(19) Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 101 46 943 B4** 2017.05.24

(12) # Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **101 46 943.8**
(22) Anmeldetag: **24.09.2001**
(43) Offenlegungstag: **10.04.2003**
(45) Veröffentlichungstag der Patenterteilung: **24.05.2017**

(51) Int Cl.: ***H01M 8/0438*** (2016.01)
H01M 8/0432 (2016.01)
H01M 8/04492 (2016.01)
H01M 8/04111 (2016.01)
H01M 8/04007 (2016.01)

Innerhalb von neun Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 1 Patentkostengesetz).

(73) Patentinhaber:
General Motors LLC (n. d. Ges. d. Staates Delaware), Detroit, Mich., US

(74) Vertreter:
Manitz Finsterwald Patentanwälte PartmbB, 80336 München, DE

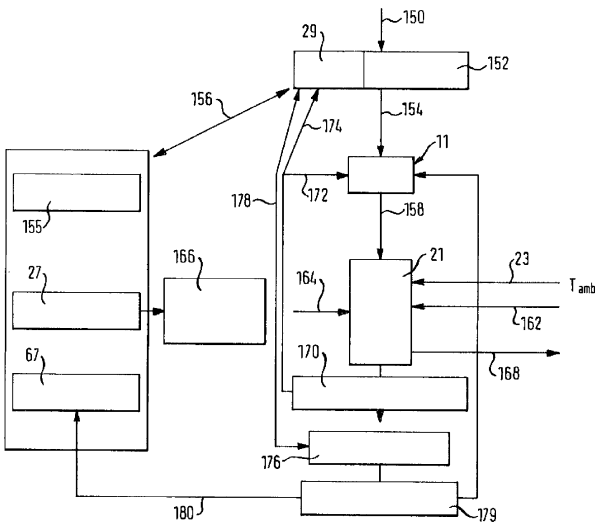
(72) Erfinder:
Formanski, Volker, 65207 Wiesbaden, DE; Herbig, Thomas, 64285 Darmstadt, DE; Wöhr, Martin, Pittsford, N.Y., US

(56) Ermittelter Stand der Technik:

DE	**43 18 818**	**C2**
DE	**100 02 006**	**A1**
DE	**100 21 946**	**A1**
DE	**195 40 824**	**A1**
EP	**0 629 013**	**B1**

(54) Bezeichnung: **Verfahren zum Betrieb eines Brennstoffzellensystems sowie Brennstoffzellensystem**

(57) Hauptanspruch: Verfahren zum Betrieb eines Brennstoffzellensystems mit mehreren zu einem Brennstoffzellenstapel (11) zusammengeschalteten Brennstoffzellen, die der Erzeugung von elektrischer Energie von Kraftfahrzeugen dienen, wobei der Brennstoffzellenstapel (11) einen Anodeneingang (43) für einen Brennstoff und einen Kathodeneingang (71) für Sauerstoff aufweist, der Sauerstoff von einem von einem Elektromotor (65) betriebenen Kompressor (67) geliefert wird, der mit der erzeugten elektrischen Energie betrieben wird, und eine Kühleinrichtung (17, 19, 21, 25, 27) vorgesehen ist, die mittels eines Kühlfluids für den Abtransport von im Brennstoffzellenstapel erzeugter Wärme sorgt und dabei die jeweilige Betriebstemperatur des Brennstoffzellenstapels bestimmt, dadurch gekennzeichnet, daß der Kompressor (67), der Elektromotor (65) und/oder ein diesem zugeordnetes Bauteil (77) entsprechend der Betriebstemperatur oder einem dieser entsprechenden oder proportionalen Wert angesteuert wird, um den vom Luftkompressor erzeugten Betriebsdruck auf einen Wert einzustellen, der beim jeweiligen Betriebspunkt des Brennstoffzellenstapels (11) einen Minimalwert darstellt, der den Betrieb bei diesem Betriebspunkt gewährleistet.



Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zum Betrieb eines Brennstoffzellensystems mit mehreren zu einem Brennstoffzellenstapel zusammen geschalteten Brennstoffzellen, bspw. PEM-Brennstoffzellen, die der Erzeugung von elektrischer Energie bspw. elektrischer Antriebsenergie für ein Kraftfahrzeug dienen, wobei der Brennstoffzellenstapel einen Anodeneingang für einen Brennstoff, wie beispielsweise Wasserstoff und einen Kathodeneingang für Sauerstoff, beispielsweise in der Form von Luftsauerstoff aufweist, der Sauerstoff von einem von einem Elektromotor betriebenen Kompressor geliefert wird, der mit der erzeugten elektrischen Energie betrieben wird und eine Kühleinrichtung vorgesehen ist, die mittels eines Kühlfluids für den Abtransport von im Brennstoffzellenstapel erzeugter Wärme sorgt und dabei die jeweilige Betriebstemperatur des Brennstoffzellenstapels bestimmt. Weiterhin betrifft die Erfindung ein Brennstoffzellensystem, das zur Durchführung des Verfahrens ausgelegt ist.

[0002] Verfahren bzw. Brennstoffzellensysteme dieser allgemeinen Art sind aus vielen Druckschriften bekannt, beispielsweise aus der DE 100 21 946 A1.

[0003] Nach dem heutigen Stand der Technik wird ein Verfahren dieser Art bzw. das entsprechende Brennstoffzellensystem bei fest vorgegebenen Auslegungswerten für die Betriebsparameter, Betriebstemperatur und Betriebsdruck (Systemdruck) betrieben. Vor allem wird der Betriebsdruck in recht engen Grenzen vorgegeben.

[0004] Ferner ist es aus der DE 43 18 818 C2 bekannt, einen Brennstoffzellenstapel bei möglichst hohem Druck mit möglichst geringem Energieaufwand zu betreiben.

[0005] Des Weiteren setzt sich die DE 100 21 946 A1 mit der Feuchtigkeitssteuerung eines Brennstoffzellenstapels auseinander.

[0006] Der vorliegenden Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren bzw. Brennstoffzellensystem der eingangs genannten Art so zu gestalten, daß ein deutlich effizienterer Systembetrieb möglich ist.

[0007] Um diese Aufgabe zu lösen, wird nach einer ersten Variante der Erfindung, bei einem Verfahren der eingangs genannten Art, erfindungsgemäß vorgesehen, daß der Kompressor bzw. der Elektromotor und/oder ein diesem zugeordnetes Bauteil entsprechend der Betriebstemperatur oder einem dieser entsprechenden oder proportionalen Wert angesteuert wird, um den vom Luftkompressor erzeugten Betriebsdruck auf einen Wert einzustellen, der beim jeweiligen Betriebspunkt des Brennstoffzellenstapels einen Minimalwert darstellt, der den Betrieb bei diesem Betriebspunkt gewährleistet.

[0008] Mit dem erfindungsgemäßen Verfahren wird anerkannt, daß bei Anpassung des vom Luftkompressor erzeugten Betriebsdrucks an die jeweils herrschende Betriebstemperatur des Brennstoffzellensystems ein höherer Wirkungsgrad erreicht werden kann. Mit anderen Worten wird der Betriebsdruck so geregelt, daß eine höhere Systemeffizienz erreicht wird.

[0009] Es ist nämlich erfindungsgemäß erkannt worden, daß es möglich ist, den jeweiligen Luftmassenstrom, der für den Betrieb des Brennstoffzellenstapels erforderlich ist, um die jeweils erwünschte Leistung zu erhalten, bei unterschiedlichen Betriebsdrücken zu erreichen und zwar unter Berücksichtigung der jeweils herrschenden Betriebstemperatur sowie anderer festlegbarer Parameter wie die relative Feuchte am Kathoden Ausgang des Brennstoffzellenstapels. Die elektrische Leistung, die erforderlich ist, einen erwünschten Luftmassenstrom bei höheren Betriebsdrücken zu erreichen, liegt deutlich höher als die elektrische Leistung, die erforderlich ist, wenn der gleiche Luftmassenstrom bei einem niedrigeren Betriebsdruck erreicht wird. Da die elektrische Energie, die zum Betrieb des Luftkompressors notwendig ist, eine bedeutende Auswirkung auf die verfügbare Leistung des Brennstoffzellensystems hat, d. h. die Leistung, die z. B. für den elektrischen Antrieb eines Kraftfahrzeuges zur Verfügung steht, das den Brennstoffzellenstapel enthält, kann unter Anwendung der Erfindung durch die Herabsetzung des Betriebsdrucks insgesamt eine höhere Systemeffizienz erreicht werden.

[0010] Um den erwünschten Luftmassenstrom bei verschiedenen Betriebsdrücken erreichen zu können, ist es erforderlich, daß der Luftkompressor bzw. der dem Luftkompressor zugeordneten Antriebsmotor und ein regelbares Drosselventil am Kathodenausgang des Brennstoffzellenstapels ausgelegt und ansteuerbar ist, um den Betriebsdruck unabhängig vom Luftmassenstrom verändern zu können. Es kann auch vom Vorteil sein, den Luftkompressor mit variabler Geometrie, beispielsweise verstellbare Leitschaufeln oder -düsen zu versehen, um den jeweiligen Wirkungsgrad des Kompressors zu optimieren

[0011] Wenn gesagt wird, daß der Luftkompressor oder ein diesem zugeordnetes Bauteil entsprechend der Betriebstemperatur oder einem dieser entsprechenden oder proportionalen Wert angesteuert wird, ist diese Aussage bezüglich der Betriebstemperatur so zu verstehen, daß man eine Referenztemperatur ermittelt, die als Betriebstemperatur verwendet werden kann. Bspw. kann man die Temperatur des Kühlmittels am Kühlmittelausgang des Brennstoffzellenstapels oder die Gasaustrittstemperatur am Katho-

denausgang und/oder am Anodenausgang als die Referenztemperatur nehmen.

[0012] Die Erfindung ist aber nicht beschränkt auf Flüssigkeitskühlung, sondern könnte auch dann angewandt werden, wenn eine Luftkühlung des Brennstoffzellenstapels vorgesehen ist. Auch hier wird die Luftkühlung für eine bestimmte Betriebstemperatur des Brennstoffzellenstapels sorgen.

[0013] Wichtig ist es, einen Referenzwert für den Feuchtehaushalt des Brennstoffzellenstapels zu berücksichtigen. Bspw. kann dieser Referenzwert der Sättigungsgrad am Kathodenausgang sein.

[0014] Als Referenzwert für die Feuchte kann bspw. einen Feuchtekennwert F_K gebildet werden, der durch folgende Gleichung bestimmt ist:

$$F_K = \frac{\left(\dot{N}^{Fl}_{H_2O} + \dot{N}^{Gas}_{H_2O} \right)_{K\text{-aus}}}{\sum_i \dot{N}_{iK\text{-aus}}} \cdot \frac{P_{K\text{-aus}}}{P^*_{Ts}}$$

wo

$\dot{N}^{Fl}_{H_2O}$

der Massenstrom von Wasser in Form von Flüssigkeit am Kathodenausgang (K-aus),

$\dot{N}^{Gas}_{H_2O}$

der Massenstrom von Wasser in Gasform am Kathodenausgang (K-aus),

$$\sum_i \dot{N}_{iK\text{-aus}} = \dot{N}^{Fl}_{H_2O} + \dot{N}^{Gas}_{H_2O} + \dot{N}_{N_2} + \dot{N}_{O_2},$$

wobei

$\dot{N}^{Fl}_{H_2O} + \dot{N}^{Gas}_{H_2O}$

die oben angegebenen Bedeutungen haben,
$\dot{N}_{N_2}$ der Massenstrom von N_2 am Kathodenausgang (K-aus),
$\dot{N}_{O_2}$ der Massenstrom von O_2 am Kathodenausgang (K-aus),
$P_{K\text{-aus}}$ der partielle Druck des Wassers am Kathodenausgang und
P^*_{Ts} der Sättigungspartialdruck von Wasser bei der jeweiligen Betriebstemperatur des Stapels (gleich der herrschenden Temperatur am Kathodenausgang) ist.

[0015] Man könnte auch einen Referenzwert in Betracht ziehen, der auch die vorhanden Feuchte auf der Anodenseite miteinbezieht. Dies ist im Prinzip nur dann empfehelenswert wenn Wasser die Anodenseite mit den Anodenabgassen verläßt.

[0016] Der Referenzwert für die Feuchte des Brennstoffzellenstapels soll nämlich zur Sicherstellung eines schadenfreien Betriebs der Brennstoffzellen innerhalb von gewissen Grenzen gehalten werden, beispielsweise 120% +/– 10%, und es ist nicht erforderlich, höhere Werte vorzusehen. Es gibt aber eine eindeutige Korrelation zwischen dem jeweiligen Betriebsdruck, dem Referenzwert der relativen Feuchte und der Betriebstemperatur.

[0017] Es ist erfindungsgemäß möglich und sogar bevorzugt, einen bestimmten Wert für den Referenzwert für die relative Feuchte, wie beispielsweise 120% festzulegen und bei der Auswahl des jeweiligen Betriebsdruckes die Kurvenfamilien zu berücksichtigen, die für eine bestimmte Auslegung des Brennstoffzellenstapels bzw. des Brennstoffzellenstapeltyps die Verknüpfungen zwischen dem jeweils herrschenden Betriebsdrucken und den Feuchtekennwerten wiedergeben. Dabei muß berücksichtigt werden, daß diese Kurven nicht nur temperaturabhängig sind, sondern auch die Stöchiometrie an der Anode und an der Kathode und die relative Feuchte am Anodeneingang und die relative Feuchte am Kathodeneingang berücksichtigen.

[0018] Die Stöchiometrie an der Anode, d. h. das Verhältnis zwischen der anodenseitig zugeführten Wasserstoffmenge zur dort umgesetzten Wasserstoffmenge, liegt häufig aufgrund der Auslegung des jeweiligen Brennstoffzellenstapels bzw. des Brennstoffzellenstapeltyps bei einem zumindest im Wesentlichen konstanten Wert von beispielsweise etwa 2,0. Dies bedeutet allerdings nicht, daß der Massenstrom des zugeführten Wasserstoffs konstant bleibt, sondern dieser Massenstrom wird von der Systemsteuerung entsprechend dem jeweiligen Leistungsbedarf geändert. Sollte aufgrund einer bestimmten Auslegung des Brennstoffzellenstapels die Stöchiometrie an der Anode nicht bei einem konstanten Wert liegen, so muß die Variation der Stöchiometrie berücksichtigt werden.

