

Erdgasbusprojekt

Autoren

D. Ambühl, J. Fernandez



Betreuung

Institut für Mess- und Regeltechnik

Prof. Dr. L. Guzzella, Dr. Chr. Onder, P. Spring

ETH-Juniors

B. Bolinger, H. Hagenmüller

Auftraggeber

Bundesamt für Energie (BfE)

Herr M. Pulfer

Inhaltsverzeichnis

1 Aufgabenstellung	4
2 Einleitung	6
2.1 Erdgas	6
2.2 Situation in Glarus	8
2.3 Fahrzeuge	10
3 Umfrage	11
3.1 Kundenbefragung	11
3.2 Chauffeurbefragung	11
3.3 Resultate	11
3.4 Repetition der Befragung	13
4 Energieverbrauch	15
4.1 Gasanalyse	15
4.2 Erdgasbus VanHool	16
4.3 Mercedes Citaro	18
4.4 NAW Dieselbus	20
4.5 Resultate	21
4.6 Energiekosten	22
5 Messungen	23
5.1 Leistungsmessung	23
5.2 Lärmessungen	27
5.2.1 Durchführung	27
5.2.2 Resultate	28
5.3 Schadstoffemissionen	31
5.3.1 Literaturstudium	31
5.3.2 Zusammenfassung Literaturstudie	32
5.3.3 Innenraummessungen	33
6 Schlussfolgerungen	35
7 Literatur	37

Zusammenfassung

Im Kanton Glarus sind seit April 2002 zwei Erdgasbusse des Herstellers VanHool im Einsatz. Das Bundesamt für Energie (BfE) beauftragte über das Institut für Mess- und Regeltechnik an der ETH Zürich die ETH Juniors, einen Erfahrungsbericht des Einsatzes dieser Erdgasbusse zu erstellen.

Dieser Bericht stellt einerseits die gemachten Erfahrungen des Betreibers „Autobetriebe E. Niederer“ und andererseits einen Vergleich hinsichtlich Energieverbrauch, Leistung, Lärm- und Schadstoffemissionen von 3 verschiedenen Busfahrzeugen dar. Im Vergleich steht ein NAW Bus mit Mercedes Dieselmotor, ein Mercedes Citaro Bus mit Mercedes Dieselmotor und integriertem Russfiltersystem CRT und ein VanHool Bus mit MAN Erdgasmotor und Oxidationskatalysator.

Um die Erfahrungen des Betreibers sammeln zu können, wurde eine Umfrage durchgeführt. Dabei wurden sowohl der Betreiber als auch der Mechaniker und die Chauffeure befragt. Die Erfahrungen dieser Befragten waren unterschiedlich. Jedoch waren alle der Meinung, dass das Fahrzeug zu wenig reif gewesen war für eine Einführung. Viele kleinere Probleme, vor allem die Elektronik betreffend, sind am Anfang aufgetreten. Diese konnten mittlerweile jedoch mehrheitlich gelöst werden. Fahrtechnisch mussten sich die Chauffeure an ein anderes Beschleunigungsverhalten der Erdgasbusse anpassen. Beim Anfahren reagierte der Erdgasbus im Vergleich zu den Dieselbussen viel spritziger. Bei höheren Drehzahlen glich sich das wieder aus. Das Hauptmerkmal des Erdgasbusses ist für die Chauffeure die angenehme Fahrlage des Fahrzeuges.

Neben den Betreibererfahrungen wollte man auch erörtern, wie die Erdgasbusse von den Benutzern, den Kunden, akzeptiert wurden. Für diese Auswertungen wurden die Kunden direkt im Bus befragt. Die Kunden wussten grösstenteils, dass die Besonderheit des Erdgasbusses der Antriebstreibstoff war. Doch sowohl die positiven als auch negativen Kundenkritiken bezogen sich mehr auf die Inneneinrichtung und Platzgestaltung der Busse als auf das Antriebssystem der Fahrzeuge. Die Kunden sind zwar offen für ökologische Fahrzeuge und würden mehrheitlich auch dafür mehr zahlen, doch der Fahrkomfort und die Sitzplatzgestaltung stehen bei Ihnen im Vordergrund.

Um den Energieverbrauch der drei Fahrzeuge zu vergleichen, wurden die Fahrkartenschreiber ausgewertet. Damit konnte das Streckenprofil in Bezug auf die Beschleunigungen und Leerlaufzeiten der Busse charakterisiert werden. So konnte mathematisch abgeschätzt werden, wie hoch der Verbrauch des Mercedes Citaro und des NAW Fahrzeugs auf der Fahrroute des Erdgasbusses wäre. Die Gegenüberstellung zeigt, dass der Erdgasbus zwar 24% mehr Energie verbraucht, gegenüber den NAW-Bussen, bzw. 21% gegenüber dem Mercedes Citaro, jedoch nur 1% mehr CO₂ produziert als der NAW Bus, bzw. 2% weniger als der Mercedes Citaro. Dies ist eine gute Bilanz angesichts der höheren Masse und der strengeren Abgasnorm (Euro 3) des Erdgasbusses.

Um die Lärmemissionen der Fahrzeuge vergleichen zu können wurden Lärmessungen durchgeführt. Vier verschiedene Lärmessungen wurden gemacht: Fernmessung, Nahmessung und Messungen beim Anfahren jeweils innen und aussen.

Die Messungen zeigen, dass der Lärmpegel des Erdgasbusses im Vergleich zu den Dieselfahrzeugen NAW und Mercedes Citaro ausserhalb des Fahrzeuges zwischen 2.4 und 10.8 dB tiefer liegt (Ausnahme bei der Fernmessung Links beim Citaro). Die Messungen im Fahrzeuginneren zeigen ein anderes Bild. In diesem Fall ist der Lärmpegel des Erdgasbusses je nach Situation um 0.3 - 5.1 dB höher als beim Dieselfahrzeug NAW. Verglichen mit dem Citaro Dieselbus ist der Gasbus vorne im Innern bis 3 dB lauter, jedoch hinten im Innern 0.3 - 3.2 dB leiser. Bei den Messresultaten im Inneren des Fahrzeuges sollte man berücksichtigen, dass verschiedene Masse (Länge, Höhe, Motorlage) der Busse die Messungen beeinflussen können.

Im Vergleich zwischen Innen und Aussen kann man deutlichen erkennen, dass die Unterschiede im Innern nicht so hoch anfallen wie die Unterschiede ausserhalb der Fahrzeuge.

Verschiedene Studien, welche die Schadstoffemissionen von Gas- und Dieselbussen gemessen haben zeigen, dass die Emissionen von Partikeln und Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffen beim Gasbus praktisch null sind. NOx-Emissionen liegen deutlich tiefer als beim Dieselbus. Bei der CO₂-Produktion der Fahrzeuge teilen sich die Resultate. Bei einer Studie produziert der Gasbus ca. 6% weniger CO₂ als der Dieselbus und bei zwei anderen Untersuchungen produziert der Gasbus 2% respektive 9.5% mehr CO₂ als der Dieselbus.

Messungen im Fahrzeuginnenraum haben ergeben, dass die dortigen Konzentrationen an Kohlenmonoxid, Stickstoffdioxid und Methan unter der jeweiligen Messgrenze lagen. Das Messsystem wurde so gewählt, dass die untere Messgrenze weit unter dem MAK-Wert (maximale Arbeitsplatz-Konzentration) liegt.

1 Aufgabenstellung

Im Kanton Glarus sind herkömmliche Dieselbusse sowie 2 neue Euro3-Erdgasbusse im Einsatz. Das Bundesamt für Energie (BfE) hat dem Institut für Mess- und Regeltechnik (IMRT) der ETHZ den Auftrag gegeben, die Erfahrungen mit den Erdgasbussen auszuwerten und einen Vergleich mit den Dieselbussen in folgenden Punkten zu erstellen:

- Kundenakzeptanz
- Akzeptanz bei den Buschauffeuren
- Energieverbrauch
- Lärmemissionen
- Schadstoffemission

Kundenakzeptanz

Es werden Kunden befragt, welche sowohl die Dieselbusse als auch die neuen Erdgasbusse benützen. Die Erhebung wird im Bus durchgeführt, damit man ein möglichst reales Bild der Kundenmeinungen erhält. Um möglichst repräsentative Resultate zu erhalten, werden 50 Personen befragt.

Akzeptanz bei Buschauffeuren

Die Personen, die mit den Erdgasbus täglich fahren und somit vom technischen und fahrerischen Standpunkt die Fahrzeuge am besten kennen, sind die Chauffeure. Im Gegensatz zu den Kunden können die Chauffeure die Nachteile bzw. Vorteile des Fahrverhaltens und eventuell der Technik der Busse erläutern. Auch die Anzahl der Chauffeure (6), welche beide Fahrzeugtypen fahren, ermöglicht eine repräsentative Meinung zur Akzeptanz dieser Busse unter den Chauffeuren.

Energieverbrauch

In erster Linie geht es hier darum, reale Energieverbrauchswerte von den Erdgasbussen zu erhalten. Frühere Untersuchungen zeigten, dass Erdgasbusse einen höheren Energieverbrauch haben als Dieselbusse [1, Basel]. Mit diesen Berechnungen möchte man dieses Wissen für diesen speziellen Fall überprüfen und untersuchen, inwieweit der Energieverbrauch beider Fahrzeugtypen die Umwelt belastet (CO_2 Produktion).

Gasanalyse

Um diese Kalkulationen durchzuführen wird das benützte Erdgas analysiert. Einerseits wird so der Heizwert des Gases bestimmt, andererseits kann überprüft werden wie konstant die Qualität des Gases ist.

Lärmemissionen

Zum Vergleich der beiden Fahrzeugarten gehören auch Lärmessungen. Es werden bei verschiedenen Situationen (Stand, Anfahrt) die Lärmelastungen gemessen, jeweils innerhalb und ausserhalb des Fahrzeugs.

Schadstoffemissionen

Um die Vorteile von Erdgasbussen gegenüber Dieselbussen in Bezug auf die Umweltbelastung zeigen zu können, werden Schadstoffmessungen durchgeführt. Um einen guten Vergleich zu erhalten, werden beide Fahrzeugtypen unter den gleichen Bedingungen gemessen. Zusätzlich werden noch Innenraummessungen durchgeführt. Diese sollen beweisen, dass keine gesundheitsgefährdende Gase den Chauffeur und die Fahrgäste belasten.

2 Einleitung

In diesem Kapitel werden einige allgemeine Erläuterungen zum Thema Erdgas und Erdgasfahrzeuge gemacht. Schliesslich wird auch die Umgebung, in der die Erdgasbusse seit April 2002 eingesetzt werden, näher beschrieben. Am Ende dieses Kapitels werden die verschiedenen Fahrzeugtypen verglichen.

2.1 Erdgas

Entstehung

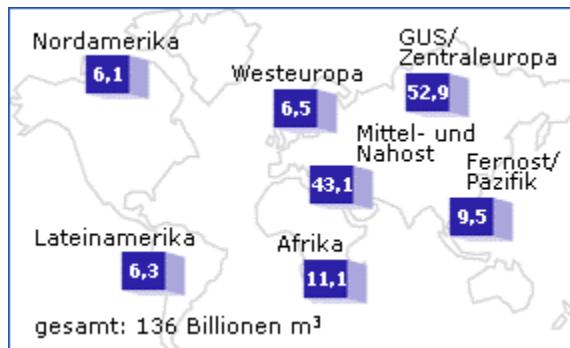
Alle Prozesse, an deren Ende Erdgas und Erdöl stehen, setzen mit der Entstehung des Lebens ein. In kleinen Anfängen vor etwa dreieinhalb Milliarden Jahren und im großen Umfang vor etwa zwei Milliarden Jahren [2].

Ausgangsbasis für das Erdöl waren mikroskopisch kleine Meereslebewesen: tierisches und pflanzliches Plankton. Starben diese Mikroorganismen, lagerten sie sich am Grunde flacher Meere ab. Mit der Zeit schoben die Flüsse Sand und Geröll (Sedimentation) darüber, so dass keine Luft mehr an das abgestorbene Plankton gelangte. Es entstand der so genannte Faulschlamm. Dieser Faulschlamm entwickelte sich über lange Zeiträume langsam zu Erdöl- und Erdgasmuttergestein. Mit Hilfe von Bakterien zersetzen sich die hierin eingeschlossenen, abgestorbenen Kleinstlebewesen. Genau wie bei der Kohle gelangt das Muttergestein durch weitere Überlagerungen von Gesteinsmaterial in größere Tiefen. Die dort herrschenden hohen Temperaturen und hohen Drücke führten dazu, dass sowohl das Erdöl als auch das Erdgas aus dem Muttergestein ausgepresst wurde und nach oben stieg, bis es auf eine undurchlässige Gesteinsschicht traf. Darunter sammelte es sich, im so genannten Speichergestein [2].

Erdgas wird nicht am Ort seiner Entstehung gefunden. Es wandert unter der Erde, bis bestimmte Gesteins-Strukturen das aufsteigende Gas am Entweichen hindern. Sie speichern das Erdgas in so genannten Erdgasfallen. Sandstein, Kalkstein, Ton- und Kieselschiefer, Riffe und Riffkalkschutt sowie Salzstücke sind gute Speichersteine. In diesen Schichten wird es dann schließlich gefördert.

Vorkommen

Bestimmte Regionen der Erde sind im Vorteil bei der Verteilung der Ressourcen. Die Übersicht zeigt die bedeutendsten Vorratsregionen der Welt [2].



Graphik 2.1.1: Erdgas-Vorräte der Welt, 1999 in Billionen m³

Reserven und Ressourcen

Wie lange die Erdgas-Vorräte reichen, hängt von verschiedenen Faktoren ab: Erstens gibt es noch unentdeckte Vorkommen. Zweitens hängt die Schätzung vom Welt-Verbrauch ab. Drittens sind Fortschritt und andere Energien einzubeziehen, die den Verbrauch reduzieren können. Als grobe Schätzung von Wissenschaftlern reichen die Vorkommen ca. 160 Jahre - inklusive aller bis dahin bekannten Reserven und Ressourcen [2].

Erdgas heute

Mit einem Anteil bis zu 99 % ist Methan (CH₄) der Hauptbestandteil von Erdgas. Methan ist ein Kohlenwasserstoff und besteht aus einem Kohlenstoffatom (C) und vier Wasserstoffatomen (H). Je mehr Methan in Erdgas enthalten ist, umso höher ist die Qualität, umso grösser ist der Brennwert. Neben Methan sind im Erdgas andere Gase wie Ethan, Propan und Butan anzutreffen [2].

Erdgas ist Primärenergie, d.h. dass es gasförmig, also bereits im Verbrennungszustand, per Leitung zum Verbraucher geliefert und ohne Umwandlungsverluste in Wärme umgesetzt wird. Es kommt hinzu, dass der Erdgastransport umweltfreundlich ist: Die weit verzweigten Versorgungsnetze bringen die Energie unterirdisch zum Verbraucher, ohne Belastung der öffentlichen Verkehrswege, ohne Störung der Natur und des Landschaftsbildes [2].

Zu unterscheiden sind im Wesentlichen zwei Erdgase: Erdgas L und Erdgas H. L steht für das englische Wort low (niedrig). Dieses Erdgas hat einen Brennwert von rund 10 kWh/m³ (im Normzustand). H steht für das englische Wort high (hoch). Dieses Erdgas hat einen Brennwert von rund 12 kWh/m³ (im Normzustand). In Tabelle 1 ist die chemische Zusammensetzung dieser zwei Gase aufgeführt [2].

Bestandteile	Erdgas L (%)	Erdgas H (%)	Kokereigas (%)
Methan	82	85,4	24,5
Ethan, Propan, Butan	4,2	11,9	2,6
Wasserstoff	-	-	57,5
Stickstoff	12,6	0,7	6,9
Sauerstoff	-	-	1
Kohlendioxid	1,2	2	2
Kohlenmonoxid	-	-	5,5

Tabelle 2.1.1: Die verschiedenen Erdgase und ihre Zusammensetzung

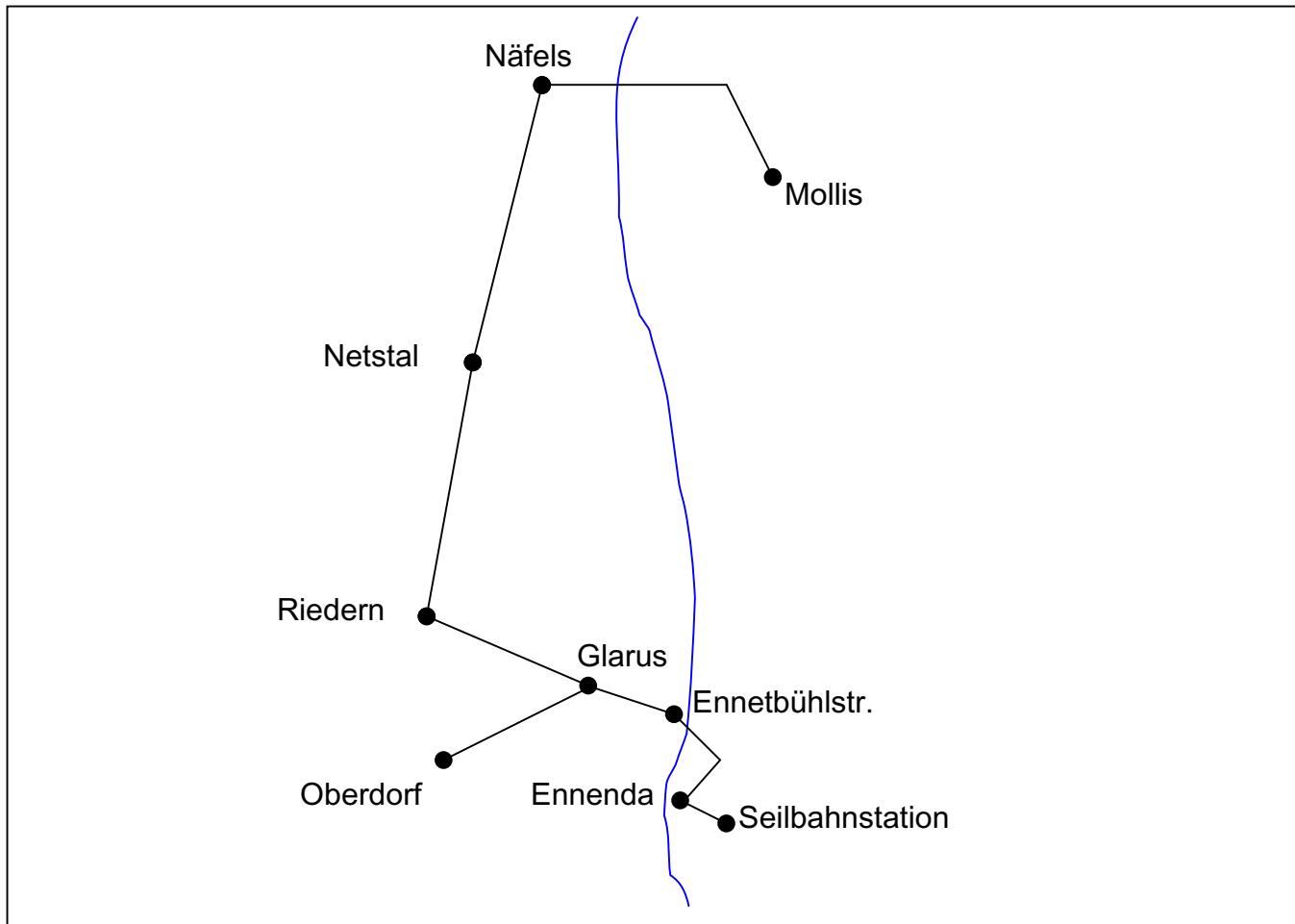
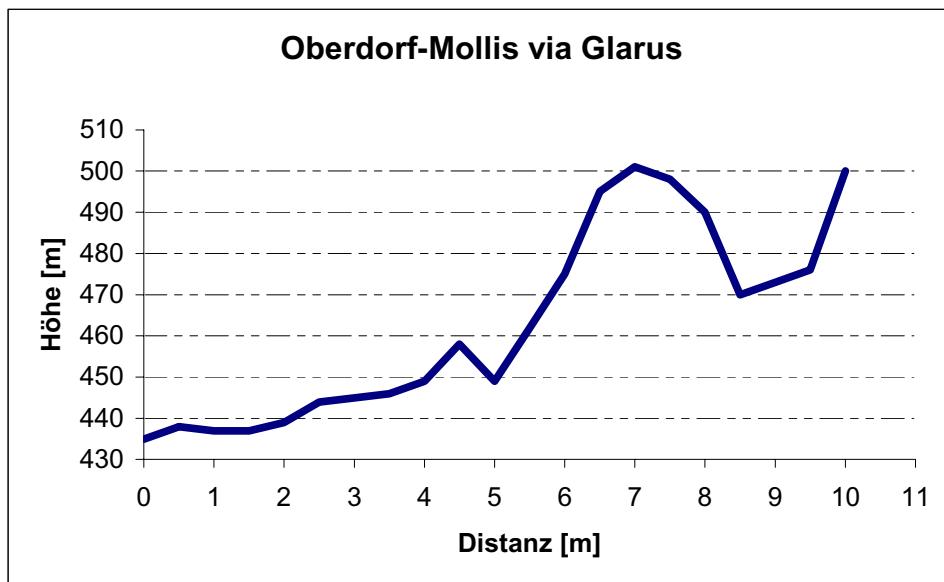
Erdgas ist aus dem modernen Leben nicht wegzudenken. Haushalt und Produktion, Gewerbe und Verkehr sind Nutznießer einer Energie, die viele Vorteile bietet.

