

Biomassenutzung zur Stromproduktion Vergleich verschiedener Techniken

Der Gasmotor im Wettbewerb zum Zündstrahlmotor

**Jenbacher AG
Dr. G.R. Herdin**

EU-Ziele bzw. Einhaltung der Kyoto-Ziele

International gesehen ist zumindest am Papier bereits einiges geschehen, um den Beitrag an „fossil“ erzeugtem CO₂ einzuschränken. Heute gelten dazu die Festlegungen, die in Kyoto (Japan) gemacht wurden. Die Zielwerte der CO₂-Reduktion wurden durch die Konferenz sehr optimistisch angesetzt. Nach dem derzeitigen Kenntnisstand sind dazu die Ausschöpfung mehrerer Ressourcen, wie der vermehrte Einsatz der Kraft/Wärmekopplung, die Nutzung biogener Energieträger, vermehrter Einsatz der Wind- und Kleinwasserkraft sowie verschiedene Effektivitätsverbesserungen notwendig. Für die EU-Staaten wurde die Vorgehensweise im EU-Weißbuch „Energie für die Zukunft: Erneuerbare Energie“ festgelegt. Für Österreich hat man sich auf 4 % des angebotenen Stromes aus „biogenen Energieträgern (inkl. Wind)“ sowie 12 % aus Kleinwasserkraft bis zum Jahr 2007 geeinigt. Für die Jenbacher AG ist daher die intensive Beschäftigung mit dem Thema „Strom aus erneuerbaren Energieträgern“ ein sehr in die Zukunft reichendes Aufgabengebiet, wobei bereits auf jahrzehntelange Erfahrungen zurückgegriffen werden kann.

Potenziale in der Landwirtschaft

Im Bereich der Landwirtschaft schlummern erhebliche Potenziale zur Erzeugung von Strom und Wärme aus Biomasse bzw. landwirtschaftlichen Reststoffen. In einer vom Österr. BMfUJF veröffentlichten Studie (Stand E98) werden die grundsätzlichen Potenziale in der Landwirtschaft (Anaerobverklärung) bewertet und in einem Umsetzungsszenario die gewinnbare Arbeit in GWh/a errechnet. Das gezeigte Modell geht von vielen kleinen Anlagen (13.600 bis 46.000) aus, wobei der Wirkungsgrad (el.) für den heutigen Technologiestand eher als bescheiden einzustufen ist. Insgesamt könnten auf diese Weise 1.350 GWh/a erzeugt werden, ohne daß eine eigene Produktionslinie geschaffen werden mußte. Der Ansatz kann mit „jeder Bauer mit mehr als 20 GVE (Großvieheinheiten) hat sein eigenes BHKW“ bezeichnet werden. Dieser Lösungsweg ist nach unseren Erfahrungen als kritisch einzustufen, da der Anlagenbetreiber sich dann in vielen Technologiebereichen relativ gut auskennen muß. Ein spezieller Bereich stellt dabei die Biologie des Methanisierungsbehälters dar, wo im Speziellen

auf die Population der Methanbakterien geachtet werden muß. Wird z.B. wegen eines Virusbefalles ein erlaubtes Antibiotika den Tieren verabreicht, so hat das nachhaltige Auswirkungen auf die Methanbakterienstämme (meist dramatische Reduktion). Vom Anlagenbetreuer muß dann der Prozess diesen Randbedingungen angepaßt werden, sonst kommt die gesamte Bakterienpopulation in Gefahr und im Klärbehälter befindet sich eine „tote Suppe“. Diese Umstände sind auch von Großanlagen städtischer Abwässer bekannt und die Betreiber haben gelernt, damit umzugehen. Der Motor (egal welches Prinzip der Verbrennungseinleitung) ist sicher in der relativ komplexen Kette eine eher einfache Komponente.

Jenbacher hat mit der motorischen Nutzung von Biogasen (international gesehen) langjährige Erfahrungen, die bereits auf die Siebzigerjahre zurückgehen. So wird z.B. in Dänemark die Gülle in relativ großen Anlagen (z.B. Thorsö 1,3 MW el.) seit Beginn der Neunzigerjahre zur Produktion von Strom und Wärme genützt. Die genannte Anlage verarbeitet die Gülle von 1.000 GVE und zusätzlich fraktionierten Biomüll und landwirtschaftliche Reststoffe. Bei diesen Anlagen, die über das Zusammenschließen mehrerer Bauern zustande kommt, ist die professionelle Betreuung immer sichergestellt und es kommt zu keinen größeren Betriebsstörungen. Neben Dänemark gibt es solche Anlagen auch in Schweden und seit neuestem auch in Deutschland. Das Zusammenschließen von mehreren „Rohstofflieferanten“ bezeichnen wir als den sogenannten „Dänischen Weg“ zur Gülle/Biomassenutzung. Durch diesen Ansatz ist es möglich, auch entsprechend optimierte Motoren einzusetzen, die dann aus dem zur Verfügung stehenden Biogas auch mehr Strom und somit mehr Ertrag erwirtschaften. So kann mit einem Gasmotor ab einer Leistung von 140 kW mit optimierter Verbrennung ein Wirkungsgrad von 37,5 % erreicht werden. Mit dem Einsatz dieser Technologie kann aus demselben Biomassepotenzial, wie vorher angeführt, ein Wert von 1.810 GWh/a erzeugt werden. Um dieses Ziel zu erreichen, sind ca. 1.000 Anlagen notwendig, die Summe der Installationsleistung beträgt rund 210 MW.

Das Potenzial der Strom- und Wärmeproduktion könnte zusätzlich mit der Cofermentation von landwirtschaftlichen Abfällen, biologischen Reststoffen (Grüne Tonne) bzw. mit der gezielten Nutzung von Brach- oder Stilllegungsflächen erheblich verbessert werden. Mit dieser Technologie wird nicht nur der Biogasanfall vermehrt, sondern auch die Stabilität des Anaerobprozesses verbessert. Realistisch betrachtet beträgt dann das Potenzial ca. 3.000 GWh/a aus 1.300 Anlagen, durch den größeren anlagentechnischen Aufwand ist eine Mindestgröße der Anlage von ca. 250 kW el. installiert zweckmäßig. Als Installationsleistung kann nach diesem Ansatz 350 MW errechnet werden. Besonders zu erwähnen ist, daß diese Technik bekannt ist und praktisch kein technologisches Risiko besteht.

Analyse der Biologie

Für den nicht mit dem Thema direkt beschäftigten Interessenten besteht eine Vielzahl von verschiedenen Einheiten und Bezugsmaßen. Um die Sachlage zusätzlich zu verkomplizieren, sind auch die Biogaserträge von dem Rohstoff (Gületyp, Grünschnitt bzw. speziell dem Fettgehalt) abhängig. Speziell im Fall der Gülle ist auch eine Abhängigkeit von dem Futter gegeben, so daß es für Planungsarbeiten zweckmäßig ist, von auf Erfahrungen gestützten Mittelwerten auszugehen. In Bild 1 ist der spezifische Biogasertrag in m^3/m^3 Gülle bzw. der spezifische Biogasertrag in m^3/Tonne Cofermentationsmaterial gezeigt. Die Unterschiede sind beachtlich und hängen im Wesentlichen wie bereits erwähnt von den Inhaltsstoffen ab.

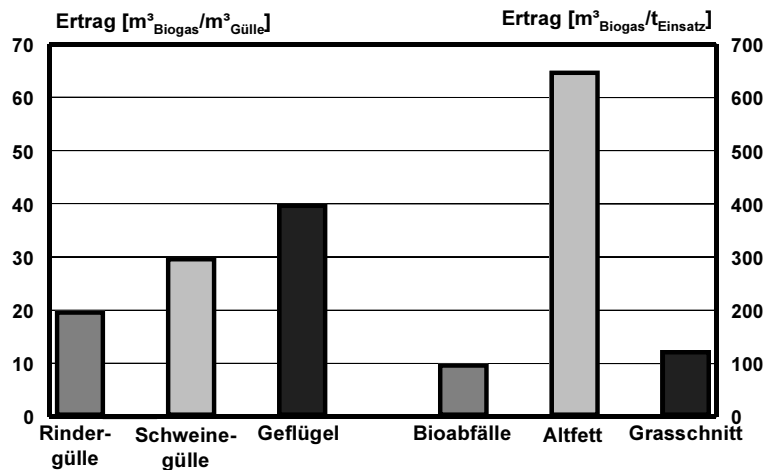
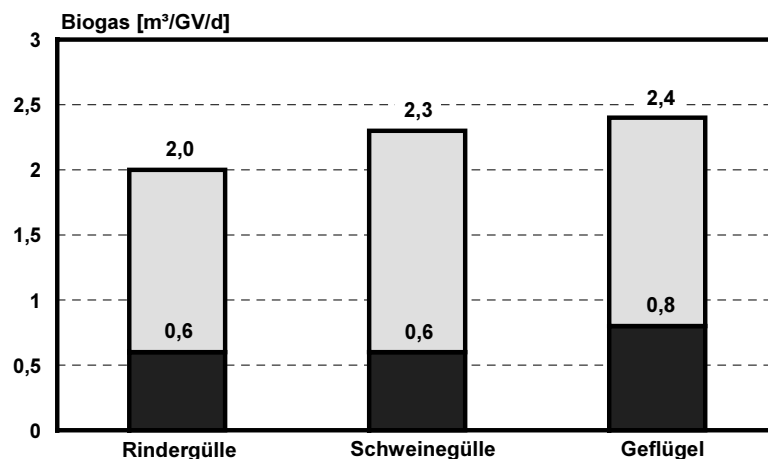


Bild 1: Spezifische Biogaserträge von verschiedener Gülle bzw. Cofermentationsstoffen

Eine ebenfalls übliche Einheit ist die Angabe der spez. Biogasmenge in m³/GVE und Tag. Das Bild 2 zeigt dazu die typischen Werte in den bekannten Bereichen.



