

**Abwärme Compound System (ACS)
zur Energieeinsparung an Verbrennungsmotoren**

AZ 00372

Abschlußbericht 1. Phase
(Januar 1994 - Februar 1997)

Verfasser: D. Burhorn
K. Himmel
F. Heidelberg

Inhalt

	Seite
1. Einleitung, Projektübersicht, Ziele	2
1.1 Einleitung	2
1.2 Ziel des Gesamtvorhabens	2
1.3 Ziel der ersten Projektphase	4
2. Dampferzeuger	4
3. Düsen	5
4. Dampfturbine	5
4.1 Konstruktion einer neuen Dampfturbine	7
5. Hochfrequenzgenerator	8
6. Kondensator	9
7. Prüfstand	9
8. Versuche	10
9. Berechnung	11
10. Erste Ergebnisse	13
10.1 Dampferzeuger	13
10.2 Dampfturbine	15
10.3 Optimierungen	15
11. Arbeiten in geplanter 2. Projektphase	16
12. Kosten der 2. Projektphase	18
12.1 Fa. Magnet - Motor GmbH	18
12.2 Institut für Strömungsmaschinen	19
12.3 Firma zur Herstellung von Prototypen (Ersatz für Fa. Lütgemeier)	21
13. Zeiplan 2. Projektphase	22
14. Meilensteinplan der 2. Projektphase, Mittelplan	23
14.1 Fa. Magnet - Motor GmbH	23
14.2 Institut für Strömungsmaschinen	25
14.3 Firma zur Herstellung von Prototypen (Ersatz für Fa. Lütgemeier)	27
15. Literatur	28
16. Bildanhang	29 - 47

1. Einleitung, Projektübersicht, Ziele

1.1. Einleitung

Im Rahmen des Projektes "Abwärme Compound System" (ACS), das durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt gefördert wird, soll ein Produkt entwickelt werden, mit dessen Hilfe die heißen Abgase von Verbrennungskraftmaschinen in Fahrzeugen über einen geschlossenen arbeitenden Clausius Rankine Prozeß (CRP) mit integriertem Hochfrequenzgenerator ausgenutzt werden, um elektrische Energie zu erzeugen. Die gewonnene elektrische Energie soll dann in den Motor-/Fahrzeugantriebsprozeß eingebracht werden und, entsprechend der in jedem Betriebspunkt aus dem Abgas zusätzlich gewonnenen Energie, somit den Verbrauch des Verbrennungsmotors senken.

1.2. Ziel des Gesamtvorhabens

Langfristiges Ziel des Vorhabens ist (s. Antrag S.8) /1, Antrag/ ein neuartiges Antriebskonzept für Kraftfahrzeuge, wobei diese mit in den Radnaben montierten Elektromotoren versehen sind. Dies bedeutet einen vollständig elektrischen Antrieb des Fahrzeuges einschließlich der notwendigen Hilfsaggregate (z.B. Kühlwasserpumpe, Ölpumpe, Kraftstoffpumpe, Licht, Heckscheibenheizung, Zündung (elektronisch), Scheibenwischer, Motronic, 1- und Leerlaufregelung, Katalysator(vor)heizung (in Zukunft)) und zusätzlichen Nebenaggregate (z.B. Servopumpe [Lenkung], Klimaanlage, Sitzverstellung, sonstige Komfortausstattung).

Bei dieser Antriebsart wird der Verbrennungsmotor dann lediglich zum Antrieb eines Generators verwendet, der die notwendige elektrische Energie zum Fahrzeugbetrieb erzeugt (Bild 1). Ein solcher Betrieb bedeutet, daß der Verbrennungsmotor entlang einer definierten Lastkurve betrieben wird, im Gegensatz zum derzeitigen Motorkonzept mit mechanischem Antrieb über ein Getriebe (und Kupplung, Kardanwelle, Differential), wo der Verbrennungsmotor den gesamten Kennfeldbereich durchlaufen muß. Allein durch den Wegfall der mechanischen Bauteile (Kupplung, Kardanwelle, Differential) ist eine Wirkungsgradverbesserung des gesamten Antriebsprozesses zu erwarten, der durch das hier dargestellte ACS gesteigert wird. Da der Verbrennungsmotor selbst nach wie vor einen maximalen Wirkungsgrad von ca. 33% im Bestpunkt aufweist und weitere ca. 33% der eingebrachten Energie (Kraftstoff) in Form von Wärme durch das Abgas verloren gehen, kann mit Hilfe des ACS zusätzlich elektrische Energie erzeugt werden. Der Lastpunkt des Motors wird durch den zusätzlich erbrachten Leistungsanteil gesenkt und operiert dadurch in einem Punkt geringerer Leistungsanforderung. Hier wird, entsprechend dem Anteil gewonnener Energie aus dem Abgas, Kraftstoff gespart.

Mittelfristiges Ziel des Antrages ist, zum Verwirklichen der o.g. Punkte, das darzustellende ACS derart zu gestalten und auszulegen, daß es an heute existierenden Kraftfahrzeugmotoren ohne wesentliche Änderungsarbeiten und ohne Eingriff in den Verbrennungsprozeß selbst, installiert werden kann. Hierzu wird das ACS, gemäß Antrag, in verschiedene Bauteile getrennt, die jedes für sich bereits eine Vermarktung zulassen (s. Antrag), im Verbund zum ACS aber an Fahrzeugen (PKW, LKW) unterschiedlicher Baugröße zum Einsatz kommen sollen. Die wesentlichen Bauteile dieses ACS sind dann der Dampferzeuger (montiert im Abgasstrang des Fahrzeuges), die Dampfturbine und der Hochfrequenzgenerator zur Stromerzeugung (Bild 2). Dampferzeuger, Dampfturbine und Hochfrequenzgenerator sind bis heute in ihrer Art und Größe den Autoren nicht als am Markt erhältlich bekannt.

Der Dampferzeuger wird zu diesem Zweck modular aufgebaut und kann dadurch an verschiedene Motorgrößen angepaßt werden. Wird die über das ACS gewonnene elektrische Leistung dazu verwendet, bisher mechanisch angetriebene Hilfs- und Nebenaggregate (s.o.) zukünftig elektrisch anzutreiben, so wird der Motor dadurch bereits deutlich "entlastet" und der Kraftstoffverbrauch sinkt. Im Antrag und nachfolgender Korrespondenz mit der Stiftung wurde dargelegt, daß die so zu erreichende Kraftstoffeinsparung in Abhängigkeit des Motorbetriebspunktes und des Motors (Baugröße) bis zu 15 % betragen kann (s.a. "Berechnung", unten). Aus im Antrag /1/ genannten Literaturquellen kann entnommen werden, daß bei LKW-Motoren Einsparungen bis zu 15% im Konstantbetrieb /2, Doyle/ mit einem vergleichbaren System bereits erreicht wurden. Aus einer zweiten Literaturstelle /3, Gwinner/ kann entnommen werden, daß in naher Zukunft bedingt durch neue Werkstoffe im Motorenbau auch bis zu 25% Kraftstoffeinsparung mit derartigen Konzepten als realistisch anzusehen sind. Diese beiden Literaturstellen werden diesem Bericht als Anlage beigefügt. Entgegen allen in der Literatur bisher gemachten Angaben, die immer eine mechanische Anbindung der rückgewonnenen Abgasleistung mittels eines Getriebes an den Antriebsstrang des Fahrzeuges vorsehen, wird im hier geförderten Projekt eine elektrische Anbindung verfolgt. Hierdurch ergeben sich wesentliche Vorteile, wie beispielsweise:

- freie Platzierbarkeit der elektrischen Antriebe von Nebenaggregaten im Motorraum. (Der Motorraum moderner Fahrzeuge wird, bedingt durch die zunehmende technische Ausstattung und aerodynamische Formgebung der Fahrzeuge, räumlich sehr stark eingeschränkt. Die Platzierung mechanisch angetriebener Nebenaggregate im unmittelbaren Bereich des Motors (Riementrieb) beinhaltet extreme Nachteile bei der Konzeption derartiger Nebenaggregate)
- mechanische Antriebe (zum größten Teil über Keilriemen) zeigen niedrige Wirkungsgrade und tragen dadurch zu einem erhöhten Kraftstoffverbrauch bei. Die Regelung dieser bis heute verwendeten Antriebe ist äußerst schwierig und aufwendig (z.T. mehrstufige Getriebe, Wandler u.ä. /4, Frister/ s. Anlage) oder gar unmöglich. Ein elektrischer Antrieb von Nebenaggregaten wird in Zukunft angestrebt und ist höchst wahrscheinlich unumgänglich /4, Frister/ /5, Gorille/ (s. Anlage)
- Die heute in Motoren verwendeten Lichtmaschinen (z.T. bis zu zwei in einem PKW) zur Bordstromversorgung und Batterieaufladung weisen sehr niedrige Wirkungsgrade auf. Der Arbeit von Frister /4/ kann entnommen werden, daß bei Vollastbetrieb des Motors der Generator (Lichtmaschine) ca. 7 kW Antriebsleistung benötigt (die vom Motor durch zusätzlichen Kraftstoffverbrauch erbracht werden muß), um 2 kW notwendiger elektrischer Leistung zu gewährleisten. Dies entspricht einem **Gesamtwirkungsgrad der Lichtmaschine von nur etwa 28,5%**. Durch den Einsatz des ACS könnte die Lichtmaschine eingespart werden und damit gleichzeitig die vom Motor aufzubringende Leistung.
- Der elektrische Leistungsbedarf in Kraftfahrzeugen wird in den kommenden Jahren drastisch steigen (s. Bild 3 /5, Gorille/). Eine Weiterentwicklung der bestehenden Generatoren wird diesem Bedarf nicht gerecht werden können. Das ACS bietet somit ein zur Weiterentwicklung geeignetes System zur Deckung des geforderten Leistungsbedarfes allein durch Ausnutzung ansonsten verlorener Energie (Abgas).
- Das ACS ist regelbar (s.u. "Düsen") und kann damit der Leistungsanforderung angepaßt werden. Besser ist jedoch, daß über das ACS immer die maximal mögliche Leistung dem Abgas entzogen wird. Hinsichtlich des langfristig verfolgten Zieles des ACS-Projektes (s.o.) wird immer, in jedem Betriebspunkt, die erhaltene elektrische Leistung des ACS mit zum Fahrzeugantrieb verwendet. Der Motor wird also automatisch in seiner Leistungsanforderung entlastet, wodurch wiederum der Kraftstoffverbrauch sinkt.

1.3. Ziel der ersten Projektphase

Die deutsche Bundesstiftung Umwelt hat das ACS-Projekt zunächst in einer ersten Phase gefördert. Ziel dieser ersten Phase war, entsprechend den im Antrag /1, Antrag/ dargelegten Einzelaggregaten des Clausius-Rankine Prozesses einen funktionsfähigen Prüfstand aufzubauen, um erste Untersuchungen hinsichtlich der zu erhaltenden Turbinenleistung durchführen zu können. Im Rahmen dieser ersten Phase sollten der Dampferzeuger und die Dampfturbine aufbauend auf den im Institut für Strömungsmaschinen (IfS) der Universität Hannover durchgeführten Prototypuntersuchungen neu konstruiert und gebaut werden. Der Hochfrequenzgenerator des Antragstellers Magnet-Motor (MM) soll dann aufbauend auf den ersten experimentellen Untersuchungen des Kreislaufes und dem Auslegungspunkt der Dampfturbine in seinen wesentlichen technischen Daten festgelegt werden. Zur Ermittlung der möglichen Turbinenleistung, zur schnellen Inbetriebnahme des Prüfstandes und zur endgültigen Generatorfeinauslegung wird die neu konstruierte Dampfturbine zunächst mit einem Radialverdichter (anstelle des Generators) versehen, der versuchstechnisch leicht zu beherrschen und zu vermessen ist.

2. Dampferzeuger

Für die in der ersten Phase geplanten Versuche des ACS an einem Brennkammerprüfstand wurde ein neuer Dampferzeuger konstruiert und gefertigt. Dieser Dampferzeuger hat einen modularen Aufbau (6 Module), wodurch eine Anpassung und Optimierung an unterschiedlich große Abgas-Wärmeströme gegeben ist. Jedes der Module ist sowohl auf der Wasser- als auch auf der Abgasseite einzeln zu- und abschaltbar ausgeführt. Die Dampferzeugermodule bestehen auf der Wasser-/Dampfseite aus einem durchgehenden Rohr (Werkstoff 1.4404 [X 2 CrNiMo 18 10], nichtrostend, Wärmeleitfähigkeit 15 W/K m), das mäanderförmig in verschiedenen Ebenen gebogen und in ein Abgashüllrohr eingebaut ist (Bild 4 - Bild 6). Der innere Durchmesser des Dampferzeugerrohres beträgt dabei 2 mm, der Außendurchmesser 3.2 mm. Vorversuche mit einem Dampferzeuger, bestehend aus zwei parallelen Modulen, haben gezeigt, daß bedingt durch die kleinen geometrischen Abmessungen des Dampferzeugerrohres und dem damit verbundenen geringen Dampfmassenstrom je Modul ein schnelles Ansprechverhalten des Dampferzeugers auf wechselnde Wärmeströme des Abgases realisiert werden kann.

abgeschlossene Arbeiten :

- Fertigung von 6 Dampferzeugermodulen, jedes bestehend aus einem 25 m langen Rohr, Innendurchmesser 2 mm (Bild 4)
- Fertigung von Abgashüllrohren für die einzelnen Module, einzeln zuschaltbar über Abgasklappe (Bild 5)
- Abgeschlossene Fertigung des gesamten Dampferzeugers, Anschluß an Brennkammer, Installation von Meßtechnik zur Druck- und Temperaturmessung sowohl auf der Abgas-, als auch auf der Wasser/Dampfseite des Dampferzeugers, Montage auf dem Prüfstand (Bild 6)
- Der Dampferzeuger einschließlich Meßtechnik ist am Prüfstand aufgebaut und angeschlossen.

3. Düsen

Das Kreislaufmedium verläßt den Dampferzeuger (Bild 2) im überhitzten, d.h. dampfförmigen Zustand mit Temperaturen bis zunächst 650 °C (typisch für Dieselmotoren) und einem Druck von ca. 5,5 bar. Der auf hohem Enthalpieniveau befindliche Dampf wird in Überschall- Lavaldüsen entspannt. Die Auslegung des Kreislaufes sieht vor, daß jedes Dampferzeugermodul in eine Überschalldüse mündet. Damit ist gewährleistet, daß durch den modularen Aufbau des Dampferzeugers auch gleichzeitig eine Regelung der Turbine durch das Beaufschlagungsverhältnis (Anzahl der Düsen) möglich ist.

Die Düsen wurden nach dem Charakteristikenverfahren (/6 Zucrow et.al./) ausgelegt, was zu einer konstanten Geschwindigkeitsverteilung der Strömung am Düsenaustritt führt. Hierdurch ist eine Anpassung des Düsenaustritts an das Turbinenlaufrad durch parallele Verlängerung der Düsenaustrittskontur möglich, was aus konstruktionstechnischen Belangen erforderlich ist (Bild 11). Für die Versuche am Brennkammerprüfstand wurden aufbauend auf Prototypenversuchen an einem Dampferzeuger /1,Antrag/ drei verschiedene Düsenvarianten ausgelegt, die im Hinblick auf eine Optimierung des ACS untersucht werden sollen. Die Auslegungspunkte der Düsen liegen bei:

- 1.) $T_{\text{Ein}} = 300 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $p_{\text{Ein}} = 6 \text{ bar}$, $\dot{m} = 1.0 \text{ g/s}$, V 007
- 2.) $T_{\text{Ein}} = 300 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $p_{\text{Ein}} = 6 \text{ bar}$, $\dot{m} = 1.5 \text{ g/s}$, V 015
- 3.) $T_{\text{Ein}} = 300 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $p_{\text{Ein}} = 6 \text{ bar}$, $\dot{m} = 2.0 \text{ g/s}$, V 023

Bild 7 zeigt die berechneten Konturen dieser drei Düsen. Der Auslegungspunkt wurde bewußt auf niedrige Temperaturen gelegt (der Eintrittsdruck folgt aus dem h-s Diagramm für Wasser bei einer isentropen Entspannung auf $p_{\text{Aus}} = 1 \text{ bar}$), da sich bei höheren Eintrittstemperaturen und damit auch höheren Eintrittsdrücken der durch die Düsen durchsetzbare Massenstrom erhöht (Bild 8). Für einen Betrieb mit hohen Temperaturen ließe sich dann die Anzahl der notwendigen Dampferzeugermodule reduzieren, solange der notwendige Massenstrom in den Heißdampfbereich überführt werden kann. Dies käme einer kleinen Baugröße des Dampferzeugers entgegen und reduziert Kosten.

abgeschlossene Arbeiten :

- rechnerische Auslegung von Überschall-Lavaldüsen für drei verschiedene in Frage kommende Auslegungspunkte.
- rechnerische Abschätzung des Arbeitsbereiches der Lavaldüsen.
- Herstellung von Düsen eines Auslegungspunktes ($\dot{m} = 1.5 \text{ g/s}$).
- Anpassung der gefertigten Düsen an die Turbine.

4. Dampfturbine

Aufbauend auf Prototypenuntersuchungen an Dampfturbinenlaufrädern im IfS /1,Antrag/ wurde eine neue Dampfturbine konstruiert und für die gußtechnische Fertigung vorbereitet. Für die Versuche am Brennkammerprüfstand im IfS wurden verschiedene Varianten des Turbinenlaufrades erörtert und konzipiert (s.u. "Versuche"). Dabei handelt es sich um von den geometrischen Abmessungen her ähnliche Turbinenlaufräder.

