



WIR SCHAFFEN WISSEN – HEUTE FÜR MORGEN

Stefan Hirschberg – Labor für Energiesystem-Analysen, Energie-Forschungsbereiche, Paul Scherrer Institut

Entwicklungen und Herausforderungen in der Energiewirtschaft, auch in Bezug auf Klimaveränderung

22. Weiterbildungsseminar des Forum VERA, EMPA Dübendorf, 14. September 2018

Agenda

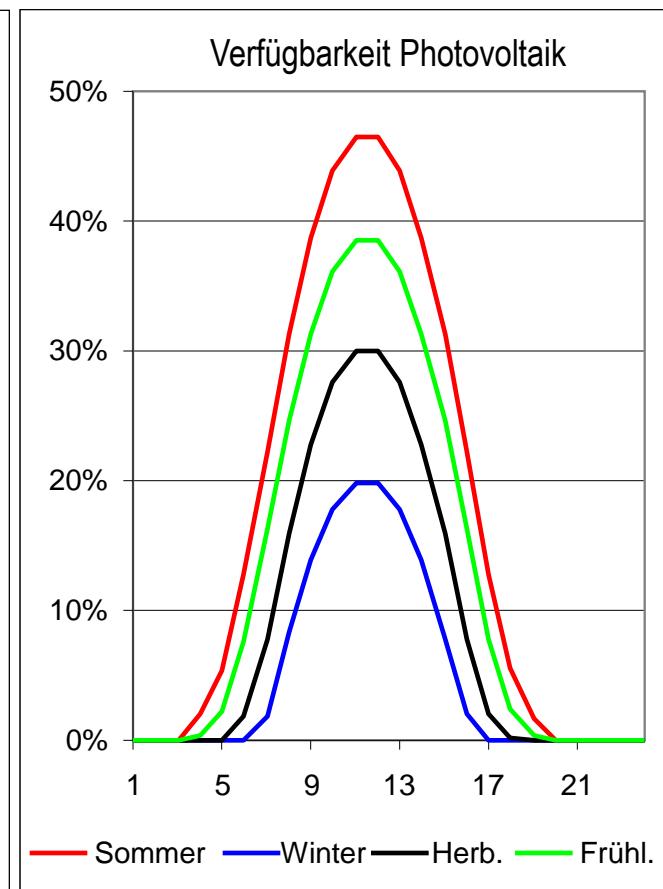
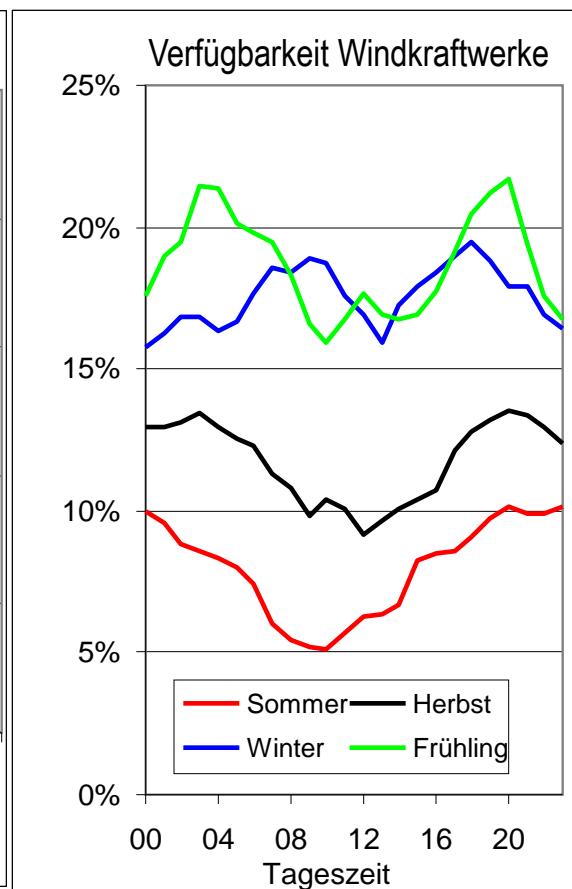
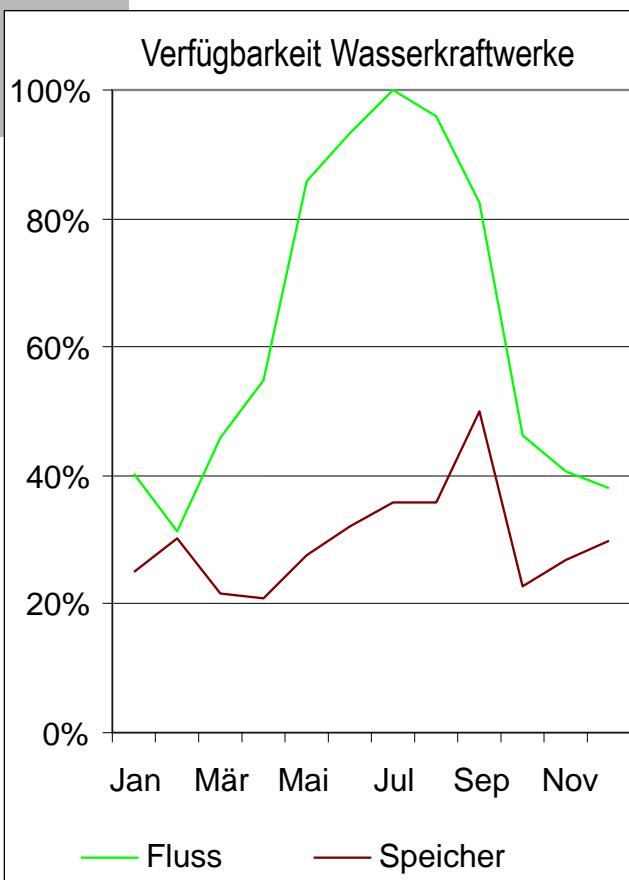
- **Einleitung**
 - Herausforderung
 - Ganzheitliche Systemanalysen am PSI
- **Technologische Optionen für zukünftige Elektrizitätsversorgung in der Schweiz**
 - Potenziale
 - Kosten
 - Umweltauswirkungen
- **Szenario-modellierung**
 - Systemmodell
 - Auswahl der Ergebnisse
- **Fazit**

Ziele der Energiestrategie 2050 des Bundes

- Reduktion des Energiebedarfs um 50%
($244 \text{ TWh} \rightarrow 125 \text{ TWh}$)
- Stabilisierung und möglicherweise Reduktion des Strombedarfs ($\leq 60 \text{ TWh}$)
- Reduktion der Pro-Kopf- CO_2 -Emissionen um 70%
- Schrittweiser Ausstieg aus der Kernenergie ($\approx 26 \text{ TWh}$)

