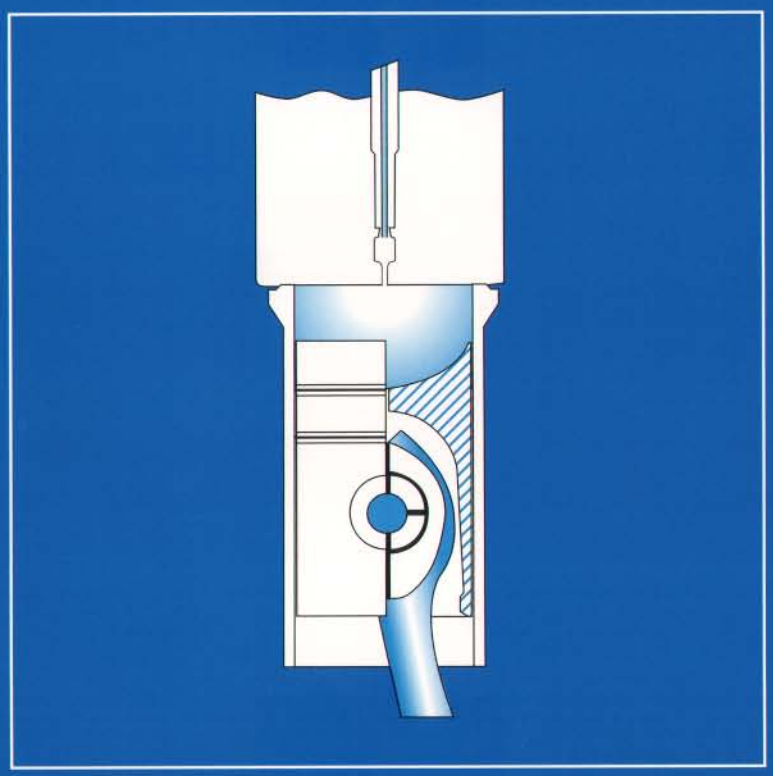
ARBEITSGEMEINSCHAFT FÜR
SPARSAMEN UND
UMWELTFREUNDLICHEN
ENERGIEVERBRAUCH E.V.

BHKW und Methanzahl

Einfluß der Gasbeschaffenheit auf den Motorbetrieb



Inhalt

Vorwort	3
Bedeutung der Methanzahl für den Gasmotor	5
Unterschiedliche Gasbeschaffenheit bei der Erdgasversorgung	6
Auswirkungen der Zumischung von Flüssigas/Luft auf das Motorbetriebsverhalten	7
Motorische Randbedingungen und Methanzahlbedarf	8
Lösungsansätze zur Ausregelung von Beschaffenheitsänderungen	10
Literaturhinweise	12
Anhang:	
Berechnung der Methanzahl aus der Gaszusammensetzung	13
Beispiele für die rechnerische Ermittlung der Methanzahl	14
Nomogramme mit Methanzahl für verschiedene Grundgase und Zumischungen	18

Herausgeber:

ASUE
Arbeitsgemeinschaft für
sparsamen und umweltfreundlichen
Energieverbrauch e.V.
Bismarckstraße 16

67655 Kaiserslautern

Telefon: (0631) 360 90 70
Internet: http://www.asue.de

Vertrieb:

Verlag Rationeller Erdgaseinsatz
Postfach 25 47
67613 Kaiserslautern
Telefax: (0631) 360 90 71

BHKW und Methanzahl
Best.-Nr. 05 03 00
Schutzgebühr: 2,50 €

Vorwort

Das zunehmende Interesse an gasmotorgetriebenen Anlagen (insbesondere Blockheizkraftwerken) hat zu einem verstärkten Informationsbedürfnis über die Einsatzmöglichkeiten dieser Technik bei den potentiellen Betreibern und auch bei den Gasversorgungsunternehmen geführt. Die Fragen des Motorbetriebes bei bestehenden Anlagen und die Auswahl bzw. Auslegung zukünftiger Motorenaggregate sind nicht zuletzt abhängig von der Beschaffenheit des zur Verteilung kommenden Brenngases.

In der öffentlichen Gasversorgung wird heute fast ausschließlich Erdgas verwendet. Es stammt aus folgenden Quellen (Angaben für 1998):

Rußland	35 %
Niederlande	22 %
Deutschland	21 %
Norwegen	19 %
Dänemark und sonstige	3 %

Erdgas besteht im wesentlichen aus Methan sowie aus Ethan, Propan und Butan, aus Spuren höherer Kohlenwasserstoffe und aus den inerten Komponenten Stickstoff und Kohlendioxid. Erdgase aus verschiedenen Quellen unterscheiden sich in der anteiligen Zusammensetzung dieser Komponenten. Die Werte können im Einzelfall beim örtlichen Gasversorgungsunternehmen in Erfahrung gebracht werden. Beispielhafte Durchschnittsanalysen sind im Bild 1 dargestellt.

Durch die Erschließung neuer großer Erdgasvorkommen in der Nordsee wurden die Versorgungssicherheit und die Erdgasreserven vergrößert und die Abhängigkeit von einzelnen Erdgasproduzenten verringert. Der höhere Anteil des Nordsee-Erdgases hat in vielen Versorgungsgebieten zu Änderungen in der Erdgasbeschaffenheit geführt. Heizwert und Wobbezahl sind höher, die Methanzahl ist niedriger als zuvor. Die einzelnen Werte und Bestandteile des Nordsee-Erdgases befinden sich im zulässigen Bereich des DVGW-Arbeitsblattes G 260, das die Anforderungen an die Beschaffenheit der Brenngase der öffentlichen Gasversorgung beschreibt.

Zur Spitzengasdeckung können die örtlichen Gasversorgungsunternehmen dem Erdgas Flüssiggas bzw. Flüssiggas/Luftgemische zumischen. Dieses Vorgehen beeinflußt naturgemäß die Gasbeschaffenheit. Entsprechend dem G 260 sind Flüssiggas/Luft-Zumischungen zum Grundgas möglich, die mit Auswirkungen auf die motorische Verbrennung (Methanzahlverringerung) verbunden sind.

Die vorliegende Veröffentlichung informiert über die Bedeutung der Methanzahl der Brenngase und beschreibt die Auswirkungen der Zumischung von Flüssiggas/Luft auf das Motorbetriebsverhalten. Weiterhin werden Lösungsansätze zur Ausregelung von Änderungen in der Gasbeschaffenheit aufgezeigt.

		Einheit	Nordsee Erdgas H	Misch-Erdgas H (Nordsee-Erdgas H/ Erdgas L)	Russ.-Erdgas H	Holland-Erdgas L	Verbund-Erdgas L
Analysenwerte							
CO_2		Vol.-%	1,01	0,96	0,08	1,46	1,48
N_2		Vol.-%	1,33	2,56	0,84	9,92	9,25
O_2		Vol.-%	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
CH_4		Vol.-%	88,66	88,39	98,30	83,97	85,70
C_2H_6		Vol.-%	6,85	6,20	0,52	3,61	2,79
C_3H_8		Vol.-%	1,49	1,28	0,17	0,68	0,50
C_4H_{10}		Vol.-%	0,50	0,45	0,06	0,23	0,18
C_5H_{12}		Vol.-%	0,09	0,07	0,02	0,06	0,04
C_{6+}		Vol.-%	0,07	0,09	0,01	0,07	0,06
Kennwerte							
Brennwert	$H_{s,n}$	kWh/m³	11,831	11,594	11,058	10,332	10,281
Heizwert	$H_{i,n}$	kWh/m³	10,695	10,478	9,968	9,328	9,278
Normdichte	ρ_n	kg/m³	0,8147	0,8128	0,7304	0,8288	0,8161
Rel. Dichte (Luft=1)	d	–	0,630	0,629	0,565	0,641	0,631
Wobbe-Index	$W_{s,n}$	kWh/m³	14,906	14,619	14,711	12,905	12,943
Wobbe-Index	$W_{i,n}$	kWh/m³	13,474	13,212	13,261	11,651	11,680
Luftbedarf, min.	L_o	m³/m³	10,27	10,06	9,54	8,99	8,95
spez. Luftb. min. bez. auf $H_{i,n}$	l_o	m³/kWh	0,960	0,960	0,957	0,964	0,965
Abgaszusammen-setzung							
Abgasvol. feucht		m³/m³	11,10	10,89	10,34	9,82	9,76
CO_2		Vol.-%	10,0	9,9	9,7	9,8	9,8
H_2O		Vol.-%	17,7	17,7	18,2	17,7	17,7
N_2		Vol.-%	72,3	72,4	72,1	72,5	72,5
Abgasvol. trocken		m³/m³	9,14	9,97	8,46	8,08	8,03
CO_2		Vol.-%	12,1	12,1	11,8	11,9	11,9
N_2		Vol.-%	87,9	87,9	88,2	88,1	88,1
Analysenwerte							
Flammen-geschwindigkeit		m/s	0,43	0,43	0,43	0,41	0,41
Flammen-temperatur (ohne Diss.)		°C	2068	2065	2054	2046	2044
Zündtemperatur (mit Luft)		°C	570 – 640	570 – 640	570 – 640	570 – 640	570 – 640
Methanzahl	MZ		75	76	95	86	89

Bild 1: Beispielhafte Erdgas-Zusammensetzungen und Kenndaten (1998)

Bedeutung der Methanzahl für den Gasmotor

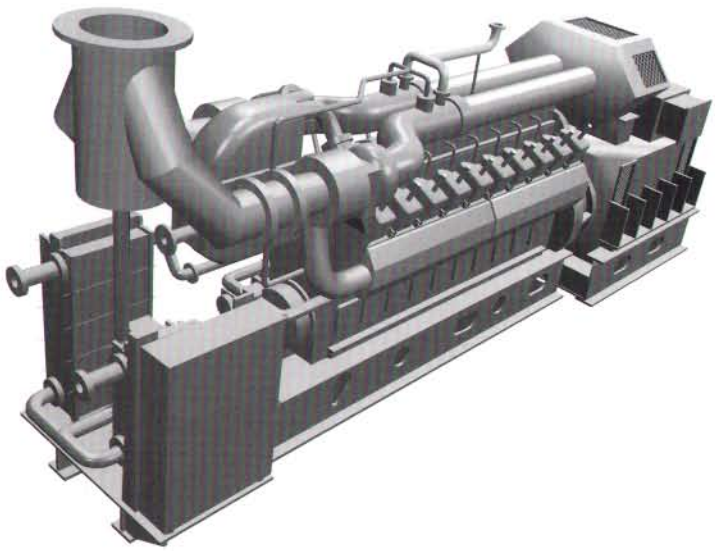
Bei der motorischen Verbrennung müssen Motor und gasförmiger Brennstoff aufeinander abgestimmt sein. Die Anforderungen an den gasförmigen Brennstoff sind dabei neben dem ausreichenden und konstanten Energieinhalt (Gemischheizwert) eine möglichst hohe Klopffestigkeit.

Eine für den Motor zu niedrige Klopffestigkeit des Gases führt zu klopfender Verbrennung. Beim Klopfen tritt im noch unverbrannten Gas/Luft-Gemisch Selbstzündung auf. Infolge örtlicher Druckunterschiede entstehen hochfrequente Gasschwingungen, die sich dem Verbrennungsdruck überlagern. Dabei nimmt der Wärmeübergang vom Gas auf die Brennraumwände stark zu und die thermische Belastung dieser Bauteile steigt. Bei klopfender Verbrennung können gravierende Schäden am Motor (z. B. „Kolbenfresser") auftreten.

Die bestimmende Größe zur Beurteilung der Klopffestigkeit von Brenngasen ist die **Methanzahl (MZ)**. Sie ist mit der Oktanzahl für Benzinbetrieb vergleichbar und gibt das prozentuale Methan-Volumenverhältnis einer Methan/Wasserstoff-Mischung an, die in einem Prüfmotor unter definierten Randbedingungen dieselbe Klopfstärke aufweist wie das zu untersuchende Gas. Wenn z. B. Erdgas H eine Methanzahl von 85 aufweist, so heißt das, daß unter bestimmten motorischen Bedingungen dieses Erdgas die gleiche Klopfstärke aufweist wie ein Gemisch aus 85 % Methan und 15 % Wasserstoff.

