

# „Einfache Lösung oder neue Probleme? – Auswirkungen von Erdgas auf das Klima“

Isabell Braunger und Hanna Brauers



# “Aber was, wenn diese Brücke die letzte ist?”

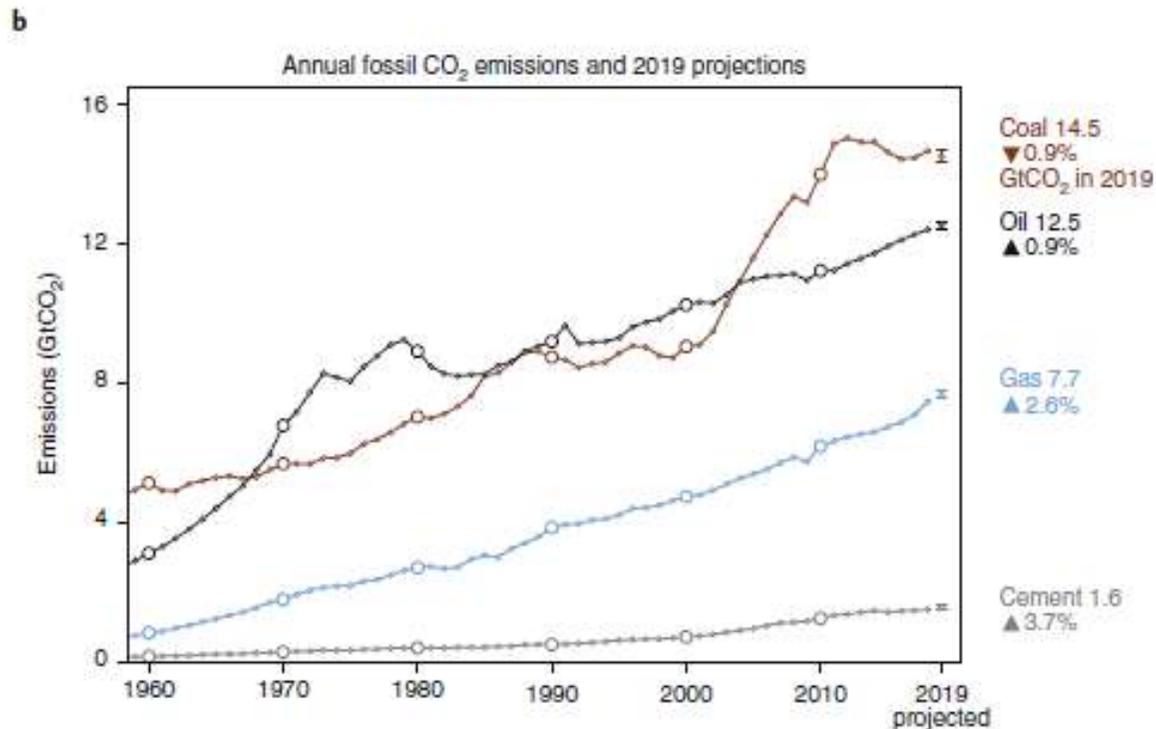
- Der Diskurs der „Brücke“ wurde seit den 1970ern verwendet; sowohl für Erdgas, als auch für Kohle (Delborne et al. 2020)



**Aber wie klimafreundlich ist Erdgas wirklich?**

[https://www.enerpedia.info/enerthek\\_util/cache/1487574802\\_jahresbericht\\_erdgas\\_2016.pdf](https://www.enerpedia.info/enerthek_util/cache/1487574802_jahresbericht_erdgas_2016.pdf)

# Erdgas mitverantwortlich für Anstieg der globalen CO<sub>2</sub> Emissionen



**Erdgas hat zu dem größten Anstieg der globalen fossilen CO<sub>2</sub> Emissionen der letzten Zeit beigetragen, ~35% des Wachstums im letzten Jahrzehnt und >50% in den letzten Jahren.**

**Fig. 1 | Global fossil CO<sub>2</sub> emissions showing projections for 2019.** Projections are from ref. <sup>1</sup>. **a**, Emissions and projections for regions. **b**, Emissions and projections for fossil fuels and cement. The projections for China, the United States, EU28 and India in 2019 are based on monthly data available at the time of submission; all others are based on economic data. The projections are done separately for coal, oil, gas and cement in each region. The Indian projection is based on the Indian financial year, April 2019 to March 2020. Both China and India exhibit higher uncertainty than usual because of unusual economic (China and India) and monsoon (India) events. Error bars indicate  $\pm 1\sigma$ .

