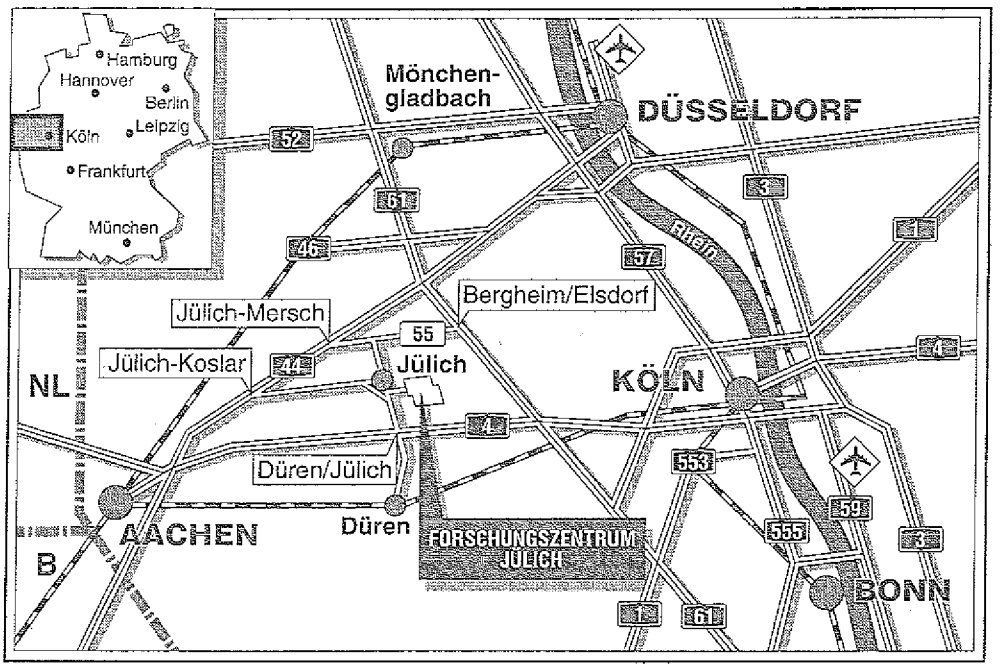
FORSCHUNGSZENTRUM JÜLICH GmbH KFA

Institut für Energieverfahrenstechnik

Modellrechnungen zu Systemvarianten von 200 kW-SOFC-Anlagen

E. Riensche H. Fedders



Berichte des Forschungszentrums Jülich ; 2787
ISSN 0944-2952
Institut für Energieverfahrenstechnik Jül-2787

Zu beziehen durch: Forschungszentrum Jülich GmbH · Zentralbibliothek
D-52425 Jülich · Bundesrepublik Deutschland
Telefon: 02461/61-6102 · Telefax: 02461/61-6103 · Telex: 833556-70 kfa d

Modellrechnungen zu Systemvarianten von 200 kW-SOFC-Anlagen

E. Riensche H. Fedders

Dieser Bericht entstand im Rahmen der Zusammenarbeit zwischen
Forschungszentrum Jülich GmbH und Siemens-KWU

Forschungszentrum
Jülich GmbH
IEV

Jül-2787

Juni 1993

Modellrechnungen zu Systemvarianten von 200-kW-SOFC-Anlagen

von

E. Riensche
H. Fedders

Kurzfassung

In diesem Bericht werden Möglichkeiten der Optimierung eines SOFC-Blockheizkraftwerkes aufgezeigt. Die Verfahrensanalysen zeigen, daß zur Abfuhr der elektrochemischen Verlustwärme bei einigen Verfahrensvarianten ein sehr großer Luftstrom erforderlich ist. Der Rekuperativ-Luftvorwärmer kann eine kostendominierende Komponente sein. Durch Verringerung der elektrochemischen Verlustwärme und Erhöhung der treibenden Temperaturdifferenzen im Wärmetauscher infolge günstiger Anordnung der Nachverbrennung werden Größe und damit die Kosten des Luftvorwärmers gesenkt. Zur Ermittlung von Anlagenwirkungsgraden wird der periphere Aufwand ermittelt. Für einen typischen Auslegungsfall mit einer Zellenspannung von 0,8 V beträgt der Bruttowirkungsgrad 62 % und der Anlagenwirkungsgrad 50 %. Der Einfluß verschiedener Zellparameter wird analysiert.

Inhalt

1 Einleitung und Problemstellung

In dieser Arbeit wird über Modellrechnungen berichtet, die zu verschiedenen Systemvarianten einer SOFC-Anlage durchgeführt wurden. Die Anlage soll als Blockheizkraftwerk eingesetzt werden mit einer elektrischen Leistung von 200 kW.

Diese Rechnungen erfolgen im Rahmen einer Feasibility-Studie zur Temperaturabsenkung bei SOFC-Anlagen auf ca. 850 °C in Zusammenarbeit mit SIEMENS AG-KWU.

In dieser Studie soll der Einfluß der SOFC-Betriebstemperatur auf Technik und Wirtschaftlichkeit eines Kraftwerkes auf Erdgasbasis aufgezeigt werden. Es werden getrennte Betrachtungen durchgeführt:

a) Für ein 40 MW Kraftwerk zur reinen Stromerzeugung. Zugehörige Rechnungen führt SIEMENS - KWU durch.
b) Für ein 200 kW Blockheizkraftwerk. Dieser Teil der Studie wird im wesentlichen bei KFA-IEV bearbeitet.

Problemstellung

Die Arbeitstemperaturen von Festoxid-Brennstoffzellen liegen bei bisher verfolgten Konzepten bei 950 - 1000 °C. Bei dieser Temperatur treten folgende Materialprobleme auf:

- Festigkeit der Zellenkomponenten
- Abdichtung der Zellenkomponenten
- Abdichtung und Fügetechnik der Gasanschlüsse (manifolds)
- Festigkeit der gasführenden und wärmeaustauschenden Komponenten
- Korrosion und Interdiffusion der eingesetzten Werkstoffe
- Wärmeisolation

Es liegt auf der Hand, daß alle Werkstoffprobleme bei niedrigerer Temperatur leichter lösbar wären. Im Rahmen dieser Studie

wurde mit Rücksicht auf die Temperaturbeständigkeit warmfester austenitischer Stähle die mittlere Arbeitstemperatur der Brennstoffzelle zu 850 °C gewählt, während die max. zulässige Austrittstemperatur 900 °C nicht überschreiten soll.
Während die Materialprobleme durch die Temperaturabsenkung entschärft werden, treten bei den elektrochemischen Prozessen in der Brennstoffzelle Probleme auf, die möglicherweise andere Zellkonzepte als bisher üblich erfordern. Obwohl die thermodynamische Zellspannung mit abnehmender Temperatur zunimmt, können die ohmschen- und Polarisationsverluste unzulässig hohe Werte annehmen.
Ein besonders kostenintensives Problem stellt der Wärmehaushalt dar. So bestimmen

- die Strömungsdruckverluste im Zellenblock und in den Gasführungen,
- der Grad der internen Reformierung,
- der elektrochemische Umsatzgrad (Utilisation) der Reaktanden,
- die Art der Wasserdampferzeugung und -nutzung,
- das Temperaturniveau der Abgas- und Abwärmenutzung,
- die Einspeisung des Brennstoffes Erdgas,
- die Wärmeisolation und nicht zuletzt
- das Temperatur- und Druckniveau

nachhaltig die Bauart und die Baugröße von wärmeaustauschenden Komponenten sowie von Aggregaten zur Gasförderung.

Veränderungen im Zellenblock, insbesondere bei Lastwechseln, setzen sich in der Peripherie fort. Folglich muß ein leistungsfähiges Regelungskonzept entwickelt werden.

Bei den Simulationsrechnungen wird, von einem typischen Anlagenschema ausgehend, die Frage nach dem verfahrenstechnischen Aufwand bei Änderung von Systemparametern im Hinblick auf hohen Systemwirkungsgrad gestellt. Die Qualität der gefundenen Antworten hängt ursächlich von der Qualität der eingegebenen Auslegungsdaten ab.

2 Vorgabe der Eckdaten

Dieser Studie wird das Anlagenfließbild für ein Blockheizkraftwerk (Bild 1) zugrunde gelegt. Es umfaßt einen geschlossenen Anodengaskreislauf und ein offenes Kathodengassystem. Die Auslegungsdaten für die bisherige Auslegung sind in Tabelle 1 enthalten. Demgegenüber unterscheiden sich die Betriebsparameter für die neue Auslegung einer Anlage, die bei tieferer Temperatur betrieben wird, wie folgt:

- Zellenblock -Ein bzw. -Austrittstemperatur 800 bzw. 900 °C
- mittlere Zellspannung 0,7 Volt bei einer
- mittleren Stromdichte von 150 mA/cm^2

Die Brennstoffnutzung bei der elektrochemischen Reaktion wird mit 80 % projektiert.

Der Begriff Brennstoffnutzung wird wie folgt definiert: Wird Methan innerhalb der Anlagengrenzen vollständig zu Wasser und CO_2 umgesetzt, so wird dabei eine bestimmte maximale Sauerstoffmenge verbraucht (Abb. 2). In der Anlage kommt es an zwei Stellen zur Reaktion mit Sauerstoff, elektrochemisch in der Zelle und thermisch bei der Nachverbrennung. Die Brennstoffnutzung, oft auch als Utilisation bezeichnet, ist nun definiert als der Sauerstoffverbrauch im Zellenblock im Verhältnis zum Sauerstoffverbrauch bei vollständiger Verbrennung. Daraus folgt auch unmittelbar, daß der elektrische Zellenstrom proportional zur elektrochemischen Brennstoffnutzung ist, denn die Elektronen werden von den 2-fach negativ geladenen Sauerstoffionen durch den Festelektrolyten transportiert.

Außerdem ist das H_2O/CH_4-Verhältnis am Eintritt des Vorreformers vorgegeben. H_2O/CH_4 = 2,5 mol/mol wird als ausreichend angesehen, um Rußbildung zu vermeiden. Dieser Dampf wird durch Rückführung des Anodenaustrittsgases bereitgestellt. Das Kreislaufverhältnis wird jeweils so gewählt, daß sich der Wert H_2O/CH_4 = 2,5 einstellt.

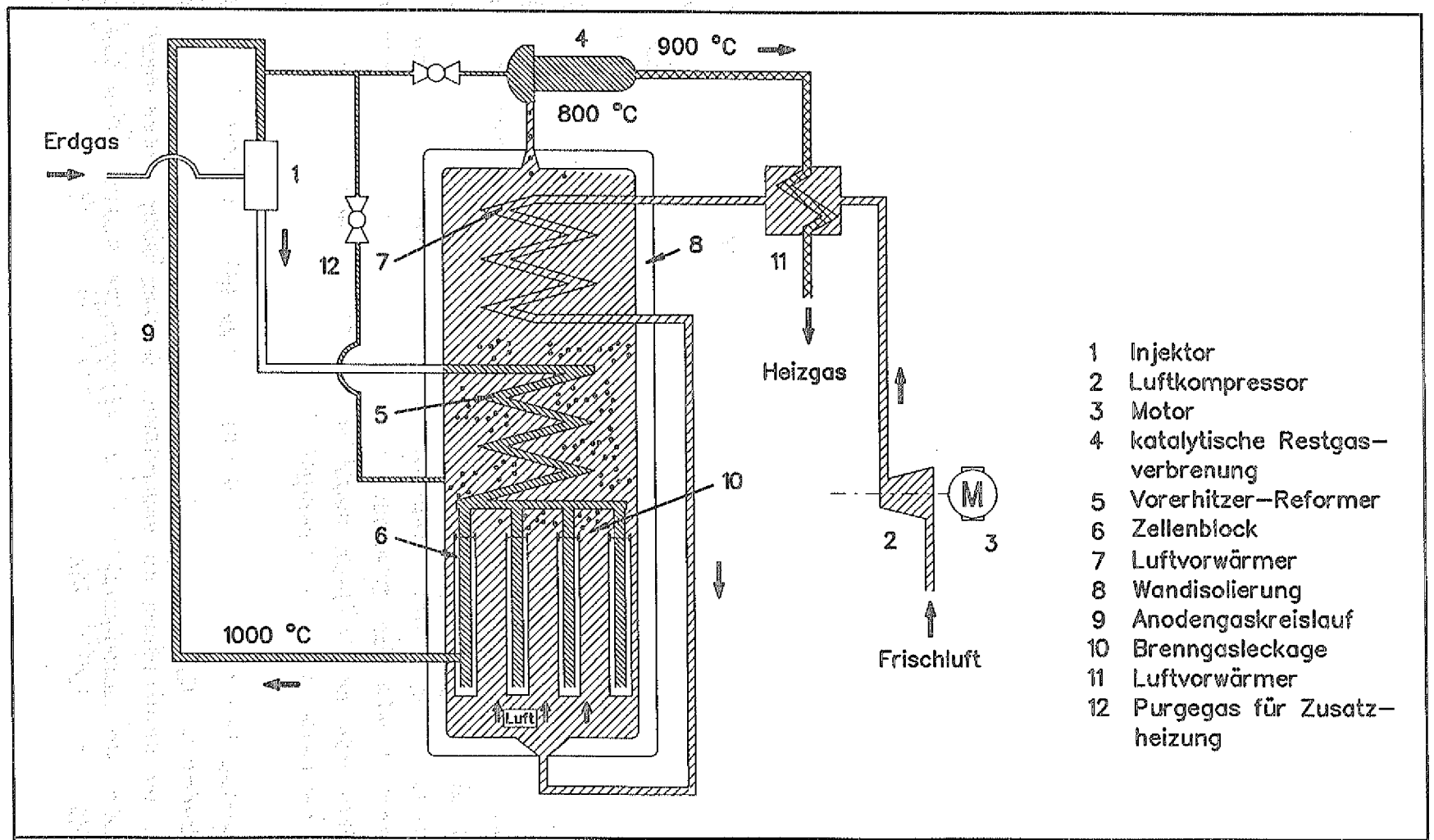


Bild 1: SOFC-ANLAGE ALS DEZENTRALES BLOCKHEIZKRAFTWERK

	bisherige Auslegung	neue Auslegung
Zelltemperatur	850 – 1050°C	**800 – 900°C**
Zellspannung	0,8 V	**0,7 V**
Stromdichte	300 mA / cm^2	150 mA / cm^2
Brennstoffnutzung	80 %	**80 %**

