ETH zürich



Energiewende: Umfassender und offener gedacht

Wolfgang Kröger

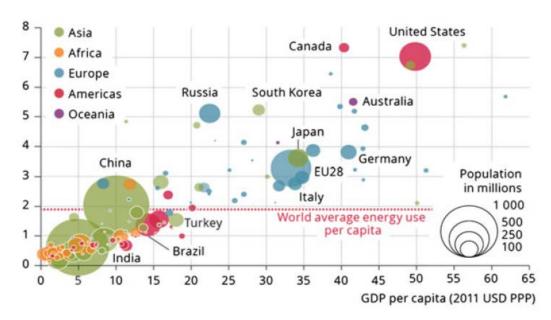
ETH Zürich - Scientific Advisor Chair of Entrepreneurial Risks (Prof. Sornette) & Mitglied acatech/ Leopoldina/ Union Projekt Energiesysteme der Zukunft (ESYS)

Themen-Apéro des Carnot-Cournot Netzwerks, Basel, 25. Juni 2019



Kurze Bestandsaufnahme mit Fakten (I)

Primärenergiebedarf (150 Billionen kWh) zu 85% beansprucht von 15% der Weltbevölkerung, zu 80% abgedeckt durch fossile Brennstoffe



17% der Primärenergie umgewandelt in Strom, hauptsächlich erzeugt aus Kohle (40%) und Erdgas (23%), Anteile Kernenergie fast 11%, Wasser 16.5%, Wind und Sonne mit knapp 8%



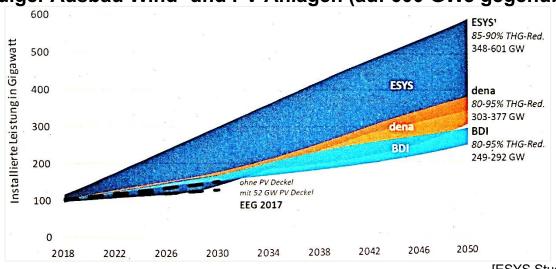
Kurze Bestandsaufnahme mit Fakten (II)

- Kein Ressourcenproblem; Klimaproblematik gebietet Senkung der THG(CO₂)-Emissionen (ca. 45 Gt) im Stromsektor um 73% weltweit bis 2040, 85% in OECD Ländern in nächsten 25 Jahren
- Anteile (%) an globalen Emissionen: PRC 29.6, US 15.5, D 2.3, CH 0.7; pro Kopf in Tonnen: US ca. 15, D knapp 11, PRC 6.6, CH 5.8
- Sektoranteile (%) an Emissionen: in D Strom 40, Transport 20 (Luft 2.7); in CH Strom (noch) marginal, Transport 32, Landwirtschaft 18
- Weltweiter Anstieg der THG-Emissionen schien gestoppt, aber Anstieg in 2017 und 2018 (2.7% gegenüber 2017); Wiederbelebung eingefrorener Kohlekraftwerk-Projekte u.a. in PRC und den US
- Dekarbonisierung als globales Problem verlangt politische Lösung Handeln und Verhaltensänderungen Einzelner reichen nicht aus



Energiewende in Deutschland: Ein Grossexperiment

Notwendiger Ausbau Wind- und PV-Anlagen (auf 600 GWe gegenüber 100 heute)