Peters et al. 2020. *Nature Climate Change*.

# Die Klimawirkung von Erdgas

---

- Erdgas besteht zu einem Großteil aus dem stark klimawirksamen Gas **Methan** (CH<sub>4</sub>).
- Das Treibhauspotenzial (englisch Global Warming Potential, GWP) von Methan ist in den ersten 20 Jahren bis zu 87 mal stärker und in den ersten 100 Jahren bis zu 36 mal stärker als das von CO<sub>2</sub>. (IPCC 2013)
- In Deutschland wird in offiziellen Berechnungen (u.a. Umweltbundesamt) weiterhin der veraltete Faktor 25 genutzt, um die CO<sub>2</sub>-Äquivalente von Methanemissionen zu bestimmen.
- Meist wird nur der 100 Jahreszeitraum berücksichtigt allerdings kann - aufgrund des hohen Treibhauspotenzials von Methan in den ersten 20 Jahren - die Verwendung von Erdgas zum Beispiel als Ersatz für Kohle zu einem zusätzlichen kurzfristigen Temperaturanstieg führen.
- Kipppunkte im Klimasystem, die zu abrupten und irreversiblen Klimaänderungen führen, könnten bereits in den nächsten 10 bis 20 Jahren erreicht werden. (IPCC 2014)

 **Aktuelle IPCC Zahlen sollten dementsprechend für die Erstellung von Klimabilanzen verwendet werden und dabei sowohl die Klimaeffekte von Methan in den ersten 100 Jahren als auch für den 20 Jahreszeitraum berücksichtigt werden.**

# Lebenszyklus Emissionen von Methan

---

Gesamtmenge an Emissionen die bei der Nutzung von Erdgas entstehen lange unterschätzt:

- Treibhausgasemissionen (THG) entstehen nicht nur bei der Verbrennung (CO<sub>2</sub>-Emissionen) sondern auch bei Förderung, Transport und Lagerung (Methanemissionen) (u.a. Cremonese and Gusev 2016)
- Oft werden die Methanemissionen, die durch Leckagen, aber auch bewusstes Ablassen oder Abfackeln insbesondere bei der Erdgasförderung entstehen (Lebenszyklusemissionen), nicht in die Berechnung der Klimawirkung von Erdgas einbezogen
- Dies verfälscht die Klimabilanz von Erdgas. Denn werden die gesamten Lebenszyklus Emissionen berücksichtigt, kann Klimabilanz bei hohen Leckage-Raten ungefähr bei der von Kohle liegen (u.a. Zhang 2016, Hausfather 2015, Howarth 2014)
- Die Emissionen der Erdgasnutzung haben auch einen Einfluss auf die seit 2007 stark ansteigende Methankonzentration in der Atmosphäre (Nisbet et al. 2019)
- Die Gas- und -ölförderung könnte für bis zu 33% des gesamten weltweiten Anstiegs an Methanemissionen verantwortlich sein und trägt damit wesentlich zur Erderwärmung bei (Howarth 2019)