Herausforderungen der zukünftigen Stromversorgung

Variabilität der erneuerbaren Energien

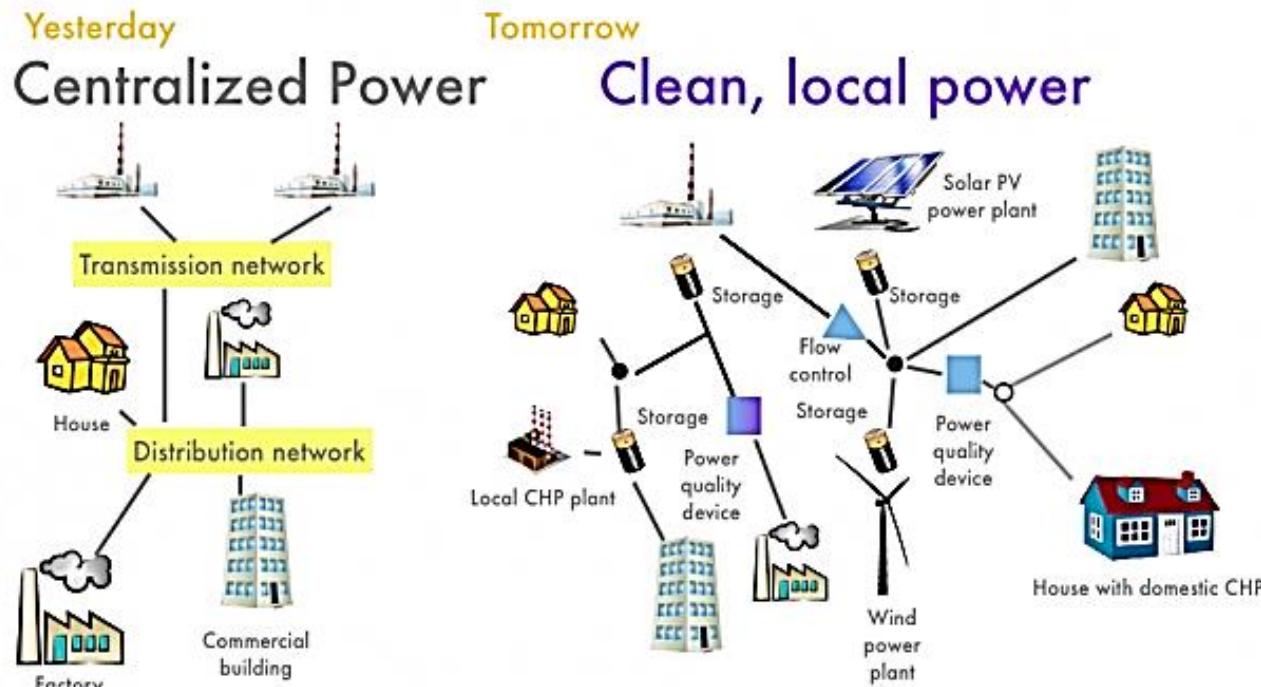


Wasserkraft

Wind

Photovoltaik

Renewable energy changes the electricity system

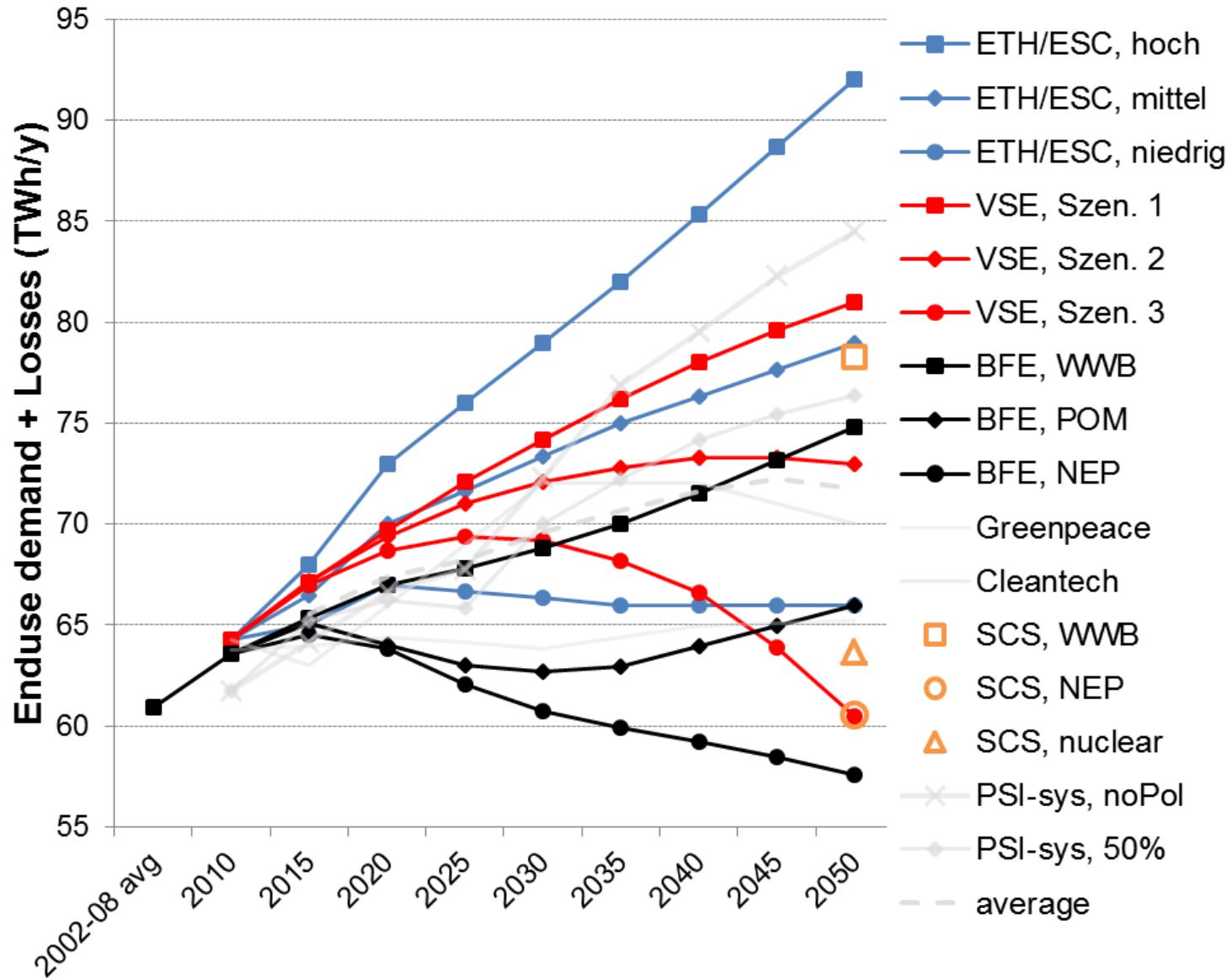


Source: <http://ilsr.org/challenge-reconciling-centralized-v-decentralized-electricity-system/>

Main challenges in electricity modelling but very important to model the full energy system since (1) electricity is fundamental for the overall efficiency improvement; (2) necessary for optimal (with view to efficiency, cost, climate protection goals, etc.) allocation of electricity to specific demand sectors:

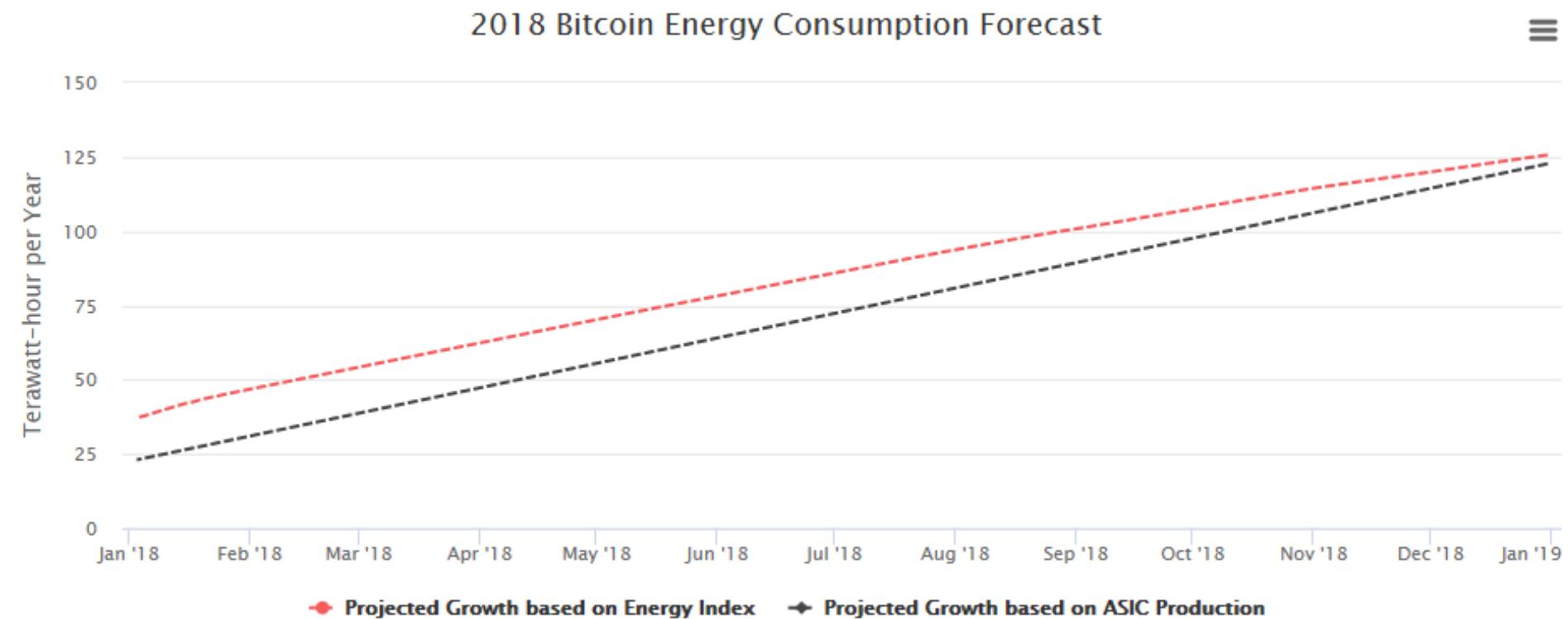
- Distinguishing between centralized and decentralized generation
- Representing electricity grid from high to low voltage
- Identifying storage options and new business models, e.g. prosumers
- Capturing the intra-annual variability of renewable generation and demand
- Assessing interactions between demand and supply

Stromnachfrage

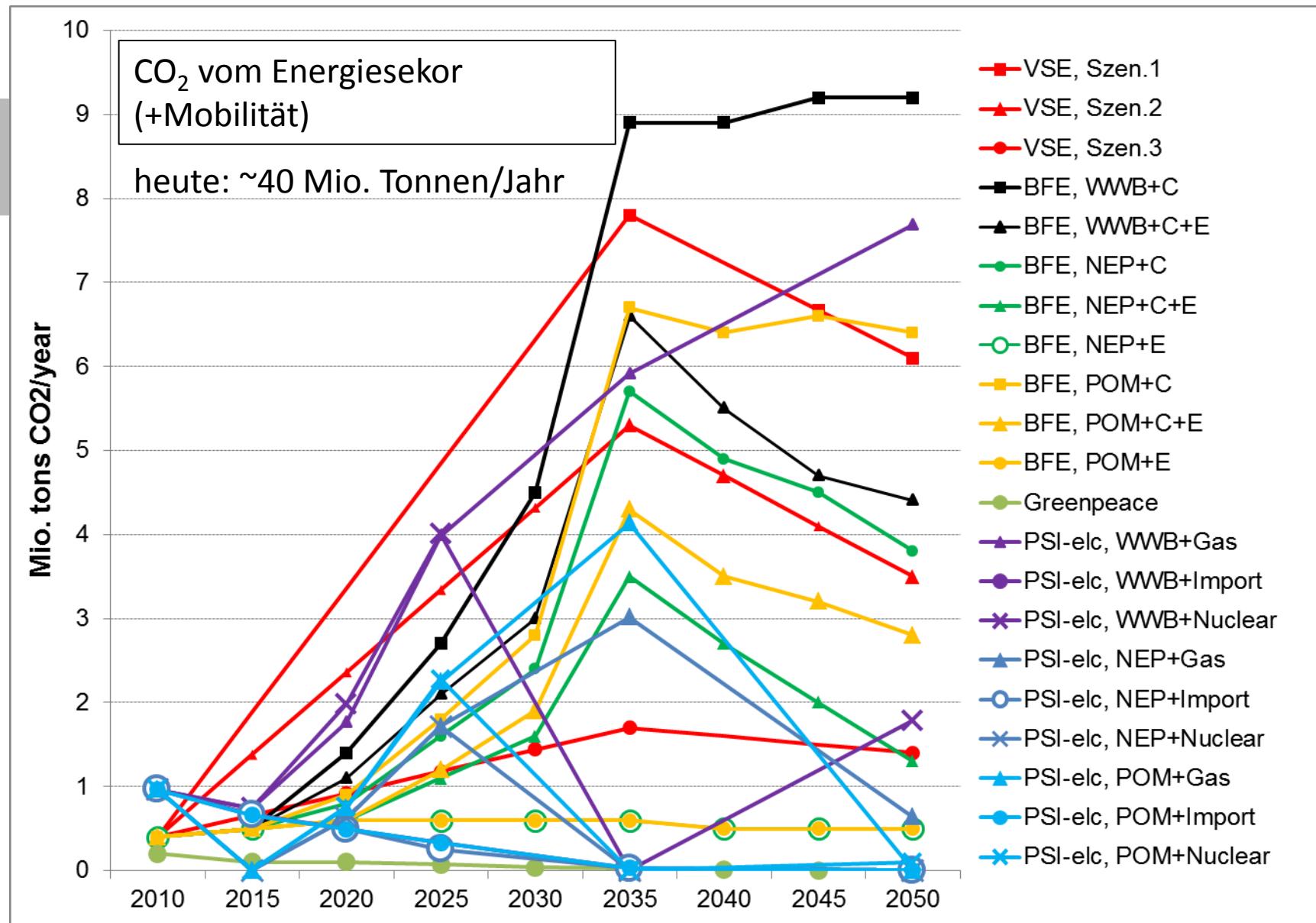


Quelle: Densing et al., 2014

Impacts of digitalization?

