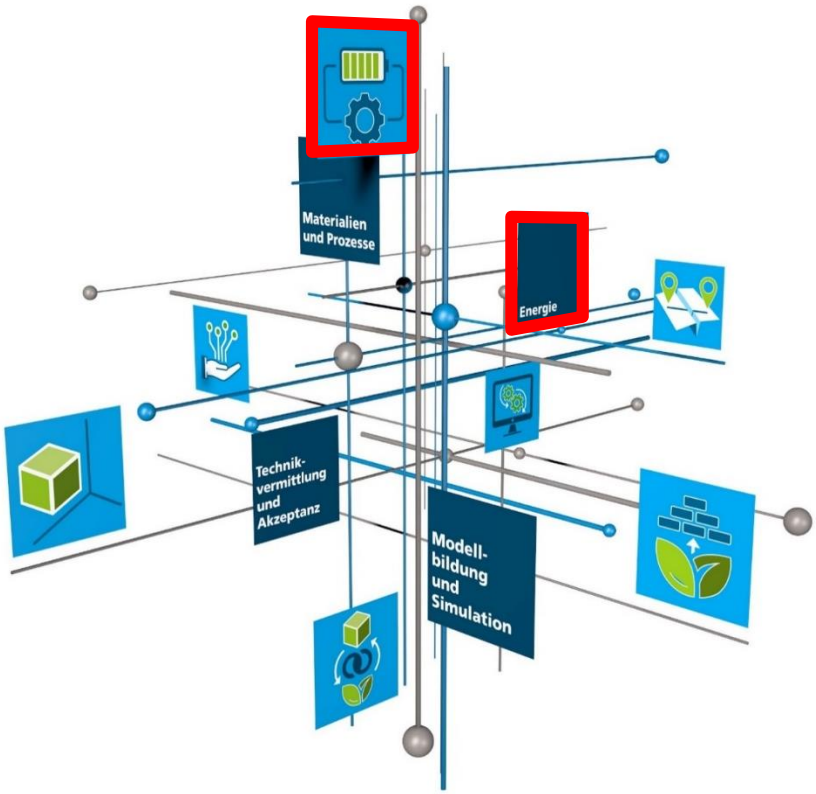
Fantastic Hydrogen and Where to Find It – Infrastruktur für Wasserstoff, insbesondere Transport- und Verteilnetze

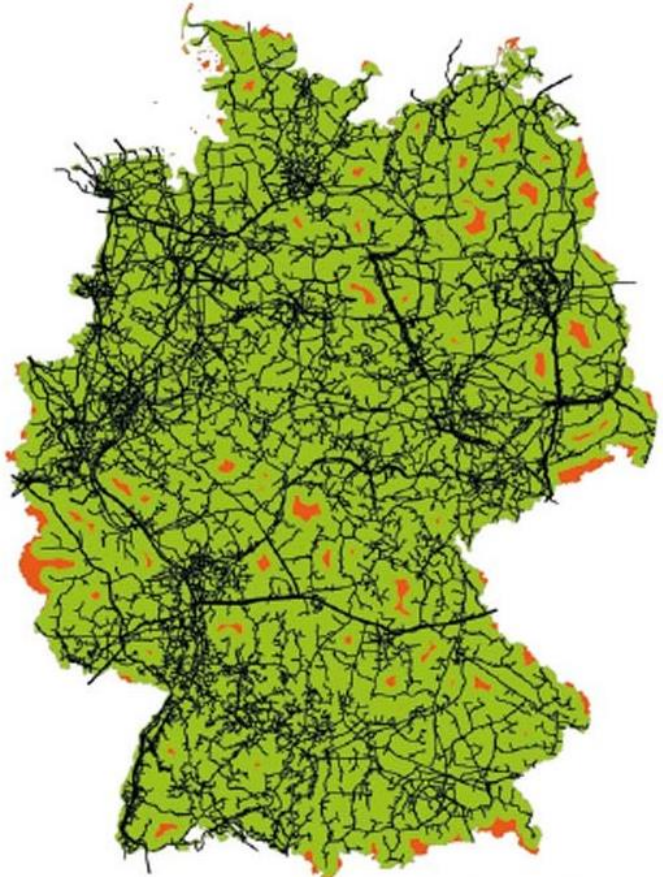
KLUGER Tandem Talk

15. Februar 2024

Prof. Dr. Tanja Clees



Einleitung – Erdgasnetz / Wasserstoff-Kernnetz



Das deutsche Gasnetz, dargestellt in der Druckstufe > 4 bar (gauge), insgesamt rund 540.000 km

geplantes Wasserstoff-Kernnetz, Stand: 15.11.2023

Ref.: https://www.dvgw.de/themen/sicherheit/technische-sicherheit-gas/leitungstechnik/ , https://fnb-gas.de/wasserstoffnetz-wasserstoff-kernnetz/