Zur Ermittlung des Methanzahlbedarfs eines Gasmotors wird das Methanzahlangebot (MZA) durch die Zugabe von Wasserstoff zum Methan soweit verändert, bis es dem Methanzahlbedarf (MZB) des Motors entspricht.

Zur Gewährleistung eines sicheren Motorbetriebes muß das Methanzahlangebot immer größer oder mindestens gleich dem Methanzahlbedarf des Motors sein.



Unterschiedliche Gasbeschaffenheit bei der Erdgasversorgung

Bild 2 zeigt brenntechnische Kenndaten der Gase der 2. Gasfamilie nach DVGW-Arbeitsblatt G 260 für Erdgase der Gruppen L und H (Grund- und Ergänzungsregeln). Die Grundregeln sind in der öffentlichen Gasversorgung üblicherweise einzuhalten, die Ergänzungsregeln z.B. dann, wenn zur Aufrechterhaltung der Gasversorgung Gase eingesetzt werden, die nicht alle in den Grundregeln aufgeführten Kennwerte erfüllen. Bei der Zumischung von Flüssiggas/Luft zum Erdgas ist demnach ein Anstieg der relativen Dichte bis auf maximal d = 0,85 (Erdgas H) und d = 0,90 (Erdgas L) und eine Absenkung des Wobbe-Indexes bis zur Untergrenze 13,5 kWh/m³ für Erdgas H bzw. bis zur Untergrenze 11,6 kWh/m³ für Erdgas L zugelassen.

	Grundregeln		Ergänzungsregeln	
	L	H	L	H
Wobbe-Index $W_{s,n}$ kWh/m³	10,5 – 13,0	12,8 – 15,7	11,6 – 13,0	13,5 – 15,7
Brennwert $H_{s,n}$ kWh/m³	8,4 – 13,1	8,4 – 13,1	8,4 – 13,1	8,4 – 13,1
rel. Dichte d	0,55 – 0,75	0,55 – 0,75	0,75 – 0,90	0,75 – 0,85

Bild 2: Brenntechnische Kenndaten der 2. Gasfamilie nach G 260

Die Flüssiggas/Luft-Zumischung

Für eine effiziente und wirtschaftliche Erdgasversorgung ist die optimale Auslastung der Versorgungseinrichtung ein wichtiges Ziel. Dies wird am besten durch eine möglichst gleichmäßige Nachfragecharakteristik gewährleistet. Dem steht auf der Gasanwenderseite eine verschiedenen Einflüssen (z. B. Temperaturverlauf, konjunkturelle Rahmenbedingungen) unterworfene Abnahmecharakteristik gegenüber, die sowohl tages- und wochenzyklischen als auch jahreszeitlichen Schwankungen unterworfen ist.
Zum Ausgleich der Unterschiede zwischen der Abnahmecharakteristik der Verbraucher und der angestrebten gleichmäßigen Auslastung der Gasversorgungseinrichtungen setzen Gasversorgungsunternehmen verschiedene Techniken ein. Neben der Nutzung des Rohrnetzes zur zeitweiligen Speicherung von Erdgas (Netzatmung) kommen Untertagespeicher (Kavernen- und Porenspeicher) sowie Gasbehälter zum Einsatz.

In Ergänzung zu den Untertagespeichern, welche für den Jahresausgleich geeignet sind, lassen sich Gasbehälter für den Tages- und Wochenausgleich einsetzen. Neben einer Speicherung von Erdgas – i.d.R. hochdruckseitig – bietet sich aus Platz- und Kostengründen die Lagerung von Flüssiggasen (Propan, Butan) an. Diese Flüssiggase werden unter Beimischung von Luft dem Erdgas zur Spitzendekkung von Ortsgasversorgungsunternehmen zugemischt. Die Zumischung erfolgt zunächst in der Form, daß der Brennwert des Gasgemisches konstant gehalten wird. Ab einer gewissen Grenze wird so zugemischt, daß die Wärmebelastung der Gasverbrauchseinrichtung unverändert bleibt (konstanter Wobbe-Index).

Auswirkungen der Zumischung von Flüssiggas/Luft auf das Motorbetriebsverhalten

Um die Auswirkungen der möglichen Zumischungen von Flüssiggas/Luft zum Erdgas zu verdeutlichen, werden die wesentlichen Abhängigkeiten in Diagrammen dargestellt.

Der Aufbau soll an zwei Beispielen erläutert werden **(Bild 3)**. In dem Grunddiagramm sind der Brennwert $H_{s,n}$ in kWh/m³ über der relativen Gasdichte d sowie Linien konstanter Wobbeindices $W_{s,n}$ in kWh/m³ aufgetragen. Dieser Grunddarstellung sind Linien für konstante Butan/Luft-Zumischungen zum russischen Erdgas und die dazugehörigen Iso-Linien für konstante Methanzahlen überlagert.

Beispiele:

1. Bei brennwertgleicher Zumischung von 20 % Butan-Luft zum russischen Erdgas, dargestellt durch die waagerechte Linie zwischen dem Ausgangs punkt (A) und dem Punkt (1), ergibt sich eine Methanzahlverringerung von 95 auf etwa 60 Einheiten. Die relative Dichte steigt von 0,57auf 0,72. Der Wobbeindex geht von 14,7 auf rd. 13,1 kWh/m³ zurück.

   Der Luftbedarf – nicht im Diagramm dargestellt – bleibt bei brennwertgleicher Zumischung nahezu konstant.

2. Bei brennwertgleicher Zumischung von 10 % Butan/Luft und anschließender wobbewertgleicher Zumischung von 15 % Butan/Luft, das ist die Strecke zwischen Ausgangspunkt (A) und Punkt (2), ergibt sich eine Methanzahlverringerung von 95 auf etwa 41 Einheiten. Die relative Dichte liegt bereits bei ca. 0,8. Der Brennwert steigt von 11,1 auf rd. 12,3 kWh/m³.

   Der Luftbedarf steigt wie der Brennwert um rd. 10 %, d. h. von 9,55 auf etwa 10,50 m³/m³.

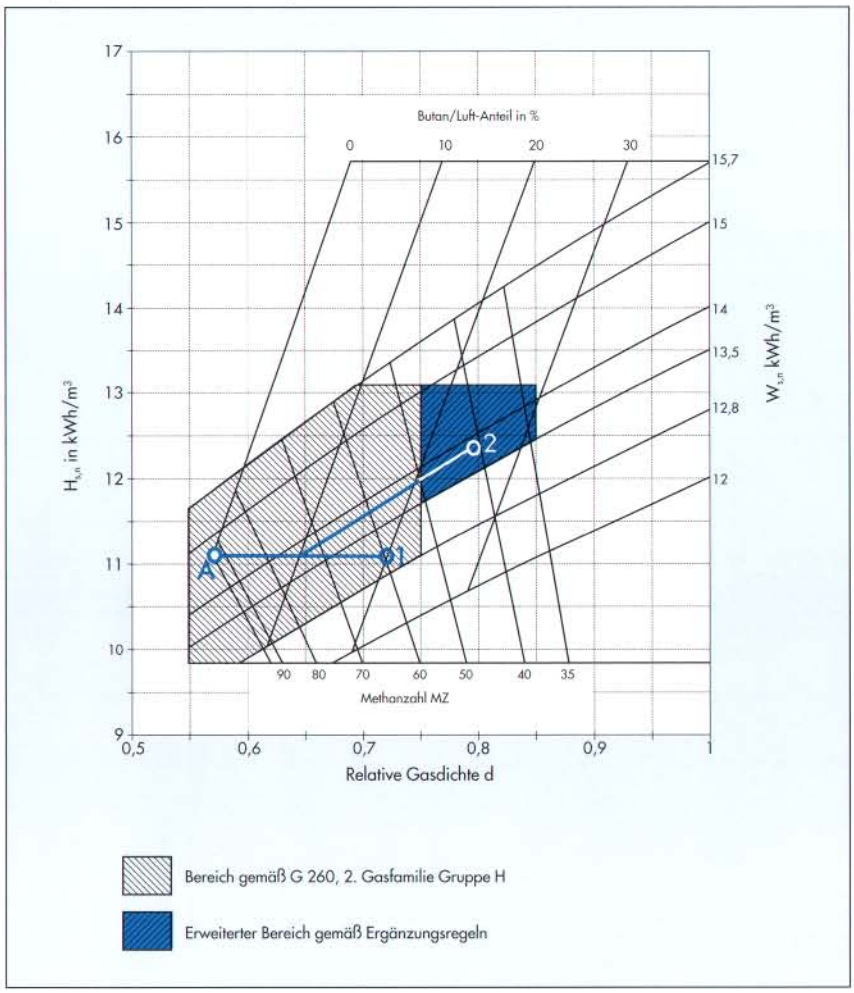


Bild 3: Auswirkung der Flüssiggas-Zumischung auf die Methanzahl am Beispiel Butan/Luft-Zumischung zum Erdgas H (Rußland)

Die vorgenannten Zumischungen erhöhen die Klopfgefahr und haben je nach Betriebsweise auch Einfluß auf die Schadstoffemissionen und die Laufruhe des Motors.

Das tatsächliche Gefährdungspotential durch Klopfen hängt von der Konstruktion, Einstellung und Betriebsweise des Motors ab. Da eine allgemein gültige Aussage über die Auswirkungen einer Methanzahländerung auf den Motorbetrieb aufgrund der vielen Einflußgrößen nicht möglich ist, sollte im jeweiligen Fall mit dem Motorhersteller Kontakt aufgenommen werden.

Motorische Randbedingungen und Methanzahlbedarf

In der Praxis ist es notwendig, neben der Methanzahl des Erdgases auch den Methanzahlbedarf des Gasmotors zu kennen. Eine grobe Klassierung hinsichtlich des Methanzahlbedarfs beispielhafter **Erdgas-Otto-Motoren** kann gemäß **Bild 4** vorgenommen werden.

Gas-Diesel-Motoren (Zündstrahlmotoren) haben aufgrund ihres hohen Verdichtungsverhältnisses einen Methanzahlbedarf von 70 bis 80 Einheiten.

Für den **Flüssiggasbetrieb** werden Motoren mit einem niedrigeren Methanzahlbedarf angeboten. Da sie gegenüber Erdgas-Motoren auslegungsbedingt erhebliche Wirkungsgrad- und CO_2-Nachteile aufweisen, sind sie für den Einsatz in Gebieten, in denen nur zeitweise Flüssiggas/Luft zum Erdgas zugemischt wird, nicht zu empfehlen.

Der Methanzahlbedarf bzw. die Klopffestigkeit des Motors wird von konstruktiven und betrieblichen Faktoren beeinflußt.

Klopffeste Motoren weisen folgende konstruktive Merkmale auf:

- niedriges Verdichtungsverhältnis,
- kompakte Brennraumgeometrie,
- optimierter Ladungswechsel,
- keine heißen Stellen am Ende des Flammenweges.

Ein niedrig verdichteter Motor hat Nachteile hinsichtlich der erreichbaren effektiven Wirkungsgrade. Es ist daher energetisch, ökologisch und wirtschaftlich nicht vertretbar, den Motor bereits konstruktiv auf die niedrigste zu erwartende Methanzahl auszulegen.

Verdichtungsverhältnis	8,7/11	9 – 10/12	10	10 – 11	11 – 12	12 – 12,5
Bohrung (mm)	>180	<150	>180	170 – 180	150 – 180	<150
Luftverhältnis	mager	mager	stöch.	mager	stöch.	stöch.
Drehzahl (1/min)	1.000	1.500	1.000	1.500	1.500	1.500
p_{me} (bar)	9,5 – 11	8,0 – 13,5	7,12 – 7,8	10,7 – 11,3	6,6 – 7,2	8,1 – 8,5
Wirkungsgrad (%)	35 – 38	34,4 – 38,7	34 – 35,7	35	34,3 – 34,7	36,2 – 37,3
Methanzahlbedarf	>60/70	>60 – 70/80	>70	>70	>70	>80

Bild 4: Beispiele der am Markt angebotenen Erdgas-Otto-Motoren

Bei der Auswahl des Gasmotors, ist die niedrigste zu erwartende Methanzahl sowie die Gasbeschaffenheitsbandbreite gemäß DVGW-Arbeitsblatt G 260 zu berücksichtigen. Der Gasmotor sollte so ausgelegt sein, daß die Anpassung an Methanzahländerungen ggf. durch eine Veränderung der Motoreinstellung erreicht werden kann. Die Möglichkeiten zur Verringerung der Klopfneigung und ihre qualitativen Auswirkungen sind in **Bild 5** dargestellt.