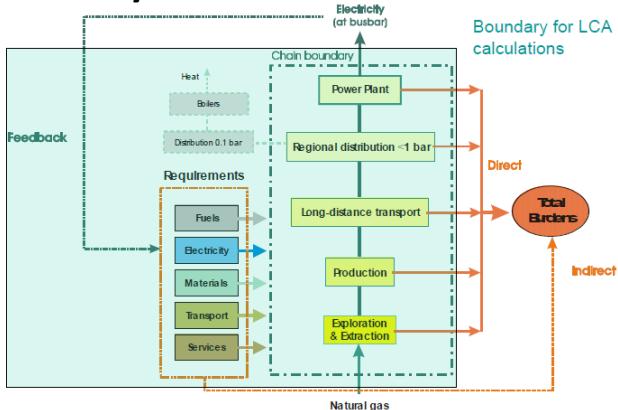


CO₂-Emissionen from Stromsektor (ohne Importe)

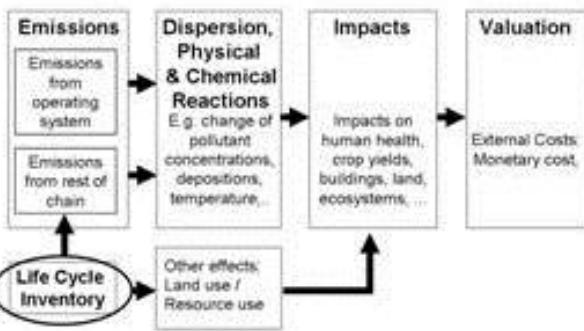


Methods, Models and Databases at PSI

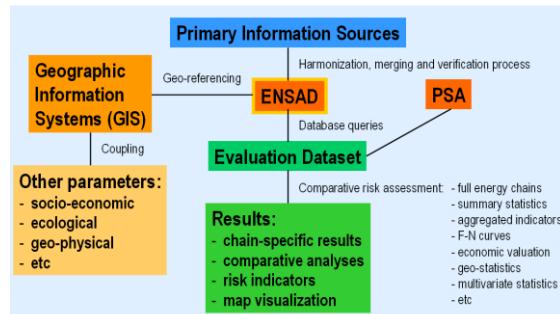
Life Cycle Assessment



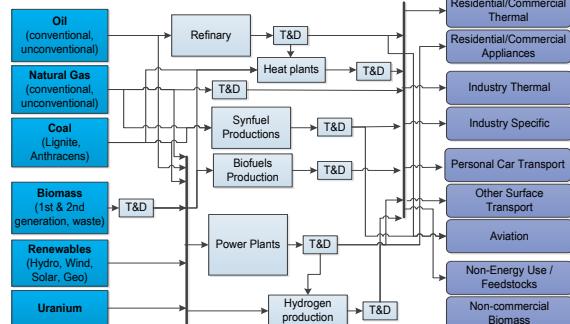
Impact Pathway Approach



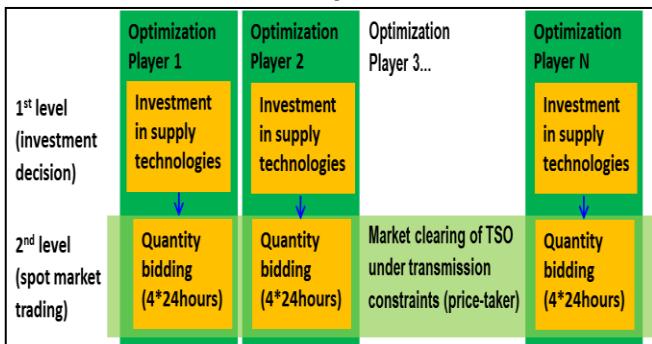
Risk Assessment



Swiss TIMES energy systems model

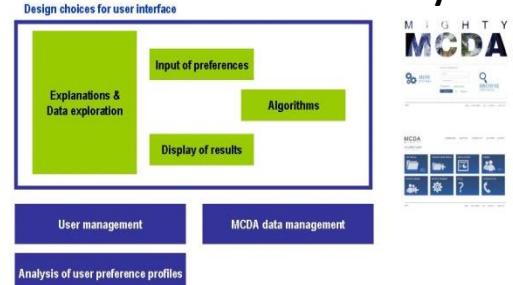


Bilevel Electricity Market Model

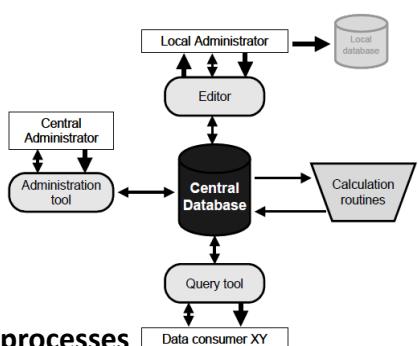


Integration:

Multi-Criteria Decision Analysis



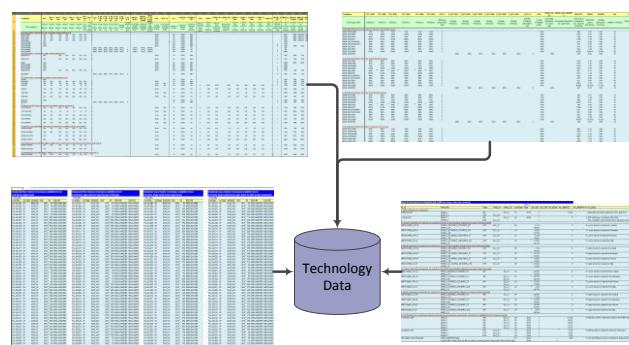
Ecoinvent Database



ENSAD Database



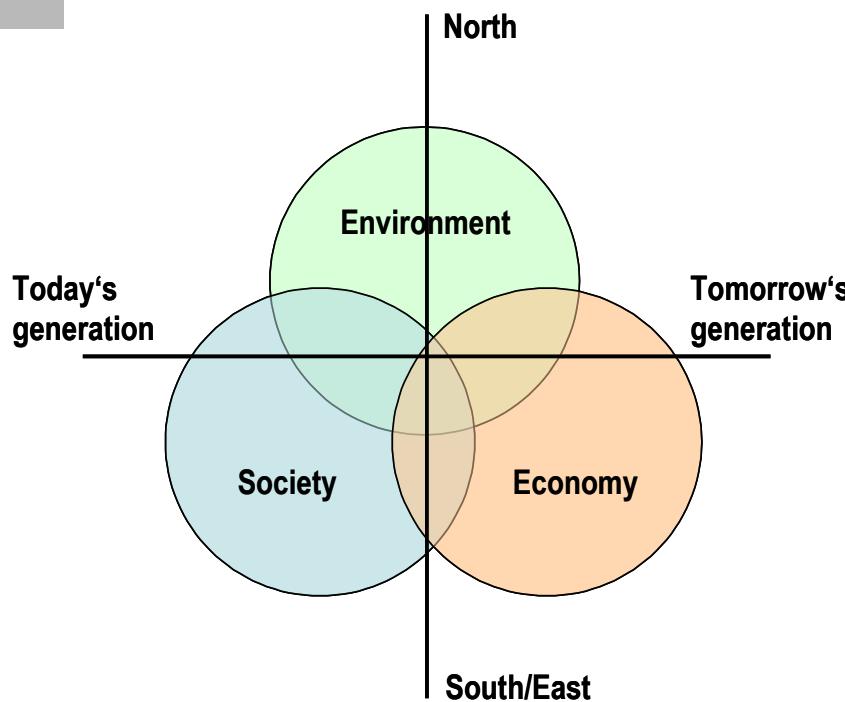
Technology Database



New Technologies



Sustainability Criteria



	Criterion
ENVIRONMENTAL DIMENSION	RESOURCES Energy Resources Mineral Resources (Ores)
	CLIMATE CHANGE
	IMPACT ON ECOSYSTEMS Impacts from Normal Operation Impacts from Severe Accidents
	WASTES Special Chemical Wastes stored in Underground Depositories Medium and High Level Radioactive Wastes to be stored in Geological Repositories
	IMPACTS ON CUSTOMERS Price of Electricity
	IMPACTS ON OVERALL ECONOMY Employment Autonomy of Electricity Generation
	IMPACTS ON UTILITY Financial Risks Operation
	SECURITY/RELIABILITY OF ENERGY PROVISION Political Threats to Continuity of Energy Service Flexibility and Adaptation
	POLITICAL STABILITY AND LEGITIMACY Potential of Conflicts induced by Energy Systems. Necessity of Participative Decision-making Processes
	SOCIAL AND INDIVIDUAL RISKS Expert-based Risk Estimates for Normal Operation Expert-based Risk Estimates for Accidents Perceived Risks Terrorist Threat
SOCIAL DIMENSION	QUALITY OF RESIDENTIAL ENVIRONMENT Effects on the Quality of Landscape Noise Exposure

