutz durch Gaspendingung möglich.

Der werkstattseitige Aufwand für die auf den Motor und seine Komponenten begrenzten Reparaturen war spürbar geprägt von Merkmalen eines Versuchsbetriebes. Dies bedeutet teils eine erheblich höhere Sensibilität gegenüber subjektiv empfundenen Störungen, aber auch ein Betrieb von Bussen mit bekannten Schwachstellen. Um die Busse in einem solchen Fall nicht stilllegen zu müssen, wurden sie teilweise weiter im Linienbetrieb eingesetzt.

Eine für die Bewertung ausreichende Aussage kann dagegen zum erforderlichen 'Wartungsaufwand' der Fahrzeuge der Firma MAN gemacht werden. Eine Gegenüberstellung der aufzuwendenden Zeiten für die Wartung von Diesel- und Methanol-Bus ergibt einen zu erwartenden Mehraufwand für den Methanol-Bus von 6.2%. Dieser Mehraufwand liegt in erster Linie im häufigen Wechsel der Zündkerzen begründet.

Bedingt durch den geringeren Heizwert des Methanol-Kraftstoffes sind die verbrauchten volumetrischen Mengen um das 2,2-Fache höher als bei einem Diesel-Bus. Allerdings hat die Auswertung der differenzierten Betriebsdatenaufzeichnungen von einigen Bussen gezeigt, daß der Kraftstoffverbrauch in starkem Maße vom Fahrer und den Trans-

portbedingungen abhängt. Verbrauchsunterschiede mit dem gleichen Bus auf den gleichen Linien an verschiedenen Tagen sind erheblich. Dieses Ergebnis zeigt einmal mehr die Notwendigkeit eines geeigneten Testverfahrens, mit dem reproduzierbare Vergleichsergebnisse erzielt werden können. Dies gilt ebenso für vergleichende Aussagen zu den Abgasemissionen. Es gibt heute noch kein Meßverfahren, welches die besonderen Betriebsbedingungen eines Stadtbusses ausreichend berücksichtigt. Vom Verbrennungsverfahren her weist der Dieselmotor bereits geringe Schadstoffkonzentrationen bei den gesetzlich limitierten Bestandteilen aus. Lediglich die Rußpartikel bzw. Anlagerungen an diese Partikel stehen im Verdacht, kanzerogen zu sein. In der Diskussion um den Partikelaustritt von Dieselmotoren zeigt sich der Methanol-Motor als eine Alternative für den Stadtbus. Entsprechend einer eher mit dem Otto-Prinzip vergleichbaren Verbrennung des Methanol-Kraftstoffes ist auch das Abgas des Methanoldotors praktisch partikelfrei. Eine Nachbehandlung des Abgasstromes mittels Oxydationskatalysator vermindert die gesetzlich limitierten Schadstoffkomponenten auf Werte, die unterhalb denen eines Dieselmotors liegen. Somit erfüllen Methanol-Busse bereits heute die strengen Vorschriften für Californien, die für das Jahr 1994 angestrebt werden. Noch nicht ausreichend untersucht ist die gesundheitliche Bedeutung der bisher noch nicht limitierten Schadstoffkomponenten, wie z.B. Aldehyde. Da sie allerdings Bestandteil der emittierten Kohlenwasserstoffe sind, werden durch den Katalysator die auftretenden Mengen auch anteilig vermindert.

Der weichere Verbrennungsverlauf beim Methanol-Motor vermindert die Geräuschemission der Methanol-Busse gegenüber einem vergleichbaren Diesel-Bus spürbar. Umfangreiche Messungen zeigen zum Teil erheblich geringere Geräuschemissionen als bei einem Diesel-Bus.

Aus betriebswirtschaftlicher Sicht weist der Methanol-Bus gegenüber dem Diesel-Bus aus heutiger Sicht einige Nachteile auf. Bei allen Randbedingungen treten die Preise für den Methanol-Kraftstoff in den Vordergrund. Abgesehen von der Situation, daß Kraftstoffe aus Mineralöl aufgrund schwindender Ressourcen nicht mehr zur Verfügung stehen, kann bei einer volumetrischen Abrechnung des Energieverbrauches die Methanol-Technologie den Standard eines Diesel-Busses aus derzeitiger Sicht noch nicht erreichen. Eine monetäre Bewertung der Vorteile bei Abgas- und Geräuschemissionen der Methanol-Busse konnte nicht getroffen werden.

Nach dem offiziellen Abschluß des Teilvorhabens 'Methanol-Busse' wurden die Fahrzeuge der Firma DB auf Dieselbetrieb zurückgerüstet. Die Fahrzeuge der Firma MAN blieben weiterhin im Betriebseinsatz. Die in der Demonstrationsphase aufgetretenen Schwachstellen und Störungen wurden konsequent analysiert und durch unterschiedliche Maßnahmen beseitigt bzw. minimiert. Eine Modifizierung der Zündkerzen, der Zündanlage, der Kraftstoffversorgung und der Abgasführung haben im aufrechterhaltenen Betriebseinsatz ihre Tauglichkeit zeigen können.

Zusammengefaßt konnten die Methanol-Busse in ihrem 3-jährigen Praxisbetrieb im Linieneinsatz weit mehr als ihre Funktionstüchtigkeit beweisen. Die aufgrund der Erfahrungen vorgenommenen Veränderungen am Konzept haben überwiegend zu einer Stabilisierung der Betriebssicherheit geführt und somit eine für einen Versuchsbetrieb relativ hohe Verfügbarkeit der Busse erreichen lassen. Für den Versuchsbetrieb kann die Standfestigkeit der Methanol-Motoren als zufriedenstellend angesehen werden. Es wäre dennoch wünschenswert und scheint sinnvoll, den Betrieb der Busse allein schon im Hinblick auf erreichbare Standfestigkeiten und Fragen des Verschleißes weiterzuführen.

I. RANDBEDINGUNGEN DES METHANOL-VERSUCHES

2.0 ALLGEMEINES

Vor der Praxiserprobung mit einer Flotte von 14 Methanol-Bussen im Liniendienst der BVG wurden erste Erfahrungen mit je 1 Prototyp der beiden zur Erprobung vorgesehenen Fahrzeugkonzepte (Daimler Benz und MAN) ebenfalls bei der BVG gesammelt.

Im Jahr 1981 kam ein MAN-SL 200, im Jahre 1982 ein Daimler Benz O 305 mit Standort Berlin-Lichterfelde zum Einsatz. Da zu diesem Zeitpunkt bei der BVG noch keine Werkstatterfahrungen mit den neuen Systemen vorlagen, wurden die methanolspezifischen Wartungs- und Reparaturarbeiten noch vom zuständigen Herstellerservice durchgeführt. Die Betankung der Busse mit Methanol-Kraftstoff erfolgte an einer im Zusammenhang mit einem parallel durchgeführten Demonstrationsvorhaben (Alternative Energien M 100) eingerichteten Methanol-Tankstelle. Während des insgesamt positiven Ablaufes der Vorerprobung konnte nach Laufleistungen von über 100.000 km anwenderseitig eine Entscheidung zugunsten eines Referenzbetriebes getroffen werden. Unter projektbezogener Berücksichtigung der methanolspezifischen Fahrzeugausrüstungen wurde im Jahre 1985 die geplante Versuchsflotte von 14 Methanol-Bussen von der BVG bestellt und zum Jahresende 1985 von den Herstellern ausgeliefert. Beide Busse des Vorversuchs wurden im Rahmen abschließender Vorbereitungen für den weiteren Versuch wieder an die Hersteller zurückgegeben.

Der Einsatz der 14 Methanol-Busse im Liniendienst der BVG sollte weitgehend frei von innerbetrieblichen Einflüssen und innerhalb des Erprobungszeitraumes möglichst häufig erfolgen. Die jährlichen Laufstrecken sollten mit denen der Diesel-Busse vergleichbar sein.

Bei einem Fahrzeugbestand der BVG von 1.005 Doppeldeckbussen und 'nur' 310 Eindeckbussen, die überwiegend als 'Einsatzwagen' betrieben werden, blieb ein kontinuierlicher Betrieb der 14 Methanol-Busse weitgehend beschränkt auf Linien, deren Linienführung aufgrund niedriger Brückendurchfahrten nur Eindeckbusse zuließen.

Die laufende Wartung und die Reparaturen sollten - vergleichbar denen an den Diesel-Bussen - ebenfalls beim Anwender, der BVG, ausgeführt werden. Damit mußte eine Integration der Eigenheiten der Methanol-Busse in den Werkstattablauf vorgenommen werden.

Einbezogen in den Betrieb der Versuchsflotte war die Versorgung mit Methanol-Kraftstoff. Hierzu war die Errichtung einer eigenen Methanol-Tankstelle erforderlich.

2.1 BETRIEBSHOF/LINIEN/EINSATZ

Im Gegensatz zu der gesamten Autobusflotte der BVG, die dezentral auf 7 Betriebshöfen innerhalb des Stadtgebietes von Berlin stationiert ist, mußte die Fahrzeugflotte der 14 Methanol-Busse in

erster Linie aufgrund der Kraftstoffversorgung auf einem Betriebshof betrieben werden. Durch die im Berliner Stadtgebiet topographisch ausgeglichene Geländestruktur und die von den Buslinien nahezu gleichartige Erschließung von städtischem Kerngebiet im Wechsel mit Vorortbereichen, war eine besondere regionale Zuordnung der Versuchsflotte und damit eine bevorzugte Auswahl des Betriebshofes nicht erforderlich. Wesentlich aus dem Grunde eines möglichst ständigen Einsatzes der Methanol-Busse wurde als Standort der Flotte der Autobusbetriebshof Spandau ausgewählt, da hier die Randbedingungen für die Versuchsdurchführung am günstigsten waren (Bild 2.1).

Als weiterer Aspekt zur Standortwahl waren die gegenüber im Stadtgebiet zentraler gelegenen Betriebshöfen im Mittel tieferen Temperaturen im Winter zu sehen. Bei einer Abstellung der Busse im Freien waren besondere Erfahrungen über die Kaltstarteigenschaften der Busse zu erwarten.



Bild 2.1: Einsatzgebiet der Versuchsflotte

2.2 INFRASTRUKTUR (TANKSTELLE/WERKSTATT)

Gegenüber der Vorerprobung, bei der die Methanol-Busse durch eine im Rahmen eines weiteren Forschungsvorhabens (Alternative Energien M 100) erstellten Tankmöglichkeiten mit Kraftstoff versorgt wurden, war für die Flotte der 14 Methanol-Busse eigens eine Tankstelle auf dem Gelände des Betriebshofes Spandau zu errichten (Bild 2.2). Hierdurch wurde nicht nur die Versorgung der Busse mit Kraftstoff sichergestellt, sondern es konnten ebenfalls Erfahrungen mit dem Betrieb der Tankstelle und der Logistik gewonnen werden.

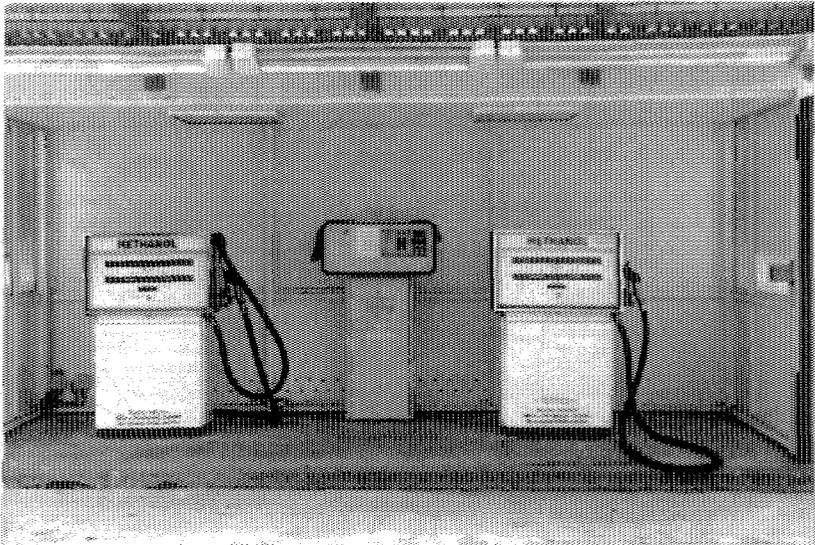


Bild 2.2: Neu errichtete Methanol-Tankstelle

Mit der Baumaßnahme für die Tankstelle wurden alle innerbetrieblichen Vorgaben und auch behördlichen Auflagen zur Erfüllung sicherheitstechnischer Erfordernisse gegenüber Methanol-Kraftstoff berücksichtigt. So mußten unter anderem die zusätzliche Aufstellung eines leistungsstarken Löschwasserhydranten und aufwendige Tiefbauarbeiten für den Wasseranschluß durchgeführt werden.

Um für einen störungsfreien Betriebsablauf eine ausreichende Kraftstoffmenge vorhalten zu können, wurde die Methanol-Tankstelle durch einen Erdtank von 100.000 l mit einer vergleichsweise große Vorratskapazität ausgestattet. Die Tankanlage wurde zunächst mit einem Datenterminal zur halbautomatischen Tankdatenerfassung versehen. Mittels Magnetkarte, die durch eine entsprechende Codierung jeweils nur einem Bus zugeordnet war, wurde das Fahrzeug identifiziert. Nach der manuellen Eingabe des aktuellen km-Standes wurde das Zapfventil freigegeben und der Bus konnte betankt werden. Die getankte Kraftstoffmenge wurde mit den fahrzeugbezogenen Daten auf Magnetband und einem Druckerstreifen dokumentiert. Verschiedentlich aufgetretene Beschädigung an Magnetkarten, die der Kartenleser nicht akzeptierte, wurden in der Notlage mit Magnetkarten anderer Fahrzeuge getauscht. Hierdurch kam es zu fehlerhaften Aufzeichnungen, die nachträglich korrigiert werden mußten. Aus diesem Grunde wurde zu einem späteren Zeitpunkt die Fahrzeugbetankung voll automatisiert. Jedes Fahrzeug erhielt eine Induktionsschleife, durch die über einen Sender die Fahrzeugkennung und der aktuelle km-Stand zu einem Empfänger an dem Zapfventil übertragen wurde.

Um bei einem technischen Ausfall der Zapfsäule die Versorgung der Busse mit Kraftstoff sicherzustellen, wurde eine zweite Zapfsäule installiert.

Weiterhin mußte eine auf das Motor-Konzept der Methanol-Busse abgestimmte Kapazität im Wartungs- und Reparaturbereich des Betriebshofes eingerichtet werden. Als wichtige Voraussetzung hierzu waren im Zuge der Versuchsvorbereitungen Sicherheitsvorkehrungen im Hinblick auf formale Risiken durch den Methanol-Kraftstoff selbst, als auch durch seine Dämpfe und Abgase zu treffen. Vor allem mußte dafür Sorge getragen werden, daß kritische Stoffkonzentrationen durch wirksame Be- und Entlüftung der Arbeitsräume vermieden wurden. Die im Werkstattbereich des Betriebshofes Spandau für Arbeiten an methanolspezifischen Komponenten der Versuchsbusse vorbereiteten zwei Arbeitsgruben wurden mit einer explosionsgeschützten Absauganlage mit chemisch-aktiver Umluftfilterung und zusätzlichem Saugrüssel für den Anschluß an den Auspuffstutzen ausgestattet (Bild 2.3). Zur Abwendung von Gefahren bei Kraftstoffleckagen oder ähnlichen Störfällen, war an der Arbeitsstelle ein Gas-Spürgerät fest installiert. Mit einem weiteren portablen Meßgerät konnte ortsunabhängig in der Werkstatthalle eventuell auftretender Methanoldampf in der Umgebungsluft erfaßt werden.

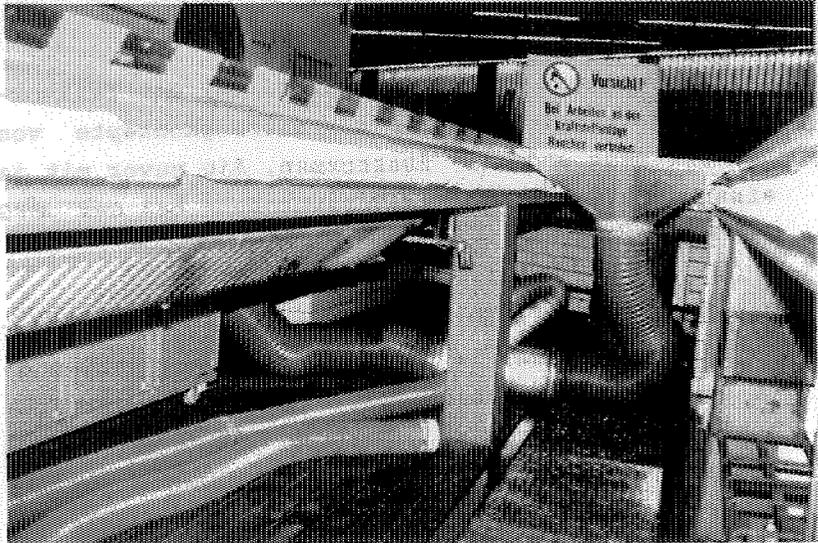


Bild 2.3: Absauganlage mit Umluftfilter

Als weitere Maßnahme zur Sicherheit wurden bei den Reparaturarbeiten großflächige Warntafeln (Rauchverbot, u.ä.) neben den speziell ausgerüsteten Arbeitsplätzen aufgestellt. Generell wurde vom Sicherheitswesen der BVG darauf geachtet, daß durch die Einhaltung einschlägiger Arbeitsschutzbestimmungen das Auftreten kritischer Methanol-Konzentrationen sowohl in toxischer als auch in sicherheitstechnischer Hinsicht ausgeschlossen waren.

2.3

FAHRZEUGKONZEPTE

Mit nur wenigen Änderungen wurden für das Teilvorhaben Methanol-Versuch die Fahrzeugkonzepte von Daimler Benz und MAN übernommen, die zuvor mit je einem Bus im Rahmen der Vorerprobung bei der BVG eingesetzt waren.

Die Ausgangsbasis für die Methanol-Motoren beider Hersteller war der im Standardlinien-Bus verwendete Diesel-Motor. Beide Hersteller paßten ihr Konzept diesen Motoren an. Darüber hinaus waren vereinzelt Änderungen in der Motorperipherie erforderlich. Im folgenden werden die Konzeptüberlegungen und Motor- bzw. Fahrzeugänderungen der Hersteller kurz beschrieben.

2.3.1

DAIMLER BENZ

Reinmethanol ist aufgrund seiner chemischen Eigenschaften als Kraftstoff nur für ein Fremdzündverfahren (Ottomotor) geeignet. Da Methanol im Gegensatz zum Diesel-Kraftstoff eine hohe Klopfestigkeit, nur einen Siedepunkt bei 65 °C (Diesel-Kraftstoff hat einen Siedebereich von 180 bis 350 °C) hat und zur Verdampfung eine große Wärmemenge erforderlich benötigt, wurde von DB als Konzept der 'Alkohol-Gas-Antrieb mit Energierückgewinnung entwickelt.

Ein Vergleich der Energieabgabe von einem konventionellen Otto-Motor und einem Alkohol-Gas-Motor ist im Bild 2.4 dargestellt.

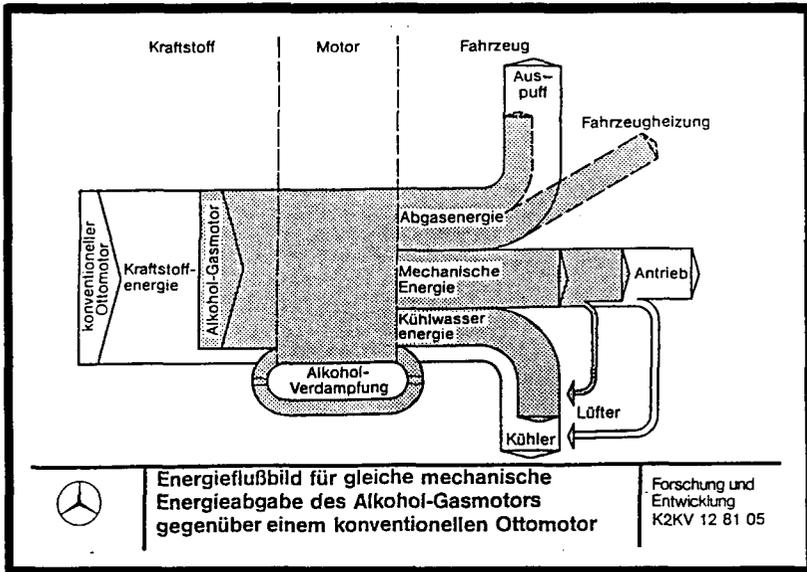


Bild 2.4: Energieflußbild (DB)

Bei dem entwickelten Konzept wird Methanol durch das Motorkühlwasser verdampft und der Kraftstoffdampf einem Gas-Motor zugeführt. Durch diese Verdampfung wird die nutzbare Energie des Kraftstoffes erhöht und die vom Fahrzeugkühler abzuführende Wärme vermindert, d.h. ein Teil der Verlustenergien wird zurückgewonnen (Bild 2.4). Das Gas-Motoren-Prinzip führt zu einem sehr leisen und schadstoffarmen Betriebsverhalten. Außerdem kann -im Gegensatz zu üblichen (Benzin-) Otto-Motoren - mit sehr magerem Gemisch gefahren werden, so daß im oberen Lastbereich eine reine Qualitätsregelung mit entsprechenden Verbrauchsvorteilen wie beim Diesel-Motor anwendbar ist. Das Aufbauschema dieses Motorenkonzeptes ist in Bild 2.5 dargestellt.

- Zylinderkopf: - Molybdänlegierter Grauguß
- Füllungsoptimierter Einlaßkanal im Gegensatz zum
- Hochwarm- und verschleißfeste Ventile und Ventil-Sitzringe
- Aufnahme für Standard-Zündkerzen (Kurzgewinde) anstelle der Einspritzdüse
- Zündanlage: - Kontaktloser Zündverteiler, direkt angetrieben, anstelle der Einspritzpumpe
- Zündkabel anstelle der Einspritzleitungen
- Regulierung: - Kombinierte Qualitäts-/Quantitätsregulierung mit lastabhängiger Verstellung des Zündzeitpunktes
- elektrischer Enddrehzahlregler
- Schubabschaltung (Sperrn der Gaszufuhr im Schubbetrieb), (Bild 2.6)
- Ansaugsystem: - Gas-Motor-Saugrohr mit Drosselklappe
- Gas-Mischer, Leerlaufregler, (Bild 2.7)
- Anschluß für Kurbelgehäuseentlüftung vor Drosselklappe und Ansaugung Luftpresseur vor Gas-mischer
- Auspuff: - Hochwarmfester Werkstoff (SiMo-legierter Sphäroguß)
- Krümmer für Zylinder 1 bis 3 mit zusätzlichem Ausgang zum Abgaswärmetauscher und Auspuffklappe zum Umschalten.

Zum Betrieb mit dem Alkohol-Gasmotor M407hGO wurde der Stadtbus 0305 in folgenden Punkten verändert:

- Kraftstoff-
system:
- Tanks aus Edelstahl
 - methanolbeständige Leitungen und Filter
 - elektrische Kraftstoffpumpe
 - Methanol-Verdampfer, (Bild 2.8)
- Kühlwasser-
system:
- zusätzlicher wärmeisolierter Wasserkreislauf für Methanol-Verdampfer
 - methanolbetriebenes Fremdheizgerät wärmeisoliert
 - Thermostat zur Kopplung von Motor- und Verdampferkreislauf
 - thermostat geregelter Vorlauf zur Frontheizung
- Abgassystem:
- Abgaswärmetauscher
 - Oxidationskatalysator
 - Edelstahlleitungen zwischen Motor und Schalldämpfer
- Elektrik:
- Steuergeräte für Enddrehzahlregelung, Leerlaufregelung und Schubabschaltung
 - Verdampfer-Niveauregelung
 - Thermostalter im Kühlwassersystem.

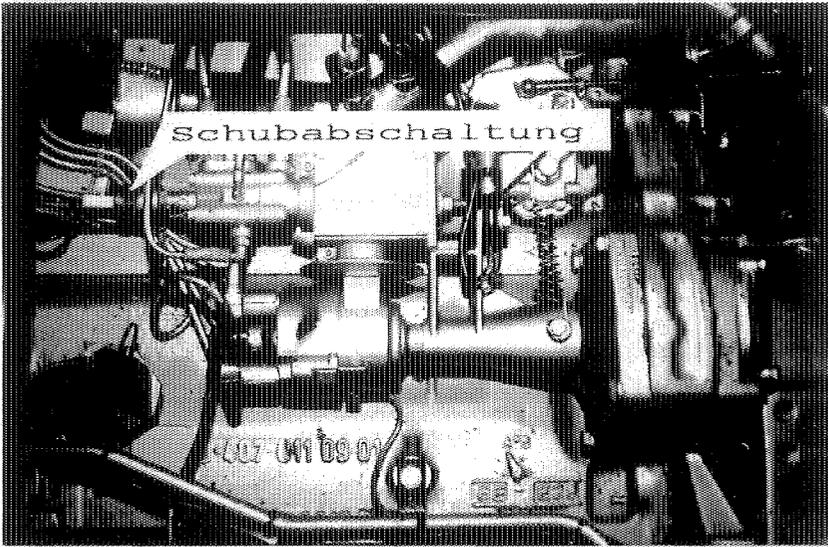


Bild 2.6

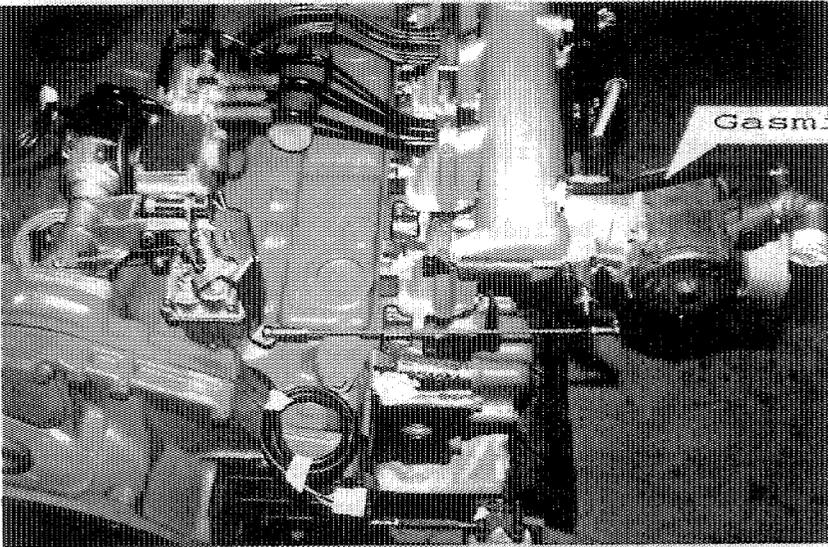


Bild 2.7

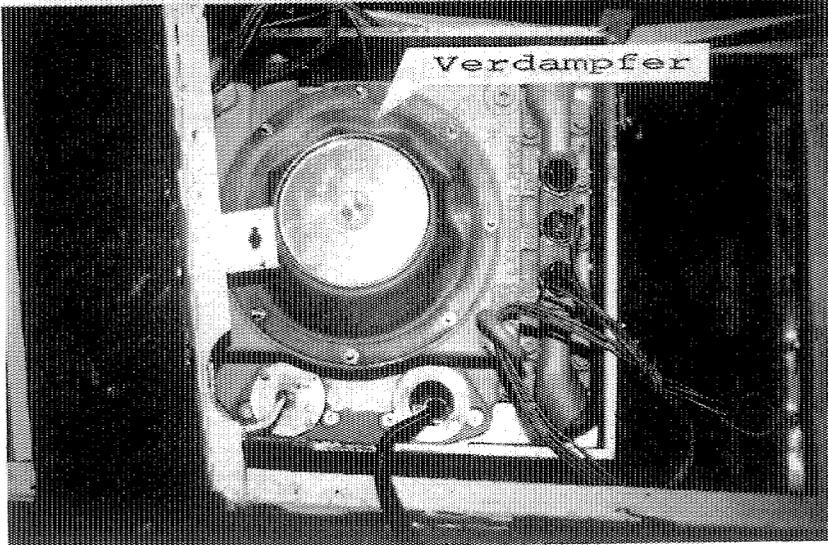


Bild 2.8

2.3.2 MAN

Der MAN-Methanol-Motor M 2566 UH wurde vom serienmäßigen MAN-Diesel-Motor D 2566 MUH abgeleitet und ist weitgehend baugleich mit diesem.

Die Verdichtung von 18 : 1 sowie die direkte Kraftstoffeinspritzung in den Brennraum und die Leistungsregulierung ohne Drosselklappe wurden vom Diesel-Motor übernommen.

An die Stelle der Selbstzündung tritt die Fremdzündung des Methanol-Kraftstoffes, da dieser mit einer Cetanzahl von 5 sehr selbstzündungsunwillig ist. Die Fremdzündung erfolgt mit Hilfe einer Hochspannungskondensatorzündanlage und Zündkerzen.

Der Motorbrennraum befindet sich im Kolben (Bild 2.9). Zündkerze und Einlocheinspritzdüse sind im Zylinderkopf eingeschraubt und ragen in den Brennraum hinein. Die Anordnung im Brennraum ist diametral.

Der Motor saugt reine Luft an und verdichtet diese auf dem Diesel-Motor vergleichbare Drücke. Gegen Ende des Verdichtungstaktes wird durch die Einlocheinspritzdüse Methanol-Kraftstoff in Richtung Brennraumwand in der Nähe der Zündkerze gespritzt, dort an der Brennraumwand angelagert und teilweise mit Luft verwirbelt.

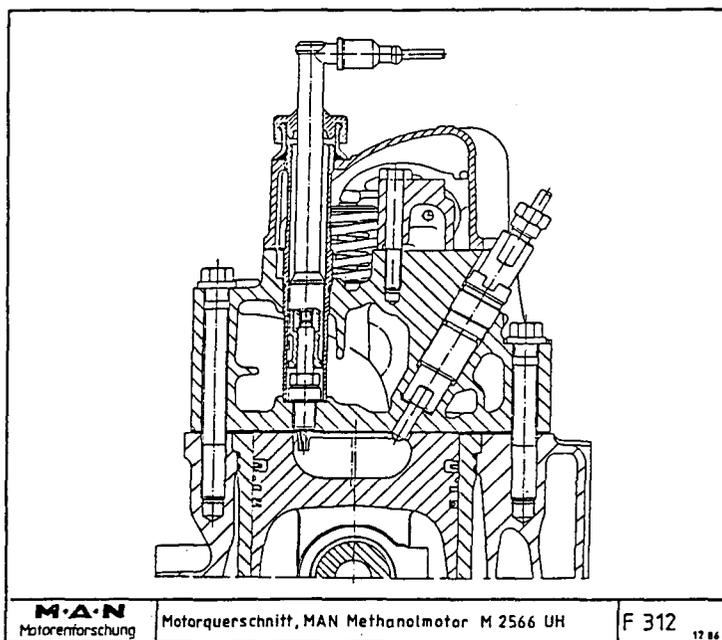


Bild 2.9: Motorquerschnitt (MAN)

Das Methanol-Luftgemisch wird durch die Gasbewegung im Brennraum zu den Zündkerzenelektroden transportiert und dort zum Zündzeitpunkt durch Funkenüberschlag zwischen den Elektroden entzündet. Durch die verzögert von der Brennraumwand abdampfende Hauptkraftstoffmenge ergibt sich eine schichtweise Verbrennung mit geringem Verbrennungsgeräusch.

Durch den speziell ausgebildeten Brennraum und die Form der Zündkerzenelektroden ist eine gute Entzündung auch bei unterschiedlichsten Betriebsbedingungen gewährleistet.

Der Methanol-Motor M 2566 UH ist mit einem Oxidationskatalysator ausgestattet, der Kohlenwasserstoff- (einschließlich der Aldehyde) und Kohlenmonoxidemissionen weitgehend eliminiert. Auch die NO_x -Emissionen sind gegenüber einem Diesel-Mo-

Das Abgas des Methanol-Motors ist rußfrei und im Vergleich zu dem des Diesel-Motors sehr partikelarm.

2.3.2.1 BESCHREIBUNG EINZELNER KOMPONENTEN

MOTORÜBERWACHUNGSSYSTEM

Zur Erhöhung der Funktions- und Betriebssicherheit wurde der Bus mit einem automatisiertem Motorbedien- und -überwachungssystem ausgerüstet (Bild 2.10). Es soll den Motorstart und das Abstellen des Motors übernehmen sowie den Motorbetrieb überwachen und bei Unregelmäßigkeiten den Motor selbsttätig abstellen.

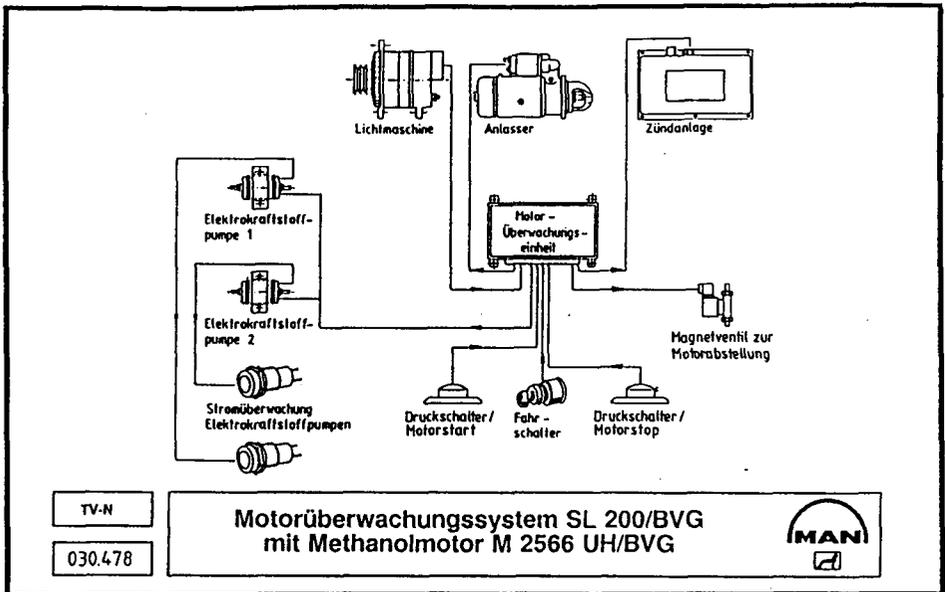


Bild 2.10: Motorüberwachungssystem (MAN)

Die Motorüberwachungseinheit verarbeitet Eingabebefehle des Fahrers und Funktionssignale bestimmter Motorkomponenten. Sie erteilt daraufhin Funktionsbefehle an bestimmte Motorkomponenten.

Eingabesignale von:

- Fahrschalter
- Druckschalter/Motorstart
- Druckschalter/Motorstop
- Lichtmaschine

Ausgabesignale an:

- Elektrokraftstoffpumpen für Motor
- Störanzeigen Elektrokraftstoffpumpen für Motor
- Anlasser
- Zündanlage
- Magnetventil zur Motorabstellung

Mit Einschalten des Fahrschalters laufen die beiden Elektrokraftstoffpumpen an. Wird kein Motorstart eingeleitet, werden diese nach 20 sec durch die Motorüberwachungseinheit wieder stillgesetzt.

Unmittelbar nach Einschalten des Fahrschalters kann der Motor durch Betätigen des Druckschalters/Motorstart gestartet werden.

Die Lichtmaschine signalisiert der Motorüberwachung über die Ladespannung den Selbstlauf des Motors. Das Anlasserritzel wird daraufhin ausgespart. Wird ein vorgegebener Spannungs-Schwellenwert nicht überschritten, so bricht die Motorüberwachungseinheit den Startvorgang nach maximal 20

Sekunden ab. Ein erneuter Startversuch kann durch Wiederbetätigung des Druckschalters/Motorstart eingeleitet werden.

Der Methanolmotor wird wie ein herkömmlicher Dieselmotor abgestellt. Durch Auslösen des Druckschalters/Motorstop wird der Füllungshebel der Einspritzpumpe mittels eines Druckluftzylinders bis zum völligen Stillstand des Motors in Stopstellung gehalten.

Der Ausfall einer der im Dauerbetrieb laufenden Elektrokraftstoffpumpen wird dem Fahrer durch ein Lichtsignal angezeigt. Die Betriebsbereitschaft des Fahrzeuges ist durch den Ausfall einer Pumpe nicht beeinträchtigt.

KRAFTSTOFFANLAGE

Zwei hydraulisch parallel geschaltete Elektrokraftstoffpumpen saugen den Kraftstoff über Kraftstoffvorfilter aus dem Fahrzeugtank und fördern diesen über den Kraftstoffhauptfilter direkt in den Saugraum der Einspritzpumpe. Die beim Dieselmotor übliche mechanische Förderpumpe entfällt. Das Überströmventil am Austritt der Einspritzpumpe öffnet bei einem Saugraumdruck von 3 bar; der nicht für die Motorverbrennung benötigte Kraftstoff fließt über die Rücklaufleitung drucklos in den Fahrzeugtank zurück (Bild 2.11).

Nach dem Abstellen des Motors und der Elektrokraftstoffpumpen schließen das als Druckhalteventil ausgelegte Überströmventil und die in den Elektrokraftstoffpumpen eingebauten Rückschlagventile, wodurch ein Staudruck von ca. 1,5 bis 2,0 bar im Kraftstoffsystem aufgebaut wird. Der Stau-

druck bewirkt, daß selbst bei heiß abgestelltem Motor sich keine Dampfblasen im Saugraum der Einspritzpumpe bilden können. Ein Sofortstart ist jederzeit möglich.

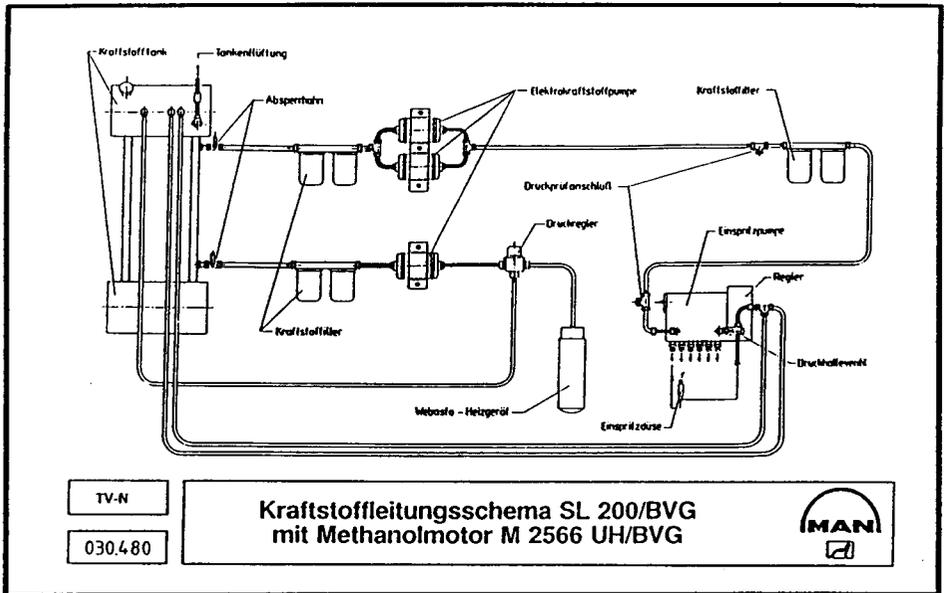


Bild 2.11: Kraftstoffsystem (MAN)

ZÜNDANLAGE

Das Zündsteuergerät wird mit der Bordspannung von 24 Volt versorgt. Die Versorgungsspannung des Hallensors, über eine Steuerleitung mit dem Zündsteuergerät verbunden, beträgt 8 Volt.

Beim Passieren der im Schwungrad eingelassenen Signalmagneten oder des Resetmagneten bricht eine im Hallsensor erzeugte Steuerspannung von 5 Volt gegen annähernd 0 Volt zusammen.

Diese elektrische Signal dient zum Errechnen eines Zündimpulses, den je zwei in Reihe geschaltete Zündspulen auf der Zündspuleneinheit gleichzeitig über eine der drei Steuerleitungen erhalten.

Die von etwa 380 Volt primärseitig auf maximal 35.000 Volt sekundärseitig hochtransformierte Zündspannung wird über Hochspannungszündleitungen und Zündkerzenstecker an die Elektroden der Zündkerzen geleitet (Bild 2.12).

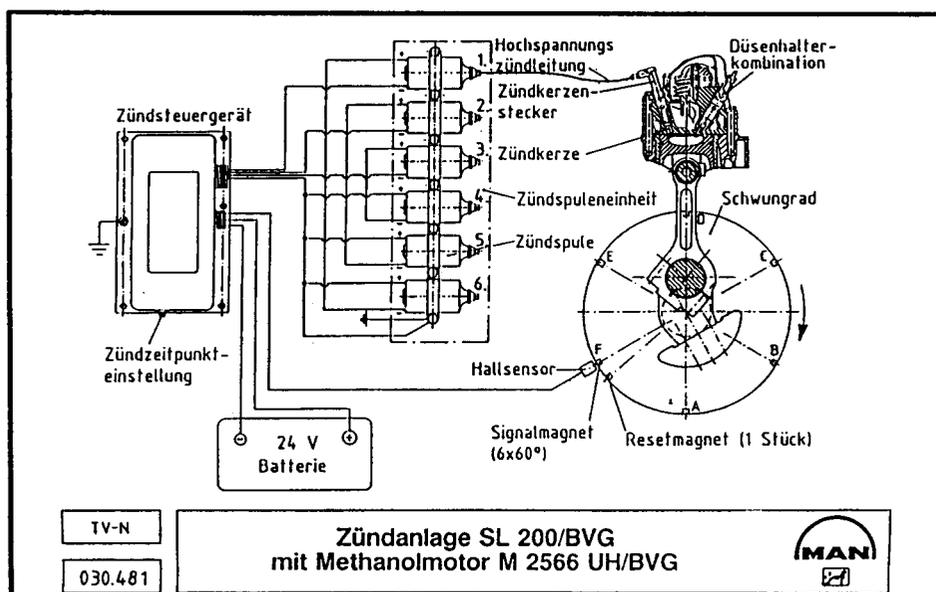


Bild 2.12: Zündsystem (MAN)

ABGASANLAGE

Die Abgasanlage besteht aus Abgaskrümmer, Kompensator, Katalysator und Abgasschalldämpfer. Der Kompensator dient zur Schwingungsentkopplung des Katalysators und des Schalldämpfers vom Motor.

Der Katalysator ist als einflutiger Oxidationskatalysator in Metallwickelausführung mit einer Platin-Monobeschichtung ausgelegt (Bild 2.13).

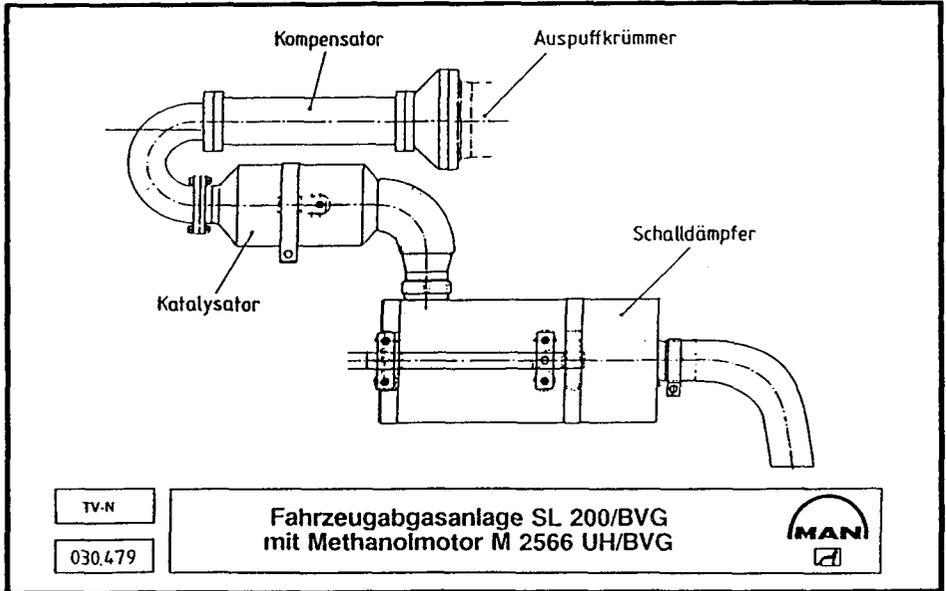


Bild 2.13: Abgassystem (MAN)

2.3.3 ÄNDERUNGEN AN DEN KONZEPTEN

Aufgrund der im Versuchsbetrieb gemachten Erfahrungen nahmen beide Hersteller an ihren Fahrzeugen bzw. an einzelnen Komponenten des Motor-Konzeptes Änderungen vor, welche die Betriebssicherheit und Standfestigkeit erhöhen sollten. Diese Änderungen wurden zum Teil erst nur an einzelnen Fahrzeugen vorgenommen und erprobt oder direkt bei allen Fahrzeugen durchgeführt. Erwartungsgemäß war die Anzahl der Änderungen im ersten Betriebsjahr größer als in den folgenden Jahren.

2.3.3.1 ÄNDERUNGEN AM DAIMLER BENZ-MOTORKONZEPT

Im ersten Betriebsjahr:

- 1) Kühlwasser-Rückschlagklappe
- 2) Kraftstoff-Magnetventil an Fremdheizgerät
- 3) Leerlaufbypass am Gasmischer
- 4) Leerlauf-Zündzeitpunkt
- 5) Verdampfer-Füllstandsregelung
- 6) Werkstattschalter für Fremdheizgerät
- 7) Magnetventil in Leerlaufbypass
- 8) Relais für Verdampfer-Niveausonden
- 9) Ventilplatte an Verdampfer-Druckregler

Im zweiten Betriebsjahr:

- 11) Austausch der Steuereinheit für
Qualitäts-/Quantitätsregelung
- 12) Einbau einer Anlassersperre
- 13) Einbau einer Retarderabschaltung
- 14) Einbau einer Edelstahldüse
im Verdampfer-Druckregler
- 15) Einbau einer Füllstandssonde
mit 2-Punkt-Ausführung

Im dritten Betriebsjahr:

- 16) Einbau einer Sicherheitssonde
mit Schlingerblech

2.3.3.2 ÄNDERUNGEN AM MAN MOTOR-KONZEPT

Die von der Firma MAN im Versuchsverlauf vorgenommenen Änderungen am Motorkonzept sind bereits in der Konzeptbeschreibung mit berücksichtigt.

Die im Kapitel 2.3.2.1 gegebene Konzeptdarstellung entspricht dem technischen Stand der Fahrzeuge zum Ende des Vorhabens.

2.4 PERSONALSCHULUNG UND EINWEISUNG

Da der Methanol-Kraftstoff gegenüber dem Dieselmotorkraftstoff andere chemische Eigenschaften besitzt und somit auch einen anderen Umgang bzw. eine andere Handhabung erforderte, aber auch die Fahrzeuge in ihrer Bedienung Unterschiede aufwiesen, wurde vor dem praktischen Versuchsbetrieb bei der BVG eine besondere Schulung der in den Versuch eingebundenen Personengruppen vorgesehen. Mit Auslieferung der ersten Busse führten die Hersteller Schulungsveranstaltungen durch. Das Schulungsprogramm wurde zunächst für Fahrlehrer und Fahrmeister, für das Tankstellenpersonal und insbesondere für bestimmte Fachgruppen des Werkstattpersonals zugeschnitten. Durch die BVG-Fahrlehrer wurde das gesamte, etwa 600 Mann zählende Fahrpersonal des Betriebshofes Spandau auf Besonderheiten bei der Handhabung der Methanol-Busse hingewiesen.

2.5 METHANOL-KRAFTSTOFF

2.5.1 ALLGEMEINES

Methanol ist einer der wichtigsten Ausgangsstoffe in der chemischen Industrie. Die produzierten Methanolmengen werden demgemäß hauptsächlich vom Chemiebereich aufgenommen. Im Energiesektor besteht für Methanol ein Interesse im Bereich Verkehr und Transport als alternativer Energieträger zu herkömmlichen Kraftstoffen. Im Zuge der heute technisch und ökologisch bedingten Bereitstellung von unverbleitem Benzin werden gemäß EG-Richtlinie von einigen Kraftstoffherstellern bereits bis zu 3 % Methanol dem Otto-Kraftstoff zugesetzt. Eine besonders interessante Perspektive ist jedoch der im vorliegenden Forschungsvorhaben realisierte Einsatz von praktisch 'Reinmethanol' als Kraftstoff (M 100), da nur ein hierfür konzipierter Motor die vorteilhaften Eigenschaften dieses Brennstoffes (thermodynamische Abläufe, Emissionsverhalten) voll ausnutzen kann.

Dennoch steht der Methanol-Verbrauch im Verkehrssektor im Vergleich zu herkömmlichen Verbrauchsmengen an Diesel- und Otto-Kraftstoffen derzeit noch in unbedeutenden Anfängen. So beträgt selbst für das gesamte Bedarfsspektrum die Weltproduktion an Methanol zur Zeit etwa 15 Mio. t/Jahr bzw. ca. 50 Mio. l/Kalendertag. Der inländische, maßgeblich durch die Großchemie geprägte Gesamtverbrauch liegt bei etwa 10 % entsprechend 1,5 Mio. t/ Jahr bzw. 5 Mio. l/Tag. Dem steht gegenüber, daß allein in der Bundesrepublik im Tagesdurchschnitt etwa 50 Mio. Liter Diesel-Kraftstoff und 80 Mio. Liter Otto-Kraftstoff verbraucht werden.

Die großtechnische Herstellung von Methanol erfolgt katalytisch aus Synthesegas, vereinfacht dargestellt nach der Summenformel



das hauptsächlich aus Rückständen der Erdöl-Raffination, aus Erdgas und auch durch Vergasung von Kohle erzeugt wird. Neben ergänzenden Importen steht dem Inlandsbedarf der Bundesrepublik eine Eigenproduktion von Methanol in einer Größenordnung von 900.000 t/Jahr zur Verfügung.

Die Firma Union-Kraftstoff, Wesseling (UK), ist namhafter Hersteller von konventionellen Kraftstoffen und ein großer einheimischer Produzent von Methanol. Aufgrund gravierender wirtschaftlicher Zwänge innerhalb der Methanol-Industrie versteht sich bei diesem Hersteller als kommerzieller Ausgleich eine weitergehende petrochemische Rohölverarbeitung, die der Erzeugung zusätzlicher, zu vermarktender Chemiegrundstoffe dient. Eine wichtige Produktionslinie ist dabei auch die Methanol-Herstellung im Verbund mit der Synthesegaserzeugung aus schweren Erdölrückständen. Hierbei ist von besonderer Bedeutung, daß bei der hierzu eingesetzten Verfahrenstechnik zusätzlich noch Kohlensäure, Stickstoff, Sauerstoff und auch Schwefel in marktgängiger Qualität anfallen.

Der Methanol-Produktion bei UK-Wesseling ist eine partielle Synthesegaszufuhr aus einer neu entwickelten Kohlevergasungsanlage nach dem sogenannten Hoch-Temperatur-Winkler(HTW)-Verfahren zugeordnet, die als BMFT-gefördertes Demonstrationsobjekt mit direktem Einsatz von getrockneter Rohbraunkohle aus dem Köln-Aachener Revier arbeitet. Das derart

erzeugte Synthesegas wird kontinuierlich zur Methanol-Synthese mit eingespeist. Mit dieser in der Art einzigen Anlagentechnik wird damit die Umsetzungsmöglichkeit von aus Braunkohle gewonnenem Kohlegas zu Methanol großtechnisch erprobt (Bild 2.13). Mit einem Kohleeinsatz von 30 t/Stunde wird bei der UK ein Anteil Methanol von 14 t/Stunde und damit etwa ein Drittel der gesamten Methanol-Erzeugung von 400.000 Jahrestonnen abgedeckt.

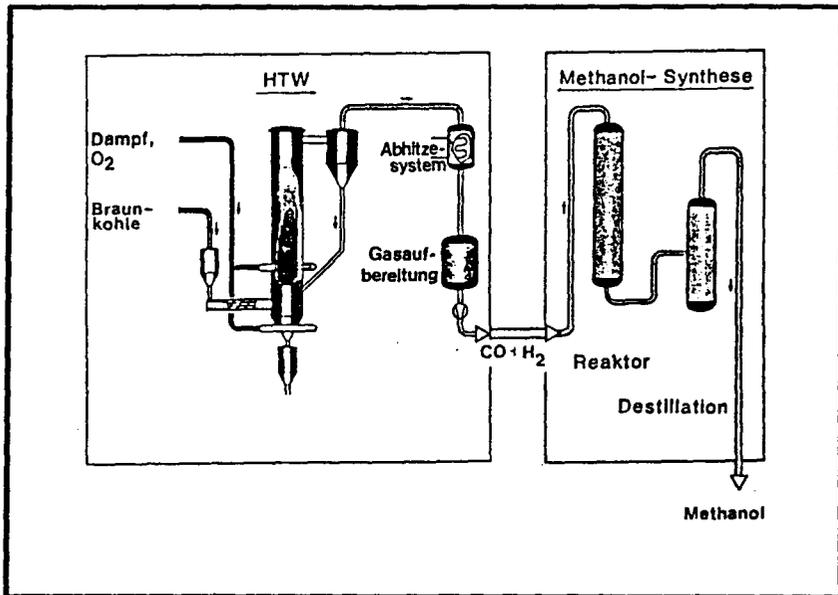


Bild 2.13: Synthesegas-Verbund

Schwerpunkte in der Methanol-Erzeugung lassen sich künftig in der Nutzung der bisher in großen Mengen auf überseeischen Ölfeldern abgefackelten Begleitgasen absehen. Mittelfristig wird so das Importangebot von Methanol kontinuierlich zunehmen und neue Verwendungsbereiche ansprechen. Ein prognostizierter, steigender Mehrbedarf für den Strassenverkehr und die Verfügbarkeit von Methanol ist in Bild 2.14 dargestellt.

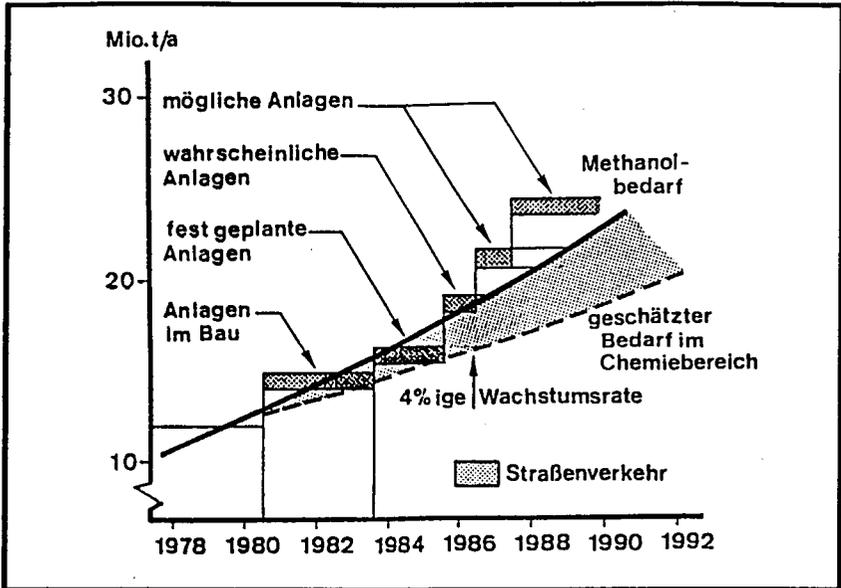


Bild 2.14: Verfügbarkeit und Verbrauch von Methanol (weltweit)

Methanol läßt sich prinzipiell als Motoren-Kraftstoff verwenden. Außer der Adaption konventioneller Motoren-Konzepte macht diese Verwendungsart prinzipiell auch erforderlich, daß einzelne, nachteilige Eigenschaften des reinen Chemie-Methanols durch Beimischungen und Additive beseitigt werden. So setzt die Beschaffenheit des Methanol-Kraftstoffes voraus, daß durch Zusätze leichtflüchtiger Kohlenwasserstoffe die gemäß DIN erforderlichen höheren Dampfdrücke erreicht werden. Hierdurch muß allerdings auch eine niedrigere Siedetemperatur in Kauf genommen werden, die eine Neigung zur Dampfblasenbildung begünstigt. Durch die Zumischung wird nicht nur das Kaltstartverhalten positiv beeinflusst, sondern damit genügt Methanol-Kraft-

stoff auch sicherheitstechnischen Ansprüchen hinsichtlich der Einhaltung erforderlicher Explosionsgrenzen und ermöglicht somit problemloseren Transport und Lagerung bei Verteilung und Anwendung.

Bei Anpassung der Motoren-Konzepte und der Versorgungssysteme im betrieblichen Umfeld an Methanol-Kraftstoff waren auch Werkstoffprobleme zu berücksichtigen. In bezug auf Kunststoff- und Dichtungsmaterialien ließen sich derartige Probleme durch stoffliche Umstellung vergleichsweise leicht und schnell beseitigen. Schwieriger ist es dagegen, metallische Werkstoffe auf Methanol-Kraftstoff einzustellen. Neben teilweiser Änderung von Bauteilen auf methanol-resistente Werkstoffe bzw. widerstandsfähige Versiegelung sind dem Methanol-Kraftstoff zwecks Beibehaltung möglichst vieler konventioneller Materialien auch Additivpakete zur Abwendung korrosiver Einflüsse beigegeben.

Im Rahmen eines von der Mineralölindustrie zusammen mit den Kraftfahrzeugherstellern durchgeführten M 100-Pilotprojektes wurde von UK-Wesseling die Optimierung des Methanol-Kraftstoffes und der Aufbau eines Versorgungssystems mit allen notwendigen Überwachungseinheiten zur Qualitätssicherung des Kraftstoffes übernommen. Hierbei wurde eine Kraftstoff-Formulierung erarbeitet, die zur Zeit einen gewissen Standard für Methanol-Kraftstoff setzt. An der Wirkfähigkeit von Additiven und Korrosionsinhibitoren wird weitergehend gearbeitet - eine Optimierung bleibt als Ziel bestehen (vgl. hierzu Kapitel 2.5.2.2).

Die technologische Aufbereitung des reinen Methanols zu Methanol-Kraftstoff ist prinzipiell einfach. Eine entsprechende Anlagentechnik beschränkt sich auf Vorratstanks für die Zumischkomponenten und eine Mischeinrichtung. Für die Handhabung des Methanol-Kraftstoffes wurden entsprechend geeignete Versorgungs- und Verbrauchsstrukturen geschaffen.

Methanol-Kraftstoff gilt als Chemikalie und wird nicht wie üblicher Kraftstoff bewertet. Dies führt zu erschwerten Transportbedingungen. Hierzu werden auf der Straße druckfeste Chemikalien-Tankwagen eingesetzt, deren Tanks und Armaturen aus resistenten Materialien bestehen. Die Einordnung von Methanol-Kraftstoff erfolgt in die Gefahrenklasse für Flüssigkeiten der Gruppe B. Diese werden jedoch hinsichtlich der Sicherheitsbestimmungen den Flüssigkeiten der Gruppe A (Otto-Kraftstoffe) gleichgesetzt. Schließlich fällt Methanol unter die Giftverordnung der Bundesländer. Es unterliegt somit strengen Regeln für die Abgabe und Kennzeichnung.