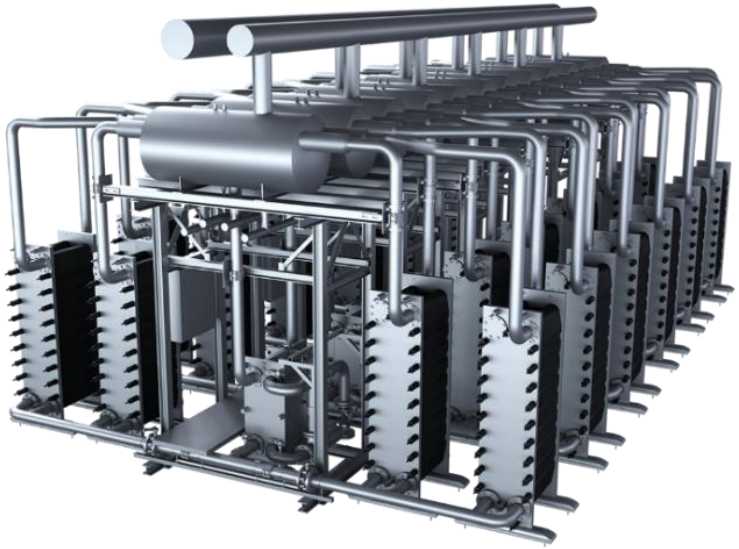
Nötige Infrastruktur

Wesentliche Teile:

- Elektrolyse-Anlagen
- Rohrleitungssysteme
- große Speicher
- Verdichterstationen
- Gasdruckmess- und -regelanlagen
- Verbraucher: Kraftwerke und Industrie (i.w. KEINE Haushalte!)

Erzeugung – Beispiel: PEM-Elektrolyseur

Output: ~ 30 bar
H_2-Qualität: bis zu 5.0 machbar



Ref.: Bildmontage links CC0, rechts: https://assets.siemens-energy.com/siemens/assets/api/uuid:a193b68f-7ab4-4536-abe2-c23e01d0b526/datasheet-silyzer300.pdf

Gastransport

Transport H_2: ca. 30 bis 80 bar

- verläuft fast immer unterirdisch
- Erdgas zu erkennen an den gelben Beschilderungen (Farbe für H_2?)

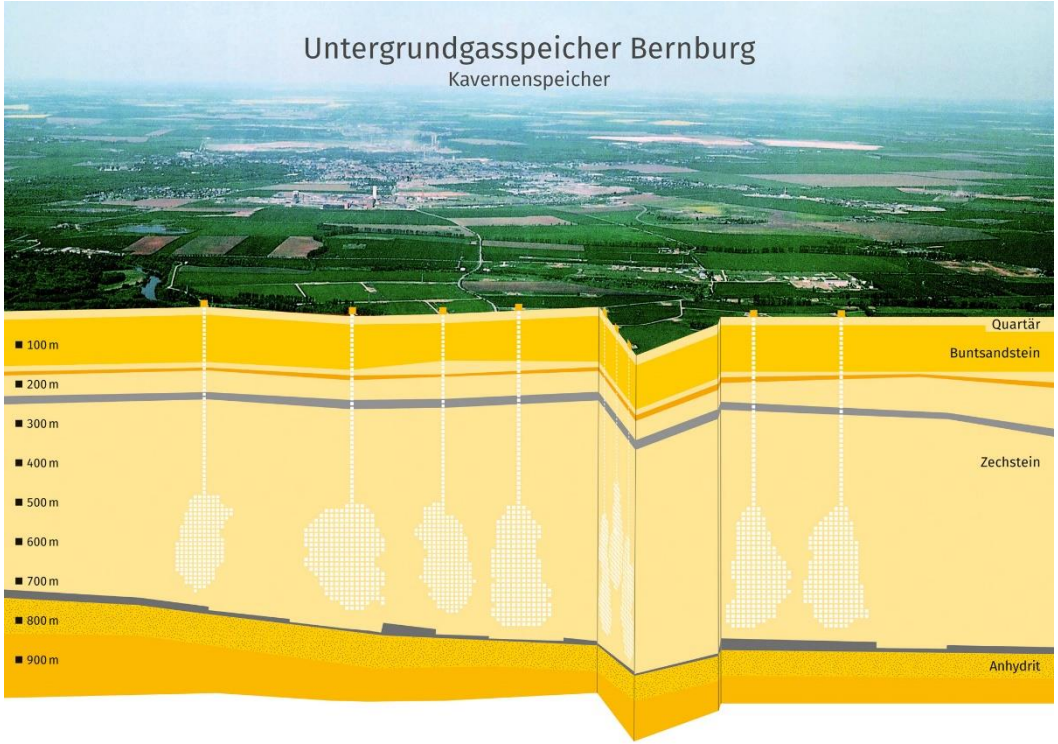
Ref.: Tanja Clees - eigenes Werk, CC BY-SA 4.0