Eine Veränderung der Motoreinstellung ist in Absprache mit dem Hersteller durchzuführen.

Die für den jeweiligen Anwendungsfall geeignete Maßnahme oder Maßnahmenkombination ist vom Motor und seiner Betriebsweise abhängig. In bestimmten Fällen ist eine Veränderung der Motoreinstellung nur unter besonderen Vorkehrungen oder Vereinbarungen möglich (Insel- bzw. Notstrombetrieb, Verdichterantrieb).

Zündzeitpunktveränderung und Leistungsreduzierung sind wirksame Maßnahmen den Motorbetrieb an ein niedrigeres Methanzahlangebot anzupassen **(siehe Bild 6)**.

Maßnahme	Verringerung der Klopfneigung (● groß / ○ gering)
1. Spätverstellung des Zündzeitpunktes bzw. des Zündölförderbeginns	●
2. Verringerung der Motorbelastung bzw. Aufladung	●
3. Erhöhung der Luftzahl	●
4. Verringerung des Gemischdrucks und der -temperatur	●
5. Abgasrückführung	○
6. Verringerung der Bauteiltemperaturen (Absenken der Kühlwassertemperatur)	○

Bild 5: Maßnahmen zur Verringerung der Klopfneigung von Motoren durch Veränderung von Betriebsparametern

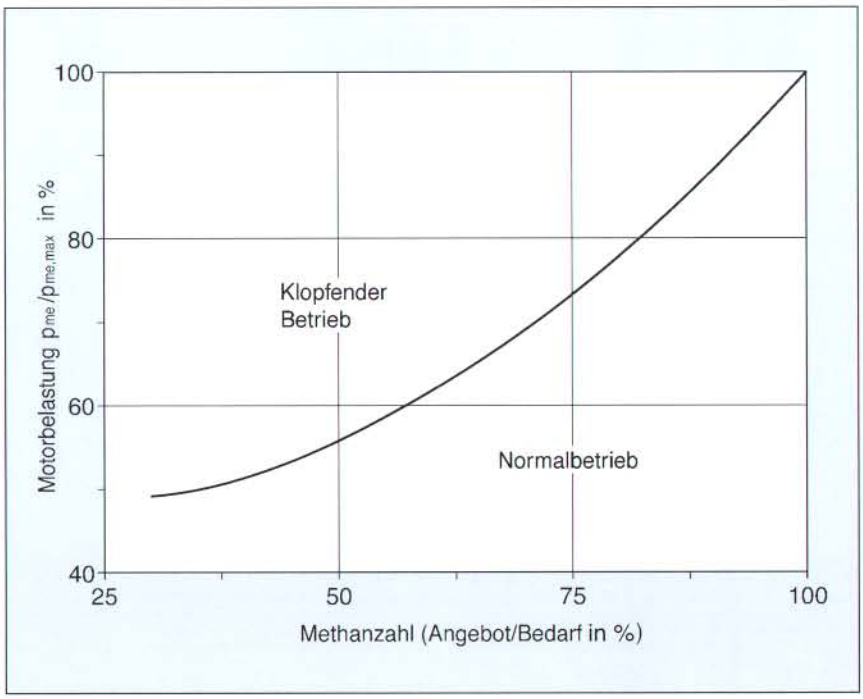


Bild 6: Motorbelastung in Abhängigkeit von der Methanzahl

Lösungsansätze zur Ausregelung von Beschaffenheitsänderungen

Die Maßnahmen zur vorbeugenden und dauerhaften Einstellung des Motorbetriebes an sich ändernde Gasbeschaffenheiten wirken sich in der Regel nachteilig auf die Leistung und/oder den Wirkungsgrad aus. Daher besteht die Forderung nach einer ereignisorientierten Anpassung des Methanzahlbedarfes an das aktuelle Methanzahlangebot.

Diese Anpassung kann entweder mit Hilfe von **Gas-** oder **Methanzahlsensoren** erfolgen, die Informationen über die Gasbeschaffenheit (z.B. Methanzahl, Brennwert oder Luftbedarf) an eine Motorsteuerung übertragen, oder über **Klopferkennung /-regelungen**, Systeme, die Unregelmäßigkeiten im Motorbetrieb (Klopfen, unzulässige Brennraumtemperaturen usw.) registrieren und beheben.

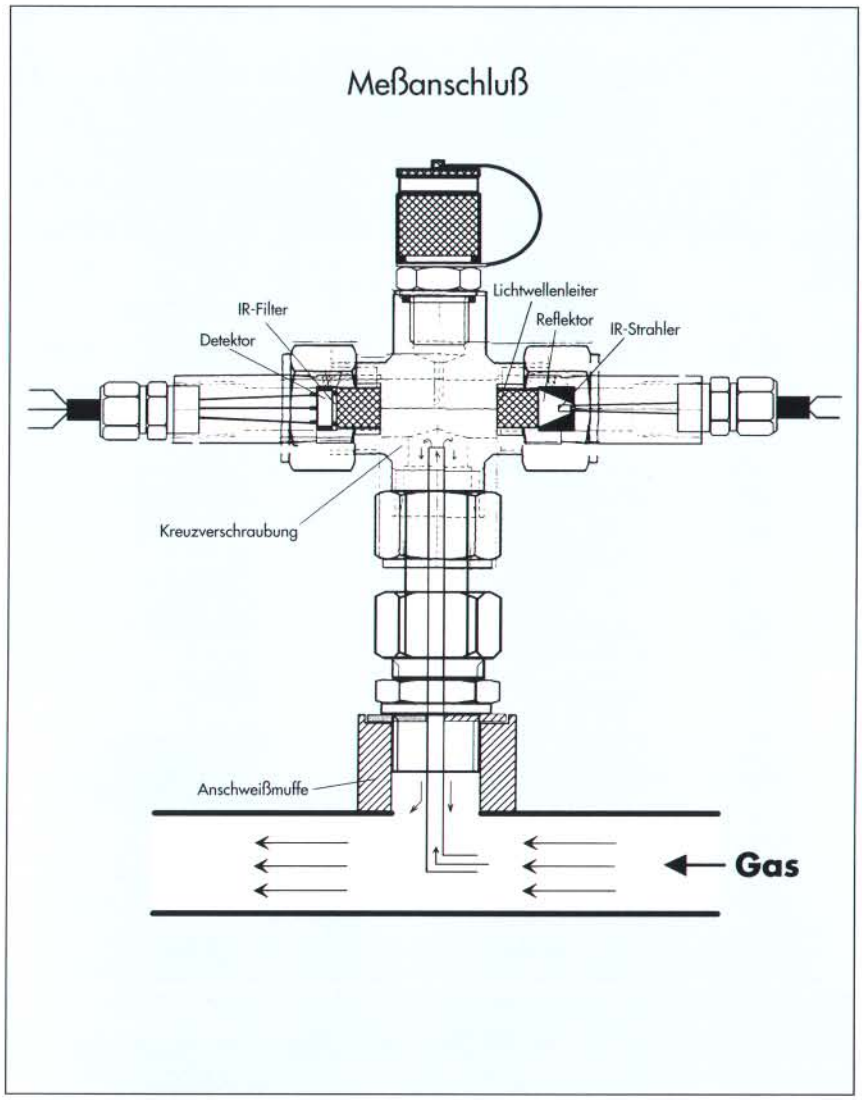


Bild 7: Aufbau IR-Sensor

Methanzahlsensoren

Die Entwicklung von Gassensoren wurde in den letzten Jahren intensiv vorangetrieben. Gute Ergebnisse werden mit Sensoren nach dem Wärmeleitfähigkeitsprinzip erreicht. Sie liefern unter bestimmten Vorgaben (Grundgas, Propan/- oder Butan/Luft-Zumischung) ein methanzahlanaloges Meßsignal.

Bei wechselnder Erdgasbeschaffenheit können mit Wärmeleitfähigkeitssensoren aufgrund von Querempfindlichkeiten nur bei einigen Gasarten Methanzahlveränderungen mit ausreichender Genauigkeit erfaßt werden. Die Gaswirtschaft hat deshalb für diese Anwendungsfälle spezielle Sensorsysteme entwickelt. Die neue Sensorgeneration arbeitet nach dem Infrarot (IR)-Absorptions-Prinzip **(Bild 7)**. Dabei wird die Eigenschaft der Gasmoleküle genutzt, IR- Strahlung absorbieren zu können. Durch eine spezielle Filterung werden die Absorptionsbanden von Methan, Ethan, Propan und Butan in einem Spektralbereich um 3 µm so bewertet, daß die Absorption in der Summe mit der Methanzahl korreliert. Die IR-Sensoren sind in einem breit angelegten Feldversuch erfolgreich getestet worden und sind seit Mitte 1998 auf dem Markt verfügbar.

Die Steuerung des Motorbetriebes mit Hilfe von Gassensoren stellt einen klopffreien Motorbetrieb sicher. Aus Sicherheitsgründen muß allerdings ein Abstand zur Klopfgrenze mit entsprechenden Wirkungsgradnachteilen eingehalten werden. Weitere Einsatzbereiche für Methanzahlsensoren können z. B. auch Erdgas-Übergabestationen und Erdgas-Tankstellen sein.

Klopferkennung/-regelungen

Die Ursache für klopfende Verbrennung ist eine Selbstzündung des noch nicht von der Flammenfront erfaßten Frischgemisches an einer oder mehreren Stellen. Durch die mit der Selbstzündung verbundene hohe Energieumsatzrate entstehen hochfrequente Druckwellen und hohe Temperaturen im Brennraum. Die Hochfrequenzschwingungen können durch eine direkte Messung des Zylinderdruckes detektiert werden. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, piezoelektrische Beschleunigungssensoren am Motorblock oder Zylinderkopf einzusetzen.

Für Ottomotoren hat sich folgende Signalverarbeitung als zuverlässige Basis für die Klopferkennung herausgestellt:

- ▷ Betrachtung des Signals in einem definierten Kurbelwinkelfenster nach Zünd-OT
- ▷ Breitbandige Bandpaßfilterung mit den Frequenzgrenzen oberhalb der Kippschwingung bzw. unterhalb der Sensorresonanz
- ▷ Quadrieren, Integrieren

Das Ergebnis der Integration ist eine Art Energiewert, der als Fensterenergie bezeichnet wird. Dieses Signal wird in der Klopfregelung verarbeitet.