Vom Kraftstoffhersteller wurden die Voraussetzungen für die Kraftstoffperipherie ausführlich untersucht, so daß die Verfügbarkeit von Methanol-Kraftstoff bis hin zur Entnahme an der Methanol-Zapfsäule technisch sichergestellt ist. Entsprechend wurde anwenderseitig bei den Berliner Verkehrs-Betrieben (BVG) eine Methanol-Tankstelle errichtet und in Betrieb genommen.

Einen Überblick über die projektbezogen aufgebaute inländische Versorgungsinfrastruktur zeigt Bild 2.15.

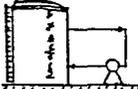
	PRODUKTION M. DESTILLATION (auch aus Braunkohle/ MW-Demonstrationsanlage)	METHANOL (rein)
	AUFMISCHEN (mit "Strohgas-meth- Stabilbenzin") U. ADDITIVIERUNG	M 100-KRAFTSTOFF
	VERTEILUNG	STRASSEN- TANKWAGEN
	BETANKUNG (bei ÖVG)	TANKSTELLE (2 Zapfsäulen mit Lamposten-Terminal)
	ANWENDUNG (bei ÖVG)	METHANOL- STADTLINIENBUS (14 Fahrzeuge)

Bild 2.15: Versorgungsinfrastruktur
Methanol-Kraftstoff

2.5.2 KRAFTSTOFFQUALITÄT

2.5.2.1 METHANOL-KRAFTSTOFF UND MOTOR-KONZEPT

Zu verschiedenen Arbeitsverfahren von Verbrennungsmotoren müssen auch an Kraftstoffe unterschiedliche Anforderungen gestellt werden. Bei Verwendung von Kraftstoffen in Otto-Motoren zeigen sich Flüchtigkeit, Verdampfungswärme und Klopfestigkeit (Oktanzahl) als wesentliche Eigenschaften. Für dieselmotorische Arbeitsverfahren ist die Zündwilligkeit, gekennzeichnet durch die Cetanzahl, ein wichtiges Kriterium. Bei praktisch jedem Kraftstoff bedeutet hohe Oktanzahl immer geringe Cetanzahl und umgekehrt und kennzeichnet damit ein wichtiges Merkmal hinsichtlich Eignung eines Kraftstoffes für das eine oder andere motorische Arbeitsverfahren.

Aufgrund der hohen Oktanzahl und damit hoher Klopfestigkeit sind Alkohole - und hierbei insbesondere Methanol - für den ottomotorischen Verbrennungsprozeß besonders wertvoll, da eine vergleichsweise höhere Verdichtung des Motors ermöglicht wird und Wirkungsgrad wie auch Leistungsausbeute gesteigert werden können.

Im Vergleich zu Kraftstoffen auf Kohlenwasserstoffbasis besitzt Methanol jedoch eine sehr hohe Verdampfungswärme und einen niedrigen Dampfdruck. Für die motortechnische Kraftstoffaufbereitung bzw. Gemischbildung sind diese Eigenschaften des Methanols weniger günstig. Der größere Bedarf an Verdampfungswärme wird noch dadurch erhöht, daß bei Alkoholkraftstoffen wegen des geringeren Energieinhalts für gleiche Leistung größere Kraft-

stoffmengen benötigt werden. Dieser Effekt begünstigt zwar im Sinne einer gesteigerten Innenkühlung den thermodynamischen Arbeitsprozeß im Motor, macht aber für den Vorgang der Gemischbildung eine intensive Art der Aufheizung erforderlich.

Die für den ottomotorischen Betrieb nachteiligen Eigenschaften des Methanols lassen sich jedoch durch im Prinzip einfach zu handhabende Maßnahmen ausgleichen. Dabei sind entweder modifizierte Bauteile, wie erweiterte Kaltstarteinrichtungen als auch bestimmte, der Materialverträglichkeit dienende Änderungen usw. dem Motor-Konzept zuzuordnen, oder der Methanol-Kraftstoff selbst muß den Erfordernissen des Motors durch Zugabe verschiedener Komponenten, wie z.B. leichtflüchtiger Kohlenwasserstoffe, angepaßt werden. Auch methanolbedingte Korrosionsprobleme lassen sich durch zuge-mischte Inhibitoren weitgehend einschränken.

In der Technik des Otto-Motors ist für den Einsatz von Methanol-Kraftstoff bis heute bereits ein ausgeprägter Entwicklungsstand erreicht worden. Dazu parallel hat sich auch der Entwicklungsgang, durch Aufbereitung des Methanols sich dem konventionellen Konzept des Otto-Motors möglichst direkt anzupassen und damit eine wirtschaftlich optimale Lösung des Gesamtsystems sicherzustellen, als zumindest ebenso wichtig abgezeichnet. Der zur Zeit praxisübliche Methanol-Kraftstoff wird bereits gegenüber reinem Methanol in Kombination mit gezielt und erfahrungsgemäß zugesetzten Komponenten dargestellt und ist mit dieser Konditionierung der Art nach vergleichbar mit der Zugabe von Antiklopfmitteln, Anticings und Korrosionsschutzmitteln bei heutigen Benzin (vergleiche Kapitel 2.5.2.2).

Obschon sich Methanol wegen seiner Stoffeigenschaften primär für den Einsatz im Otto-Motor anbietet, ist es wegen des günstigen Motor-Wirkungsgrades, der damit verbundenen guten Ausnutzung der Kraftstoffenergie und der rußfreien Verbrennung für den Einsatz im Diesel-Motor von gleichem Interesse. Für die unmittelbare Verwendung im Diesel-Motor weist Methanol allerdings einige grundlegende Nachteile auf, die sich hauptsächlich in der geringen Zündwilligkeit zeigen. Aber auch in der höheren Flüchtigkeit gegenüber Diesel-Kraftstoff und der damit verbundenen Gefahr von Dampfblasenbildung. Auch erfordert die geringere Schmierwirkung des Methanol-Kraftstoffes eine Anpassung der üblichen Diesel-Einspritzsysteme.

Zur Lösung dieser Probleme sind Modifikationen am motorischen Konzept, aber auch an der Kraftstoff-Zusammensetzung erforderlich. Im Gegensatz zum Methanol-Ottomotor sind für dieselmotorischen Einsatz wesentlich mehr Varianten und unterschiedliche Systeme erprobt und untersucht worden (Bild 2.16). Bei der Vielfalt hierbei denkbarer Möglichkeiten muß zwischen den zwei Systemgruppen unterschieden werden, die mit einem einzigen oder mit zwei getrennten Kraftstoff-Systemen arbeiten.

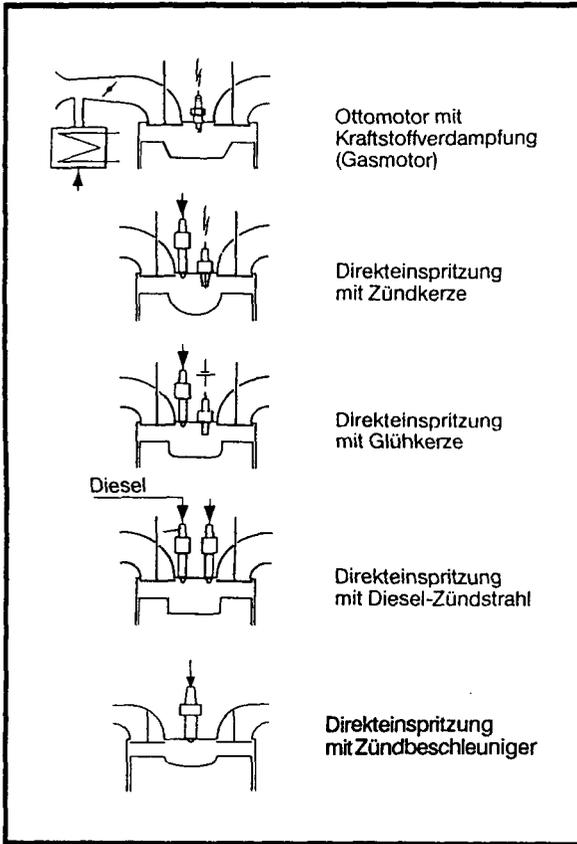


Bild 2.16: Brennverfahren für Methanol-Kraftstoff mit adaptierten Diesel-Motoren

Als Ein-Kraftstoff-System kommt für Diesel-Motoren lediglich Methanol mit Zündwilligkeitsverbesserern oder Methanol als Diesel-Mischkraftstoff infrage. Obwohl die bisher vorliegenden Ergebnisse mit dem Methanol-Kraftstoff zugemischten Zündverbesserern ihre Einsatzfähigkeit in Diesel-Motoren erkennen lassen, sind weitergehende Entwicklungsschritte, insbesondere hin zu einer vereinfachten Verfügbarkeit kostengünstiger und wirksamerer Zusätze noch

erforderlich. Für Diesel-Mischkraftstoffe lassen sich selbst unter Nutzung von Lösungsvermittlern nur Methanolmengen in Größenordnungen von 20 - 30% verwenden, so daß man damit zumindest nicht dem Anspruch auf Methanol als maßgeblichem Basis-kraftstoff gerecht wird.

Dieselmotorische Konzepte mit einem Zwei-Kraftstoff-System bedingen einen Mehraufwand bei der Anpassung der Motortechnik durch eine kompliziertere Versorgungsperipherie. Unter praktischen Gesichtspunkten wäre hierzu nur das hilfsweise mit Diesel-Kraftstoff arbeitende Zündstrahlverfahren noch am besten geeignet, Methanol mit hohem Anteil und ohne zusätzliche Zündverbesserer in Dieselmotoren zu verbrennen.

Wie bereits bei ersten Versuchen, Methanol als Kraftstoff einzusetzen, auf der Grundlage von Benzinmotoren mit Anpassung des Kraftstoff-Luftverhältnisses gearbeitet wurde, konnte anhand der physikalisch bedingten Vergleichbarkeit des Benzins mit Methanol (hohe Oktanzahl) im wesentlichen nur mit dieser Motor-Technik ein großes Entwicklungspotential ausgenutzt werden. So sind auf dem Pkw-Sektor alle zur Einsatzreife modifizierten Konzepte für Methanol-Motoren dem durch Fremdzündung charakterisierten Arbeitsverfahren des Ottomotors zugeordnet geblieben.

Zu dieser Tendenz bleibt deshalb herauszustellen, daß auf dem Gebiet schwerer Nutzfahrzeug-Aggregate auch die im Rahmen des Forschungsvorhabens 'Alternativen im Stadtbusbetrieb' bei der BVG eingesetzten Methanol-Busse mit zwar unterschiedlichen, aber in dieser Richtung modifizierten Motoren ausgerüstet sind. Das von Daimler-Benz verwendete Gasmotor-Konzept, ist dem Ottomotor am nächsten.

Der durch einen mit Kühlwasser beheizten Verdampfer aufbereitete Methanol-Kraftstoff wird durch äußere Gemischbildung in einem nachgeschalteten Gasmischer mit der Ansaugluft vermischt, im Motor komprimiert und durch eine Zündkerze gezündet. Beim Konzept von MAN werden nach dem Prinzip der Schichtladung mit direkter Einspritzung in den Kompressionsraum, aber auch mit Fremdzündung, sowohl Funktionsmerkmale des Diesel- wie auch des Otto-Motors vereinigt. Abgesehen von anderen Erfordernissen (Explosions-Sicherheit, Korrosionsschutz usw.) besteht hinsichtlich Gemischbildung und Verbrennungsablauf bei beiden Konzepten eine relative Unempfindlichkeit gegenüber der qualitativ hauptsächlich für Pkw-Otto-Motoren angepaßten Formulierung des eingesetzten Methanol-Kraftstoffes.

2.5.2.2 SPEZIFIKATION METHANOL-KRAFTSTOFF M 100

Da ein umfangreicher Einsatz von Alkoholen als Grundkraftstoff - von einer überseeischen Ausnahme abgesehen - noch nicht gegeben ist, sind allgemein anerkannte Qualitätsstandards für Alkohol-Kraftstoffe auch noch nicht vorhanden. Im größeren Rahmen angelegte FE-Flottentests und eine erste inländische Markteinführung innerhalb eines Pilotprogramms haben erst den Ansatz zur Festlegung einer Spezifikation für einen wirtschaftlichen und einen für ein möglichst breites Anwendungsgebiet verfügbaren Methanol-Kraftstoff gebracht. Bei dementsprechend für diese Programme eingesetzten Methanol-Kraftstoff M 100 handelt es sich aufgrund der vorstehend geschilderten vorzugsweisen Anwendung von Methanol in ottomotorischen Konzepten um einen für diese Motortechnik aufbereiteten Kraftstofftyp.

Nach Angaben der Mineralöl-Industrie lassen sich die Kriterien für die Spezifikationsmerkmale des derzeit verwendeten Methanol-Kraftstoffs M 100 wie folgt benennen:

Zur Sicherheitstechnik ist darauf hinzuweisen, daß die Explosionsgrenzen von Rein-Methanol in Luft zwischen 6,75 und 36,7 Vol.-% liegen. Das bedeutet, daß in einem mit Rein-Methanol gefüllten Tank bei einer Umgebungstemperatur zwischen +10 und +36 °C im Luftraum oberhalb der Flüssigkeit ein explosionsfähiges Gemisch vorliegt.

Die Explosionsgrenzen für ein Luftgemisch mit üblichem Benzin liegen zwischen 0,6 und 8,0 Vol.-%. Unter normalen klimatischen Bedingungen wird damit selbst im Winter die obere Explosionsgrenze überschritten, da ein überfettetes Gemisch vorliegt. Bei Diesel-Kraftstoff wird ein Flammpunkt von über 55 °C eingehalten und damit ebenfalls den geltenden Lagerungs- und Transportvorschriften entsprochen.

Niedriger Dampfdruck und hohe Verdampfungswärme des Methanols bereiten Schwierigkeiten beim Kaltstart und im Kaltfahrverhalten der Pkw-Methanol-Motoren. Für Reinmethanol existiert eine eindeutige Kaltstartgrenze. Anhand des Dampfdruckverlaufs ist bei einem mit konventioneller Gemischbildung arbeitenden Ottomotor ein Kaltstart unter +15 °C nicht mehr möglich.

Um das Explosionsrisiko und das Kaltstartproblem zu beseitigen, werden dem Methanol leichte Kohlenwasserstoffschnitte zugemischt. Hierbei entscheidet in Anlehnung an die DIN-Vorschriften für Otto-Kraftstoffe der Dampfdruck nach Reid über die Mischkomponenten werden optimale Werte bezüglich die zugesetzt werden muß. Nach Art der Zugesetzungsgrades der Dampfdruckkurve, der Stabilität der Kraftstoff-Mischung und einer Absenkung des oberen Explosionspunktes formuliert.

Auch die Kosten der Mischkomponenten bestimmen deren Anwendung. So erfolgte bei früheren Flottenversuchen zunächst eine bis zu 8,5 %ige Mischung von Isopentan zum Methanol, während später ein 7 %iger Zusatz eines C₄/C₅-Schnittes festgelegt wurde. Isopentan und der C₅-Anteil im C₄/C₅-Schnitt besitzen in einer Raffinerie einen sehr hohen Warenwert und sind nicht allgemein verfügbar.

Mit einer neuen, zur Zeit angewendeten M 100-Spezifikation wurde mit dieser weltweit am weitesten entwickelten Version zuletzt ein weiterer Schritt in Richtung eines optimalen, möglichst allgemein einzusetzenden Methanol-Kraftstoffs getan. Dabei werden jetzt Kohlenwasserstoffe von insgesamt 10 Gew. - % zugemischt. Es handelt sich bei dieser Mischkomponente nicht mehr um einen C₄/C₅-Schnitt, sondern um ein in der Raffinerie anfallendes 'straight-run'-Stabilbenzin, das sich aus C₄/C₅-Nichtaromaten zusammensetzt und ein Siedende unter 120°C aufweist. Die Einstellung des Dampfdrucks erfolgt weiterhin mit Butan. Die Entwicklung bisheriger Spezifikationen für M 100 zeigt Tabelle 2.17 .

		bis II./1983		ab III./1983		ab II./1986	
		Sommer	Winter	Sommer	Winter	Sommer	Winter
Methanol, rein	Gew. %	94,5	91,5	93		90	
Kohlenwasserstoffe (gesamt)	Gew. %	5,5	8,5	7,5		10,0	
Art der Kohlenwasserstoffe	Gew. %	Isopentan		C ₄ /C ₅ -Schnitkte		SR-Stabilbenzin* / Butan	
				0,5/6,5	2,1/4,9	9,3/0,7	8,5/1,5
Wasser	ppm	max. 1000		max. 1000		3000-5000**	
Additive	ppm	-		150		max. 1,0 (Gew. %)	
Dichte (d ₁₅)	g/cm ³	0,785	0,799	0,786	0,784	0,778-0,785	
Dampfdruck n. Reid	mbar	700	900	700	790	640/700	840/900
oberer Explosionspunkt	°C			-13	-25	-15	-20
Abdampfrückstand	mg/100 ml	max. 10		max. 10		max. 5	

* SR-Stabilbenzin **Blenderlauf:** E 70 > 50 Vol. %
E 100 > 90 Vol. %
SE < 110 °C

** mit Korrosionsinhibitor (max. 150 ppm)

Tabelle 2.17 : Spezifikationen des Methanol-Kraftstoffes

Als sicherheitstechnisches Erfordernis stellt sich noch die Frage einer Sichtbarmachung der nach Entzündung normalerweise nicht erkennbaren Methanolflamme.

Durch die beigemischten Kohlenwasserstoffe brennt M 100-Kraftstoff mit leuchtender Flamme, jedoch nur solange, bis diese vorschnell verdampft und verbrannt sind. Weitere Maßnahmen durch Zugabe von

Spuren bestimmter Alkali- oder Metallverbindungen eine Färbung der Flamme zu erreichen, gefährden allerdings die motortechnisch bedingten Spezifikationsmerkmale, belasten das Abgasverhalten bzw. schädigen den Abgaskatalysator.

Auf diesem Teilgebiet der Optimierung ist es bis jetzt nicht zufriedenstellend gelungen, die Methanolflamme durch zugegebene Substanzen dauerhaft sichtbar zu machen, ohne die Vorteile der festgelegten Kraftstoff-Spezifikation zu beeinträchtigen.

ADDITIVIERUNG

Auch zur Minderung des Korrosionsverhaltens wurde mit der Optimierung des M 100-Kraftstoffes entsprechend der neuen Spezifikation ein weiterer Beitrag geleistet. Von der Kraftstoffindustrie wurde hierzu berichtet, daß für M 100 ein Wassergehalt von 3.000 - 5.000 ppm festgelegt wurde, weil z.B. bei geringerem Wassergehalt Aluminium sehr stark korrodierend angegriffen wird. Allerdings geht die Aluminiumkorrosion nicht soweit zurück, daß man es bei der Wasserzugabe bewenden lassen könnte. Bei Zink und dessen Legierungen führt erhöhter Wassergehalt zu intensiverer Korrosion.

Um die Aggressivität des Methanol-Kraftstoffes zu vermindern, wird nach der neuen M 100-Spezifikation die Zugabe eines hochwirksamen Inhibitors mit maximal 150 ppm vorgenommen. Nach vom Kraftstoff-

Hersteller vorgenommenen Labortests wurden hierbei erhebliche Korrosionsminderungen nachgewiesen. Der Wirkungsmechanismus wird dabei mit einem elektrolytisch monomolekular gebildeten, geschlossenen Schutzfilm erklärt, der sich als Barriere zwischen Metallwandung und Kraftstoffmedium aufbaut. Unlegierter Stahl, Zink und Aluminium sollen ausgezeichnet geschützt werden. Kupfer- und Messingkorrosion werden ebenfalls noch inhibiert. Die Weiterentwicklung des Inhibitorsystems führte inzwischen mit Rücksicht auf die katalysatorvergiftende Wirkung eines im Inhibitor enthaltenen Phosphorsäureesters zu einer phosphorfreien Formulierung, die speziell auf Methanol-Kraftstoff zugeschnitten wurde und die gleiche Schutzwirkung gewährleistet.

Dennoch dürfte ein umfassend wirksames Inhibitorpaket bis jetzt noch nicht gefunden sein. Lassen sich nicht resistente Werkstoffe aus produktionstechnischen Gründen nicht ersetzen, so kann erfahrungsgemäß Korrosion vielfach durch Auswahl geeigneter Schutzbehandlung von Bauteiloberflächen stark verringert bzw. ganz verhindert werden. Hier kommen insbesondere Chromatierungsverfahren bei Zink, Eloxieren bei Aluminium und Phosphatieren bei Stahl zur Anwendung.

Neben Korrosionsschutz-Additiven ist ein Detergentien-Additiv als weitere Komponente für Methanol-Kraftstoff wichtig. Für den Motor-Betrieb eingesetzte Schmieröle enthalten hochsiedende Bestandteile, die in Methanol nicht löslich sind. Zur Verhinderung von Verschmutzungen und zum Abbau von

Ablagerungen in den Gemischbildungsräumen der Methanol-Motoren ist ein Detergens auf Basis eines Polyetheralkohols zugegeben. Zur Erarbeitung eines optimalen Additivs werden beim Kraftstoff-Hersteller noch Wirksamkeitstests durchgeführt. Eine Entscheidung zugunsten einer relativ einfachen und vom Siedebereich her passenden Verbindung ist zu erwarten.

Unter bestimmten Voraussetzungen kann es von Interesse sein, Ethylalkohol (Ethanol) als Energieträger aus agrarischen, d.h. aus nachwachsenden Rohstoffen dem Methanol-Kraftstoff beizumischen. Allerdings wirkt sich zugefügtes Ethanol auf die physikalische Eigenschaft von M 100 derart aus, daß der Dampfdruck bei höherer Zumischmenge beträchtlich erniedrigt wird. Ohne den in der Formulierung für M 100-Kraftstoff vorgegebenen Dampfdruck zu gefährden und ohne das Erfordernis einer weitergehenden Anpassung der Methanol-Motoren konnte in der Spezifikation für M 100 als Option ausdrücklich die Zumischung von maximal 5 Gew.-% an höherem Alkohol vorgesehen werden.

2.5.2.3 KONSEQUENZEN FÜR DEN VERSUCH

Das derzeitige M 100-Kraftstoff-Konzept wird von Herstellerseite schon als sehr weit ausgereift bezeichnet. Die neue Zumischkomponente SR-Benzin stellt eine preiswerte allgemein verfügbare Alternative zum C₅-Schnitt dar, wobei der Kraftstoff in kritischen Punkten verbessert wurde. Dazu sind allerdings nunmehr insgesamt 10 % Kohlenwasser-

stoffanteil nötig und nicht mehr nur 7 % wie zuvor. Wie erwähnt, wird mit der Zumischung der leichtflüchtigen Kohlenwasserstoffe eine Reihe von Bedingungen zum praxisgerechten Einsatz eines Methanol-Kraftstoffes erfüllt. Unter anderem wurde damit den Problemen des Kaltstarts und des Kaltfahrverhaltens bei den auf Methanol umgestellten Pkw-Ottomotoren begegnet.

Die zugesetzten leichten Komponenten sind für die dieselmotorischen Verfahren nicht notwendig. Die Verbrennungsabläufe in beiden eingesetzten Motor-Konzepten (DB und MAN) sind prinzipiell nicht von zugemischten Kohlenwasserstoffen abhängig. So werden die Prüfstandsuntersuchungen mit diesen Motoren beim Hersteller überwiegend mit Rein-Methanol durchgeführt.

Grundsätzlich haben die im vorliegenden Demonstrationsvorhaben gemachten Erfahrungen gezeigt, daß mit der in den Methanol-Bussen eingesetzten Motor-Technik der jetzt mit den einheitlich vorgegebenen Spezifikationen angebotene Kraftstoff (M100) verwendet werden kann. Vergleichbare Untersuchungen in den USA haben gezeigt, daß der Betrieb mit 'Rein-Methanol' ebenso möglich ist. Eine individuelle Anpassung des Methanol-Kraftstoffes an ein Motor-Konzept wird aus Gründen der Wirtschaftlichkeit und im Hinblick einer möglichst begrenzten Anzahl unterschiedlicher Kraftstoffe nicht verfolgt.

Eine Alternative bleibt in der Kategorie schwererer Nutzfahrzeuge die Verwendung eines Methanol-Kraftstoffes mit Zündbeschleuniger, da hierbei das

Selbstzündungsprinzip erhalten bleibt und damit konventionelle Diesel-Motoren relativ leicht adaptiert werden könnten. Aufgrund problembehafteter Aspekte der Wirtschaftlichkeit, der Verfügbarkeit und vor allem der Sicherheit - hierbei insbesondere des riskanten Umgangs mit einem Zündwilligkeitsverbesserer - steht diese kraftstoffseitige Lösung zur Zeit jedoch noch nicht im Vordergrund.

2.6 PROBLEME DER VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

2.6.1 ALLGEMEINES

Bevor eine neue Technologie eingeführt werden kann, ist es von großem Interesse, den Grad der 'technischen Ausgereiftheit' zu bestimmen. Von ebenso großer Bedeutung ist dabei die Akzeptanz gegenüber der neuen Technologie durch den Anwender.

Allgemein bieten sich für diese Bestimmung bei industriell gefertigten Produkten zwei Methoden an.

Die wohl am häufigsten gewählte Methode ist die Anwendung umfangreicher Testprozeduren auf der Grundlage von Praxiserfahrungen, mit denen Schwachstellen oder Mängel noch vor der Einführung des Produktes aufgedeckt und geändert werden können.

Eine weitere Methode liegt darin, zunächst eine Funktionstüchtigkeit des Produktes sicherzustellen, um dann in einem Praxistext anhand von aufgetretenen Mängeln und deren Beseitigung eine optimale Funktionssicherheit zu erzielen.

Beide Methoden zeigen Vor- und Nachteile bei ihrer Anwendung. Kann einerseits das Ergebnis der Verwendung umfangreicher Testprozeduren nur so gut sein, wie diese Prozeduren der tatsächlichen Belastung im Praxisbetrieb entsprechen, erfordert andererseits eine praktische Erprobung eines funktionsreifen Produktes meist einen größeren Zeitaufwand und setzt eine gute Kommunikation zwischen dem Hersteller und dem Anwender voraus.

Aus der Energiekrise in den siebziger Jahren ergab sich für die Bundesregierung ein Handlungszwang, Vorkehrungen für eine aus unterschiedlichen Gründen denkbare Verknappung von Mineralöl zu treffen. Besonders stark würde von solch einer Verknappung der Fahrzeugverkehr getroffen, da er zu annähernd 100 % vom Mineralöl abhängig ist. Die sich ergebende Konsequenz war eine intensive Forschungsförderung von Möglichkeiten zur Anwendung alternativer Energien für den Fahrzeugbetrieb.

Um zu einer entscheidungsfähigen Aussage zu kommen, unter welchen Bedingungen eine kurzfristige Umstellung auf eine andere Energieform möglich wäre, wurde erstmals die Form eines Praxistests mit bis zu 1.000 Fahrzeugen gewählt. Im beobachteten Praxiseinsatz dieser Fahrzeuge in 'Kundenhand' war die Einsatzfähigkeit bzw. Funktionstüchtigkeit neuer Systeme nachzuweisen bzw. zu demonstrieren (Projekt: Methanol-Mischkraftstoff M 15, Methanol-Kraftstoff M 100).

Seither hat sich diese Form der Erhebung von Erfahrungen etabliert und wird besonders im Forschungsbereich 'Alternative Energien' und 'Alternativen im Stadtbusbetrieb' angewandt.

Aus einer langjährigen Erfahrung mit dieser Erhebungsart erscheint eine kritische Auseinandersetzung und vor allen Dingen eine Gegenüberstellung erwarteter Aussagen und möglicher Ergebnisse erforderlich.

2.6.2. AUSGANGSSITUATION

Technologische Fortschritte entstehen überwiegend durch die Realisierung einer Idee bzw. aus einer Problemstellung heraus, indem ein Produkt bis zum Funktionsnachweis entwickelt wurde oder auch bereits die umfangreichen Testprozeduren eines Serienproduktes durchlaufen hat.

Im letzteren Fall kann von einer Serienreihe ausgegangen werden, die lediglich noch vereinzelte Schwächen im Praxisgebrauch, die sogenannten 'Kinderkrankheiten', zulassen dürfte. Eine Praxisdemonstration mit einer solchen Lösung ist identisch mit einer marktgerechten Einführung dieses Produktes.

Eine vollkommen andere Voraussetzung für eine Praxisdemonstration ist der als Ausgangslage lediglich vorliegende Funktionsbeweis einer technischen Lösung bzw. eines neuen Systems. Prototypen in meist geringer Stückzahl haben ihre Funktion auf Prüfständen gezeigt, waren aber selten über einen längeren Zeitraum einem tatsächlichen Praxisbetrieb oder praxisnahen Testprozeduren unterzogen.

Auslegungskriterien und tatsächliche Anforderungen bzw. Beanspruchung können divergieren, so daß eine zufriedenstellende 'Reife' eines Produktes nur durch ein iteratives Vorgehen erzielt werden kann. Dies bedeutet im Einzelfall, daß die im praktischen Einsatz gewonnenen Erfahrungen eine teilweise Neukonstruktion einzelner Bauteile oder -gruppen erforderlich macht und damit oftmals die Praxisdemonstration wieder in ein Versuchsstadium zurückführt. Jede technische Änderung an einem Konzept durchläuft zunächst wieder eine Phase der Erprobung.

2.6.3 RANDBEDINGUNGEN

Im vorliegenden konkreten Fall einer Praxisdemonstration von Methanol-Kraftstoff für den Betrieb von Stadtbussen soll mit einer Fahrzeugflotte von 14 Bussen - je 7 Busse zweier Hersteller - die Tauglichkeit der verwendeten unterschiedlichen Systeme und die Vor- bzw. Nachteile gegenüber dem über Jahrzehnte verwendeten Diesel-Motor gezeigt werden.

Die Praxisdemonstration bedeutet nicht allein den fahrplanmäßigen Linieneinsatz von Bussen, sondern auch deren Integration in fest bestehende Werkstattabläufe von Wartung und Reparaturen. Langjährige Erfahrungen mit dem Diesel-Bus stehen einer relativ geringen Erfahrung mit dem neuen System gegenüber.

Diese unterschiedliche Voraussetzung kann sich in einer größeren Vorsicht beim Umgang mit den Methanol-Bussen ausdrücken, schließt aber auch nicht

aus, daß Anzeichen auf eintretende Ausfälle aufgrund mangelnder Erfahrung mit dem neuen System nicht erkannt werden.

Die Verwendung möglichst vieler bereits in Serie gefertigter Bauteile bei einer Neukonstruktion sichert in hohem Maße die Funktionstüchtigkeit dadurch, daß diese Bauteile einen recht hohen Standard haben. Die hohen Anforderungen an den Standard der Bauteile setzen einen hohen Einsatz bei der Fertigung und der Qualitätskontrolle voraus, der heute fast ausschließlich nur noch von Großserienherstellern zu vertretbaren Preisen möglich ist. Ein Nachteil dieser Vorgehensweise zeigt sich dann, wenn das Serienteil den gewünschten Anforderungen im Praxiseinsatz nicht entspricht und neu konstruiert bzw. geändert werden muß. Hersteller dieser Serienprodukte, die offensichtlich das umfangreichste Erfahrungspotential haben, fertigen wunschgemäß geänderte Serienteile als sogenannte 'Kleinserie' auf gesonderten Bändern. Die sich hieraus ergebenden Konsequenzen sind zum einen eine niedrige Priorität der Fertigung und zum anderen kann nicht in jedem Fall die gleiche Funktionssicherheit vorausgesetzt werden, die ein Serienprodukt aufweist.

Lange Lieferzeiten und die oft eingeschränkte Funktionssicherheit gegenüber dem Serienteil beeinflussen somit den Verlauf einer Praxisdemonstration.

Als weitere Randbedingung ist die Akzeptanz eines neuen Systems durch den Personenkreis zu sehen, der unmittelbar damit in Berührung kommt.

Die Verwendung von Methanol als Kraftstoff gegenüber dem Diesel-Kraftstoff erfordert zunächst im

Werkstattbereich, aber auch bei den Fahrern der Busse aufgrund der Tatsache, daß Methanol zu Recht als giftiger Stoff bezeichnet wird, eine umfangreiche Aufklärung im Umgang mit diesem Kraftstoff. Bei den dennoch auch weiterhin verbleibenden Vorbehalten kann davon ausgegangen werden, daß Aufklärung die Grundeinstellung zu einem neuen System verändert.

In einem weitaus stärkeren Maße wird die Grundeinstellung zu einem System mitgeprägt von der Tatsache, ob die Teilnahme an einer Praxisdemonstration aus eigener Entscheidung oder durch Weisung erfolgt. Die vorliegenden Erfahrungen aus verschiedenen Demonstrationsvorhaben zeigen, daß der unmittelbare Anwender, der Fahrer, einer Neuerung weitaus aufgeschlossener gegenübersteht, wenn es sein eigener Wunsch war, dieses Fahrzeug zu fahren bzw. an der Praxisdemonstration teilzunehmen (Vorhaben: Methanol-Kraftstoff M 15). Ein angestellter Fahrer dagegen wird mit dem neuen System meist konfrontiert und 'muß' es anwenden. Beide Fälle sind im Bezug auf eine Akzeptanzuntersuchung als Extreme anzusehen, da sich der eine aus Interesse häufig mit den Neuerungen auseinandersetzt und somit sein gewohntes Verhalten verändert und sich der andere im Gegensatz hierzu mit dem neuen System weniger befaßt oder nicht viel damit zu tun haben will, aber somit ebenfalls eine geänderte Verhaltensweise zeigt.

Eine neutrale oder objektive Verhaltensweise kann von beiden Gruppe nicht erwartet werden, da die gesammelten Erfahrungen mit bestehenden, etablierten Systemen immer als Vergleichsmaßstab dienen.

2.6.4 ERGEBNISERWARTUNGEN

Eine Praxisdemonstration - im vorliegenden Fall 'Alternativen im Stadtbusbetrieb' - hat vornehmlich zur Zielsetzung, daß Erfahrungen mit einer neuen Technologie gesammelt werden können und daß diese Erfahrungen durch eine wissenschaftliche Begleitung ausreichend differenziert sein sollen, um die neue Technik gegenüber bereits eingeführter Technik vergleichend bewerten zu können.

Wird an der dargestellten Unterscheidung der Voraussetzungen für die Durchführung einer Praxisdemonstration festgehalten (siehe Kapitel 2.6.1), so mag die vorgegebene Zielsetzung bestenfalls noch für die Einführung einer serienreifen Technologie zutreffen. Einer Technologie mit lediglich einem Funktionsnachweis kann sie nicht genügen und muß abgewandelt werden.

In den seltensten Fällen ist es möglich, die zu vergleichenden Technologien nebeneinander unter unmittelbar vergleichbaren Bedingungen in der Praxis einzusetzen. Für die Praxisdemonstration der Methanol-Busse würde dies bedeuten, daß eine Vergleichsflotte von Diesel-Bussen parallel in gleicher Weise eingesetzt würde. Der finanzielle Aufwand wäre erheblich und eine qualitativ bessere Aussage ungewiß. Somit erscheint es angemessener, die Ergebniserwartungen den Randbedingungen der Durchführung in der Weise anzupassen, daß eine weitgehend optimierte Versuchsaussage möglich ist.

Im Einzelfall bedeutet dies, daß scheinbar objektive Versuchsergebnisse aus der Kenntnis der Einflüsse auf die Versuchsdurchführung für eine vergleichende Bewertung relativiert dargestellt werden müssen.

2.6.5 KONSEQUENZEN

Bei erkennbaren Einschränkungen der Aussagen bzw. der Ergebnisse einer Praxisdemonstration stellt sich die Frage nach der Effektivität einer solchen Untersuchungsform.

Aus den bisher gemachten Erfahrungen kann festgestellt werden, daß mit dieser Form der Forschung eine Möglichkeit geschaffen wurde, in angemessener Zeit einen sehr guten und zutreffenden Einblick in Probleme und Voraussetzungen im Zusammenhang mit der Einführung neuer Technologien zu erzielen.

Die zwangsläufige Zusammenarbeit zwischen dem Hersteller und dem Anwender schafft eine schnelle Kommunikation, mit der gesammelte Erfahrungen unmittelbar in anwenderorientierte Lösungsmöglichkeiten umgesetzt werden können.

Die direkte oder indirekte Mitarbeit des Anwenders beschleunigt Problemlösungen, macht aber auch den Anwender in einem weitaus stärkeren Maße sensibler für die Schwierigkeiten im Zusammenhang mit der Einführung der Technologie bzw. gibt ihm die Möglichkeit, sich mit ihr auseinanderzusetzen.

Auch die im Rahmen von Akzeptanzuntersuchungen erhobenen subjektiven Angaben der Anwender stellen eine sehr gute Plattform dar, von welcher insbesondere eine Relativierung der scheinbar objektiven Versuchsergebnisse im Hinblick auf einen Vergleich mit etablierten Technologien möglich ist.

Eine Praxisdemonstration, verteilt auf eine möglichst breite Anzahl von Anwendern, stellt somit eine gute Vorbereitung für eine Einführung einer neuen Technologie dar.

II. WISSENSCHAFTLICHE BEGLEITUNTERSUCHUNGEN

3.0 ALLGEMEINES

Eine vergleichende Bewertung neuer Technologien gegenüber einer bereits eingeführten Technik, kann nur dann sinnvoll durchgeführt werden, wenn möglichst differenziert objektive aber auch subjektive Erfahrungen begleitend dokumentiert werden. Die Aussage zur Bewertung kann dann mit größter Sicherheit getroffen werden, wenn die zu vergleichenden Systeme möglichst nebeneinander unter gleichen Bedingungen erprobt werden können.

Da die Methanol-Busse einerseits Bestandteil des jährlichen Beschaffungskontingentes der BVG waren und damit im gleichen Jahr keine weiteren, vergleichbaren Diesel-Busse hätten angeschafft werden können und andererseits die Kosten für eine Referenzflotte in Relation zu den zu erwartenden zusätzlichen Ergebnissen sehr hoch waren, wurde hierauf verzichtet. Lediglich in Einzelfällen wurde im Verlauf des Vorhabens auf einen unmittelbaren Vergleich, soweit er möglich war, zurückgegriffen.

Im einzelnen wurden versuchsbegleitend folgende Betriebsdaten erhoben:

- der Betriebs- bzw. Linieneinsatz
- die verbrauchten Betriebsstoffmengen
(Methanol-Kraftstoff/Motoröl)

- die empfundenen Beanstandungen und durchgeführten Reparaturen
- die Akzeptanz gegenüber den Methanol-Bussen durch Fahrer- und Werkstattpersonal.

Darüber hinaus wurden mit je 2 Fahrzeugen eines Herstellers differenzierte Betriebsdaten während des Linieneinsatzes mittels elektronischer Datenaufzeichnung erhoben.

Messungen zu den Geräuschemissionen wurden im Rahmen des Vorhabens durchgeführt. Bei den Messungen der Abgasemissionen mußte auf Messungen der Hersteller zurückgegriffen werden.

Mit dem abgegrenzten Umfang der im Versuch erhobenen Daten lag eine gute Vergleichsbasis zu den umfangreichen, über viele Jahre mit dem Diesel-Bus gemachten Erfahrungen vor.

Als ein vorteilhaftes und wichtiges Instrument im Rahmen der Versuchsdurchführung muß die Einrichtung einer regelmäßigen projektinternen Berichterstattung 'sogenannter Projekt-routinen' gesehen werden. Bei einer regelmäßigen Zusammenkunft der Projektbeteiligten konnten durchzuführende Projektschritte abgestimmt und gleichzeitig neue Erfahrungen, die sich aus der Datenauswertung ergaben, diskutiert und umgesetzt werden. Die Projekt-routinen wurden in den Räumen des Autobus-Betriebshofes Spandau durchgeführt, womit gleichzeitig die Möglichkeit gegeben war, bei Stör- oder Schadfällen vor Ort, eine Bewertung zu treffen und Abhilfemaßnahmen zu beschließen.

4.0 BETRIEBSDATENERFASSUNG

4.1 ERHEBUNG DER BETRIEBSDATEN

Zur Erfassung technisch und wirtschaftlich bedeutender Fahr- und Betriebsdaten während des Einsatzes im Liniendienst sind sechs Fahrzeuge mit einem mobilen Betriebsdatenerfassungssystem ausgerüstet worden, um detaillierte Aussagen über Einsatz- und Betriebsbedingungen im Stadtbusbetrieb treffen zu können.

Ausgewählt wurden dafür je ein Diesel- und je zwei Methanol-Busse der Firmen MAN und DB, wobei das jeweils zweite Fahrzeug zum Jahresanfang 1988 mit dem Aufzeichnungsgerät in Betrieb genommen wurde, nachdem entsprechende Erfahrungen mit den ab Februar 1987 in den unterschiedlichen Varianten installierten Meßsystemen gesammelt werden konnten.

Es wurde zunächst ein Meßkonzept für die während des Einsatzes der Fahrzeuge im Liniendienst zu erfassenden Daten entworfen. Grundvorstellung der Datenerfassung war ein mobil einsetzbares Meßdatenerfassungssystem.

Eine Anforderung war, daß das Datenaufzeichnungsgerät möglichst einfach aufgebaut und auf den Fahrzeugbetrieb abgestellt sein sollte, damit die Fahrer möglichst wenig für die Bedienung und Beachtung des Gerätes tun müssen.

Eine Reihe von Einflußgrößen ist im Alltagsbetrieb nur schwer meßtechnisch zu erfassen, wie z.B. das Motordrehmoment, Fahrzeugmasse, Steigungen oder Luftwiderstand, so daß hier einige Kompromisse eingegangen werden mußten. Es wurden daher die folgenden Meßgrößen festgelegt:

- Fahrstrecke bzw. Geschwindigkeit
- Kraftstoffverbrauch
- Motordrehzahl
- Betrieb der Zusatzheizung
- Öltemperatur Motor, Getriebe, Hinterachse
- Temperatur Ansaugluft
- Temperatur Kühlwasser
- Fahrzeugmasse bzw. Zuladung
- Gaspedalstellung
- Bremsbestätigung (Betriebsbremse, Haltestellenbremse, Retarder).

In Bild 4.1 sind alle Meßgrößen nach Untersuchungsziel, Sensor, Verarbeitung und Speicherung unterteilt worden.

Die technische Ausführung der Meßdatenerfassung wurde in der Konzeptphase mit verschiedenen potentiellen Anbietern diskutiert und darauf aufbauend ein Lastenheft erstellt. Von zunächst insgesamt acht angesprochenen Firmen haben drei ein detailliertes Angebot eingereicht. Die Auftragsvergabe erfolgte nach Gesichtspunkten der Preiswürdigkeit, aber auch der Forderung, daß Wartung und Reparatur in einer Hand lagen und möglichst umgehend Störungen beseitigt werden konnten.

	Untersuchungsziel	Sensor	Meßgröße / Verarbeitung	Speicherung (Floppy Disk)
	Fahrzeugkennung, Datum, Zeit	Systemintern		Kopffile bei Inbetriebnahme des Fahrzeuges
1	Weg/Zeitverhalten	Tachowellengeber	Periodendauer Impulsfolge	1 Byte
2	Kraftstoffverbrauch	Diesel: PLU M100 MAN: Regelstangenweg	Impulse, Anzahl Widerstand Widerstand	1 Byte 1 Byte 1 Byte
3	Motordrehzahl	Drehzahlgeber	Periodendauer Impulsfolge	1 Byte
4	Heizung Innenraum	Steuerspannung	Spannung	1 Bit
5	Heizung Verdampfer (DB)	Temperaturschalter	Spannung	1 Bit
5	Kraftstoffdruck im Saugraum (MAN)	Druckgeber	Widerstand	1 Byte
6	Kraftstofftemperatur Einspritzpumpenaustritt MAN	PT 100	Widerstand	1 Byte
7	Getriebeöltemperatur	PT 100	Widerstand	1 Byte
8	Motoröltemperatur	PT 100	Widerstand	1 Byte
9	Temperatur Hinterachse	PT 100	Widerstand	1 Byte
10	Temperatur Ansaugluft	PT 100	Widerstand	1 Byte
11	Temperatur Kühlwasser	PT 100	Widerstand	1 Byte
12	Fahrzeugmasse	Druckgeber Luftfedern	Digitalausgang	1 Byte
13	Gaspedalstellung	Drehpotentiometer	Widerstand	1 Byte
14	Betriebsbremse	Bremslichtschalter	Spannung	1 Bit
15	Haltestellenbremse	Steuersignal	Spannung	1 Bit
16	Retarder	Steuerspannung	Spannung	1 Bit
				Summe 14 Byte + 1 Byte (5 Bit) je Sekunde

Bild 4.1: Liste der Meßgrößen

Das Grundgerät umfaßt folgende Komponenten:

- Prozessor/Interface-Karte
- Stromversorgung (10-15 oder 20-30 V)
- Diskettenlaufwerk (360 oder 720 kByte).

Es arbeitet bei Temperaturen von +10 bis +50° C. Für größere Temperaturbereiche mußte eine Isolier- und Heizungserweiterung vorgesehen werden. Die Erfahrung zeigte, daß insbesondere das Diskettenlaufwerk empfindlich gegen niedrige Temperaturen war und beim Ganzjahreseinsatz beheizt werden mußte.

Die Aufzeichnungsgeräte sind in den Fahrzeugen jeweils unter der letzten Sitzbank vor der Mitteltür eingebaut worden. Dieser Platz ist in allen Busvarianten von unten her für die Kabelanschlüsse und vom Innenraum für den Datenträgerwechsel gut zugänglich und im Linieneinsatz für die Fahrgäste nicht hinderlich. An diesem Platz ist das Gerät außer Reichweite für Beschädigungen und Manipulationen. Es befindet sich in einem isolierten Gehäuse (verschießbar), wo es abhängig von der Außentemperatur im Winter intern beheizt und im Sommer durch einen Ventilator belüftet werden konnte.

Im Lastenheft wurde neben der uneingeschränkten Eignung für den ganzjährigen Fahrzeugeinsatz gefordert:

- Robustheit
- geringe Baugröße
- IBM-PC-kompatible Meßdatenspeicherung auf Diskette
- Modularer Aufbau
 - o problemlose Anpassungsmöglichkeiten an veränderte Meßaufgaben
 - o Erweiterungsmöglichkeit für andere Speichermedien und weitere Meßkanäle
 - o Speicherkapazität für mindestens 20 Betriebsstunden
 - o vollautomatischer Betrieb des Meßsystems ohne Zugriffserfordernisse des Fahrers (abgesehen vom Diskettenwechsel).

In der beschriebenen Konfiguration ermöglicht das aufgeführte Meßgerät die Messung von 20 Kanälen, die sich im einzelnen wie folgt gliedern:

- 3 in Frequenzen kodierte Signale (z.B. Motordrehzahl)
- 1 Impulszähler (z.B. Kraftstoffdurchfluß über PLU-Gerät)

- 16 digitale Signale
(z.B. An-/Aus-Zustände wie Kupplung, Bremse)

oder

- 8 analoge Signale bzw. Mischungen aus beiden.

Das System arbeitet mit dem Siemens Microcontroller SAB 80535 und einer Taktfrequenz von 12 MHz. Auf der Prozessorplatine des Grundgerätes befindet sich eine akkugepufferte Echtzeituhr mit Datum, ein Eprom, ein 32 kByte großer statischer, akkugepuffert RAM-Speicher (Datenhaltezeit 150 h) sowie das Meßinterface. Der Anschluß der Meßleitungen erfolgt über einen 25-poligen AMP-Junior-Timer-Stecker. Eine V 24-ähnliche serielle Schnittstelle mit einer Übertragungsrate von 4800 Baud steht zur Kommunikation mit einem externen Rechner zur Verfügung. Dadurch ist ein Umprogrammieren bzw. Anpassen des Meßzyklus, Stellen der Echtzeituhr oder Sichtbarmachen der Messung auf einem Bildschirm möglich. Beim Hersteller in Vorbereitung waren auch Kassettenlaufwerke und steckbare RAM-Disk mit 1 MByte zur Speichererweiterung bzw. Betriebszeitverlängerung (die Möglichkeiten sind jedoch nicht weiterentwickelt worden, da Zeit- und Kostenvorgaben des Vorhabens dies nicht erlaubten). Vier digitale Ausgänge stehen für Kontrollanzeigen oder Relaisansteuerungen zur Verfügung.

Die Signale der Sensoren werden über den Sammelstecker auf die Interface-Karte geführt, aufbereitet und über den Microcontroller im 1-Sekundentakt auf die Diskette geschrieben. Diese Taktzeit wurde

als Kompromiß zwischen der zeitlichen Auflösung der Daten und des Speicherbedarfs gewählt; darüber hinaus können wenig veränderliche Meßgrößen auch nur im Minutentakt abgespeichert werden.

Das Übertragen der Meßdaten erfolgt sektorweise, wobei nicht voll ausgenutzte Sektorteile mit einem Sonderzeichen aufgefüllt werden. Eine Kopfzeile mit Datum, Zeit und Fahrzeugkennung erlaubt die Identifizierung der einzelnen Aufzeichnungen; der genaue Zeitpunkt einer Einzelmessung wird durch Auszählen der Takte ab der letzten Kopfzeile bzw. des Blockanfangs bei der Kontrolle oder Auswertung mit dem stationären Rechner ermittelt. Durch Abspeicherung der analogen Meßgrößen mit je 1 Byte ergibt sich eine Auflösung des Meßbereiches in je 255 Stufen. Die fünf Zustandsgrößen werden zusammen in einem Byte kodiert und erst bei der Auswertung wieder decodiert.

Die Abspeicherung der Meßdaten von bis zu 30 Einsatzstunden auf 5 1/4"-Disketten erfolgt, indem die während der Fahrt aufgenommenen Daten in einen RAM-Zwischenspeicher geladen und nur im Stillstand des Fahrzeugs auf die Disketten überspielt werden. Erst wenn die Kapazität des Zwischenspeichers (entsprechend etwa einer halben Stunde Meßbetrieb) erschöpft ist, werden die Disketten auch während der Fahrt beschrieben. Der Einsatz von Diskettenlaufwerken als preisgünstiges Speichermedium hat sich als richtig herausgestellt, da es entgegen anfangs verschiedentlich geäußerter Bedenken nicht zu Datenverlusten auf den Disketten oder zu Laufwerksschäden gekommen ist. Die spezielle Laufwerkssteuerung und die thermische Isolierung haben diesem Speichermedium eine hohe Funktionssicherheit gegeben.

Allerdings ist der Anteil unbeschriebener oder nicht auswertbarer Disketten dennoch relativ hoch. Die Gründe hierfür liegen bei in der Anfangsphase häufigen Bedienungsfehlern beim Diskettenwechsel, falschem Verhalten nach Störungen und in Schäden der angeschlossenen Sensorik.

Die bei der Bedienung aufgetretenen Fehler hatten zum Teil ihre Ursache in einer zu knapp gehaltenen Bedienungsanleitung, andererseits stellte sich heraus, daß durch den Verzicht auf zusätzliche Kontrolleinrichtungen der Gerätefunktionen das Gerät z.B. deswegen nicht in Betrieb war, weil das Ansprechen einer Sicherung nicht bemerkt wurde.

Durch den zwar täglichen Diskettenwechsel, den jedoch nur wöchentlichen Turnus der Auswertung, wurde der Verlust von Daten erst relativ spät bemerkt. Der hierdurch entstandene Datenverlust ist jedoch sehr gering im Hinblick auf die Gesamtmenge der auf diese Weise erhobenen Daten. Bei Versuchsende lag ein Bestand von über 1.500 auswertbaren Disketten vor.

Die Liste der aufgezeichneten Daten ist im Versuchszeitraum gegenüber der ursprünglichen Auslegung nur geringfügig geändert worden. So wurden z.B. anstelle der Kraftstofftemperaturen nunmehr die Abgastemperaturen vor und/oder nach Katalysator gemessen.

Die Erfahrungen mit den eingesetzten Sensoren sind recht unterschiedlich. So ist z.B. die Messung der Temperaturen mit einem PT 100 sehr genau, doch

zeigten sich unerwartet aus unterschiedlichsten Ursachen häufig Schäden an den Kabelanschlüssen. Die Meßwerte über Geschwindigkeit und Verbrauch bei den Diesel-Vergleichsfahrzeugen, die in den Vorversuchen, insbesondere an der unteren Meßbereichsgrenze, Probleme auswiesen, lieferten später über Monate hinweg gute Ergebnisse. Die Kraftstoffverbrauchsmessung bei den Vergleichsbussen mit Diesel-Motor wurde mit Durchflußmeßgeräten der Firma PLU, Typ 116, vorgenommen.

Die MAN-Methanol-Busse dagegen wurden mit Regelstangenweggebern ausgerüstet, da die Durchflußmessung in der herkömmlichen Weise wegen der starken Neigung des Methanol-Kraftstoffes zur Dampfblasenbildung nicht möglich war. Die Regelstangenweggeber hatten jedoch leider nur eine sehr kurze Lebensdauer, da es meist schon nach einer Woche zu wahrscheinlich auf Methanoldämpfe zurückzuführenden Wicklungsschäden in diesen Sensoren kam. Nach mehrmaligem Ersatz mußte daher auf diese Meßgröße verzichtet werden. Über die Eignung der Regelstangenweggeber für die Kraftstoffverbrauchsmessung bei den Methanol-Bussen wurde ergänzend eine Untersuchung in Auftrag gegeben, die im Ergebnis die prinzipielle Eignung bestätigte, wegen der geringen Standzeiten aber vom Einsatz abrät.

Bei den DB-Methanol-Bussen mit Gasmotor ist eine kontinuierliche Messung des flüssigen Kraftstoffes vor dem Verdampfer nicht möglich. Zur Bestimmung der Lastkollektive, als Einflußgröße für den Verbrauch im Fahrbetrieb, wurde die Stellung der Drosselklappe mit einem Geber erfaßt und auf eine direkte Verbrauchsmessung verzichtet.

Eine aufgrund der vorgenannten Probleme in Auftrag gegebene 'Untersuchung von Meßverfahren zur dynamischen Kraftstoffverbrauchsmessung in Kraftfahrzeugen' ergab ebenfalls, daß es keine Sensoren zur Kraftstoffverbrauchsmessung gab, die bei den Methanol-Motoren von MAN und DB zufriedenstellend eingesetzt werden konnten. Alle aufgezeigten Lösungen ließen sich nicht umsetzen, da sie mit dem Zeit- und Kostenrahmen des Vorhabens nicht zu vereinbaren oder selbst nur als Labormuster vorhanden, d.h. nicht im Handel erhältlich waren.

Diese Situation, bei der eine der wichtigsten Meßgrößen nicht für alle Alternativen der Antriebstechnik vergleichbar erfaßt und ausgewertet werden konnte, ist zwar nicht anders als unbefriedigend zu bezeichnen, andererseits muß aber auch in Erinnerung gerufen werden, daß es sich hier um ein Demonstrationsvorhaben handelte und der unter Umständen erforderliche Entwicklungsaufwand für die Meßtechnik damit nicht in Einklang zu bringen ist. Für zukünftige Forschungsvorhaben könnten durchaus andere Voraussetzungen vorliegen. So wäre z.B. gegen Vorhabensende ein Einsatz der PLU-Durchflußsensoren bei den MAN-Methanol-Motoren doch noch denkbar gewesen, da die Kraftstoffanlage geändert wurde.

Ebenfalls nicht zur vollen Zufriedenheit verliefen bei einigen Fahrzeugen die Motor-Drehzahlmessungen. Da im Leerlauf nur noch etwa 6 - 8 Umdrehungen pro Sekunde erfolgen, ist in dem Meßzyklus von 100 ms keine ausreichend genaue Erfassung dieser wenigen Impulse, z.B. von der Zündanlage, möglich.

Es sind daher teilweise optische, teilweise induktive Geber montiert worden, die auf Reflexpunkte bzw. Schraubenköpfe an der Keilriemen-Scheibe reagieren. Diese Geber müssen jedoch relativ genau justiert werden, müssen unempfindlich gegen Schwingungen sein und dürfen Wartungsarbeiten nicht behindern. Trotz sorgfältiger Anbringung ist es in einigen Fällen schon nach wenigen Wochen zu Störungen und Ausfällen gekommen.

Anhand der vorgenannten Beispiele läßt sich ein Grundproblem der Betriebsdatenerfassung über lange Beobachtungszeiträume erkennen. Die auf dem Markt angebotene oder in Forschungs- und Entwicklungsabteilungen eingesetzte elektronische Meßtechnik ist zwar oft im Prinzip äußerst leistungsfähig, für den Praxiseinsatz im rauhen Alltag aber entweder zu teuer, zu empfindlich, zu wartungsaufwendig oder erfordert einen nicht akzeptablen Installationsaufwand. Einfachere Sensoren, wie sie etwa in Großserien-Pkw tausendfach verwendet werden, sind dagegen häufig zu ungenau, liefern für die Weiterverarbeitung ungeeignete Signale oder sind für den nachträglichen Einbau in nicht entsprechend vorbereitete Fahrzeug ungeeignet.

Der in diesem Forschungsvorhaben beschrittene Mittelweg hat sich nun als schwieriger herausgestellt, als dies zunächst abzusehen war, zeigt aber auch, daß mit gewissen Einschränkungen durchaus zufriedenstellende Ergebnisse bei akzeptablem Aufwand zu erzielen sind. Für andere bzw. zukünftige Teilvorhaben (Hydro-Bus, Metroliner, Bi-Mot usw.) sind wertvolle Erfahrungen gesammelt worden, die dort für wesentlich geringere Startschwierigkeiten bei der Betriebsdatenerfassung sorgen werden.

4.2

DATENVERARBEITUNG UND AUSWERTUNG

Die vom Betriebsdatenerfassungssystem bespielten Disketten wurden im wöchentlichen Turnus an die SNV übergeben und dort geprüft. Dazu ist ein Fortran-Programm erstellt worden, das die Wiedergabe der Aufzeichnungen in Tabellenform erlaubt und eine Reihe von Abfragen vornimmt, mit denen Störungen bei der Aufzeichnung allgemein bzw. Störungen einzelner Meßgrößen erkannt werden können. Ebenso ist es möglich, mittels einer Option 'Prüfen' zeitsparend nur ein sogenanntes Kopf-File zu lesen, in dem Informationen über das verwendete Gerät, Datum und Menge der aufgezeichneten Daten abgelegt werden. Tabelle 4.2 zeigt exemplarisch ein mit diesem Programm erstelltes Prüfprotokoll mit kurzem Statistikeil.

Das Prüfprotokoll weist bei diesem Fahrzeug eine Fehlermeldung für die Verbrauchsmessung auf, da bei beiden MAN-Methanol-Bussen, die meßtechnisch ausgerüstet wurden, die verwendeten Regelstangenweggeber, wie zuvor bereits beschrieben, nur eine geringere Lebensdauer hatten. Ursache der Ausfälle waren bei beiden Gebern gerissene Spulenwicklungen.

Bei der im Prüfprotokoll angegebenen Maximalgeschwindigkeit ist zu beachten, daß es sich um den höchsten, während der Betriebsdauer aufgetretenen Meßwert handelt, der unter Umständen weniger als eine Sekunde anlag. Eventuell aufgetretene Abtastfehler, die zur Anzeige der Maximalgeschwindigkeit geführt haben, können durch eine Darstellung des Geschwindigkeitsverlaufes erkannt werden.

