



Bundesamt für Energie
Office fédéral de l'énergie
Ufficio federale dell'energia
Swiss Federal Office of Energy

Forschungsprogramm Elektrizität



Energiesparen bei Reisezugwagen

Messungen am erneuerten B 20-73

ausgearbeitet durch:

Conrad U. Brunner, Projektleiter, Zürich

Markus Farner, Liestal

Renato Gartner, Wettingen

Heiri Huber, Luzern

Jürg Nipkow, Zürich

Enper-Team, R&D in Energy Performance of Railways
Lindenhofstrasse 15, CH 8001 Zürich

im Auftrag des
Bundesamtes für Energie

März 2000

Bericht 5

BFE Vertragsnummer: 58801
BFE Projektnummer: 19183

Diese Arbeit ist im Auftrag des Bundesamtes für Energie entstanden. Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Dieser Bericht ist auch unter www.electricity-research.ch im Internet als pdf-File vorhanden.

Enper-Bericht 5

Ergebnisse der Messungen am erneuerten und energetisch verbesserten Reisezugwagen B 20-73



B 20-73 in der Klimakammer Olten

Enper-Team
Projektleitung: CUB
Tel 01 226 30 70, Fax 01 226 30 99

20.03.00 11:02/enper5.doc
Lindenhofstrasse 15, CH 8001 Zürich
E-Mail: enper@cub.ch

Inhalt

Zusammenfassung.....	4
Summary	4
1. Das Energieoptimierungskonzept am Reisezugwagen Bpm 20-70.....	5
2. Die Messungen in der Klimakammer vom Juni 1999.....	8
3. Die Verbesserung der Raumlufthaltung im Dezember 1999.....	10
4. Die Messung im Betrieb Dezember 1999	11
5. Der Energieverbrauch Ist/Soll/Effektiv	16
6. Ergebnis der Energieeffizienzmassnahmen	18
7. Empfehlungen für energieeffizientes Rollmaterial.....	19
Anhang 1: Messung Klimakammer.....	20
Anhang 2: Messung Betrieb	24

Wir danken dem BFE für den beträchtlichen Beitrag an die Mittel zur Durchführung dieser Untersuchung.

Wir danken den Mitarbeitenden den Schweizerischen Bundesbahnen (SBB) und der ADtranz (DaimlerChrysler Rail Systems) für die tatkräftige Unterstützung und die menschlich und fachlich gute Zusammenarbeit.

Dies ist ein fachtechnischer Bericht zur messtechnischen Überprüfung, der sich hauptsächlich auf den Bericht *Enper* 4 vom Oktober 1997 stützt. Die Grundannahmen etc. werden hier nicht wiederholt.

Es werden folgende Bezeichnungen für die drei verschiedenen Zustände des Wagens verwendet:

Ist-Zustand Bpm 20-70	Gemessener Zustand 1997 alt vor der energetischen Sanierung
------------------------------	--

Soll-Zustand Bpm 20-70	Zustand 1997 mit den geplanten energetischen Verbesserung (Enper 4)
-------------------------------	--

Effektiver Zustand B 20-73	Gemessener Zustand Dezember 1999 nach den Regelloptimierungen in der Klimakammer
-----------------------------------	---

Zusammenfassung

Der seit 20 Jahren im Betrieb stehende, klimatisierte Reisezugwagen Bpm 20-73 der SBB wurde anlässlich der Hauptrevision energetisch verbessert. Gemäss dem Konzept von 1997 wurden 10 Energieeffizienz-Massnahmen mit ca. Fr. 53'000 Zusatzkosten umgesetzt. Neben der thermischen Optimierung des Wagenkastens stand die bedarfsabhängige Regelung der Heizung, Lüftung und Klimatisierung im Vordergrund des Interesses. Zudem wurden durch diverse Verbesserungen 2 t Wagengewicht eingespart. Die messtechnische Überprüfung im Klimalabor und im fahrplanmässigen Betrieb mit Passagieren hat die Funktionsweise des Wagens und insbesondere der im Rollmaterialbereich neuartigen bedarfsabhängigen Lüftung bestätigt. Der nunmehr für weitere 20 Jahre einsetzbare Wagen braucht im revidierten Zustand 55% weniger Energie für Heizung, Lüftung, Klimatisierung, Beleuchtung, etc. Bezogen auf den gesamten Energieverbrauch eines Intercity Zuges (inkl. Traktionsenergie) vermindert sich der Energieverbrauch durch die Verbesserung der Wagen um 14%. Die Wirtschaftlichkeit der Massnahmen ist unter strengen Auflagen der SBB in Bezug auf Verzinsung, Amortisation und Energiepreisen mit einem Kosten-/Nutzenverhältnis von 0,4 sehr gut. Die SBB planen die Umsetzung an den 27 Wagen der selben Serie und planen die Erkenntnisse für die Erneuerung von 500 weiteren klimatisierten Einheitswagen zu nutzen.

Summary

The passenger railway coach Bpm 20-70, in service for SBB since 20 years, has been retrofitted and energetically improved. According to a detailed study from 1997 10 energy efficiency measures have been implemented with additional costs of sFr. 53'000. The main focus was on thermal improvement of the coach body and windows and the demand operated heat-, ventilation- and air-conditioning-system. With several other measures 2 t of weight were reduced. The measurement campaign in the thermal laboratory and in actual passenger use show the operational qualities of the coach including the new ventilation system. This passenger coach is now ready for another life-cycle of 20 years and will consume 55% less energy for heating, ventilation, cooling, lighting, etc. Of the total operating energy of a Intercity train the coach will contribute an energy savings of 14%. The cost-/benefit ratio of 0,4 shows that the investment will be paid for quickly by the energy savings. These calculations are based on rigid numbers for interest rate, amortisation and energy price determined by SBB. SBB is planning to implement the findings directly into the refit of the B 20-73 fleet of 27 coaches and to use these experiences to improve the refit of the further 500 air-conditioned passenger coaches in the near future.

1. Das Energieoptimierungskonzept am Reisezugwagen Bpm 20-70

Im *Enper*-Bericht 4 (Oktober 1997)¹ wurde ein detailliertes Energiesparprogramm für den im Jahr 1980 in Betrieb gesetzten, klimatisierten Intercity Reisezugwagen Bpm 20-70 vorgelegt und veröffentlicht². Dieses Konzept war 1996/97 vom *Enper*-Team in enger Absprache mit den SBB und der ADtranz sowie weiteren Industriepartnern (L&S, Glas Troesch, etc.) mit Mitteln des BFE erarbeitet worden. Die SBB wollen die Ergebnisse einerseits an der Flotte der 27 Fahrzeuge des Reisezugwagens Bpm 20-70 umsetzen und andererseits die Ergebnisse auch für weitere Um- und Neubauten von klimatisierten Reisezugwagen (z.B. EW IV, IC N) nutzen.

Im erwähnten Energiekonzept wurde ein Paket mit insgesamt 10 Energiesparmassnahmen vorgeschlagen, die während der nach 20 Jahren Betriebseinsatz ohnehin fälligen Revision 4 umgesetzt werden sollten. Damit könnte der Energieverbrauch des Wagens für Komfort und Funktion mit zusätzlichen Investitionen für Energieeffizienz von ca. Fr. 60'000 (zu den Fr. 650'000 für die allgemeine Revision) um ca. 90'000 kWh/a (54%) vermindert werden. Die Wirtschaftlichkeit des Massnahmenpaketes war unter den von den SBB geforderten Randbedingungen (Verzinsung, Strompreis, Nutzungsdauer, Amortisation, etc.) mit einem Kosten-/Nutzenverhältnis von 0,33 sehr gut.

Die Hauptwerkstätte Bellinzona wurde von den SBB mit der Umsetzung des Projektes beauftragt. Im Frühjahr 1999 (nach diversen terminlichen Verzögerungen der SBB) wurde der erste Wagen für Messzwecke in die Klimakammer Olten überführt. Der Wagentyp heisst neu B 20-73, der hier untersuchte Wagen ist B 50 85 20-73 000-5.

Die ADtranz (als Hauptauftragnehmerin der Umbauten) machte dort, zuhanden der SBB, vom 26.5.99 bis zum 21.6.99 die geforderten Abnahmemessungen im Aussentemperaturbereich von -20° C bis 35° C gemäss UIC (Union Internationale des Chemins de fer)³. Dabei wurden einige Schwierigkeiten (geringere Luftvolumenströme, verunreinigte Verdampfer, beschädigte CO₂-VOC-Sensoren, etc.) beobachtet und soweit möglich behoben. Bei den Messungen wurde festgestellt, dass die Klimaanlage die UIC-Werte erfüllt und der Wagen eine gemessene Scheinleistung hat, die deutlich unter den UIC-Grenzwerten liegt.

Anschliessend stand der Wagen für drei Tage dem *Enper*-Team zur energetischen Analyse zur Verfügung.

Seit August 1999 ist der Wagen im normalen, inländischen Intercity-Betrieb als Verstärkungswagen (am Schluss oder an der Spitze des Zuges nach der Lok) zwischen Basel und Chiasso eingesetzt. Ab Januar 2000 soll aufgrund der Erfahrungen des Vorläuferwagens in Bellinzona der Umbau der Serie beginnen, deren erste Fahrzeuge ab August 2000 ausgeliefert werden sollen.

Der Wagen erhielt eine neue Vis-à-Vis-Bestuhlung mit unverändert 80 Sitzen, ein Veloabteil, nur noch ein (offenes) WC (statt bisher 2) und einen neuen Anstrich (wie EW IV). Die Aussentüren und die Drehgestelle sind unverändert. Der ursprünglich als RIC Z1 mit Mehrspannungseinrichtung ausgerüstete, international einsetzbare Wagen ist heute nur noch in der Schweiz (16 2/3 Hertz/15 kV) einsetzbar.

Die SBB haben folgende **Enper-Massnahmen** realisiert:

- Wärmedämmung der Aussenhaut (6 cm Fiberform 40 kg/m³ mit Mylar-Dampfsperre, Z-Profil mit 0,7 cm Überdeckung) und der Lüftungskanäle.
- Neues Glas (ESG/VSG, Argonfüllung, Troesch: U-Wert effektiv 1,60 W/m² K, g-Wert effektiv 57 %).
- Neue Energieversorgung (BUR), modular aus verfügbaren Komponenten aufgebaut. Eigenverbrauch (gemäss SBB) statt Ist 3,9 kW neu effektiv 1,1 kW (Leerlauf), höherer Wirkungsgrad im Betrieb.
- Lüftung mit variablen Aussen- und Fortluftvolumenströmen mit Klappensteuerung, nicht Drehzahl-geregeltem Fortluftventilatormotor und CO₂-Sensor.
- Kältemaschinen mit 2 Kompressoren ein/aus mit reduzierter Leistung (neu effektiv je 5,75 kW statt Ist je 9,2 kW).
- Raumlufttemperatur: Herabsetzung des Sollwertes im Heizbetrieb (22° C auf 21° C) resp. Erhöhung im Kühlbetrieb (+/- 1K minimal), sowie weitere regeltechnische Massnahmen in der Steuerung der Klimaanlage.
- Abteilbeleuchtung (ungeregelt) mit T5-FL-Röhren 28 W (plus Leistung elektronisches Vorschaltgerät 3 W) in geschlossenen Leuchten mit opalisierter Abdeckung, EVG (Fluora), neu 500 W, Wegfall der alten Leselampen.
- Beleuchtung Vorräume, Gepäckabteil und WC: 10 mal 18 W (1 Leuchte mehr als vorher, dafür überall effektiv 18 W (plus elektronisches Vorschaltgerät 3 W) statt alt 20 W und η_{VSG} 85% statt alt 80%). WC-Leuchten sind nicht bedarfsabhängig geschaltet.
- LED-Schlusslicht mit 5 W bei 24 V.
- Leichtere Sitze (Sedile Julius 18 kg/Sitz).