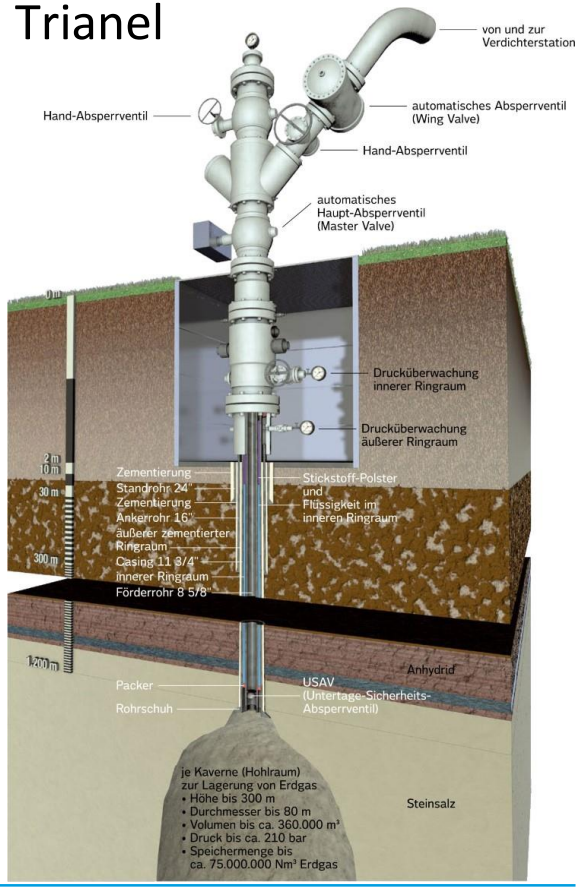
Ref.: Von Anne Offermanns - Eigenes Werk, CC BY-SA 4.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=95092634

Speicherung – Beispiel: Kavernenspeicher

Speicherung H_2: ca. 200 bar

- Bernburg: VNG
- Gronau-Epe (GET H2!): u.a. E.ON, Vattenfall, RWE, Trianel





Ref.: https://www.vng-gasspeicher.de/speichertypen
https://www.vattenfall.de/epe-gasspeicher

Verdichterstation

Verdichtung H_2:
bis ca. 80 bar
Transport,
bis ca. 200 bar
Speicherung

- rechts: VS Köln-Porz (OGE)
- unten: Verfahrensschritte

Ref.:https://oge.net/_Resources/Persistent/8/b/7/b/8b7bff16c0c61d40af21ea418f0554bfb811955a/20201113_OGE_Broschuere_Verdichterstationen_A5_DEU_v10.pdf, https://www.h-brs.de/de/h-brs-in-filmen

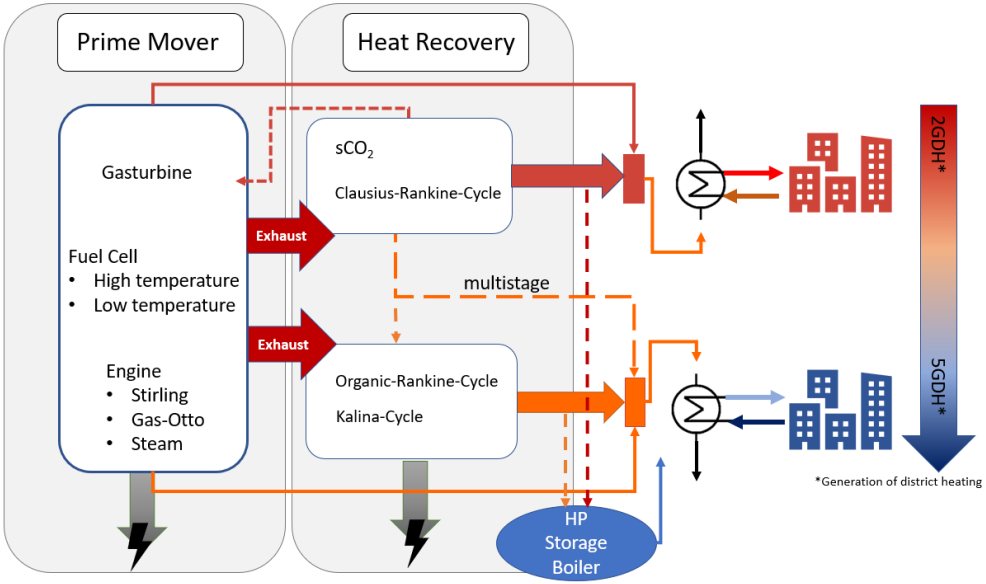
Gasdruckmess- und -regelanlage (GDMRA)