Programm G3M100
Ausgabe und Prüfung der Diskettenaufzeichnungen
TV 7911 M100

Anzeige der Datenaufzeichnungen von Bus 1663

Anfangs-Km-Stand 105573 End-Km-Stand 105763
Disk-Nr. = 1292
Geräte-Nr. = 4
Anfangssektor Nr.: 0
Endsektor Nr. : 596
Programmversion Goth: 4

Ausdruck von Sektor 0 bis Sektor: 596

Datenfile ist beschrieben bis Sektor 868 1

Datum : 13.05.1988

Die Gesamtzeit der Messung beträgt: 58805 Sekunden
16. Stunden 20. Minuten 5. Sekunden

Der errechnete Gesamtverbrauch beträgt: 824.977 Liter

Durchschnittsverbrauch : 435.77 l/100 km (M 100)
(Durchschnittsverbrauch (M 100) nicht plausibel !)
(Regelstangenweggeber Defekt ?)

Die errechnete Gesamtfahrstrecke beträgt: 189.314 km
(Korrekturfaktor: 9.500000E-01)

Gesamtfahrstrecke laut Etikett: 190 km
(Verbrauch über Km-Stand-Angabe nicht plausibel)

Maximal erreichte Geschwindigkeit 62 km/h (Sektor 524)
Maximaldrehzahl: 1788 1/min in Sektor 302
(Korrekturfaktor: 7.500000E-01)

Gaspedal max 155 Gaspedal min 0

Einschalt Dauern der Digitalwerte (%-Angaben gerundet)

Heizung	0 s bzw.	0 %
Haltestelle	10443 s bzw.	18 %
Retarder	14736 s bzw.	25 %
Fußbremse	6984 s bzw.	12 %
Testschalter	0 s bzw.	0 %

Minimal- und Maximaltemperaturen (Sektor in Klammern)

Kühlwassertemperatur	min 35.33 (14), max 95.33 (742) °C
Hinterachstemperatur	min 22.67 (10), max 62.67 (715) °C
Motoröltemperatur	min 31.33 (11), max 98.00 (630) °C
Fahrerplatstemperatur	min 15.33 (11), max 31.33 (626) °C
Ansauglufttemperatur	min 22.67 (25), max 53.33 (716) °C
Katalysatortemperatur/v	min 4.00 (10), max 404.00 (21) °C
Katalysatortemperatur/h	min 8.00 (10), max 428.00 (225) °C

Getriebeöltemperaturmessung gestört ! (<-25 bzw. >120 °C) 1
von Sektor 394 bis Sektor 794

Protokoll erstellt am 25. 5.1988

Tabelle 4.2: Prüfprotokoll (exemplarisch)

Die Wegaufzeichnungen zeigen bereits ohne einen erforderlichen Abgleich gute Übereinstimmungen zur Wegstreckenanzeige des Fahrzeuges, Haupteinflußfaktor ist hier vornehmlich der Reifenverschleiß und damit der Abrollumfang.

Die im Prüfprotokoll angegebenen Temperaturen für den Katalysator sind die Bereichsgrenzen, in denen sich die gemessenen Temperaturen im Verlauf des dokumentierten Betriebszeitraumes bewegt haben.

Zur eigentlichen Auswertung sind alle Disketten, die die Plausibilitätsprüfungen bestanden haben, auf eine 330-MByte-Festplatte überspielt worden. Mittels eines in der Programmsprache 'Modula' geschriebenen Auswerteprogramms wurden eine Vielzahl von Wertetabellen bzw. Dateien erstellt, die die Grundlage für die tabellarische und graphische Darstellung der Versuchsergebnisse darstellen.

4.3

ALLGEMEINE ERGEBNISSE

Eine umfangreiche statistische Aufbereitung aller auf die Festplatte des PC überspielten Betriebsdaten war, wie sich im Laufe der Arbeiten herausgestellt hat, doch nicht für alle Daten aller Busse gleichzeitig möglich, da hierzu eine Speicherkapazität von mehr als einem Gigabyte notwendig gewesen wäre. Aus diesem Grunde wurde eine Auswahl aus den zur Verfügung stehenden Daten getroffen, bei der Tage mit hohen Laufleistungen und Verfügbarkeit von Daten aller sechs Meßbusse bevorzugt wurden und ebenso Daten aus Wochen mit geringen Lauf-

leistungen oder hohem Anteil an gestörten bzw. fehlenden Aufzeichnungen vorerst nicht zur Auswertung gelangten. Angesichts der enormen Datenmenge, die insgesamt gesammelt wurde, dürfte diese subjektive Auswahl die statistische Repräsentativität kaum beeinflussen.

Es ist jedoch jederzeit möglich, die Betriebsdaten einzelner Tage und Fahrzeuge (d.h. einzelner Disketten) mit dem inzwischen ebenfalls sehr leistungsfähigen Prüfprogramm auszuwerten. Als Beispiel für eine Zwischenauswertung einer Diskette mag eine Aufzeichnung vom 30.11.1987 dienen.

Bild 4.3 zeigt zum Beispiel die Verläufe von Fahrgeschwindigkeit, Motordrehzahl und Verbrauch des MAN-Diesel-Vergleichsfahrzeuges (Bus 1662) während einer Probefahrt, die der Kalibrierung der Verbrauchs- und Weg/Zeitaufzeichnungen diente. Dazu wurde ein Meßtank in das Fahrzeug eingebaut, mit dem sehr exakt der absolute Kraftstoffverbrauch während der Testfahrt zu ermitteln war. Die im Bild dargestellte Fahrphase ist das Abfahren einer bekannten, häufig für Probefahrten benutzten Strecke, auf der sowohl ein Linieneinsatz simuliert als auch über einige Kilometer höhere Geschwindigkeiten gefahren werden können.

Die Mitschriften ergaben bei dieser Testfahrt einen mit dem Meßtank ermittelten Verbrauch von 5,3 l für 18,5 km Fahrstrecke. Der aus den elektrischen Aufzeichnungen berechnete Gesamtverbrauch für diese Fahrt beträgt 5,25 l, d.h. es ergab sich eine Differenz von weniger als einem Prozent.

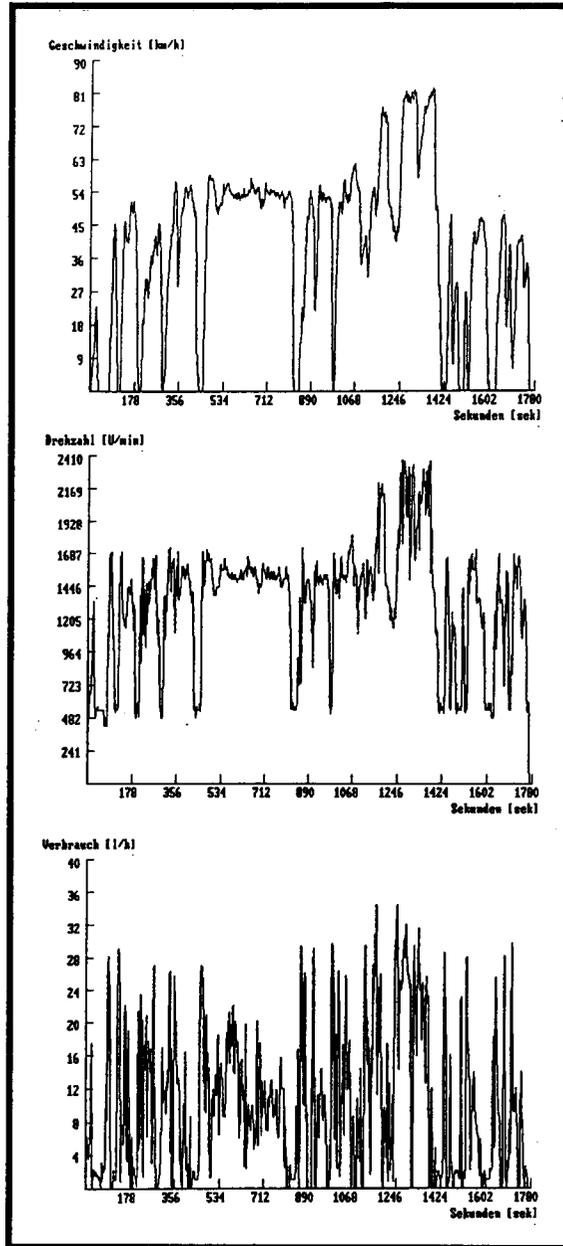


Bild 4.3: Auswertung einer Fahrphase
(Bus-Nr. 1662 vom 30.11.87)

Tabelle 4.4 ist die tabellarische Wiedergabe der wichtigsten Kenngrößen dieser Fahrt. Hierbei ist zu beachten, daß es sich nicht um einen realen Linieneinsatz handelte und damit die Verteilungen von Konstantfahrt, Beschleunigungen und Verzögerungen usw. nicht typisch sind.

Auffallend bei den Ergebnissen, die unter diesen Voraussetzungen festgestellt wurden, ist z.B., daß das Öl der Hinterachse nur selten die angestrebte Betriebstemperatur erreicht, womit die Fahrwiderstände aufgrund hoher Schwerkkräfte des Öles höher sein dürften als dies erforderlich wäre.

Fahrvorgänge

Stand	:	279	s
Beschleunigung	:	276	s
Verzögerung	:	252	s
Verzögerung mit Bremse	:	145	s
Verzögerung ohne Bremse	:	107	s
Konstantfahrt	:	1146	s
Prozentualer Anteil für Stehen	:	14,49	%
Prozentualer Anteil der Beschleunigung	:	14,33	%
Prozentualer Anteil der Verzögerung	:	13,08	%
Prozentualer Anteil der Konstantfahrt	:	59,50	%
Prozentualer Anteil eingeschalteter Heizung	:	17,24	%
Durchschnittlicher Verbrauch	:	27,35	l/100 km
Maximale Geschwindigkeit	:	75	km/h
Maximale Motordrehzahl	:	2380	U/min
Maximaler Verbrauch	:	37,40	l/100 km
Anteil Hinterachstemperatur > 45°	:	0,00	%
Anteil Motortemperatur > 65°	:	76,95	%
Gesamte Fahrstrecke	:	19,94	km

Bild 4.4: Auswertung einer Fahrphase
(Bus-Nr. 1662 vom 30.11.87)

Der Kraftstoffverbrauch des Wagens 1662 während der o.g. Testfahrt am 30.11.1987 ist in den Tabellen 4.5 und 4.6 einmal exemplarisch über verschiedene Geschwindigkeitsklassen aufgeteilt dargestellt worden.

Tabelle 4.7 zeigt die Verteilung der in den Geschwindigkeitsklassen verbrauchten Kraftstoffmenge. So ist hier z.B. 25 % des auf dieser Fahrt verbrauchten Kraftstoffs im Geschwindigkeitsbereich zwischen 50 und 60 km/h verbraucht worden.

Durchschnittlicher Kraftstoffverbrauch über der Geschwindigkeit (alle Motor-, Getriebe- und Hinterachstemperaturen):

Geschwindigkeit	Verbrauch / Zeit	Verbrauch / Weg
0 km/h	2.1 l/h	
> 0 km/h - 10 km/h	4.6 l/h	81.9 l/100 km
> 10 km/h - 20 km/h	8.1 l/h	51.9 l/100 km
> 20 km/h - 30 km/h	9.7 l/h	37.6 l/100 km
> 30 km/h - 40 km/h	11.6 l/h	31.6 l/100 km
> 40 km/h - 50 km/h	10.8 l/h	23.3 l/100 km
> 50 km/h - 60 km/h	11.9 l/h	22.5 l/100 km
> 60 km/h - 70 km/h	21.4 l/h	32.4 l/100 km
> 70 km/h - 80 km/h	23.5 l/h	31.0 l/100 km
> 80 km/h - 90 km/h	.0 l/h	.0 l/100 km
über 90 km/h	.0 l/h	.0 l/100 km
Durchschnitt	10.7 l/h	27.9 l/100 km

(Keine Auswertung in Klassen mit < 0.1 km bzw. < 10 s)

Zugrundegelegte Gesamtsummen:

Σ Verbrauch: 5.2 l Σ Weg: 18.8 km Σ Zeit: 1766 s

Bild 4.5: Durchschnittlicher Kraftstoffverbrauch (Bus-Nr. 1662 vom 30.11.87)

Verbrauchsverteilungen über Geschwindigkeitsklassen

(nur Konstantfahrtanteile ($a < \pm 0,3 \text{ m/s}^2$))

Durchschnittlicher Kraftstoffverbrauch über der Geschwindigkeit
(alle Motor-, Getriebe- und Hinterachstemperaturen):

Geschwindigkeit	Verbrauch / Zeit	Verbrauch / Weg
0 km/h	2.0 l/h	
> 0 km/h - 10 km/h	3.2 l/h	.0 l/100 km
> 10 km/h - 20 km/h	4.5 l/h	29.2 l/100 km
> 20 km/h - 30 km/h	5.5 l/h	20.8 l/100 km
> 30 km/h - 40 km/h	10.3 l/h	27.6 l/100 km
> 40 km/h - 50 km/h	10.1 l/h	21.7 l/100 km
> 50 km/h - 60 km/h	11.5 l/h	21.9 l/100 km
> 60 km/h - 70 km/h	23.4 l/h	35.4 l/100 km
> 70 km/h - 80 km/h	23.4 l/h	30.8 l/100 km
> 80 km/h - 90 km/h	.0 l/h	.0 l/100 km
über 90 km/h	.0 l/h	.0 l/100 km
Durchschnitt	9.8 l/h	25.1 l/100 km

(Keine Auswertung in Klassen mit $< 0.1 \text{ km}$ bzw. $< 10 \text{ s}$)

Zugrundegelegte Gesamtsummen:

I Verbrauch: 3.2 l I Weg: 12.7 km I Zeit: 1175 s

Bild 4.6: Kraftstoffverbrauch bei Konstantfahrt (Bus-Nr. 1662 vom 30.11.87)

Verbrauchsverteilungen über Geschwindigkeitsklassen
(alle Fahrzustände einschließlich Schiebebetrieb)

Verteilung des Kraftstoffverbrauchs über der Geschwindigkeit
(in % der I des Gesamtverbrauchs):

Standzeiten	2.2 %
> 0 km/h - 10 km/h	2.1 %
> 10 km/h - 20 km/h	4.6 %
> 20 km/h - 30 km/h	7.7 %
> 30 km/h - 40 km/h	12.7 %
> 40 km/h - 50 km/h	26.0 %
> 50 km/h - 60 km/h	25.0 %
> 60 km/h - 70 km/h	4.0 %
> 70 km/h - 80 km/h	15.7 %
> 80 km/h - 90 km/h	.0 %
über 90 km/h	.0 %

I 100.0 %

Bild 4.7: Kraftstoffverbrauch
über Geschwindigkeitsklassen
(Bus-Nr. 1662 vom 30.11.87)

Zwei Fahrzeuge (1663, MAN M 100; 1670, DB M 100) sind mit Temperaturfühlern am Abgaskatalysator ausgerüstet worden. Die Temperaturen schwanken im Fahrbetrieb zwischen etwa 200°C und knapp 600°C beim DB-Fahrzeug bzw. gut 400°C beim MAN. Diese Unterschiede sind konzeptionell bedingt. Die Temperaturverläufe (die bisher nur in Tabellenform vorliegen) zeigen, daß die Temperatur vor dem Ka-

talysator um etwa 100°C geringer ist, als die nach dem Katalysator. Im Fahrbetrieb stellen sich meist Temperaturen zwischen 200°C und 400°C nach dem Katalysator (MAN) ein; im Leerlauf werden dagegen keine 200°C erreicht.

Die Einsatzzeiten der Methanol-Busse pro Tag sind sehr unterschiedlich. Typisch sind Aufzeichnungsdauern und damit Einsatzdauern von etwa 5 - 6 Stunden zuzüglich der nicht erfaßten Zeiten, z.B. an Endhaltestellen. Es kommen aber auch registrierte Aufzeichnungszeiten von über 23 Stunden vor, d.h. die Fahrzeuge sind mitunter praktisch rund um die Uhr im Einsatz.

In Tabelle 4.8 ist dargestellt, wie die einzelnen Fahrten eines typischen Einsatztages aussehen. Die Streckenlängen der Fahrten mit dem Vermerk 'LE' stimmen recht gut überein, wobei der Linieneinsatz aus der Verknüpfung 'länger als 100 m und mehr als 10 Haltestellen' geschlossen wurde.

Bei einigen Fahrten sind offensichtlich einige Haltestellen ausgelassen worden, obwohl es sich aufgrund der übereinstimmenden Streckenlänge doch um reguläre Linieneinsätze gehandelt hat. Bei einer Fahrt (Nr. 17) ist der Wagen ohne längeren Aufenthalt wieder in Gegenrichtung auf die Linie gegangen, wodurch sich bei der Auswertung die doppelte Streckenlänge ergab.

Durchschnittliche Streckenlänge und -fahrzeit ganzer Fahrten:
 Länge in km: 5.957 Dauer in Sekunden: 1063 Anzahl: 41
 Durchschnitt gefiltert (Streckenlänge > 100 m):
 Länge in km: 8.133 Dauer in Sekunden: 1449 Anzahl: 30

Liste der Einzelfahrten :

lfd. Nr.	Länge in km	Dauer [min]	Uhr von/bis lt. Diskette	Sektoren von/bis	Linie/Ende *	Verb. l/100km	Σ Stops / Hst. **	Geschw km/h
1	.3	1	01:50/01:51	83/ 84	Z	.0	3/ 0	11.7
2	.3	5	04:52/05:02	85/ 91	5	.0	2/ 0	3.6
3	2.9	6	05:18/05:27	101/ 107	5	.0	4/ 0	30.3
4	8.6	22	05:27/05:55	107/ 124	5	.0	9/ 5	23.7
5	3.8	24	06:13/06:42	135/ 153	LE 5	.0	24/ 15	21.9
6	8.6	22	06:58/07:25	163/ 180	5	.0	16/ 9	23.8
7	8.8	24	07:41/08:12	190/ 209	LE 5	.0	30/ 19	21.8
8	8.5	25	08:28/08:58	219/ 238	LE 5	.0	25/ 17	20.6
9	8.8	26	09:11/09:41	246/ 265	LE 5	.0	26/ 19	20.6
10	8.6	29	09:58/10:31	275/ 296	LE 5	.0	24/ 16	17.9
11	8.8	26	10:41/11:12	302/ 321	LE 5	.0	26/ 18	20.4
12	8.6	29	11:28/12:01	331/ 352	LE 5	.0	26/ 16	18.0
13	8.9	27	12:11/12:43	358/ 378	LE 5	.0	30/ 17	19.9
14	8.5	24	12:58/13:27	387/ 405	LE 5	.0	24/ 13	21.8
15	8.8	23	13:41/14:10	414/ 432	LE 5	.0	25/ 17	22.9
16	8.6	34	14:23/15:03	440/ 465	LE 5	.0	27/ 16	14.9
17	17.4	68	15:13/16:27	471/ 517	LE 5	.0	87/ 35	15.3
18	8.8	35	16:43/17:23	527/ 552	LE 5	.0	31/ 16	15.3
19	8.5	25	17:28/17:58	555/ 574	LE 5	.0	30/ 16	20.3
20	8.8	23	18:13/18:42	583/ 601	LE 5	.0	22/ 15	22.6
21	8.6	23	18:43/19:11	602/ 619	LE 5	.0	22/ 14	22.5
22	8.9	24	19:27/19:56	629/ 647	LE 5	.0	23/ 15	22.4
23	8.6	27	20:10/20:42	656/ 676	LE 5	.0	23/ 12	19.3
24	8.8	21	20:57/21:23	685/ 701	LE 5	.0	21/ 11	25.1
25	8.6	26	21:29/22:01	705/ 725	LE 5	.0	19/ 10	19.8
26	8.8	22	22:17/22:45	735/ 752	5	.0	14/ 7	24.4
27	8.6	27	22:49/23:21	755/ 775	LE 5	.0	21/ 15	18.9
28	8.8	23	23:36/00:03	784/ 801	5	.0	10/ 7	22.9
29	14.3	32	00:10/00:48	805/ 829	LE 5	.0	15/ 10	26.3
30	.2	3	00:50/00:55	830/ 833	Z	.0	4/ 1	3.5

* LE: Linieneinsatz; mehr als 10 Haltestellen
 Z : Fahrt beendet mit "Zündung aus"
 5 : Fahrt beendet nach 5 min Standzeit

** Stops : Alle Fahrtunterbrechungen
 Hst. : Nur betriebliche Halte bzw. Haltestellen

Bild 4.8: Durchschnittliche Streckenlänge und Fahrzeit

Für einige ausgewählte Tage wurde anhand einer derartigen Fahrtenübersicht eine Gegenüberstellung der zu bestimmten Tageszeiten erreichten mittleren Fahrgeschwindigkeiten und der mittleren Kraft-

stoffverbräuche gemacht. Die Darstellungen in den Bildern 4.9 und 4.10 zeigen teilweise recht deutliche Zusammenhänge, d.h. relativ hohe Durchschnittsverbräuche bei niedrigen Durchschnittsgeschwindigkeiten und ebenso deutlich geringere Verbräuche in den Nachtstunden.

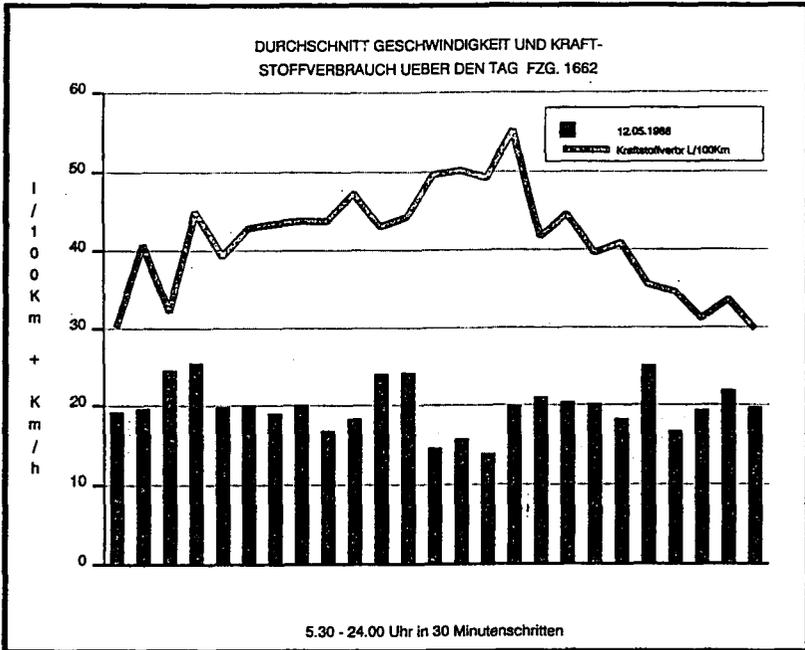


Bild 4.9: Auswertung der Fahrten eines Tages (Bus-Nr. 1662 vom 12.5.88)

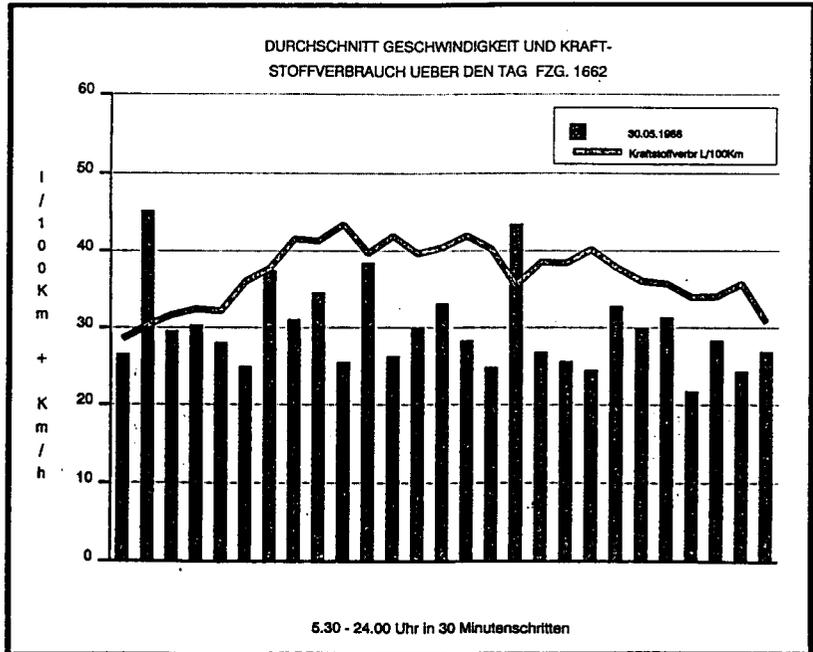


Bild 4.10: Auswertung der Fahrten eines Tages (Bus-Nr. 1662 vom 30.5.88)

4.4 SPEZIFISCHE ERGEBNISSE

Die Auswertung der gesamten gesammelten Daten hat eine derartige Fülle an Material ergeben, daß eine Darstellung aller Ergebnisse hier den Rahmen des Berichtes sprengen würde. Stattdessen sollen bevorzugt nur Ergebnisse exemplarisch ausgewählter Fahrzeuge und Zeiträume zu den jeweiligen Themen bzw. Verknüpfungen gezeigt werden.

Bei der parallelen Auftragung der aufgezeichneten Größen über der Zeitachse ergeben sich Darstellungen wie in den Bildern 4.11 und 4.12. Die Zeitachse erlaubt hier gerade die Wiedergabe einer Linienfahrt des Wagens 1671 in der Übersicht; längere Zeiträume lassen sich nicht mehr abbilden, da die Strichstärke ja nicht beliebig verringert werden kann.

Die grafische Darstellung der Fahrvorgänge ist jedoch gut geeignet, die Qualität und Störungsfreiheit der Daten mit einem Blick zu überprüfen. So erkennt man im Beschleunigungsverlauf des Bildes 4.12 von Wagen 1671 nicht plausible, hohe Spitzen und fehlende Signale bei drei kurzen Fahrtintervallen (z.B. bei Sekunde 350). Die Motordrehzahlen wurden teilweise oberhalb der Nenndrehzahl angegeben. Ebenso deutlich läßt sich aus diesen Bildern erkennen, daß die permanente Aufzeichnung einiger Meßgrößen im Minutentakt eigentlich nicht notwendig ist.

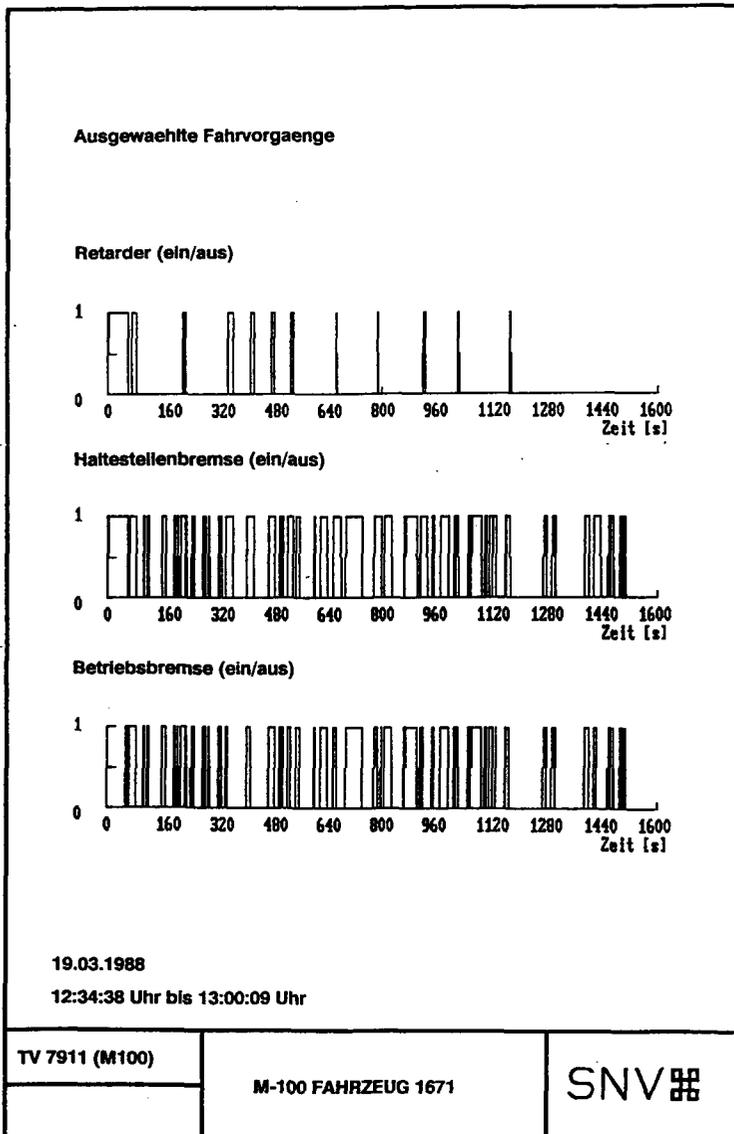


Bild 4.11: Ausgewählte Fahrvorgänge
(Bus-Nr. 1671 vom 19.3.88)

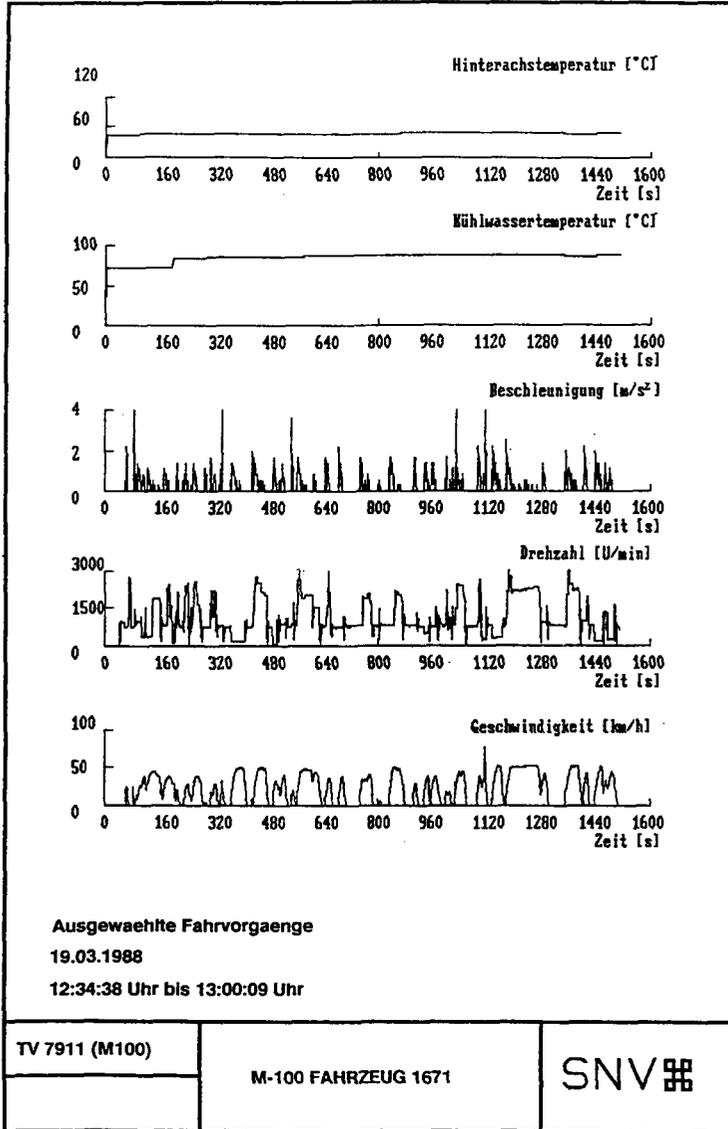


Bild 4.12: Ausgewählte Fahrvorgänge
(Bus-Nr. 1671 vom 19.3.88)

Die Bilder 4.13 bis 4.15 zeigen einen Fahrtvorgang des im Vergleichsverfahren eingesetzten Diesel-Busses 1662 vom 12.5.1988. Die zur Unterscheidung verschiedener Betriebsbedingungen aufgezeichneten Temperaturen von Kühlwasser, Hinterachse und Motoröl ändern sich nur minimal über die ganze Fahrt und beginnen auch schon auf hohem Niveau. Man kann hier auch beliebige andere Fahrten des Tages herausgreifen und erhält fast die gleichen Ergebnisse. Die normalen Standzeiten an den End- und Betriebshaltestellen sind offenbar kurz genug, um das Fahrzeug den gesamten Einsatztag über auf ausreichenden Betriebstemperaturen zu halten und gute Betriebsbedingungen zu gewährleisten. Es würde demzufolge völlig ausreichen, nur die Über- bzw. Unterschreitung einer Betriebstemperatur als 1/0-Wert aufzuzeichnen, um die Betriebsbedingungen zu erkennen. Dies wird auch bestätigt durch die Tabelle 4.16, aus der erkennbar wird, daß die Betriebstemperaturen verteilt über den ganzen Tag zu rund 90 % in nur einer Temperaturklasse liegen.

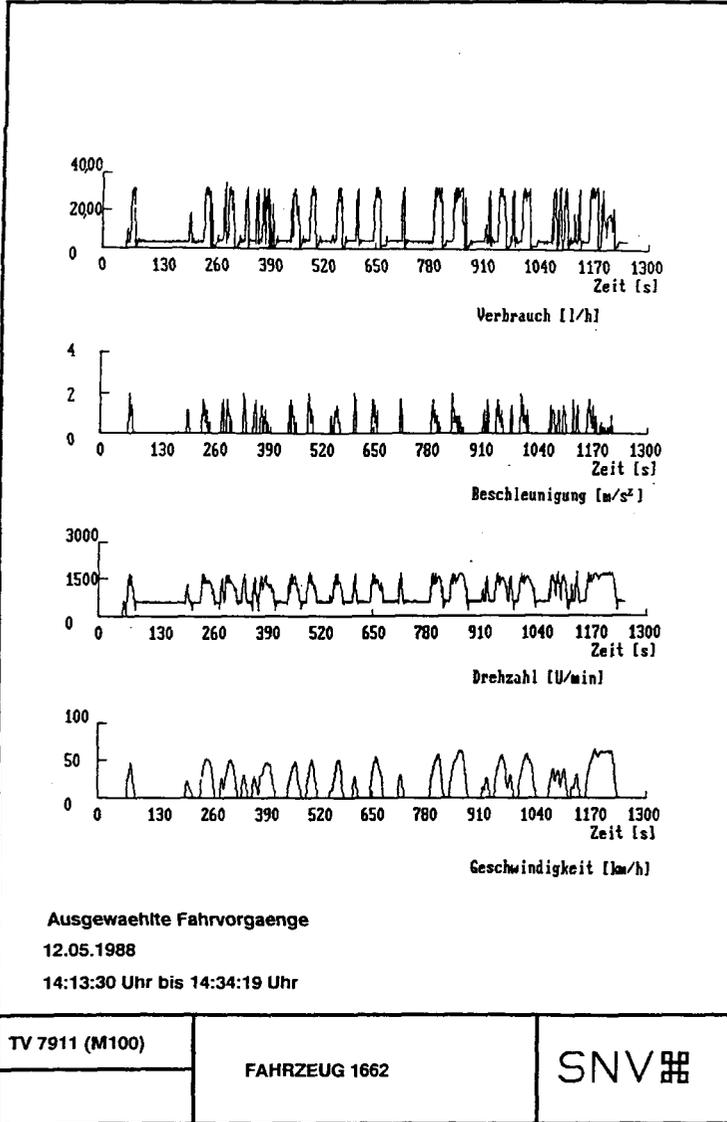


Bild 4.13: Ausgewählte Fahrvorgänge
(Bus-Nr. 1662 vom 12.5.88)

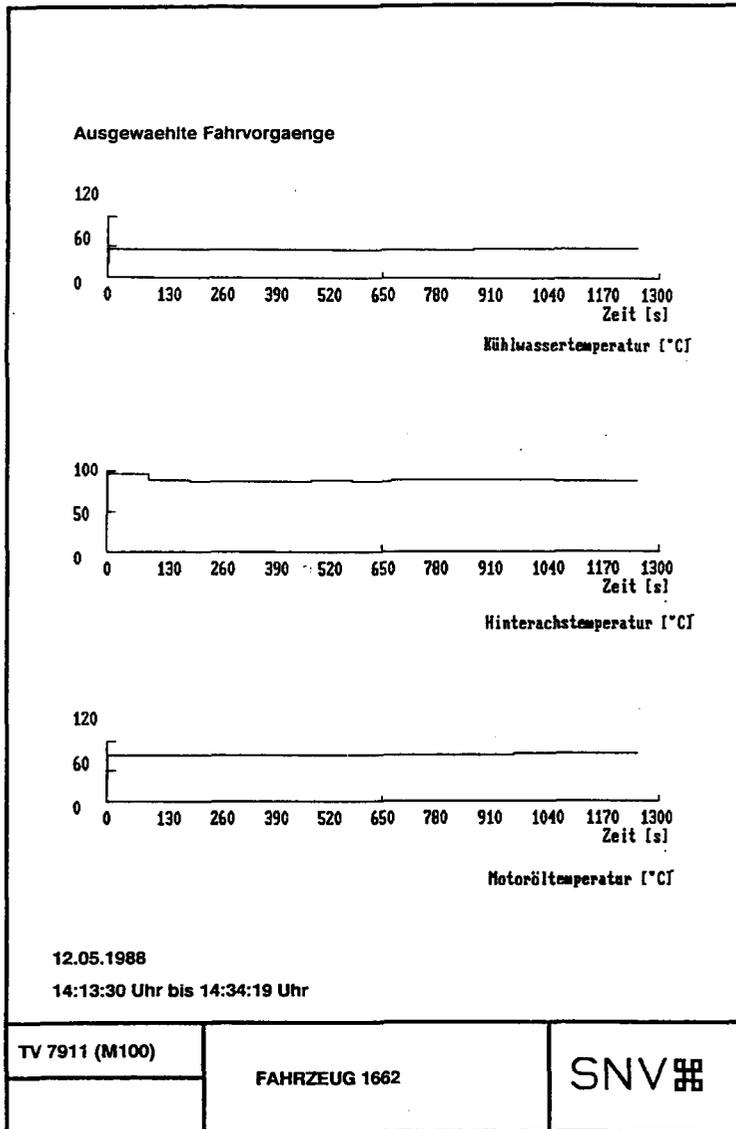


Bild 4.14: Ausgewählte Fahrvorgänge
(Bus-Nr. 1662 vom 12.5.88)

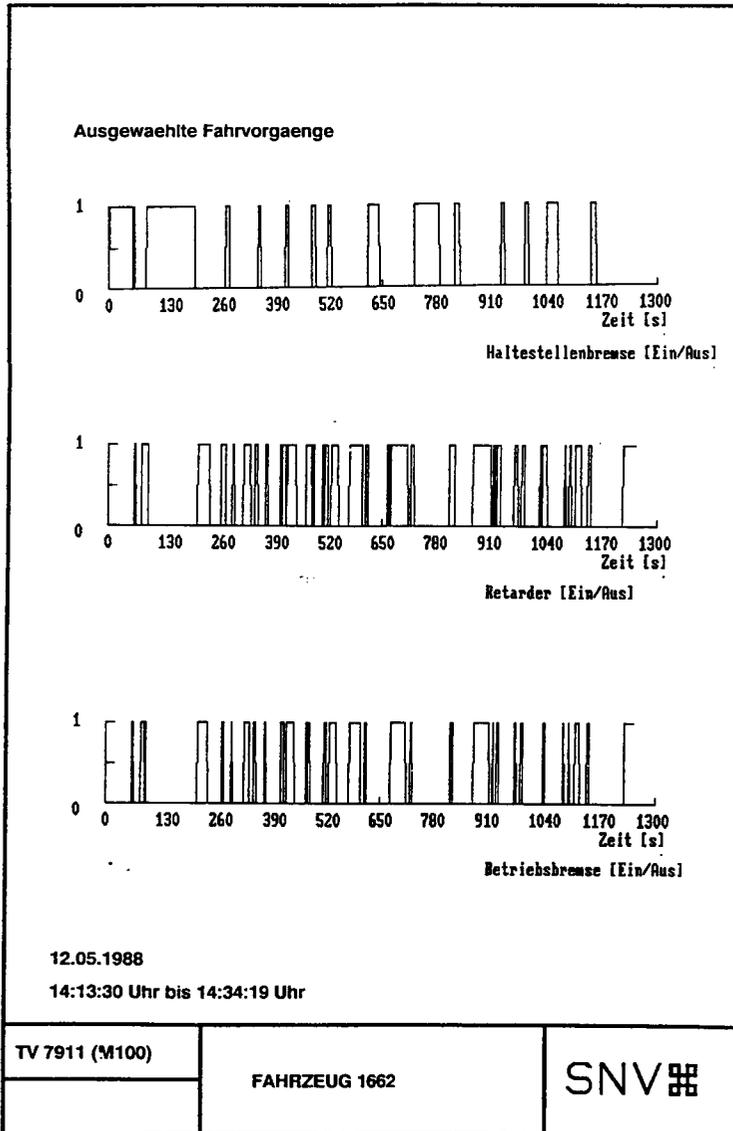


Bild 4.15: Ausgewählte Fahrvorgänge
(Bus-Nr. 1662 vom 12.5.88)

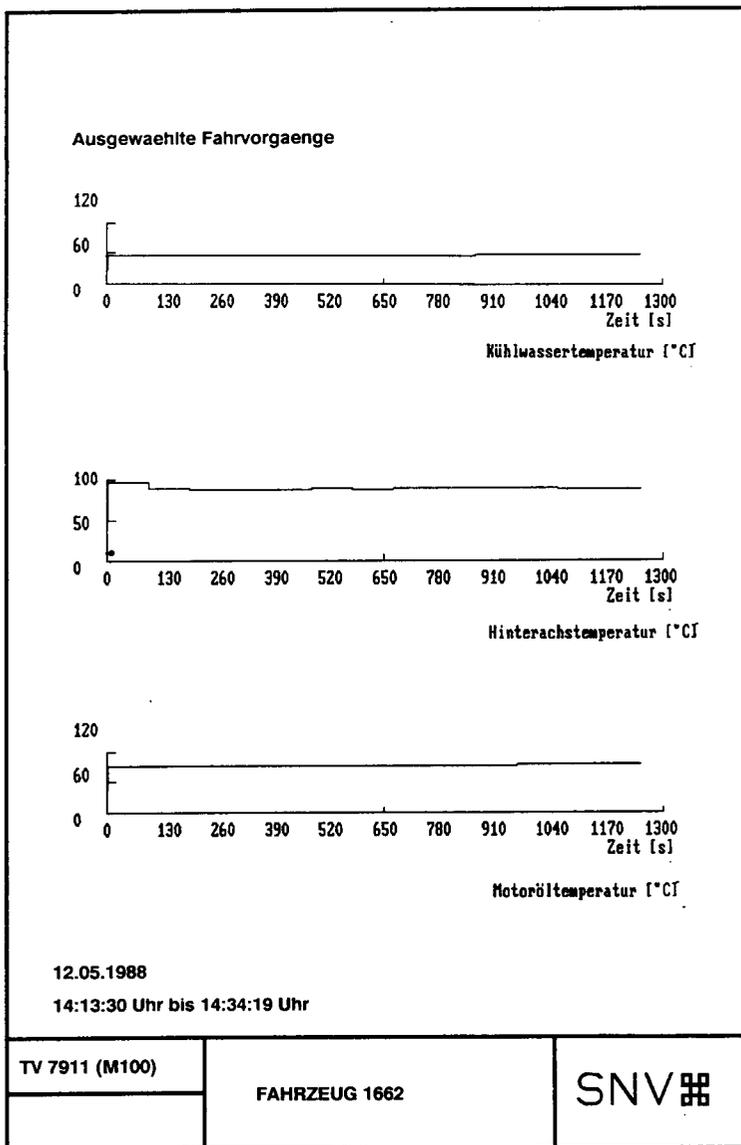


Bild 4.16: Zeitliche Verteilung von Temperaturen

Weitere spezifische Auswertungen dieser Fahrt sind in den Bildern 4.17 bis 4.19 dargestellt.

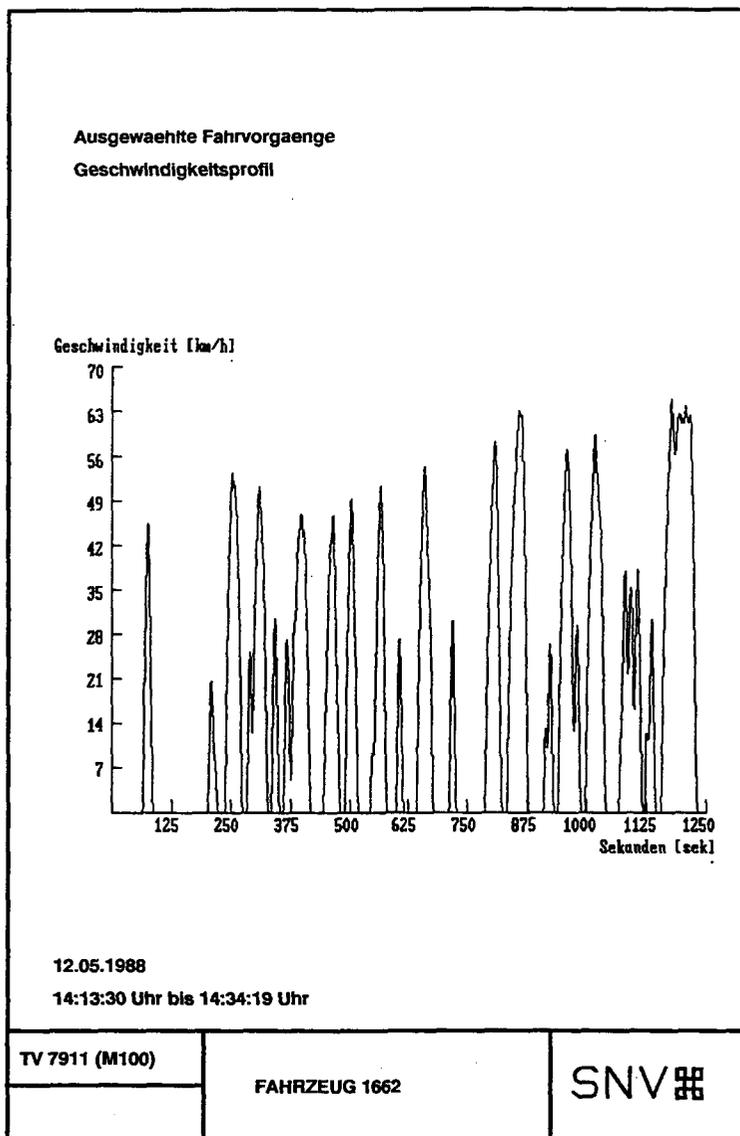


Bild 4.17: Ausgewählte Fahrvorgänge
(Bus-Nr. 1662 vom 12.5.88)

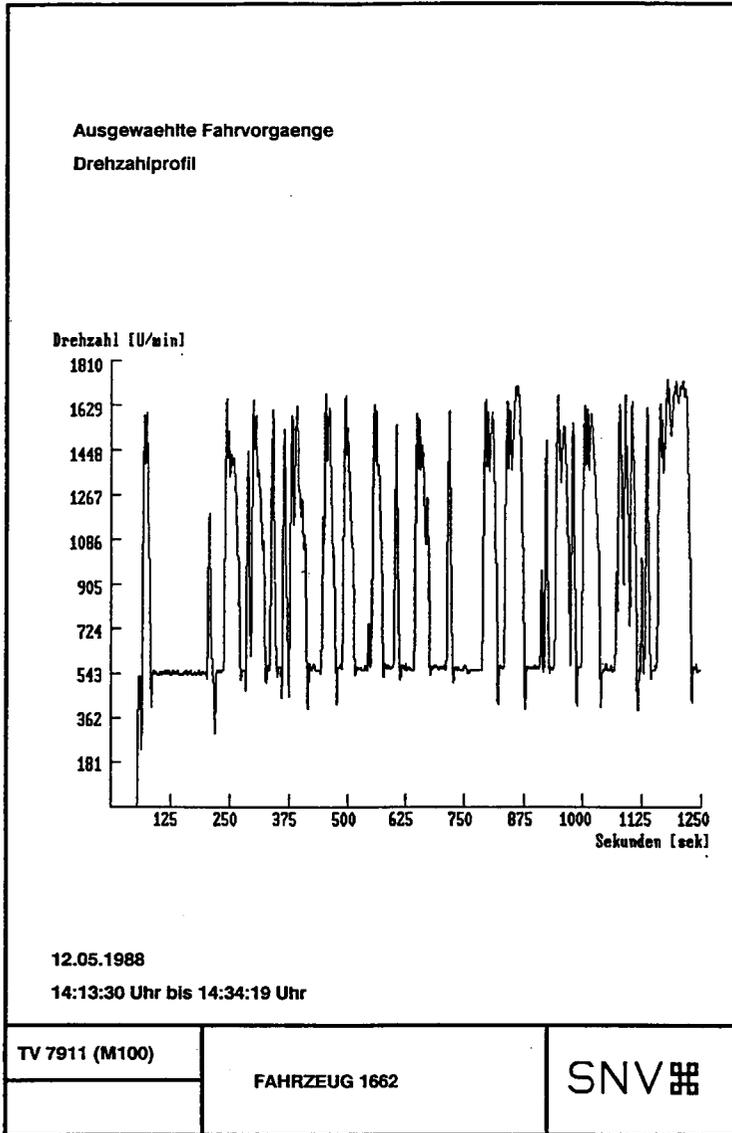


Bild 4.18: Ausgewählte Fahrvorgänge
(Bus-Nr. 1662 vom 12.5.88)

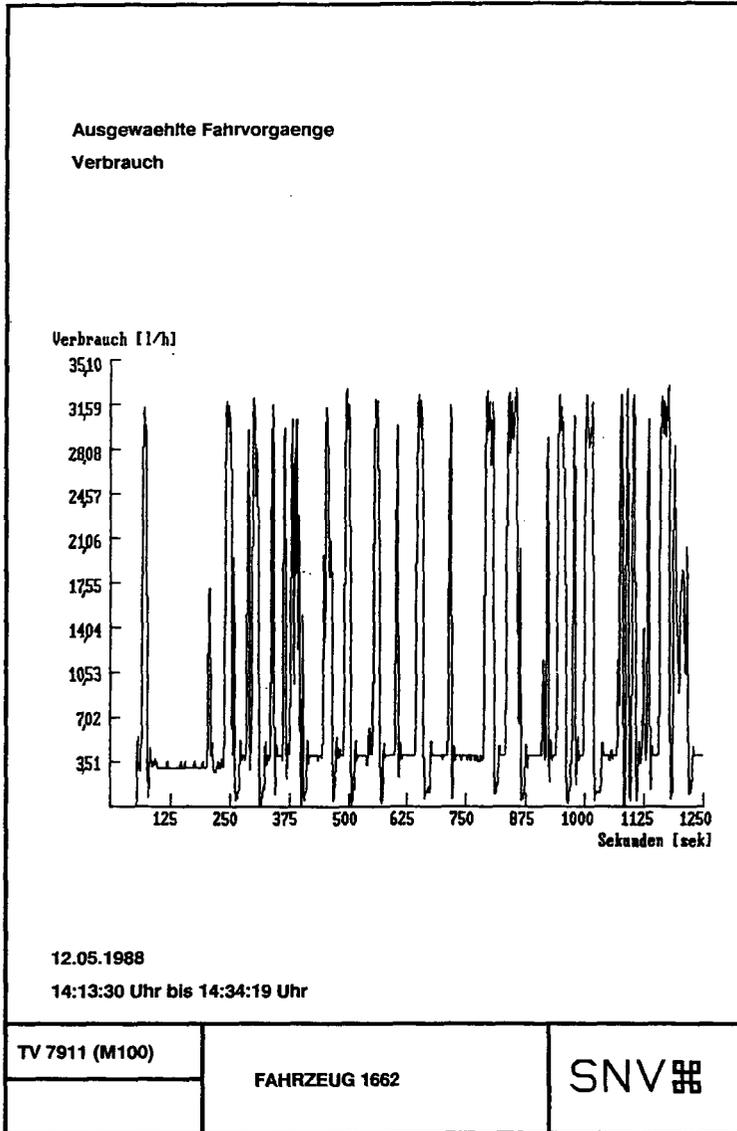


Bild 4.19: Ausgewählte Fahrvorgänge
(Bus-Nr. 1662 vom 12.5.88)

Ergänzend zu den grafischen Darstellungen der Fahrt des Wagens 1662 findet sich in Tabelle 4.20 eine Aufbereitung nach Standzeiten, Wegintervallen, Anhalte- und Fahrzeiten sowie eine Statistik der Haltestellenaufenthalte desselben Zeitraumes. Die Bilder 4.21 bis 4.23 zeigen dazu die Verteilung der Fahrgeschwindigkeiten nach Zeitanteilen, verschiedene Geschwindigkeitsklassen sowie Beschleunigungs- und Verzögerungsanteile.

Die Verzögerungsanteile sind zusätzlich daraufhin untersucht worden, ob die Verzögerung durch Ausrollen oder Betätigung von Bremse oder Retarder bewirkt wurde und eventuell eine irgendwie geartete Form einer Nutzbremmung bei dieser Einsatzart sinnvoll sein könnte. Da auf dieser Fahrt fast $\frac{2}{3}$ aller Verzögerungen durch Abbremsungen bewirkt wurden, wobei immerhin über 25 % der Fahrtstrecke gebremst wurde, könnte eine Energierückgewinnung bei diesem typischen Linieneinsatz durchaus lohnend sein.

Erfasste Meßdauer (Zündung "ein") insgesamt: 22 Minuten

Erfasste Standzeiten insgesamt: 10 Minuten
Erfasste Standzeiten über mehr als 1 Minute: 4 Minuten
(entspricht 18 % der Meßdauer)
Erfasste Standzeiten über mehr als 5 Minuten: 0 Minuten
(entspricht 0 % der Meßdauer)

Einsatzzeitanteil: 22 Minuten bzw. 2 % (bezogen auf 24 h)
(davon reine Fahrzeit 12 Minuten, Haltezeiten 10 Minuten)

(Einsatzzeit: Fahrzeit ($v > 0$) + kurze Standzeiten ($t < 5$ min))

Durchschnittliche Wegstrecke zwischen zwei Stops ($v=0$) [km]:
linear gemittelt: .273 gefiltert ($t>1s, s>1m$): .272
Gewertete Gesamtwegstrecke: 6.288 km

Anzahl aller Anhaltevorgänge (alle/gefiltert): 23 / 23
Durchschnittliches Fahrzeitintervall: 32 Sekunden
Durchschnittliche Haltedauer: 26 Sekunden

Durchschnittlicher Haltestellenabstand: .419 km
(gefiltert auf $>50m$ bzw. <2 km: .411 km)

Anzahl der Haltestellenaufenthalte insgesamt: 15
(Durchschnittliche Haltestellenanzahl pro Fahrt < 10 bzw. 0)
Durchschnittliche Haltestellenzeit über alles: 26 Sekunden
(Nur $v=0$ und H.-Br. ein über min. 2 s: 26 Sekunden)
(Alle Standzeiten an Haltestellen: 24 Sekunden)
Durchschnittliche Fahrzeit: 63 Sekunden

Bild 4.20: Auswertung einer Fahrt nach unterschiedlichen Merkmalen

Geschwindigkeitsverteilung über der Zeit (in %):
(Zeiten mit und ohne Motorlauf (Σ 22 Minuten))

Standzeiten	45 %
>0 km/h - 10 km/h	8 %
11 km/h - 20 km/h	11 %
21 km/h - 30 km/h	10 %
31 km/h - 40 km/h	8 %
41 km/h - 50 km/h	11 %
51 km/h - 60 km/h	7 %
61 km/h - 70 km/h	1 %
71 km/h - 80 km/h	0 %
81 km/h - 90 km/h	0 %
über 90 km/h	0 %

Standzeiten: 45 %

Σ 101 %

Mittlere Geschwindigkeit über der Zeit: 31 km/h
(ohne Standzeiten)

Bild 4.21: Geschwindigkeitsverteilung

Beschleunigungsverteilung über dem Weg

0.0 m/s ²	12 %
> 0.0 m/s ² - 0.3 m/s ²	11 %
> 0.3 m/s ² - 0.6 m/s ²	13 %
> 0.6 m/s ² - 0.9 m/s ²	12 %
> 0.9 m/s ² - 1.2 m/s ²	9 %
> 1.2 m/s ² - 1.4 m/s ²	3 %
> 1.4 m/s ² - 1.7 m/s ²	1 %
> 1.7 m/s ² - 2.0 m/s ²	0 %
> 2.0 m/s ² - 2.3 m/s ²	0 %
über 2.3 m/s ²	0 %

Bild 4.22: Verteilung der Beschleunigungen

Verzögerungsverteilung über dem Weg

> 0.0 m/s ² - 0.3 m/s ²	12 %
> 0.3 m/s ² - 0.6 m/s ²	8 %
> 0.6 m/s ² - 0.9 m/s ²	7 %
> 0.9 m/s ² - 1.2 m/s ²	4 %
> 1.2 m/s ² - 1.4 m/s ²	4 %
> 1.4 m/s ² - 1.7 m/s ²	2 %
> 1.7 m/s ² - 2.0 m/s ²	1 %
> 2.0 m/s ² - 2.3 m/s ²	0 %
> 2.3 m/s ² - 2.6 m/s ²	0 %
über 2.6 m/s ²	0 %

Σ mit Abbremsung	25 %
Σ Verzögerungen	39 %

Bild 4.23: Verteilung der Verzögerungen

4.5 AUSWERTUNG MIT KORRELATIONEN MEHRERER EINGANGSGRÖßEN

Neben der Darstellung von Verteilungen einzelner oder Relationen zweier Meßgrößen ist durch die eindeutige Zuordnung aller Meßdaten zueinander die Möglichkeit gegeben, die Abhängigkeiten einzelner Meßgrößen von mehreren anderen Parametern abzubilden.

In der einfachsten Form ist dies in den Bildern 4.24 bis 4.32 zu sehen, wo die Verteilung der Betriebstemperaturen von Motoröl, Getriebeöl, Kühlwasser und Hinterachse in Abhängigkeit von der Jahreszeit für den Wagen 1662 (MAN Diesel) und 1970 dargestellt wurde; beim 1970 (DB M 100) zusätzlich auch die der Ansauglufttemperatur. Wenn es auch bemerkenswerte Unterschiede bei den Verteilungen der verschiedenen Temperaturen zwischen den Fahrzeugen gibt, ist die Abhängigkeit von der Jahreszeit deutlich und in der Tendenz bei beiden Fahrzeugen gleich ausgeprägt.

Ein besonderer Hinweis sollte zum Bild 4.32 erfolgen. Die Ansaugtemperaturen in den Temperaturbereichen über 50 °C lassen sich durch die Lage des Ansaugrohres im Motorraum und die dort auftretende Stauwärme erklären.

Die Bilder 4.33 und 4.34 zeigen die Abhängigkeiten von Geschwindigkeit und Beschleunigung voneinander, ausgedrückt in Prozentanteilen des Auswertungszeitraumes für verschiedene Klassen. Auf eine dreidimensionale Darstellung wurde verzichtet, da diese ein sehr unübersichtliches Bild mit vielen gegenseitigen Verdeckungen ergeben hätte. Die Eingangsdaten lieferten wiederum die Fahrzeuge 1662 und 1670, wobei jeweils ein ganzer Werktag (19.