Der im Dampferzeuger überhitzte Dampf wird in den oben beschriebenen und berechneten Überschall-Lavaldüsen entspannt und die zur Verfügung stehende Enthalpie in Geschwindigkeit umgesetzt. Der so beschleunigte Dampf beaufschlagt die Dampfturbine, die nach dem Gleichdruckprinzip arbeitet. Aus der Theorie der Gleichdruckturbine nach

dem Pelton- Prinzip /7, Malobabic et.al.(Denver)/, /8, Shao et.al.(Kairo90)/ (Anlagen) ergibt sich eine maximale Energieumsetzung in der Turbine dann, wenn eine Umlenkung des Dampfstrahles um 180° bei gleichzeitig möglichst tangentialer Zu- und Abströmung stattfindet. Um dies gewährleisten zu können, muß die Dampfturbine mit Kanälen, die eine 180° -Umlenkung ermöglichen, versehen sein. Gleichzeitig wurden die Kanäle bei der konstruktiven Gestaltung, soweit dies aus fertigungstechnischer und strömungstechnischer Sicht möglich war, möglichst tangential angeordnet. Es wurden für die Versuche zwei verschiedene Laufraddurchmesser vorgesehen, 70 mm und 85 mm äußerer Laufraddurchmesser. Hieraus ergeben sich für das Laufrad mit 70 mm Durchmesser eine Kanalanzahl von 17 (13, 19, s.u.), bei dem Laufrad mit 85 mm Durchmesser eine Kanalanzahl von 21 (Bild 9, Bild 10). Gleichzeitig wurde bei der Konstruktion des Turbinenlaufrades und des Gehäuses eine zweite Laufradform mitkonstruiert, wobei hier im Laufrad anstelle der Kanäle Taschen vorgesehen sind. Für diesen Laufradtyp muß der Gehäuseteil der Dampfturbine, welcher die Düsen trägt, mit einem inneren Ring versehen werden der in die Taschen eingreift und die Strömungsumlenkung in der geforderten Weise unterstützt. Dieser Gehäuseteil muß dann in geteilter Bauform ausgeführt werden (Bild 11).

Zur Fertigung der Turbine einschließlich Laufrad und Gehäuseteilen wurde die Konstruktion derart durchgeführt, daß eine gußtechnische Herstellung möglich ist. Dabei muß berücksichtigt werden, daß alle Gehäuseteile und die Laufräder als Gußteile konzipiert sind, die mit einer anschließenden Endbearbeitung auf einer CNC gesteuerten Maschine fertiggestellt werden. Hier kommt zum Tragen, daß die Laufradvariante mit Taschen durch eine schnelle und kostengünstige CNC-Fertigung bearbeitet werden kann, während die Laufradform mit Kanälen insgesamt als Gußteil erstellt wird.

abgeschlossene Arbeiten :

- konstruktive Gestaltung der Turbinenlager-, des Abström- und des Düsenträgergehäuses für zwei Laufradformen und zwei Laufradgrößen
- konstruktive Gestaltung und Optimierung der Kanalströmung durch plazieren der Düsen in strömungsgünstiger Weise (keine Strahlversperrung durch Kanaleintritt)
- Formen zum Abguß der Einzelteile wurden fertiggestellt
- Abströmgehäuse, Düsengehäuse und Lagergehäuse wurden gegossen und sind zur Endbearbeitung vorbereitet.

noch offene Arbeiten :

- CNC-Bearbeitung der einzelnen Gehäuseteile
- gußtechnische Herstellung der Turbinenlaufräder und CNC-Bearbeitung

4.1 Konstruktion einer neuen Dampfturbine

Die Konstruktion und die Fertigung, sowohl des Turbinengehäuses als auch der Laufräder, wurde der Firma Lütgemeier übertragen. Die Fertigung und Endbearbeitung der soeben erwähnten Bauteile ist aber bis zum heutigen Tage nicht durchgeführt worden. Da das Turbinengehäuse und die Laufräder sehr entscheidende Komponenten im zu untersuchenden Clausius - Rankine - Prozeß darstellen, wurde der Zeitplan des ACS - das Projekt erheblich verzögert. Da nicht mit einer Lieferung der Bauteile zu rechnen war, war ein erfolgreicher Abschluß nicht in Sicht. Um das Scheitern eines so vielversprechenden Projektes zu verhindern, mußte eine Lösung gefunden werden, wie man in Eigeninitiative eine neue Turbine samt Laufrad konstruieren kann, die mit den am IfS zur Verfügung stehenden Mitteln gefertigt werden kann. Eine eventuelle Verschlechterung des Turbinenwirkungsgrades muß bei der Vereinfachung der Komponenten aber leider in Kauf genommen werden.

Aus der Tatsache heraus, daß alle Einzelteile der Turbine am IfS zu fertigen sein sollten, ergab sich zwangsläufig, daß eine gußtechnische Herstellung des Turbinengehäuses nicht mehr in Frage kam - die neue Konstruktion sollte relativ einfach aufgebaut sein, so daß die Einzelteile auf einer Drehmaschine zu fertigenden sind. Auch das favorisierte Laufrad mit der 180° Strömungsumlenkung kann am IfS nicht gefertigt werden. Es mußte nun ein Laufradtyp ausgewählt und konstruiert werden, der auf der am IfS zur Verfügung stehenden Fräsmaschine herstellbar war.

Im Rahmen der am IfS stattfindenden Forschungsarbeiten wurden Versuche mit einer kleinen Preßluftturbine (als Gleichdruckturbine) durchgeführt. In diesem Falle wurde die zur Verfügung stehende Preßluft durch mehrere Düsen geleitet, wodurch der Druck in Geschwindigkeit umgewandelt wurde. Die mit hoher Geschwindigkeit strömende Luft beaufschlagt nun das Laufrad. Das Laufrad wird von der Luft unter einem bestimmten Winkel angeströmt und verläßt das Laufrad dann axial. Da in den beschriebenen Versuchen gute Ergebnisse erzielt wurden und der verwendete Laufradtyp am IfS selbst hergestellt werden kann, wurde daraufhin, in Anlehnung an den beschriebenen Laufradtyp, ein neues Laufrad für denn Betrieb mit Heißdampf konstruiert und gefertigt. Das gefertigte Laufrad hat einen Durchmesser von 50 mm und besitzt 25 Kanäle.

Die oben beschriebenen Düsen wurden an das neue Laufrad angepaßt und in das so entstandene Turbinengehäuse integriert.

abgeschlossene Arbeiten :

- konstruktive Gestaltung der Turbinenlager-, des Abström- und des Düsenträgergehäuses
- konstruktive Gestaltung und Optimierung der Kanalanströmung durch plazieren der Düsen in strömungsgünstiger Weise (keine Strahlversperrung durch Kanaleintritt)
- konstruktive Gestaltung des Laufrades
- Fertigung des Laufrades
- Endmontage der Dampfturbine und des Turbinenlagers
- Aufbau der Kompletten Dampfturbine auf den Prüfstandswagen

5. Hochfrequenzgenerator

Für die Umsetzung der mechanischen in elektrische Energie ist ein MM-Permanentmagnetgenerator - der auf der Turbinenwelle ohne Untersetzung läuft - ausgelegt, berechnet und vorkonstruiert worden.

Zur Umformung des Generatorausgangsstromes wurde ein Pulswechselrichter und zur Generatorsteuerung ein Mikroprozessorsystem auf Basis der MM-Technologie konzipiert.

Die Auslegungseckdaten für den Generator sind:

n_{\max}	=	100.000 min ⁻¹
n_{Nenn}	=	70.000 min ⁻¹
$d_{\text{außen}}$	=	85 mm
P_{Nenn}	=	10 kW

Die Daten und Auslegungen des elektromagnetisch, mechanisch und thermisch berechneten Generators sind :

Außenläufer

70 mm Luftspaltdurchmesser

12 Magnetpole; 14 Statorzähne

P_{mech} = 14.06 kW bei $n = 90.000 \text{ min}^{-1}$

$P_{\text{elektrisch Generator}}$ = 13.60 kW bei $n = 90.000 \text{ min}^{-1}$

$P_{\text{Zwischenkreis}}$ = 13.21 kW bei $n = 90.000 \text{ min}^{-1}$

$\eta_{90.000}$ = 93.67 %

$\eta_{70.000}$ = 94.79 %

Stator: Kühlung

Läufer: Luftkühlung über Eigenventilation

Läufer: Kohlefaserverbund

6. Kondensator

Zur Rückkühlung des Kreislaufmediums auf den im Speisewasserbehälter vorherrschenden Zustand wurde für die experimentellen Untersuchungen ein Kondensator ausgewählt und am Prüfstand installiert. Bei diesem Kondensator handelt es sich um einen Wasser/Wasser Wärmetauscher mit einer Nennwärmeleistung von 69.3 kW, wobei die geometrischen Abmaße mit $h \cdot b \cdot l = 189 \cdot 72 \cdot 75$ mm äußerst klein sind (Bild 12).

7. Prüfstand

Gemäß dem im Antrag aufgeführten Ziel und Zeitplan des Projektes, sollen mit dem in der ersten Phase konzipierten CRP zunächst Untersuchungen im stationären Betrieb an einem Brennkammerprüfstand durchgeführt werden. Erste Optimierungsarbeiten und Änderungen des CRP werden dort realisiert. Zu einem späteren Zeitpunkt sind mit dem selben Prüfstand sowohl stationäre als auch instationäre Untersuchungen an einem Motorenprüfstand vorgesehen. Es ist daher notwendig, den Prüfstandsaufbau insgesamt so zu gestalten, daß ein Betrieb mit Brennkammer und Motor möglich ist. Die erforderliche Meßtechnik muß entsprechend ausgewählt werden (dynamisches Verhalten der Aufnehmer, Eignung für dynamische Messungen) und der Prüfstand selbst muß mobil sein. Zu diesem Zweck wurde der CRP auf einem rollbaren Prüfstandstisch montiert (Bild 13), der sowohl am Motor als auch an der Brennkammer angeschlossen werden kann. Zur Erfassung aller für die Optimierung und Untersuchung des CRP notwendigen Daten wurde der Prüfstand mit entsprechender Meßtechnik versehen. Hierzu gehören Druck- und Temperaturmeßstellen, Düsen zur Volumenstrombestimmung des Abgases, Durchflußmessgeräte zur Erfassung des Volumenstromes im Kreislauf selbst und im Kühlkreislauf des Kondensators. Bild 14 und Bild 15 geben eine Übersicht über den versuchstechnischen Aufbau des CRP am Brennkammerprüfstand und die Anordnung der einzelnen Meßstellen. Alle Meßaufnehmer wurden dahingehend ausgewählt, daß für dynamische Messungen eine Erfassung der Daten mittels einer automatischen Meßdatenerfassungsanlage möglich ist.

abgeschlossene Arbeiten :

- Aufbau des Prüfstandstisches, rollbar, einsetzbar am Motor- und Brennkammerprüfstand.
- Aufbau des Kreislaufes (CRP) auf dem Prüfstandstisch.
- Installation der gesamten Meßtechnik am CRP.
- Anschluß des CRP an die Brennkammer.
- Anschluß der Brennkammer an die Druckluftversorgung des Institutes.

8. Versuche

Am fertiggestellten Brennkammerprüfstand werden stationäre Untersuchungen des Kreislaufes durchgeführt. Gegenstand dieser Untersuchungen sind insbesondere die Dampfturbine und der Dampferzeuger. Durch die bei der Konstruktion berücksichtigten Variationsmöglichkeiten (s.o. modulare Steuerung des Dampferzeugers, versch. Laufradtypen und Düsen der Turbine) ist die Voraussetzung zu einer schnellen Abschätzung und Umsetzung wirkungsgradsteigernder Eingriffe gegeben. Es wird dabei gleichzeitig berücksichtigt, ob eine kostengünstige Fertigung insbesondere der Turbine gegeben ist.

Zunächst werden Kennfelder des Dampferzeugers und der Turbine bei unterschiedlichen Lastvorgaben durch den Abgaswärmestrom aufgenommen und hinsichtlich des Einflusses der Variationsmöglichkeiten bewertet.

Durch die nicht gelieferten Laufräder der Firma Lütgemeier ist es vorerst nicht möglich Variationen bezüglich verschiedener Turbinenlaufräder zu untersuchen. Eine Herstellung von Laufrädern am IfS ist nicht ratsam, da mit den hier zur Verfügung stehenden Mittel nur relativ einfach aufgebaute Laufräder zu fertigen sind.

Zusammenstellung der Variationsmöglichkeiten und des Versuchsprogrammes für die stationäre Untersuchung des CRP:

Düsen

Es wurden drei verschiedene Düsen für die Brennkammerversuche ausgelegt und berechnet

Dampferzeuger

Der Dampferzeuger besteht aus 6 Modulen, die einzeln nach Bedarf zu- und abgeschaltet werden können

9. Berechnung

Anhand von ersten Untersuchungen im IfS an Prototypen der Dampfturbine und des Dampferzeugers konnten die Wirkungsgrade dieser Bauteile ermittelt werden. Es muß dabei berücksichtigt werden, daß diese beiden Bauteile derzeit nicht optimiert waren und zunächst für erste Untersuchungen gebaut wurden. Die zulässigen Belastungsgrenzen, insbesondere die der Turbine als Aluminiumbauteil, waren sehr niedrig. Die mit diesen beiden Prototypen ermittelten Wirkungsgrade sind daher als niedrig anzusehen und sollten, bei Verwendung geeigneterer Materialien und bei einer maschinellen Fertigung (mit entsprechender Fertigungsgenauigkeit) wesentlich übertroffen werden. Bild 16 gibt den Wirkungsgrad des Dampfturbinenprototyps wieder, Bild 17 den des Dampferzeugerprototyps. Der experimentell ermittelte Turbinenwirkungsgrad liegt dabei in einem Bereich von 50 - 70%, der des Dampferzeugers bei 60 - 80%.

Aufbauend auf diesen Daten wurde eine Berechnung des ACS in Verbindung mit einem real existierenden PKW-Motor durchgeführt. Diese Berechnungen dienen als Anhaltswert, da für jeden Motor und jedes Fahrzeug, bedingt durch das Motorkennfeld, Getriebeübersetzung, Luftwiderstandsbeiwert etc., bei der Ankopplung des ACS andere Einsparungen berechnet werden. Dieser Motor wurde deshalb ausgewählt, da er in einem häufig verkauften PKW eingesetzt wird. Dieses Fahrzeug und die Leistung dieses Motors sind in der Mittelklasse einzuordnen. Bei Motoren in LKW, die mit einem entsprechend enger gefaßten Kennfeld (kleinerer Drehzahlbereich) gefahren werden und zudem im tatsächlichen Straßenbetrieb oft über lange Zeit im hohen Lastbereich fahren, sind höhere Einsparungen zu erwarten.

Die für die Berechnung verwendeten Eingabedaten für Turbinen- und Dampferzeugerwirkungsgrad ($\eta_{\text{Turb.}} = 40\%$, $\eta_{\text{Dampferz.}} = 80\%$) sowie für den Prozeßdruck ($p = 30 \text{ bar}$) wurden niedrig angesetzt. Jede Wirkungsgradverbesserung der Einzelwirkungsgrade von Dampferzeuger und Turbine, die im Rahmen dieses Projektes erzielt werden sollen und realistisch erscheinen, bringt unmittelbar auch eine Erhöhung der Einsparung. In den folgenden Bildern sind die Berechnungsergebnisse dargestellt. In Bildern, die den prozentualen Verbrauch wiedergeben, wird davon ausgegangen, daß der Motor ohne ACS immer 100% Kraftstoff verbraucht. Ein Verbrauch mit ACS von beispielsweise 90% entspricht demnach einer Kraftstoffeinsparung von 10%. Bild 18 gibt die mögliche Einsparung an dem o.g. PKW- Motor im gesamten Kennfeldbereich wieder. Zum einen wird der Kraftstoffverbrauch in l/h über dem Mitteldruck, zum anderen über der Motorleistung an der Antriebswelle dargestellt. Der Mitteldruck (effektiver Mitteldruck) ist ein Maß für die Leistung des Fahrzeuges gemäß der Gleichung:

$$P_{\text{Mot}} = \frac{p_e \cdot n \cdot V_H}{i}$$

mit p_e als effektivem Mitteldruck, n als Drehzahl, V_H als Hubvolumen und $i=2$ für Viertaktmotoren. Bild 18 zeigt, daß im Bereich des Vollastpunktes bei einer Drehzahl von $n = 6000 \text{ min}^{-1}$ und einem Mitteldruck von $p_e = 8 \text{ bar}$ dieses Fahrzeuges ohne ACS ein Verbrauch von 32,1 l/h vorliegt, bei einem Betrieb mit ACS der Verbrauch jedoch auf 29 l/h sinkt. Dies bedeutet eine Verbrauchssenkung um ca. 10%. Selbst bei einem Betrieb im unteren und mittleren Teillastbereich sind bereits unter diesen ungünstigen Voraussetzungen deutliche Einsparungen möglich.

Die nachfolgende Tabelle gibt eine Übersicht der Kraftstoffeinsparung der in Bild 18 dargestellten Kurven:

Drehzahl [1/min]	Nutzmitteldruck [bar]		
	2	3	6
2000	0,8%	1,2%	2,75%
6000	4,3%	6,3%	9,1%

Verbrauchsabsenkung im Teillastbetrieb (am Bsp. 1.8-Liter Motor)

Den Betrieb des Fahrzeuges im ECE-Zyklus sowohl im Stadtbetrieb als auch bei Überlandfahrt zeigen Bild 19 und Bild 20. Bei diesem Fahrzyklus, der eine extrem langsame Beschleunigung des Fahrzeuges beinhaltet, können im Stadtbetrieb gemäß den o.g. Kreislaufvorgaben bis zu 1,5 % Kraftstoff eingespart werden (Beschleunigung von 30 km/h auf 50 km/h im 3. Gang). Dieser Wert sollte nach einer Optimierung des Kreislaufes überschritten werden. Bei einer Überlandfahrt mit dem hier beispielhaft berechneten Fahrzeug ergibt sich eine maximale Einsparung bei der Beschleunigung von Tempo 100 km/h auf Tempo 120 km/h im vierten Gang von ca. 4,6%, bei einer konstanten Geschwindigkeit von 120 km/h im vierten Gang eine Einsparung von 3,6%.

