gwi Gas- und Wärme-Institut Essen e.V.

Die L-/H-Marktraumumstellung, schwankende Erdgasbeschaffenheiten und die Auswirkungen auf Gasturbinen

Dr.-Ing. Jörg Leicher

Würzburg, 17.05.2017

Erdgasverbrauch nach Sektor

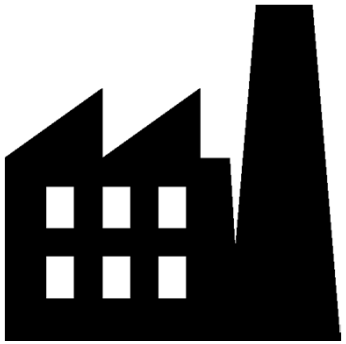
Haushalt & Gewerbe

43.33 %

41.02 %

28.45 %

Erdgas



Industrie

42.76 %

33.23 %

33.07 %

Kraftwerke

13.49 %

22.96 %

35.30 %

Transport

0.28 %

0.42 %

3.25 %

Data Sources: Eurogas 2015 (D, EU) and Lawrence Livermore National Laboratory, 2015 (USA)

Erdgasmarkt im Wandel

- Der europäische Gasmarkt ist in Bewegung:
  - Rückgang von L-Gas ("**Marktraumumstellung**")
  - Mehr Importe (Rußland, Naher Osten, LNG)
  - **Neue Gase**: Biomethan, LNG, evtl. H_2 aus power-to-gas in naher Zukunft
  - Liberalisierung des Marktes ("**unbundling**"), kürzere Lieferverträge
  - EU H-Gas-**Harmonisierung** (EN 16726:2016, Pilot Study 2.0)

- Viele dieser Entwicklungen sind für den Endverbraucher durchaus vorteilhaft:
  - Mehr Wettbewerb am Markt
  - Diversifikation der Quellen, erhöhte Versorgungssicherheit
  - Einbindung erneuerbarer Energien in die Gas-Infrastruktur

- Aber: es treten verstärkt **erhebliche Schwankungen lokaler Erdgas-beschaffenheiten** auf.

L-/H-Gas-Marktraumumstellung

L-/H-Marktraumumstellung

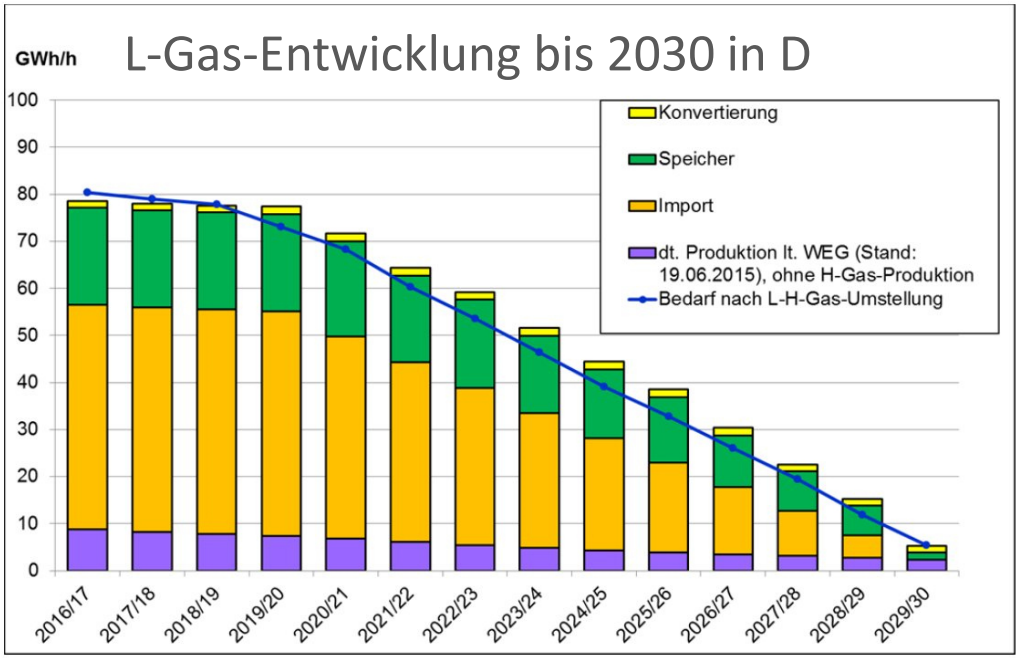
- In Deutschland sind derzeit zwei weitgehend **getrennte Erdgasnetze** in Betrieb, das **L-Gas-Netz** im **Nordwesten Deutschlands**, und das **H-Gas-Netz** in den übrigen Regionen. Alle an das Erdgasnetz angeschlossenen Geräte und Anlagen sind entweder auf L- oder auf H-Gas eingestellt.

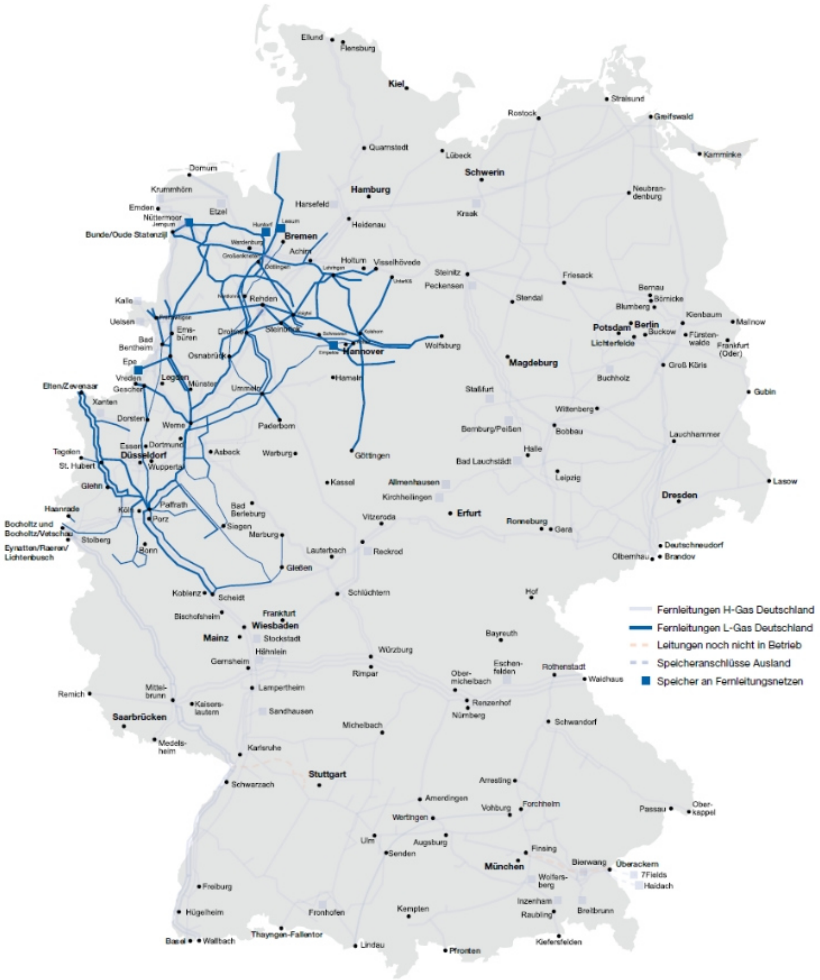
- Aufgrund des Rückgangs der **niederländischen Erdgasexporte** hat die deutsche Gaswirtschaft beschlossen, die L-Gas-Gebiete peu à peu **auf H-Gas-Betrieb umzustellen**. In Frankreich und Belgien gibt es analoge Maßnahmen.

- Das bedeutet, dass **alle installierten Gasverbrauchseinrichtungen** (ca. 5 - 6 Mio. Haushaltsgeräte und eine unbekannte Anzahl von großtechnischen Verbrauchern in Industrie und Stromerzeugung) überprüft und auf das neue Brenngas eingestellt werden müssen. Dies stellt eine erhebliche **logistische** und teilweise auch **technische Herausforderung** dar.

- Die Marktraumumstellung soll **bis 2030** abgeschlossen sein.

L-Gas in Deutschland



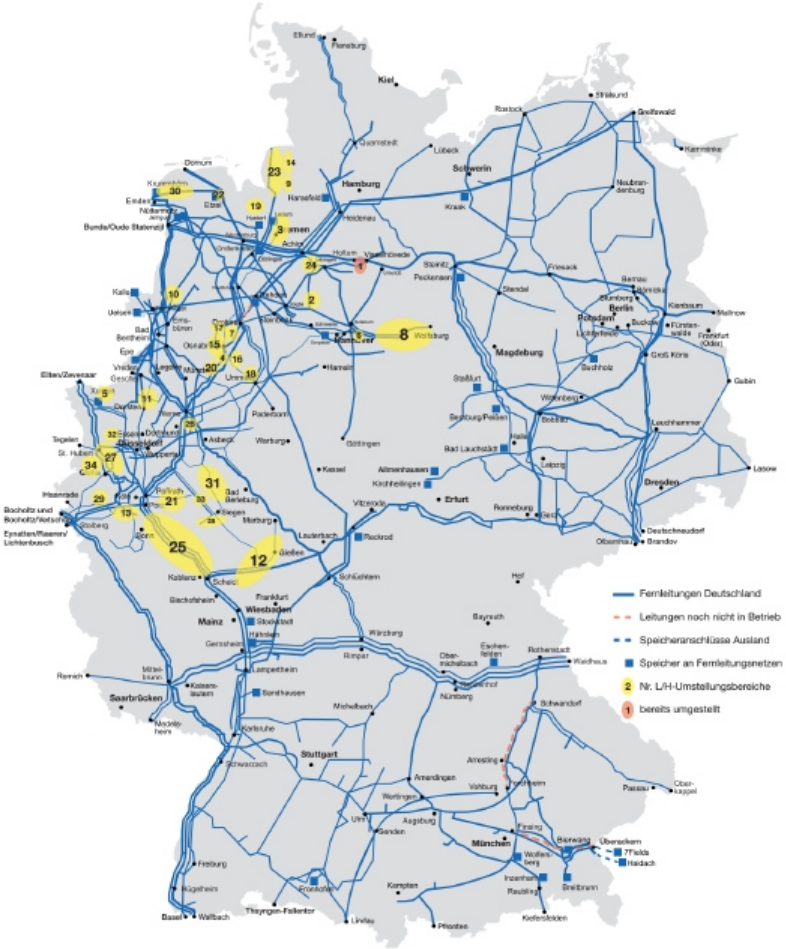


L-Gas-Gebiete in Deutschland (2016)