Quelle: ÖKL Merkblatt

Bild 2: Biogasertrag in m³/GVE/d

Weitere Bezugsmaße sind die organische Trockensubstanz oTS oder nur die Trockensubstanz TS bzw. die Substratmasse. Typische Werte sind dazu im Bild 3 enthalten. Bei den Pflanzen, die für die Cofermentation genutzt werden, ist der Biogasertrag von den wesentlichen Bestandteilen wie den Kohlehydraten, den Fetten und dem Eiweißgehalt abhängig. Der theoretisch mögliche Methanertrag dazu ist in Bild 4 gezeigt.

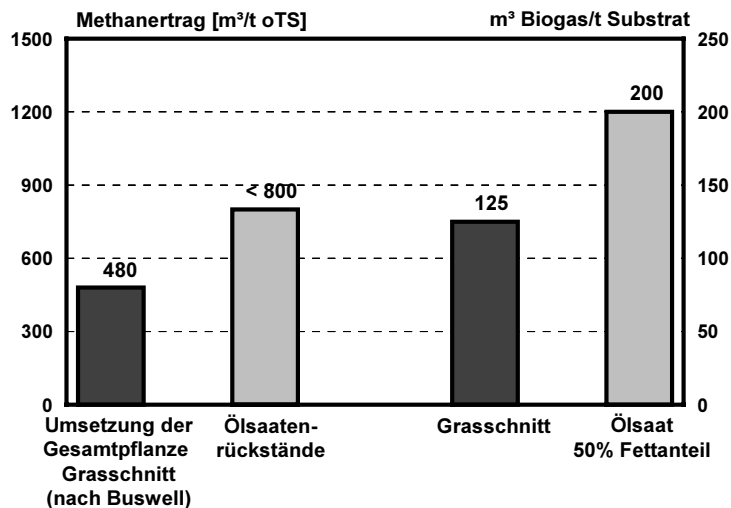
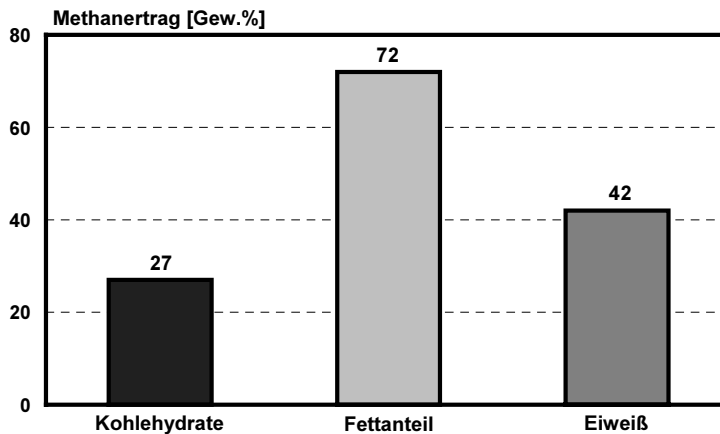


Bild 3: Methanertrag bezogen auf oTS bzw. bezogen auf die Substratmasse

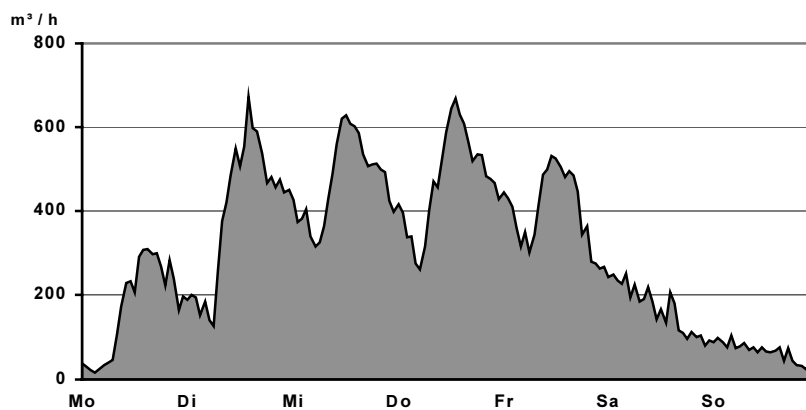


Quelle: www.boxer99.de

Bild 4: Methanertrag bezogen auf die Pflanzenbestandteile

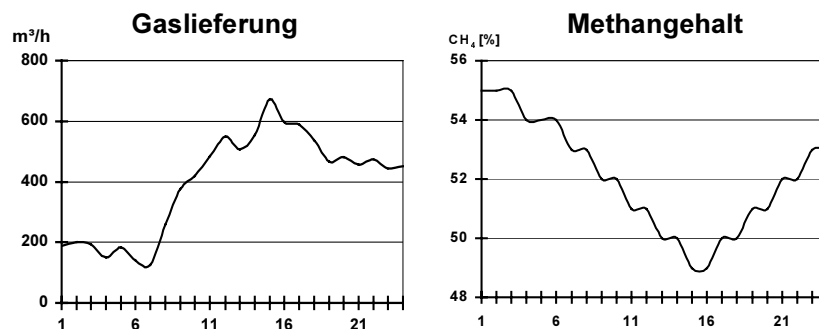
Ergebnisse einer ausgeführten Anlage "Salzburg Siggerwiesen"

Im Land Salzburg (Siggerwiesen – Fa. Salzburger Abfallbeseitigungs GmbH.) wird parallel zur Deponieanlage eine Biomasseanlage nach dem "Dranco Verfahren" zur Biogasgewinnung eingesetzt. Es werden hier die kompostierbaren Abfälle von Salzburg und Umgebung verarbeitet. Der Gasanfall sowie die Gasqualität hängen in diesem Fall neben den oben angeführten Parametern auch von der Anlieferung der Biomasse und der dadurch möglichen Betriebsweise ab. Das Bild 5 zeigt dazu den Gasanfall während der KW 10/2001. Im Bild 6 ist neben dem Gasanfall auch die Schwankungsbreite des Methangehaltes über 24 Stunden zu sehen. Für den Gasmotor sind diese Schwankungen von Heizwert bzw. Gasmenge während des Betriebes des Motors kein Problem. Startschwierigkeiten können jedoch bei großen Heizwertunterschieden auftreten, da die Einstellung des Kraftstoff/Luftverhältnisses für den Neustart auf eine mittlere Gasqualität erfolgt. Eine Abhilfe für dieses mögliche Problem ist die Messung des aktuellen Methangehaltes und eine dadurch korrigierte Einstellung des Gasmischers gegeben. Um bei der Verpflichtung von Wärmelieferungen an kommunale Netze keine Probleme zu bekommen, gibt es ausgeführte Anlagen, wo bei Bedarf dem Biogas auch Erdgas zugemischt wird (Thorsö Mix – Dänemark).



QUELLE: Salzburger Abfallbeseitigung

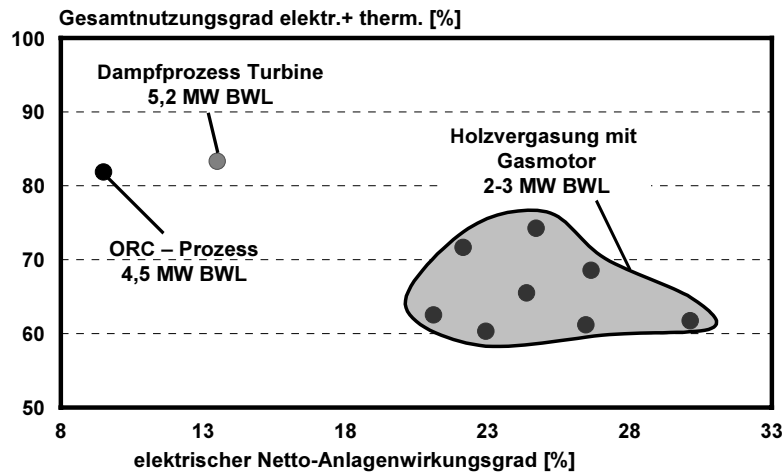
Bild 5: Gasanfall in KW 10/2001 der Biogasanlage Salzburg Siggerwiesen



QUELLE: Salzburger Abfallbeseitigung

Bild 6: Gasqualität und Gasmenge im Tagesverlauf

Als weitere Zukunftstechnologie kann die Vergasung der Biomasse eingestuft werden. Auch in diesem Bereich sind die Potenziale erheblich. Werden die Potenziale von bestehenden Biomasseheizwerken auch zur Stromproduktion genutzt, so wären aus ca. 1.000 Anlagen (mittlere Anlagengröße 2 MW therm.) 2.100 GWh/a generierbar. Als nachteilig ist anzumerken, daß diese Anlagen sinnvoll nur in der Heizsaison (rund 3.500 Betriebsstunden/a) betrieben werden können. In wenigen Fällen besteht auch im Sommer ein Wärmebedarf und damit eine ausreichende Nutzungsdauer für das Investment. Im Fall von gezielter Nutzung des Rohstoffes Holz und einer intensiven Bewirtschaftung kann ein Mehrfaches der oben genannten Jahresarbeit als hochwertiger Strom produziert werden. Das Bild 7 zeigt den Vergleich verschiedener Techniken, um aus fester Biomasse Strom zu generieren. Die besten Verstromungswirkungsgrade sind bei der Vergasung mit anschließender motorischer Nutzung des Holzgases erzielbar. Andere Techniken, wie die eines relativ kleinen Dampfprozesses mit Dampfturbine sowie auch die ORC (Organic Rankine Cycle) Technologie, erreichen bei weitem nicht die durch den Motor erzielten Werte.



Quelle: EVN

Bild 7: Vergleich verschiedener Technologien zur Verstromung von Biomasse

Motorische Nutzung des Biogases

Das von der Methanisierungsanlage kommende Biogas besteht im Wesentlichen aus einer Mischung von Methan (ca. 40 bis max. 65 %) und dem Rest als CO₂. Aus Sicht der innermotorischen Verbrennung ist dieser Kraftstoff sehr gut für den Motor geeignet. Dennoch muß auf einige Eigenheiten des Biogases geachtet werden, besondere Beachtung ist den Spurenstoffen - im speziellen dem H₂S - zu widmen. Im Fall der Mitverarbeitung von industriellen Biomasseabfällen bei der Cofermentation können weitere Stoffe (Phosphorverbindungen, Siloxane u.a.) in das Biogas gelangen und möglicherweise Probleme bei den Motoren oder im Abgassystem verursachen. Ebenso ist auf die Feuchtigkeit zu achten. Jenbacher kann durch die langjährige Beschäftigung mit diesem Gastyp (mehr als 600 Biogasmotoren wurden verkauft) auf einen entsprechenden Erfahrungsschatz zurückgreifen.