10. Erste Ergebnisse

10.1 Dampferzeuger

Bei den ersten Untersuchungen des Kreisprozesses am aufgebauten Brennkammerprüfstand wurde auch die Komponente - Dampferzeuger - näher untersucht. In den Bildern 21 bis 23 ist eine Auswahl von Betriebspunkten des Dampferzeugers wiedergegeben.

Für ein komplexes Rechenprogramm, welches einen Clausius - Rankine - Prozeß in Verbindung mit einer Verbrennungskraftmaschine simuliert, wurde am IfS ein Programmmodul für den Dampferzeuger erstellt. Die gemessenen Ergebnisse sind den mit dem Dampferzeugerberechnungsprogramm ermittelten Werten ebenfalls in den Bildern 21 bis 23 gegenübergestellt. Die durchgezogene Linie stellt die Berechnung dar, die Meßpunkte sind durch Rauten gekennzeichnet und durch eine gestrichelte Linie verbunden. In den Bildern ist im oberen Diagramm der Temperaturverlauf der Abgastemperatur, im mittleren der Verlauf der Wassertemperatur und im unteren Diagramm der Verlauf des Wasserdruckes über der Rohrlänge aufgetragen. Die angegebenen Werte beziehen sich auf ein Modul des Dampferzeugers.

In allen drei Fällen ist eine gute Übereinstimmung der Meßwerte mit den Berechnungen festzustellen. Es ist zu erkennen, daß in allen drei Betriebspunkten überhitzter Dampf am Austritt aus dem Dampferzeuger zu Verfügung stand. Der berechnete Wert der Dampfaustrittstemperatur liegt leicht über dem gemessenen Wert, da sich die Meßstelle nicht unmittelbar hinter dem Dampferzeuger befindet sondern direkt vor der Düse der Turbine angebracht ist.

Aus der Wärmebilanz des Abgases bzw. des Wassers und des überhitzten Wasserdampfes ergeben sich folgende durch den Dampferzeuger übertragene Wärmeleistungen:

Betriebspunkt 1 (Bild 21)

Abgaseintrittstemperatur:	503	°C
Abgasaustrittstemperatur:	292	°C
Abgaseintrittsdruck:	1,05	bar
Abgasaustrittsdruck:	1,05	bar
Abgasmassenstrom:	0,019	kg/s

Wassereintrittstemperatur:	27,5	°C
Wasseraustrittstemperatur:	413	°C
Wassereintrittsdruck:	25,6	bar
Wasseraustrittsdruck:	5,35	bar
Wassermassenstrom:	1,3	g/s

Abgegebene Wärmeleistung des Abgases:	30,41 kW
Aufgenommene Wärmeleistung des Wassers:	24,61 kW

Betriebspunkt 2 (Bild22)

Abgaseintrittstemperatur:	614	°C
Abgasaustrittstemperatur:	371	°C
Abgaseintrittsdruck:	1,05	bar
Abgasaustrittsdruck:	1,05	bar
Abgasmassenstrom:	0,0167	kg/s

Wassereintrittstemperatur:	28	°C
Wasseraustrittstemperatur:	513	°C
Wassereintrittsdruck:	40,57	bar
Wasseraustrittsdruck:	9,48	bar
Wassermassenstrom:	1,378	g/s

Abgegebene Wärmeleistung des Abgases: 32,76 kW
 Aufgenommene Wärmeleistung des Wassers: 27,98 kW

Betriebspunkt 3 (Bild23)

Abgaseintrittstemperatur:	744	°C
Abgasaustrittstemperatur:	501	°C
Abgaseintrittsdruck:	1,05	bar
Abgasaustrittsdruck:	1,05	bar
Abgasmassenstrom:	0,033	kg/s

Wassereintrittstemperatur:	28,5	°C
Wasseraustrittstemperatur:	665	°C
Wassereintrittsdruck:	72,11	bar
Wasseraustrittsdruck:	17,45	bar
Wassermassenstrom:	2,115	g/s

Abgegebene Wärmeleistung des Abgases: 33,59 kW
 Aufgenommene Wärmeleistung des Wassers: 24,65 kW

In Bild 24 ist für eine Reihe von Meßpunkten der übertragene Wärmerstrom im Dampferzeuger dargestellt. Weiterhin sind zur Verdeutlichung die Wirkungsgradlinien für 85% und 60% in das Diagramm eingetragen. Mit steigenden Temperaturen steigt auch der Wirkungsgrad des Dampferzeugers an, bis bei einer Abgaseintrittstemperatur von ca. 600 °C ein Optimum von 85% erreicht wird. Mit weiterer Zunahme der Abgaseintrittstemperatur fällt der Wirkungsgrad aber wieder leicht ab. Dieser Abfall des Wirkungsgrades ist sicherlich im sehr hohen Temperaturniveau des Dampferzeugers zu sehen, wodurch auch eine erhöhte Wärmekonvektion an die Umgebung stattfindet.

In den oben beschriebenen ersten Untersuchungen des Kreisprozesses hat sich gezeigt, daß über den Dampferzeuger dem Abgas eine große Wärmemenge entzogen werden kann. Hier kann sicherlich ein hohes Potential zur Rückgewinnung der ansonsten sinnlos entweichenden Abgasenergie ausgenutzt werden.

In weiteren Versuchen sollen Betriebspunkte des Dampferzeugers untersucht werden, wobei Variationen des Abgasmassenstromes und der Abgaseintrittstemperatur durchgeführt werden, um durch die zu bzw. Abschaltung der einzelnen Module der Dampferzeuger immer im optimalen Wirkungsgradbereich betrieben werden kann.

10.2 Dampfturbine

Bei ersten Untersuchungen des Kreisprozesses wurde das Turbinenlaufrad mit dem Heißdampf aus allen sechs Düsen beaufschlagt. Es wurden Drehzahlen bis zu $n = 40.000$ 1/min gemessen. Höhere Drehzahlen waren aufgrund eines zu hohen Wassermassenstromes nicht möglich. Bei Versuchen mit drei Düsen und einer Pumpe hinter dem Kondensator konnten stationäre Drehzahlen von $n = 65.000$ 1/min gemessen werden. In diesem Falle wurde an der Abtriebswelle eine Leistung von 1,5 kW gemessen.

In weiteren Versuchen sollen Düsen- und Laufradvariationen vorgenommen werden, damit die hohe Wärmemenge die vom Abgas an den Dampferzeuger abgegeben wird auch optimal genutzt werden kann.

10.3 Optimierungen

Bei Versuchen bei denen hohe Wassermassenströme durch den Dampferzeuger gepumpt wurden, fiel auf, daß zunächst die Drehzahl der Turbine anstieg und kurz darauf wieder abfiel. Bedingt durch den hohen Wasserdurchsatz stieg der Wasserspiegel im Kondensator anstieg, wodurch wiederum eine geringere Dampfmenge kondensiert werden konnte. Der Grund für das rasche abfallen der Drehzahl ist darin zu sehen, daß der Wasserspiegel bis in das Turbinengehäuse stieg und somit das Laufrad bremste.

Eine erste Optimierung des gesamten Kreislaufes würde eine Vergrößerung des Kondensators mit sich bringen. Von der Wärmemenge her ist der Kondensator zwar richtig ausgelegt, da aber beim untersuchten Kreislauf der Druck hinter der Turbine ungefähr dem Umgebungsdruck entspricht, muß das kondensierte Wasser durch Schwerkraft in den Speisebehälter fließen.

Um mit dem gegebenen Kondensator auch Versuche mit höheren Wassermassenströmen durchführen zu können, wurde der Versuchsstand dahingehend modifiziert, daß das kondensierte Wasser hinter dem Kondensator mit einer Pumpe in den Speisebehälter gefördert wurde.

11. Arbeiten in geplanter 2. Projektphase

Gemäß den im Antrag /1,Antrag/ gemachten Angaben zum Arbeitsprogramm (Kapitel 4.2 d. Antrages) ergeben sich für die zweite Phase die folgenden Arbeiten:

1:

- Untersuchung des Dampferzeugers und der Dampfturbine an einem vorbereiteten Brennkammerprüfstand im IfS, Messung und Auswertung
- Nachweis des realisierbaren Leistungsgewinnes mittels eines Radialverdichters (bei Vorversuchen zum Generatoreinsatz)

2:

- Entsprechend den ermittelten Leistungsdaten des Dampferzeugers und der Dampfturbine müssen eine Speisepumpe und ein Kondensator für den Einsatz am Kfz-Motor ausgewählt werden (Zukauf).

3:

- Konstruktion eines Hochfrequenzgenerators zur direkten Ankopplung an die Dampfturbine
- Vorversuche zu Materialeigenschaften und Herstellbarkeit mechanisch und thermisch belasteter Teile
- Aufbau des Hochfrequenzgenerators einschließlich Elektrik/Elektronik
- Vermessung elektrischer und mechanische Kennwerte
- Experimenteller Nachweis der technischen Zieldaten
- Erprobung von Dampfturbine und Hochfrequenzgenerator im Zusammenwirken am Brennkammerprüfstand

4:

- Neukonstruktion des Turbinenlagergehäuses, Dichtung zum Generator, Auslegung der Turbinenwelle für den Generator und das Turbinenlaufrad.
- Durchführung erster Optimierungsmaßnahmen (z.B. Laufraddurchmesser, Laufradform [Taschen, Kanal s.o.], Düsendurchmesser)
- Experimentelle Untersuchung der optimierten Turbine im Verbund mit HF-Generator

5:

- Aufbau eines Motorenprüfstandes im IfS. Es wurden bereits zwei moderne Motoren beschafft (1.4-Liter Einspritzmotor [Otto], 2.5-Liter Turbodiesel [Audi TDI]), die für einen Einsatz am Motorenprüfstand in Frage kommen.
- Adaption des ACS an den vorbereiteten Motorenprüfstand
- Aufbau einer Meßdatenerfassungsanlage für dynamische Messungen am Motorenprüfstand
- Experimentelle Untersuchungen am Motorenprüfstand, Messung, Auswertung im stationären und dynamischen Einsatz
- Darstellung der gewinnbaren elektrischen Leistung in diesem Betrieb über passive Last

6:

- Ankauf eines Versuchsfahrzeuges
- Installation einer mobilen Meßdatenerfassung zur Bestimmung der wesentlichen Motor- und Kreislaufkenndaten (der mobile Einsatz der Meßdatenerfassung wird beim Kauf (s.a. 5:) bereits berücksichtigt, daher keine Doppelanschaffung notwendig)
- Aufnahme der Motorkenndaten am Versuchsfahrzeug ohne ACS
- Umrüsten des Versuchsfahrzeuges (Abgaskrümmer u.ä.) auf den Einsatz des ACS
- Ermittlung der vom Generator abgegebenen Zeitmittelleistung (zyklusabhängig) über eine passive Last

12. Kosten der 2. Projektphase

12.1. Fa. Magnet-Motor GmbH

Die folgenden Angaben wurden aus der Meilensteinplanung übernommen und verstehen sich nunmehr als Grundlage für den Antrag auf Förderung einer 2. Projektphase.

2. Meilenstein

Inhalt: Abschluß Hardwarevorarbeiten; Herstellungbeginn Rotor/Stator

Kosten: Personalkosten DM 168.000,--
Sachkosten DM 49.000,--

3. Meilenstein

Inhalt: Abschluß von Aufbau, Inbetriebnahme, ersten Tests und Messungen am Prototyp 1; Beginn von Überarbeitung/Optimierung

Kosten: Personalkosten DM 170.000,--
Sachkosten DM 40.000,--

4. Meilenstein

Inhalt: Abschluß Aufbau Prototypen 2 und 3; Beginn des Versuchs Prototyp 1 an Turbine

Kosten: Personalkosten DM 133.000,--
Sachkosten DM 15.000,--

5. Meilenstein

Inhalt: Abschluß Inbetriebnahme Prototyp 2 und 3; Beginn der Erprobung Prototyp 1 an Turbine und System (Bordnetz)

6. Meilenstein

Inhalt: Abschluß Erprobung Prototyp 1, 2, 3 an Turbine und System (Bordnetz)

Kosten: 5. + 6. Meilenstein Personalkosten DM 197.000,--

12.2. Institut für Strömungsmaschinen

Für die Durchführung der in der zweiten Phase geplanten Arbeiten ergeben sich die dargestellten Kosten am Institut für Strömungsmaschinen (korrespondierend zu Antrag):

a) Wissenschaftliche Leitung der am Institut durchgeführten Arbeiten (Professor anteilig, <u>Eigenanteil</u>)	DM	65.000,--
b) Betreuung der Meßdatenerfassung, Anpassung an vorhandene Anlagen, Erarbeitung messtechnischer Regelungen (Dr.-Ing anteilig, <u>Eigenanteil</u>)	DM	45.000,--
c) Betreuung anfallender elektronischer Arbeiten, Wartung und Instandhaltung elektronischer Bauteile Nutzung der institutseigenen Elektronikwerkstatt (Techniker, Nutzung, anteilig, <u>Eigenanteil</u>) 5 Monate	DM	100.000,--
d) Wissenschaftliche Betreuung der am Institut durchgeführten Arbeiten. (Dipl.-Ing., BAT IIa DFG Richtsatz 1996 DM 99.600,--/Jahr)	DM	199.200,--
e) Technische Betreuung der am Institut durchgeführten Arbeiten (Techniker BAT IVa, DFG-Richtsatz 1996 DM 85200,--/Jahr)	DM	170.400,--
f) Studentische Hilfskraft. Beschäftigung 80Std./Monat (DFG-Richtsatz DM 19.200/Jahr)	DM	38.400,--
g) Wissenschaftliche Geräte		
- Meßdatenerfassungsanlage	DM	65.000,--
- Zusatz Meßdatenerfassung für mobilen Einsatz	DM	15.000,--
- Aufbau Motorenprüfstand	DM	10.000,--
- Meßtechnik für Motor (Sonden u.ä.)	DM	10.000,--
- Software, Kleinteile	DM	15.000,--
gesamt	DM	115.000,--
h) Verbrauchsmaterial		
- Umbau des vorhanden Dampferzeugers für den Einsatz am Motorenprüfstand, Optimierungs- und Anpassungsmaßnahmen	DM	10.000
- Hochtemperaturbeständige Bauteile am Motorenprüfstand und Versuchsfahrzeug, z.B. Rohrleitungsteile, Armaturen, Halbzeuge, Thermoleitungen, elektronische Bauteile (Motorüberwachung und -steuerung Regelung), Isoliermaterial, Kleinteile Speisepumpe für Motor und Kfz Betrieb, Kondensator	DM	90.000,--
gesamt	DM	100.000,--

i) Projektgebundene Aufträge an Dritte		
- Material und Fertigung eines Dampferzeugers für den Einsatz an einem Versuchsfahrzeug	DM	50.000,--
j) sonstige Sachkosten		
- passive Last für Generator		
- Anschlußverbindungen für Prüfstandsmotor und Versuchsfahrzeug	DM	20.000,--
- Ankauf eines Versuchsfahrzeuges	DM	50.000,--
k) Betriebskosten		
- Brennkammerprüfstand mit durchschnittlich 20 Std./Woche		
Diese Kosten beinhalten:		
- Strom für Drucklufterzeugung, Überwachung, Regelung, Betrieb der Einzelaggregate		
- Kühlwasser für Kondensator, Verdichter, Luftmengenmessung des Abgases, Motorkühlung, Kühlung der Wirbelstrombremse		
- Betriebsstoffe für Brennkammer, Motor, Kreislauf		
- Nutzung Wirbelstrombremse einschl. Steuerungseinheit, Feuerüberwachungsanlage, Be-/Entlüftungsanlagen der Prüfstände		
<u>Eigenanteil</u>	DM	250.000,--
l) Transport- und Reisekosten	DM	20.000,--
		=====
Gesamtkosten der 2.Phase (IFS)	DM	1.223.000,--
davon als Eigenanteil	DM	460.000,--
Beantragte Mittel	DM	763.000,--

12.3. Firma zur Herstellung von Prototypen (Ersatz für Fa. Lütgemeier)

Da die Firma Lütgemeier bis zum heutigen Tage die benötigten Bauteile wie Turbinenlaufräder und Turbinenlagergehäuse nicht geliefert hat, sollten die entsprechenden Arbeiten für die zweite Phase einer anderen Firma übergeben werden.

Für die in der 2. Phase durchzuführenden Arbeiten ergeben sich die im Antrag /1/ dargestellten Kosten, die entsprechend dem Fortgang der Arbeiten, Optimierungsvorschläge (für die Turbine und den Dampferzeuger) und Einzelaggregatentwicklung näher unterlegt werden.