Mai 1988) ausgewählt wurde. Beide Fahrzeuge halten sich am häufigsten im Bereich Konstantfahrt mit etwa 50 km/h auf, beim 1670 ist aber eine deutlich breitere Streuung zu erkennen hin zu stärkeren Beschleunigungen und Verzögerungen.

Bild 4.35 zeigt ebenfalls aufgetragen über Geschwindigkeit und Beschleunigung den mittleren Kraftstoffverbrauch in Litern pro Stunde. Erwartungsgemäß treten die höchsten Verbrauchswerte bei Beschleunigungen im oberen Geschwindigkeitsbereich auf. Die Werte streuen jedoch recht stark, da durch die Aufteilung in insgesamt 225 Klassen die Datenbasis in diesen Klassen extrem unterschiedlich ist. Hier ist ein Quervergleich mit den Bildern 4.21 und 4.22 (%-Verteilung Geschwindigkeit/Beschleunigung) angebracht, da in Klassen mit sehr geringen oder nicht mehr aufgelisteten %-Anteilen die Mittelwertbildung entsprechend ungenau wird. Für die Methanolfahrzeuge ist eine vergleichbare detaillierte Auswertung aufgrund der zuvor geschilderten Probleme bei der Verbrauchsmessung leider nicht möglich gewesen.

Eine weitere interessante Aufgliederung wird in den Bildern 4.36 und 4.37 vorgenommen, indem aus der gesamten Meßdauer eines Tages noch einmal nur die Zeiten des Berufsverkehrs herausgezogen wurden. Im Berufsverkehr dominieren bei der dargestellten Verteilung der Fahrgeschwindigkeiten die Klassen 36-40 und 41-45 km/h deutlicher als bei der Verteilung des gesamten Tages.

Auf die Wiedergabe einer Vielzahl weiterer Korrelationen soll an dieser Stelle verzichtet werden, da zusätzliche Auswertungen bei Bedarf jederzeit aus dem vorhandenen Datenmaterial erstellt werden können.

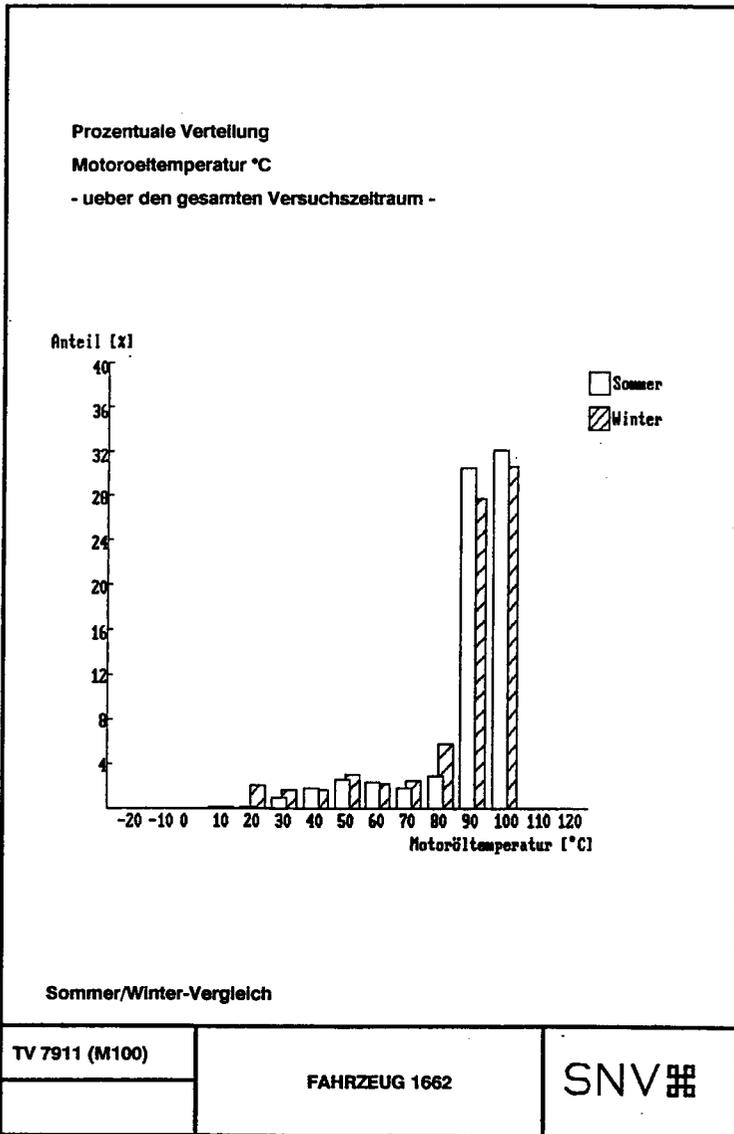


Bild 4.24: Motoröltemperaturen (Wg 1662)

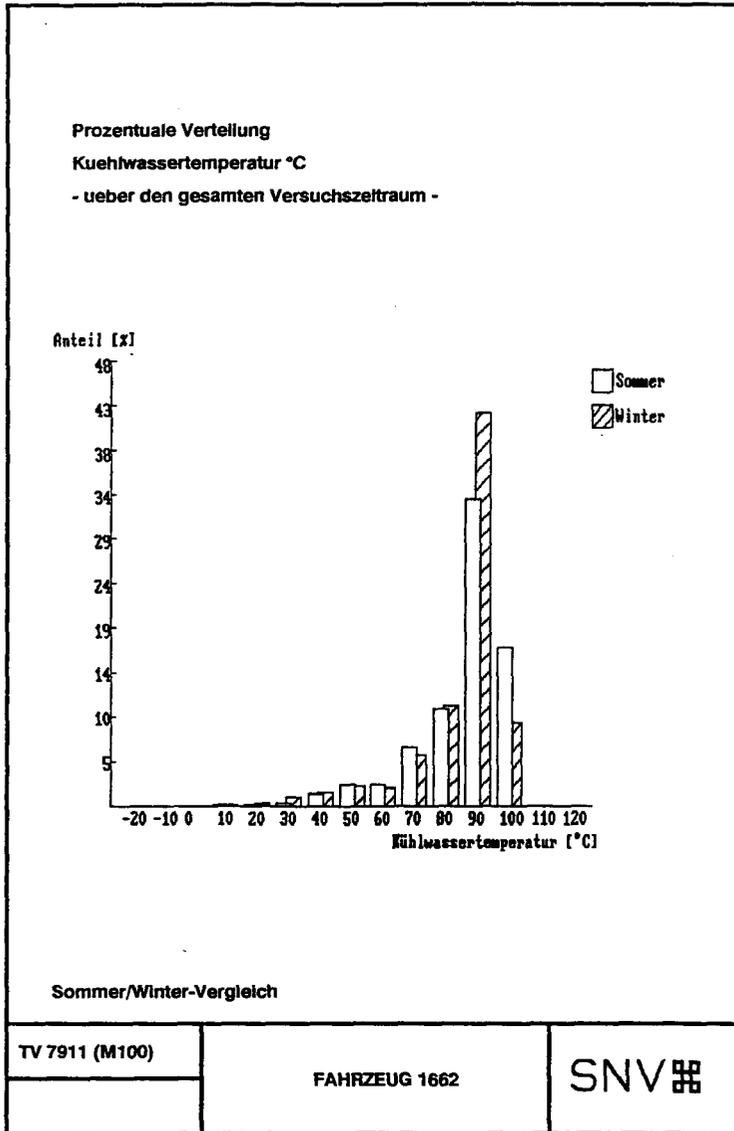


Bild 4.25: Kühlwassertemperaturen (Wg 1662)

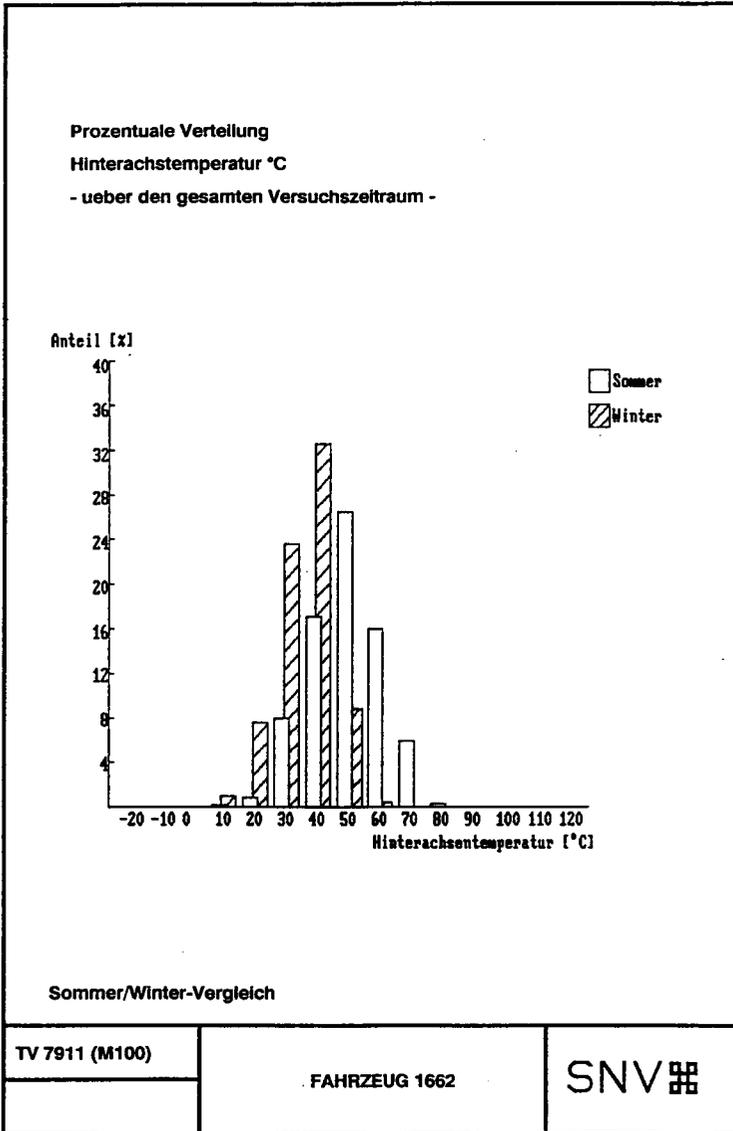


Bild 4.26: Öltemperaturen der Hinterachse (Wg 1662)

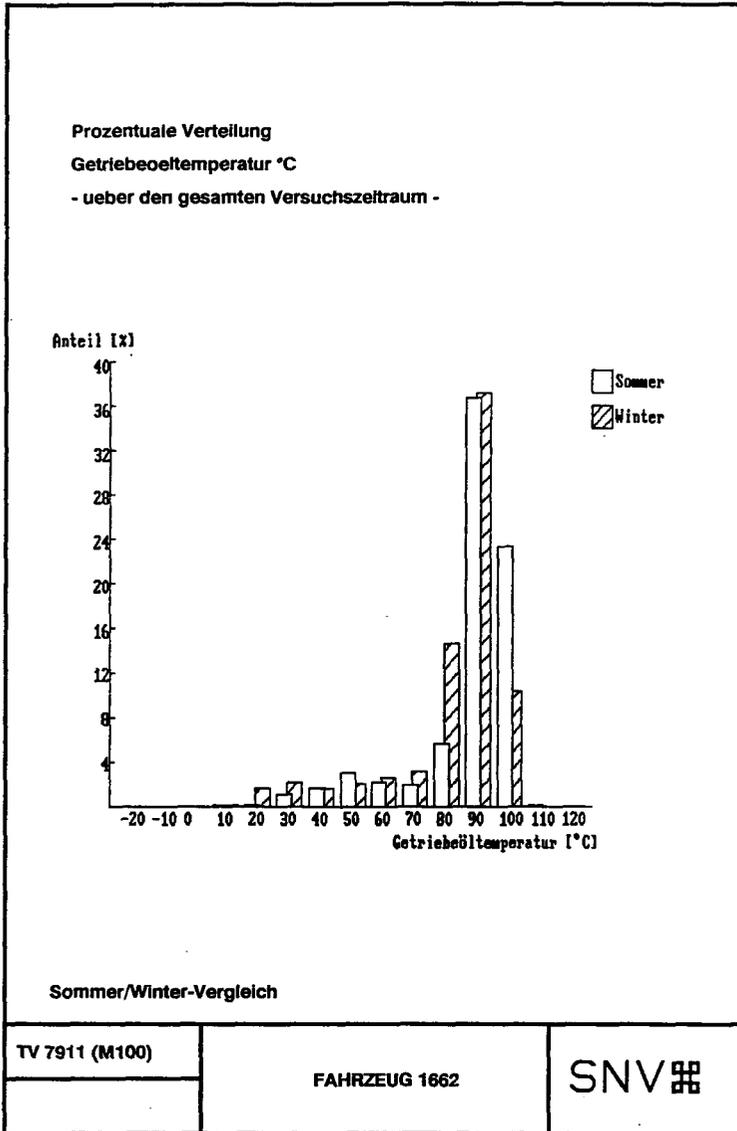


Bild 4.27: Getriebeoeltemperaturen (Wg 1662)

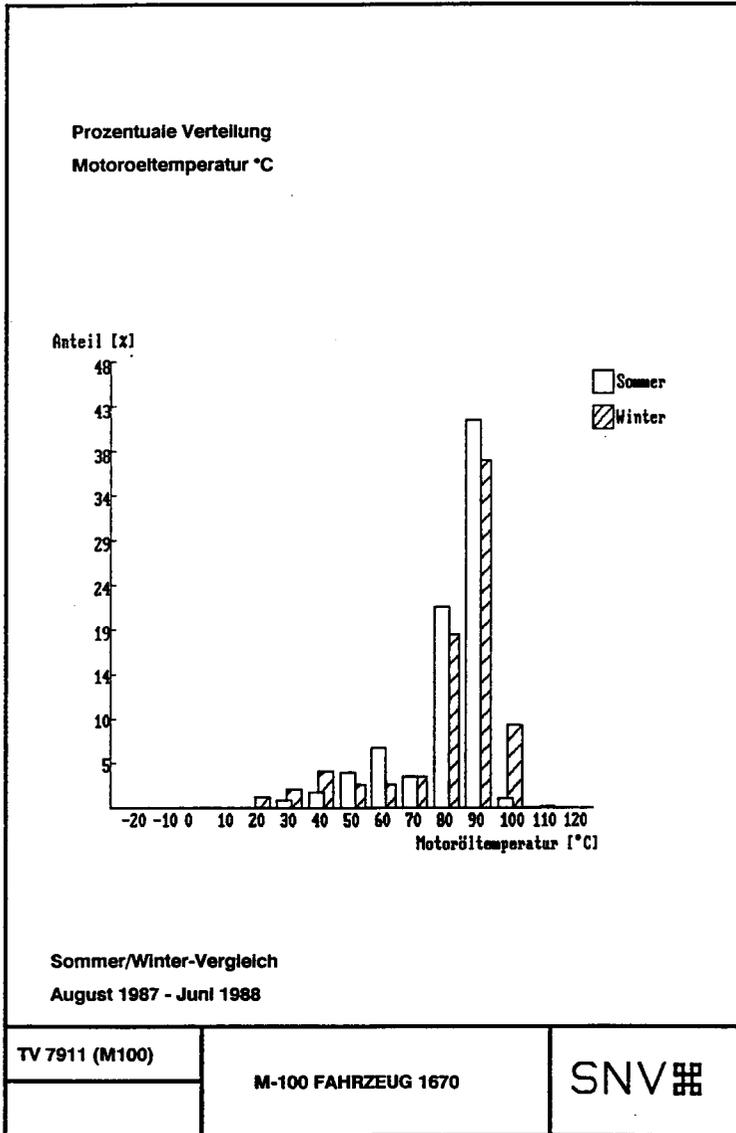


Bild 4.28: Motoröltemperaturen (Wg 1670)

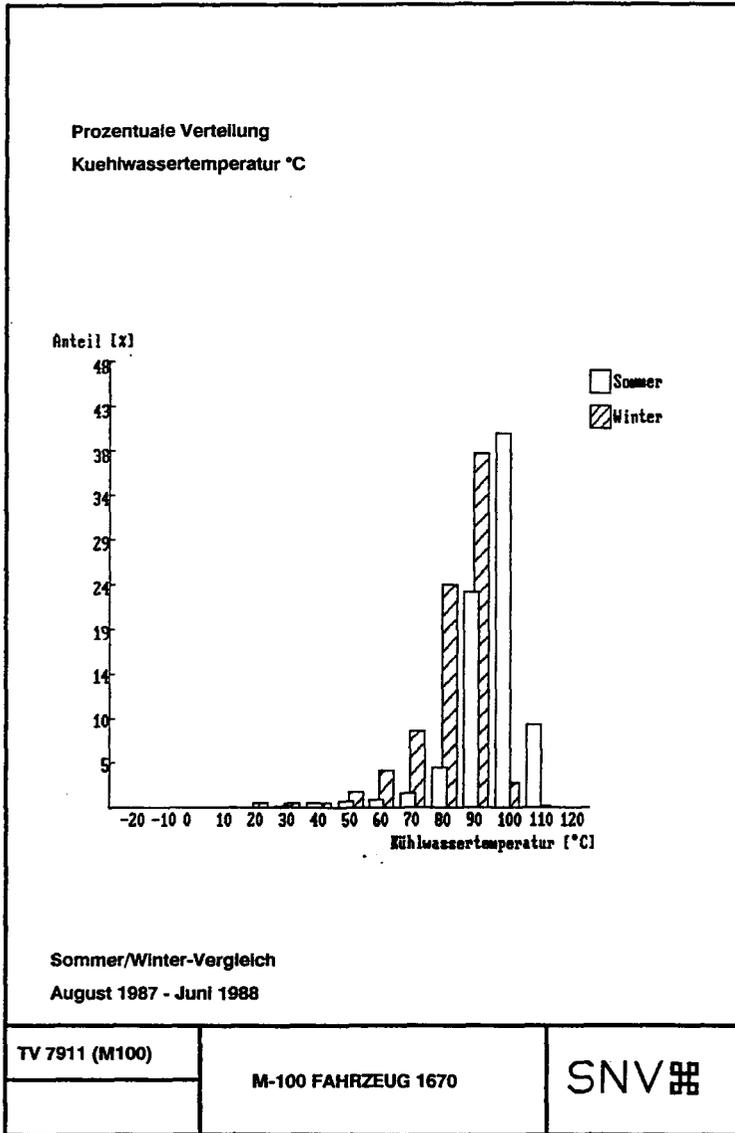


Bild 4.29: Kuehlwassertemperaturen (Wg 1670)

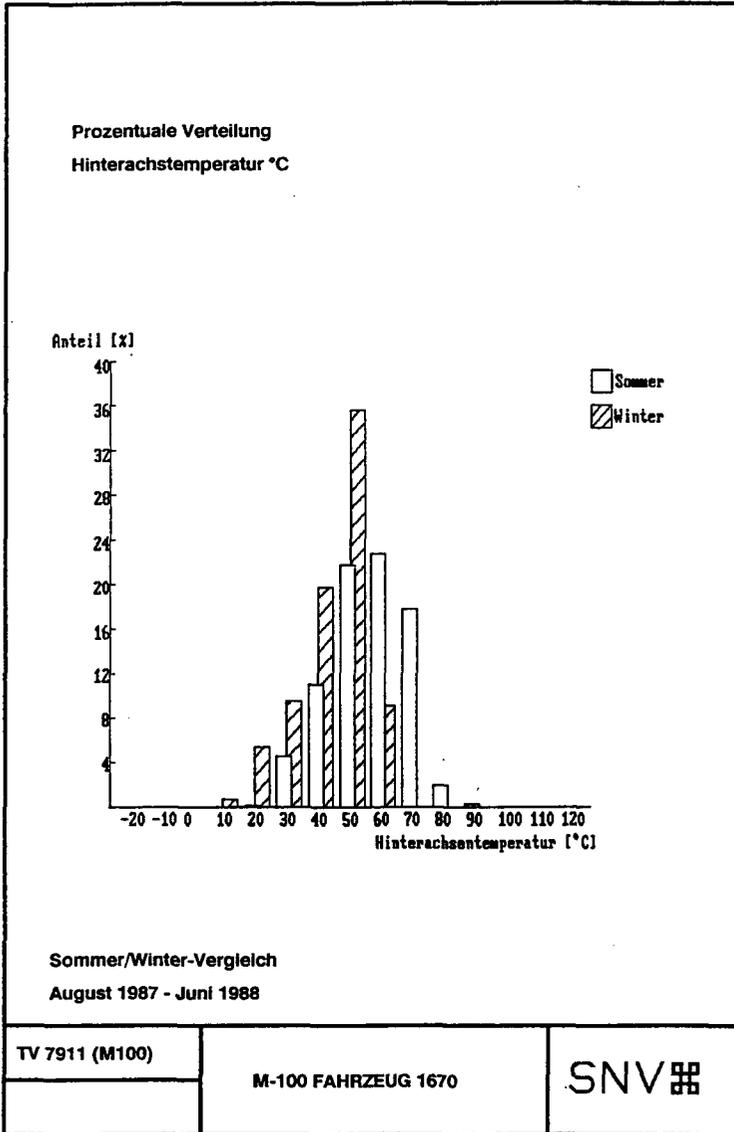


Bild 4.30: Öltemperaturen der Hinterachse
(Wg 1670)

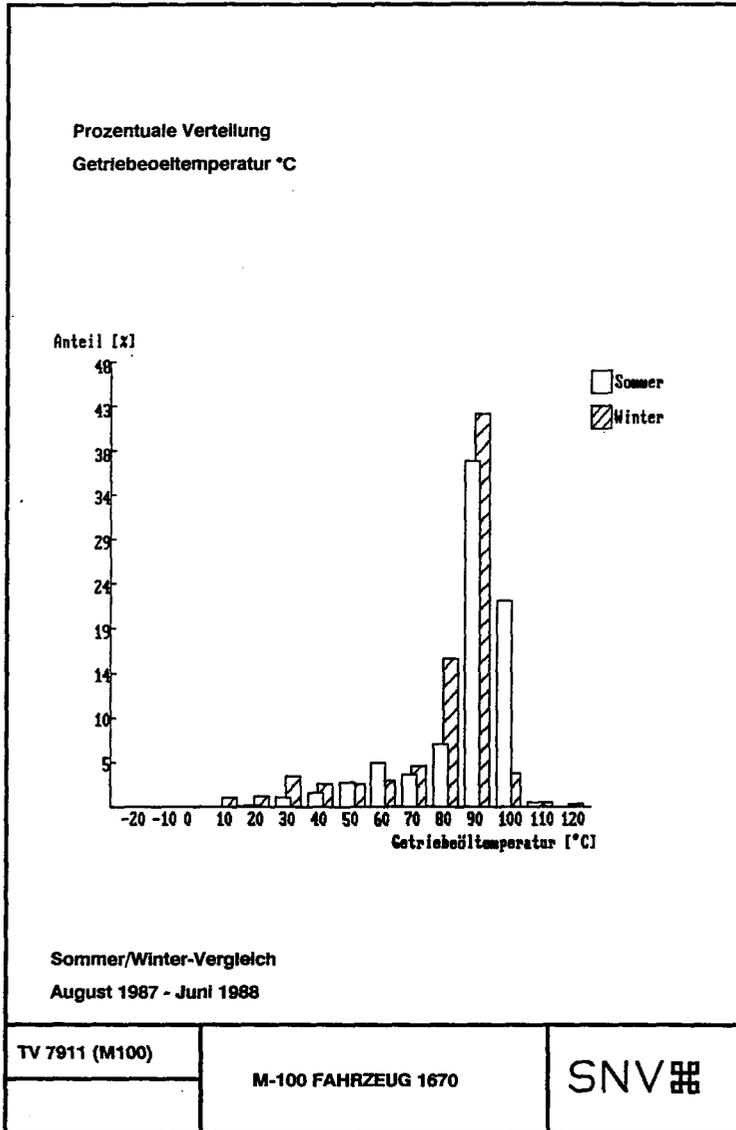


Bild 4.31: Getriebeöltemperaturen (Wg 1670)

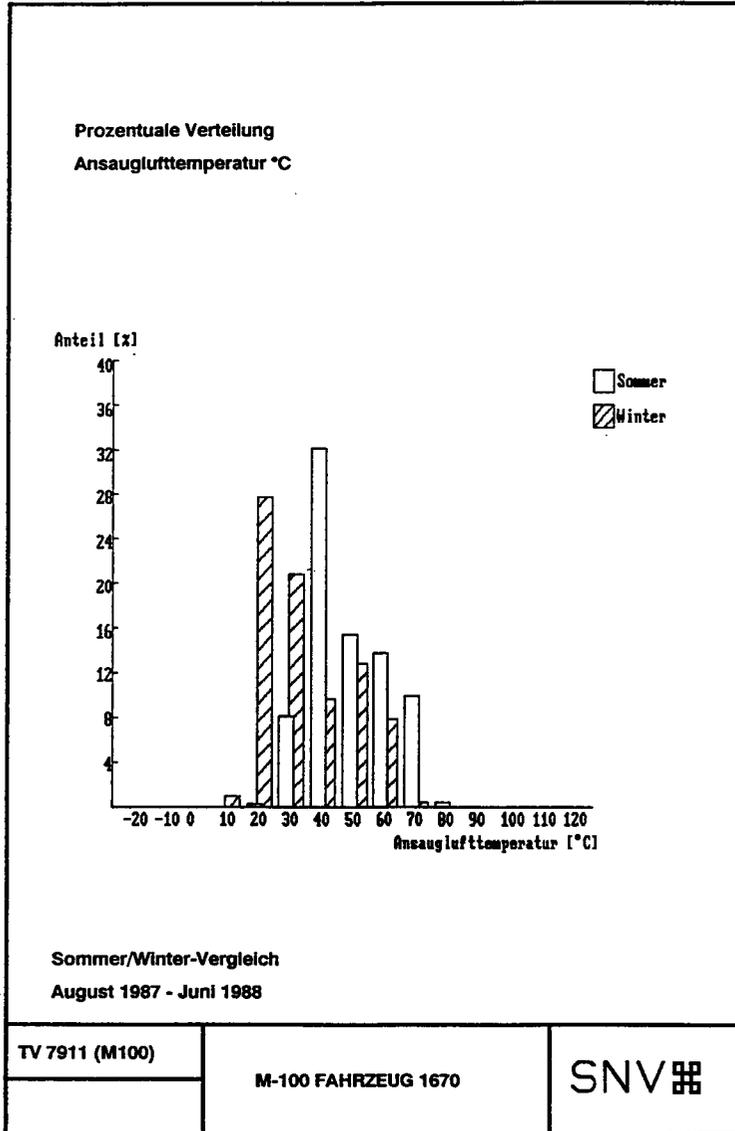


Bild 4.32: Ansauglufttemperaturen (Wg 1670)

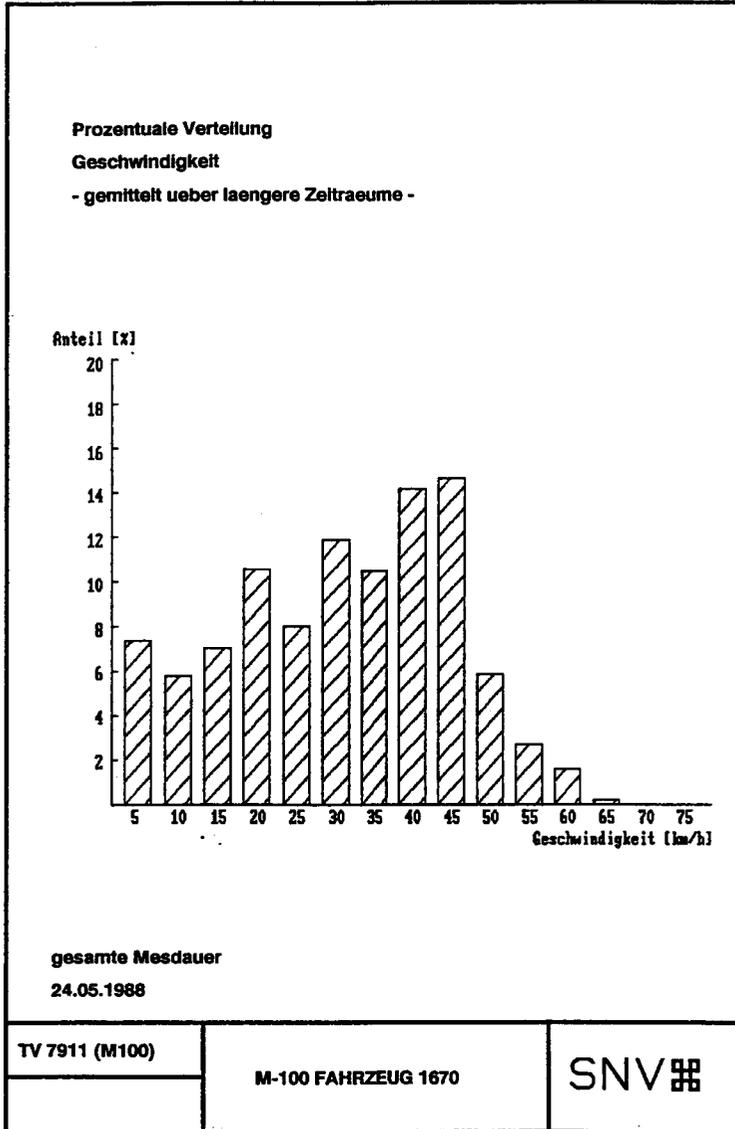


Bild 4.36: Verteilung Geschwindigkeit
(Gesamte Messdauer, Wg 1670)

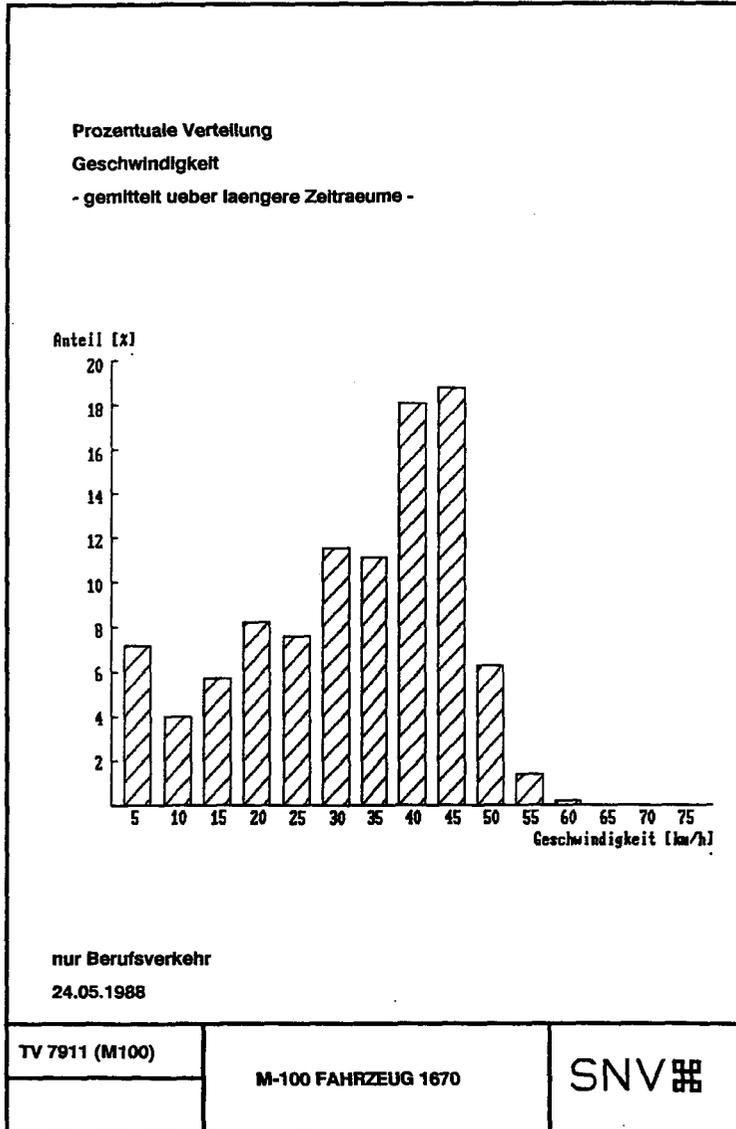


Bild 4.37: Verteilung Geschwindigkeit
(nur Berufsverkehr, Wg 1670)

5.0 BETRIEBSSTOFFE

5.1 KRAFTSTOFFVERBRAUCH

5.1.1 DATENERHEBUNGEN

Die eigens für das Forschungsvorhaben auf dem Betriebshof Spandau eingerichtete Methanol-Tankstelle, die auch weiterhin betrieben wird, wurde mit einem Tankdatensystem der Firma Kienzle ausgerüstet. Mit diesem System werden alle Tankdaten, d.h. Menge, km-Stand, Tankzeit/-datum sowie die Fahrzeugnummer, automatisch für die weiteren Auswertungen erfaßt.

Neben den Zapfsäulen befindet sich dazu eine weitere Säule, die ein Eingabefeld mit Kartenleser, Display, Eingabetasten und Anzeigen für die Benutzerführung (Bild 5.1) sowie einen verdeckt eingebauten Protokolldrucker, der der zusätzlichen Datensicherung dient, enthält. Der Datenspeicher (RAM-Kassette, Firma D+S) ist wechselbar und kann über ein Zusatzgerät mit einem PC ausgelesen werden.

Jedem Fahrzeug wurde ein Tankausweis in Art einer Scheckkarte zugeordnet, der vor jedem Tankvorgang in den Kartenleser an der Tankstelle eingeführt werden mußte. Erst dann konnte Kraftstoff gezapft werden. Die mittels Benutzerführung abgeforderten Daten und die Tankdaten wurden gespeichert und mittels eingebautem Drucker zusätzlich protokolliert.

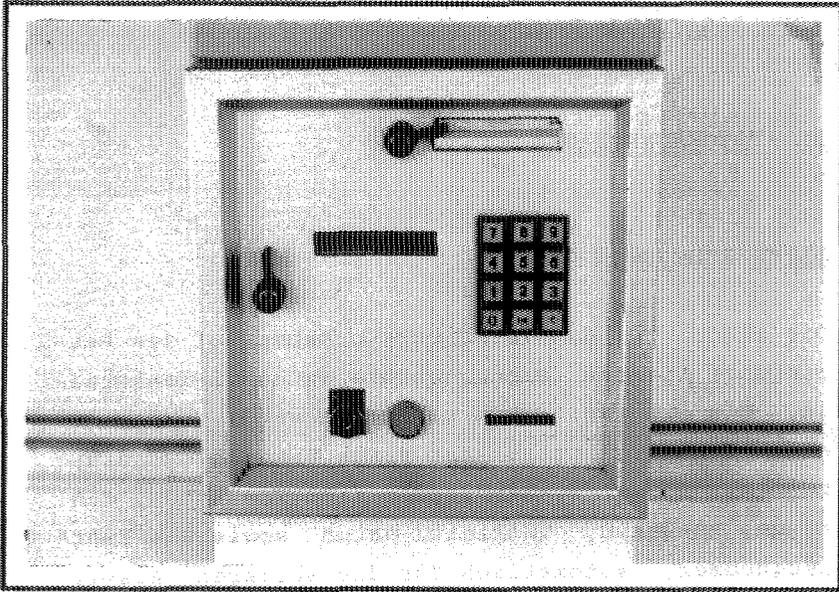


Bild 5.1: Eingabegerät an der Methanol-Tankstelle

Die Bedienung des zunächst eingebauten halbautomatischen Tankdatenerfassungssystems bereitete in der Einführungsphase mitunter Schwierigkeiten, da z.B. die km-Stände rechtsbündig eingegeben und die verbleibenden Stellen der Anzeige mit Nullen aufgefüllt werden mußten. Dabei kam es häufig zu Fehleingaben, die wegen einer fehlenden Plausibilitätskontrolle innerhalb des Programms dennoch eine Tankung erlaubten. Die Berechnung der Durchschnittsverbräuche in der Monatsabrechnung wurde dadurch häufig fehlerhaft und mußte korrigiert werden. Durch eine Änderung des Eingabeprogramms konnte ein spürbarer Rückgang der Fehlerquote erreicht werden.

Im letzten Jahr des Versuches wurde diese Art der Dateneingabe ersetzt durch eine vollautomatische Datenübergabe. Ein im Bus installierter Sender übertrug die Fahrzeugidentifizierungsnummer und den aktuellen km-Stand induktiv über eine Drahtschleife auf einen Sender, der am Zapfventil montiert war. Da die Drahtschleife unmittelbar hinter der Tankklappe der Busse angebracht war, wurde der Sender beim Einstecken des Zapfventils in den Tankstutzen zwangsläufig durch die Schleife hindurchgeführt. Hiermit wurden die aktuellen Daten übertragen und die Zapfsäule freigegeben. Auf diese Art konnte sichergestellt werden, daß die registrierte Tankmenge dem entsprechenden Fahrzeug zugeordnet wurde (Bilder 5.2 und 5.3).



Bild 5.2: Datenübertragungssender
am Zapfventil

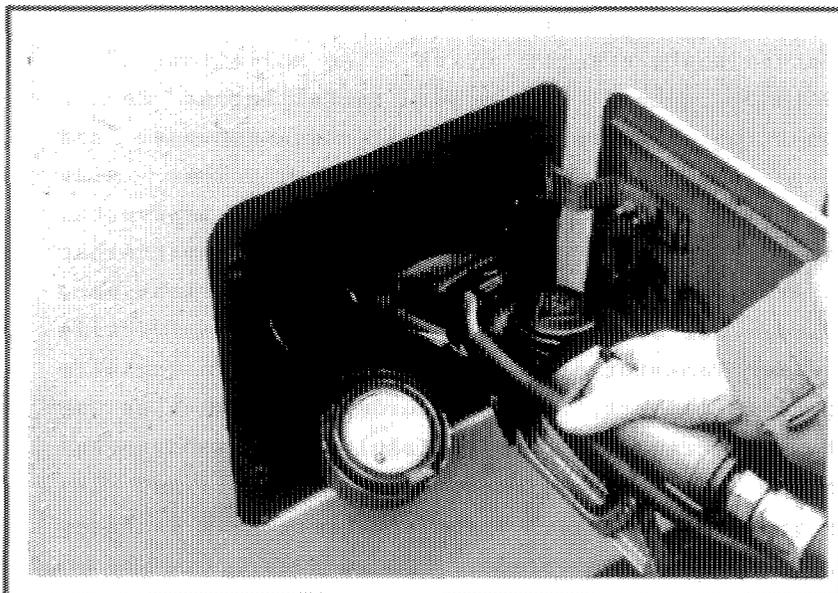


Bild 5.3: Induktionsschleife
hinter der Tankklappe

Bis zur Einführung des neuen Datenerhebungssystems wurde für die Tankstelle in regelmäßigen Abständen eine nach Fahrzeugen geordnete Abrechnung vorgenommen. Diese konnte ebenfalls über den eingebauten Drucker ausgegeben werden. Bild 5.4 zeigt den Ausdruck einer derartigen Monatsabrechnung.

MONATSBERECHNUNG
ALBERTUS (DINITE) 28.09.84
ALLE FAHRZEUGE
FAHRZEUG NR: 1543

12.06			
1903	1	31285	91,57
1905	1	32126	175,00
19.12	1	32297	117,93
2101	1	32335	95,00
2101	1	32540	0,00
2304	1	32560	159,00
2404	1	32621	252,62
2504	1	33159	233,00
2604	1	33402	207,34
2701	1	33450	201,78
2802	1	33990	213,16
2802	1	34239	0,00
2802	1	34039	0,00
2802	1	34039	0,00
2802	1	34039	0,00
2802	1	34039	115,00
8014 KM	1	1956,42	0,00 L/100KM

FAHRZEUG NR: 1544

1.08	1	31744	34,02
2.10	1	31900	87,00
2.11	1	32164	204,95
400 KM	1	335,98	83,09 L/100KM

FAHRZEUG NR: 1544

Bild 5.4: Kontrollstreifen

Die Tankmenge und der jeweilige km-Stand wurden aus organisatorischen Gründen im Zuge der Gleichbehandlung der Methanol-Busse mit den konventionellen Diesel-Fahrzeugen über den gesamten Versuchszeitraum handschriftlich vom Tankwart in einer Liste notiert, die dann in das EDV-System der BVG eingegeben wurde. Somit wurden die Methanol-Busse auch in der BVG-internen Übersicht über den monatlichen Betriebsstoffverbrauch geführt.

Die zu Versuchsbeginn verwendeten Druckerstreifen der ersten Version des Tankdatensystems wurden in regelmäßigen Abständen (monatlich bzw. halbmonatlich) von der BVG an die SNV weitergeleitet und dort mittels EDV ausgewertet. Die Eingabe erfolgte auf der Grundlage des Druckerstreifens manuell, womit auch gleichzeitig eine Kontrolle auf eventuelle Fehleingaben erfolgen konnte. Die Einfüh-

rung der vollautomatischen Datenübergabe ermöglichte mit Hilfe des RAM-Speichers ebenfalls die automatische Übergabe an den Auswerterechner. Dennoch war eine Prüfung der Datensätze mit einem eigens dafür erstellten Programm erforderlich. Mehrfachtankungen (Tankvorgänge mit mehreren Unterbrechungen des Füllvorganges) und Nulltankungen (Datensatz mit Tankmenge 0 Liter) wurden gefiltert und nicht weiterverarbeitet.

Ein spürbarer Rückgang von Bedienungsfehlern, konnte durch die Einführung der vollautomatischen, induktiven Datenübergabe erreicht werden. Dafür zeigte das System aber Schwächen in der Funktionssicherheit der Systemsteuerung bzw. der induktiven Datenübergabe. Immer dann, wenn die Fahrzeugerkennung nicht eindeutig erfolgen konnte, wurde der Tankvorgang unterbrochen und die Förderpumpe abgeschaltet. Jeder Abschaltvorgang bedeutete die Anlage eines neuen Datensatzes. Auch hier mußten die verwendeten Datensätze vor ihrer Auswertung auf Fehler überprüft werden.

Um konzeptbedingte Einflüsse auf den Betriebsstoffverbrauch des Zusatzheizgerätes auswerten zu können, wurden die Heizgeräte zum Beginn des Versuchsbetriebes mit einem Betriebsstundenzähler ausgestattet. Die monatlich abgelesenen Betriebsstunden wurden mit ermittelten Betriebsstoffverbräuchen der jeweiligen Heizung multipliziert, womit eine Trennung der Verbräuche möglich wurde.

Während das Zusatzheizgerät bei den Methanol-Bussen der Firma MAN zur Vorwärmung des Innenraumes genutzt und während der Fahrt nur bei Bedarf eingeschaltet wird, dient es bei den Bussen der Firma DB primär der Aufheizung des Kraftstoffes im Verdampfer, d.h. der Vergasung des Kraftstoffes für den Motor. Beim Betrieb der Motoren übernimmt in der Warmlaufphase ein Abgaswärmetauscher und nach Erreichen der Betriebstemperatur die Motorwärme die Erwärmung des Wassers für den Verdampfer, so daß auch in diesem Fall das Zusatzheizgerät nur bei Bedarf zugeschaltet wird. Die anfänglich sehr großen Streuungen des von der Einschaltzeit abhängigen Verbrauchs der Zusatzheizgeräte wurden durch einen teilweisen Austausch von Druckreglern und durch Einstellungen an den vorhandenen Druckreglern minimiert. Um eine Vergleichbarkeit der Verbrauchswerte zu erreichen, wurden alle Zusatzheizgeräte mit baugleichem Druckregler ausgerüstet. Eine mehrfache Kontrolle des Kraftstoffverbrauches (in l/h) ermöglichte eine hinreichend genaue Bestimmung der Verbräuche anhand der Betriebsstunden (Tabelle 5.5).

	1986	1987	1988	1989
1663	9,4	9,6	9,0	9,2
1664	9,2	8,6	8,6	8,5
1665	8,8	8,6	9,6	9,5
1666	8,4	9,4	9,5	9,4
1667	9,4	9,2	9,0	9,0
1668	8,8	8,8	9,2	9,5
1669	9,2	9,5	9,5	9,5
1670	9,6	9,6	9,0	D
1671	9,9	9,4	9,2	D
1672	9,4	9,0	9,5	D
1673	8,6	7,8	9,2	D
1674	9,4	9,2	9,2	9,0
1675	8,8	8,3	7,5	7,1
1676	9,4	8,8	9,2	D
Mittlerer Verbrauch	9,2	9,0	9,1	9,0

Angaben in l/h

D: Bus war zum Zeitpunkt der Messung auf Dieselmotor umgerüstet.

Tabelle 5.5: Verbrauchswerte der Zusatzheizgeräte

5.1.2 AUSWERTUNG DER VERBRAUCHSDATEN

Die von dem Tankdatensystem an der Methanol-Tankstelle des Betriebshofes Spandau registrierten Daten wurden in regelmäßigen Zeitabständen der SNV übermittelt und zur Auswertung in einem Datenfile abgelegt. Jeder Datensatz besteht aus folgenden Angaben

- Fahrzeugnummer
- Datum und Uhrzeit der Tankung
- Tankmenge
- km-Stand.

Nach einer Sichtkontrolle wurden die Datensätze automatisch sortiert und auf Plausibilität kontrolliert. Auffallende Tankdaten wurden gegebenenfalls mit den Handaufzeichnungen des Tankstellenpersonals abgeglichen.

Die Überspielung der Tankdaten aus dem RAM-Speicher in den PC erfolgte mit dem von der Firma Kienzle gelieferten Tankdatenabrechnungsprogramm PCFAH, die Weiterverarbeitung mit von der SNV erstellten Programmen in FORTRAN. PCFAH liefert zwar zahlreiche Funktionen zur Rechnungserstellung, die bei der BVG nicht benötigt werden, aber keine Verbrauchsdarstellung für einzelne Fahrzeuge und keine Grafiken.

Der Kraftstoffverbrauch der Methanol-Fahrzeuge wurde normalerweise von Tag zu Tag bezogen auf die gesamte Tankmenge eines Einsatztages berechnet. Wenn ein Fahrzeug mehrmals am Tag betankt wurde,

ohne daß eine entsprechende Laufleistung zwischen den Tankungen zu registrieren war, wurden bei der Auswertung diese Tankmengen zusammengefaßt und auf den letzten berücksichtigten km-Stand bezogen.

Lag zwischen zwei Tankmengen mit demselben Datum eine Mindestlaufleistung, die auf einen tatsächlichen Betriebseinsatz schließen ließ, wurden dementsprechend auch zwei einzelne Verbrauchsberechnungen durchgeführt.

Die Darstellung des Kraftstoffverbrauches erfolgt als Balkendiagramme oder in Form von Verlaufskurven, die den Quotienten aus Tankmenge und Kilometerstandsdifferenz als Punkteintragung über den km-Zählerstand der Tankungen enthalten. Durch die so entstehende Punktwolke wird eine Ausgleichskurve (Polynom achter Ordnung) gezogen, die nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate bestimmt wird. Für die Darstellung des Verbrauchs einzelner Fahrzeuge kann auch eine Kurve nach einem F-Spline-Verfahren¹ berechnet werden, die sich durch geeignete Wahl von Glättungsfaktoren besser an die Punktwolke anpassen läßt.

¹ Siegmur Niemierski: 'Paramtergesteuerte Karosserie-Generierung im Pkw-Vorentwurf'. Dissertation an der TU-Berlin 1988

Die Bilder 5.6 und 5.7 zeigen die Kurvenverläufe des Verbrauchs über den Versuchszeitraum, aufgetragen über den km-Stand bzw. die Laufleistung der Fahrzeuge. Nach einer deutlichen Verbrauchssenkung in der Anfangsphase des Versuches ergeben sich über der Gesamtlaufstrecke Schwankungen, die bei Überlagerung von Laufstrecke und Kalendermonat eindeutig jahreszeitlich bedingten Einflüssen zugeordnet werden können. Bei etwa 40.000 bis 45.000 km Laufleistung zeichnet sich ein Verbrauchsanstieg zum Winter 1986/87 und erneut bei etwa 90.000 km zum Winter 1987/88 ab. Über die gesamte Laufleistung der Flotte betrachtet, zeigt sich eine relative Konstanz der Verbrauchswerte. Wird in diese Betrachtung die Anfangsphase im Frühjahr 1986, bis etwa 15.000 km durchschnittlicher Laufleistung, mit einbezogen, so ergibt sich eine eher fallende Tendenz.

Das nachfolgende Bild 5.8 zeigt ausschnittsweise die Einzeljahre 1986, 1987 und 1988, um einen besseren Vergleich zu ermöglichen.

Bedingt durch konzeptionelle Unterschiede wurde das Zusatzheizgerät bei den Bussen der beiden Hersteller unterschiedlich oft eingeschaltet. Aus dieser Tatsache ergibt sich für die Busse der beiden Hersteller auch ein unterschiedlicher Kraftstoffanteil, der für die Heizung aufgewandt wird.

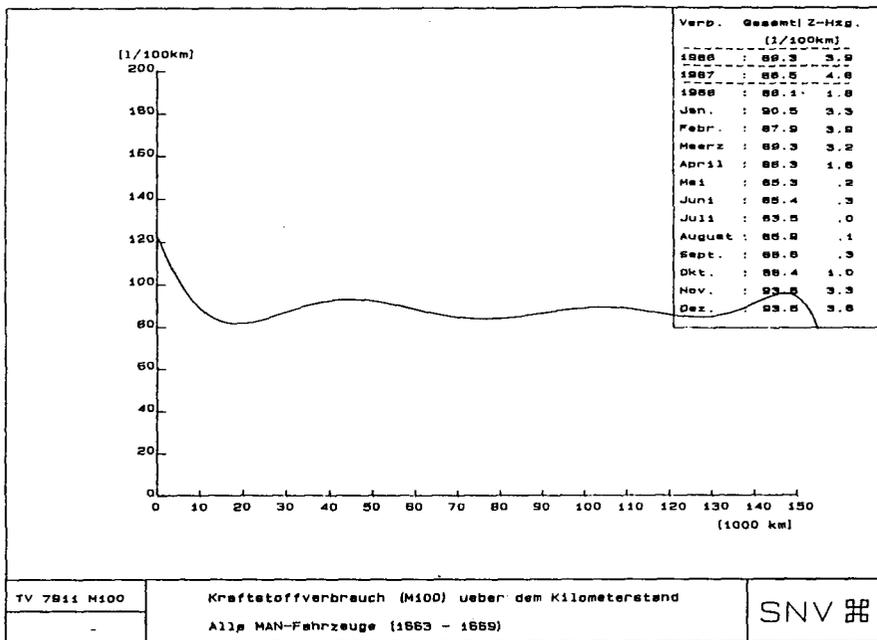


Bild 5.6: Kraftstoffverbrauch (MAN-Busse)

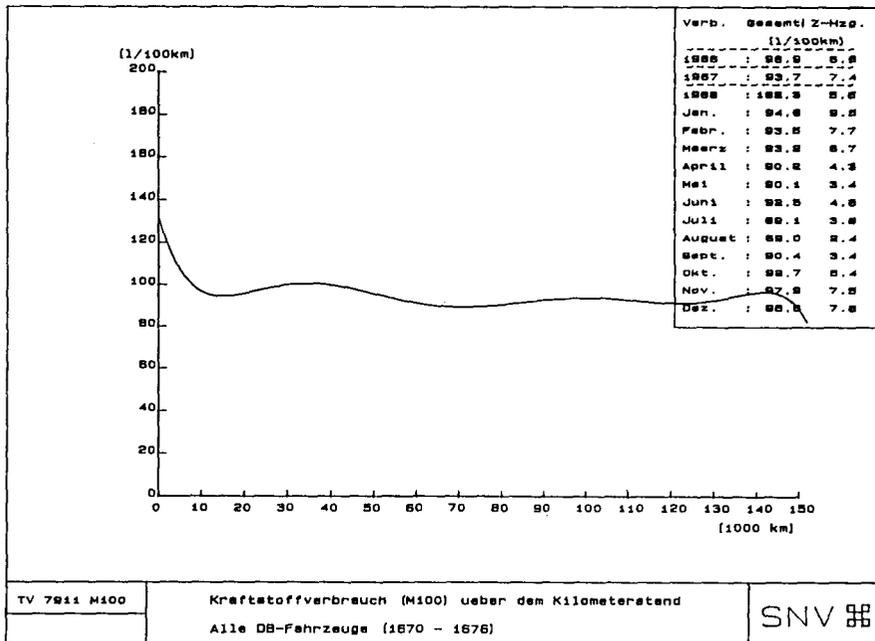


Bild 5.7: Kraftstoffverbrauch (DB-Busse)

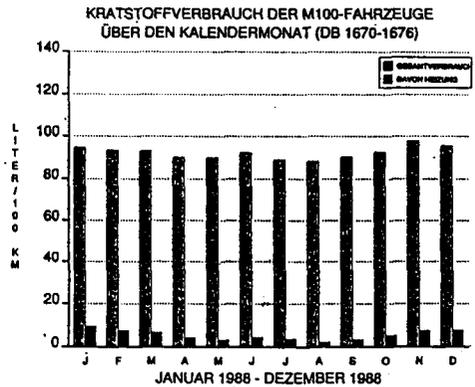
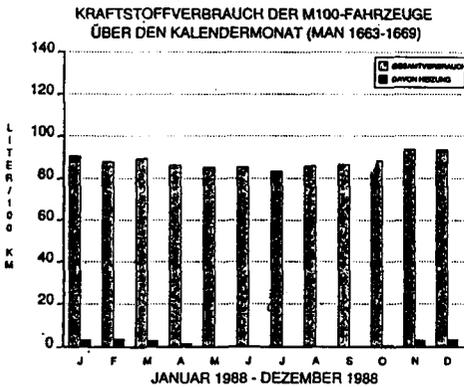
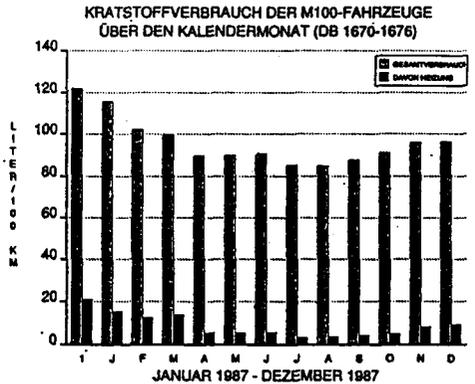
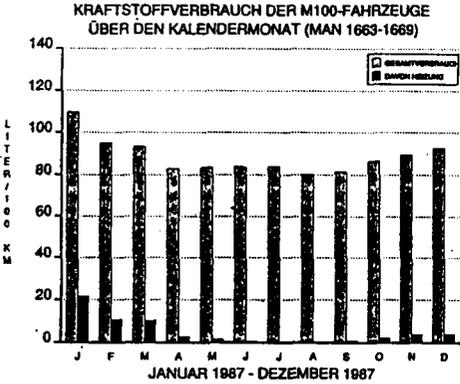
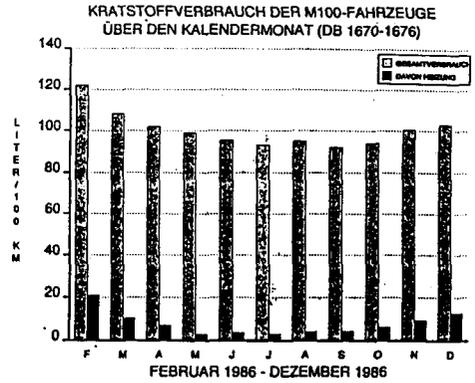
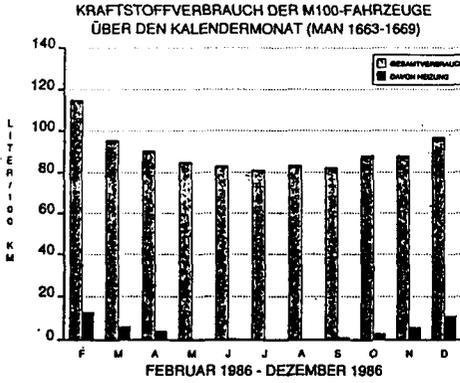


Bild 5.8: Kraftstoffverbräuche der Teilflotten nach Jahren aufgeteilt

Die Bilder 5.9 und 5.10 zeigen neben den Verbrauchswerten auch die durchschnittlichen Heizungsverbräuche der Teilflotten. Eine Bewertung des Verbrauchsunterschiedes ist lediglich für die Sommermonate eindeutig möglich, da in diesen Monaten bei den Bussen von MAN das Zusatzheizgerät nicht eingeschaltet wird, bei den Bussen von Daimler Benz aber Verbräuche gemessen werden können, da es konzeptbedingt eingeschaltet wird. Allerdings ist eine lineare Übertragung der Verbrauchsunterschiede auf die übrigen Monate nicht möglich, da die Einflußfaktoren nur schwer eingrenzbar sind.

Die Bilder 5.11 bis 5.12 zeigen für die einzelnen Jahre die mittleren Fahrleistungen der Teilflotten. Eine ansteigende Tendenz bzw. ein Einpendeln der Fahrleistungen auf etwa 4.000 bis 5.000 km/Monat bei beiden Fabrikaten ist zu erkennen.