Senkung des Drucks bzw. Flusses

Ref.: https://www.ontras.com/de/infrastruktur/innovationsprojekt

Verbraucher –

Beispiel: Kraftwerke

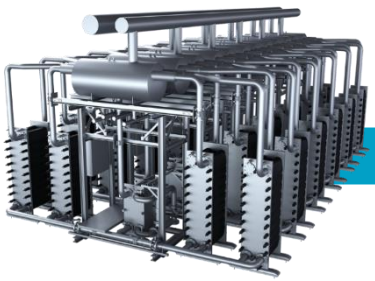


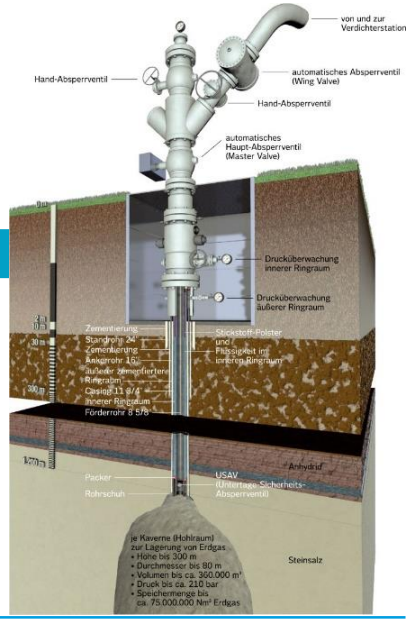
Input: ~ 40 bar

Ref.: Barbara Schiffer, Systemvergleich zur Nutzung von Wasserstoff in der Kraftwerkstechnik mit Schwerpunkt Fernwärme-erzeugung in Deutschland, CC BY-SA 4.0

Ref.: Georg Slickers - Selbst fotografiert, CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1239195

Wo/Wie könnte es zu Leckagen kommen?





Fremdeinwirkung!

Betrieb/Fremdeinwirkung!

Ref.: : https://assets.siemens-energy.com/siemens/assets/api/uuid:a193b68f-7ab4-4536-abe2-c23e01d0b526/datasheet-silyzer300.pdf, , Georg Slickers - Selbst fotografiert, CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1239195, https://oge.net/_Resources/Persistent/8/b/7/b/8b7bff16c0c61d40af21ea418f0554bfb811955a/20201113_OGE_Broschuere_Verdichterstationen_A5_DEU_v10.pdf, https://www.vattenfall.de/epe-gasspeicher

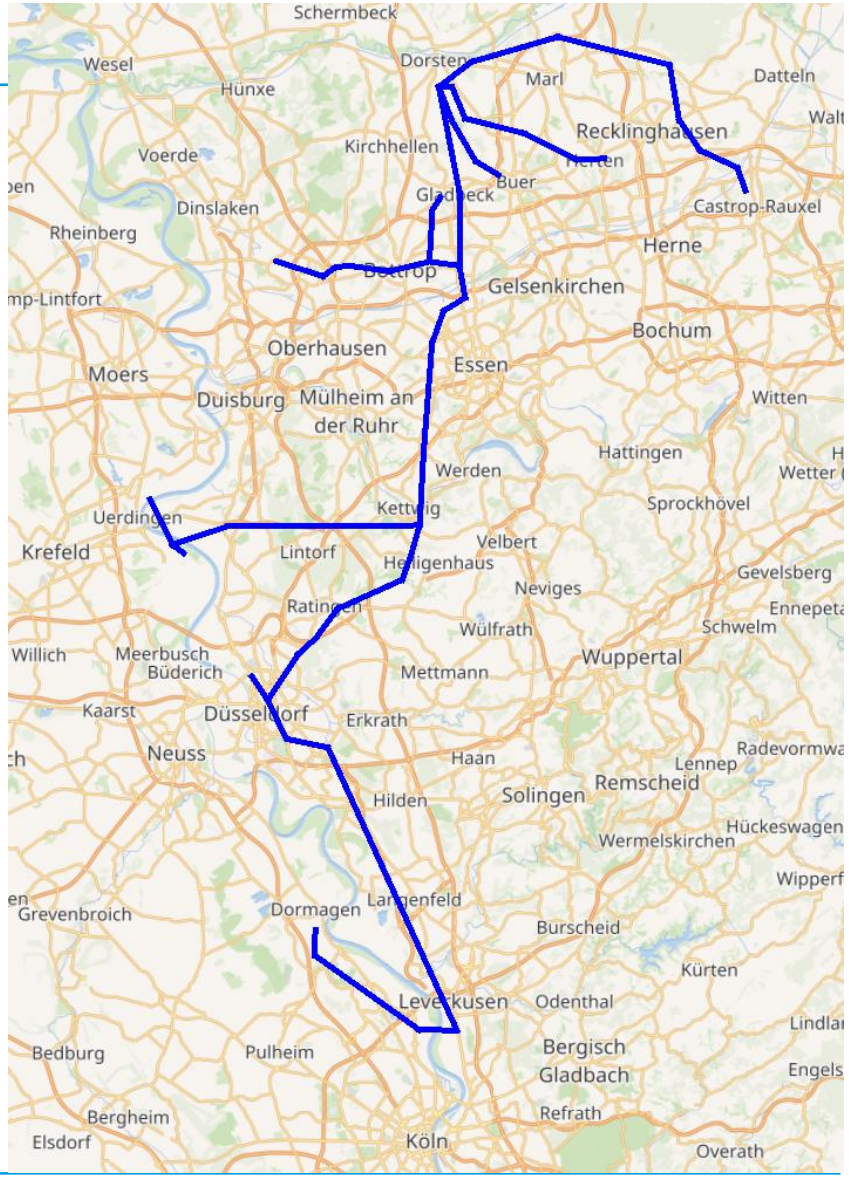
Was ist über Leckagen bekannt?