H20 / CH_4 = **2.5** (Eintritt Reformer)

mit Anodengasrückführung

Kein Kathodenkreislauf

Vereinfachung: – **CH_4** anstatt Erdgas

–Gleichstrom – Wärmetausch in der SOFC

Tab. 1: Vorgabedaten

$$BN = \frac{\text{Sauerstoffverbrauch in der Zelle}}{\text{Sauerstoffverbrauch bei vollst. Verbrenn.}} \; 100\%$$

El. Strom ~ BN

$$CH_4 + 2O_2 \rightarrow 2H_2O + CO_2$$

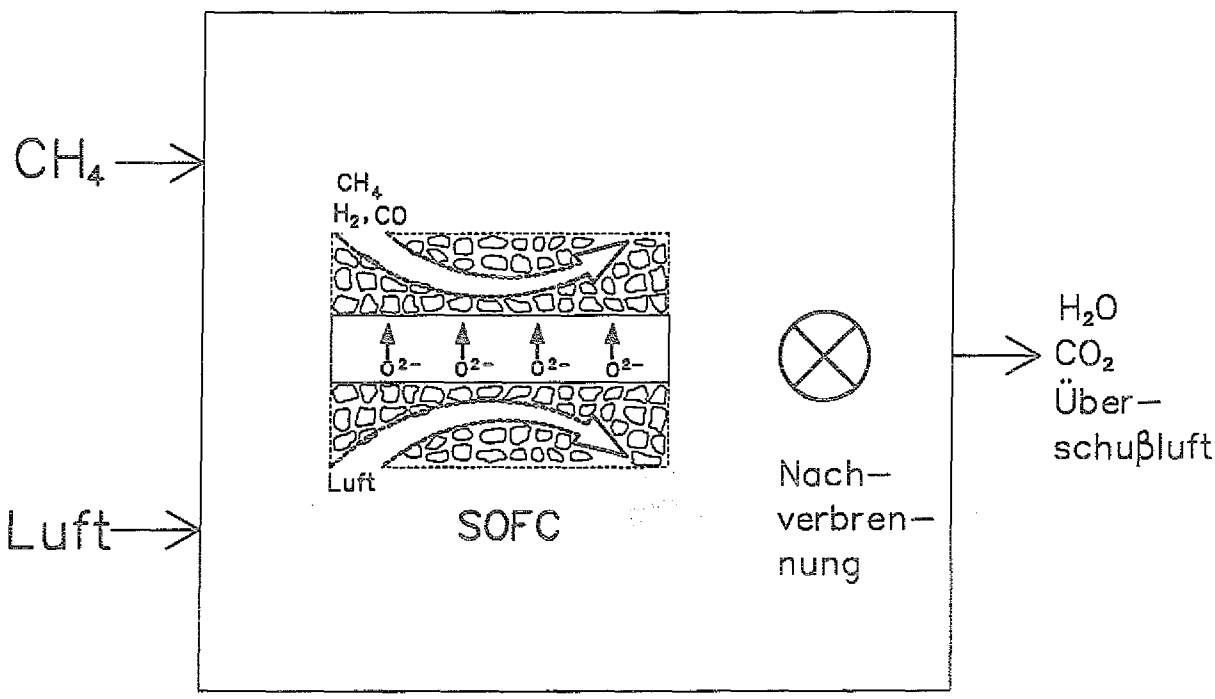


Abb. 2: Definition des Brennstoffnutzungsgrades BN

In dieser Studie werden grundsätzliche Fragen behandelt. Deshalb kann zur Vereinfachung mit Methan gerechnet werden, und in der Zelle wird Gleichstromführung für Anoden- und Kathodengas angenommen. Dann ergeben sich auch gleiche Zell-Austrittstemperaturen für beide Gase.

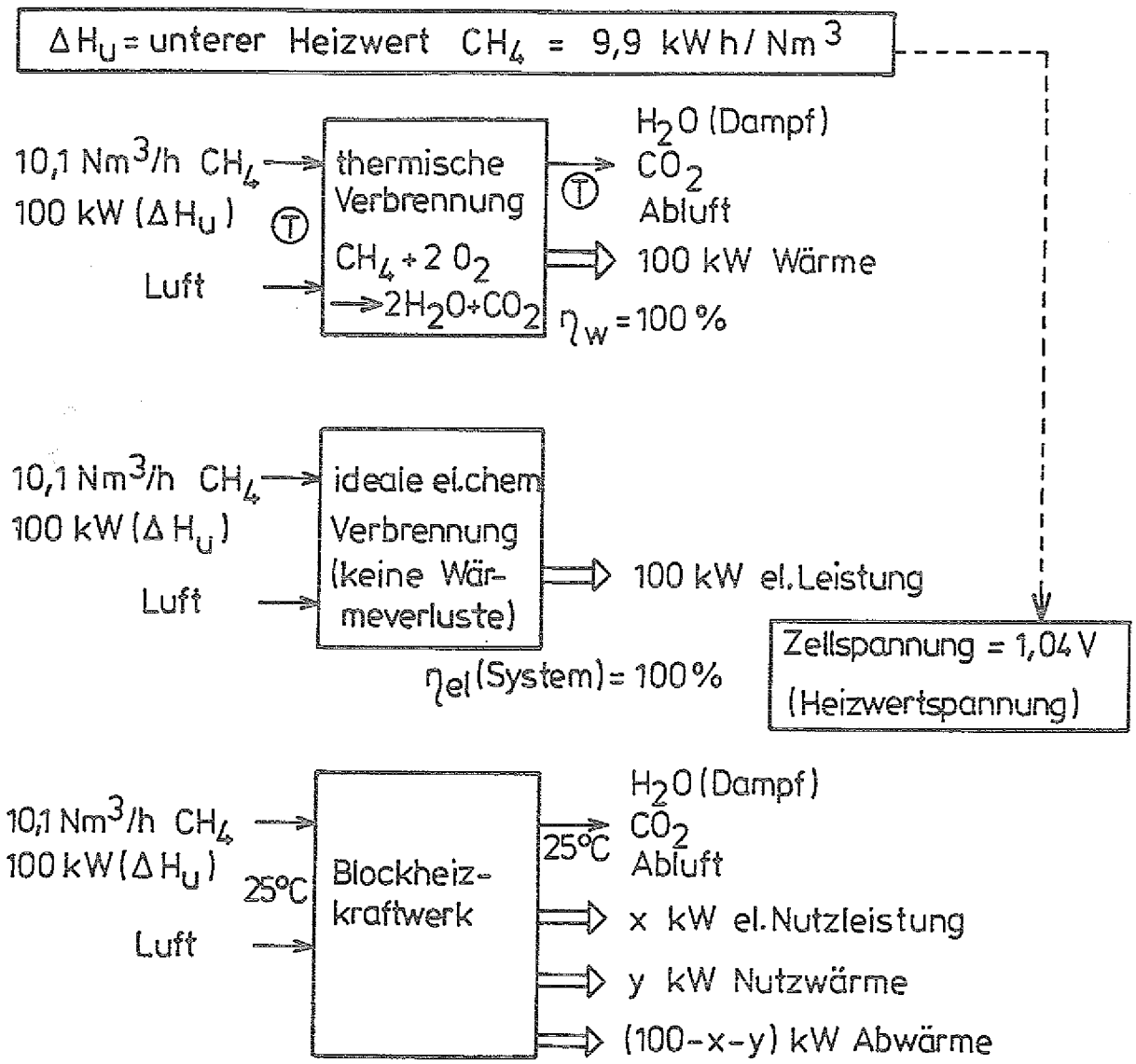
3 Definition des System- oder Nettowirkungsgrades

Der untere Heizwert von Methan H_u (CH_4) beträgt 9,9 kWh/Nm^3. Damit kann eine grundsätzliche Betrachtung angestellt werden, wie Abb. 3 verdeutlicht. Werden 10,1 Nm^3 Methan pro Stunde einem Verbrennungsprozeß zugeführt, so beträgt H_u (CH_4) $\cdot$ $\dot{V}_N$ (CH_4) = 100 kW. Wird das Methan thermisch vollständig verbrannt mit Luft-Sauerstoff, so daß im Abgas nur Wasserdampf, CO_2 und Abluft vorhanden ist, wird eine Wärmeleistung von 100 kW (Heizwertleistung) nach außen abgegeben. Der Wärmewirkungsgrad beträgt dann 100 %.

Bei einer idealen elektrochemischen Verbrennung ohne Wärmeverluste würden 100 kW el. Leistung abgegeben (el. Leistung = Heizwertleistung). Auch hier sind vorausgesetzt gleiche System-Ein- und Austrittstemperaturen und keine Kondensation des Wasserdampfes, andernfalls müßte der obere Heizwert herangezogen werden. Für die Zellspannung erhält man bei Umgebungsdruck und Temperaturen von 25 °C im Idealfall 1,04 V (Heizwertspannung).

Das reale System, das hier betrachtet wird, ist ein Blockheizkraftwerk. Bei 25 °C und Umgebungsdruck werden 10,1 Nm^3 pro Stunde Methan und Luft zugeführt.
Als Nutzleistung verlassen das System x kW el. Leistung und y kW Nutzwärme. Der an 100 nach fehlende Rest ist Abwärme. Der el. System-Wirkungsgrad ist dann gerade x %.

Bei den Rechnungen hat sich bewährt, zunächst mit 10,1 Nm^3 Methan pro Stunde zu rechnen, weil dann die energetischen Verhältnisse in der Anlage leicht überschaubar sind. Denn alle energetischen Daten können gedanklich auf eine Wärmeleistung von 100 kW bei vollständiger thermischer Verbrennung (Heizwertleistung) bezogen werden. Für eine Anlage bestimmter Leistung, z.B. 200 kW, sind dann für die Auslegung der Apparate alle Mengenströme und Leistungen lediglich mit einem Faktor zu multiplizieren.



Def.: El. Systemwirkungsgrad

$$\eta_{el}\,(\text{System}) = \frac{\text{El. Nutzleistung}}{\text{Energiezufuhr } CH_4\,(\Delta H_u)} \cdot 100\,\%$$

Bei einer 200 kW_{el} - Anlage sind Mengenströme und Leistungen mit dem Faktor $\frac{200}{x}$ zu multiplizieren.

Abb.3 Definition des elektrischen Systemwirkungsgrades

4 Berechnung des Systemwirkungsgrades aus dem Bruttowirkungsgrad und dem verfahrenstechnischen Aufwand

Bezieht man die el. Leistung des Zellenblocks auf die Heizwertleistung des Methans, so erhält man den Brutto-Wirkungsgrad. Eine theoretische Zellspannung von 1,04 Volt entspricht dem unteren Heizwert des Methans und wird für die Gasreaktion

$$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$$

aus $\Delta H/nF$ hergeleitet (Die thermodynamische Zellspannung, hergeleitet aus $\Delta G/n\,F$, ist nur unwesentlich niedriger). Der Brutto-Wirkungsgrad ergibt sich somit aus der realen Zellspannung U_z im Verhältnis zu 1,04 V und aus der Brennstoffnutzung BN, denn diese ist , wie oben gezeigt, proportional zum Strom.

$$\eta_{el}\ (\text{brutto, DC}) = (U_z/1{,}04\ \text{V}) \cdot \text{BN}$$

In Abb. 4 ist nach oben die Zellspannung aufgetragen und nach rechts die Brennstoffnutzung. Für den Referenzfall mit 0,7 V und 80 % Brennstoffnutzung erhält man einen Brutto-Wirkungsgrad von 54 %. Dieser erhöht sich auf 62 %, wenn die Spannung auf 0,8 V steigt oder auf 61 %, wenn die Brennstoffnutzung auf 90 % steigt.

Der Betrieb einer Anlage erfordert aber auch energetischen Aufwand. Die el. Leistung des Zellenblocks kann also nur zum Teil an den Verbraucher abgegeben werden.

Unser jetziges Konzept eines Blockheizkraftwerkes ist in Abb. 5 dargestellt. Es entspricht dem in Bild 1 gezeigten Fließschema. Gezeigt werden die typischen Verfahrensschritte, Temperaturen und Energie- und Stoffströme.