2.2 Situation in Glarus

Die Autobetriebe Niederer betreiben im Mittelland und Unterland von Glarus die Busse, welche im öffentlichen Verkehr eingesetzt werden. Die Flotte besteht aus 4 Mercedes Citaro, 4 NAW Postautos und 2 neue VanHool Erdgasbusse. Die Erdgasbusse haben seit ihrer Einführung, April 2002, die NAW Postautos mehrheitlich ersetzt. Die NAW Postautos dienen jetzt als Ersatzautos oder als Schulbusse. Das Einsatzgebiet der Busse in Glarus ist folgendermassen aufgeteilt:

- Glarner Mitteland: Erdgasbusse
- Glarner Unterland: Mercedes Citaro
- Klöntal (Sommerbetrieb): NAW

Der Erdgasbus fährt einen bestimmten Rundkurs im Mittelland. Dieser Rundkurs dauert etwa 1 Stunde. Das Streckenprofil ist eben mit einigen leichten Steigungen zwischendurch. Der Ausgangspunkt ist Glarus Bahnhof. Von hier fährt der Bus sternförmig einmal nach Oberdorf und zurück und einmal nach Ennenda und wieder zurück nach Glarus. Nun fährt er in Richtung Netstal über Riedern. Von Netstal aus fährt er über Näfels bis nach Mollis. Mollis ist der Wendepunkt.

**Graphik 2.2.1:** Streckengraphik im Mitteland**Diagramm 2.2.1:** Höhendifferenz der Strecke Oberdorf - Mollis via Glarus

2.3 Fahrzeuge

Wie schon oben erwähnt, werden im Glarnermitteland und Unterland 3 Typen von Bussen verwendet: 4 Stück des typischen Postautos (NAW), vier Niederflurbusse Mercedes Citaro und die zwei Erdgasbusse VanHool/MAN. Beim Citaro handelt es sich um einen Dieselbus mit Russfilter während der VanHool ein Erdgasbus ist, ausgestattet mit einem MAN Erdgasmotor. In der unteren Aufstellung sind einige Eigenschaften der 3 Fahrzeuge aufgeführt.

	NAW Postauto	Mercedes Citaro	VanHool
Motor	Mercedes OM 447 Ha	Mercedes OM 457 hLA	MAN E2866 LUH 01
Russfilter	-	CRT Filter	-
Katalysator	Nein	-	Oxidationskat
Leistung	206 kW (280 PS) bei 2200 U/min	220 kW (299PS) bei 2000 U/min	228 kW (310 PS) bei 2000 U/min
Hubraum	11961 cm ³	11967 cm ³	11967 cm ³
Zylinderzahl	6 Zylinder in Reihe	6 Zylinder in Reihe	6 Zylinder in Reihe
Speziell	Abgasturbolader ohne Ladeluftkühlung	Abgasturbolader mit Ladeluftkühlung	Abgasturbolader mit Ladeluftkühlung
Max. Drehmoment	1225 Nm bei 1200 U/min	1250 Nm bei 1100 U/min	1250 Nm bei 1200-1600 U/min
Plätze	71 (41 Sitzplätze)	96 (40 Sitzplätze)	80 (26 Sitzplätze)
Länge	10 m	12 m	10,7 m
Leergewicht	10'260 kg	11'220 kg	12'760 kg
Abgasnorm	Euro 0	Euro 2	Euro 3

Tabelle 2.3.1: Eigenschaften der 3 Fahrzeuge

3 Umfrage

Wie schon in der Aufgabenstellung erwähnt, wurde zur Untersuchung der Kunden- und Chauffeureakzeptanz eine Umfrage durchgeführt. Innerhalb von zwei Tagen während der Kalenderwoche 2 wurden die vorbereiteten Fragen den Kunden und Chauffeuren gestellt. Im Anhang A sind die beiden Fragekataloge aufgeführt.

3.1 Kundenbefragung

Die Kundenbefragung wurde so ausgetragen, dass die Kunden im Bus direkt angesprochen wurden. Die Fragen sollten einfach und kurz beantwortet werden können. Mit einem Streichlistensystem wurden die Antworten auf dem Antwortenblatt festgehalten. Innerhalb dieser zwei Tage wurden 65 Personen verschiedener Berufsgattungen befragt.

3.2 Chauffeurbefragung

Im Gegensatz zu den Kunden, wurden für die Chauffeure mehr fahrtechnische Fragen aufgestellt. Die Anzahl der für die Umfrage in Frage kommenden Fahrer war schon von vornherein bestimmt. 6 Personen haben Fahrerfahrungen mit Dieselfahrzeugen oder Erdgasbussen. Von diesen 6 Personen sind 4 Chauffeure, einer Mechaniker und noch der Betreiber der Autobetriebe, Herr Niederer selbst.

3.3 Resultate

Aus den Auswertungen der Umfrage bei den Kunden (siehe Anhang A) geht hervor, dass 77% der befragten Kunden vom Erdgasbus Kenntnis hatten, wobei nur eine Minderheit (6%) bei der Einführungsfeier der Busse teilgenommen hat. Der grösste Teil der Busbenutzer haben einen Unterschied zwischen dem früheren und dem jetzigen Bus bemerkt. Am meisten aufgefallen ist den Leuten der unterschiedliche Einstieg (22%), der Platz (18%), die Sitzanordnung (16%) und Geräusch (16%).

Fast die Hälfte (49%) der befragten Personen findet den Erdgasbus besser. 18% sind unschlüssig und 33% bevorzugen den Dieselbus. Für den Erdgasbus spricht vor allem der niedrige Einstieg (24%), der Umweltaspekt (21%) und der niedrigere Lärm (14%). Für den Dieselbus spricht vor allem der Platz (38%), die Sitzanordnung (33%) und der Fahrkomfort (14%).

Die Einführung solcher Erdgasbusse wird positiv gesehen (77%) während nur 5% diese Einführung negativ finden. Vor allem wegen dem Umweltgedanken (62%) wird die Einführung positiv empfunden. Als negativ wird im Erdgasbus die Wärme bei heissen Tagen aufgrund fehlender Klimaanlage und der Fahrkomfort (Sitzanordnung, Platz) gewertet.

Mehr als die Hälfte der Befragten (57%) würden den Erdgasbus beibehalten, wenn sie die Wahl hätten. 17% würden den Diesel wieder einführen und den Restlichen ist es entweder gleichgültig oder sie hatten keine Meinung dazu.

Der Umweltgedanke selbst ist den befragten Menschen im Glarnerland tendenziell sehr wichtig (40%). Nur wenigen Befragten ist die Umwelt unwichtig oder egal (5%).

60% würden für die Garantie eines umweltschonenden Fahrzeugs auf bestimmte Sachen verzichten (Komfort, Luxus). Fast ein Drittel der Befragten (23%) würde auf nichts verzichten.

Obwohl die Preise schon relativ hoch sind, würden 55% der befragten Kunden mehr bezahlen für ein umweltfreundliches Fahrzeug, 18% sind dagegen und 27% unschlüssig.

Die Auswertung der Umfrage bei den Chauffeuren brachte folgende Schlüsse: Für alle 6 Fahrer ist ein Unterschied zwischen Dieselbus und Erdgasbus klar vorhanden. Vor allem ist das Gasgeben einer der grössten Unterschiede. Der Erdgasbus ist in dieser Hinsicht viel unruhiger, d.h. bei tiefen Drehzahlen reagiert er viel spritziger als der Diesel. Bei höheren Tourenzahlen ist es dann umgekehrt (Diesel hat mehr Kraft).

Die Mehrheit der Chauffeure (83%) findet die Einführung des Erdgasbusses positiv. Aus der Sicht der Fahrer liegen die positiven Aspekte des Erdgasbusses beim Lärm und bei der Umweltbelastung. Erfahrungen mit Velofahrern, die sehr spät auf den Bus reagierten oder Anwohnern von wenig befahrenen Regionen, die am Lärm bemerkten, dass der Erdgasbus durch das Postauto ersetzt wurde, zeigten den Chauffeuren, dass der Erdgasbus deutlich leiser ist als der Dieselbus.

Die grössten Probleme verursachte den Chauffeuren eindeutig die Elektronik (57%). Jedoch hat sich für 67% der Befragten der Erdgasbus seit der Einführung verbessert. Vor allem wurde die Zuverlässigkeit und somit die Elektronik verbessert. Auch die Gasverzögerung (Verzögerung Gaspedal betätigen / Fahrzeugbeschleunigung) des Erdgasbusses verbesserte sich.

Für 83% der Chauffeure hat der Erdgasbus eine Zukunft, falls eine gute Entwicklung und Konstruktion dahinter steht. 25% sehen den mit Erdgas betriebenen Bus als Alternative zum Dieselbus. 50% finden, dass der Umweltaspekt dem Erdgasbus eine gute Zukunft verspricht. Nachteilig sind die momentan leicht höheren Anschaffungs- und Unterhaltskosten der Erdgasbusse. Erdgas sollte aber in Zukunft auch in der Schweiz von zusätzlichen Steuervergünstigungen profitieren.

Was den Fahrern am Erdgasbus am meisten fehlt ist eine Klimaanlage (25%) und der Platz (25%). Sie würden auch die Tankanlage verbessern und vor allem den Verbrauch des Busses zu mindern versuchen.

Allen Chauffeuren ist die Umwelt wichtig bis sehr wichtig.

Wenn die Chauffeure die freie Wahl hätten, würden 33% den Dieselbus wieder einführen. 50% würden den Erdgasbus beibehalten und 16% würde ihn nur dann beibehalten, falls das Fahrzeug von nur einem Hersteller gebaut würde.

Zum Schluss wurden die Chauffeure über ihre Sorge bezüglich Gesundheitsaspekten wegen der Diesel-Schadstoffe befragt. Bei 2 von 6 Fahrern ist die Sorge gross, bei 3 mittel und bei einem wenig. Von den Schadstoffen schätzen sie vor allem die Partikel als am gefährlichsten für die Gesundheit ein.

Zusammenfassend kann man sagen, dass die Kunden positiv auf den Erdgasbus reagieren, aber sehr sensibel auf das Interieur der Busse sind. Die Busbenutzer realisieren, dass der Erdgasbus im Bezug auf die Umwelt etwas Positives ist und beziehen das Negative auf die Sitzanordnung und auf den Platz im Bus.

Bei den Chauffeuren lassen sich ähnliche Aussagen machen. Die Mehrheit findet die Einführung solcher Busse positiv hinsichtlich der Umwelt und der Lärmemissionen. Die erlebten Probleme wären für die Chauffeure mit einem guten Produkt (sprich ganzes Fahrzeug von einem Hersteller (MAN, Mercedes)) vermeidbar.

3.4 Repetition der Befragung

Die Umfrage wurde mit identischen Fragebögen ein Jahr später wiederholt um eine Veränderung in der Haltung der Kunden und Chauffeure gegenüber den Gasbussen zu untersuchen. Befragt wurden am 10.02.2004 drei Chauffeure und 28 Kunden. Die Auswertung der Formulare (siehe Anhang A) zeigt folgende Resultate:

61% der befragten Kunden wussten, dass sie in einem erdgasbetriebenen Bus sitzen, nur 7% waren jedoch an der Einführungsfeier dieser Busse. Einen Unterschied zwischen Gas- und Dieselbus bemerkten etwas mehr als die Hälfte (57%) der Kunden, 32% bemerkten nichts, der Rest war sich nicht sicher. Die bemerkten Unterschiede waren selten auf den Antrieb bezogen. Aufgefallen war mit 29% der tiefe Einstieg, der geringere Platz (19%), die Sitze, der Fahrkomfort und allgemein die Inneneinrichtung mit je 14%. Weniger Geräusch und technische Probleme wurden jeweils von 5% der Befragten bemerkt.

Der Gasbus wurde von rund einem Drittel favorisiert (29%), 25% finden den Dieselbus besser und eine Mehrheit von 46% konnte sich nicht entscheiden. Im Dieselbus wurden vor allem die Sitze (50%) und der Platz (37%) gelobt, 13% bevorzugten diesen, weil er weniger Pannen aufweist. Der Gasbus ist vor allem beliebt wegen seinem tiefen Einstieg (54%), dem Fahrkomfort (15%), dem Platz (15%) und der Sitze (8%). Bezuglich des Antriebes hat niemand Unterschiede bemerkt.

Am Erdgasbus fällt den Kunden am meisten der Einstieg auf (30%), die hohen Absätze im Fahrzeug (25%), die Sitze (15%), die Inneneinrichtung (10%) und mit je 5% der Fahrkomfort, das Geräusch, technische Probleme und die bediente Strecke.

Dass Erdgasbusse eingeführt wurden bewerten 54% als positiv, 18% als negativ und 28% spielt die Einführung keine Rolle. Positiv bewertet an der Einführung der Gasbusse wird, dass sie als umweltfreundlich gelten (29%), deren Komfort und Einstieg (je 11%) und die Sitze (7%). Die Kunden die gegen die Einführung sind, bemängeln vor allem die Sitze (hart, viele rückwärts zur Fahrtrichtung) und die Pannen der Fahrzeuge (14%).

Die alten Dieselbusse wünschen sich rund 14% der Kunden zurück, 50% sind mit den neuen Bussen zufrieden, der Rest ist unschlüssig bzw. weiß es nicht.

Die Umwelt ist der Hälfte der Befragten wichtig (53%), sehr wichtig für 18%, mittel wichtig für 25% und 4% gaben an, die Umwelt sei ihnen wenig wichtig. Trotzdem möchte die Mehrheit (61%) nicht auf Komfort verzichten und 64% würden nicht mehr für ihr Billett bezahlen zugunsten eines umweltfreundlichen Fahrzeuges.

Alle drei befragten Chauffeure bemerkten deutliche Unterschiede zum alten Dieselbus. Beim Anfahren sei der Erdgasbus bedingt durch die Getriebeeinstellung unruhiger. Der Komfort des Arbeitsplatzes sei höher (nach der Modifikation des Sessels) allerdings fehle in der Ausstattung die Klimaanlage und eine Kommunikationsmöglichkeit Fahrer-Passagiere.

Zwei der drei befragten Chauffeure finden die Einführung der Gasbusse positiv. Dies speziell auf Umweltschutz und Komfort bezogen. Negativ bewertet werden die Pannen, die meist von der Elektronik ausgehen. Diese seien jedoch weniger häufig als kurz nach der Einführung. Die Chauffeure finden Erdgasbusse prinzipiell sinnvoll, dies vor allem aufgrund tieferer Emissionen und der vorhandenen Ressourcen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass der Erdgasantrieb den Kunden nicht auffällt, sondern eher die Inneneinrichtung des Busses. Bemängelt wird vor allem die Anordnung der Sitzmöglichkeiten. Positiv fällt den Kunden hauptsächlich der tiefe Einstieg auf. Dies lässt darauf schliessen, dass die Fahrgäste mit dem Antrieb zufrieden sind.

Die Chauffeure sind mit dem Antrieb an sich auch zufrieden und finden Erdgas als Treibstoff sinnvoll. Allerdings sind sie von dem vorliegenden Produkt nicht überzeugt, da viele elektronische Probleme auftreten. Die fehlende Klimaanlage stört die Chauffeure stark, da sie im Sommer stark unter der Hitze leiden, was ihre Konzentration beeinträchtigt.

Ein Vergleich der beiden Umfragen muss mit Vorsicht gemacht werden, da diese von zwei verschiedenen Personen durchgeführt wurden und die Antworten oft stark von der Formulierung der Frage abhängen.

Aus beiden Umfragen ist erkennbar, dass die Fahrgäste vom Antrieb wenig bemerken und sich mehr auf die Inneneinrichtung konzentrieren. In der ersten Umfrage wurde wesentlich häufiger angegeben, dass der Erdgasbus leiser ist. In der zweiten Umfrage erwähnten die Fahrgäste das Geräusch praktisch nie. Es scheint, man habe sich an den leisen Erdgasbus gewöhnt und bemerkt so diesen Vorteil nicht mehr. Auch der Tankaufbau auf dem Dach ist in der ersten Befragung oft erwähnt worden im Gegensatz zur Zweitumfrage. Dies wird auch auf die Gewohnheit zurückzuführen sein.

4 Energieverbrauch

Um den Energieverbrauch zu bestimmen, wurde aus den Fahrzeuggbüchern die gefahrenen Kilometer und der getankte Kraftstoff (Diesel, Erdgas) über eine bestimmte Zeitperiode bestimmt. Da nur zwei (NAW, VanHool) von den drei zu vergleichenden Fahrzeugen die gleiche Strecke fahren, wurde zusätzlich der Verbrauch auch durch Simulationsrechnungen bestimmt. Für diese theoretischen Berechnungen wurden die Kartenschreiber der Fahrzeuge (Citaro, VanHool) benutzt. Mit Hilfe dieser Kartenschreiber konnte das Streckenprofil der entsprechenden Busse beschrieben und damit der theoretische Verbrauch über dieses Streckenprofil berechnet werden. Es muss darauf hingewiesen werden, dass die Auswertung der Fahrkartenschreiber nur schwer zu bewerkstelligen war. Deshalb sollten diese Zahlen mit Vorsicht betrachtet werden.

Um schliesslich einen Energievergleich zwischen den 3 Bussen zu erhalten, wurde mathematisch simuliert, wie hoch der Verbrauch des Mercedes Citaro Busses auf dem Streckenprofil des VanHool-Busses wäre.

4.1 Gasanalyse

Da die Gasqualität für ein optimales Funktionieren des Erdgasmotors von grosser Wichtigkeit ist, wurde beschlossen, das Erdgas in Glarus zu untersuchen. Um die Zusammensetzung und Qualität des Gases zu bestimmen, wurde das Erdgas direkt vom Zapfhahn der Tankstelle abgenommen und in speziellen Behältern (sog. Mäuse) gesammelt. Die zwei Gasproben wurden im Stadtteil Bern untersucht.

Resultate

In nachfolgender Tabelle sind die Ergebnisse der zwei Gasproben aufgelistet.

Erdgasprobe am Zapfhahn / Gastankstelle Glarus					
Probe 1 (31. Jan 2003)		Probe 2 (12. Feb 2003)			
Dichte :	0.7891 kg/m ³	Dichte :	0.8000 kg/m ³		
oberer Heizwert :	11.397 kWh/m ³	oberer Heizwert :	11.486 kWh/m ³		
unterer Heizwert :	10.259 kWh/m ³	unterer Heizwert :	10.343 kWh/m ³		
oberer Heizwert :	51.99 MJ/kg	oberer Heizwert :	51.69 MJ/kg		
unterer Heizwert :	46.8 MJ/kg	unterer Heizwert :	46.54 MJ/kg		
Methan	[Vol %]	91.43	Methan	[Vol %]	90.47
Ethan	[Vol %]	4.113	Ethan	[Vol %]	4.517
Propan	[Vol %]	1.091	Propan	[Vol %]	1.229
i-Butan	[Vol %]	0.155	i-Butan	[Vol %]	0.188
Butan	[Vol %]	0.173	Butan	[Vol %]	0.234
i-Pentan	[Vol %]	0.035	i-Pentan	[Vol %]	0.065
Pentan	[Vol %]	0.027	Pentan	[Vol %]	0.059
Hexane	[Vol %]	0.005	Hexane	[Vol %]	0.031
CO ₂	[Vol %]	0.958	CO ₂	[Vol %]	1.082
Luft	[Vol %]	2.009	Luft	[Vol %]	2.127

Tabelle 4.1.1: Resultate der zwei Gasproben

Vergleicht man die zwei Gasproben, sind die Ergebnisse praktisch gleich. Die Dichte von Probe 1 weicht um 1.4% von der Dichte der Probe 2 ab. Bei den Heizwerten weichen die Ergebnisse der zwei Proben noch weniger ab (0.6%). Demzufolge kann man davon ausgehen, dass die Qualität des Gases konstant gut ist.