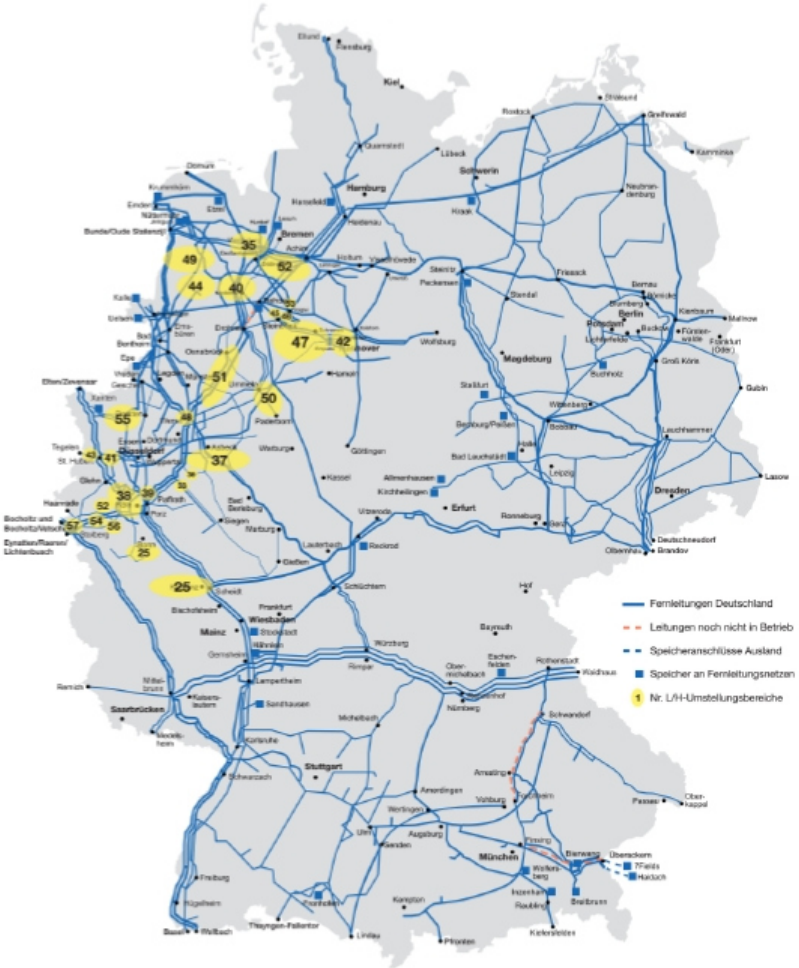
Quelle: FNB Netzentwicklungsplan, 2016

Marktraumumstellung

Betroffene Regionen bis 2022:



Betroffene Regionen 2022 bis 2027:



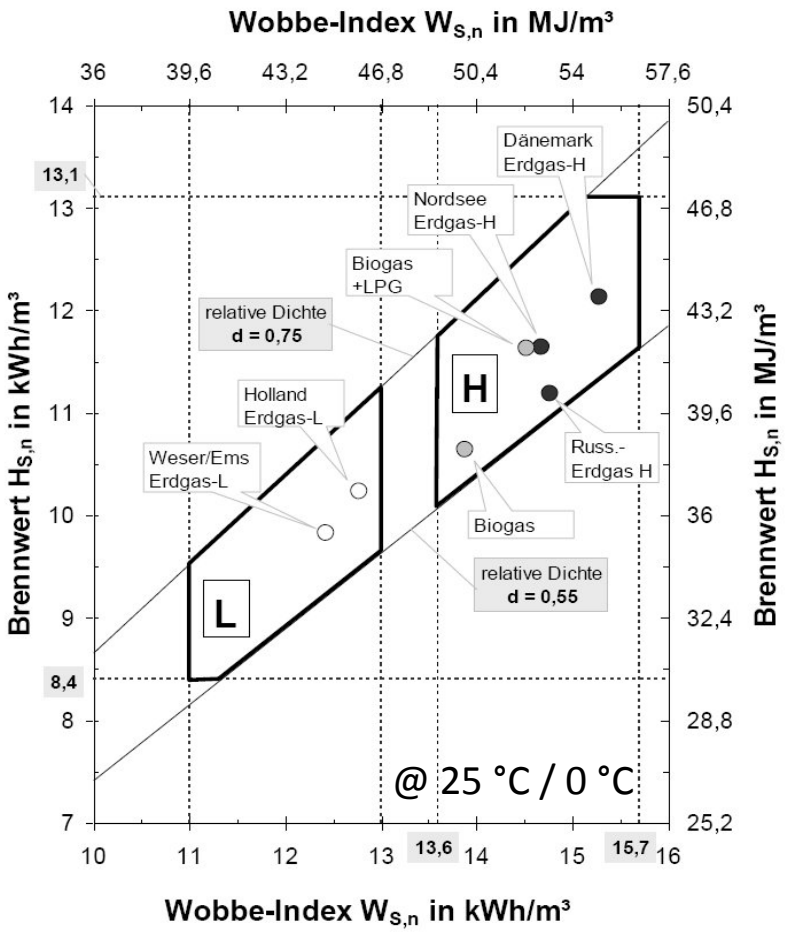
Quelle: FNB Netzentwicklungsplan, 2016

Gasbeschaffenheit: DVGW-Arbeitsblatt G 260

- In Deutschland werden Fragen der Gasbeschaffenheit durch das **DVGW-Arbeitsblatt G 260** geregelt.

- Die Charakterisierung der Erdgase erfolgt **nicht** anhand der chemischen Zusammensetzung, sondern mit Hilfe einiger weniger Stoffwerte: **relative Dichte d**, **Brennwert H_S** und **Wobbe-Index W_S**.

- Es wird zwischen verhältnismäßig niederkalorischem **L- Gas** und hoch-kalorischem **H-Gas** unterschieden.



$$d = \frac{\rho_{Gas,n}}{\rho_{Luft,n}};\ W_S = \frac{H_S}{\sqrt{d}}$$

Typische L- und H-Gase in Deutschland

Erdgas-Durchschnittswerte 2006							
Benennung Analysewerte		**Nordsee-Erdgas H**	**Misch-Erdgas H**	**Russ.-Erdgas H**	**Holland-Erdgas L**	**Verbund-Erdgas L**	**Weser/Ems-Erdgas L**
CO_2	Vol.-% Mol.%	1,91 1,92	1,96 1,97	0,09 0,09	1,71 1,72	1,74 1,75	2,55 2,56
N_2	Vol. % Mol.%	0,93 0,92	2,65 2,64	0,83 0,83	10,11 10,09	9,21 9,19	8,71 8,69
O_2	Vol.-% Mol.%	<0,01 <0,01	<0,01 <0,01	<0,01 <0,01	<0,01 <0,01	<0,01 <0,01	<0,01 <0,01
CH_4	Vol.-% Mol.%	86,25 86,22	87,50 87,43	97,63 97,61	83,08 83,04	85,46 85,43	88,08 88,08
C_2H_6	Vol.-% Mol.%	8,56 8,61	6,80 6,85	1,00 1,01	3,97 4,00	2,91 2,93	0,61 0,61
C_3H_8	Vol.-% Mol.%	1,89 1,91	0,90 0,92	0,32 0,33	0,81 0,82	0,47 0,48	0,04 0,04
C_4H_{10}	Vol.-% Mol.%	0,39 0,39	0,16 0,16	0,11 0,11	0,22 0,22	0,15 0,15	0,01 0,02
C_5H_{12}	Vol.-% Mol.%	0,05 0,05	0,02 0,02	0,01 0,01	0,06 0,06	0,03 0,03	<0,01 <0,01
C_{6+}	Vol.-% Mol.%	0,02 0,02	0,01 0,01	0,01 0,01	0,04 0,05	0,03 0,04	<0,01 <0,01
Brennwert $H_{s,n}$	kWh/m^3_N	11,905	11,332	11,135	10,322	10,241	9,880
Heizwert $H_{i,n}$	kWh/m^3_N	10,766	10,237	10,040	9,320	9,241	8,906
Wärmeverhältnis H_i/H_n	-	0,9043	0,9034	0,9017	0,9029	0,9024	0,9014
Normdichte ρ	kg/m^3_N	0,83363	0,8150	0,7362	0,8357	0,8178	0,8006
Dichteverhältnis (Luft=1)	-	0,6448	0,630	0,569	0,646	0,632	0,619
Wobbe-Index $W_{s,n}$	kWh/m^3_N	14,826	14,277	14,762	12,842	12,882	12,588
Wobbe-Index $W_{i,n}$	kWh/m^3_N	13,329	12,897	13,310	11,596	11,624	11,320
Methanzahl (+/– 2) MZ	-	75	82	91	86	90	102
min Luftbedarf L_{min}	m^3_N/m^3_N	10,33	9,77	9,6	8,9	8,83	8,52