Gasottomotor

Aus heutiger Sicht ist der Gasottomotor für den Einsatz mit Biogas sehr weit entwickelt und kann es auch betreffend der erreichbaren Wirkungsgrade leicht mit dem Dieselmotor aufnehmen. Das Konzept ist schematisch in Bild 8 dargestellt. Primär wird bei dem Ottomotor das zündfähige Gemisch vor dem Zylinder hergestellt (Gasmischer) und dann im Brennraum mittels der Zündkerze gezündet (sog. Fremdzündung). Zur Einhaltung der NO_x-Emissionen nach dem Stand der TA-Luft wird der Motor bei Luft/Kraftstoffverhältnissen (Lambda) über 1,65 betrieben. Um trotz des Luftüberschusses auch eine entsprechende Leistungsdichte zu bekommen, werden diese Motoren mit Hilfe eines Turboladers aufgeladen. Nach dem Verdichter ist üblicherweise ein Gemischkühler angeordnet. Das wesentliche Merkmal ist, daß die Lastregelung über eine Drosselklappe erfolgt.

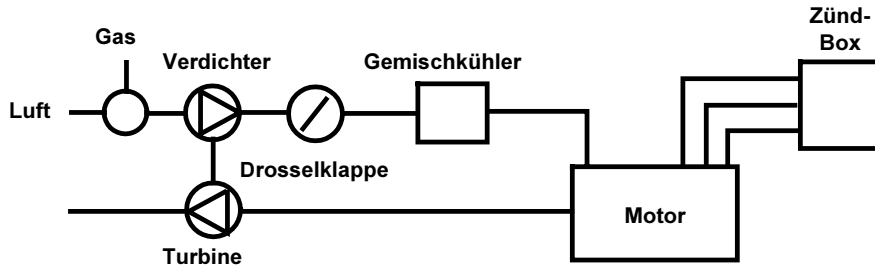


Bild 8: Schema Gasotomotor (aufgeladen)

Das Bild 9 zeigt die Wärmebilanz eines speziell auf Biogas optimierten Gasmotors unseres Types J 208 GS. Bei einem Mitteldruck von 16,5 bar wird ein Wirkungsgrad von 39 % (mech.) erreicht, seitens der Wärmenutzung können nochmals ca. 50 % energetisch auf einem Temperaturniveau von 90 °C angeboten werden.

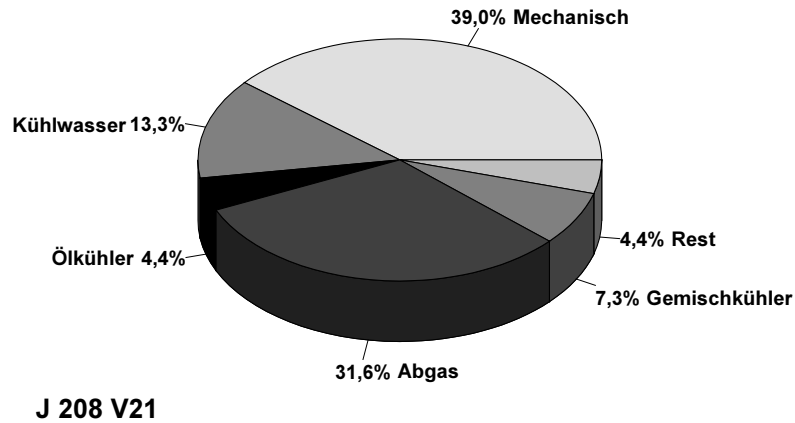


Bild 9: Wärmebilanz des Gasmotors J 208 GS

Die charakteristischen Verläufe der NO_x-, CO- und der HC-Emissionen sind im Bild 10 für Erdgas gezeigt. Im Fall des Biogases verlagert sich bei gleichen NO_x-Werten der Betriebspunkt geringfügig zur „fetteren“ Seite.

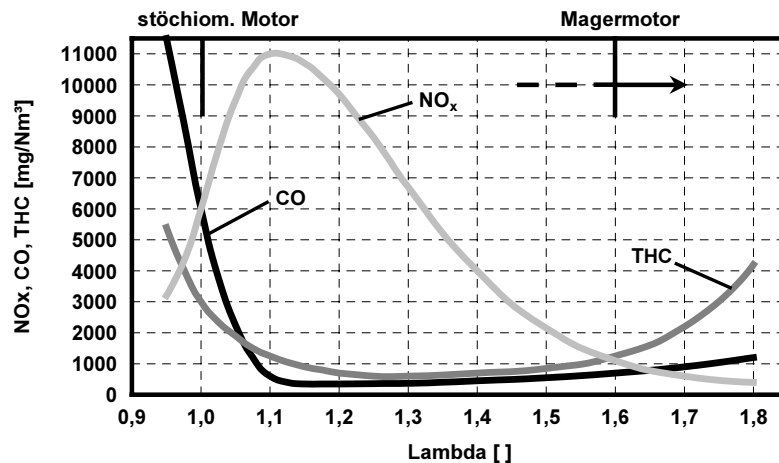


Bild 10: Typische Verläufe der Emissionen (NO_x, CO und HC) über Lambda

Dieselmotor

Neben den Ottomotoren gibt es den Dieselmotor, der für seine hohe Wirtschaftlichkeit bekannt ist. Das Hauptargument für den Fahrzeugeinsatz (speziell dem Nutzfahrzeug) ist das sehr gute Teillastverhalten des Dieselmotors, da er konzeptbedingt ohne Drosselverluste arbeitet. Weiters sprechen auch thermodynamische Aspekte für den hohen Umsetzungswirkungsgrad beim Dieselmotor (hohes Verdichtungsverhältnis). Die für den Entwicklungsingenieur ausschöpfbaren Wirkungsgradpotenziale des Ottomotors sind für den Vollastbereich praktisch gleichwertig dem des Dieselmotors. Das Bild 11 zeigt dazu den letzten Stand der Entwicklungsarbeiten eines neuen Motors der Jenbacher AG mit der Bezeichnung HEC (High Efficiency Concept). Es ist festzustellen, daß dieser neue Gasottomotor betreffend des spezifischen Kraftstoffverbrauches (MJ/kWh) gleich bis besser ist als alle derzeit am Markt befindlichen Dieselmotoren.

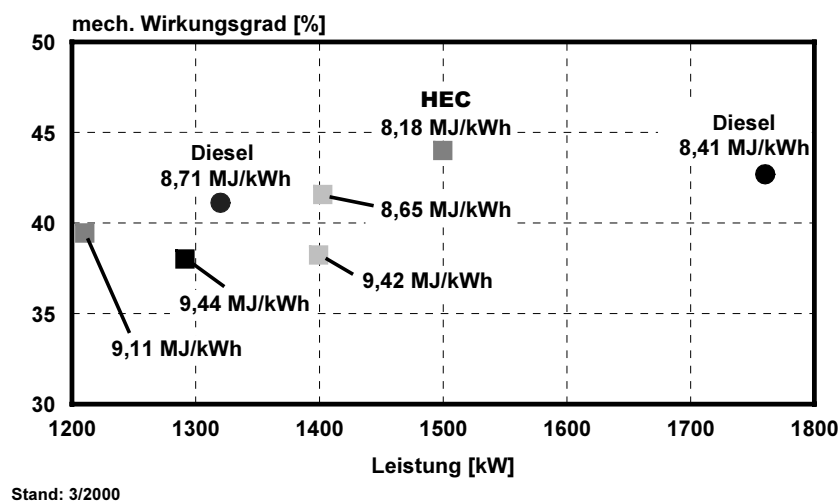
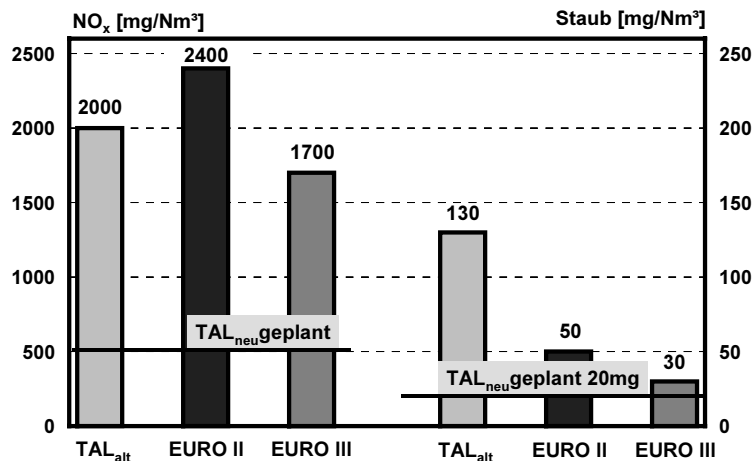


Bild 11: Vergleich des spezifischen Kraftstoffverbrauches Dieselmotoren/Ottomotoren

Aus Sicht der Beeinträchtigung der Umwelt ist der Gasmotor dem Dieselmotor (heutiger Entwicklungsstand) weit überlegen. Im Fall von einer für den Wirkungsgrad optimalen Einstellung betragen die NO_x-Emissionen des Gasmotors lediglich 25 % von den derzeit bestmöglichen Emissionswerten des Dieselmotors, als Potential sind 10 % mit reduziertem Wirkungsgrad derzeit ohne Abgasnachbehandlung darstellbar. Zusätzlich emittiert der Dieselmotor Partikel (Ruß), die dann bei der Einstufung als Stationärmotors als Staub bewertet werden. Das Bild 12 zeigt den Stand der Emissionen bei den Dieselmotoren nach dem derzeit noch gültigen TA-Luft Reglement. Bei der singulären Betrachtung der HC-Emissionen hat der Dieselmotor Vorteile, die bei dem Gasmotor mit Hilfe eines Oxidationskatalysators ausgeglichen werden müssen. Die CO-Emissionen des Dieselmotors sind geringfügig höher als die Rohemissionen eines wirkungsgradoptimierten Gasmotors. Für Biogase wird der Katalysatoreinsatz jedoch durch mögliche Katalysatorgifte eingeschränkt.