Die Rechnungen wurden mit dem PROCESS-Programm von SIMSCI durchgeführt, wobei aber der Zellenblock mit einem Rechenmodell, das im IEV entwickelt wurde /1/, simuliert wird.
Für die Berechnungen wurden weitere Annahmen getroffen:

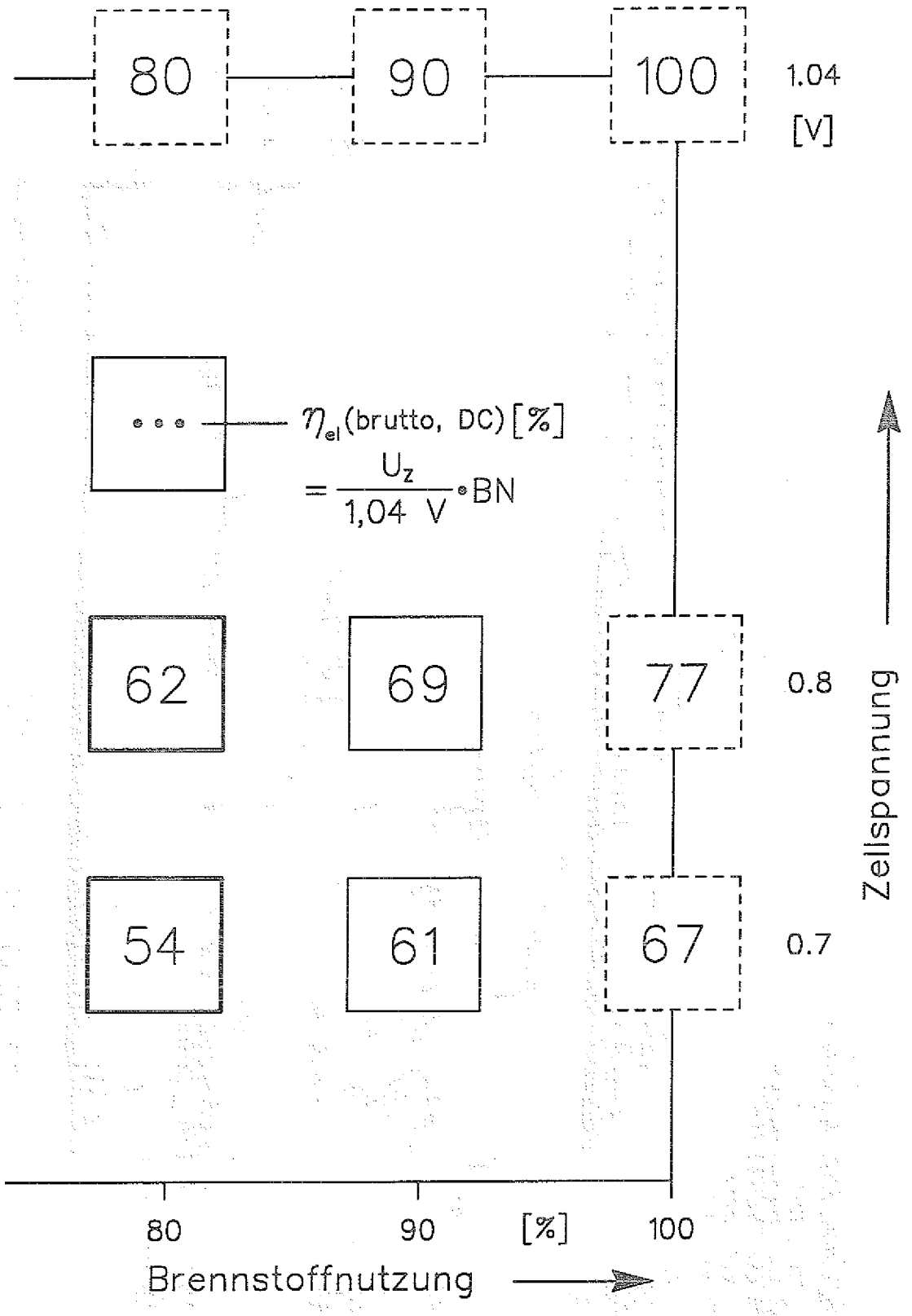


Abb. 4: Elektrische Bruttowirkungsgrade

DRUCKVERLUSTE (Annahmen)

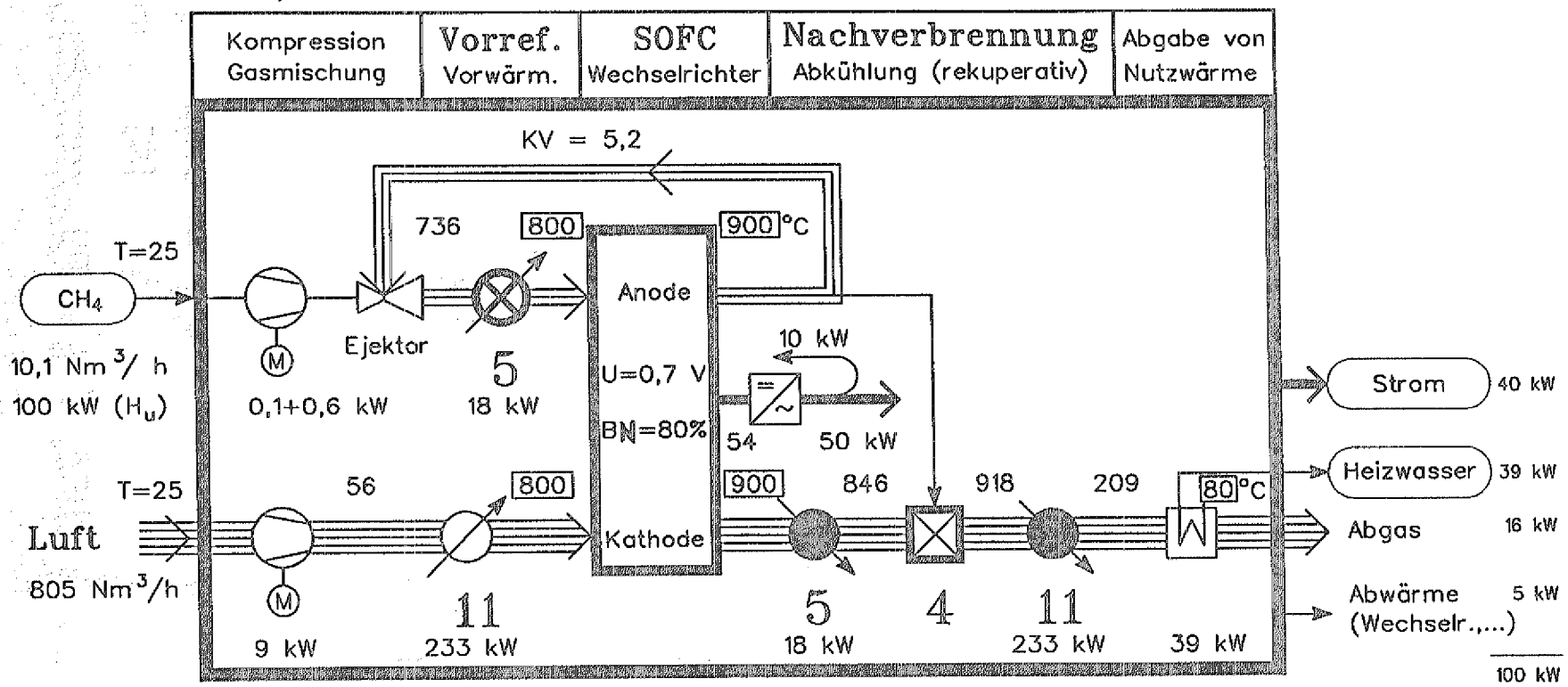
0	bar	SOFC
0,02	bar	Nachverbrennung
0,05	bar	Vorreformer (jede Seite)
0,1	bar	LUVO (")
0,05	bar	sonst. WT (")

WIRKUNGSGRADE

95 %	E-Motoren
80 %	Kompression Erdgas, Frischluft
50 %	Kompressor Anodenkreislauf (energetische Simulation eines Ejektors)
93 %	Wechselrichter

VORREFORMER

CH_4-Umsatz = 50%



Gasz. [mol%]	CH_4	H_2	CO	H_2O	CO_2
Ref. Ein	18	10	6	45	21
Ref. Aus = An. Ein	8	30	14	32	16
An. Aus	2	12	7	53	25

5 / 5 Vorreformierung und Vorerhitzung des Anodengases

11 / 11 Luftvorwärmung LUVO

4 Nachverbrennung

Abb. 5: SOFC – Blockheizkraftwerk mit Anodengasrückführung (normierte Größen)

Th. Bauer /2/ hat gezeigt, daß 0,3 bar Druckverlust in einem Wärmetauscher sicherlich einen zu hohen Kompressionsaufwand erfordern. Im jetzigen Konzept sehen wir für den größten WT, den als Plattenwärmetauscher ausgelegten Luftvorwärmer LUVO, 0,1 bar vor auf jeder Seite. Für alle anderen Apparate haben wir geringere Druckverluste angenommen.

Zur Überwindung des Druckverlustes auf der Kathodengasseite ist ein Verdichter mit einer Leistungsaufnahme von 9 kW vorgesehen, dessen isothermer Wirkungsgrad mit $\eta = 0,8$ angesetzt wird. Der heiße Anodenkreislauf wird in einem Injektor mit kaltem Erdgas vermischt. Dabei wird die Strömungsenergie des auf hohem Druck befindlichen Erdgases zum Antrieb des Kreislaufs genutzt. Bei günstiger Auslegung dieser Strahlpumpe kann ein Wirkungsgrad von $\eta = 0,5$ erreicht werden. Wegen des geringen Leistungsbedarfs von ca. 0,7 kW ist dieser Wert vertretbar. Die den Verdichtern zugeführte elektrische Leistung wird der Anlage letztendlich in Form von Reibungswärme übertragen.

Schließlich hat der Wechselrichter zur Umformung der Gleichspannung in Wechselspannung bei dieser Anlagengröße einen Wirkungsgrad von 0,93. Im Vorreformer soll das Methan zur Hälfte umgesetzt werden. Damit kann die Anlage durchgerechnet werden.

Beschreibung der Rechenergebnisse

Mit den o.g. Daten können grobgerasterte Modellrechnungen des gewählten Anlagenschemas durchgeführt werden. Ausgehend vom Anlagenschema gemäß Bild 1 und 5 werden Anlagenvarianten berechnet und diskutiert.

Die rechnerisch ermittelten Daten von Bild 5 werden wie folgt erläutert:

Der Anlage wird pro Stunde 10,1 Nm^3 Methan entsprechend einer Wärmeleistung von 100 kW zugeführt.

Es wird komprimiert und dann in einem Ejektor mit rückgeführtem 900 °C heißen Anodenabgas gemischt. Dieses enthält 53 mol% Wasserdampf.

Das Gas wird nun dem Vorreformer (5) zugeführt. Dieser wird rekuperativ beheizt von der heißen Kathodenabluft.

Die Zahl (5) taucht zweimal auf und steht für ein und denselben Apparat, der als Wärme-Rekuperator und Vorreformer dient. In diesem wird der Anodengasstrom aufgeheizt und der Kathodengasstrom entsprechend abgekühlt. Dabei werden 18 kW Wärme ausgetauscht. 50 % des Methans werden umgesetzt in Wasserstoff, CO und CO_2.

Über die Kathodenluft wird der Zellenblock quasi thermostatisiert. Die vorgegebenen Temperaturen bestimmen daher die erforderliche Kühlluftmenge. Nach iterativer Rechnung ergab sich eine Luftmenge von 805 Nm^3/h. Das Luft/Methan-Verhältnis hat also einen sehr hohen Wert von 80 mol/mol. Das Sauerstoffangebot für die Kathode ist damit mehrfach erfüllt. Hiermit wird die Zelle so stark gekühlt, daß die Austrittstemperaturen nur 900 °C betragen. Eintrittstemperaturen: 800 °C. Der Luftstrom ist auch deswegen so hoch, weil keine vollständige interne Reformierung stattfindet. Dadurch muß relativ viel Abwärme aus dem Zellenblock abgeführt werden. Die Kompression der großen Luftmenge erfordert beachtliche 9 kW el. Leistung für den Elektromotor, der den Verdichter antreibt. Die Luftvorwärmung (11) von 56 auf 800 °C erfordert 233 kW Wärme. Die Abluft verläßt den Zellenblock mit 900 °C. Nun wird, wie bereits erwähnt, zuerst der Vorreformer beheizt. Die Lufttemperatur sinkt auf 846 °C. In der Nachverbrennung (4) wird das nicht zurückgeführte Anodenabgas, das sog. Purgegas, mit der gesamten Abluft gemischt. Nach vollständiger Oxidation der Reste an CH_4, H_2 und CO ist die Lufttemperatur wieder angestiegen auf 918 °C.
Damit wird nun der LUVO beheizt. An dessen heißem Ende ist also die treibende Temperaturdifferenz für den Wärmeaustausch 918 - 800 = 118 Grad. Je höher diese Temperaturdifferenz ist, um so größer ist die Wärmestromdichte und um so weniger Wärmetauscherfläche ist erforderlich. Strömungsbedingte Einflüsse auf die Wärmeübertragung werden vernachlässigt, da wir uns auf den Wärmetauschertyp, den Bavaria-Plattenwärmetauscher festgelegt ha-

ben. Mit 209 °C verläßt die Abluft den LUVO. Damit ist die interne Wärmerekuperierung beendet.

Die jetzt noch verbliebene fühlbare Wärme ist bis etwa 80 °C nutzbar. In einem Wärmetauscher wird heißes Wasser erzeugt. 39 kW Nutzwärme werden für Heizzwecke abgegeben.

Mit dem 80 °C heißen Abgas werden 16 kW Abwärme an die Umgebung abgegeben, zuzüglich ca. 10 kW latente Wärme, wenn der im Abgas enthaltene Wasserdampf kondensiert.
Weitere 5 kW Abwärme werden im wesentlichen vom Wechselrichter erzeugt.