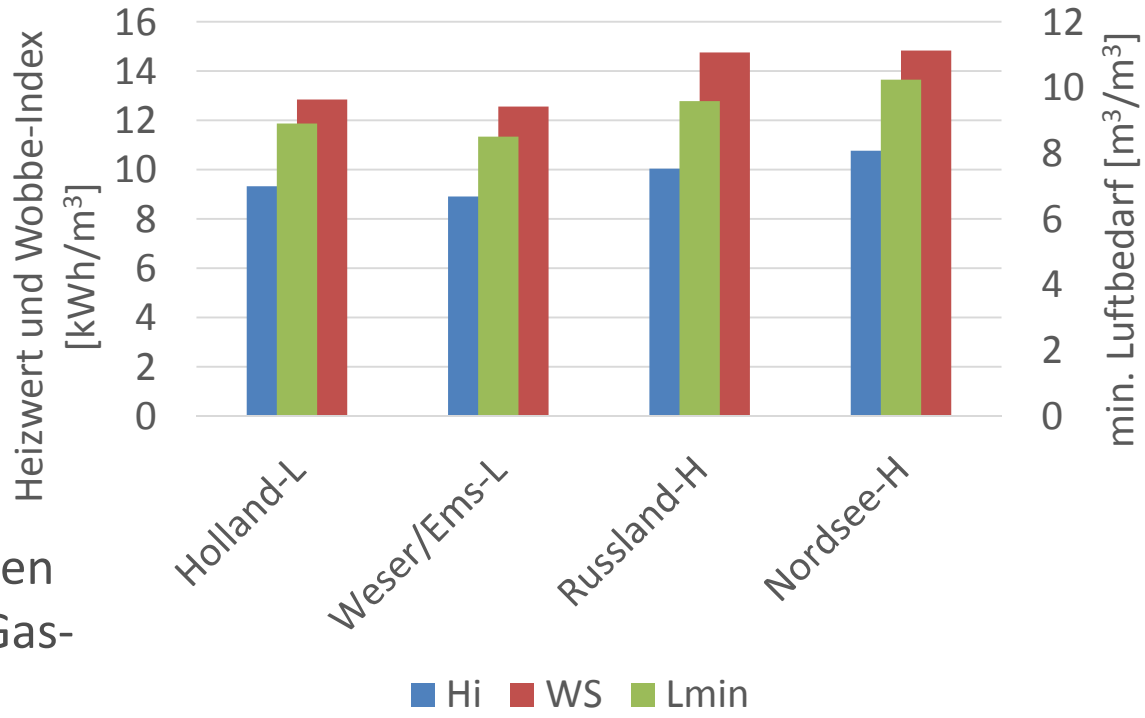
Quelle: gwi-Arbeitsblätter, Vulkan-Verlag, 2012

Wechsel von L- zu H-Gas

- Die **verbrennungstechnischen Eigenschaften** von L- und H-Gasen können sich durch den **höheren Stickstoffanteil** im Gas deutlich unterscheiden. Die Massenströme für Brenngas und Oxidator müssen entsprechend **angepasst** werden, um wesentliche Prozessparameter (z. B. Leistung, Luftzahl, TIT) konstant zu halten.

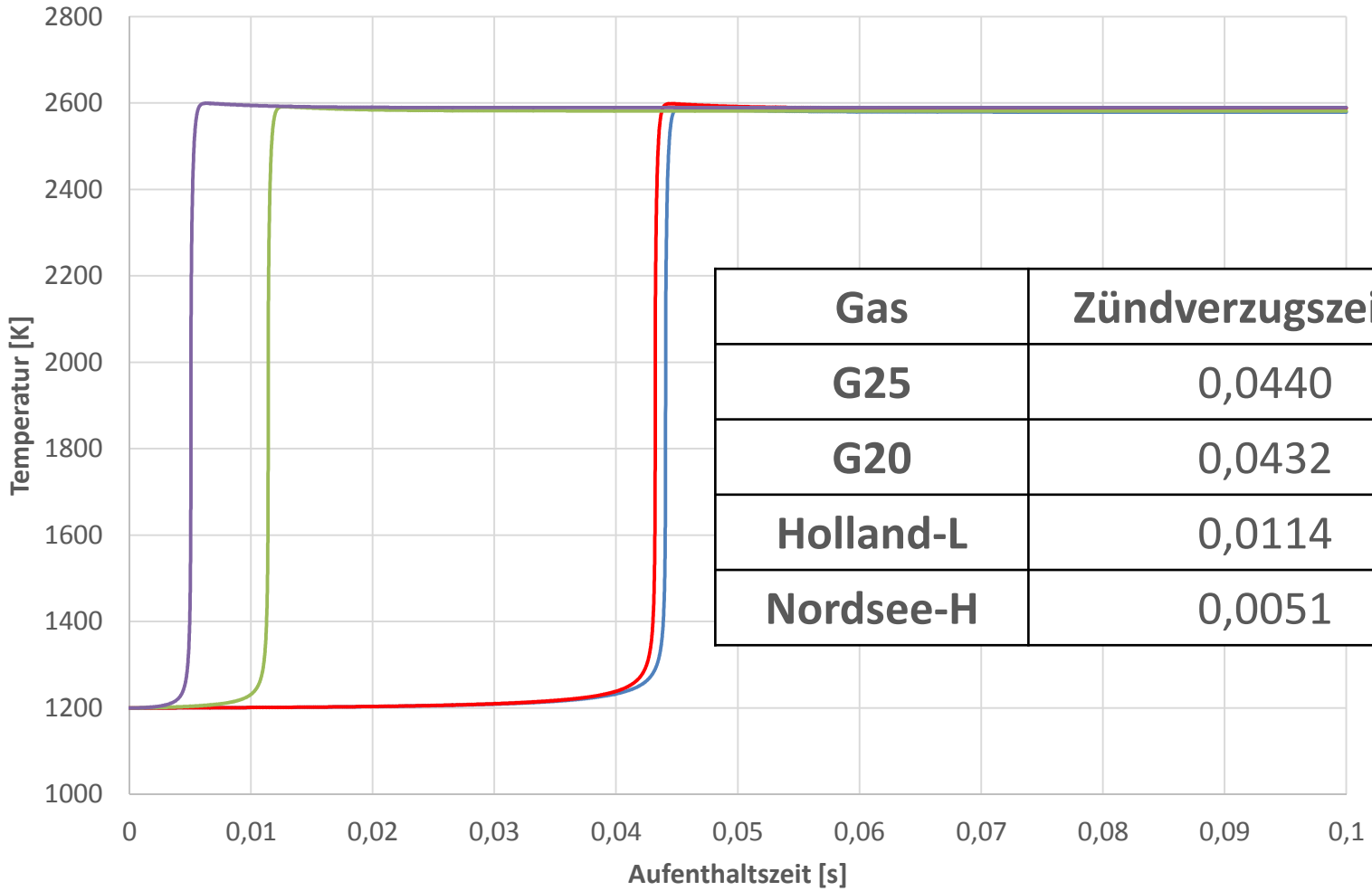
- Aus Gasturbinensicht vielleicht noch kritischer ist der Anteil **höherer Kohlenwasserstoffe** im Brenngas, da er Auswirkungen auf **Flammgeschwindigkeiten** und **Zündverhalten** hat.

- Lokale Gaszusammensetzungen **schwanken** außerdem im H-Gasgebiet meist stärker.



@ 25 °C / 0 °C

Zündverzugszeiten (λ = 1,1, p = 1,01325 bar, T_{in} = 1200 K)



Gas	Zündverzugszeit [s]
G25	0,0440
G20	0,0432
Holland-L	0,0114
Nordsee-H	0,0051

calculated with GRI 3.0,
all C_{3+} added to C_3H_8

Quelle: GWI

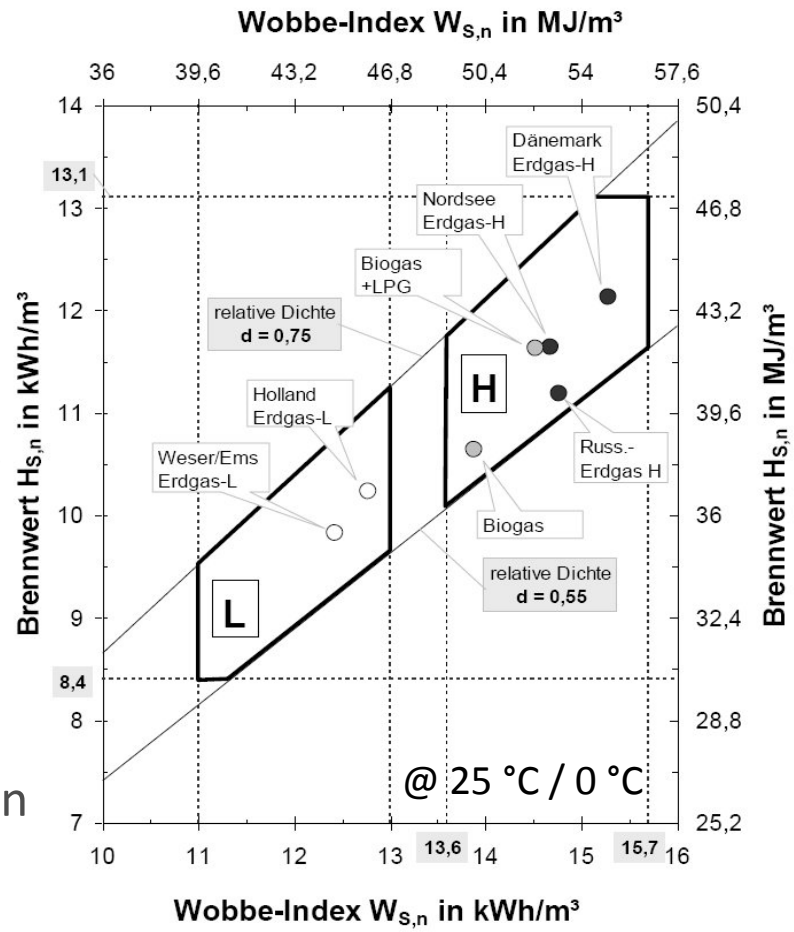
Erdgasbeschaffenheiten

Gasbeschaffenheit: DVGW-Arbeitsblatt G 260

- In Deutschland werden Fragen der Gas-beschaffenheit durch das **DVGW-Arbeitsblatt G 260** geregelt.