# Die Klimawirkung von Erdgas

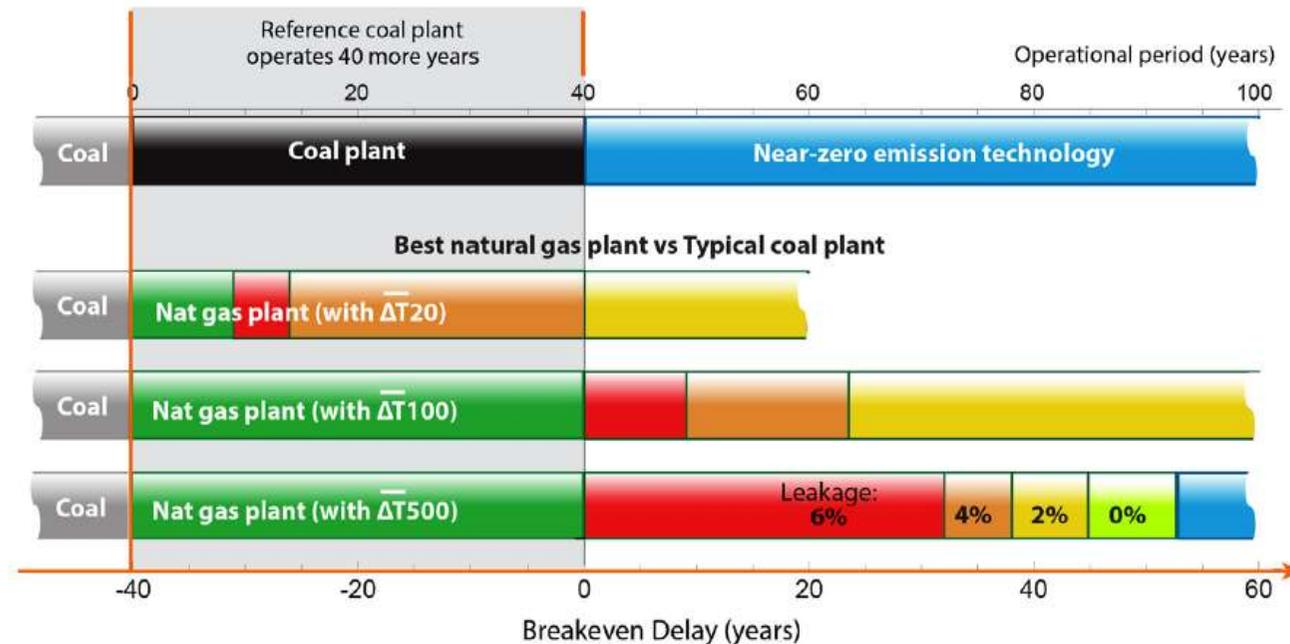
- Aufgrund der unterschiedlichen Eigenschaften von CO<sub>2</sub> und CH<sub>4</sub> ist der Vergleich der Klimawirkung von Erdgas und Kohle schwierig

Methan (CH <sub>4</sub> )	CO <sub>2</sub>
Kurzlebig – zerfällt schnell in der Atmosphäre	Langlebig – bleibt relative lange in der Atmosphäre erhalten
Starke Klimawirkung innerhalb kurzer Zeit	Kontinuierliche Klimawirkung über langen Zeitraum

(Hausfather 2015)

- Beim Vergleich der beiden Energieträger müssen die kurzfristigen Klimawirkungen von Methan mit den langfristigen Auswirkungen von CO<sub>2</sub> abgewogen werden
- Unklarheiten bei Methanleckeraten bei der Förderung und dem Transport von Erdgas stellen eine zusätzliche Herausforderung dar (Howarth et al. 2011; Cathles et al. 2012; Alvarez et al. 2012; Levi 2013; Schwietzke et al. 2014; Howarth 2014)
- Methanleckerate variieren zwischen 2,3% bis zu 17% in verschiedenen Studien (Lenox and Kaplan 2016)
- Zudem müssen lock-in Effekte von neuer Erdgasinfrastruktur mitbedacht werden

# Schwierigkeiten bei der Berechnung durch Unsicherheiten und Varianzen



**Fig. 4.** Importance of choice of time horizon for computing breakeven delay of near-zero emission energy systems without losing all climate benefit using time-averaged temperature change as the climate metric. Meaning of colors is as in Fig. 3. Short (i.e., 20 year) time horizons emphasize natural gas leakage and demonstrate the potential for natural gas to be “worse” than coal. However, long (i.e., 500 year) time horizons suggest benefit from natural gas use even if it causes a delayed deployment of near-zero emission energy technologies. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

- Andere Einflussfaktoren bei der Berechnung sind bspw. die Wirkungsgrade der Kohle- und Gaskraftwerke, und auch die Wahl der Metriken mit der die Klimawirkung berechnet wird (global warming potential (GWP), mean radiative forcing, oder mean temperature change)