Nettowirkungsgrad
Der Zellenblock erzeugt bei 0,7 V Zellspannung und 80 % Brennstoffnutzung 54 kW el. Leistung brutto. Nach dem Wechselrichter verbleiben 50 kW. Dann müssen aber noch ca. 10 kW für den Bedarf der Verdichter abgezweigt werden.

Der elektrische System- oder Nettowirkungsgrad beträgt also 40 %.
Dies ist das zentrale Ergebnis der Rechnung, denn diese Werte geben den verfahrenstechnischen Aufwand für den Betrieb der Anlage an.

5 Verfahrensvarianten

Das obige Verfahrenskonzept hat den Vorteil, daß die Nachverbrennung genutzt wird, um den Luftvorwärmer günstig betreiben zu können. Die Temperaturdifferenz zwischen den beiden Luftströmen im Wärmetauscher (LUVO), die sog. "Grädigkeit", beträgt immerhin 118 Grad. Bei anderen Verfahrensvarianten, dargestellt in Abb. 6, war dieser Wert geringer. In /2/ wurde eine Anlage berechnet, bei der die Nachverbrennung erst bei tiefer Temperatur erfolgte. Sie kommt also dem LUVO nicht zugute. Die Grädigkeit beträgt nur 45 Grad. Entsprechend nimmt der Bedarf wärmeaustauschender Flächen im LUVO zu.

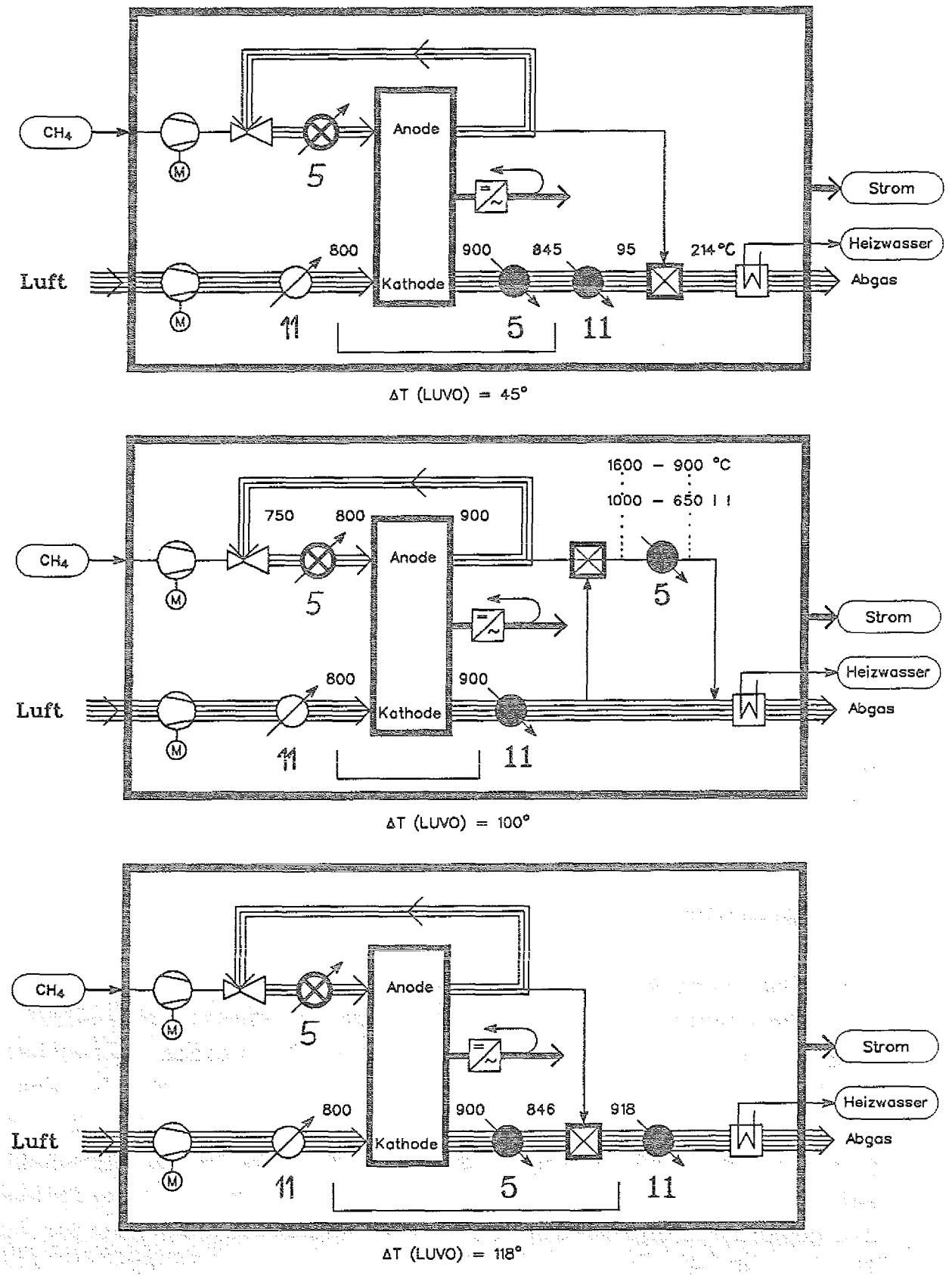


Abb.: 6 Verfahrensvarianten
(50% Vorreformierung)

Danach wurde ein Konzept verfolgt, bei dem die Reihenfolge der Beheizung vertauscht war. Zuerst wird der LUVO mit 900 °C beheizt. Damit werden 100 Grad Temperaturdifferenz erreicht. Die Nachverbrennung mit nur einem Teil der bereits kalten Abluft verbessert jetzt die Beheizung des Reformers. Aber die Wärme reicht nicht aus für 50 % Vorreformierung. Selbst wenn man die Luftmenge so wählte, daß noch 1000 °C erreicht würden, müßte auf 650 °C abgekühlt werden. Dies ist jedoch nicht möglich, da das wärmeaufnehmende Reformergas ein höheres Temperaturniveau hat.

6 Variation der elektrochemischen Parameter des Zellenblocks

Für den Referenzfall beträgt der Bruttowirkungsgrad 54 %. Abzüglich 4 %-Punkten für den Wechselrichter und 10 %-Punkten für die Gaskompression verbleibt ein System-Wirkungsgrad von nur 40 %. Dieser Wert ist deutlich zu niedrig für eine Markteinführung. Zur Abschätzung des Potentials der elektrochemischen Bedingungen in Bezug auf höhere Systemwirkungsgrade wurden Parameter verändert (s. Abb. 7):

Steigt die Zellspannung auf 0,8 V, so erhöht sich der Bruttowirkungsgrad um 8 %-Punkte. Außerdem wird der Kompressionsaufwand geringer. Er fällt von 10 auf 7 %-Punkte. Weniger Abwärme in der Zelle erfordert weniger Kühlluft. Das ergibt eine starke Erhöhung des Systemwirkungsgrades auf 50 %.

Wird nur die Brennstoffnutzung auf 90 % erhöht, steigt der Systemwirkungsgrad auf lediglich 45 %. Mit der höheren Brennstoffnutzung steigt zwar der Bruttowirkungsgrad, aber auch die Kompressionsarbeit und der Flächenbedarf des LUVO nehmen zu.

Schließlich wurde der Grad der Vorreformierung auf 30 % gesenkt. Das Ergebnis ist vielversprechend. Der Kompressionsaufwand sinkt von 12 auf 10 %-Punkte. Mehr elektrochemische Abwärme geht direkt in die Reformierungsreaktion in der Zelle, so daß weniger Kühlluft erforderlich ist.

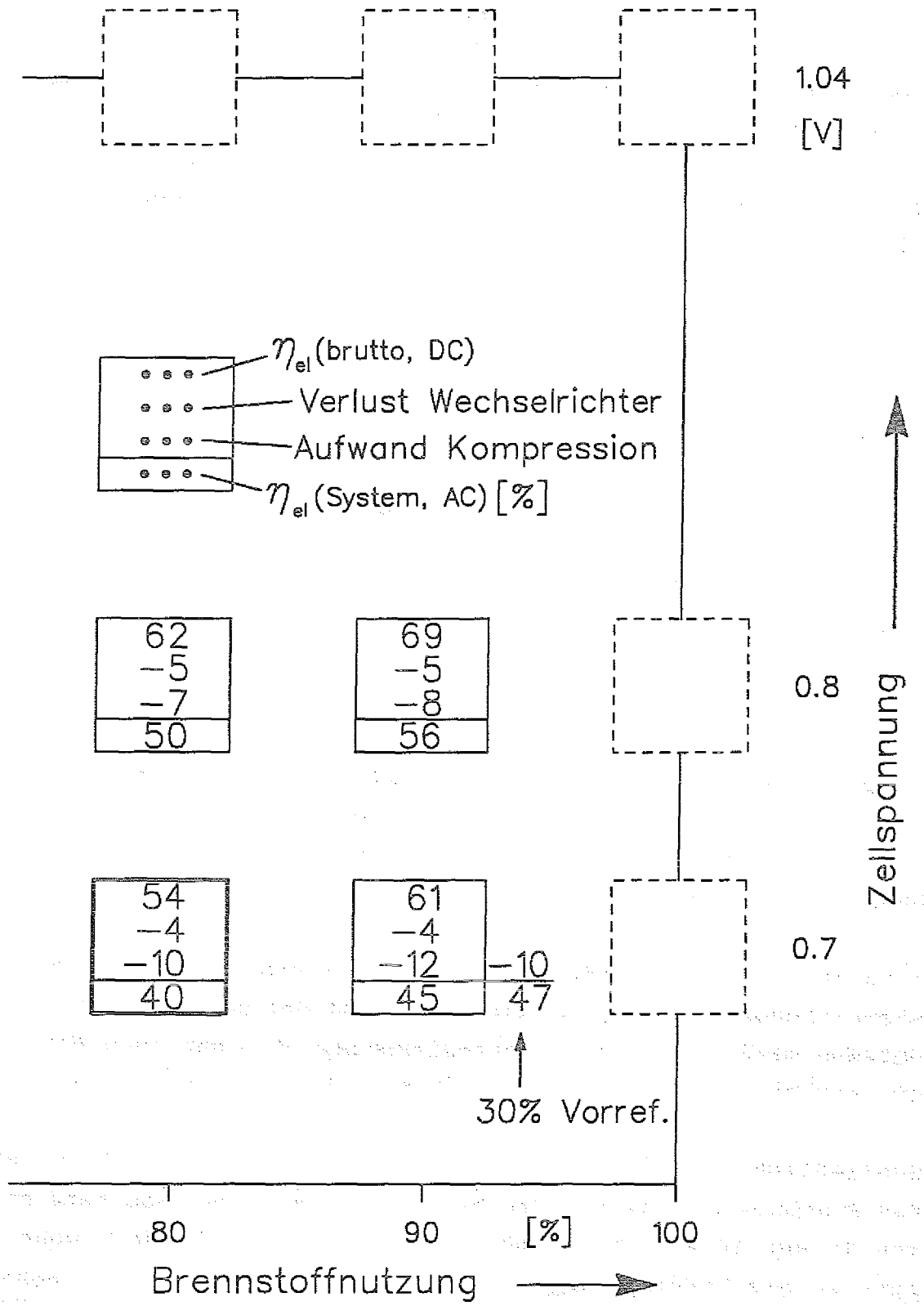


Abb. 7: Elektrische Brutto- und Systemwirkungsgrade

Wie Abb. 8 zu entnehmen, ist die anfallende Nutzwärme beträchtlich. Die Wärme-Wirkungsgrade liegen etwa zwischen 30 und 40 %. Damit ergeben sich unter Einbeziehung der Wärmenutzung Gesamt-Nutzungsgrade von ca. 80 %.