Der gesamt U-Wert der Aussenhülle (in Fahrt mit α_a 100 W/m²K) wurde von 2,06 W/m² K (Ist) auf 1,41 W/m² K (effektiv) verbessert. Dabei wurden die Linienzuschläge im ausgeführten Zustand aufgrund von Plänen abgeschätzt. Im *Enper*-Bericht 4 wurde ein Sollwert von 1,28 W/m² K anvisiert.

Insgesamt wiegt der Wagen leer neu effektiv 2,0 t weniger (Wegfall 1 WC, leichtere Sitze), nämlich 42,0 t (Ist alt 44,0 t), wobei die Genauigkeit wegen unterschiedlicher Bandagen-Stärken nur mit +/- 0,5 t zu beziffern ist.

Folgende Massnahmen wurden **nicht** entsprechend dem *Enper*-Konzept oder **anders** realisiert:

- Keine neuen Fensterrahmen (neues Glas in alten Alu-Rahmen), dadurch keine aerodynamische Verbesserung, keine verbesserte Feuchtigkeitsdichtung und keine Wärmebrückenverminderung.
- VOC-Sensor (Raucher): eingebaut aber nicht aktiviert.
- Kein drehzahl geregelter Fortluftventilatormotor.
- Keine Bioreaktor-Vakuum-Toilette.

Die SBB haben sich nachträglich entschieden, die Wagen für die Verpendelung (elektrisch) nachzurüsten. Mit der Umrüstung auf eine geschlossene Toilette wird zugewartet, bis eine bahntaugliche Bioreaktorlösung vorhanden ist, die die Probleme mit der Entleerung des Fakälientanks löst.

Die SBB hat nach eigenen Angaben (von *Enper* nicht überprüft) die **Mehrkosten** für Energieeffizienzmassnahmen (gegenüber der normalen R4-Revision) wie folgt veranschlagt:

Nr.	Massnahme	Soll Mehrkosten Schätzung <i>Enper</i> 97 (kFr)	Effektiv Mehrkosten Berechnung SBB 99 (kFr)
P1	optimierte Steuerung/Regelung Heizung/Lüftung/Klima HLK	1,0	5,0
P2/P3/P4	Wärmedämmung Wand, Dach, Boden, neue Verglasung, Raumlufthtemp. 21°C	41,2	12,8
P5	Bedarfssteuerung Lüftung	16,0	28,0*
P6	Lüftungskanäle wärmedämmen	0,8	0,8
P7	Beleuchtung T5	0,0	4,8
P8	BUR, neue Stromversorgung, Batterie- ladung, Kälteanlage 2 Verdichter	-1,9	0,0
P9	Schlusslicht LED	1,6	1,2
P10	leichtere Sitze	0,0	0,0
Total		58,7	52,6

*) Mehrkosten gemäss Gutachten H. Huber vom 23.12.99. Gemäss Angaben SBB nur 20,4 kFr.

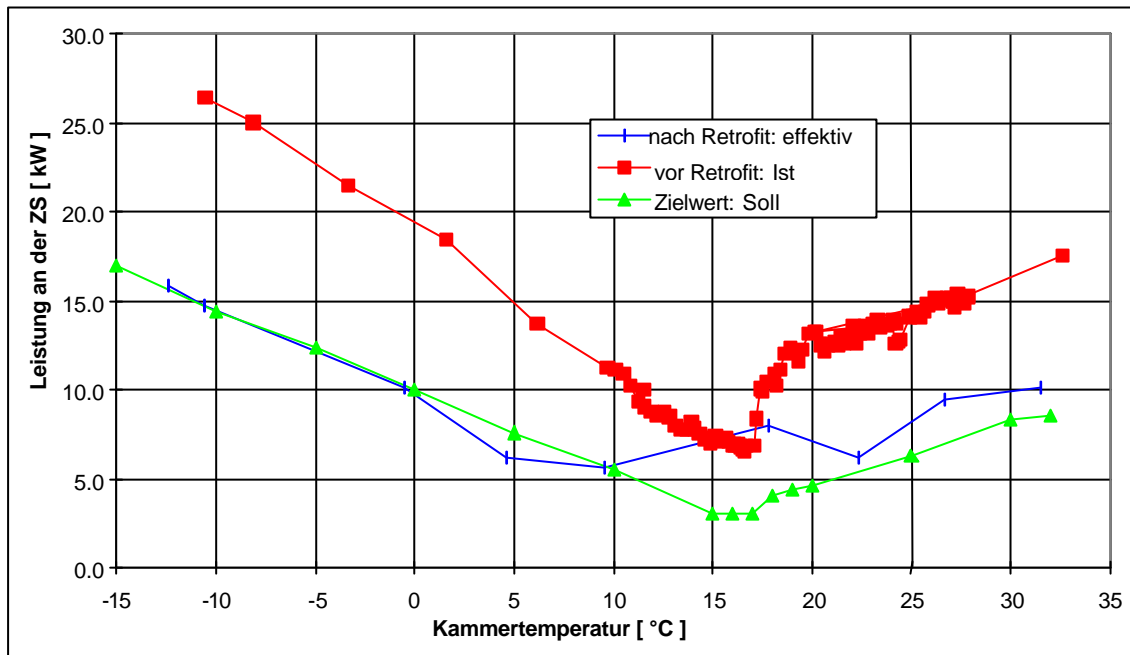
Tabelle 1: Mehrkosten für energetische Effizienzverbesserungen

Dies bedeutet, dass die effektiven auf die Energieeinsparung anzurechnenden Gesamtmehrkosten nur 90% der erwarteten Soll-Kosten ausmachen. Die Minderkosten sind vor allem auf den Wegfall der neuen Fensterrahmen, resp. die Weiterverwendung der bestehenden Fensterrahmenkonstruktion zurückzuführen. Mehrkosten entstanden im Bereich Lüftung (2 Klappen Aussenluft und Fortluft, Luftkanalanpassungen, etc.).

2. Die Messungen in der Klimakammer vom Juni 1999

Unter der Leitung von Markus Farner (*Enper-Team/Eicher & Pauli*) wurde versucht, die Messungen mit den selben Geräten wie in der Ist-Zustandsmessung vom 21.5.96 bis 29.6.96 (*Enper-Bericht 3*, 16. September 1996)⁴ zu machen. Die Messungen in der Klimakammer der SBB in Olten verliefen insgesamt störungsfrei.

Vom 23. bis 25.6.99 wurde der erneuerte Wagen im Aussentemperaturbereich von $-12,4^{\circ}\text{C}$ bis $+31,5^{\circ}\text{C}$ durchgemessen. Dabei wurde durch künstliche Innenlasten wiederum eine mittlere Belegung (33 %) und eine typische Sonnenbestrahlung simuliert.



LI L:\1999\412\ERGEBNIS\vor_nach1.xls\Tabelle1B

Bild 1: Vergleich der Messergebnisse des Bpm 20-70/B20-70 in der Klimakammer

Kammer-temp. [°C]	Leistung 25/20 [kW]	Leistung 5/5 [kW]	Heiz-register 1 [% Ein]	Heiz-register 2 [% Ein]	Kompres-sor 1 [% Ein]	Kompres-sor 2 [% Ein]
-12,4	15,9		27,0%	25,6%	0,0%	0,0%
-10,6	14,7		23,8%	23,0%	0,0%	0,0%
-0,5	10,2		10,1%	15,3%	0,0%	0,0%
4,6	6,1		0,0%	10,4%	0,0%	0,0%
9,5	5,7		0,0%	2,8%	14,6%	29,2%
17,8	7,9		0,0%	5,9%	16,1%	47,4%
22,3	6,2		0,0%	0,7%	31,5%	17,4%
26,7		9,4	0,0%	1,6%	56,4%	35,5%
31,5		10,1	0,0%	1,2%	36,2%	62,2%

Tabelle 2: Tabellarische Auflistung der Messergebnisse in der Klimakammer

Die gesamte elektrische Leistung liegt nach dieser Messphase neu im Sockelbereich effektiv bei 8 kW (Ist alt 7 kW), die Winterspitze bei -12°C bei effektiv 16 kW (Ist alt 27 kW) und die Sommerspitze bei $+31^{\circ}\text{C}$ bei effektiv 10 kW (Ist alt 18 kW). Die Ergebnisse stimmen bei extremen Temperaturen gut mit den geplanten Werten für den Sollzustand

überein und bestätigen die thermische Verbesserung des Wagenkastens und der Lüftung/Heizung sowie Kühlung. Die gemessenen Werte im mittleren Temperaturbereich (11°C bis + 22°C) liegen aber (in diesem Zustand) noch deutlich über den erwarteten Sollwerten von 3 kW, weil die Regelung offenbar immer noch zu oft Zustände mit gleichzeitigem Heizen und Kühlen zulässt.

Nach der Klimakammer erfolgten Erprobungen im Betrieb, während der dynamischen Messfahrt wurden auch diesbezügliche Optimierungen durchgeführt.

3. Die Verbesserung der Raumluftheregelung im Dezember 1999

Aufgrund der Messergebnisse wurde von *Enper* festgestellt⁵, dass nicht alle Funktionen der bedarfsabhängigen Lüftung sowie Kühlung gemäss dem ursprünglichen Plan implementiert waren. Insbesondere betraf dies folgende Elemente:

- Neutralzone Aussenlufttemperatur (Vermeiden gleichzeitiges Heizen/Kühlen)
- Free Cooling (Vermeiden Kältemaschineneinsatz bei $t_a < 20^\circ\text{C}$)
- VOC-Sensor (Raucherabteil) nicht aktiviert – wegen ungenügender Bahntauglichkeit des eingesetzten kombinierten CO₂-VOC-Sensors.

Dadurch werden in diesem wichtigen Bereich der Lüftung/Kühlung/Heizung die angestrebten Betriebszeiten der Aggregate überschritten und das anvisierte Energiesparziel nur teilweise erreicht.

Nach mehreren Gesprächsrunden mit SBB- und ADtranz-Vertretern sowie nach erneuten Rücksprachen mit den bisherigen Sensorlieferanten und weiteren Anbietern wurden einige Optimierungen⁶ wie folgt gemacht:

Neutralzone: Regelung mit weicher Sollwertzone erlaubt länger ohne gleichzeitige Kühlung/Heizung auszukommen.

VOC-Sensoren (Raucherabteil): Die von *Enper* 1997 (aufgrund von Vorabklärungen mit Sensorherstellern) vorgeschlagenen Sensoren, die aus der Gebäudeklimatechnik stammen, sollten in der Zwischenzeit überprüft und allenfalls weiterentwickelt werden: Die Überprüfung der Bahntauglichkeit der CO₂- und VOC-Sensoren wurde vom Hersteller nur in Bezug auf Erschütterungen durchgeführt und bestätigt. ADtranz und SBB zweifelten beim VOC-Sensor an der Bahntauglichkeit durch zeitweisen Stromunterbruch und tägliche Kalibrierungsroutinen sowie unerwünschte Feuchtigkeit (Betauung), in seltenen Betriebszuständen sowie mangelnden Brandschutzeigenschaften. Zudem wurde festgestellt, dass die eingesetzten kombinierten CO₂-VOC-Sensoren sehr empfindlich (Kontakte, etc.) seien und beim Einbau, resp. beim Unterhalt beschädigt werden können.