Diese Motorregelungen gewährleisten bei wechselnder Erdgasbeschaffenheit und Flüssiggas/Luft-Zumischung einen sicheren Motorbetrieb unter Einhaltung optimaler Wirkungsgrade. Die bei einem Wechsel der Gaszusammensetzung u.U. ansteigenden Schadstoffemissionen werden bei stöchiometrisch betriebenen Motoren durch die Lambda-Regelung und den 3-Wege-Katalysator weitgehend ausgeglichen. Zur Erzielung hoher Wirkungsgrade und zur Aufrechterhaltung eines sicheren Betriebes ist daher nahezu im gesamten

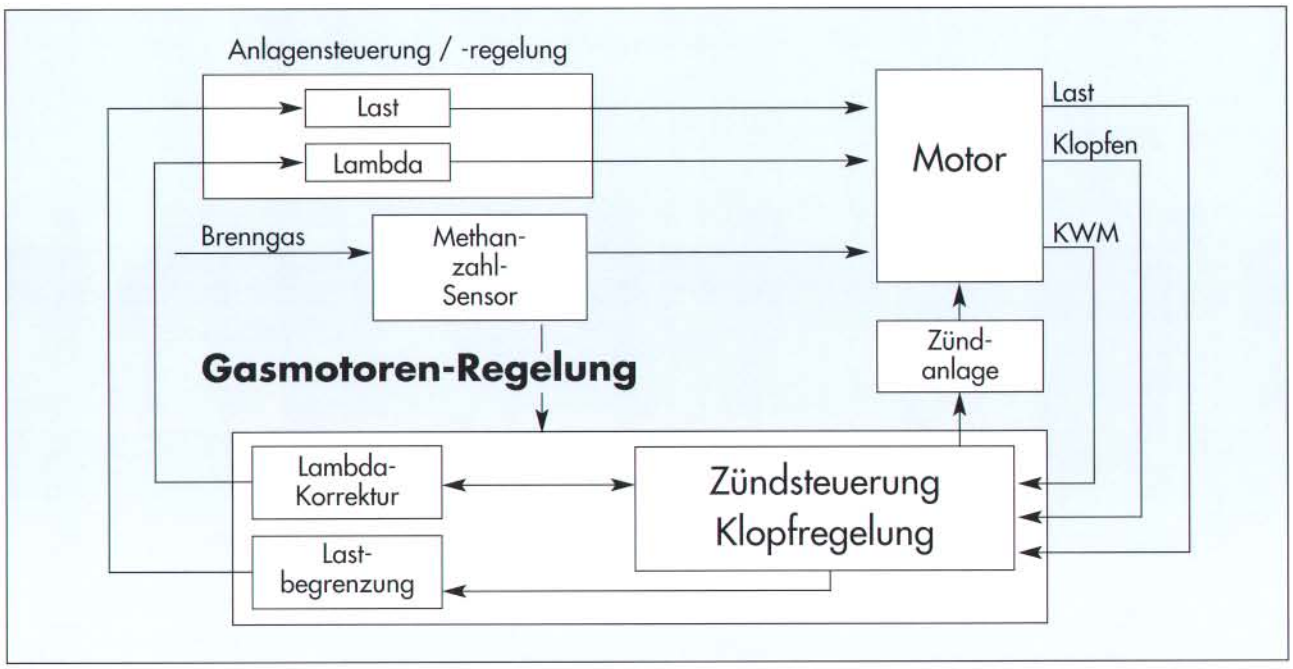


Bild: 8 Schema einer Gasmotoren-Regelung zur Anpassung der Betriebsparameter an wechselnde Gasbeschaffenheiten

Methanzahlbereich ein klopfgeregelter Betrieb erforderlich. Magermotoren sollten zur Einhaltung der Schadstoffgrenzwerte in den Methanzahlbereichen, in denen die Klopfgrenze noch nicht erreicht wird, mit Hilfe einer Lambda-Regelung und ggf. eines Gassensors vorgesteuert werden können. Bei Erreichen der Klopfgrenze muß automatisch auf einen klopfgeregelten Betrieb umgeschaltet werden. **Bild 8** zeigt den schematischen Aufbau einer entsprechenden Gasmotorenregelung.

Managementsysteme zur Anpassung des Motorbetriebes an die aktuelle Gasbeschaffenheit werden von den Motor- und Anlagenherstellern angeboten. Diese Systeme sind auch zur Nachrüstung an bestehenden Anlagen geeignet. Vor einer Nachrüstung wird es zur Vermeidung von Schäden ggf. erforderlich sein, den Motorbetrieb in Absprache mit den Herstellern manuell anzupassen. In der Regel wird eine Lastverminderung vorgenommen werden müssen.

Literaturhinweise

[1] DVGW-Arbeitsblatt G 260 (3/2000)

[2] Christoph, K.; Cartellieri, W. und Pfeifer, U.: Bewertung der Klopffestigkeit von Kraftgasen mittels der Methanzahl und deren praktische Anwendung bei Gasmotoren MTZ 33, (1972) Nr. 10

[3] Schiffgens, H.-J. und Schollmeyer, H.-J.: Einfluß der Methanzahl auf die Verbrennung im Gas-Ottomotor. MTZ 54 (1993) Nr. 7/8, Seite 350/357

[4] Herdin, G.; Gruber, F.; Plohberger, D. und Lutz B.: Einfluß wechselnder Methanzahlen auf das Betriebsverhalten von Magergasmotoren. VDI-Bericht 1195 (1995)

[5] Hupperich, P.: Einfluß der Methanzahl auf Auslegung und Betrieb eines mager laufenden Gas-Ottomotors. Diss. TH Aachen

[6] Schollmeyer, H.-J.; Wackertapp, H.: Einsatz von Erdgasen unterschiedlicher Beschaffenheit in Stationär- und Fahrzeugmotoren. gwf-Gas / Erdgas 137 (1996) Heft 2, S. 78–88

[7] Hoppe, M.; Wolf, D.: Methanzahl-Controller zur Steuerung von Gasmotoren bei wechselnden Gasbeschaffenheiten. Gaswärme International, 48 (1999) Heft 7/8, S. 419–422

Anhang: Berechnung der Methanzahl aus der Gaszusammensetzung

Die Methanzahl eines Gases wird üblicherweise in einem Prüfmotor unter definierten Prüfbedingungen ermittelt. Da dieser Prüfmotor nicht überall zur Verfügung steht und die experimentelle Bestimmung der Methanzahl recht aufwendig ist, ist außerdem ein Verfahren zur Vorausberechnung der Methanzahl aus der chemischen Zusammensetzung eines Gasgemisches hergeleitet worden. Dabei wurde deutlich, daß ein akzeptables Ergebnis aufgrund der komplexen Zusammenhänge nur erreicht wird, wenn

1. das Gasgemisch zunächst in bestimmte Zwei- oder Drei-Komponenten-Gruppen aufgeteilt wird und zwar unter den Prämissen, daß die Methanzahlen dieser Gemische

a) aus Versuchen bekannt sind und

b) sich um höchstens 5 Einheiten voneinander unterscheiden und

2. erst aus den Methanzahlen dieser Komponenten Gruppen die Methanzahl des Gesamtgemisches nach folgender linearen Mischungsformel berechnet wird:

$$MZ' = \frac{1}{100} \cdot \sum_{i=1}^{n} y_i \cdot MZ_i \qquad (1)$$

MZ' – Methanzahl des Gesamtgemisches

MZ_i – Methanzahl der Gemischgruppe i

y_i – Anteil der Gemischgruppe i am Gesamtgemisch in Vol.-%

Die Klopffestigkeit von Gasgemischen wird meist von wenigen Komponenten bestimmt. Vor der Aufteilung des Gasgemisches in Gruppen sind deshalb folgende Vereinfachungen zulässig:

▷ Die Iso- und Norm-Butan-Gehalte können addiert werden.

▷ Die Komponenten C_5, C_6 und höhere können dem n-Butan zugerechnet werden, da sie meist nur als Spuren im Gas enthalten sind.

▷ Die Inertgase CO_2 und N_2 können vernachlässigt werden, wenn deren Volumen-Gehalte 2 bzw. 9 % nicht übersteigen. Der Fehler kann in diesen Fällen höchstens 2 MZ-Einheiten betragen.

Die auf die wesentlichen Bestandteile reduzierte Analyse, meist verbleiben 5 - 6 Komponenten, wird dann nach folgenden Regeln in Gruppen aufgeteilt:

a) Aufteilung des Restgemisches in 2 oder 3 Gruppen, wobei eine Gruppe möglichst aus 3 und die restlichen Gruppen aus mindestens 2 Komponenten bestehen sollten. Bei wasserstoffreichen und flüssiggashaltigen Gemischen liefern auch reine Zweikomponenten-Gemische gute Ergebnisse. Kohlenmonoxid und Wasserstoff müssen immer eine Gruppe bilden. Für diese Kombination fehlen exakte Meßwerte. Deshalb ist ein linearer Zusammenhang zwischen Gemischzusammensetzung und Methanzahl anzunehmen.

b) Probieren verschiedener Aufteilungsvarianten, bis die Methanzahlen der einzelnen Gruppen um nicht mehr als 5 Einheiten voneinander abweichen. Kleine Methanzahl-Differenzen zwischen den Gruppen sind zu erwarten, wenn eine oder mehrere Komponenten auf mehrere Gruppen verteilt werden.

c) Klopffreudige Komponenten (z. B. Butan) sollten immer mit klopffesten Komponenten (z. B. Methan) in einer Dreistoff-Gruppe zusammengefaßt werden.

d) Bei Gasen mit hohen CO_2- und N_2-Gehalten wird die Methanzahl zunächst unter Vernachlässigung des Inertgasanteiles nach Gleichung (1) berechnet. Anschließend ist dem klopffestigkeitserhöhenden Einfluß dieser Komponenten durch eine Korrektur gemäß Gleichung (2) Rechnung zu tragen.

$$MZ = MZ' + (MZ'' - 100) \qquad (2)$$

MZ – MZ des Gesamtgemisches

MZ′ – MZ ohne Inertgasanteil nach Gl. (1)

MZ′′ – fiktive MZ des Dreistoffgemisches CH_4-CO_2-N_2

Zur Ermittlung von MZ" wird der gesamte inertgasfreie Anteil der Analyse als Methan aufgefaßt.

Beispiele für die rechnerische Ermittlung der Methanzahl

Die rechnerische Ermittlung der Methanzahl aus der Gaszusammensetzung soll an 2 Beispielen veranschaulicht werden.

In **Beispiel 1** wird die Methanzahl eines Erdgases mit einem hohen Stickstoffgehalt berechnet (Erdgas L aus den Niederlanden), um den klopffestigkeitserhöhenden Einfluß der Inertgasanteile deutlich zu machen.

Die Berechnung wird zweckmäßigerweise in folgenden Schritten durchgeführt (siehe auch Beispieltabellen "Rechnerische Ermittlung der Methanzahlen"):

(1) Das Gasgemisch wird zunächst auf die wesentlichen Bestandteile reduziert. Dazu werden die i- und n-Butangehalte zusammengefaßt und die Komponenten C_5, C_6 und höhere werden dem n-Butan zugerechnet. Die C_1 bis C_3 Anteile bleiben unverändert. Die Inertgase werden zurückgestellt und erst im 5. Schritt berücksichtigt.

(2) Die reduzierte Zusammensetzung (87,74 Vol-%) wird auf 100 Vol-% normiert. Dazu werden die verbliebenen 4 Komponenten mit dem Faktor 100/87,74 multipliziert.

(3) Das resultierende Gemisch wird in zwei geeignete Teilgemische aufgeteilt. In Beispiel 1 ist eine Gemischgruppe aus den Komponenten CH_4 (46,00 %) und C_2H_6 und eine zweite Gruppe aus den Komponenten CH_4 (48,95 %), Propan und n-Butan gebildet worden.

(4) Die durch die Aufteilung in Gemischgruppen reduzierten Zusammensetzungen sind wie in Schritt 2 wieder auf 100 Vol-% zu normieren. Für die resultierenden Gemische sind aus den passenden Dreiecksdiagrammen (**Bild 9** für die Gruppe I und **Bild 10** für die Gruppe II) die Einzelmethanzahlen MZ_i zu ermitteln. Diese Einzelmethanzahlen dürfen um nicht mehr als 5 Einheiten voneinander abweichen. Da dies hier der Fall ist, kann nach Gleichung (1) die MZ für das gesamte inertgasfreie Gemisch (MZ′) berechnet werden.