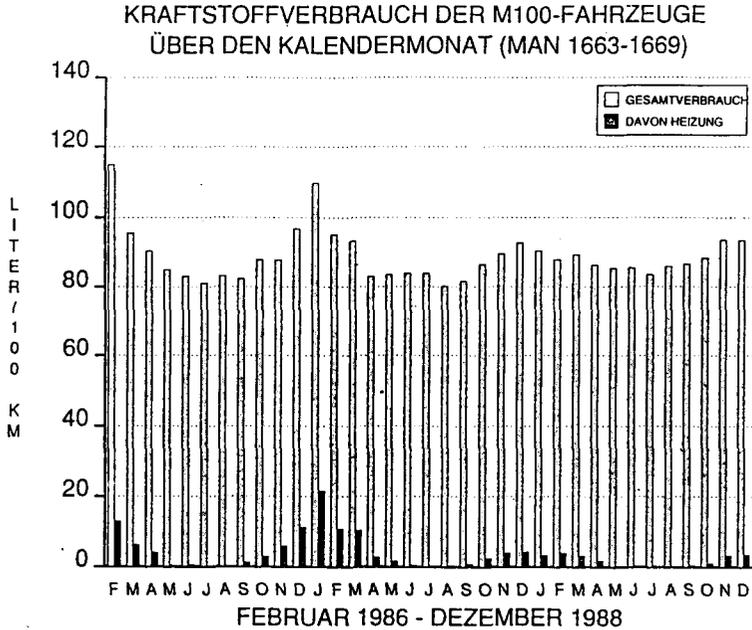


Bild 5.9: Kraftstoffverbrauch der MAN-Busse

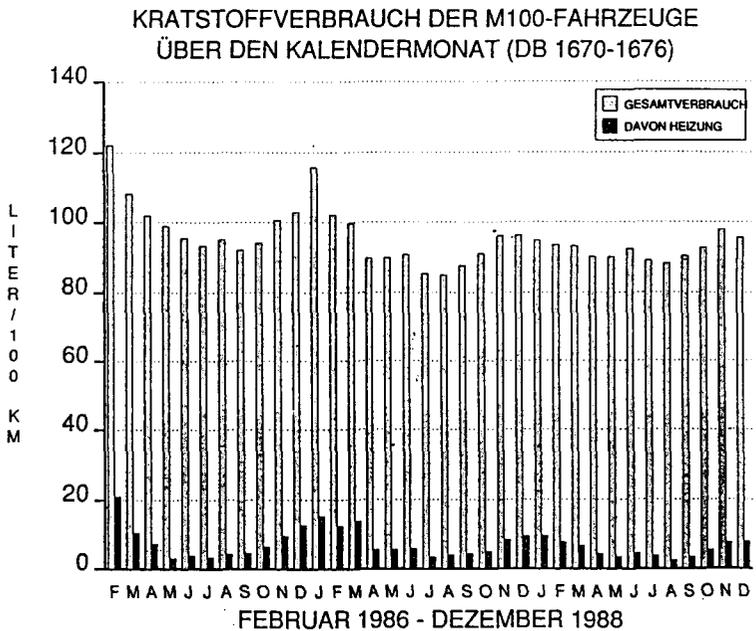


Bild 5.10: Kraftstoffverbrauch der DB-Busse

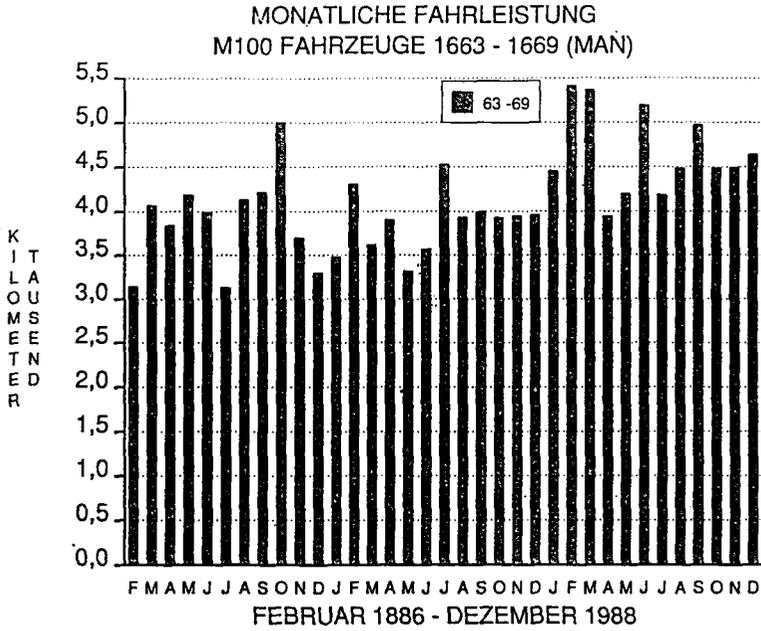


Bild 5.11: Fahrleistungen der MAN-Busse

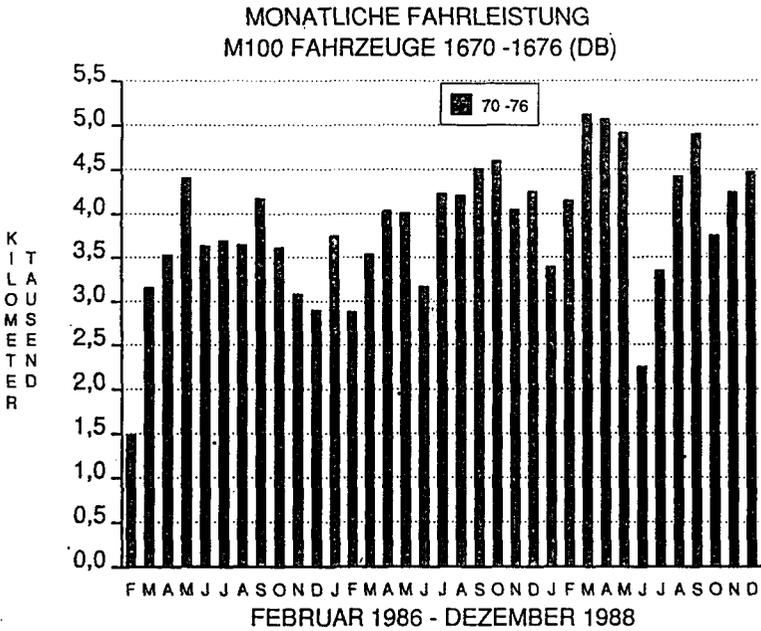


Bild 5.12: Fahrleistung der DB-Busse

In den Tabellen 5.13 und 5.14 sind die wichtigsten Zahlen zu den Verbrauchs- und Fahrleistungswerten exemplarisch für zwei Fahrzeuge der Teilflotten noch einmal zusammengefaßt worden. Die auf das Jahr bezogenen Fahrleistungen zeigen bei beiden Fabrikaten eine steigende Tendenz. Anfängliche Unterschiede zwischen den Teilflotten wurden ausgeglichen und die Laufleistung gegenüber dem Vorjahr gesteigert. Die Jahresdurchschnittswerte des Kraftstoffverbrauchs sind annähernd konstant geblieben.

Fahrzeug 1670

Verbrauchsdurchschnitt 1986: 93.2 l/100km, davon Heizung: 7.5 l/100km,
Fahrleistung aller Monate des Jahres 35697 km

Monatswerte von 1986:

Verbrauch 2. 1986:	117.5 l/100km,	davon Heizung: 18.6 l/100km,	Fahrleistung 2163 km
Verbrauch 3. 1986:	109.3 l/100km,	davon Heizung: 13.7 l/100km,	Fahrleistung 2461 km
Verbrauch 4. 1986:	96.9 l/100km,	davon Heizung: 9.0 l/100km,	Fahrleistung 3741 km
Verbrauch 5. 1986:	90.1 l/100km,	davon Heizung: 3.3 l/100km,	Fahrleistung 4887 km
Verbrauch 6. 1986:	89.7 l/100km,	davon Heizung: 5.0 l/100km,	Fahrleistung 3230 km
Verbrauch 7. 1986:	91.5 l/100km,	davon Heizung: 6.5 l/100km,	Fahrleistung 2050 km
Verbrauch 8. 1986:	83.0 l/100km,	davon Heizung: 3.6 l/100km,	Fahrleistung 4718 km
Verbrauch 9. 1986:	87.5 l/100km,	davon Heizung: 4.3 l/100km,	Fahrleistung 4708 km
Verbrauch 10. 1986:	88.7 l/100km,	davon Heizung: 7.0 l/100km,	Fahrleistung 4118 km
Verbrauch 11. 1986:	95.7 l/100km,	davon Heizung: 9.9 l/100km,	Fahrleistung 2996 km
Verbrauch 12. 1986:	109.1 l/100km,	davon Heizung: 32.2 l/100km,	Fahrleistung 625 km

Verbrauchsdurchschnitt 1987: 95.0 l/100km, davon Heizung: 10.0 l/100km,
Fahrleistung aller Monate des Jahres 36790 km

Monatswerte von 1987:

Verbrauch 1. 1987:	115.3 l/100km,	davon Heizung: 15.6 l/100km,	Fahrleistung 2769 km
Verbrauch 2. 1987:	103.5 l/100km,	davon Heizung: 13.1 l/100km,	Fahrleistung 2716 km
Verbrauch 3. 1987:	102.5 l/100km,	davon Heizung: 20.9 l/100km,	Fahrleistung 2750 km
Verbrauch 4. 1987:	86.9 l/100km,	davon Heizung: 5.7 l/100km,	Fahrleistung 3840 km
Verbrauch 5. 1987:	89.4 l/100km,	davon Heizung: 5.1 l/100km,	Fahrleistung 3777 km
Verbrauch 6. 1987:	94.0 l/100km,	davon Heizung: 12.2 l/100km,	Fahrleistung 944 km
Verbrauch 7. 1987:	90.6 l/100km,	davon Heizung: 13.1 l/100km,	Fahrleistung 1464 km
Verbrauch 8. 1987:	84.8 l/100km,	davon Heizung: 5.8 l/100km,	Fahrleistung 4136 km
Verbrauch 9. 1987:	91.4 l/100km,	davon Heizung: 7.8 l/100km,	Fahrleistung 2938 km
Verbrauch 10. 1987:	91.7 l/100km,	davon Heizung: 6.9 l/100km,	Fahrleistung 4276 km
Verbrauch 11. 1987:	100.4 l/100km,	davon Heizung: 14.3 l/100km,	Fahrleistung 2421 km
Verbrauch 12. 1987:	98.0 l/100km,	davon Heizung: 10.1 l/100km,	Fahrleistung 4759 km

Verbrauchsdurchschnitt 1988: 92.0 l/100km, davon Heizung: 6.5 l/100km,
Fahrleistung aller Monate des Jahres 45830 km

Monatswerte von 1988:

Verbrauch 1. 1988:	85.5 l/100km,	davon Heizung: 9.8 l/100km,	Fahrleistung 2144 km
Verbrauch 2. 1988:	95.1 l/100km,	davon Heizung: 12.0 l/100km,	Fahrleistung 3987 km
Verbrauch 3. 1988:	94.3 l/100km,	davon Heizung: 9.0 l/100km,	Fahrleistung 4711 km
Verbrauch 4. 1988:	87.9 l/100km,	davon Heizung: 6.6 l/100km,	Fahrleistung 4803 km
Verbrauch 5. 1988:	87.8 l/100km,	davon Heizung: 3.8 l/100km,	Fahrleistung 5222 km
Verbrauch 6. 1988:	92.8 l/100km,	davon Heizung: 4.4 l/100km,	Fahrleistung 3498 km
Verbrauch 7. 1988:	87.6 l/100km,	davon Heizung: 4.3 l/100km,	Fahrleistung 3123 km
Verbrauch 8. 1988:	98.1 l/100km,	davon Heizung: 4.2 l/100km,	Fahrleistung 2542 km
Verbrauch 9. 1988:	89.9 l/100km,	davon Heizung: 3.6 l/100km,	Fahrleistung 4811 km
Verbrauch 10. 1988:	90.2 l/100km,	davon Heizung: 3.8 l/100km,	Fahrleistung 5170 km
Verbrauch 11. 1988:	98.8 l/100km,	davon Heizung: 10.4 l/100km,	Fahrleistung 3195 km
Verbrauch 12. 1988:	102.0 l/100km,	davon Heizung: 9.6 l/100km,	Fahrleistung 2624 km

Tabelle 5.13: Auswertung der Tankdaten

TV 7911 - M 100 - Auswertung der Tankdaten per 6.10.1989

Fahrzeug 1663

Verbrauchsdurchschnitt 1986: 87.2 l/100km, davon Heizung: 3.2 l/100km,
Fahrleistung aller Monate des Jahres 46054 km

Monatswerte von 1986:

Verbrauch 2. 1986:	121.1 l/100km,	davon Heizung:	22.9 l/100km,	Fahrleistung	1200 km
Verbrauch 3. 1986:	89.4 l/100km,	davon Heizung:	6.4 l/100km,	Fahrleistung	4330 km
Verbrauch 4. 1986:	87.1 l/100km,	davon Heizung:	2.6 l/100km,	Fahrleistung	4505 km
Verbrauch 5. 1986:	83.8 l/100km,	davon Heizung:	.4 l/100km,	Fahrleistung	4166 km
Verbrauch 6. 1986:	83.6 l/100km,	davon Heizung:	.3 l/100km,	Fahrleistung	5376 km
Verbrauch 7. 1986:	80.7 l/100km,	davon Heizung:	.2 l/100km,	Fahrleistung	4463 km
Verbrauch 8. 1986:	82.2 l/100km,	davon Heizung:	.2 l/100km,	Fahrleistung	4758 km
Verbrauch 9. 1986:	81.2 l/100km,	davon Heizung:	1.3 l/100km,	Fahrleistung	4173 km
Verbrauch 10. 1986:	94.0 l/100km,	davon Heizung:	2.4 l/100km,	Fahrleistung	5735 km
Verbrauch 11. 1986:	87.6 l/100km,	davon Heizung:	5.3 l/100km,	Fahrleistung	2788 km
Verbrauch 12. 1986:	92.1 l/100km,	davon Heizung:	8.6 l/100km,	Fahrleistung	4560 km

Verbrauchsdurchschnitt 1987: 87.0 l/100km, davon Heizung: 5.3 l/100km,
Fahrleistung aller Monate des Jahres 38531 km

Monatswerte von 1987:

Verbrauch 1. 1987:	104.5 l/100km,	davon Heizung:	17.1 l/100km,	Fahrleistung	3841 km
Verbrauch 2. 1987:	94.9 l/100km,	davon Heizung:	11.8 l/100km,	Fahrleistung	3275 km
Verbrauch 3. 1987:	93.1 l/100km,	davon Heizung:	13.8 l/100km,	Fahrleistung	4017 km
Verbrauch 4. 1987:	85.2 l/100km,	davon Heizung:	3.8 l/100km,	Fahrleistung	3439 km
Verbrauch 5. 1987:	81.9 l/100km,	davon Heizung:	1.8 l/100km,	Fahrleistung	1529 km
Verbrauch 6. 1987:	81.4 l/100km,	davon Heizung:	.8 l/100km,	Fahrleistung	1157 km
Verbrauch 7. 1987:	78.4 l/100km,	davon Heizung:	.2 l/100km,	Fahrleistung	3784 km
Verbrauch 8. 1987:	76.3 l/100km,	davon Heizung:	.4 l/100km,	Fahrleistung	4692 km
Verbrauch 9. 1987:	83.9 l/100km,	davon Heizung:	.3 l/100km,	Fahrleistung	3208 km
Verbrauch 10. 1987:	84.7 l/100km,	davon Heizung:	1.9 l/100km,	Fahrleistung	3514 km
Verbrauch 11. 1987:	87.6 l/100km,	davon Heizung:	2.6 l/100km,	Fahrleistung	3741 km
Verbrauch 12. 1987:	90.8 l/100km,	davon Heizung:	2.9 l/100km,	Fahrleistung	2334 km

Verbrauchsdurchschnitt 1988: 86.2 l/100km, davon Heizung: 2.1 l/100km,
Fahrleistung aller Monate des Jahres 53738 km

Monatswerte von 1988:

Verbrauch 1. 1988:	89.1 l/100km,	davon Heizung:	3.3 l/100km,	Fahrleistung	5454 km
Verbrauch 2. 1988:	96.9 l/100km,	davon Heizung:	5.1 l/100km,	Fahrleistung	4283 km
Verbrauch 3. 1988:	88.0 l/100km,	davon Heizung:	3.7 l/100km,	Fahrleistung	3595 km
Verbrauch 4. 1988:	83.9 l/100km,	davon Heizung:	1.9 l/100km,	Fahrleistung	4474 km
Verbrauch 5. 1988:	79.9 l/100km,	davon Heizung:	.0 l/100km,	Fahrleistung	4140 km
Verbrauch 6. 1988:	83.6 l/100km,	davon Heizung:	2.1 l/100km,	Fahrleistung	5096 km
Verbrauch 7. 1988:	80.3 l/100km,	davon Heizung:	.0 l/100km,	Fahrleistung	3721 km
Verbrauch 8. 1988:	83.5 l/100km,	davon Heizung:	.0 l/100km,	Fahrleistung	4394 km
Verbrauch 9. 1988:	84.9 l/100km,	davon Heizung:	.2 l/100km,	Fahrleistung	5148 km
Verbrauch 10. 1988:	87.0 l/100km,	davon Heizung:	1.1 l/100km,	Fahrleistung	3955 km
Verbrauch 11. 1988:	91.2 l/100km,	davon Heizung:	3.3 l/100km,	Fahrleistung	3784 km
Verbrauch 12. 1988:	93.3 l/100km,	davon Heizung:	3.6 l/100km,	Fahrleistung	5694 km

Tabelle 5.14: Auswertung der Tankdaten

5.2 MOTORÖLUNTERSUCHUNG

5.2.1 VERWENDETE MOTORENÖLE

Die Motorenöle für den Einsatz in den Methanol-Bussen wurden von der Deutschen BP AG in Abstimmung mit den Motorenherstellern ausgewählt und geliefert. Die Daimler-Benz-Motoren laufen mit einem modernen Mehrbereichsöl für Dieselmotoren (BP Vanelus FE), das auch für Ottomotoren geeignet ist und heute sehr verbreitet in Nutzfahrzeugen eingesetzt wird. Die MAN-Motoren laufen mit einem vor mehreren Jahren speziell für diesen Motortyp entwickelten Motorenöl (K 13/3), dessen aschearme Additivierung speziell auf hohe Methanolverträglichkeit ausgerichtet ist.

5.2.2 UNTERSUCHTE KENNGRÖSSEN

Die untersuchten Ölproben wurden von der BVG alle 5000 km gezogen und die Ölanalysen zu Beginn teilweise, danach ganz, vom Labor der Deutschen BP durchgeführt.

Routinemäßig wurden untersucht:

Die Viskosität bei 100°C. Die Frischöle haben 13,8 (D.-B.) bzw. 9,6 (MAN) mm²/s bei 100°C. Sie sollte sich im Betrieb möglichst wenig (max. +/-20 %) ändern.

Die Basenzahl der Frischöle liegt bei ca. 12 bzw. ca. 6 mgKOH/g. Ein Absinken dieser Kenngröße bis auf etwa den halben Wert ist im Betrieb, besonders mit Dieselmotoren, üblich.

IR-Spektroskopie zur halbquantitativen Erfassung von Betriebseinflüssen wie z. B. Ölalterung, Nitrierung und Abbau wichtiger Additive.

Als Abriebelemente werden erfaßt: Eisen, Aluminium, Chrom, Molybdän, Kupfer, Silizium, Zinn, Blei. Art und Menge der im Öl gefundenen Metalle lassen gewisse Rückschlüsse auf Ausmaß und Ort von Verschleißerscheinungen im Motor zu.

5.2.3 ÖLWECHSELFRISTEN

Die Daimler-Benz-Busse fahren seit Testbeginn mit Ölwechselfristen von 30.000 km. Bei den MAN-Bussen wurde zunächst alle 20.000, später ebenfalls nach 30.000 km Öl gewechselt.

5.2.4 BISHERIGE ERGEBNISSE (Tabellen 5.15 und 5.16)

FAHRZEUGE B - V 1663-1669 (MAN)

Die bereits im Zwischenbericht diskutierten Ergebnisse hinsichtlich Ölzustand und Belastung des Öles durch Abriebelemente behalten auch nach einer Laufleistung ca. 130 - 170 Tkm ihre Gültig-

keit. Lediglich bei den Fahrzeugen 1663, 1664 und 1669 wurde gegen Ende des Betriebszeitraumes ein erhöhter Gehalt an Eisen, Blei und Chrom festgestellt.

FAHRZEUGE B - V 1670-1676 (DB)

Auch hier erhielten die Beobachtungen aus den ersten zwei Jahren der Erprobung ihre Gültigkeit. Die Ölbelastung sowie der Additivabbau liegen auch weiterhin in der gewohnten Größenordnung. Die Beanspruchung des Öles -meßbar in Basenzahlabbau sowie Oxidation und Nitrierung- liegt höher und zeigt in einzelnen Fällen -Fahrzeug 1671- eine sehr hohe Belastung des Öles auf. Bei diesem Fahrzeug findet sich bei 120.000 km auch ein erhöhter Molybdängehalt. Einen erhöhten Kupfergehalt kann man bei 150.000 km noch für das Fahrzeug 1672 feststellen. Danach untersuchte Ölproben aus diesem Fahrzeug weisen jedoch wieder normale Kupfergehalte auf.

Von dem Fahrzeug 1670 wurden im Jahre '89 keine Proben erhalten.

Insgesamt läßt sich bei den Fahrzeugen dieser Gruppe nach einem relativ hohen Einlaufverschleiß eine Normalisierung auf deutlich niedrigerem Niveau erkennen.

Das gewählte Ölwechselintervall von 30.000 km scheint für den Betrieb beider Fahrzeugtypen angemessen.

MAN

Flottenversuch mit Methanol (M 100) Ölsorte: K 13/3 Anschrift: BVG

Fahrzeug-Kennzeichen	Musterziehung		Visk./100°C qmm/s	Verschleißelemente mg/kg								IR				Basenzahl mg KOH/g
	Datum	km-Stand		Cr	Mo	Al	Fe	Cu	Si	Sn	Pb	POR	P-S	A 1700	A 1630	
B-V 1663	23.06.86	19.607		7	<5	<1	19	7	<1	<5	21	-40	-45	+<0	<0,1	4,9
	18.11.86	41.828		5	<5	<1	10	2	<1	<5	11					5,0
	08.04.87	59.749		4	<5	3	13	2	<1	<5	14					5,0
	27.01.88	90.861	10,2	20	<5	7	40	5	5	<5	22					4,7
	26.08.88	120.295	10,2	21	<5	5	49	6	5	<5	18					4,2
	03.03.89	150.076	10,2	18	-	9	93	10	14	3	43					*
B-V 1664	20.06.86	20.011		6	<5	<1	19	37	<1	<5	26					4,8
	13.05.87	59.704		5	<5	1	20	13	<1	<5	30					4,7
	20.01.88	88.987	10,2	13	<5	3	33	7	3	<5	18					4,6
	08.09.88	119.943	10,3	14	<5	4	25	6	<1	<5	17	-60	-90	0,2	0,2	3,5
	04.04.89	150.371	10,1	39	-	11	102	20	16	4	28	-65	-60	0,1	<0,1	*
B-V 1665	19.06.86	20.790		5	<5	<1	19	13	<1	<5	20	-40	-45	0,1	<0,1	4,6
	08.05.87	60.054		9	<5	5	25	10	1	<5	15					4,3
	23.12.87	89.815	10,3	12	<5	3	37	7	2	<5	14					4,5
	08.06.88	120.930		22	<5	1	30	5	<1	<5	15					*
	03.01.89	150.538	10,4	17	<5	<1	10	5	<1	<5	20	-50	-75	0,5	1,0	*
B-V 1666	26.06.86	18.939		6	<5	<1	20	10	<1	<5	23					4,9
	06.04.87	53.684		4	<5	2	16	3	<1	<5	19					5,1
	10.11.87	90.459		10	<5	6	36	6	5	<5	20					5,3
	14.03.88	105.302		16	<5	5	22	3	2	<5	11					4,8
	04.05.88	115.029	10,0	3	<5	6	32	4	3	<5	12					4,8
	06.12.88	150.563	10,4	16	<5	5	35	8	2	<5	20	-60	-90	0,2	<0,1	4,3
	02.05.89	178.342	10,1	10	-	4	35	5	5	3	22	-65	-65	0,1	<0,1	4,0
B-V 1667	20.06.86	19.523		8	<5	<1	22	13	<1	<5	32					4,7
	24.09.86	29.974		4	<5	<1	11	6	<1	<5	22					5,2
	20.03.87	53.684		5	<5	5	19	13	1	<5	27					4,8
	12.05.87	59.934		3	<5	4	11	4	3	<5	9					5,8
	04.01.88	90.812	10,1	34	<5	7	42	6	3	<5	22				<0,1	4,6
	29.06.88	120.435	10,2	8	<5	1	22	4	<1	<5	19	-60	-90	0,1	0,1	3,9
	27.09.88	133.366	9,8	3	<5	5	16	21	1	<5	7	-15	-60	0,1	<0,1	5,4
	11.01.89	150.126	9,9	4	<5	1	20	6	<1	<5	9	-35	-85	<0,1	<0,1	5,0
	25.04.89	169.733	9,9	10	-	4	36	5	4	3	16	-45	-85	<0,1	<0,1	4,5
B-V 1668	24.09.86	13.445		2	<5	<1	5	2	<1	<5	14					5,3
	02.04.87	52.199		16	<5	9	40	25	1	<5	27					5,1
	14.10.87	79.553		25	<5	4	27	6	1	<5	26					5,8
	12.01.88	90.588	9,9	13	<5	2	12	3	<1	<5	7				<0,1	5,4
	21.04.88	110.258	9,9	7	<5	5	16	3	<1	<5	12	-40	-85	0,1	<0,1	4,8
	20.10.88	139.735	10,2	4	<5	1	16	5	<1	<5	12	-50	-85	0,2	<0,1	4,2
	14.04.89	166.001	10,0	8	-	5	36	8	3	2	18					-
B-V 1669	04.07.86	19.843		5	<5	<1	14	14	<1	<5	26					4,7
	15.05.87	59.636		9	<5	3	17	6	<1	<5	29					4,3
	22.12.87	90.001	10,2	21	<5	5	32	5	1	<5	22				<0,1	4,5
	01.08.88	120.114	10,1	18	<5	3	40	5	1	<5	22	-60	-85	0,1	0,1	4,3
	28.04.89	164.191	14,5	14	-	7	66	6	4	4	46					-

0188L-3

* nicht auswertbar

Tabelle 5.15: Öluntersuchung (Ölsorte: K 13/3)

D B

Flottenversuch mit Methanol (M 100) Ölsorte: BP Vanellus FE Anschrift: BVG

Fahrzeug-Kennzeichen	Musterziehung		Visk./100°C qmm/s	Verschleißelemente mg/kg								IR				Basenzahl mg KOH/g	
	Datum	km-Stand		Cr	Mo	Al	Fe	Cu	Si	Sn	Pb	POR	P=S	A	1700 A		1630
B-V 1670	-	30.097		6	8	5	40	45	2	<5	48						9,1
	15.09.87	61.196		16	14	25	88	20	6	<5	26						9,5
	28.04.88	89.723	12,9	10	7	12	26	9	3	<5	10	-35	-60	+0	0,2		10,1
	27.12.88	120.235	13,4	11	28	29	90	21	10	<5	8			0,9	2,8		5,9 (ca)
B-V 1671	23.09.86	29.595		6	22	4	50	35	3	<5	48						7,9
	25.05.87	59.884		5	92	11	57	37	4	7	36						4,7 (ca)
	12.01.88	85.172	12,7	3	34	9	34	23	4	<5	30	*	+0	1,1	2,8		6,0 (ca)
	24.10.88	120.400	13,6	5	52	14	57	20	7	5	35	*	*	1,6	4,3		*
08.02.89	135.315		5	-	22	45	8	8	<1	10							
B-V 1672	-	29.529		8	21	15	43	55	4	<5	50						8,8
	23.04.87	59.522		22	40	170	100	37	6	<5	35						7,1
	28.10.87	90.045		13	60	50	120	29	14	<5	38						5,3
	07.04.88	116.104	13,5	7	20	16	55	15	5	<5	22	*	*	1,0	2,9		*
	13.05.88	120.500	13,7	12	<5	4	9	250	3	<5	7	+0	-55	<0,1	<0,1		12,1
	21.12.88	150.315	13,0	10	5	9	27	50	5	<5	12						8,3
19.04.89	175.119	13,1	4	-	8	26	20	3	1	13	-	-	2,1	1,9		-	
B-V 1673	10.10.86	29.976		11	32	24	58	32	6	<5	35						9,3
	24.06.87	59.750		15	13	13	55	20	3	<5	18						10,0
	26.10.87	78.669		28	90	240	520	29	18	<5	24						10,3
	28.01.88	90.811	13,0	10	8	6	15	14	2	<5	8						
	09.08.88	121.103		6	<5	3	20	10	2	<5	11	-70	*	*	0,2		10,4
08.02.89	145.309		2	-	3	17	8	4	<1	6							
B-V 1674	19.09.86	29.729		10	23	16	56	43	4	<5	44						8,0
	20.05.87	59.791		18	28	75	85	30	4	<5	35						7,2
	22.12.87	89.580	12,6	10	50	30	45	27	8	8	46	*	-5	1,5	3,7		5,1
	11.05.88	115.447	13,5	7	32	25	62	10	10	<5	11	-80	*	0,2	1,4		*
	02.01.89	149.309	13,0	2	16	5	20	21	5	<5	12	-75	*	*	0,6		8,8
13.04.89	164.707		<1	-	3	9	7	2	2	5						-	
B-V 1675	22.09.86	25.005		30	85	250	430	80	100	10	58						8,2
	02.09.87	60.010		16	14	9	46	21	2	<5	18						9,5
	09.03.88	90.328		8	14	8	27	18	5	<5	15	*	*	0,6	1,9		*
	07.09.88	120.576	13,3	5	<5	9	24	13	4	<5	9	-75	*	<0,1	0,7		8,6
	10.04.89	149.967	12,4	7	-	5	28	14	4	<1	11			1,8	1,4		-
B-V 1676	05.11.86	29.811		6	26	7	48	60	2	<5	40	-35	-25	+0	0,2		8,6
	29.07.87	59.901		17	45	28	110	55	8	7	60						5,5 (ca)
	03.12.87	80.161	13,0	9	28	12	40	19	7	<5	20	-30	-35	0,1	0,5		9,2
	25.07.88	105.179		11	24	69	70	13	20	<5	9						10,4
	25.11.88	119.754	12,7	4	<5	6	20	43	2	<5	8	-80	-	<0,1	0,9		8,7
	19.04.89	144.349	12,4	4	-	5	29	9	4	<1	10	-45	-	1,8	1,4		*

0188L-4

* nicht auswertbar

Tabelle 5.16: Öluntersuchung
(Ölsorte: BP Vanellus FE)

5.2.5 AUSBLICK

Die eingesetzten Öle scheinen den Anforderungen der Motoren und der langen (30.000 km) Ölwechselintervalle gut gewachsen zu sein. Bei den Bussen des Herstellers MAN, 1663 bis 1669, erscheint wegen der geringen Ölbelastung sogar eine weitere Verlängerung möglich. Bei den Bussen des Herstellers Daimler Benz, 1670 bis 1676, wird ein schneller Informationsaustausch zwischen Ölanalytik und Werkstatt/Hersteller zur Optimierung von Öleinsatz und Motor-Wartung führen.

6.0 WERKSTATTDATEN

6.1 DURCHFÜHRUNG DER DATENERHEBUNG

Eine der Zielvorgaben im Forschungsvorhaben war es, die Fahrzeuge der Methanol-Versuchsflotte in den 'normalen' Werkstattablauf des Autobus-Betriebshofes Spandau zu integrieren. Die gegenüber dem Diesel-Bus geänderte Technik bedingte eine intensive Schulung der Mitarbeiter. Um eine möglichst hohe Verfügbarkeit der Methanol-Busse zu erzielen, die zusätzlich von vorhersehbaren, anfänglichen Problemen der Mechaniker -besonders bei Einstellarbeiten- überdeckt wurde, beschränkte sich die Anzahl des eingebundenen Werkstattpersonals zunächst auf nur wenige Personen. Im Verlauf des Vorhabens wurden einzelne Mitarbeiter aus internen Gründen ausgewechselt, so daß der Kreis der mit der Technik der Methanol-Busse vertrauten Personen größer wurde.

Zur statistischen Auswertung der Werkstattdaten wurden eigens für den Versuchsbetrieb Fragebogen erstellt, auf denen die einzelnen Angaben dokumentiert wurden. Neben den routinemäßigen Werkstattaufenthalten für die Wartung wurden die Fahrzeuge immer dann in der Werkstatt untersucht, wenn von einem Fahrer des Busses eine meist subjektiv empfundene Beanstandung geäußert oder wenn ein Mangel durch einen Mitarbeiter der Werkstatt festgestellt wurde.

Es wurden im einzelnen folgende Fragebogen für die Datenerhebung verwendet:

ERHEBUNGSBOGEN 'FAHRLEISTUNGEN'

Als ein Kriterium für den Zustand des Motors wurde seine Leistung auf einem Rollenprüfstand laufleistungsabhängig im Rahmen einer fälligen Wartung bzw. Inspektion gemessen. Als ergänzendes Kriterium für die Fahrleistung diente die Fahrzeugbeschleunigung, die immer auf einem gleichen, ebenen Fahrbahnabschnitt bestimmt wurde. Bezugswerte für eine Bewertung waren die Ergebnisse einer Messung, die unmittelbar nach Inbetriebnahme der Busse vorgenommen worden war.

ERHEBUNGSBOGEN 'WARTUNG'

Zyklische Untersuchungen der Busse erfolgten mit den laufstreckenbezogenen Wartungsarbeiten, die vom Hersteller vorgegeben und auf den Erhebungsbo-

gen 'Wartung' aufgelistet waren. Die Fragebogen dienten gleichzeitig als Grundlage für die von der Werkstatt durchzuführenden Arbeiten. Im Versuchsverlauf wurden verschiedene Wartungsarbeiten zusätzlich einbezogen, um möglichst schnelle Erkenntnisse bei Konzeptänderungen zu erhalten.

ERHEBUNGSBOGEN 'INSTANDSETZUNG'

(Bild 6.1)

Der größte Teil der Erfahrungen konnte mit dem Erhebungsbogen 'Instandsetzung' dokumentiert werden. Für jeden Linieneinsatz wurde dem Bus eine betriebsinterne Begleitkarte zugeordnet, auf welcher der Fahrer Besonderheiten, insbesondere Beanstandungen, die im Linieneinsatz auftraten, vermerken konnte. Diese Begleitkarte gelangte in die Werkstatt, von der dann die Maßnahmen zur Beseitigung getroffen wurden. Da die vom Fahrer geäußerten Beanstandungen überwiegend subjektive Empfindungen wiedergaben (z.B. Fahrzeug beschleunigt nicht ausreichend), überprüften die Mitarbeiter der Werkstatt zunächst die Angaben und leiteten das Fahrzeug gegebenenfalls zur Reparatur weiter. Die Beanstandungen und die von der Werkstatt durchgeführten Maßnahmen bzw. Reparaturen wurden mit dem Datum und dem jeweils aktuellen km-Stand auf dem Erhebungsbogen 'Instandsetzung' zum Teil differenziert beschrieben.

ERHEBUNGSBOGEN 'BETRIEBSEREIGNIS'

(Bild 6.1)

Für außergewöhnliche Ereignisse im Verlauf des Praxisbetriebes stand ein eigener Erhebungsbogen zur Verfügung, auf dem das Ereignis, seine Ursache und die Maßnahmen zur Beseitigung dokumentiert werden konnten.

ERHEBUNGSBOGEN 'TECHNISCHE ÄNDERUNGEN UND UMRÜSTUNG'

(Bild 6.1)

Aus Erfahrungen und Erkenntnissen des Linienbetriebes konnten verschiedene erforderliche Konzeptänderungen abgeleitet werden, welche die Zuverlässigkeit des Betriebes der Busse erhöhten. Die Hersteller dokumentierten diese Konzeptänderungen auf den genannten Erhebungsbogen, meist ergänzt durch weitere Unterlagen, wie Schaltpläne und Zeichnungen. Gegebenenfalls wurde auch eine geänderte Wartung oder auch ein Hinweis für eine geänderte Bedienung vom Hersteller vorgegeben.

Durch eine weitere Dokumentation von Vorkommnissen und teilweise auch konkreten Einstelldaten einzelner Komponenten und der Methanol-Motoren selbst konnte eine Redundanz der gemachten Erfahrungen und Erkenntnisse geschaffen werden.

Für die statistische Auswertung der Werkstattdaten wurden die verbal beschriebenen Beanstandungen und Werkstattmaßnahmen bezogen auf einzelne Komponenten codiert und mit Datum und km-Stand sowie weiterer Angaben in einer EDV-Datei zusammengefaßt. Die Auswertung erfolgte mit dem Statistikprogramm SPSS (Statistical Package for the Social Sciences).

6.1.1 BEGRIFFSBESTIMMUNGEN 'BEANSTANDUNGEN'

Bei der Einführung neuer Technologien wird häufig die Forderung gestellt, daß der unmittelbare Anwender, im vorliegenden Fall der Fahrer, möglichst keinen Unterschied zu seinen bisherigen Gewohnheiten mit dem Diesel-Bus spüren sollte. Die im Forschungsvorhaben 'Alternativen im Stadtbusbetrieb' bisher gemachten Erfahrungen im Praxistest zeigen, daß diese Forderung zu differenzieren ist. Besonders dann, wenn durch eine geänderte Technik der Fahrer von seinen bisherigen Gewohnheiten entlastet werden soll, muß ihm der Unterschied deutlich und der Hintergrund verständlich gemacht werden. Nur dann ist er in der Lage, sich auf diese Änderung einzustellen und gegebenenfalls die Vorteile voll zu nutzen. Für die Methanol-Busse forderten besonders zum Beginn des Vorhabens geänderte Startmodalitäten bei beiden Konzepten und die Verhaltensregeln bei eventuell auftretenden Störungen eine eingehende Information der Fahrer. Durch konstruktive Veränderungen konnten die Startmodalitäten bei den Methanol-Bussen der Firma MAN im Verlauf des Vorhabens verbessert werden.

Auch sollte durch Informationen bereits in der Anfangsphase eine Sensibilität der Fahrer gegenüber Veränderungen im Fahrverhalten der Methanolbusse ausgebildet werden.

Wurden vom Fahrer Veränderungen im Fahrverhalten oder gar Störungen empfunden, so hatte er die Aufgabe, sie verbal zu formulieren und auf der Busbegleitkarte festzuhalten. Die auf der Begleitkarte dokumentierten Beanstandungen wurden von der Werkstatt auf den Erhebungsbogen 'Instandsetzung' übertragen und um die Werkstattmaßnahme ergänzt.

Um eine bereits zu Beginn des Vorhabens allzu vor-
eilige Eingrenzung der Informationen zu vermeiden,
wurden bei der Codierung der Fahrerangaben zu-
nächst die Originalformulierungen in ihrer Viel-
falt berücksichtigt. Erst zum Ende des Vorhabens
wurde im Hinblick auf eine übersichtliche Auswer-
tung eine sinnvolle Zusammenfassung gleichartiger
Beanstandungen getroffen. Die Codierung wurde in
Übereinstimmung mit den Reparaturmaßnahmen nach
Baugruppen unterteilt vorgenommen (Tabelle 6.2).
Zwar wurden von den Fahrern der Methanol-Busse
meist nur allgemeine Beanstandungen gegeben, ohne
Zuordnung einer bestimmten Baugruppe, doch waren
Beanstandungen von Mitarbeitern der Werkstatt in
der Regel gezielt auf eine Baugruppe bezogen.

6.1.2 BEGRIFFSBESTIMMUNGEN 'WERKSTATTMASSNAHMEN'

Aufgrund der vom Fahrer im Linienbetrieb bemerkten
Störung bzw. Beanstandung wurde das Fahrzeug in
der Werkstatt untersucht. War die Störung offen-
sichtlich oder konnte sie bei einer vom Werkstatt-
personal durchgeführten Probefahrt reproduziert
werden, erfolgte eine entsprechende 'Werkstattmaß-
nahme' bzw. Reparatur zur Beseitigung der Störung.
Trat die vom Fahrer beschriebene Störung nicht
wieder auf, so wurde das Fahrzeug in der Regel
'ohne Maßnahme' wieder für den Liniendienst frei-
gegeben. In Einzelfällen wurden jedoch auch Kon-
trollen oder Messungen durchgeführt, um die auf-
getretene Störung näher einzugrenzen bzw. ihre Ur-
sache zu ergründen. Die auf den Erhebungsbogen
verbal artikulierten Werkstattmaßnahmen wurden
ebenfalls mit ihrer Vielfalt zunächst übernommen
und erst gegen Ende des Vorhabens zur Vermeidung
von Überschneidungen in Gruppen sinnvoll zusammen-
gefaßt (Tabelle 6.3).

0		900	Abgasanlage
10	Mängel am Datenaufzeichnungsgerät	901	Katalysator defekt
100	<u>Motor / Allgemeines</u>	902	Staudruckanzeige (zentrale Warnleuchte)
101	Motor läuft unrund	903	Katalysator mit Ablagerungen zugesetzt
102	Motor ruckelt	904	Auspuffrohr rußig
103	Motor geht nach Anlassen wieder aus	991	Katalysator
104	Geräusche Motor / Wagen	1000	<u>Zündanlage</u>
105	Motor springt schlecht an	1001	Unterdruckdose defekt
106	Luftfilter enthält Methanol	1002	Zündaussetzer
107	Entlüftungsschlauch geschmolzen	1100	<u>Anlasser / Lichtmaschine</u>
108	Enddrehzahl zu hoch / niedrig	1101	Anlasser defekt
109	Motor hält Drehzahl trotz Gaswegnahme	1200	<u>Zusatzheizung</u>
110	Motor geht beim Bremsen aus	1201	Heizung qualmt
111	Schlechte Motorleistung, zieht nicht	1202	Heizung springt nicht an
115	Motor qualmt	1203	Zuleitung undicht
116	Motor lässt sich nicht abschalten	1204	Heizung springt an und geht wieder aus
117	Motorbremse	1205	Heizung macht Geräusche
118	BU-Lampe	1206	Magnetventil gebrochen
119	Rücken bei Schaltvorgängen	1207	kein Kraftstoffdruck
120	Leistungsschwankungen auf Prüfstand	1208	Kraftstoffverlust
127	Kein Leerlauf	1209	Heizung heizt nicht
132	Motor geht während der Fahrt aus	1210	Verbrauch zu hoch
134	Fzg. läuft zw. 30 u. 40 km/h unruhig	1211	Mantelrohr undicht / Lamellenträger
135	Methanolgeruch	1212	Abgasschlauch defekt
136	Motor springt nicht an	1291	Funktion
139	Motor nimmt kein Gas an	1292	Undichtigkeiten
140	Motor nagelt	1300	<u>Sonstiges</u>
191	Motorlauf	1301	Fahrzeug qualmt
192	Motorleistung	1302	CO zu hoch
193	Anlassvorgang	1303	Wandlerbremse lässt sich nicht einschalten
199	Motor abgebrannt	1304	Startperre o. F.
200	<u>Motorblock</u>	1313	Getriebe
201	Kolbenklemmer	1314	Getriebeöl
202	Schäden am Kolbenboden	1400	<u>Elektrische Einrichtungen</u>
203	Wasserverlust an Zylinderköpfen		
213	Zylinderkopfdichtung		
291	Kolbenschäden		
300	<u>Kraftstoffanlage</u>		
301	Tankverschluss defekt		
302	Kraftstoffverlust		
303	Tankanzeige defekt		
304	Tankgeber		
305	Kraftstoffpumpe macht Geräusche		
306	EKP undicht		
391	Undichtigkeiten		
392	Änderungen		
400	<u>Einspritzpumpe</u>		
401	Regelstange klemmt		
402	Einspritzleitung undicht		
500	<u>Gemischaubereitung</u>		
501	Kontrollleuchte leuchtet		
502	Verdampfer wird nicht gefüllt		
503	Stellmotor -Schubabschaltung- defekt		
504	Füllstandsonde defekt		
505	Schwimmerschalter schaltet nicht ab		
506	Magnetventil vom Bypass schliesst nicht		
507	Methanol läuft aus Gasmischer		
508	Methanoldämpfe aus Ansaugrohr		
509	Druckverlust im Verdampfer		
591	Undichtigkeiten		
600	<u>Motor Kühlung</u>		
601	Wasserverlust am Wärmetauscher		
602	Wassertemperatur zu niedrig / hoch		
603	Kontrollleuchte brennt		
604	Kühler undicht		
605	Wasserpumpe undicht		
606	Kühlflüssigkeitsverlust		
610	Kühlwasser Heizkreislauf		
631	Wasserschlauch defekt		
691	Undichtigkeiten		
700	<u>Motorschmierng</u>		
701	Nachfüllbehälterlampe leuchtet		
702	Zuviel Öl im Motor		
718	autm. Ölnachfüllung -über-		
719	autm. Ölnachfüllung -unter-		
720	Öl nachgefüllt		
721			
725	Ölverlust (Motor, Behälter)		
726	Öldruck		
791	Ölstand		
800	<u>Nebenaggregate</u>		
807	Keilriemen rutschen		
808	Keilriemen Lima defekt		
809	Keilriemen Wapu defekt		
810	Keilriemen ZW-Lüfter defekt		
811	Keilriemen XW-ZW defekt		
828	Keilriemengeräusche		

Tabelle 6.2: Liste der genannten Mängel

100 <u>Allgemeins</u>	1000 <u>Zündanlage</u>
102 Kontrolle mit Endoskop	1001 Kerzenstecker erneuert
103 Kabelverbindung erneuert	1002 Gestänge Zündverstellung instand gesetzt
104 Rücklaufsicherung gewechselt	1003 Kerzen erneuert
106 Zündschloß gewechselt	1004 Zündkabel erneuert
200 <u>Motorblock</u>	1005 Gestänge für Zündverstellung verändert
201 Kolben und Laufbuchsen erneuert	1006 Verteilerfinger gew.
202 Zylinderkopf erneuert	1007 Induktionsgeber / Hallgeber gew.
203 Wasserkanäle abgedichtet	1008 Elektrodenabstand eingestellt
220 Motorreparatur diverse	1013 Platinkerzen eingebaut bzw. gew.
222 Motor gewechselt	1014 Zündschaltgerät ern. / gew.
	1091 Kerzen
300 <u>Kraftstoffanlage</u>	1100 <u>Anlasser, Lichtmaschine</u>
301 Tankverschluss gerichtet, abgedichtet	1101 Anlasser gew.
302 EKP gewechselt	1102 Lichtmaschine gew.
303 Tankgeber gewechselt	1200 <u>Zusatzheizungen</u>
304 Sicherheitsventil am Filter gewechselt	1201 Zulaufschlauch gekürzt und befestigt
305 Gelenk am Tankstutzen gangbar gemacht	1202 EKP gew.
306 Magnetventil gewechselt	1203 Brennerkopf gew.
307 mech. Kraftstoffpumpe gew.	1204 Druckregler gew.
308 Undichtigkeiten beseitigt	1205 Temperatursicherung
309 Anzeigergerät gew.	1206 Mantelrohr gerissen
310 Kraftstofffilter gew.	1207 Umwälzpumpe gew.
311 EKP auf Dauerbetrieb	1208 Filter für Zusatzheizung gew.
400 <u>Einspritzpumpe</u>	1209 Lamellenträger ausgetauscht
401 Überströmventil gew.	1210 Temperaturschalter gew.
402 Einspritzdüsen erneuert	1211 Gebläsemotor gew.
403 Einspritzpumpe gew.	1212 Elektroniksteuerteil gew.
404 Einspritzleitungen und -düsen gew.	1213 Magnetventil gew.
405 Regelweggeber	1214 Wärmetauscher gew.
500 <u>Genischauflbereitung</u>	1215 Abgasschlauch gew.
501 Leerlaufstellglied gew.	1291 Mechanik
502 Sicherheitssonde gew.	1292 Elektronik
503 Leerlaufanreicherung / Düse gew.	1300 <u>Ohne Maßnahme der Werkstatt</u>
504 Schwimmerschalter - Füllstandssonde gew.	1301 Fehlbedienung
505 Mischerkegel abgedreht	1302 kontrolliert i. O.
506 Stellmotor gewechselt	1303 Befund und Weitergabe an Hersteller
507 Drosselklappe gangbar gemacht	1313 Getriebe gew.
508 Magnetventil ern. (Kaltstartanreicherung)	1314 Getriebe abgedichtet
509 Membrane vom Gasmischer gewechselt	1315 Getriebeöl nachgefüllt
510 Druckregler im Verdampfer ern. (auch nur Ventil)	1316 Stellmotor gew.
511 Verdampferdeckel ern.	1391 Getriebe
512 Drosselklappe angestellt	1400 <u>Elektrische Einrichtung</u>
513 Magnetventil für Schubabschaltung ern.	1401 Relais erneuert
514 Stutzen am Gasmischer aufgeb.	1402 Kabelverbindung erneuert
515 Mitnehmerhebel für Stellmotor geändert	1403 Elektronikteil Stellmotor gew.
516 Dichtung für Druckregler gew.	1404 Sicherung gew.
517 Näherungsschalter Schubabschaltung gew.	1405 Start- / Stopautomatik gew.
518 Dichtung für Sonde gew.	1406 Batterie gew.
519 Schalter für Startfreigabe gew.	1407 Batterietrennrelais gew.
520 Steuereinheit gew.	1500 Messungen, Kontrollen, Einstellungen
521 Druckreglerfedern gew.	1501 Beschleunigungsmessung
523 Sicherheitsventil Druckregler	1503 Düsen überprüft
524 neueste Füllstandssonde eingebaut	1504 Zündung eingestellt
525 Manometer gew.	1505 versuchsweise Geräte gew. i. O.
526 Dichtung im Steuerventil gew.	1800 repariert
591 Mischer	2000 <u>Änderungen am Konzept</u>
592 Verdampfer	2001 1. Änderung
593 Steuerung	2002 2. Änderung
600 <u>Motorabkühlung</u>	2003 3. Änderung
601 Schlauchverbinder festgezogen	2004 4. Änderung
602 Abgaswärmetauscher repariert	2005 5. Änderung
603 Kühler gew.	2006 6. Änderung
604 Wasserkanäle in den Zylinderköpfen kontrolliert	2007 7. Änderung
605 Wasserstandssonde gew.	2008 8. Änderung
606 Kühlanlage abgedrückt	2009 9. Änderung
607 Wasserpumpe gew.	2010 10. Änderung
608 Wasserkühler rep.	2013 13. Änderung
610 Reparatur am Heizkreislauf	2014 14. Änderung
691 Motorkreislauf	2015 15. Änderung
692 Heizkreislauf	9999 <u>Umrüstung auf Dieselmotorbetrieb</u>
700 <u>Motorschmierung</u>	
701 Nachfüllbehälter abgedichtet	
702 Ölleitung abgedichtet	
703 Befestigung des Behälters korrigiert	
704 Ölfilterkopf gew.	
705 Öl abgelassen	
800 <u>Nebenantriebe</u>	
808 Keilriemen Lima gew.	
900 <u>Abgasanlage</u>	
901 Katalysator erneuert	
902 Staudruckwächter eingestellt	
903 Staudruckwächter gew.	

Tabelle 6.3: Liste der genannten Werkstattmaßnahmen

Der Datenauswertung im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden aus allen vorgenommenen Maßnahmen lediglich die Werkstattmaßnahmen zugeführt, welche den Methanol-Motor bzw. die konzeptbedingt geänderten Komponenten betrafen. Zur transparenteren Strukturierung der Maßnahmen wurde ebenfalls eine Aufteilung nach den gleichen Baugruppen vorgenommen, wie sie bereits für die 'Beanstandungen' definiert wurden.

6.2 PROBLEME BEI DER ERHEBUNG DER WERKSTATTDATEN

Mit Bezug auf die in Kapitel 2.6 aufgezeigten allgemeinen Probleme bei der Versuchsdurchführung mußte zunächst die Vorgehensweise für die Informationsweitergabe in den Organisationsablauf der Werkstatt integriert werden. Dank des hohen persönlichen Einsatzes eines Werkstattmeisters im Autobusbetriebshof Spandau konnte die Integration sehr schnell und zuverlässig erfolgen. Eine detaillierte Aufzeichnung der Vorkommnisse für jeden Bus stellt somit eine Grundlage für die jeweilige 'Geschichte' des Busses dar, ist aber gleichzeitig breite Datenbasis für eine statistische Auswertung.

Aufbauend auf den zufriedenstellenden Ergebnissen der Voruntersuchung mit je einem Bus jedes Konzeptes bzw. jedes Herstellers (DB; MAN) schienen die Konzepte zum Abschluß der Vorerprobung bereits eine gute Betriebs- bzw. Funktionssicherheit erreicht zu haben. Dennoch traten zu Beginn, aber auch im Verlauf des Versuchsbetriebes Störungen auf, die konzeptionelle Veränderungen erforderlich machten. Hinzu kamen Bauteile, deren Resistenz gegenüber Methanol-Kraftstoff zwar zugesagt, aber

nicht eingehalten wurde. Änderungen an diesen Bauteilen erforderten zunächst wieder eine interne Erprobung beim Hersteller, bevor sie in die Versuchsbusse eingebaut werden konnten. Um die Busse in der Zeit der Entwicklung neuer Bauteile nicht stilllegen zu müssen, wurden in Einzelfällen die Bauteile weiterhin eingesetzt, von denen die Schwachstellen bekannt waren. Zum Teil erfolgte die Erprobung eines Bauteils zunächst in nur einem oder zwei Versuchsbussen, bis die Funktionssicherheit erkennbar war.

Eine geeignete Selektion der Werkstattmaßnahmen nach versuchs- oder einsatzbedingten Maßnahmen konnte nicht getroffen werden, so daß alle Maßnahmen in die statistische Auswertung eingegangen sind. Allerdings erlaubt der Umfang der insgesamt erhobenen Daten eine Bestimmung von Schwerpunkten, die eine gute Bewertung der Konzepte zulassen.

6.3 AUSWERTUNG DER ERHOBENEN DATEN

Alle im Zusammenhang mit der Werkstatt bzw. den Werkstattaufenthalten der Versuchsbusse erhobenen Daten wurden bezogen auf die jeweilige Bus-Nummer, das Datum und den Kilometer-Stand in einem Datenfile zusammengefaßt. Jedem Werkstattaufenthalt eines Busses konnten bis zu 4 Beanstandungen und Werkstattmaßnahmen zugeordnet werden (Bild 6.4). Weitere Angaben, zum Beispiel wer die Beanstandungen genannt hatte usw., ergänzten den jeweiligen Vorgang.

Die bei der Dateneingabe zunächst belassene Vielfalt der verbalen Angaben konnte zur Erzielung einer größeren Transparenz vor der endgültigen Auswertung zu einer geringeren Anzahl zusammengefaßt werden. Eine weitere, sinnvolle Zusammenfassung bestand in der Auswertung der Angaben zu den gewählten Baugruppen.

6.3.1 ALLGEMEINE AUSWERTUNGEN

Bei einer Gesamtleistung der 14 Methanol-Busse von ca. 2 Mio. km im Versuchszeitraum konnte mit einer durchschnittlichen jährlichen Laufstrecke eines Versuchsbusse von ca. 46.000 km der mittlere Standard eines Diesel-Busses der BVG mit ca. 60.000 km/Jahr zu etwa 78 % erreicht werden. Während des gesamten Versuchszeitraumes wurden -begrenzt auf Störungen am Motor-Konzept und den zugeordneten Bauteilen- insgesamt 1.338 einzelne Werkstattmaßnahmen für alle Versuchsbusse registriert. Störungen an den übrigen Aggregaten bzw. der übrigen Busausrüstung blieben unberücksichtigt, da sie in keinem kausalen Zusammenhang zum Motor-Konzept standen und ebenso bei einem Diesel-Bus auftreten.

Die Gesamtanzahl der Werkstattmaßnahmen, die im Versuchszeitraum erhoben wurden, verteilt sich zu annähernd gleichen Anteilen auf die beiden untersuchten Konzepte. 48,5 % der durchgeführten Maßnahmen entfallen auf die Methanol-Busse des Herstellers Daimler Benz und 51,5 % auf die Methanol-Busse der Firma MAN. Aus der differenzierten Auswertung der Daten wird deutlich, daß die Anzahl der Werkstattmaßnahmen eine nicht unerhebliche Anzahl von Werkstattaufenthalten mit einschließt,

bei denen die Werkstatt das Fahrzeug aufgrund einer Beanstandung des Fahrers zwar durchgesehen und probegefahren, aber keine Reparaturmaßnahme durchgeführt hat. Gerade in diesen Beanstandungen mag sich die bereits erwähnte, versuchstypische, höhere Sensibilität der Fahrer gegenüber vermeintlichen Unregelmäßigkeiten im Betrieb der Versuchsbusse ausdrücken.

Ein weiterer Anteil von Werkstattaufenthalten kann in gleicher Weise als typisch für einen Versuchsbetrieb gesehen werden. Wurde im Rahmen einer Reparatur oder Werkstattmaßnahme bei einem Fahrzeug eine Veränderung vorgegebener Einstellwerte festgestellt, erfolgte häufig als Präventivmaßnahme eine Kontrolle bzw. Messung dieser Werte bei den übrigen Fahrzeugen des Herstellers, die dann als Werkstattaufenthalt gewertet wurden.

Als ebenso versuchsbedingte Werkstattaufenthalte sind konzeptionelle Änderungen an den Bussen zu sehen. Hatte der Versuchsbetrieb ergeben, daß eine Konzeptänderung durch Häufung gleichartiger Störungen erforderlich wurde, mußten die Busse zur Durchführung der Änderung immer dann zusätzlich in die Werkstatt beordert werden, wenn die Änderung nicht im Rahmen einer turnusmäßigen Wartung oder Inspektion durchgeführt werden konnte.

Bei einer entsprechenden Berücksichtigung dieser ausschließlich versuchsspezifischen Werkstattmaßnahmen verbleibt eine Gesamtanzahl von 969 Maßnahmen der Werkstatt für alle 14 Methanol-Busse im Versuchszeitraum von 36 Monaten.

Als eine wichtige Beurteilungsgröße für einen betriebswirtschaftlich sinnvollen Einsatz der Methanol-Busse in Verkehrsbetrieben ist die Verfügbar-

keit der Busse im Linieneinsatz zu sehen. Wird eine Reparaturmaßnahme durch die Werkstatt erforderlich, so steht der Bus für den Zeitraum der Reparatur nicht für den Linieneinsatz zur Verfügung. Dies kann bei kleineren Reparaturen bedeuten, daß der Bus nur stundenweise oder halbtags nicht eingesetzt werden kann. Für die zweite Tageshälfte könnte er dann wieder in den Linienverkehr integriert werden. Da die Erhebung des zeitlichen Aufwandes der einzelnen an den Versuchsbussen durchgeführten Werkstattmaßnahmen nicht sinnvoll schien, zumal viele Arbeiten an den Bussen für die Mechaniker neu waren, wurde zur Vereinfachung lediglich das auf dem Fragebogen angegebene Datum berücksichtigt. Entsprechend der üblichen Werkstattpraxis ergibt sich hieraus, daß an einem Tag auch mehrere Werkstattmaßnahmen an einem Bus in der Werkstatt durchgeführt werden konnten. Ebenso konnte eine Reparatur auch mehrere Tage in Anspruch nehmen. Auf dieser Betrachtungsgrundlage ergibt sich, daß die 14 Methanol-Busse an insgesamt 722 Tagen von 36 Monaten in der Werkstatt waren und somit für den Liniendienst nicht verfügbar waren.

Durch die statistische Betrachtung über den Gesamtzeitraum ergibt sich jedoch eine Ausgewogenheit in den werkstattbedingten Ausfallzeiten, die sich in der Verfügbarkeit (Kapitel 6.5) der Methanol-Busse dokumentiert. Eine auch hier vorgenommene redundante Datenerhebungen machte einen Quervergleich möglich. Eine gute Übereinstimmung der auf verschiedenen Daten basierenden Bestimmung der Verfügbarkeit bestätigt die getroffene Annahme.

6.3.2 SPEZIFISCHE AUSWERTUNGEN

Die insgesamt recht umfangreiche Datengrundlage läßt eine Vielzahl von Betrachtungen und Darstellungen zu, die allerdings in Einzelfällen durch geringe Anzahlen keine statistische Relevanz erreichen und damit auch nur einen geringen Aussagewert besitzen. Aus den Übersichtstabellen (6.7 und 6.8) ergeben sich hierzu einige Beispiele (Werkstattmaßnahme: 800 - Nebenantriebe, 1.100 Anlasser/ Lichtmaschine usw.). Aufgrund der geringen Anzahl kann hier nicht angenommen werden, daß diese Störungen bzw. Reparaturen als typisch für die Methanol-Busse anzusehen sind. Vielmehr zeigt ein Vergleich mit begrenzt zur Verfügung stehenden Daten von Diesel-Bussen ähnliche Einzelfälle bei Störungen.