[0019] Die Stöchiometrie an der Kathode, d. h. das Verhältnis der der Kathode zugeführten Sauerstoffmenge zur umgesetzten Sauerstoffmenge, kann bspw. auch bei 2.0 liegen. Dies bedeutet allerdings nicht, daß der Massenstrom des zugeführten Sauerstoffs konstant bleibt, sondern dieser Massenstrom wird von der Systemsteuerung entsprechend dem jeweiligen Leistungsbedarf geändert. Sollte aufgrund einer bestimmten Auslegung des Brennstoffzellenstapels die Stöchiometrie an der Kathode nicht bei einem konstanten Wert liegen, so muß die Variation der Stöchiometrie berücksichtigt werden.

[0020] Die relative Feuchte am Kathodeneingang die den jeweiligen Betrag des Feuchtekennwerts beeinflußt und für die Auswahl der jeweiligen Kurvenfamilie für die Regelung des jeweiligen Betriebsdrucks maßgebend ist, um den erwünschten Feuchtekennwert F_K zu erreichen, variiert je nach der relativen Feuchte der vom Luftkompressor angesaugten Umgebungsluft, kann aber auch durch Befeuchtungseinrichtungen beeinflußt werden, die manchmal vorgesehen sind, um eine ausreichende relative Feuchte auf der Kathodenseite bzw. der Anodenseite des Brennstoffzellenstapels sicherzustellen.

[0021] Die Verknüpfungen zwischen dem Referenzwert für die Feuchte F_K, dem Betriebsdruck, der Betriebstemperatur und der relative Feuchte am Kathodeneingang und am Anodeneingang sind eindeutig, so daß sie es erlauben, beispielsweise durch in einem Datenspeicher abgelegten Kennfelder, bei der jeweiligen Betriebstemperatur des Brennstoffzellenstapels stets den optimalen Betriebsdruck auszuwählen, der für den Betrieb geeignet ist und hierdurch das Brennstoffzellenstapel stets am effizientesten zu betreiben.

[0022] Besonders bevorzugte Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung sind den Patentansprüchen sowie der weiteren Beschreibung zu entnehmen.

[0023] Die Erfindung wird nachfolgend rein beispielhaft näher erläutert anhand von Zeichnungen, die die Grundauslegung eines möglichen Brennstoffzellensystems sowie Überlegungen zu der Auslegung eines solchen Systems und die erfindungsgemäße Lösung im Einzelnen angeben. In der Zeichnung zeigen:

[0024] **Fig.** 1 ein Blockschaltbild eines erfindungsgemäßen Brennstoffzellensystems,

[0025] **Fig.** 2 ein Blockschaltbild, um die Arbeitsweise des erfindungsgemäßen Verfahrens zum Betrieb eines Brennstoffzellensystems näher zu erläutern,

[0026] **Fig.** 3 ein Diagramm zur Darstellung der Feuchtebilanz einer Brennstoffzelle in Abhängigkeit der Betriebsparameter Druck und der Stöchiometrie an der Kathode (auch K-Luftzahl bzw. Kathodenstöchiometrie genannt),

[0027] **Fig.** 4 ein Diagramm zur Darstellung der Feuchtebilanz einer Brennstoffzelle in Abhängigkeit der Betriebsparameter Temperatur und der Stöchiometrie an der Kathode (auch K-Luftzahl bzw. Kathodenstöchiometrie genannt),

[0028] **Fig.** 5 ein Diagramm zur Darstellung der Feuchtebilanz einer Brennstoffzelle in Abhängigkeit der Betriebsparameter Druck und Temperatur,

[0029] **Fig.** 6 ein Diagramm zur Darstellung der Kompressorleistung eines Kompressors in Abhängigkeit des Betriebsdruckes und des Luftmassenstroms,

[0030] **Fig.** 7 ein Diagramm zur Darstellung der normierten Brennstoffzellspannung in Bezug auf verschiedene relative Stromdichten bei Betriebsdrücken von 1,5 Bar bis 3,0 Bar,

[0031] **Fig.** 8 ein Diagramm zur Darstellung der normierten Brennstoffzellspannung in Bezug auf verschiedene relative Stromdichten bei 60°C und bei 80°C Betriebstemperatur,

[0032] **Fig.** 9 ein Diagramm zur Darstellung der Fahrzeugkühlleistung in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur bei verschiedenen Systemtemperaturen,

[0033] **Fig.** 10 eine Wiederholung des Diagramms der **Fig.** 5, jedoch mit einer eingetragenen Linie zur Ermittlung des jeweils angebrachten Betriebsdrucks, bei einem erwünschten F_K-Wert,

[0034] **Fig.** 11 ein Diagramm zur Darstellung von Systemwerten bei unterschiedlichen Betriebsparametern, und

[0035] **Fig.** 12 ein Diagramm zur Darstellung der Systemeffizienz P_{netto}/P_{H2} für den Hochdruck-/Hochtemperaturfall (80°; 290 kPa) und für den Niederdruck-/Niedertemperaturfall (60°; 130 kPa).

[0036] Die **Fig.** 1 zeigt nunmehr eine schematische Darstellung eines in einem Brennstoffzellensystem integrierten Brennstoffzellenstapels **11**, der wiederum aus mehreren einzelnen Brennstoffzellen, die elektrisch in Reihe und/oder parallel geschaltet sind, besteht. Die Anodenseiten von allen einzelnen Brennstoffzellen des Stapels **11** sind in an sich bekannterweise aneinander geschlossen, wobei die sich hieraus ergebende Anodenseite des Stapels mit dem Bezugszeichen **13** bezeichnet ist. In gleicher Weise sind die Kathodenseiten aller Brennstoffzellen des Stapels in an sich bekannterweise aneinander geschlossen und die Kathodenseite des Brennstoffzellenstapels ist mit dem Bezugszeichen **15** in **Fig.** 1 gekennzeichnet. Die Schleife **17** in **Fig.** 1 deutet auf eine Flüssigkeitskühlung, die im Stapel **11** eingebaut ist und ebenfalls an sich bekannt ist. Diese Kühlschleife ist völlig getrennt von der Anodenseite **13** und Kathodenseite **15** und stellt eine geschlossene Kühlschleife dar, mit Pumpe **19** sowie Kühler **21**. Der Kühler **21** wird vorzugsweise beim Einbau in einem Kraftfahrzeug so angeordnet, daß er von der Umgebungsluft entsprechend dem Pfeil **23** durchströmt wird, um die Kühlflüssigkeit abzukühlen, wobei die Durchströmung des Kühlers **21** von einem von einem elektrischen Motor **25** antreibbaren Gebläse **27** unterstützt wird. Der elektrische Motor **25** ist in seiner Geschwin-

digkeit über eine Leitung **27** von einer Steuerung **29** ansteuerbar, d. h. die Kühlleistung kann von der Systemsteuerung **29** beeinflußt werden. Das Bezugszeichen **31** deutet auf einen Temperaturfühler hin, der über die Leitung **33** an die Systemsteuerung **29** angeschlossen ist. Die Bezugszeichen **31'** und **31"** zeigen, daß die Betriebstemperatur des Brennstoffzellenstapels **11** nicht nur mittels des Temperaturfühlers **31** am Kühlmittelausgang, sondern mittels Temperaturfühler am Kathodenausgang bzw. am Anodenausgang gemessen werden kann, wobei der verwendete Temperaturfühler stets an der Systemsteuerung **29** über eine entsprechende Leitung angeschlossen ist.

[0037] Auf der Anodenseite **13** des Brennstoffzellenstapels **11** wird Wasserstoff H_2 von einem Vorrat **35** über ein abschaltbares Drosselventil **37** und eine Leitung **39** in den Anodenkreislauf **13** eingespeist. Das Ventil **37** wird ebenfalls an die Systemsteuerung **29** angeschlossen und diese kann die Menge des zugeführten Wasserstoffs durch elektrische Ansteuerung des Ventils **37** über die Leitung **41** regeln. Der Wasserstoff geht somit beim Eingang **43** in den Brennstoffzellenstapel hinein und die Anodenabgase, die u. a. nicht verbrauchten Wasserstoff und Wasser enthalten, treten bei **45** aus dem Brennstoffzellenstapel heraus. Das Wasser wird in einem Sammelbehälter **47** gesammelt und das gesammelte Wasser kann über ein Ventil **48** wahlweise einem Befeuchter **49** für den H_2-Stromzugeführt werden und/oder kontinuierlich oder diskontinuierlich abgelassen werden. Ein Teil des austretenden Wasserstoffs wird in diesem Beispiel mittels der Pumpe **51** dem Eingang **43** wieder zugeführt. Eine solche Rezirkulation ist aber nicht erforderlich. Ein Restanteil der anodenseitigen Abgase wird über die Leitung **53** einer Verbrennungseinrichtung **55** zusammen mit Luft von einem Gebläse **57** zugeführt und dort zu Wasser verbrannt, das über die Leitung **59** den Stapel verläßt.

[0038] Die Verbrennungseinrichtung **55** muß nicht ständig in Betrieb sein und kann vom Anodenkreislauf **13** mittels des abschaltbaren Drossel- und/oder Auslaßventils **61** isoliert werden.

[0039] Auf der Kathodenseite **15** des Brennstoffzellenstapels **11** wird Luft, die über eine Leitung **63** angesaugt wird, von einem vom Motor **65** angetriebenen Kompressor **67** verdichtet und über die Leitung **69** dem Kathodeneingang **71** des Brennstoffzellenstapels **11** zugeführt. Die Kathodenabgase, die hauptsächlich aus Wasser, Stickstoff und einem Restanteil von Sauerstoff bestehen, treten aus dem Kathodenausgang **73** des Brennstoffzellenstapels **11** heraus. Das in den Kathodenabgasen in Form von Flüssigkeit enthaltene Wasser wird beispielsweise im Behälter **75** gesammelt und die restlichen Abgase einschließlich Wasser in Gasform über das Drosselventil **77** und die Leitung **79** der Umgebung zugeführt. Das im Behälter **75** gesammelte Wasser kann über ein Ventil **80** entweder abgelassen oder einem Befeuchter **81** für den Luftstrom zugeführt werden.

[0040] Der Motor **65** ist über die Leitung **83** an die Systemsteuerung **29** angeschlossen. Durch die Ansteuerung des Motors **65** über die Leitung **83** kann die Systemsteuerung **29** die Kompressorleistung, vor allem die Drehgeschwindigkeit des Luftkompressors **67** und daher den von diesem gelieferten Luftmassenstrom beeinflussen.

[0041] Das Ventil **77**, das als elektrisch abschaltbares Drosselventil ausgebildet ist, ist an die Steuerung **29** über die Leitung **85** angeschlossen. Das Ventil **77** macht es möglich, je nach dessen Öffnungsgrad den Betriebsdruck unabhängig vom Luftmassenstrom einzustellen. Ergänzend hierzu, kann ein Luftkompressor **67** mit Bauteilen variabler Geometrie verwendet werden, wie beispielsweise verstellbare Leitschaufeln oder -düsen, wobei diese Bauteile (nicht gezeigt) bzw. ein diesen zugeordneter Stellmotor (ebenfalls nicht gezeigt) von der Steuerung **29** über die Leitung **87** elektrisch angesteuert und verstellt werden können.

[0042] Alle Ventile wie **61** und **80** sind über entsprechende Leitungen (nur als kurze Linien angedeutet) an die Systemsteuerung **29** angeschlossen und dies gilt auch für andere steuerbare Bauteile wie die Kühlmittelpumpe **19** den Brenner **55** und gegebenenfalls die Rezirkulationspumpe **51**.

[0043] Die Bezugszeichen **89**, **91** deuten auf Feuchtigkeitssensoren hin, die auf der Kathodenseite bzw. der Anodenseite vorgesehen werden und über jeweilige Leitungen **93** bzw. **95** an die Systemsteuerung **29** angeschlossen sind, um die relative Feuchte am Kathoden- bzw. am Anodeneingang messen zu können.

[0044] Es soll zum Ausdruck gebracht werden, daß die **Fig.** 1 nur eine Grundauslegung eines Brennstoffzellensystems **11** mit den zugeordneten Bauteilen angibt. Es sind in der Praxis sehr viele verschiedene Varianten möglich.

[0045] Nachdem die Grundzüge der Konstruktion eines Brennstoffzellenstapels bzw. eines diesen enthaltenden Brennstoffzellensystems gemäß **Fig.** 1 erläutert worden sind, werden nunmehr Überlegungen zu der erfindungsgemäßen Auslegung eines Brennstoffzellensystems gemacht.

[0046] Ein Brennstoffzellensystem dient bekanntlich zur Erzeugung von elektrischer Leistung. Eine Hauptkomponente des Brennstoffzellensystems ist der Brennstoffzellenstapel **11** (Stack), der auf der Anodenseite **13** mit Brennstoff (vom H_2-Vorrat **35**). Neben der Brenngasversorgung beinhaltet das Brennstoffzellensystem auch die Luftversorgung auf der Kathodenseite **15**, die als Hauptkomponente den ge-

eigneten Luftkompressor **67** hat. Der Luftkompressor **67** versorgt den Brennstoffzellenstapel **11** mit dem erforderlichen Luftmassenstrom bei dem erforderlichen Gasdruck. Der Luftkompressor **67** wird in der Regel vom Motor **65** elektrisch angetrieben und verbraucht dabei elektrische Leistung, die letztendlich vom Brennstoffzellenstapel **11** geliefert wird. Die erforderliche Kompressorleistung wird neben dem Kompressorwirkungsgrad im wesentlichen vom Luftmassenstrom und vom Druckverhältnis der Kompression bestimmt. Demnach saute ein Brennstoffzellensystem mit einem effizienten Luftkompressor **67** mit einem möglichst kleinen Luftmassenstrom und auf einem möglichst geringen Druckniveau betrieben werden, um den internen Verbrauch an elektrischer Leistung im Brennstoffzellensystem möglichst gering zu halten und damit eine hohe Effizienz des Gesamtsystems erreicht werden kann.

[0047] Die nachfolgend beschriebene Systembetriebsweise soll zu einer Optimierung des Betriebsdruckniveaus beitragen.

[0048] Die Anforderungen der PEM-Brennstoffzellen bezüglich der Gaskonditionierung auf der Kathoden- und Anodenseite sind je nach Design und Aufbau der einzelnen Brennstoffzellen unterschiedlich und in der Regel komplex.