Der ursprünglich ins Auge gefasste Sensorlieferant stellt heute nur noch eine schmale Palette von VOC-Sensoren her, ist nicht in der Lage individuelle Modifikationen zu machen und bestreitet die Störanfälligkeit bei normaler Handhabung. Nach Typenblatt bezieht der Sensor max. 6 VA, nach inzwischen erfolgten Messungen eff. 3 W.

CO₂-Sensoren (Nichtraucherabteil): Es sind CO₂-Sensoren anderer Hersteller bereits bei Rollmaterial (z.B. im ICE 3 Führerstand) eingesetzt worden. ADtranz überprüft, ob andere Sensorhersteller besser bahntaugliche Geräte (zu vernünftigen Kosten) anbieten.

Aufgrund der vorliegenden Messergebnisse wurde von ADtranz und Enper übereinstimmend festgestellt, dass im Raucherabteil nur mit CO₂-Sensoren eine gute Regelung der Luftqualität ohne VOC-Sensoren möglich ist.

4. Die Messung im Betrieb Dezember 1999

Nach der Justierung der Regelung wurde am 10.11.99 durch ADtranz eine begleitete Messung Basel-Chiasso-Basel gemacht, um die Regelalgorithmen und die Lüftungssteuerung im Betrieb zu überprüfen und zu optimieren.

Darauf wurde von *Enper* am 9.12.99 eine begleitete Messung des B 20-73 im Betrieb von Basel nach Chiasso und zurück (analog der Apm 10-90 Messfahrt Basel-Nizza vom 12. bis 23.1.96)⁷ durchgeführt. Dabei sollte die Abhängigkeit des Energieverbrauchs von der Aussentemperatur und der Belegung verifiziert werden. Der zur Verfügung stehende Wagen und die betrieblich mögliche Messdauer konnten naturgemäss nicht alle aus energetischen Gründen interessierenden Betriebszustände (Leer-, Vollzustand) und alle Aussenklimasituationen (Temperaturen über 25°C und Kältebetrieb) abdecken. Zudem sollte die Funktionsweise der bedarfsgeregelten Lüftung/Heizung/Kälte verfolgt und die Personenbelegung und Raucherintensität protokolliert werden. Die Messungen erfolgten in normalem Betrieb bei Aussentemperaturen von ca. 0°C bis +13°C und bedecktem Himmel. Die Sitzplatzauslastung schwankte auf der Fahrt von 10% bis 65%.

Zudem wurden von *Enper* während 4 Tagen vom 10.12.99 bis 13.12.99 unbegleitete Messungen mit Datenloggern und auf dem Wagenrechner vorhandenen Daten aufgezeichnet und zu statistischen Zwecken ausgewertet. Damit sollten die in der Klimakammer nur stationär fix simulierten Betriebszustände in der Praxis überprüft werden. Zu dieser Auswertung wurden nur die Daten verwendet, bei denen das Fahrzeug auf fahrplanmässiger Fahrt war (kein Vorheiz-, bzw. Rangierbetrieb).

Da die Belegung des als Verstärkungswagen eingesetzten B 20-73 insgesamt unterdurchschnittlich war, war die Luftqualitätsregelung insgesamt nur in drei Fällen aktiv (1 mal begleitete, 2 mal unbegleitete Messung). Während der Fahrt waren die Luftklappen deshalb üblicherweise auf der Minimalstellung, was einem Aussenluftvolumenstrom von ca. 375 m³/h entspricht.

Beim minimalem Aussenluftvolumenstrom lag der CO₂-Gehalt der Raumluft (Maximum von Raucher- und Nichtraucherabteil) in einem Bereich von 500 bis 1'000 ppm. Bei den drei Belegungsspitzen stieg der CO₂-Gehalt bis auf 1'500 ppm. Nach dem Kriterium des CO₂-Gehalts kann die Raumluft während der ganzen Periode als gut bezeichnet werden.

Wenn bei einem Halt die Zugsammelschiene ausgeschaltet wurde, öffneten die Klappen bei anschliessenden Anfahren kurz (ca. 5 Minuten), damit die Heizleistung erhöht werden konnte.

Während den Stillstandszeiten in Chiasso vom 10.12.99 und 12.12.99 (von 11 bis 14 Uhr) wurde der Vorheizbetrieb eingestellt. Dabei lag der Aussenluftvolumenstrom bei ca. 600 m³/h. Da das Fahrzeug vorher nicht ausgekühlt war, hätte bei diesen Vorheizphasen die erforderliche Heizleistung auch mit einem Aussenluftvolumenstrom von ca. 375 m³/h erbracht werden können. Hier besteht also noch ein geringes Optimierungspotential durch einen mehrstufigen Vorheizbetrieb.

Energieeinsparung im Heizbetrieb

Die wesentliche Energieeinsparung der Luftqualitätsregelung resultiert im Heizbetrieb. Als Basis für die Berechnung der Heizenergieeinsparung muss zuerst der mittlere Aussenluftvolumenstrom mit einem Modellansatz berechnet werden.

Bei den drei Ereignissen, bei denen die Luftqualitätsregelung aktiv war, wurde der Zu-

sammenhang zwischen CO₂-Gehalt und Aussenluftvolumenstrom grafisch dargestellt (siehe Bilder 17, 18: Aussenluftvolumenstrom in Funktion des CO₂-Gehalts). Daraus wurde ein empirisches Modell abgeleitet, nach dem die Luftqualitätsregelung als P-Regler arbeitet (P-Bereich zwischen 1'200 und 1'450 ppm). Der I-Anteil wird in diesem einfachen statischen Modell vernachlässigt.

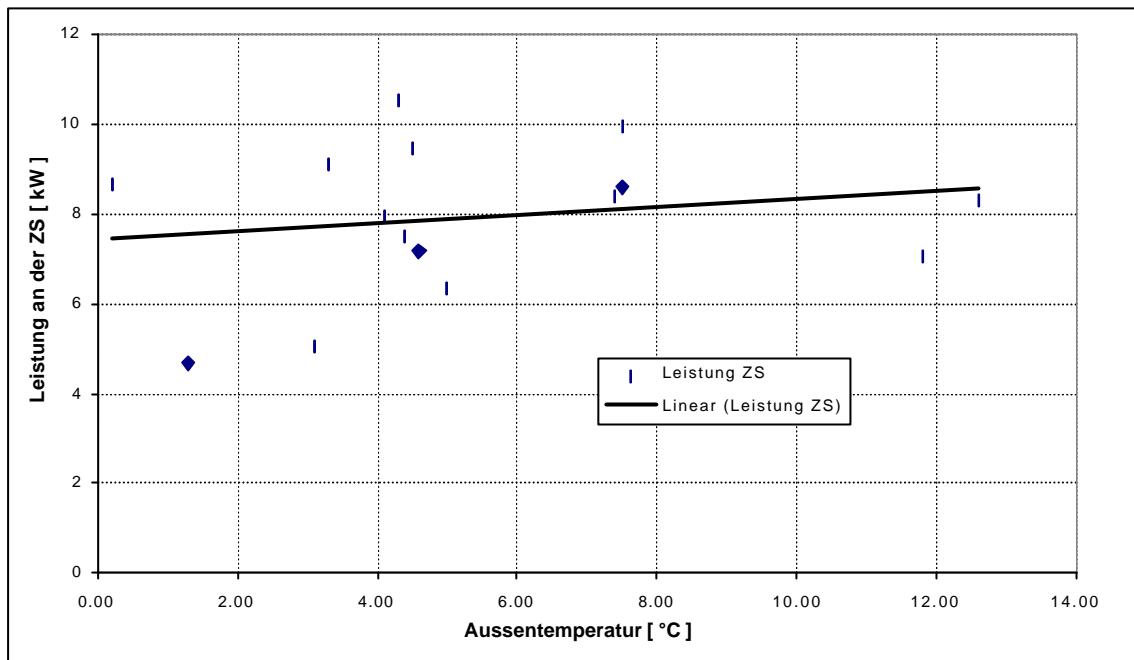
Die prozentuale Sitzbelegung von Raucher- und Nichtraucherabteil muss nicht gleich sein. Aus den Daten der begleiteten Messfahrten der ADtranz und des *Enper*-Teams wurde eine exponentielle Kurve für die nicht gleichmässige Abteilbelegung geschätzt. Diese Kurvenanpassung wird für die Berechnung des maximalen CO₂-Gehalts verwendet (Maximum von Raucher und Nichtraucher). Der y-Wert der Kurve ist eine Funktion der totalen Anzahl Personen im Fahrzeug (siehe Bild 20: Exponentialfunktion für Personenbelegung der Abteile). Beispiel: Wenn total 24 Personen im Fahrzeug sind, bedeutet ein Faktor $y = 1.11$, dass entweder 11 Personen im Raucher sind (und 13 im Nichtraucher) oder 16 Personen im Nichtraucher sind (und 8 im Raucher).

Mit den beiden genannten Ansätzen (P-Regler und Exponentialkurve) wird der Aussenluftvolumenstrom in Funktion der Personenbelegung berechnet (siehe Bilder 17, 18: Aussenluftvolumenstrom in Funktion der Personenbelegung). Im Diagramm sind neben den Modellwerten auch die Daten aus der begleiteten Messfahrt eingetragen. Die Werte von begleiteter Fahrt und Modell weichen in einigen Bereichen voneinander ab. Gründe dafür sind:

- Im Modell wird der CO₂-Ausstoss pro Person mit einem pauschalen Literaturwert von 20 g/h gerechnet. Die effektive CO₂-Produktion ist je nach Person (Gewicht) und Aktivität unterschiedlich. Zudem kann auch der CO₂-Gehalt der Aussenluft geringfügig schwanken.
- Bei der begleiteten Messfahrt war der Aussenluftvolumenstrom bei gleichem CO₂-Gehalt grösser als an den übrigen Messtagen. Die Ursache könnte sein, dass sich die Belegung in diesem Fall ungewöhnlich schnell und stark geändert hatte.
- Der effektive Wert y war bei der höchsten Belegung 30 % grösser als im Modell.

Mit der angenommenen Häufigkeit der Personenbelegung wurde der mittlere Aussenluftvolumenstrom während der Betriebszeit in der Heizperiode berechnet. Der berechnete Mittelwert liegt bei 730 m³/h. Im *Enper*-Bericht von 1997 wurde mit konservativen Annahmen gerechnet. Deshalb wurde 1997 ein mittlerer Aussenluftvolumenstrom von 1'235 m³/h für die Berechnung des Heizenergiebedarfs eingesetzt.

Für den Aufheizbetrieb wird ein Aussenluftvolumenstrom von ca. 600 m³/h während einer durchschnittlichen Betriebszeit von 2 Stunden pro Tag eingesetzt.