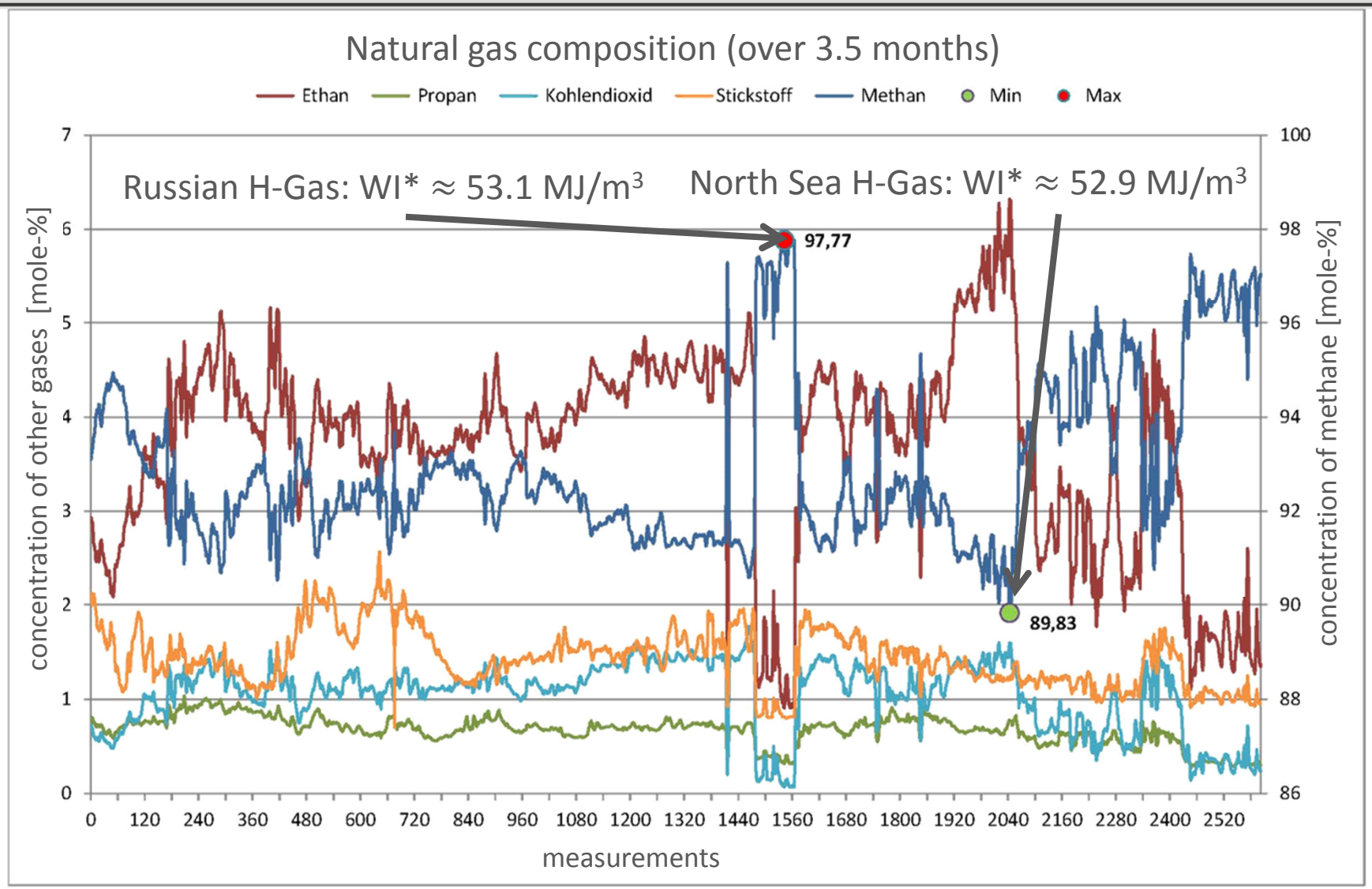
- **Theoretisch** lässt das Regelwerk (im H-Gas-Bereich) Schwankungen von etwa **36 %** in der relativen Dichte, **30 %** im Brennwert und **15 %** im Wobbe-Index zu…. aber **in der Realität** ist das (bisher) nie geschehen.

- Es gibt keinerlei Vorgaben, **wie schnell** eine lokale Gasbeschaffenheitsänderung stattfinden darf.



$$d = \frac{\rho_{Gas,n}}{\rho_{Luft,n}};\ W_S = \frac{H_S}{\sqrt{d}}$$

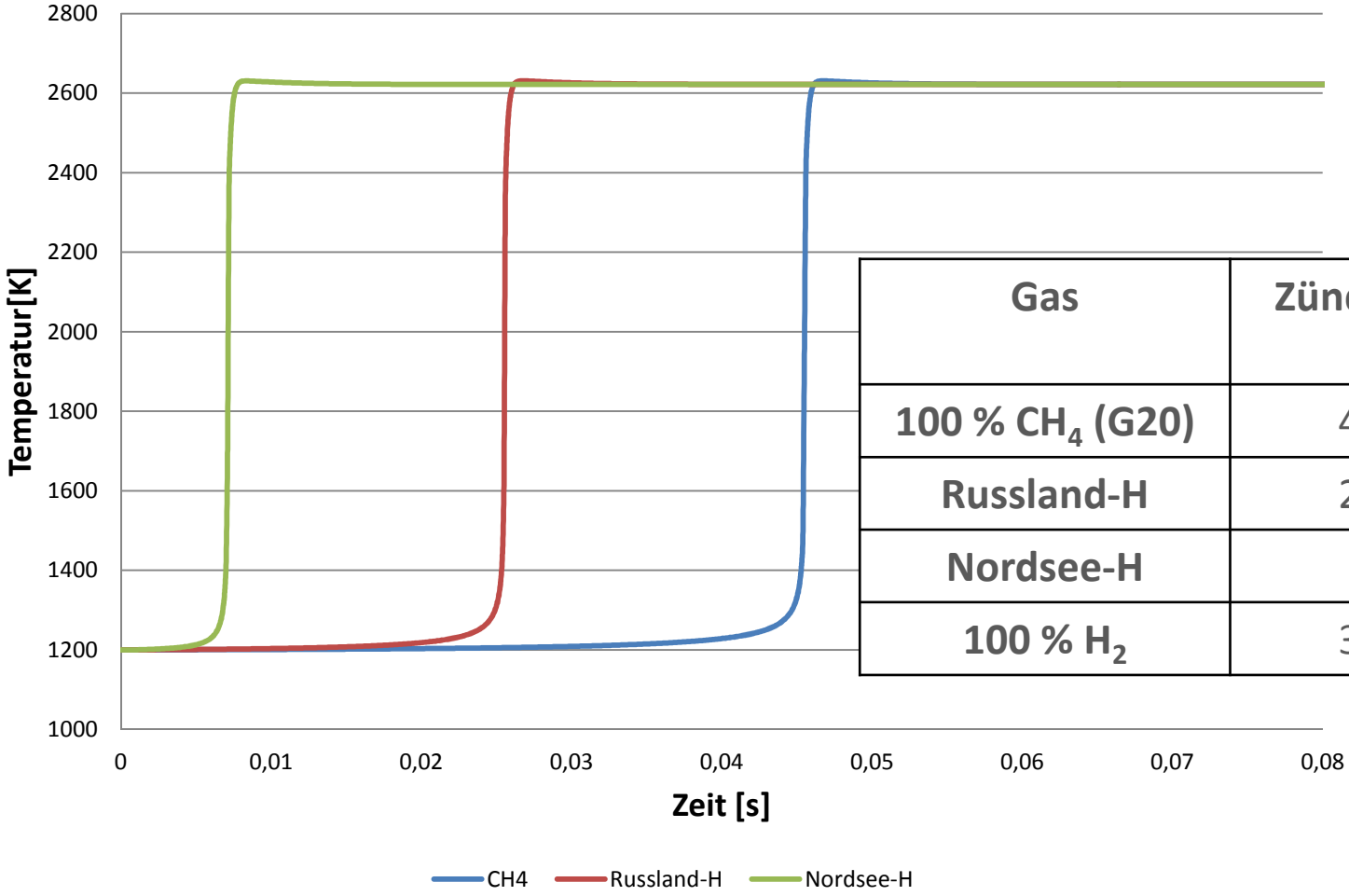
Gasbeschaffenheitsschwankungen im Großraum Leipzig 2011



* @ 25 °C / 0 °C

Quelle: Leicher, J. et al.: Impact of Changing Natural Gas Qualities on Industrial Combustion Processes, IGRC, Kopenhagen, Dänemark, 2014

Zündverzugszeiten (T_{in} = 1200 K; p = 1,01325 bar; λ = 1,0)