[0049] Hauptparameter, die für einen stabilen Betrieb einer PEM-Brennstoffzelle definiert sein müssen, sind die Gasstöchiometrie, die Gasfeuchte, der Gasdruck und die Stapelbetriebstemperatur.

[0050] Durch die Gasstöchiometrie wird der erforderliche Gasmassenstrom vorgegeben, mit dem die Brennstoffzelle je nach Lastfall betrieben wird. Auch wird durch die Gasstöchiometrie die Konzentrationsverteilung der Reaktanden innerhalb des Stapels vorgegeben.

[0051] Bei Verwendung der jeweils eingesetzten Brennstoffzellenmembrane und der jeweiligen Brennstoffzellenauslegung, muß die Gasfeuchte bestimmte Grenzwerte einhalten, um eine ausreichende Lebensdauer der Membran sowie eine gute Leitfähigkeit der Membran zu haben.

[0052] Die Wasserbilanz um den gesamten Stapel wird jedoch neben den Eintrittsfeuchten durch die Betriebsparameter Druck, Temperatur und Gasstöchiometrie bestimmt, wie die **Fig.** 3 bis **Fig.** 5 zeigen.

[0053] Die **Fig.** 3 zeigt für drei verschiedene Werte des Betriebsdruckes, d. h. den Druck am Eingang des Brennstoffzellenstapels **11** (auch Systemdruck genannt), wie sich die relative Feuchte am Ausgang des Brennstoffzellenstapels mit der Stöchiometrie an der Kathode (K-Luftzahl) bei einer konstanten Betriebstemperatur von in diesem Beispiel 80°C, bei einer Stöchiometrie an der Anode von 2,0 und bei einer angenommenen relativen Feuchte von 50% am anodenseitigen Eingang des Brennstoffzellenstapels **11** und ebenfalls von 50% am kathodenseitigen Eingang des Brennstoffzellenstapels **11** verhält.

[0054] Der Pfeil **110** zeigt die Richtung an, in der sich die Kurven bei höher werdenden Betriebsdrücken verschieben.

[0055] Man sieht somit, daß mit niedrigeren Stöchiometrien an der Kathode der Feuchtekennwert F_K am Ausgang des Brennstoffzellenstapels steigt und daß diese Werte vom jeweiligen Betriebsdruck abhängig sind.

[0056] Es wurden nur drei repräsentative Kurven gezeigt – es gibt aber in der Praxis für jeden Betriebsdruck eine entsprechende Kurve und die genaue Form der Kurven ändern sich je nach Betriebstemperatur des Brennstoffzellenstapels, je nach Stöchiometrie an der Anode und je nach den Eingangswerten der relativen Feuchte auf der Anoden- und Kathodenseite.

[0057] **Fig.** 4 zeigt wie die relative Feuchte am Ausgang des Brennstoffzellenstapels **11** sich in Abhängigkeit von der Kathodenstöchiometrie bei verschiedenen Betriebstemperaturen des Brennstoffzellenstapels variiert, hier für drei verschiedene Betriebstemperaturen von 60, 70 und 80°C. Der Pfeil **112** zeigt die Richtung an der sich die Kurven bei steigenden Stapeltemperaturen, d. h. Betriebstemperaturen verschieben. Die hier gezeigten Kurven, die rein beispielhaft angegeben sind, berücksichtigen in diesem Beispiel beispielsweise einen Betriebsdruck von 250 kPa, eine Stöchiometrie der Anode von 2,0 und wiederum relative Feuchtewerte von 50% am Anoden- und Kathodeneingang. Auch hier gibt es eine ganze Familie von Kurven, die für den jeweiligen Brennstoffzellenstapel bzw. Brennstoffzellenstapeltyp ermittelt bzw. festgelegt werden müssen. Man sieht aber, daß die relativen Feuchtewerte mit niedriger Betriebstemperatur höher werden.

[0058] **Fig.** 5 dagegen zeigt die relative Feuchte am Ausgang des gesamten Stapels als Funktion des Betriebsdruckes des Brennstoffzellenstapels – hier in bar angegeben – und zwar in Form von drei verschiedenen Kurven, die für drei unterschiedliche Betriebstemperaturen des Brennstoffzellenstapels **11** von 60, 70 und 80°C stellvertretend sind.

[0059] Diese Kurven, die hier rein beispielhaft angegeben sind, berücksichtigen eine Stöchiometrie an der Anode von 2,0, eine Stöchiometrie an der Kathode von 2,0 und eine relative Feuchte von 50% am anoden- bzw. kathodenseitigen Eingang des Brennstoffzellenstapels. Auch hier gibt es eine ganze Familie von entsprechenden Kurven, die für andere Be-

triebswerte gelten und die für den jeweiligen Brennstoffzellenstapel bzw. den jeweiligen Brennstoffzellenstapeltyp ermittelt bzw. festgelegt werden müssen.

[0060] Der Pfeil **114** zeigt die Richtung an, in der sich die Kurven bei steigender Betriebstemperatur verschieben.

[0061] Der Betriebsdruck, unter dem der Stapel betrieben wird, hat zum einen Einfluß auf die Wasserbilanz des Stapels, zum anderen werden durch den Gasdruck und die Gaskonzentrationen der Reaktanden die Partialdrücke bestimmt, die auf die Effizienz des Brennstoffzellenstapels Einfluß haben, wie in **Fig.** 7 dargestellt, die später näher erläutert wird. Darüber hinaus beeinflußt der Betriebsdruck wesentlich den internen Systemverbrauch an elektrischer Leistung, die dem Kompressor **67** zugeführt werden muß, wobei **Fig.** 6 die prinzipielle Abhängigkeit zeigt.

[0062] **Fig.** 6 zeigt nämlich rein beispielhaft Kurven für die erforderliche Kompressorleistung, um bestimmte Luftmassenstromwerte in Gramm pro Sekunde zu erreichen bei vier verschiedenen Betriebsdrücken, die in diesem Beispiel mit 1,5 bar, 2,0 bar, 2,5 bar und 3,0 bar angegeben sind. Der Pfeil **116** zeigt die Richtung an, in der sich die Kurven bei steigendem Betriebsdruck verschieben. Man sieht, daß für einen bestimmten Luftmassenstrom die erforderliche Kompressorleistung bei steigendem Betriebsdruck deutlich ansteigt. Beispielsweise ist ersichtlich, daß für einen Luftmassenstrom von 40 g/Sek bei einem Betriebsdruck von 1,5 Bar eine Kompressorleistung von etwa 2,5 kW erforderlich ist, während bei dem doppelten Betriebsdruck von 3,0 Bar die erforderliche Kompressorleistung auf etwa 9 kW gestiegen. ist.

[0063] Aus **Fig.** 7 ist ersichtlich, daß bei höheren Betriebsdrücken eines Brennstoffzellenstapels **11** für eine bestimmte Stromdichte höhere Zellenausgangsspannungen erreichbar sind. Der Pfeil **118** zeigt wie sich die Kurven bei steigenden Betriebsdrücken verschieben. Aus einer Betrachtung der **Fig.** 7 könnte man geneigt sein, den Stapel bei höheren Betriebsdrucken zu betreiben, da man hierdurch eine höhere Brennstoffzellenleistungsausbeute erreichen könnte.

[0064] **Fig.** 8 zeigt wie die Ausgangsspannung einer einzelnen PEM-Brennstoffzelle mit der Stromdichte variiert, und zwar für zwei verschiedene Betriebstemperaturen von 80°C und 60°C. Für eine bestimmte Stromdichte kann bei einer höheren Betriebstemperatur eine höhere Zellspannung erreicht werden.

[0065] Die Stapeltemperatur hat neben dem Einfluß auf die Effizienz der Brennstoffzelle, der in **Fig.** 8 dargestellt ist, auch einen wesentlichen Einfluß auf das thermische Subsystem, das zur Kühlung des Gesamtsystems bzw. im Wesentlichen zur Abfuhr der im Stapel produzierten Wärme erforderlich ist. Für die Stapeltemperatur sowie für den Gasdruck gab es bisher bestimmte Sollwerte, die für den gesamten Betriebsbereich des Brennstoffzellensystems gültig sind. Die Regelung des thermischen Subsystems muß demnach die definierte Temperatur des Stapels sicherstellen, wobei Einschränkungen durch die Auslegung des thermischen Subsystems gegeben sind.

[0066] Ein Brennstoffzellensystem wird nach heutigem Stand der Technik bei fest vorgegebenen Auslegungswerten für die Betriebstemperatur und den Gasdruck auf der Kathodenseite betrieben. Vor allem wird dieser Gasdruck in recht engen Grenzen vorgegeben. Diese Auslegung ignoriert aber, daß unter bestimmten Betriebsbedingungen entsprechend angepaßte Betriebsdrücke einen wesentlich effizienteren Systembetrieb ermöglichen würden.

[0067] Das Kühlsystem eines Brennstoffzellenfahrzeugs ist eine wichtige Schnittstelle des Brennstoffzellensystems zur Umgebung. Je nach Umgebungsbedingungen, Lufttemperatur, Luftdruck und Luftfeuchte kann über das Kühlsystem des Fahrzeugs entsprechende Kühlleistungen an die Umgebung abgeführt werden. Wichtigste Einflußgröße ist hierbei die Umgebungstemperatur und der Luftdurchsatz (abhängig von Fahrzeuggeschwindigkeit und Lüfterleistung). Zusammen mit der Temperatur des zu kühlenden Kühlmediums geht die Umgebungstemperatur in die Kenngröße Q/ITD (Q = Wärmemenge; ITD = inlet temperature difference = Eingangstemperaturdifferenz) ein, die die Kapazität des Kühlsystems beschreibt. Die Kenngröße Q/ITD wird beschrieben durch den Quotient der maximalen Kühlleistung und der Differenz der Umgebungstemperatur zur Kühlmitteltemperatur des in das Kühlsystem eintretenden Kühlmediums.

$$\frac{Q}{ITD} = \frac{Q_{Kühl}}{T_{Kühl\ ein} - T_{Umg.}}$$

[0068] Die Auslegung des Kühlsystems für ein Fahrzeug wird in der Regel durch die Fahrzeuganforderungen bestimmt. Insbesondere bestimmen die maximale Steigfähigkeit (geringe Fahrzeuggeschwindigkeit bei maximaler Antriebsleistung), maximale Anhängerlast und maximale Umgebungstemperatur die erforderliche Leistung des Kühlsystems und somit die Q/ITD-Kennzahl. Des weiteren kann die Annahme getroffen werden, dass die Kühlmitteltemperatur, die in das Kühlsystem eintritt und in **Fig.** 1 vom Temperaturfühler **99** an der Stelle des Austritts des Kühlmittels aus dem Brennstoffzellenstapel gemessen wird, der Systemtemperatur des Brennstoffzellensystems entspricht. Daraus ergibt sich mit diesem Zusammenhang, dass mit steigender Systemtemperatur bei gleicher Umgebungstemperatur, bzw. mit sin-

kender Umgebungstemperatur und gleichbleibender Systemtemperatur, eine größere Wärmemenge an die Umgebung abgegeben werden kann. **Fig.** 9 zeigt die Abhängigkeit der Kühlleistung in einem Fahrzeug in Abhängigkeit der Umgebungstemperaturen.

[0069] Die drei in **Fig.** 9 dargestellten Kurven zeigen wie für einen bestimmten Brennstoffzellenstapel bzw. Brennstoffzellenstapeltyp die verfügbare Kühlleistung mit der Umgebungstemperatur und als Funktion der Systemtemperatur des Brennstoffzellenstapels, die durch die Temperatur der in den Brennstoffzellenstapel **11** einströmende Kühlflüssigkeit bestimmt wird, variiert.

[0070] Die in **Fig.** 9 dargestellte Abhängigkeit des Kühlsystems von der Umgebungstemperatur und der Systemtemperatur verdeutlicht den Zusammenhang zwischen Brennstoffzellensystem und Umgebungsbedingungen. Ein Brennstoffzellensystem, dem unter 100% Systemlast als Beispiel 60 kW Wärme abgeführt werden muß, erfordert mit einer angenommenen Q/ITD-Kennzahl von 1,2 kW/K und einer Umgebungstemperatur von 30°C eine Systemtemperatur von 80°C. Bei einer Umgebungstemperatur von ca. 10°C hingegen ist eine Systemtemperatur von 60°C ausreichend, um die Systemwärme von 60 kW an die Umgebung abzuführen.

[0071] Obwohl der Umsatzwirkungsgrad der Brennstoffzellen mit höheren Partialdrücken der Reaktanden ansteigt, sollte für ein effizientes Gesamtsystem der Betriebsdruck, wie oben beschrieben, möglichst gering sein.

[0072] Demnach muß der Betriebsdruck und damit der vom Luftkompressor bereitgestellte Luftdruck den jeweils vorliegenden Systemanforderungen angepaßt werden und nicht, wie es Stand der Technik ist, auf einen bestimmten, gleichbleibenden Auslegungsdruck geregelt werden. Der Betriebsdruck wird somit zu einer Regelgröße, deren Sollwert je nach vorliegenden Betriebsparametern und -bedingungen angepaßt wird. Entsprechende Algorithmen zur Bestimmung des optimalen Systemwirkungsgrades müssen hierzu für das jeweilige Brennstoffzellensystem bzw. für den jeweiligen Brennstoffzellenstapeltyp entwickelt bzw. entsprechende Kennfelder in einem Datenspeicher abgelegt werden. Ein wichtiger Betriebsparameter ist hierbei die Temperatur des Brennstoffzellenstapels, die neben dem Betriebsdruck die Gasein- und Gasaustrittsfeuchten im Wesentlichen bestimmt, für die es wiederum wichtige Anforderungen von Seiten der Langzeitstabilität und der elektrischen Leitfähigkeit der Brennstoffzellenmembran gibt. Je nach Betriebsweise und Betriebszustand unter transienten Leistungsanforderungen des Systems sowie bei verschiedenen Umgebungstemperaturen und Einflüssen von Systemkomponenten gibt es unterschiedliche Anforderungen an den Betriebsdruck eines Brennstoffzellensystems. Mit dem Ziel, optimale Systemwirkungsgrade zu erreichen, indem möglichst wenig elektrische Kompressionsarbeit durch Reduzierung des Betriebsdrucks bereitzustellen ist (geringe systeminterne elektrische Verbraucher), aber dennoch den jeweils erforderlichen Betriebsdruck zu liefern, muß der Betriebsdruck für ein Brennstoffzellensystem variabel und den Betriebsbedingungen angepaßt sein.