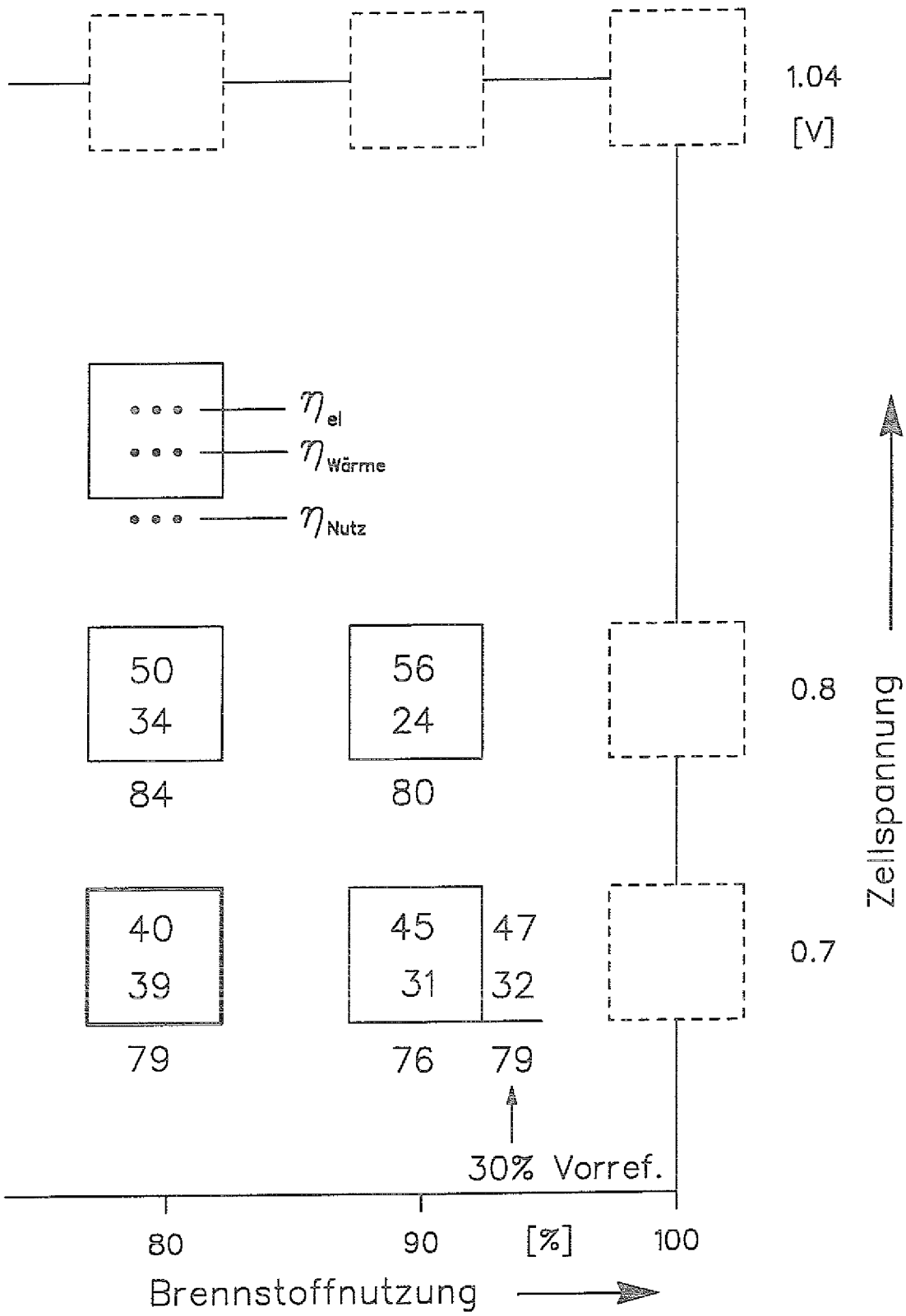


Abb. 8: Systemwirkungsgrade für elektrische Nutzleistung und Nutzwärme

7 Investkosten des Luftvorwärmers

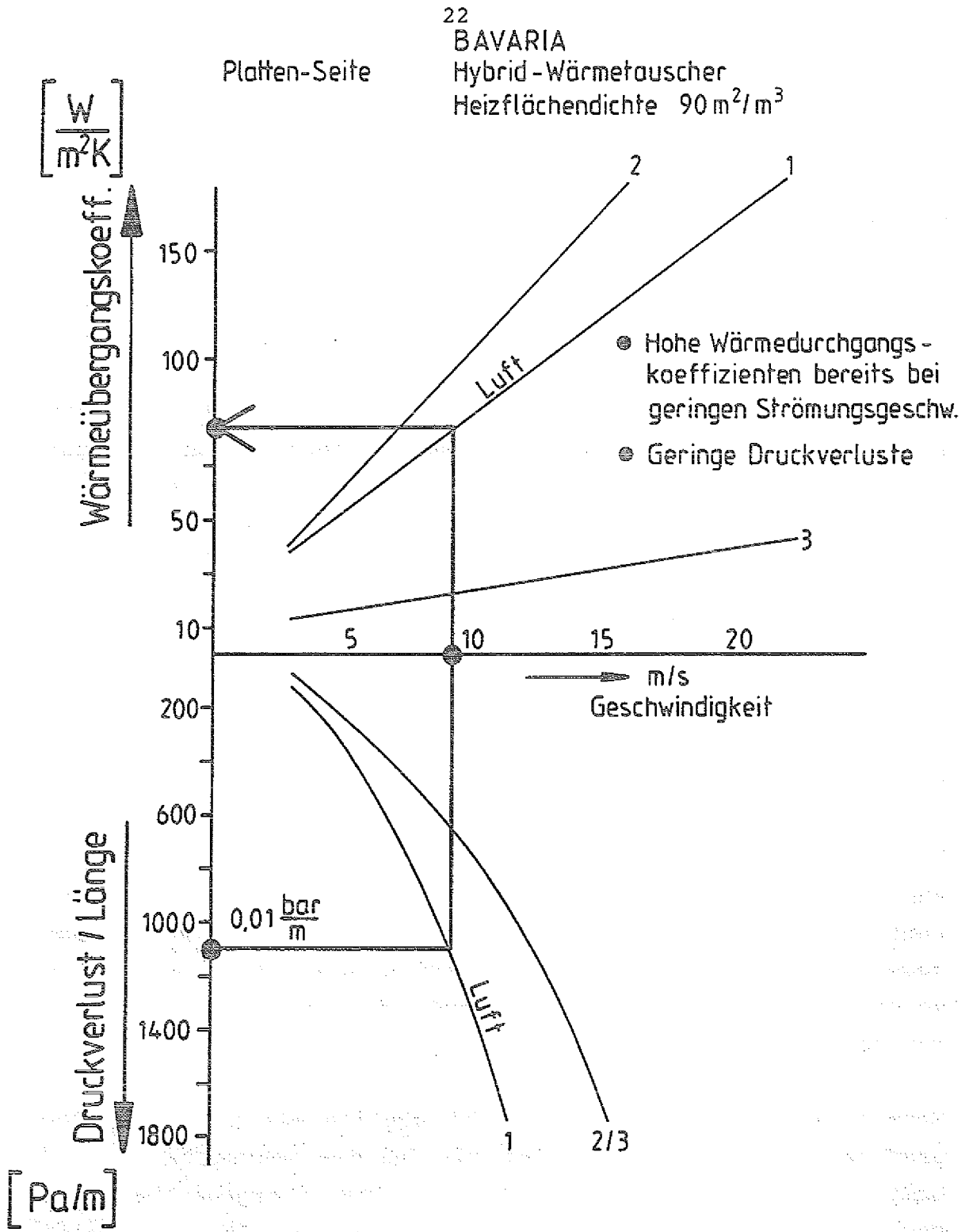
In der Feasibility-Studie soll die voraussichtlich teuerste Komponente neben dem Zellenblock, nämlich der Luftvorwärmer näherungsweise ausgelegt werden.
Wir haben einen Platten-WT ausgewählt. Diese sind in der Industrie weit verbreitet, werden aber i.a. bei niedrigen Temperaturen eingesetzt.
Die Fa. BAVARIA bietet einen neuartigen Typ Platten-WT, einen sog. Hybrid-WT an, der auch bei hohen Temperaturen eingesetzt werden kann. Zur Fertigung eines Vorreformers, der im Komponentenprüfstand eingesetzt werden soll, wurden die einzelnen Bleche eines solchen BAVARIA-Platten-WT im ICH-4 mit Katalysator beschichtet und bei BAVARIA zum Vorreformer-WT zusammengeschweißt.

Die Gase werden innerhalb des Plattenwärmetauschers im Kreuzstrom geführt. Die Platten sind wellenförmig geformt.
Das führt zur Verwirbelung des Gasstroms und damit zu einem guten Wärmeübergang.

Die Bleche werden zu Modulen zusammengefaßt. Diese können so angeordnet werden, daß insgesamt praktisch eine Gegenstromführung erreicht wird. Die Anordnung ist sehr stabil und kompakt. Wegen der hohen Wärmeübergangszahlen sind relativ geringe Strömungsgeschwindigkeiten ausreichend, so daß der Druckverlust gering ist.

Eine näherungsweise Auslegung ist möglich mit Hilfe von Nomogrammen (Abb. 9) für die Platten- und die Rohrseite. Für eine bestimmte Geschwindigkeit können der Wärmeübergangskoeffizient und der Druckverlust, bezogen auf die Strömungslänge, abgelesen werden.

Vorgegeben sind die Rechenergebnisse für den Referenzfall. Die Mengenströme der Luft auf der Plattenseite und der Abluft auf der Rohrseite betragen je etwa 4000 Nm^3/h. Die auszutauschende Wärmemenge ist mit 1165 kW etwa sechsmal so hoch wie die el.



Index: 1 Luft bei 20°C und 1 bar
hydraulischer Durchmesser Spalt 22,3 mm
Rohr 6,1 mm

Abb. 9 : Kenndaten des BAVARIA-Hybrid-Wärmetauschers (Heizflächendichte 90 m²/m³)

Nutzleistung, und die Grädigkeit beträgt 136 Grad. Die Forderung von 1/10 bar Druckverlust auf jeder Seite führt zu einer WT-Fläche von 175 m^2 in einem Volumen von 1,9 m^3 (Tab. 2).

Die Kosten des BAVARIA-Vorreformer-WT (ca. 3 m^2) beliefen sich auf 2700 DM pro m^2 Wärmetauscherfläche. Die Firma BALCKE-DÜRR verlangt einen Preis von ca. 2500 DM pro m^2 /3/.
Dann ergeben sich spezifische Kosten in Höhe von 2200 DM/kW_{el}. Diese sind sicherlich zu hoch, denn das wären schon die kompletten Investkosten eines konventionellen Blockheizkraftwerkes, die ebenfalls bei 2000 DM/kW_{el} liegen (Tab. 3).

Die Größe des LUVO wird von 3 Größen bestimmt (Tab. 4), vom Luft-Methan-Verhältnis, von der treibenden Temperaturdifferenz und vom el. Sytemwirkungsgrad. Damit sind nun Möglichkeiten einer Kostenreduktion erkennbar (Abb. 10 und Tab. 5).

Kann die Zellspannung auf 0,8 V angehoben werden, so halbieren sich die Kosten. Hier liegt die Aufgabe für die Elektrochemie.

Findet vollständige interne Reformierung statt, so kostet der LUVO nur noch 300 DM/kW. Dies ist eine Herausforderung für die Verfahrenstechnik. Ob die interne Reformierung realisierbar ist, weiß man heute noch nicht.

Ungünstig ist eine höhere Brennstoffnutzung. Die Kosten steigen dann um den Faktor 1,4.

Auch die Arbeitsfähigkeit des Zellenblocks über einen größeren Temperaturbereich z.B. von 700 - 900 °C wäre von großem Vorteil, könnte dadurch das Luft/Methan-Verhältnis um den Faktor zwei und der LUVO um ca. den Faktor vier verkleinert werden, wie im folgenden Abschnitt gezeigt wird.

In einem Komponentenprüfstand sollen die auftretenden Probleme, z.B. Rußbildung, untersucht werden. Zu diesem Problemkreis ist

Mengenstrom Luft/Abluft $\dot{V}$ = 4025/4074 Nm^3/h

Ausgetauschte Wärmemenge $\dot{Q}$ = 1165 kW

Mittlere Temp.differenz $\overline{\Delta T}$ = 136 K

Forderung Δ_p = 0,1 bar je Seite

Schätzung Δ_p/L	0,011 bar/m (3. Iteration)	
Diagramm BAVARIA		
α (Platte)	85	W/m^2K
α (Rohr)	115	
k	49	W/m^2K
Fläche $F = \dot{Q} / k \cdot \Delta T$	175	m^2
Volumen $V = F / 90\ m^2/m^3$	1,9	m^3
Geschw. w (Platte)	9	m/s
w (Rohr)	13	
Ström.qu. A (Platte) = $\dot{V}$ /w (Platte)	0,12	m^2
A (Rohr) = $\dot{V}$/w (Rohr)	0,09	
Ström.Länge L = V/A (Platte) + A (Rohr)	9,0	m
Δ_p je Seite	0,10	bar

Kosten Hochtemperatur-Platten-WT

a) BAVARIA Vorreformer (unbeschichtet, 4 m^2) 2700 DM/m^2

b) BALCKE-DÜRR Erfahrungswert (bis 2 bar) 2500 DM/m^2

spez. Kosten Referenzfall: 2200 DM/kW_{el}

Tab. 2: Auslegung des LUVO (Referenzfall, 200 kW_{el})

GUD-Kraftwerk	bis	50 MW_{el}	ca. 1300	DM/kW_{el}
	ab	50 MW_{el}	ca. 1000 (-1300)	"
Blockheizkraftwerk, aufgerüstet mit				
Gasmotor		200 kW_{el}	ca. 4000	"
Gasmotor	>	1 MW_{el}	2500-3500	"
Gasmotor oder Gasturbine	>	5 MW_{el}	2000-3000	"

Tabelle 3: Investkosten pro installierte kW_{el} bei konventionellen Kraft- bzw. Blockheizkraftwerken (Brennstoff: Erdgas; Stand 1992; Angaben nach verschiedenen Quellen)