Analysen-wert	Vol.-%	(1) Reduzierung auf die wesentlichen Bestandteile Vol.-%	(2) Umrechnung der reduzierten Zusammen-setzung auf 100 Vol.-%	(3) Bildung von zwei Teilgemischen Vol.-% I	(3) II	(4) Umrechnung der Teilgemische auf 100 Vol.-% I	(4) II	(5) Berechnung der Klopffestigkeits-erhöhung durch Inertgasanteile 100 Vol.-%
CH_4	83,31	83,31	94,95	46,00	48,95	92,07	97,82	87,74
C_2H_6	3,47	3,47	3,96	3,96		7,93		
C_3H_8	0,66	0,66	0,75		0,75		1,50	
$i\text{-}C_4H_{10}$	0,08							
$n\text{-}C_4H_{10}$	0,13	0,30	0,34		0,34		0,68	
$i\text{-}C_5H_{12}$	0,03							
$n\text{-}C_5H_{12}$	0,03							
C_{6+}	0,03							
CO_2	1,27							1,27
N_2	10,99							10,99
Summe	100,00	87,74	100,00	y_i	49,96	50,04	100,00	100,00	100,00
				MZ_i			82	84	MZ''=104
							aus Bild 9	aus Bild 10	aus Bild 11

Beispiel 1: Rechnerische Ermittlung der Methanzahl eines Erdgases der Gruppe L

Die Forderung ΔMZ_i der Gemischgruppen ≤ 5 MZ-Einheiten wird erfüllt

Rechnung nach Gleichung (1) : $MZ' = \frac{1}{100}(82 \times 49{,}96 + 84 \times 50{,}04) = 83$

Rechnung nach Gleichung (2) : $MZ = 83 + (104 - 100) = 87$

(5) Im letzten Schritt wird der klopffestigkeitserhöhende Einfluß der Inertgase berücksichtigt. Dazu ist eine Gemischgruppe aus CO_2, N_2 und dem gesamten inertgasfreien Anteil des Gases zu bilden. Der inertgasfreie Anteil wird als Methan aufgefaßt. Aus **Bild 11** kann dann die fiktive Methanzahl (MZ'') des Dreistoffgemisches CH_4-CO_2-N_2 ermittelt werden. Mit MZ' und MZ'' ist abschließend die Gesamtmethanzahl des Gases (MZ) nach Gleichung (2) zu berechnen.

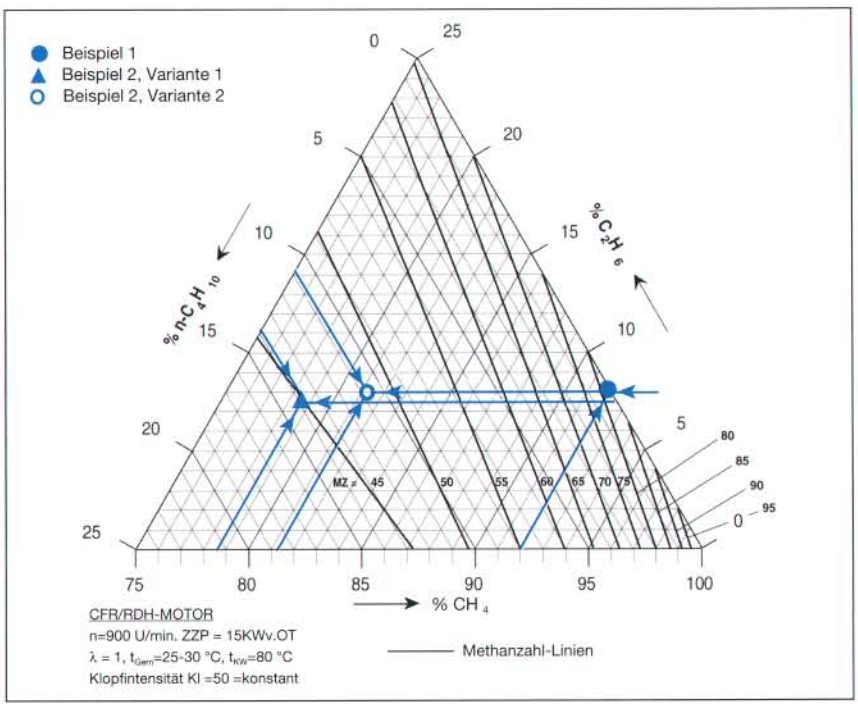


Bild 9: Klopffestigkeit (MZ) von Methan-Ethan-Butan-Gemischen

In **Beispiel 2** wird die Methanzahl eines Gasgemisches aus dem niederländischen Erdgas der Gruppe L und Butan/Luft ermittelt, um den klopffestigkeitsmindernden Einfluß des Flüssiggases zu demonstrieren. In diesem Beispiel soll dem Grundgas ein Butan/Luft-Anteil von 18,5 Vol.-% wobbewertgleich zugemischt werden. Die Beschaffenheit des Gemisches aus Grund- und Zusatzgas entspricht den Anforderungen der G 260. Die relative Gasdichte liegt bei 0,8. Die Berechnung erfolgt wiederum in fünf Schritten, wie bereits für das

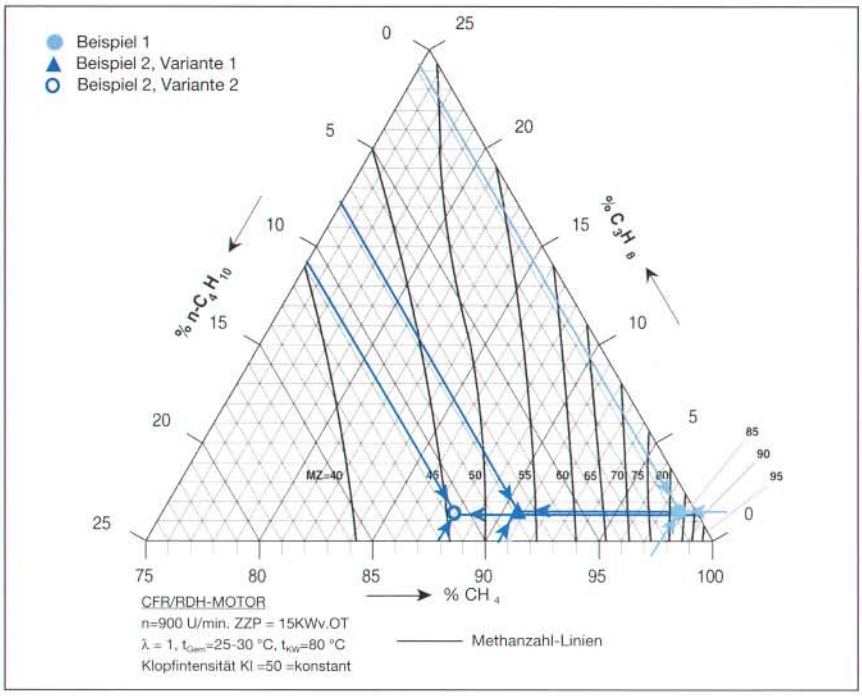


Bild 10: Klopffestigkeit (MZ) von Methan-Propan-Butan-Gemischen

Analysenwert	Vol.-%	(1) Reduzierung auf die wesentlichen Bestandteile Vol.-%	(2) Umrechnung der reduzierten Zusammensetzung auf 100 Vol.-%	(3) Bildung von zwei Teilgemischen Vol.-% I	(3) II	(4) Umrechnung der Teilgemische auf 100 Vol.-% I	(4) II	(5) Berechnung der Klopffestigkeitserhöhung durch Inertgasanteile 100 Vol.-%
CH_4	68,26	68,26	84,85	38,00	46,85	78,32	91,00	90,85
C_2H_6	2,78	2,78	3,45	3,45		7,12		
C_3H_8	0,51	0,51	0,63		0,63		1,23	
$i\text{-}C_4H_{10}$								
$n\text{-}C_4H_{10}$	8,80	8,90	11,07	7,06	4,00	14,56	7,77	
$i\text{-}C_5H_{12}$								
$n\text{-}C_4H_{10}$	0,05							
C_{6+}	0,05							
CO_2	1,17							1,17
N_2	16,20	8,22	(16,20-8,22) Luftanteil bleibt hier unberücksichtigt					7,98
O_2	2,18	2,18						
Summe	100,00	90,85	100,00	y_i	48,51	51,48	100,00	100,00
				MZ_i			44	54	MZ''=103
							aus Bild 9	aus Bild 10	aus Bild 11

Beispiel 2 / Variante 1 : Rechnerische Ermittlung der Methanzahl eines Erdgases der Gruppe L im Gemisch mit Butan/Luft

Die Forderung ΔMZ_i der Gemischgruppen ≤ 5 MZ-Einheiten wird nicht erfüllt

Rechnung nach Gleichung (1) : $MZ' = \frac{1}{100}(44 \times 48{,}51 + 54 \times 51{,}48) = 49$

Rechnung nach Gleichung (2) : $MZ = 49 + (103 - 100) = 52$

Analysen-wert	Vol.-%	(1) Reduzierung auf die wesentlichen Bestandteile Vol.-%	(2) Umrechnung der reduzierten Zusammen-setzung auf 100 Vol.-%	(3) Bildung von zwei Teilgemischen Vol.-% I	(3) II	(4) Umrechnung der Teilgemische auf 100 Vol.-% I	(4) II	(5) Berechnung der Klopffestigkeits-erhöhung durch Inertgasanteile 100 Vol.-%
CH_4	68,11	68,11	84,89	38,00	46,89	81,36	87,98	82,38
C_2H_6	2,97	2,97	3,71	3,71		7,94		
C_3H_8	0,59	0,59	0,73		0,73		1,37	
$i\text{-}C_4H_{10}$								
$n\text{-}C_4H_{10}$	8,48	→ 8,57	10,67	5,00	5,67	10,70	10,65	
$i\text{-}C_5H_{12}$								
$n\text{-}C_5H_{12}$	0,05							
C_{6+}	0,04							
O_2	2,14	→ bleibt unberück-sichtigt						
CO_2	1,05	→						→ 1,05
N_2	16,57	→						→ 16,57
Summe	100,00	80,24	100,00	y_i	46,71	53,29	100,00	100,00
				MZ_i			48,5	46	MZ''=106
							aus Bild 9	aus Bild 10	aus Bild 11

Beispiel 2 / Variante 2 : Rechnerische Ermittlung der Methanzahl eines Erdgases der Gruppe L im Gemisch mit Butan/Luft

Die Forderung ΔMZ_i der Gemischgruppen ≤ 5 MZ-Einheiten wird erfüllt

Rechnung nach Gleichung (1) : $MZ' = \frac{1}{100}(48{,}5 \times 46{,}7075 + 46 \times 53{,}2925) = 47$

Rechnung nach Gleichung (2) : $MZ = 47 + (106 - 100) = 53$

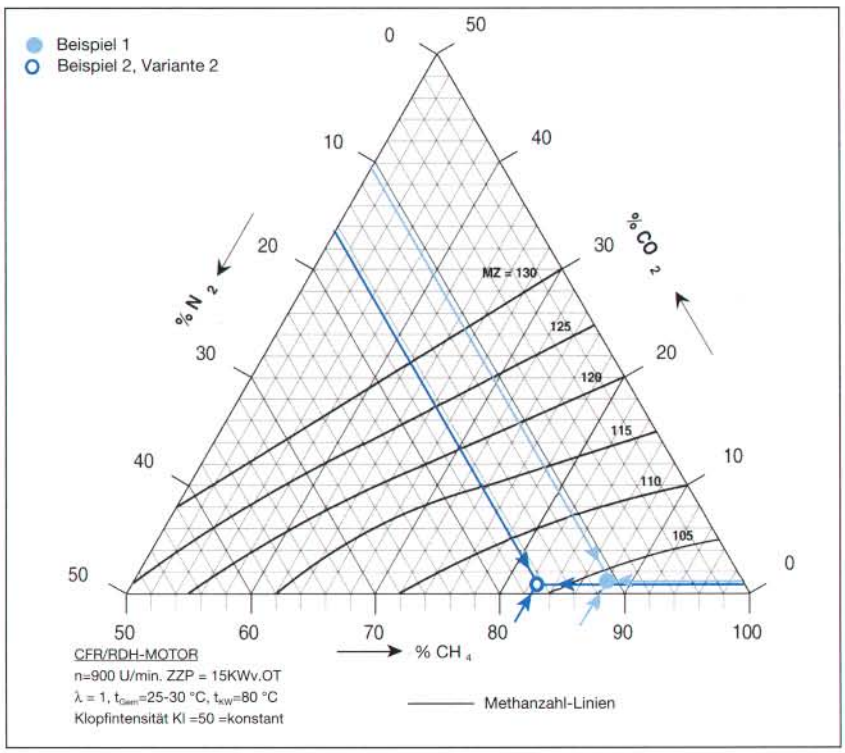


Bild 11: Klopffestigkeit (MZ) von Methan-Kohlendioxid-Stickstoff-Gemischen

Beispiel 1 erläutert. In diesem Fall ist zusätzlich zu beachten, daß der Luftanteil, der durch die Zumischung in das Gas gelangt ist, nicht in die MZ-Berechnung eingehen darf, weil bei der Gemischbildung in Motoren mit Lamda-Regelung automatisch entsprechend weniger Verbrennungsluft beibemessen wird.