Air Liquide – Wasserstoffnetz im Ruhrgebiet

- seit ~1938 (!)
- 240 km Leitungen, 40 Stationen
- Kapazität 60.000 m^3/h
- Rohrdurchmesser 100 - 300 mm
- 25 bar max. Druck

→ **KEINE MELDUNGEN!**

Vergleiche z.B.:
https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/NetzentwicklungUndSmartGrid/Wasserstoff/Wasserstoffpapier.pdf?__blob=publicationFile&v=2
https://docplayer.org/docview/93/112137782/#file=/storage/93/112137782/112137782.pdf



Ref.: Tanja Clees, Frederik Schweitzer – eigenes Werk, CC BY-SA 4.0, basierend auf OpenStreetMap, openstreetmap.org/copyright

Was ist über Leckagen bekannt?

→ eigentlich nur zu Rissausbreitung in Pipelines

- Diverse einschlägige Forschungsprojekte zu Transportleitungen, ihren Stählen und Schweißverbindungen, welche sowohl existente Rohrleitungen als auch neue Werkstoffe untersucht haben. Beispiele:
  - **NATURALHY (1.5.2004 bis 31.10.2009)**: "Integrated Project funded by the European Commission's Sixth Framework Programme for research, technological development and demonstration (RTD) Preparing for the Hydrogen Economy by Using the Existing Natural Gas System as a Catalyst Project Contract", https://www.gerg.eu/projects/hydrogen/naturalhy/
  - **HYPOS H2-PIMS (01.11.2016 bis 31.12.2019)**: „Entwicklung von innovativen Bewertungssystemen (Pipeline Integrity Management System, PIMS), die die Betriebssicherheit von Leitungen zum Transport von wasserstoffreichen Gasen (Erdgas-Wasserstoff-Gemische) gewährleisten", https://www.hypos-germany.de/ueber-uns/hypos-projekte-zwanzig20/

Was ist über Leckagen bekannt?

- Für Rohrleitungen wären axiale Risse und plastische Verformungen (Dellen, Beulen) besonders kritisch und müssen überwacht werden.
- Dabei hat die Frequenz (erhebliche Druckschwankungen in der Pipeline) einen deutlichen Einfluss auf das Risswachstum.
- Als Hauptursache für Leitungsschäden durch Risswachstum wird jedoch weiterhin das plastische Versagen (äquivalent dem Versagen bei Erdgas) statt des Sprödbruchs infolge von Wasserstoff erwartet.
- Für Umfangsrisse in Schweißnähten wurde jedoch ein Versagen infolge von Sprödbruch durch den Einfluss von Wasserstoff erwartet.

Ergebnisse aus NATURALHY

material	medium	load cycle frequency: 0.00164Hz	actual ΔK_{th} in MPa√m at Δa/ΔN 0.01µm /cycle:	Δa/ΔN µm /cycle at ΔK of 11.3 MPa√m:	equation:	R^2
BS 7910	*Air: mean*		*10*	*0.015*		
	Air: +2SD		*7.8*	*0.03*		
			Results TNO			
X52: BM	100% NG	trap.	**10.7**	**0,0116**	$y = 3{,}00E\text{-}06x^{3{,}4081}$	0,9437
	25% H2	trap.	**10.4**	**0.0135**	$y = 9E\text{-}07x^{3{,}9652}$	0.900
	50% H_2	trap. + S	**10**	**0,0157**	$y = 5{,}00E\text{-}06x^{3{,}3213}$	0,826
	75% H_2	trap.	**9.7**	**0,0225**	$y = 8E\text{-}08x^{5{,}1738}$	0,8211
	100% H_2	trap.+ S	**8.7**	**0,0438**	$y = 6{,}00E\text{-}08x^{5{,}5679}$	0,868
X70: BM	100% NG	trap.	**11.5**	**0,0094**	$y = 3{,}00E\text{-}06x^{3{,}3219}$	0,860
	25% H_2	trap.	**10.5**	**0,0134**	$y = 7{,}00E\text{-}06x^{4{,}7503}$	0,94
	50% H_2	trap.	**8**	**0,0328**	$y = 2{,}00E\text{-}05x^{3{,}1766}$	0,786
	75% H_2	trap.	**7.5**	**0,0705**	$y = 7E\text{-}07x^{4{,}7503}$	0.94
	100% H_2	trap.	**6.5**	**0,1126**	$y = 3{,}00E\text{-}06x^{4{,}3439}$	0,923
			Other sources			
material	**medium**	Pressure (bar)	**actual ΔK_{th} in MPa√m at Δa/ΔN 0.01µm /cycle:**	**Δa/ΔN µm /cycle at ΔK of 11.3 MPa√m:**	**equation:**	
X42	100% N_2	69	**12**	**0.008**	$y = 1E\text{-}06x^{3{,}6922}$	
	100% H_2	69	**7.2**	**0.201**	$y = 2E\text{-}08x^{6{,}6497}$	
X60	100% N_2	69	**10.7**	**0.0123**	y = 8E-07x3,9766	
	100% H_2	69	**8.7**	**0.0439**	y = 5E-08x5,6439	
X70	100% N_2	69	**10**	**0.0146**	y = 8E-06x3,0959	
	100% H_2	69	**7.4**	**0.0976**	y = 2E-07x5,4019	