Die Kosten beziehen sich auf das 2. und 3. Jahr des Antragszeitraumes und beinhalten die Arbeiten:

- Anpassungsarbeiten an Speisepumpe und Kondensator (Zukaufteile für Motor-/Fahrzeugversuche), Haltevorrichtungen, Antriebe etc.
- Neukonstruktion des Turbinenlagergehäuses, Dichtung zum Generator, Turbinenwelle, Zeichnung, Fertigung
- Variation an Turbinenlaufrädern, evtl. optimierte Neuherstellung oder Überarbeitung bestehender Teile
- Für die Adaption des ACS sind neu zu konstruierende Bauteile wie Abgaskrümmen und Haltevorrichtungen notwendig, Konstruktion, Herstellung als Gußteil bzw. CNC Fertigung
- Einbau ACS in Versuchsfahrzeug und Herstellung notwendiger Einzelteile für die Integration des ACS

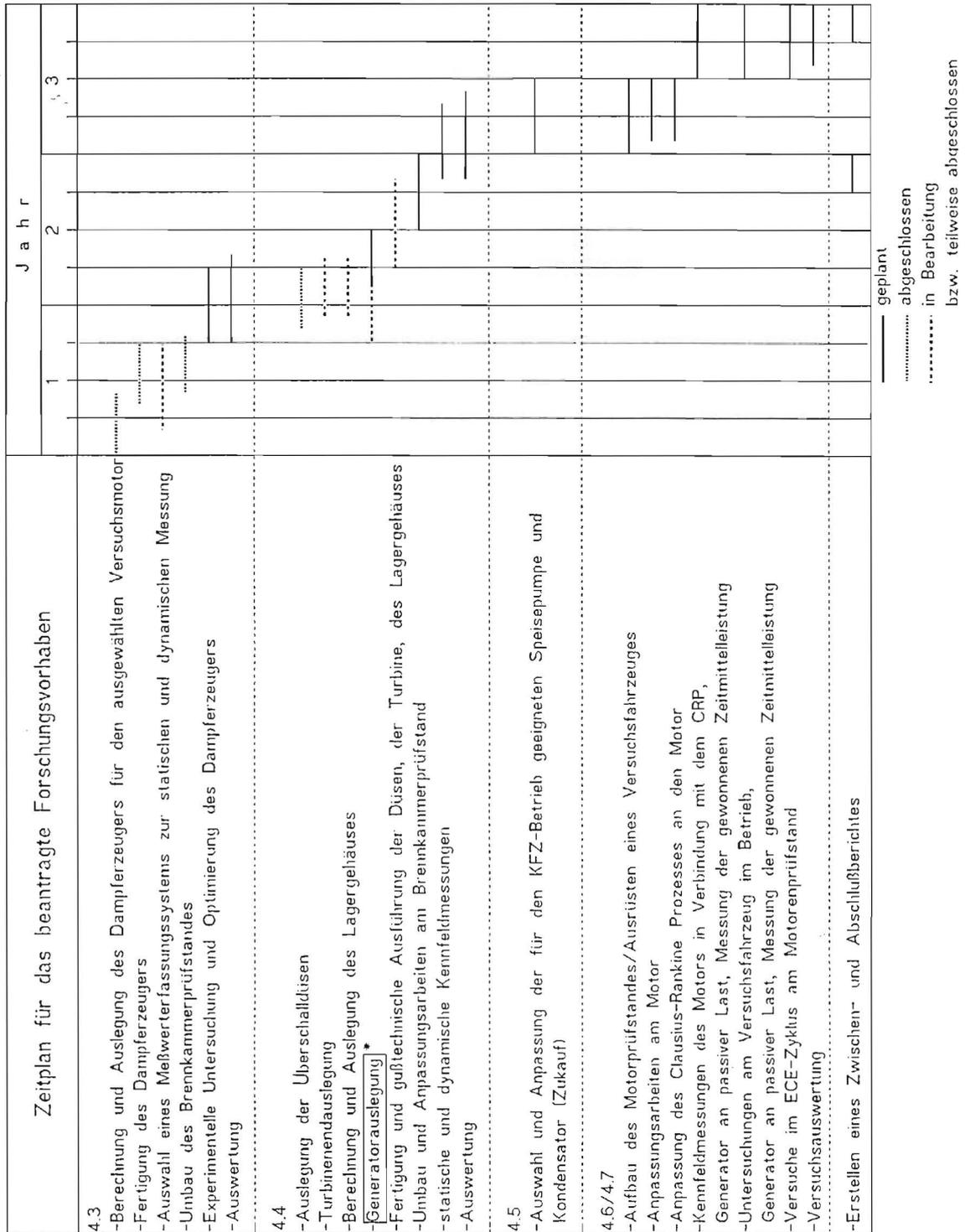
korrespondierend zu Antrag:

a) 1 Diplom-Ingenieur, Konstruktion, Entwicklung, CAD-CAM unterstützt 1000 Std. á DM 100,-- Durchschnittsstundensatz	DM 100.000,--
b) 2 Techniker, Mechanische Fertigung für Musterteile und Versuch unter Benutzung von CNC-Maschinen 2000 Std. á 130,-- Durchschnittsstundensatz	DM 260.000,--
c) Modelle für Kfz-Einbauteile und Versuchsanordnung, Vor- richtungen für die Produktion von Prototypen	DM 100.000,--
d) Nebenkosten Transporte, Reisen, Koordinationskosten	DM 36.000,--
	=====
Gesamtkosten der 2.Phase	DM 496.000,--
davon als Eigenanteil (50%)	DM 248.000,--
Beantragte Mittel	DM 248.000,--

Gesamtkosten der 2. Phase	DM 2.491.000,--
Gesamt-Eigenanteil der 2. Phase	DM 1.094.000,--
Gesamt beantragte Mittel für die 2. Phase	DM 1.397.000,--

13. Zeitplan 2. Projektphase

Der Zeitplan für die 2. Phase entspricht dem Zeitplan (liegt in Kopie bei) des Antrages für das letzte Quartal des 1. Förderungsjahres und das 2. und 3. Förderungsjahr. Seit Auszahlung der ersten Sachmittel durch die Stiftung Anfang Juni 1993 wurden die Arbeiten der ersten 3 Quartale abgearbeitet. Zusätzlich zu den im Zeitplan für die ersten 3. Quartale geplanten Arbeiten wurden bereits Arbeiten aus dem 2. Förderungsjahr abgeschlossen (Düsenauslegung, Turbinenauslegung) bzw. begonnen (gußtechnische Fertigung einiger Turbinenteile (s.o. Dampfturbine)).



14. Meilensteinplan der 2. Projektphase, Mittelplan

14.1. Fa. Magnet-Motor GmbH

Die folgenden Angaben wurden aus der Meilensteinplanung übernommen und verstehen sich nunmehr als Grundlage für den Antrag auf Förderung einer 2. Projektphase.

2. Meilenstein

Inhalt: Abschluß Hardwarevorarbeiten; Herstellungbeginn Rotor/Stator

Tätigkeiten zur Erreichung von Meilenstein 2:

Engineeringarbeiten:

- Erstellung Detailzeichnungen
- Schwingungsberechnung
- Lagerungsauslegung
- Planung der räumlichen Integration

Vorversuche:

- Tests an kritischen Materialien
- Materialauswahl
- Handlingversuche
- Test Leistungselektronik an passiver Last
- Vortest Stellungsgebersystem

Hardwarearbeiten:

- Fertigungsfreigabe und Beginn der Herstellung Rotor/Stator von Hochfrequenzgenerator Prototyp 1

Kosten: Personalkosten DM 168.000,--
Sachkosten DM 49.000,--

3. Meilenstein

Inhalt: Abschluß von Aufbau, Inbetriebnahme, ersten Tests und Messungen am Prototyp 1; Beginn von Überarbeitung/Optimierung

Tätigkeiten zur Erreichung von Meilenstein 3:

Arbeiten am Generator Prototyp 1 ohne Turbine:

- Aufbau Leistungselektronik
Steuerungssystem
Peripherieelektrik
- Gesamtmontage Hochfrequenzgenerator
- Aufbau Inbetriebnahmeprüfstand
- Inbetriebnahme
- Tests und Messungen
- Auswertung

Überarbeitungsengineering/Optimierung:

- Kühlung
- Rotormechnik
- Steuerungsparameter
- Leistungselektronik
- Aufbauhandling

Kosten: Personalkosten DM 170.000,--
Sachkosten DM 40.000,--

4. Meilenstein

Inhalt: Abschluß Aufbau Prototypen 2 und 3; Beginn des Versuchs Prototyp 1 an Turbine

Tätigkeiten zur Erreichung von Meilenstein 4:

Arbeiten an Generator 2 und 3:

- Komponentenaufbauten
- Gesamtmontage der Hochfrequenzgeneratoren

Arbeiten an Generator Prototyp 1 mit Turbine:

- Gesamtmontage Prototyp 1 mit Turbine
- Vorbereitung zur Prüfstandsintegration Univ. Hannover

Kosten: Personalkosten DM 133.000,--
Sachkosten DM 15.000,--

5. Meilenstein

Inhalt: Abschluß Inbetriebnahme Prototyp 2 und 3; Beginn der Erprobung Prototyp 1 an Turbine und System (Bordnetz)

6. Meilenstein

Inhalt: Abschluß Erprobung Prototyp 1, 2, 3 an Turbine und System (Bordnetz)

Tätigkeiten zur Erreichung von Meilenstein 5 und 6:

Arbeiten an Generator Prototypen 1,2 und 3:

- Tests und Messungen von Hochfrequenzgenerator Prototyp 1 an Turbine über passive Last und über Bordnetzbelastung
- Auswertung / Datendokumentation Prototyp 1
- Inbetriebnahme Prototyp 2 und 3 am Inbetriebnahmeprüfstand
- Tests und Auswertungen Prototypen 2 und 3

Weitere Arbeiten mit Univ. Hannover:

- Mitarbeit bei Einrüstung Hochfrequenzgenerator in Turbinenprüfstand der Univ. Hannover

- Mitarbeit bei Prüfstandsmessungen der Univ. Hannover
- Mitarbeit bei Integrationsarbeiten Hochfrequenzgenerator mit Turbine in Versuchsfahrzeug
- Mithilfe bei elektrischer Abstimmung des Bordnetzsystems
- Mitarbeit bei Versuchen

Kosten: Personalkosten DM 197.000,--

14.2. Institut für Strömungsmaschinen

Die angegebenen Kosten beziehen sich auf beantragte Fördermittel

1. Meilenstein

- Abschluß des Aufbaues des Brennkammerprüfstandes im Institut für Strömungsmaschinen. Hierfür muß lediglich die Turbine nach deren Fertigstellung am Prüfstand montiert und angeschlossen werden. Alle dafür notwendigen Teile werden mit Mitteln der ersten Phase beschafft.
- Abschluß der ersten experimentellen Untersuchungen am Brennkammerprüfstand, Auswertung und Darstellung der Meßergebnisse, Erarbeiten erster Optimierungsmaßnahmen für Dampferzeuger und Turbine

Personalkosten	3 · DM 8.300,-- (d)	DM	24.900,--
	3 · DM 7.100,-- (e)	DM	21.300,--
	3 · DM 1.600,-- (f)	DM	4.800,--
Sachmittel	Verbrauchsmaterial wie Thermoelemente		
	Meßsonden, Kupplungen, etc.	DM	10.000,--
	Reise- und Transportkosten	DM	2.500,--

2. Meilenstein

- Abschluß der Aufbauarbeiten am Motorenprüfstand und zugehörigen Anpassungsarbeiten wie: Motorinstallation, Krümmerbau und -anpassung, Versorgungsleitungen für Öl, Kühlwasser, Kraftstoff u.ä., Inbetriebnahme
- Weiterführung der experimentellen Untersuchungen am Brennkammerprüfstand, Optimierung, Aufbau Meßdatenerfassungsanlage für dynamische Untersuchungen
- Umbau des Dampferzeugers für den Einsatz am Versuchsmotor und Optimierung

Personalkosten	6 · DM 8.300,-- (d)	DM	49.800,--
	6 · DM 7.100,-- (e)	DM	42.600,--
	6 · DM 1.600,-- (f)	DM	9.600,--
Sachmittel	Meßdatenerfassungsanlage	DM	65.000,--
	Software	DM	6.000,--
	Aufbau Motorenprüfstand (g) (Überprüfung der Bremsenregelung, Steuerung "Zyklus"-fähigkeit, Stellmotoren)	DM	10.000,--
	Aufbau Motorenprüfstand (h)	DM	25.000,--
	Meßtechnik für Motor	DM	10.000,--
	Umbau Dampferzeuger	DM	10.000,--
	Vorbereitung Anschluß HF-Generator (j)	DM	10.000,--
Reise- und Transportkosten	DM	5.000,--	

3. Meilenstein

- Experimentelle Untersuchungen am Motorenprüfstand, Messung, Auswertung, Darstellung für dynamische und stationäre Betriebspunkte

Personalkosten	4 · DM 8.300,-- (d)	DM	33.200,--
	4 · DM 7.100,-- (e)	DM	28.400,--
	4 · DM 1.600,-- (f)	DM	6.400,--
Sachmittel	Verbrauchsmaterial wie Thermoelemente		
	Meßsonden, Kupplungen, etc.	DM	10.000,--
	Reise- und Transportkosten	DM	2.500,--

4. Meilenstein

- Optimierung des ACS aufgrund der Untersuchungen am Motorenprüfstand und Fortsetzung der Untersuchungen mit optimierten Bauteilen
- Ankauf Versuchsfahrzeug
- Ankauf Speisepumpe, Kondensator, Steuerung Speisepumpe
- Umbau Versuchsfahrzeug, Installation der Meßtechnik
- Ankauf mobile Meßdatenerfassungseinheit
- Anpassung des ACS an Versuche im Fahrzeug
- Adaption des HF-Generators an das ACS

Personalkosten	7 · DM 8.300,-- (d)	DM	58.100,--
	7 · DM 7.100,-- (e)	DM	49.700,--
	7 · DM 1.600,-- (f)	DM	11.200,--
Sachmittel	Ankauf Versuchsfahrzeug	DM	50.000,--
	Ankauf Speisepumpe, Kondensator, Anschlußmaterial, Anpassung an Motor	DM	10.000,--
	Umbau Versuchsfahrzeug	DM	15.000,--
	Meßtechnik Versuchsfahrzeug	DM	9.000,--
	mobile Meßdatenerfassung Fahrzeug	DM	15.000,--
	Anpassung des ACS für Fahrzeugversuche	DM	10.000,--
	Adaption HF-Generator an das ACS im Fahrzeug	DM	10.000,--
	Bau Dampferzeuger für Versuchsfahrzeug einschl. evtl. Regelung (Speisepumpe)	DM	50.000,--
	Reise- und Transportkosten	DM	6.000,--

5. Meilenstein

- Inbetriebnahme Versuchsfahrzeug
- Messungen mit Versuchsfahrzeug im Straßenbetrieb
Aufzeichnung der Lastdaten und der Generatorleistung
- Messungen mit Versuchsfahrzeug im Testbetrieb (Teststrecke, z.B. Contidrom, Volkswagen Versuchsgelände)
- Messung, Auswertung
- Verfassen eines Abschlußberichtes

Personalkosten	4 · DM 8.300,-- (d)	DM	33.200,--
	4 · DM 7.100,-- (e)	DM	28.400,--
	4 · DM 1.600,-- (f)	DM	6.400,--
Sachmittel	Verbrauchsmaterial wie Thermoelemente		
	Meßsonden, Kupplungen, etc.	DM	10.000,--
	Reise- und Transportkosten	DM	4.000,--

14.3. Firma zur Herstellung von Prototypen (Ersatz für Fa. Lütgemeier)

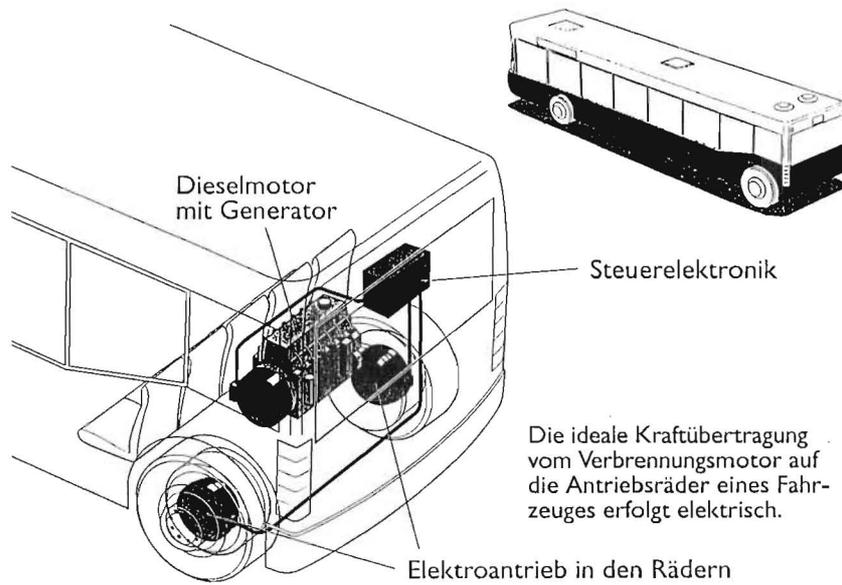
Der Meilensteinplan der Fa. fügt sich, bedingt durch die Kooperation mit dem IfS und den sich aus dem Fortgang der Arbeiten am IfS notwendig werdenden Arbeiten in den Meilensteinplan des IfS ein (s.a "Kosten der 2. Projektphase"). Einzelkosten können erst entsprechend dem Verlauf des Projektes und den sich daraus ergebenden notwendigen Arbeitsschritten detailliert angegeben werden.

