

Biogasmotoren Technik

Technik-Info Motorklopfen

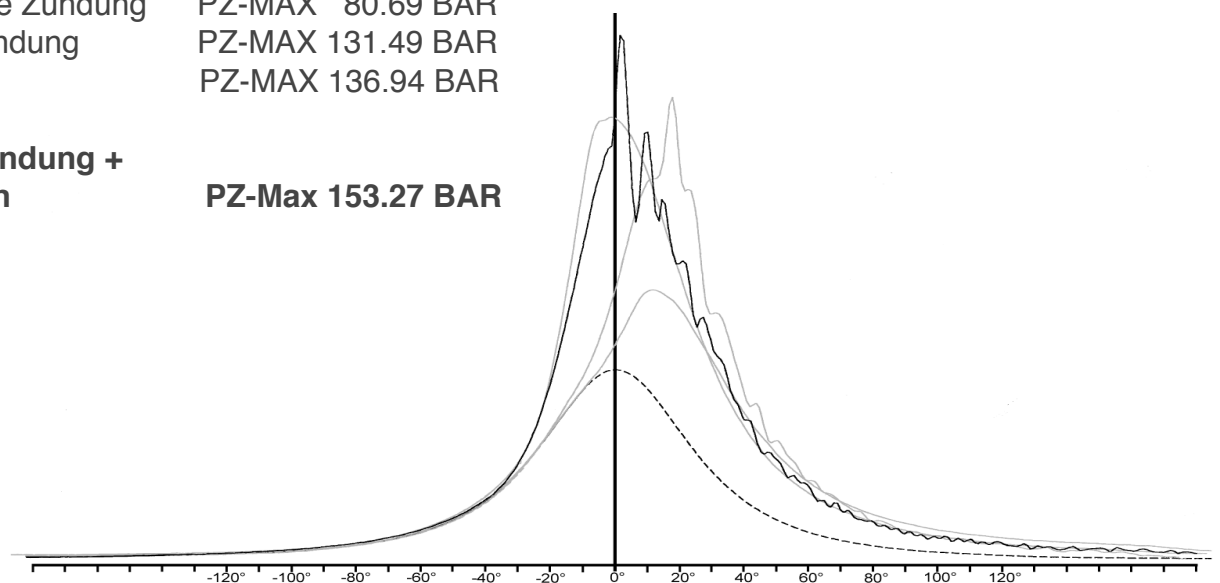
1. Was ist Motorklopfen

Verbrennt das Gemisch aus Luft und Biogas mit zu steilem Druckanstieg und zu großem Verbrennungsdruck, dann äußert sich dies in hartem Motorlauf mit dem charakteristischen Klopfen. Neben den hohen Drücken im Verbrennungsraum, die die Lager des Motors überlasten, sind auch die Brennraum-Temperaturen deutlich erhöht.

Druckverlauf im Brennraum eines Zylinders aufgetragen über den Kurbelwellenwinkel

Normale Zündung	PZ-MAX 80.69 BAR
Frühzündung	PZ-MAX 131.49 BAR
Klopfen	PZ-MAX 136.94 BAR

Frühzündung + Klopfen	PZ-Max 153.27 BAR
----------------------------------	--------------------------



Quelle : Caterpillar Energy Solutions GmbH

2. Welche Gefahren birgt Motorklopfen für die Motorengesundheit?

Die mechanischen Belastungen führen zu Schädigungen der Haupt- und Pleuellager des Motors. Die Motorkühlung ist mit den zu hohen Brennraumtemperaturen dauerhaft überfordert, sodass der Kolben, der obere Laufbuchsenbund und der Zylinderkopf zu heiß werden.

Aufgrund der hohen Brennraumdrücke wird oftmals auch die Zylinderkopfdichtung undicht und es gelangen Verbrennungsgase in das Kühlsystem, was aufgrund der hohen Drücke zur starken Druckerhöhung im Kühlkreislauf des Motors und zur Störungsmeldung bzw. Abschaltung des Motors führt.