4.2 Erdgasbus VanHool

Gemäss Rapportbuch erhält man für den Erdgasbus für folgende Monate nachstehenden Verbrauch:

	kg Erdgas	km	kg/100km
Mitte März02-April02	2405.75	5128	46.91
Mai 02 - Juni 02	5141.89	11188	45.96
Jul 02	2548.69	5711	44.63
Aug 02	3097.96	6524	47.49
Sep 02	2413.54	5370	44.94
Okt 02	2760.87	5883	46.93
Dez 02	1523.63	3267	46.64
Jan 03	1868.55	4115	45.41
Total	21760.88	47186	46.12

Tabelle 4.2.1: Erdgasverbrauch des VanHool Busses gemäss Rapportbuch

Aus den Rapportbüchern ergibt sich ein durchschnittlicher Verbrauch über fast ein ganzes Jahr von ca. $46 \text{ kg}_{\text{Erdgas}}/100\text{km}$. Bei einem Heizwert von 46.67 MJ/kg erhält man einen Energieverbrauch von $2152 \text{ MJ}/100\text{km}$. Dabei produziert der Erdgasbus mit diesem Energieverbrauch 127kg CO_2 pro 100 Kilometer.

Um das Streckenprofil des Erdgasbusses mit Hilfe der Fahrkartenschreiber zu charakterisieren, wurden die Anzahl Beschleunigungen von $0-30 \text{ km/h}$, $0-50 \text{ km/h}$ und die Leerlaufzeit bestimmt. Der Fahrzyklus beinhaltet 216 Beschleunigungen von $0-30 \text{ km/h}$, 116 Beschleunigungen von $0-50 \text{ km/h}$ und eine Leerlaufzeit von 11200 Sekunden. Die gefahrene Strecke an diesem Tag betrug 96 km.

Mit dieser Streckencharakterisierung und den theoretischen Überlegungen von Anhang B erhält man für den Erdgasbus VanHool folgenden theoretischen Verbrauch:

VanHool	$E_{\text{a A}}$ [MJ]	$E_{\text{r A}}$ [MJ]	E_{kin} [MJ]	E_{totkin} [MJ]	E_{verl} [MJ]	E_{fuel} [MJ]	P_{mL1} [kW]	P_{mL2} [kW]	E_{mL1} [MJ]	E_{mL2} [MJ]	$E_{\text{totalLeerl}}$ [MJ]	E_{tot} [MJ]
0-30 km/h	3.08		0.443	95.70								
0-50 km/h	4.91	48.07	1.231	142.76	8	703.54	11.97	17.95	300.57	1051.98	1352.55	2056
Total: $45.89 \text{ kg}_{\text{Erdgas}}/100\text{km}$												
Rapportbuch: $46.12 \text{ kg}_{\text{Erdgas}}/100\text{km}$												
$x = 0.5\%$												

Tabelle 4.2.2: Theoretischer Verbrauch des Erdgasbusses

Bei diesen Berechnungen wurden nachstehende Parameter angenommen:

	$x_{\text{tot km}}$	ρ_L [kg/m ³]	A_f [m ₂]	c_w	m_f [kg]	g [m/s]	c_r	V_h [cm ³]	p_{me0} [bar]	e	v_{mittel} [km/h]
0-30 km/h	61000	1.293	7.500	0.6	12760	9.810	0.008	11967	0.150	0.43	15
0-50 km/h	35000	1.293	7.500	0.6	12760	9.810	0.008	11967	0.150	0.43	25

Tabelle 4.1.3: Angenommene Parameter für den Erdgasbus

Vergleicht man den theoretischen Verbrauch mit dem tatsächlichen Verbrauch an diesem Tag ($46.12 \text{ kg}_{\text{Erdgas}}/100\text{km}$), so liegt der theoretische Verbrauch 0.5% tiefer als der tatsächliche Verbrauch des Erdgasbusses. Der berechnete Verbrauch stimmt gut mit dem gemessenen überein.

Somit produziert der Erdgasbus von **VanHool 125.9 kg CO₂ pro 100 Kilometer** (berechnet auf Referenzstrecke).

4.3 Mercedes Citaro

Für den Mercedes Citaro erhält man für folgende Monate nachstehenden Verbrauch gemäss Fahrzeugbüchern:

	Liter Diesel	Km	l/100km
Jul 02	8156	24627	33.12
Aug 02	7289	22283	32.71
Sep 02	7918	23054	34.35
Okt 02	7846	23592	33.26
Nov 02	8521	23027	37.00
Dez 02	8379	23523	35.62
Total	48108.9	140106	34.34

Tabelle 4.3.1: Dieselverbrauch des Citaro Busses gemäss Rapportbuch

Aus den Rapportbüchern ergibt sich ein Verbrauch für die Monate Juli bis Dezember 2002 von ca. 34 l_{Diesel}/100km. Mit einem Heizwert von 43.4 MJ/kg erhält man einen Energieverbrauch von 1248 MJ/100km. Dabei produzierte der Mercedes Citaro 90kg CO₂ pro 100 Kilometer auf der gefahrenen Strecke.

Um das Streckenprofil des Mercedes Citaro mit Hilfe der Fahrkartenschreiber zu charakterisieren, wurden die Anzahl Beschleunigungen von 0-30 km/h, 0-50 km/h, 0-70 km/h und die Leerlaufzeit bestimmt. Der Fahrzyklus beinhaltet 108 Beschleunigungen von 0-30 km/h, 306 Beschleunigungen von 0-50 km/h, 54 Beschleunigungen von 0-70 km/h und eine Leerlaufzeit von 6090 Sekunden. Die gefahrene Strecke an diesem Tag betrug 270km.

Mit dieser Streckencharakterisierung und den theoretischen Überlegungen von Anhang B erhält man für den Dieselbus Mercedes Citaro folgenden theoretischen Verbrauch:

Citaro	E _{a A} [MJ]	E _{r A} [MJ]	E _{kin} [MJ]	E _{totkin} [MJ]	E _{verl} [MJ]	E _{fuel} [MJ]	P _{mL1} [kW]	P _{mL2} [kW]	E _{ml1} [MJ]	E _{ml2} [MJ]	E _{totalLeerl} [MJ]	E _{total} [MJ]
0-30 km/h	3.06		0.39	42.08								
0-50 km/h	25.04	118.87	1.08	331.15	10.50	1520.36	22.26	14.36	136.26	1478.79	1615	3135
0-70 km/h	8.52		2.12	114.54								
Total: 31.95 l_{Diesel}/100km												
X = 6.96%												
Rapportbuch: 34.34 l_{Diesel}/100km												

Tabelle 4.3.2: Theoretischer Verbrauch des Dieselbusses Citaro

Für diese Berechnungen wurden folgende Parameter eingesetzt:

	x_{tot} [m]	ρ_L [kg/m ³]	A_f [m ₂]	c_w	m_f [kg]	g [m/s]	c_r	V_h [cm ³]	p_{me0} [bar]	e	v_{mittel} [km/h]
0-30 km/h	60500	1.293	7.500	0.600	11220	9.810	0.008	11967	0.120	0.43	15
0-50 km/h	178500	1.293	7.500	0.600	11220	9.810	0.008	11967	0.120	0.43	25
0-70 km/h	31000	1.293	7.500	0.600	11220	9.810	0.008	11967	0.120	0.43	35

Tabelle 4.3.3: Angenommene Parameter beim Dieselbus Citaro

Vergleicht man den theoretischen Verbrauch des Dieselfahrzeuges mit dem tatsächlichen Verbrauch an diesem Tag (34.34 l_{Diesel}/100km), so liegt der theoretische Verbrauch um 6.96% tiefer als der tatsächliche Verbrauch des Dieselbusses an diesem Tag ab. Auch hier stimmen die Berechnungen mit den angenommenen Parametern gut mit dem Rapportbuchverbrauch überein.

Um die Verbrauchswerte des Mercedes Citaro mit den beiden anderen Fahrzeugen (VanHool, NAW) korrekt vergleichen zu können sollte der Mercedes Citaro die gleiche Strecke wie die beiden anderen Fahrzeuge abfahren. Mit den theoretischen Berechnungen kann man diesen Zustand simulieren, indem man die Streckencharakterisierung des Erdgasbusses und die Fahrzeugparameter des Mercedes Citaro annimmt. Dies ergibt somit den theoretischen Dieserverbrauch des Mercedes Citaro auf der Fahrroute des Erdgasbusses. In Tabelle 4.3.4 ist das Resultat dieser Simulation ersichtlich.

	E_{aA} [MJ]	E_{rA} [MJ]	E_{kin} [MJ]	E_{totkin} [MJ]	E_{verl} [MJ]	E_{fuel} [MJ]	P_{mL1} [kW]	P_{mL2} [kW]	E_{mL1} [MJ]	E_{mL2} [MJ]	$E_{totalLeerl}$ [MJ]	E_{total} [MJ]
0-30 km/h	3.08		0.390	84.15								
0-50 km/h	4.91	42.27	1.082	125.53	8	623.12	9.57	14.36	240.45	841.59	1082.04	1705
Total: 48.87 l_{Diesel}/100km												

Tabelle 4.3.4: Theoretischer Verbrauch des Dieselbusses Citaro auf Streckenprofil des Erdgasbusses

Diese Ergebnisse wurden mit folgenden angenommenen Parametern berechnet:

	x_{tot} [m]	ρ_L [kg/m ³]	A_f [m ₂]	c_w	m_f [kg]	g [m/s]	c_{r1}	V_h [cm ³]	p_{me0} [bar]	e	v_{mittel} [km/h]
0-30 km/h	61000	1.293	7.500	0.600	11220	9.810	0.008	11967	0.120	0.43	15
0-50 km/h	35000	1.293	7.500	0.600	11220	9.810	0.008	11967	0.120	0.43	25

Tabelle 4.3.5: Angenommene Parameter beim Dieselbus Citaro

Mit einem unteren Heizwert von 43.4 MJ/kg erhält man somit einen berechneten Energieverbrauch von 1776 MJ/100km. Dabei produziert der **Mercedes Citaro** mit diesem Energieverbrauch **128.4 kg CO₂ pro 100 Kilometer** (berechnet auf Referenzstrecke).

4.4 NAW Dieselbus

Bevor der Erdgasbus im Glarnerland eingesetzt wurde, fuhren die NAW Dieselbusse während dem Winter (November-Februar) die gleiche Strecke ab. Um einen gültigen Verbrauchsvergleich zu erhalten, werden deshalb die Verbrauchsdaten aus jener Zeit berücksichtigt. Man erhält für den Dieselverbrauch gemäss Rapportbücher folgenden Zahlen

	Liter Diesel	Km	l/100km
Nov 01	2895	5889.00	49.16
Dez 01	2255	5094.00	44.27
Jan 02	2979	5989.00	49.74
Feb 02	2448	5658.00	43.27
Mrz 02	2626	5541.00	47.39
Total	13203	28171	46.87

Tabelle 4.4.1: Dieselverbrauch des NAW Busses gemäss Rapportbuch

Um die Resultate mit den theoretischen Verbrauchsberechnungen vergleichen zu können, wurde auch für das NAW Dieselfahrzeug der Verbrauch auf dem Streckenprofil des Erdgasbusses simuliert. In Tabelle 4.4.2 sind die Resultate dieser Berechnung aufgeführt.

	E _{a A} [MJ]	E _{r A} [MJ]	E _{kin} [MJ]	E _{totkin} [MJ]	E _{verl} [MJ]	E _{fuel} [MJ]	P _{mL1} [kW]	P _{mL2} [kW]	E _{ml1} [MJ]	E _{ml2} [MJ]	E _{totalLeerl} [MJ]	E _{total} [MJ]
0-30 km/h	3.08	38.65	0.36	76.95								
0-50 km/h	4.91		0.99	114.79	8.00	572.98	9.57	14.35	240.33	841.16	1081.50	1655
Total: 47.42 l_{Diesel}/100km												

Tabelle 4.4.2: Theoretischer Verbrauch des Dieselbusses NAW auf Streckenprofil des Erdgasbusses

Für die Berechnungen wurden folgende Parameter angenommen:

	x_{tot} [m]	ρ_L [kg/m ³]	A_f [m ²]	c_w	m_f [kg]	g [m/s]	c_{r1}	V_h [cm ³]	p_{me0} [bar]	e	v_{mittel} [km/h]
0-30 km/h	61000	1.293	7.500	0.600	10260	9.810	0.008	11961	0.120	0.43	15
0-50 km/h	35000	1.293	7.500	0.600	10260	9.810	0.008	11961	0.120	0.43	25

Tabelle 4.4.3: Angenommene Parameter beim Dieselbus NAW

Für den NAW erhält man mit einem Heizwert von 43.4 MJ/kg einen Energieverbrauch von 1723 MJ/100km. Dabei produziert der **NAW** Dieselbus mit diesem Energieverbrauch **124.6 kg CO₂ pro 100 Kilometer** (berechnet auf Referenzstrecke).

4.5 Resultate

In der Tabelle 4.5.1 sind einige angenommene, chemische Eigenschaften der zwei Treibstoffe und Kohlendioxid aufgelistet. Es ist zu erkennen, dass Erdgas ~19% weniger CO₂ pro Energieeinheit produziert als Diesel. Dieser Vorteil wird allerdings durch den tieferen Wirkungsgrad des Gasmotors gegenüber dem Dieselmotor teilweise kompensiert.

	Diesel	Erdgas	CO ₂
Dichte [kg/l]	0.8375	0.000717	
Heizwert [MJ/kg]	43.4	46.67	
Molmasse [g/mol]	112.208	16.042	44.01
CO ₂ Produktion	1mol C ₈ H ₁₆ → 8 mol CO ₂	1mol CH ₄ → 1 mol CO ₂	
CO ₂ Produktion [g/MJ]	72.3	58.8	

Tabelle 4.5.1: Angenommene chemische Eigenschaften für Diesel, Erdgas und CO₂

In Tabelle 4.5.2 sind alle Verbrauchsresultate der drei Fahrzeuge nochmals zusammengefasst. Im Vergleich stehen die Verbrauchszahlen bei gleichem Streckenprofil.

	NAW	Mercedes Citaro	VanHool/MAN
Theorie Verbrauch	47.42 l _{Diesel} /100km	48.87 l _{Diesel} /100km	45.89 kg _{Erdgas} /100km
Masse Verbrauch	39.71 kg _{Diesel} /100km	40.93 kg _{Diesel} /100km	45.89 kg _{Erdgas} /100km
Energie Verbrauch	1723 MJ/100km	1776 MJ/100km	2142 MJ/100km
CO ₂ Produktion	124.6 kg _{CO₂} /100km	128.4 kg _{CO₂} /100km	125.9 kg _{CO₂} /100km

Tabelle 4.5.2: Energieverbrauch und CO₂-Produktion der 3 Busse

Der Erdgasbus verbraucht rund 19% mehr Energie pro 100 Kilometer als das NAW Postauto respektive 16% mehr als der Mercedes Citaro. Dies ist bedingt durch die höhere Masse des VanHool Busses, aber auch durch den, im Vergleich zum Dieselmotor, tieferen Wirkungsgrad eines Erdgasmotors.

Betreffend CO₂-Emissionen haben alle drei Fahrzeuge ähnliche Werte auf 100 km. Das NAW Postauto emittiert rund 1% weniger, der Mercedes Citaro rund 2% mehr CO₂ als der VanHool Erdgasbus.

Berücksichtigt man, dass der Erdgasbus die Abgasnorm Euro3 erfüllt, der Citaro hingegen nur Euro2 so spricht das stark für den Gasbus, weil so die Schadstoffemissionen gesenkt wurden ohne einen erhöhten CO₂-Ausstoss in Kauf nehmen zu müssen. Zusätzlich dürfen die verschiedenen Massen der Fahrzeuge nicht vergessen werden.

4.6 Energiekosten

Die Treibstoffkosten der jeweiligen Fahrzeuge sind in Tabelle 4.5.1 aufgeführt. Es werden drei Treibstoffarten unterschieden: Diesel mit Schwefelgehalt 350 ppm „1“, Diesel mit Schwefelgehalt 20/50 ppm „2“ und Erdgas.

	NAW	Mercedes Citaro	VanHool/MAN
Treibstoffpreis [Rp./l]	143.5 „1“	145.5 „2“	-
Treibstoffpreis [Rp./kg]	171.3	173.7	185 (119)
Treibstoffpreis [Rp./MJ]	3.9	4.0	3.7 (2.4)
Treibstoffkosten [CHF/100km]	68.0	71.1	84.9 (54.6)

Tabelle 4.6.1: Treibstoffkosten der 3 Busse, in Klammer abzüglich Treibstoffsteuer

Man sollte berücksichtigen, dass die Dieselpreise je nach Monat schwanken. Mit diesen hier aufgeführten Preisen, ist der NAW mit ca. 68.-CHF auf 100 km der kostengünstigste Treibstoffverbraucher. Die Treibstoffkosten pro 100 Kilometer sind beim NAW etwa 20% und beim Citaro um 16% tiefer im Vergleich zum Erdgasbus. Beachtet man jedoch, dass beim Erdgas die Treibstoffsteuer zurückgefordert werden kann (bei Fahrzeugen des ÖV's wird die Treibstoffsteuer vom Gaswerk nicht abgezogen im Unterschied zu Privatpersonen mit PW's), so erhält man einen Treibstoffpreis für das Erdgas von 119 Rp./kg. Dies entspricht einem Preis von rund 55.-CHF auf 100 Kilometer. So gerechnet sind die Treibstoffkosten pro 100 km beim NAW-Dieselfahrzeug ca. 20% und Mercedes Citaro ca. 23% höher als beim VanHool Erdgasbus.

5 Messungen

Die Messungen sollen aufzeigen, wie gut die Fahrzeuge in den verschiedenen Aspekten wie Leistung/Kraft und Lärmemissionen abschneiden. Mit diesen Ergebnissen lassen sich wieder Vergleiche zwischen den Fahrzeugen ziehen.

5.1 Leistungsmessung

Es wurden für die 3 Fahrzeugtypen (Dieselbus, Dieselbus mit Russfilter und Erdgasbus) bei der Larag folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Leistungsprüfung bei Vollast
- Drehmomentmessung
- Verbrauchsmessung der Dieselfahrzeuge
- Rauchtrübungsmessungen

Die Leistungsprüfungen wurden so geführt, dass bei Vollast während 40 Sekunden die Drehzahl konstant gehalten wurde. Zuerst wurde während 15 Sekunden die Leistung gehalten, um dann während den restlichen 25 Sekunden zu messen. Die gemessenen Werte der letzten 25 Sekunden wurden gemittelt, um so den endgültigen Messpunkt zu erhalten. Auf diese Weise wurden 8 verschiedene Messpunkte bestimmt (beim NAW Postauto wurden 12 Messpunkte bestimmt).

Zuerst wurde die Radleistung (P_{Rad}) am Fahrzeug gemessen. Als nächstes wurde mit einem Ausrollversuch die Verlustleistung bestimmt. Durch Addieren der Verlustleistung zur Radleistung erhält man die Motorleistung (P_{Mot}). Das Programm berechnet durch Berücksichtigung der Klimadaten die korrigierte Leistung (P_{Kor}) aus der Motorleistung.

Motorleistung

Man sieht im Diagramm 5.1.1 die Motorleistungen der 3 getesteten Fahrzeuge (NAW Postauto, Mercedes Citaro, VanHool).

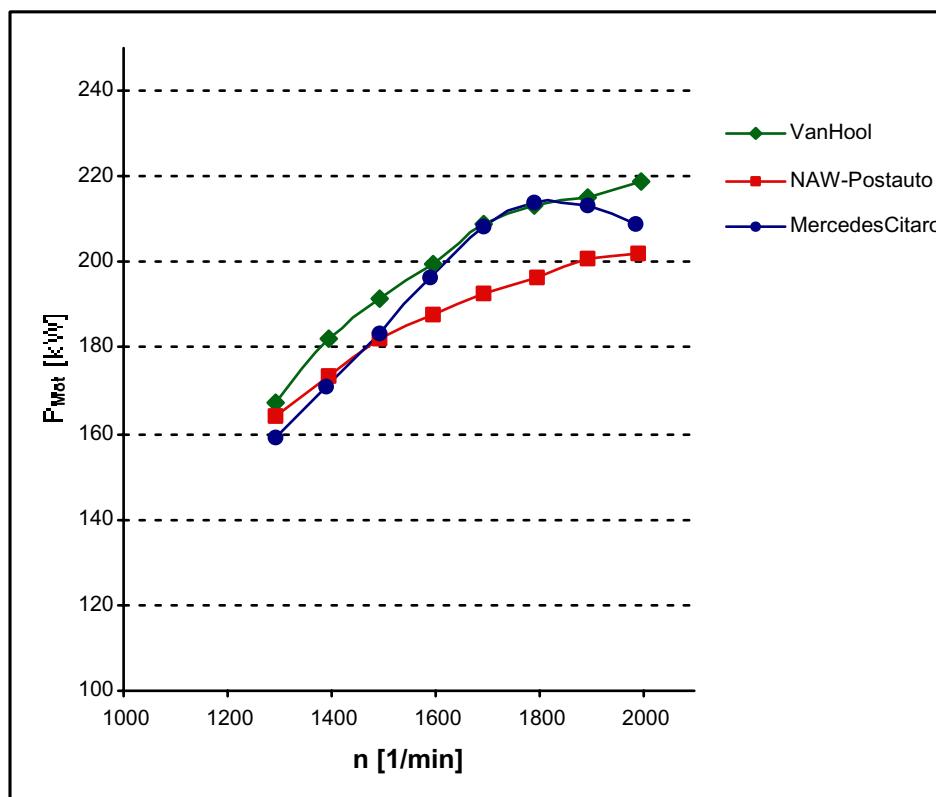


Diagramm 5.1.1: Motorleistung der 3 Busse (NAW, Citaro, VanHool) im Vergleich

Um die Gültigkeit der Messungen beim Erdgasbus zu verifizieren wurden zwei Messreihen durchgeführt. Die erste Messreihe wurde von tiefen zu hohen Drehzahlen gemessen (VanHool). Bei der zweiten Messreihe wurde von hohen zu tiefen Drehzahlen gemessen (VanHool_1). Für den Vergleich wird die „VanHool“ Messreihe berücksichtigt.