15. Literatur

- /1/ Antrag auf Förderung für ein "Abwärme-Compound System" zur Umwandlung von Abwärme in elektrische Energie, Antrag an die Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Feb. 1992
- /2/ Doyle, DiNanno, Kramer, "Installation of a Diesel-Organic Rankine Compound Engine in a Class 8 Truck for a Single-Vehicle Test", SAE Technical Paper Series, No. 790646 (Anlage)
- /3/ Gwinner, "Konzipierung eines Verbundantriebes zur Absenkung des Kraftstoffverbrauches bei Nutzfahrzeugen", Automobil-Industrie 3/84, pp. 361-369, 1984 (Anlage)
- /4/ Frister, "Antriebe zur Reduzierung des Drehzahlbereiches von Nebenaggregaten", Tagung Nr. T-30-230-056-8 "Nebenaggregate im Fahrzeug", Haus der Technik, Essen, 1988 (Anlage)
- /5/ Gorille, "Generatoren für KfZ-Anwendungen", Lehrgang Nr. 13260 / 64.071 "Reibungsoptimierung bei Verbrennungskraftmaschinen", Technische Akademie Esslingen, 1990 (Anlage)
- /6/ Zucrow, Hoffman, "Gas Dynamics", Vol. I und II, Wiley & Sons, New York, 1976
- /7/ Malobabic, Shao, Burhorn Rautenberg, "Performance Analysis of a Small Partial Admitted High Speed Steam Turbine", Proceeding of the 23rd Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, IECEC, Denver 1988 (Anlage)
- /8/ Shao, Burhorn, Malobabic, Rautenberg, "An Advanced Rotor Design for a Partial Admitted Pelton Steam Turbine under Aspect of Waste Heat Recovery, 3rd International Congress of Fluid Mechanics, Kairo, 1990 (Anlage)

16. Bildanhang

Elektrische Kraftübertragung für Nahverkehrsbusse
 • energiesparend • umweltschonend • komfortabel •



- Wegfall komplizierter Antriebsmechanik
- Perfekt stufenloser Antrieb
- Wesentliche Energieeinsparung
- Drastisch weniger Abgasstoffe
- Basis für alle Hybridkonzepte