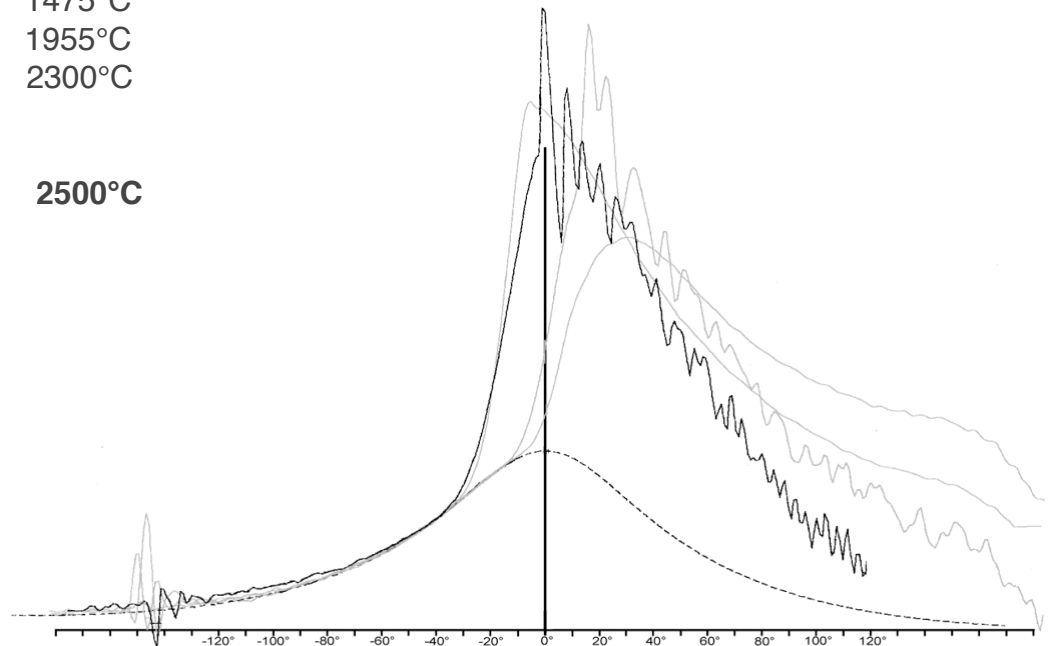
Biogasmotoren Technik

Im Extremfall wird die Kolbenboden-Anschmelztemperatur erreicht und ein Kolbenfresser ist die Konsequenz. Der Zylinderkopf wird zu heiß und verschleißt entsprechend schneller, erkennbar an der raschen Erhöhung des Ventilrückstandsmaßes.

Temperaturverlauf im Brennraum eines Zylinders aufgetragen über den Kurbelwellenwinkel

Normale Zündung	1475°C
Frühzündung	1955°C
Klopfen	2300°C

Frühzündung + Klopfen	2500°C
----------------------------------	---------------



Quelle : Caterpillar Energy Solutions GmbH

3. Ursachen für das Motorklopfen?

Es gibt ein ganzes Ursachenbündel für das Motorklopfen, deshalb ist eine genaue Störungsanalyse wichtig, um die Ursache des Klopfens dauerhaft abzustellen.

Grundsätzlich ist Motorklopfen eine vorzeitige, schlagartige Verbrennung einer zu großen oder zu heißen Menge eines Gas-Luft-Gemisches.

Es wird also zu früh gezündet, durch falschen Zündzeitpunkt oder durch Selbstentzündung des Gemisches, weil dieses zu heiß ist oder Bestandteile enthält, die nicht so klopfest sind wie Methan. Dies gilt z.B. für langkettige Kohlenwasserstoffe, die unkontrolliert bei bestimmten

Biogasmotoren Technik

Temperaturen und Drücken schlagartig verbrennen. Aber auch heiße Ablagerungen im Brennraum oder heiße Stellen des Zylinderkopfes können zu „Glüh“- Zündungen führen.

In der Folge werden daher die Ursachen für Motorklopfen detailliert unterschieden:

3.1 Gemischtemperatur zu hoch

Das Gemisch aus Biogas und Luft wird im Abgasturbolader auf ca. 1,5 bis 2 bar verdichtet und hat nach dem Verdichter eine Temperatur von ca. 180° bis 200° Celsius. Der Gemischkühler sorgt dafür, dass das heiße Gemisch in zwei Stufen im Gemischkühler auf maximal ca. 50°Celsius aber auch auf nicht weniger als ca. 25°C abgekühlt wird.

Eine **Raumlufttemperatur höher als 35°C** birgt ebenfalls die Gefahr des Klopfens, weil dann die Ausgangstemperatur schon so hoch ist, dass der Gemischkühler es nicht schafft, die Gemischtemperatur unter 50°C zu halten. Diese Gefahr besteht gerade im Sommer bei Containeraufstellung des Aggregates, wenn die Zuluft- und Abluftvolumenströme zu klein sind, um den Betriebsraum zu kühlen und den Motor mit ausreichendem Luftvolumen zu versorgen.