Vergleicht man die Messreihe des Erdgasbusses mit den Motorleistungen der zwei Dieselfahrzeuge erkennt man, dass die Leistung des Erdgasbusses höher liegt als die Leistung des NAW-Postautos. Der durchschnittliche Leistungswert des Erdgasbusses liegt 6.4% höher. Im Vergleich zum Mercedes Citaro sind zwei Fälle zu unterscheiden: Bei Drehzahlen von 1300-1600 U/min und 1900-2000 U/min hat der Erdgasbus eine höhere Motorleistung bei Drehzahlen von 1600-1900 U/min zeigen die beiden Fahrzeuge gleichwertige Resultate. Bei dieser Gegenüberstellung liegt der durchschnittliche Leistungswert des Erdgasbusses 2.7% höher.

Drehmoment M_{Mot}

In Diagramm 5.1.2 kann man die Drehmomentkurven der 3 Fahrzeugmotoren erkennen. Übereinstimmend mit der Motorenleistung zeigt sich auch beim Drehmoment das gleiche Bild.

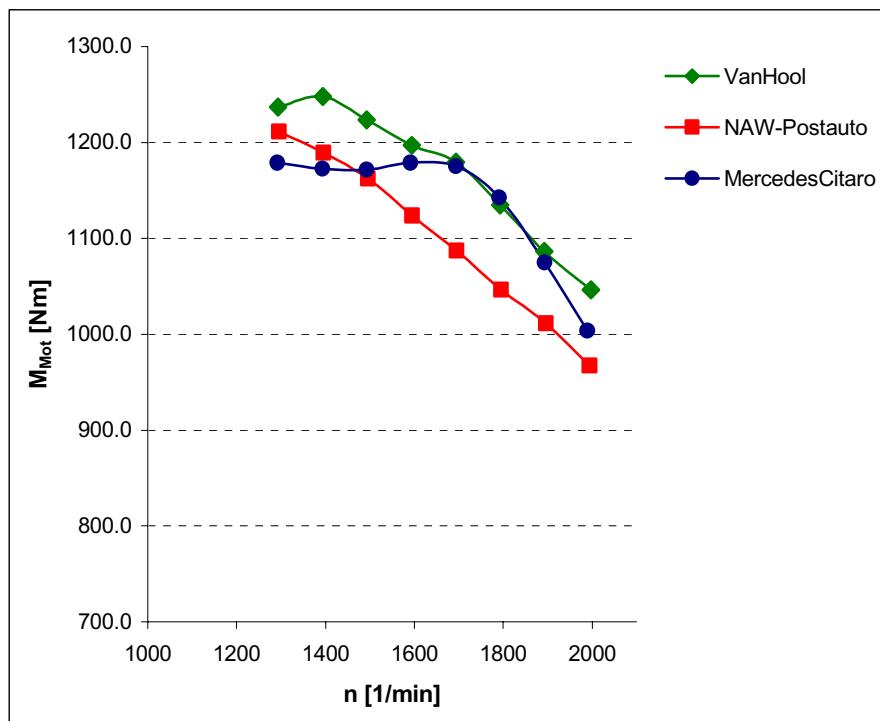


Diagramm 5.1.2: Drehmoment der 3 Busse (NAW, Citaro, VanHool) im Vergleich

Die Drehmomente des Erdgasbusses VanHool liegen bei tiefen bis mittleren Drehzahlen höher als bei den anderen zwei Bussen. Bei hohen Drehzahlen liegen die Drehmomentwerte des VanHools ungefähr gleich hoch wie die des Mercedes Citaros.

Aus den beiden Vergleichen (Motorleistung und Drehmoment) kann folgendes zusammengefasst werden:

- Der Erdgasbus hat eine höhere Motorleistung als die beiden Dieselfahrzeuge. Bei höheren Drehzahlen (1600-1900 U/min) gleichen sich die Leistungswerte verglichen mit dem Mercedes Citaro aus
- Übereinstimmende Resultate des Drehmomentvergleichs mit dem Leistungsvergleich
- Der Erdgasbus hat bei tieferen Touren höhere Drehmomente als die beiden Dieselfahrzeuge und bei höheren Drehzahlen gleicht es sich aus
- Die Aussagen der Chauffeure (Erdgasbus ist bei tiefen Drehzahlen spritzen; hat mehr Kraft bei tiefen Drehzahlen) korrelieren eher mit der gemessenen Kurve der Messreihe 2.

Rauchgas

Leider konnten bei der zweiten Leistungsprüfung des Erdgasbusses keine Trübungsmessungen durchgeführt werden (Gerät für Erdgas als Treibstoff nicht geeignet). Deshalb werden hier die Ergebnisse der ersten Leistungsprüfung für den Erdgasbus verwendet. Diese sind aber mit Vorsicht zu bewerten.

Unter Rauchgas versteht man hier die Trübung des Abgases. In Diagramm 5.1.3 erkennt man die gemessene Trübung der 3 Fahrzeuge (NAW, Citaro, VanHool).

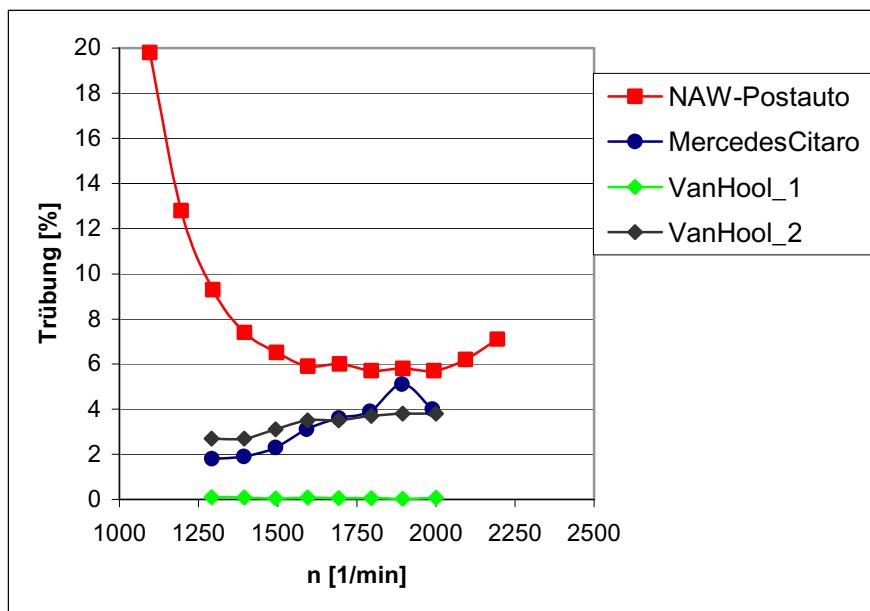


Diagramm 5.1.3: Trübung der 3 Busse (NAW, Citaro, VanHool) im Vergleich

Beim Erdgasbus sind zwei Messreihen dargestellt. VanHool_1 hat Werte im Bereich von 0.03-0.1%. Diese Resultate entsprechen den erwarteten Werten.

Die Messreihe VanHool_2 zeigt deutlich höhere Werte. Diese entsprechen jedoch kaum der effektiv vorhandenen Trübung, sondern röhren höchstwahrscheinlich von kondensiertem Wasser auf dem Messsystem her. Das Wasser kondensiert, weil das Messsystem für Diesel ausgelegt ist, welcher weniger Wasserdampf produziert als Erdgas. Diese Messung wird nur der Vollständigkeit halber dargestellt.

Zusammenfassung

Der Leistungs- und Drehmomentvergleich zwischen den drei Fahrzeugen widerspiegelt die Erfahrungen der Chauffeure: Der Erdgasbus ist bei tiefen Drehzahlen kräftiger als die beiden Dieselfahrzeuge (wie im Drehmomentvergleich zu sehen) und der Gasbus ist von der Leistung her gleich stark oder noch stärker als die Dieselbusse.

Die Rauchgasmessungen zeigen beim Erdgasbus praktisch keine Trübung, jedoch müssen diese Werte mit Vorsicht genossen werden

5.2 Lärmessungen

Um die Lärmemissionen der verschiedenen Fahrzeugtypen zu vergleichen, wurden Lärmessungen durchgeführt. Das Strassenverkehrsamt von Glarus stellte uns das Messgerät zur Verfügung. Es handelt sich dabei um ein Brüel & Kjaer Precision Sound Level Meter vom Typ 2232. Die letzte Eichung des Messgerätes wurde am 24. Juli 2002 durchgeführt.

5.2.1 Durchführung

Die 3 Bustypen wurden am gleichen Tag gemessen. Bei jedem Fahrzeug wurden 4 verschiedene Serien von Messungen durchgeführt. Nach dem Strassenverkehrsrecht unter VTS Anhang 6 wurden die Fern- und Nahmessung an den Fahrzeugen gemessen. Zusätzlich wurden dann noch Messungen beim Anfahren innen und aussen angesetzt, jeweils bei verschiedenen Straßenverhältnissen (eben, aufwärts, abwärts). Im Innern der Fahrzeuge wurde auch noch zwischen vorne und hinten unterschieden.

Bei der Fernmessung wurde je links und rechts im Stillstand des Fahrzeuges bei 3/4 Motoren-Drehzahl der höchsten Leistung gemessen. Beim NAW wurde bei einer Drehzahl von ca. 1500 U/min, beim Citaro bei einer Drehzahl von ca. 1350 U/min und beim VanHool bei einer Drehzahl von ca. 1500 U/min. Das Messgerät ist dabei 1.2 m vom Boden entfernt. In Abbildung 5.2.1 sieht man die Messaufstellung abgebildet.

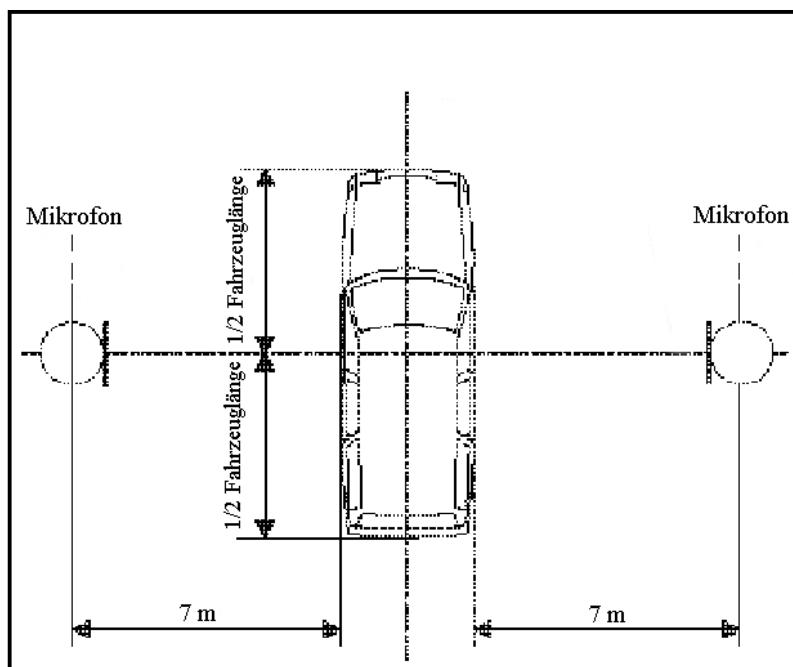


Abbildung 5.2.1: Messeinrichtung bei der Fernmessung

Die Nahmessung wird am Auspuff des jeweiligen Fahrzeuges durchgeführt. Dabei wird das Messgerät in einem Abstand von 0.5 m vom Auspuff und einem Winkel von 45° zur Ausstromrichtung des Abgases platziert (Abbildung 5.2.2). Es wurde der höchste Wert beim Anlassen des Busses gemessen.

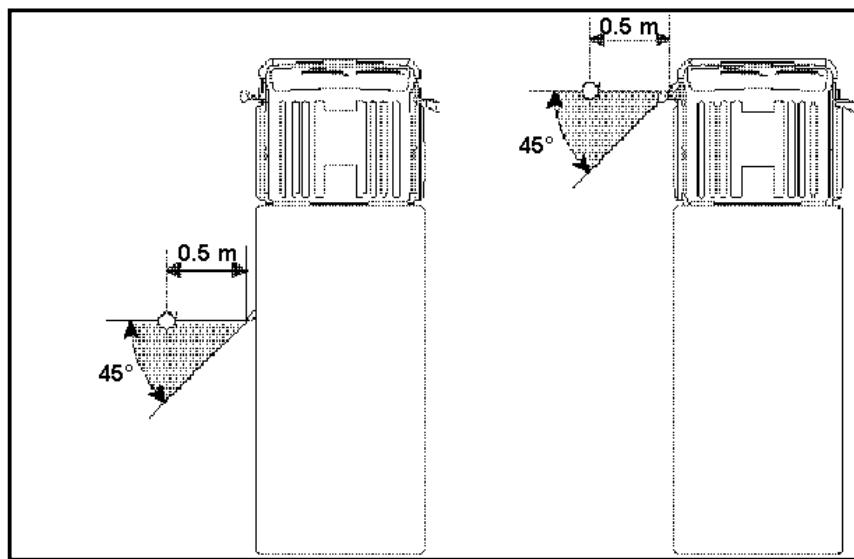


Abbildung 5.2.2: Messaufstellung bei der Nahmessung

Bei den Messungen innerhalb des Fahrzeuges wurde das Messgerät 1.2 m über dem Fahrzeugboden platziert und zwar jeweils in der Mitte des Busses. Es wurde jeweils der höchste Wert beim Anfahren des Fahrzeugs genommen.

Bei der Messreihe ausserhalb der Fahrzeuge wurde das Messgerät in einer Höhe von 1.2 m vom Boden und 0.5 m vom Fahrzeug entfernt platziert. Der höchste Wert nach der Vorbeifahrt des ganzen Fahrzeuges wurde als Messergebnis angenommen.

5.2.2 Resultate

In den untenstehenden Tabellen sind die Messresultate der 3 Fahrzeuge aufgelistet. Für jede Messart wurden 4 Messungen gemacht. Der Durchschnitt über die 4 Messresultate jeder einzelnen Messart wurde dann als Vergleichswert herangezogen. In Tabelle 5.2.1-3 sind diese Resultate der einzelnen Bustypen zusammengefasst.

Beim NAW Postauto ist es im Innern vorne beim Anfahren am leisensten. Im Vergleich zu Innen ist der Lärmpegel draussen jeweils beim Anfahren und bei der Nahmessung viel höher. Bei der Fernmessung ist er rechtsseitig ca. 3dB lauter.

Auch beim Citaro werden die niedrigsten Pegel vorne im Inneren beim Anfahren gemessen. Es fällt auf, dass der Lärmpegel beim Aufwärtsanfahren im Innern deutlich höher ist. Im Gegensatz zum NAW ist bei der Fernmessung des Citaro der Lärmpegel links und rechts ausgeglichen.

Auch der Erdgasbus ist vorne im Innern beim Anfahren am ruhigsten. Auffallend bei diesem Fahrzeug ist der tiefe Lärmpegel beim Abwärtsanfahren aussen (liegt um 6-7 dB unter den beiden anderen Werten). Im Unterschied zum NAW-Postauto ist der Erdgasbus bei der Fernmessung linkslastig (4 dB lauter als rechts). Dies hat sicherlich mit der Lage des Motors zu tun (links hinten am Heck eingebaut).

Diesel NAW

Fernmessung		Nahmessung	Messung beim Anfahren draussen						Messung beim Anfahren innen						
Links	Rechts		Vorne			Hinten			Vorne	Auf	Ab	E	Auf	Ab	
			E	Auf	Ab	E	Auf	Ab							
75.0	77.4	85.6	87.4 88.0 87.5 87.8	88.4	84.6	67.0 68.2 67.9 67.5	68.8	67.1	75.1 75.0 75.7 75.5	75.4	74.0	75.0 75.7 73.9 75.5	75.6	74.4	
75.3	77.8	87.6		89.2	83.6		68.1	67.7		75.4	73.9		75.6	75.1	
74.6	77.5	89.2		88.0	82.9		68.3	69.3		75.7	75.1		75.5	74.7	
73.0	77.7	87.0		89.4	81.9		68.5	68.0		75.5	75.5		75.5	74.4	
74.5	77.6	87.4	87.7	88.8	83.3	67.7	68.4	68.0	75.3	75.6	74.4				

Tabelle 5.2.1: Messresultate beim NAW-Postauto

Diesel Citaro

Fernmessung		Nahmessung	Messung beim Anfahren draussen						Messung beim Anfahren innen						
Links	Rechts		Vorne			Hinten			Vorne	Auf	Ab	E	Auf	Ab	
			E	Auf	Ab	E	Auf	Ab							
70.6	71.1	84.7	83.6 82.7 84.0 86.9	85.5	81.1	71.4 70.3 72.0 72.5	69.1	70.1	77.3 78.0 78.3 78.1	81.0	75.6	77.3 78.0 78.3 78.1	81.1	75.5	
71.2	70.3	85.2		83.4	81.4		72.7	69.9		79.5	75.7		80.3	77.1	
70.7	70.6	85.5		83.2	84.1		73.4	68.8		79.5	75.7		80.3	77.1	
71.6	71.0	83.8		82.8	81.0		72.2	68.8		80.3	77.1		80.5	76.0	
71.0	70.8	84.8	84.3	83.7	81.9	71.6	71.9	69.4	77.9	80.5	76.0				

Tabelle 5.2.2: Messresultate beim Mercedes Citaro

Erdgas VanHool

Fernmessung		Nahmessung	Messung beim Anfahren draussen						Messung beim Anfahren innen						
Links	Rechts		Vorne			Hinten			Vorne	Auf	Ab	E	Auf	Ab	
			E	Auf	Ab	E	Auf	Ab							
71.4	67.7	81.9	78.7 80.3 78.6 83.3	76.8	72.5	67.2 72.2 72.1 72.9	73.7	72.9	76.6 78.3 77.6 78.0	77.7	75.6	76.6 77.1 77.2 77.3	74.2		
71.6	67.6	82.4		78.1	72.8		72.9	72.4		77.1	74.2		77.2	73.8	
70.9	67.3	82.3		77.8	73.3		73.7	72.1		77.2	73.8		77.3	75.1	
71.1	66.6	83.1		80.6	71.3		73.6	72.0		77.3	75.1		77.4		
71.3	67.3	82.4	80.2	78.3	72.5	71.1	73.5	72.4	77.6	77.3	74.7				

Tabelle 5.2.3: Messresultate beim VanHool

Vergleicht man nun die Fahrzeuge untereinander, zeigt sich folgendes Bild:

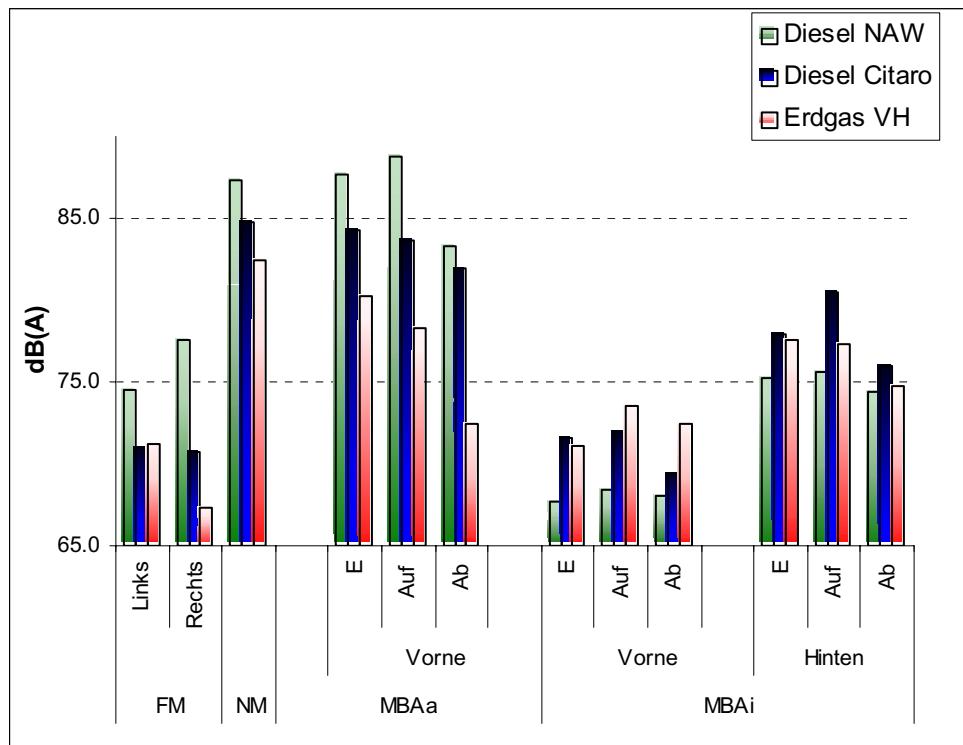


Diagramm 5.2.1: Lärmpegelvergleich der 3 Fahrzeuge

Man erkennt aus Diagramm 5.2.1 deutlich, dass der Erdgasbus ausser bei den Messungen im Inneren der Fahrzeuge klar die tiefsten Lärmpegel aufweist.