Wärmetauscherfläche LUVO

$$\sim \text{Luft}/CH_4$$

$$\sim \frac{1}{\overline{\Delta T}}$$

$$\sim \frac{1}{\eta_{el}\ (System)}$$

Tab. 4: Für die Baugröße des LUVO wesentliche Parameter

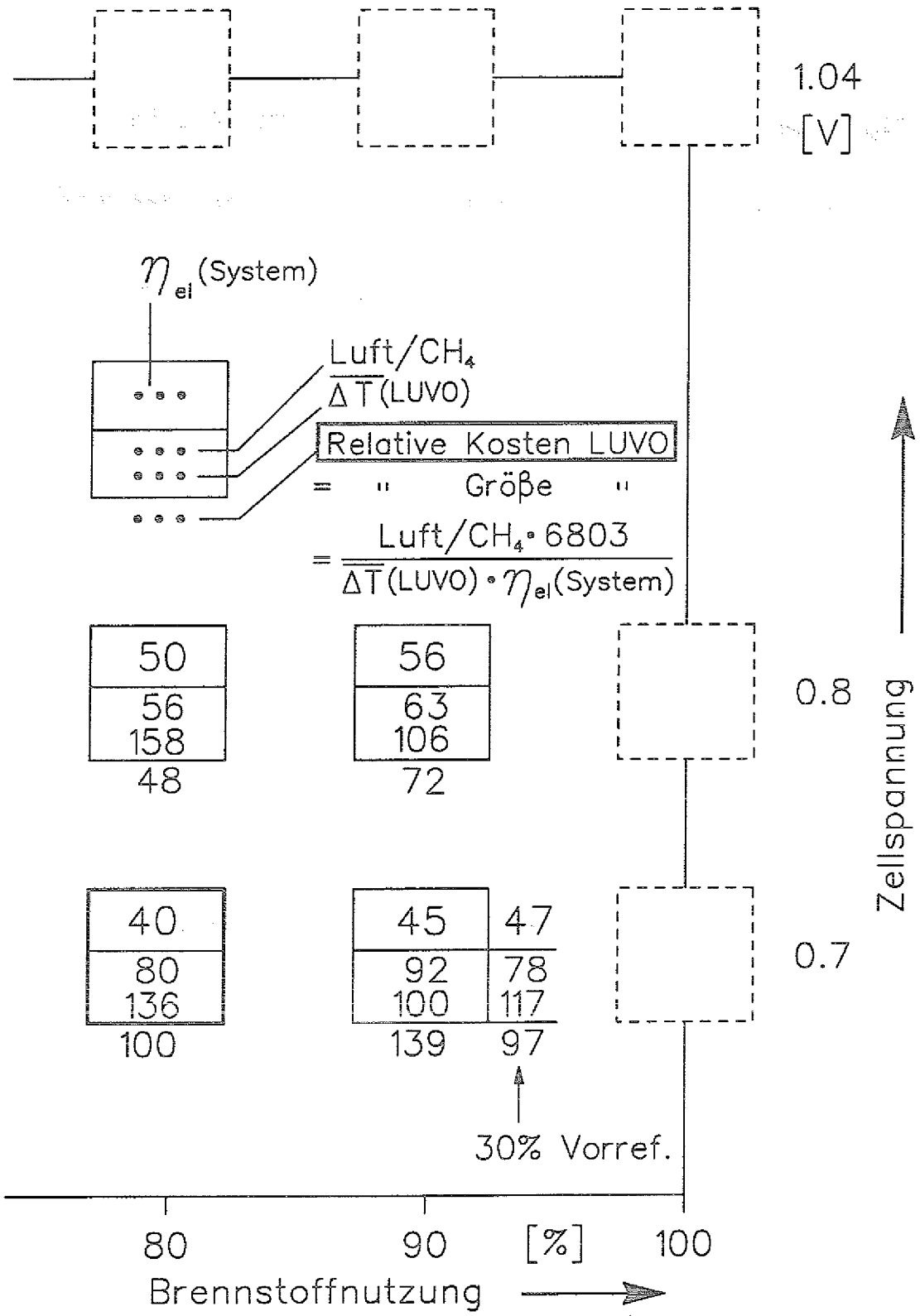


Abb. 10: Elektrische Systemwirkungsgrade und relative Investkosten des LUVO

Kostenreduktion LUVO

Referenzfall	2200 DM/kW_{el}
Zellspannung 0,7 → 0,8 V	1100 DM/kW_{el}
und: nur interne Reformierung	300 DM/kW_{el}

Kostenerhöhung LUVO

Brennstoffnutzung 80 → 90 % Faktor 1,4

Tab. 5: Spezifische Investkosten des LUVO

im IEV, wenn auch für andere Parameterbereiche der Temperatur, Gaszusammensetzung usw., Expertise vorhanden /4/.

8 Einfluß der Aufheizspanne im Zellenblock

Anhand einer tabellarischen Darstellung (Tabelle 6) wird gezeigt, daß die Aufheizspanne des Anoden- bzw. Kathodengases den technischen und wirtschaftlichen Aufwand der peripheren Gastechnik sehr stark beeinflußt. Die Kostenreduktion beim LUVO steht in direktem Zusammenhang mit der Kathodengasstrommenge, denn das eigentliche Problem stellt die Abfuhr der elektrochemischen Verlustwärme dar. Beim Einsatz von Methan hilft die interne endotherme Methanreformierung das Problem lösen. Ist zur Rußvermeidung z.B. eine 50 %ige Vorreformierung vorzusehen, so erhält man die in Tabelle 6 aufgeführten Daten.
Setzte man vollständig reformiertes Erdgas oder entsprechendes "Kohlegas" ein, so wäre der Aufwand für den LUVO und die Kompression etwa zu verdoppeln.

Obwohl der interne Wärmeaustausch im Stack durch Gegenstromführung und Wärmeleitung in den Zellen die Aussagen der tabellierten Fälle etwas entschärfen hilft, spricht viel für die in Fall B und C vorgegebene Temperaturspanne von 200 °C. Während der Temperaturbereich 850 - 1050 °C (Fall C) heutiger Experimentierpraxis mit zugehörigen peripheren Materialproblemen entspricht, stellt der Temperaturbereich 700 - 900 °C (Fall B) eine große Herausforderung für die Elektrochemie der Zellen dar.

In den Abbildungen 11 - 17 sind Parametervariationen zum Fall B enthalten. Daraus geht hervor, daß gegenüber der Variation des Falles A (Abb. 7, 8, 10) die Verdopplung der Temperaturspanne auf 200 °C aus energetischer und wirtschaftlicher Sicht (Peripherie) vorteilhaft ist.

	Fall Aufheizspanne	 K	A 100	B 200	C 200
Vorgabewerte	Zelltemperatur	°C	800 - 900	700 - 900	850 - 1050
	Zellspannung	V	0,7	0,7	0,8
	Brennstoffnutzung	%	80	80	80
	CH_4-Umsatz im Vorreformer	%	50	50	50
Berechnete Werte	El. Bruttowirkungsgrad	%	54	54	62
	Verlust Wechselrichter	%-Punkte	4	4	4
	Aufwand Kompression	%-Punkte	10	5	4
	El. Systemwirkungsgard	%	40	45	54
	Wärmewirkungsgrad	%	39	43	36
	Gesamtnutzunggrad	%	79	88	90
	KOSTENABSCHÄTZUNG FÜR DEN LUFTVORWÄRMER				
	Luft/CH_4	mol/mol	80	36	21
	Temp. LUVO, Frischluft	°C	56 - 800	56 - 700	56 - 850
	Temp. LUVO, Abluft	°C	918 - 209	962 - 384	!1170 - 86
	Mittlere Temperaturdifferenz LUVO (Grädigkeit)	Grad	136	295	380
	Relative Kosten des LUVO		100	16	> 8
	Spezifische Kosten des LUVO	DM/kW_{el}	2200	350	>180

Tabelle 6: Drei Beispiele zum Einfluß vorgegebener Daten für den SOFC-Zellenblock auf Wirkungsgrade und LUVO-Kosten

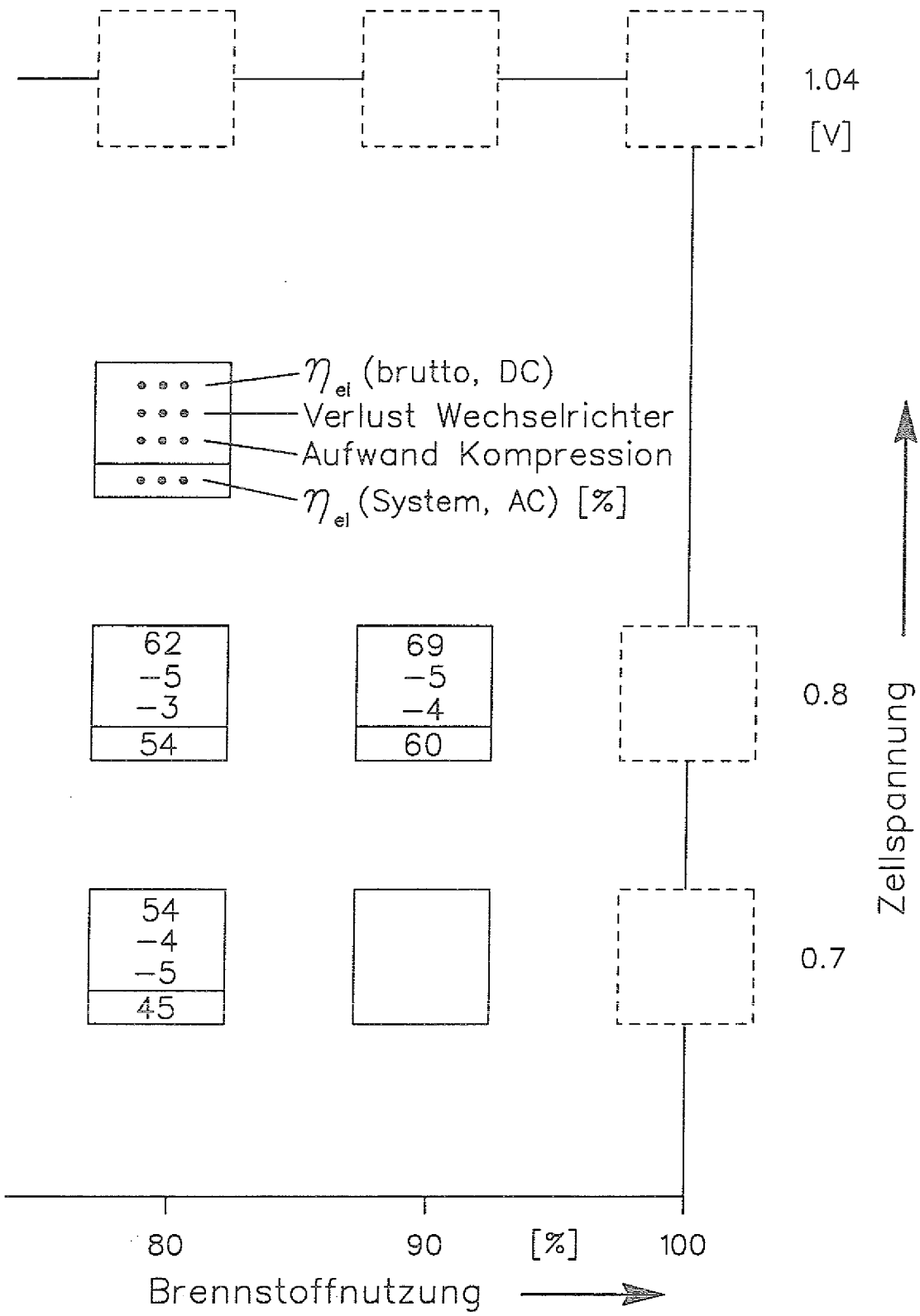


Abb. 11: Elektrische Brutto- und Systemwirkungsgrade
(Δ T (SOFC) = 200 K)

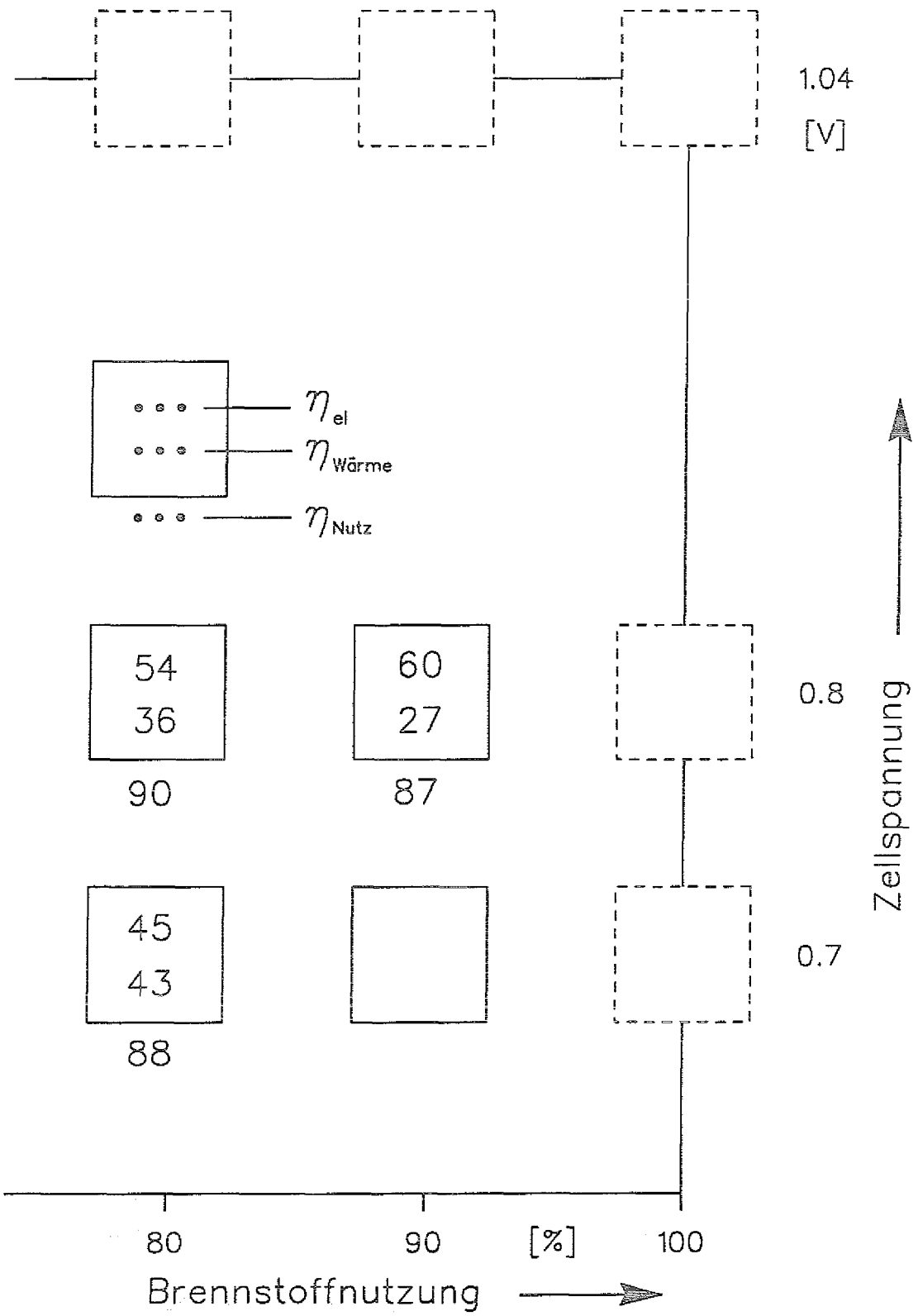


Abb. 12: Systemwirkungsgrade für elektrische Nutzleistung und Nutzwärme (ΔT (SOFC) = 200 K)