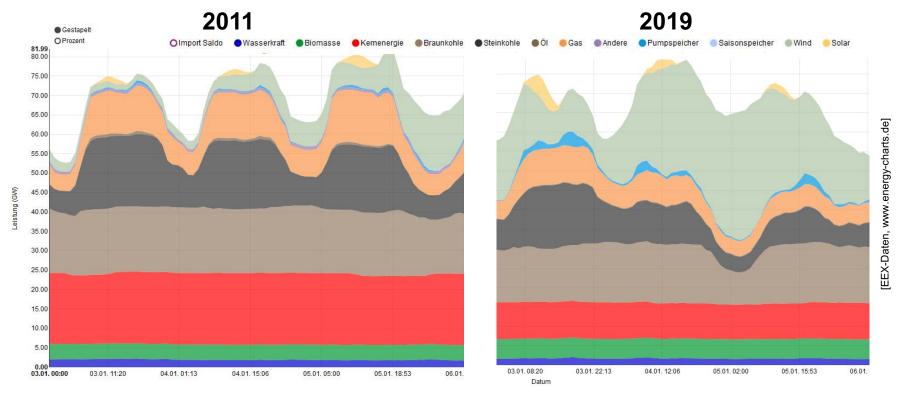


- Ausstieg aus der **Kernenergie** (Atomstromanteil 2018: 12%)
- [ESYS Studienvergleich 2019]
- Verzicht auf Kohle samt CCS-Technologien (Kohleanteil 2018: 38%)
- Ausbau EE, vor allem Wind- und Solarenergie
- Wahrung eines hohen Akzeptanzniveaus trotz unumgänglicher Eingriffe in die Umwelt und hoher Kosten*

^{*}geschätzt auf jährlich 15-70 Mrd. Euro (ca. 0.5-2% des 2017 BIP), bis 2050 auf total 3'354 Mrd. Euro



Netzstabilität: Nettostromerzeugung in Deutschland



- Intermittierende (variable) Anteile: ~ 12% in 2011; ~ 30% in 2018
- Starke tages- und jahreszeitlichen Schwankungen, einhergehend u.a. mit zunehmender Abhängigkeit von der Wettervorhersagequalität
- Kaum Glättungseffekte wegen Grossräumigkeit der Wetterlagen



Stabilität, Struktur und Ausbau des Netzes

- Bei Ersatz thermischer Grosskraftwerke Verlust rotierender Massen zur Frequenzstabilisierung – erhöhter Regelaufwand und Bedarf an schnell zuschaltbaren Reserve-Kraftwerken
- Grosse Distanz zwischen Erzeuger- und Verbraucherzonen erhöht Netzverluste (1% bei HVAC und 0.5% bei HVDC, jeweils auf 100 km)
- Umbau der Netzstruktur hin zu mehr Digitalisierung/Smartness und erhöhter Dezentralität ("Posumer-Inseln", an- und abgekoppelbar vom Hauptübertragungsnetz) erhöht die Netzkomplexität; erforderlicher Netzausbau nicht verringert, höchstens verzögert
- Notwendigkeit von Komplementärtechnologie, sprich ausreichender Speicher- und Reservekraftwerkskapazitäten (bevorzugt Gas)

Energiewende in Deutschland: Status

- Senken der **THG-Emissionen** im Energiesektor bis 2020 um 40, 2030 um 55 und 2050 80-90%¹⁾; bisher leichte Abnahme, ab 2015 Stagnation/ab 2018 leichter Anstieg (Transportsektor als Problem)
- EE-Anteil an Stromerzeugung 2018 bei 40.3% gegenüber 25.9% 2012, Anstieg Wind von 9.4 auf 20.4%, PV von 4.9 auf 8.4%, Anteil Hydro und Bio mit 11.5% stabil
- Um Klimaschutzziele zu erreichen, **Zubau** von jährlich 4.4 GW **PV**und 4.3 GW Windanlagen; derzeit halb so hoch und eher abnehmend ("Ökostromlücke")
- Bis 2025 ca. 6 000 km **neue Stromleitungen** (Nord-Süd Trasse) erforderlich; derzeit nur 100 km pro Jahr fertiggestellt
- Strompreise (2017 30.5 Cent/kWh, 39%iger Anstieg in 10 Jahren) könnten weiter steigen/sich verdoppeln
- 1) Gemäss Klimaschutzplan 2050



Steigende Strompreise



Der gemittelte Strompreis in der Schweiz lag bei 20.1 Rp für das günstigste Produkt.



Von der Stromwende zur Energiewende¹⁾

Verzahnung der traditionellen Stromnutzung mit Verkehr und Wärmesektor

- Starker Anstieg des Strombedarfs
 - Verdopplung auf über 1000 TWh im Jahr 2050
 - Bis 600 GW an Windkraft- und PV-Anlagen (sechsfach gegenüber heute) bei Reduzierung der CO₂-Emissionen um 90% (scharfes Klimaziel)
 - Abrufbare Reservekraftwerke bis zu 130 GW (heute: 105 GW) auf lange Sicht nötig zur Nennlastsicherung
- Verdoppelung der Gebäudesanierungsrate (auf jährlich 2%), Effizienzsteigerung und Import großer Mengen CO₂-neutraler Energieträger (Strom, synthetische Brenn- und Kraftstoffe)
- Notwendigkeit digitaler Steuerungstechnik zur Anpassung an fluktuierendes Angebot (erhöhte Komplexität und Cyber-Risiken)
- Erdgasnetz als Speicher für und synthetische Kraft- und Brennstoffe
- 1) ESYS Stellungnahme "Sektorkopplung", Nov. 2017