Der **Zustand des Gemischkühlers** ist für die Kühlleistung verantwortlich: es bilden sich mit der Zeit Ablagerungen auf der Luftseite des Gemischkühlers, die die Kühlleistung reduzieren und in regelmäßigen Abständen eine Reinigung des Gemischkühlers erfordern.

Auf der Wasserseite ist ein entlüfteter Kühlwasserkreis (Primär- und Sekundärkreis) mit ausreichendem Wasserdruck notwendig und ein **funktionsfähiger Notkühler** im Gemischkühler-Niedertemperaturkreis, der frei von Staub, Pollen und Blättern auf der Luftseite ausreichende Kühlleistung bereitstellt.

3.2 Ölnebel dampf im Gemisch

Ölnebel dampfe bilden sich im Kurbelgehäuse. Schmieröltropfen werden im Ölnebel dampfabscheider von der Luft getrennt und entweder der Ölwanne wieder zugeführt oder extern aufgefangen und entsorgt. Die nun „sauberen“ Kurbelgehäusedämpfe werden dem Ansaugkanal vor der Verdichterstufe des Abgasturboladers der Verbrennung zugeführt.

Ölnebel dampfe wirken wie ein Brandbeschleuniger im Brennraum, sind sehr klopfreudig und erhöhen die Brennstoffmasse zusätzlich zum Biogas im Gemisch im Brennraum. Temperatur und Druck steigen massiv im Brennraum an. Deshalb ist die **Filterung der Ölnebel dampfe** aus dem Kurbelgehäuse kein Luxus sondern elementarer Bestandteil der Motorengesundheit.

Biogasmotoren Technik

Eine weitere Quelle unerwünschter Ölnebelämpfe sind **verschlissene Ventildführungen** des Zylinderkopfes auf der Einlassventil-Seite und **verschlissene Kolbenringe**. Auch schlechte **Abdichtung der Abgasturbolader-Welle zu den gasführenden Räumen** (hier zur Verdichter- Seite) ist eine Ursache für Ölnebelämpfe im Verbrennungsraum.

3.3 Zuviel Gemisch im Brennraum

Ist die Ansaugluft zu kalt, steigt ihre Dichte und über den Gemischregler wird die passende Menge Biogas der Ansaugluftmasse zugemischt, um das korrekte Verbrennungsluft-Verhältnis zu erreichen. Damit wird das Ladungsgewicht im Brennraum zu groß, Druck und Temperatur steigen stark an, der Motor kommt ins Klopfen.

Ebenso sorgt ein zu hoher Ladedruck für zuviel Gemisch im Brennraum, Druck- und Temperaturanstieg sind dann wiederum für das Klopfen verantwortlich.

3.4 Motorkühlung unzureichend

Für unzureichende Motorkühlung gibt es zahlreiche Ursachen, allen gemeinsam ist die nicht gewünschte Temperaturerhöhung der Bauteile, die an den Verbrennungsraum angrenzen und dort auch für eine weitere Temperaturerhöhung des Gemisches sorgt. Die Gefahr der unkontrollierten Selbstentzündung deutlich vor dem Zündzeitpunkt wächst. Tritt diese ein, steigen die Drücke und Temperaturen im Brennraum stark an.

Die Ursachen für zu geringe Kühlleistung sind im einzelnen

- Kühlwasserdruck zu gering, daher partielle Dampfblasenbildung
- Kühlwasser-Umlaufmenge zu gering
- Notkühler zugesetzt, zu schwache Kühlleistung
- Heizwärmetauscher zugesetzt in Verbindung mit schwachem Notkühler
- Regelventil defekt oder falsch parametrisiert (Öffnung zu Notkühlern)
- Kühler, Rohre, Wasserpumpen im Kühlkreislauf unzureichend dimensioniert, in Verbindung mit schlechter Notkühlung

3.5 Schlechte Kühlmittelpflege im Motorkühlkreislauf

Kühlmittel mit Korrosions- und Frostschutzzusätzen verbrauchen sich im Betrieb durch die thermische Beanspruchung. Daher ist eine regelmäßige Überprüfung des Zustandes und ein Austausch spätestens nach 4 Jahren notwendig. Ein Wechsel wird notwendig nach größeren Motoren-Instandsetzungen bzw. nach größeren Verunreinigungen durch Schmieröl.

