

# NO<sub>x</sub>-EMISSIONSMINDERUNG BEI FLUGTRIEBWERKSBRENNKAMMERN NACH DEM KONZEPT DER FETT-MAGER-VERBRENNUNG:

## Von der Grundlagenforschung zum industriellen Einsatz

N. Zarzalis

MTU Motoren- und Turbinen-Union München GmbH

80976 München

### 1. ÜBERSICHT

Zur Reduzierung der NO<sub>x</sub>-Emission wird bei MTU-München das Konzept der Fett-Mager-Verbrennung verfolgt, das die NO<sub>x</sub>-Produktion durch Sauerstoffmangel in der primären Verbrennungszone (fette Verbrennung) und durch niedrige Temperaturen in der sekundären Verbrennungszone (magere Verbrennung) vermeidet. Die Entwicklungsschwerpunkte bei der Realisierung des angesprochenen Konzeptes liegen in der Brennstoffaufbereitung (homogene fette Verbrennung) und in der Auslegung des Zumischmoduls, worin der schnelle Übergang von der fetten zur mageren Verbrennung realisiert wird.

Die Grundlagen der Fett-Mager-Verbrennung wurden in den FVV-Forschungsvorhaben [1,2], die auch von MTU betreut wurden, untersucht. Aufbauend auf den erarbeiteten Grundlagen begann MTU 1989 mit einer Machbarkeitsstudie innerhalb eines vom BMFT mitfinanzierten Forschungsvorhaben der AG-Turbo. Die Arbeiten wurden innerhalb des europäischen Forschungsprogramms „BRITE/EURAM - Low Emission Combustor Technology, Phase II“ und des nationalen E3E-Technologieprogramms fortgeführt. In der vorliegenden Veröffentlichung wird die Methodik der Entwicklung des neuen Konzeptes und die Auswirkungen der Kompromisse, die man eingehen muß, um die Praktikabilität des Konzeptes zu gewährleisten, dargestellt.

### 2. EINLEITUNG

Obwohl der Anteil der zivilen Luftfahrt an den gesamten Verkehrsemissionen eher gering ist (ca. 2%), erscheint deren Reduzierung notwendig, da zumindest ein Teil der Emissionen in großen Höhen emittiert wird, also in Regionen, wo keine anderen vergleichbaren Schadstoffemissionen auftreten. Es herrscht nicht immer Einigkeit über die Wirkung der emittierten Stoffe auf die Atmosphäre. Mit ziemlicher Sicherheit kann man aber sagen, daß das NO<sub>x</sub> oberhalb einer gewissen Höhe das Ozon katalytisch ver-

nichtet, während es unterhalb dieser Höhe die Ozonbildung begünstigt.

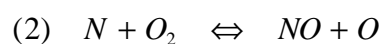
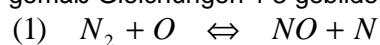
Bild 1 zeigt die Entwicklung der Schadstoffemissionen über die Jahre. Man erkennt daran deutlich, daß die Emission von Kohlenmonoxid (CO) und unverbrannten Kohlenwasserstoffe (UHC) stark zurückgegangen ist, wogegen die NO<sub>x</sub>-Emission nahezu konstant geblieben ist. Der Grund für diesen Sachverhalt liegt in der Anhebung des Druck- und Temperaturniveaus des Kreisprozesses, um den thermodynamischen Wirkungsgrad zu erhöhen. Hoher Druck und hohe Temperatur bewirken einerseits Reduzierung der CO- und UHC-Emission andererseits aber eine Erhöhung der NO<sub>x</sub>-Emission. Die Tatsache, daß die NO<sub>x</sub>-Emission über die Jahre nahezu konstant geblieben ist (s. Bild 1) spricht für die Fortschritte in der Brennkammerentwicklung. Bild 1 macht aber auch deutlich, daß bei modernen Triebwerken die NO<sub>x</sub>-Emission die Emission der restlichen Schadstoffe um einiges übertrifft. Anstrengungen zur Reduzierung der NO<sub>x</sub>-Emission erscheinen auch aus diesem Grund sinnvoll.

### 3. GRUNDLAGEN DER NO-BILDUNG

Man unterscheidet zwei NO-Bildungsmechanismen, den thermischen im mageren und den Prompten im fetten stöchiometrischen Bereich.

#### 3.1 Die thermische NO-Bildung

Im mageren stöchiometrischen Bereich werden Stickoxide nach dem von Zeldovic beschriebenen und von Fenimore erweiterten thermischen NO-Mechanismus gemäß Gleichungen 1-3 gebildet:



Die Reaktion (1) ist in diesem Reaktionssystem der geschwindigkeitsbestimmende Schritt, da die Spaltung der starken Dreifachbindung des  $N_2$ -Moleküls nur unter hoher Temperatur möglich ist. Die Konzentration der O-Radikale, die die Spaltung des  $N_2$ -Moleküls bewirken, kann in guter Näherung aus der Gleichgewichtskonzentration der Dissoziationsreaktion (4) von molekularem Sauerstoff berechnet werden:



(M bezeichnet ein stoßenergetisch mitwirkendes Drittmolekül)

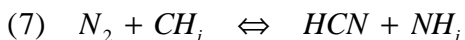
Sowohl die thermische Dissoziationsreaktion (4) als auch der geschwindigkeitsbestimmende Reaktionsschritt (1) sind stark endotherm und besitzen hohe Aktivierungsenergien. Daher ist die NO-Bildung nach diesem Mechanismus erst ab Temperaturen von 1900 K von Bedeutung. Die Druckabhängigkeit der NO-Bildung nach dem beschriebenen Mechanismus ist (s. [1]):

$$(5) \quad \frac{d[NO]}{dt} \propto p^{0.5}; \text{ bei } \Phi < 1$$

$$(6) \quad \frac{d[NO]}{dt} \propto p^0; \text{ bei } \Phi > 1$$

### 3.2 Die Prompt-NO-Bildung

Der Prompt-NO-Bildungsmechanismus (s. Bild 2) wird durch die Spaltung von molekularem Stickstoff ( $N_2$ ) über den Angriff von Kohlenstoff-Radikalen ( $CH_{i=0,1,2}$ ) [3] bewirkt:



Das nach diesem Reaktionsmechanismus entstehende Stickstoffmonoxid (NO) wird also quasi-schlagartig („prompt“) gebildet. Bei der Prompt-NO-Bildung sind die Kohlenwasserstoffradikale direkt beteiligt und sie bleibt daher auf die Hauptreaktionszone von Kohlenwasserstoffflammen beschränkt.

## 4. DIE FETT-MAGER-VERBRENNUNG

Die Reduzierung der NOx-Emission bei der Fett-Mager-Verbrennungsführung wird durch eine Unterteilung der Verbrennung in eine fette ( $\Phi > 1$ , sauerstoffarm) und eine magere ( $\Phi < 1$ , Niedrigtemperaturzone) Stufe erreicht. Beide Zonen werden durch das Zuzugmodul getrennt, worin der Übergang von der fetten zur mageren Verbrennung realisiert wird (s. Bild 3).