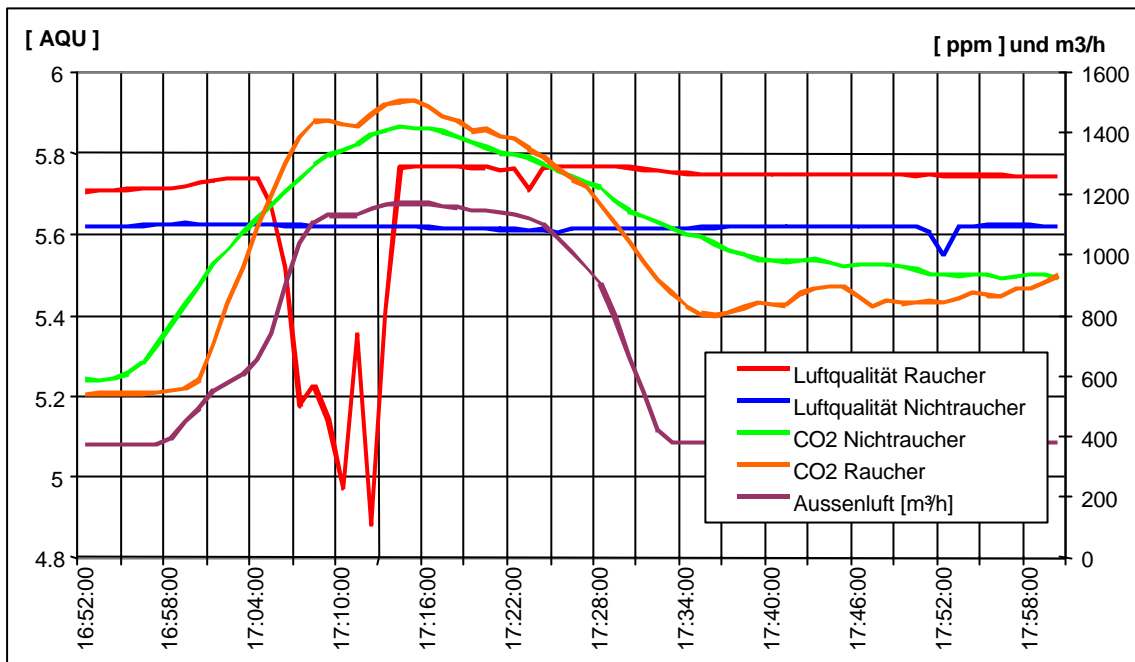


LI L:\1999\412\fahrt\Ergebnis\PER_OAT.XLS]begleitetBer1

Bild 2: Abhängigkeit der elektrischen Leistung des Wagens von der Aussentemperatur

Während der Messfahrt wurde auf dem Wagenrechner diejenige Aussentemperatur aufgezeichnet, die der Rechner zur Berechnung des Basis-Sollwertes benötigt. Dieser Wert ist stark geglättet. Und lässt nur sehr bedingt Rückschlüsse auf die tatsächliche Aussentemperatur zu. Es wurde deshalb mit Temperaturdaten der nächstliegenden SMA Meteostationen gearbeitet. Über einen Zeitraum von 10 Minuten bei der Vorbeifahrt an der Meteostation wurde der Mittelwert der Wagenleistung ermittelt. Aufgrund der sich so ergebenden sehr schmalen Datenbasis lassen sich nur sehr beschränkte Aussagen über die Abhängigkeit der Wagenleistung bezüglich der Aussentemperatur machen.

Die Belegung des Wagens war fast über den gesamten Zeitraum kleiner als 20 Personen. Bei dieser Belegung ist die Aussenluftzufuhr noch auf dem Minimum von ca. 375 m³/h. Rückschlüsse auf eine Abhängigkeit der Wagenleistung von der Personenbelegung lassen sich daher nicht nachweisen.

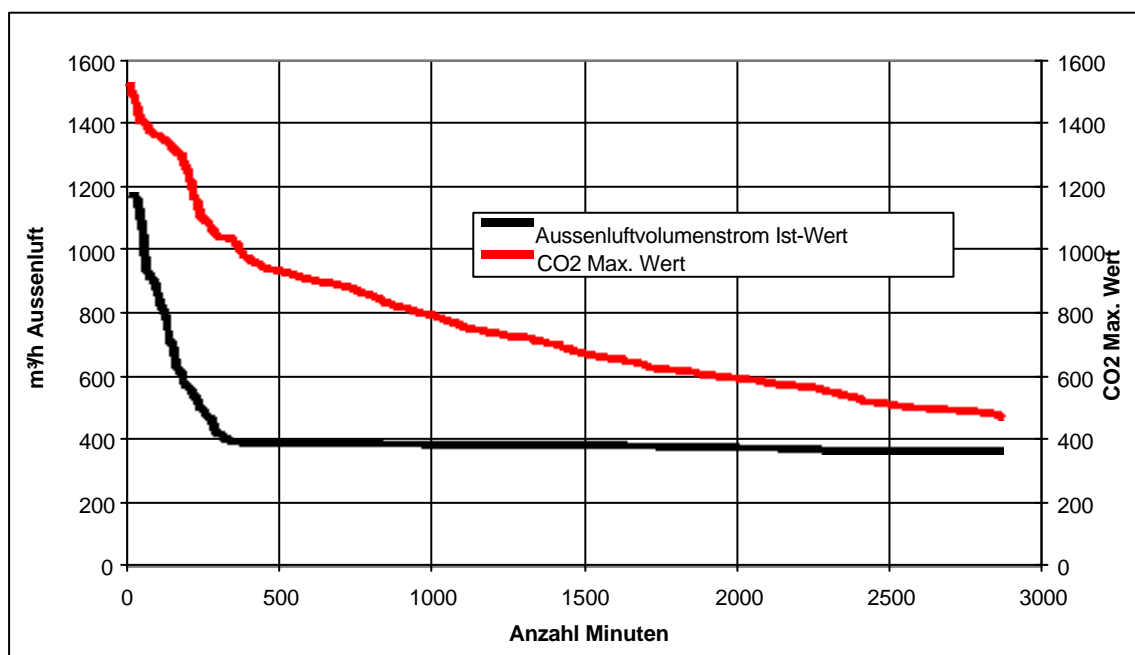


LI L:\1999\412\fahrt\Arbeit\Luftqualität.xls\DiagrammeB

Bild 3: Regelverhalten der Lüftung auf der Strecke Lugano-Bellinzona.

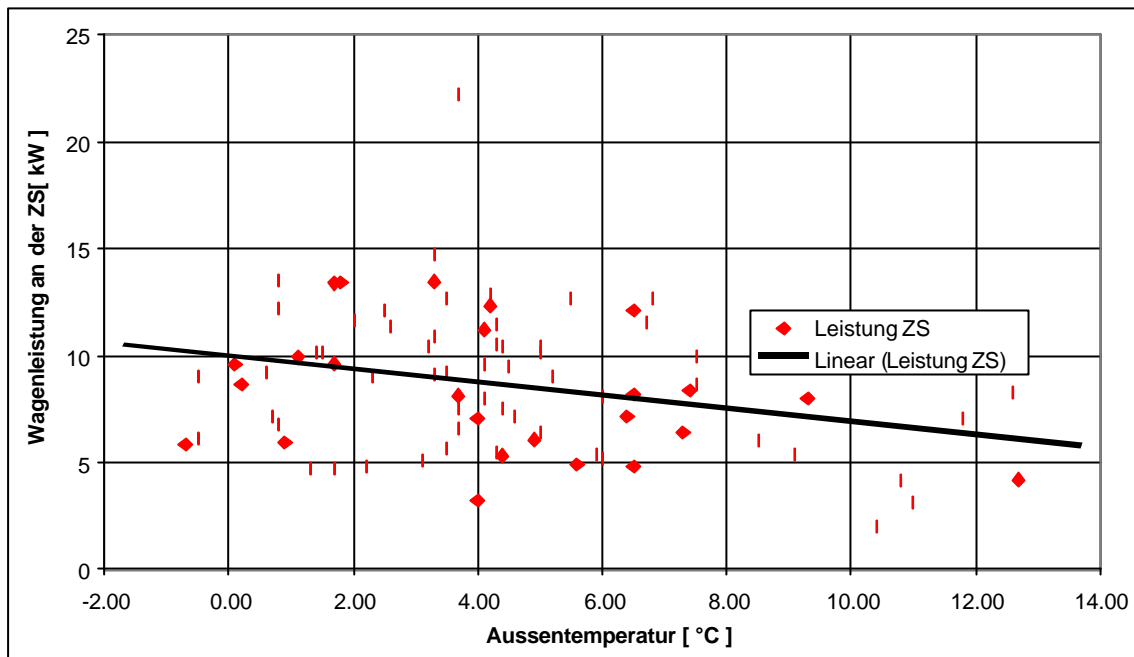
Belegung max. 44 Personen, davon 22 im Raucherabteil, die stark rauchen. Trotz fehlendem VOC-Sensor sinkt die Luftqualität im Raucherabteil kurzzeitig nur um 0,9 AQU.

Infolge der Belegung stieg die CO₂-Konzentration in der Luft und die Aussenluftzufuhr wurde erhöht. Die CO₂-Konzentration nahm darauf wieder ab. Obwohl die 22 Personen im Raucherabteil stark rauchten, sank die Luftqualität nur um 0,9 AQU (Air Quality Unit) und dies nur über einen kurzen Zeitraum von ca. 10 Minuten. Die dem Fahrzeug zugeführte Heizenergie verringerte sich während der Messfahrt (ohne Stillstand, Vorheiz-, oder Rangierzeiten) von theoretisch berechneten 49 kWh infolge des reduzierten Luftwechsel auf gemessene 17.7 kWh.



LI L:\1999\412\fahrt\Ergebnis\5MIN_F.XLS\DiagrammeE

Bild 4: Häufigkeitsverteilung der Aussenluftvolumenstrom und der maximalen CO₂-Konzentration



LI L:\1999\412\fahrt\Ergebnis\Alle_tage2.xls]Diagramm E

Bild 5: Elektrische Leistung des Wagens in Abhängigkeit der Aussentemperatur über die ganze Messperiode

Die Betriebsmessungen haben gezeigt, dass die neue bedarfsabhängige Regelung der HLK-Aggregate auf der Basis einer reinen CO₂-Regelung voll funktionsfähig ist und dadurch eine beachtliche Verminderung der Laufzeiten der Aggregate und des Energieverbrauches möglich wird⁸. Ferner geht aus den *Enper*- und ADtranz-Messfahrten klar hervor, dass auch ohne VOC-Sensoren im Raucherabteil mit CO₂-Sensoren eine gute Regelung mit angenehmer Luftqualität möglich ist.

Dank der breiteren Datenbasis können nun bessere Aussagen über die Abhängigkeit der Wagenleistung bezüglich der Aussentemperatur gemacht werden. Die Daten stimmen recht gut mit den Messungen in der Klimakammer überein. Einschränkungen für die Interpretation bestehen, weil die Belegung des Wagens während den drei unbegleiteten Tagen nicht bekannt ist.

Es zeigt sich weiter, dass über den gesamten gemessenen Zeitraum vom 9.12.1999 bis 13.12.1999 nur während ca. 10% der Zeit eine Aussenluftzufuhr grösser als der minimale Luftvolumenstrom von ca. 375 m³/h erfolgte.