Für das zweite Beispiel (siehe auch Beispieltabellen "Rechnerische Ermittlung der Methanzahlen") sind zwei Berechnungsvarianten aufgeführt.

In **Variante 1** ist die Berechnung bewußt mit einer Gemischaufteilung (Schritt 3) durchgeführt worden, die zu einer unzulässig hohen MZ-Differenz zwischen den Gruppen führt (ΔMZ_i = 10 MZ-Einheiten).

Variante 2 zeigt das Ergebnis, wenn der Berechnung eine geeignete Aufteilung der Komponenten vorausging. Es wird deutlich, daß im ersten Fall eine um etwa 2 Einheiten zu hohe MZ ermittelt wird.

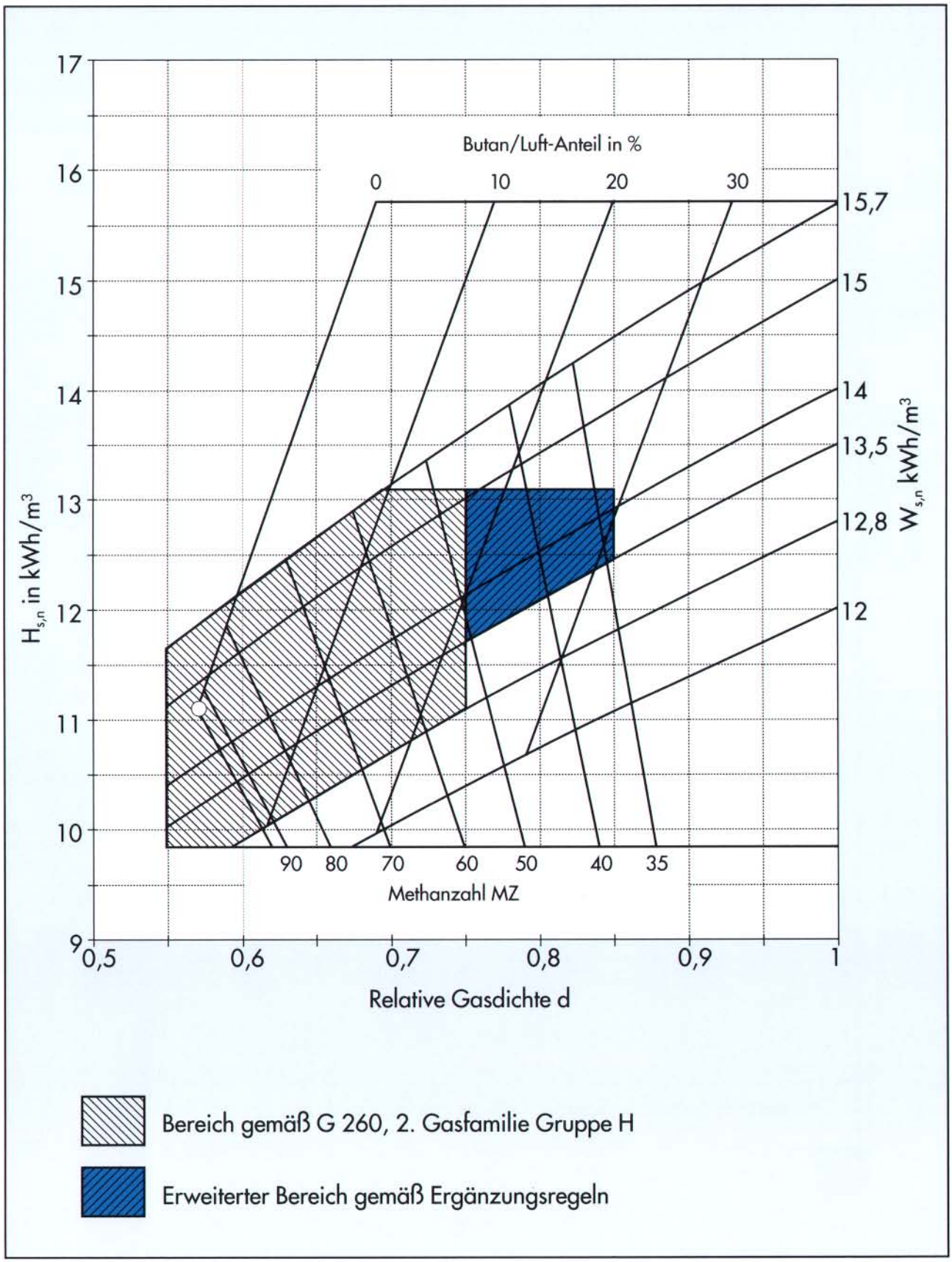
Die zur Erläuterung der Beispiele verwendeten Dreiecksdiagramme **(Bilder 9-11)** sind nur ein Auszug aus dem experimentell ermittelten Datenmaterial. Entsprechende Diagramme liegen auch für andere Gemischgruppen aus Methan, Ethan, Propan und Butan sowie für Gemischgruppen aus den einzelnen Kohlenwasserstoffen mit Wasserstoff bzw. Schwefelwasserstoff vor [2].

Eine Alternative ist die EDV-gestützte Berechnung der Methanzahl. Geeignete PC-Programme können heute erworben werden.

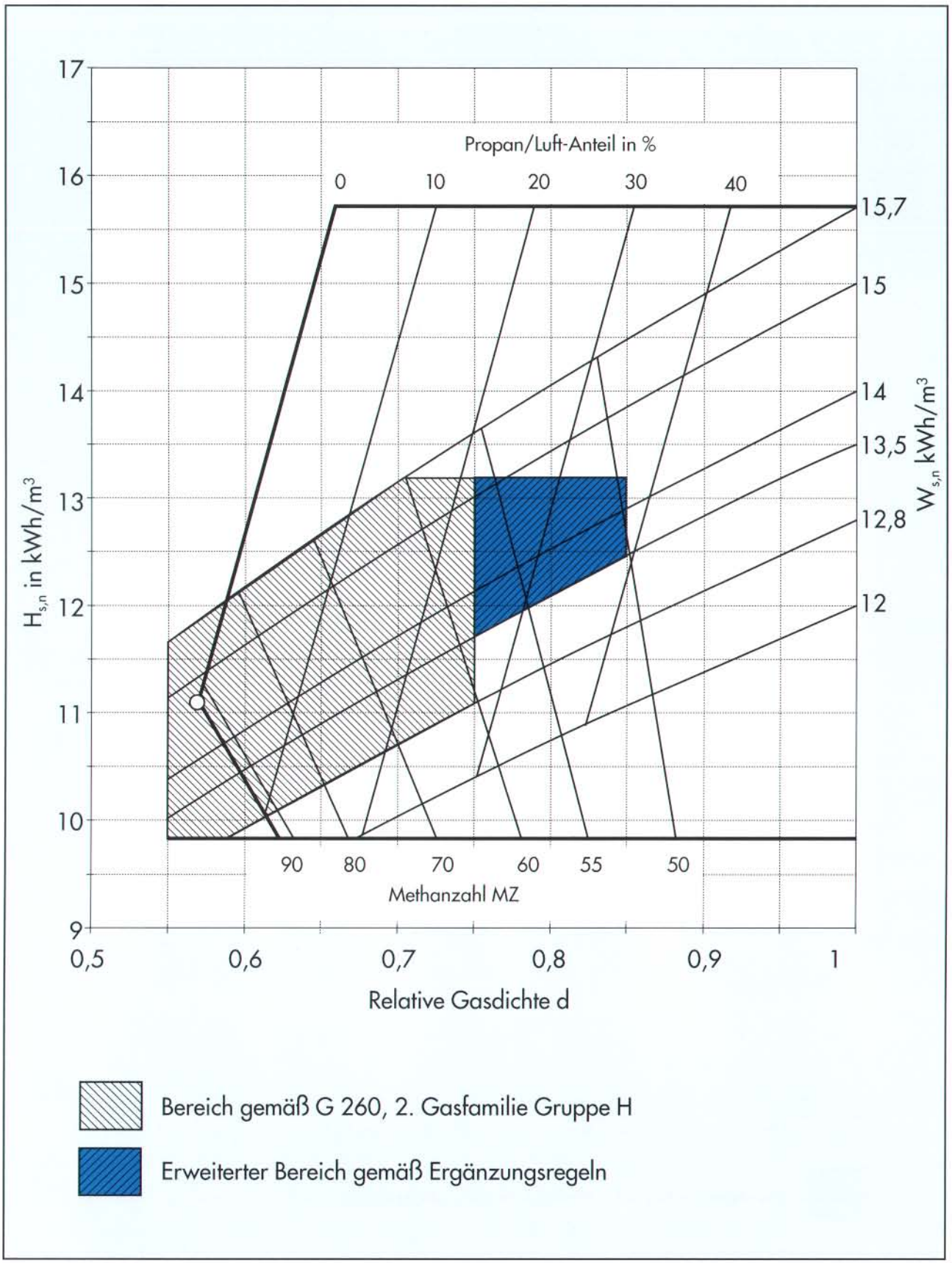
Nomogramme mit Methanzahl für verschiedene Grundgase und Zumischungen

	Seite
Butan/Luft-Zumischung zum Erdgas H (Rußland)	19
Propan/Luft-Zumischung zum Erdgas H (Rußland)	20
Butan/Luft-Zumischung zum Erdgas H (Nordsee)	21
Propan/Luft-Zumischung zum Erdgas H (Nordsee)	22
Butan/Luft-Zumischung zum Erdgas H (Verbundgas)	23
Propan/Luft-Zumischung zum Erdgas H (Verbundgas)	24
Butan/Luft-Zumischung zum Erdgas L (Niederlande)	25
Propan/Luft-Zumischung zum Erdgas L (Niederlande)	26

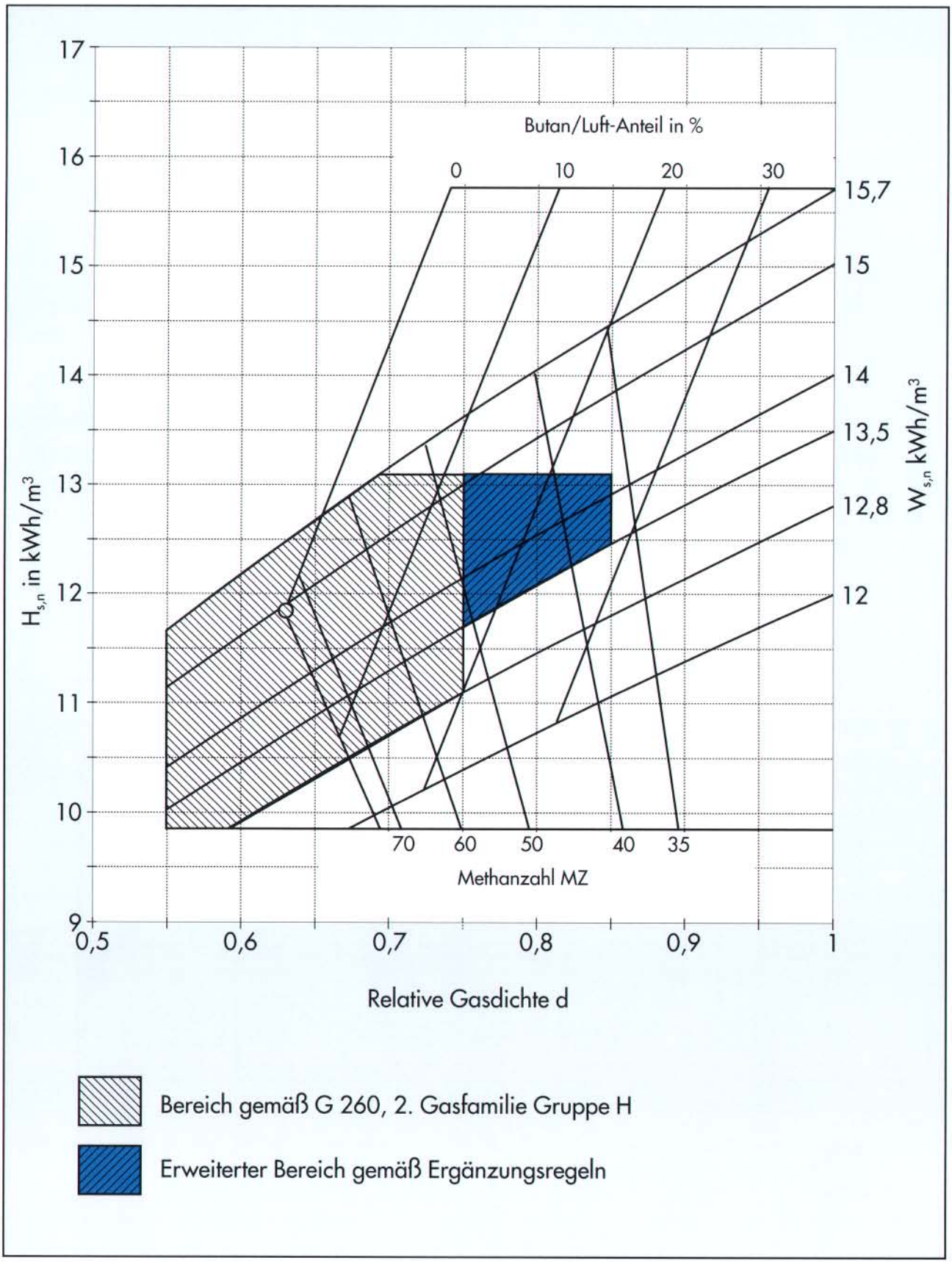
Butan/Luft-Zumischung zum Erdgas H (Rußland)