### 4.1 Auslegungskriterien

#### 4.1.1 Stöchiometrie

Wie in Kapitel 3 dargestellt, werden bei der Prompt-NO-Bildung verschiedene N-haltige Zwischenprodukte gebildet. Diese werden als N-haltige Komponenten in die magere Stufe ausgetragen und dort zu NO oxidiert. Die N-haltigen Hauptkomponenten, die in ihren Konzentrationen um zwei bis drei Größenordnungen höher liegen als die anderer Komponenten, sind in der fetten Stufe  $NH_3$  und HCN. Die Summe der Konzentrationen aller N-haltigen Spezies wird in der Größe TFN (Total Fixed Nitrogen) zusammengefaßt. Der TFN-Gehalt am Ende der Primärstufe bestimmt bei der Fett-Mager-Verbrennung maßgeblich die NOx-Emission nach der mageren Stufe. Aus diesem Grund ist die Frage der stöchiometrischen Abhängigkeit der TFN-Konzentration von besonderem Interesse. In Bild 4 (s. [4]) wird diese Abhängigkeit dargestellt. Daran erkennt man, daß bis zu einem Äquivalenzverhältnis  $\Phi$  von 1.4 NO die Haupt-N-Komponente ist. Mit steigendem  $\Phi$  wird zunächst HCN und dann  $NH_3$  produziert. Wichtig bei dieser Betrachtung ist, daß die Summe aus den N-haltigen Komponenten (TFN) ein Minimum aufweist. Um die NOx-Emission zu reduzieren sollte deswegen die Brennkammer so ausgelegt werden, daß die Brennstoffzahl  $\Phi$  in der fetten Stufe sich in dem Bereich der minimalen TFN-Konzentration bewegt.

#### 4.1.2 Zumischmodul

Die Effektivität der Fett-Mager-Verbrennungsführung hängt entscheidend von der Auslegung des Zumischmoduls ab, da zumindest theoretisch das Zumischmodul den einzigen Ort darstellt, worin NOx-Produktion stattfinden kann. Um die NOx-Produktion in dieser Strecke zu begrenzen, sollte man bestrebt sein die Mischungszeit zu minimieren. Bild 5 (s. [1]) zeigt die NO-Bildung für identische Stöchiometrie in der fetten und der mageren Stufe, aber unterschiedliche Verweilzeiten im Zumischmodul. Man erkennt daran, daß die NO-Emission der Verweilzeit im Zumischmodul proportional ist.

#### 4.1.3 Homogenität

Da der NO-Bildungsmechanismus ein nichtlinearer Prozeß ist, genügen wenige inhomogene Gebiete, um die Effektivität der Fett-Mager-Verbrennungsführung zu beeinträchtigen. Bild 6 zeigt den Einfluß der Mischungsgüte auf die NO-Bildung. Daran erkennt man, daß die NO-Emission für perfekt homogene Gemische im fetten und im mageren Bereich niedriger als die NO-Emission bei inhomogenen Gemischen ist. Dagegen ist die NOx-Emission im Falle des homogenen Gemisches im stöchiometrischen Bereich am größten.

## 5. AUFBAU UND WIRKUNG EINER GASTURBINENBRENNKAMMER

Wie man an Bild 7 erkennen kann, versorgt die gesamte Verbrennungsluft, die durch den Verdichterausstritt strömt, verschiedene Brennkammerzonen. Der Grund dafür liegt in der Gewährleistung einer stabilen Verbrennung im gesamten Betriebsbereich und der Zündung der Brennkammer unter Höhenbedingungen. Bei konventioneller Auslegung wird die primäre Belochung so ausgelegt, daß die gegenüberliegenden Luftstrahlen aufeinander treffen. Dadurch entsteht in der primären Verbrennungszone eine Rezirkulationsströmung, die die ständige Zufuhr heißen Abgases in die Flammenwurzel hinein bewirkt und damit eine permanente Zündung des Gemisches aufrecht erhält. Die Rezirkulation der Luft aus der primären Belochung in die primäre Verbrennungszone verursacht eine inhomogene Gemischbildung mit einem erhöhten NO<sub>x</sub>-Ausstoß.

## 6. KONZEPTDARSTELLUNG

Der ungefähre Betriebsbereich einer Gasturbinenbrennkammer (s. Bild 8) erstreckt sich von einem Luft/Brennstoffmassenverhältnis (LBV) 35 (Vollastbedingung) bis zu einem LBV von 250 (magere Erlöschgrenze, Lean Blow Out (LBO)). Unter der Annahme, daß ca. 20% der Luft die Primärzone belädt, erhält man, daß die primäre Verbrennungszone entweder im fetten (Take Off, Climb, Reiseflug und Approach) oder im mageren (Idle) stöchiometrischen Bereich arbeitet. Da nicht die gesamte Verbrennungsluft der primären Zone durch die Brennstoffdüse strömt, ist die Stöchiometrie der Brennstoffdüse noch fetter als die der Primärzone. Würde man die Rezirkulation der Luft aus der primären Belochung bei einer entsprechenden Auslegung unterbinden und den Anteil der durch die Brennstoffdüse strömenden Luft derart erhöhen, daß die Stöchiometrie des Gemisches für die Primärzone und die Brennstoffdüse zusammenfallen, so hätte man für den Betriebsbereich Take Off bis Approach eine fette, homogene Primärzone. Für den Idle Betriebspunkt wäre die Primärzone mager, d.h. auch niedrige NO<sub>x</sub>-Emission. Da in diesem Fall die Primärstrahlen nicht rezirkulieren, sollte die Verbrennungsstabilität durch die Brennstoffdüse allein garantiert werden. Das beschriebene Konzept wird in Bild 3 dargestellt. Die Probleme bei der Konzeptrealisierung sind demnach:

- Entwicklung von einer Brennstoffdüse, die die Homogenität der Primärzone und die Verbrennungsstabilität gewährleistet
- Kühlung der fetten Stufe, da diese nicht durch konventionelle Kühlfilme gekühlt werden kann. Das

Einströmen von Luft in ein fettes Gemisch erzeugt eine stöchiometrische Verbrennung mit hoher Temperatur und deswegen hoher NO<sub>x</sub>-Emission

- Entwicklung eines Zumischmoduls, das den schnellen Übergang von fetter zu magerer Verbrennung realisiert und nach Möglichkeit die Rezirkulation der Luft aus der primären Lochreihe unterbindet.