Quelle: MTU

Bild 12: Grenzwertevergleich TA-Luft/EURO für Dieselmotoren

Diesenzündstrahlmotor

Für die Nutzung von Biogas wird neuerdings auch das sehr „betagte“ Diesenzündstrahlkonzept (Bild 13) auch für relativ kleine Motoren propagiert. Für den Motorfachmann ist dieses Konzept eine zweckmäßige Alternative bei schlecht entflammaren Gasmischungen sowie für den Alternativbetrieb mit zwei Kraftstoffen (Notstrombetrieb). Bei den NO_x-Emissionen ist dieses Konzept dem Ottogasmotor immer unterlegen und hat auch eine erhebliche Partikelemission. Neue Entwicklungen im Bereich der durch einen Dieselstrahl ausgelösten Fremdzündung (Einspritzmenge kleiner 1 % energetisch) werden für Zylinderleistungen von erheblich über 100 kW analysiert und könnten in den nächsten Jahren auch eine Serienreife für größere Stückzahlen erlangen. Dieser Zündungstyp ist jedoch mit dem am Biogasmarkt erhältlichen Konzept nicht vergleichbar, hier wird von den Anbietern meist nur eine andere Einspritzdüse (reduzierte Spritzquerschnitte) verbaut, um „etwas“ bessere Bedingungen für die Zündungseinleitung herzustellen (siehe Versuche TU München MAN 24/30).

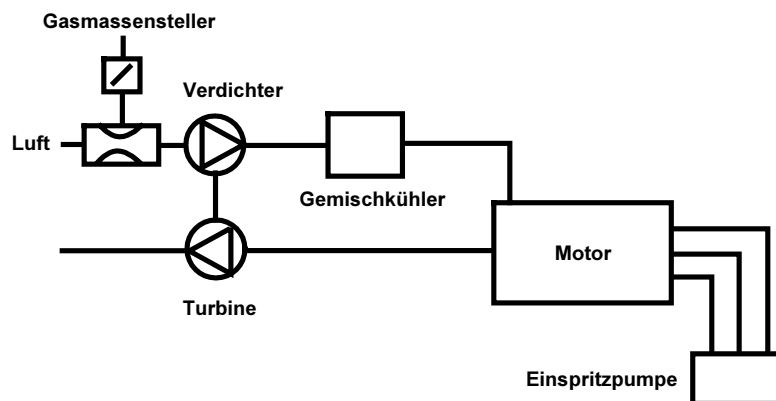


Bild 13: Diesel-Zündstrahlkonzept

Am Markt angebotene Biogas-Zündstrahlmotoren

Für den Motorenfachmann ist die Analyse des Regelungskonzeptes der am Biogasmarkt angebotenen Aggregate ein entscheidendes Kriterium, um die Potenziale dieser Konzepte bewerten zu können. Von mehreren Anbietern wurden dazu diverse Prospekte bzw. veröffentlichte Dokumentationen bearbeitet und eigenen Messungen sowie zugänglichen Daten gegenübergestellt. Das Biogas wird grundsätzlich der Ansaugluft mit Hilfe eines

Steuerorganes zugemischt und mitverbrannt. Als Lastregelungen der Biogas-Zündstrahlmotoren konnten zwei verschiedene Typen gefunden werden.

1. Gasmengengesteuerter Betrieb – hier erfolgt die Lastregelung über die Gasregelstrecke, d.h. der Motor arbeitet bei konstanter Dieselmenge und variablem Gasanteil mit daraus resultierendem variablem Lambda (Motor hat keine Drosselklappe). Für bestimmte Lastbereiche läßt sich der Motor bei konstanter Biogasqualität sicher gut einstellen, bei aufgeladenen Motoren hilft auch die Charakteristik der Aufladegruppe, stabile Verhältnisse herzustellen. Im unteren Lastbereich ist dieses Verbrennungskonzept als kritisch zu bewerten.
2. Regelung auf konstante Leistung – hier erfolgt bei fehlender Gasmenge die Kompensation des energetischen Anteiles durch Dieselkraftstoff.

Für den Insel- und Notstrombetrieb werden der alleinige Betrieb mit Dieselkraftstoff angeboten. Wegen der anderen Düsenkonfiguration jedoch nur 2/3 der Nennleistung.

So verwendet die Fa. Dreyer&Bosse z.B. für ihr 250 kW Aggregat einen Motor des Types Deutz BF 8 M 1015 C. Für den Dieselbetrieb wird eine Leistung von 303 kW bzw. für den Biogasbetrieb eine Leistung von 250 kW angegeben. Die Wirkungsgrade (mech.) liegen dann für den Dieselbetrieb bei 41,15 und für den Biogasbetrieb bei 37,6 % (Bild 14).

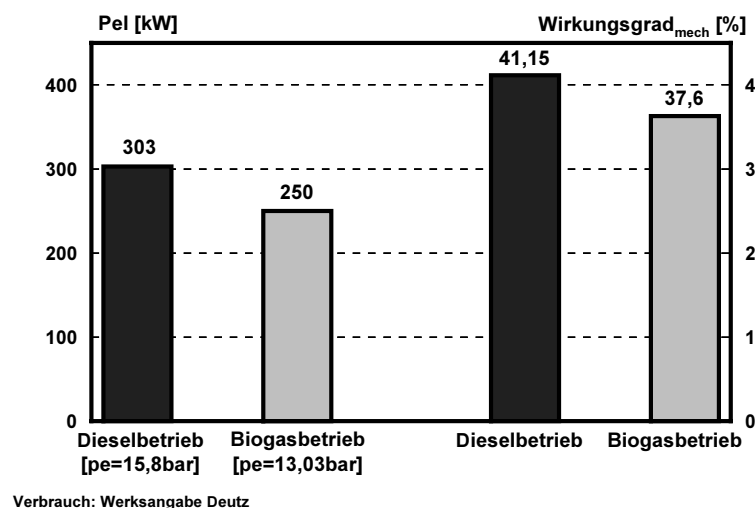


Bild 14: Vergleich Leistung und Wirkungsgrad Diesel-/Zündstrahlbetrieb (Fa. Dreyer&Bosse)

In den Unterlagen sind für den erwähnten Motor zwei verschiedene Leistungen und auch zwei verschiedene Zündstrahlanteile angegeben. Im Fall der kleineren Leistung wird ein energetischer Anteil von ca. 15 % ausgewiesen (Bild 15), der aus Sicht der Verbrennung zu einem sicheren Betrieb der Anlage führen sollte.

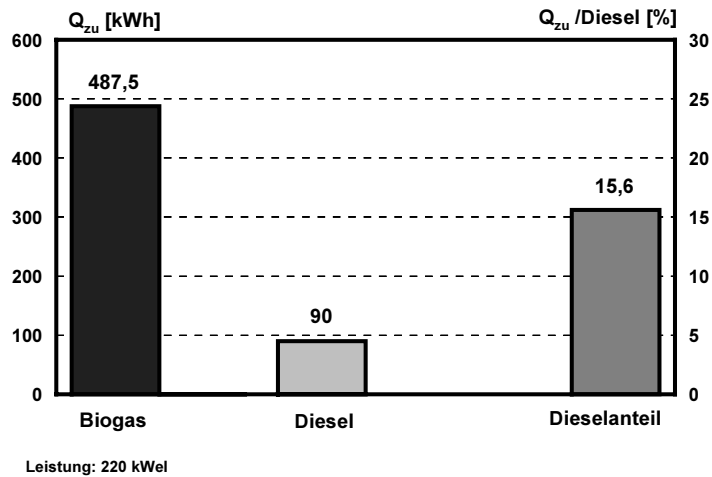


Bild 15: Energetische Aufteilung Biogas/Diesel im Fall der 220 kW Anlage (Fa. Dreyer&Bosse)

Weiters wurde auch ein Anbieter von kleineren Aggregaten (Fa. H.J. Schnell) analysiert. In diesem Fall wird ein Motor von Perkins für ein 55 kW Aggregat verwendet. Das Bild 16 zeigt dazu die angegebene Aufteilung der beiden Primärenergieträger, wobei als Zündstrahlanteil knapp 10 % angegeben werden. Von dem Dieselmotor waren keine Verbrauchsdaten verfügbar, daher konnte kein direkter Vergleich wie beim Deutz Motor angestellt werden.

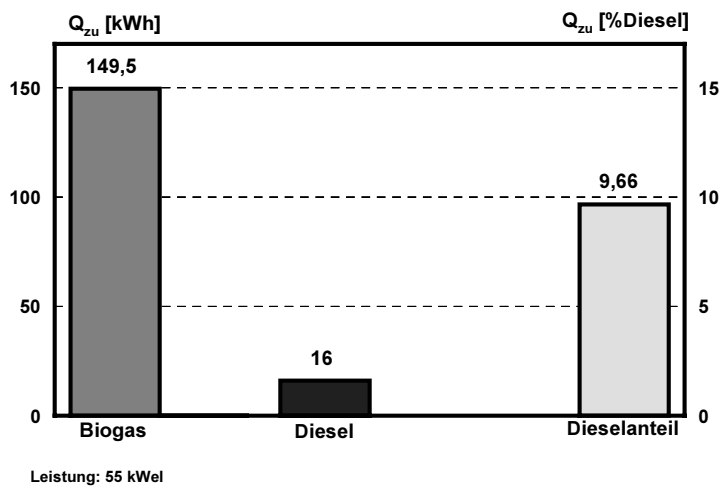


Bild 16: Energetische Aufteilung Biogas/Diesel im Fall der 55 kW Anlage (H.J. Schnell)

Verfügbare Daten eines Motors der schweren Nutzfahrzeugklasse (Dieselbetrieb) betreffend des Lambdas und der Schwärzungszahl (Bosch) sind im Bild 17 gezeigt. Der Motor hat einen hohen Entwicklungsstand bei den Emissionen (EURO II) und weist in weiten Bereichen niedrige Schwärzungszahlen mit Werten unter 0,5 auf. Im Vollastpunkt beträgt das Lambda 1,8 und nimmt naturgemäß mit kleineren Mitteldrücken zu, Lambda 3 wird bei einem Mitteldruck von 4 bar erreicht. Sollte dieser Motor im Zündstrahl-Biogasbetrieb betrieben werden, so wäre die Einspritzmenge 33 mm³ pro Arbeitstakt.