6.3.2.1 AUSWERTUNG VON BEANSTANDUNGEN

Nach der Einweisung und Unterrichtung in den Umgang mit den Methanol-Bussen sollten von den Fahrern im Linienbetrieb auftretende Störungen beim Betrieb des Busses dokumentiert und an die Werkstatt weitergeben werden. Hierzu wurde die bei der BVG betriebsintern verwendete Fahrzeugbegleitkarte verwendet. Durch eine möglichst differenzierte Beschreibung der Störung durch den Fahrer sollte der Werkstatt eine schnelle Abhilfe bzw. eine gezielte Untersuchung erleichtert werden. In gleicher Weise konnten jedoch auch Störungen oder Beanstandungen vom Werkstattpersonal festgestellt und auf der Begleitkarte bzw. dem projektbezogenen Datenträger, dem Fragebogen 'Instandsetzung', dokumentiert werden. Bedingt durch einen unterschiedlichen Kenntnisstand technischer Details, zu-

mindest zwischen den Fahrern und dem Werkstattpersonal, war zu erwarten, daß die von den Fahrern gemachten Angaben eher allgemein gegenüber den Angaben des Werkstattpersonals ausfielen. Durch die größere Detailkenntnis der technischen Zusammenhänge bei den Mitarbeitern der Werkstatt waren die von diesem Personenkreis genannten Störungen bzw. Beanstandungen weitgehend präziser auf die Ursachenquelle bezogen. Durch den größeren Anteil von Beanstandungen, die von den Fahrern genannt wurden, ergibt sich ein Schwerpunkt überwiegend subjektiver Empfindungen der Fahrer, die in nur relativ wenigen Fällen eine Übereinstimmung mit den anschließend in der Werkstatt durchzuführenden Reparaturmaßnahmen zeigten.

Die Tabellen 6.5 und 6.6 zeigen die Anzahl der genannten Beanstandungen getrennt nach Fahrzeugkonzepten bzw. Herstellern und aufgeteilt nach den einzelnen Methanol-Bussen. Werden die Schwerpunkte näher betrachtet, so sind sie für beide Konzepte annähernd gleich, lediglich bei den Fahrzeugen der Firma Daimler Benz konnten durch die konstruktive Trennung von Motor und Verdampfer differenziertere Angaben zum Motorlauf getroffen werden, wenn die Ursache auch für die Fahrer offensichtlich in der Gemischaufbereitung lag. Somit bezogen sich für beide Konzepte weit über die Hälfte der Beanstandungen auf den Motor bzw. den Motorlauf allgemein. Die weiteren von den Fahrern als Quelle von Störungen empfundenen Schwerpunkte sind die Kraftstoffanlage, das Zusatzheizgerät und die Motorkühlung. Die übrigen Beanstandungen, die differenziertere Angaben zu einzelnen Baugruppen enthalten, wurden nur zu geringen Anteilen genannt. Die Tabellen zeigen, daß es zwar partielle Unterschiede für die einzelnen Busse gibt, die allerdings nicht so signifikant sind, als daß für einzelne Busse eine mehr oder minder stärkere Störbelastung abgeleitet werden könnte.

Beanstandungen bis Dez. 1988 (DB)

10/30/89

Crosstabulation: MANGEL genannter mangel a
By BNR busnummer

BNR->	Count	1670	1671	1672	1673	1674	1675	1676	Row Total
MANGEL									
100 Motor / Allgemei	34	41	26	49	23	40	21	234	41.9
200 Motorblock	1		2	1	1	1	1	7	1.3
300 Kraftstoffanlage	5	5	8	5	7	7	5	42	7.5
500 Gemischtaufbereit	11	17	13	17	17	9	17	101	18.1
600 Motorkuehlung	9	10	2	3	5	7	10	46	8.2
700 Motorschmiering	3	3	5	5	1	1	1	19	3.4
800 Nebenantriebe	1					1		2	.4
900 Abgasanlage					1		1	2	.4
1000 Zuendanlage			2		1	2	1	6	1.1
1100 Anlasser-Lichtma		1						1	.2
1200 Zusatzheizung	8	12	10	3	8	10	7	58	10.4
1300 Sonstiges		3	1	2	1	2		9	1.6
1400 Elektrische Einr	9	4	3	7	2	3	3	31	5.6
Column	81	96	72	92	67	83	67	558	
(Continued) Total	14.5	17.2	12.9	16.5	12.0	14.9	12.0	100.0	

Tabelle 6.5: Beanstandungen
bis Dezember 1988 (DB)

Beanstandungen bis Dez. 1988 (MAN)

10/30/89

Crosstabulation: MANGEL genannter mangel a
By BNR busnummer

BNR->	Count	1663	1664	1665	1666	1667	1668	1669	Row Total
MANGEL									
100	37	32	39	34	45	50	45	282	61.0
Motor / Allgemei									
200			2	1		2	1	6	1.3
Motorblock									
300	5	5	6	5	4	3	1	29	6.3
Kraftstoffanlage									
400		1		1			1	3	.6
Einspritzpumpe									
600	5	7	2	4	6	5	1	30	6.5
Motorkuehlung									
700	2	2	2	1	1	1	4	13	2.8
Motorschmierung									
900	1	2	6	1	4	3	4	21	4.5
Abgasanlage									
1000	4	6	3	5	1		4	23	5.0
Zuendanlage									
1100				1			1	2	.4
Anlasser-Lichtma									
1200	3	5	5	4	5	6	7	35	7.6
Zusatzheizung									
1300			2	2	1	2	1	8	1.7
Sonstiges									
1400	1	1	1	3	1	3		10	2.2
Elektrische Einr									
Column	58	61	68	62	68	75	70	462	
(Continued) Total	12.6	13.2	14.7	13.4	14.7	16.2	15.2	100.0	

Tabelle 6.6: Beanstandungen
bis Dezember 1988 (MAN)

6.3.2.2 AUSWERTUNG VON WERKSTATTMASSNAHMEN

Durch die unterschiedlichen Motor-Konzepte der im Liniendienst untersuchten Methanol-Busse konnte gerade bei der Auswertung der Werkstattmaßnahmen nur eine nach Konzepten getrennte Darstellung eine sinnvolle Ergebnisaussage erwarten lassen. Die konzeptbezogenen Störungen betrafen weitgehend unterschiedliche Aggregate und Bauteile.

Bei gleichartigen Störungen beider Konzepte kann angenommen werden, daß auch Randbedingungen, wie z.B. Kraftstoffzusammensetzung, als Ursache in Frage kommen (Kapitel 2.5).

Die tabellarische Darstellung der Auswertungsergebnisse zeigt, daß die statistische Verteilung der Maßnahmen auf die einzelnen Busse als ausgegogen anzusehen ist, somit die Busse einer annähernd gleichen Werkstattbetreuung bedurften (Tabellen 6.7 und 6.8).

METHANOL-BUSSE DER FIRMA DAIMLER BENZ

Eine Häufung von Störfällen bei den Fahrzeugen der Firma Daimler Benz betraf die Gemisch-Aufbereitung bzw. deren Komponenten (190 Werkstattmaßnahmen). Die größte Störanfälligkeit mit insgesamt 47,4 % wiesen Schwimmerschalter/Füllstandssonde (35,3 %) und Sicherheitssonde (12,1 %) auf. Unkorrekte Schaltfunktionen, aber auch mangelnde Resistenz gegenüber den im Verdampfer auftretenden Methanol-Dämpfen waren Ursachen für Ausfälle und teilweise Folgeschäden. Nach den ersten aufgetretenen Ausfällen weiterentwickelte Sonden zeigten zwar partielle Verbesserungen, waren aber weiterhin Ur-

sache von Störungen. Somit erreichten diese Bauteile bis zum offiziellen Ende des Vorhabens (Dezember 1988) nicht die erforderliche Standfestigkeit. Hier wäre eine Weiterentwicklung notwendig.

Die Steuer- und Regeleinheit wies verschiedene, meist mechanisch bedingte Störungen auf (24,2 %), bis hin zu Brüchen des Gehäuses. Konstruktive Veränderungen innerhalb des Versuchszeitraumes führten hier zu erkennbaren Verbesserungen .

Der Verdampfer als zentrales Bauteil der Gemisch- aufbereitung war zu etwa 20,4 % Ursache von Werkstattmaßnahmen. Anfängliche Fertigungsmängel mit der Folge auftretender Korrosion, aber vor allen Dingen Werkstoff- und Auslegungsprobleme beim Druckregelventil, machten Werkstattmaßnahmen erforderlich. Partielle Verbesserungen konnten zwar im Versuchszeitraum realisiert und erprobt werden, doch kam es auch zum Ende des Versuches noch zu Störungen an diesen Bauteilen.

Der Gasmischer zeigte zumindest zum Versuchsbeginn offensichtliche Schwächen in der Materialzusammensetzung. Starker Verschleiß der Führungen an den Mischerkegeln führte zu unkorrekter Zumischung von Methanol-Gas und oftmals Folgeschäden durch kondensiertes Methanol im Ansaugweg des Motors. Eine Oberflächenvergütung der gefährdeten Führungen ergab eine erkennbare Standzeiterhöhung.

Nach der Gemischaufbereitung führte das Zusatzheizgerät und die Elektrik, hier besonders die Batterie, zu Störungen und Werkstattaufenthalten. Da das Zusatzheizgerät nicht nur bei den Bussen der Firma DB sondern ebenso bei den Bussen der Firma MAN Störungen zeigte, wird hierauf gesondert eingegangen (Kap. 6.3.3).

Weit über die Hälfte (61,4 %) von Ausfällen, deren Grund in den elektrischen Einrichtungen zu sehen war, hatten ihre Ursache in einer leeren Starterbatterie. Meist durch unsachgemäße Bedienung beim Start des Motors, d.h. durch eine vorzeitige Inbetriebnahme des Busses, obwohl eine noch nicht ausreichende Menge gasförmigen Kraftstoffs zur Verfügung stand (Druck im Verdampfer zu gering) und der Motor somit nach kurzem Anlaufen wieder ausging, wurden die Starterbatterien über die normale Kapazität für einen Startvorgang hinaus beansprucht und entleert. Der Einbau einer vom Verdampferdruck abhängigen Anlaßsperre brachte nur teilweise Verbesserungen.

Überwiegend in der Unverträglichkeit verwendeter Bauteile gegenüber dem Methanol-Kraftstoff lagen Ausfälle des Tankgebers, einem Schwimmkörper mit Widerstandsspule, begründet. Undichtigkeiten am Tank bzw. am Tankdeckel, die zu Kraftstoffverlusten führten, wurden zunächst auf die Deckeldichtung zurückgeführt. Für erneut aufgetretene Undichtigkeiten nach dem Wechsel der Tankdeckeldichtung konnten Unebenheiten an der Bördelkante des Tankstutzens als Ursache ermittelt werden. Ein Planschliff des Randes erbrachte die gewünschte Dichtigkeit.

Werkstattmaßnahmen bis Dez. 1988 (DB)

10/30/89

Crosstabulation: WERKMA werstattmassnahme a
By BNR busnummer

WERKMA	Count	BNR							Row Total
		1670	1671	1672	1673	1674	1675	1676	
100 Allgemeines							1	1	2
200 Motorblock		1		3	2	1	1	2	10
300 Kraftstoffanlage		3	6	9	5	8	7	6	44
500 Gemischaufbereit		29	30	23	44	26	20	27	199
600 Motorkuehlung		9	7	2	1	4	8	8	39
700 Motorschmierung		2	2	4	4			1	13
800 Nebenantriebe		2					2		4
1000 Zuendanlage		3	2	5	3	3	6	1	23
1100 Anlasser, Lichtma								1	1
1200 Zusatzheizung		10	8	9	5	9	10	8	59
1300 Ohne Massnahme d		11	24	14	20	11	22	7	109
1400 Elektrische Einr		13	9	4	12	7	8	4	57
1500 Messungen, Kontr		9	7	5	7	3	6	6	43
1800 repariert		1							1
2000 Änderungen am Ko		9	7	5	6	7	5	6	45
Column Total		102	102	83	109	79	96	78	649
(Continued) Total		15.7	15.7	12.8	16.8	12.2	14.8	12.0	100.0

Tabelle 6.7: Werkstattmaßnahmen
bis Dezember 1988 (DB)

METHANOL-BUSSE DER FIRMA MAN

Bei den Fahrzeugen der Firma MAN lag der größte Teil der erforderlichen Werkstattmaßnahmen in einer Störung der Kraftstoffversorgung, einschließlich der Einspritzpumpe begründet (155 Werkstattmaßnahmen). Mit 27,1 % war die elektrische Kraftstoffpumpe (EKP) Ursache der Störung und Grund von Werkstattmaßnahmen. Konzeptbedingte Einschaltzeiten der Pumpe, aber hauptsächlich eine nicht ausreichende Resistenz gegenüber dem Methanol-Kraftstoff haben zu Beginn des Liniendienstes einen häufigen Austausch der EKP erforderlich gemacht. Mehrere Änderungen am Kraftstoffsystem haben zum Ende des Vorhabens zu einer deutlichen Stabilisierung und zu einer höheren Zuverlässigkeit der Pumpen (bis zu 87 000 km Fahrzeuglaufleistung) geführt.

In gleicher Weise waren auch die Kraftstofffilter von Ausfällen und Störungen betroffen (26,5 %). Der Einbau anderer Filter erhöhte zwar die Zuverlässigkeit, doch traten auch noch bis zum offiziellen Versuchsende vereinzelte Störungen an diesem Bauteil auf. Mit 19,3 % ist auch der Anteil allgemeiner, nicht näher spezifizierter Störungen am Kraftstoffsystem und jeweils ca. 6 % der Anteil von Störungen an den Einspritzdüsen und der Einspritzpumpe nicht unerheblich. Die bereits erwähnte grundlegende Veränderung des Kraftstoffsystems, die allerdings erst nach dem offiziellen Versuchsende vollständig durchgeführt werden konnte, hat in der Folgezeit (1989) zu einer spürbar geringeren Störanfälligkeit geführt.

Ein weiterer Schwerpunkt bei den erforderlichen Werkstattmaßnahmen für die Methanol-Busse der Firma MAN lag in Maßnahmen im Zusammenhang mit der Zündanlage. Der größte Anteil hiervon betraf allerdings die Zündkerze. Besonders im Hinblick auf die hohe Sensibilität des Katalysators auf Fehlzündungen bzw. größere Mengen unverbrannten Kraftstoffes im Abgas kam der Zuverlässigkeit der Zündkerze eine hohe Bedeutung zu. Hohe Anforderungen durch die sich aufgrund des Diesel-Prinzips ergebenden Randbedingungen der Verbrennung schlossen die Verwendung einer Serienzündkerze aus dem Anwendungsbereich in Pkw-Motoren aus. Die entsprechend den Anforderungen neu konstruierte Zündkerze zeigte über den gesamten Versuchszeitraum eine höchst unterschiedliche Standfestigkeit. Während einzelne Zündkerzen bzw. Zündkerzensätze Laufleistungen bis zu 20.000 km und sogar darüber erreichten, mußte der größte Teil bereits nach einer Laufleistung von ca. 10.000 km und darunter gewechselt werden. Die erforderlichen Standzeiten konnten im Versuchszeitraum auch durch verschiedene konstruktive Veränderungen an den Zündkerzen nicht allgemein erzielt werden. Konzeptionelle Änderungen sollen in Zukunft zu einer entscheidenden Verbesserung führen.

Eng verbunden mit dem Ausfall einer oder auch mehrerer Zündkerzen sind Störungen im Abgassystem bzw. dem Katalysator (58 Werkstattmaßnahmen). Zunächst aufgetretene mechanische Beschädigungen am Katalysator, wie Gehäusebrüche, Ablösungen und Zerstörungen des Monoliten, konnten durch eine geänderte, schwingungsfreiere Anbringung im Motorraum vermieden werden. Trotz der spürbaren Verbesserung kam es auch zum Ende des Versuchs noch zu vereinzelt Ausfällen, deren Ursache in einer

schadhaften Zündkerze oder Einspritzdüse gesehen werden kann. Als eine weitere Störquelle und damit Ursache von Ausfällen ist die Motorelektronik der Methanol-Busse der Firma MAN zu sehen (75 Werkstattmaßnahmen). Neben Störungen, die von den Schaltgeräten selbst ausgingen, war auch hier der Anteil von Störungen aufgrund eines Bedienungsfehlers besonders beim Start des Fahrzeugs und den sich darauf ergebenden Konsequenzen (Batteriewechsel) mit über einem Drittel der erforderlichen Werkstattmaßnahmen (36,4 %) relativ hoch.

Da beide Hersteller das gleiche Zusatzheizgerät verwendeten, traten auch bei den Methanol-Bussen der Firma MAN zum Teil ähnliche Störungen wie bei den Geräten in den Daimler Benz-Bussen auf (siehe auch Kapitel 6.3.3).

Crosstabulation: WERKMA werstattmassnahme a
By BNR busnummer

BNR->	Count								Row
		1663	1664	1665	1666	1667	1668	1669	Total
WERKMA									
100	2		1	1			2		6
Allgemeines									.9
200		1	1	2	1	3	1		9
Motorblock									1.3
300	19	15	23	25	12	14	15		123
Kraftstoffanlage									17.9
400	3	8	5	7	3	4	3		33
Einspritzpumpe									4.8
600	4	6	2	4	2	3	2		23
Motorkuehlung									3.3
700	2	2	2	1	1	1	3		12
Motorschmierung									1.7
800							1		1
Nebenantriebe									.1
900	4	5	10	7	9	8	4		47
Abgasanlage									6.8
1000	19	20	23	21	17	19	21		140
Zuendanlage									20.3
1100	2	2	1	2	1	1	2		11
Anlasser,Lichtma									1.6
1200	4	4	8	5	6	6	6		39
Zusatzheizung									5.7
1300	1	6	11	8	11	19	14		70
Ohne Massnahme d									10.2
1400	11	5	3	8	14	7	7		55
Elektrische Einr									8.0
1500	13	13	9	7	10	6	8		66
Messungen, Kontr									9.6
1800					1				1
repariert									.1
2000	10	8	7	8	6	7	7		53
Änderungen am Ko									7.7
Column		94	95	106	106	94	100	94	689
(Continued) Total		13.6	13.8	15.4	15.4	13.6	14.5	13.6	100.0

Tabelle 6.8: Werkstattmaßnahmen

bis Dezember 1988 (MAN)

6.3.3 ZUSATZHEIZGERÄTE

Unabhängig vom Antriebskonzept sind Stadtbusse in den hiesigen Klimazonen mit Zusatzheizgeräten ausgerüstet, die vor dem Motorstart und in den Warmlaufphasen des Antriebsmotors die Innenraumbeheizung des Busses übernehmen oder bei tiefen Temperaturen zusätzlich zur Motorabwärme eingeschaltet werden. Aus Gründen einer einfachen Handhabung wird das Zusatzheizgerät in der Regel mit dem gleichen Kraftstoff, mit dem auch der Antriebsmotor betrieben wird und aus dem gleichen Kraftstoffbehälter versorgt. Lediglich in besonderen Fällen erhält das Zusatzheizgerät einen separaten Kraftstofftank, mit dem Nachteil, daß zwei Kraftstoffe getrennt eingefüllt werden müssen. Die Methanol-Busse beider Hersteller wurden mit Zusatzheizgeräten ausgerüstet, die für den Betrieb mit Methanol-Kraftstoff ausgelegt waren.

Während beim Motorkonzept der Firma MAN das Zusatzheizgerät die gleiche Funktion ausübte, wie sie auch beim Diesel-Bus vorgesehen ist, wurde das Zusatzheizgerät bei den Bussen der Firma Daimler vor dem Start des Motors zunächst ausschließlich für die Beheizung des Verdampfers eingesetzt. Bei betriebswarmen Motor war dann die gleiche Funktion vorgegeben, wie sie auch beim Diesel-Bus vorlag. Aus dem unterschiedlichen Einsatz der Zusatzheizgeräte bei beiden Konzepten ergaben sich unterschiedliche Schwerpunkte bei den Störungen. Während bei den in den Bussen der Firma Daimler Benz installierten Geräten mehrere Ursachen zu Störungen führten, lagen die Störungen bei den

Bussen der Firma MAN überwiegend (ca. 77 %) im Bereich der Kraftstoffversorgung. Dagegen unterlagen die Geräte in den Bussen der Firma Daimler Benz offensichtlich einer höheren thermischen Belastung. Die Ursache hierfür lag nicht allein in den erforderlichen Einschaltzeiten, sondern in einer zusätzlich angebrachten Isolierung, die zu Überhitzungen und zu Schäden am Lamellenträger des Zusatzheizgerätes führte. Nachdem die Isolierung entfernt worden war, traten diese Schäden nicht wieder auf.

6.3.4 MOTORREPARATUREN

Aus betriebswirtschaftlicher Sicht ist die hohe Standzeit des Diesel-Motors im Stadtbus ein entscheidender Vorteil. Laufleistungen bis zu ca. 700.000 km bedeuten, daß der Motor über die gesamte Betriebszeit des Stadtbusses nicht gewechselt wird. Vergleichsweise hierzu muß ein Erfahrungspotential aus lediglich drei Jahren Betriebseinsatz für die Methanol-Busse als relativ gering eingestuft werden. Dennoch lassen sich aus den gemachten Erfahrungen Rückschlüsse auf wahrscheinliche Probleme der Standfestigkeit der Motoren ziehen.

Hierbei sind vier Kategorien von Reparaturen zu unterscheiden:

- A) Reparaturen bis einschließlich des Zylinderkopfes
- B) Austausch von Kolben und Zylindern
- C) Austausch von Pleuelwellen und Lagern
- D) Austausch des kompletten Aggregates.

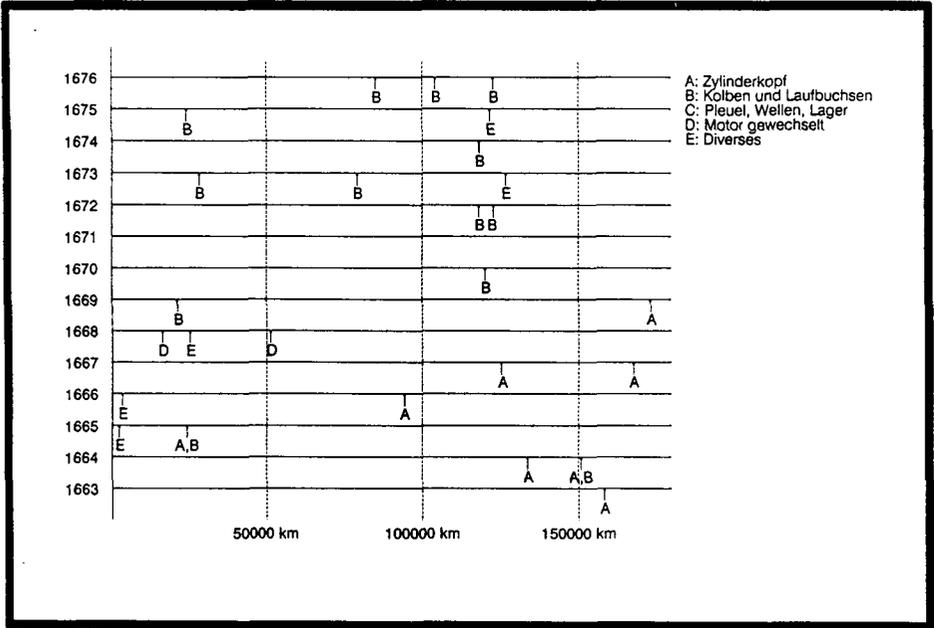


Bild 6.9: Motorreparaturen über Laufleistung der Busse

Bild 6.9 zeigt den auf Reparaturen am Motor bezogenen 'Lebenslauf' der 14 Methanol-Busse, aufgetragen über die Fahrleistungen. Zu Beginn des Vorhabens wurden bei den Motoren der MAN-Methanol-Busse Anzeichen dafür bemerkt, daß die Zylinderkopfdeckel nach dem Gießen nicht mit der wünschenswerten Sorgfalt verputzt waren und nachgearbeitet bzw. ausgetauscht werden mußten.

Verursacht durch einen Schaden am Katalysator wurde der Motor des Busses mit der Wagen-Nr. 1668 in Mitleidenschaft gezogen und komplett ausgetauscht. Ein zweiter Motortausch beim gleichen Bus wurde durch einen Schaden am Luftpresser nach einer Laufstrecke von nur ca. 35.000 km erforderlich.

Die übrigen Reparaturen und die vorausgegangenen Schäden an den weiteren Motoren der Methanol-Busse der Firma MAN betrafen lediglich einzelne Motor-komponenten bis zum Zylinderkopf. Reparaturen an Kolben und Zylindern wurden erforderlich bei den Motoren der Busse mit der Wagen-Nr. 1664 und 1665. Bis auf den Bus mit der Wagen-Nr. 1668 fahren die übrigen Busse der Firma MAN heute noch mit den gleichen Motoren (ca. 180.000 km).

Bis zu einer Laufleistung von ca. 120.000 km wurden bei 6 der 7 Methanol-Busse der Firma Daimler Benz Reparaturen an Kolben und Zylindern durchgeführt. Der Bus mit der Wagen-Nr. 1671 blieb ohne Reparaturen am Motor über die gesamte Erprobungszeit. Vorherrschende Ursache waren Zerstörungen des Materials, förmlich ein Zerfressen, welches darauf zurückgeführt wird, daß ein Anteil flüssigen Methanol-Kraftstoffs in den Brennraum gelangte. Ein kausaler Zusammenhang zu einer bestimmten Laufleistung bzw. eines erhöhten Verschleißes in den Komponenten der Gemischaufbereitung konnte nicht nachgewiesen werden. Allerdings zeigt sich der Motor recht empfindlich gegen Störungen und Schäden im Bereich der Gemischaufbereitung, bei denen es verschiedentlich zu einem Transport von flüssigem Kraftstoff in den Brennraum kam.

6.3.5 WEITERFÜHRUNG DER VERSUCHSBEGLEITUNG

Das offizielle Projektende war der 31.12.1988. Bis zu diesem Zeitpunkt wurde die Fahrzeugflotte von 14 Methanol-Bussen beobachtet und durch Untersuchungen begleitet. Aufbauend auf den in diesem Zeitraum gemachten Erfahrungen wäre eine Weiterführung der Demonstration sinnvoll gewesen. Die Übernahme der Flottenfahrzeuge in ein anlaufendes Forschungsvorhaben (Multifuel) war vorgesehen und sollte den Betriebseinsatz für weitere Jahre sichern. Terminverschiebungen des Projektbeginns erschwerten einen nahtlosen Übergang. Die Busse der Firma Daimler Benz wurden auf Dieselbetrieb umgerüstet, da die in den drei Jahren eines Linieneinsatzes gemachten Erfahrungen mit dem Methanol-Gas-Motor-Konzept als hinreichend angesehen wurden. Die Busse der Firma MAN blieben weiterhin als Methanol-Busse im Linieneinsatz der BVG, so daß aus ihrem Betrieb zusätzliche Erfahrungen gewonnen werden konnten. Die einmal eingeführte Art der Datenerhebung wurde weitergeführt. Allerdings wurden in den ersten Monaten des Jahres 1989 mehrere Modifikationen des Konzeptes systematisch untersucht, so daß ein unmittelbarer Vergleich der Ergebnisse der Weiterführung mit den Ergebnissen bis zum Ende 1988 nicht möglich ist.

Die im Zeitraum vom 01.01.1989 bis zum Oktober 1989 erfaßten Mängel bzw. Beanstandungen gehen aus der Tabelle 6.10 hervor. In den drei Jahren Betriebserprobung im Liniendienst wurden die Beanstandungen zu 78,7 % von den Fahrern und zu 19,4 % vom Werkstattpersonal genannt. Aufgrund der angestrebten systematischen Untersuchungen der an den Bussen auftretenden Störungen wurden die Beanstandungen im Zeitraum der Weiterführung mit

41,7 % vom Werkstattpersonal genannt. Unregelmäßigkeiten im Motorlauf bei höheren Geschwindigkeiten, deren Ursache zum Beispiel in der Zündanlage bzw. den Zündkerzen lagen, traten im normalen Liniendienst nicht auf und waren somit für den Fahrer auch kein Grund zur Beanstandung. In häufig durchgeführten Probefahrten durch das Werkstattpersonal liegt auch begründet, daß die Beanstandungen differenzierter formuliert wurden. Waren es in den drei Jahren von 1986 bis 1988 überwiegend Beanstandungen im Motorlauf, so teilen sich die Angaben für den Zeitraum in 1989 erkennbar auf den Motorlauf und Zündanlage. Auch ist der Anteil von Beanstandungen einzelner Aggregate höher als in den drei Jahren zuvor. In dieser Tatsache spiegelt sich offensichtlich die höhere Sensibilität des Werkstattpersonals gegenüber allen Bauteilen wieder, deren Optimierung primär in diesen Zeitraum betrieben werden sollte.

Beanstandungen Jan.89 bis Okt. 89 (MAN)

11/27/89

Crosstabulation: MANGEL genannter mangel a
By BNR busnummer

BNR-> Count	1663	1664	1665	1666	1667	1668	1669	Row Total
MANGEL								
100 Motor / Allgemei	8	14	11	6	8	1	4	52 36.1
200 Motorblock		1						1 .7
300 Kraftstoffanlage	2	1		1	1		1	6 4.2
400 Einspritzpumpe			2		2	1	1	6 4.2
600 Motorkuehlung				1	1	2	1	5 3.5
700 Motorschmierung	1	1	1	1				4 2.8
800 Nebenantriebe		1	3	1	1	4		10 6.9
900 Abgasanlage		2	2					4 2.8
1000 Zuendanlage	3	3	5	6	1	5	8	37 25.7
1100 Anlasser-Lichtna						1		1 .7
1200 Zusatzheizung	2		2	1		1	3	9 6.3
1300 Sonstiges		1						1 .7
1400 Elektrische Einr	1	3	2			1	1	8 5.6
Column Total	17	27	28	17	20	16	19	144
(Continued) Total	11.8	18.8	19.4	11.8	13.9	11.1	13.2	100.0

Tabelle 6.10: Beanstandungen
Januar 1989 bis Oktober 1989 (MAN)

Die Zielsetzung der Optimierung wird auch im Vergleich der durchgeführten Werkstattmaßnahmen und hier besonders bei den Messungen und Kontrollen (Code-Ziffer 1.500) erkennbar. Eine Verlagerung der Schwerpunkte von Maßnahmen an der Kraftstoffanlage in den drei Betriebsjahren hin zu Maßnahmen an der Zündanlage in den letzten Monaten dokumentiert die verstärkten Anstrengungen zur Lösung des Zündkerzenproblems. Die Verminderung von Maßnahmen an der Kraftstoffanlage zeigt aber auch eine zunehmende Stabilisierung nach dem generellen Umbau. Die überproportional angestiegenen Aufwendungen für Reparaturen an der Einspritzpumpe liegen überwiegend in präventiven Maßnahmen, die für Reparaturen an den Nebenantrieben im Wechsel von Keilriemen begründet. Die weiteren Unterschiede lassen keine eindeutigen Interpretationen zu. Abschließend läßt sich feststellen, daß die verbliebenen sieben Methanol-Busse der Firma MAN, abgesehen von den bewußt zusätzlich durchgeführten Untersuchungen, ihren Liniendienst weitgehend störungsfrei absolvieren.

Werkstattmaßnahmen Jan. 89 bis Okt. 89 (MAN)

11/27/89

Crosstabulation: WERKMA werstattmassnahme a
By BNR busnummer

BNR->	Count	1663	1664	1665	1666	1667	1668	1669	Row Total
WERKMA									
100			2						2
Allgemeines									.9
200		2	2	1	1	1		2	9
Motorblock									3.8
300		5	4	3	4	5	3	5	29
Kraftstoffanlage									12.4
400		4	3	8	7	3	3	3	31
Einspritzpumpe									13.2
600					1		3	1	5
Motorkuehlung									2.1
700		2	1		1			2	6
Motorschmierung									2.6
800			1	2	3	3	4	1	14
Nebenantriebe									6.0
900		3	3	3	2	3	1	1	16
Abgasanlage									6.8
1000		7	7	7	7	9	7	9	53
Zuendanlage									22.6
1100			1	1	1	1	1	1	6
Anlasser, Lichtma									2.6
1200		3		1	1	1	1	2	9
Zusatzheizung									3.8
1300		1	1	3	1	1			7
Ohne Massnahme d									3.0
1400		2	5	1	3		1	3	15
Elektrische Einr									6.4
1500		4	5	9	3	5	2	3	31
Messungen, Kontr									13.2
2000			1						1
Änderungen am Ko									.4
Column		33	36	39	35	32	26	33	234
(Continued) Total		14.1	15.4	16.7	15.0	13.7	11.1	14.1	100.0

Tabelle 6.11: Werkstattmaßnahmen

Januar 1989 bis Oktober 1989 (MAN)

6.4 STANDFESTIGKEIT

6.4.1 ALLGEMEINES

Wie bereits im Kapitel 2.6 dargelegt wurde, ist besonders der Problembereich der Bewertung der Standfestigkeit des gesamten Systems bzw. einzelner Komponenten stark betroffen von Einflüssen der Versuchsdurchführung.

Gerade bei einzelnen Bauteilen, die nicht aus einer Großserie entnommen werden konnten, traten mehrfach Probleme und Schäden auf, die entweder nur mit einem erheblichen konstruktiven und finanziellen Aufwand oder einer grundlegenden Änderung einzelner Konzeptbauteile hätten vermieden werden können. Somit wurden zunächst Teillösungen angestrebt, die jeweils erprobt und gegebenenfalls aufgrund neuer Erfahrungen erneut geändert wurden. Die Auswirkungen auf die Beurteilung der Standfestigkeit sind offensichtlich. Bei einem generellen Einbau eines neuen Bauteils in alle Fahrzeuge des jeweiligen Herstellers wurden teilweise auch Bauteile ausgetauscht, die noch keine Schäden aufwiesen und ihre Funktion auch weiterhin erfüllt hätten. Dagegen konnten aus organisatorischen Gründen bei der Montage der Fahrzeuge fehlgeleitete Bauteile, die zum Beispiel nicht die erforderliche Resistenz gegenüber Methanol-Kraftstoff aufwiesen, nicht einfach beim Hersteller umgetauscht werden, womit über eine gewisse Betriebszeit im Versuchszeitraum Bauteile verwendet werden mußten, deren Ausfall sozusagen vorgegeben war.

Wenn im Rahmen der Begleituntersuchung dennoch eine Betrachtung der Standfestigkeit durchgeführt wird, so dient sie in erster Linie als Grundlage einer eher qualitativen Einschätzung. Ungeachtet der beschriebenen Einflüsse wurden jene Bauteile anhand ihrer Einsatzdauer auf Standfestigkeit untersucht, die häufiger von Schäden betroffen waren. Aus der eher qualitativen Ergebnisdarstellung inform einer Summenhäufigkeit über eingeteilte Klassen der Laufstrecke, in welcher das Teil nicht ausgefallen ist, wird erkennbar, daß zwar der größte Anteil der Bauteile bereits nach relativ kurzen Laufstrecken ausgetauscht wurde, aber ein Anteil auch recht hohe Laufstrecken erreichte.

6.4.2 UNTERSUCHUNG ZUR STANDFESTIGKEIT EINZELNER BAUTEILE

Im einzelnen wurden folgende Bauteile untersucht, deren Nachweis der Standfestigkeit bei gleicher Anwendung teilweise - zum Beispiel im Otto-Motor - bereits über lange Zeit vorlag.

Zündkerzen

Beide von den Herstellern verwendete Konzepte der Methanol-Motoren sind mit einer Zündkerze ausgestattet. Dieses Bauteil wies eine unterschiedliche Standfestigkeit auf. Bei den Fahrzeugen der Firma Daimler Benz traten im Laufe der Betriebszeit bei diesem Bauteil keine nennenswerten Ausfälle auf, da zum einen Serienzündkerzen verwendet wurden und

zum anderen die mechanische und elektrische Belastung gleich der eines Einsatzes in einem gewöhnlichen Otto-Motor ist.

Anders dagegen war die Belastung der Zündkerze im Methanol-Motor der Firma MAN zu sehen. Hier wurden zur Erzielung eines möglichst optimalen Verbrennungsverlaufes spezielle Zündkerzen entwickelt und in einer Kleinserie hergestellt. Die starre Auslegung der gesamten Zündanlage auf einen Betriebspunkt im Teillastbereich und die relativ hohe mechanische Belastung durch ein dieselmotorisches Verdichtungsverhältnis (1 : 18) waren Ursachen für Ausfälle und Anlaß für Änderungen.

Wie aus Bild 6.12 hervorgeht, haben bei den Bussen der Firma MAN bis zu ca. 85% der Zündkerzen Laufstrecken 10 bis 15.000 km erreicht. Die restlichen 15 % der Zündkerzen absolvierten mit einer zwischenzeitlichen Nachregulierung des Elektrodenabstandes Laufleistungen bis zu 30.000 km. Aus den bereits erwähnten Randbedingungen muß die Standfestigkeit der Zündkerzen bei diesem Konzept als noch nicht ausreichend angesehen werden. In diesen Untersuchungsergebnissen konnten allerdings die angestrebten Maßnahmen zur Verbesserung noch nicht berücksichtigt werden. Als sichere Maßnahme zur Verbesserung der Standfestigkeit der Zündkerze wird der Einbau einer Kennfeldzündung angesehen.

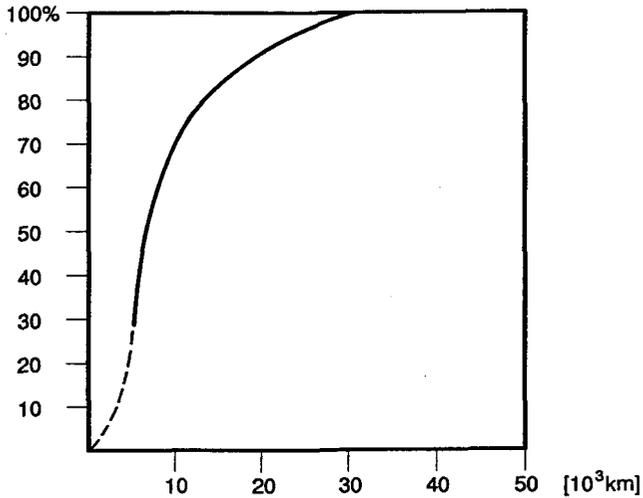


Bild 6.12: Summenhäufigkeit der erreichten Standfestigkeit; Zündkerzen

Füllstands/Sicherheitssonde

Beim Motor-Konzept der Methanol-Busse der Firma Daimler Benz wurden die Füllstände im Verdampfer durch Schwimmerschalter bzw. Füllstandssonden geregelt. Ein Überlauf wurde durch eine zusätzliche Sicherheitssonde verhindert. Da diese Sonden nicht als Serienteile in hoher Stückzahl angeboten wurden, mußte auch hier eine Kleinserie mit allen Einflüssen auf den Qualitätsstandard aufgelegt werden. Wie aus den Bildern 6.13 und 6.14 zu entnehmen ist, erreichten 80 % der Füllstandssonden Laufstrecken von 15 - 20.000 km bis sie ausge-

tauscht werden mußten. Der gleiche Anteil an Sicherheitssonden erreichte Laufstrecken von 45-50.000 km. Auch bei diesem Bauteil wurden im Einzelfall Laufstrecken bis zu 90.000 km erreicht. Aus einer Einzelanalyse wird deutlich, daß die jeweils höhere Standfestigkeit bzw. die größeren Laufstrecken zum Versuchsende erzielt wurden, so daß durch Änderungen an diesem Bauteil eine Verbesserung der Haltbarkeit zumindest partiell erreicht werden konnte.

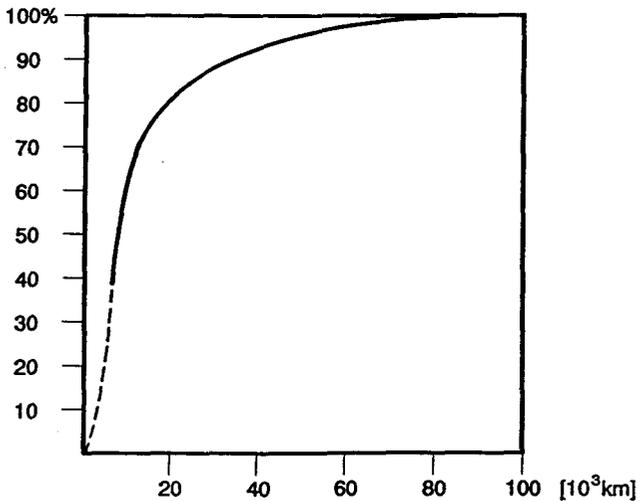


Bild 6.13: Summenhäufigkeit der erreichten Standfestigkeit; Füllstandssonde

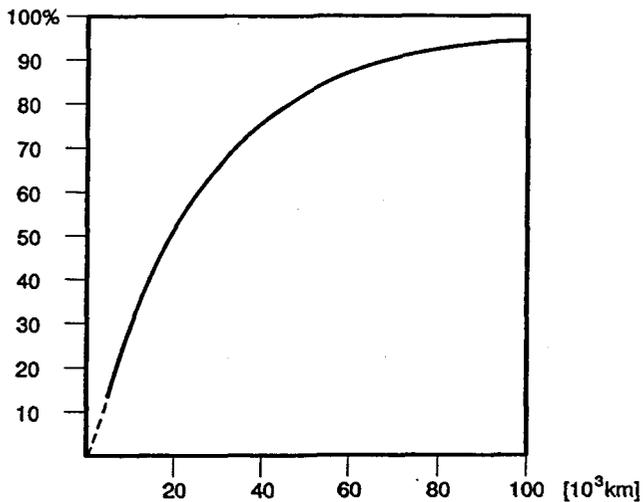


Bild 6.14: Summenhäufigkeit der erreichten Standfestigkeit; Sicherheitssonde

Elektrische Kraftstoffpumpe

Gegenüber der beim Diesel-Motor üblicherweise verwendeten mechanischen Kraftstoffförderpumpe unterlag die bei den Methanol-Motor-Konzepten verwendete elektrische Kraftstoffpumpe einer hohen Belastung. Insbesondere bei den Fahrzeugen der Firma MAN traten vermehrt Schäden an diesem Bauteil auf. Eine Erklärung hierfür lag darin, daß nach Angaben von MAN ohne Kenntnis Pumpen eingebaut wurden, die nicht ausreichend resistent gegenüber Methanol waren.

Die Verwendung methanol-fester Kraftstoffpumpen und eine konstruktive Veränderung der Kraftstoffanlage führte zu einer deutlichen Verbesserung der Zuverlässigkeit und Standfestigkeit der Kraftstoffförderpumpe beim Konzept der Firma MAN. Bild 6.15 zeigt die Summenhäufigkeit der Schäden an diesem Bauteil für die Busse der Firma MAN.

Die Ausfälle von elektrischen Kraftstoffpumpen bei den Fahrzeugen der Firma Daimler Benz waren gering. Eine Erklärung hierfür könnte in den unterschiedlich arbeitenden Kraftstoffsystemen gesehen werden.

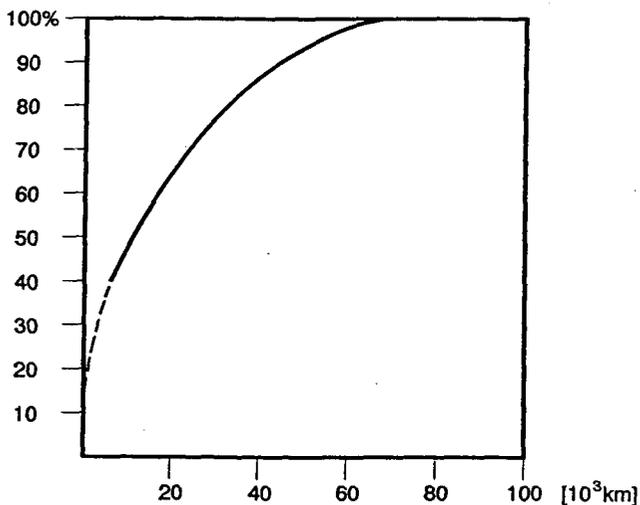


Bild 6.15: Summenhäufigkeit der Standfestigkeit Motor-Elektrokraftstoffpumpe

Katalysatoren

Die Katalysatoren bei den Fahrzeugen der Firma Daimler Benz erforderten im ersten Betriebsjahr bzw. bis zu einer Laufleistung von ca. 20 000 km Reparaturen bzw. mußten sie gewechselt werden. In den weiteren Betriebsjahren traten dann allerdings keine nennenswerten Schäden mehr auf.

Nach anfänglich mechanischen Problemen des Katalysatorgehäuses bzw. der verwendeten Monolite, verursacht durch hohe Schwingungsbelastung und eine starre Verbindung zum Motor, traten bei den Fahrzeugen der Firma MAN mehrfach Schäden am Katalysator in Verbindung mit defekten Einspritzdüsen und Zündaussetzern auf. Die mechanische Belastung konnte unter Verwendung einer schwingungsfähigen Verbindung zwischen Motor und Katalysator und den Einsatz eines einflutigen Metallwickelkatalysators erheblich vermindert werden, so daß es aus diesen Gründen keine Ausfälle mehr gab. Das Bild 6.16 zeigt die Summenhäufigkeit der von den Katalysatoren in den Bussen der Firma MAN erreichten Laufleistungen. 80 % der Katalysatoren erreichten eine Laufleistung von 25 - 30.000 km. Der verbleibende Anteil erreichte Laufleistungen bis zu 105.000 km. Um die Sekundärbeschädigungen aufgrund unverbrannter Kraftstoffmengen im Katalysator zu vermeiden, müßte bei den Metanol-Bussen der Firma MAN das Zündsystem einschließlich der Zündkerze zu einer höheren Betriebssicherheit entwickelt werden. Entsprechende Maßnahmen wurden bereits eingeleitet, konnten aber im Versuchszeitraum nicht mehr realisiert werden. Der Umbau in einem Prototyp zeigte bereits spürbare Verbesserungen.

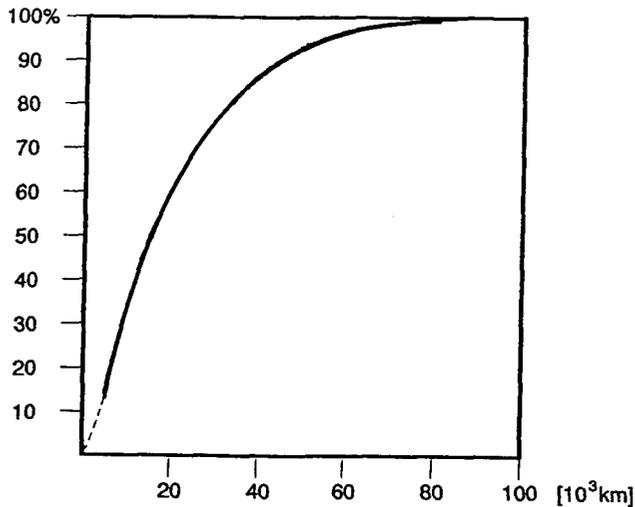


Bild 6.16: Summenhäufigkeit der Standfestigkeit Katalysatoren

6.4.3 ZUSAMMENFASSUNG ZUR STANDFESTIGKEIT

Trotz der beschriebenen Problematik bei der Bestimmung der Standfestigkeit einzelner Bauteile im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens kann aus der eher qualitativen Betrachtung als Erkenntnis abgeleitet werden, daß einzelne Bauteile, und hier besonders jene, die noch keine Serienreife erreicht hatten, im Praxiseinsatz nicht die gewünschte Standfestigkeit nachgewiesen haben. Allerdings zeigen einzelne Ergebnisse Größenordnungen einer Standfestigkeit auf, die mit den bisher gewonnenen Erkenntnissen in einem vergleichbaren Einsatz - zum Beispiel Pkw Otto-Motor - in Übereinstimmung sind. Eine konsequente Systemoptimierung ließe hier eine deutlich zunehmende Standfestigkeit einzelner Bauteile erwarten.

6.5 BESTIMMUNG DES WERKSTATTAUFWANDES

6.5.1 VORGEHENSWEISE

Zielsetzung der versuchsbegleitenden Erhebung von Werkstattdaten war eine Aussage zum Werkstattaufwand, der bei einer Verwendung von Methanol-Bussen vom Betreiber einzuplanen wäre. Als Vergleichsgrundlage ist der derzeitige Werkstattaufwand für den Diesel-Bus zu sehen. Da der Versuchsbetrieb der Methanol-Busse keine Referenzflotte dieselgetriebener Busse einschloß, mußte auf Vergleichsdaten baugleicher Eindeckbusse zurückgegriffen werden, die bereits eine mindestens doppelt so hohe Laufleistung absolviert hatten, als die Methanol-Busse.

Es wurden zwei Betrachtungsmodelle untersucht:

- der im Versuchsbetrieb aufgewendete Werkstattaufwand
- der turnusmäßige Wartungsaufwand.

Die Gesamtheit aller erhobenen, auf den Motor und die Kraftstoffanlage bezogenen Einzelmaßnahmen der Werkstatt wurde zunächst bereinigt. Maßnahmen der Werkstatt, wie reine Probefahrten oder Meßfahrten, aber auch die Werkstattaufenthalte aufgrund konzeptioneller Änderungen, die alle Busse des jeweiligen Herstellers betrafen, wurden selektiert und nicht ausgewertet. Darüber hinaus wurden mehrere Werkstattmaßnahmen an einem Bus, die am gleichen Tag durchgeführt wurden, zu 'einem Werkstatttag' zusammengefaßt. Eine weitere Differenzierung, daß zum Beispiel kleinere Werkstattmaßnahmen nur einen

halben Tag, aber auch, daß Maßnahmen mehr als einen Tag erforderten, wurde nicht vorgenommen, da aus statistischer Sicht von einem Ausgleich ausgegangen werden konnte und dieses Betrachtungsmodell in gleicher Weise auf die zur Verfügung stehenden Vergleichsdaten von den Diesel-Bussen angewandt wurde. Eine entscheidende Voraussetzung für die Anwendung des gleichen Betrachtungsmodells war eine dem Diesel-Bus vergleichbare Ersatzteilversorgung der Methanol-Busse.

Aus einer solchen Betrachtung heraus ergibt sich, daß auf der Grundlage der erhobenen Werkstattdaten ein Diesel-Bus - auf die Unterschiede innerhalb der Fabrikate wurde hier verzichtet im Durchschnitt 1,1 Tage/Monat aufgrund von erforderlichen Reparaturen an Motor und an dem Kraftstoffsystem nicht einsatzbereit ist und in der Werkstatt steht. Innerhalb des Versuchszeitraumes stand ein Methanol-Bus aus gleichen Reparaturgründen im Durchschnitt 1,43 Tage/Monat in der Werkstatt. Dieser Wert ergibt sich aus den zwar bereinigten Werkstattdaten, beinhaltet jedoch weiterhin die nicht zu trennenden Einflüsse eines Versuchsbetriebes.

Ein weitgehend objektiveres Betrachtungsmodell für eine Bestimmung des Werkstattaufwandes ist die Summation der zyklisch auftretenden Wartungsarbeiten. In der Werkstattorganisation der BVG werden die zyklischen Wartungsarbeiten sowohl laufleistungsabhängig als auch zeitabhängig durchgeführt. Weitere Wartungsarbeiten werden im Rahmen der gesetzlichen Fahrzeuguntersuchung nach § 29 StVZO (HU, ZU) durchgeführt. Das Betrachtungsmodell für diesen Vergleich bleibt beschränkt auf den Wartungsaufwand für Motor- und Kraftstoffanlage, da die Arbeiten an den übrigen Fahrzeugkomponenten

durch Modellübereinstimmung von Methanol-Bus und Diesel-Bus gleich sind. Der Vergleichszeitraum umschließt drei Jahre bei einer jährlichen Laufleistung von 60.000 km, somit insgesamt 180.000 km. Mit der Betrachtung über den Zeitraum von drei Jahren sollen unterschiedliche Zyklusabstände zwischen Diesel-Bus und Methanol-Bus statistisch besser ausgeglichen werden. In diesem Betrachtungsmodell wird lediglich der vom Werkstattpersonal für die einzelnen Arbeiten aufzuwendende Zeitbedarf (ohne Nebenzeiten, wie zum Beispiel Ersatzteilbeschaffung u.ä.) verglichen.

Der Wartungsaufwand für die Diesel-Busse ist im Organisationsablauf der BVG seit Jahren festgeschrieben und optimiert. Die laufleistungsabhängigen Wartungsarbeiten sind auf Zyklen von 30.000 km, unabhängig vom Busfabrikat, ausgelegt. Auf der Grundlage der in der 3-jährigen Erprobung bei der BVG gemachten Erfahrungen konnte zumindest für die Busse der Firma MAN ein auf das Motor-Konzept zugeschnittener Wartungsplan erarbeitet werden. Vorrangig wurden bei seiner Festlegung Aspekte des Herstellers berücksichtigt. Somit konnte auch für die Methanol-Busse ein mit den Diesel-Bussen vergleichbarer Turnus eingeführt werden.

Aus dem Modellvergleich zwischen einem Diesel-Bus und einem Methanol-Bus des Herstellers MAN ergibt sich für eine Laufleistung von 180.000 km -entsprechend ca. 3 Jahre Betriebseinsatz- ein zeitlicher Mehraufwand an Wartungsarbeiten für einen Methanol-Bus von ca. 6,2 %. Dieser Mehraufwand liegt in erster Linie in den relativ kurzen Fristen für einen Zündkerzenwechsel begründet. Durch eine Verbesserung der Standfestigkeit der Zündkerzen würde sich der Mehraufwand vermindern lassen.

6.5.2 ZUSAMMENFASSUNG UND KONSEQUENZEN

Aus den im Versuchsbetrieb erhobenen Werkstattdaten der Methanol-Busse wurde in Zusammenarbeit mit einem Hersteller (MAN) und dem Betreiber (BVG) in zwei unterschiedlichen Modellbetrachtungen eine Abschätzung des Werkstattaufwandes für die Methanol-Busse versucht. Berücksichtigt wurden die Wartungs- und Werkstattarbeiten nur für den Motor und die Kraftstoffanlage.

Aus dem objektiveren Modellansatz, dem Vergleich des Wartungsaufwandes eines MAN-Methanol-Busses gegenüber dem eines MAN-Diesel-Busses, ergibt sich aus derzeitiger Sicht ein erforderlicher, zeitlicher Mehraufwand von 6,2 %. Dieser Mehraufwand wird stark geprägt von den Wechselzyklen der Zündkerzen.

Die Abschätzung des Werkstattaufwandes zur Reparatur motor- und kraftstoffseitiger Schäden bei den Methanol-Bussen - unabhängig vom Hersteller - führt auf der Grundlage der 3-jährigen Erfahrung zu einer Ausfallzeit von 1,43 Tage/Monat. Ein Diesel-Bus ist aus gleichen Gründen 1,1 Tage/Monat nicht verfügbar. Eine weitere Optimierung einzelner Baugruppen des Motor-Konzeptes der Methanol-Busse dürfte zwangsläufig zu einer stärkeren Angleichung des Werkstattaufwandes an den eines Diesel-Busses führen.

6.6 VERFÜGBARKEIT DER FAHRZEUGE

Ein für den Betreiber entscheidendes Kriterium zum Betriebseinsatz einer neuen Antriebsalternative für den Stadtbus ist die Verfügbarkeit der Busse. Hierunter wird allgemein die mögliche Einsatzzeit abzüglich des Zeitaufwandes für erforderliche Wartung und Reparaturen verstanden. Da das vorliegende Vorhaben in den drei Jahren seiner Laufzeit weitgehend noch von einem Versuchsbetrieb geprägt wurde, war bei einer Betrachtung der Verfügbarkeit von Einschränkungen auszugehen. Bedingt durch eine Vielzahl von Störungen gerade im ersten Betriebsjahr, die sich auch noch in das zweite Jahr hinzogen, ist es sachlich als begründet anzusehen, für die Ermittlung der Verfügbarkeit das letzte Betriebsjahr zu wählen, da in diesem Jahr von einer angenäherten Stabilisierung ausgegangen werden konnte. Stillstandszeiten, die aus organisatorischen Gründen entstanden waren und in denen keine konzeptbedingten Reparaturen durchgeführt wurden, kamen nicht in Anrechnung. In einer internen Einsatzstatistik wurden lediglich die Ausfalltage aufgenommen, die für die Reparatur konzeptbedingter Schäden erforderlich waren.

Aus dem Verhältnis der möglichen Einsatztage im letzten Betriebsjahr des Versuches (1988 mit 366 Tagen) zu den konzeptbedingt erforderlichen Ausfalltagen ergibt sich für die Gesamtflotte der 14 Methanol-Busse eine Verfügbarkeit von 92,5 %. Innerhalb der jeweiligen Fahrzeugflotten der Hersteller ergeben sich unterschiedliche Verfügbarkeiten (Daimler Benz .. 90 %, MAN .. 95 %). Eine zusätzliche Bestimmung der Verfügbarkeit aus den bereinigten Werkstattdaten führte zu einem Wert in gleicher Größenordnung. Die exemplarische Bestim-

mung der Verfügbarkeit (unter gleichen Voraussetzungen) für vier Vergleichsbusse mit Diesel-Motor ergab eine Verfügbarkeit von 95 bis 96 %.

6.7 UMWELTEINWIRKUNGEN DURCH DIE METHANOL-BUSSE

Eine offensichtliche Zunahme von Belastungen der Umwelt, die direkt oder indirekt auf die menschliche Gesundheit wirken, räumen einer Umweltverträglichkeit neuer Technologien eine hohe Priorität ein. Hieraus resultiert, daß eine Bewertung neuer Systeme in jedem Fall die Konsequenzen für bzw. die Auswirkungen auf die Umwelt enthalten muß. Dem Stadtbus im Öffentlichen Personennahverkehr kommt in diesem Zusammenhang eine besondere Bedeutung zu, da er einerseits in Kernbereichen der Innenstadt - in denen sich während der Geschäftszeiten viele Menschen aufhalten - und andererseits bei kritischen Wetterlagen (Smog) seine Transportaufgaben erfüllen muß. Somit kommt den Geräuschemissionen und der Abgasemission der Stadtbusse eine entscheidende Rolle bei der Bewertung der Systeme zu.

6.7.1 ABGASEMISSIONEN

6.7.1.1 ALLGEMEINES

Zu annähernd 100 % sind weltweit Stadtbusse, die mit einem Verbrennungsmotor angetrieben werden, mit einem Diesel-Motor ausgerüstet. Die Gründe liegen in der wirtschaftlichen Betriebsweise dieser Motoren, ihrer extremen Langlebigkeit, aber auch darin, daß die Schadstoffanteile im Abgas des Dieselmotors im Vergleich zum Otto-Motor erheblich

niedriger sind. Die Einführung der katalytischen Abgasreinigung bei Otto-Motoren hat diesen Vorteil des Diesel-Motors weitgehend aufgezehrt, so daß der Diesel-Motor in der letzten Zeit immer häufiger in die Kritik geraten ist. Insbesondere die bei bestimmten Belastungszuständen des Diesel-Motors auftretenden Rußpartikel gelten als Träger bzw. Transportmedium kanzerogener Stoffe. Die Entwicklung von Abhilfemaßnahmen zur Rußentwicklung wird derzeit stark betrieben, wobei der Ruß- bzw. Partikelfilter bereits einen erprobungsreifen Entwicklungsstandard erreicht hat.

In dieses Umfeld reiht sich der Methanol-Motor mit katalytischer Abgasreinigung ein. Jedoch bereitet schon eine Einordnung der Methanol-Motoren in die gesetzlichen Vorgaben insofern Schwierigkeiten, daß sie zwar aus einem Diesel-Motor entwickelt und einzelne Konstruktionsprinzipien beibehalten wurden (Verdichtung 1:18 (MAN), Einspritzpumpe (MAN) usw.), aber durch die Verwendung einer Fremdzündungsquelle und durch die spezifischen Kraftstoff-eigenschaften eher einem Otto-Motor entsprechen. Während bei Pkw (bis 3,5 t) im europäischen Raum die Abgasemissionen auf eine bestimmte Fahrstrecke (Zyklus) bezogen werden (z.B. ECE 15/04), sind die Emissionen bei größeren Fahrzeugen wegen der größeren Spannweiten der zulässigen Gesamtgewichte (3,5 t bis 40 t) auf die spezifische Motorleistung bezogen (ECE R 49).