[0073] Die Betriebsstrategie, die hier beschrieben werden soll, beinhaltet somit den Feuchtekennwert F_K des Brennstoffzellenstapels als identifizierte Betriebskenngröße, die zur Sicherstellung eines schadensfreien Betriebes der Brennstoffzellen unbedingt eingehalten werden muß. Das System wird demnach nicht wie bisher bei einem fest vorgegebenen Druck betrieben, sondern den jeweils vorliegenden Bedingungen angepaßt, um einen erwünschten F_K-Wert oder Bereich von F_K-Werten einzuhalten. Der F_K-Wert wird nicht gemessen, sondern es wird der jeweilige Betriebsdruck für die jeweils herrschende Betriebstemperatur unter den gegebenen Betriebsbedingungen, d. h. die erforderlichen Massenströme an Luft und H_2, um die erwünschte Leistungsabgabe des Brennstoffzellenstapels **11** zu erreichen, die Stöchiometrien an der Anode und der Kathode, sowie die relativen Feuchtewerte am Kathoden- und am Anodeneingang eingestellt. Die übrigen Betriebsparameter können zur Optimierung des Systembetriebs und je nach Systembedingungen angepaßt werden.

[0074] Bei tiefen Umgebungstemperaturen und gleichen Q/ITD, reduziert sich bei Abgabe der gleichen Wärmemenge an die Umgebung, die Betriebstemperatur des Brennstoffzellensystems. Dies ermöglicht es, den Betriebsdruck zu senken. Im Teillastbereich kann bei gleicher Kühlleistung die Betriebstemperatur noch weiter gesenkt werden. Unter Umständen kann man entscheiden, durch Änderung der Kühlleistung bzw. Regulierung der Lüftergeschwindigkeit (evtl. Abschalten des Lüfters) oder durch teilweise oder vollständige Umgehung des Kühlers die Betriebstemperatur auf einen vernünftigen Wert einzustellen, um einen Betrieb bei einer Betriebstemperatur die an sich ungünstig ist, bspw. weil sie zu tief liegt, zu vermeiden.

[0075] Mit der hier beschriebenen Betriebsstrategie wird die verfugbare Kühlleistung genutzt, um die Betriebstemperatur des Brennstoffzellenstapels zu senken, womit der erforderliche Betriebsdruck, den der Kompressor aufbringen muß, reduziert wird. In der folgenden **Fig.** 10 wird dieser Zusammenhang dargestellt.

[0076] Mit einem erforderlichen Feuchtekennwert F_K der Brennstoffzellen von z. B. 120% ist bei einer Temperatur von 80°C ein Betriebsdruck von 2.9 bar erforderlich. Eine Reduzierung der Brennstoffzellen-

temperatur auf 60°C reduziert den notwendigen Betriebsdruck auf 1.3 Bar, was eine deutlich niedrigere elektrische Leistung für den Luftkompressor bedeutet. Neben der Umgebungstemperatur nimmt auch die Luftfeuchte der Umgebungsluft sowie die Fahrzeuggeschwindigkeit Einfluß auf die erreichbare Kühlleistung. Ein Vergleich dieser beiden Betriebszustände (80°C Stapeltemperatur/290 kPa Betriebsdruck bzw. 60°C Stapeltemperatur/130 kPa Betriebsdruck) bezüglich des Brennstoffzellenwirkungsgrades, der Brennstoffzellenbruttoleistung (Stapelbruttoleistung), der Kompressorleistung und der Systemleistung (system net power) wird in **Fig.** 11 dargestellt.

[0077] Fig. 11 zeigt deutlich den Vergleich der Systemkennwerte der beiden Betriebszustände, mit denen, nach dem mit **Fig.** 10 beschriebenen Zusammenhang; identische Feuchten in der Brennstoffzelle eingestellt werden können. Während für den Hochdruck-/Hochtemperaturfall (80°C; 290 kPa) deutlich höhere Brennstoffzellenwirkungsgrade und damit höhere Brennstoffzellenbruttoleistungen erreicht werden, liegt die Systemnettoleistung für den Hochdruck-/Hochtemperaturfall aufgrund der höheren Kompressorleistungen unter den Werten die mit der Systemparametern des Niederdruck-/Niedertemperaturfall (60°C; 130 kPa) errechnet werden. In **Fig.** 12 sind die zu vergleichenden Systemeffizienzkurven dargestellt, die das gleiche Ergebnis zeigen.

[0078] Die Einflüsse auf die Effizienz der Brennstoffzelle, die mit einer Änderung der Betriebsparameter verbunden ist, müssen zur Optimierung des Gesamtsystems ebenso berücksichtigt werden, wie die Einflüsse auf die Druckverluste über den einzelnen Systemkomponenten.

[0079] Eine effizientere Betriebsweise eines Brennstoffzellensystems wird möglich sowie die Flexibilität des Brennstoffzellensystems im Hinblick auf sich ändernde Umgebungsbedingungen und Lastanforderungen wird deutlich erhöht. Mit niedrigerem Betriebsdruck und niedrigerer Betriebstemperatur sind weitere Vorteile verbunden, wie ein verbessertes transientes Systemverhalten, geringere Geräuschentwicklung (Komfort), reduzierte Gaspermeation durch die Brennstoffzellenmembrane, d. h. daß insgesamt kleinere Mengen an N_2, H_2, O_2 die Membrane passieren und dies führt zu einer weiteren Wirkungsgradverbesserung. Der niedrigere Betriebsdruck und die niedrigere Betriebstemperatur führen zu einer höheren Dauerhaltbarkeit der Komponenten.

[0080] Die Arbeitsweise eines erfindungsgemäßen Brennstoffzellensystems bzw. des erfindungsgemäßen Verfahrens wird nunmehr zusammenfassend anhand der **Fig.** 2 erläutert.

[0081] Hier deutet der Pfeil **150** auf die vom Fahrer eines Kraftfahrzeugs, das das Brennstoffzellensystem beinhaltet, geforderte Leistung. Beispielsweise kann der Fahrer wie bei einem herkömmlichen Kraftfahrzeug auf ein Gaspedal drücken und der Grad der Bewegung des Gaspedals oder der vom Fahrer ausgeübte Druck auf das Gaspedal verwendet werden, um ein Leistungsanforderungssignal zu erzeugen, das der Fahrzeugsteuerung **152**, die die Systemsteuerung **29** umfaßt, zugeführt wird. Einerseits dient die als Rechner realisierte Systemsteuerung **29** bzw. Fahrzeugsteuerung **152** dazu, die Elektromotoren anzusteuern, die für die Fortbewegung des Fahrzeugs zuständig sind. Die Systemsteuerung **29** dient außerdem dazu, den Brennstoffzellenstapel **11** so anzusteuern (durch den Pfeil **154** angedeutet), daß die vom Fahrer verlangte Leistung verfügbar ist.

[0082] Zu diesem Zweck wird zunächst der der Anodenseite **13** des Brennstoffzellenstapels **11** zugeführte Wasserstoffmassenstrom über das Ventil **37** der **Fig.** 1 angesteuert, um die erforderliche elektrische Leistung vom Stapel zu erzeugen. Da diese Leistung abhängig ist von der Antriebsleistung des Luftkompressors **67**, des dem Kühler **21** zugeordneten Gebläses **27** sowie der Pumpe **19** und auch der Leistungsbedarf von anderen Hilfsaggregaten des Fahrzeugs, wie beispielsweise dem Beleuchtungssystem (hier mit dem Bezugszeichen **155** angedeutet) abhängt, erhält die Systemsteuerung **29** entsprechende Signale, die hier schematisch mit Pfeil **156** angedeutet sind, die bei der Berechnung der Systemlast von der Systemsteuerung **29** mit berücksichtigt werden.

[0083] Die vom Brennstoffzellenstapel abgegebene Wärme, die durch den Pfeil **158** angedeutet ist, wird in den Kühler **21** hineingeführt und es findet dort ein Wärmeaustausch mit der Umgebungsluft statt, wie durch den Pfeil **23** angedeutet, die eine bestimmte Umgebungstemperatur T_{Umg} aufweist. Die Kühlleistung ist auch von der Fahrzeuggeschwindigkeit abhängig, was durch den Pfeil **162** angedeutet ist. Die Durchströmung des Kühlers **21** ist auch abhängig vom Gebläse **27**, wobei diese Abhängigkeit durch den Pfeil **164** angedeutet ist. Zwischen dem Gebläse **27** und dem Kühler **21** ist schematisch eine Gebläsesteuerung **166** gezeigt, die in der Systemsteuerung **29** eingebaut werden kann und im Prinzip dazu dient, das Gebläse **27** bei niedrigen Fahrtgeschwindigkeiten und beim Stillstand des Fahrzeugs, d. h. bei niedrigem Kühlungsbedarf, abzuschalten oder in der Geschwindigkeit herunterzuschalten, um unnötige Lärmerzeugung zu vermeiden.

[0084] Das Ergebnis der Auswirkung der Umgebungsluft auf den Kühler **21**, beeinflußt durch die Fahrzeuggeschwindigkeit und dem Luftstrom vom Gebläse **27**, ist die Abgabe von Wärme an die Umgebung, was durch den Pfeil **168** angedeutet ist. Die

im Kühler **21** abgekühlte Flüssigkeit bestimmt dann die Betriebstemperatur des Brennstoffzellenstapels **11**, was schematisch durch das Kästchen **170** angedeutet ist und diese Betriebstemperatur, die vorzugsweise am Kühlmittelausgang des Brennstoffzellenstapels **11** durch den Temperaturfühler **33** der **Fig.** 1 oder durch die Temperaturfühler **31'** bzw. **31"** ermittelt wird, hat einerseits eine Auswirkung auf den Betriebspunkt des Brennstoffzellenstapels **11**, was durch den Pfeil **172** angedeutet ist und sie wird im Übrigen der Systemsteuerung **29** entsprechend dem Pfeil **174** mitgeteilt, der die Mitteilung über die Leitung **33** der **Fig.** 1 symbolisiert.

[0085] Das Kästchen **176** deutet auf eine Steuerung für den Feuchtekennwert F_K, die hier getrennt von der Systemsteuerung **29** gezeigt ist, jedoch ohne weiteres ein Bestandteil der Systemsteuerung sein kann und auf jeden Fall mit dieser gekoppelt ist wie durch den Doppelpfeil **178** symbolisiert. Die Aufgabe dieser Steuerung **176** für die relative Feuchte ist es, unter Berücksichtigung der von Fühlern **84** und **91** gemessenen relativen Feuchte der Umgebungsluft und der jeweiligen von der Systemsteuerung **29** vorgegebenen Einstellungen der Betriebsparameter, die die relative Feuchte am gesamten Stapelausgang bestimmen, d. h. die Stöchiometrie an der Anode und an der Kathode sowie die Auswirkung von vorhandenen Befeuchtungseinrichtungen **49**, **81** bzw. von zurückgeführter Feuchte (beispielsweise durch die Rezirkulationspumpe **51**), der Systemsteuerung **29** zu ermöglichen, den jeweils erwünschten Betriebsdruck aus Kurven wie in **Fig.** 10 gezeigt zu bestimmen.

[0086] Wird beispielsweise eine Betriebstemperatur von 70°C gemessen, so stellt die Steuerung **176** einen Betriebsdruck gemäß **Fig.** 10 von etwa 1,9 bar ein, was durch das Kästchen **179** symbolisiert ist, um den gewünschten Feuchtekennwert F_K von bspw. 120% zu erhalten. Diese Einstellung des Betriebsdrucks wird durch die Signale, die in **Fig.** 1 über die Leitungen **83** und **85** geschickt werden und welche die Einstellungen des Motors **65** für den Luftkompressor **67** bzw. des Ventils **77** bestimmen. Gegebenenfalls kann es notwendig sein, je nach der konkreten technischen Realisierung, auch den Luftkompressor **67** über die Leitung **87** anzusteuern, um einen möglichst effizientem Betrieb des Kompressors **67** zu erreichen. Diese Möglichkeiten der Ansteuerung sind durch den Pfeil **180** in **Fig.** 2 symbolisiert.

[0087] Auf dieser Weise kann die Systemsteuerung **29** stets den optimalen Betriebspunkt des Brennstoffzellensystems bestimmen und alle notwendigen Einstellungen vornehmen, um diesen Betriebspunkt zu erreichen.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Betrieb eines Brennstoffzellensystems mit mehreren zu einem Brennstoffzellenstapel (**11**) zusammengeschalteten Brennstoffzellen, die der Erzeugung von elektrischer Energie von Kraftfahrzeugen dienen, wobei der Brennstoffzellenstapel (**11**) einen Anodeneingang (**43**) für einen Brennstoff und einen Kathodeneingang (**71**) für Sauerstoff aufweist, der Sauerstoff von einem von einem Elektromotor (**65**) betriebenen Kompressor (**67**) geliefert wird, der mit der erzeugten elektrischen Energie betrieben wird, und eine Kühleinrichtung (**17**, **19**, **21**, **25**, **27**) vorgesehen ist, die mittels eines Kühlfluids für den Abtransport von im Brennstoffzellenstapel erzeugter Wärme sorgt und dabei die jeweilige Betriebstemperatur des Brennstoffzellenstapels bestimmt, **dadurch gekennzeichnet,** daß der Kompressor (**67**), der Elektromotor (**65**) und/oder ein diesem zugeordnetes Bauteil (**77**) entsprechend der Betriebstemperatur oder einem dieser entsprechenden oder proportionalen Wert angesteuert wird, um den vom Luftkompressor erzeugten Betriebsdruck auf einen Wert einzustellen, der beim jeweiligen Betriebspunkt des Brennstoffzellenstapels (**11**) einen Minimalwert darstellt, der den Betrieb bei diesem Betriebspunkt gewährleistet.

2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet,** daß die Steuerung des erzeugten Betriebsdrucks durch die Steuerung (**77**) des am Kathodenausgang (**73**) des Brennstoffzellenstapels (**11**) nachgeschalteten Drosselventils (**77**) erfolgt, das das genannte Bauteil bildet.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet,** daß die Effizienz des Kompressors (**67**) durch die Steuerung von Bauteilen des Kompressors (**67**) mit variabler Geometrie unter Berücksichtigung des jeweils erzeugten Betriebsdrucks und des jeweils gelieferten Massenstroms optimiert wird.