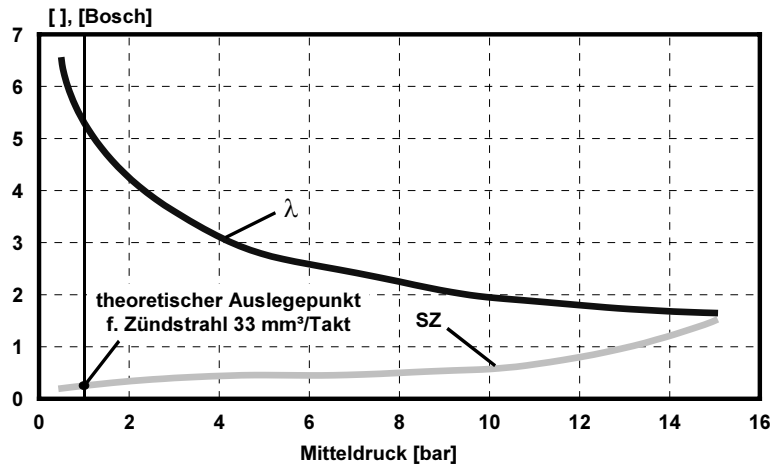


Bild 17: Lambdaverlauf und Schwärzungszahl eines Nfz. Motors

Das Bild 18 zeigt die Verhältnisse bei einem 3,2 l, 6-Zylinder-Motor bezüglich des spez. Kraftstoffverbrauches und der Einspritzmenge pro Arbeitstakt. In diesem Fall liegt der Zündstrahlanteil bei 9 mm³ pro Arbeitstakt, im reinen Dieselmotor entspricht diese Einspritzmasse ca. 11 % der Last. Die Schwärzungszahlen dieses Motors liegen knapp über denen des schweren Nutzfahrzeugmotors (bei 9 mm³ - SZ = 0,2).

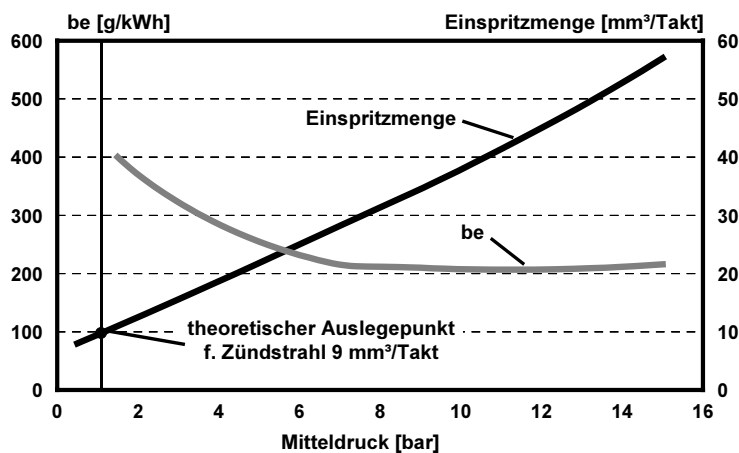
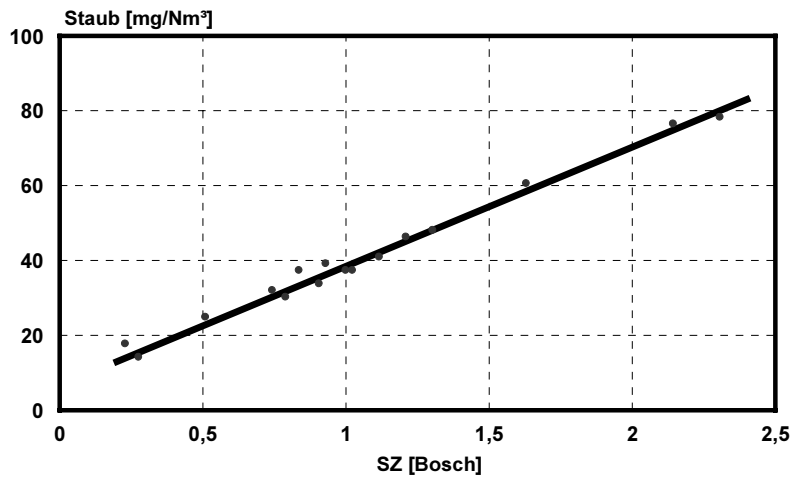


Bild 18: Spezifischer Verbrauch und Einspritzmenge eines 3,2 l Dieselmotors

Alle Dieselmotoren haben gegenüber den Gasotomotoren den Ruß als zusätzliche Emissionskomponente. Der Ruß bildet sich dabei durch die heterogene Verbrennung in den sehr fetten Zonen der Flamme. Im Laufe des Verbrennungsvorganges wird der größte Teil wieder oxidiert und im Abgas ist nur ein relativ kleiner Teil des ursprünglich gebildeten Rußes zu messen. Die TA-Luft beschränkt auch die Staubemissionen (Ruß) der Motoren mit 20 mg/Nm³. Prinzipiell lassen sich die Schwärzungszahlen auch in Staubwerte umrechnen (vereinfacht), eine solche Korrelation zeigt das Bild 19. Im Fall von großen Zündstrahldieselmotoren (z.B. 2 MW Klasse) steigen die Rußwerte im Vollastbetrieb auf ca. 0,5 bis 0,6 Boscheinheiten an. Diese Menge ist ausreichend klein, um sie optisch nicht wahrzunehmen. Bei Bewertung des Rußes als Staub in mg/Nm³ wird der Grenzwert nur knapp erreicht bzw. überschritten. Um dieses Emissionsniveau zu halten, ist ein korrekt eingestellter Motor notwendig. Bei zu großen Abweichungen kann sich der Staubwert auch mehr als verdoppeln. Das gilt auch für Serviceprobleme im Bereich der Einspritzdüsen.



Quelle: MAN (5%O₂)

Bild 19: Korrelation Schwärzungsgrad zu Staub

Brenneigenschaften der Gase

Neben dem Heizwert, der Methanzahl und den Zündgrenzen gibt es noch zwei wesentliche Kriterien der Bewertung von Gasen für die motorische Nutzung, die laminare Flammgeschwindigkeit und der Gemischheizwert.

Eine sehr wichtige Information erhält man durch die laminare Flammgeschwindigkeit. Diese Kennzahl gibt an, wie schnell sich die Flamme bei laminaren Strömungsverhältnissen ausbreitet. Charakteristisch ist, daß jedes brennbare Gas eine mit zunehmendem Lambda abnehmende laminare Flammgeschwindigkeit hat. Ab einer Größe von ca. 5 cm/sec. erlischt die Flamme bzw. kann durch einen Funken nicht mehr gezündet werden. Das Bild 20 zeigt die Situation im Fall von verschiedenen Biogasarten, zum Vergleich ist die lam. Flammgeschwindigkeit von Methan angezeigt. Sehr gute Biogase haben einen CH₄-Anteil von 65 % (Rest CO₂), bei schlechten Qualitäten sinkt der Anteil auf etwa 40 %, im Fall von biologischen Störungen kann der Methananteil auch kleiner sein. Wie ebenso dem Bild 20 zu entnehmen ist, liegt die Gasqualität mit 40 % knapp am Limit der Verwendbarkeit in einem Gasmotor. Insbesondere ist zur Nutzung des Gases das Lambda gezielt anzupassen.

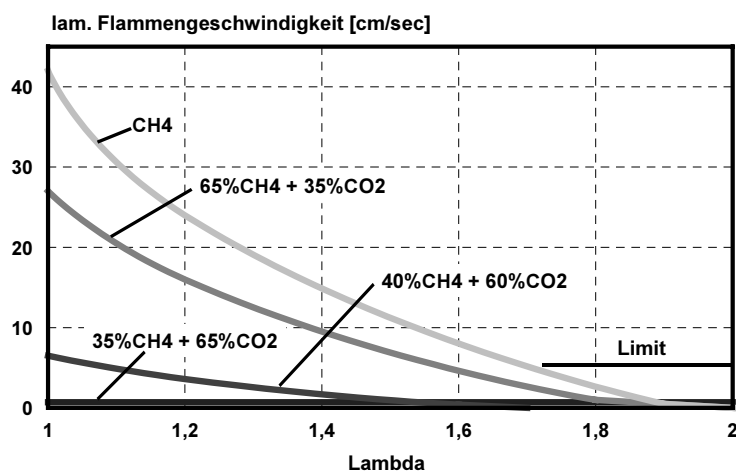


Bild 20: Laminare Flammgeschwindigkeiten von verschiedenen Biogasqualitäten

Das zweite wesentliche Kriterium ist der Gemischheizwert (kWh/Nm³), der sich aus dem Verhältnis der Verbrennungsluft zum Gas ergibt. Im Bild 21 sind die Verhältnisse von

hochwertigem zu schlechtem Biogas bei stöchiometrischer Verbrennung gezeigt. Für den Zündstrahlmotor bedeutet dieser Zusammenhang, daß bei schlechterer Gasqualität die Regelung eine automatische Anfattung des Gemisches durchführt und höhere NO_x und Rußemissionen daraus resultieren.