Abbildung 3: Zusammenstellung der Ergebnisse zur Risswachstumsrate [52]

Ref.: NaturalHy. Final report WP3.2: Transmission pipelines. 2009

Beispielhafte Ergebnisse

- **Betriebsdauer von 40 Jahren (14.600 d)**
- 1 Lastwechsel/d
- Wandstärke des Rohres: 10 mm
- Risswachstumsrate von 0,015 µm/Zyklus → **Gesamtrisswachstum: 0,219 mm**
- Für X52 Grundwerkstoff und Schweißnaht:
  - ≤ 50 Vol.-% H_2 Risswachstum innerhalb des max. Gesamtrisswachstums
  - Bei Zugabe von 250 oder 500 ppm O_2 sind 100% H_2 „ok“ (vergleichbar Erdgas)
- Für das X70-Grundmetall und Schweißgut:
  - ≤ 25 Vol.-% H_2 Risswachstum innerhalb des max. Gesamtrisswachstum.
  - Bei Zugabe von 100, 250 oder 500 ppm O_2 sind 100% H_2 „ok“

***Tabelle 1**: Zusammenstellung der untersuchten Werkstoffe*

Bestandswerkstoffe (IWM)	
Werkstoffklasse nach DVGW G 410	**Baujahr / Errichtung**
bis StE 210 / St 34/35 / Grade A	1958
StE 240 / St 37/38 / L245 / Grade B	1985
StE 360 / St 52/53 / L360 / X52	1972
StE 480 / St 70 / L485 / X70	1992
Neu gefertigte Werkstoffe (SZMF)	
P255 (DIN EN 10217) L245 (DIN EN 10208) Grade B	
P355 (DIN EN 10217) L360 (DIN EN 10208) X52 / X52MS (API 5L)	
L485 (DIN EN 10208) X70 (API 5L)	

Ref.: E. Wanzenberg et al: Forschungsvorhaben „H2-PIMS“: Wasserstoff im Erdgasnetz sicher transportieren. 3R 06/2019, S. 84-93 und Abschlussbericht HYPOS H2-PIMS , 06/2020

Beispielhafte Ergebnisse

- Diese O_2 -Anteile wären eigentlich zu hoch. Laut DVGW G 260 (A): Gase der 5. Gasfamilie (Wasserstoff in Leitungen): max. 5 ppm O_2 !
- Aber: Nach thermomechanischem Walzen ergibt sich ein feineres und homogeneres Gefüge: positiv für Beständigkeit gegen H_2-Versprödung: X52**MS** und X70**(M)**

***Tabelle 3**: Untersuchte Werkstoffe der Firma MLP. Güte und Abmessungen*

Güte	Abmessungen (Außendurchmesser x Wanddicke)
P235 (DIN EN 10217) L245 (DIN EN 10208)	610 mm x 12,7 mm
P355 (DIN EN 10217) L360 (DIN EN 10208)	610 mm x 12,7 mm
X52MS	219 mm x 8,2 mm
X70M (API 5L) L485 (DIN EN 10208)	508 mm x 12,7 mm

Ref.: E. Wanzenberg et al: Forschungs-vorhaben „H2-PIMS“: Wasserstoff im Erdgasnetz sicher transportieren. 3R 06/2019, S. 84-93 und Abschlussbericht HYPOS H2-PIMS , 06/2020