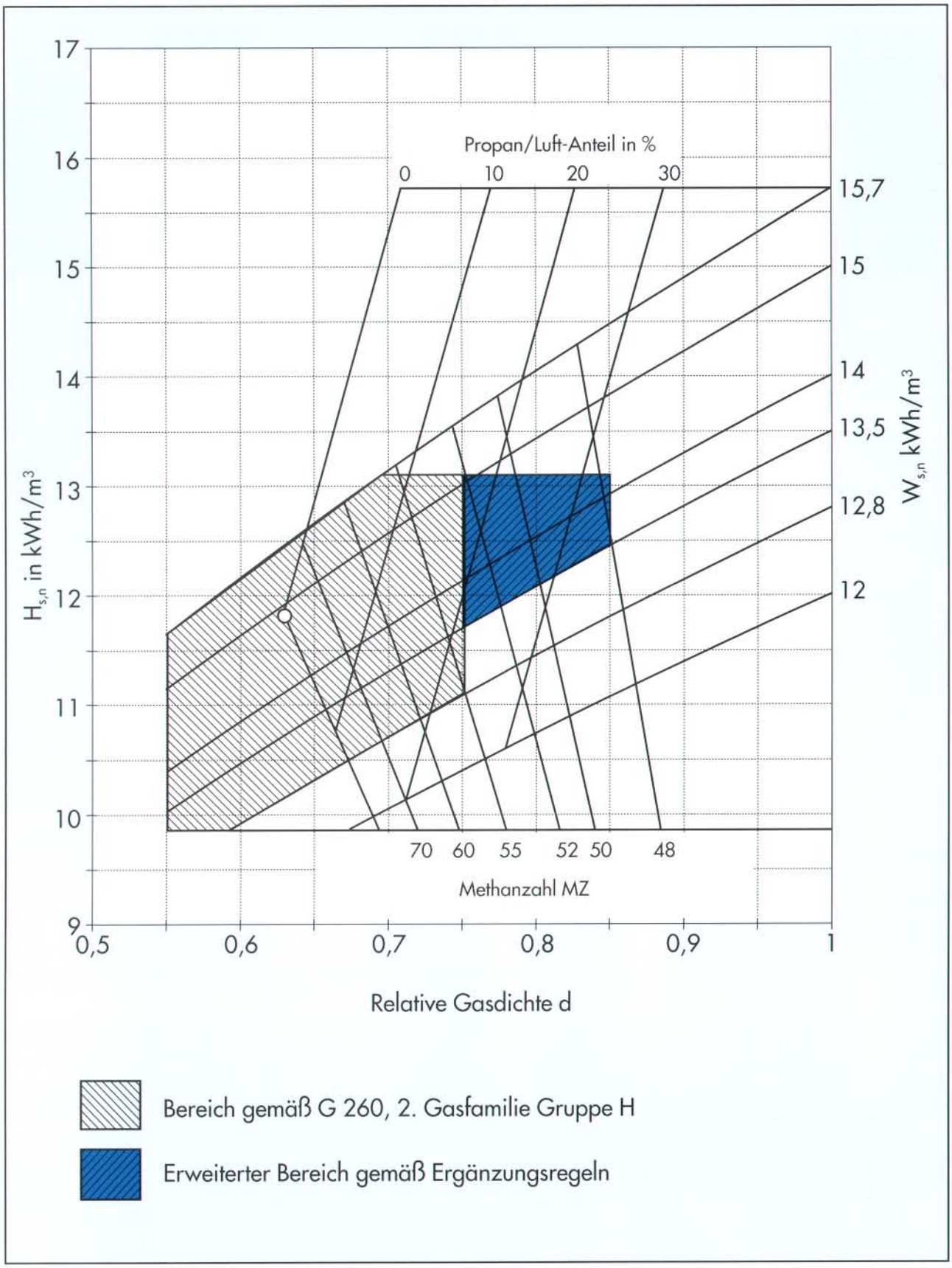
Propan/Luft-Zumischung zum Erdgas H (Rußland)



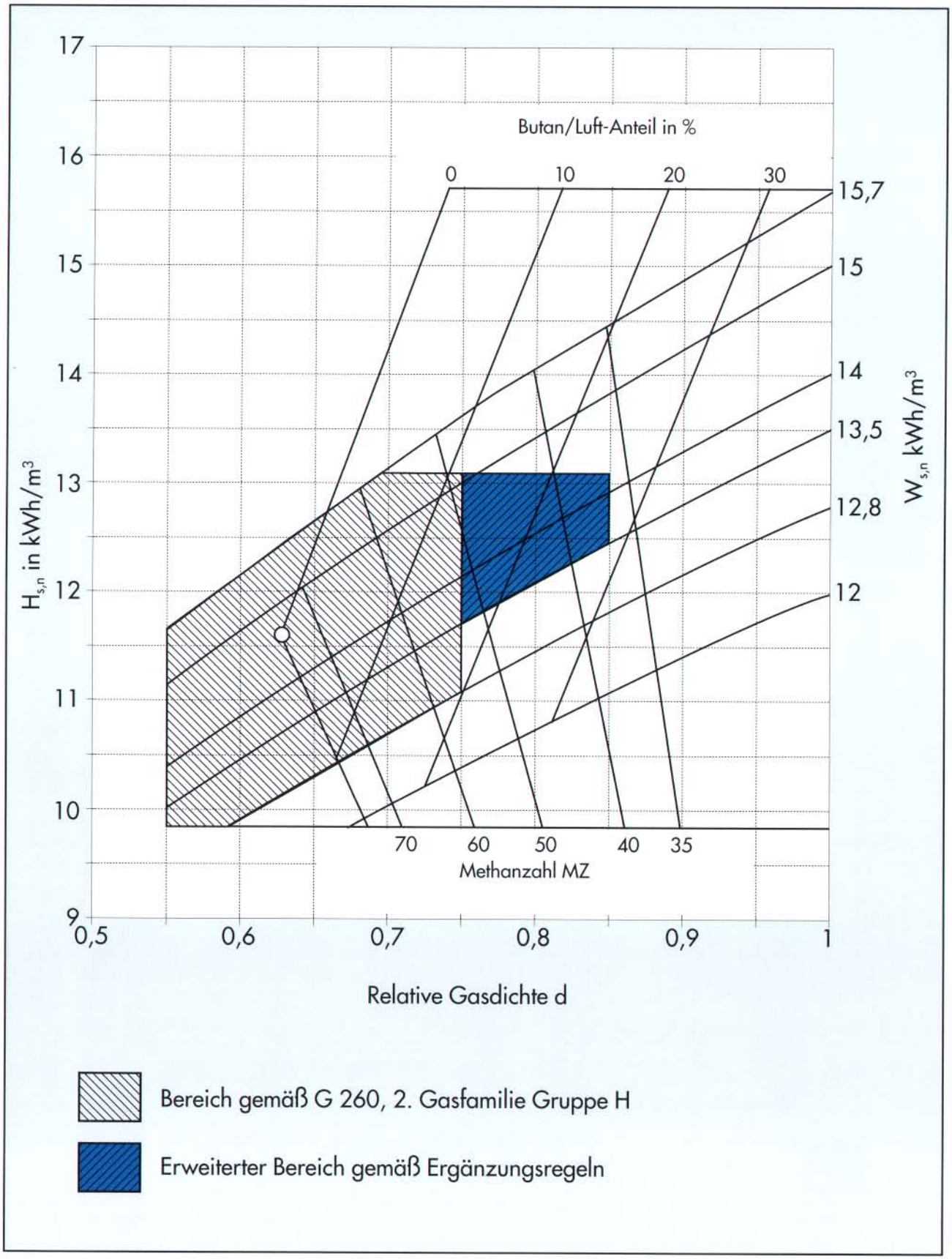
Butan/Luft-Zumischung zum Erdgas H (Nordsee)



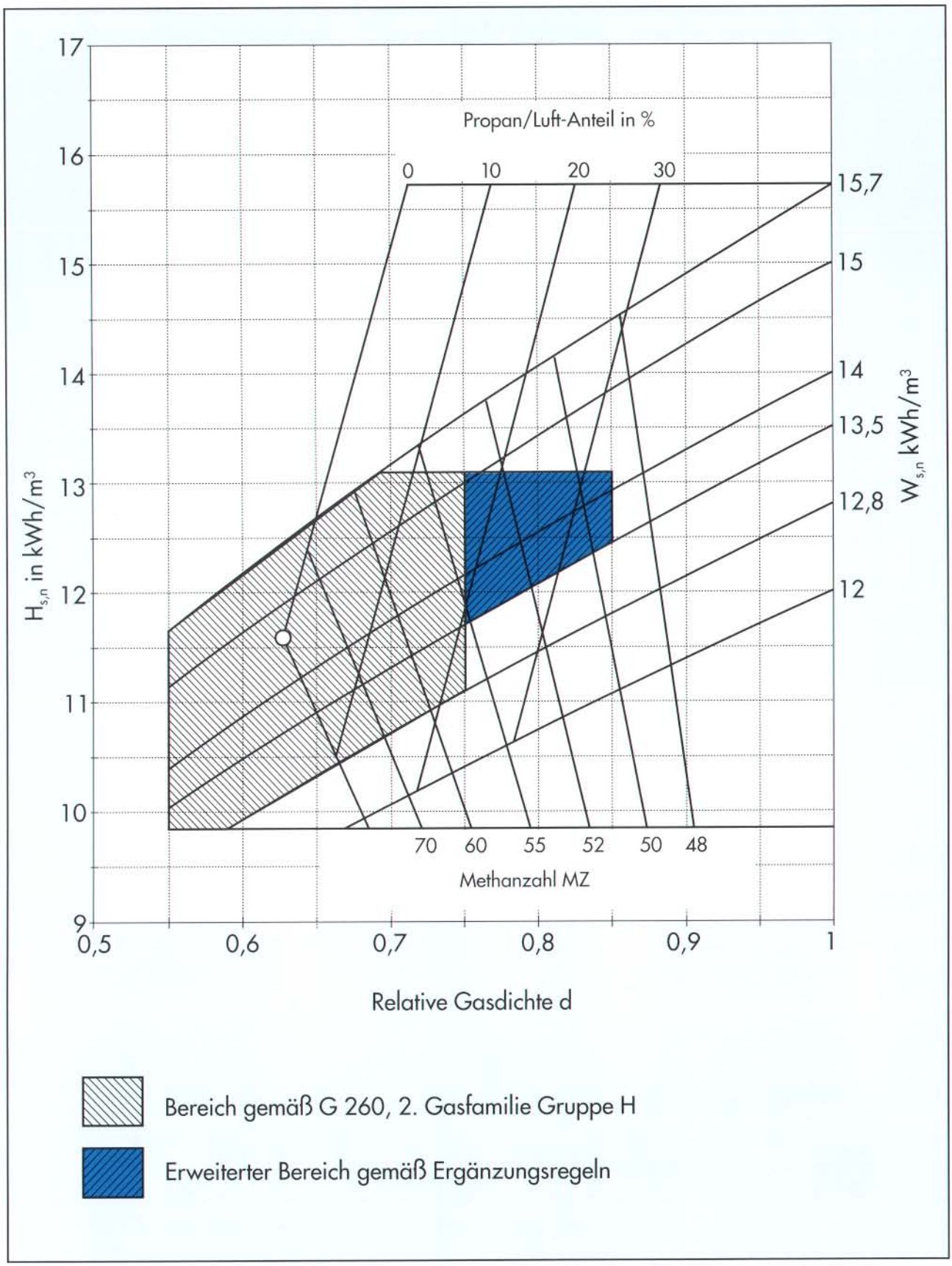
Propan/Luft-Zumischung zum Erdgas H (Nordsee)