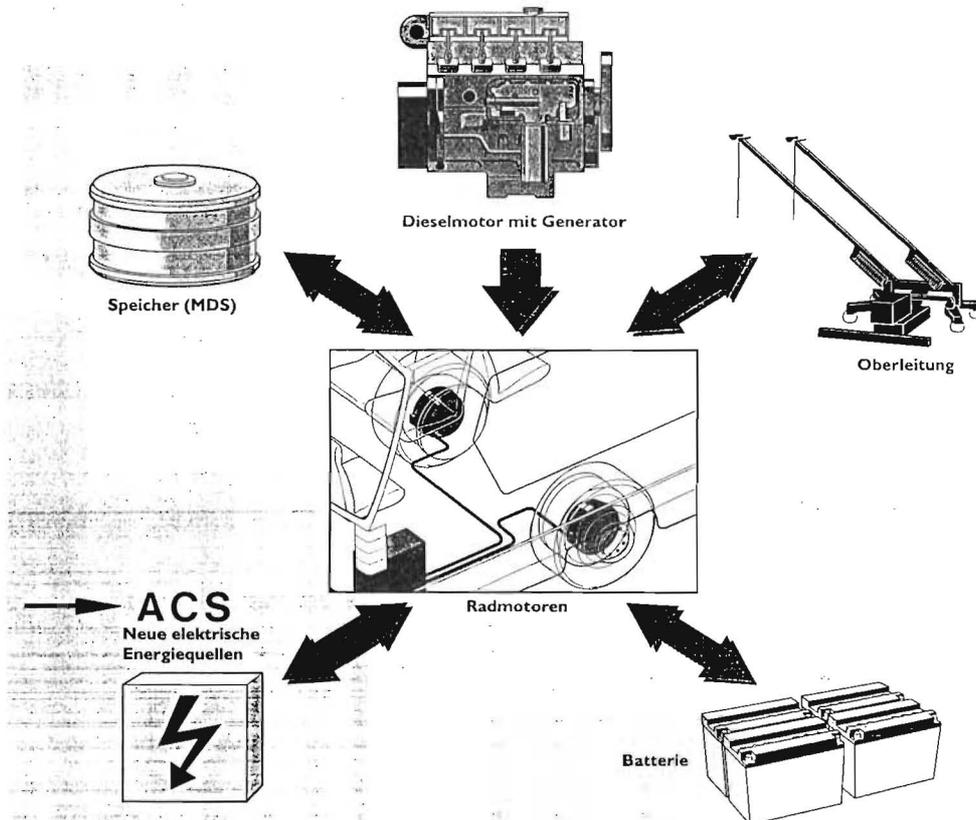


Bild 1: Antriebskonzept Verbrennungsmotor / Generator mit Radnabenantrieb

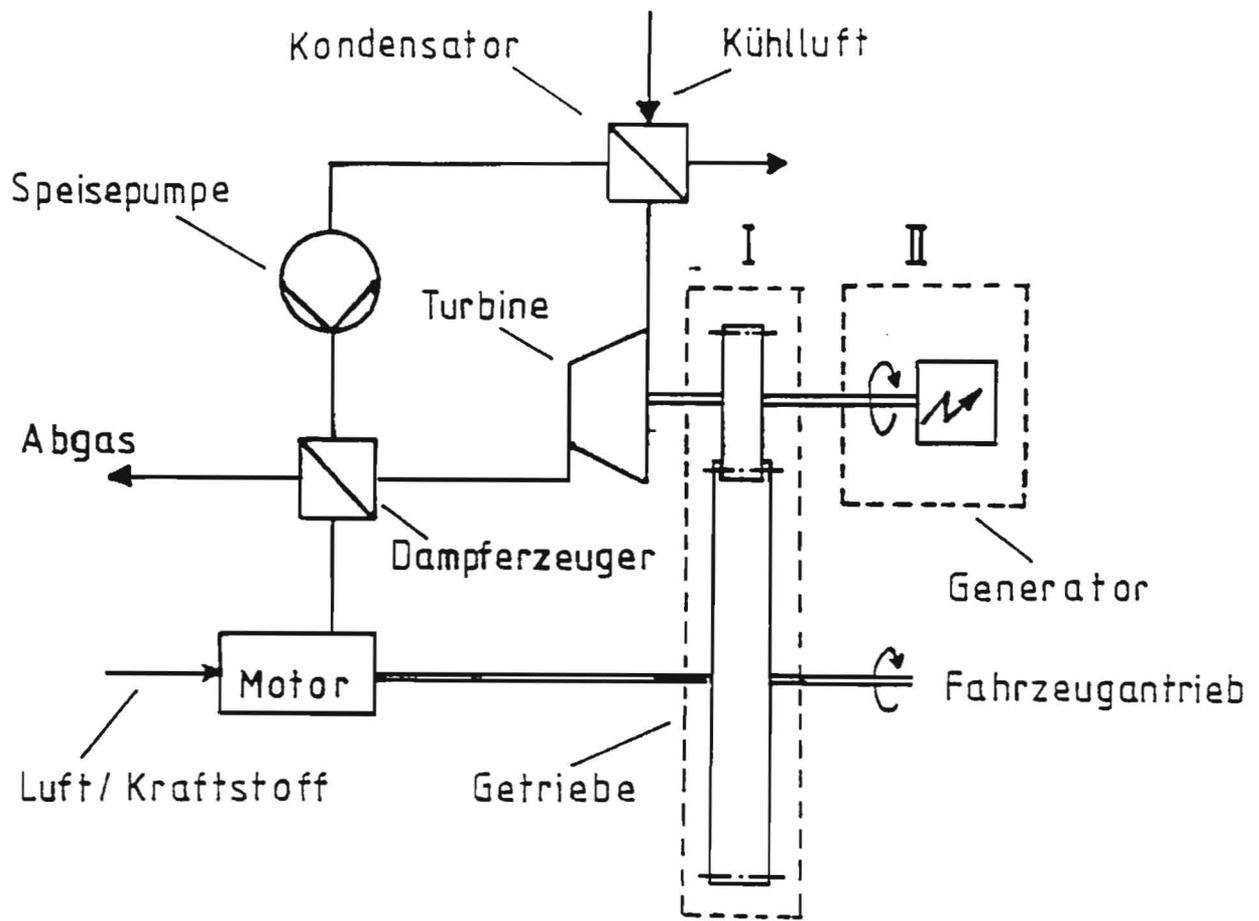


Bild 2: Schematische Darstellung der Ankopplung ACS-Verbrennungsmotor /1/

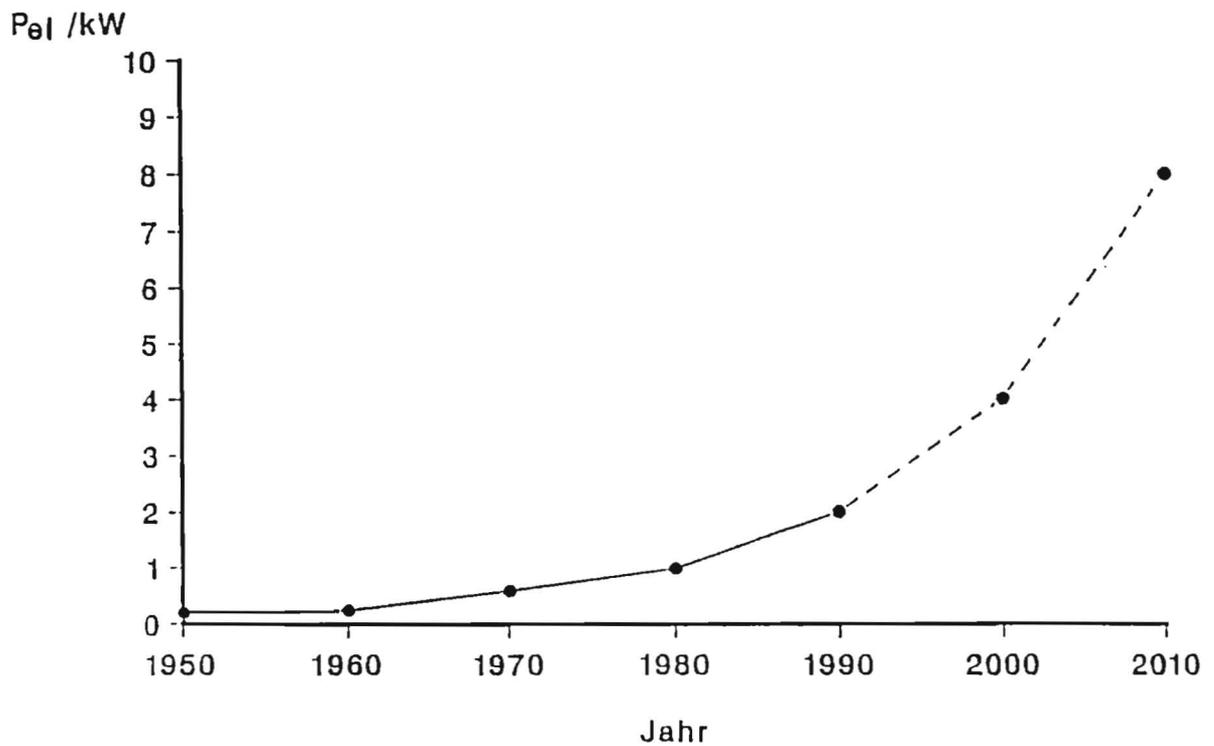


Bild 3: Elektrischer Leistungsbedarf in PKW /5/



Bild 4: Biegeform der installierten Dampferzeugermodule

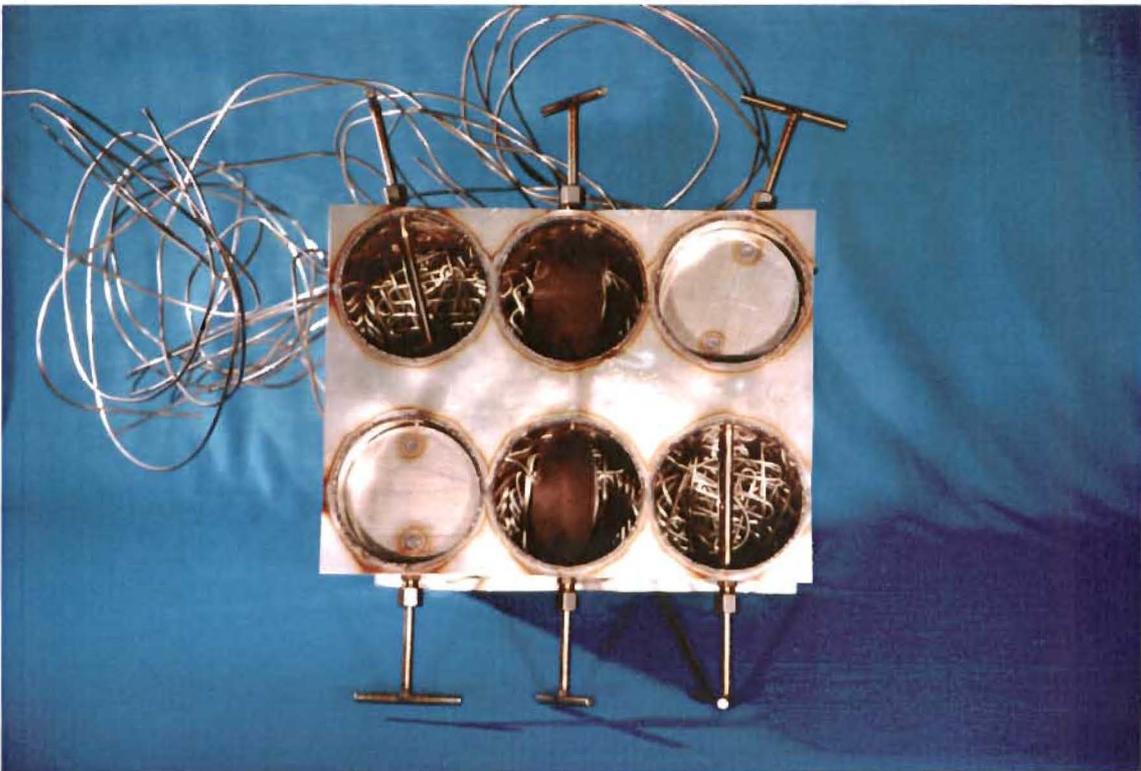


Bild 5: Dampferzeuger mit Abgashüllrohren und Regelklappen

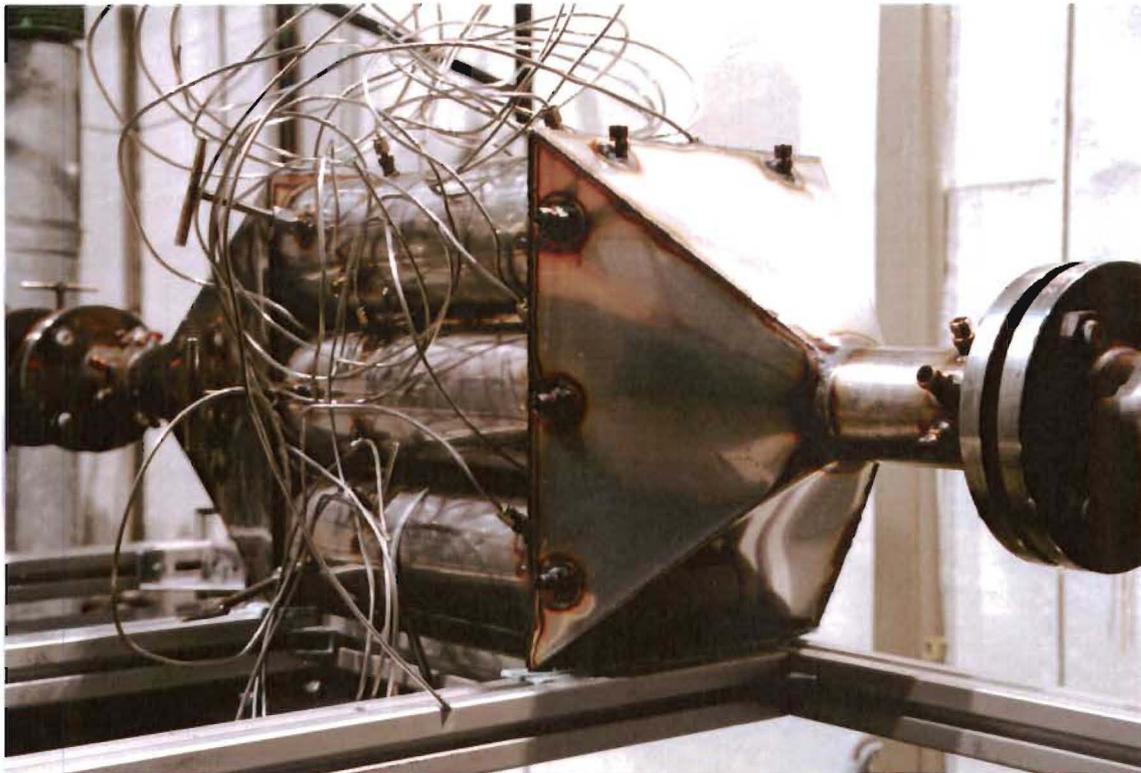


Bild 6: Dampferzeuger montiert auf Prüfstandstisch

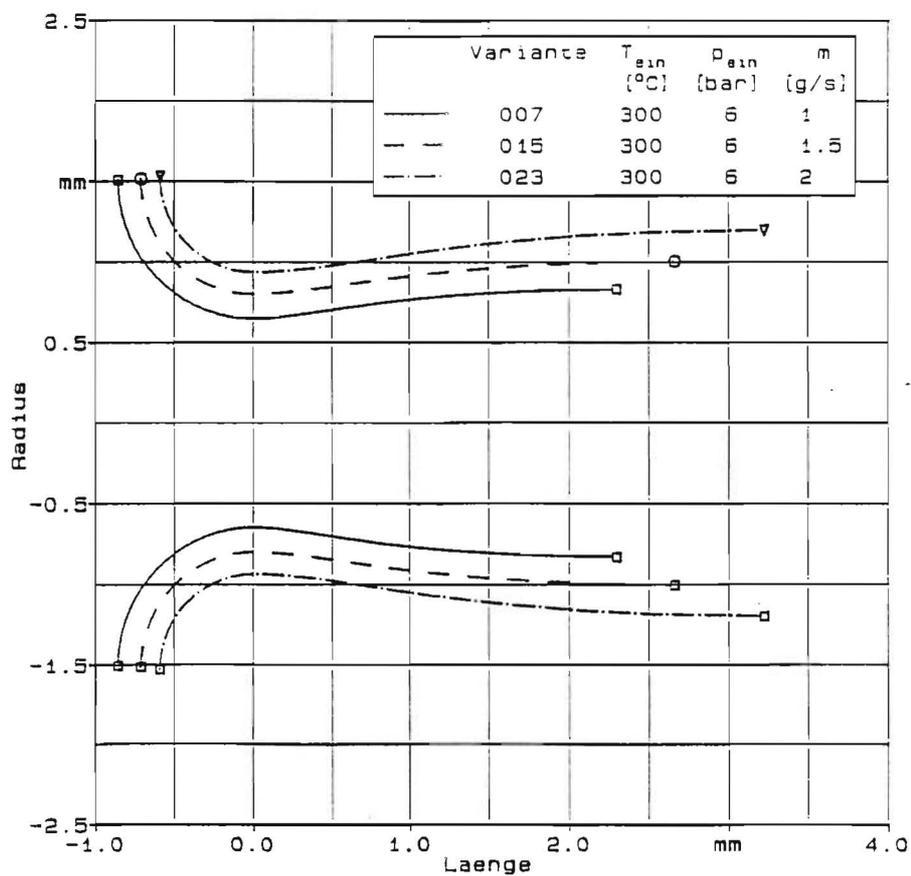
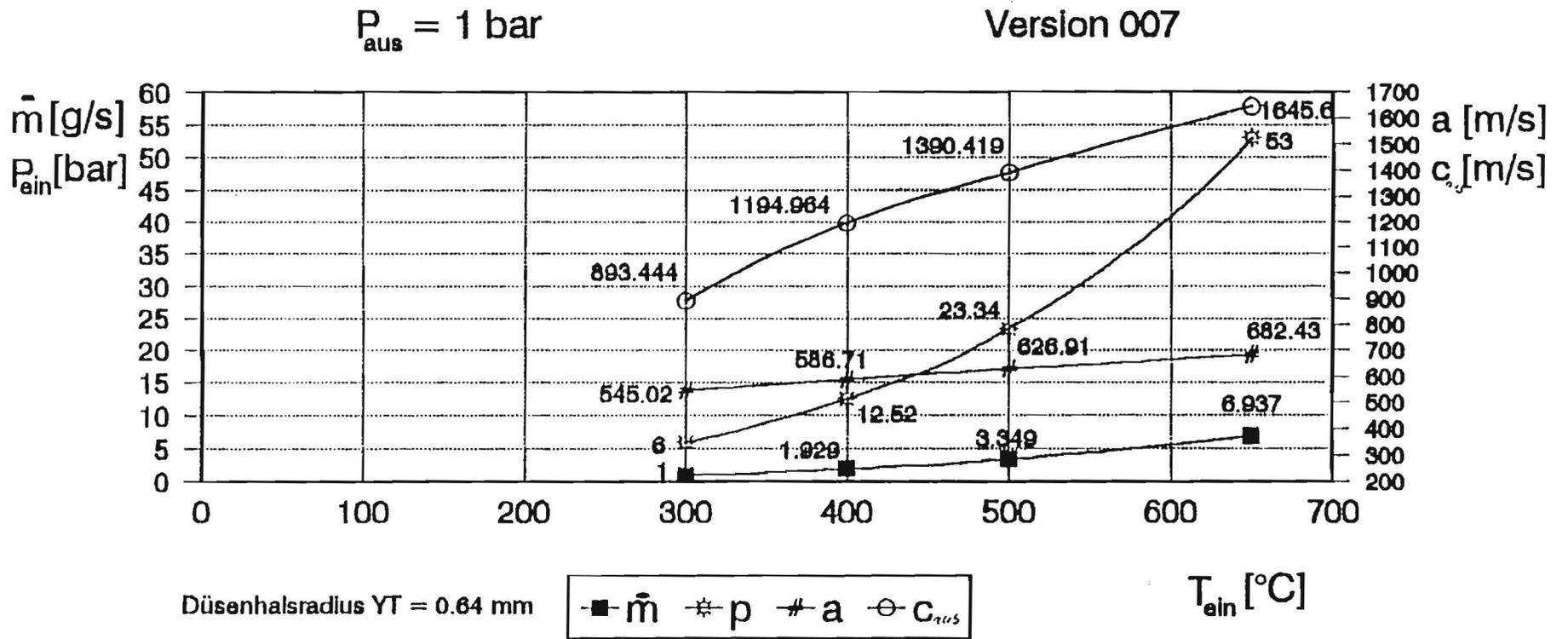


Bild 7: Berechnete Düsenkontur für 3 verschiedene Massenströme

Bild 8: Berechneter Anstieg des Massenstromes durch Lavaldüse bei veränderlichem Eintrittszustand am Beispiel der Variante 7



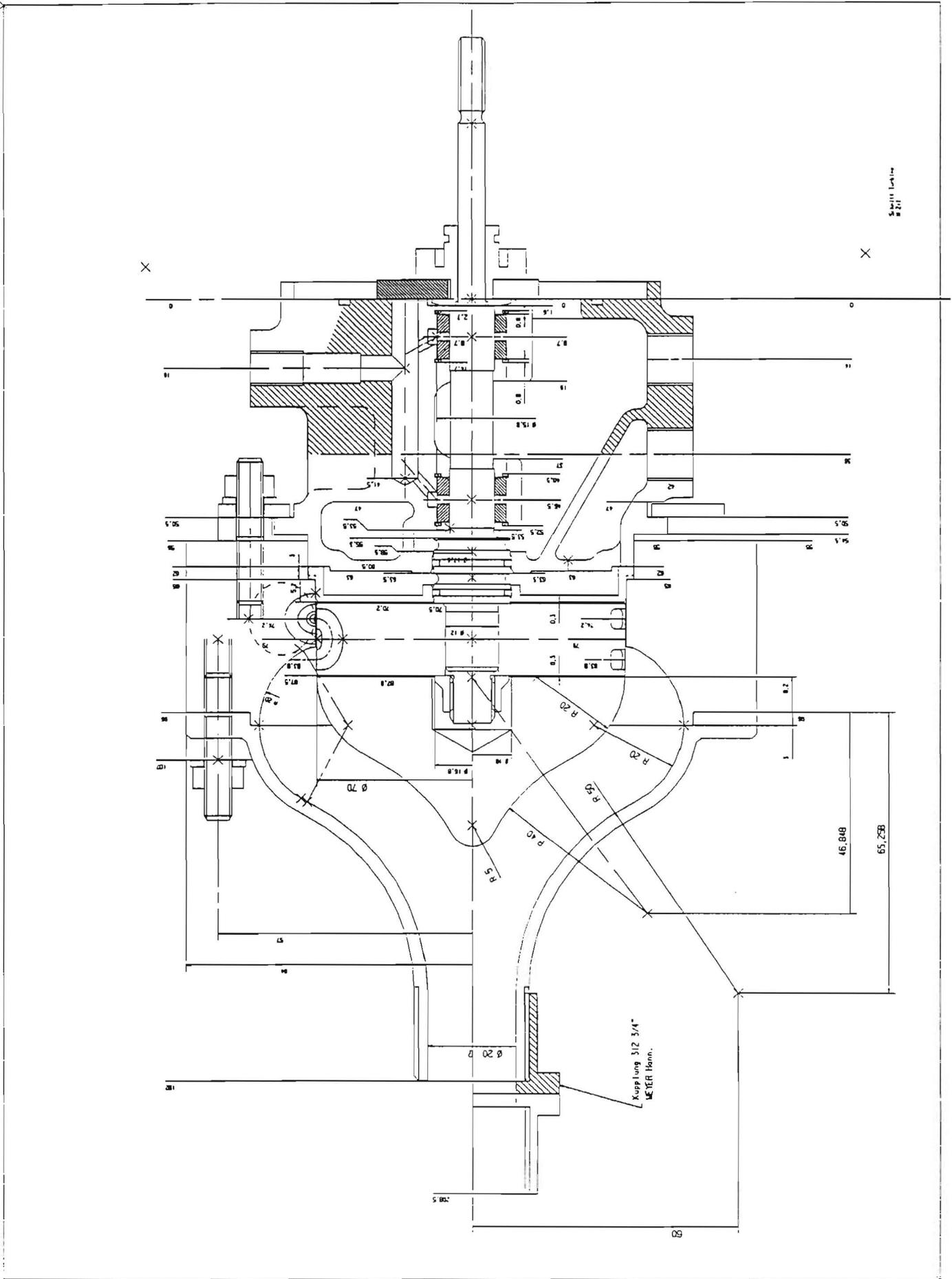


Bild 9: Dampfturbine mit Turbinenlaufrad (Kanal)

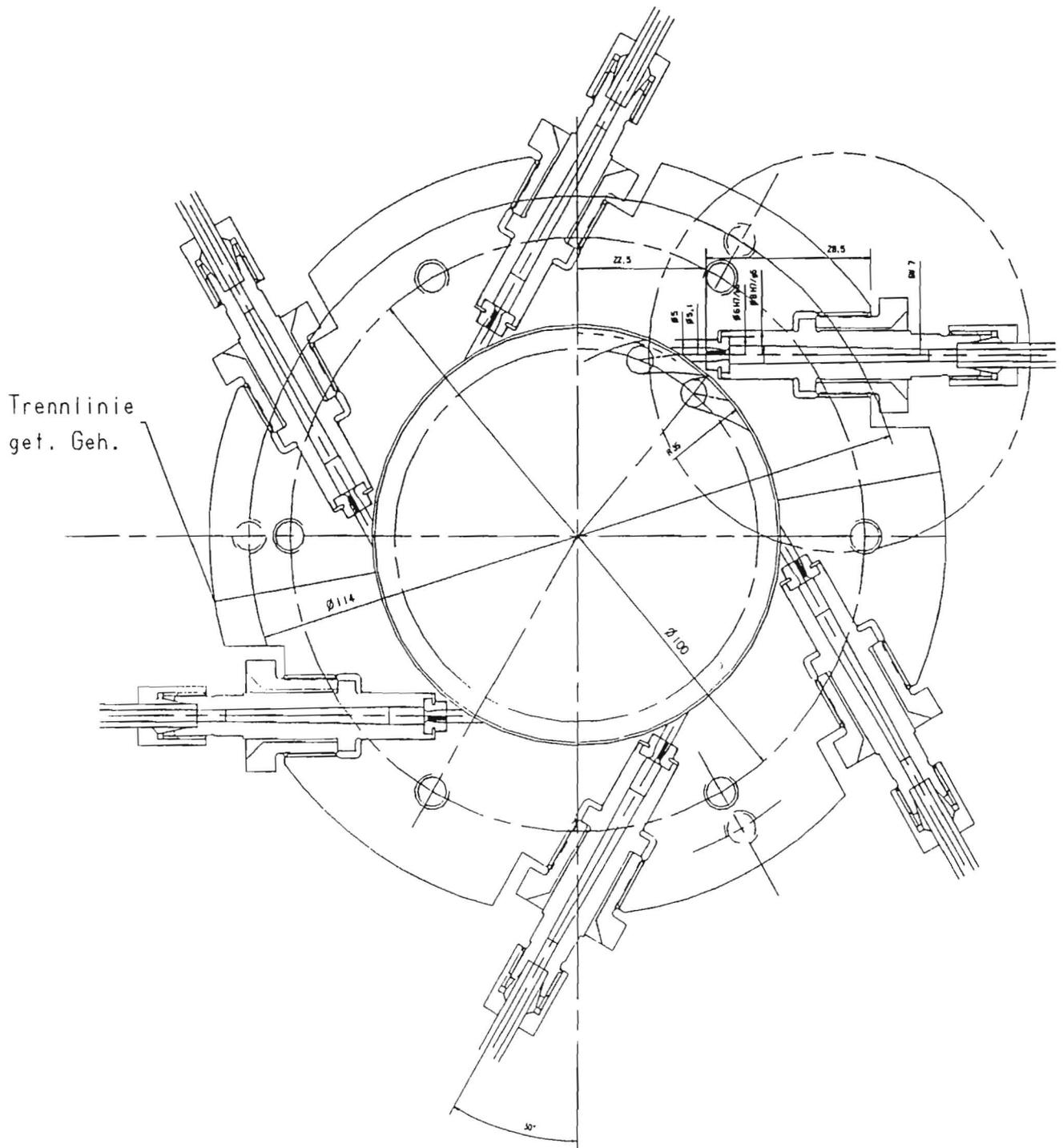


Bild 11: Düsenring in geteilter Ausführung



Bild 12: Kondensator (Wasser/Wasser)

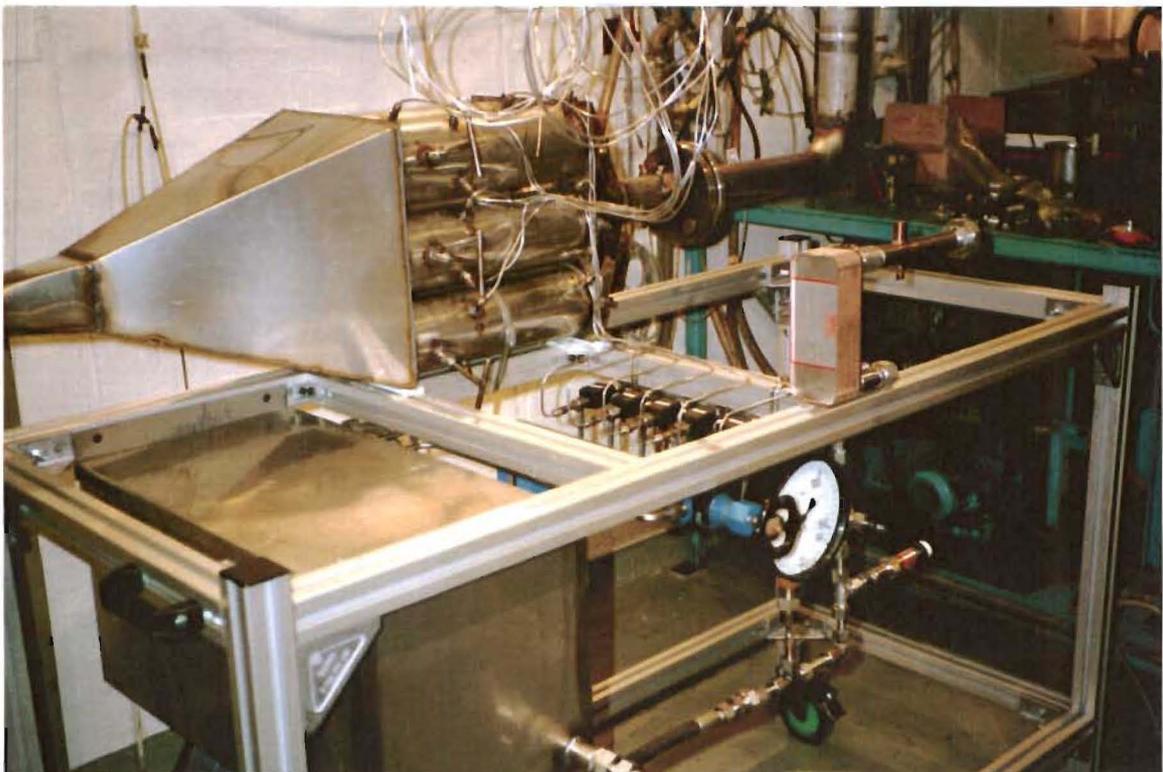
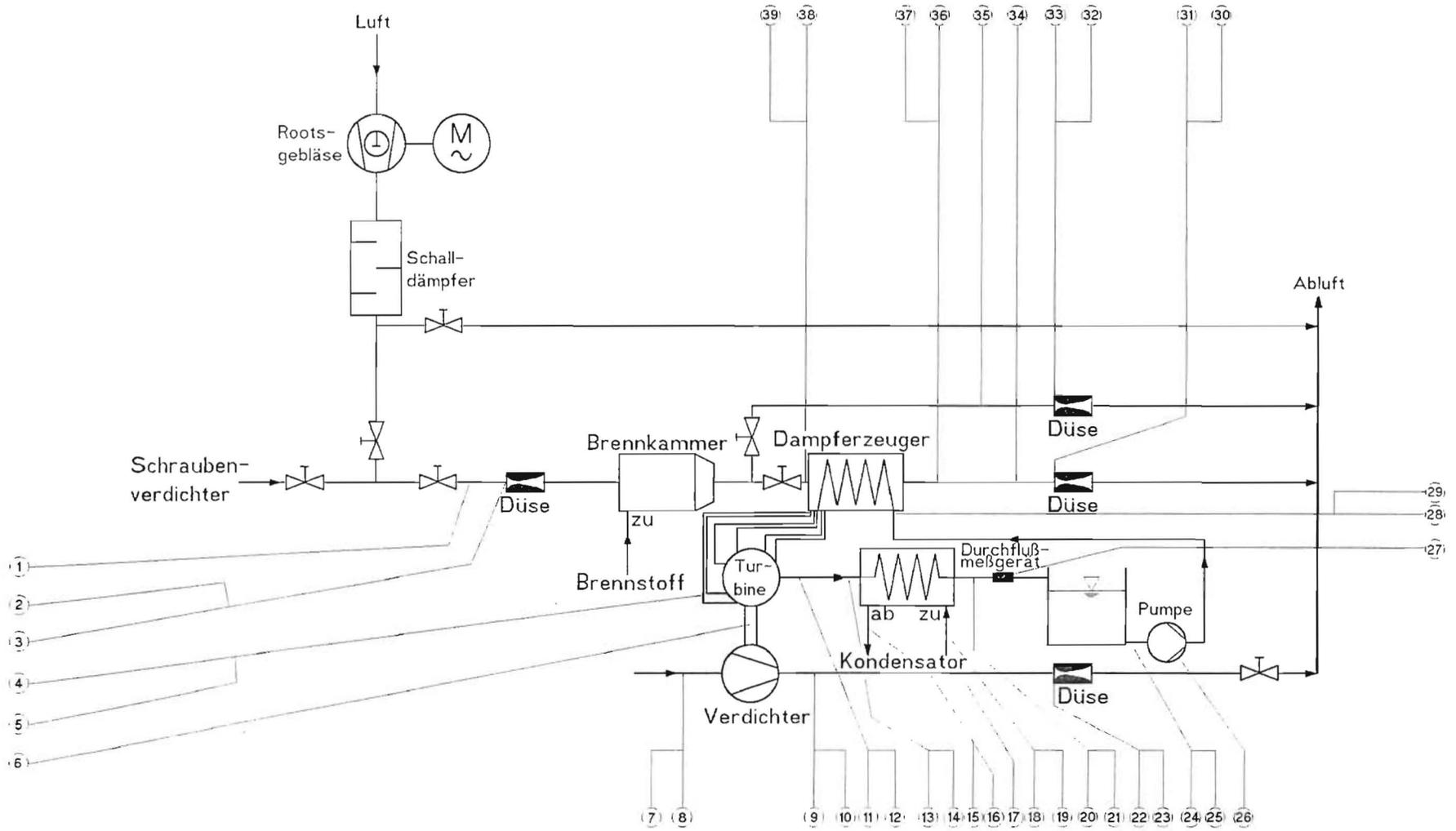