Lokale Überhitzungen des Schmiermittels (oder Überfahren) führen zu chemischen Zersetzungsprodukten, die Gummikompensatoren auflösen und zu Strömungsbehinderungen

Biogasmotoren Technik

im Kühlkreislauf führen, sodass an strömungsberuhigten Zonen z.B. im Zylinderkopf kein ausreichender Wasserdurchfluss gegeben ist. Die Folge ist eine Überhitzung mit Gefahr des Kolbenfressers.

3.6 Zuviel Frühzündung

Wird das Luft-Biogas-Gemisch zu früh gezündet, entstehen ebenfalls hohe Druck- und Temperaturspitzen im Brennraum, die Klopfen des Biogasmotors verursachen.

Die Frühzündung resultiert aus

- defektem Zündsteuergerät oder
- aus heißen Ablagerungen auf dem Kolbenboden oder am Zylinderkopf, die dann unkontrollierte Glühzündungen verursachen.
- Quelle von Glühzündungen können Ablagerungen aus verbrannter Sulfatasche (zu hoch dotiertes Schmieröl für die Biogasqualität) oder Ölkohle aus zuviel verbranntem Schmieröl sein (unzureichende Ölnebelabscheidung, verschlissene Einlass-Ventilführungen).

3.7 Klopfreudiger Kraftstoff

Biogas ist ein sehr klopfester Kraftstoff. Aus der Abfallvergärung können je nach Abfallzusammensetzung auch langkettige Kohlenwasserstoffe anfallen (z.B. Limonene), die selbst klopfreudig sind und je nach Volumenanteil am Gemisch dafür sorgen, dass die Klopfestigkeit des Gemisches stark abnimmt.

Aufklärung hierüber hilft nur eine Feinanalyse des Biogases. In der Folge muss der Motor mit entsprechender Leistungsreduktion betrieben werden, um die Gefahr des Klopfens zu vermeiden.

3.8 Erhöhung der Kompression durch Ölkohleaufbau

Biogasmotoren werden nahezu ebenso stark verdichtet wie Dieselmotoren, um einen möglichst hohen mechanischen Wirkungsgrad zu erzielen.

Wird im Betrieb durch mangelnde Wartung zuviel Ölkohle auf dem Kolbenboden gebildet, erhöht sich die geometrische Verdichtung des Biogasmotors im Vergleich zu fehlenden Ablagerungen noch weiter. Dadurch droht Klopfgefahr in Verbindung mit Punkt 3.6, da die Ölkohle-Ablagerungen im Betrieb auch sehr heiß werden und das Klopfen durch die Glühzündungswirkung verstärken.

Biogasmotoren Technik

4. Abhilfemaßnahmen gegen Motorklopfen

4.1 Für kühles Gemisch sorgen

Zwei Faktoren treiben die Gemischtemperatur nach oben: schlechte Gemischkühlerleistung und ein zu schwacher Luftdurchsatz im Betriebsraum.

Abhilfe ist eine

- regelmäßige Reinigung des Gemischkühlers und des Notkühlers luftseitig sowie
- eine Überwachung der Wassertemperatur Vorlauf/Rücklauf mit Druckdifferenz und
- eine Raumluft-Filterüberwachung mit (Verschmutzung entspricht wachsender Druckdifferenz vor und hinter dem Filterelement) Wechsel der verbrauchten Filterelemente
- Überprüfung der Zuluft- und Abluftventilatoren

4.2 Schmieröl im Brennraum vermeiden

Ölnebeldämpfe wirken verschmutzend (Ablagerungen) und erhöhen die Brandlast des Gemisches unzulässig stark. Leider gibt es mehrere „Öl-Quellen“ im Brennraum:

- verschmutzter Ölnebelabscheider : Filter warten und erneuern
- undichter Turbolader auf der Verdichterseite: ATL abdichten auf der Frischgas- und Abgasseite
- verschlissenen Einlass-Ventilführungen: Zylinderköpfe überholen oder austauschen
- verschlissene Kolbenringe, Kolben und Laufbuchsen: Motorgrundüberholung durchführen (Kompressionsmessung deckt die „Ölschleudern“ zuverlässig auf).

4.3 Zu hohes Ladungsgewicht durch zu kalte Raumluft

Im Winter droht klopfende Verbrennung, wenn bei sehr tiefen Außentemperaturen die Raumluft nicht vorgewärmt wird und eine Motorsteuerung Vollast nach dem Start zulässt.