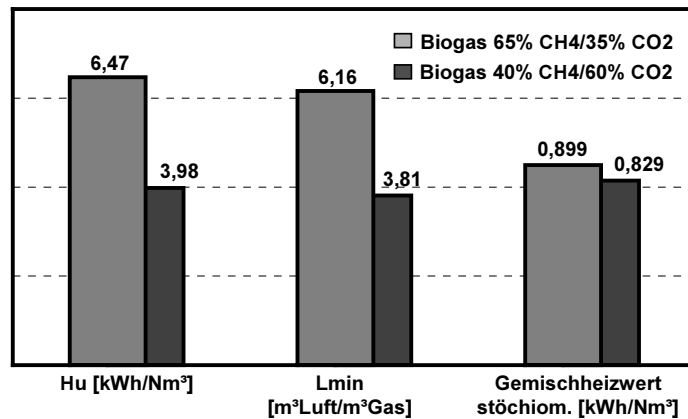


Bild 21: Gemischheizwert von verschiedenen Biogasqualitäten

Durch die im Vergleich zur Funkenzündung hohe Zündenergie der Dieselflamme, ca. 4500 mal höher, verschiebt sich die Magergrenze zu höherem Lambda. Zusätzlich sind die höheren Temperaturen in der Nähe der Flammenkeule im Fall des Zündstrahlmotors für die sichere Entflammung des Gemisches vorteilhaft. Dennoch gibt es einen Grenzbereich, wo die Flamme im Brennraum erlischt. Untersuchungen an einem Jenbacher Motor des Types der Serie 3 zeigen eine Grenze im Bereich von Lambda 3 im Fall von Erdgas (Bild 22). Der Anteil an unverbranntem Methan beträgt bei diesem Lambda bereits 70 %. Als sinnvolle Grenze sollte ein Lambda von 2,3 bei Erdgas nicht überschritten werden, da die energetische Kraftstoffumsetzung bei höherem Lambda unzureichend ist. Für CH₄/CO₂-Gemische, wie es bei den Biogasen der Fall ist, liegt diese Grenze je nach Qualität entsprechend bei fetteren Gemischen. Ebenso sind im Bild 22 die typischen HC-Werte eines Dieselmotors (in ppm) sowie die Anteile an unverbranntem HC (% Q_{zu}) eines Gasototomotors eingetragen.

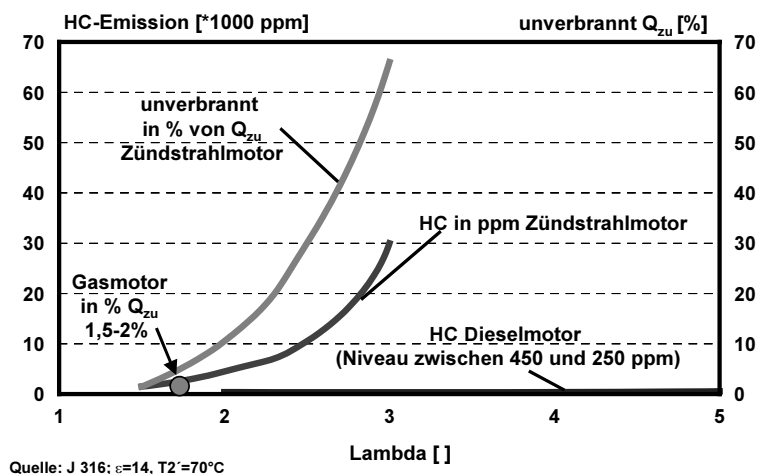


Bild 22: Ausbrandverhalten bei dem Zündstrahlmotor

Das Bild 23 zeigt verfügbare HC- und CO-Werte eines ca. 200 kW Dieselmotors im Vergleich zu den Emissionswerten des optimierten Diesel-Basismotors. Naturgemäß treten bei optimaler Einstellung des Biogaszündstrahlmotors etwa gleiche Werte

auf wie bei den hauseigenen Versuchen mit Zündstrahltechnik. Da in diesem Fall nur die Volllastwerte verfügbar waren, ist bei den HC-Emissionen für den Teillastbereich ein „Strahlenbüschel“ von möglichen Verläufen eingezeichnet, da diese von mehreren Einflußgrößen (Regelungsart, Gasqualität, Zündstrahlmenge u.a.) abhängen. Die CO-Emissionswerte reagieren von einer optimalen Volllasteinstellung in Richtung Teillast geringer als die HC-Emissionen.

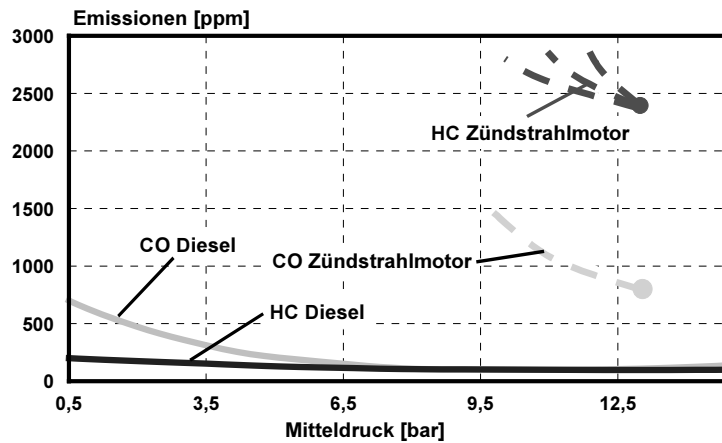


Bild 23: Vergleich der HC- und CO-Emissionen eines Zündstrahlmotors zum Basismotor

Je nach eingestelltem Lambda und damit NO_x-Emissionen ergibt sich beim Zündstrahlmotor ein bestimmter Kraftstoffverbrauch und damit Wirkungsgrad. Die spez. Kraftstoffverbräuche des Basismotors Deutz BF 1015 V8 sind dazu den rückgerechneten Verbräuchen (Biogas plus Zündstrahlanteil), energetisch bezogen auf die Werte des Zündstrahlmotors, im Bild 24 gegenübergestellt. Konzeptbedingt weitet sich die Spanne der spezifischen Verbräuche bei Teillast auf, im unteren Teillastbereich wird durch das sich vergrößernde Lambda die Flammengeschwindigkeit reduziert und erreicht bei Lasten unter 25 % die Magerzündgrenze, die auch durch den hohen Energieinhalt des Zündstrahles nicht kompensiert werden kann, d.h., der Zündstrahlmotor arbeitet in diesem Fall unbemerkt als Dieselmotor.

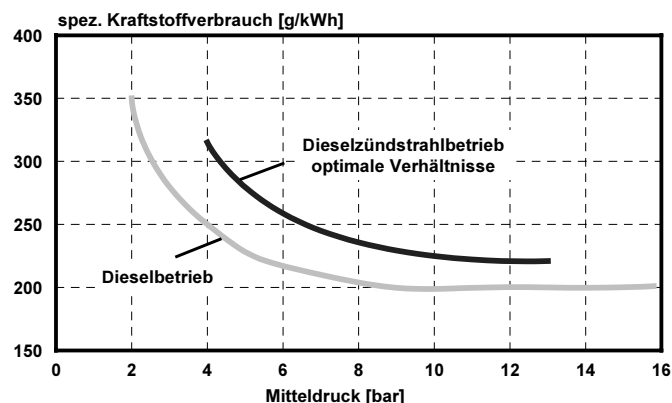


Bild 24: Verbrennungsanalyse des spez. Kraftstoffverbrauches Diesel-/Zündstrahlmotor

Ein optimierter Gasmotor ist daher durch die bessere Verbrennung (Kraftstoffausnutzung), speziell im Teillastbereich dem Zündstrahlmotor überlegen und das trotz der Drosselverluste. Den Vergleich dazu zeigt das Bild 25, d.h. auch bei geringen Lasten ist kein Vorteil für das Zündstrahlkonzept festzustellen.

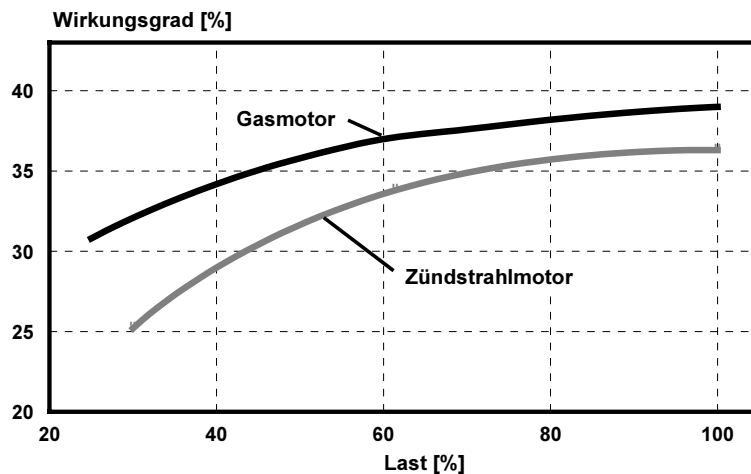


Bild 25: Vergleich der Wirkungsgrade Gasmotor/Zündstrahlmotor

Untersuchungen zur Technologie der Dieselzündung von verschiedenen Gasen werden derzeit auch an der TU München im Rahmen eines FVV-Forschungsvorhabens für größere Zylindereinheiten durchgeführt. Die Arbeiten erfolgen auf einem 1 Zyl. Forschungsmotor der MAN Baureihe 24/30. Neben den vorher ausgeführten Einflüssen sind noch weitere Parameter bei der Zündstrahltechnologie zu beachten.

Im Bild 26 ist dazu der Einfluß des Einspritzdruckes und der Einfluß einer durch eine höhere Ladungsbewegung (Drall) verbesserten Verbrennung dargestellt. Der bescheidene Einspritzdruck von 300 bar hat einen geringeren Wirkungsgrad und auch niedrigere NO_x-Emissionen zur Folge. Höhere Einspritzdrücke (800 bar) verbessern die Verbrennung und heben aber auch die NO_x-Emissionen an. Weiters wird die Magergrenze bei geringen Einspritzdrücken früher erreicht als es bei der optimierten Verbrennung unter der Mithilfe eines höheren Einspritzdruckes der Fall ist. Einige Hersteller von Biogaszündstrahlaggregaten reagieren auf diese Effekte durch kleinere Düsenquerschnitte und dadurch reduzierte Nennleistung im Dieselnotstrombetrieb.