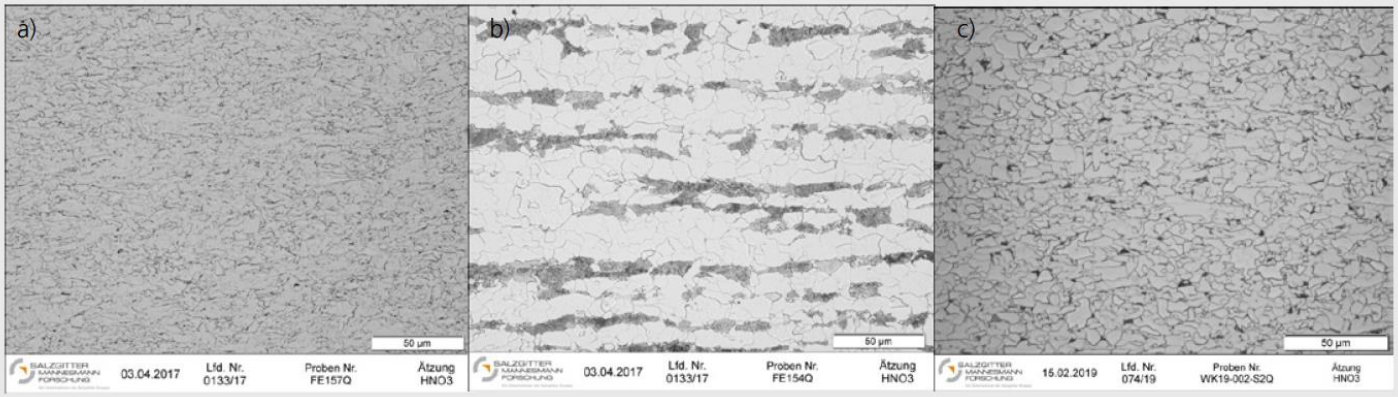
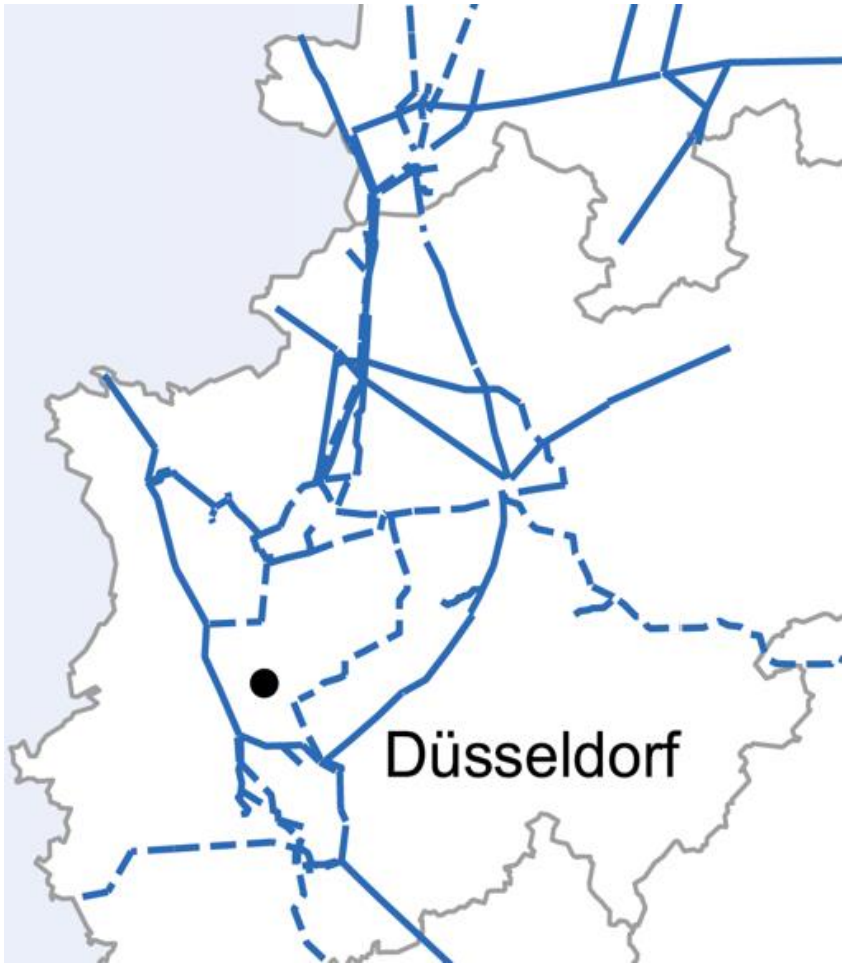