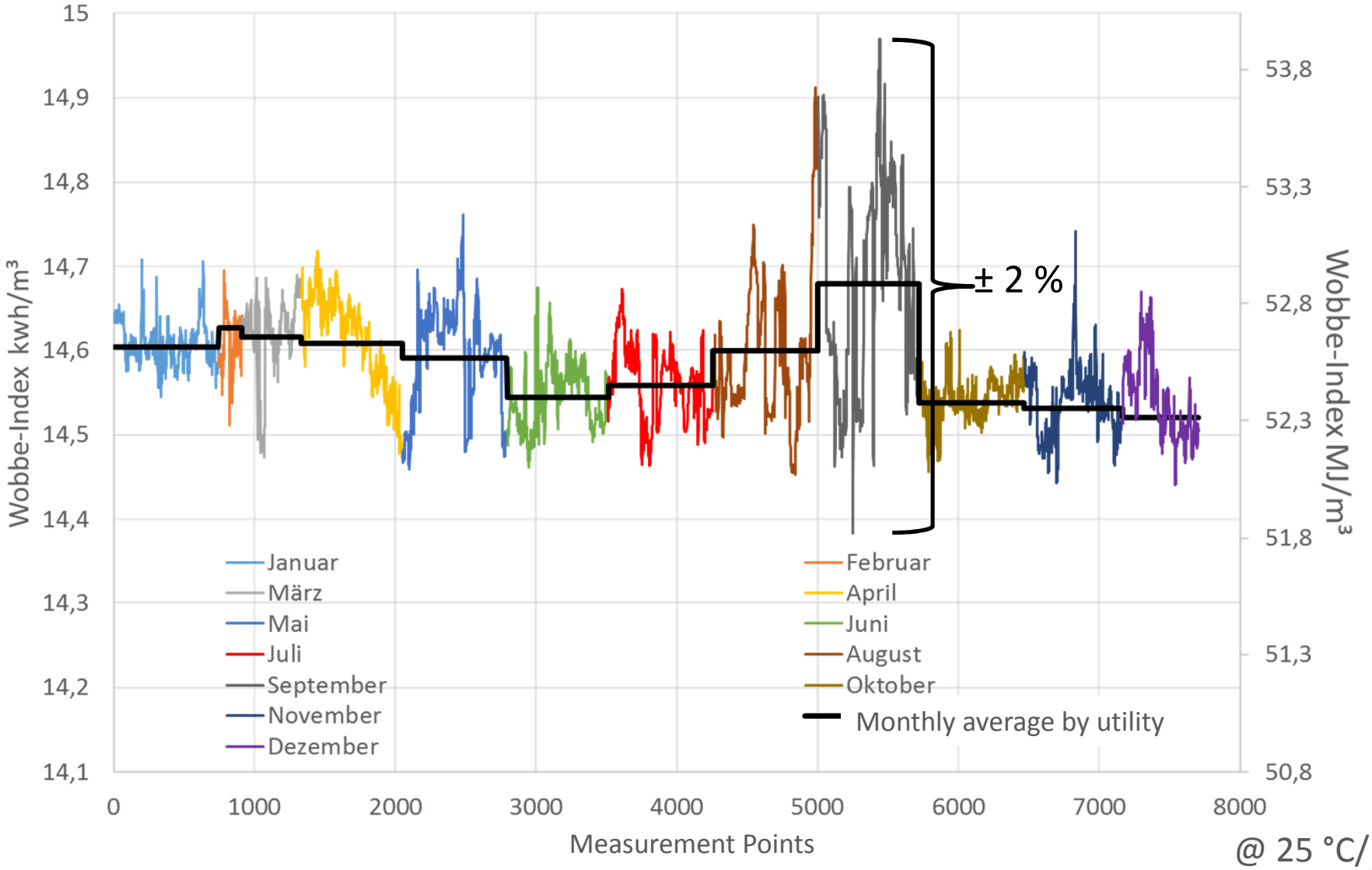


Gas	Zündverzugszeit [s]
100 % CH_4 (G20)	$4{,}54*10^{-2}$
Russland-H	$2{,}55*10^{-2}$
Nordsee-H	$7{,}0*10^{-3}$
100 % H_2	$3{,}28*10^{-5}$

calculated with GRI 3.0,
all C_{3+} added to C_3H_8

Quelle: GWI

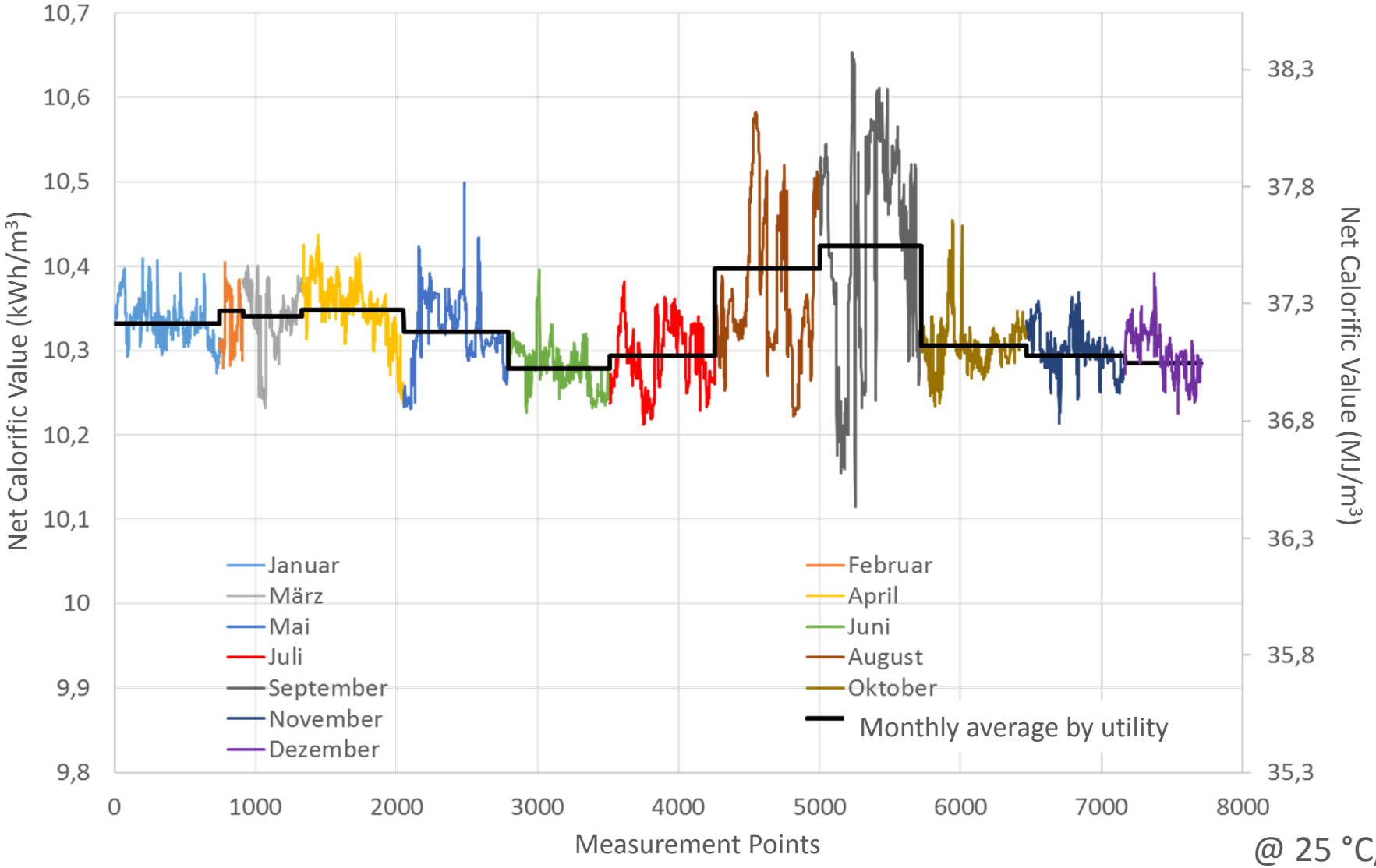
Lokale Wobbe-Index-Fluktuationen am GWI in 2016



Quelle: Leicher, J.: Gas Quality: Impact on Industrial Combustion Processes, GWI/IFRF TOTeM 44, Essen, 2017

@ 25 °C/ 0°C

Lokale Heizwertfluktuationen am GWI in 2016

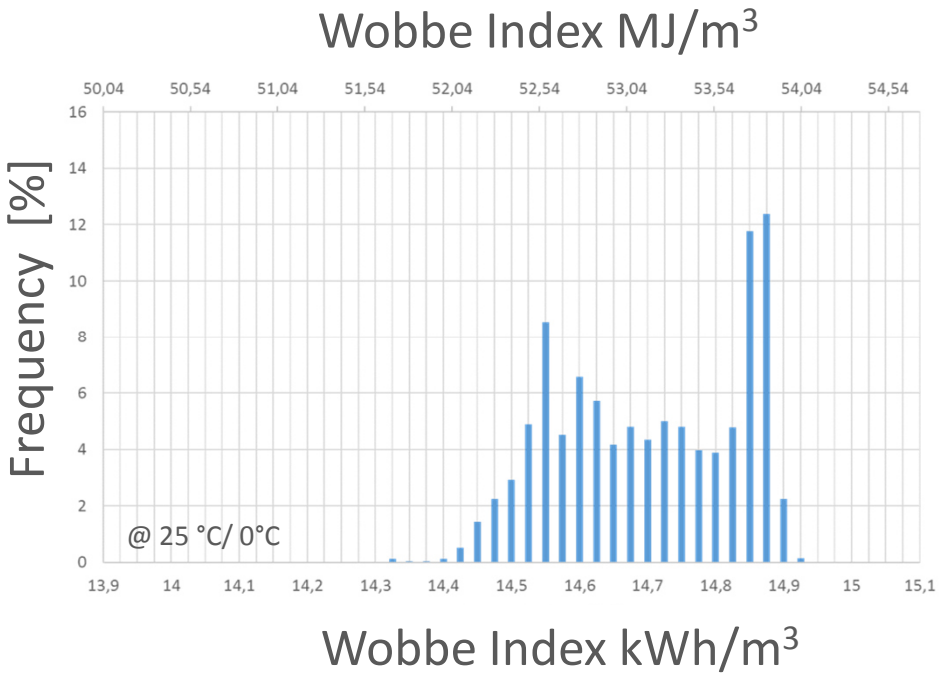


Quelle: Leicher, J.: Gas Quality: Impact on Industrial Combustion Processes, GWI/IFRF TOTeM 44, Essen, 2017