Potentials, costs and environmental assessment of electricity generation technologies

Potenzielle, Kosten und Umweltauswirkungen von Stromproduktionsanlagen

Final report in English with summaries in German and French

Hauptbericht auf Englisch, mit Zusammenfassung auf Deutsch und Französisch



Date / Datum: November 2017

Place / Ort: Bern

Client / Auftraggeberin: Bundesamt für Energie BFE, 3003 Bern

Contractor / Auftragnehmerin: PSI – Paul Scherrer Institut

Authors / Autoren: Christian Bauer, Stefan Hirschberg (PSI, Lead), Y. Bäuerle, S. Biollaz, A. Calbry-Muzyka, B. Cox, T. Heck, M. Lehnert, A. Meier, H.-M. Prasser, W. Schenler, K. Treyer, F. Vogel, H.C. Wieckert, X. Zhang, M. Zimmermann (alle PSI), V. Burg, G. Bowman, M. Erni (WSL), M. Saar (ETHZ), M.Q. Tran (EPFL)

Contact / Kontakt: christian.bauer@psi.ch

The authors of this report are solely responsible for its content.

Für den Inhalt dieses Berichts sind ausschliesslich dessen Autoren verantwortlich.

Cite this report as / Zitierungsvorschlag:

Bauer, C., S. Hirschberg (eds.), Y. Bäuerle, S. Biollaz, A. Calbry-Muzyka, B. Cox, T. Heck, M. Lehnert, A. Meier, H.-M. Prasser, W. Schenler, K. Treyer, F. Vogel, H.C. Wieckert, X. Zhang, M. Zimmermann, V. Burg, G. Bowman, M. Erni, M. Saar, M.Q. Tran (2017) "Potentials, costs and environmental assessment of electricity generation technologies." PSI, WSL, ETHZ, EPFL. Paul Scherrer Institut, Villigen PSI, Switzerland.

Bundesamt für Energie BFE

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen; Postadresse: CH-3003 Bern

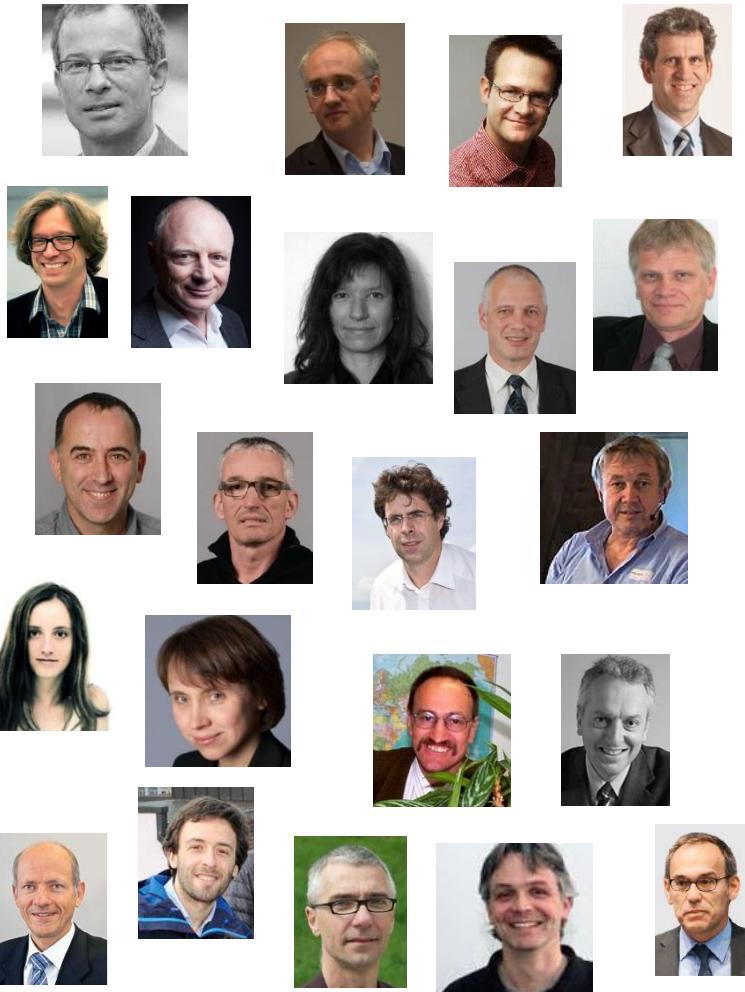
Tel. +41 58 462 56 11 · Fax +41 58 463 25 00 · contact@bfe.admin.ch · www.bfe.admin.ch

Autoren & Reviewer

Autoren: PSI, WSL, EPFL, ETHZ

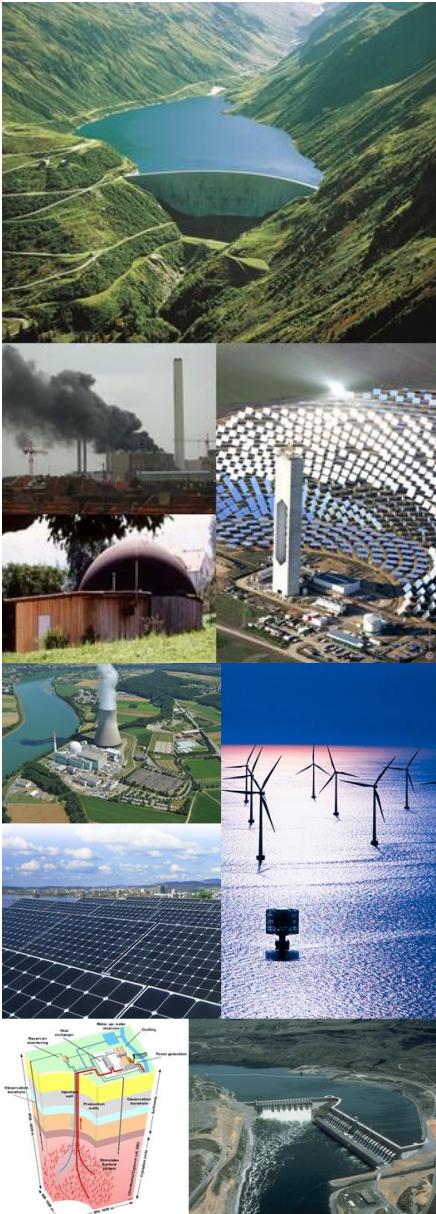


Reviewer: BFE & Wissenschaft



Stromproduktionstechnologien

- Wasserkraft (CH)
- Windenergie (onshore CH, offshore EU)
- Fotovoltaik (CH)
- Strom aus Biomasse (CH)
- Geothermie (CH)
- Wellen- und Gezeitenenergie (EU)
- Strom aus Solarthermie (EUMENA)
- Kernenergie
- Strom aus Erdgas (CH) und Kohle (EU) (CCS)
- Brennstoffzellen (CH)
- Neuartige Technologien (Biomass, Kernfusion, Geothermie)