## 7. KONZEPTREALISIERUNG

Die Konzeptrealisierung erfolgte in drei Projekten. Zunächst wurde die Machbarkeitsstudie innerhalb des vom BMFT mitfinanzierten Vorhabens Turboflam durchgeführt (s. [6]). Ziel dieser Machbarkeitsstudie war das Reduktionspotential des Fett-Mager-Konzeptes in einer Rohrbrennkammer zu untersuchen. Im nächsten Schritt innerhalb mit dem europäischen Forschungsprogramm "BRITE/EURAM-Low Emission Combustor Technology, Phase II" untersuchte man in einer Rechteckbrennkammer, die einen Ausschnitt aus der realen Ringbrennkammer darstellt, die Wechselwirkung der Brennstoffdüsen untereinander und bemühte sich um die Kühlung des Brennkammerkopfes und der Effektivität des Zumischmoduls. Im letzten Schritt innerhalb des nationalen E3E-Technologieprogramms soll die Technologie in einer Ringbrennkammer demonstriert werden.

Die folgenden Kapitel stellen die wichtigsten Ergebnisse aus den angesprochenen Entwicklungsschritten dar.

### 7.1 Rohrbrennkammer - Turboflam Vorhaben

In dieser Machbarkeitsstudie sollte nachgewiesen werden, daß das Fett-Mager-Verbrennungskonzept in einer einfachen Brennkammergeometrie realisieren läßt. Als Brennkammer wurde eine Rohrbrennkammer gewählt (s. Bild 9), um ohne großen finanziellen Aufwand mehrere Konfigurationen zu testen. Die hauptsächlichste Entwicklung konzentrierte sich in der Auslegung der Brennstoffdüse und des Zumischmoduls. Um die Mischung im Bereich des Zumischmoduls zu optimieren, wurde das turbulente Strömungsfeld für den realen 3-D Fall berechnet. Die turbulente Schwankungsbewegung wurde mit dem k,ε-Turbulenzmodell erfaßt. Die Parameterstudien mündeten zu einem Zumischmodul, das aus 4 Lochreihen bestand. Die erste Lochreihe (größter Durchmesser) war so ausgelegt, daß die Luftstrahlen die Brennkammermitte erreichen ohne dabei in die Primärzone zu rezirkulieren. Die restlichen 3 Lochreihen sollten sukzessiv die Zwischenräume füllen.

Bilder 10 und 11 stellen die beschriebene Funktionsweise des Zumischmoduls dar. In Bild 10 wird die

Diskretisierung des Zumischmoduls in Umfangsrichtung dargestellt. Berechnet wurde ein 30° Sektor. In Bild 11 werden die Isolinien der skalaren Mischungsvariablen für die Ebene, die die Mittelpunkte der Löcher der 3. Lochreihe des Zumischmoduls enthält dargestellt. Die zwei ersten Gebiete, die am nächsten zur Flammrohrachse liegen, deuten die Eindringtiefe der Strahlen der 1. Lochreihe an. Die zwei nächsten Gebiete stammen aus der 2. Lochreihe und die drei letzten Gebiete grenzen noch an den Löchern der 3. Lochreihe an. Bild 11 verdeutlicht somit die schon beschriebene Wirkungsweise des Zumischmoduls.

Der Technologiesprung innerhalb dieses Vorhabens wird anhand von Bild 12 dargestellt, worin ein Thermofarbenversuch der ersten und der letzten Konfiguration verglichen wird. Die sehr homogene Wandtemperaturverteilung für die letzte Konfiguration deuten auf eine sehr homogene Mischung in der Brennkammer hin. Resultat der homogenen Mischung waren sehr niedrige NO<sub>x</sub>-Emissionen [6].

## 7.2 Rechteckbrennkammer BRITE/EURAM Vorhaben [10]

Die Kühlung der fetten Stufe der Rohrbrennkammer, die innerhalb des Turboflam-Vorhabens untersucht wurde, erfolgte konvektiv. Durch diese Methode konnte man wegen der Wandtemperatur die Primärzone (fette Stufe) nicht im stöchiometrischen Punkt betreiben. Innerhalb des BRITE/EURAM-Vorhabens wurde dieses Problem durch die Einführung einer Prallkühlung für den Brennkammerkopf behoben. In Bild 13 ist die konstruktive Ausführung der Kühlung des Brennkammerkopfes zu sehen. Es handelt sich dabei um eine Doppelwand deren erste Wand (stromaufwärts) zahlreiche kleine Bohrungen aufweist. Die Luft, die durch diese Bohrungen strömt, prallt auf die zu kühlende Wand. Durch die Prallkühlung lassen sich hohe Wärmeübergangszahlen realisieren. Die Kühlluft strömt danach in die Primärzone und wird als Verbrennungsluft verbraucht. Der Kompromiß, den man hier wegen der Kühlung des Brennkammerkopfes eingehen muß, erhöht die Homogenität im Bereich der Primärzone und deswegen auch die NO<sub>x</sub>-Emissionen im Vergleich zu der Rohrbrennkammer.

Das Zumischmodul für die Rechteckbrennkammer mußte neu ausgelegt werden, da sich die Strömungssituation von der Rohrbrennkammerinnenströmung unterscheidet. Zu diesem Mischungsproblem wurde mit der TH-Darmstadt [8] und der DLR-Köln [9] kooperiert. Die Arbeiten in Darmstadt und in Köln ergaben, daß eine in radialer und axialer Richtung versetzte Lochreihenkonfiguration das größte Mischungspotential aufweist. Das berechnete Strömungs- und Mischungsfeld der Brennkammer [11] zeigte, daß die Mischung mit der versetzten Lochan-

ordnung schnell und homogen erfolgt. Durch Messungen in der Brennkammer, mit einer dafür entwickelten Traversiereinheit, konnte dieses theoretische Ergebnis bestätigt werden. Bild 14 zeigt den gemessenen NO<sub>x</sub>- und Ausbrandverlauf in der Brennkammer. Die dargestellten Ebenen sind in Bild 13 zu sehen. An Bild 14 erkennt man, daß nach dem Zumischmodul kaum noch nennenswerte NO<sub>x</sub>-Produktion entsteht und der volle Ausbrand erreicht wird. Dies bedeutet, daß in der mageren Stufe die Homogenität einen sehr hohen Grad erreicht und deswegen Gebiete mit hoher Temperatur und hoher NO<sub>x</sub>-Produktion kaum noch existieren.

Die Probleme, die innerhalb dieses Vorhabens nicht gelöst werden konnten, war die Kühlung der Brennkammerwand der fetten Stufe und die für eine Anwendung sehr niedrige thermische Belastung der Brennkammer.

## 7.3 E3E-Brennkammertechnologieprogramm

Innerhalb des E3E-Brennkammertechnologieprogramms soll eine NO<sub>x</sub>-Reduktion von 60% gegenüber der Vorschrift ICAO '95 bei einem Druck von 22 bar demonstriert werden. Als Verbrennungskonzept wählte die MTU das Fett-Mager-Verbrennungskonzept, da die Entwicklungsarbeiten innerhalb der Projekte Turboflam und BRITE/EURAM zeigten, daß das angesprochene Konzept das Reduktionspotential bei hervorragender Verbrennungsstabilität und Zündeigenschaft besitzt. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit der Umrüstung von alten Triebwerken, da die Fett-Mager-Brennkammer im äußeren Design sich von konventionellen Brennkammern nicht unterscheidet.