4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet,** daß bei der Auswahl des jeweiligen Betriebsdrucks ein erwünschter Feuchtekennwert F_K am Kathodenausgang (**73**) berücksichtigt wird.

5. Verfahren nach Anspruch 4, **dadurch gekennzeichnet,** daß der Feuchtekennwert F_K zur Sicherstellung eines schadenfreien Betriebs der Brennstoffzellen in einem vorgebbaren Bereich gehalten wird.

6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet,** daß bei der Auswahl des jeweiligen Betriebsdrucks die relative Feuchte der in den Kathodeneingang einlaufenden Luft berücksichtigt wird.

7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet,** daß bei der Auswahl des Betriebsdrucks die relative Feuchte der in den Anodeneingang einlaufenden Gase berücksichtigt wird.

8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet,** daß der Massenstrom des dem Brennstoffzellenstapel (**11**) zugeführten Brennstoffs (H_2) dem jeweiligen Leistungsbedarf angepaßt wird.

9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet,** daß der Massenstrom der dem Brennstoffzellenstapel zugeführten Luft dem jeweiligen Leistungsbedarf angepaßt wird.

10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet,** daß die jeweilige Stöchiometrie an der Anode bei der Auswahl des einzustellenden Betriebsdrucks berücksichtigt wird.

11. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet,** daß die jeweilige Stöchiometrie an der Kathode bei der Auswahl des einzustellenden Betriebsdrucks berücksichtigt wird.

12. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet,** daß bei der Festlegung des jeweils angebrachten Betriebsdrucks die jeweils herrschende Umgebungstemperatur durch ihre Auswirkung auf das Kühlsystem und die Betriebstemperatur berücksichtigt wird.

13. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet,** daß der Betriebsdruck eine Regelgröße bildet, deren Sollwert den vorliegenden Betriebsparametern und Bedingungen angepaßt wird, wobei der Sollwert von einem Algorithmus bestimmt wird, der die herrschenden Betriebsbedingungen berücksichtigt.

14. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet,** daß der Betriebsdruck eine Regelgröße bildet, deren Sollwert den vorliegenden Betriebsparametern und Bedingungen angepaßt wird, wobei der Sollwert durch in einem Datenspeicher gespeicherte Kennfelder ermittelt wird.

15. Brennstoffzellensystem mit mehreren zu einem Brennstoffzellenstapel (**11**) zusammengeschalteten Brennstoffzellen, die der Erzeugung von elektrischer Antriebsenergie dienen, wobei der Brennstoffzellenstapel (**11**) einen Anodeneingang (**43**) für einen Brennstoff und einen Kathodeneingang (**71**) für Sauerstoff (O_2) aufweist, mit einem von einem Elektromotor (**65**) betriebenen Luftkompressor (**67**) zur Lieferung von Luftsauerstoff an den Kathodeneingang, mit einer Kühleinrichtung (**17**, **19**, **21**, **25**, **27**), die ausgelegt ist, um mittels eines Kühlfluids für den Abtransport von im Brennstoffzellenstapel (**11**) erzeugter Wärme zu sorgen und dabei die jeweilige Betriebstemperatur des Brennstoffzellenstapels bestimmt und mit einer Steuerung (**29**), **dadurch gekennzeichnet,** daß ein Temperaturfühler (**31**, **31'**, **31"**) zur Messung der Betriebstemperatur oder eines dieser proportionalen Wertes vorgesehen und an die Steuerung (**29**) angeschlossen ist und diese auslegt ist, um den Luftkompressor (**67**), den Elektromotor (**65**) und/oder ein diesem zugeordnetes Bauteil entsprechend der Betriebstemperatur oder einem dieser entsprechenden oder proportionalen Wert anzusteuern, um für jeden Betriebspunkt des Brennstoffzellensystems den vom Luftkompressor erzeugten Betriebsdruck auf den geringsten Wert zu setzen, der diesen Betriebspunkt ermöglicht.

16. Brennstoffzellensystem nach Anspruch 15, **dadurch gekennzeichnet,** daß es sich bei dem dem Luftkompressor zugeordneten Bauteil um ein am Kathodenausgang (**73**) des Brennstoffzellenstapels nachgeschaltetes Drosselventil (**77**) handelt.

17. Brennstoffzellensystem nach Anspruch 15 oder 16 **dadurch gekennzeichnet,** daß der Luftkompressor (**67**) Bauteile mit variabler Geometrie aufweist und daß die Steuerung (**29**) ausgelegt ist, um die Geometrie der Bauteile zu verändern, um einen möglichst effizienten Betrieb des Luftkompressors bei jedem Betriebspunkt zu ermöglichen.

18. Brennstoffzellensystem nach einem der Ansprüche 15 bis 17, **dadurch gekennzeichnet,** daß Sensoren (**89**, **91**) vorgesehen sind, um die relative Feuchte am Kathoden- und am Anodeneingang zu messen und daß die genannten Sensoren an die Steuerung (**29**) angeschlossen sind.

19. Brennstoffzellensystem nach einem der Ansprüche 15 bis 18, **dadurch gekennzeichnet,** daß ein der Steuerung (**29**) zugeordneter oder in dieser enthaltener Speicher vorhanden ist, der für verschiedene Betriebstemperaturen und verschiedene Betriebsparameter des Brennstoffzellenstapels gespeicherte Werte für den jeweils angebrachten Betriebsdruck oder einen Algorithmus zur Berechnung des jeweils angebrachten Betriebsdrucks enthält und daß die Steuerung (**29**) weiterhin ausgelegt ist, um den Luftkompressor (**67**), den Elektromotor (**65**) und/oder das diesem zugeordnete Bauteil so anzusteuern, daß der jeweils angebrachte Betriebsdruck (**77**) erreichbar ist.

20. Brennstoffzellensystem nach einem der Ansprüche 15 bis 19, **dadurch gekennzeichnet,** daß die Steuerung (**29**) gespeicherte Werte für die Stöchiometrie an der Anode und an der Kathode für ver-

schiedene Betriebspunkte enthält oder auf einen entsprechenden Speicher Zugriff hat.

21. Brennstoffzellensystem nach Anspruch 20, **dadurch gekennzeichnet,** daß die Steuerung (**29**) einen Eingang für ein den jeweiligen Leistungsbedarf bestimmendes Signal aufweist.

22. Brennstoffzellensystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche 15 bis 21, **dadurch gekennzeichnet,** daß ein Ventil (**37**) zur Bestimmung des dem Brennstoffzellenstapel (**11**) zugeführten Wasserstoffmassenstrom vorgesehen ist und von der Steuerung (**29**) entsprechend dem jeweiligen Leistungsbedarf ansteuerbar ist.

Es folgen 12 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

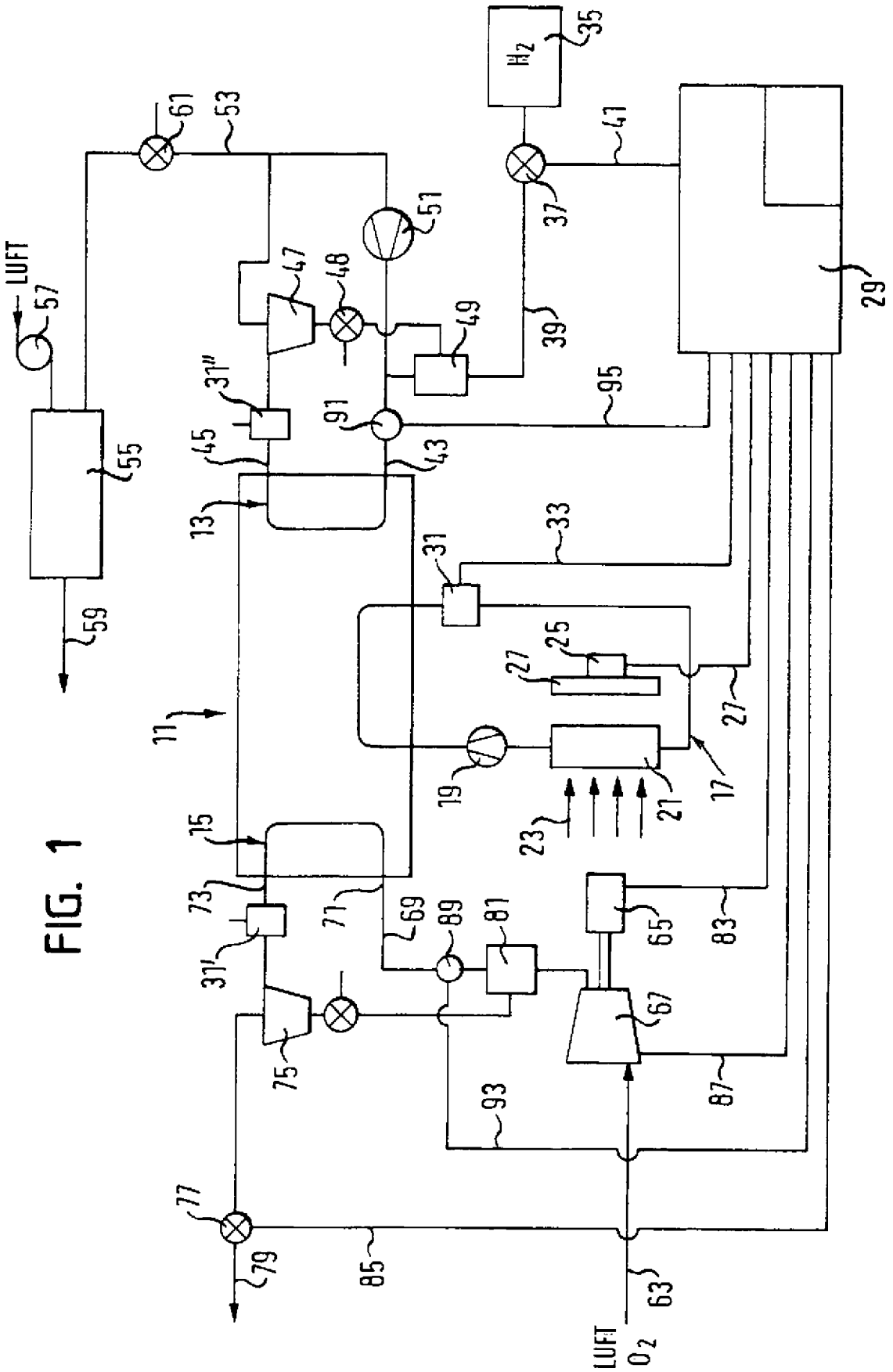


FIG. 1

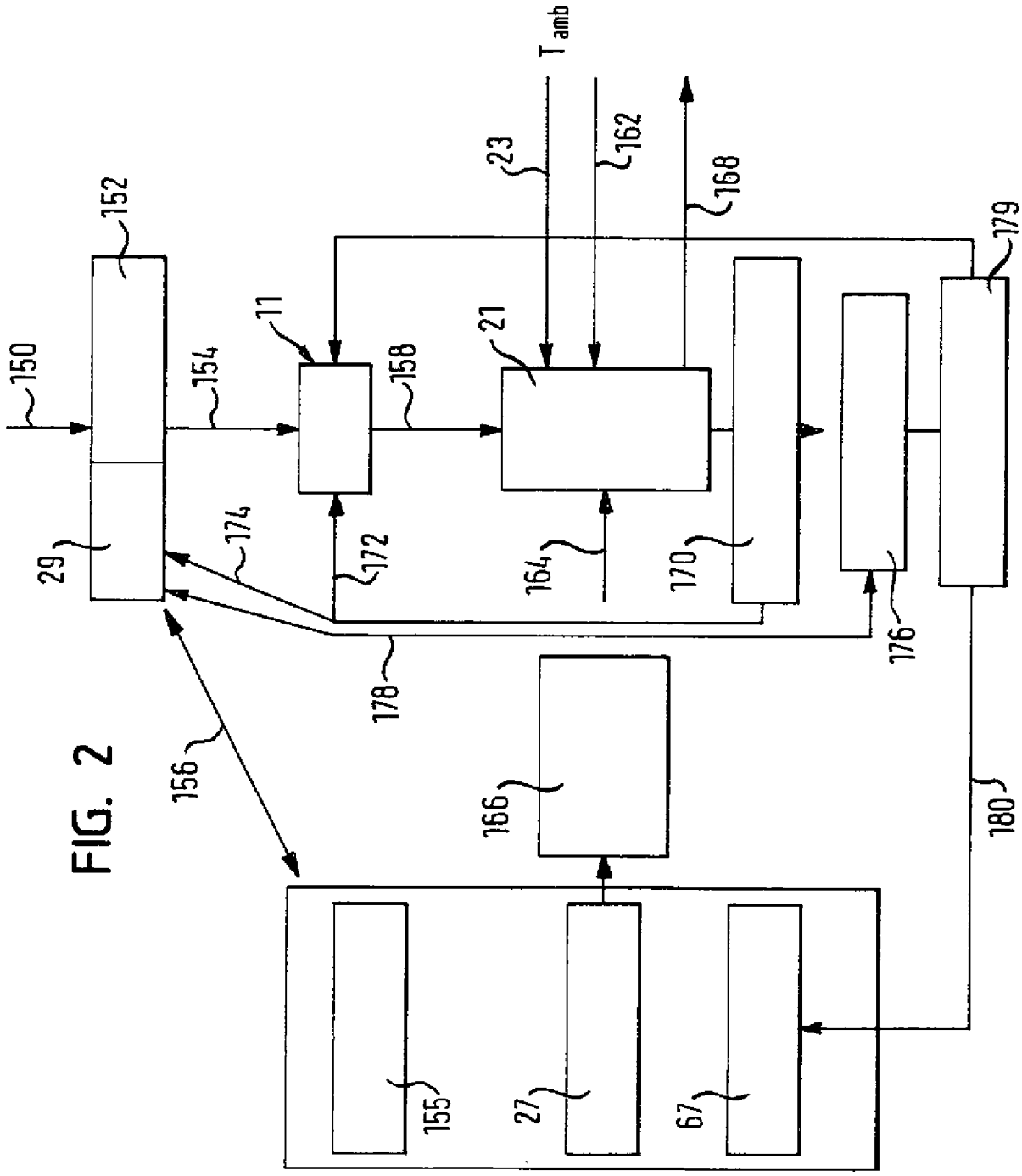

T amb
23
162
168
152
179
150
154
11
158
21
29
174
172
164
170
176
178
156
166
180
155
27
67