# Messungen zu Methanleckagen

---

Methanleckagen können auf zwei unterschiedlichen Wegen gemessen werden:

Direkt an der Infrastruktur (zum Beispiel einer Förderstelle)

- Vorteil, dass die Messwerte einer bestimmten Infrastruktur zugerechnet werden kann.
- Nachteil: Qualität der Messung hängt stark vom genutzten Instrumentarium ab, Leckagen können leicht übersehen werden und an schwer zugänglichen Stellen kann nicht gemessen werden.

Messung der Methankonzentration von der Luft aus (z.B. mit Flugzeugen oder Satelliten)

- Vorteil: Methode schafft einen flächendeckenden Überblick über die Höhe der Emissionen in einer Region
- Nachteil: Emissionen können nicht direkt einer einzelnen Infrastruktur zugeordnet werden

(EDF 2018)

# Messungen zu Methanleckagen

---

- Bislang gibt es keine Messungen oder unabhängige Studien zu Methanemissionen aus der Produktion und dem Transport fossiler Energieträger für Deutschland und die EU.
- In Deutschland werden die Methanemissionen bislang lediglich als Schätzwerte von der Industrie geliefert (eine Pflicht zur Messung gibt es nicht).
- Dieser Mangel an verlässlichen Daten besteht weltweit. Bspw. die Umweltschutzbehörde der Vereinigten Staaten (EPA), haben die tatsächlichen Methanemissionen der Gasindustrie bislang unterschätzt (Saunois et al. 2019). Messungen an einigen Standorte deuten auf eine ~60% höhere Leckage-Rate als zuvor von der EPA geschätzt (Alvarez et al. 2018).
- 2020 hat die EU auf das Problem mit der Verabschiedung einer Methanstrategie reagiert, diese sieht jedoch zunächst lediglich eine bessere Erfassung von Emissionen vor aber keine Reduktionsziele, wie bspw. für CO<sub>2</sub>.

# Die Unsicherheiten führen zu sich stark unterscheidenden Schätzungen der Emission von Erdgas

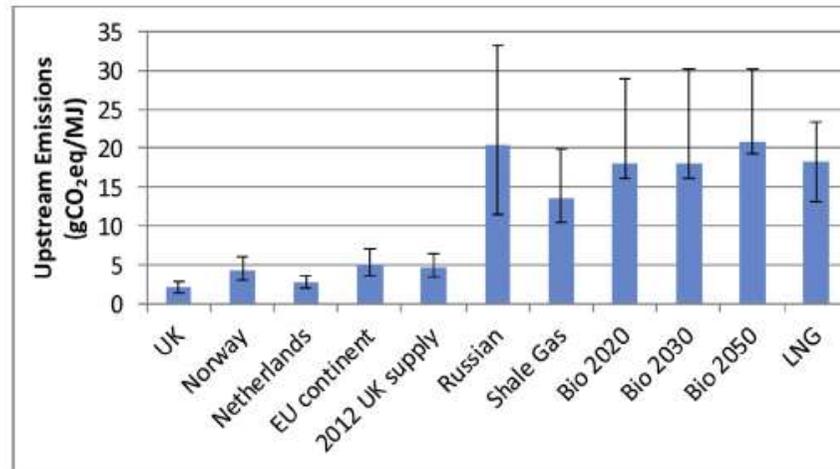


Fig. 2. Upstream GHG emissions associated with gas supply pathway by source [uncertainty ranges vary between gas sources as discussed in Section 2.1].

Hammond and O'Grady 2017

*“The controversial study by Howarth et al. [53] was excluded when averaging this data, because of its relatively high estimates for fugitive emissions”*

# Methanleckage und Industriedaten Problem seit den 90ern bekannt

Victor, D. G. 1992. Leaking Methane from Natural Gas Vehicles: Implications for Transportation Policy in the Greenhouse Era. *Climatic Change* 20 (2): 113–41. <https://doi.org/10.1007/BF00154171>.