Vermeiden lässt sich dies dann nur durch

- Raumluft vorwärmen (Raumluftheizung oder Motor mit sehr niedriger Last starten und die Strahlungswärme des Motors den Raum ausreichend erwärmen lassen, dann Last schrittweise erhöhen.)
- Einsatz einer Betriebsraum-Heizung und Vorwärmung vor Kaltstart (wichtig im Flexbetrieb)
- Überprüfen des ATL-Ladedruckes und ggf. des Wastegates (Abblasventil bei zu hohem Ladedruck).

Biogasmotoren Technik

4.4. Prüfung der Kühlkreisläufe

Werden die zulässigen Kühlwassertemperaturen überschritten, droht dem Motor Klopfgefahr, daher zählt ein Check des Motor- und Gemischkühlkreislaufes zu den wichtigen Präventionsmaßnahmen. Dabei spielen nicht nur die Wassertemperaturen, sondern auch die Wasserdrücke eine wichtige Rolle.

Im Einzelnen geht es um folgende Punkte:

- Kühlwasserdruck erhöhen, Membranausgleichsgefäß auf korrekte Druckhaltung und Funktion prüfen (lassen), Druck > 1,5 bar
- Wassermangelsicherung, Entlüftung prüfen, Kühlkreislauf ggfls. entlüften
- Druckdifferenzen Primär- und Sekundärkreis des Wärmetauschers prüfen: Verkalkung Wärmetauscher, ggfls. reinigen bzw. Wärmetauscher austauschen.
- Heizkreisläufe korrekt parametrisieren lassen: Ansteuerung Thermostatventil zu den Notkühlern prüfen.

4.5 Überprüfung des Kühlmittels und der Kompensatoren

Das Kühlmittel in den Kühlkreisläufen wird häufig stiefmütterlich behandelt und genießt selten die Aufmerksamkeit, die es verdient. Die Kalt-Warm-Wechsel und zeitweisen Temperaturüberlastungen an den besonders heißen Stellen im Kühlkreislauf sorgen für eine chemische Zersetzung des Kühlmittels. In der Folge dieses Prozesses werden Stoffe frei, die Gummikompensatoren zersetzen und zerstören.

Es lösen sich von innen Gummiteile ab und treiben durch den Kühlkreislauf, um sich an den strömungsberuhigten Zonen anzulagern. Dort, wo nur noch Gummiteile lagern, fehlt das Wasser in seiner kühlenden Wirkung. Die Motorbauteile werden zu heiß, wie z.B. Zylinderköpfe und führen dann im Extremfall zum Kolbenfresser. Höhere Bauteiltemperaturen sorgen mindestens für starken Verschleiß.

Es lohnt sich daher sehr, dass

- Kühlmittel regelmäßig zu überprüfen und auszutauschen sowie
- die richtigen Kompensatoren einzusetzen, die als Glycol-fest ausgewiesen sind.

Biogasmotoren Technik

4.6 Zündanlage als Ursache des Motor-Klopfens

Ein zu früher Zündzeitpunkt sorgt ebenfalls für Motorklopfen, kommt aber in der Praxis selten vor. Der richtige Zündzeitpunkt lässt sich mit passender Messtechnik einfach bestimmen und ggfls. korrigieren.

Viel wichtiger für einen ruhigen Motorlauf ohne Zündaussetzer sind ausreichende Zündleistung und ein guter Zustand der Zündkerze. Daher sind ergänzend zum Zündzeitpunkt

- die Zündspannung der Zündkerze sowie
- die Brenndauer des Zündfunken zu messen. (Beides leider selten mit Bordmitteln machbar.)

Fest sitzende Zündkabelverbindungen sind eine weitere notwendige Voraussetzung für gute Zündleistung, ebenso mit korrektem Drehmoment angezogene Zündkerzen, um sie vor Überhitzung zu schützen.

4.7 Klopfreudige Gasbestandteile als Klopfursache

Biogas ist sehr klopfest, die kompakten Moleküle Methan und CO₂ stellen zusammen mit der Verbrennungsluft ein sehr klopfestes Gemisch dar. In Abfallvergärungsanlagen können im Klärgas langkettige Kohlenwasserstoffe als Gärprodukt im Gas auftreten. Mit nennenswertem Anteil wird dann die Klopfestigkeit reduziert und der Gasmotor kommt bei Vollast ins Klopfen.

Die wenig klopfesten Gasbestandteile leiten dann zu früh die Verbrennung ein und reißen weitere Teile des Gemisches in die Verbrennung, bevor die Zündkerze diese zum korrekten Zeitpunkt einleiten will.

Motoren mit einer Klopfsensorik schützen sich dagegen, wie weiter unten erläutert wird.