Bild 13: Prüfstandstisch mit installierten Einzelbauteilen

Bild 14: Schematische Darstellung des CRP mit Angabe der Meßstellen



Nr.	Art	Bem.	Ausg.	Sonstiges	Anz
1	T	Temp. vor Düse BK	mV	Luft	1
2	p	Druck vor Düse BK	V	Luft	1
3	Dp	Diff.druck Düse BK	V	Luft	1
4	T	Temp. vor Lavaldüse	mV	Heißdampf	2 (6)
5	p	Druck vor Lavaldüse	V	Heißdampf	2 (6)
6	n	Drehzahl Turbine	Imp.	1 Impuls pro Umdrehung	1
7	T	Temp. Verdichtereintritt	mV	Luft	1
8	p	Druck Verdichtereintritt	V	Luft	1
9	T	Temp. Verdichteraustritt	mV	Luft	1
10	p	Druck Verdichteraustritt	V	Luft	1
11	T	Temp. nach Turbine	mV	Heißdampf / Kondensat	1
12	p	Druck nach Turbine	V	Heißdampf / Kondensat	1
13					
14					
15	T	Temp. nach Kondens. Kühl.	mV	Wasser	1
16	p	Druck nach Kondens. Kühl.	V	Wasser	1
17	T	Temp. vor Düse Verdichter	mV	Luft	1
18	T	Temp. vor Kondens. Kühl.	mV	Wasser	1
19	p	Druck vor Kondens. Kühl.	V	Wasser	1
20	T	Temp. nach Kondensator	mV	Wasser	1
21	p	Druck nach Kondensator	V	Wasser	1
22	p	Druck vor Düse Verdichter	V	Luft	1
23	Dp	Diff.druck Düse Verdichter	V	Luft	1
24	T	Temp. vor Speisepumpe	mV	Wasser	1
25					
26	n	Drehzahl Speisepumpe	Imp.	1 Impuls pro Umdrehung	1
27	m	Massen-/Volumenstrom	mA	Wasser 20mS	1
28	T	Temp. vor DE Fluid	mV	Wasser	1
29	p	Druck vor DE Fluid	V	Wasser	1
30	p	Druck vor Düse DE	V	Luft	1
31	Dp	Diff.druck Düse DE	V	Luft	1
32	p	Druck vor Düse BY	V	Luft	1
33	Dp	Diff.druck Düse BY	V	Luft	1
34	T	Temp. vor Düse DE	mV	Luft	1
35	T	Temp. vor Düse DE	mV	Luft	1
36	T	Temp. nach DE	mV	Luft	1
37	p	Druck nach DE	V	Luft	1
38	T	Temp. vor DE	mV	Luft	1
39	p	Druck vor DE	V	Luft	1

Bild 15: Übersicht der installierten Meßstellen am CRP

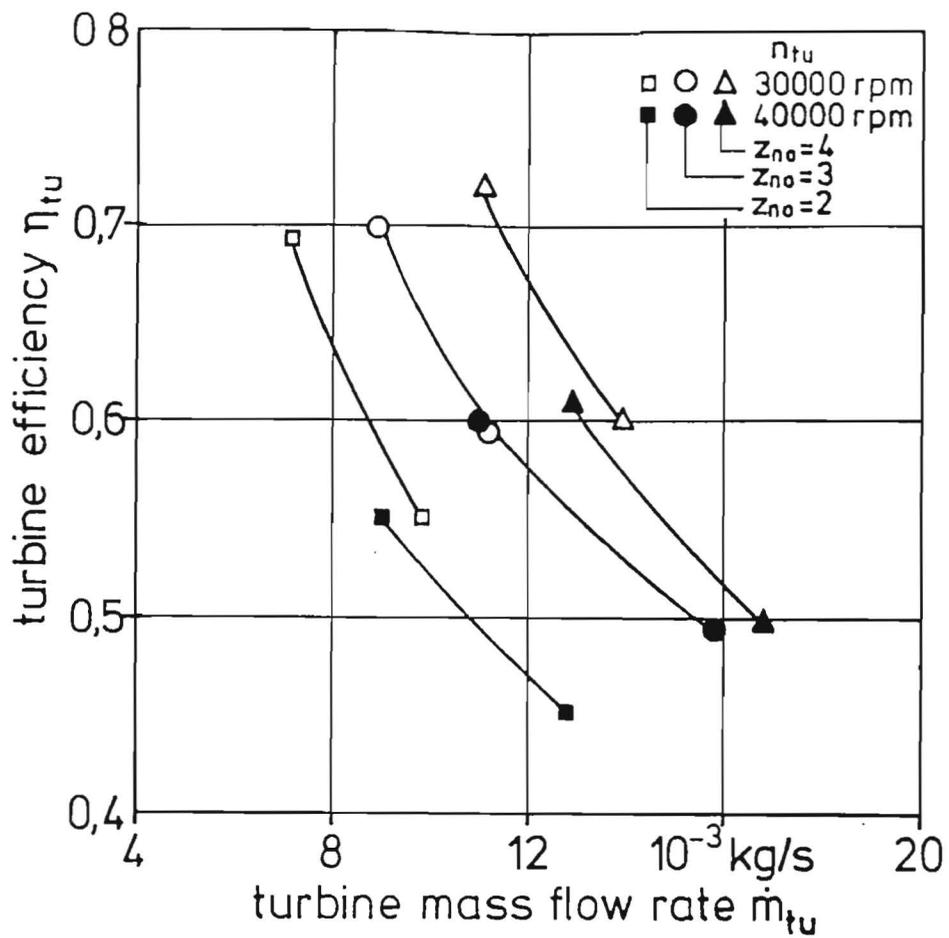


Bild 16: Wirkungsgrad der Dampfturbine (Rotor 3), Variation der Düsenanzahl

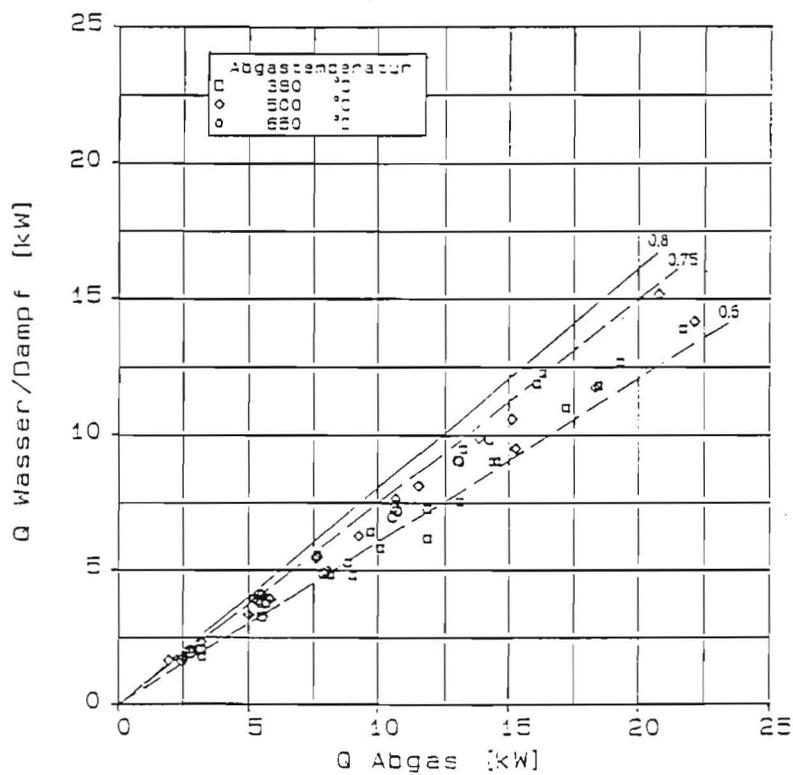


Bild 17: Übertragener Wärmestrom am Dampferzeugerprototyp (1 Modul) / 1/

Bild 18: Berechneter Kraftstoffverbrauch am Beispiel eines 1.8-Liter Motors mit und ohne ACS

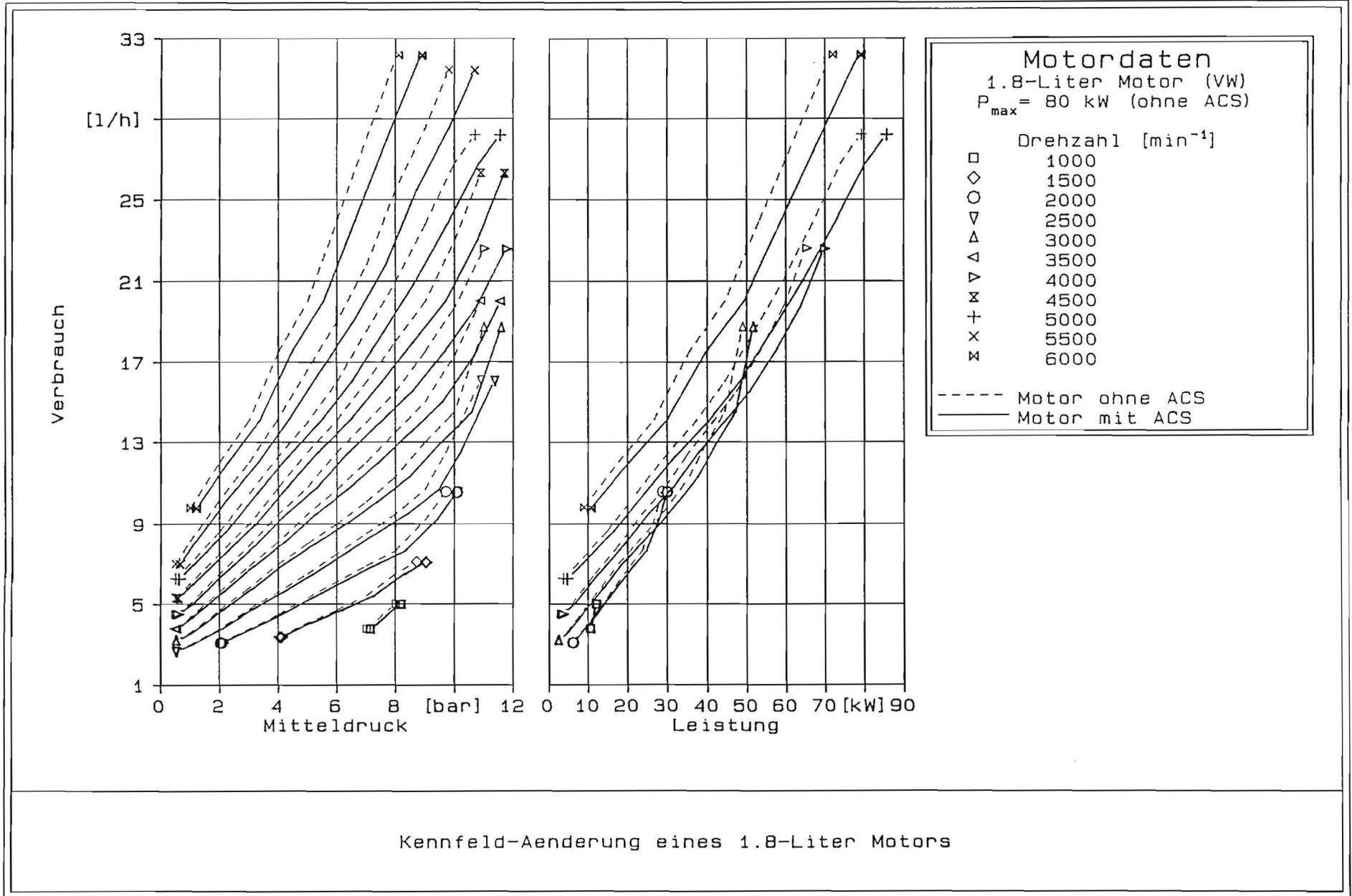


Bild 19: Berechneter Kraftstoffverbrauch im ECE-Zyklus (Stadt)
am Beispiel eines 1,8-Liter Motors

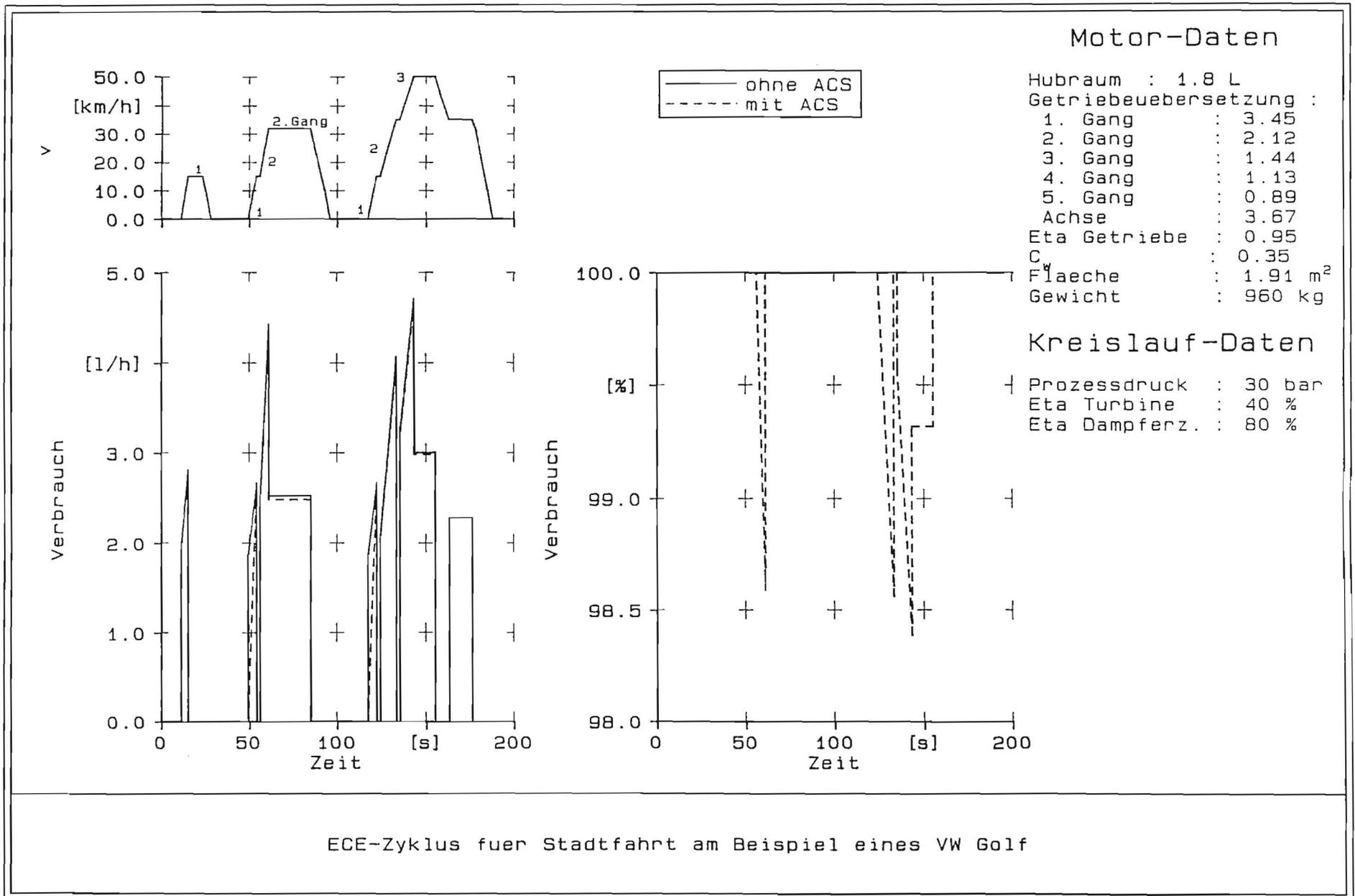
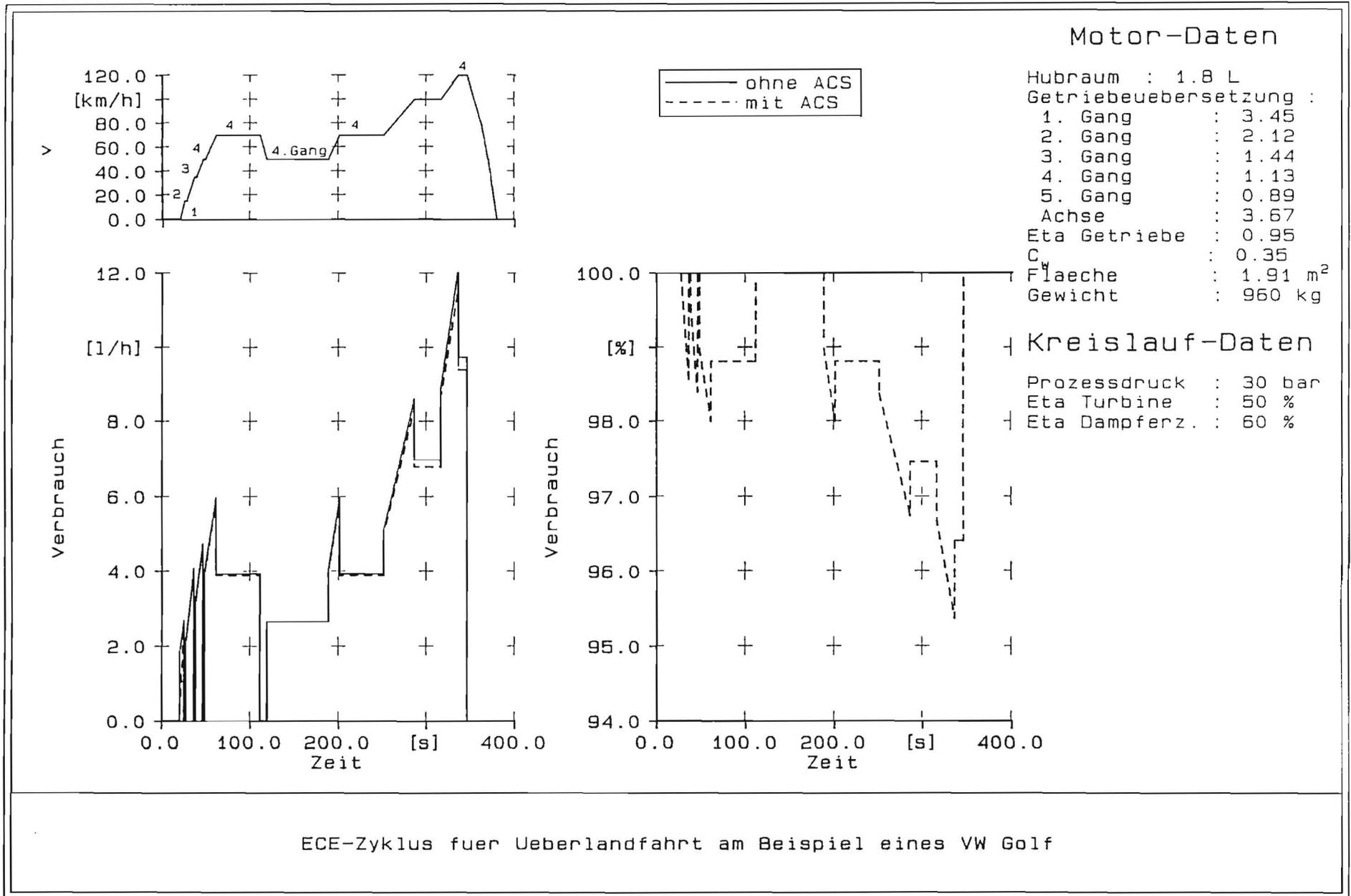