Zielsetzung & Rahmenbedingungen

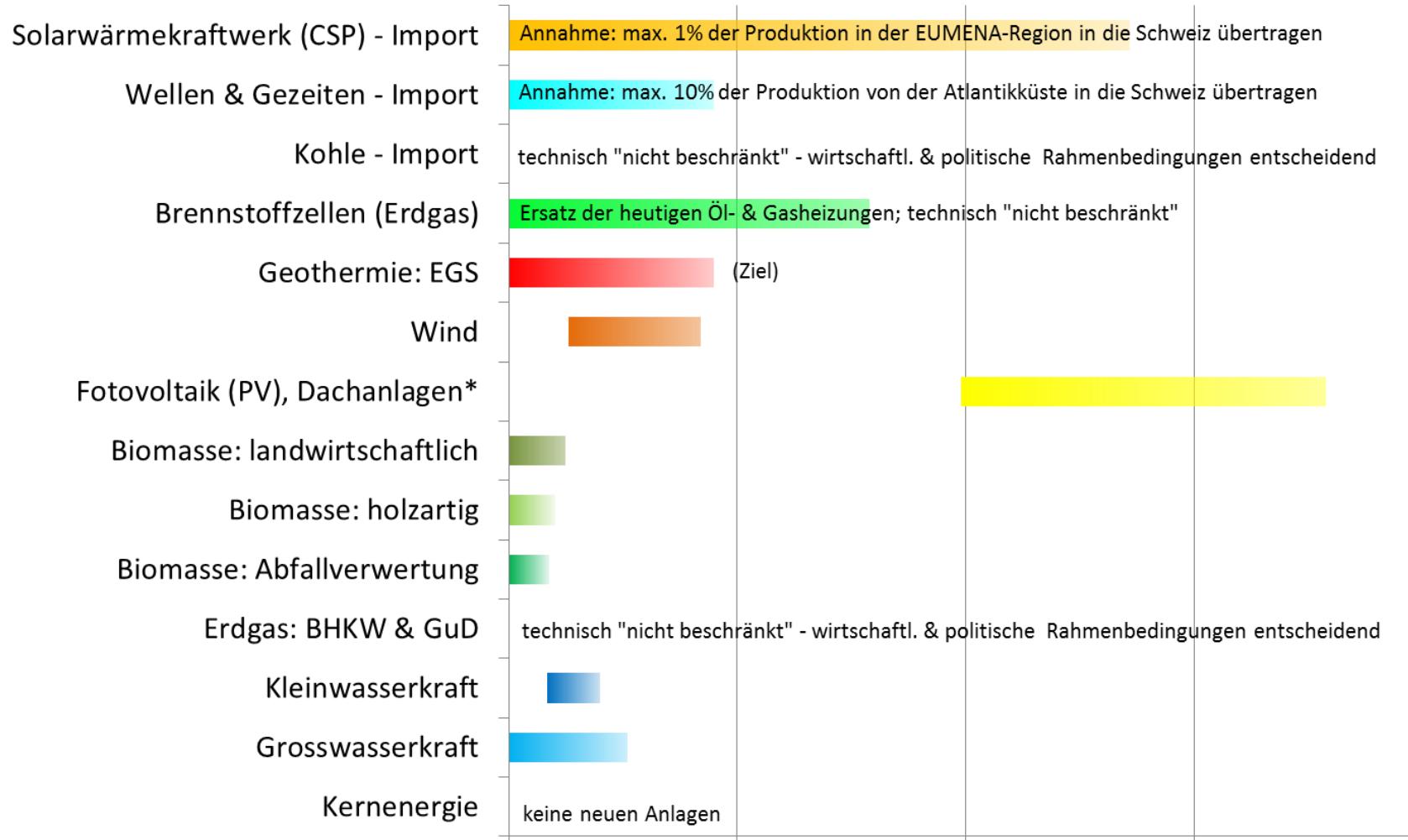
- Projekt finanziert durch BFE und unterstützt von SCCER Supply of Electricity & SCCER Biosweet
- Ziele: Inputs für «Energieperspektiven» und Basis für Technologie-monitoring
- Erweiterung, Verbesserung und Aktualisierung einer früheren PSI-Studie für das BFE (Hirschberg et al., 2005)
- Basis: Literatur und eigene Berechnungen
- Stromproduktionskosten: Levelized Costs of Electricity (LCOE)
- Umweltauswirkungen: Life Cycle Assessment (LCA)
- Berücksichtigung der technologischen Entwicklung bis 2050
- Explizite Sensitivitätsanalysen für Stromproduktionskosten
- Harmonisierung bestimmter Kernannahmen und -daten
- Konsistenz bei Kosten und Umweltauswirkungen durch «zentralisierten Ansatz»
- Qualitätskontrolle

Potenzielle der Stromproduktion

- «Potenzialbegriffe»: theoretisch, technisch, ökologisch, wirtschaftlich, nachhaltig, realistisch, erwartet
- Hier: Fokus auf technischen Potenzialen; unter Berücksichtigung von weiteren limitierenden Faktoren (technologiespezifisch)
- Quantifizierung der «**ausschöpfbaren Potenziale**»*
- Berücksichtigung der technischen Entwicklung bis 2050

*«Ausschöpfbares Potenzial»:
entspricht dem technischen Potenzial unter Berücksichtigung
wirtschaftlicher und ökologischer Einschränkungen; gesellschaftliche
Faktoren sind zum Teil berücksichtigt

Potenzielle*: Zusätzliche Stromproduktion 2050



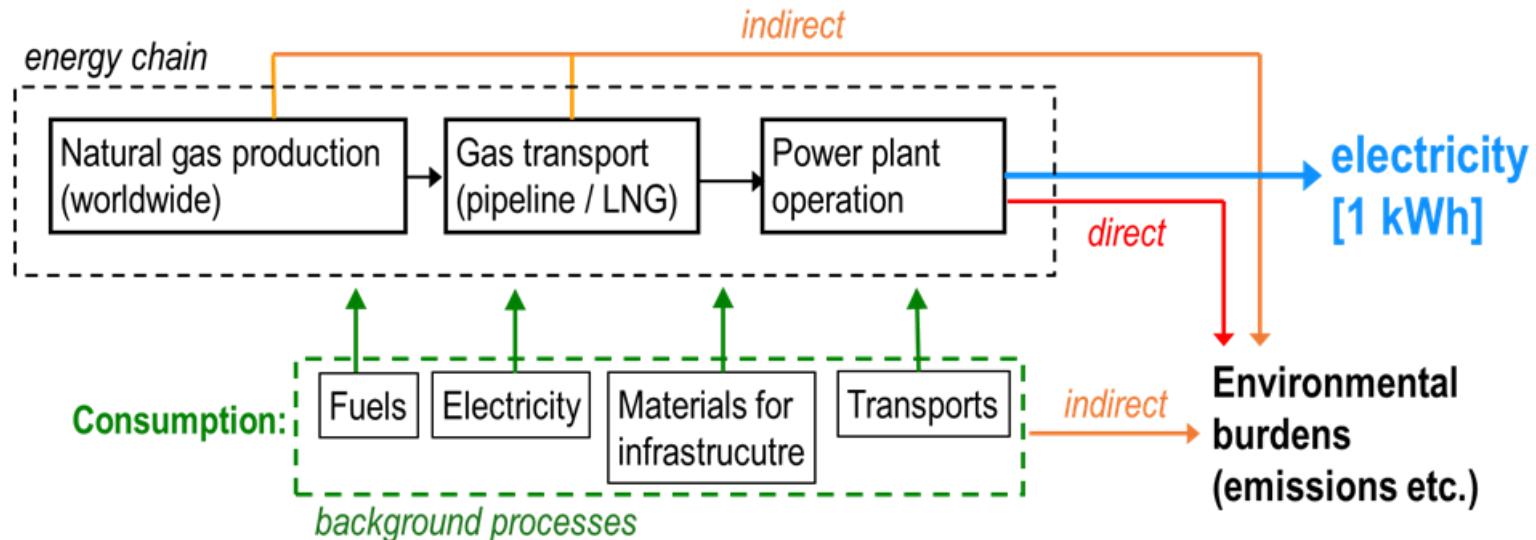
Quelle: Bauer&Hirschberg et al. 2017

0 5'000 10'000 15'000 20'000

GWh/a (zusätzliche Produktion)