Angefangen wurde auch in diesem Fall mit einer Rechteckbrennkammer, die aber alle geometrischen Gegebenheiten einer Triebwerksbrennkammer aufweist. Bild 15 zeigt das E3E-Brennkammerrig mit der Fett-Mager-Brennkammer. Man hat in diesem Fall darauf geachtet, daß die Brennkammerzu- und -Umströmung der Realität im Triebwerk entspricht. Darüber hinaus erhöhte man die thermische Belastung der Brennkammer auf ca. 60 MW/(m<sup>3</sup>·bar). Die Brennkammerwände wurden in diesem Fall durch Effusionskühlung gekühlt. Dies bedeutete für die primäre Verbrennungszone eine weitere Verschlechterung der Homogenität. Durch das Einströmen von Luft entsteht im Wandbereich der fetten Zone ein stöchiometrisches Gebiet, das für hohe Gastemperaturen und NO<sub>x</sub>-Emission verantwortlich ist. Es war zu erwarten, daß das Ergebnis bezüglich der NO<sub>x</sub>-Emission gegenüber dem BRITE/EURAM-Ergebnis sich verschlechtern würde.

Mit der Rechteckbrennkammer wurden sowohl Mittel- druckversuche (bis 6 bar) bei der MTU, als auch Hochdruckversuche (bis 20 bar) bei der DLR-Köln durchgeführt. Das gewählte Kühlkonzept der Effusionskühlung bewährte sich bei diesen Versuchen hervorragend. Die thermische Stabilität der Brennkammer wurde in allen Betriebspunkten gewährleistet.

In Bild 16 wird der Ausbrand unter Teillastbedingungen dargestellt. Für den Vollastfall ist der Ausbrand wegen den hohen Drücken und Temperaturen nahezu 100 % und stellt für moderne Triebwerke kein Problem dar. An Bild 16 erkennt man, daß auch für die dargestellten niedrigen Drücke und Temperaturen hohe Ausbrände über einen sehr weiten Betriebsbereich erreicht werden können, eine Tatsache die für das Fett-Mager-Konzept spricht. Will man nämlich ein neues Konzept zur NO<sub>x</sub>-Reduzierung einführen, so muß man gewährleisten, daß die restlichen Emissionen, sich in der Größenordnung der Emissionen konventioneller Triebwerke bewegen. Der Vergleich des Ausbrandes für Teillastbedingungen der E3E-Brennkammer mit repräsentativen Triebwerken (s. Bild 17), zeigt daß dies der Fall ist. An Bild 17 wird für die Doppeldombrennkammer des CFM56-2B1/2-Triebwerkes auch der Ausbrand im Betriebspunkt Approach dargestellt. Daran sieht man, daß das neue Brennkammerkonzept, das für niedrige NO<sub>x</sub>-Emissionen entwickelt wurde, einen niedrigen Ausbrand im Betriebspunkt Approach aufweist.

Bild 18 vergleicht die Rußemission der E3E-Brennkammer mit der Rußemission repräsentativer Triebwerke. Da die Einheit der Rußemission keine absolute Größe sondern von der Partikelkonzentration im Abgasstrom abhängt, erscheint hier die gemessene Rußkonzentration der E3E-Brennkammer höher zu sein als die konventioneller Triebwerke. Man muß aber berücksichtigen, daß der Brennkammerabgasstrom am Düsenaustritt mit der Bleed-Luft, die man für die Turbinenkühlung abzweigt, gemischt wird, und deswegen die Rußemission am Triebwerksaustritt, immer geringer als die Rußemission am Brennkammeraustritt ist. Mischt man weiterhin den Kernstrom mit dem Bypass-Strom, so erreicht man eine weitere Reduzierung der Rußemission. Berücksichtigt man diese Aspekte, so kann man sagen, daß die Rußemission eines Triebwerkes, das mit der E3E-Brennkammertechnologie ausgerüstet ist, in der gleichen Größenordnung wie konventioneller Triebwerke liegt.

In Bild 19 werden die NO<sub>x</sub>-Emissionen als Funktion des Brennstoff/Luftmassenverhältnisses (BLV) dargestellt. Daran erkennt man den typischen Verlauf der NO<sub>x</sub>-Emission. Ausgehend aus einem niedrigen Niveau (magere Primärzone) wächst die Emission zu einem Maximum (stöchiometrische Primärzone) um

dann zu einem Minimum (fette Primärzone) abzufallen. Der Anstieg der NO<sub>x</sub>-Emissionen zum Maximum ist um so steiler je homogener das Brennstoff/Luft-Gemisch ist. Anhand der erzielten Ergebnisse läßt sich Druck und Temperaturabhängigkeit der NO<sub>x</sub>-Emission herleiten:

$$(8) \quad EINO_x \sim p^a; 0.3 < a < 0.4$$

$$(9) \quad EINO_x \sim \exp\left(\frac{T}{A}\right); 220 < A < 330$$

Aus den hergeleiteten Beziehungen läßt sich die NO<sub>x</sub>-Emission für den ICAO-Zyklus eines konventionellen Triebwerkes darstellen. In Bild 20 ist die NO<sub>x</sub>-Emission der E3E-Brennkammer im Vergleich zu repräsentativer Triebwerkstechnologie dargestellt. Daran erkennt man, daß das einfache E3E-Konzept durchaus mit der komplizierten Technologie der brennstoffgestuften Brennkammer konkurrieren kann.

#### 7.4 Vergleich der Entwicklungsstadien

Bild 21 vergleicht die NO<sub>x</sub>-Emissionen während der verschiedenen Entwicklungsstadien untereinander und mit konventioneller MTU-Brennkammer-technologie.

Die erste Erkenntnis aus diesem Vergleich ist, daß die NO<sub>x</sub>-Emission bei konventioneller Auslegung sehr schwach von der Stöchiometrie abhängt. Der Grund dafür liegt in der nicht sauberen Trennung der Verbrennungszonen und der damit verbundenen inhomogenen Gemischaufbereitung. Wie schon in Kapitel 4.1.3 theoretisch gezeigt wurde, nimmt mit steigender Inhomogenität die Abhängigkeit der NO<sub>x</sub>-Emission von der Stöchiometrie ab.

Die zweite Erkenntnis aus diesem Vergleich ist, daß im Zuge der praktischen Anwendung eines theoretischen Konzeptes notwendige Kompromisse eingegangen werden müssen. Diese beeinflussen meistens das Ergebnis negativ. In der vorliegenden Veröffentlichung wurde dargestellt, wie man einen Zuwachs der Inhomogenität in der primären Verbrennungszone hinnehmen müßte, um die thermische Stabilität der Brennkammer zu gewährleisten. Dieser Zuwachs in der Inhomogenität bewirkte auch einen Zuwachs in der NO<sub>x</sub>-Emission im interessierenden Bereich der fetten primären Stufe.