Bild 20: Berechneter Kraftstoffverbrauch im ECE-Zyklus (Überland)
am Beispiel eines 1,8-Liter Motors



Abgaseintrittstemperatur: 503 °C

Wassereintrittsdruck: 25.6 bar

Abgasmassenstrom: 0.019 kg/s

Wassermassenstrom: 1.3 g/s

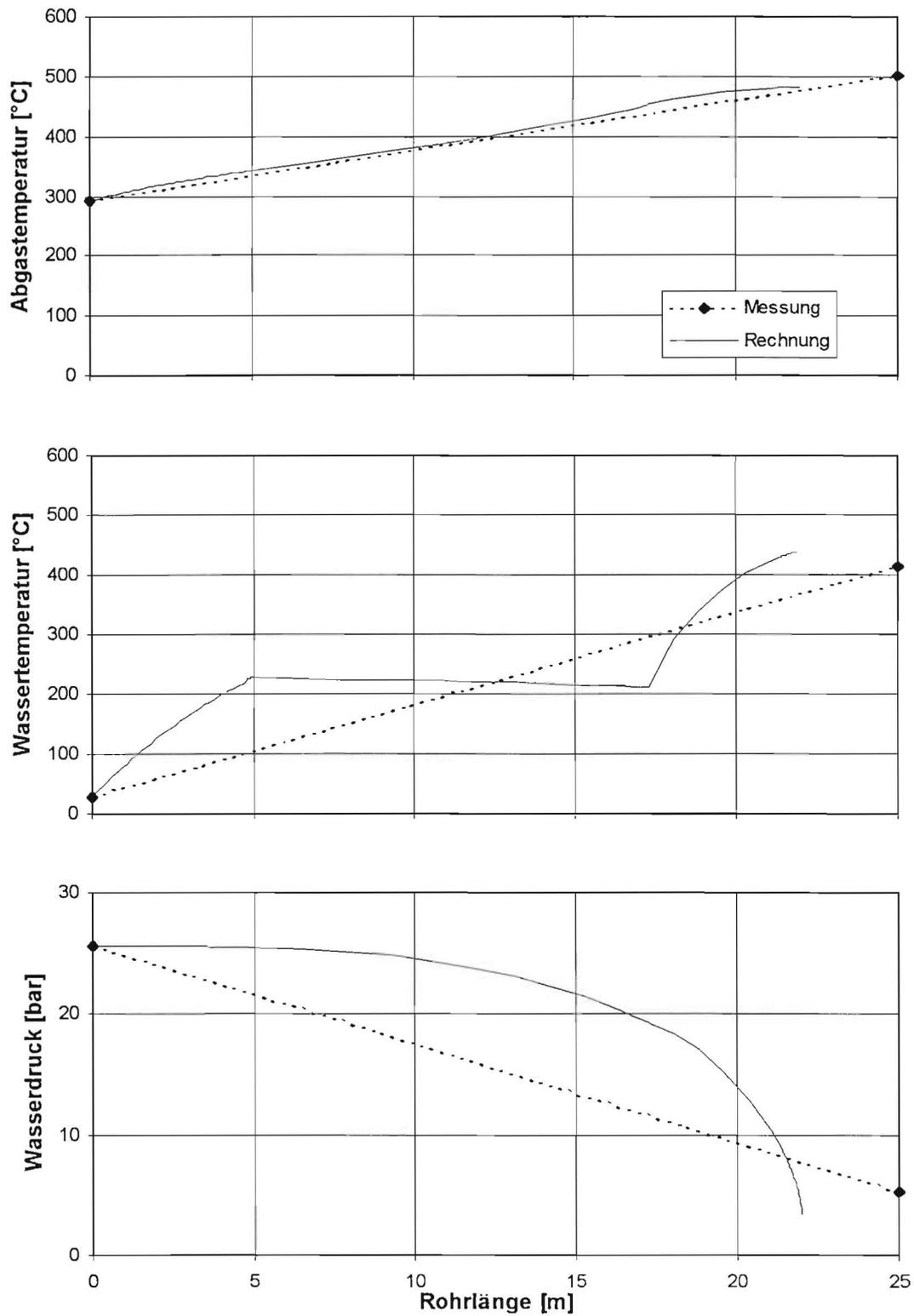


Bild 21: Betriebspunkt Dampferzeuger - Vergleich Messung und Berechnung

Abgaseintrittstemperatur: 614 °C

Wassereintrittsdruck: 40.58 bar

Abgasmassenstrom: 0.0167 kg/s

Wassermassenstrom: 1.378 g/s

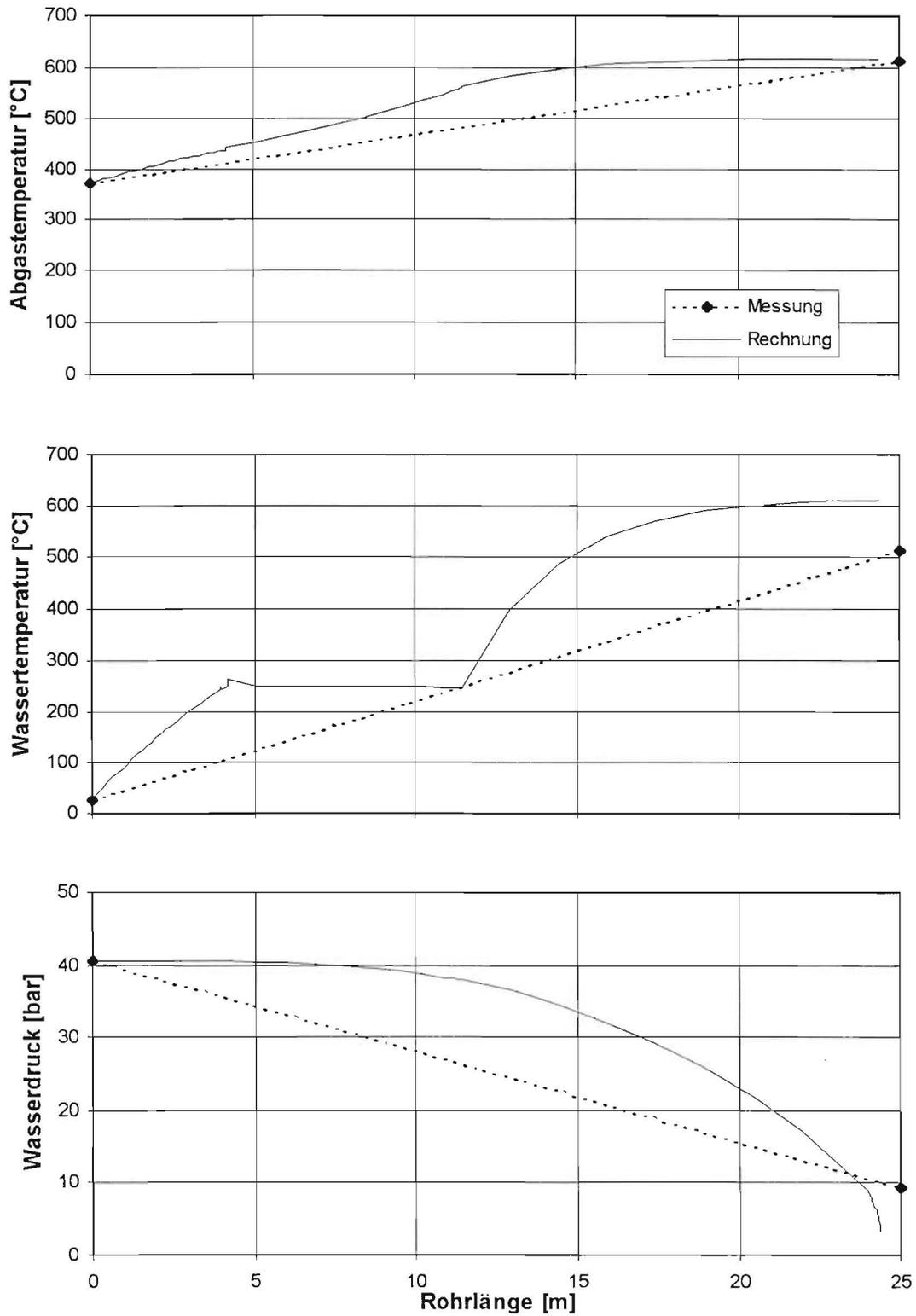


Bild 22: Betriebspunkt Dampferzeuger - Vergleich Messung und Berechnung

Abgaseintrittstemperatur: 745 °C
Abgasmassenstrom: 0.033 kg/s

Wassereintrittsdruck: 72.11 bar
Wassermassenstrom: 2.115 g/s

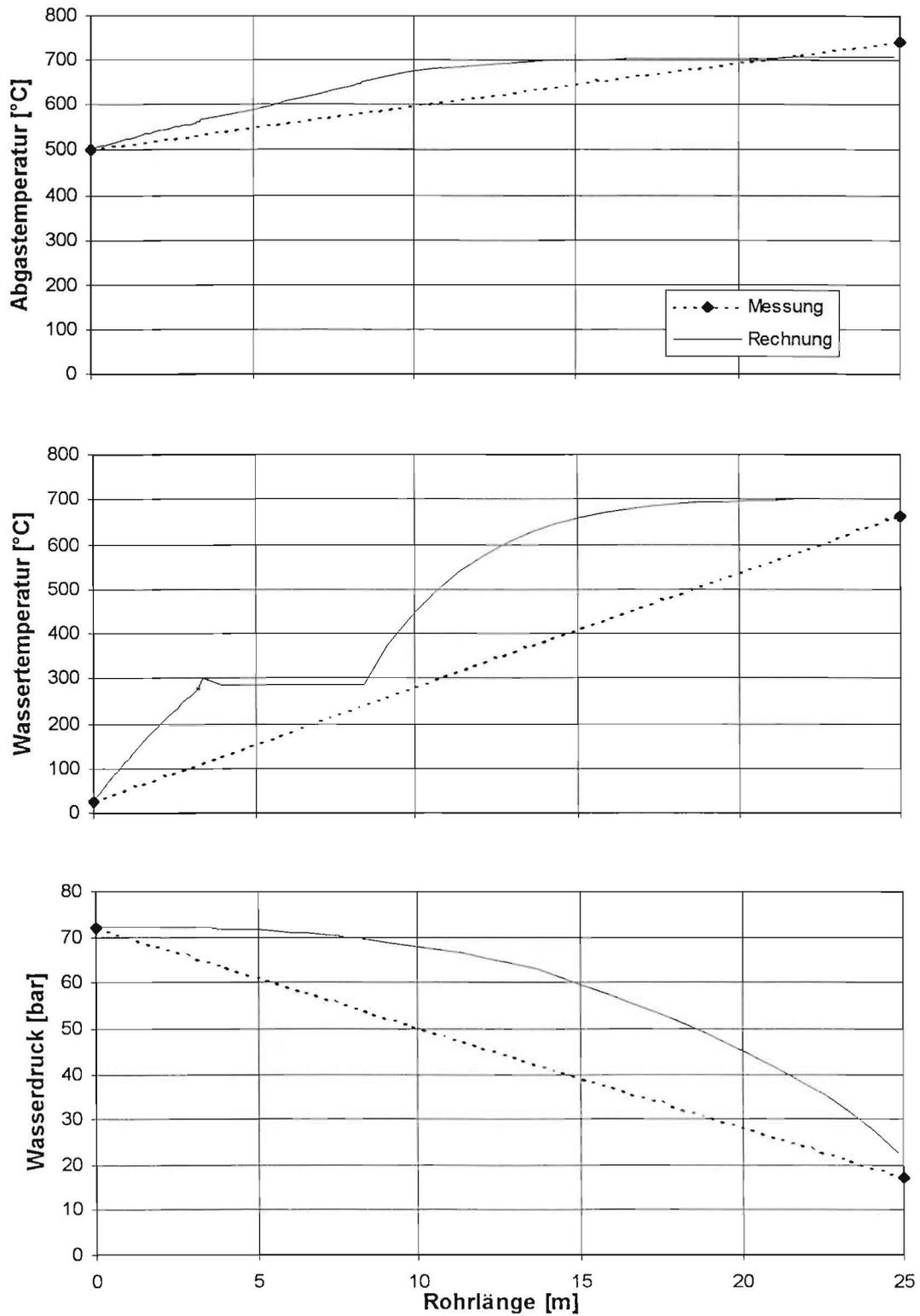


Bild 23: Betriebspunkt Dampferzeuger - Vergleich Messung und Berechnung

Übertragener Wärmestrom am Dampferzeuger

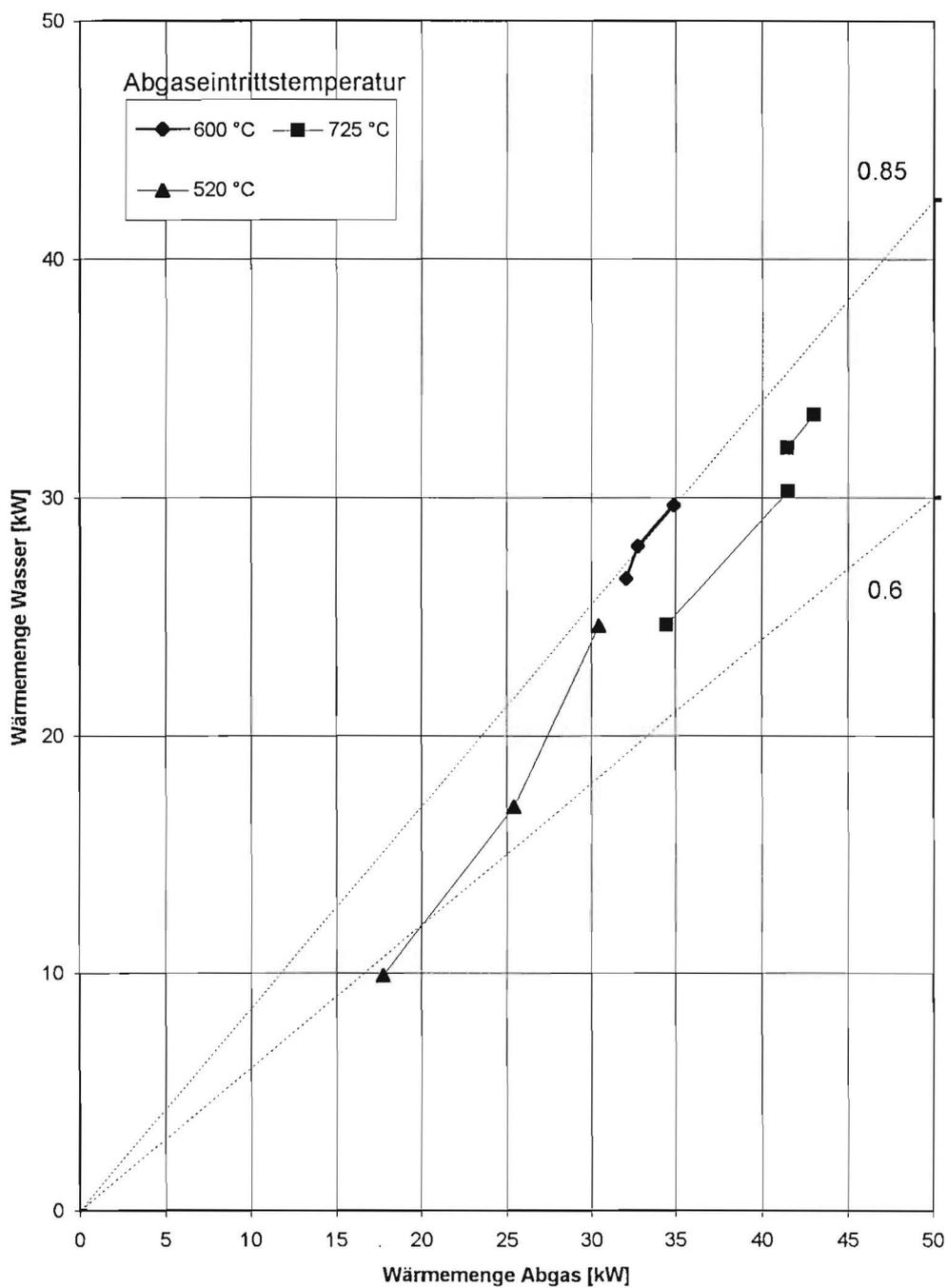


Bild 24: Übertragener Wärmestrom im Dampferzeuger