- Schon in den 90ern waren Hauptunsicherheiten und Risiken von Methan bekannt
- Schon damals klar, dass die Berichterstattung der Industrie nicht mit den atmosphärischen Methandaten übereinstimmt
- "Die grundlegenden Schlussfolgerungen bleiben jedoch bestehen. Die Kapazität, den Treibhauseffekt in der nahen Zukunft durch den Umstieg auf Erdgasfahrzeuge zu reduzieren, ist begrenzt" (eigene Übersetzung; nahe Zukunft = 60 Jahre)

TABLE I: Major greenhouse-related uncertainties that affect this model

Parameter	Range	Notes
Carbon dioxide: Atmospheric retention of anthropogenic CO <sub>2</sub> emissions ('marginal airborne fraction')	30–70% (50% used here)	May change in the future if net sinks do not change in proportion to net CO <sub>2</sub> emissions. May be much lower if current CO <sub>2</sub> source from deforestation is very large.
Methane: Mean residence time of CH <sub>4</sub> in the atmosphere	8–14 years	May increase due to OH feedback. Such a feedback is estimated and included in model.
Feedback factor for OH depletion	1–1.5	Amplifies effective emissions of CH <sub>4</sub> .
Feedback factor for chemical/radiative feedback	1–2	Includes radiative effects of trop. O <sub>3</sub> and stratospheric water vapor. Amplifies the methane factor described below.
Methane factor (for converting ppm CH <sub>4</sub> to equiv. of ppm CO <sub>2</sub> )	26	Uncertainty is quite small. May be smaller in the future due to band saturation. Is amplified by the chemical/radiative feedbacks described above.
Methane sources: Total methane source	400–640 Tg annually	540 Tg/yr used in this study (500 Tg/yr is quasi steady state source; 40 Tg/yr yields the 1% annual increase in atmospheric CH <sub>4</sub> ).
% from 'old' sources (determined isotopically)	10–32%	22% for this study, including 33 Tg from 'old' biological sources.
Amount of fossil-fuel-derived CH <sub>4</sub> is from natural sources (i.e., not directly related to mining or total energy production)	?	33 Tg of 'old' sources assumed from biology in this study. The rest assumed proportional to respective energy production. Biological sources or natural fossil-based seeps may be larger, so problem of CH <sub>4</sub> leaks from energy production may be overstated.

# Verdrängungseffekte von Erneuerbaren und Lock-In-Effekte von Erdgas

---

- Ein wesentliches Risiko zusätzlicher Investitionen in Erdgas: Verzögerung des Ausbaus von erneuerbaren Energien oder Energieeffizienzmaßnahmen (Stephenson, Doukas und Shaw 2012; P. Hammond und O' Grady 2017; Cotton, Rattle, und Van Alstine 2014; Chen und Chen 2019; Lenox und Kaplan 2016; Healey und Jaccard 2016; Littell 2017; Orthofer, Huppmann, und Krey 2019; Zhang et al. 2016; Hammond und O'Grady 2017; Shearer et al. 2014; Hausfather 2015; McGlade et al. 2018).
- (1) (Über-)Investitionen in Erdgas ersetzen direkt Investitionen, die sonst in Erneuerbare getätigt worden wären;
- (2) Billiges Erdgas senkt die Energiepreise und verzögert die Zeitspanne weiter, in der Erneuerbare wettbewerbsfähig werden;
- (3) Durch das Hinauszögern von Investitionen werden auch Lernkurven verschoben und dadurch die Kosten erhöht
- Risiko von pfadabhängiger Infrastruktur (*lock-ins*), insbesondere durch Aufbau neuer Gas-Infrastruktur (Stephenson, Doukas und Shaw 2012; Hammond und O'Grady 2017; Serkin und Vandenberg 2018; McGlade et al. 2018).
- Infrastrukturen haben typischerweise technische Lebensdauer von mehreren Jahrzehnten. Sobald Infrastruktur existiert, ist es wahrscheinlicher, dass THG-Emissionen steigen und THG-Ziele vernachlässigt werden, z. B. aufgrund von resultierendem wirtschaftlichem und politischem Druck (P. Hammond und O' Grady 2017; Eyre und Baruah 2015; Serkin und Vandenberg 2018; Verhagen, der Voet und Sprecher 2020).
- Bestehende Infrastrukturen sind schwer zu verändern (Egyedi und Spirco 2011; Hanmer und Abram 2017; Thomson, Corbett und Winebrake 2015). Pfadabhängigkeitseffekte entstehen durch steigende Skalenerträge, versunkene Kosten, oder technologische Netzwerkeffekte (Bertelsen und Vad Mathiesen 2020).