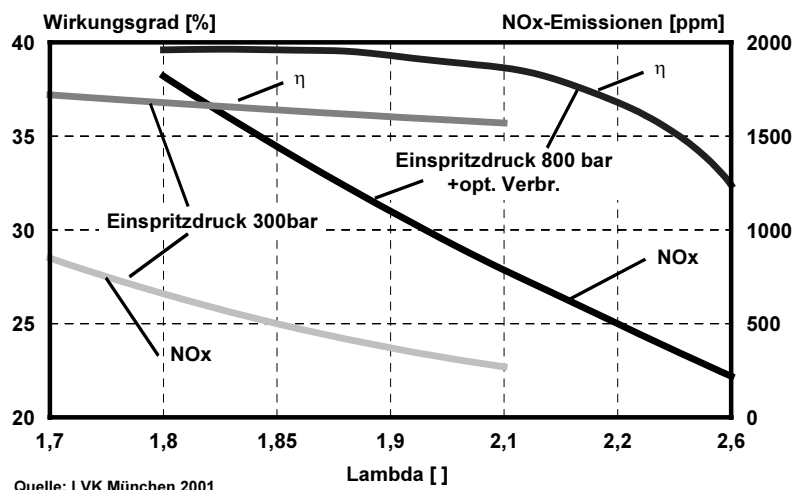
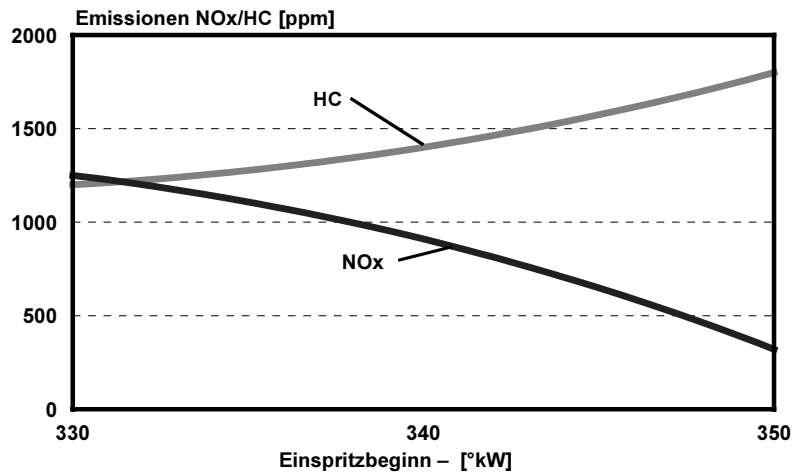


Bild 26: Analyse Zündstrahlmotor MAN 24/30 Einfluß des Einspritzdruckes auf die Verbrennung im Zündstrahlbetrieb

Bei den Dieselmotoren ist die NO_x-Bildung wesentlich auch von dem Einspritzzeitpunkt (Start der Verbrennung) und von der Temperatur der Ansaugluft abhängig. Diese Randbedingungen haben auch im Zündstrahlbetrieb großen Einfluß. Das Bild 27 zeigt dazu die Situation bei dem großen Forschungsmotor der TU München. Eine verspätete Einleitung der Verbrennung führt zu einer deutlichen NO_x-Reduktion, der Anteil an unverbranntem Methan steigt jedoch an.



Quelle: LVK München 2001

Bild 27: Einfluß des Einspritzzeitpunktes auf die NOx und HC Emissionen

Probleme durch die „rußende“ Verbrennung des Zündstrahlmotors

Sinngemäß soll die Energie, die im Biogas enthalten ist, so effizient als möglich genutzt werden. Die Technologie der Kraft/Wärme Kopplung (BHKW) ist daher der bestmögliche Ansatz, da neben der Produktion von Strom auch die anfallende Wärme genutzt wird.

Von Diesel-BHKW's ist bekannt, daß durch den Ruß der Wärmeübergang im Abhitzekegel gestört wird. Dieser Effekt tritt ebenso auch bei den Biogaszündstrahlmotoren auf. Das Bild 28 zeigt dazu die Temperaturverläufe der Abgastemperatur nach dem Abhitzekegel eines Zündstrahlmotors im Vergleich zu einem Biogasottomotor. Nach einer Betriebszeit von 1000 Stunden ist die Abgastemperatur bei dem Zündstrahlmotor um 120 °C angestiegen, der Biogasmotor hat ebenso einen kleinen Anstieg (20 °C durch an den Rohren anhaftende Aschen). Um nicht einen zu großen Wärmeverlust bei dem Zündstrahlmotor in Kauf nehmen zu müssen, sollte der Abhitzekegel daher in relativ kurzen Abständen gereinigt werden. Die prozentuellen Verluste durch die Abhitzekegelverschmutzung sind in Bild 29 gezeigt.

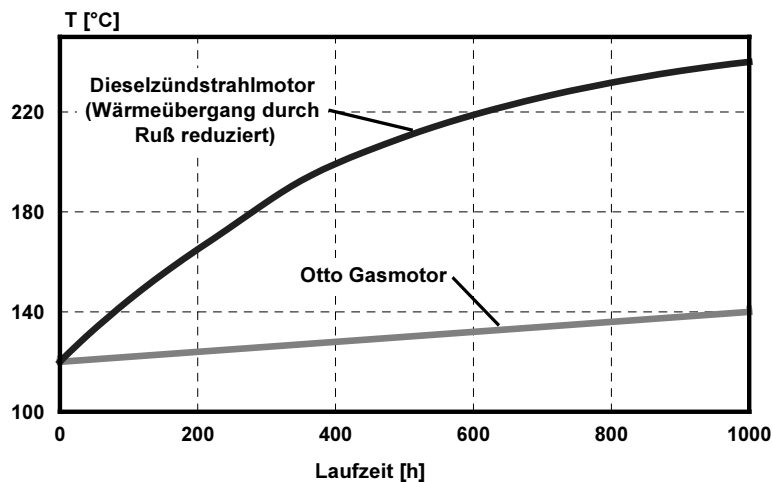


Bild 28: Wärmerückgewinnung aus dem Abgas

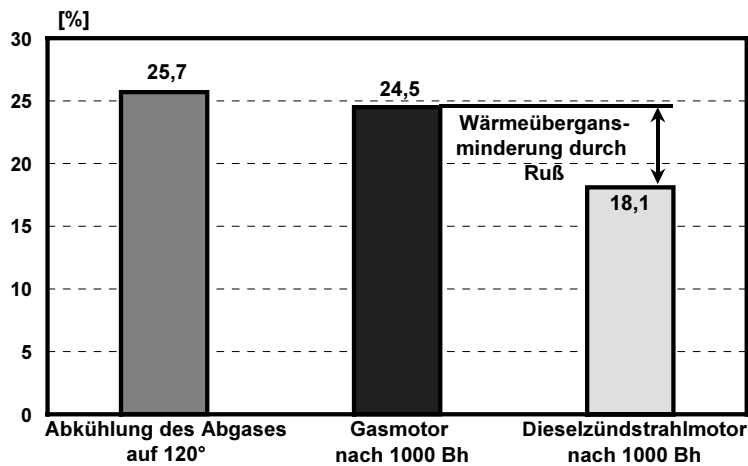


Bild 29: Einbußen bei der Wärmerückgewinnung aus dem Abgas

Weitere durch die Rußemission des Zündstrahlmotors ausgelöste Probleme

Wie bereits berichtet emittiert der Zündstrahlmotor auch bei bestmöglicher Einstellung Ruß. Je nach Gasmengenanstieg und Gasqualität können die Rußemissionen von dem Bestwert aus ansteigen. Je nach Aufstellungsart und Anordnung der Luftfilter können dadurch entsprechende Probleme verursacht werden. Das Bild 30 zeigt dazu einen Luftfilter eines Motors, der durch den emittierten Ruß hoch belastet wird. Für den Zündstrahlmotor bedeutet diese Beeinträchtigung einen kleineren Luftdurchsatz und eine daraus folgende Anfettung des Gemisches mit zusätzlich höheren NO_x- und Rußemissionen.



Bild 30: Rußprobleme an einem Luftfilter

Im Fall der gezeigten Anlage ist auch die Schaltanlage (Bild 31) in dem gleichen Raum positioniert. Auch hier sind die verschiedenen Baugruppen mit Rußschichten belegt. Da Ruß ein guter Leiter ist, sind el. Probleme bis zu einem brennenden Schaltschrank vorprogrammiert.

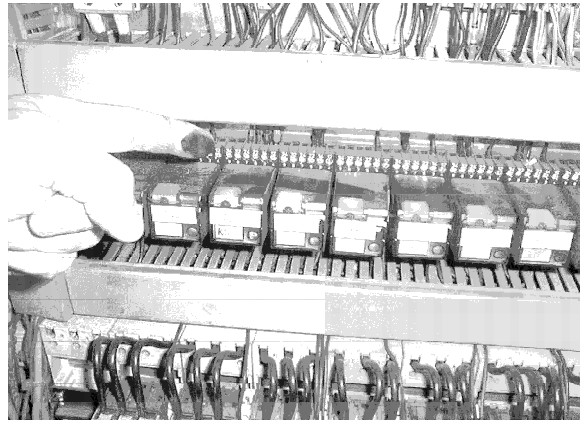


Bild 31: Rußprobleme in einem Schaltschrank

Meist wird bei Nfz. Dieselmotoren ein sogenanntes Schiebestück (Bild 31) vor dem Turbolader verwendet. Die Abdichtung gegen den Abgasdruck erfolgt über Kolbenringe oder einen Pressring. Diese Abdichtungsart ist nicht gasdicht und im Fall der Zündstrahltechnik meist die Hauptursache der Verschmutzung von Gebäuden und diversen im Raum verbauten Bauteilen.

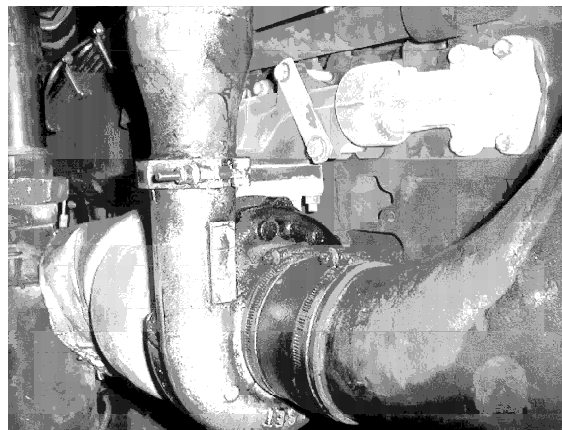


Bild 32: Typische Leckagestelle bei Nfz. Motoren

Zukünftige Emissionen für Biogasmotoren nach TA-Luft neu

Die meisten Biogas-Zündstrahlaggregate fallen wegen ihrer Leistungsgröße ($Q_{zu} < 1 \text{ MW}_{ther.}$) nicht unter das TA-Luftreglement. Aus Sicht der Gesetzgeber ist für die Zukunft (TA-Luft neu) eine Regelung der Emissionswerte jedoch sinnvoll. Vorgesehen ist in der neuen TA-Luft eine Anpassung der Emissionswerte, die auch durch die heute bekannten Techniken erreichbar sind. Das Bild 33 zeigt dazu die Emissionslimits der Gasmotoren und die der Zündstrahlaggregate. Die NO_x und CO Werte für die Zündstrahlmotoren weisen ein Vielfaches von denen der Gasottomotoren auf. In der neuen TA-Luft sollen auch eigene erreichbare Limits für die Zündstrahltechnik festgelegt werden.