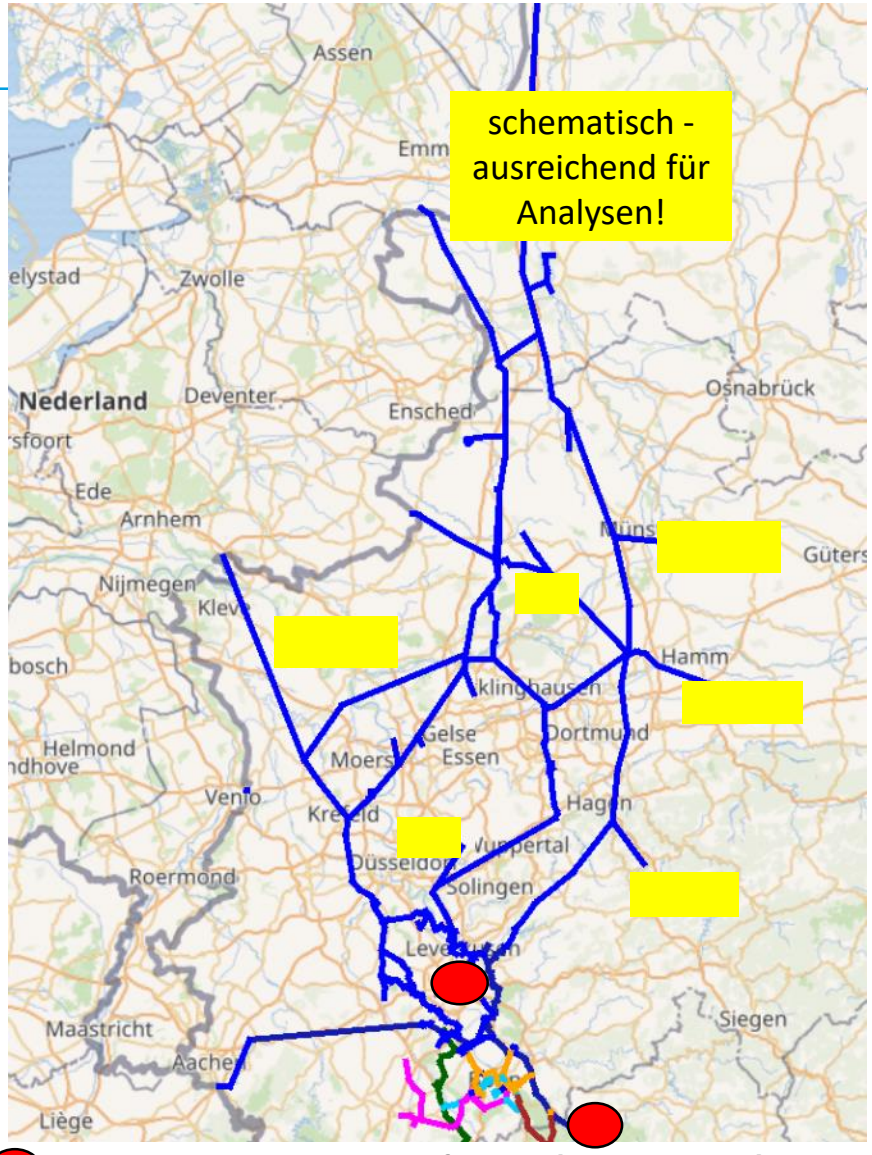
***Bild 7**: Gefügebilder der Werkstoffe a) L485, b) L360, c) X52MS*

Kernnetz Stand 15.11.2023

Quadrant NW + Modell



Ref.: https://fnb-gas.de/wasserstoffnetz-wasserstoff-kernnetz/



Beispielpunkte

Ref.: Tanja Clees – eigenes Werk, CC BY-SA 4.0, basierend auf OpenStreetMap, openstreetmap.org/copyright

Beispiele – ca. 0,02 µm/Zyklus

große Transportleitung	Kraftwerk	Werte
8000	350	MW maximale Leistung
57,541	2,517	kg/s
1	1	beispielhafter Zeitraum [Tage]
4971542,4	217468,8	kg im beispielhaften Zeitraum
4971,5424	217,4688	t im beispielhaften Zeitraum
2	2	EUR angenommene Kosten pro kg
9.943.085	**434.938**	**EUR pro Zeitraum max.**
0,9	0,2	m Innenrohrdurchmesser
0,636172512	0,031415927	m^2 Fläche
0,0003	**0,0003**	m Länge angenommener Riss
0,00000009	0,00000009	m^2 Fläche des Risses bei quadr. Fläche
1,41471E-07	2,86479E-06	Anteil Fläche
0,703329376	**0,623002221**	kg diesem Anteil entsprechende Masse

Beispiele – ca. 0,2 µm/Zyklus

große Transportleitung	Kraftwerk	Werte
8000	350	MW maximale Leistung
57,541	2,517	kg/s
1	1	beispielhafter Zeitraum [Tage]
4971542,4	217468,8	kg im beispielhaften Zeitraum
4971,5424	217,4688	t im beispielhaften Zeitraum
2	2	EUR angenommene Kosten pro kg
9.943.085	**434.938**	**EUR pro Zeitraum max.**
0,9	0,2	m Innenrohrdurchmesser
0,636172512	0,031415927	m^2 Fläche (bei 0,9 bzw. 0,2 m Durchm.)
0,003	**0,003**	m Länge angenommener Riss
0,000009	0,000009	m^2 Fläche des Risses bei quadr. Fläche
1,41471E-05	0,000286479	Anteil Fläche
70,33293758	**62,30022208**	kg diesem Anteil entsprechende Masse

Danke für Ihre Aufmerksamkeit!

Prof. Dr. rer. nat. Tanja Clees

Fachbereich IWK

Institut für Technik,
Ressourcenschonung und
Energieeffizienz TREE → Direktorium

https://www.h-brs.de/de/tree

Hochschule Bonn-Rhein-Sieg

Grantham-Allee 20

53757 Sankt Augustin

02241 865-9854

tanja.clees@h-brs.de