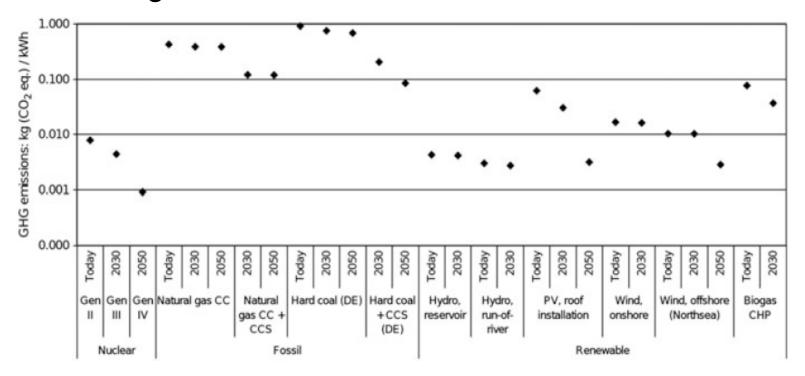
Zwischenfazit

- **Dekarbonisierung** des Energiesektors, **nicht nur des Stromsektors**, ist geboten, aber national und erst global ein höchst ambitioniertes Ziel; die Formulierung der Zielgrössen und erforderlichen Schritte muss breiter als nur (tages-)politisch abgesichert sein (Governance).
- Die Energiewende in Deutschland ist fortgeschritten, aber in einer kritischen Phase; die politische und gesellschaftliche Unterstützung und Akzeptanz scheinen zu erodieren.
- Die zunehmende Importabhängigkeit vieler Länder schreckt auf und hat zu einer offeneren Diskussion möglicher Abhilfe geführt; das CCS-Verbot und die Rolle der Kernenergie (Hinausschieben des Abschaltens, Neuanlagen) sollten überdacht werden.



Kurzbeurteilung verfügbarer Technologien (I)

Treibhausgasemissionen heutiger und zukünftiger **Technologien**



(Hirschberg & Burgherr 2015)



Kurzbeurteilung verfügbarer Technologien (II)

Energiedichten

Uran in Brutreaktoren 80'620'000 MJ/kg

Erdgas 47.1, Steinkohle 22.7, Wasserstoff (Speicher) 120.2,

Biomasse 16 – 18, je MJ/kg

Wind < 150 bis > 350, Sonne 5 - 20, je W/m²

Lastfaktoren (Vollaststunden), rund

Wind 13% (onshore) – 38% (offshore)

Sonne 11.5%

Kernkraftwerke 83%

Faktische Vorteile der Kernkraft konfrontiert mit Mangel an gesellschaftlicher Akzeptanz



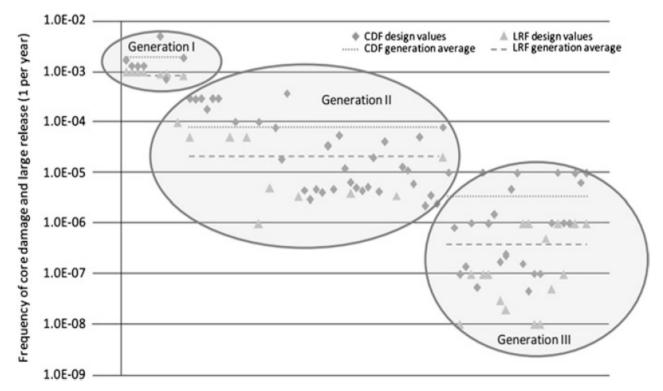
Eckdaten der Kernenergienutzung (Ende 2018)