## 8. ZUSAMMENFASSUNG

Zur Reduzierung der NO<sub>x</sub>-Emission wird bei MTU des Konzept der Fett-Mager-Verbrennung verfolgt. Neben der niedrigen NO<sub>x</sub>-Emission erfüllt dieses Verbrennungskonzept die Sicherheitsaspekte des Triebwerkes (Verbrennungsstabilität, zünden in großer Höhe). Darüber hinaus besteht die Möglichkeit der Umrüs-

tung von alten Triebwerken, da das untersuchte Konzept, sich äußerlich von konventionellen Brennkammern nicht unterscheidet.

Das vorgeschlagene Verbrennungskonzept wurde innerhalb des E3E-Technologieprogramms unter realistischen Betriebsbedingungen ( $p_{\text{ein}} = 20 \text{ bar}$ ,  $T_{\text{ein}} = 800 \text{ K}$ ) untersucht. Die Ergebnisse dieser Untersuchung lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die thermische Stabilität der Brennkammer wurde im gesamten Betriebsbereich gewährleistet
- Der Ausbrand und die Rußemission entsprechen dem Stand der Technik
- Die schon erreichte NO<sub>x</sub>-Reduktion beträgt 57% gegenüber ICAO 95 bei einem Druck von 22 bar.

## 9. LITERATURVERZEICHNIS

[1] K. Knapp, W. Leuckel, J. Meisel, S. Wittig  
Zweistufige Verbrennung  
FVV Vorhaben Nr. 405, Heft R528, 1993, S. 1-110

[2] K. Knapp, W. Leuckel, J. Meisel, S. Wittig  
Zweistufige Verbrennung II  
FVV Vorhaben Nr. 539, Heft R575, 1995, S. 1-79

[3] C.P. Fenimore  
13<sup>th</sup> Symposium (International) on Combustion  
1971, pp. 373-380

[5] H. Eberius, T. Just, S. Kelm  
VDI-Berichte Nr. 498 (1983), S. 183-192

[6] N. Zarzalis

NO<sub>x</sub>-Reduktion mittels der zweistufigen Verbrennung (Fett-Mager-Verbrennung) bei Gasturbinenbrennkammern  
BWK 11/92, S. 485-490

[8] T. Dörr  
Ein Beitrag zur Reduzierung des Stickoxydausstoßes von Gasturbinenbrennkammern  
Dissertation, TH-Darmstadt, 1995, S. 1-127

[9] C. E. S. S. Migueis  
Untersuchung zur Optimierung der Mischzone einer fett-mager gestuften Ringbrennkammer  
ISRN DLR-FB-96-33, 1996, S. 1-99

[10] N. Zarzalis, G. Pellischek, G. Meikis, B. Glaeser, H. Huster  
NO<sub>x</sub>-Reduction in Aero Engine Combustors by Application of the Rich Lean Combustion Concept  
ASME, 1995, Wam-95-6

[11] N. Zarzalis  
Brite/Euram: Task 1.2 „Rectangular RQL Combustor“,  
Final Report, 1996  
MTUM-TM/ET-96/059

## 10. BILDER

kN-Schub

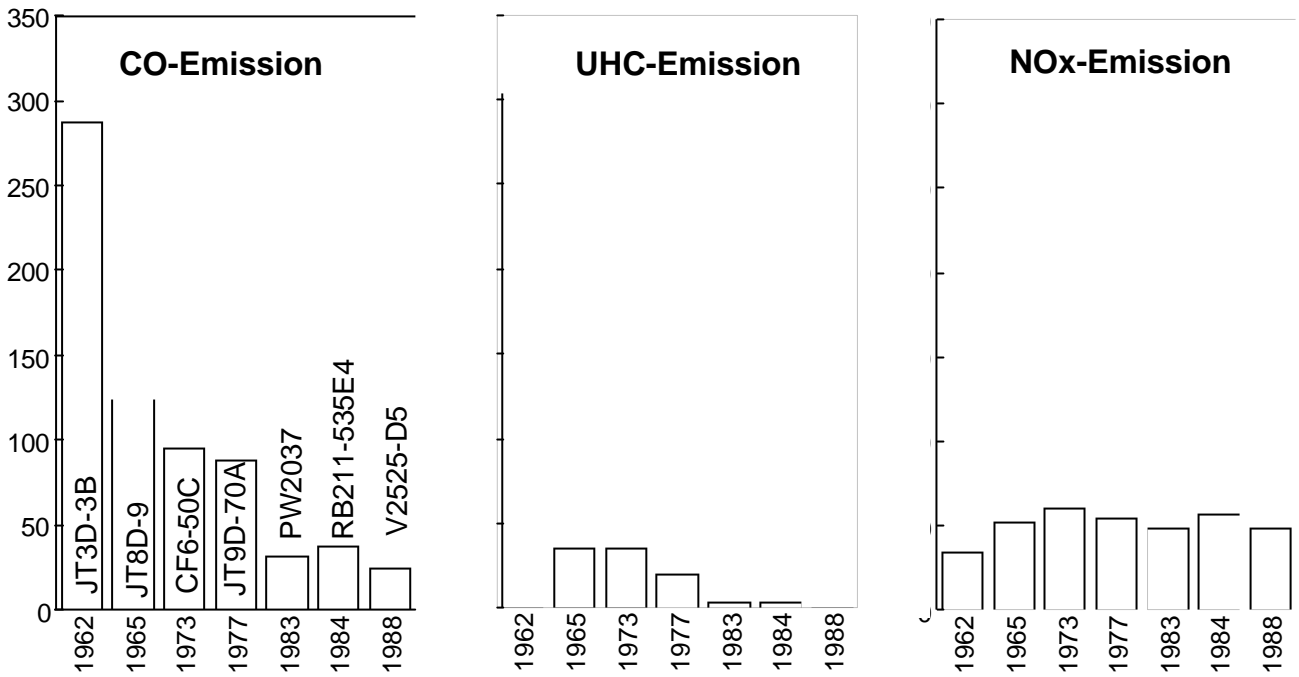
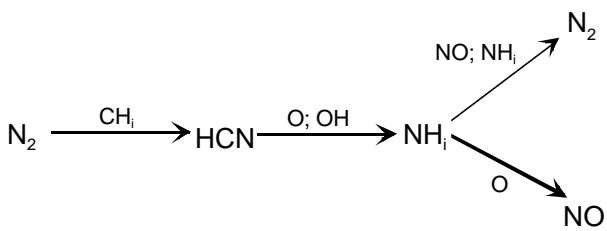