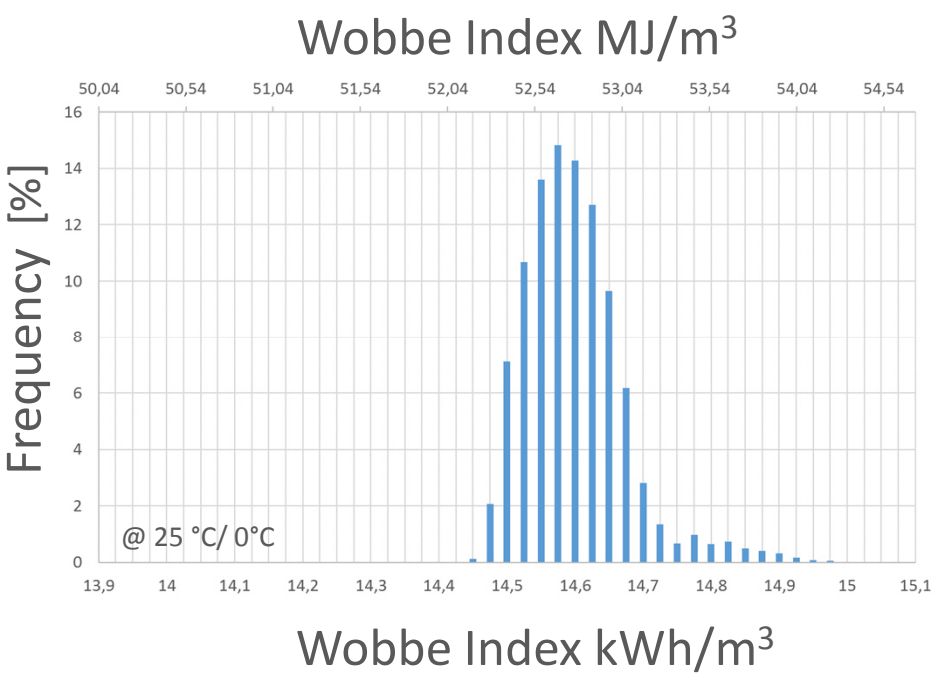
@ 25 °C/ 0°C

Wobbe-Index: Häufigkeitsverteilungen an 2 Standorten in D

Eastern Germany (Postal Code 0****)
(January – August 2016)



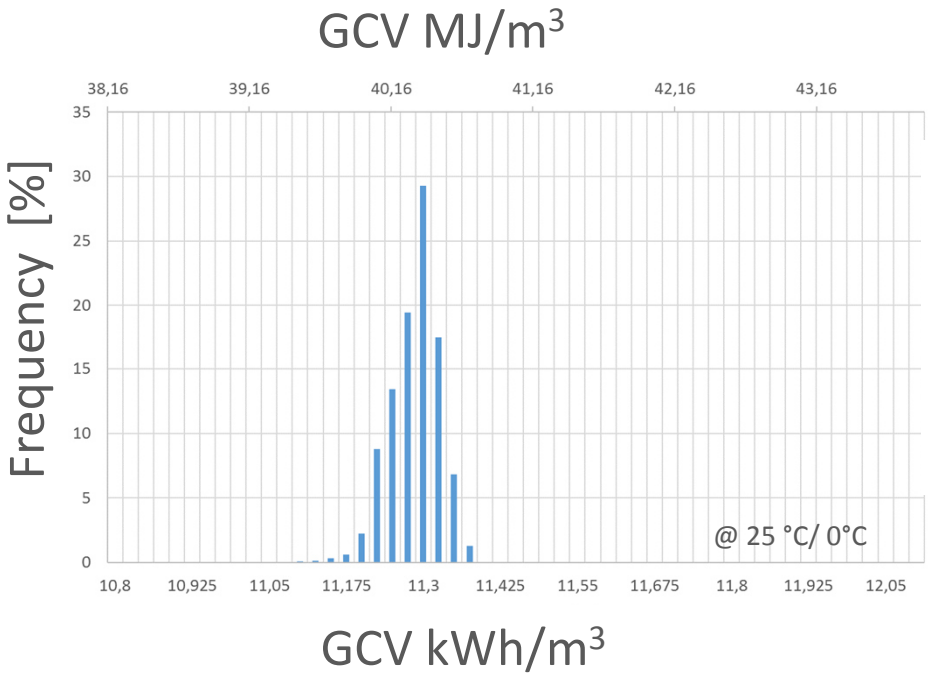
GWI, Essen
(January – December 2016)



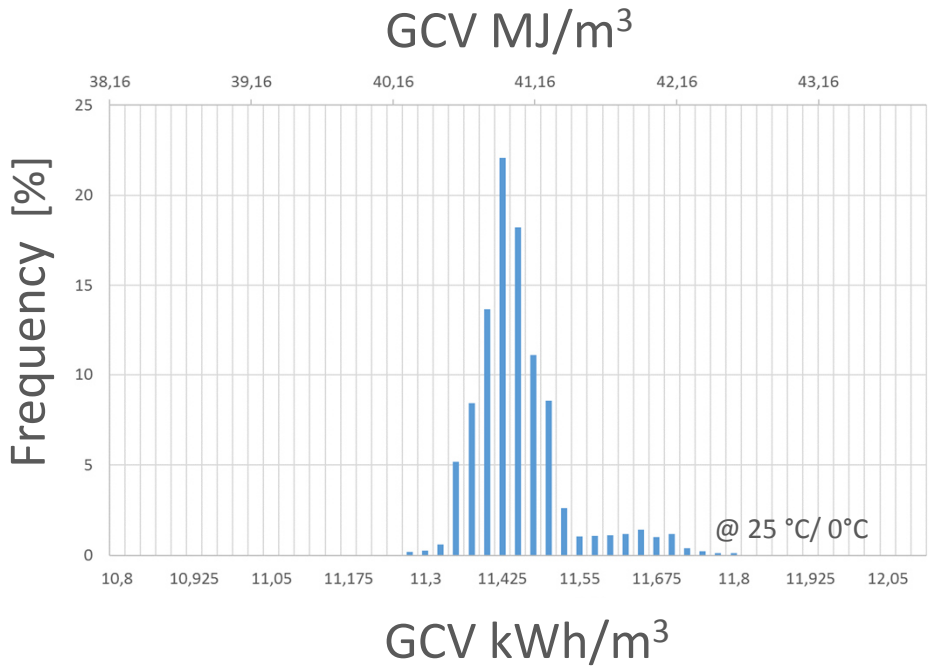
Quelle: Leicher, J.: Gas Quality: Impact on Industrial Combustion Processes, GWI/IFRF TOTeM 44, Essen, 2017

Brennwert-Häufigkeitsverteilungen an 2 Standorten in D

Eastern Germany (Postal Code 0****)
(January – August 2016)

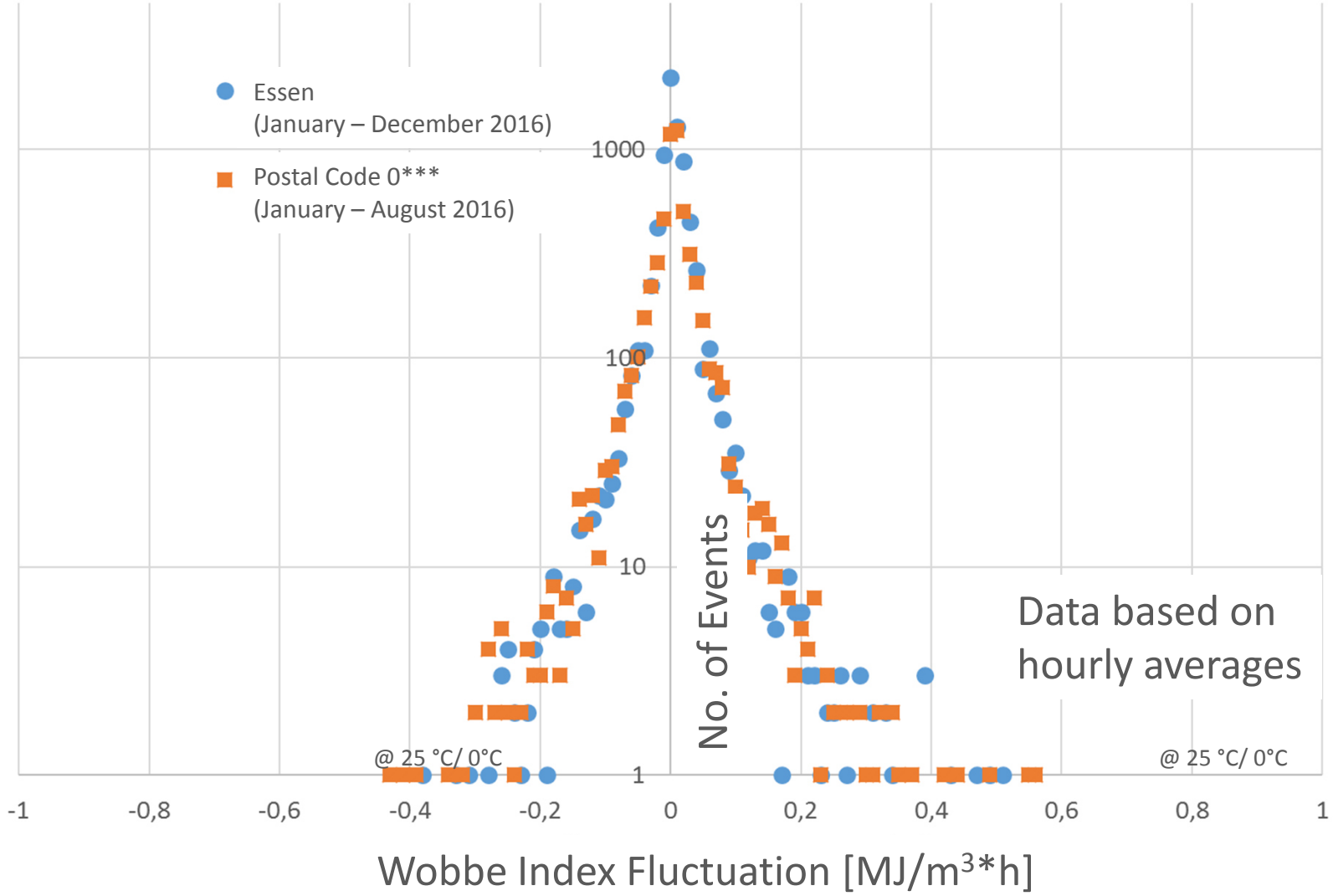


GWI, Essen
(January – December 2016)