- 450 Einheiten in Betrieb in 31 Ländern (davon 31 mit Betriebsstillstand in JP); installierte Leistung total 397.1 GWe; Anteil an Stromproduktion global bei 11%, in CH bei knapp 40%; jährlich ca. 11'500 tHM entladen
- 55 Einheiten in Bau (davon 12 in PRC, 6 in RUS, 7 in IND; VAE, BY, TR als Neueinsteiger); total 56.8 GWe; einige Länder mit Ausstiegsbeschlüssen
- EPR in PRC mit Bauzeitverzug (3 a) innerhalb des Kostenrahmens (?) gebaut/ in Betrieb genommen, FIN und F mit deren "Sprengung"
- 17'000 Reaktor-Jahre (real 12'250) als kumulierte Betriebserfahrung
- Zwei Unfälle auf INES-Stufe 7 (Tschernobyl, Fukushima 1), einer (TMI) plus 2-3 (Versuchsanlagen) auf Stufe 5, viele Ereignisse niederer Klassierung
- Schwere Unfälle keine nukleare Singularität (bspw. Bhopal mit 3787 Toten und 3900 Schwerverletzten), aber Furcht vor Strahlen-Spätschäden, verstärkt durch lineare Dosis-Wirkungs-Beziehung



Sicherheitsbeurteilungen

Abnahme der Häufigkeit von Kernschmelzen und grosser Freisetzungen dank Weiterentwicklungen (Generation I – III) und Nachrüstungen



Kein Widerspruch zwischen statistischen und probabilistischen Werten



Weiter verschärfte Sicherheitsanforderungen (I)¹⁾

- Should not overburden the use of nuclear energy with a selective "zero risk" expectation. There are **barriers to make** its **future**, potentially extended use, acceptable to the public such as the unequal treatment of probabilities and extraordinaryly high consequences, the perceived dread of even low dosis of radiation and the sensitivity to instabilities within the operational environment.
- Future nuclear power reactors should be less dependent on 1) properly designed (active) safety systems and security measures (including early operator actions) as well as protection against external events, either natural or malicious-intentional, 2) the adequacy of infrastructure, safety culture and operational modes and 3) on the stability of our **socities** (and geological formations).

1) D. Sornette, W. Kröger, S. Wheatley, New Ways and Needs for Exploiting Nuclear Energy, Springer 2017



Weiter verschärfte Sicherheitsanforderungen (II)

- Requirements, aiming as far as possible at a deterministic exclusion of serious conditions and states, are
- elimination of reactivity induced accidents by design,
 - forgiveness against loss of active core cooling by design and inherent/passive means,
 - avoidance/incineration of long-lived radioisotopes by fuel cycle designs, allowinfg for reduced husbandry times,
 - intrinsic proliferation resistance of the fuel, fuel cycle and related processes, etc.

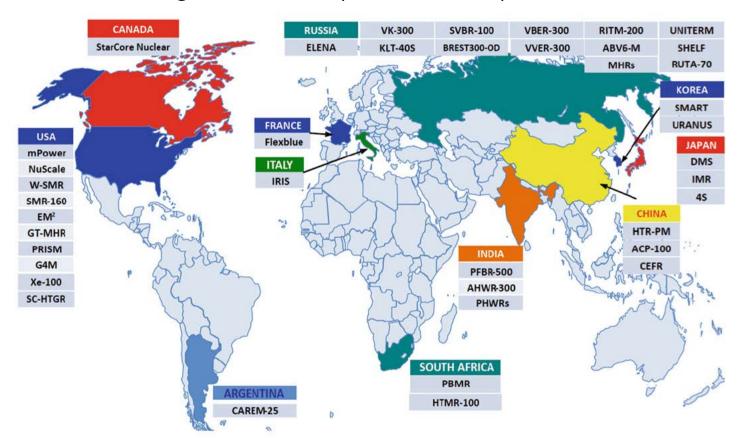
Examining Candidate Technologies (Generation IV and beyond)

- Concepts use different coolants, i.e. sodium, lead, molten salt or gas (helium), varying neutron spectrum, i.e. fast to thermal, are selfsustained critical or accelerator driven subcritical systems, and are designed as uranium/thorium burner, breeder or even waste burner
- Concepts are of **different power size** (large (1600 Mwe) to small (less than 300 Mwe)); there is a revival of small sized modular reactors (SMR)
 - as they allow for greater simplicity and adaptability to special needs and conditions (replacement of old coal-fired stations),
 - enjoy enhanced safety by inherent/passive design features/increased safety margins,
 - active powered systems and an essential need for human intervention can largely be avoided,
 - can be factory fabricated and allow for earlier return of investment.