# Erdgas und Narrativprobleme

---

**Wirtschaftliche Chancen** ← *Diskursive Spannung 1* → **Umwelt- und Gesundheitsrisiken**

- Umweltbedrohungen können als Risiken geframed werden, die abgemildert oder kompensiert werden können
- Diese Art des Reframings ermöglicht Risikogovernance; Debatten beschränken sich auf: Wie können wir die Risiken minimieren und abmildern, und wie können wir diejenigen entschädigen, die Verluste erleiden? Grundlegende Fragen vermieden, ob der bestehende Politikansatz langfristigen Nachhaltigkeitszielen dient oder nicht

**Übergangsbrennstoff (transition fuel)** ← *Diskursive Spannung 2* → **Energiewende-Bremser (delayer of transition)**

- Der zweite Diskurs fokussiert eher auf normative Fragen, die nicht durch Risikogovernance gelöst werden können. Er erfordert daher eine reflektierte Haltung aller Akteure, die sich an der Diskursdebatte beteiligen
- Führt auch zu (befristeten) Moratorien von Erdgasförderung

***Die Darstellung von Fakten wird benutzt um Objektivität, Unparteilichkeit und Sachlichkeit darzustellen. Interessanterweise haben Akteure von gegnerischen Seiten bei Frackingdebatten oft dieselben wissenschaftlichen Artikel und Berichte verwendet, um für ihre jeweilige Interpretation des Themas zu argumentieren...***

(Dodge and Metzger 2017)

## Ein paar Schlussfolgerungen

---

- Die Erdgasnutzung verursacht **hohe Treibhausgasemissionen und somit negative Klimafolgen**.
- Die genaue Höhe der Emissionen und auch der Klimafolgen sind von vielen **Unsicherheiten** betroffen, die von fehlenden Messungen erschwert werden. Diese Unsicherheiten sollten kommuniziert werden, ohne dass die Hauptaussage dadurch abgeschwächt wird.
- Treibhausgasemissionen werden bei Förderung, Transport und Verbrennung verursacht. Es ist wichtig die gesamten **Lebenszyklusemissionen inklusive der Methanleckagen** von Erdgas einzubeziehen, neben dem CO<sub>2</sub>-Budget ein **Methanbudget** einzuführen und die Klimawirkung sowohl für einen **20-Jahres- als auch einen 100-Jahres-Zeitraum** zu betrachten.
- Der weitere Ausbau von Erdgasinfrastruktur erhöht das **Risiko von lock-in** Effekten und kann den Ausbau von erneuerbaren Energien verzögern. Die unverminderte Nutzung von fossilem Gas **gefährdet** somit das Erreichen der bereits vereinbarten **Klimaschutzziele**.
- In der Debatte um Erdgasnutzung können wissenschaftliche Erkenntnisse über die Klimafolgen von Erdgas helfen, jedoch spielt die **Art des Diskurses** und die Macht der beteiligten Akteure dabei eine große Rolle.

---

**Hanna Brauers**  
**[hbr@wip.tu-berlin.de](mailto:hbr@wip.tu-berlin.de)**

Wissenschaftliche Mitarbeiterin und Doktorandin and der  
Technischen Universität Berlin,  
Fachgebiet Wirtschafts- und Infrastrukturpolitik (WIP),  
Junior Research Group CoalExit  
und Gastwissenschaftlerin am  
Deutschen Institut für Wirtschaftsforschung (DIW Berlin)