Bei der Fernmessung liegt der Erdgasbus 3.2-10.3 dB tiefer als der NAW, linkseitig etwa gleich auf wie der Citaro und rechtseitig ist er um 3.5 dB leiser als der Citaro. Bei der Nahmessung ist der VanHool-Bus um 5 dB leiser als der NAW, beziehungsweise um 2.4 dB leiser als der Citaro. Beim Anfahren ausserhalb des Fahrzeuges liegt der Lärmpegel des Erdgasbusses um 7.5-10.8 dB tiefer als beim NAW und um 4.1-9.4 dB tiefer als beim Mercedes Citaro.

Vorne im Innern ist der Erdgasbus um 3.4-5.1 dB lauter als der NAW und 0.5-3 dB lauter als der Citaro. Im Innern hinten ist der Erdgasbus um ca. 0.3-2.3 dB lauter als der NAW aber um 0.3-3.2 dB leiser als der Citaro.

Zusammenfassend kann man sagen, dass der Erdgasbus aussen deutlich leiser ist als die zwei anderen Fahrzeuge. Im Inneren ist er zwar etwas lauter als der NAW bzw. Citaro, jedoch sollte man berücksichtigen, dass einerseits der NAW höher liegt als der Erdgasbus und der Citaro 1.3 Meter länger ist als der Erdgasbus. Diese Unterschiede beeinflussen die Lärmessungen im Inneren. Man kann auch erkennen, dass die Abweichungen der Messungen im Inneren kleiner sind als die Abweichungen der Messungen ausserhalb des Fahrzeuges. Damit kann man das Fazit ziehen, dass der Erdgasbus von aussen deutlich leiser ist und die Unterschiede im Inneren kaum wahrgenommen werden.

5.3 Schadstoffemissionen

In den vergangenen Jahren wurden schon Untersuchungen der Schadstoffemissionen bei verschiedenen Busarten durchgeführt. Im nachfolgenden Kapitel werden die Resultate einiger Studien im Bezug auf die Schadstoffemissionen resümiert.

5.3.1 Literaturstudium

Basel

Basel Stadt beschloss 1994 Erdgasbusse im ÖV einzusetzen. 1998 beauftragte das BUWAL, die Betriebserfahrungen mit diesen Bussen zu untersuchen. Einer der zu untersuchenden Aspekte war auch die Evaluierung der Schadstoffemissionen bei den Erdgasbussen. Um diese Emissionen messen zu können, wurden On-board-Messungen am Erdgasbus durchgeführt. Mit dieser Messtechnik ergaben sich folgende Resultate:

BVB Linie 37	v	En'Verbrauch		CO ₂	CO	HC	NOx
	km/h	kg/100km	l/100km	g/km	g/km	g/km	g/km
Gasbus der BVB	19.5	41.8	54	1'075	13.68	2.43	5.58
Dieselbus (Euro 2)	19.1	36.3	43.6	1'138	1.9	0.84	13.31

Tabelle 5.3.1: Emissionsmessergebnisse der On-board-Messungen in Basel (Jan. 1998)

Die Tabelle 5.3.1 zeigt die Durchschnittswerte von je 4 Fahrten à rund 10km auf der Linie 37, bei einer Durchschnittsgeschwindigkeit von rund 19.5 km/h [1].

Winterthur

In einem ökonomischen und ökologischen Vergleich hat die Umweltschutzfachstelle der Stadt Winterthur verschiedene Busantriebssysteme evaluieren lassen [5]. Zu diesem Vergleich gehörte auch die Untersuchung der Schadstoffemissionen der drei Busantriebssysteme. In Tabelle 5.3.2 sind diese Resultate aufgelistet. Der Gasbus verfügte schon über einen Dreiweg-Katalysator und der Dieselbus hielt Euro-2-Norm ein.

Winterthur Linie 37	CO ₂ [g/h]	NOx[g/h]
Gasbus	26'484	103
Dieselbus (Euro 2)	26'027	274

Tabelle 5.3.2: Emissionsmessergebnisse auf der Winterthurer Breite Linie (1996)

Baden-Würtemberg

Dieser Bericht beinhaltet eine objektive und übersichtliche Gegenüberstellung bezüglich der Umweltrelevanz von Diesel- und Erdgasbussen. Beim Gasfahrzeug handelt es sich um das Model E2866 DUH2 von MAN und beim Dieselbus um das Model OM447 hLA von Mercedes. Folgende Resultate bezüglich der Schadstoffemissionen ergab diese Gegenüberstellung.

München Linie 66	CO₂	CO	HC	NOx	Partikel
	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh
Gasbus	1'176	0.5	4.5	13.4	-
Dieselbus (Euro 2)	1'074	0.9	1.1	17.1	0.13

Tabelle 5.3.3: On-board-Messungen auf der Münchener Linie 66 (2000)

Kurzexpertise Dresden

Diese Expertise zeigt ein Systemvergleich von Wasserstoff, Erdgas und Dieselkraftstoff betriebenen Bussen mit EURO V-Norm im ÖPNV. Ein Aspekt, welcher in diesem Bericht erläutert wird, sind die heutigen Möglichkeiten mit Erdgasmotoren die Euro V-Norm zu erfüllen. In nachstehender Tabelle sind die möglichen Emissionswerte durch Erdgasmotoren für Busse < 220 kW am Prüfstand zu sehen.

Prüfstand	CH₄	CO	HC	NOx	Partikel
	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh
Grenzwerte Euro V	1	4	0.55	2	0.03
Gasbus A	0.02	0.12	0.00	0.36	0.00700
Gasbus B	0.65	3.00	0.04	2.00	0.02000
Gasbus C	0.06	0.00	0.01	1.79	0.00400
Gasbus D	0.03	0.03	0.00	1.79	0.05300
Gasbus E	0.03	0.00	0.02	1.50	0.00140
Gasbus F	0.03	0.00	0.04	1.55	0.00170

Tabelle 5.3.3: Mögliche Erdgasmotoren auf dem Prüfstand (2002 ETC-Zyklus)

Durch innermotorische Massnahmen zu NOx-Senkung ist das Lambda = 1 Konzept oder das Mager-Konzept ($\text{Lambda} > 1$) möglich. Die derzeitigen Erdgasmotoren sind zur Erzielung der o.g. Emissionswerte mit 3-Wege-Katalysatoren ausgerüstet.

5.3.2 Zusammenfassung Literaturstudie

Aus all diesen Studien geht hervor:

- Die NOx und Partikelemissionen (welche als gefährlichste Schadstoffe eingestuft werden) liegen bei den Erdgasbussen deutlich tiefer als bei den Dieselfahrzeugen.
- Die Untersuchungen zeigen, dass die Emissionswerte der Fahrzeuge stark von der Charakteristik der Strecke beeinflusst werden. Busse im öffentlichen Verkehr sollten daher separat behandelt werden.
- Die auf dem Prüfstand gemessenen Werte beziehen sich immer auf den Motor selbst und einen bestimmten Normzyklus.
- Die Tendenz, in Zukunft noch schärfere Normen im Bezug auf die Schadstoffemissionen einzuführen, stellt für den Erdgasmotor kein Problem dar. Es gibt schon heute Erdgassysteme welche die Euro V-Norm erfüllen.

5.3.3 Innenraummessungen

Einzelne Personen fürchteten, dass im Fahrzeuginnern im Bereich des Chauffeurs gesundheitsgefährdende Schadstoffe vorkommen. Aus diesem Grund wurden Messungen durchgeführt.

Die Schadstoffe die am ehesten zu erwarten sind, wären gemäss Absprache mit der SUVA:

- Kohlenmonoxid
- Stickstoffdioxid
- Methan

Die Messungen wurden mit Dräger-Röhrchen® durchgeführt. Dabei handelt es sich um ein einfaches Messsystem der Firma Dräger, bei dem eine durch die zugehörige Pumpe bestimmte Luftmenge durch das Messröhren gesogen wird. Anhand der Verfärbung der aktiven Schicht der Röhren kann die Gaskonzentration abgelesen werden.

Der Messbereich der verwendeten Röhren wurde anhand der MAK-Werte (maximale Arbeitsplatz-Konzentration) festgelegt:

	MAK-Wert	Messbereich	Standardabweichung
CO	30 ppm	2-60 ppm	±10...15%
NO₂	3 ppm	0.5-10 ppm	±10...15%
CH₄	1 Vol.%	ab 0.5 Vol.%	Qualitative Messung

Tabelle 5.3.4: Auswahl des Messbereiches anhand MAK-Werten

Über CO und NO₂ können mit den Messröhren quantitative Aussagen im Messbereich gemacht werden, über Methan hingegen nur eine qualitative Aussage, nämlich ob es mit einer Konzentration von 0.5 Vol% oder höher vorhanden ist.

Es wurden insgesamt fünf Messungen durchgeführt, nämlich zwei Messungen zu verschiedenen Zeitpunkten im Fahrerbereich auf beiden Erdgasbussen und zusätzlich noch eine Messung im Heckbereich eines Busses.

Bei keiner Messung konnte eine Verfärbung des Messröhrchens festgestellt werden, das heisst, die Konzentrationen der jeweiligen Schadstoffe liegen unterhalb des Messbereiches:

$$\begin{aligned}c_{CO} &< 2 \text{ ppm} \\c_{NO_2} &< 0.5 \text{ ppm} \\c_{CH_4} &< 0.5 \text{ Vol\%}\end{aligned}$$

Die Schadstoffkonzentrationen von CO, NO₂ und CH₄ liegen somit auch weit unterhalb der MAK-Werte.

6 Schlussfolgerungen

Die Erfahrungen mit den Glarner Bussen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Gasbustechologie ist verfügbar und einsetzbar. Verschiedene technische Einführungsprobleme traten auf. Diese lagen vor allem im Bereich der Elektronik, konnten aber beseitigt werden.
- Die Menschen im Glarnerland, welche die öffentlichen Busse benutzen, bemerkten den Wechsel von Dieselfahrzeug zu Erdgasfahrzeug. Jedoch stehen für die Akzeptanz der Busse in erster Linie nicht die Art des Fahrzeugantriebes im Mittelpunkt, sondern mehr der Komfort und die Innenausstattung, sowie die Innenaufteilung der Busse. Die positive oder negative Kritik bezieht sich mehrheitlich auf andere Punkte als prinzipiell Antriebsart und deren Vorteile. Insgesamt kann man zusammenfassen, dass die Einführung solcher Busse von den Kunden begrüßt wurde.
- Vom Standpunkt der Chauffeure ist die Akzeptanz vorhanden. Eine bessere, fahrtechnische Einführung für die Chauffeure würde die Anerkennung der Erdgasbusse verbessern. Ausserdem ist vom Standpunkt der Chauffeure klar ersichtlich, dass die Zweigleisigkeit bei der Konstruktion der Busse (Chassis VanHool, Motor MAN) nicht vorteilhaft für die Einführung solcher Busse ist. Die Chauffeure tendieren vom technischen und fahrerischen Standpunkt zum Erdgasbus, solange dieser solide von einem Hersteller gebaut und eingeführt wird.
- Durch das häufige Stoppen und Anfahren liegt der Energieverbrauch allgemein von Bussen im öffentlichen Verkehr sehr hoch. Unter gleichen Bedingungen (Streckenprofil) hat sich im Vergleich der 3 Busarten gezeigt, dass der Erdgasbus zwar energetisch mehr verbraucht als die Dieselbusse, aber ähnlich viel CO₂ produziert wie die beiden Dieselbusse, obwohl er wesentlich strengere Abgasvorschriften erfüllt.

Die Energiekosten der beiden Dieselfahrzeuge sind etwa 16 bzw. 20% tiefer als jene des Gasbusses. Jedoch muss man berücksichtigen, dass bei Erdgasfahrzeugen die Treibstoffsteuer nicht eingefordert wird (im Glarnerland berechnet das Gaswerk bei Privatpersonen mit Erdgasfahrzeug keine Treibstoffsteuer und der ÖV kann die Treibstoffsteuer im Nachhinein zurückerstatten). So sind die Energiekosten der Dieselbusse etwa 20 bzw. 23% höher als jene des Erdgasbusses.

- Die Auswertungen der verschiedenen Studien zeigen, dass vor allem bei den am gefährlichsten eingeschätzten Schadstoffen NOx und Partikel die Gasbusse deutlich tiefere Emissionswerte aufweisen als die Dieselbusse. Bei der CO₂-Produktion liefern die Studien unterschiedliche Resultate: Bei einer Untersuchung liegen die CO₂-Werte beim Gasbus um 5.5% tiefer und bei zwei anderen Untersuchungen liegen sie 2-9.5% höher als beim Dieselbus.
- Im Innenraum konnten keine gesundheitsschädigende Gase (Kohlenmonoxid, Stickstoffdioxid, Methan) gemessen werden. Die verwendeten Messsysteme hatten eine Messgrenze weit unter den jeweiligen MAK-Werten (maximale Arbeitsplatzkonzentration).
- Die Lärmessungen zeigen, dass die Erdgasbusse für die Umgebung viel leiser sind als die beiden Dieselbusse (Nahfeldmessung, Fernmessung, Anfahren aussen). Dieses Resultat stimmt mit den Aussagen der Chauffeure überein (Velofahrer hören Erdgasbus erst ganz nahe hinter sich, Bewohner in ruhigen Wohnquartieren bemerken). Im Innern ist nach unseren Messungen das NAW-Postauto am leisesten. Diese Resultate sind jedoch primär von der Bauart (Motorposition, Niederflurbus, Länge) des Fahrzeuges abhängig.

7 Literatur

- [1] Umweltmaterialien Nr. 103, BUWAL 1998 „*Gasbusse in Basel, Erfahrungsbericht*“
- [2] www.erdgasinfo.de, Wissen über Erdgas
- [3] Wolfgang Seiffert, Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden, 2003
„*Systemvergleich von mit Wasserstoff, Erdgas und Dieselkraftstoff betriebenen Bussen mit Euro V-Norm im ÖPNV*“
- [4] Sabina Drechsler, Dr. Werner Scholz, Dr. Dieter Ahrens, Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg, 2000 „*Möglichkeiten der Minderung von Schadstoffen bei Bussen*“
- [5] Umweltpfaxis Nr. 8, Umweltschutzfachstelle der Stadt Winterthur, Daniel Klooz 1996
„*Dieselbus, Trolleybus oder gar Erdgasbus*“
- [6] L. Guzzella, Vorlesungsskript Wintersemester 2002/03 „*Fahrzeugantriebssysteme*“
- [7] Heinz Grohe, Vogel Verlag Würzburg, 12. Auflage 2000 „*Otto- und Dieselmotoren*“
- [8] EvoBus (Schweiz) AG, Angebot Nr. 171 / 00 A, „*Niederflur-Stadtbus Mercedes-Benz Citaro*“
- [9] EvoBus AG, Dr.-Ing. Manfred Schuckert, Product Management Hohenheim 2002,
„*Comparision of new propulsion systems for city buses*“
- [10] Dirk Amerijckx, Van Hool N. V. 2002, „*Technische Beschreibung Niederflur Stadtbus A330 Normale CNG*“

Anhang A

Fragebögen

Kunden

1) Wissen Sie von der Besonderheit dieses Busses?

2) Waren Sie bei der Einführungsfeier der Busse?

3) Ist der Unterschied Diesel-/ Erdgasbus bemerkbar?

3a) Unterschied ist vor allem bemerkbar durch:

4) Welchen Typ Bus finden sie besser?

4a) Weshalb finden Sie ihn besser?

5) Wodurch fällt der Erdgasbus für Sie am meisten auf?

6) Was halten Sie allgemein von der Einführung dieses Busses?

6a) Wieso eher positiv oder eher negativ?

7) Würden Sie wieder die alten Busse einsetzen?

8) Wie wichtig ist Ihnen die Umwelt?

9) Würden Sie auf bestimmte Sachen verzichten für ein umweltschonendes Fahrzeug?

10) Wären Sie bereit, zusätzlich zu bezahlen, um umweltfreundlicher zu fahren?

Chauffeure

1) Ist der Unterschied Diesel-/ Erdgasbus bemerkbar?

1a) Unterschied ist vor allem bemerkbar durch:

2) Was halten Sie von der Einführung dieses Busses?

2a) Wieso eher positiv oder negativ?

3) Was würden sie gern ändern beim Erdgasbus?

4) Welches war Ihr grösstes Problem mit dem Erdgasbus?

5) Hat sich der Erdgasbus seit der Einführung verbessert?

5a) Was hat sich verbessert?

6) Hat in Ihren Augen der Erdgasbus eine Zukunft?

6a) Wieso eher ja oder nein?

7) Wie wichtig ist Ihnen die Umwelt?

8) Was fehlt Ihnen am meisten beim Erdgasbus?

9) Würden Sie den Erdgasbus nach fast 1 Jahr Erfahrung durch den Dieselbus wieder umtauschen?

10) Wie gross ist beim Diesel Ihre Sorge um Ihre Gesundheit wegen den Schadstoffen?

10a) Welche Schadstoffe würden sie am gefährlichsten einstufen?