Quelle: Leicher, J.: Gas Quality: Impact on Industrial Combustion Processes, GWI/IFRF TOTeM 44, Essen, 2017

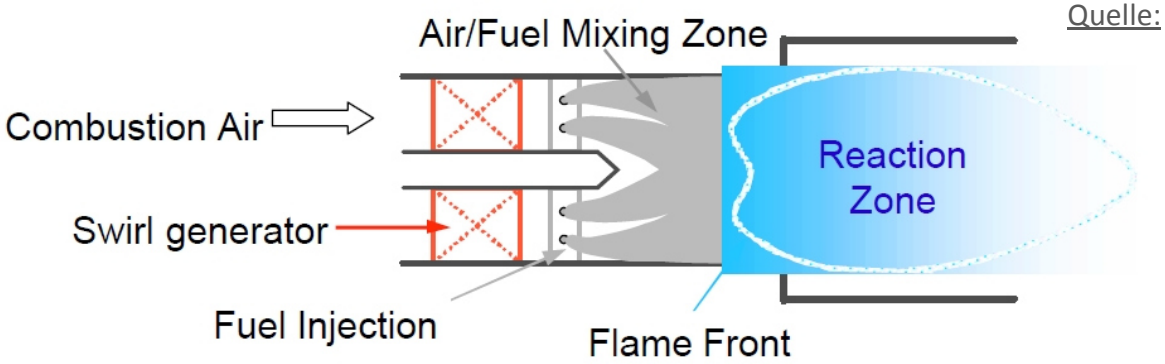
Häufigkeitsverteilungen der W_S-Änderungsraten



Quelle: Leicher, J.: Gas Quality: Impact on Industrial Combustion Processes, GWI/IFRF TOTeM 44, Essen, 2017

Gasturbinen

Magere Vormischverbrennung in Gasturbinen

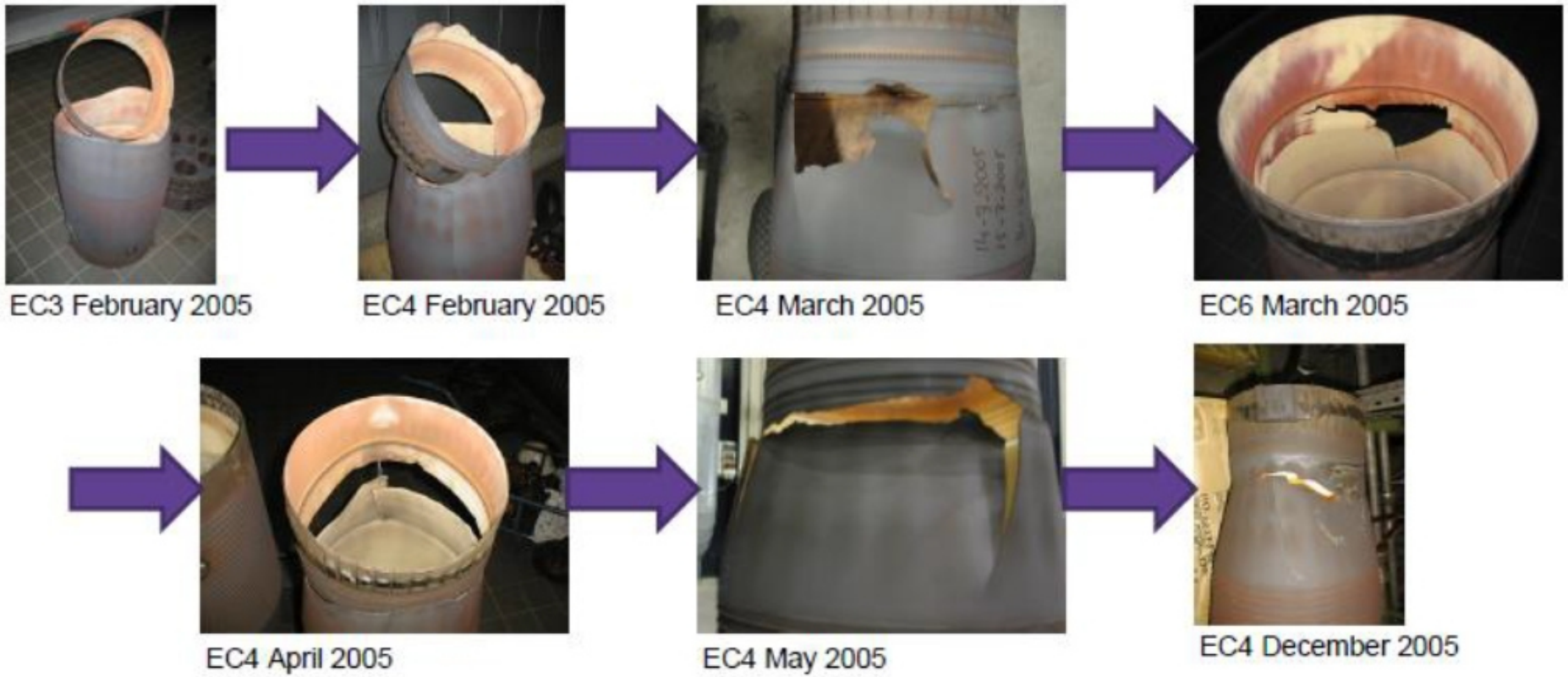


Quelle: Abbott, D., "The Impact of Fuel Gas Composition on Gas Turbine Operation", British-French Flame Days, Lille, Frankreich, 2009.

- Bei der mageren Vormischverbrennung werden Brenngas und Oxidator intensiv gemischt, **bevor** sie in den eigentlichen Brennraum eintreten.
- Vorteile: extrem hohe Energiedichte, geringes Bauvolumen, niedrige Flammentemperaturen (=> hohes λ!), dadurch geringe NO_X-Bildung
- Nachteile: recht **instabile** Verbrennungsform, **reagiert empfindlich** u. a. auch auf **Schwankungen** in der Brenngaszusammensetzung
- Gefahr von Flammenrückschlag, „Brummen", Vibrationen, „flame out", erhöhten Emissionen, Effizienzverlust, …
- GT-Hersteller geben oft sehr enge Grenzen für Gasbeschaffenheitsschwankungen vor (W_S ± 2 - 5 %). Möglicher Schwankungsbereich lt. G 260: ca. 15 % (H-Gas)!

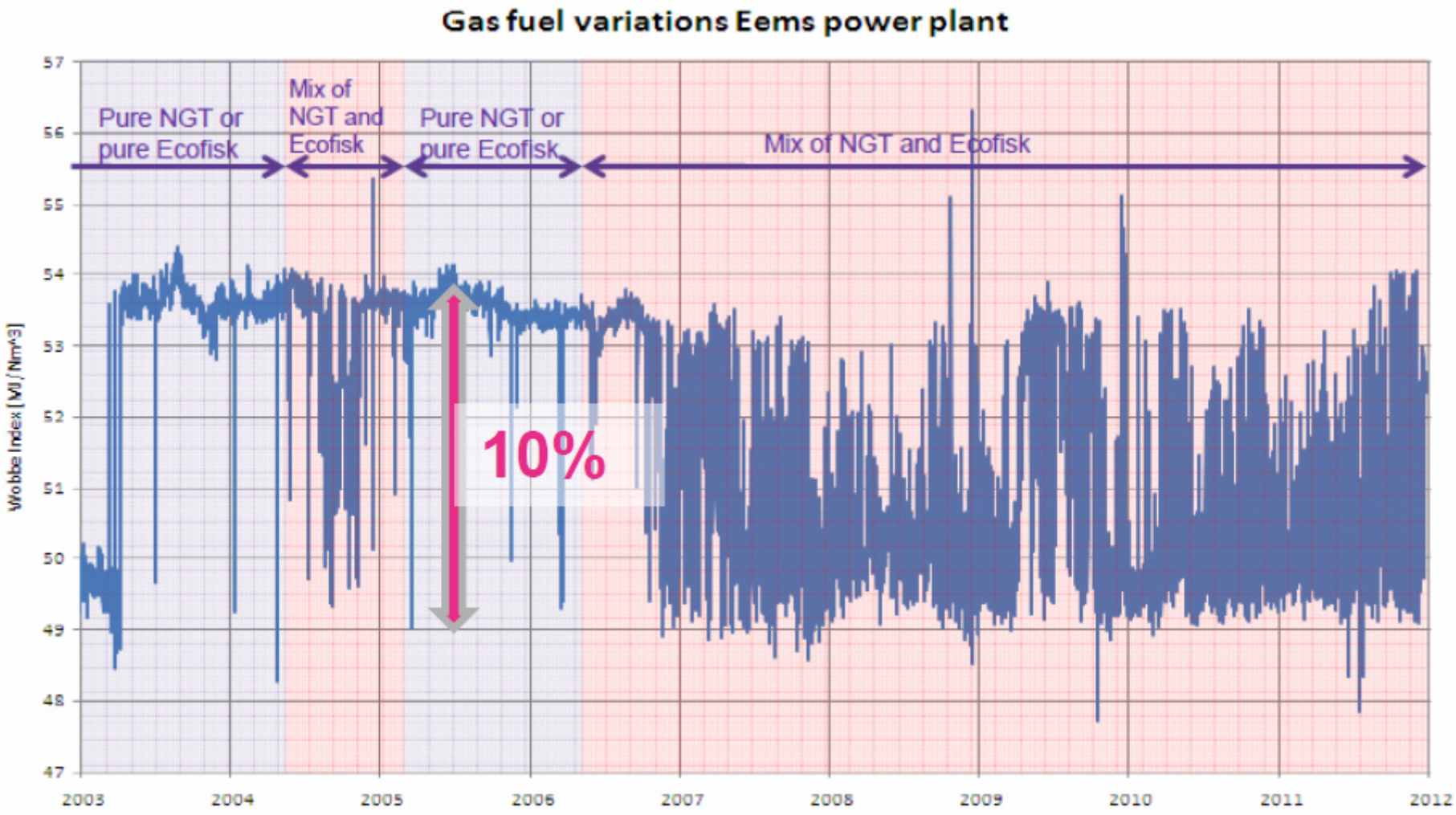
Beispiel: Electrabel Eemshaven, NL

- Ermüdungsbrüche im Brennkammer-Liner aufgrund erhöhter thermo-akustischer Vibrationen durch variable Gasbeschaffenheiten (W_S: 49 – 54 MJ/m^3).
  Kosten jeweils ca. **200.000 €**.