## Referenzen (1/3)

---

- Alvarez, R. A., S. W. Pacala, J. J. Winebrake, W. L. Chameides, and S. P. Hamburg. 2012. 'Greater Focus Needed on Methane Leakage from Natural Gas Infrastructure'. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 109 (17): 6435–40. <https://doi.org/10.1073/pnas.1202407109>.
- Alvarez, Ramón A., Daniel Zavala-Araiza, David R. Lyon, David T. Allen, Zachary R. Barkley, Adam R. Brandt, Kenneth J. Davis, et al. 2018. 'Assessment of Methane Emissions from the U.S. Oil and Gas Supply Chain'. *Science* 361 (6398): 186–88. <https://doi.org/10.1126/science.aar7204>.
- Bertelsen, Nis, and Brian Vad Mathiesen. 2020. 'EU-28 Residential Heat Supply and Consumption: Historical Development and Status'. *Energies* 13 (8): 1894. <https://doi.org/10.3390/en13081894>.
- Cremonese, Lorenzo, and Alexander Gusev. 2016. 'The Uncertain Climate Cost of Natural Gas: Assessment of Methane Leakage Discrepancies in Europe, Russia and the US, and Implications for Sustainability'. IASS Working Papers (December). <https://doi.org/10.2312/iass.2016.039>.
- Delborne, Jason A., Dresden Hasala, Aubrey Wigner, and Abby Kinchy. 2020. 'Dueling Metaphors, Fueling Futures: "Bridge Fuel" Visions of Coal and Natural Gas in the United States'. *Energy Research & Social Science* 61 (March): 101350. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2019.101350>.
- Dodge, Jennifer, and Tamara Metz. 2017. 'Hydraulic Fracturing as an Interpretive Policy Problem: Lessons on Energy Controversies in Europe and the U.S.A.' *Journal of Environmental Policy & Planning* 19 (1): 1–13. <https://doi.org/10.1080/1523908X.2016.1277947>.
- EDF. 2018. 'Measuring Methane: A Groundbreaking Effort to Quantify Methane Emissions from the Oil and Gas Industry'. <https://www.edf.org/sites/default/files/EDF-Methane-Science-Brochure.pdf>.
- Egyedi, Tineke, and Jaroslav Spirco. 2011. 'Standards in Transitions: Catalyzing Infrastructure Change'. *Futures* 43 (9): 947–60. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2011.06.004>.
- Eyre, Nick, and Pranab Baruah. 2015. 'Uncertainties in Future Energy Demand in UK Residential Heating'. *Energy Policy* 87 (December): 641–53. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.12.030>.
- Hammond, Geoffrey P., and Áine O'Grady. 2017. 'Indicative Energy Technology Assessment of UK Shale Gas Extraction'. *Applied Energy* 185 (January): 1907–18. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.02.024>.

## Referenzen (2/3)

---

- Hanmer, Clare, and Simone Abram. 2017. 'Actors, Networks, and Translation Hubs: Gas Central Heating as a Rapid Socio-Technical Transition in the United Kingdom'. *Energy Research & Social Science* 34 (December): 176–83. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2017.03.017>.
- Hausfather, Zeke. 2015. 'Bounding the Climate Viability of Natural Gas as a Bridge Fuel to Displace Coal'. *Energy Policy* 86 (November): 286–94. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.07.012>.
- Howarth, Robert W. 2014. 'A Bridge to Nowhere: Methane Emissions and the Greenhouse Gas Footprint of Natural Gas'. *Energy Science&Engineering* 2 (2): 47–60. <https://doi.org/10.1002/ese3.35>.
- . 2019. 'Ideas and Perspectives: Is Shale Gas a Major Driver of Recent Increase in Global Atmospheric Methane?'. *Biogeosciences* 16 (15): 3033–46. <https://doi.org/10.5194/bg-16-3033-2019>.
- Howarth, Robert W., Renee Santoro, and Anthony Ingraffea. 2011. 'Methane and the Greenhouse-Gas Footprint of Natural Gas from Shale Formations'. *Climatic Change* 106 (4): 679–90. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0061-5>.
- IPCC, 2013. Chapter 8, Anthropogenic and Natural Radiative Forcing Link: [https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5\\_Chapter08\\_FINAL.pdf](https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_Chapter08_FINAL.pdf).
- IPCC. 2014. 'Climate Change 2014: Synthesis Report'. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change. Geneva, Switzerland: IPCC.
- Lenox, Carol, and P. Ozge Kaplan. 2016. 'Role of Natural Gas in Meeting an Electric Sector Emissions Reduction Strategy and Effects on Greenhouse Gas Emissions'. *Energy Economics* 60 (November): 460–68. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2016.06.009>.
- McGlade, Christophe, Steve Pye, Paul Ekins, Michael Bradshaw, and Jim Watson. 2018. 'The Future Role of Natural Gas in the UK: A Bridge to Nowhere?'. *Energy Policy* 113 (February): 454–65. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.11.022>.
- Nisbet, E. G., M. R. Manning, E. J. Dlugokencky, R. E. Fisher, D. Lowry, S. E. Michel, C. Lund Myhre, et al. 2019. 'Very Strong Atmospheric Methane Growth in the Four Years 2014-2017: Implications for the Paris Agreement'. *Global Biogeochemical Cycles*, February. <https://doi.org/10.1029/2018GB006009>.
- P. Hammond, Geoffrey, and Áine O' Grady. 2017. 'The Life Cycle Greenhouse Gas Implications of a UK Gas Supply Transformation on a Future Low Carbon Electricity Sector'. *Energy* 118 (January): 937–49. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.10.123>.