Die ECE 15/04 legt einen dynamischen Vergleichszyklus mit Beschleunigungs- und Schubphasen zugrunde, über den ein verdünnter Abgasstrom in einem Beutel gesammelt und analysiert wird. Die ECE R 49 beinhaltet dagegen einen statischen Test, bei dem 13 Punkte im Motorkennfeld auf einem Moto-

renprüfstand eingestellt und die Emissionen gemessen werden. Aus einer vorgegebenen Bewertung der einzelnen stationären Punkte bezüglich Drehzahl und Belastung, werden die leistungsbezogenen Abgaswerte bestimmt.

Gegenüber dem in Europa angewandten statischen Test setzen sich im amerikanischen Raum auch für schwere Nutzfahrzeuge, eben auch den Stadtbus, überwiegend dynamische Testverfahren durch (z.B. Transient-Test). Dynamische Messungen mit schweren Nutzfahrzeugen erfordern Rollenprüfstände mit Schwungmassenäquivalenten, die sehr kostenintensiv sind. Einer Studie zufolge, die von der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich < 5 > durchgeführt wurde, sind die Meßergebnisse eines dynamischen Transient-Tests (USA) in vertretbarer Koordination zu den Messergebnissen der ECE R 49. Hieraus leiten die Bearbeiter die Empfehlung ab, auch weiterhin im europäischen Raum die ECE R 49 anzuwenden.

6.7.1.2 DISKUSSIONEN VON MÖGLICHKEITEN DER EMISSIONSMESSUNGEN

Sehr eindeutig mußten bei den Diskussionen um Möglichkeiten zur Durchführung von Emissionsmessungen die Abhängigkeiten einer wünschenswerten Messung, gleich in welcher Form, von den insbesondere in Berlin, aber auch im Bundesgebiet vorhandenen Möglichkeiten aufgezeigt werden. Prüfstände für vollständig dynamische Messungen (also auch die Nachbildung des Schiebebetriebes) stehen zwar den Herstellern zur Verfügung, sind allerdings auf lange Zeit mit eigenen Kapazitäten belegt. Aufwendige Prüfstände für militärische Erprobungen (Bundeswehrhochschule) erforderten einen erheblichen Aufwand an Anpassungen.

Als ein Kompromiß konnte somit ein Leistungsprüfstand gesehen werden, der der BVG zur Verfügung steht. Durch eine elektrische Schwungmassensimulation kann über einstellbare Potentiometer eine Beschleunigungskennlinie (Lastkennlinie) vorgegeben werden. Der Schiebetrieb kann dagegen nicht dargestellt werden. Diese Prüfstandsordnung ist zwar nicht in der Lage, einen vollständigen dynamischen Zyklus zu realisieren, ist aber ebenso verwendbar für statische Messungen nach ECE R 49 mit einem Gesamtfahrzeug.

Ein weiterer Problemkreis der **dynamischen** Messungen ist in der Auswahl eines geeigneten Zyklus zu sehen. Eine gesetzliche Festlegung für den Stadtbus gibt es im europäischen Raum für diese Art der Messung nicht. Die Herstellerfirmen wenden teilweise selbstentwickelte oder amerikanische Zyklen an. Darüber hinaus wurden anwenderorientierte Fahrzyklen entwickelt, die bei verschiedenen Vergleichen - hauptsächlich Energieverbräuchen - herangezogen werden (Bilder 6.17 bis 6.20). In die Diskussion um eine Problemlösung möglicher Testzyklen wurde auch der für die gesetzliche Emissionsmessung an Pkw vorgegebene Zyklus nach ECE 15/04 einbezogen, da ein Stadtbus überwiegend als Teilnehmer am Stadtverkehr etwa gleichen Belastungen ausgesetzt ist. Der Arbeit von NEPPEL < 10 > liegen dynamische Messungen entsprechend dem Zyklusverlauf der ECE 15/04 zugrunde, bei denen allerdings bedingt durch die eingegrenzten Möglichkeiten eines Leistungsprüfstandes die Schubphasen nicht nachgebildet werden konnten.

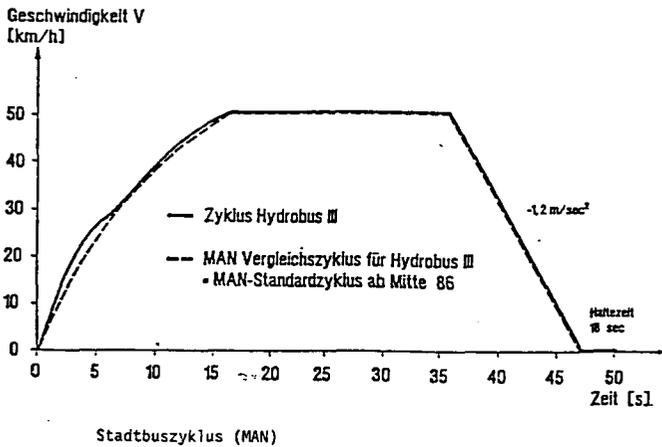
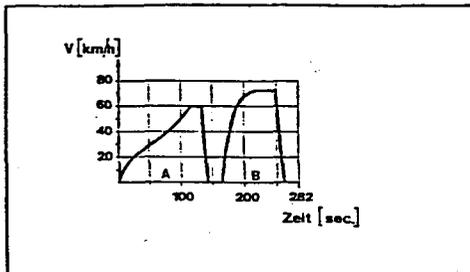


Bild 6.17: Stadtbuszyklus der Firma MAN



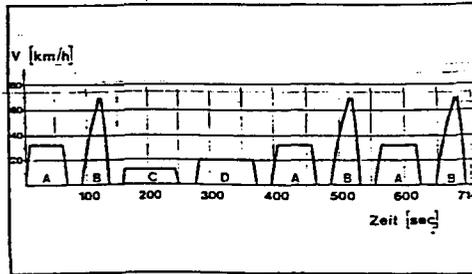
500 m und 300 m Zyklen aus Testfahrt
(Magnet-Motor mit MDS)

Bild 6.18: Testzyklus für Bus mit Magnet-Motor



Überlandzyklus (Kässbohrer)

Bild 6.19: Überlandzyklus (Firma Kässbohrer)



Stadtzyklus (Kässbohrer)

Bild 6.20: Stadtzyklus (Firma Kässbohrer)

Als eine weitere Möglichkeit der dynamischen Messung wurden auch vergleichende Straßenversuche als Alternativen diskutiert.

Die im Forschungsvorhaben eingebundenen Herstellerfirmen wiesen auf die Problematik der allgemeinen Festlegung eines Zyklusverlaufes hin und boten Messungen auf der Grundlage der gesetzlichen Vorgaben (ECE R 49) an.

Zur Durchführung von Emissionsmessungen mußten neben der Festlegung der anzuwendenden Meßmethode auch eine vergleichbare Analyse der emittierten Abgase erfolgen. Abhängig von den gegebenen Möglichkeiten war hier zwischen einer mobilen Einrichtung und einer stationären Anlage zu unterscheiden. Allgemein war die Bestimmung der gesetzlich limitierten Abgasbestandteile

CO	Kohlenmonoxid
HC	Kohlenwasserstoffe (unverbrannt)
NOx	Stickoxide

als wenig problematisch anzusehen. Die Messung von

Rußpartikeln beim Diesel-Motor im dynamischen Zyklus und die Bestimmung von Aldehydkonzentrationen beim Methanol-Motor sind dagegen nur mit hohem Aufwand oder mit Einschränkungen möglich.

Erst in letzter Zeit wurde von der TU Berlin ein neueres Verfahren für die Verwendung bei Prüfstandsmessungen von großen Lkw vorgestellt, das ähnlich der Messung für Pkw mit einem Verdünnungstunnel arbeitet. Wegen des großen Luftdurchsatzes bei großvolumigen Motoren ist eine Verdünnung des gesamten Abgasstromes, wie sie bei der Messung von Pkw angewandt wird, nicht möglich. Bei dem neu vorgestellten Verfahren wird durch eine in die Abgasleitung integrierte Sonde ein Teilstrom des Abgases entnommen und in einem 'Minitunnel' verdünnt und der Analyse zugeführt.

Aus positiven Meßerfahrungen im Forschungsvorhaben 'Tempo 100' wurde für eine mobile Straßenmessung der Einsatz einer in Großbritannien entwickelten Mini-CVS-Anlage erwogen.

Aus den vorgenannten in Betracht gezogenen Möglichkeiten zur Emissionsmessung wurde eine Entscheidungsmatrix entwickelt (Tabelle 6.21).

Tabelle 6.21: Möglichkeiten der Abgasmessung

STATIONÄRE ABGASMESSUNG		MOBILE ABGASMESSUNG MIT EINER RHEU - CVS - ANLAGE				
	Statische Prüfstandmessungen	Dynamische Prüfstandmessungen	Statische Fahrzustände kontinuierliche Messung	Statische Fahrzustände Bestelmmessung	Dynamische Fahrzustände kontinuierliche Messung	Dynamische Fahrzustände Bestelmmessung
Prüfstand	Bei der BVG vorhanden Fabrikat: Fa. Schenck Fa. Horiba	In Berlin derzeit nicht vorhanden, Anbau der vorhandenen Prüfst. wie Überprüf.	Streckennelmsatz Testgelände	Streckennelmsatz Testgelände	Streckennelmsatz Testgelände	Streckennelmsatz Testgelände
Fahrzyklus	entfällt	Auswahl des Zyklus ECE 15,04 Selbst entwickelter Zyklus	entfällt	entfällt	Auswahl des Zyklus ECE 15,04 Selbst entwickelter Zyklus	Auswahl des Zyklus ECE 15,04 Selbst entwickelter Zyklus
Fahrtracis in Linienvorkehr	entfällt	Übernahme eines gemessenen Fahrprofils	entfällt	entfällt	Übernahme eines gemessenen Fahrprofils	Übernahme eines gemessenen Fahrprofils
Betriebszustände	Gemäß ECE 49	entfällt	Gemäß ECE 49	Gemäß ECE 49	entfällt	entfällt
Abgasentnahme	Transportable Messstation der TU Berlin	Transportable Messstation der TU Berlin	Mini CVS	Mini CVS	Mini CVS	Mini CVS
Abgasanalyse	ditto	ditto	Mobile Analyse der Fa. Horiba	Mobile Analyse durch TU Berlin/DAR	Mobile Analyse der Fa. Horiba	Mobile Analyse durch TU Berlin/DAR
Berechnungsaufwand	sehr gering	mittel - hoch	mittel - hoch	mittel	mittel - hoch	mittel
Vergleichbarkeit der Ergebnisse	gut	gut	begrenzt	begrenzt	begrenzt	begrenzt
Kostenbeteiligung	gering	hoch - sehr hoch	hoch	mittel	hoch	mittel

6.7.1.3 ERGEBNISSE/KONSEQUENZEN

Die parallel zum dargestellten Forschungsvorhaben erneut entfachte Diskussion über eine speziell für Forschungsaufgaben im Personennahverkehr anzuwendende Vergleichsmeßmethode für Verbräuche und Abgasemissionen konnte bisher nicht zu einem sinnvollen Ende geführt werden. Besonders die prinzipielle Einordnung der erforderlichen Meßmethode (im Sprachgebrauch als 'Meßplatte' bezeichnet) in die gesetzlichen Vorgaben im europäischen aber auch amerikanischen Raum erscheint noch unüberwindbar. Darüber hinaus bestehen derzeit noch keine konkreten Vorstellungen über eine verbindliche Anwendung der neu zu definierenden Meßmethode auch neben den gesetzlichen Vorgaben.

Neben dieser prinzipiellen Fragestellung waren auch die bestehenden Randbedingungen der technischen Voraussetzungen für die Emissionsmessungen in Berlin zu sehen. Die erforderlichen Komponenten eines Meßaufbaues für die Abgasmessungen existieren als Einzelkomponenten in unterschiedlichen Institutionen, aber nicht zusammen an einem Prüfstand. Wegen der Vielzahl von Einflüssen bei einer mobilen Messung und der daraus resultierenden großen Streubreite der Messergebnisse wurde diese Möglichkeit nicht weiter in die Überlegungen eingebunden. Nicht zuletzt auch aus finanziellen Gründen mußte im Rahmen des Forschungsvorhabens auf eigene Messungen verzichtet und auf Meßergeb-

nisse der Hersteller bzw. anderer, vorwiegend amerikanischer Institutionen zurückgegriffen werden. Aus diesen zur Verfügung stehenden Unterlagen war es allerdings nicht möglich, unmittelbar vergleichbare Meßergebnisse von Methanol-Motor und

Diesel-Motor des gleichen Herstellers gegenüberzustellen, so daß die Recherche lediglich einen Anhalt bzw. einen Trend für die Einordnung des Methanol-Motors in die derzeit gültige Gesetzgebung aufzeigen kann. Von entscheidender Bedeutung ist allerdings eine qualitative Darstellung der Vor- und Nachteile des Methanol-Motors gegenüber dem heute eingesetzten Diesel-Motor.

Die wohl umfangreichsten und aufwendigsten vergleichenden Emissionsmessungen an Methanol-Motoren und Diesel-Motoren wurden von ULLMAN und HARE <1, 2> im Auftrage der EPA (Environmental Protection Agency) durchgeführt.

In einer vergleichenden Untersuchung aus dem Jahre 1982 <1> wurden die Emissionen von drei alternativen Methanol-Motoren und einem Diesel-Motor auf Motorprüfständen differenziert untersucht. Der Diesel-Motor war ein VOLVO TD-100C, zwei der Methanol-Motoren waren VOLVO TD-100A, heavy duty dual injektion, mit und ohne Katalysator und der dritte Methanol-Motor war ein MAN-Motor D2566 FMUH mit Katalysator, wie er auch in den MAN-Bussen im darzustellenden Forschungsvorhaben verwendet wurde. Aus der Tabelle 6.22 gehen die Ergebnisse hervor. Beschränkt man sich auf die Ergebnisse vom Diesel-Motor (VOLVO) und den MAN-Motor, so ergeben sich für den Methanol-Motor Verminderungen einzelner Abgaskomponenten von bis zu 90 %. Lediglich der Anteil an Aldehyden ist beim 13-mode-Test erheblich höher als beim Diesel-Motor.

Summary of Composite Emission Rates from the Diesel and Methanol-Fueled Engines

Composite Emission Rates	Engine Test Configuration							
	Conventional Diesel Valve TD-100C		Dual-Injection Methanol Valve TD-100A		Dual-Injection Methanol-Catalyst Valve TD-100A		Spark-Ignited Methanol-Catalyst N.A.S. 82566 PMUM	
	13-mode	Transient	13-mode	Transient	13-mode ^b	Transient ^c	13-mode	Transient
Federal Test Procedure (FTP)								
Hydrocarbon, HC ^a g/bw-hr. (g/bp-hr)	1.05 (0.78)	1.15 (0.85)	1.45 (1.08)	1.95 (1.45)	0.16 (0.12)	0.16 (0.12)	0.24 (0.18)	0.06 (0.04)
Carbon Monoxide, CO g/bw-hr. (g/bp-hr)	3.18 (2.37)	4.04 (3.01)	9.35 (7.12)	10.29 (7.67)	0.83 (0.62)	3.61 (2.69)	0.39 (0.29)	0.42 (0.31)
Oxides of Nitrogen, NO _x ^b g/bw-hr. (g/bp-hr)	11.88 ^d (8.86)	11.19 (8.34)	5.26 (3.92)	7.31 (5.45)	6.79 (5.06)	7.39 (5.51)	9.13 (6.81)	8.86 (6.61)
Brake Specific Fuel Consump. kg fuel/bw-hr. ^e (kg diesel/bw-hr) ^d	0.262 (0.262)	0.288 (0.288)	0.486 (0.289)	0.531 (0.297)	0.482 (0.287)	0.518 (0.295)	0.624 (0.287)	0.708 (0.326)
Test Cycle	7-mode	Transient	7-mode	Transient	7-mode	Transient	7-mode	Transient
Total Individual HC ug/bw-hr	120	130	67	180	32	66	0	1.1
Total Unburned Alcohols ug/bw-hr	Does not Apply	Does Not Apply	2200	4900	950	890	530	910
Total Aldehydes ug/bw-hr	16	14	88	250	140	260	61	<1.1
Total Phenols ug/bw-hr	Not Run	35	17	24	14	48	Not Run	0
I of Hydrocarbon Species g/bw-hr. (g/bp-hr)	1.07 (0.80)	1.16 (0.87)	2.37 (1.77)	5.35 (3.99)	1.14 (0.85)	1.26 (0.94)	0.59 (0.44)	0.51 (0.48)
Total Particulate g/bw-hr. (g/bp-hr)	0.69 (0.52)	0.70 (0.52)	0.30 (0.23)	0.39 (0.30)	0.51 (0.38)	0.37 (0.27)	0.024 (0.018)	0.057 (0.043)
Sulfate, SO ₄ ^f ug/bw-hr. (% of Particulate)	45 (6.5%)	38 (5.4%)	14 (4.6%)	16 (4.1%)	220 (43%)	98 (27%)	Not Run	Not Run
Soluble Organic Fraction (SOF) ug/bw-hr. (% of Particulate)	200 (28%)	220 (32%)	200 (64%)	280 (72%)	70 (14%)	60 (16%)	14 (60%)	41 (73%)
BaP ug/bw-hr	0.64	1.7	0.86	1.7	0.08	0.33	0.04	0.02

^aHC values based on HFID and computed as diesel-like species - see I of hydrocarbons for actual total hydrocarbons
^bNo NO_x correction factor applied to either 13-mode or transient results
^cComputed on basis of measured diesel and alcohol consumption
^dComputed on basis of equivalent diesel by lower heating values
^eNO_x value is reduced to 10.89 g/bw-hr (8.12 g/bp-hr) when the intake humidity correction for NO_x is applied

Tabelle 6.22:

In einer weiteren Untersuchung aus dem Jahre 1985 <2> wurden ganze Busse auf einem Rollenprüfstand mit Abgasanalythik (CVS-Anlage) gemessen. Ein Diesel-Bus und eine Bus-Variante mit Methanol-Motor waren vom Hersteller GMC (Typ RTS II04) die zweite Bus-Variante mit Methanol-Motor war von MAN (Typ SU 240) mit einem Methanol-Motor MAN D2566 FMUH. Ein Vergleich der Ergebnisse (Tabellen 6.23 und 6.24) zeigt zum einen die starke Abhängigkeit der einzelnen Emissionswerte von der vorgegebenen Meßmethode (steady-state, transient cycles) zum anderen die Verminderung einzelner Abgaskomponenten um bis zu 90 % beim Methanol-Motor in den realitätsnahen dynamischen Testzyklen (CBD, Bus).

Table 5 - Range of Emissions Noted from Chassis Testing of Three GMC RTS II 04 Buses Powered by DDAD 6V-92TA Engines Operated on No. 1 and No. 2 Diesel Fuel

Service, km (Oil Use, km/l)	90,000 - 230,000 (700 - 1,100)					
	Chassis Test Procedure	Steady-State Operation			Transient Cycles	
		Hot-Idle	20 kph	40 kph	CBD	Bus
Hydrocarbons, ^a FID HC g/km, (g/hr)	(18-40)	1.6-2.6	1.0-1.2	1.7-2.5	1.3-2.9	
Carbon Monoxide, CO g/km, (g/hr)	(20-30)	1.5-3.3	1.0-1.2	10-18	6-25	
Oxides of Nitrogen, NO _x ^a g/km, (g/hr)	(150-200)	10-14	7.3-9.3	14-19	13-20	
Diesel Fuel Economy ^b km/kg, (kg/hr)	(3.0-3.6)	3.2-3.6	4.1-4.6	1.8-1.9	1.9-2.2	
Total Aldehydes g/km, (g/hr)	(1.5-2.6)	0.10-0.20	0.05-0.10	ND	ND	
Total Particulate g/km, (g/hr)	(4.0-8.0)	0.50-1.1	0.40-0.50	1.7-3.9	1.3-3.9	

ND = No Data

^aBased on continuous measurement

^bFuel consumption figures were computed by carbon balance

Tabelle 6.23: Emissionswerte Diesel-Motor
(GMC)

Ebenfalls im Jahre 1985 stellt CHMELA <3> Meßergebnisse aus dem 13-MODE-Test zum Emissionsverhalten der Methanol-Motoren der Firma MAN vor. Aus der vergleichenden Darstellung zu den angestrebten Grenzwertforderungen des Staates Californien für 1984 (Bild 6.25) geht anschaulich hervor, daß die CO-Emissionen erheblich geringer sind, als gefordert wird, aber auch die übrigen limitierten Abgaskomponenten unterhalb der Grenzwerte liegen.

Table 3 - Summary of Emissions from the M.A.N. SU 240 Methanol Bus

Chassis Test Procedure	Steady-State Operation				Transient Cycles	
	Cold Idle	Hot Idle	20 kph	40 kph	CBD	Bus
Hydrocarbons, ^a FID HC ^d g/km, (g/hr), [g/kg fuel]	(225) [32]	(4.6) [0.65]	0.63 [0.93]	0.45 [1.1]	0.53 [0.54]	0.85 [1.00]
Carbon Monoxide, CO g/km, (g/hr), [g/kg fuel]	(56) [8.0]	(2.3) [0.3]	0.31 [0.4]	0.21 [0.5]	0.48 [0.5]	0.33 [0.4]
Oxides of Nitrogen, NO _x ^d g/km, (g/hr), [g/kg fuel]	(47) [6.6]	(67) [9.4]	3.3 [4.8]	2.4 [5.5]	8.8 [8.9]	8.1 [9.5]
Fuel Economy ^b km/kg, (kg/hr)	(7.0)	(7.2)	1.5	2.3	1.0	1.2
Diesel Fuel Equivalent ^c km/kg, (kg/hr)	(3.2)	(3.3)	3.2	5.1	2.2	2.6
Total Individual HC mg/km, (mg/hr), [mg/kg fuel]	(840) [120]	(41) [5.7]	43 [65]	4.0 [9.3]	79 [80]	28 [32]
Total Aldehydes g/km, (g/hr), [g/kg fuel]	(14) [2.0]	(2.1) [0.30]	0.18 [0.28]	0.039 [0.092]	0.10 [0.10]	0.084 [0.098]
Unburned Methanol g/km, (g/hr), [g/kg fuel]	(230) [33]	(8.5) [1.2]	1.6 [2.4]	0.49 [1.1]	0.35 [0.36]	1.1 [1.5]
Total Particulate g/km, (g/hr), [g/kg fuel]	(0.58) [0.08]	(0.81) [0.11]	0.04 [0.05]	0.02 [0.06]	0.06 [0.06]	0.04 [0.05]
Soluble Organic Fraction g/km, (g/hr), [g/kg fuel]	(0.58) [0.08]	(0.09) [0.01]	0.01 [0.01]	0.01 [0.02]	0.02 [0.02]	0.02 [0.02]

^aHC emissions have been increased to account for the 0.8 response factor of the FID to methanol, and are based on a molecular weight of 32

^bFuel consumption figures were computed by carbon balance, km/kg methanol may be converted to mi/gal methanol by multiplying by 1.86

^cDiesel fuel equivalent was computed using a heating value ratio of 2.17

^dBased on continuous measurement

Tabelle 6.24: Emissionswerte MAN Motor SU 240 (Methanol)

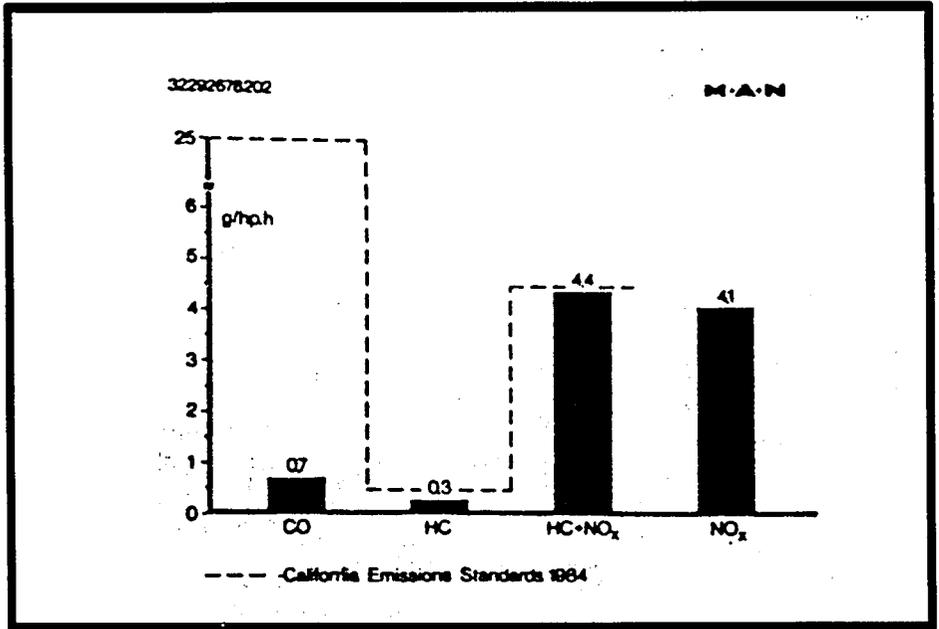


Bild 6.25: MAN-Methanol-Motor D2566 FMUH
Emissionswerte nach 13-Stufen-Test

Neuere Messungen hat im Zusammenhang mit der Einführung von Bussen mit Methanol-Motoren in der Schweiz MEIER <4> durchgeführt. Den Messungen liegt der gesetzlich vorgeschriebene 13-Stufen-Test zugrunde, dessen weitere Verwendung nach einer Studie der ETH (Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich) <5> für die Schweiz empfohlen wird. Die Messergebnisse in Bild 6.26 zeigen, daß die erzielten Meßwerte erheblich unter den vorgesehenen Abgasgrenzwerten für die Schweiz, gültig vom Jahre 1991 an, liegen. Allerdings ist der ge-

gemessene und im Ergebnis dargestellte Motor nicht identisch mit den Motoren, die im Forschungsvorhaben in Berlin eingesetzt waren. Der gemessene Motor wird durch eine Abgasturbine aufgeladen.

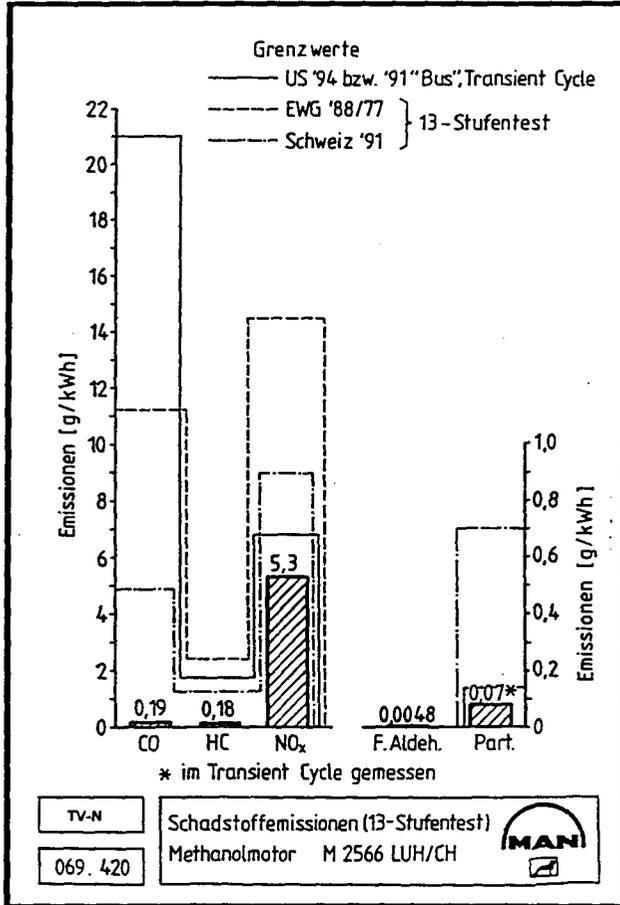


Bild 6.26: Emissionen des Methanol-Motors
MAN M2566 LUH/CH

BERGMANN und HOLLOH <6> stellen im Jahre 1983 erste Ergebnisse zum Emissionsverhalten der Methanol-Motoren der Firma Daimler Benz (Motor-Typ M407 hGO) vor. In einer abgasoptimierten Einstellung erreicht auch dieser Motor die von 1984 an in Californien geforderten Standards (Tabelle 6.27). Aufgrund der durch das Verbrennungsprinzip (Gasmotor) bereits geringen HC-Emissionen wurde zu diesem Zeitpunkt ein Katalysator noch für entbehrlich erachtet.

In einer Veröffentlichung aus dem Jahre 1987 stellt BERGMANN <7> das Emissionsverhalten des DB-Gasmotors im Vergleich zum Diesel-Motor der gleichen Baureihe vor (Bild 6.28). Von den gegenübergestellten gasförmigen Kraftstoffvarianten weist Methanol-Kraftstoff das auf unterschiedliche Motorbelastungen bezogene günstigere Emissionsverhalten auf. Während die NOx-Emissionen für den Methanol-Motor im Vollastbereich erheblich über den Werten des Diesel-Motors liegen, fallen sie bereits bei einer Last von 75 % erheblich unter die Werte des Diesel-Motors. Die HC-Emissionen steigen von einem gleichen Wert bei Vollast mit abnehmender Last stärker an als bei dem Diesel-Motor.

	actual vehicle adjustment	emission optimized adjustment	1984 and later Calif. emission standards
NOx g/hph	3,93	3,90	-
HC g/hph	1,35	0,39	0,5
HC+NOx g/hph	5,28	4,29	4,5
CO g/hph	5,46	5,36	25

Tabelle 6.27: Emissionswerte
DB Alkohol-Gas-Motor M407

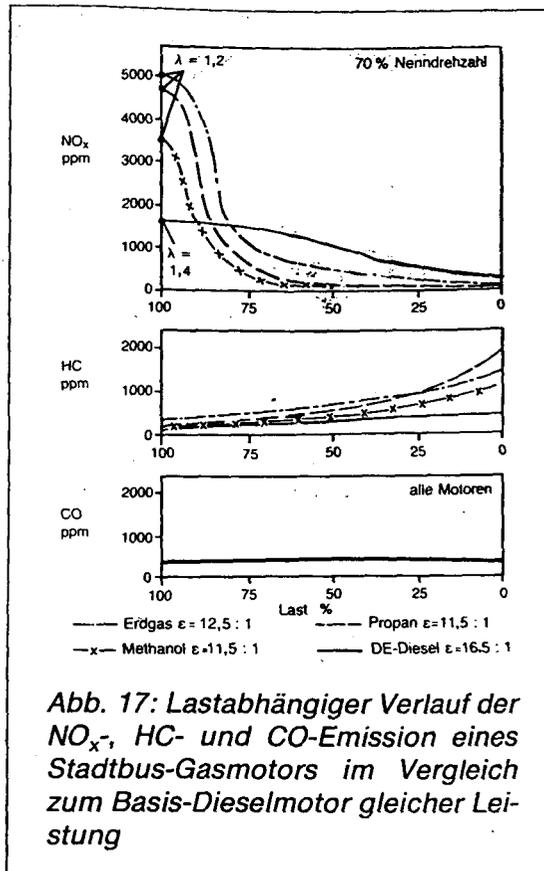


Bild 6.28: Lastabhängiger Verlauf der Emissionen eines Diesel-Motors und Stadtbus-Gas-Motors der Firma DB

In einer Veröffentlichung von Prof. KÖRNER <8> werden die Emissionen verschiedener Alternativ-Kraftstoffe - auch Pflanzenölester - bezogen auf die Emissionen eines Diesel-Motors diskutiert. Einbezogen sind auch die beiden in dem in Berlin durchgeführten Forschungsvorhaben eingesetzten Methanol-Motor-Konzepte von MAN und DB. Werden die Emissionswerte (Bild 6.29) ohne einen nachgeschalteten Katalysator betrachtet, so zeigt sich gegenüber dem Diesel-Motor ein erheblich höherer Anteil von HC im Abgas der Methanol-Motoren. Erst durch die Verwendung eines Katalysators bei beiden Methanol-Motor-Konzepten kann eine erhebliche Verminderung dieser Emission erreicht werden. Aus dieser Darstellung mag deutlich werden, daß vom Standpunkt einer verminderten Umweltbelastung Methanol-Motoren nur mit einem Katalysator zum Einsatz kommen sollten.

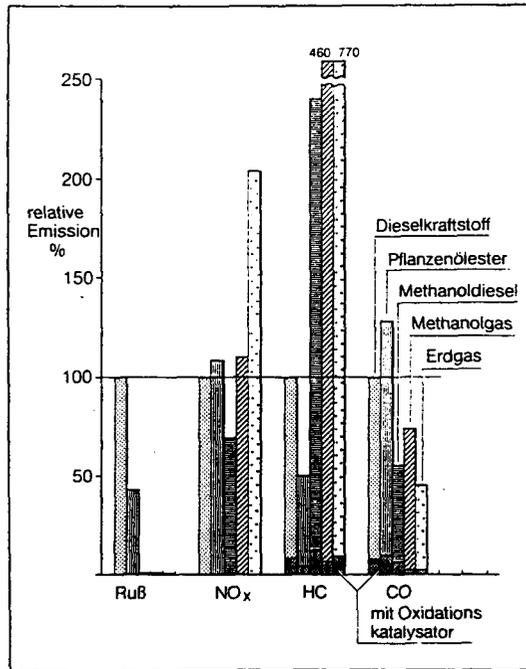


Bild Schadstoffemission mit alternativen Kraftstoffen im ECE-13-Punkte-Test im Vergleich zu Diesekraftstoff

Bild 6.29: Schadstoffemissionen im Vergleich zum Diesel-Kraftstoff

Erste Ergebnisse einer Untersuchung verschiedener Alternativ-Kraftstoffe, zu denen auch Methanol-Kraftstoff gehörte, aus Canada stellte 1988 BATTISTA <9> vor. Die Emissionswerte eines Caterpillar-Methanol-Motors sind denen eines typischen Diesel-Motors und den für 1994 von der EPA geforderten Grenzwerten gegenübergestellt. Bei den Gesamtkohlenwasserstoffen zeigen sich in dieser Untersuchung noch starke Differenzen zum Nachteil des Methanol-Motors auf.

Zusammenfassend können aus den vorliegenden Meßergebnissen, die zumindest zum Teil mit den gleichen Motoren erzielt wurden, die auch in dem vorliegenden Forschungsvorhaben eingesetzt waren, folgende Konsequenzen gezogen werden:

- Die Methanol-Motoren weisen in ihrem Abgas für die limitierte Schadstoffkomponente CO überwiegend niedrigere Werte auf als ein vergleichbarer Diesel-Motor.
- Abgängig vom Motoren-Konzept sind die Werte für die Schadstoffkomponente NOx nur beim Methanol-Diesel (MAN) geringer als bei einem vergleichbaren Diesel-Motor.
- Die Schadstoffkomponente HC ist bei Methanol-Motoren, unabhängig vom Konzept, prinzipiell erheblich höher als bei einem vergleichbaren Diesel-Motor. Durch den Einbau eines nachgeschalteten Abgaskatalysators können diese Werte allerdings erheblich vermindert werden, so daß sie etwa nur nach 10-tel der Menge, die mit dem Abgas eines Diesel-Motors in die Umwelt gelangt, betragen. Es ergibt sich hieraus die zwingende Notwendigkeit für die Verwendung eines Katalysators beim Methanol-Motor.
- Der Methanol-Kraftstoff verbrennt nahezu rußfrei, so daß in dieser Eigenschaft, insbesondere im Hinblick auf kommende Gesetzgebung für den Diesel-Motor (Rußfilter), ein erheblicher Vorteil des Methanol-Motors gegenüber dem Diesel-Motor zu sehen ist. Die heute in der Entwicklung stehenden Rußfilter lassen bereits erkennen, daß der zukünftige Wartungsaufwand für den Diesel-Motor größer werden wird.

- Bei der Verbrennung von Methanol-Kraftstoff wird mit der Menge der Schadstoffkomponente HC auch Aldehyd und hier besonders Formaldehyd frei. Die schädliche Wirkung von Formaldehyd in hohen Konzentrationen auf den Menschen ist zwar bekannt, aber die Zusammenhänge sind noch nicht vollständig geklärt. Die wichtigste Frage in diesem Zusammenhang wird sein, in welchen Mengen bzw. Konzentrationen Formaldehyd im Abgas des Methanol-Motors entsteht. Prinzipiell wird die Gesamtmenge an HC durch die Verwendung eines Katalysators erheblich gesenkt, so daß auch der Anteil der Aldehyde gesenkt wird. Eine intensive Untersuchung dieses Problemkreises sollte in einer Projektfortschreibung ausreichende Beachtung finden.

6.7.1.4 LITERATURANHANG

<1> Ullmann, Hare, Baines
Emissions from Direct-Injected
Heavy-Duty Methanol-Fueled Engines
(One Dual-Injection and One Spark-Ignited)
and a Comparable Diesel Engine

SAE - Paper 820966
West Coast Internatinal Meeting
San Francisco, California, 1982

<2> Ullmann, Hare, Baines
Emissions from two Methanol-Powered Buses

SAE - Paper (Nr. liegt nicht vor)
Sothwest Research Institute
San Antonio, Texas 78284, 1985

<3> Chmela
Unkonventionelle Motoren und Kraftstoffe
2. Informationsseminar 'Kraftstoffe
für die Motoren von morgen'

TU Wien, 07.11.1985

<4> Meier
Unveröffentlichter Schulungsvortrag
1989

- <5> Lutz, Eberle
Grundlagen und Konzept für schweizerische
Abgasvorschriften für Motorwagen mit
Dieselmotoren

Bericht im Auftrag des
Bundesamtes für Polizeiwesen, EJPD, 1986
- <6> Bergmann, Holloh
Field Experience with Mercedes-Benz
Methanol City Buses, 1983
- <7> Bergmann
Gasförmige Kraftstoffe für Nutzfahrzeuge

Der Nahverkehr, Heft 2/87
- <8> Prof. Körner, Bergmann
Alternativkraftstoffe für Nutzfahrzeuge

Verkehr und Technik, Heft 7/89
- <9> Battista
Kraftstoffalternativen
Die kanadischen Erfahrungen

BMFT Statusseminar, Hamburg 1988

6.7.2 GERÄUSCHMESSUNGEN

6.7.2.1 ALLGEMEINES

Aufgrund der zunehmenden allgemeinen Lärmbelastigungen und des damit verbundenen Risikos einer Gehörschädigung der Menschen waren im vorgegebenen Forschungsvorhaben auch die Stadt-Busse mit Methanol-Motor bezüglich ihrer Geräuschemissionen zu untersuchen. Besonders im Hinblick auf ihren Einsatz im Stadtkern bzw. in Wohnbereichen, in denen teilweise durch die Summierung einer Vielzahl einzelner Schallquellen eine verhältnismäßig hohe Lärmbelastigung entsteht, kommt der Lärmentwicklung des Stadtbusses eine große Bedeutung zu. Neuere Erkenntnisse aus der Forschung zeigen zwar Möglichkeiten einer Lärminderung bei Fahrzeugen auf, die allerdings nur durch eine teilweise konsequente Neukonstruktion zu erzielen sind. Für Serienfahrzeuge bedeutet das einen erhöhten Aufwand, der nur schrittweise durchgeführt werden kann, so daß die Umsetzung der neuen Erkenntnisse kurzfristig nur bedingt wirksam werden können. Unumgänglich scheint aus heutiger Sicht ein Kapselung des Motors zu sein. Die Berliner Verkehrsbetriebe (BVG) stellen bereits seit Jahren relativ hohe Anforderungen an eine Geräuschminderung ihrer Linien-Busse

6.7.2.2 DURCHFÜHRUNG DER MESSUNGEN

Über die Gesetzgebung wird eine stetige Senkung der Grenzwerte für den Schalldruckpegel auf EG-Ebene angestrebt. Nach der EG-Richtlinie 81/334 sind sowohl die Grenzwerte für das Fahrgeräusch als auch die Messbedingungen festgelegt. Das Fahrzeug fährt mit konstanter Geschwindigkeit von 50 km/h bis zum Beginn einer Meßstrecke von 20 m und wird dann im direkten Gang mit Vollgas bis zum Ende der Meßstrecke beschleunigt. Der Schalldruckpegel wird mit einem Mikrophon in der Mitte der Meßstrecke (10 m nach Beginn der Meßstrecke) bei einem Mikrophonabstand von 7,5 m zu beiden Seiten der Fahrspurmitte gemessen (Bilder 6.30 und 6.31). Bewertet wird jeweils der maximal auftretende Schalldruckpegel. Diese Prozedur wird mindestens dreimal durchgeführt, um eine gewisse statistische Sicherheit der Ergebnisse zu erzielen.

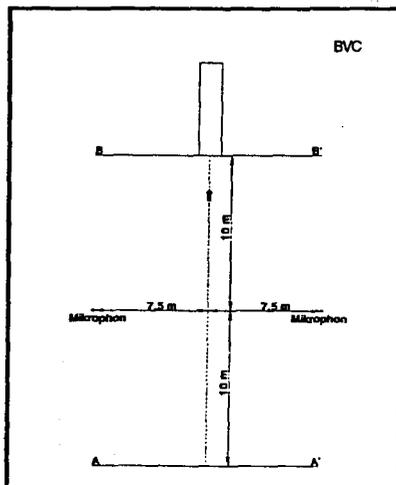


Bild 6.30: Meßstrecke nach EG-Richtlinien 81/334



Bild 6.31: Durchführung der Messung

Zusätzlich wurden pro Bus eine Rundummessung (Bild 6.32) und zwei Innenraummessungen (jeweils eine vorne in der Nähe des Fahrerplatzes und eine im Bereich der hintersten Sitzreihe - unmittelbar über dem Antriebsmotor) durchgeführt.

Gemessen wurden je 2 DB - sowie MAN - Busse mit methanol- bzw. dieseltreibenden Motoren. Der Meßvorgang zur Bestimmung des Fahrgeräusches ist in § 49 StVZO beschrieben und wurde mit Präzisions-schallpegelmessern durchgeführt. Da die Rundummessung nur zu einer qualitativen Aussage des Standgeräusches dienen sollte, wurden in Anlehnung an § 49 StVZO die Messungen im Winkel von 45° versetzt. Als Abstand zwischen dem Meßgerät und dem Fahrzeug wurden 7 m gewählt. Der Motor lief mit $3/4$ seiner Nenndrehzahl.

Da sich die primäre Geräuschentwicklung überwiegend durch die vom Motor entwickelten Geräusche unterscheidet, waren konzeptbedingt durch die sanftere Verbrennung in den Methanol-Motoren geringere Geräuschemissionen gegenüber dem Diesel-Motor zu erwarten. Ein direkter Vergleich zwischen Diesel- und Methanol-Bussen gleicher Hersteller war nur eingeschränkt möglich, da die Laufleistungsunterschiede der gegenübergestellten Fahrzeuge relativ groß waren. Die Streckenauswahl erfolgte unter verschiedenen Kriterien, wie Fahrbahnbeschaffenheit und geringer Verkehr, um die daraus resultierenden Geräuschquellen möglichst gering zu halten.

6.7.2.3 AUSWERTUNG DER GERÄUSCHMESSUNG

Erwartungsgemäß lagen alle Busse, mit denen die Messungen durchgeführt wurden, unter den für das Fahrgeräusch gesetzlich festgelegten Grenzwerten, wobei berücksichtigt werden muß, daß die Busse durch zum Teil hohe Laufleistungen eher ein höheres Geräuschniveau aufweisen, als fabrikneue Fahrzeuge. Erwartet wurde ferner, daß die Methanol-Motoren durch das dem Otto-Motor angenäherte Verbrennungsprinzip weniger Geräusche emittieren. Diese Erwartung bestätigte sich allerdings nur zum Teil (Bilder 6.33 und 6.34).

Bei der Messung des Standgeräusches (Rundummessung) ließen sich Differenzen des Schallpegels zugunsten der methanolgetriebenen Busse verzeichnen, die durchaus als konzeptbedingt angesehen werden können (Bilder 6.35 und 6.36).

Bei der Innenraummessung konnte festgestellt werden, daß die Methanol-Busse sowohl für den Fahrer als auch für die Fahrgäste geräuschärmer als die verglichenen Diesel-Busse sind. Die Methanol-Busse der Firma DB wiesen bei der Messung vorn ein um 7 dB und hinten in Motornähe ein um 4,5 dB geringeres Geräuschniveau als die Diesel-Busse auf. Bei den Methanol-Bussen der Firma MAN betrug die Verbesserung vorn 4 dB und hinten 6,5 dB gegenüber dem vergleichbaren Diesel-Bus.

Da die Versuchsflotte von je 7 Fahrzeugen eines Herstellers eher einer Kleinserie entsprach, kann davon ausgegangen werden, daß durch eine konsequente Konstruktion für eine größere Fahrzeugauflage die Geräuschemissionen weiter vermindert werden können.

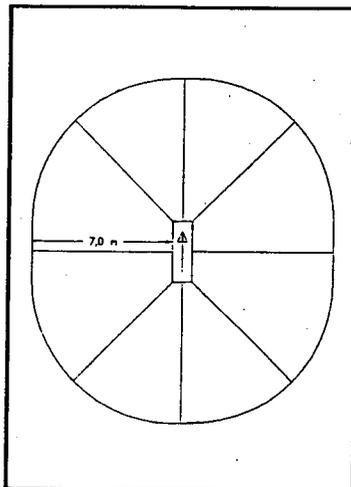


Bild 6.32: Meßaufbau für die Rundummessung

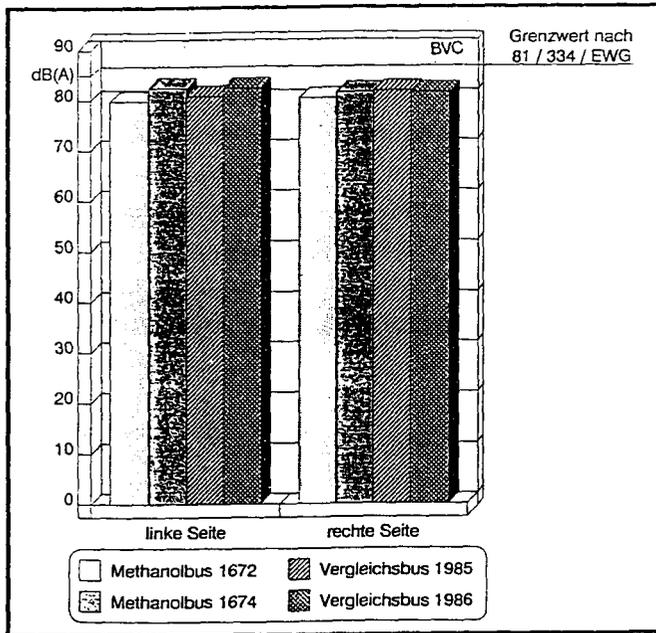


Bild 6.33: Schallpegelmessung nach § 49 StVZO (Fahrzeuge DB)

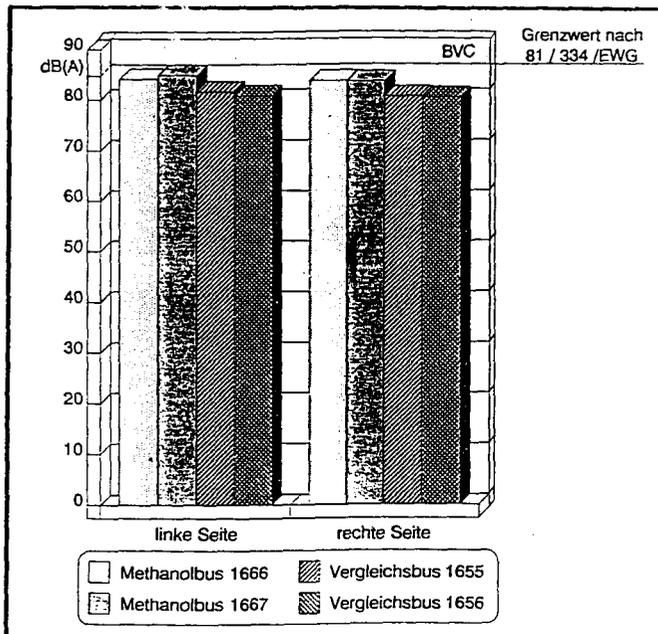


Bild 6.34: Schallpegelmessung nach § 49 StVZO (Fahrzeuge MAN)

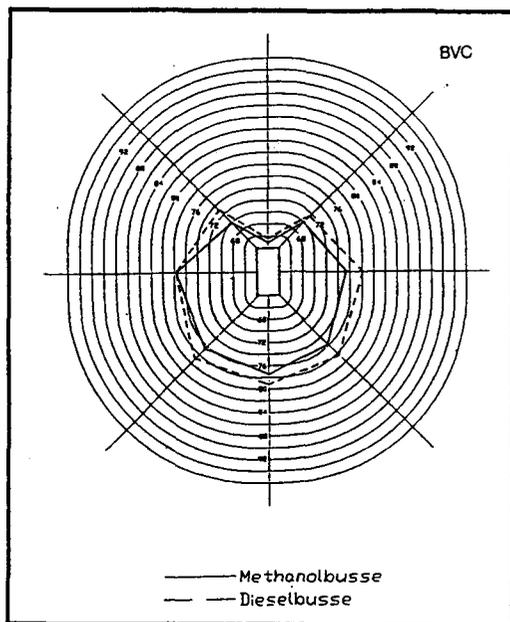


Bild 6.35: Rundummessung (Fahrzeuge DB)

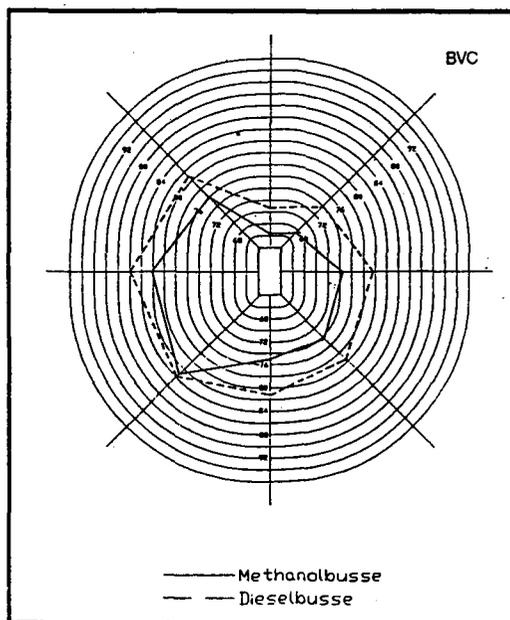


Bild 6.36: Rundummessung (Fahrzeuge MAN)

7.0 AKZEPTANZUNTERSUCHUNGEN

7.1 RANDBEDINGUNGEN DER UNTERSUCHUNG

Eine wichtige, wenn nicht oft sogar entscheidende Rolle bei der Einführung neuer Technologien kommt der Akzeptanz durch den unmittelbaren Anwender, im vorliegenden Fall die Fahrer der Methanol-Busse, zu. Doch stellt sich hier weniger die Frage nach einer generellen Eignung des Systems für eine allgemeine Einführung als vielmehr die Frage nach weitestgehender Angleichung des neuen Systems an bestehende Erfahrungen.

In einer Vielzahl von durchgeführten Befragungen hat sich gezeigt, daß ein Fragebogen die optimale Erhebungsform für Fragestellungen zur Akzeptanz darstellt. Im Rahmen eines Interviews als weiterer Form der Erhebung treten häufiger Extremaussagen auf, in dem sich der Befragte mit scheinbar gemachten Erfahrungen hervorheben will oder bei direkter Konfrontation mit dem Interviewer abschwächt bzw. verschweigt. Aus diesem Grunde wurde für die Befragung im Rahmen des Forschungsvorhabens ein Fragebogen entwickelt, der drei wesentliche Merkmale vereinigen sollte:

- Der Umfang der gestellten Fragen sollte überschaubar sein und den Ausfüllenden nicht entmutigen. Ferner sollten Belange des Datenschutzes nicht berührt werden.
- Neben den vorgegebenen Fragen, die vom Fahrer beantwortet werden sollten, war auch die Möglichkeit zusätzlicher verbaler Angaben zu schaffen.

- Bedingt durch organisatorische Vorgaben war das Format des Fragebogens den übrigen Fahrzeug- und Begleitpapieren anzupassen.

7.2

DURCHFÜHRUNG DER AKZEPTANZUNTERSUCHUNG

Entsprechend den Anforderungen bzw. den Randbedingungen wurde ein Fragebogen im C6-Format entwickelt, der damit die gleiche Größe hatte wie die Fahrzeugbegleitkarte. Damit konnte erreicht werden, daß der Fahrer den Fragebogen mit der Begleitkarte zusammen aufbewahren konnte und beim Ausfüllen der Begleitkarte an den Fragebogen erinnert wurde.

Der Fragebogen war strukturiert in drei bzw. vier Komplexe. Die Frontseite enthielt Angaben zum Fahrzeug, zur Buslinie und Angaben zum Fahrer (Geschlecht, Alter, Berufserfahrung usw.). Die Innenseiten enthielten direkte Fragen an den Fahrer zur Bedienung und Fragen zur Bewertung des neuen Busses. Hier stand dem Fahrer auch zusätzlicher Platz und Raum für die eigene Formulierung von Erfahrungen bzw. von Kritik zur Verfügung. Die Rückseite des Fragebogens gab dem Fahrer die Möglichkeit einer vergleichenden Beurteilung relevanter Eigenschaften der Methanol-Busse mit denen eines Diesel-Busses.

Innerhalb der Laufzeit des Vorhabens 'Methanol-Versuch von 1986 bis Ende 1988' wurden zwei Befragungsaktionen unter den Fahrern der Busse durchgeführt. Die erste Befragungsaktion wurde zum Ende

des Jahres 1987 durchgeführt, nach einem Zeitraum des Versuchsbetriebes, in dem sich die Fahrer auf das neue System einstellen und bereits Erfahrungen sammeln konnten. Vielfach vorhandene emotionale Widerstände gegen die Einführung von Neuerungen waren zu diesem Zeitpunkt mehr einer Routine gewichen, die der dem Umgang mit dem Diesel-Bus sehr nahe kam.

Zunächst wurde an die Fahrer, die in dem jeweiligen Erhebungszeitraum von einer Woche für die Methanol-Busse eingeteilt waren, im voraus 5 Fragebogen verteilt, die von dem Fahrer auf fünf aufeinanderfolgenden Tagen nach einem Linieneinsatz des Methanol-Busses ausgefüllt werden sollten. Planverschiebungen durch Krankheit und Umbesetzung, aber auch eine fehlende Erinnerung der Fahrer an das Ausfüllen führte zu einem unbefriedigenden Ergebnis beim Rücklauf der Fragebogen, so daß der Erhebungsmodus verändert wurde. Der Fahrer erhielt den Fragebogen nunmehr jeweils mit den Begleitpapieren des Busses und gab ihn auch ausgefüllt mit diesen zurück. Mit dieser Maßnahme konnte ein zufriedenstellender Rücklauf der Fragebogen erzielt werden. Die zweite Befragungsaktion wurde im September 1988 durchgeführt.

7.3 AUSWERTUNG DER AKZEPTANZUNTERSUCHUNG

7.3.1 ALLGEMEINE AUSWERTUNGEN

Insgesamt wurden in beiden Zeiträumen 310 Fragebogen von den Fahrern ausgefüllt und zurückgegeben. Ein Vergleich der Fragebogenangaben aus dem ersten und dem zweiten Erhebungszeitraum zeigte keine signifikanten Unterschiede, so daß eine weitere Auswertung auf der Basis der Gesamtheit der Fragebogen vorgenommen wurde.

Als ausgewogen kann die Verteilung der Fragebogen nach Herstellern bzw. den verschiedenen Konzepten gesehen werden. 148 (47,7 %) der Fragebogen wurden über Fahrzeuge der Firma Daimler Benz und 162 (52,3 %) über Fahrzeuge der Firma MAN ausgefüllt.

Die Gruppe der befragten Fahrer kann als sehr erfahren im Beruf des Busfahrers angesehen werden. Der überwiegende Anteil (ca. 78 %) war über 40 Jahre alt, der Rest (ca. 22 %) zwischen 23 und 40 Jahren (Bild 7.1). Ca. 80 % der Fahrergruppe hatte eine Berufserfahrung von über 10 Jahren. Lediglich 6 % übten den Beruf des Busfahrers weniger als 5 Jahre aus (Bild 7.2). Auf die Frage nach den spezifischen Erfahrungen mit einem Methanol-Bus (Bild 7.3) gaben ca. 81 % der Fahrer an, daß sie "gelegentlich" einen Methanol-Bus fahren, womit ein ständiger Vergleich zwischen einem Diesel- und einem Methanol-Bus sichergestellt war. Aus diesem 'gemischten Einsatz' der Fahrer kann eine hohe Kompetenz für die gemachten Angaben abgeleitet werden. Lediglich ein Anteil von ca. 17 % der Fahrer fuhr die Methanol-Busse 'häufig'. Bei dieser Gruppe kann sowohl eine grössere Toleranz bzw. Gewöhnung gegenüber vorhandenen Unterschieden der Methanol-Busse oder auch eine Überbewertung von

Unterschieden nicht ausgeschlossen werden. Bei einzelnen Fragestellungen wurden die Angaben dieser Gruppen gesondert ausgewertet. Mit ca. 2 % war der Anteil der unerfahrenen Fahrer relativ klein.