Entwicklung modular aufgebauter Reaktoren kleiner bis mittlerer Leistung (SMR)

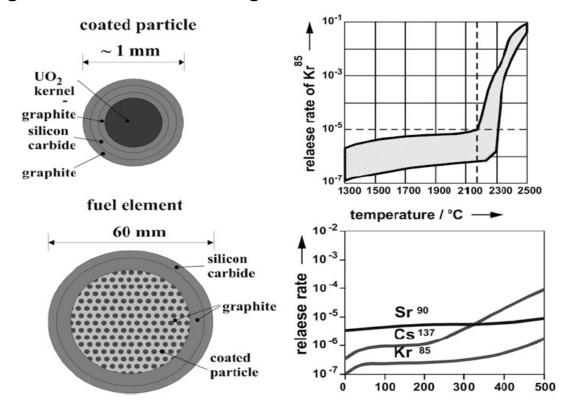
Super-sichere SMR weltweit in der Entwicklung, Wasser-gekühlte Konzepte als Brückentechnologie, HTR-PM (2 x 211 MWe) kurz vor Inbetriebnahme





Gas-gekühlte Hochtemperaturreaktoren mit keramischen, beschichteten Brennstoffpartikeln (HTR Modul, 300 MWt)

HTR Modul zeigt einzigartige inhärente Sicherheitseigenschaften und ein hohes Potential zur Erfüllung der verschärften Sicherheitsanforderungen; trotz technologisches Neuland, angezweifelte Wirtschaftlichkeit





Schlussfolgerungen

- Weiter zunehmender Weltenergiebedarf (geschätzt um knapp 30% allein bis 2040) wegen Bevölkerungs- und Wohlstandswachstum in Schwellen- und Entwicklungsländern
- Wieder steigender Stromverbrauch in Industrieländern infolge angestrebter Entwicklungen (Digitalisierung) und erweiterten Einsatzes (e-Mobilität)
- Verschärfter Kampf gegen Klimawandel und dessen Folgen "we are not on track"; Dekarbonisierung (Ersatz fossiler Brennstoffe) als Herkulesaufgabe
- Ausbau Wind- und Sonnenenergienutzung richtungweisend, aber allein nicht ausreichend und ab einer bestimmten Höhe unklug; abhängig von Komplementärtechnologien, Netzausbau und komplexen Kontrollsystemen
- Gefährdung der nationalen/regionalen Versorgungssicherheit durch temporär notwendige Importe als Teil der Energiestrategie vieler Länder
- Diversitärer Energiemix mit ausreichender Eigenerzeugung als Ziel; Enttabuisierung von Lösungsansätzen – Aufhebung von Technologieverboten (Weiterbetrieb bestehender, ggfs. Bau neuer AKW, Kohle/Gas mit CCS/U)