Quelle: Ourliac, M., Deal with gas quality variations and melt glass with syngas from gasification, GWI/IFRF TOTeM 44, Essen, 2017

Gasbeschaffenheitsschwankungen in Eemshaven, NL



Quelle: Ourliac, M., Deal with gas quality variations and melt glass with syngas from gasification, GWI/IFRF TOTeM 44, Essen, 2017

Lösungsansätze in Eemshaven

- Einige Auswirkungen der fluktuierenden Erdgaszusammensetzungen können im Prinzip durch eine variable Erdgasvorwärmung kompensiert werden, um den modifizierten Wobbe-Index $W_{i,m} = \frac{H_i}{\sqrt{d \cdot T_{gas}}}$ möglichst konstant zu halten.

- Problem: der installierte Gasvorwärmer war nicht in der Lage, bei schnellen Änderungen der Zusammensetzung das Erdgas hinreichend schnell aufzuheizen.

- Weitere Maßnahmen:
  - Entwicklung von eigenen Algorithmen, um thermoakustische Schwankungen zu detektieren (Druckfluktuationen) und durch Anlagenjustage auszugleichen.
  - Austausch der Brenner

Einige Feinheiten

- Wobbe-Index ist **nicht** gleich Wobbe-Index: in der Gaswirtschaft ist der **obere Wobbe-Index W_S** üblich, bei Gasturbinen meist der **untere Wobbe-Index W_i**, der mit dem Heizwert gebildet wird. **Bezugstemperaturen** können auch durchaus unterschiedlich sein (**D**: 25 °C / 0°C, **F**: 0 °C / 0 °C, **ISO**: 15 °C / 15 °C).

- Bei Gasturbinen werden häufig außerdem der so genannte **modifizierte Wobbe-Index**

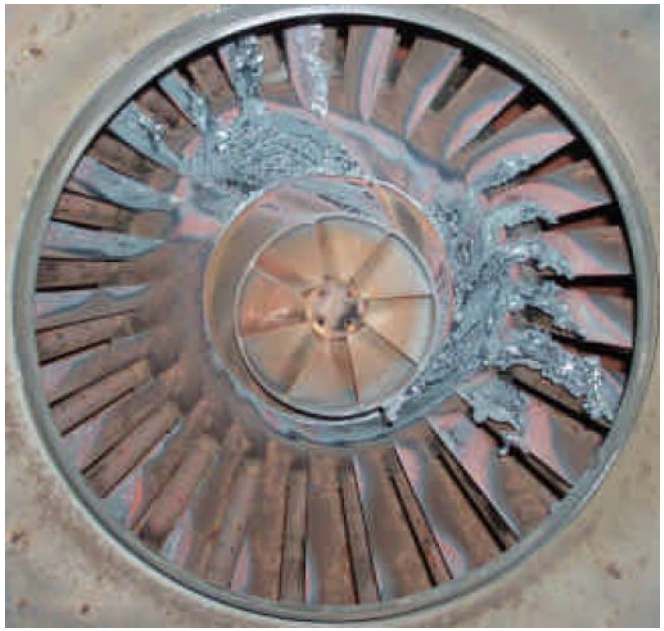
$$W_{i,m} = \frac{NCV}{\sqrt{d \cdot T_{gas}}}$$

oder der **temperaturkorrigierte Wobbe-Index** verwendet:

$$W_{i,T} = W_i \cdot \sqrt{{}^{288K}/_{T_{gas}}}$$ (W_i bei 15 °C/ 15 °C, T_{gas} in [K].

- Hintergrund ist meist, dass durch Brenngasvorheizung vermieden werden soll, dass höhere Kohlenwasserstoffe im Brenngassystem **auskondensieren** und Schäden verursachen.

Fallbeispiele aus UK: Bauteilversagen in Turbinen



„flash back“-Schaden durch höhere C_xH_y

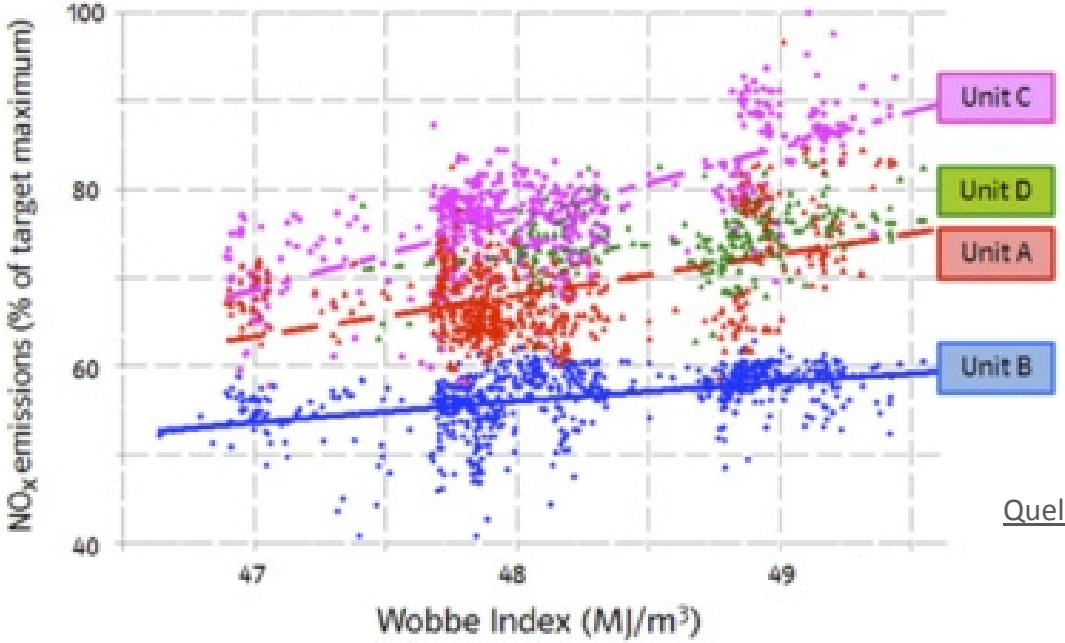
Schaden aufgrund von thermo-akustischen Schwingungen durch höhere C_xH_y

- In beiden Fällen waren die Erdgase **außerhalb der Herstellerspezifikationen**, aber noch **innerhalb des in UK gültigen Gasbeschaffenheitsregelwerks**.
- Meistens wirken sich Gasqualitätsschwankungen eher auf Emissionen und Effizienz aus. Bauteilversagen ist die Ausnahme.

Quelle: Abbott, D., “The impact of variations in gas composition on gas turbine operation and performance”, *Energy Delta Institute Quarterly*, vol. 4, no. 1, 2012

Fallbeispiel aus UK: Einfluss auf Schadstoffemissionen

- 4 baugleiche Gasturbinen, aber an unterschiedlichen Standorten in UK aufgestellt.
- Nur die Grundlast ist dargestellt.
- Große Streuung (Umgebungsbedingungen, technischer Zustand, …), aber prinzipiell gleiche Tendenzen bei 3 von 4 Maschinen: ↑WI → ↑NO_X



Quelle: Abbott, D., "The impact of variations in gas composition on gas turbine operation and performance", *Energy Delta Institute Quarterly*, vol. 4, no. 1, 2012

Fallbeispiel: Kalifornien, 2005

- Aufgrund eines Schadens an einer Gasaufbereitungsanlage wird eine Anlage mit vier modernen Gasturbinen und nachgeschalteter SCR-Anlage über einen Zeitraum von mehreren Tagen mit einem Erdgas versorgt, dessen Wobbe-Index etwa 4,4 % über dem Auslegungspunkt war.

- Die Turbinen konnten die strengen kalifornischen NO_X-Grenzwerte trotz des höheren WI erfüllen.

- Allerdings stieg der Verbrauch an NH_3, das in der SCR-Anlage als Betriebsmittel zur NO_X-Minderung verwendet wird, erheblich an.

Quelle: Guidebook to Interchangeability and Gas Quality, BP/IGU, 2011

Zusammenfassung

- In den letzten Jahren haben sich die **politischen** und **wirtschaftlichen Rahmenbedingungen** auf den deutschen und europäischen Gasmärkten stark verändert. Dies hat auch Auswirkungen auf die Endverbraucher in Haushalt, Industrie und Kraftwerkstechnik.

- Eine Veränderung ist die derzeit statt findende **Marktraumumstellung** von L- auf H-Gas, eine erhebliche logistische und auch technische Herausforderung.
  Eine weitere Konsequenz ist aber auch, dass zunehmend mit deutlich stärkeren **lokalen Fluktuationen** der Gasbeschaffenheit bzw. -zusammensetzung zu rechnen ist.

- Gasturbinen sind aufgrund der bei ihnen oft verwendeten **mageren Vormischverbrennung** besonders anfällig für veränderliche Gaszusammensetzungen, mit möglichen Auswirkungen auf **Effizienz**, **NO_X-Emissionen** oder **Lebensdauer**. Fortschrittliche **Mess- und Regelungstechnik** kann helfen, die Auswirkungen von Gasbeschaffenheitsschwankungen zu minimieren.

Gas- und Wärme-
Institut Essen e.V.

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Dr.-Ing. Jörg Leicher
Gas- und Wärme-Institut Essen e.V.
Hafenstraße 101
45356 Essen
Tel.: +49 (0) 201 3618 – 278
leicher@gwi-essen.de