Bild 1: Schadstoffemission in Bodennähe



Total Fixed Nitrogen = HCN + NH<sub>3</sub> + NO

Bild 2: Der Prompt NO-Bildungsmechanismus

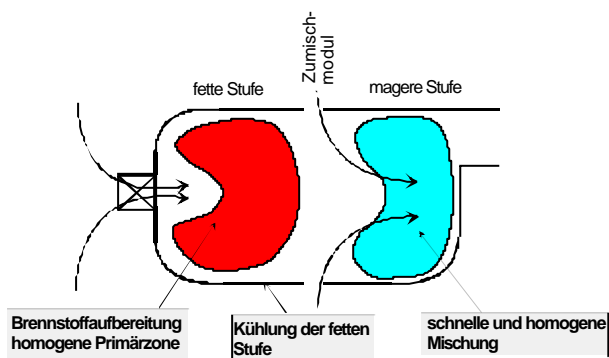


Bild 3: Darstellung des Fett-Mager Verbrennungskonzeptes

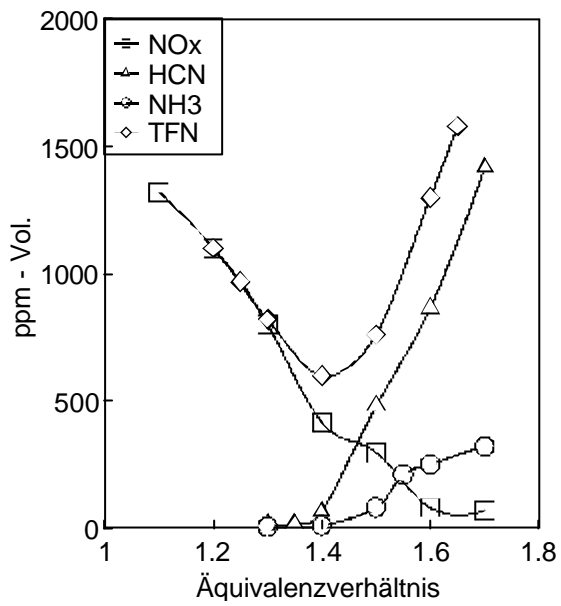


Bild 4: Stöchiometrische Abhängigkeit der TFN-Konzentration [5]

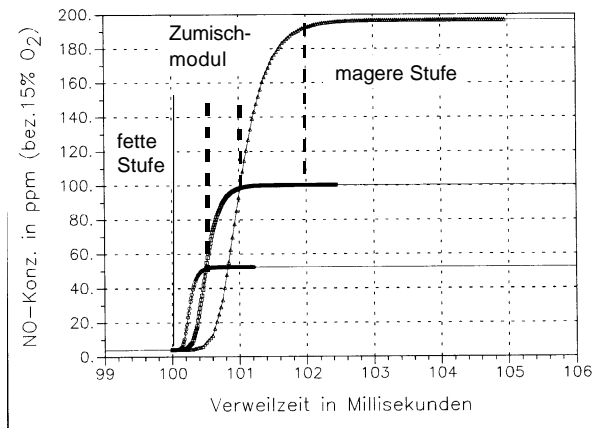


Bild 5: Einfluß der Mischzeit auf die NO-Bildung [1]