## Referenzen (3/3)

---

- Peters, G. P., R. M. Andrew, J. G. Canadell, P. Friedlingstein, R. B. Jackson, J. I. Korsbakken, C. Le Quéré, and A. Peregon. 2020. 'Carbon Dioxide Emissions Continue to Grow amidst Slowly Emerging Climate Policies'. *Nature Climate Change* 10 (1): 3–6. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0659-6>.
- Saunio, Marielle, Ann R. Stavert, Ben Poulter, Philippe Bousquet, Joseph G. Canadell, Robert B. Jackson, Peter A. Raymond, et al. 2019. 'The Global Methane Budget 2000-2017'. Preprint. *Atmosphere – Atmospheric Chemistry and Physics*. <https://doi.org/10.5194/essd-2019-128>.
- Schwietzke, Stefan, W. Michael Griffin, H. Scott Matthews, and Lori M. P. Bruhwiler. 2014. 'Natural Gas Fugitive Emissions Rates Constrained by Global Atmospheric Methane and Ethane'. *Environmental Science & Technology* 48 (14): 7714–22. <https://doi.org/10.1021/es501204c>.
- Serkin, Christopher, and Michael P. Vandenbergh. 2018. 'Prospective Grandfathering: Anticipating the Energy Transition Problem'. *Minnesota Law Review* 102: 1019–76.
- Stephenson, Eleanor, Alexander Doukas, and Karena Shaw. 2012. "Greenwashing Gas: Might a 'Transition Fuel' Label Legitimize Carbon-Intensive Natural Gas Development?" *Energy Policy* 46 (July): 452–59. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.04.010>.
- Thomson, Heather, James J. Corbett, and James J. Winebrake. 2015. 'Natural Gas as a Marine Fuel'. *Energy Policy* 87 (December): 153–67. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.08.027>.
- Verhagen, Teun Johannes, Ester der Voet, and Benjamin Sprecher. 2020. 'Alternatives for Natural-gas-based Heating Systems: A Quantitative GIS-based Analysis of Climate Impacts and Financial Feasibility'. *Journal of Industrial Ecology*, July, *jiec.13047*. <https://doi.org/10.1111/jiec.13047>.
- Victor, D. G. 1992. 'Leaking Methane from Natural Gas Vehicles: Implications for Transportation Policy in the Greenhouse Era'. *Climatic Change* 20 (2): 113–41. <https://doi.org/10.1007/BF00154171>.
- Zhang, Xiaochun, Nathan P. Myhrvold, Zeke Hausfather, and Ken Caldeira. 2016. 'Climate Benefits of Natural Gas as a Bridge Fuel and Potential Delay of Near-Zero Energy Systems'. *Applied Energy* 167 (April): 317–22. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.016>.