FIG. 2

FIG. 3

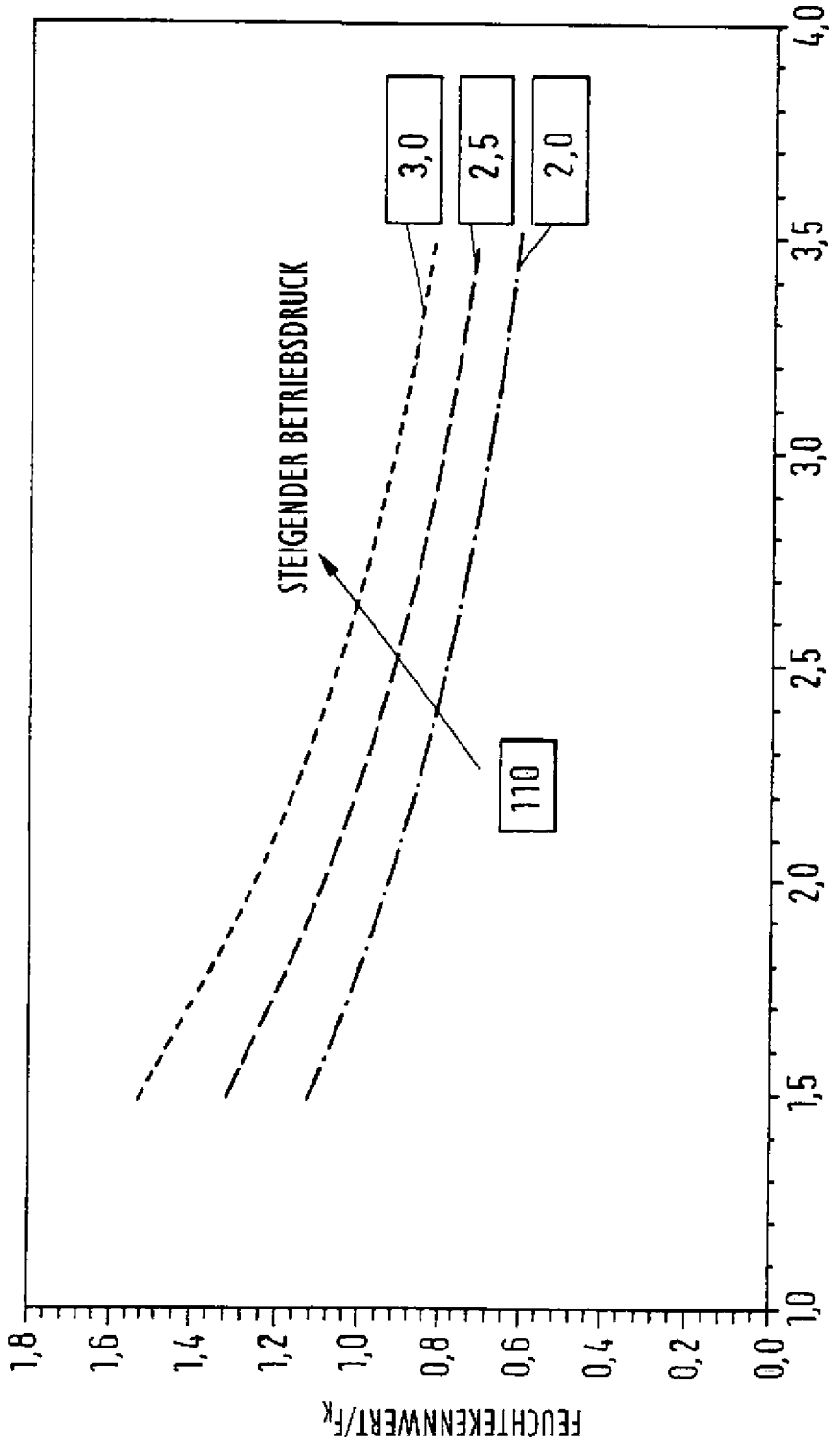

FEUCHTEKENNWERT/F_K
1,8
1,6
1,4
1,2
1,0
0,8
0,6
0,4
0,2
0,0
1,0
1,5
2,0
2,5
3,0
3,5
4,0
KATHODENSTÖCHIOMETRIE/-
STEIGENDER BETRIEBSDRUCK
3,0
2,5
2,0
110
BETRIEBSTEMPERATUR 80°C
STÖCHIOMETRIE AN DER ANODE 2,0
RELATIVE FEUCHTE AM ANODENEINGANG 50%
RELATIVE FEUCHTE AM KATHODENEINGANG 50%

FIG. 4

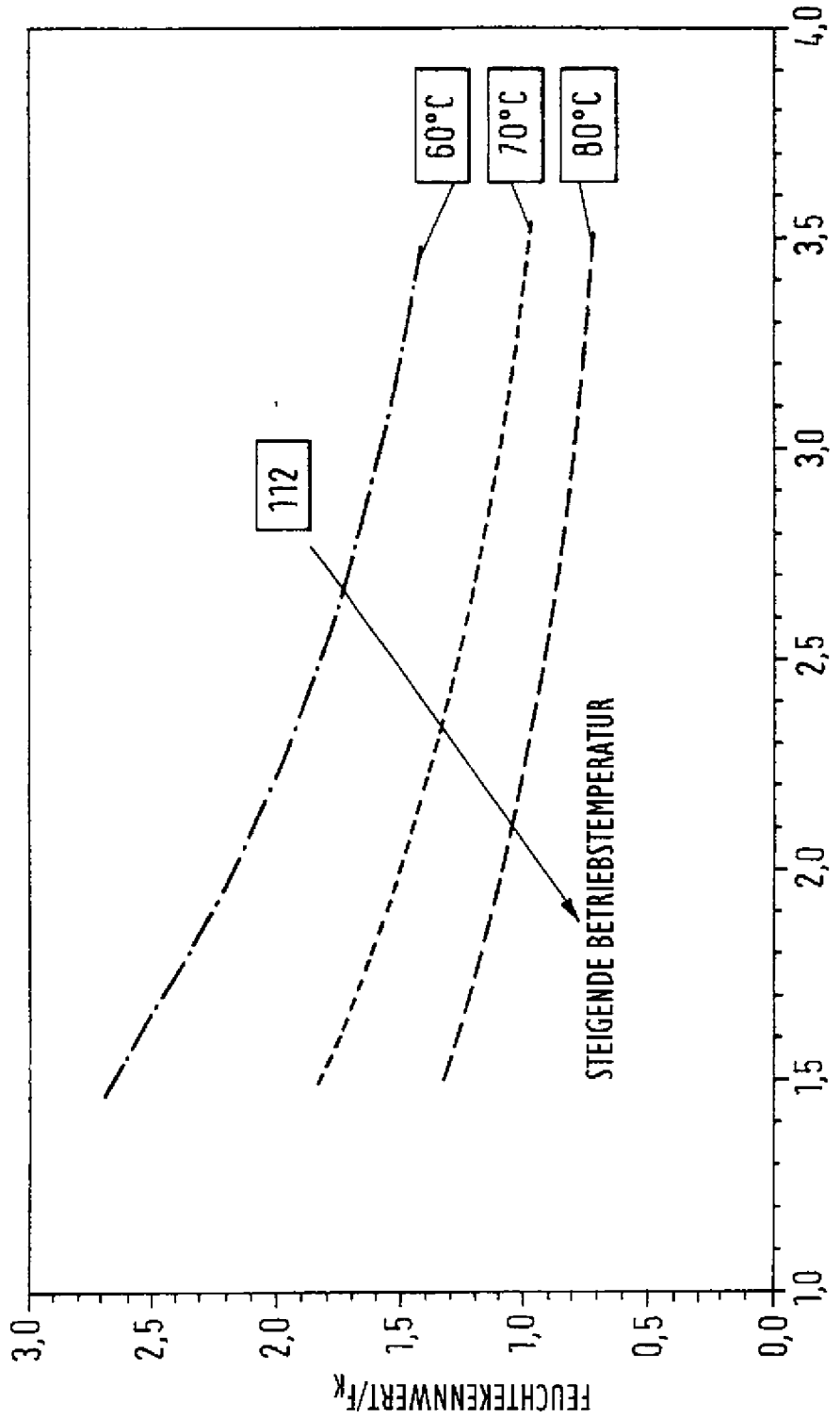

FEUCHTEKENNWERT/F_K
3,0
2,5
2,0
1,5
1,0
0,5
0,0
1,0
1,5
2,0
2,5
3,0
3,5
4,0
KATHODENSTÖCHIOMETRIE/-
60°C
70°C
80°C
112
STEIGENDE BETRIEBSTEMPERATUR
BETRIEBSDRUCK 250kPa
STÖCHIOMETRIE AN DER ANODE 2,0
RELATIVE FEUCHTE AM ANODENEINGANG 50%
RELATIVE FEUCHTE AM KATHODENEINGANG 50%

FIG. 5

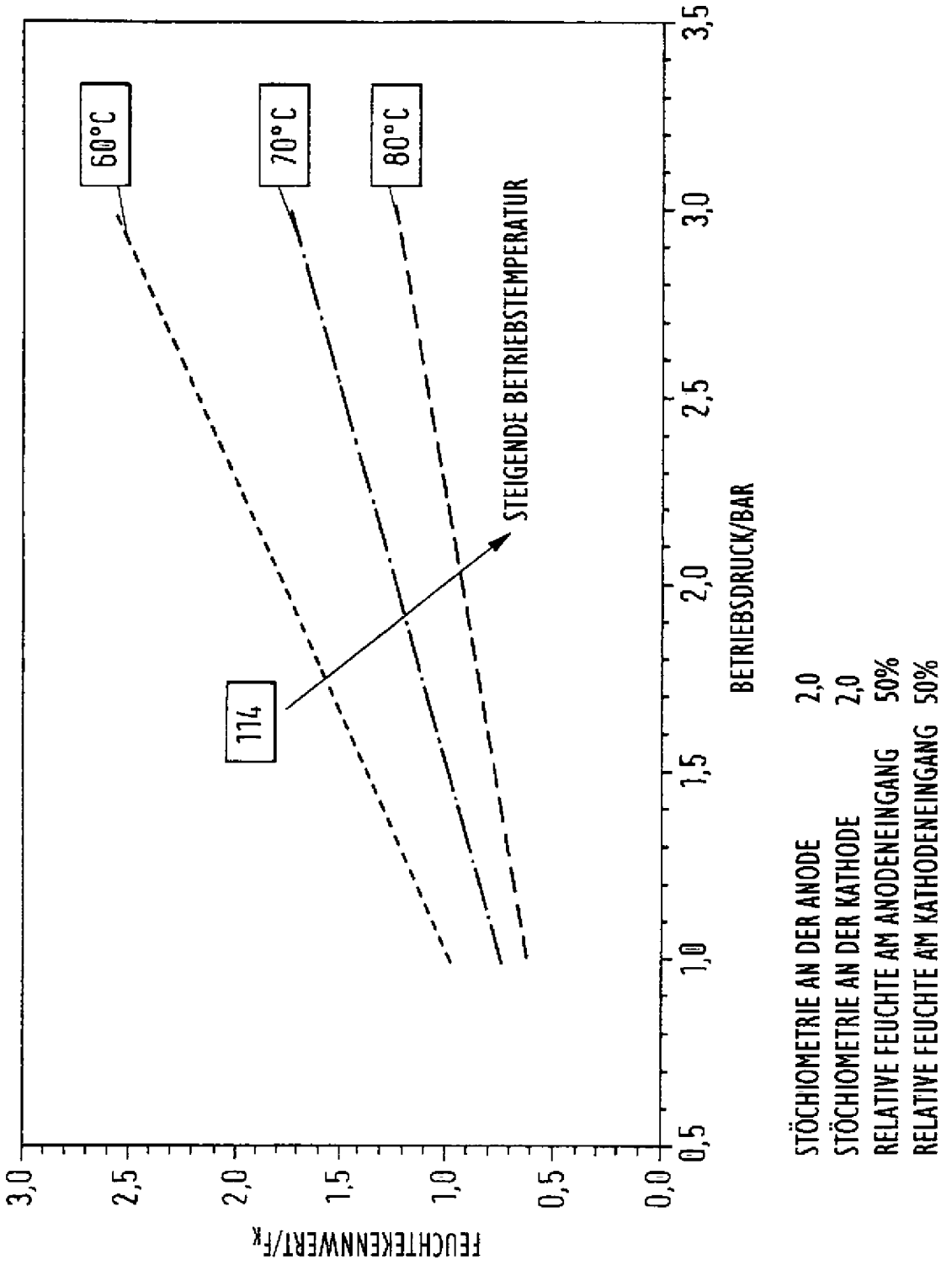

60°C
70°C
80°C
114
STEIGENDE BETRIEBSTEMPERATUR
FEUCHTEKENNWERT/F_K
BETRIEBSDRUCK/BAR
0,0
0,5
1,0
1,5
2,0
2,5
3,0
3,5
STÖCHIOMETRIE AN DER ANODE 2,0
STÖCHIOMETRIE AN DER KATHODE 2,0
RELATIVE FEUCHTE AM ANODENEINGANG 50%
RELATIVE FEUCHTE AM KATHODENEINGANG 50%