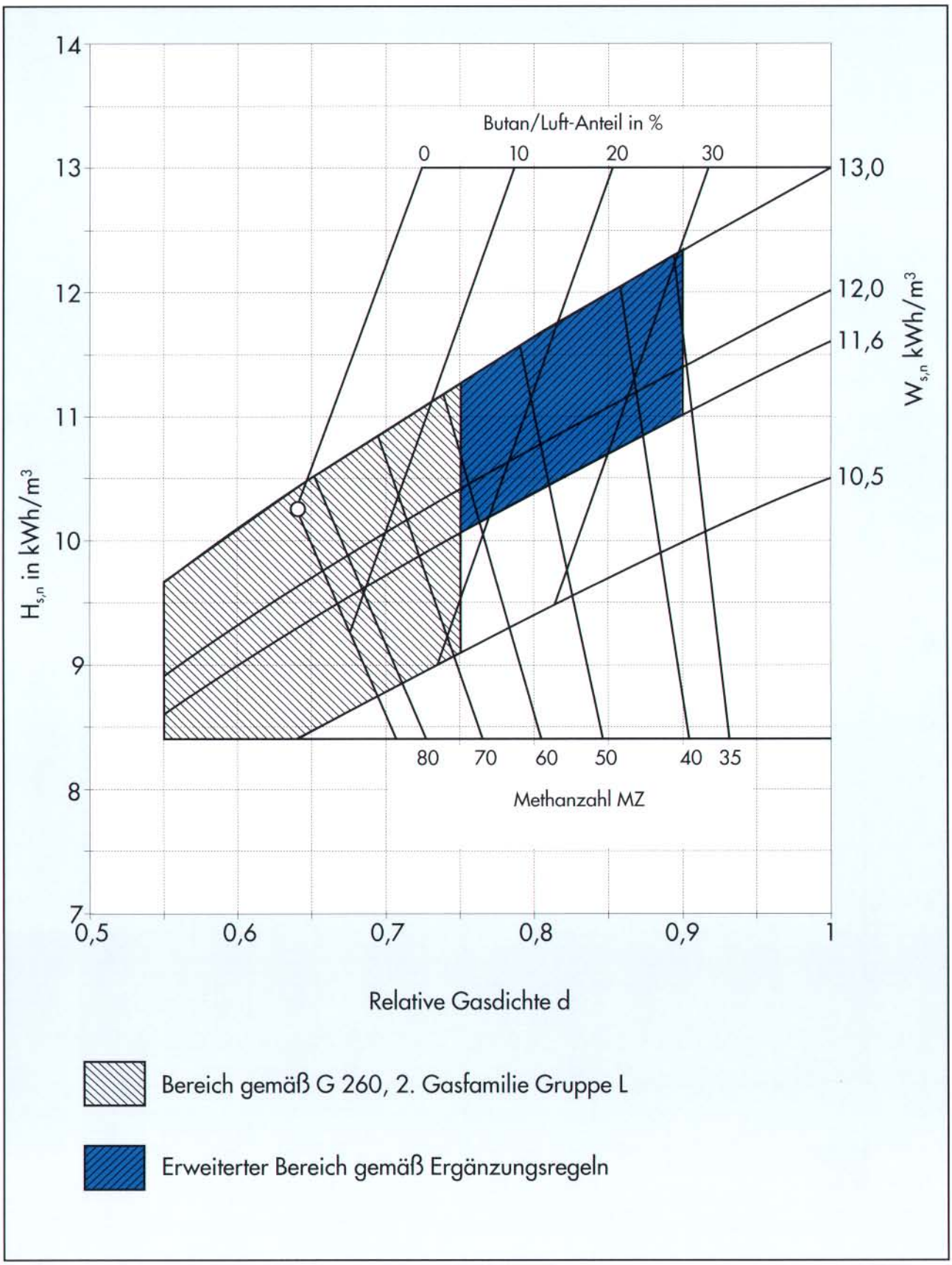
Butan/Luft-Zumischung zum Erdgas H (Verbundgas)



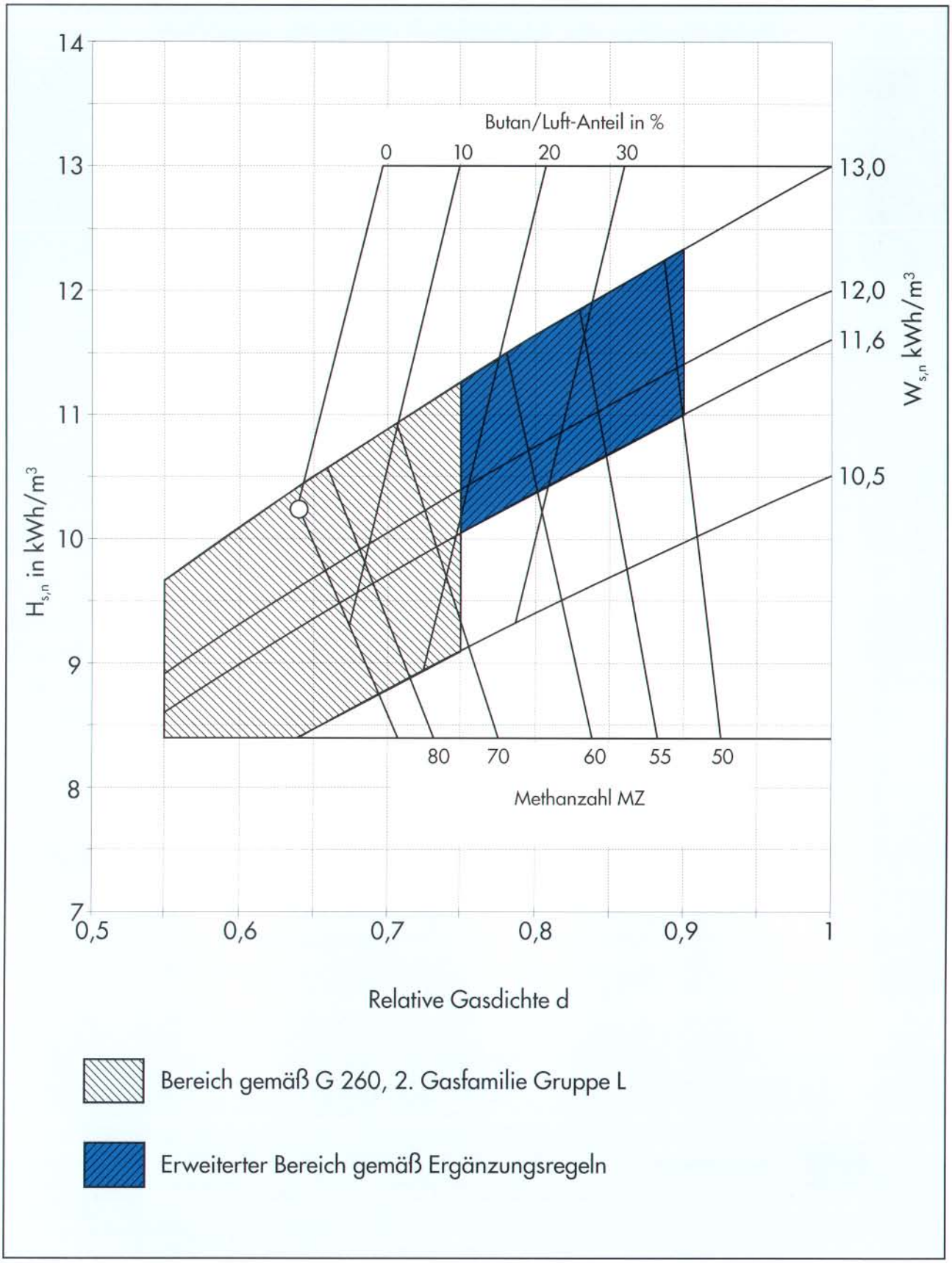
Propan/Luft-Zumischung zum Erdgas H (Verbundgas)



Butan/Luft-Zumischung zum Erdgas L (Niederlande)



Propan/Luft-Zumischung zum Erdgas L (Niederlande)



ARBEITSGEMEINSCHAFT FÜR SPARSAMEN UND UMWELTFREUNDLICHEN ENERGIEVERBRAUCH E.V.

Die 1977 gegründete ASUE Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V., ein Zusammenschluß von 40 Gasversorgungsunternehmen, fördert die Weiterentwicklung und weitere Verbreitung sparsamer und umweltschonender Technologien auf Erdgasbasis.

Solchen Techniken den Weg in die praktische Anwendung zu ebnen, ist das vorrangige Ziel der ASUE.

Aktivitäten

Fachtagungen
Veröffentlichungen
Preis der deutschen Gaswirtschaft

Arbeitskreise

Blockheizkraftwerke
Erdgas und Umwelt
Gasturbinentechnik
Gaswärmepumpen und Kältetechnik
Haustechnik
Energiedienstleistungen

Mitgliedsunternehmen:

Badische Gas- und Elektrizitätsversorgung AG, Lörrach
Bayerngas GmbH, München
BEB Erdgas und Erdöl GmbH, Hannover
egm Erdgas Mitteldeutschland GmbH, Kassel
EMB Erdgas Mark Brandenburg GmbH, Potsdam
Erdgas Schwaben GmbH, Augsburg
Erdgas Südbayern GmbH, München
Erdgas Südsachsen GmbH, Chemnitz
Erdgas-Verkaufs-Gesellschaft mbH, Münster
Erdgasversorgungsgesellschaft Thüringen-Sachsen mbH (EVG), Erfurt
Ferngas Nordbayern GmbH, Bamberg
Ferngas Salzgitter GmbH
GASAG Berliner Gaswerke AG
Gasanstalt Kaiserslautern AG
Gasversorgung Mittelbaden GmbH, Offenburg
Gas-Union GmbH, Frankfurt
Gasversorgung Main-Kinzig GmbH, Gelnhausen
Gasversorgung Osthessen GmbH, Fulda
Gasversorgung Sachsen-Anhalt GmbH, Halle
Gasversorgung Süddeutschland GmbH, Stuttgart
Gasversorgung Westerwald GmbH, Höhr-Grenzhausen
Gasversorgung Westfalica GmbH, Bad Oeynhausen
Gas-Versorgungsgesellschaft Filstal mbH, Göppingen
Gaswerksverband Rheingau AG, Wiesbaden
HEIN GAS Hamburger Gaswerke GmbH
Niederrheinische Gas- und Wasserwerke GmbH, Duisburg
Oberhessische Gasversorgung GmbH, Friedberg
RGW Rechtsrheinische Gas- und Wasserversorgung AG, Köln
Ruhrgas AG, Essen
Saar Ferngas AG, Saarbrücken
SpreeGas GmbH, Cottbus
Stadtwerke Essen AG
Stadtwerke Neuss Energie und Wasser GmbH
Stadtwerke Paderborn GmbH
Südhessische Gas und Wasser AG, Darmstadt
Thyssengas GmbH, Duisburg
VNG – Verbundnetz Gas AG, Leipzig
Westfälische Ferngas-AG, Dortmund
Wingas GmbH, Kassel

Das Papier dieser Broschüre ist nicht mit Chlor gebleicht.