5. Der Energieverbrauch Ist/Soll/Effektiv

Aufgrund der Klimakammer-Messungen, der Nachjustierung der Regelung und der Betriebsmessungen wurde versucht, die ursprünglichen Energieverbrauchsrechnungen im Ist- und Soll-Zustand von 1997 mit den Effektivwerten des Energieverbrauches zu aktualisieren. Zur besseren Vergleichbarkeit wurden alle äusseren Rahmenbedingungen unverändert übernommen (siehe *Enper 4*)¹⁾:

- 6'500 Betriebsstunden pro Jahr, 75% in Fahrt
- Klima: Mittelwert Bern
- Sitzplatzauslastung 40%
- Betriebswirkungsgrad Lok-Antrieb (Re 4/4 II): 70% und Lok-Trafo 98%
- Netzverluste 10%
- Mehr-/Mindergewicht 5,4 kWh/kg
- Antriebsleistung für Traktion 70 kW
- Nutzungsdauer 15/20 Jahre
- Kapitalzins 5%, Teuerung 0%/3%
- Entwicklung Elektrizitätspreis 2000 bis 2019 gemäss SBB (Sommer/Winter, Tag/Nacht)

Energieverbrauch		Ist	Soll	Effektiv	Ist-Effektiv Einsparung	Effektiv/Ist Restverbrauch
Komfort	MWh/a	148,4	68,1	66,9	81,6	45,0%
Gesamt	MWh/a	690,1	599,8	593,1	97,0	85,9%

Tabelle 3: Resultat Energieverbrauch Ist/Soll/Effektiv

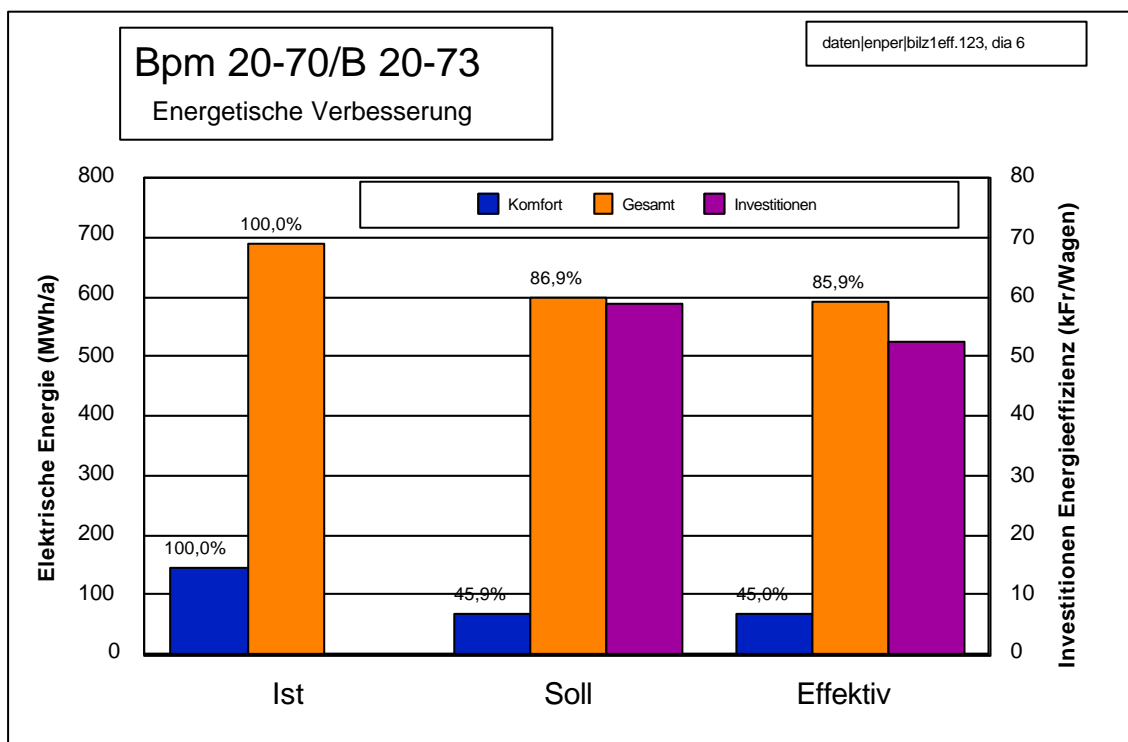


Bild 6: Vergleich Energieverbrauch Ist/Soll/Effektiv

Die Gewichtseinsparung von 2,0 t (Wegfall 1 WC, diverse „Leichterungen“) ergibt einen zusätzlichen Einsparbeitrag von 10,8 MWh/a (im Sollzustand war mit +/- 0 gerechnet)

worden). Dafür entfällt die mit 7,0 MWh/a bezifferte Einsparung durch die verbesserte Aerodynamik der Fensterrahmen.

Der **spezifische Heizenergiebedarf** (SIA 380/1) wurde von Ist 3'762 auf 1'599 MJ/m² a (um 57,5%) vermindert. Dabei spielen die verbesserte Lüftungsregelung und die verstärkte Dämmung eine positive, die alten Fensterrahmen eine negative Rolle.

Der **spezifische elektrische Energiebedarf** (SIA 380/4) im Wagen wurde von Ist 6'985 MJ/m² a auf effektiv 3'146 MJ/m² a (um 55,0%) vermindert.

Der Energieverbrauch für **Komfort** (Heizung, Lüftung, Kälte, Beleuchtung, etc.) wurde von Ist 148,4 MWh/a auf effektiv 66,8 MWh/a (um 55,0%, also 81,6 MWh/a) vermindert.

Der **Gesamtverbrauch** (inkl. Traktion und Netzverlust) wurde von Ist 690,1 MWh/a auf effektiv 593,1 MWh/a (um 14,1%, also 97,0 MWh/a) vermindert.

Die Übereinstimmung der Schätzungen/Berechnungen/Annahmen des Soll-Zustandes im Energieverbrauch von 1997 mit den Berechnungen aufgrund der Messungen im effektiven Zustand 1999 sind erstaunlich gut: Der Komfortverbrauch ist effektiv um 1,2 MWh/a tiefer und der effektive Gesamtverbrauch um 6,7 MWh/a tiefer als geschätzt.

Kosten-/Nutzen

Die effektiven Investitionen sind mit 52'600 Fr/a (90%) um 6'100 Fr./a tiefer als im Sollzustand.

Die effektiven Betriebskosten sind dagegen möglicherweise 5'100 Fr/a (für die Entrostung und Dichtung der Fensterrahmen/Wagenkasten-Verbindung) höher als im Sollzustand. Die gesamten Jahreskosten sind damit effektiv 4'568 Fr./a. (statt Soll 5'196 Fr./a).

Die gesamte Energieeinsparung wird effektiv auf 97,0 MWh/a (14,1%) geschätzt, d.h. der effektive Jahresnutzen (Energiekostenverminderung und Betriebskostenerhöhung) beträgt 11'113 Fr./a (Soll 15'671 Fr/a).

Das Kosten-/Nutzenverhältnis für den Sollzustand war mit Jahreskosten von 5'196 Fr/a und Jahresnutzen von 15'671 Fr/a $K/N=0,33$ (Variante a: ohne Teuerung). Für den effektiven Zustand ergeben sich 0,41 bei Jahreskosten von 4'568 Fr/a und einem Jahresnutzen von 11'113 Fr/a. Dies bedeutet, dass das effektive Massnahmenpaket immer noch eine ausgezeichnete Wirtschaftlichkeit aufweist und deutlich rascher als die Nutzungsdauer amortisiert ist. Diese Aussage gilt sinngemäss auch für die übrigen Varianten (b: mit Teuerung, c: mit kalkulatorischem Energiepreiszuschlag sowie bei verkürzter Nutzungsdauer 15a).

	Einheit	Soll	Effektiv
Investitionen Energie	kFr	58,7	52,6
Jahreskosten	Fr/a	5'196	4'568
Einsparung Energie	Fr/a	10'391	11'098
Jahresnutzen	Fr/a	15'671	11'113
Kosten-/Nutzen		0,33	0,41

Tabelle 4: Kosten-/Nutzenvergleich der Soll- und Effektivwerte

6. Ergebnis der Energieeffizienzmassnahmen

Das Ergebnis der messtechnischen Überprüfung des Energiesparkkonzeptes am B 20-73 zeigt zusammenfassend:

Die Energieeinsparung von ca. 97 MWh/a ist mit wirtschaftlichem Aufwand realisierbar. Das darauf abgeleitete Massnahmenpaket ist – soweit bisher sichtbar – betriebs- und bahntauglich. Die geplanten Mehrkosten wurden unterschritten (90%). Das Kosten-/Nutzen-verhältnis ist mit 0,41 sehr gut.

Als kurzfristige Empfehlung für **künftige Refitarbeiten** von klimatisierten Reisezugwagen (EW IV, etc.) kann daraus abgeleitet werden:

- Die integrale Planung der Energieoptimierung ist beim Rollmaterialbau noch weitgehend unbekannt. Die methodische Integration der verschiedenen Fachdisziplinen erfordert ein Umdenken von Auftragnehmerin und Auftraggeberin.
- Die Auftraggeberin muss überprüfbare energetische Vorgaben in das Pflichtenheft einbauen und die messtechnische Überprüfung (gemäss den Normen) von einer unabhängigen Stelle durchführen lassen. Die detaillierte Ausschreibung mit überprüfbaren Sollwerten vermindert das Risiko unbefriedigender Nacharbeiten und Nachbestellungen.
- Einige Komponentenverbesserungen erfordern grosse Vorarbeiten mit bahntechnischen Modifikationen und haben damit am Markt Unsicherheiten zur Folge, wenn keine Serienproduktion gesichert werden kann.
- Der Start der Refitarbeiten mit einer kompakten Kleinserie von 27 Reisezugwagen ist angesichts der 500 klimatisierten SBB-Reisezugwagen, die gelegentlich technisch angepasst werden müssen, vernünftig.
- Die Erfahrungen der bedarfsabhängigen Regelung der HLK-Systeme sind ermutigend. Sie sollen bei künftigen Refitarbeiten noch optimiert werden.
- Die Erfahrungen mit besser gedämmten Wagenkasten (als Voraussetzung der thermischen Behaglichkeit der Reisenden sowie der Langzeitstabilität des Fahrzeugs) sind in Bezug auf Kosten und Behaglichkeit ermutigend.

7. Empfehlungen für energieeffizientes Rollmaterial

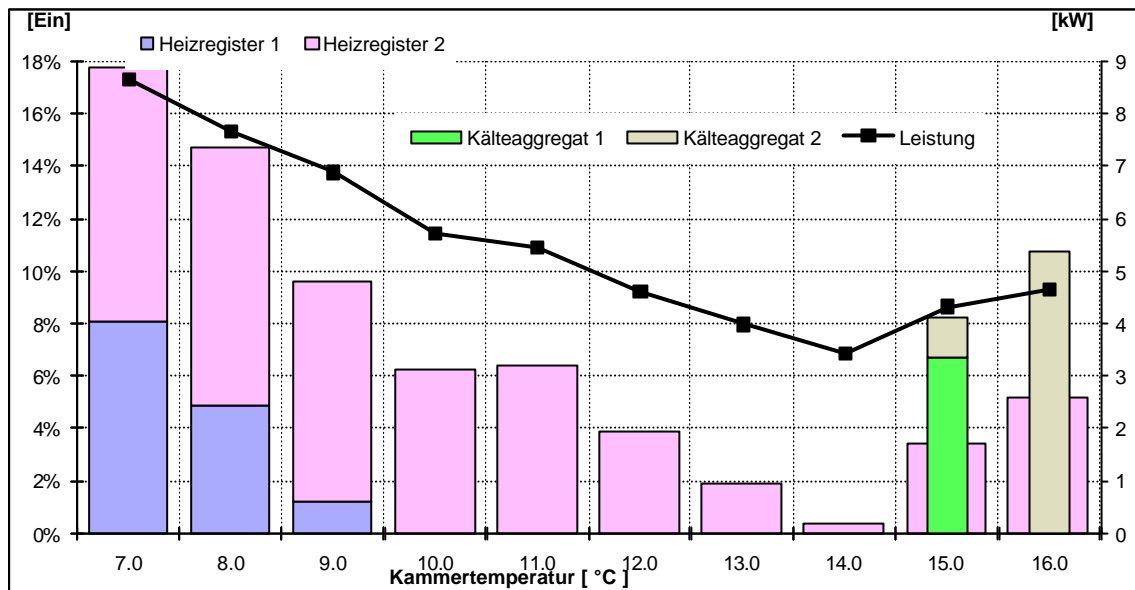
Als kurzfristige Empfehlung für **künftige Neubauten von Rollmaterial** für den europäischen Schienenverkehr können folgende Grundsätze gelten:

1. Die entscheidende Energieoptimierung am Rollmaterial ist die **Gewichtsverminderung** und dadurch die Verminderung des Traktionsaufwandes im engeren Sinne.
2. **Hochwertige Antriebssysteme** mit geringen Verlusten und Rekuperation sollten nicht den Energieverbrauch zusätzlicher (evtl. unnötiger) Gewichtselemente kompensieren müssen.
3. Die Gewichtsverminderung (kg pro Sitz) kann nur beschränkt durch den Ersatz bisheriger Wagenkastenkonstruktionen aus Stahl durch Aluminiumhohlprofile erzielt werden. Sie erfordert eine systematische Überprüfung der **Zugskonfiguration**, wie sie im Projekt EEIC (Energy Efficient Intercity)⁹ mit einem doppelstöckigen, Jakobsdrehgestell-Triebwagenzug vorgeschlagen wird, der das mögliche Tunnelprofil und die zulässige Achslast optimal nutzt.
4. Die notwendigen **aerodynamischen Verbesserungen** betreffen nicht nur den Zugkopf, sondern speziell den Wagenübergang und –boden sowie den Endwagen. Auch sind diese bereits im Geschwindigkeitsbereich über 80 km/h signifikant und ab 130 km/h dominant für den Energieverbrauch. Auch für den IC-Einsatz bis 200 km/h kann aus Erfahrungen bezüglich Aerodynamik, Energieverbrauch und Lärmentwicklung von Hochgeschwindigkeitszügen gelernt werden.
5. Die Verbesserungen im Komfortbereich durch die **thermische Optimierung** der Wagenkasten und die Optimierung der HLK-Systeme (wie sie nachträglich beim IC 2000 und rechtzeitig beim ICN versucht wurde) sind dabei Verbesserungen der zweiten Stufe, wenn der Traktionsaufwand bereits erfolgreich vermindert ist.
6. Die energetischen Vorgaben müssen bei neuem Rollmaterial durch eine gesamte **Energiebilanz** (aufgrund von Simulationen) und für einen Lebenszyklus überprüft werden, um einseitige Optimierungen von Teilsystemen mit Kostenfolgen zu verhindern. Diesbezügliche Berechnungshilfsmittel stehen zur Verfügung¹⁰.

Mittelfristig sollen im Reisezugwagenbereich noch weitergehende Systeme und Komponenten untersucht und in der Praxis getestet werden:

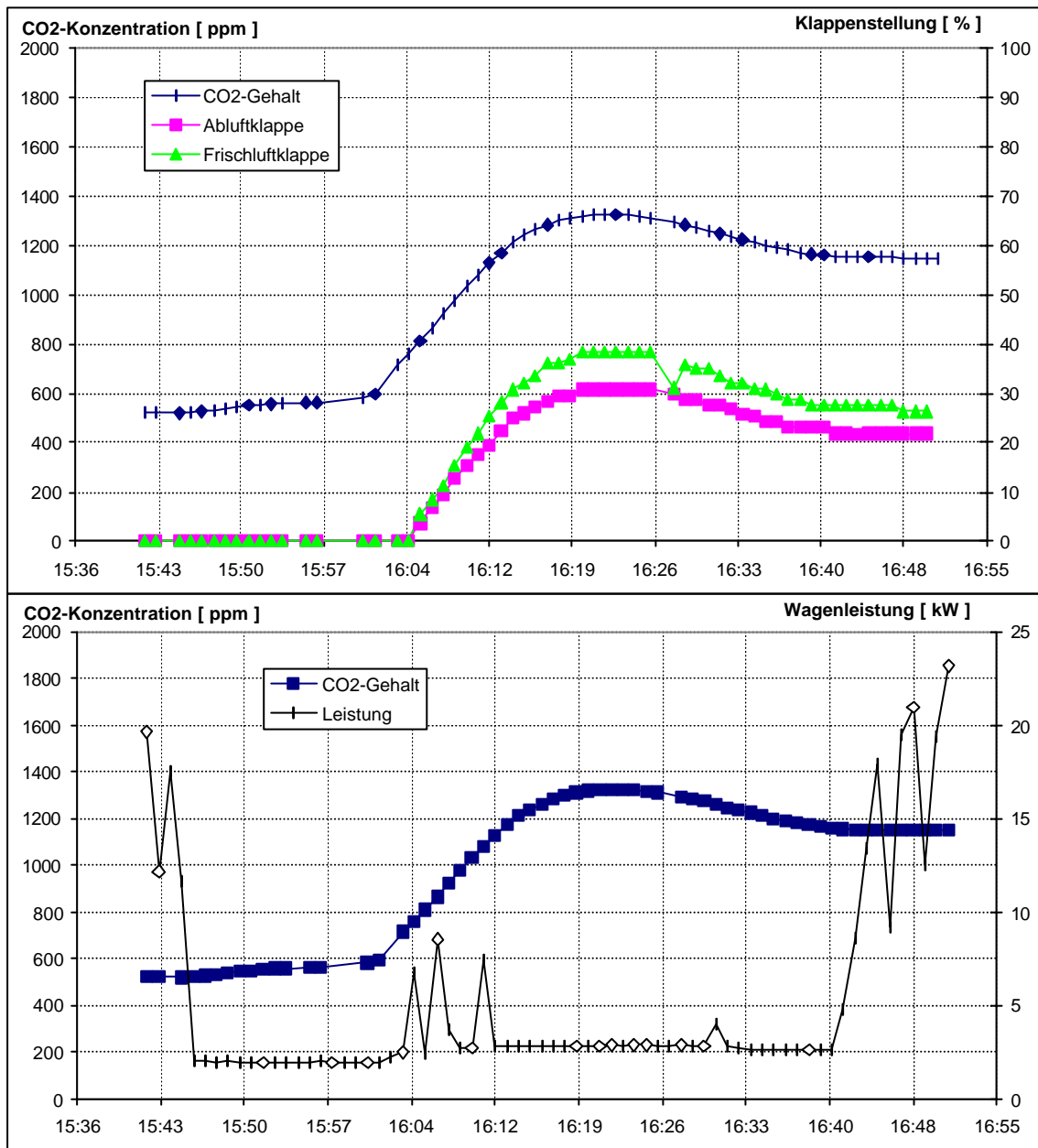
- Heizung mit Wärmepumpe
- Lüftung mit Wärmerückgewinnung
- geregelte Beleuchtung
- Fenster mit fassadenbündigem Einbau (reinigungsfreundlich)
- optimierte Batterieladung und -größe (Gewichtseinsparung)
- energetisch optimierte geschlossene WC
- Ersatz von pneumatischen Türen durch elektrischen Antrieb
- Hochfrequenz-Transformatoren
- aerodynamische Verbesserungen am Wagenübergang und –boden.

Anhang 1: Messung Klimakammer



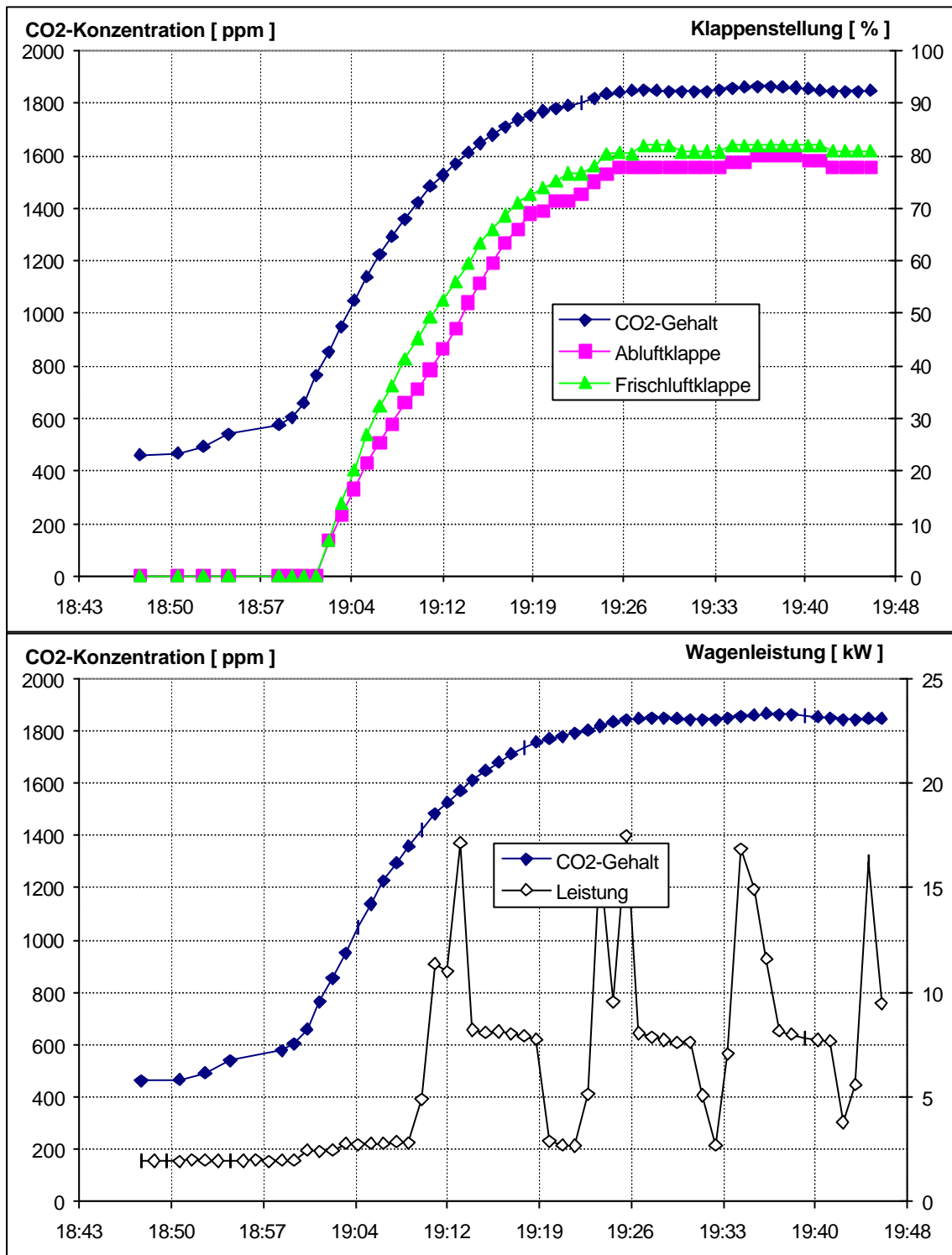
LI L:\1999\412\ERGEBNIS\vor_nach1.xls]Tabelle1Ber2

Bild 7: Regelverhalten des B 20-73 beim Übergang vom Heiz- in den Kühlbetrieb. Die bisherige Regelstrategie hat Zustände mit gleichzeitigem Heizen und Kühlen noch nicht vollständig verhindert.