Streichlisten (erste Umfrage)

Kunden

1)	Ja	Nein	WeissNicht
	10	3	
	15	3	
	25	9	
	50	15	
	77%	23%	0%

2)	Ja	Nein	WeissNicht
	1	14	
	2	13	
	1	34	
	4	61	
	6%	94%	0%

3)	Ja	Nein	WeissNicht
	12	2	3
	11	1	1
	28	5	2
	51	8	6
	78%	12%	9%

3a)	Lärm	Geschw.	Äusseres	Techn.Probleme	Fahrkomfort	Sitze	Einstieg
	2		3		3	5	4
	6		1		1	3	7
	8		4		4	8	11
	16%	0%	8%	0%	8%	16%	22%
	Platz		Geruch		Inneres	Abgas	
	6		1		1	1	
	3		1		2	1	
	9		2		3	2	
	18%		4%		6%	4%	

4)	Dieselbus	Erdgasbus	Egal
	11	13	6
	10	19	6
	21	32	12
	32%	49%	18%

4a)	Lärm	Geschw.	Äusseres	Techn.Probleme	Fahrkomfort	Sitze	Einstieg
Diesel			1 0		2 1	3 4	
			1		3	7	
			5%		14%	33%	
	Platz		Grösse		Belüftung		
	5		0		0		
	3		1		1		
	8		1		1		
	38%		5%		5%		
4a)	Lärm	Geschw.	Äusseres	Techn.Probleme	Fahrkomfort	Sitze	Einstieg
Erdgasbus	3				1	2	6
	3		3		2	1	4
	6		3		3	3	10
	14%		7%		7%	7%	24%
	Umwelt		Platz		Komfort		Grösse
	4		4				
	5		2		1		1
	9		6		1		1
	21%		14%		2%		2%
5)	Lärm	Modern	Äusseres	Techn.Probleme	Fahrkomfort	Sitze	Einstieg
		4	14			3	2
	16	1	16		1	1	1
	16	5	30		1	4	3
	25%	8%	46%		2%	6%	5%
	Grösse		Streckenverlängerung		Haube		Inneres
	4				2		2
	2		1		6		3
	6		1		8		5
	9%		2%		12%		8%
6)	Positiv	Negativ	Egal				
	9		5				
	12	1	3				
	29	2	4				
	50	3	12				
	77%	5%	18%				
6a)	Lärm	Umwelt	Wärme	Strecke	Fahrkomfort	Sitze	Einstieg
Positiv	1	18				1	1
		22		6			
	1	40		6		1	1
	2%	62%		9%		2%	2%
Negativ			1		1		
			1		1		
			1		2		
	2%			3%			

7)	Ja	Nein	WeissNicht	Egal	Eventuell
	2	8	1	1	1
	1	14	1	2	2
	8	15	3	5	1
	11	37	5	8	4
	17%	57%	8%	12%	6%

8)	Sehr Wichtig	Wichtig	Normal Wichtig	Wenig Wichtig	Egal
	6	3	7		
	6	5	4	1	
	14	7	7	2	3
	26	15	18	3	3
	40%	23%	28%	5%	5%

9)	Ja	Nein	Eventuell
	6	6	3
	12	3	2
	21	6	6
	39	15	11
	60%	23%	17%

10)	Ja	Nein	Eventuell
	5	3	5
	11	3	3
	20	6	9
	36	12	17
	55%	18%	26%

Chauffeure

1)	Ja	Nein	Weiss/Nicht
	6		

1a)	Fahrkomfort	Lärm	Erscheinungsbild	Austattung	Beim Bremsen	Beim Anfahren	Wendigkeit
	1	1					

Drehmoment Tief/Hoch	Verzögerung Gas	Unterhalt
1	2	1

2)	Positiv	Negativ	Egal
	5	1	

2a)	Lärm	Umwelt	Kosten	Techn.Probleme	Fahrkomfort	Alternative Energie
Positiv	4	6				
Negativ			1			

3)	Leistung	Bremsen	Flexibilität	Tankanlage	Handhabung	Getriebeabstimmung
			1	1		2
	Drehmomentverlauf		Durchzugsvermögen		Konstruktion	Gasplatte
	1		1		1	1
						2

4)	Leistung	Bremsen	Beschleunigung	Tanken	Türen	Andere Tech. Probleme
				1	1	
	Anfahren	Wenden	Motor hat abgestellt während Fahrt			Elektronik
			1			4

5)	Ja	Nein	Wenig
	4	1	1

5a)	Leistung	Bremsen	Service	Tanken	Türen	Gasdichtungen/ Lüftungen
			1		1	1
Anfahren	Wenden	Zuverlässigkeit		Gasverzögerungen	Elektronik	
2		1		1		1

6)	Ja	Nein	WeissNicht
	5	1	

6a)	Ruhe	Umwelt	Energiereserven	Kosten	Fahrkomfort	Als Alternative	Ersatz
Ja	1	4	1			2	
Nein				1			

7)	Sehr Wichtig	Wichtig	Normal Wichtig	Wenig Wichtig	Egal
	4	1	1		

8)	Leistung	Bremskraft	Geeignetes Tanksystem	Zuverlässigkeit der Gasanlage
	1		1	1
Das es umgebauter Dieselmotor ist	Verbrauch		Klimaanlage	Platz
		1	2	2

9)	Ja	Nein	Eventuell/ Erdgas nein VanHool ja
	2	3	1

10)	Gross	Mittel	Normal	Wenig	Unwichtig
	2	3		1	

10a)	NOx	CO	CO ₂	HC	Partikel
					6

Streichlisten (zweite Umfrage)

Kunden

1)	Ja	Nein	WeissNicht
	17	11	0
	61%	39%	0%

2)	Ja	Nein	WeissNicht
	2	26	0
	7%	93%	

3)	Ja	Nein	WeissNicht
	16	9	3
	57%	32%	11%

3a)	Lärm	Geschw.	Äusseres	Techn.Probleme	Fahrkomfort	Sitze	Einstieg
	1			1	3	3	6
	5%			5%	14%	14%	29%

Platz	Geruch	Inneres	Abgas	
4		3		
19%		14%		

4)	Dieselbus	Erdgasbus	Egal
	7	8	13
	25%	29%	46%

4a)	Lärm	Geschw.	Äusseres	Techn.Probleme	Fahrkomfort	Sitze	Einstieg
				1		4	
				13%		50%	
Diesel	Platz		Grösse		Belüftung		
	3						
	37%						
4a)	Lärm	Geschw.	Äusseres	Techn.Probleme	Fahrkomfort	Sitze	Einstieg
					2	1	7
					15%	8%	54%
Erdgasbus	Umwelt	Platz		Komfort	Grösse		
	1	2					
	8%	15%					
5)	Lärm	Modern	Äusseres	Techn.Probleme	Fahrkomfort	Sitze	Einstieg
	1			1	1	3	6
	5%			5%	5%	15%	30%
	Grösse	Streckenverlängerung		Hohe Absätze innen		Inneres	
		1		5		2	
		5%		25%		10%	
6)	Positiv	Negativ	Egal				
	15	5	8				
	54%	18%	28%				

6a)	Lärm	Umwelt	Wärme	Pannen	Fahrkomfort	Sitze	Einstieg
Positiv		8			3	2	3
		29%			11%	7%	11%
Negativ				4		5	
				14%		18%	
7)	Ja	Nein	Weiss Nicht	Egal	Eventuell		
	4	14	5	3	2		
	14%	50%	18%	11%	7%		
8)	Sehr Wichtig	Wichtig	Normal Wichtig	Wenig Wichtig	Egal		
	5	15	7	1	0		
	18%	53%	25%	4%			
9)	Ja	Nein	Eventuell				
	8	17	3				
	29%	61%	11%				
10)	Ja	Nein	Eventuell				
	8	18	2				
	29%	64%	7%				

Chauffeure

1)	Ja	Nein	Weiss/Nicht
	3	0	0

1a)	Fahrkomfort	Lärm	Erscheinungsbild	Austattung	Beim Bremsen	Beim Anfahren	Wendigkeit
	1			1		1	

Drehmoment Tief/Hoch	Verzögerung Gas	Unterhalt

2)	Positiv	Negativ	Egal
	2	1	

2a)	Lärm	Umwelt	Kosten	Techn.Probleme	Fahrkomfort	Alternative Energie
Positiv		1			1	
Negativ				1		

3)	Leistung	Bremsen	Flexibilität	Tankanlage	Handhabung	Getriebeabstimmung
	Drehmomentverlauf		Durchzugsvermögen		Konstruktion	Gasplatte
					2	Elektronik
						1

4)	Leistung	Bremsen	Beschleunigung	Tanken	Türen	Andere Tech. Probleme
					1	
	Anfahren	Wenden	Motor hat abgestellt während Fahrt			Elektronik
			1			1

5)	Ja	Nein	Wenig			
	3					

5a)	Leistung	Bremsen	Service	Tanken	Türen	Gasdichtungen/ Lüftungen
Anfahren	Wenden		Zuverlässigkeit		Gasverzögerungen	Elektronik
			2			1

6)	Ja	Nein	WeissNicht			
	2		1			

6a)	Ruhe	Umwelt	Energiereserven	Kosten	Fahrkomfort	Als Alternative	Ersatz
Ja		1	1				
Nein							

7)	Sehr Wichtig	Wichtig	Normal Wichtig	Wenig Wichtig	Egal
	2	1			

8)	Leistung	Bremskraft	Geeignetes Tanksystem	Zuverlässigkeit der Gasanlage
Das es umgebauter Dieselmotor ist		Verbrauch	Klimaanlage	Platz

9)	Ja	Nein	Eventuell/ Erdgas nein VanHool ja	
	1	1	1	

10)	Gross	Mittel	Normal	Wenig	Unwichtig
			1	2	

10a)	NOx	CO	CO ₂	HC	Partikel
					3

Anhang B

Am Beispiel des Erdgasbusses wird gezeigt, wie der Energieverbrauch theoretisch berechnet wird. Die nun folgenden theoretischen Berechnungen beziehen sich auf das Vorlesungsskript „Fahrzeugantriebssysteme“ [6].

Vereinfacht verbraucht ein Fahrzeug (Bus) folgende Energien:

$$\text{Aerodynamische Energie: } E_{aa} = \frac{1}{2} \cdot \rho_L \cdot A_f \cdot c_w \cdot v^2 \cdot x_a \quad 4.1.1$$

$$\text{Rollreibungsenergie: } E_{ra} = m_f \cdot c_r \cdot g \cdot x_{tot} / 2 \quad 4.1.2$$

$$\text{Kinetische Energie: } E_{kinA} = \frac{m}{2} \cdot v^2 \quad 4.1.3$$

$$\text{Leerlaufenergie: } E_{Leerlauf} = p_{me0} \cdot V_h \cdot \frac{n}{120} \cdot 3600s \cdot t \cdot \frac{1}{e} \quad 4.1.4$$

Berücksichtigt man noch die Anfahrtsverluste E_{verl} , so erhält man aus diesen Energien summiert die verbrauchte Energie am Rad E_{totrad} . Mit dem Wirkungsgrad $e=0.43$ lässt sich damit die Brennstoffenergie berechnen:

$$E_{fuel} = E_{totrad} \cdot \frac{1}{e} \quad 4.1.5$$

Zusätzlich zur Brennstoffenergie muss man noch den die Leerlausenergie einbeziehen. Es werden zwei Leerlausenergien berücksichtigt:

$$n_1 = 800 \text{ rpm} \quad E_{Leerlauf1} = p_{me0} \cdot V_h \cdot \frac{800}{120} \cdot 3600 \cdot t_1 \cdot \frac{1}{0.43} \quad 4.1.6$$

$$n_2 = 1200 \text{ rpm} \quad E_{Leerlauf2} = p_{me0} \cdot V_h \cdot \frac{1200}{120} \cdot 3600 \cdot t_2 \cdot \frac{1}{0.43}$$

Daraus erhält man die totale Leerlausenergie $E_{Leerl.tot}$

$$E_{Leerl.tot} = E_{Leerl.1} + E_{Leerl.2} \quad 4.1.7$$

Summiert man die Leerlausenergie mit der Brennstoffenergie so erhält man die totale vom Fahrzeug verbrauchte Energie E_{tot} :

$$E_{tot} = E_{fuel} + E_{Leerl.tot}$$

4.1.8

Für die drei Busfahrzeuge wurden folgende Parameter e und p_{me0} angenommen:

	VanHool	NAW	Mercedes Citaro
e	0.43	0.43	0.43
p_{me0}	1.5	1.2	1.2

Aus der verbrauchten Energie lässt sich nun der Brennstoffverbrauch pro 100km ermitteln:

$$V = \frac{E_{tot}}{H_{Br}} \cdot \frac{100km}{x_{tot}} \quad 4.1.9$$

Beispiel VanHool

$p_{me0} = 1.5$ bar ; $t_1 = 3$ h ; $t_2 = 7$ h ; $m = 12'760$ kg ; $V_h = 0.011967$ m³ ; $e = 0.43$; $x_{tot} = 96$ km

$x_{30} = 61'000$ km ; $x_{50} = 35'000$ km ; $c_w = 0.6$; $c_r = 0.008$

Rollreibung:

$$E_{rA} = m_f \cdot c_r \cdot g \cdot \frac{x_{tot}}{2} = 12'760kg \cdot 0.008 \cdot 9.81 \frac{m}{s^2} \cdot 48000m = 48.07MJ$$

Aerodynamik:

$$E_{aA} = \frac{1}{2} \cdot \rho_L \cdot A_f \cdot c_w \cdot \frac{-v^2}{m^2} \cdot x_{tot} = \frac{1}{2} \cdot 1.293 \frac{kg}{m^3} \cdot 7.5m^2 \cdot 0.6 \cdot \left(\frac{15}{3.6}\right)^2 \frac{m^2}{s^2} \cdot 61'000m = 3.08MJ$$

$$E_{aA} = \frac{1}{2} \cdot \rho_L \cdot A_f \cdot c_w \cdot \frac{-v^2}{m^2} \cdot x_{tot} = \frac{1}{2} \cdot 1.293 \frac{kg}{m^3} \cdot 7.5m^2 \cdot 0.6 \cdot \left(\frac{25}{3.6}\right)^2 \frac{m^2}{s^2} \cdot 35'000m = 4.91MJ$$

Kinetische Energie:

$$E_{kinA_{0-30}} = \frac{m}{2} \cdot v^2 = \frac{12'760\text{kg}}{2} \cdot \left(\frac{30}{3.6}\right)^2 \frac{m^2}{s^2} = 0.443MJ$$

$$E_{kinA_{0-50}} = \frac{m}{2} \cdot v^2 = \frac{12'760\text{kg}}{2} \cdot \left(\frac{50}{3.6}\right)^2 \frac{m^2}{s^2} = 1.231MJ$$

Mit 216 Beschleunigungen von 0-30km/h und 116 von 0-50km/h erhält man total:

$$E_{kinAtotal} = 216 \cdot E_{kinA_{0-30}} + 116 \cdot E_{kinA_{0-50}} = 95.7MJ + 142.8MJ = 238.5MJ$$

Anfahrverluste:

$$E_{Verluste} = 8MJ$$

Verbrauch Brennstoffenergie:

$$\begin{aligned} E_{fuel} &= E_{totalrad} \cdot \frac{1}{e} = (E_{rA} + E_{aA} + E_{kinAtotal}) \cdot \frac{1}{e} \\ &= (48.07MJ + 3.08MJ + 4.91MJ + 238.5MJ + 8MJ) \cdot \frac{1}{0.43} = 703.54MJ \end{aligned}$$

Leerlaufverbrauch:

$$n_1 = 800rpm :$$

$$E_{Leerlauf1} = p_{me0} \cdot V_h \cdot \frac{800}{120} \cdot 3600s \cdot t_1 \cdot \frac{1}{0.43} = 1.5 \cdot 10^5 \frac{N}{m^2} \cdot 0.011967m^3 \cdot \frac{800rpm}{120} \cdot 3600s \cdot 3h \cdot \frac{1}{0.43} = 300.57MJ$$

$$n_2 = 1200rpm :$$

$$E_{Leerlauf1} = p_{me0} \cdot V_h \cdot \frac{1200}{120} \cdot 3600s \cdot t_1 \cdot \frac{1}{0.43} = 1.5 \cdot 10^5 \frac{N}{m^2} \cdot 0.011967m^3 \cdot \frac{1200rpm}{120} \cdot 3600s \cdot 7h \cdot \frac{1}{0.43} = 1051.98MJ$$

Somit erhält man einen totalen Leerlaufverbrauch von:

$$E_{Leerlauftotal} = E_{Leerlauf1} + E_{Leerlauf2} = 311.59MJ + 1091.03MJ = 1352.55MJ$$

Addiert man den Leerlaufverbrauch mit dem Brennstoffverbrauch erhält man:

$$E_{Total} = E_{fuel} + E_{Leerlauftotal} = 703.54MJ + 1352.55MJ = 2056.09MJ$$

Aus diesem Energieverbrauch erhält man ein Brennstoffverbrauch in kg pro 100km von:

$$V = \frac{E_{tot}}{H_{Br}} \cdot \frac{100km}{x_{tot}} = \frac{2056.09 MJ}{46.67 \frac{MJ}{kg}} \cdot \frac{100km}{96km} = 45.89 \frac{kg}{100km}$$

Aus den Rapportbüchern erhält einen Verbrauch:

$$V_{rapport} = 46.12 \frac{kg}{100km}$$

Vergleicht man die beiden Verbrauche erhält man eine Abweichung von:

$$x = \frac{V_{rapport} - V}{V_{rapport}} \cdot 100 = \frac{46.12 \frac{kg}{100km} - 45.89 \frac{kg}{100km}}{46.12 \frac{kg}{100km}} \cdot 100 = 0.5\%$$

Anhang C

Leistungsmessung bei Larag

Nachstehend sind die Ergebnisse der Messungen bei der Larag der drei Fahrzeuge aufgeführt.
Im hinteren Teil dieses Anhangs sind die original Messblätter aufgeführt.

Soll- und Ist-Leistung der Motoren

In folgendem Abschnitt wird die gemessene Motorleistung (P_{Mot}) der entsprechenden Fahrzeuge mit den Werksangaben (Sollleistung= P_{Soll}) verglichen.

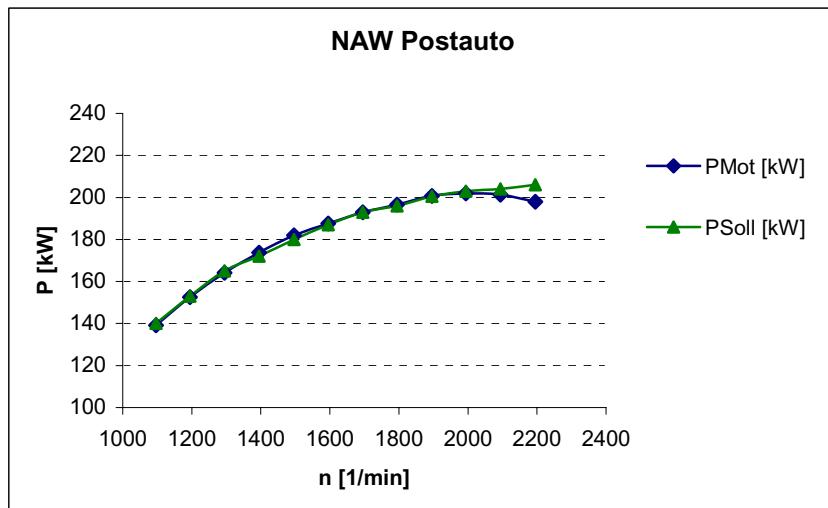


Diagramm C-1: Soll- und Motorleistung beim NAW Postauto

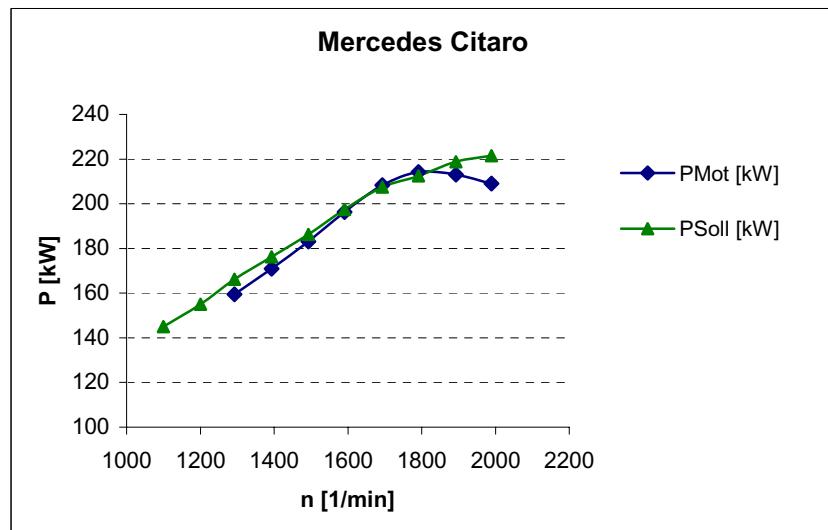


Diagramm C-2: Soll- und Motorleistung beim Mercedes Citaro

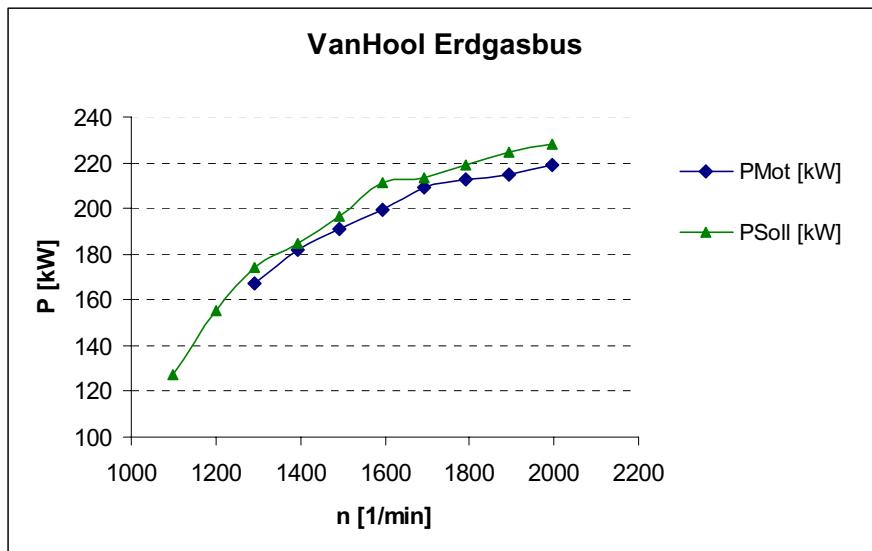


Diagramm C-3: Soll- und Motorleistung beim VanHool
(von tiefen zu hohen Drehzahlen gemessen)

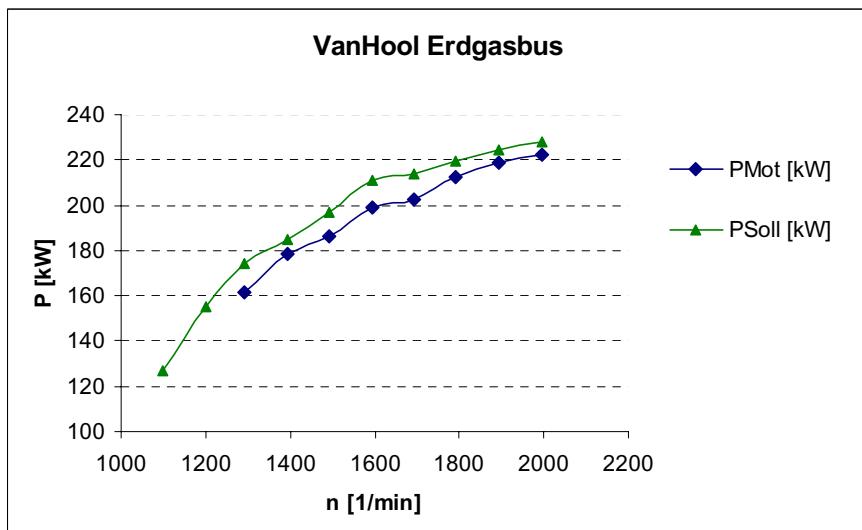


Diagramm C-4: Soll- und Motorleistung beim VanHool_1
(von hohen zu tiefen Drehzahlen)

Motorleistung P_{Mot}

Man sieht im Diagramm 5 die Motorleistungen der 3 getesteten Fahrzeuge (NAW Postauto, Mercedes Citaro, VanHool).