Diese Klopfursache lässt sich nur mit einer Feingasanalyse herausfinden, ergänzend sollten die Fütterungsbestandteile kritisch untersucht werden (hoher Früchteanteil, insbesondere Zitrusfrüchte bilden klopfreudige Kohlenwasserstoffe in der Vergärung).

Als Schutzmaßnahme greift kurzfristig nur eine Leistungsreduzierung, die das Druck- und Temperaturniveau absenkt und das Klopfen wirksam verhindert. Langfristig sollten klopfreudige Gärsubstrate im Mengenanteil reduziert oder ganz im Gärprozess vermieden werden.

4.8 Unerwünschtes Schmieröl im Brennraum als Klopfursache

Schmierölnebel wirkt im Brennraum wie ein Brandbeschleuniger und bewirkt starkes Motorklopfen. Einmal durch das zusätzliche Gemisch aus Ölnebel und Luft, das wie zusätzlicher Kraftstoff wirkt und beträchtlich Druck und Temperatur im Brennraum steigert.

Biogasmotoren Technik

Zum anderen – bei großen Ölnebelmengen, die unvollkommen verbrennen – bilden sich Ölkohleablagerungen, die harte und heiß werdende Verkokungen im Brennraum (vorzugsweise am Kolbenboden) und wie eine Glühkerze fungieren, an dem sich das Biogas-Luftgemisch unkontrolliert und zu früh entzündet.

Um diese Klopfursache zuverlässig abstellen zu können, ist zu klären, woher die übermäßigen Ölnebeldämpfe kommen:

- eine unzureichende Ölnebel dampfabscheidung kann genauso Ursache sein wie
- verschlissene Ventilführungen,
- verschlissene Kolbenringe und Laufbuchsen,
- oder ein undichter Abgasturbolader

Neben Prüfung der Filter der Ölnebel dampfabscheider sind eine Endoskopie und eine nachfolgende Überprüfung einzelner Zylinderköpfe (Einlassventilführungen) sowie des Ansaugrohres (Ölspuren vom Abgasturbolader) hilfreich, um die genaue Ursache der zu starken Ölverbrennung aufzuklären.

5. Schutzeinrichtungen Motorklopfen

Viele Biogasmotoren verfügen heute über eine Klopf sensorik, die Motorklopfen zuverlässig detektiert und mehrstufige Schutzmaßnahmen trifft, um Motorschäden zu vermeiden. Diese sind gravierend und können auch das Betriebspersonal gefährden, wenn Pleuel und weitere Motorteile das Kurbelgehäuse zerschlagen und unkontrolliert mit großer Zerstörungskraft durch den Betriebsraum fliegen.

Klopfensensoren (idealerweise an jedem Zylinder) messen über die Beschleunigungskräfte die harten Druckanstiege des Klopfens und sind selbst sehr robust, die erzeugten Spannungssignale werden in der Motorsteuerung verarbeitet und ermöglichen eine genaue Lokalisation im Motor sowie Zeitpunkt und Zeitdauer des Klopfens.

Die Klopfregelung nimmt die gemessenen Klopf signale zum Anlass, zunächst den Zündwinkel in Richtig spät zu verstellen, um Druck und Temperatur zu senken. Bleibt das Klopfen bestehen, wird die Drosselklappe zusätzlich weiter geschlossen und die Motorleistung weiter reduziert. Wird weiter Klopfen detektiert, leitet die Motorsteuerung zum Schutz des Aggregates eine Notabschaltung ein.

Die Betriebsdaten des Motors nach Auslesen aus dem Speicher der Motorensteuerung erleichtern die Fehlersuche und die Festlegung nachfolgender Instandsetzungs- und Wartungsarbeiten:

- Kontrolle der Raumlufttemperatur (zu hoch oder zu niedrig)

Biogasmotoren Technik

- Überprüfung des Ölnebdampfabscheiders mit korrekter Druckreglereinstellung und gut gewartetem Filter
- Einsatz passender Aktivkohle oder Gaswäsche gegen klopfreudige Gasbestandteile, ggfls. ergänzende Feingasanalyse
- Kontrolle der Kühlkreislaufdaten
- Kontrolle der Wärmetauscher/ Notkühler
- Überprüfung des Kühlmittelzustandes und Formveränderungen der Kompensatoren im Kühlkreislauf
- Kontrolle des Abgasturboladers auf Schmieröldichtheit zu den gasführenden Räumen

Hamburg, im Juni 2018

Michael Wentzke