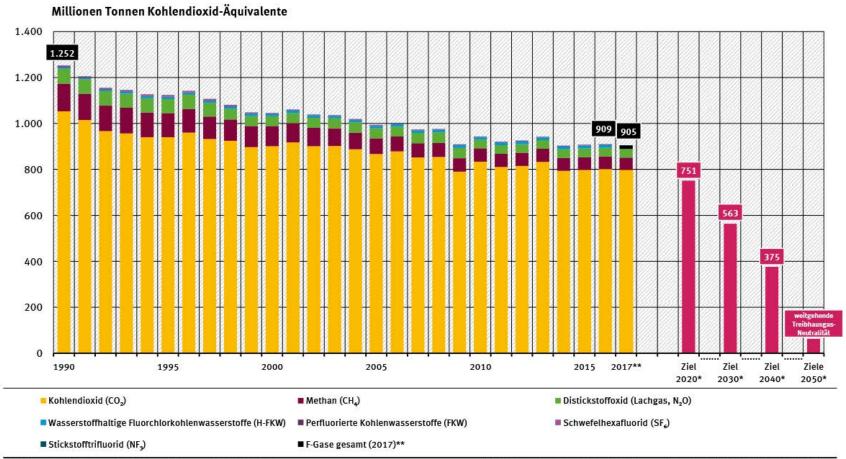


Dank für Ihre Aufmerksamkeit und allfällige Fragen



Treibhausgas-Emissionen in Deutschland

Treibhausgas-Emissionen seit 1990 nach Gasen

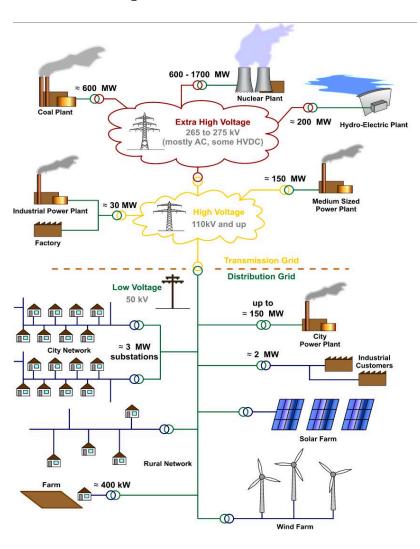


Emissionen ohne Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft tschland seit 1990 mach Gasen onzept der Bundesregierung (2010)

Quelle: Umweltbundesamt, Nationale Treibhausgas-Inventare 1990 bis 2016 (Stand 01/2018) und Zeitnahschätzung für 2017 aus UBA Presse-Information 08/2018

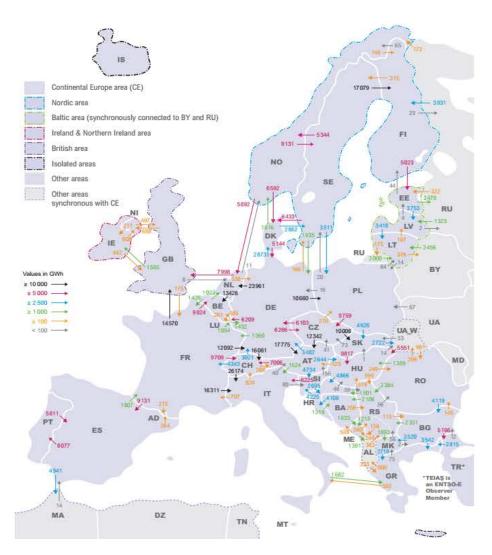


Einspeiseebenen des Stromnetzes



- Einspeisung auf unterschiedlichen Spannungsniveaus
- Reduzierung rotierender Massen (Turbo-Generatoren) zur Frequenzkontrolle
- Trennung zwischen Erzeugung und Verbrauch
- Regionale Sicht sinnvoll, aber deutsches Übertragungsnetz Teil des europäischen Verbundnetzes mit zunehmenden grenzüberschreitenden Flüssen

Das europäische Übertragungsnetz: Hochvernetzt und -entwickelt



Kennzahlen (2015):

- 5 synchrone Großflächen, betrieben von 41 TSOs aus 34 Ländern
- Versorgung von 534 Millionen Bürgern - 3'278 TWh Verbrauch, davon 15% grenzüberschreitend
- 314'333 km Hochspannungsleitungen

Hauptziele:

- Versorgungssicherheit, zuverlässiger **Betrieb**
- Effizienter, wettbewerbsfähiger Markt
- Optimales Management, technische Weiterentwicklung des Netzwerks

Schutz vor:

- Kaskadenauslösung
- Spannungs- oder Frequenzeinbruch
- Verlust der Synchronisation

[Quelle: ENTSO-E AT A GLANCE 2015]

Dezentrale (vs. zentrale) Gittertopologie¹⁾ **Ergebnisse**

- Komplexität steigt durch erhöhten Bedarf an digitalen Systemen zur Online-Überwachung und -Steuerung (Anpassung an sich ändernde Bedingungen)
- Sicherheitsprobleme werden größer (meist ungesicherte Geräte, Nutzung des öffentlichen Internets mit Eingangstoren für Hacking/Manipulationen)
- Keine wesentlichen Auswirkungen auf notwendigen Ausbau des Übertragungsnetzes (vielleicht etwas verzögert), erhöhte Anforderungen an Verteilnetz, ggfs. erhöhte Netzverluste
- Kosten steigen (moderat)

1) ESYS AG "(de-)zentralisierte Energiesysteme" (2018)