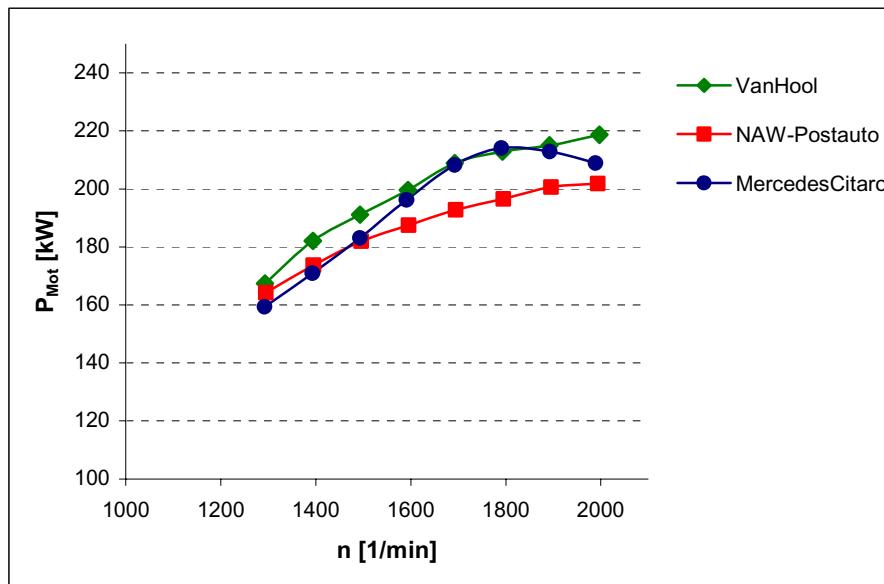


Diagramm C-5: Motorleistung der 3 Busse (NAW, Citaro, VanHool) im Vergleich

Drehmoment M_Mot

Wie beim Motorleistungsvergleich wurden auch dieses mal zwei Kurven des VanHool Busses (VanHool_1, VanHool_2) mit den Kurven der Dieselfahrzeuge verglichen. In Diagramm 6 kann man die Drehmomentkurven der 3 Fahrzeuge erkennen.

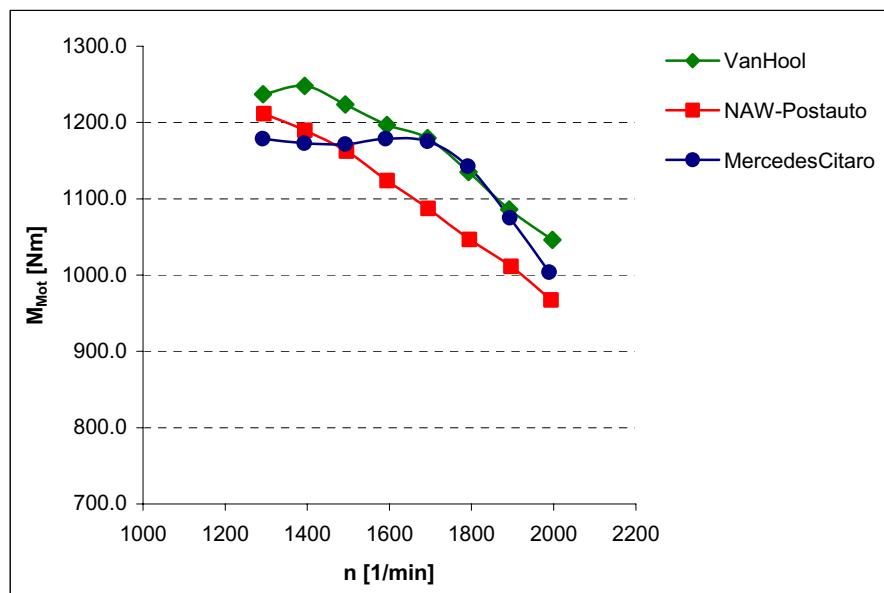


Diagramm C-6: Drehmoment der 3 Busse (NAW, Citaro, VanHool) im Vergleich

Rauchgas

Unter Rauchgas versteht man hier die Trübung des Abgases. In Diagramm 7 erkennt man die gemessene Trübung der 3 Fahrzeuge (NAW, Citaro, VanHool).

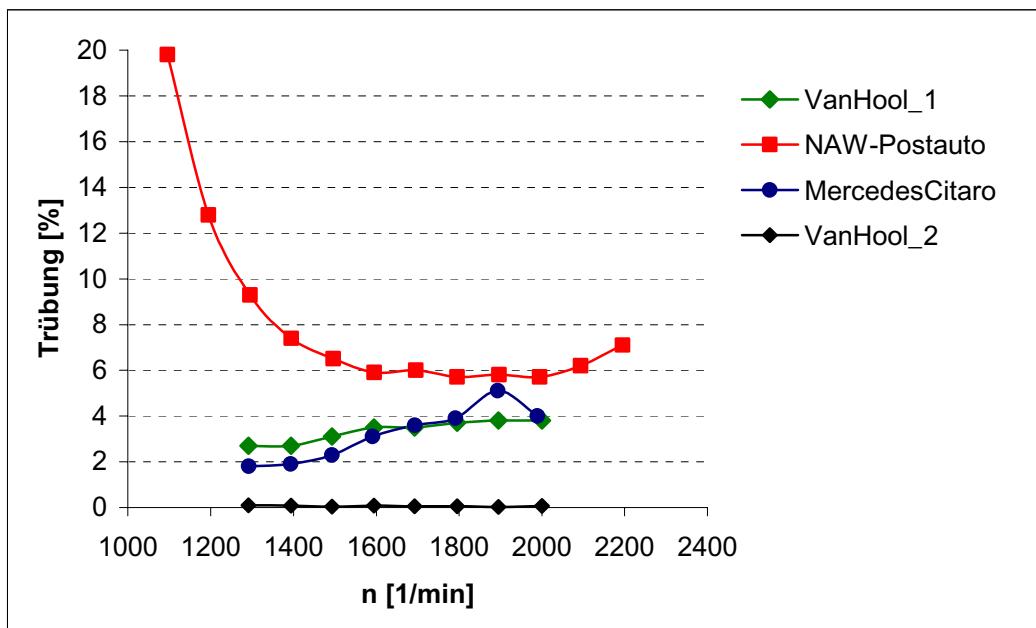


Diagramm C-7: Trübung der 3 Busse (NAW, Citaro, VanHool) im Vergleich
Dieselverbrauch

Im nachstehenden Diagramm 8 erkennt man den gemessenen Dieselverbrauch der zwei Dieselfahrzeuge (NAW, Mercedes Citaro).

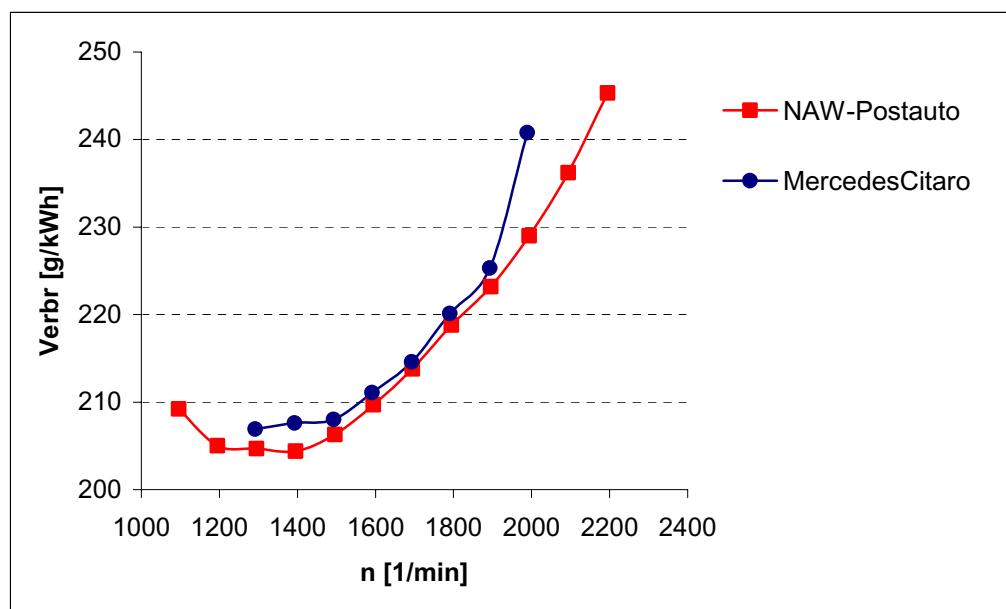


Diagramm C-8: Spezifischer Verbrauch der 2 Dieselbusse (NAW, Citaro) im Vergleich

Anhang D

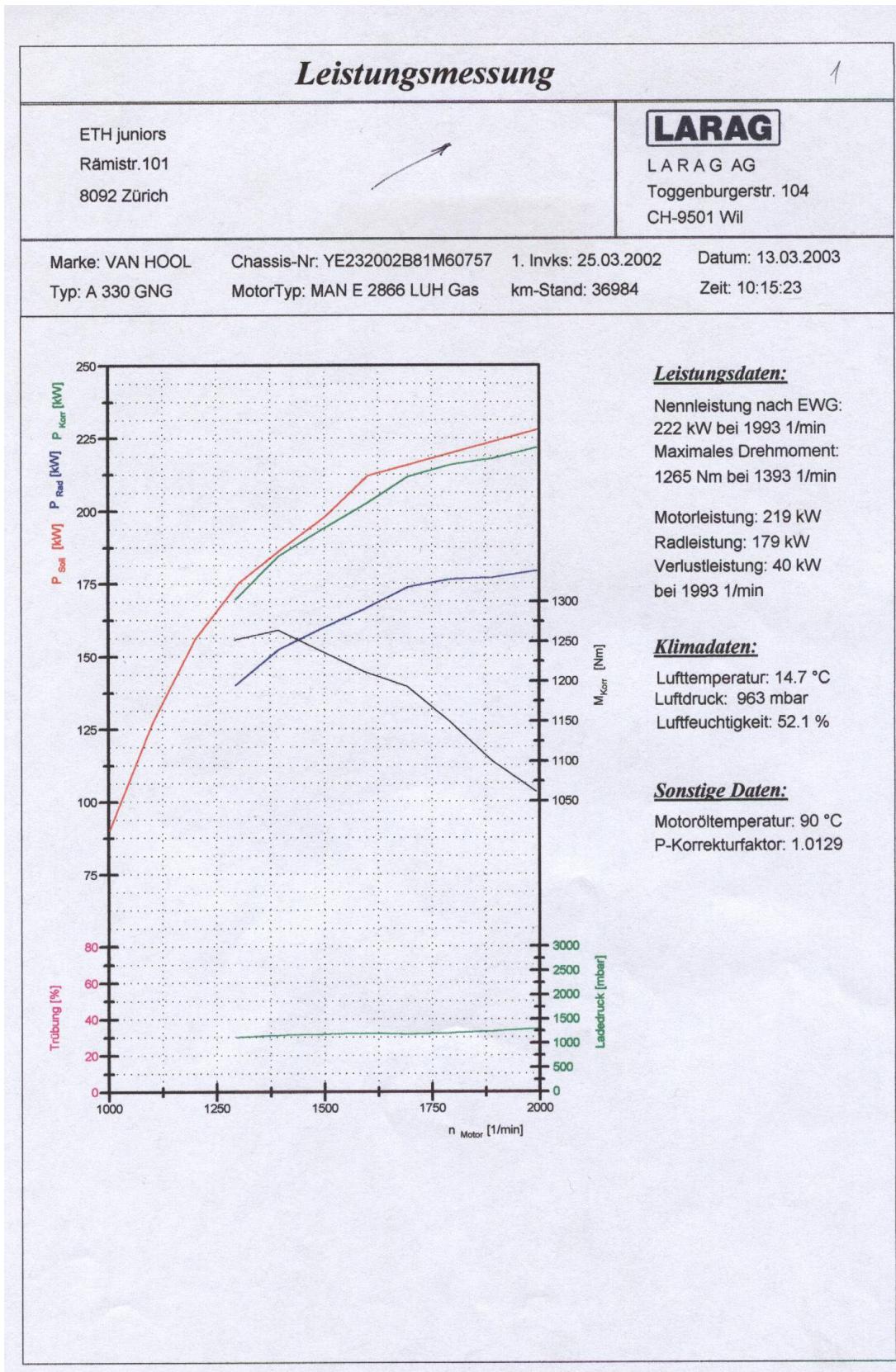


Bild D-1: Leistungsmessung VanHool (von tiefen zu hohen Drehzahlen)

Bild D-2: Leistungsergebnisse VanHool (von tiefen zu hohen Drehzahlen)

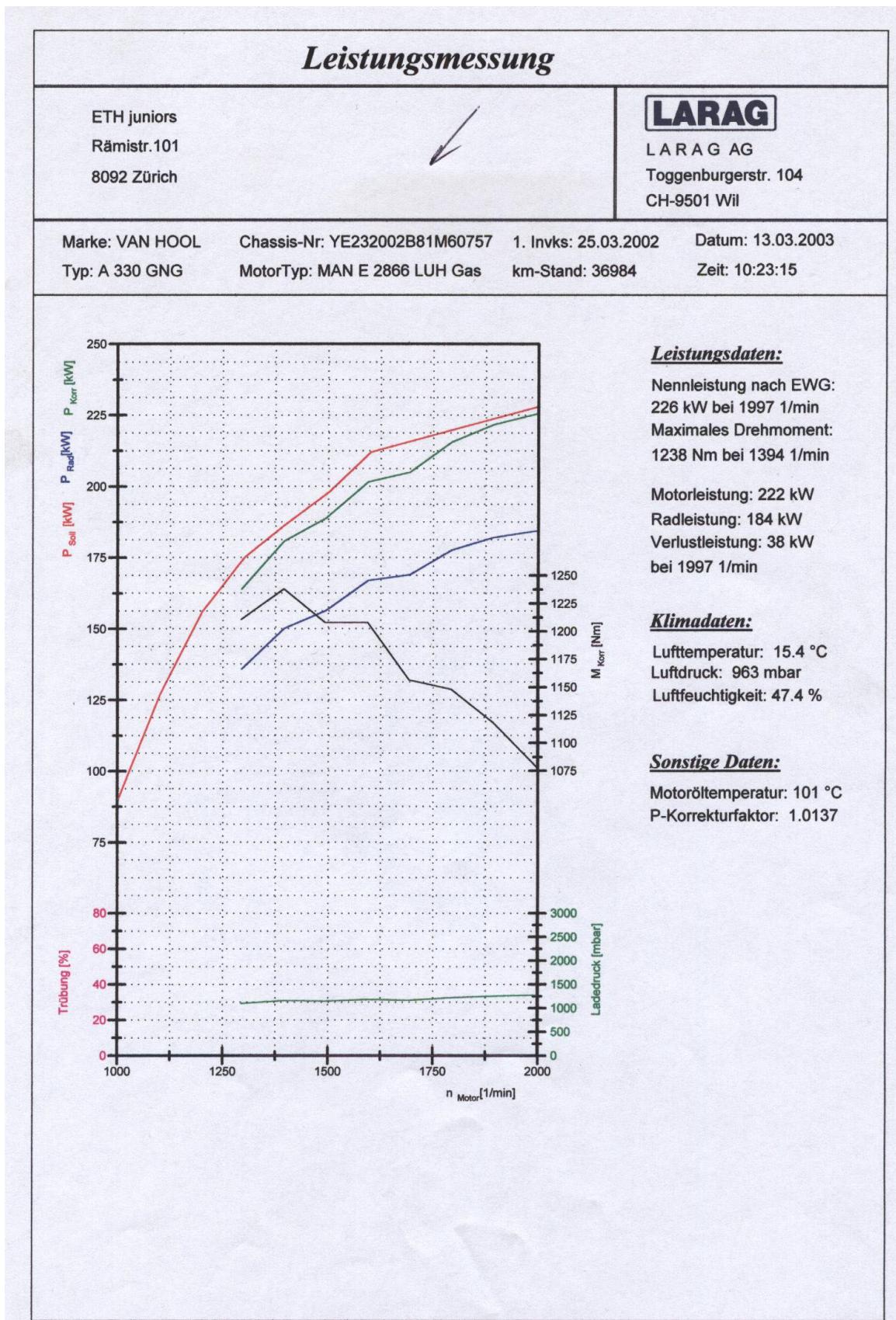


Bild D-3: Leistungsmessung VanHool (von hohen zu tiefen Drehzahlen)

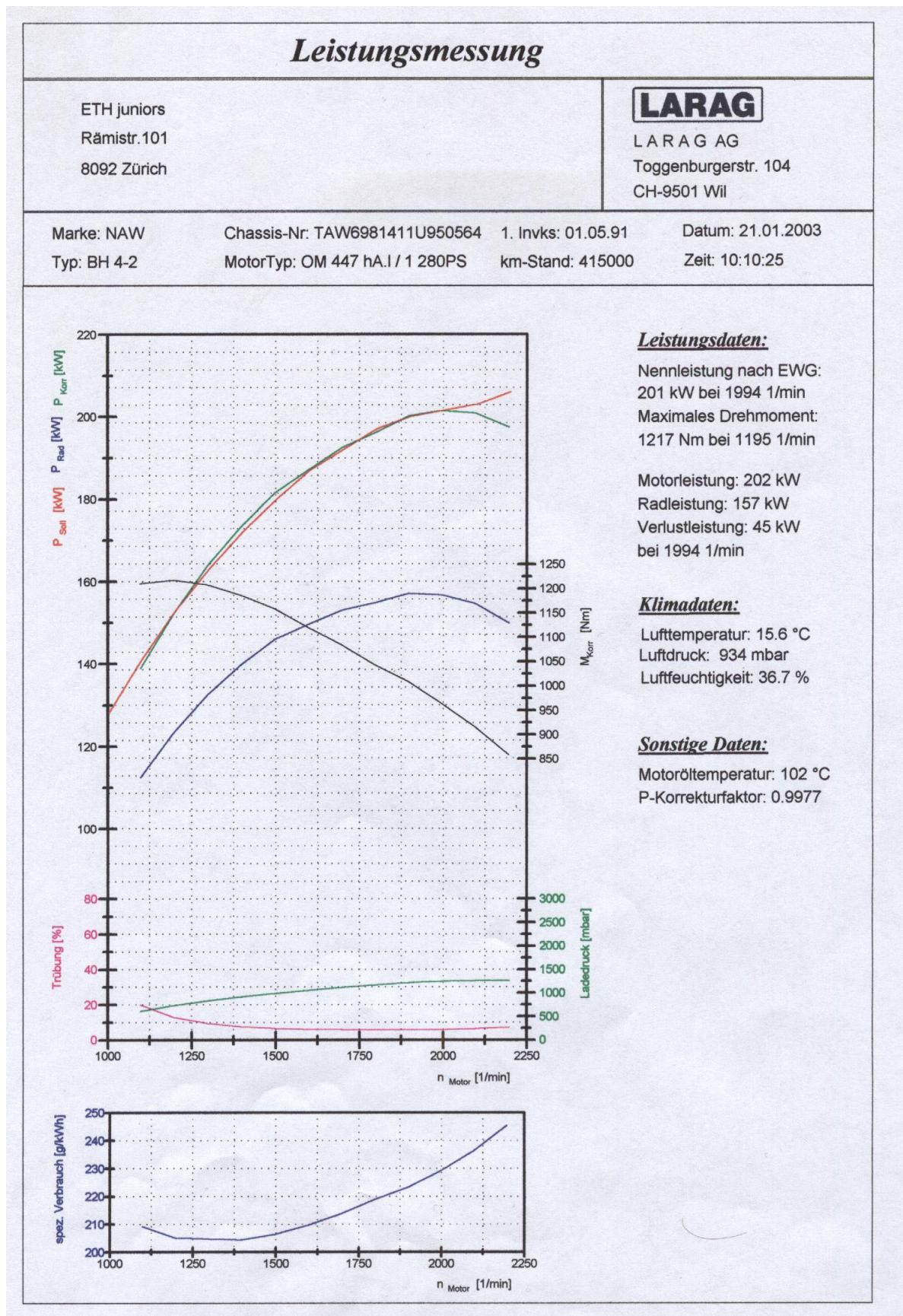


Bild D-5: Leistungsmessung NAW-Postauto (von tiefen zu hohen Drehzahlen)