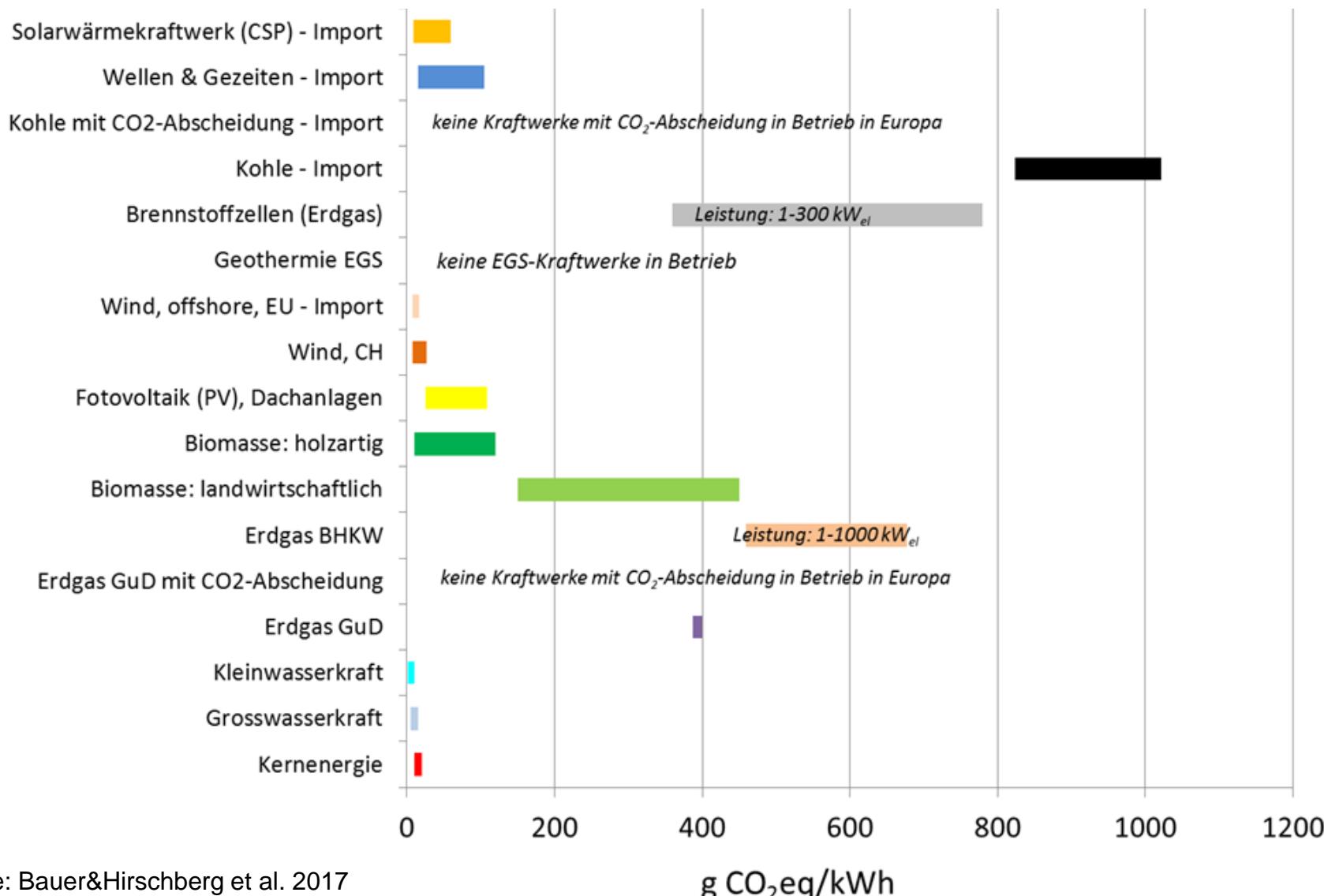
* "ausschöpfbare Potenziale"

Umweltauswirkungen Ökobilanzen – Life Cycle Assessment (LCA)