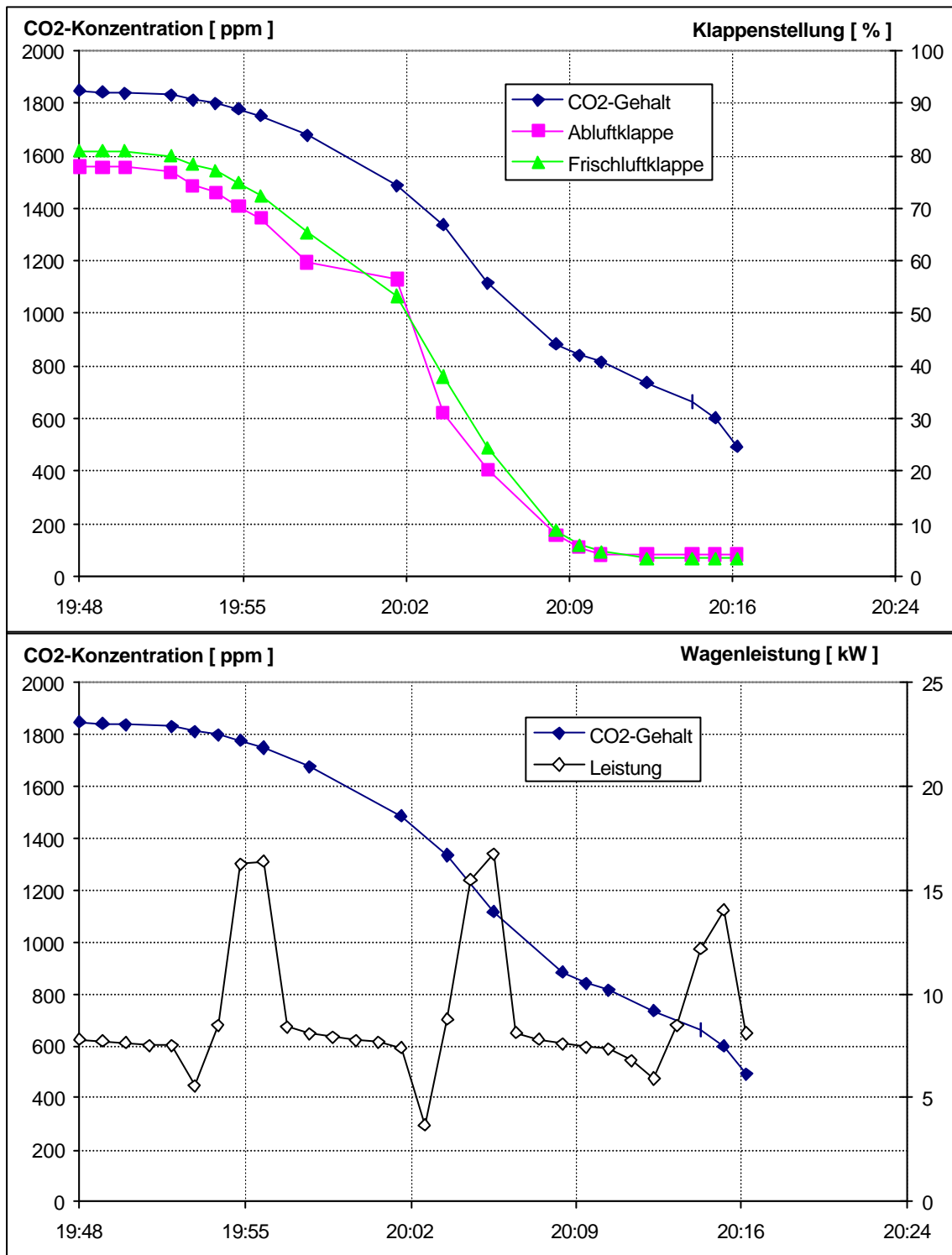
LI L:\1999\412\DATEN\ENPERCO2.XLS]10_minBer3

Bilder 8, 9: Regelverhalten bei einer Einblasmenge von 10 Liter CO₂ pro Minute



LI L:\1999\412\DATEN\ENPERCO2.XLS\30l_minBer1

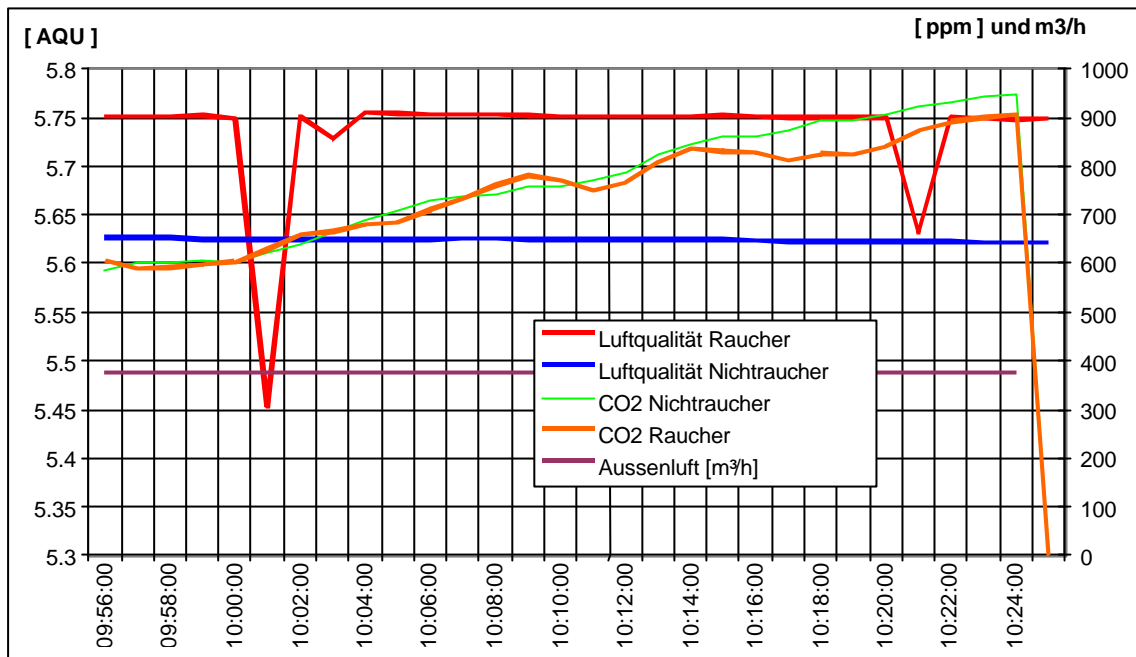
Bilder 10, 11: Regelverhalten bei einer Einblasmenge von 30 Liter CO₂ pro Minute



LI L:\1999\412\DATEN\ENPERCO2.XLS\co2_ausBer2

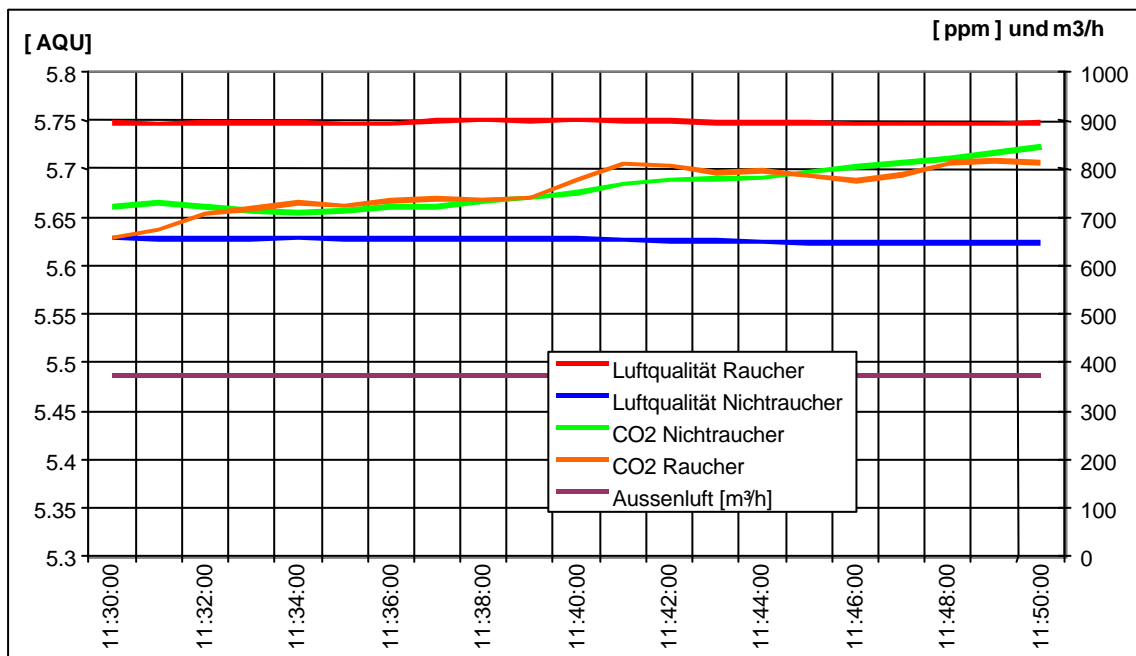
Bilder 12, 13: Regelverhalten bei abgestellter CO₂ Einblasung

Anhang 2: Messung Betrieb



LI L:\1999\412\fahrt\Arbeit\Luftqualität.xls\Diagramme E

Bild 14: Luftqualität auf der Fahrtstrecke von Aarau nach Zürich mit einer Belegung von max. 17 Personen. Eine rauchende Person sitzt direkt unterhalb des VOC-Sensor. Trotz ansteigender CO₂-Konzentration verschlechtert sich die Luftqualität nicht.



LI L:\1999\412\fahrt\Arbeit\Luftqualität.xls\Diagramme E

Bild 15: Luftqualität auf der Fahrt von Zug nach Art Goldau. Belegung max. 14 Personen, wovon ein starker Raucher. Es ist kein Einfluss auf die Luftqualität sichtbar.

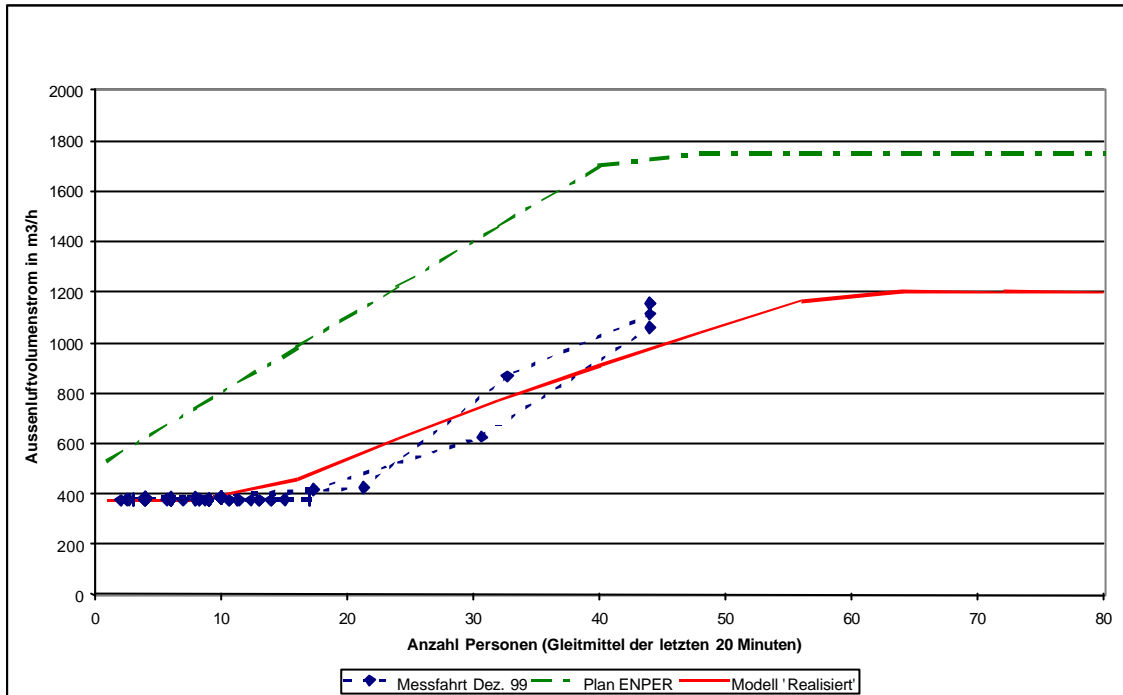


Bild 16: Aussenluftvolumenstrom in Funktion der Personenbelegung, während der begleiteten Messfahrt