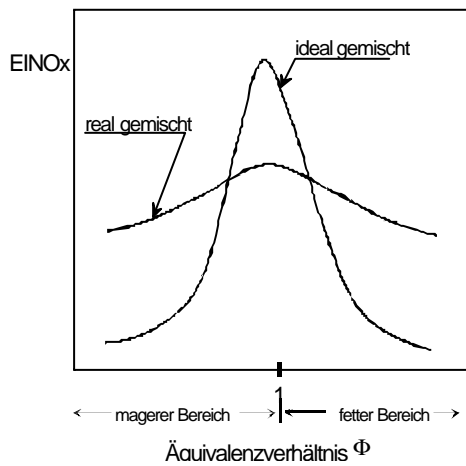




Bild 6: Einfluß der Mischungsgüte auf die NO-Bildung

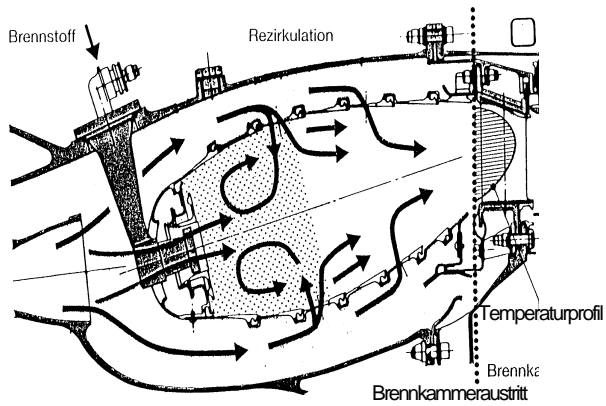


Bild 7: Aufbau und Wirkung einer Gasturbinenbrennkammer

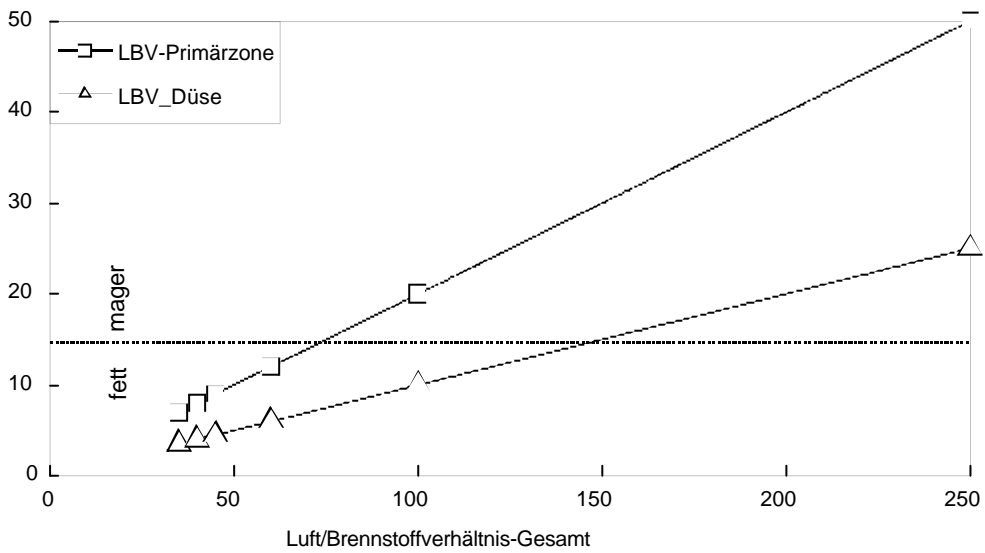


Bild 8: Darstellung des Betriebsbereiches einer Gasturbinenbrennkammer

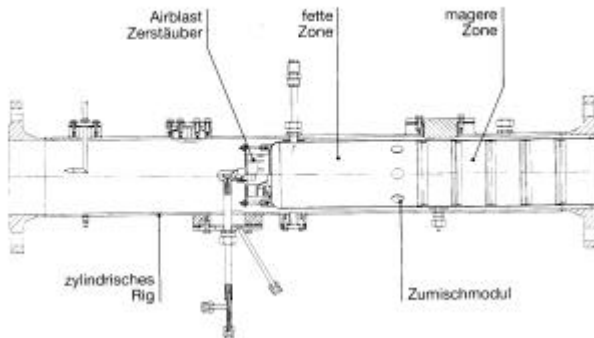


Bild 9: Fett-Mager Rohrbrennkammer

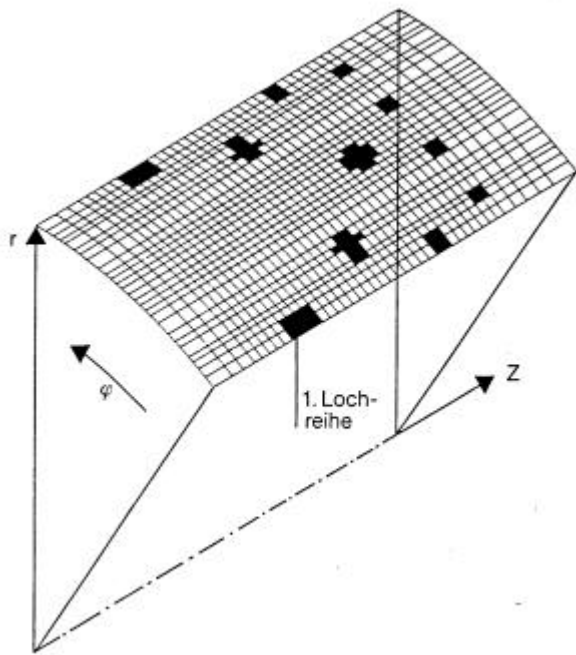
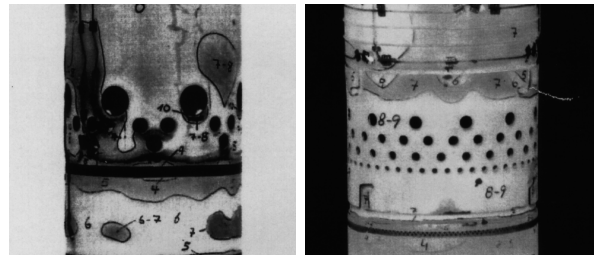


Bild 10: Diskretisierung des Zmischmoduls

Bild 11: Darstellung des berechneten Mischungsfeldes in der 3. Lochreiheebene



1. Konfiguration

Abschlußkonfiguration

Bild 12: Vergleich des Thermofarbenversuchs für die erste und die Abschlußkonfiguration

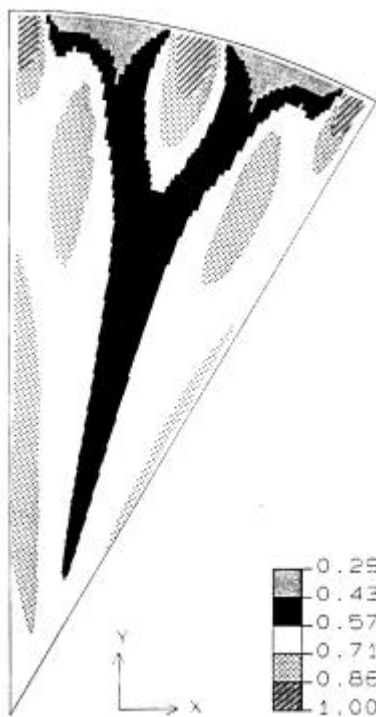


Bild 13: Fett-Mager Rechteckbrennkammer

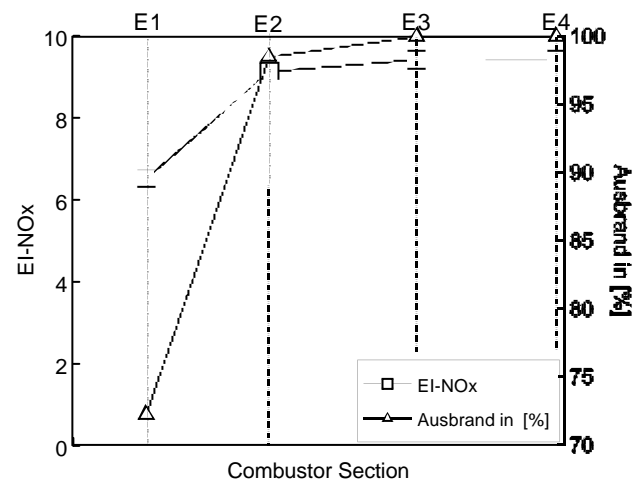
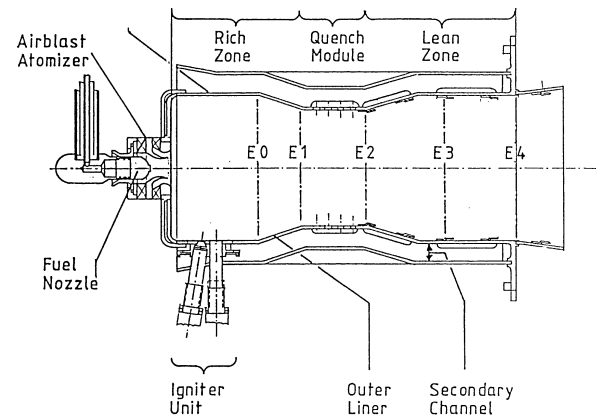