Bild D-6: Leistungsergebnisse NAW-Postauto (von tiefen zu hohen Drehzahlen)

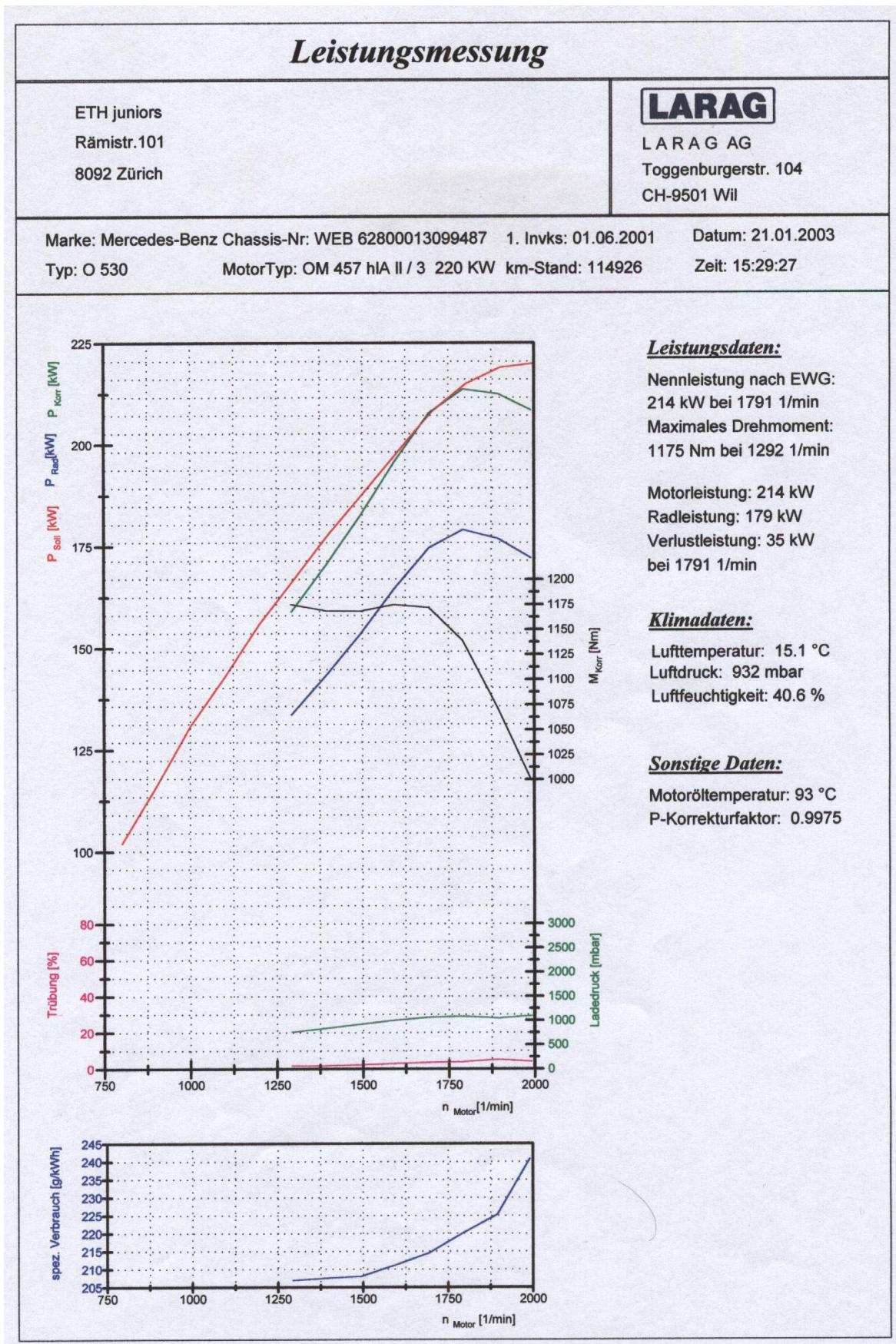


Bild D-7: Leistungsmessung Mercedes Citaro (von tiefen zu hohen Drehzahlen)

Bild D-8: Leistungsergebnisse Mercedes Citaro (von tiefen zu hohen Drehzahlen)

Anhang E

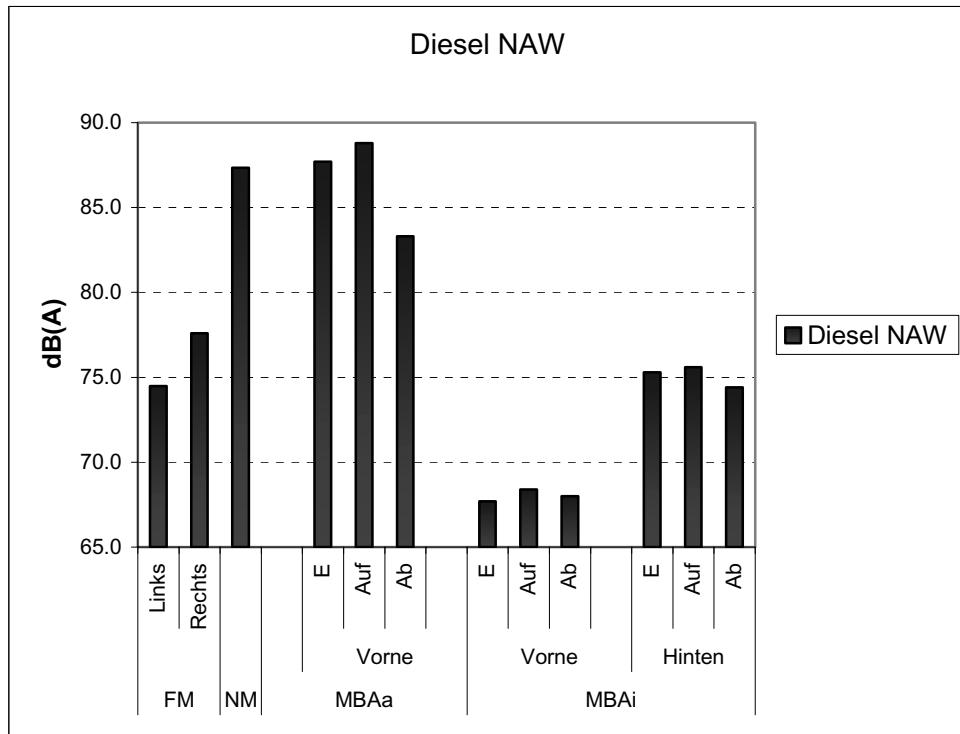


Diagramm E-1: Lärmpegel beim NAW Dieselfahrzeug

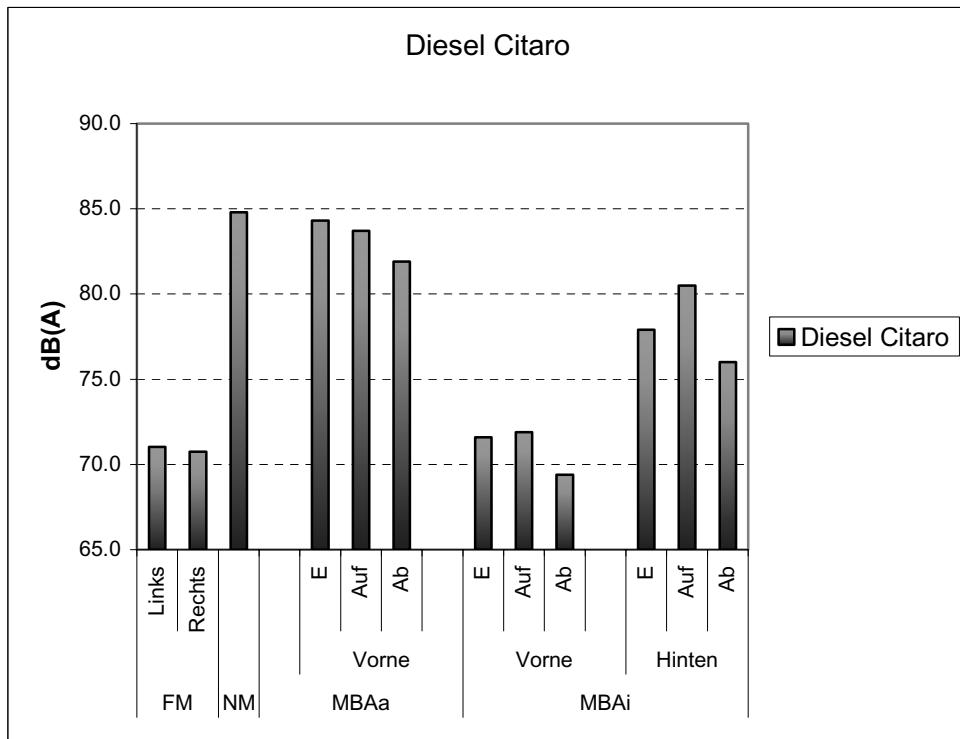


Diagramm E-2: Lärmpegel beim Citaro Dieselfahrzeug

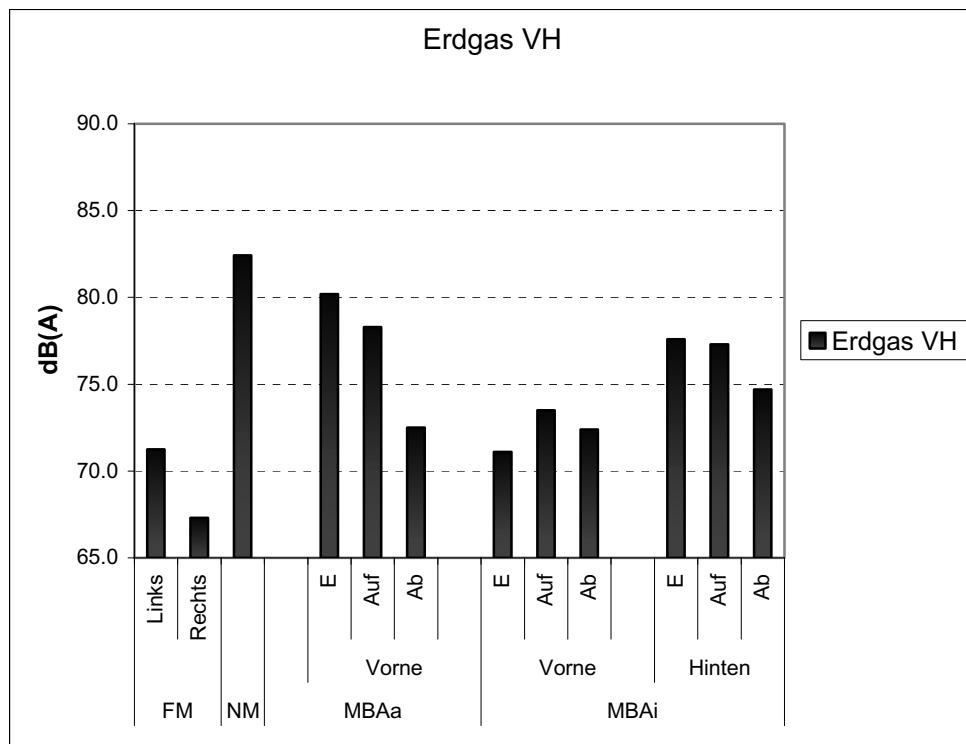


Diagramm E-3: Lärmpegel beim VanHool Erdgasbus

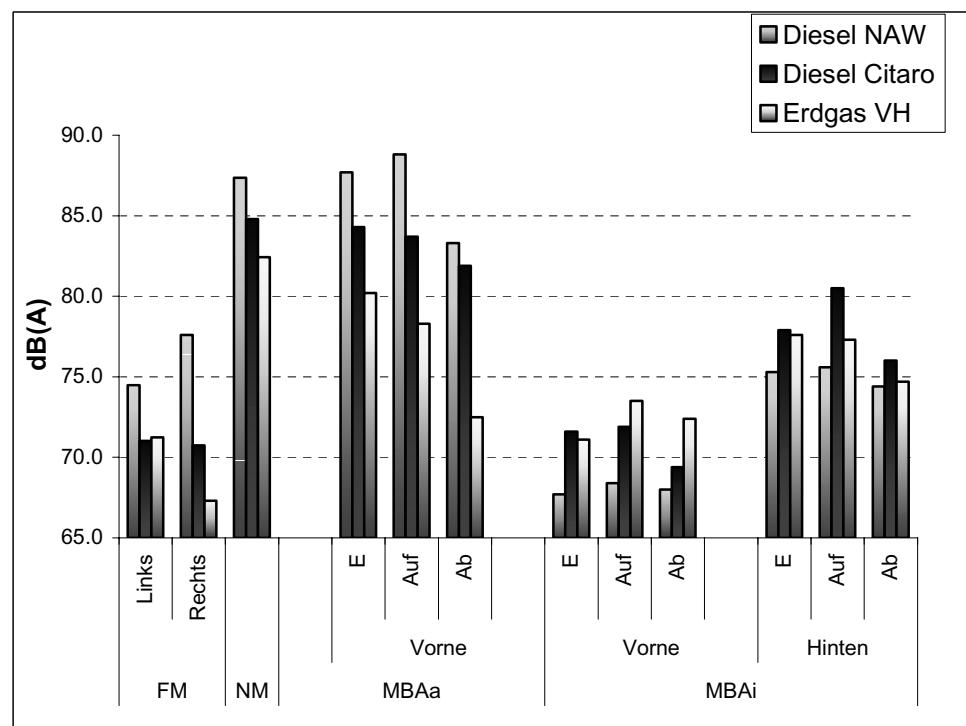


Diagramm E-4: Lärmpegelvergleich der 3 Fahrzeuge

Anhang F



Bild F-1: Erdgasbus VanHool



Bild F-2: NAW-Postauto



Bild F-3: Mercedes Citaro

Anhang G

Bern; 14. Februar 2002 St

Stadt Bern
Direktion für Bildung
Umwelt und Integration

Javier Fernandez
Letzigraben 135
8047 Zürich

Auftrag Nr: 03.041

Erdgas-Analysen, Heizwert

		Auftraggeber:	ETH juniors	Auftrag Nr:
Probenort	[Text]	Tankstelle	Tankstelle	
Probenehmer	[Text]	ETH	ETH	
Eingang im SLB	[a]	12.02.2003	12.02.2003	
Analysiert	[a]	12.02.2003	12.02.2003	
Analytiker	[Text]	St	St	
Probegefäße	[Text]	GVM 108*	IBW 101*	
'Luft'	[Vol%]	2.009	2.127	
CO2	[Vol%]	0.958	1.082	
Methan	[Vol%]	91.43	90.47	
Ethan	[Vol%]	4.113	4.517	
Propan	[Vol%]	1.091	1.229	
i-Butan	[Vol%]	0.155	0.188	
Butan	[Vol%]	0.173	0.234	
i-Pentan	[Vol%]	0.035	0.065	
Pentan	[Vol%]	0.027	0.059	
Hexane	[Vol%]	0.005	0.031	
KonzAbw	[Vol%]	0.0001	-0.0001	
Dichte	[kg/m³]	0.789	0.8000	
Dichte bez Luft	[1]	0.6103	0.6188	
ob Heizwert	[kWh/m³]	11.397	11.486	
ob Vobbeindex	[kWh/m³]	14.589	14.601	
unt Heizwert	[kWh/m³]	10.259	10.343	
ob Heizwert	[kcal/m³]	9792	9868	
ob Vobbeindex	[kcal/m³]	12535	12545	
unt Heizwert	[kcal/m³]	8814	8886	
THT	[Jmg/m³]			

* Doppelbestimmung aus 1 Maus

Eg

Leiter Stadtthurm Bern:


Bild G-1: Gasanalyse vom 12.02.2003 vom Stadtthurm Bern

Erdgas > Einzel-Analyse													
Grosses	Einheit			Lauft				AufGeb:		!T		Mittelt	
[Text]	[Text]	\1aW	\1a.	\1bW	\1b.	\2aW	\2a.	\2bW	\2b.	\1W	\1D	\1.	\2W
ProOrt	[Text]			Tankstelle				?G	Tankstelle				Tankstelle
ProStel	[Text]							T					
ProTag	[Ta]							Z					
ProZeit	[St:Mi]							T					
ProNem	[Text]												
ProGefä	[Text]	IBW 101				IBW 101			IBW 101				IBW 101
Lu	[Vol%]	2.1246	J		J?Z	2.1288	J	J?Z	J?Z	J	J	J	2.1267
CO2	[Vol%]	1.0959	J		J?Z	1.069	J	J?Z	J?Z	J	J	J	1.0825
Me	[Vol%]	90.388	J		J?Z	90.5455	J	J?Z	J?Z	J	J	J	90.4668
Ei	[Vol%]	4.5664	J		J?Z	4.4685	J	J?Z	J?Z	J	J	J	4.5175
Pr	[Vol%]	1.2416	J?G		J?Z	1.2172	J?G	J?Z	J?Z	J	J	J	1.2294
Bui	[Vol%]	0.1891	J		J?Z	0.1864	J	J?Z	J?Z	J	J	J	0.1878
Bu	[Vol%]	0.2386	J?G		J?Z	0.2323	J?G	J?Z	J?Z	J	J	J	0.2345
Pei	[Vol%]	0.0851	J?G		J?Z	0.0839	J?G	J?Z	J?Z	J	J	J	0.0845
Pe	[Vol%]	0.0803	J?G		J?Z	0.0582	J?G	J?Z	J?Z	J	J	J	0.0593
He	[Vol%]	0.0322	J		J?Z	0.0303	J	J?Z	J?Z	J	J	J	0.0313
KonzAbw	[Vol%]	-0.0002	J		J?G	0.0001	J	J?G	J?G	J	J	J	-0.0001
Diç	[kg/m³]	0.8008	J?G		J?G	0.7993	J?G	J?G	J?G	J	J	J	0.8000
DicLu	[l]	0.6194	.			0.6182	.			J	J	J	0.6188
HoW	[kWh/m³]	11.493	J		J?G	11.479	J	?G	J	J	J	J	11.486
WoW	[kWh/m³]	14.603	.			14.599	.			J	J	J	14.601
HuW	[kWh/m³]	10.349	.			10.336	.			J	J	J	10.343
HoC	[kcal/m³]	9874	.			9862	.			J	J	J	9868
WoC	[kcal/m³]	12546	.			12543	.			J	J	J	12545
HuC	[kcal/m³]	8892	.			8881	.			J	J	J	8886
Th	[mg/m³]	J?Z			J?Z	J?Z		J?Z	J?Z	J	J	J	J
Qual	Text	####			####	####		####	####	J	J	J	####

Bild G-2: Gasprobe 1 genommen am 31. Jan. 2003

Erdgas > Einzel-Analyse		L a u f						M i t t e l						ArbTag:		
Grösse	Einheit	\1aW	\1bW	\1b.	\2aW	\2a.	\2bW	\2b.	\1W	\1D	\1.	\2W	\2D	\2.	\12D	\12.
[Text]	[Text]								?G	Tankstelle						
ProOrt	[Text]								?T							
ProStel	[Text]															
ProTag	[Text]															
ProZeit	[St:Mil]															
Pronam	[Text]								G	Fernandez						
ProGefä	[Text]								G	Fernandez						
Lu	[Vol%]	2.0113	1		?Z	2.0067	1		?Z						2.0090	
CO2	[Vol%]	0.9526	1		?Z	0.963	1		?Z						0.9578	
Me	[Vol%]	91.4669	1		?Z	91.4017	1		?Z						91.4343	
Et	[Vol%]	4.0902	1		?Z	4.1362	1		?Z						4.1132	
Pr	[Vol%]	1.083	?G		?Z	1.0981	?G		?Z						1.0906	
Bui	[Vol%]	0.1559	1		?Z	0.1542	1		?Z						0.1551	
Bu	[Vol%]	0.1725	1		?Z	0.1733	1		?Z						0.1729	
Pei	[Vol%]	0.035	1		?Z	0.0346	1		?Z						0.0348	
Pe	[Vol%]	0.0275	1		?Z	0.0269	1		?Z						0.0272	
He	[Vol%]	0.0052	?K		?Z	0.0054	?K		?Z						0.0053	
KonzAbw	[Vol%]	0.0001	1		?G	0.0001	1		?G						0.0001	
Dfg	[kg/m3]	0.7888	?G		?G	0.7893	?G		?G						0.7891	
Diglu	[1]	0.6101				0.6105									0.6103	
HoW	[kWh/m3]	11.395	1		?G	11.400	1		?G						11.397	
WoW	[kWh/m3]	14.588				14.590									14.589	
HuW	[kWh/m3]	10.256				10.262									10.259	
HoC	[kcal/m3]	9790				9795									9792	
WaC	[kcal/m3]	12534				12536									12535	
HuC	[kcal/m3]	8812				8817									8814	
Tht	[Jmg/m3]		?Z		?Z		####		?Z						####	
Qual	Text		####		####		####		####						####	

Bild G-2: Gasprobe 2 genommen am 5. Feb. 2003