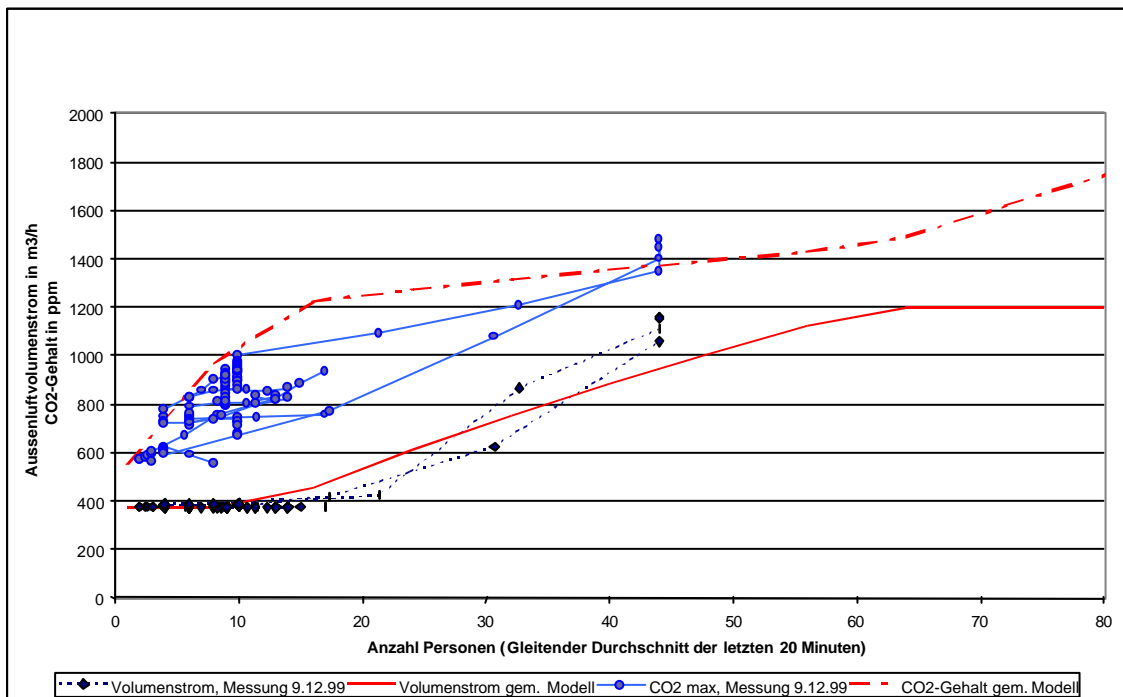


Bild 17: Aussenluftstrom und CO₂-Gehalt in Funktion der Personenbelegung

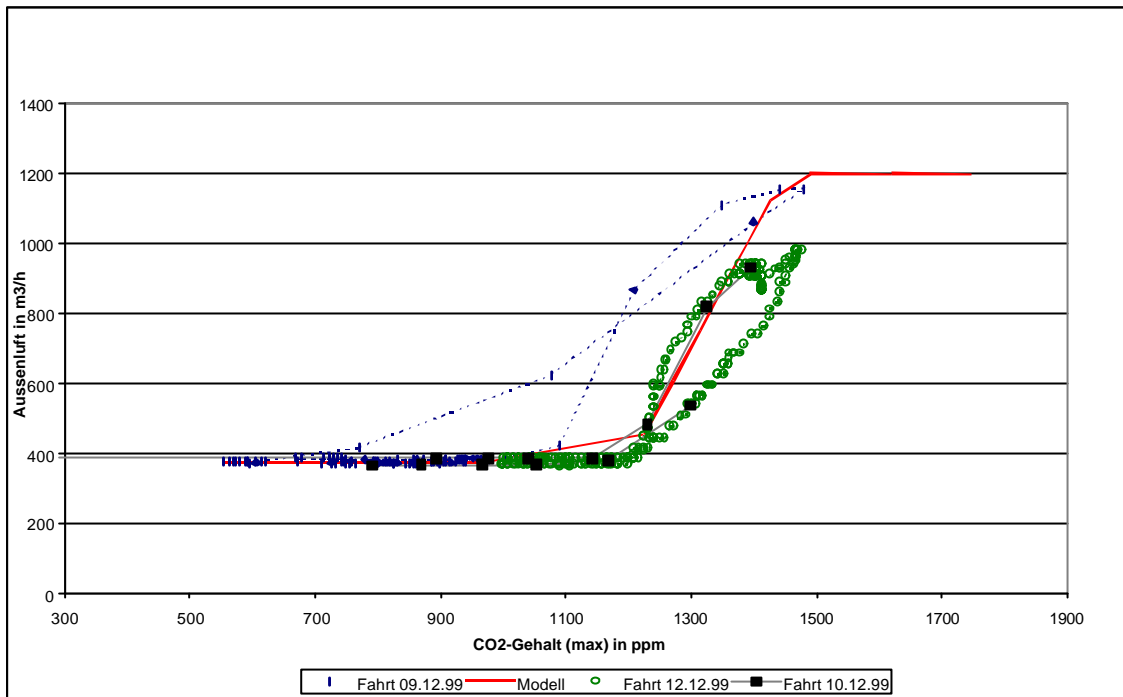


Bild 18: Aussenluftvolumenstrom in Funktion des CO₂-Gehaltes

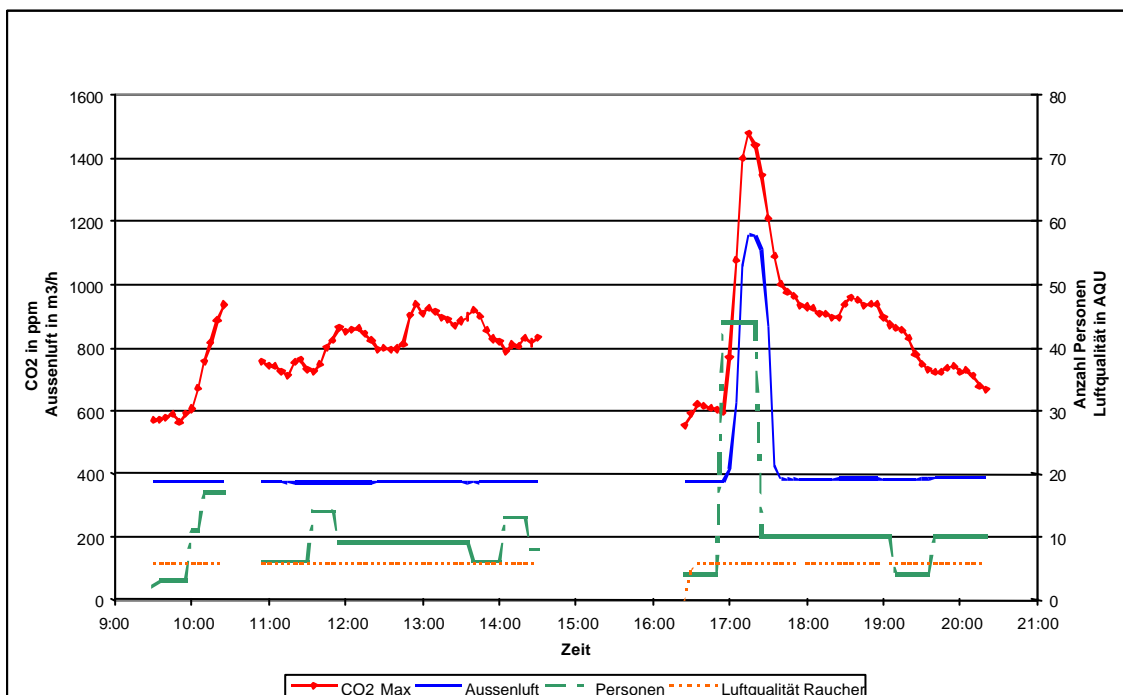


Bild 19: CO₂ in ppm, Volumenstrom und Personenbelegung

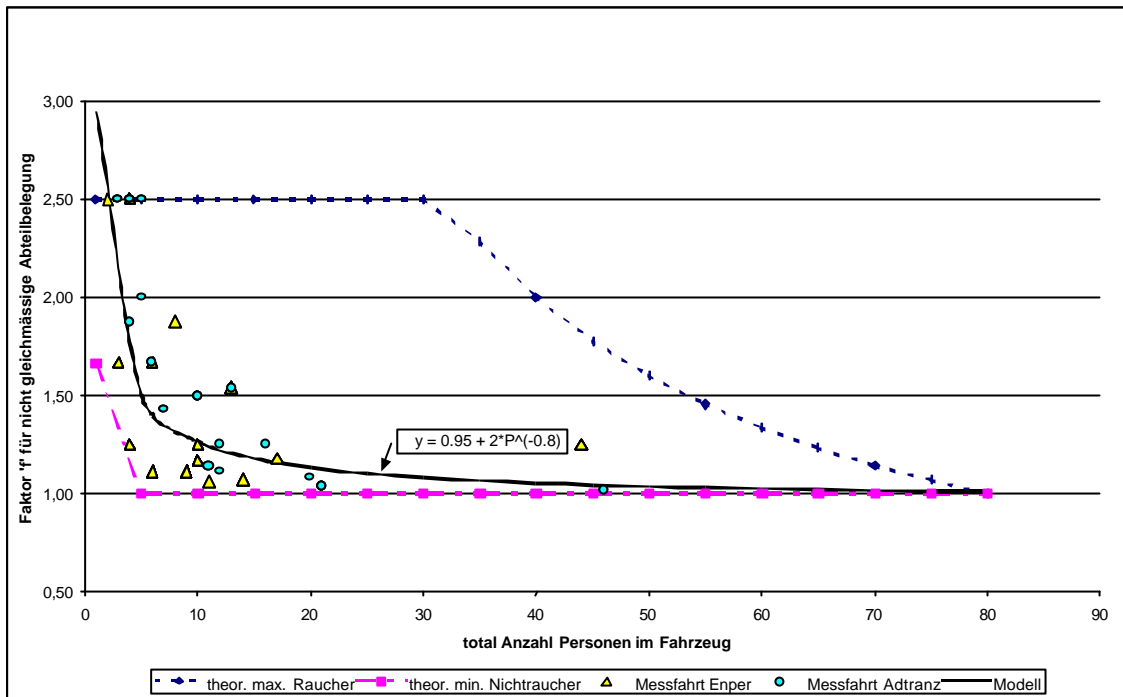


Bild 20: Exponentialfunktion für die Personenbelegung der Abteile

- 1 Enper Bericht 4, Zürich Oktober 97
- 2 Enper-Team: Energiesparen bei Reisezugwagen, in SER 1-2/98
- 3 ADtranz: Typenbericht der Klimaanlage des SBB Bpm-Refit, Zürich 28.10.99
- 4 Enper Bericht 3, Zürich 16.9.96
- 5 Aktennotiz H. Huber, Juni 99
- 6 Aktennotiz R. Hofer ADtranz, September 99
- 7 Enper Bericht 2, Zürich 9.4.96
- 8 Stellungnahmen ADtranz vom 21.12.99 und Enper vom 17.12.99 an SBB HW BEL.
- 9 Brunner C.U., Gartner R.: Energieeffizienz im Schienenverkehr, SEV/VSE Bulletin 11/99
- 10 Brunner C.U., Pelli T.: Simulationsprogramm für den Energieverbrauch von Reisezügen, in: eb 11/98