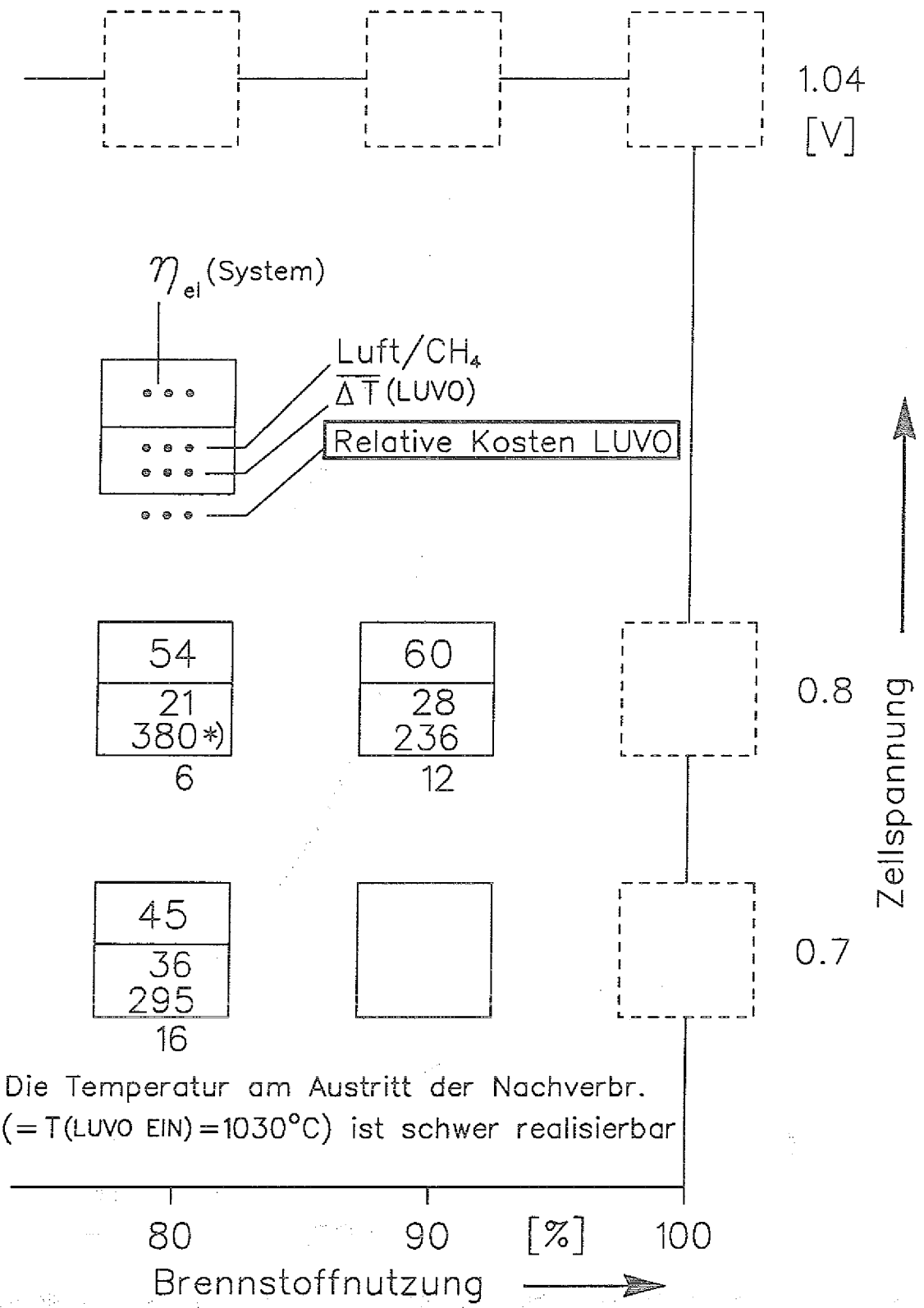


Abb. 13: Elektrische Systemwirkungsgrade und relative Investkosten des LUVO (ΔT (SOFC) = 200 K)

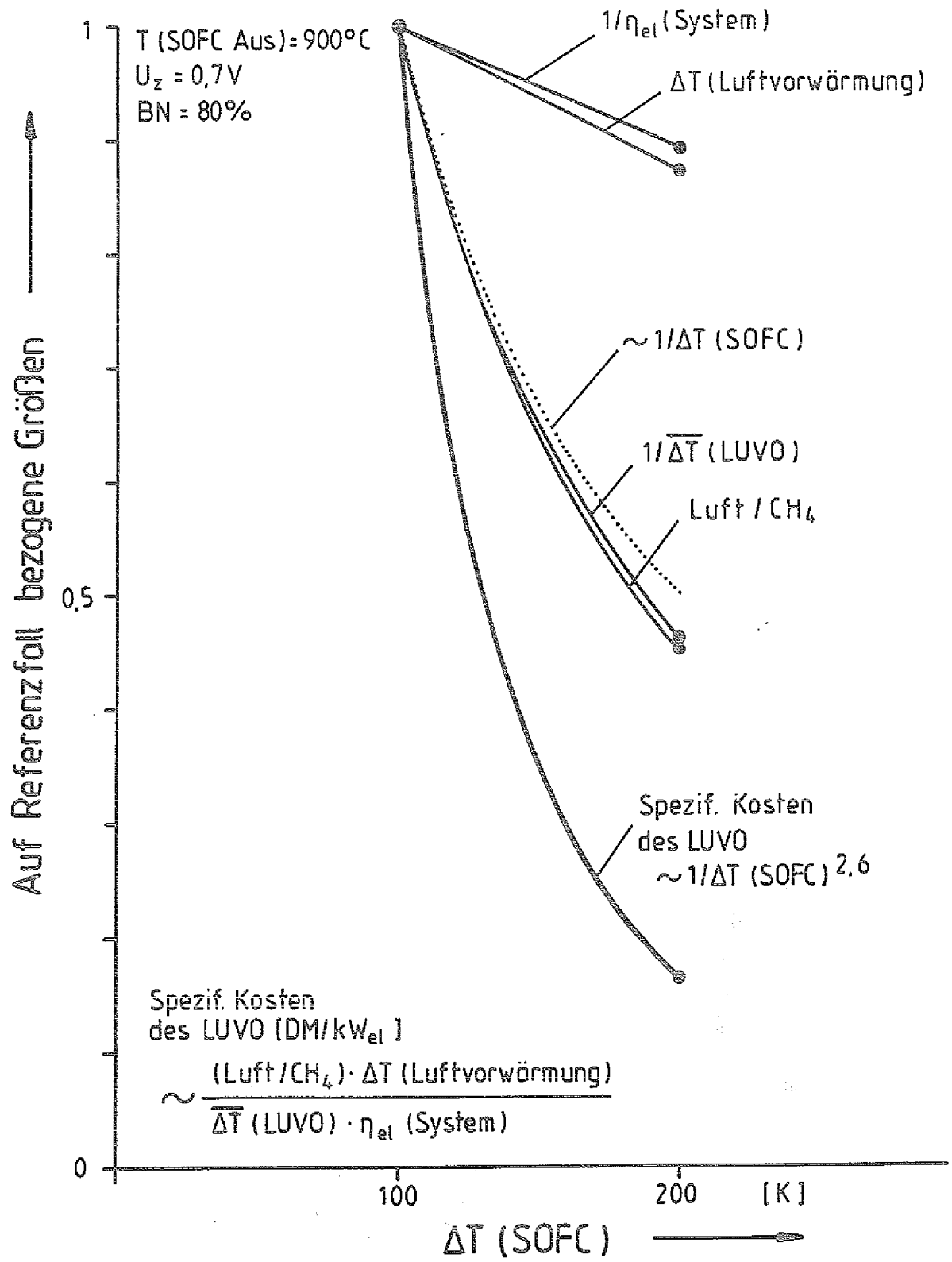


Abb.14: Einfluß der Temperaturspanne der Gasaufheizung in der SOFC auf die Investkosten des Luftvorwärmers

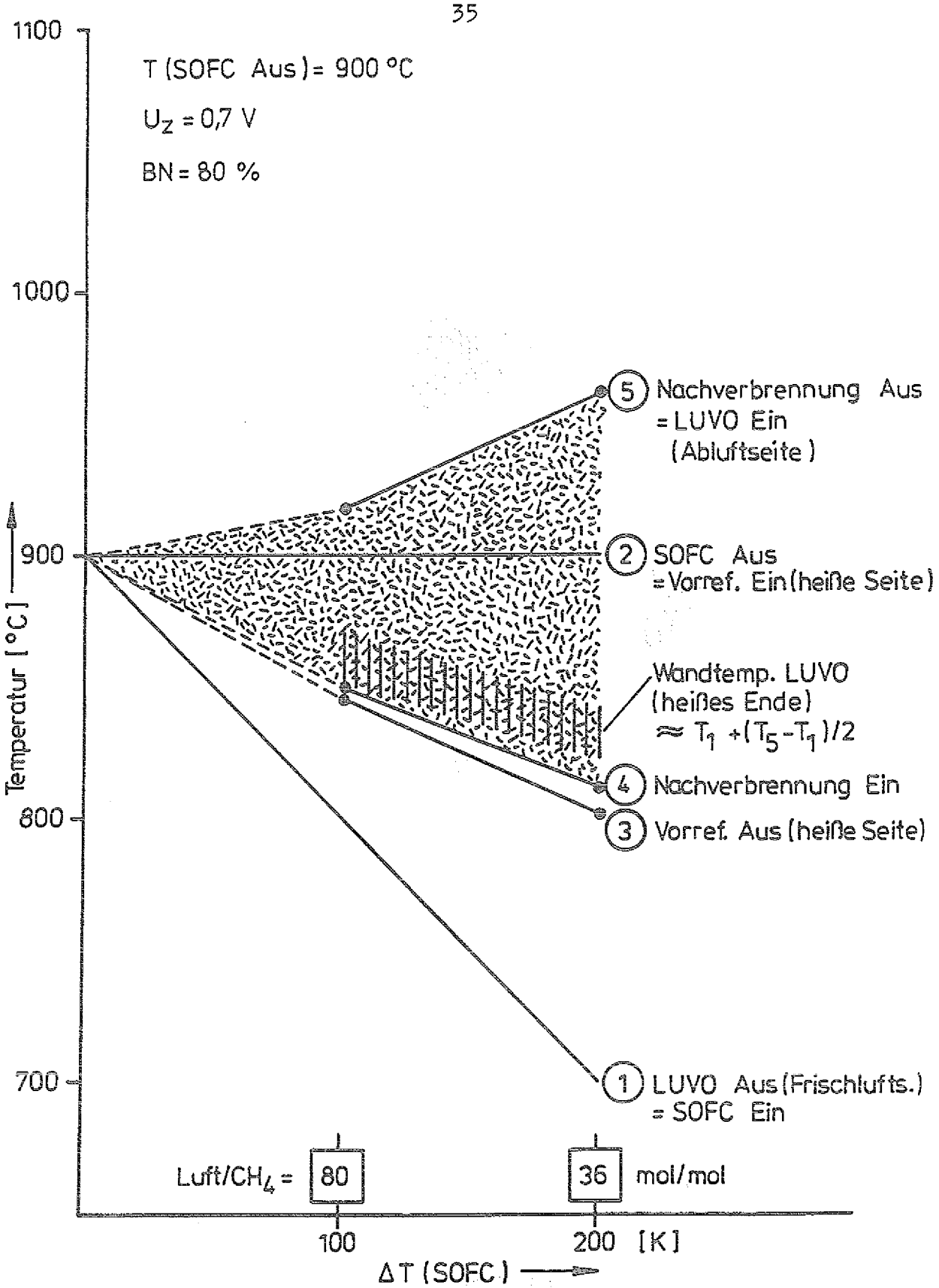


Abb. 15 Einfluß der Temperaturspanne der Gasaufheizung in der SOFC auf die Temperaturen des Kathodengases