FIG. 6

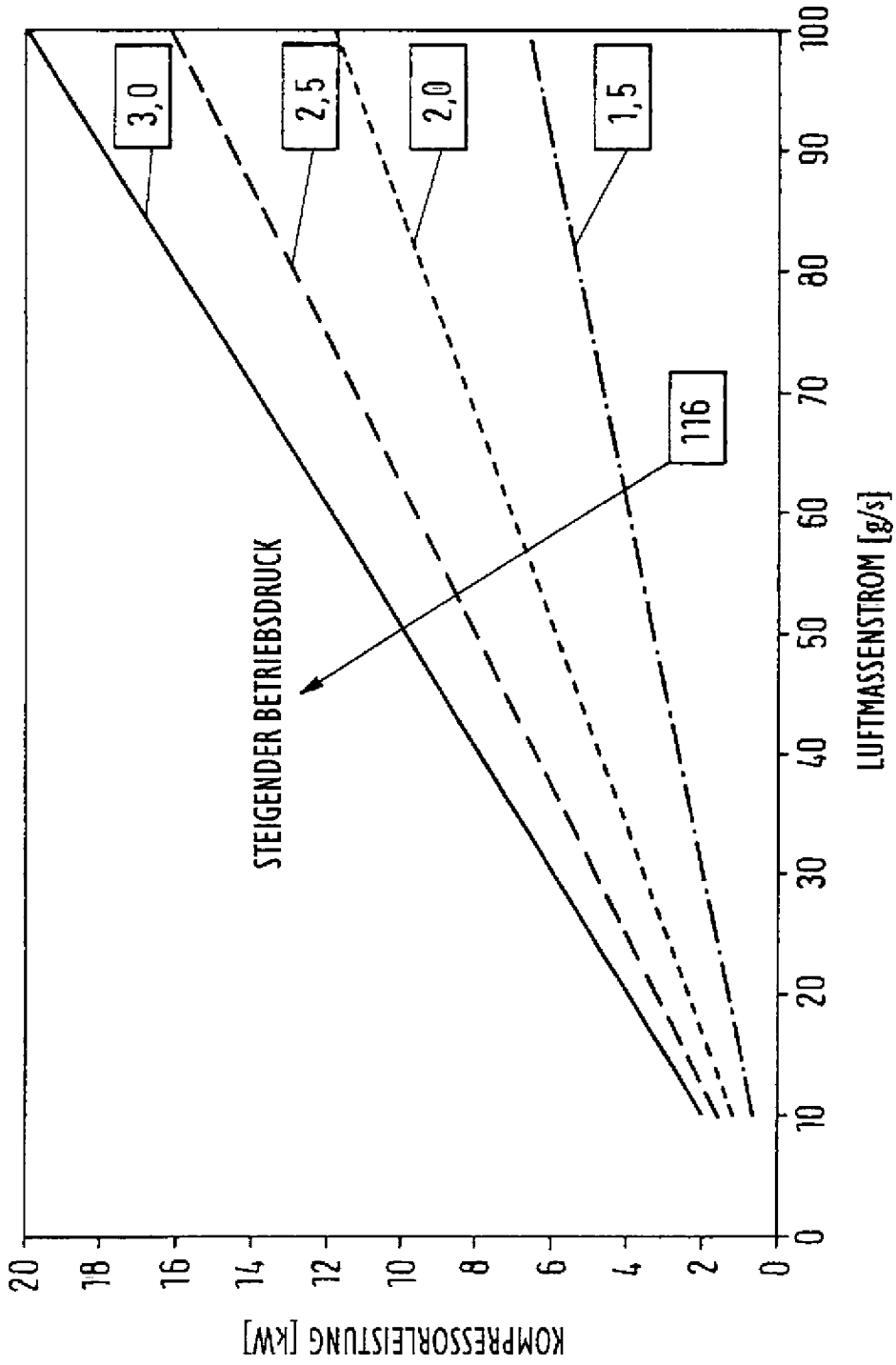

3,0
2,5
2,0
1,5
116
STEIGENDER BETRIEBSDRUCK
KOMPRESSORLEISTUNG [kW]
LUFTMASSENSTROM [g/s]
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100

FIG. 7

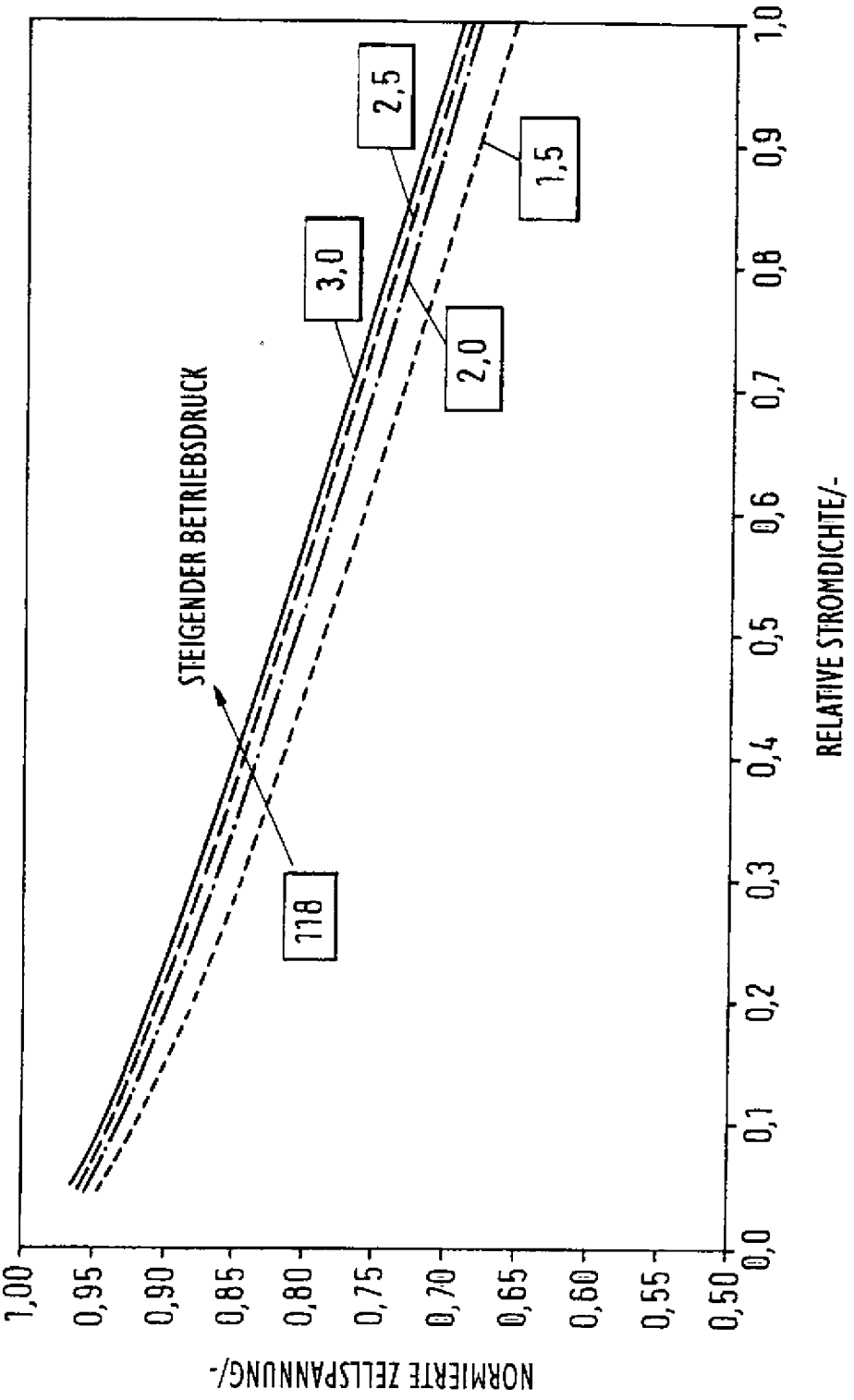

NORMIERTE ZELLSPANNUNG/-
1,00
0,95
0,90
0,85
0,80
0,75
0,70
0,65
0,60
0,55
0,50
0,0
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
0,7
0,8
0,9
1,0
RELATIVE STROMDICHTE/-
STEIGENDER BETRIEBSDRUCK
118
2,5
3,0
2,0
1,5

FIG. 8

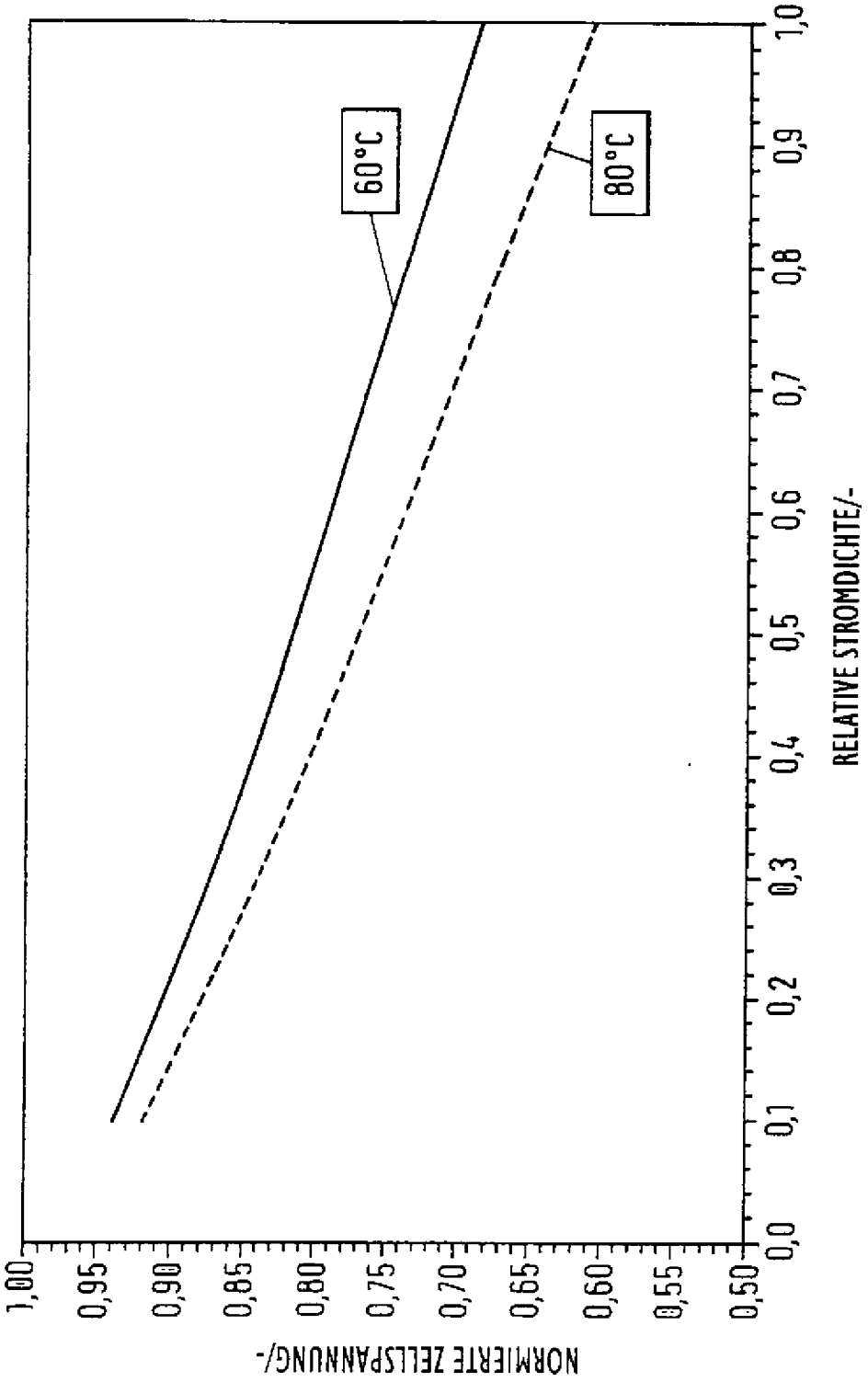

60°C
80°C
NORMIERTE ZELLSPANNUNG/-
1,00
0,95
0,90
0,85
0,80
0,75
0,70
0,65
0,60
0,55
0,50
0,0
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
0,7
0,8
0,9
1,0
RELATIVE STROMDICHTE/-

FIG. 9

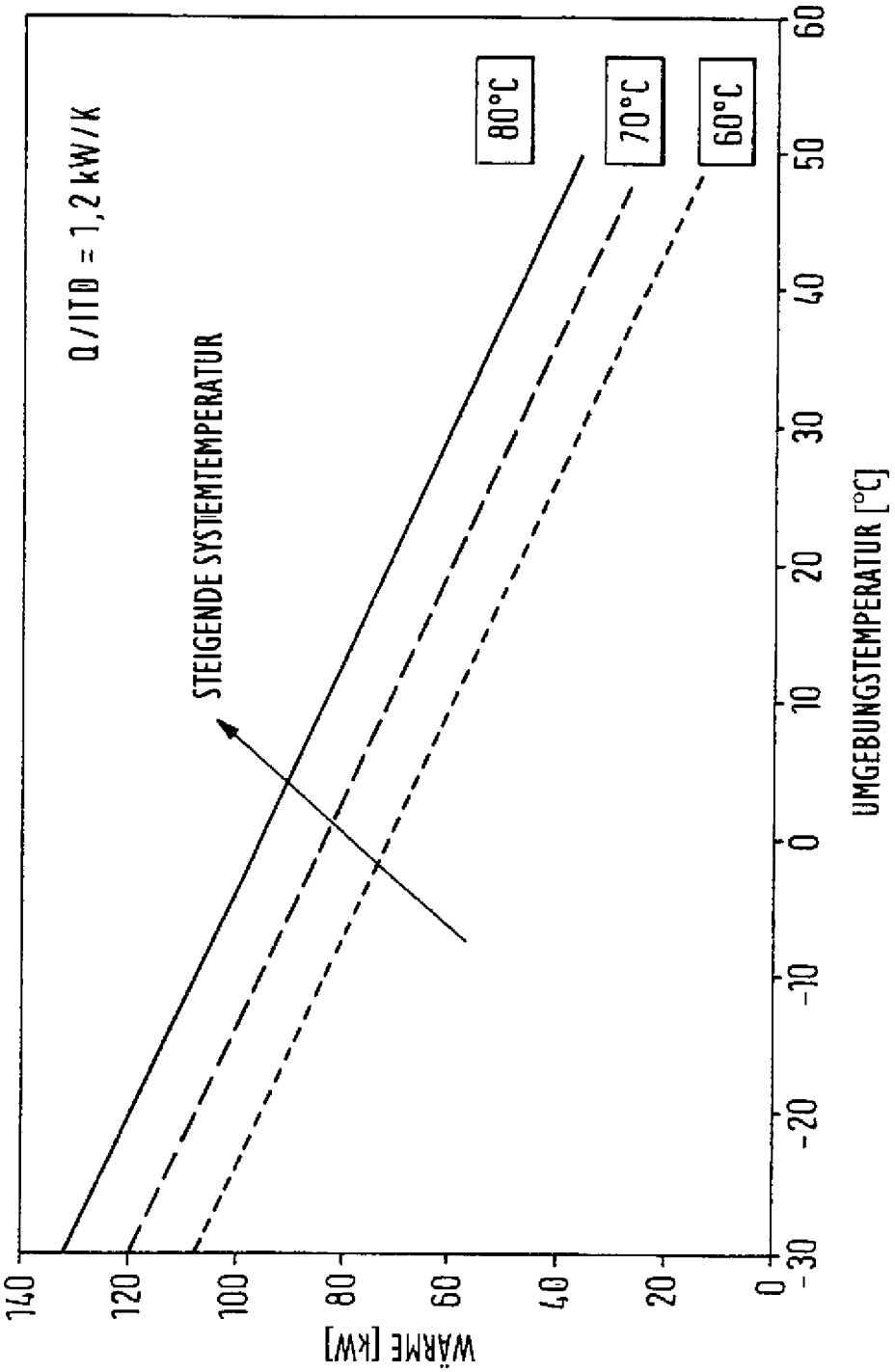

Q/ITD = 1,2 kW/K
STEIGENDE SYSTEMTEMPERATUR
80°C
70°C
60°C
WÄRME [kW]
140
120
100
80
60
40
20
0
UMGEBUNGSTEMPERATUR [°C]
60
50
40
30
20
10
0
-10
-20
-30