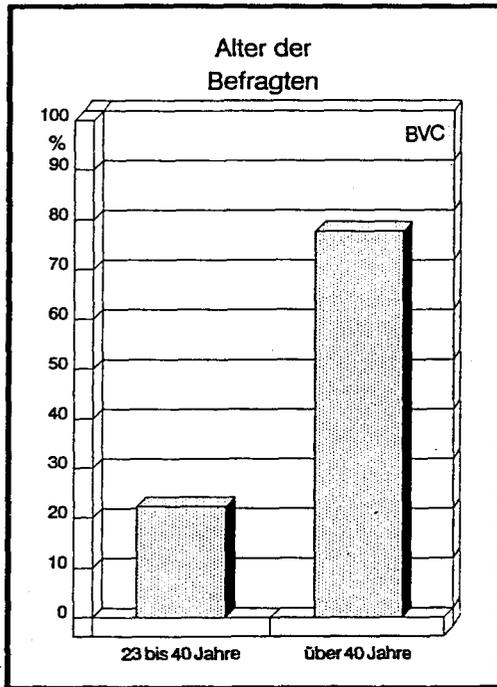


Bild 7.1: Alter der Befragten

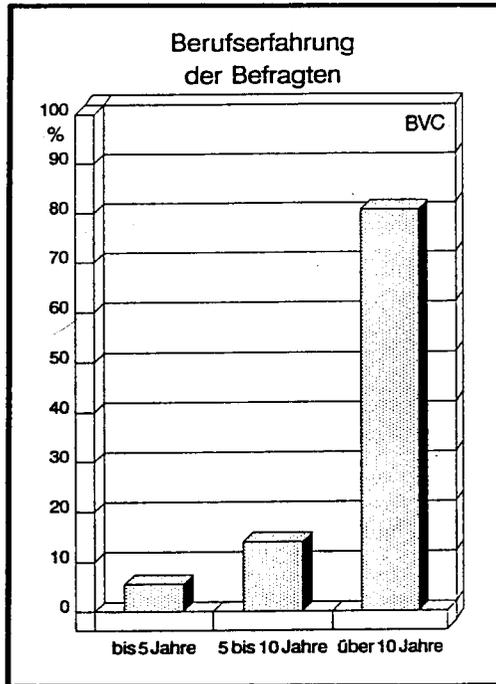


Bild 7.2: Berufserfahrung als Busfahrer

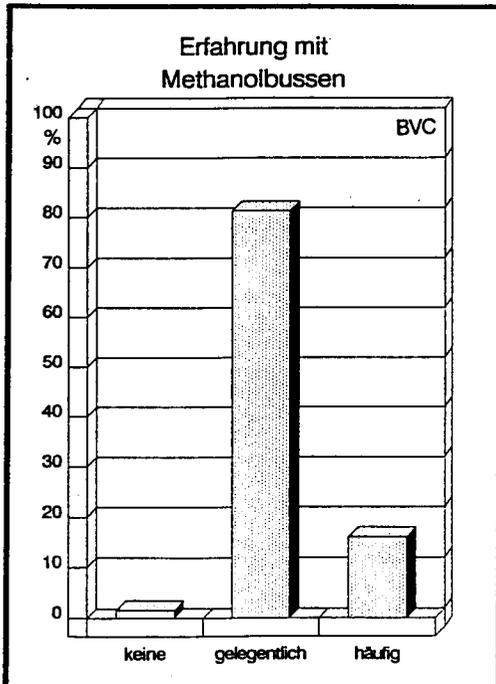


Bild 7.3: Erfahrung mit Methanol-Bussen

7.3.2 ZUSÄTZLICHER AUFWAND BEI DER BEDIENUNG

7.3.3 STARTVERHALTEN DER METHANOL-BUSSE

Die unterschiedlichen Motor-Konzepte der beiden beteiligten Hersteller machten eine getrennte Auswertung der Angaben zum Startverhalten erforderlich. Aus der Übersicht (Bild 7.4) wird erkennbar, daß der Start des kalten Motors, abgesehen von Unterschieden aufgrund der Konzepte, zum großen Teil problembehaftet beurteilt wurde. Der Start des heißen Motors dagegen wurde überwiegend mit 'gut' bewertet.

Werden die Angaben zum Startverhalten der Methanol-Busse getrennt nach Fabrikaten bzw. Konzepten dargestellt, so zeigen sich Verschiebungen in den Beurteilungen gegenüber der Gesamtdarstellung. Die weitere Unterscheidung der Angaben in jene, die von der stärksten Gruppe der gelegentlich 'eingesetzten Fahrer' und die der Gruppe von Fahrern, die 'häufig' einen Methanol-Bus fahren, macht für die Fahrzeuge der Firma Daimler Benz (Bilder 7.5 und 7.6) unterschiedliche Beurteilungen des Startverhaltens deutlich. Auffällig ist, daß sich die Gruppe der Fahrer, die 'häufig' einen Methanol-Bus fahren eindeutiger für die Angaben 'gut' oder 'schlecht' und die übrige Gruppe sich weitaus häufiger für die 'Mitte', die Angabe 'verzögert', entschieden hat. Prinzipiell bleibt aber die Tendenz in der Aussage zum Startverhalten mit kaltem und heißem Motor erhalten.

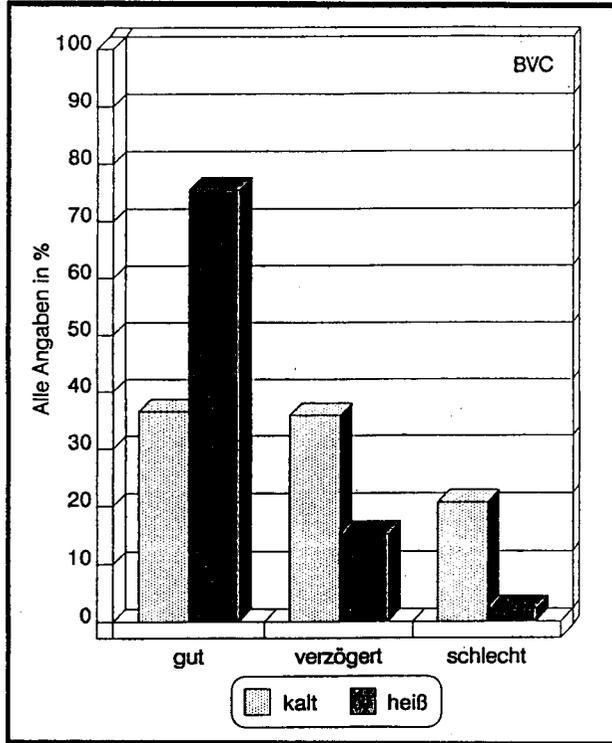


Bild 7.4: Beurteilung des Startverhaltens aller Busse (DB und MAN)

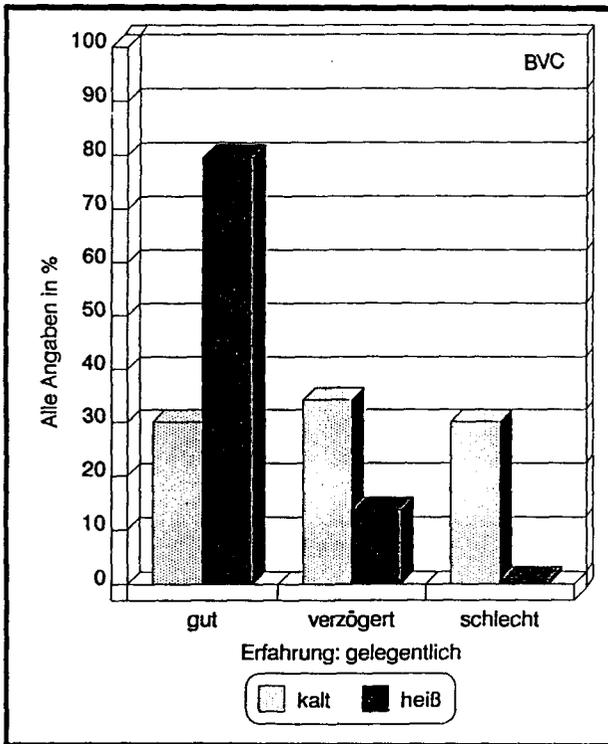


Bild 7.5: Beurteilung Startverhalten (Fahrzeuge DB, gelegentlicher Einsatz im Methanol-Bus)

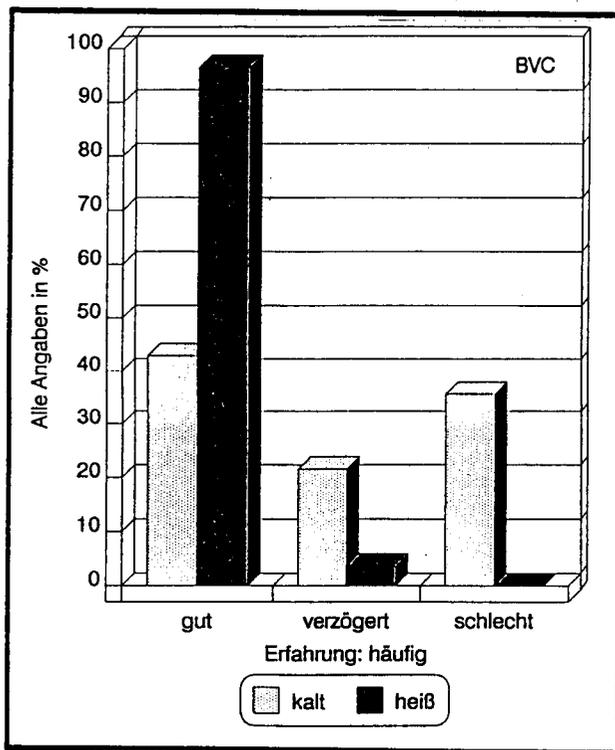


Bild 7.6: Beurteilung Startverhalten
(Fahrzeuge DB, häufiger
Einsatz im Methanol-Bus)

Dagegen sind die Angaben der Fahrer beider Gruppen zum Startverhalten der Methanol-Busse der Firma MAN in gleicher Weise verteilt, wie auch die Gesamtmenge (Bilder 7.7 und 7.8).

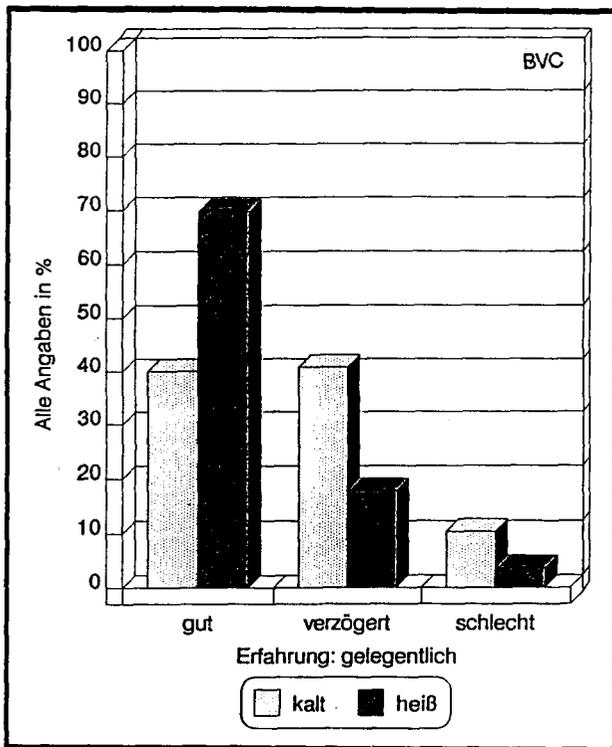


Bild 7.7: Beurteilung Startverhalten
(Fahrzeuge MAN, gelegentlicher
Einsatz im Methanol-Bus)

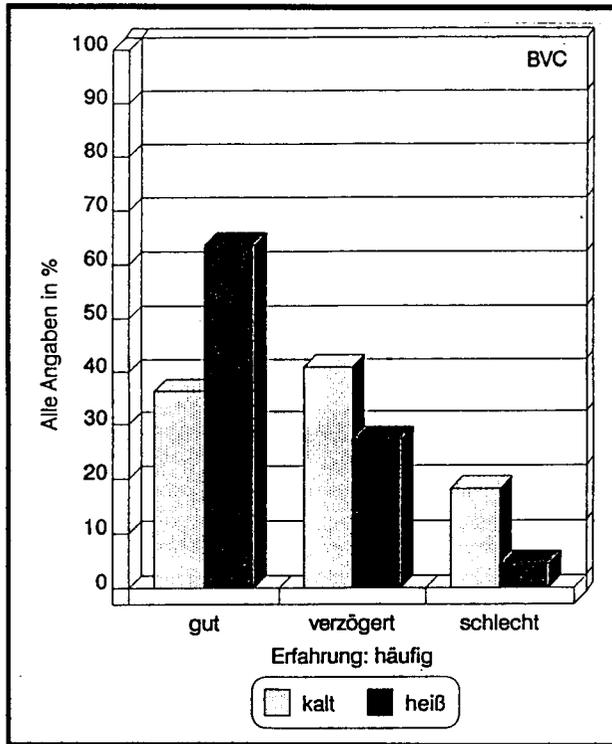


Bild 7.8: Beurteilung Startverhalten
(Fahrzeuge MAN, häufiger
Einsatz im Methanol-Bus)

7.3.4 **BEURTEILUNG WEITERER EIGENSCHAFTEN
DER METHANOL-BUSSE**

Die Bilder 7.9 und 7.12 stellen die von den Fahrern gemachten Angaben zu den Eigenschaften

- Fahrverhalten
- Beschleunigung
- Geräusche
- Vibrationen

der Methanol-Busse dar. Die Darstellungen sollen in erster Linie einen Trendverlauf der Angaben vermitteln. Die Trennung zwischen den Angaben der Fahrer, die gelegentlich und denen, die den Methanol-Bus häufig fahren, macht zwar partielle Unterschiede erkennbar, doch bleibt der Trend der Aussage ebenfalls erhalten. Die erfragten Eigenschaften wurden überwiegend positiv beurteilt. Lediglich bei den Angaben zu den Geräuschen fällt ein höherer Anteil der indifferenten Angaben auf, die als eine gewisse Einschränkung interpretiert werden können.

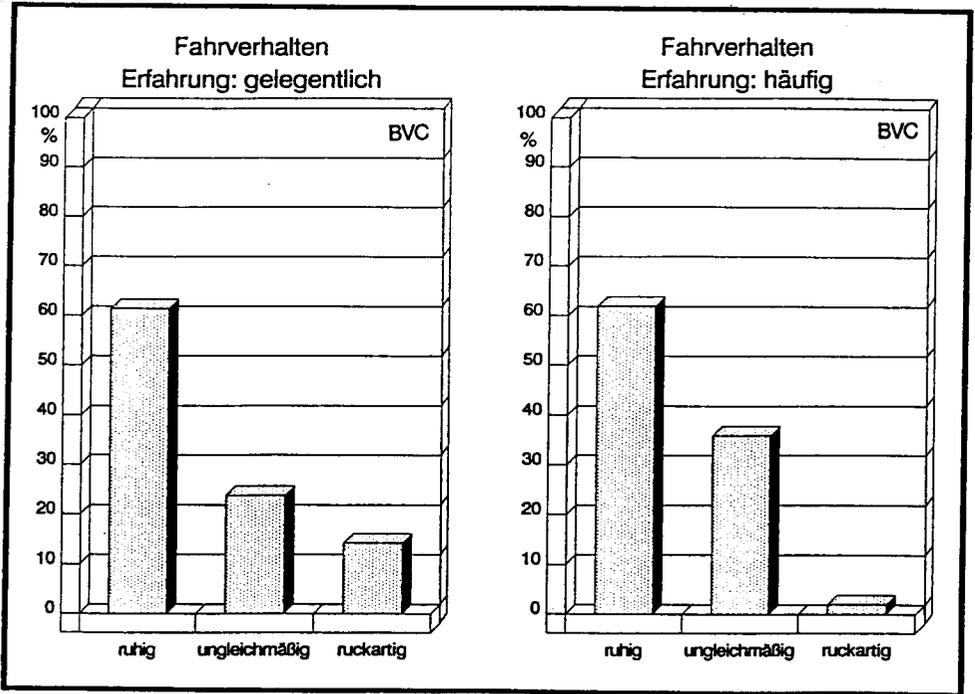


Bild 7.9: Beurteilung Fahrverhalten (alle Busse)

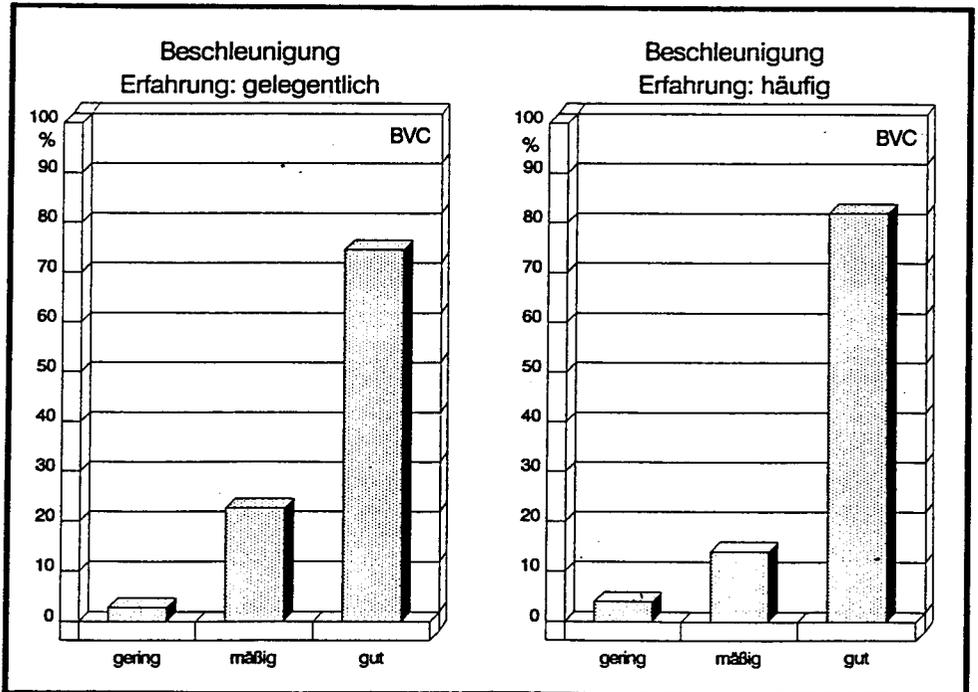


Bild 7.10: Beurteilung Beschleunigung

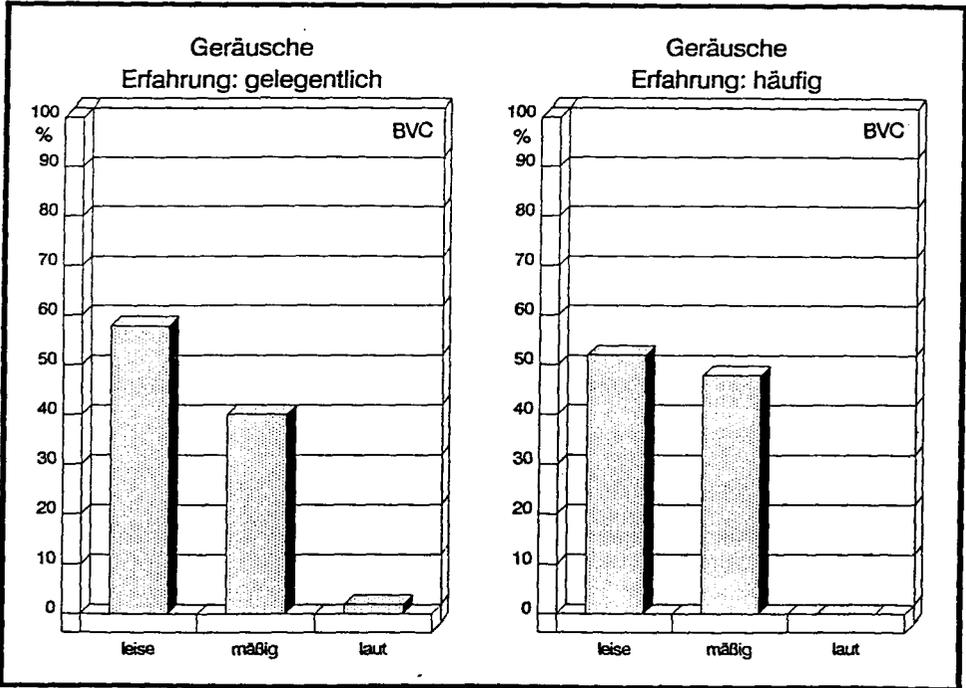


Bild 7.11: Beurteilung Geräusche
(alle Busse)

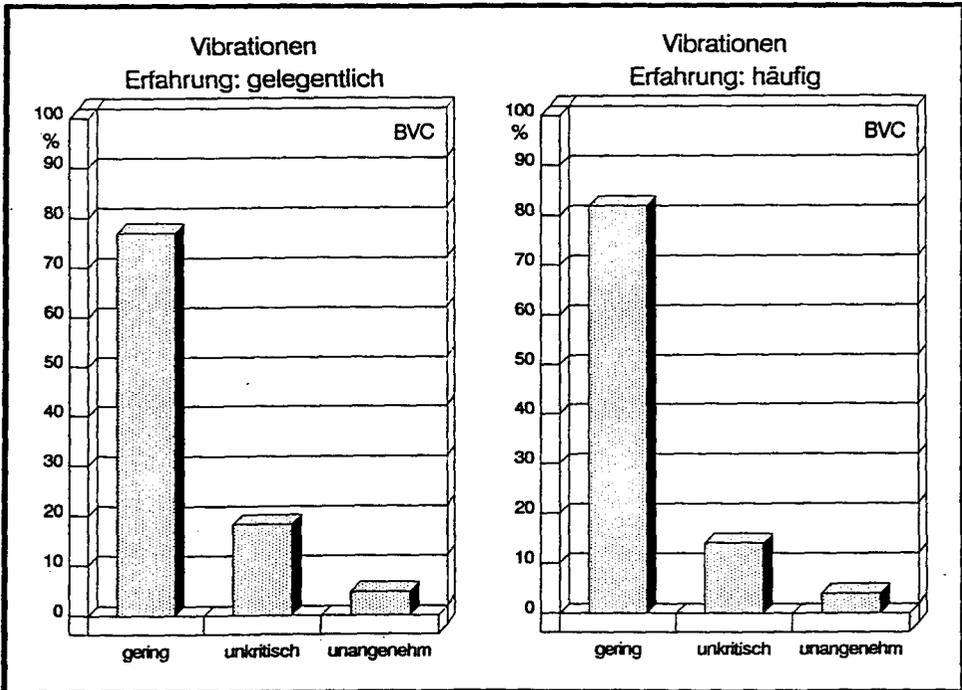


Bild 7.12: Beurteilung Vibrationen

7.3.5 ZUSÄTZLICHE ANGABEN

Bei rund einem Drittel der Fragebogen (31,6 %) nutzen die befragten Fahrer die Möglichkeit, zusätzliche Angaben zum Umgang mit den Methanol-Bussen aufzuschreiben. Um eine verwertbare Transparenz zu erreichen, wurden die zusätzlichen Angaben ihren Aussagen nach in drei Komplexe unterteilt:

- Angaben zur Gesundheit
- Angaben zur Technik
- Angaben sowohl zur Gesundheit als auch zur Technik.

Wie aus Bild 7.13 hervorgeht, wurden die häufigsten Angaben aus dem Bereich der Gesundheit gemacht. Eine weitere Unterteilung zeigt (Bild 7.14), daß größtenteils der Geruch, und hier können überwiegend die Abgase gesehen werden, Anlaß zu Anmerkungen gab. Hierzu ist unbestreitbar, daß die Abgase des Methanol-Motors einen völlig anderen Geruch haben, als die des Diesel-Motors und des Otto-Motors. Allerdings kann in diesem Zusammenhang fremder oder sogar übler Geruch nicht gleichgesetzt werden mit irgendeiner Schädlichkeit. Einige Fahrer klagten über Kopfschmerzen und eine Geschmacksbeeinträchtigung. Hierzu und ebenso zu den aufgetretenen Allergien liegen keine ärztlichen Bestätigungen vor, so daß in diesen Fällen auch eine gegebenenfalls übersteigerte subjektive Beurteilung nicht ausgeschlossen werden kann. Eine ursächlich durch den Umgang mit den Methanol-Bussen entstandene Gesundheitsschädigung ist nicht aufgetreten.

Aufgrund der fehlenden Personenidentifizierungen bei den Fragebogen wurde die Möglichkeit untersucht, in welchem Umfang die vorgenannten Ergebnisse durch eine größere Anzahl von Erhebungsbogen bestimmt werden kann, die von dem gleichen Fahrer ausgefüllt worden sind. Eine Plausibilitätsuntersuchungen der Ergebnisse zeigte allerdings keine Anhaltspunkte für diese Annahme.

Die auf den Bereich der Technik bezogenen Angaben sind aus Bild 7.15 zu entnehmen. Hier spiegeln sich weitgehend auch die in den vorhergehenden Fragen gemachten Einschränkungen wieder, die lediglich spezifiziert wurden. Die Angaben zum Abgasverhalten dagegen beziehen sich teilweise auf tatsächliche Störfälle innerhalb des Erhebungszeitraumes (Defekte an den Zusatzheizgeräten, Verdampfer usw.).

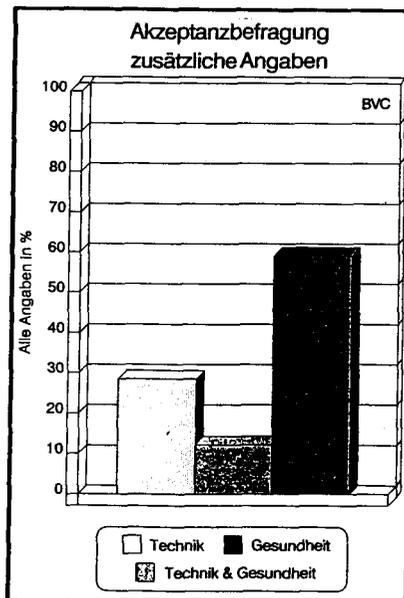


Bild 7.13: Zusätzliche Angaben der Fahrer

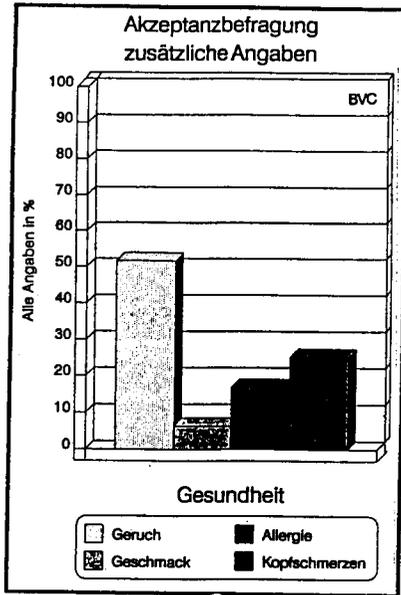


Bild 7.14: Differenzierte Angaben

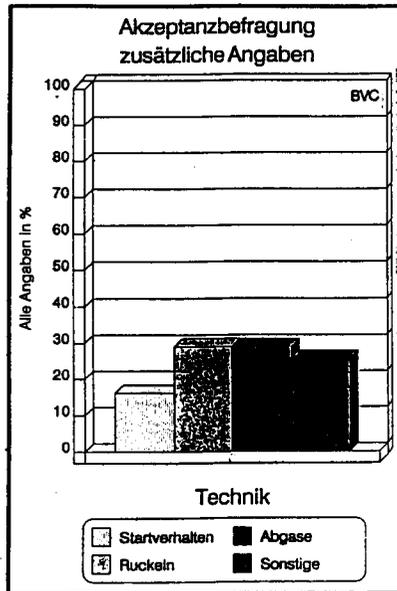


Bild 7.15: Differenzierte Angaben

7.3.6 VERGLEICHENDE BEWERTUNG VON EIGENSCHAFTEN

Im Rahmen einer Akzeptanzbefragung haben vergleichende Angaben der Befragten einen hohen Aussagewert. Da ein solcher Vergleich in hohem Maße von der mit beiden Systemen gemachten Erfahrung bestimmt wird, bot sich auch in diesem Fall die Trennung der Fahrergruppen für die Ergebnisdarstellung an. Die befragten Fahrer sollten vergleichende Aussagen ('besser; gleich; schlechter') zwischen Methanol-Bus und Diesel-Bus zu folgenden Fahrzeugeigenschaften machen:

- Startverhalten
- Fahrverhalten
- Beschleunigung
- Geräusche
- Vibrationen.

Die Wahl der gleichen Eigenschaften, die von den Fahrern bereits im Fragebogen vorher ohne vergleichende Aussagen beurteilt werden sollten, bot eine zusätzliche Möglichkeit einer Plausibilitätsüberprüfung. Die folgenden Darstellungen zeigen zu jeder vergleichenden Angabe der Eigenschaften 4 Balken, die den beiden Herstellern und den Fahrergruppen zugeordnet werden können sowie einen Balken als Mittelwert über alle Angaben. Die Bilder 7.16 bis 7.20 bieten sowohl eine allgemeine Trendaussage als auch eine differenzierte Aussage bezogen auf die gewählten Fahrergruppen.

Das Startverhalten der Methanol-Busse beider Hersteller bzw. beider Konzepte wird im Vergleich von den Fahrern überwiegend mit 'gleich' bzw.

'schlechter' zum Diesel-Bus beurteilt. Auffällig sind die Angaben der Fahrer, die die Methanol-Busse häufiger gefahren sind. In diesen Angaben spiegeln sich aber auch die vom Konzept abhängigen Probleme beim Startvorgang und der aufgrund von Störungen beim Starten häufig erforderliche Wechsel der Starterbatterie wieder.

Das Fahrverhalten der Methanol-Busse wird größtenteils als gleich dem des Diesel-Busses beurteilt. Die Unterschiede auch innerhalb der Fahrergruppen sind sehr gering.

Die Beurteilung der Beschleunigung eines Busses ist in hohem Maße subjektiv, so daß bestenfalls erhebliche Unterschiede ein eindeutiges Ergebnis erwarten lassen können. Im vorliegenden Fall wurde die Beschleunigung im Vergleich zum Diesel-Bus von der Hälfte der befragten Fahrer mit 'gleich' beurteilt. Die Unterschiede innerhalb der Fahrergruppen sind gering. Der Rest der Aussagen verteilt sich stärker auf die Angabe, daß die Beschleunigung 'besser' sei, als die des Diesel-Busses. Die Differenz innerhalb der Fahrergruppen unterstreicht die Subjektivität dieser Einschätzung.

Bei den Geräuschemissionen der Methanol-Busse wurden von den Befragten eindeutige Vorteile empfunden. Zwar konnte der größte Teil der Befragten keinen Unterschied feststellen, aber über ein Drittel der Fahrer beurteilte die Geräuschentwicklung mit 'besser' gegenüber dem Diesel-Motor. Diese Angaben sind weitgehend in Übereinstimmung mit den Ergebnissen der im Rahmen des Forschungsvorhabens durchgeführten Geräuschmessungen.

Auch die Vibrationen der Methanol-Busse, die besonders bei einem Halt im Leerlauf des Motor entstehen, wurden überwiegend mit 'gleich' oder 'besser' als beim Diesel-Bus beurteilt.

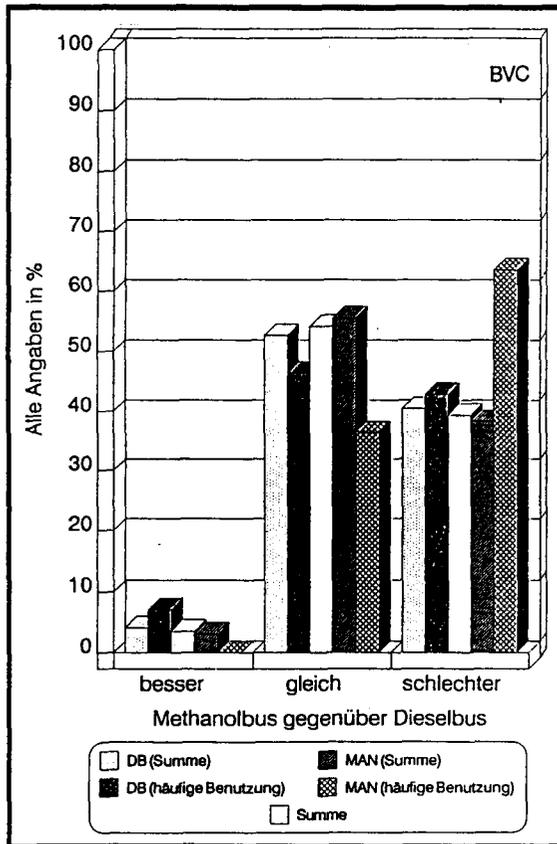


Bild 7.16: Vergleichende Gegenüberstellung (Startverhalten)

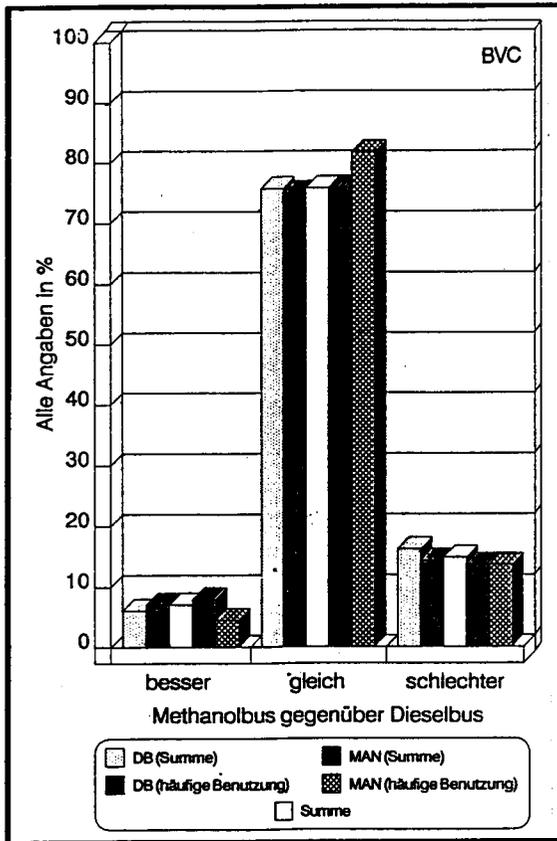


Bild 7.17: Vergleichende Gegenüberstellung (Fahrverhalten)

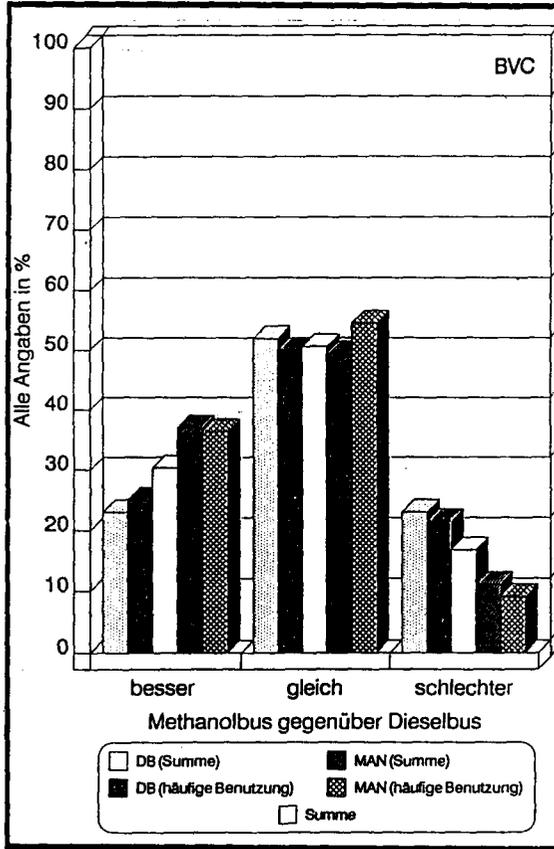


Bild 7.18: Vergleichende Gegenüberstellung (Beschleunigung)

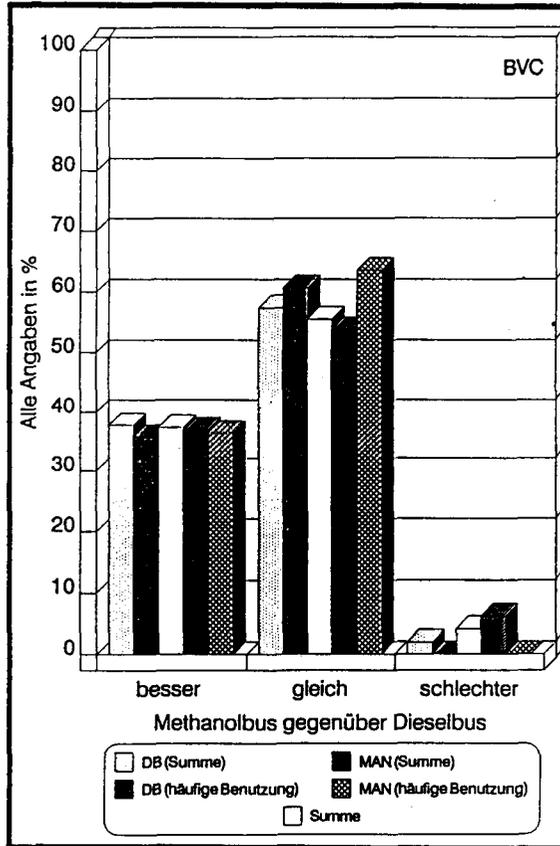


Bild 7.19: Vergleichende Gegenüberstellung (Geräusche)

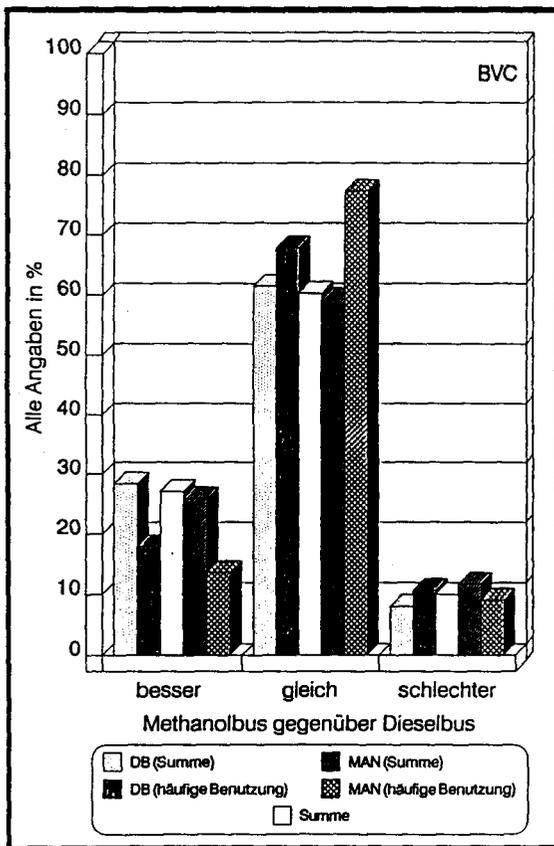


Bild 7.20: Vergleichende Gegenüberstellung (Vibrationen)

7.3.7 AKZEPTANZUNTERSUCHUNG WEITERER GRUPPEN

Um ein vollständiges Bild zur Akzeptanz einer neuen Technologie für Stadtbusse zu bekommen, sollten die Fahrgäste als auch das Werkstattpersonal in diese Untersuchungen eingebunden werden.

Die Fahrgastbefragung wurde nicht vorgenommen, da die Fahrgäste im Vorhabenszeitraum unabhängig vom Vorhaben aus verschiedenen Gründen (BVG-intern) befragt wurden und eine weitere Befragung nicht zumutbar bzw. das Befragungsergebnis weitgehend von der Verdrossenheit der Fahrgäste geprägt gewesen wäre. Darüber hinaus muß als fraglich angesehen werden, in welchem Umfang dem Fahrgast der Unterschied zwischen dem Methanol-Bus und einem Diesel-Bus bewußt gewesen wäre. Auf eine besondere Kennzeichnung der Busse wurde verzichtet, so daß für den Fahrgast eine Unterscheidung vom Erscheinungsbild her nicht möglich gewesen wäre.

7.3.8 ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE DER AKZEPTANZBEFRAGUNG

Die im Rahmen des Forschungsvorhabens durchgeführte Akzeptanzbefragung blieb begrenzt auf die Befragung der Gruppe der Fahrer. Damit konnte aber auch die wichtigste Gruppe derer befragt werden, die mit dem neuen Bus-Konzept unmittelbar in Berührung kommen.

Auf die Fahrgastbefragung mußte aus organisatorischen Gründen im Versuchszeitraum verzichtet werden, da für die BVG wesentlichere Befragungen

im Vordergrund standen und die Ergebniserwartung aus dem Kreis der Fahrgäste relativ gering war.

Die Akzeptanzuntersuchung des Werkstattpersonals wurde nicht ausgewertet, da der Kreis der Mechaniker, die die Methanol-Busse repariert haben, zu gering war, um eine Aussage darauf aufzubauen. Die Tatsache, daß das übrige Werkstattpersonal ohne Einschränkung auch in den Nachbargruben gearbeitet hat - auch wenn bei laufendem Methanol-Motor nicht in jedem Fall die Absauganlage verwendet wurde - mag als Akzeptanz oder zumindest als Duldung gesehen werden. Eine direkte Ablehnung der Methanol-Busse durch das Werkstattpersonal trat lediglich zu Beginn des Vorhabens auf. Eine bessere Aufklärung und Information des Personals konnte diese jedoch sehr schnell abbauen.

Zusammenfassend kann mit guter Sicherheit festgestellt werden, daß innerhalb der Gruppe der Fahrer, der unmittelbaren Anwender der neuen Technologie, eine gute Akzeptanz vorlag.

8.0 BETRIEBSWIRTSCHAFTLICHE BEWERTUNG

8.1 BERECHNUNG DER WIRTSCHAFTLICHKEIT

Die folgende vergleichsweise Berechnung der Wirtschaftlichkeit des Betriebes von im Linieneinsatz der BVG eingesetzten Diesel-Bussen einerseits und Methanol-Bussen andererseits basiert auf einer statischen Erfassung der Auszahlungen, d.h. die unterschiedliche finanzwirtschaftliche Wirksamkeit von gleich hohen Zahlungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten wird nicht berücksichtigt. Dies ist im vorliegenden Fall vertretbar, da außer den beiden Bus-Varianten andere Möglichkeiten der Kapitalanlage (z.B. in Gestalt von Finanzbeteiligungen, Immobilienerwerb etc.) nicht zur Verfügung stehen.

Die prinzipielle Gleichartigkeit der beiden Alternativen gestattet es ebenfalls, auf eine - womöglich dynamische - Umlegung des Anschaffungspreises auf die einzelnen Perioden der Nutzungsdauer - die sogenannte Abschreibung - zu verzichten. Der Anschaffungspreis ist ja bei beiden Alternativen in voller Höhe bereits am Anfang des Untersuchungszeitraumes zu entrichten. Lediglich der Methanol-bedingte Aufpreis bei den beiden Methanol-Bussen stellt eine Auszahlung am Anfang des Einsatzzeitraumes dar, die bei den Diesel-Bussen nicht angefallen wäre und könnte daher in Gestalt von Abschreibungen auf die Nutzungsdauer verteilt werden. Aus folgendem Grund empfiehlt sich aber auch in diesem Fall die statische Erfassung als ein Auszahlungsbetrag am Anfang des Untersuchungszeitraumes: Um die Aufteilung des Anschaffungspreises in jährliche Abschreibungsbeträge vornehmen zu können, muß die Nutzungsdauer vorgegeben

werden. Diese orientiert sich in der Regel an den von den Finanzbehörden erstellten sogenannten AfA-Tabellen (= Absetzung für Abnutzung) und würde im Falle eines Eindeck-Linien-Omnibusses 8 Jahre betragen. In den meisten Fällen ist aber ein Bus auch noch nach Ablauf dieser 8 Jahre einsatzfähig und stellt - sofern auch tatsächlich eingesetzt - eine 'stille Reserve' dar. Beschränkte man nun die vergleichsweise Wirtschaftlichkeitsberechnung der Bus-Varianten auf diese 8 Jahre, so würde eine eventuelle Änderung in der Reihenfolge der Wirtschaftlichkeit der Bus-Varianten im 9., 10. etc. Jahr nicht erkannt werden.

Aus diesem Grund erfolgt die Darstellung des Wirtschaftlichkeitsvergleichs in Gestalt der zeitlichen Verläufe des bis zu jedem beliebigen Zeitpunkt aufgelaufenen Auszahlungsbetrages. Der Schnittpunkt des Auszahlungsverlaufes mit der Ordinate stellt die Höhe der Auszahlungen am Anfang des Untersuchungszeitraumes dar, die Steigung des Auszahlungsverlaufes hingegen die variablen (= laufenden) Kosten pro Zeiteinheit.

8.1.1 AUSGABEN ZU BEGINN DES BUS-EINSATZES

Bei den Ausgaben zu Beginn des Einsatzzeitraumes handelt es sich um:

- den Anschaffungspreis für einen Bus in der Grundversion (= Diesel-Version). Er beträgt für einen Bus

des Typs MAN SL 200:	DM 238.714,--
des Typs DB 0305 :	DM 261.214,--

- den Aufpreis für die Methanol-Versionen:

für den MAN-Bus :	DM 28.800,--
für den DB-Bus :	DM 25.900,--

Zwei weitere - etwas problematischere - Kostenblöcke sind an dieser Stelle noch zu berücksichtigen:

- die Einrichtung einer Methanol-Tankstelle mit zwei Zapfsäulen (davon eine zur Reserve), Gesamtkosten DM 173.000,--. Die im Betriebshof Spandau, dem Standort der Methanol-Busse, vorhandenen drei betriebsfähigen Diesel-Zapfsäulen (hiervon wiederum eine als Reserve-Säule) sind für die Betankung der in Spandau stationierten 171 Diesel-Busse zuständig (also 85,5 Busse pro regulärer Diesel-Säule) und werden von einem Tankmeister bedient. Nach Auskunft der BVG sind in dieser Tankstellenausstattung sowohl technisch als auch personell noch Kapazitäten frei. Es kann davon ausgegangen werden, daß auch eine Diesel-Zapfsäule pro 120 Busse ausreichend wäre, ohne daß es zu Engpässen bei den morgentlichen Tankvorgängen käme.

Zur Ermittlung der Kapazität (ausgedrückt in der Anzahl der stationierbaren Busse) einer Methanol-Zapfsäule muß die unterschiedliche Tankkapazität, Kraftstoffverbrauch und Befüllungsgeschwindigkeit von Diesel- und von Methanol-Bussen berücksichtigt werden.

Diesel-Bus

Durchschnittlicher Kraftstoffverbrauch
Tag eines Diesel-Busses bei jährlich
55.000 km und einem Verbrauch von
38,4 l/100 km (Mittelwert aus MAN-
und DB-Bussen) 57,9 l

Tankvolumen eines Diesel-Busses 250,0 l

=> i.d.R. nur ein Tankvorgang pro Tag

Betankungsgeschwindigkeit einer
Diesel-Säule 130,0 l/Min.

=> reine Tankzeit (ohne 'Rüstzeiten')
pro täglichem Tankvorgang 26,7 sec

Methanol-Bus

Durchschnittlicher Kraftstoffverbrauch
Tag eines Methanol-Busses bei jährlich
55.000 km und einem Verbrauch von
90,7 l/100 km (Mittelwert aus MAN-
und DB-Bussen) 136,7 l

Tankvolumen eines Methanol-Busses 500,0 l

=> i.d.R. nur ein Tankvorgang pro Tag

Betankungsgeschwindigkeit einer
Methanol-Säule 150,0 l/Min.

=> reine Tankzeit (ohne 'Rüstzeiten')
pro täglichem Tankvorgang 54,7 sec

Das bedeutet, daß - im Jahresdurchschnitt gesehen - die reine Tankzeit während des täglichen Tankvorganges beim Methanol-Bus 54,7/26,7 ca. 2mal so lange dauert wie beim Diesel-Bus. Unter Berücksichtigung der bei jedem Tankvorgang anfallenden Rüstzeiten, wie Vorfahren des Busses bis zur Zapfsäule, Tankdeckel öffnen, Einführen, Abschalten und Wiedereinhängen des Zapfventils, Buchführung, Abfahrt des Busses etc., kann angenommen werden, daß eine Methanol-Betankung insgesamt nur 1,5mal so lange dauert wie eine Diesel-Betankung. Demzufolge würde eine reguläre Methanol-Zapfsäule für $120/1,5 = 80$ Busse ausreichen.

Die Einstellung weiteren Tankstellenpersonals kann entfallen, da beim jetzigen Personal noch Kapazitäten frei sind und der vermehrte Einsatz von Methanol-Bussen im Betriebshof Spandau gleichzeitig eine Reduzierung der Anzahl der Diesel-Busse bedeuten würde. Es würde sich also nur die Dauer pro Betankungsvorgang um den genannten Faktor erhöhen.

Die eingangs erwähnten Anschaffungskosten für die Methanol-Tankstelle in Höhe von DM 173.000,-- lassen sich also auf 80 Busse verteilen - eine Zahl, die bei tatsächlicher Einführung des Methanol-Antriebs im Alltags-Betrieb (z.B. bei der Hälfte der Spandauer Busse) durchaus erreicht werden kann -, d.h. $173.000,--/80 = \text{DM } 2.162,50$ pro Methanol-Bus. Da außerdem die wirtschaftliche Lebensdauer einer Methanol-Tankstelle mit 25 Jahren 3,125 mal so lange veranschlagt wird, wie die eines Busses (8 Jahre), brauchen pro Methanol-Bus nur $2.162,50/3,125 = \text{DM } 692,--$ in Ansatz gebracht zu werden.

Daß gleichzeitig mit der Errichtung der Methanol-Tankstelle ein Hydrant für ca. DM 60.000,-- installiert werden mußte, ist eher zufällig bedingt. Jede bauliche Veränderung an der Tankstellen-Anlage hätte diesen notwendig gemacht. Die Anschaffungskosten hierfür sind somit den Gemeinkosten des gesamten Betriebshofes bzw. der BVG zuzurechnen.

- Als weitere zu Beginn des Methanol-Betriebes angefallenen fixen Kosten sind die erfolgte Ausgabe von DM 120.000,-- für die Schulung des Personals zu betrachten. Insbesondere das Werkstatt-Personal mußte mit der Funktionsweise, der Wartung und der Reparatur eines Methanol-Busses eingehend vertraut gemacht werden. Geringer fiel der Schulungsaufwand für das Fahrpersonal aus, da dieser Personenkreis nur die Bedienung und die symptomatische Beschreibung von eventuell auftretenden Fehlern erlernen mußte. In dem genannten Betrag enthalten war außerdem die Schulung für die Handhabung der Meßdatenerfassungsgeräte in den Bussen während der Projektphase, ein Kostenbestandteil also, der im Alltagsbetrieb nicht anfällt. Dieser letztgenannte Kostenblock wird mit ca. DM 20.000,-angesetzt. Die Schulung der Fahrer würde bei einem Methanol-Alltagsbetrieb in die allgemeine BVG-interne Fahrerausbildung integriert werden müssen, da das Fahrpersonal dann beide Antriebsarten beherrschen muß. Der hierfür während der Projektphase einmalig angefallene Anteil wird mit DM 40.000,-- veranschlagt und kann - wie dargestellt - künftig entfallen. Die geschätzten DM 60.000,-Schulungskosten für die Mechaniker betrafen ca. 20 % des Werkstattpersonals. Für den Fall, daß die Hälfte der in Spandau stationierten Bus-Flotte mit Methanol angetrieben werden soll, müßten nahezu alle Werkstattangehörigen außer mit Diesel- auch mit Methanol-Antrieben vertraut sein. Das bedeutet einen 5-fachen Schulungsaufwand von DM 300.000,-(100 % / 20 % x DM 60.000,--), der sich auf eine dann vorhandene Methanol-Bus-Flotte von $185/2 = 92,5$ Busse verteilt, pro Bus also DM 3.243,24.

Da das 'Methanol-Know-how' eines Mechanikers länger hält als ein Bus selbst und außerdem bei neu einzustellenden Mitarbeitern die Methanol-Technik von vornherein in die BVGinterne Mechaniker-Ausbildung integriert werden wird, kann dieser Betrag auf DM 1.622,-- pro Bus halbiert werden.

Somit ergeben sich also als Ausgaben zu Beginn des gleichzeitigen Einsatzes von Diesel-Bussen einerseits und Methanol-Bussen andererseits die in der nachstehenden Tabelle angeführten Beträge.

	MAN Diesel	MAN Methanol	DB Diesel	DB Methanol
Anschaffung Bus	238.714,--	238.714,--	261.214,--	261.214,--
Aufpreis Methanol- Ausrüstung	-	28.714,--	-	25.900,--
Methanol- Tankstelle	-	692,--	-	692,--
Methanol- Schulung	-	1.622,--	-	1.622,--
Gesamt:	238.714,--	269.828,--	261.214,--	289.428,--
=====				

8.1.2 LAUFENDE AUSGABEN WÄHREND DES BUS-BETRIEBES

Während des Bus-Betriebes fallen laufend Ausgaben für folgende Zwecke an:

- Kraftstoffverbrauch
- Schmiermittelverbrauch
- Reifenverschleiß
- Fahrzeugpflege
- Wartung/Reparaturen

Für die im folgenden angestellten Betrachtungen wird für beide Bus-Varianten beider Hersteller gleichermaßen eine jährliche Laufleistung von 55.000 km (was dem BVG-Durchschnitt entspricht) angenommen.

Kraftstoffverbrauch

Die Auswertung der erfaßten Meßdaten in den mit entsprechenden Geräten ausgerüsteten Methanol-Bussen und dem Vergleichs-Diesel-Bus ergab die in der nachstehenden Tabelle dargestellten auf den Kalenderjahren 1987 und 1988 basierenden Durchschnittswerte.

Der Liter-Preis für 'M100' (das mit verschiedenen Additiven versehene Methanol) betrug Mitte des Jahres 1988 DM 0,55, der von Diesel zum gleichen Zeitpunkt DM 0,70. Bei einer jährlichen Laufleistung von 55.000 km (s.o.) ergeben sich für die vier Bus-Varianten die folgenden jährlichen Kraftstoffkosten:

	MAN Diesel	MAN Methanol	DB Diesel	DB Methanol
Kraftstoff- verbrauch pro 100 km (l)	38,9	88,3	37,9	93,0
Kraftstoff- verbrauch pro Jahr (l)	21.395	48.565	20.845	51.150
Kraftstoffpreis pro l (DM)	0,70	0,55	0,70	0,55
Kraftstoff- kosten pro Jahr (DM)	14.976,50	26.710,75	14.591,50	28.132,50

Schmiermittelverbrauch

Die Auswertung der Aufzeichnungen über den Schmiermittelverbrauch der Methanol-Busse und der Vergleichs-Diesel-Bussen ergab basierend auf den Kalenderjahren 1987 und 1988 die in der nachstehenden Tabelle dargestellten Durchschnittswerte. In der Tabelle ebenfalls aufgeführt sind die Preise für die entsprechenden Schmiermittel (Stand: Mitte 1988).

	MAN Diesel	MAN Methanol	DB Diesel	DB Methanol
Schmiermittel- verbrauch pro 100 km	0,061	0,056 1	0,13 1	0,05 1
Schmiermittel- verbrauch pro Jahr	33,0 1	30,8 1	71,5 1	27,5 1
Schmiermittel- preis pro l (DM)	1,68	3,28	1,68	3,38
Schmiermittel- kosten pro Jahr (DM)	55,44	101,02	120,12	92,95

Reifenverschleiß

Der Reifenverschleiß ist bei allen Bus-Varianten bei gleicher Laufleistung gleich hoch und beträgt nach BVG-Angaben ca. DM 1.700,-- pro Jahr.

Fahrzeugpflege

Die Kosten für die Fahrzeugpflege betragen nach BVG-Angaben unterschiedslos für alle Bus-Varianten ca. DM 1.600,-- jährlich.

Wartung/Reparaturen

Die Aufwendungen für Wartung und Reparaturen betragen nach BVG-Angaben für einen Eindeck-Diesel-Bus mit einer Jahresfahrleistung von 55.000 km DM 34.800,-- pro Jahr. Für die Methanol-Busse lagen diese Aufwendungen während des Forschungsvorhabens wesentlich über diesem Betrag - und zwar am Anfang des Projektes in höherem Maße als gegen dessen Ende. Die Abnahme dieses Betrages ist durch die Erkenntnis und Beseitigung sogenannter 'Kinderkrankheiten' zu erklären, die absolute Höhe zum Teil auch durch die Tatsache, daß einzelne Methanol-Aggregate auch ohne Vorliegen eines Fehlers aus- und wieder eingebaut wurden, um zu Forschungszwecken Verschleiß oder andere Veränderungen zu erfassen. Da davon ausgegangen werden kann, daß der Methanol-Antrieb zu dem Zeitpunkt, da er im Alltagsbetrieb eingesetzt werden wird, einen weitergehenden Ausreifungsgrad erreicht haben wird, kann eine Angleichung der Wartungs/Reparaturkosten von Methanol-Bussen bis auf 6 % über denen von Dieselnbussen unterstellt werden (DM 36.900,--).

Zusammenfassend ergeben sich also als laufende Betriebsausgaben für die 4 Bus-Varianten die folgenden Beträge:

	MAN Diesel (DM)	MAN Methanol (DM)	DB Diesel (DM)	DB Methanol (DM)
Kraftstoff- verbrauch	14.976,50	26.710,76	14.591,50	28.132,50
Schmiermittel verbrauch	55,44	101,02	120,12	92,95
Reifen- verschleiß	1.700,--	1.700,--	1.700,--	1.700,--
Fahrzeugpflege	1.600,--	1.600,--	1.600,--	1.600,--
Wartung/ Reparatur	34.800,--	36.900,--	34.800,--	36.900,--
Gesamt pro Jahr:	53.131,94	67.011,78	52.811,62	68.425,45
	=====	=====	=====	=====

8.1.3 ERGEBNIS

Eine Aufstellung der gesamten aufgelaufenen Ausgaben für Anschaffung und Betrieb der vier Bus-Varianten über eine Einsatzdauer von 10 Jahren ist in der nachstehenden Tabelle erfolgt:

Da bei den Methanol-Bussen sowohl die Ausgaben vor dem eigentlichen Bus-Einsatz als auch die laufenden Betriebsausgaben größer als bei der Diesel-Version des gleichen Herstellers sind, existiert kein sogenannter Break-even-Point, ab welchem der Methanol-Betrieb betriebswirtschaftlich günstiger als der Diesel-Betrieb wäre. Eine gesamtwirtschaftliche Betrachtung unter Berücksichtigung sogenannter externer Effekte (insbesondere solche ökologischer Art) mag zu einem anderen Ergebnis führen.

Soll sich bei betriebswirtschaftlicher Betrachtung der Methanol-Betrieb nach Ablauf der abschreibungsüblichen acht Jahre gleich günstig wie der Diesel-Betrieb gestalten (bei unverändert hohen Ausgaben am Beginn der Einsatzdauer), so müßten die laufenden Kosten beim MAN-Methanol-Bus auf DM 49.242,75 jährlich gesenkt werden, was z.B. durch eine Reduzierung des Literpreises für den Methanol-Kraftstoff M100 von DM 0,55 auf DM 0,184 erreicht werden könnte. Im Falle der DB-Busse müßte der Preis für M100 auf DM 0,176 pro Liter gesenkt werden, um einen gleichen Effekt zu erzielen. Denkbar wäre auch der gegenläufige Weg, bei dem bei konstantem M100-Preis der Diesel-Preis angehoben wird. Um in diesem Fall nach acht Betriebsjahren die gleiche Wirtschaftlichkeit von Diesel- und Methanol-Betrieb zu erreichen, müßte der Literpreis für Diesel - bei gleichbleibendem M100-Preis - auf DM 1,531 (MAN-Busse) bzw. DM 1,618 (DB-Busse) steigen. Selbstverständlich wäre auch die Kombination aus Senkung des Methanol- und Anhebung des Diesel-Preises möglich.

	Ausgaben zu Beginn des Bus-einsatzes DM	Laufende Betriebsausgaben pro Jahr DM	Aufgelaufene Gesamtausgaben am Ende des									
			1. Jahres DM	2. Jahres DM	3. Jahres DM	4. Jahres DM	5. Jahres DM	6. Jahres DM	7. Jahres DM	8. Jahres DM	9. Jahres DM	10. Jahres DM
MAN-Diesel	238.714,00	53.131,94	291.846	344.978	398.110	451.242	504.374	557.506	610.638	663.770	716.901	770.033
MAN-Meth.	269.828,00	67.011,78	336.840	403.852	470.863	537.875	604.887	671.899	738.910	805.922	872.934	939.946
DB-Diesel	261.214,00	52.811,62	314.036	366.837	419.649	472.460	525.272	578.084	630.895	683.707	736.519	789.330
DB-Meth.	289.428,00	68.425,45	357.853	426.279	494.704	563.130	631.555	699.981	768.406	836.832	905.257	973.683