Bild 14: NOx und Ausbrand Verlauf in der

# Brennkammer

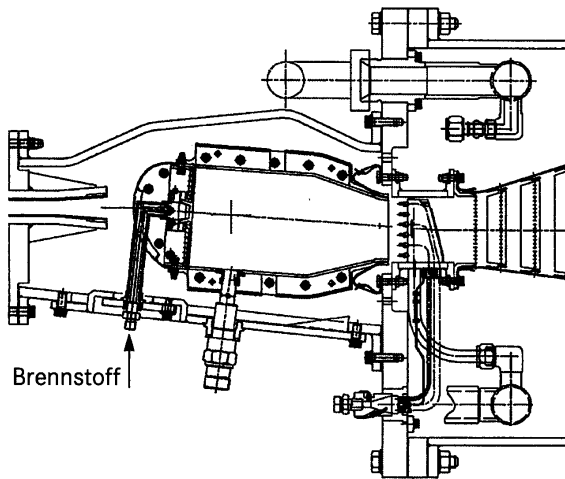


Bild 15: E3E: Fett-Mager Rechteckbrennkammer

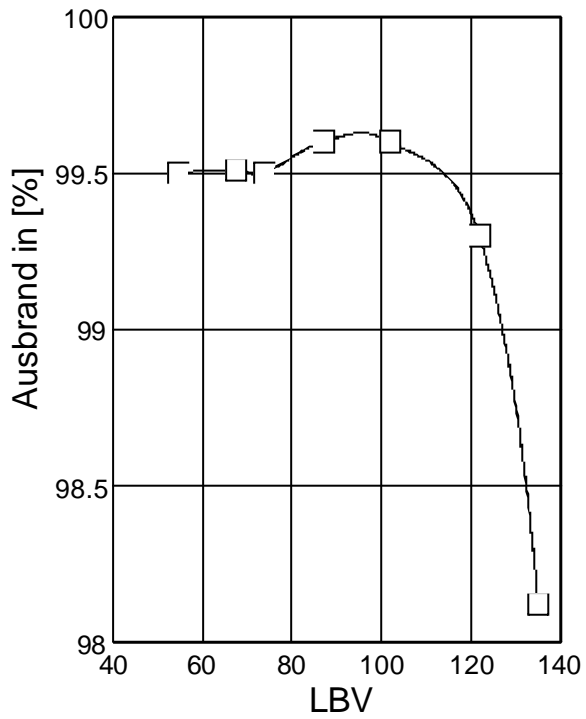


Bild 16: Darstellung des Ausbrandes für einen Teillastfall

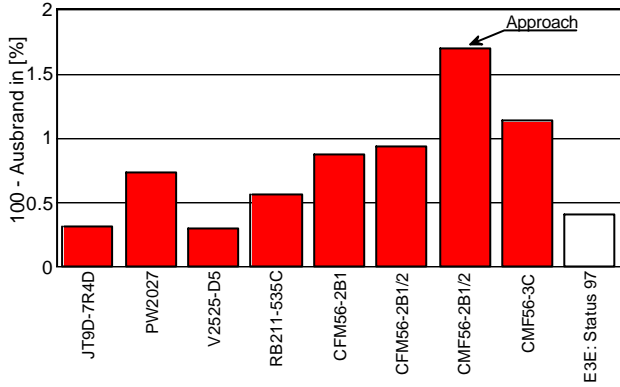


Bild 17: Vergleich des Ausbrandes repräsentativer Triebwerke

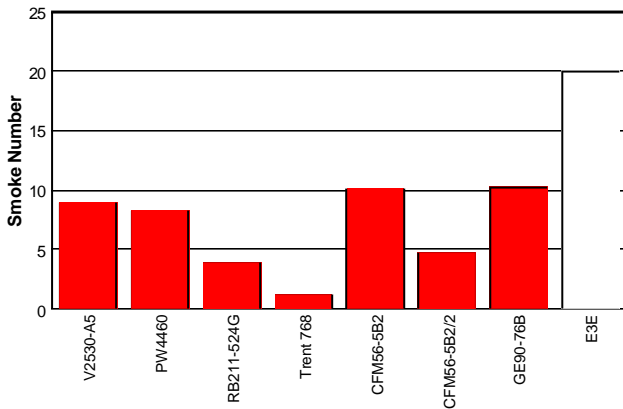


Bild 18: Vergleich der maximalen Rußemission repräsentativer Triebwerke

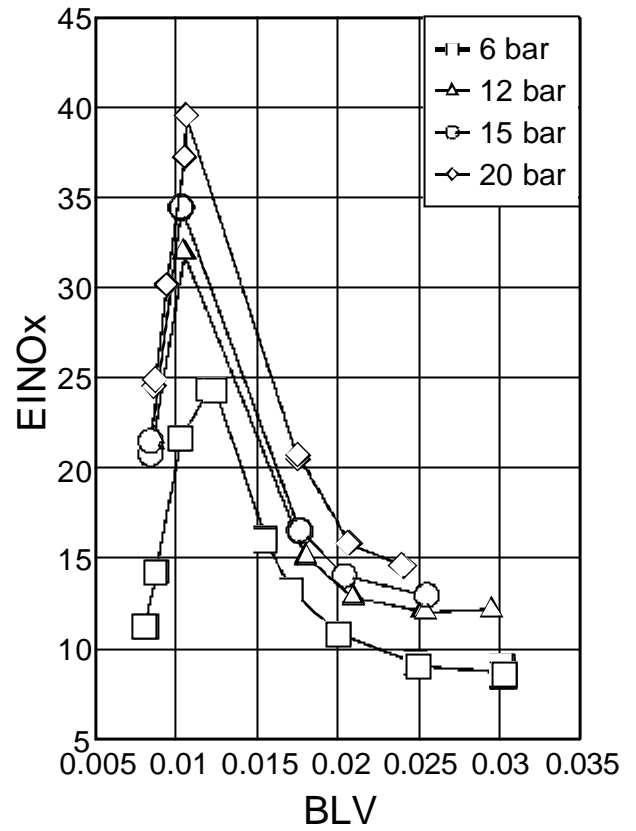


Bild 19: Darstellung der NOx-Emission bei  $T_{ein} = 727\text{ K}$

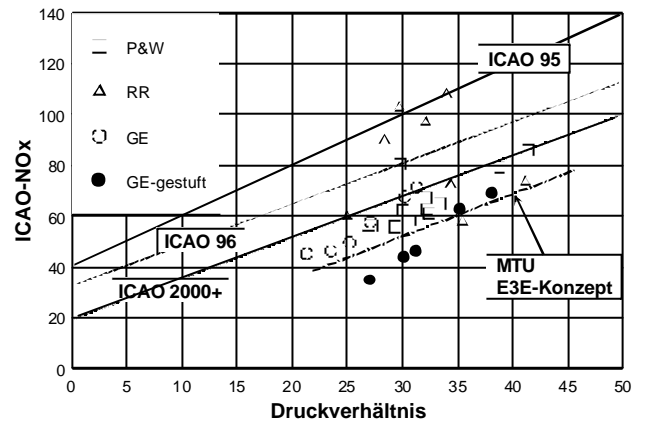


Bild 20: Vergleich der NOx-Emission repräsentativer Triebwerke

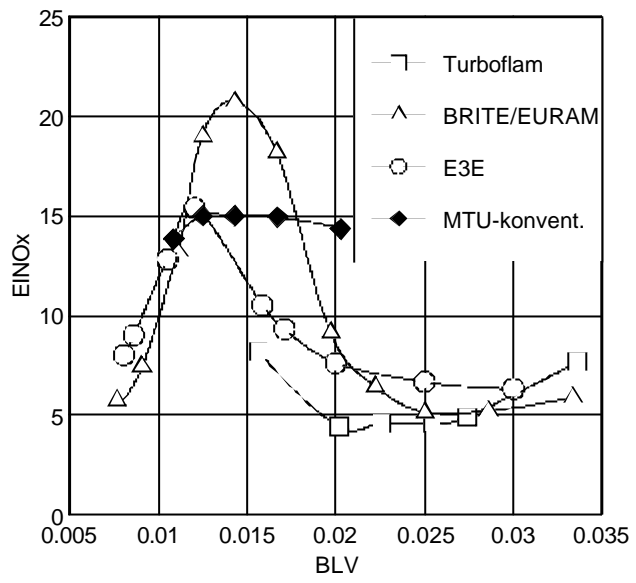


Bild 21: Vergleich der NOx-Emission während der verschiedenen Entwicklungsstadien