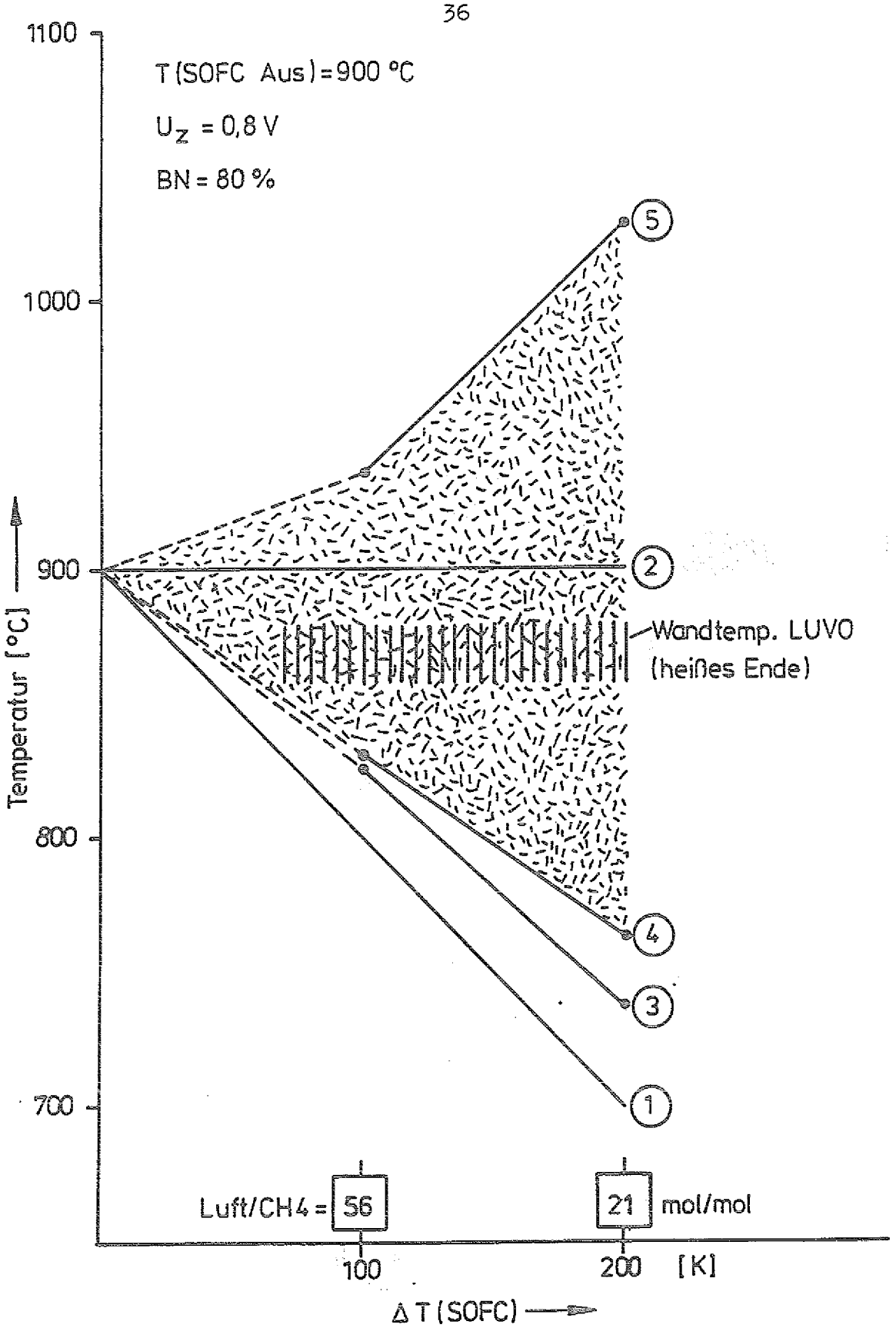


Abb. 16 Einfluß der Temperaturspanne der Gasaufheizung in der SOFC auf die Temperaturen des Kathodengases

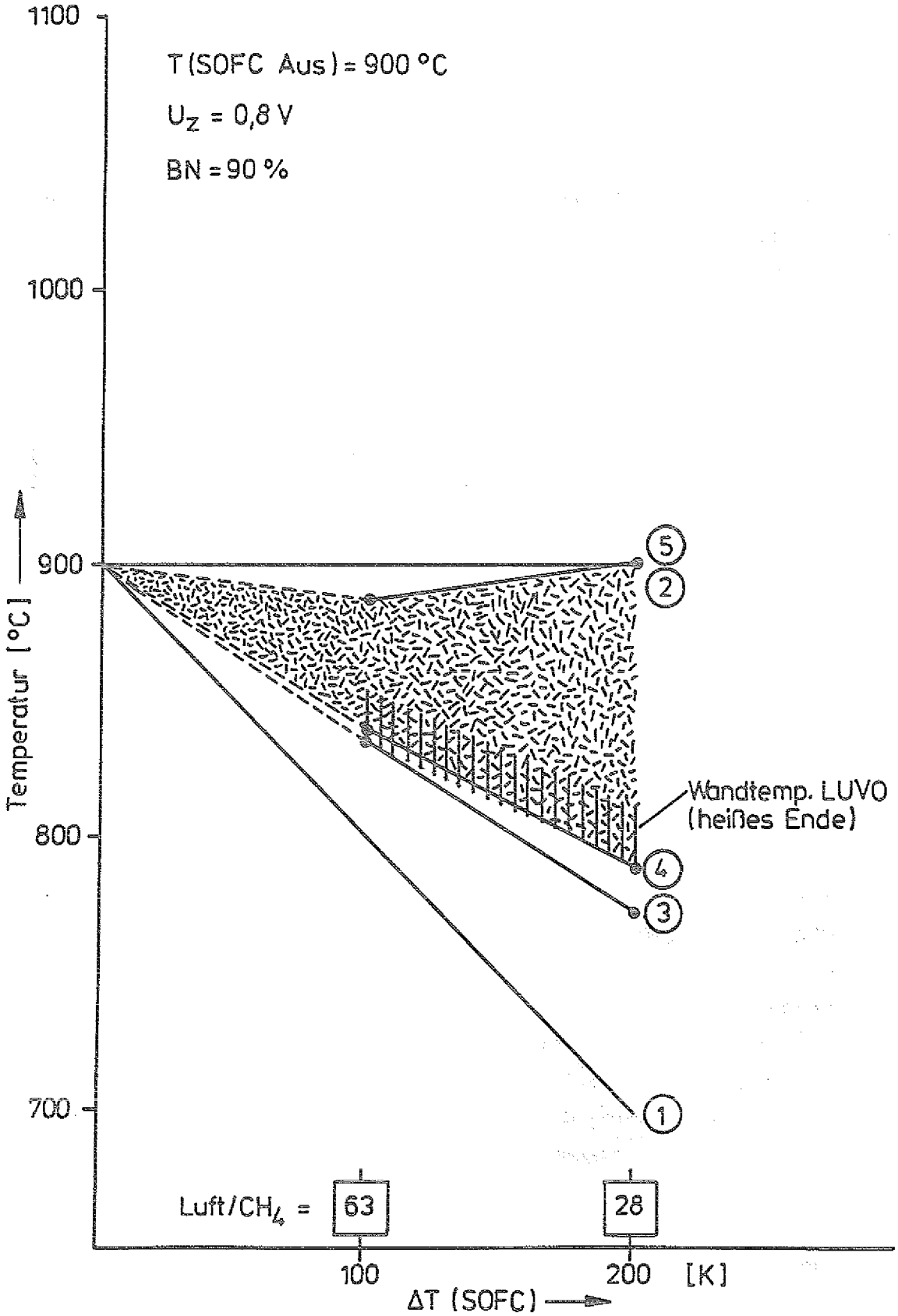


Abb. 17 Einfluß der Temperaturspanne der Gasaufheizung in der SOFC auf die Temperaturen des Kathodengases

9 Zusammenfassung

Ziel der Überlegungen und Modellrechnungen ist, Verbesserungsmöglichkeiten von SOFC-Blockheizkraftwerken in Bezug auf den elektrischen Anlagenwirkungsgrad und die Wirtschaftlichkeit aufzuzeigen. Tab. 7 enthält eine zusammenfassende Übersicht. Aufgeführt sind

- der Hochtemperaturfall (bisherige Auslegung, Fall C)
- Der Referenzfall (niedrigere Zelltemperatur, Fall A) sowie
- 4 Fälle, die dadurch aus dem Referenzfall hervorgehen, daß jweils 1 Parameter so verändert wird, daß der el. Systemwirkungsgrad um 5 %-Punkte von 40 auf 45 % steigt.
- Die letzte Spalte zeigt den Fall, bei dem alle 4 Parameter gleichzeitig verändert wurden.

Die Ergebnisse stellen Herausforderungen an die Elektrochemie und Anlagentechnik dar (Tab. 8).

1) Eine Temperaturabsenkung auf einen Arbeitsbereich zwischen 700 und 900 °C bei gleichzeitiger Forderung nach einer Zellenspannung von 0,8 Volt fordert von der Elektrochemie, alternative Zellkonzepte zu entwickeln.
2) Oben gen. Temperaturabsenkung ermöglicht den Einsatz von warmfesten Stählen im Anlagenbau und damit wirtschaftliche Vorteile.
3) Die o.g. hohe Temperaturspanne von 700 - 900 °C und eine vollständige interne Reformierung würden zu einer wesentlichen Verringerung des Kathodengasstroms führen. Der Aufwand für den Kathodengasvorwärmer (LUVO) und -verdichter würde damit erheblich abnehmen.

Der zugehörige Forschungs- und Entwicklungsbedarf ist erheblich und attraktiv.

Fall		C Hocht.-fall	A Refe-renz-fall	B jeweils 1 Parameter verändert				4 Para-meter verän-dert
Max. Zelltemperatur	°C	1050	900	900	900	900	900	900
CH_4-Umsatz im Vorreformer	%	50	50 →	ca. 0				0
Brennstoffnutzung BN	%	80	80 →		90			90
Aufheizspanne ΔT (SOFC)	Grad	200	100 →			200		200
Zellspannung Uz	V	0,8	0,7 →				0,75	0,75
El. Bruttowirkungsgrad	%	62	54	54	61	54	58	65
ERGEBNISSE DER ANLAGENSIMULATION:								
Luft/CH_4	mol/mol	21	80	50	92	36	68	ca. 24
Mittl. Temp. diff. $\overline{\Delta T}$ (LUVO)	Grad	380	136	194	100	295	147	ca. 300
El. Systemwirkungsgrad	%	54	40	45	45	45	45	ca. 60
Wärmewirkungsgrad	%	36	39	34	31	43	37	ca. 28
Gesamtnutzungsgrad	%	90	79	79	76	88	82	ca. 88
Relative Investkosten LUVO			100	25	139	16	74	ca. 4
Spezif. Investkosten LUVO	DM/kW_{el}		2200	550	3060	350	1630	ca. 88

Tabelle 7: Einfluß der Vorreformierung und der elektrochemischen Zellparameter auf Betriebsparameter und Wirkungsgrade der SOFC-Gesamtanlage und die Investkosten des Luftvorwärmers.

			FuE-Bedarf		
	Erhöhung des el. System-wirk.grades	Senkung der LUVO-Kosten	Verf.technik	Materialwiss.	Elektrochemie Kinetik Ohm., Pol.wid.
Ext.-->Int.Reform.	+	++	●	●	
Erhöhung BN	+	-			
Erhöhung ΔT(SOFC)	+	++		●	●
Erhöhung U_z	++	+			●

Tab.8: Lohnende Parameteränderungen und zugehöriger FuE-Bedarf

10 Literatur

/1/ Rechenauer C.
Modeling of Solid Oxide Fuel Cells with H_2 and CO Conversion and Internal Reforming.
Proceedings of the Symposium on Modeling of Batteries and Fuel Cells, 180th Meeting of the Electrochemical Society, Phoenix/Arizona, October 13 - 17, 1991

/2/ Bauer, Th.
Variation der Prozeßführung für SOFC-Anlagen mit Kraft-Wärme-Kopplung.
Interner Bericht, KFA-IEV, IB-1-92

/3/ Kröger, S.
Konzeption und Auslegung von Hochtemperaturkomponenten im Brennstoffzellen-Kraftwerk.
Diplomarbeit, Fachhochschule Hamburg, 1991

/4/ Fedders, H.; Riensche, E.
Wärmeübergang und Kinetik bei der Methan-Reformierung mit H_2O-CO_2-Gemischen in EVA I
Jül-Spez-419, KFA Jülich GmbH, 1987

ANHANG

Kreislaufverhältnis und Gaszusammensetzungen; ΔT (SOFC) = 100 K

U [V]	Br.st. nutz. [%]	Vorref.-grad [%]	KV mol/mol	Gaszusammen-setzung [mol %]	CH4	H2	CO	H2O	CO2
0,7	80	50	5,2	Ref.Ein	18	10	6	45	21
				Ref.Aus=An.Ein	8	30	14	32	16
				An.Aus	2	12	7	53	25
0,7	90	50	4,3	Ref.Ein	20	4	3	49	24
				Ref.Aus=An.Ein	8	26	13	35	18
				An.Aus	1	5	3	61	30
0,7	90	30	4,4	Ref.Ein	20	4	2	50	24
				Ref.Aus=An.Ein	12	18	9	40	20
				An.Aus	1	5	3	61	30
0,8	80	50	5,1	Ref.Ein	17	13	7	43	20
				Ref.Aus=An.Ein	7	31	15	31	15
				An.Aus	1	16	9	51	24
0,8	90	50	4,3	Ref.Ein	19	7	4	47	23
				Ref.Aus=An.Ein	8	28	13	34	17
				An.Aus	0,1	8	5	58	28

FORSCHUNGSZENTRUM JÜLICH GmbH

KFA

Jül-2787
Juni 1993
ISSN 0944-2952