FIG. 10

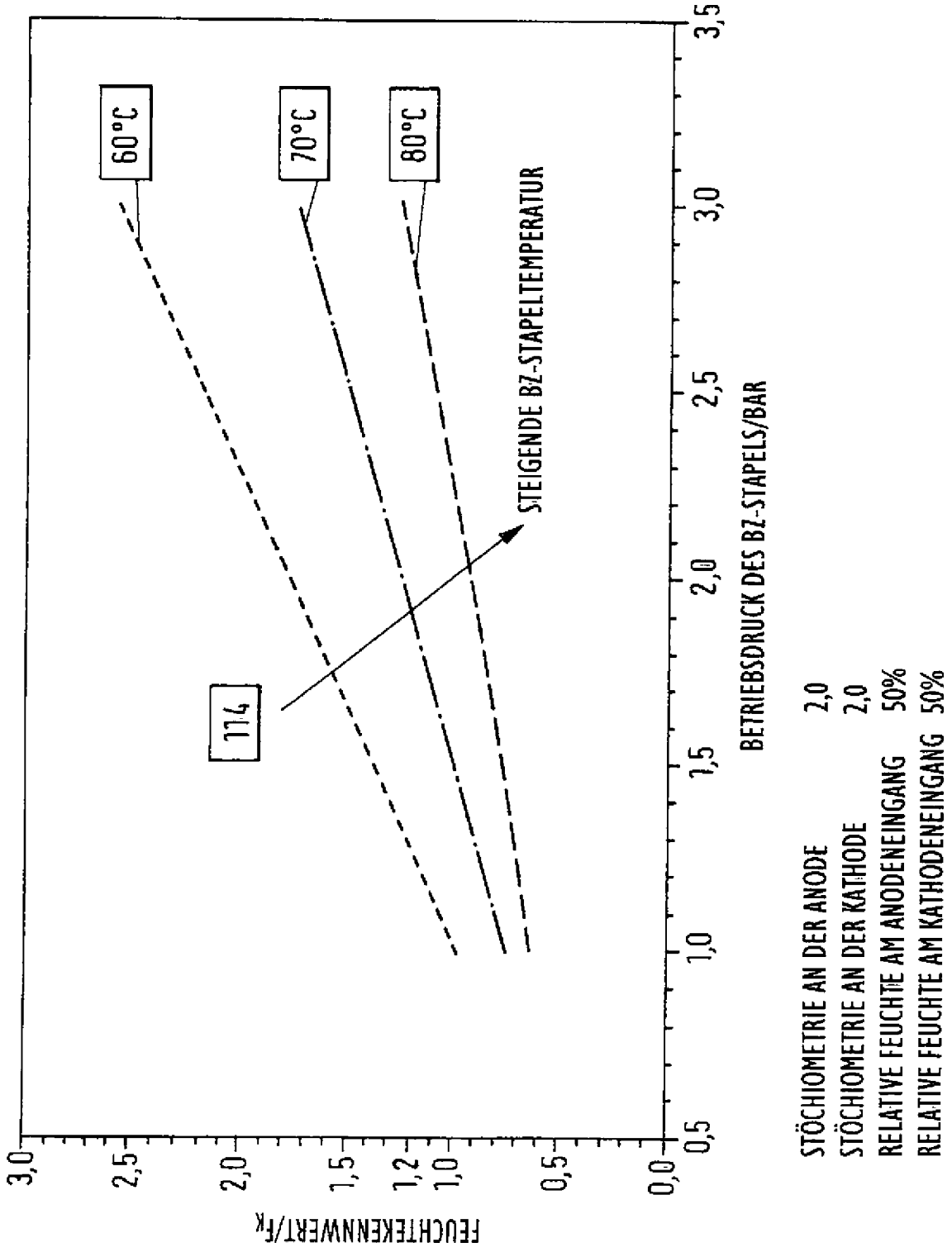

60°C
70°C
80°C
114
STEIGENDE BZ-STAPELTEMPERATUR
FEUCHTEKENNWERT/F_K
BETRIEBSDRUCK DES BZ-STAPELS/BAR
3,0
2,5
2,0
1,5
1,2
1,0
0,5
0,0
0,5
1,0
1,5
2,0
2,5
3,0
3,5
STÖCHIOMETRIE AN DER ANODE 2,0
STÖCHIOMETRIE AN DER KATHODE 2,0
RELATIVE FEUCHTE AM ANODENEINGANG 50%
RELATIVE FEUCHTE AM KATHODENEINGANG 50%

FIG. 11

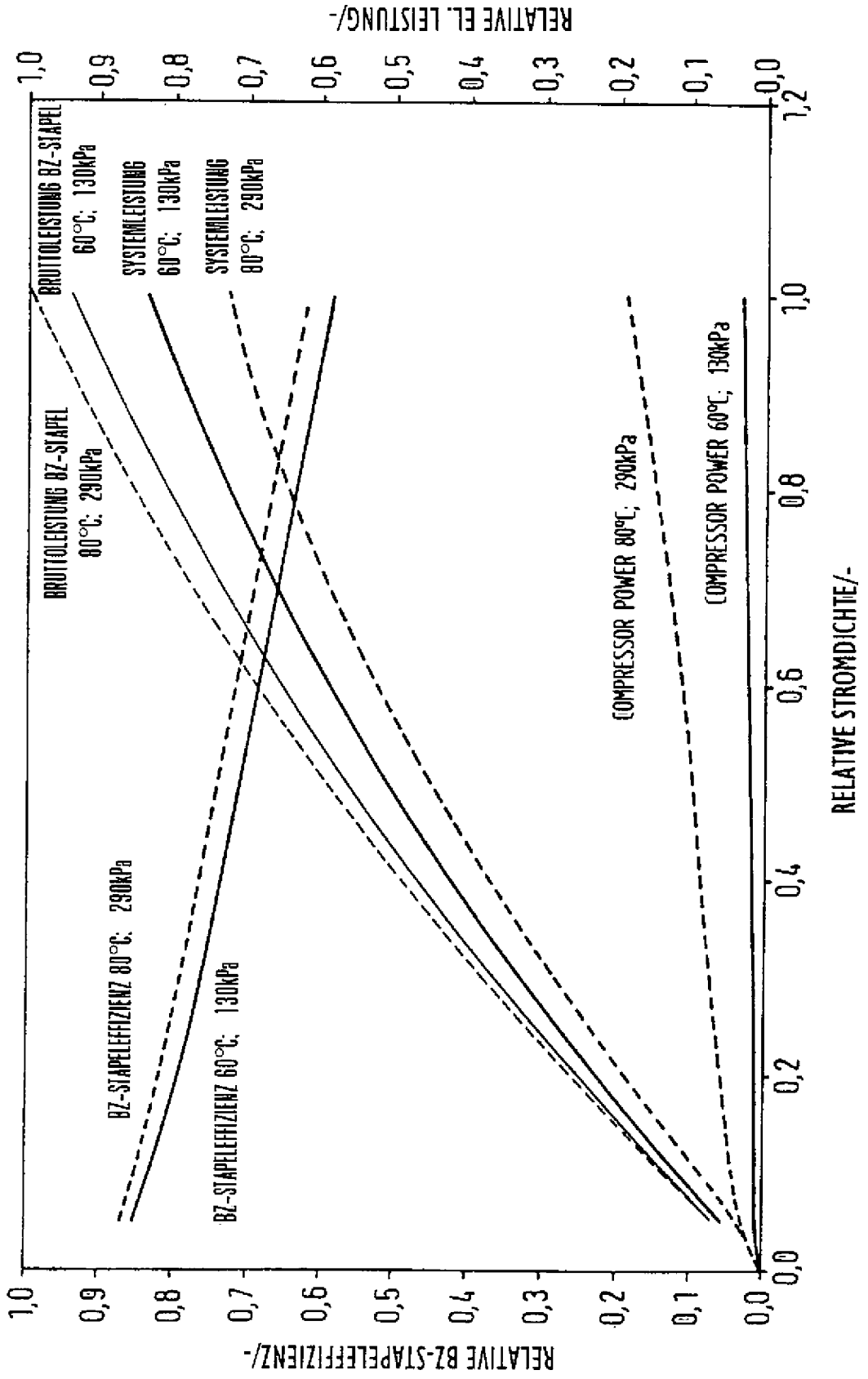
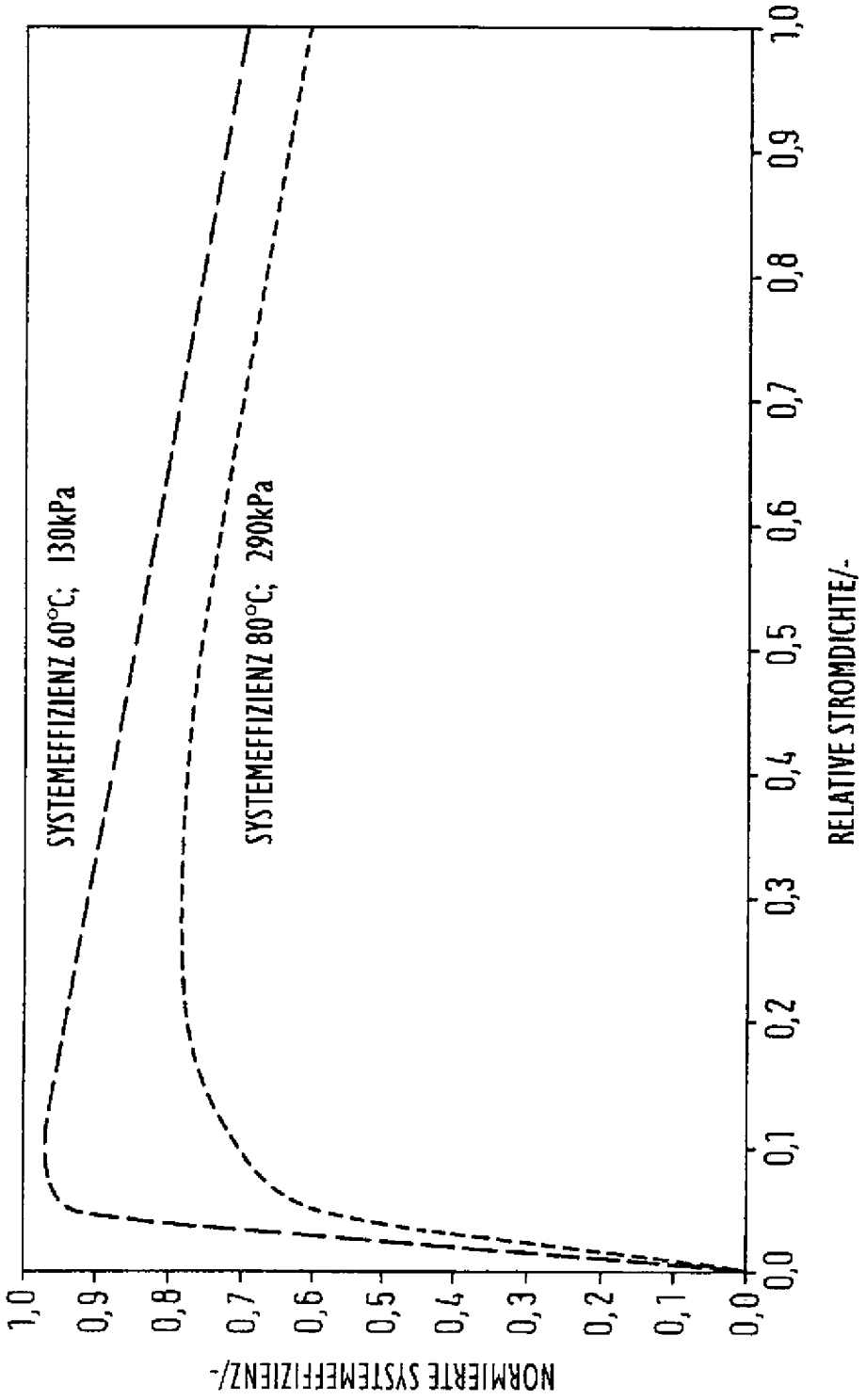

RELATIVE BZ-STAPELEFFIZIENZ/-
RELATIVE EL. LEISTUNG/-
RELATIVE STROMDICHTE/-
BRUTTOLEISTUNG BZ-STAPEL 80°C; 290kPa
BRUTTOLEISTUNG BZ-STAPEL 60°C; 130kPa
SYSTEMLEISTUNG 60°C; 130kPa
SYSTEMLEISTUNG 80°C; 290kPa
BZ-STAPELEFFIZIENZ 80°C; 290kPa
BZ-STAPELEFFIZIENZ 60°C; 130kPa
COMPRESSOR POWER 80°C; 290kPa
COMPRESSOR POWER 60°C; 130kPa

FIG. 12


SYSTEMEFFIZIENZ 60°C; 130kPa
SYSTEMEFFIZIENZ 80°C; 290kPa
NORMIERTE SYSTEMEFFIZIENZ/-
RELATIVE STROMDICHTE/-
0,0
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
0,7
0,8
0,9
1,0