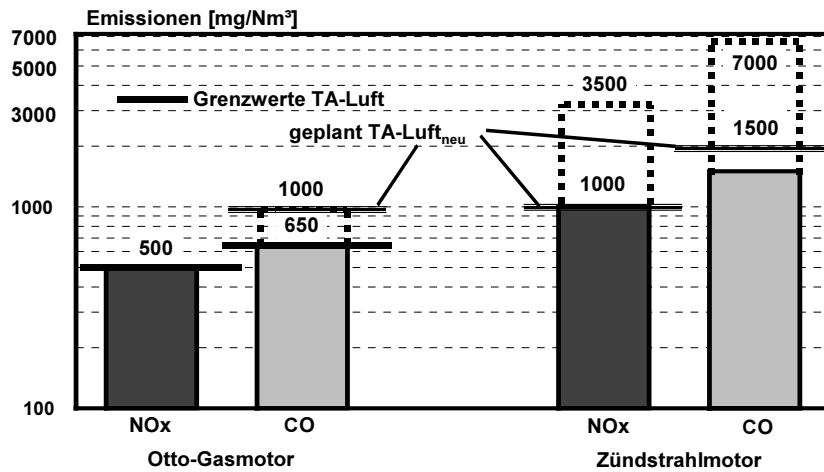


Bild 33: Emissionsvergleich Gasottomotor/Zündstrahlmotor

Probleme im Ölhaushalt durch den Betrieb mit H₂S reichem Biogas

Alle für den Zündstrahlbetrieb angebotenen Aggregate haben Fahrzeugmotoren als Basis. Da bei dem Klärprozess von Biomasse in Abhängigkeit des Rohstoffes auch Spurengase entstehen (wie z.B. H₂S), müssen die bei der Verbrennung entstehenden Zwischenprodukte (SO₂, SO₃) von dem Motoröl neutralisiert werden. Dem Ölvolume des eingesetzten Motors kommt daher eine besondere Bedeutung wegen des Anstieges der TAN (Total Acid Number) zu. Bei relativ kleinem Ölvolume wie es bei Fahrzeugmotoren üblicherweise der Fall ist besteht in erhöhtem Maße die Gefahr, daß die Übersäuerung des Öles nicht wahrgenommen wird und der Motor einen Schaden erleidet. Das Gefahrenpotenzial des Zündstrahlmotors auf Basis des BF 8M 1015 mit einem Ölvolume von 40 Liter in der Ölwanne ist um den Faktor 2,5 höher als bei dem J 208 GS, der in der Ölwanne knapp 140 Liter Öl hat. Die Pufferfähigkeit des Motoröles kann mittels der durchzuführenden Ölanalysen überwacht werden. Das Bild 32 zeigt dazu den Abfall der TBN (Total Base Number) bzw. den gleichzeitigen Anstieg der TAN. Je nach dem Gehalt von H₂S ergeben sich gemeinsam mit der vorhandenen Ölmenge maximal mögliche Laufzeiten, bevor das Öl gewechselt werden muß. Bei einem Überschreiten des erlaubten Wertes der TAN von 80 % der noch vorhandenen TBN wirkt das Motoröl als Säure und beginnt, diverse Bauteile aufzulösen. Besonders kritisch sind Cu-haltige Werkstoffe, wie z.B. die Pleuelbüchse (Bild 35).

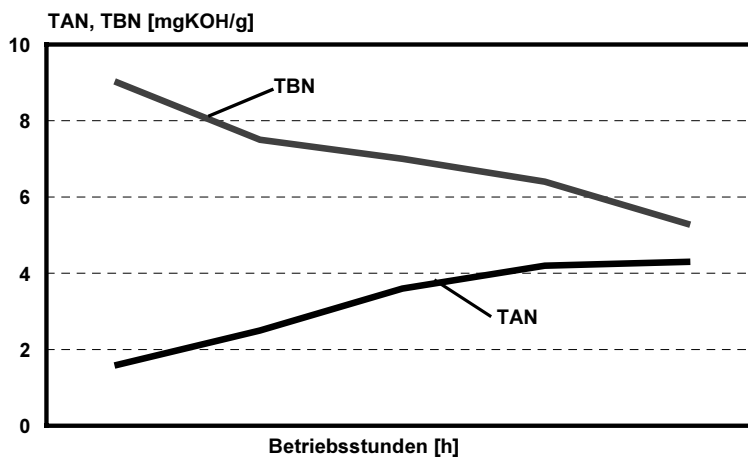


Bild 34: Situation der TBN und der TAN bei Sauergasen

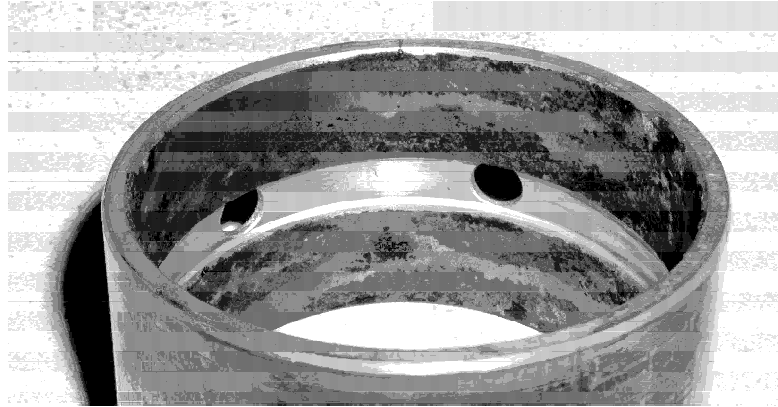


Bild 35: Säureangriff auf ein Lager

Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen beim Betrieb von Biogasmotoren Gas/Zündstrahltechnik

Der Gasmotor benötigt im Vergleich zum Zündstrahlmotor keinen weiteren Kraftstoff. Bei der genauen Analyse eines 300 kW Zündstrahlaggregates fallen, bei einem energetischen Anteil von 15 % Diesel, zusätzliche Betriebskosten von 115 ATS (Preisbasis 7,9 ATS/l) an. Aus diesem energetischen Anteil werden bei Vollast 47 kWh an Arbeit gewonnen. Bei einem Rückspeisetarif von 1,2 ATS/kWh wird ein Barwert von 56,4 ATS/h erwirtschaftet. D.h., der aus dem Dieselkraftstoff gewonnene Strom reicht nicht aus, um den eingesetzten Dieselkraftstoff zu bezahlen. Jede Betriebsstunde des Zündstrahlmotors verursacht eine Ertragsminderung um 58,6 ATS. Wird der Zündstrahlmotor wegen zu geringem Biogasanfall im Teillastbereich betrieben, so verschlechtern sich die Ertragswerte dramatisch. Der Gasottomotor hat den Vorteil, dass kein Zusatzbrennstoff benötigt wird und somit auch keine Zusatzkosten anfallen. Auch im Teillastbetrieb kann der Betreiber des Aggregates noch Geld verdienen, obwohl der Wirkungsgrad im Vergleich zum Volllastpunkt spürbar schlechter wird. Industriell gefertigte Gasmotoren mit hohem Qualitätsstandard sind ab 50 kW erhältlich und auch für Biogase verfügbar. Bei kleinen Aggregaten ist eine Wirtschaftlichkeit jedoch schlechter darstellbar als bei großen Motoren.

Summary

In der Ausarbeitung wurde die Technik des Gasottomotors der des Zündstrahlmotors gegenübergestellt. Mit beiden Konzepten kann Biogas motorisch verbrannt werden, eine Entscheidung betreffend der besseren Technologie sollen Sie als Leser selbst treffen.

Literatur

Karl Schnillen,
Franz-Mation Dübel

Nutzung von Biogas in Gaszündstrahlmotoren
MTZ 50 (1989)

Hans-Josef Schiffgens
Franz Pischinger

Jürgen Neubarth;
Martin Kaltschmitt

Erneuerbare Energien in Österreich
Springer Verlag 2000

Th. Amon	Reduktionspotentiale für klimarelevante Spurengase durch dezentrale Biomethanisierung in der Landwirtschaft Schriftenreihe des BMUJF, Band 26/1998
N.V. Nederland Gasunie	Physical Properties of Natural Gases
reNet-EVN-Studie	Erarbeiten von Entscheidungsgrundlagen Biomasse-Kraft-Wärme-Kopplung Kompetenzknoten Wr. Neustadt
Boxer Infodienst	Regenerative Energie Biogas www.boxer99.de/biogas.htm
Dr. Zeilinger; G. Zitzler	Entwicklung von Verfahren zur Vorausberechnung der Brennverläufe von Gasmotoren unter Berücksichtigung der Gasqualität und -zusammensetzung Bericht zur 4. Arbeitskreissitzung, 11/2000 FVV
J. Hochreiter	Vertriebsunterlagen für Biogasanlagen 12/2000
H-J. Schnell	Vertriebsunterlagen für HJS Zündstrahlaggregate 01/2000
Dreyer & Bosse	Vertriebsunterlagen für Zündstrahlaggregate 12/2000
MAN Nürnberg	Datenblätter für schwere Dieselmotoren 06/2000
Deutz	Datenblätter für Dieselmotoren 08/2000
Jenbacher AG	Datenblätter für Aggregat J 208 01/2001
Ch. Wörgötter	Behandlung und energ. Verwertung der Bioabfälle in Salzburg, Vortrag JAG Biogastagung 22/23.03.01 Pertisau