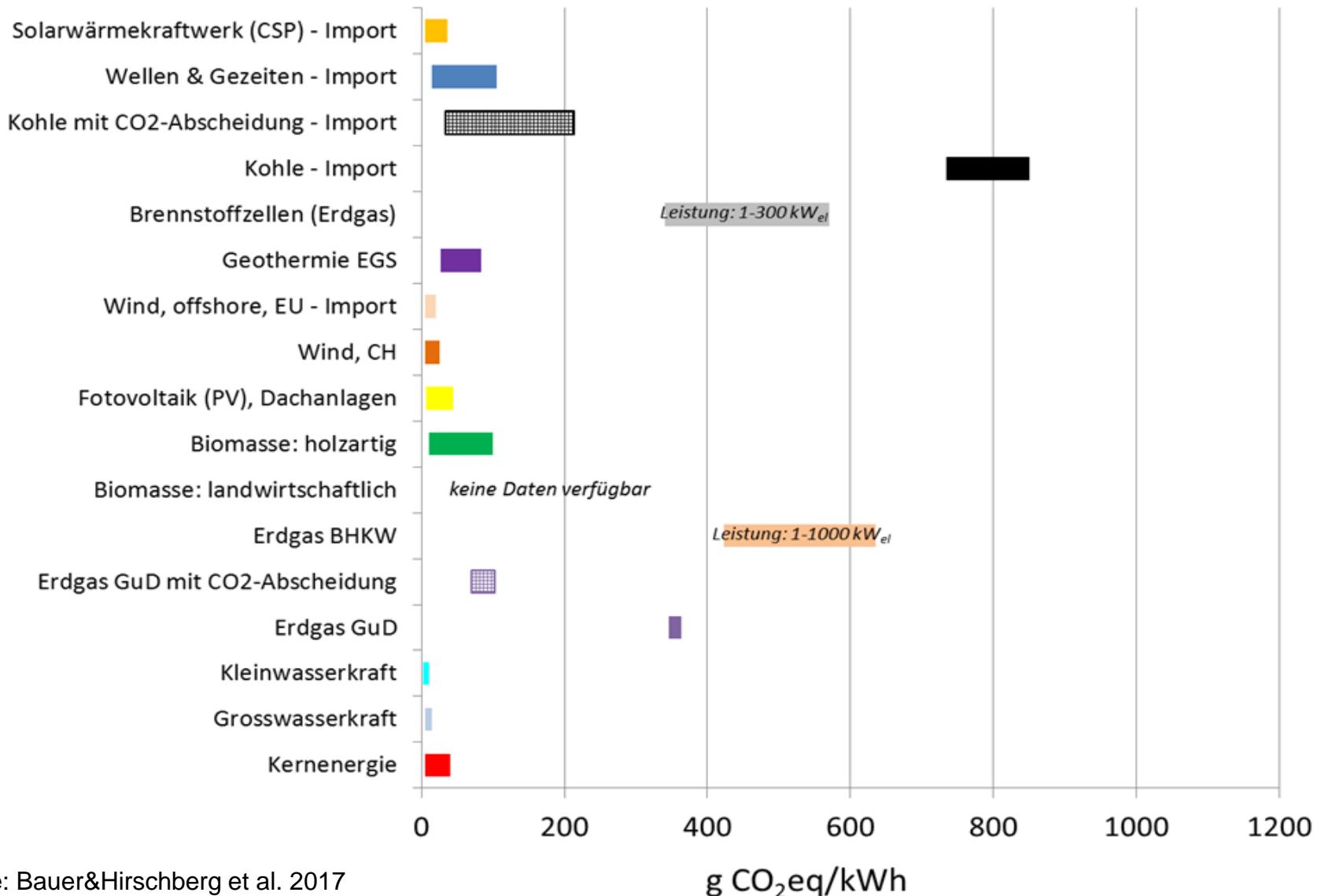


- LCA berücksichtigt den gesamten Lebenszyklus von Produkten: Produktion, Nutzung, Entsorgung/Recycling
- Stromproduktion: Kraftwerksbetrieb & -bau, Brennstoffversorgung und alle zugehörigen Versorgungsketten
- Berücksichtigung von Emissionen in Luft, Wasser und Boden, Landnutzung, Ressourcenverbrauch
- Berücksichtigung einer Vielzahl potenzieller Umweltschäden: Klimawandel, Zerstörung der Ozonschicht, Feinstaub, Versauerung, etc.
- Primäre Datenquellen: ecoinvent v3.2 & eigene Berechnungen

Umweltauswirkungen Treibhausgasemissionen heute

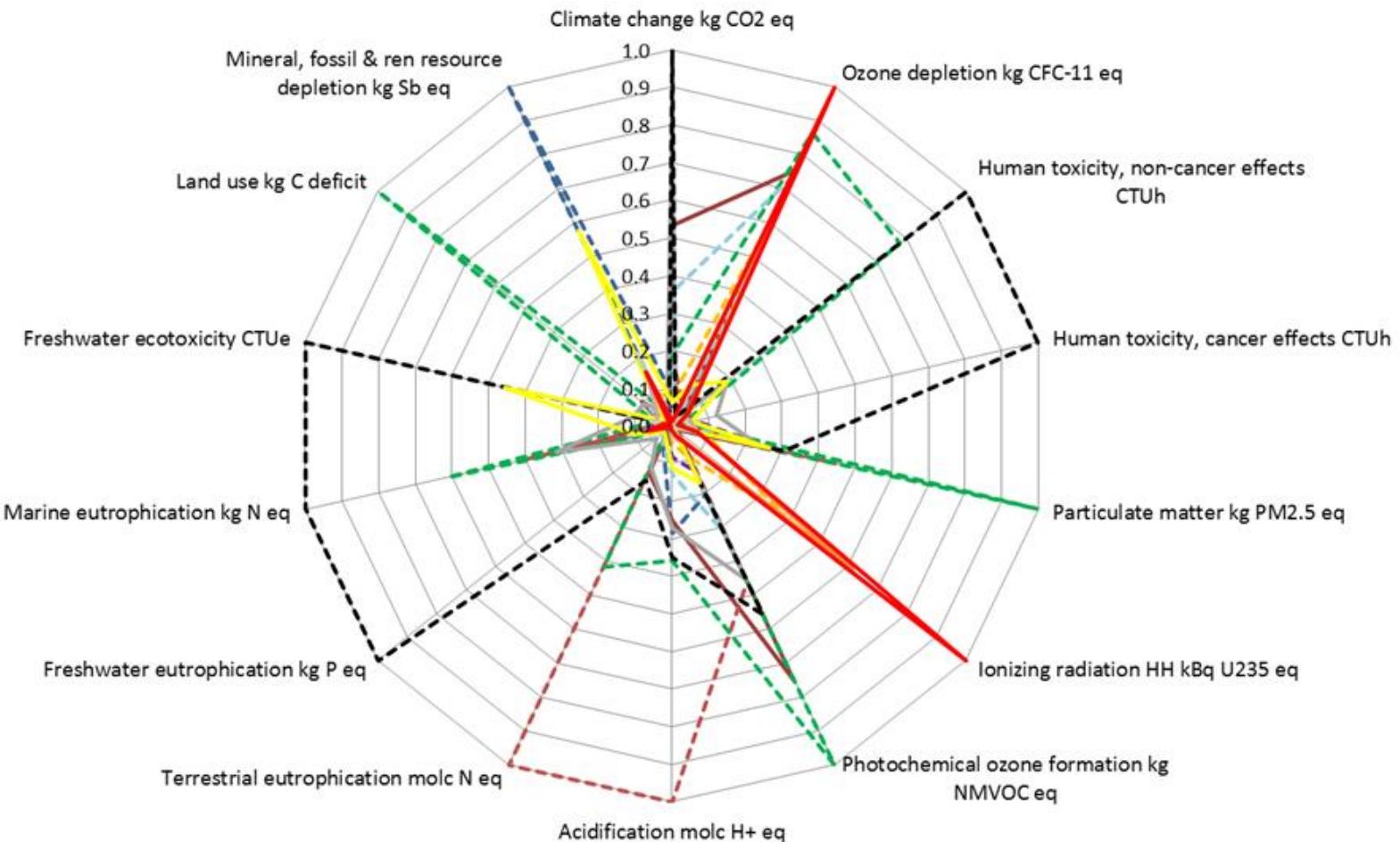


Umweltauswirkungen Treibhausgasemissionen 2050



Umweltauswirkungen

Weitere Indikatoren (heute)



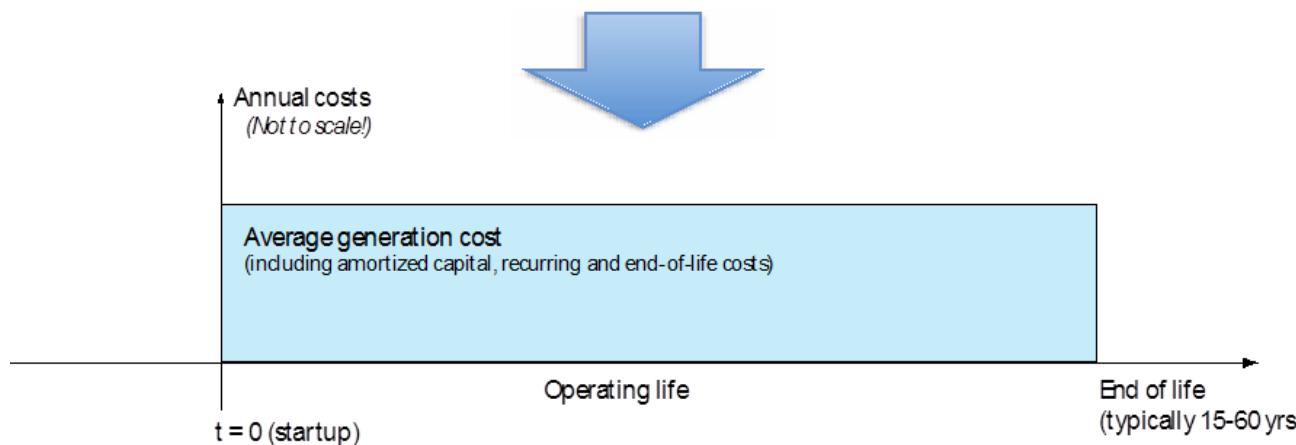
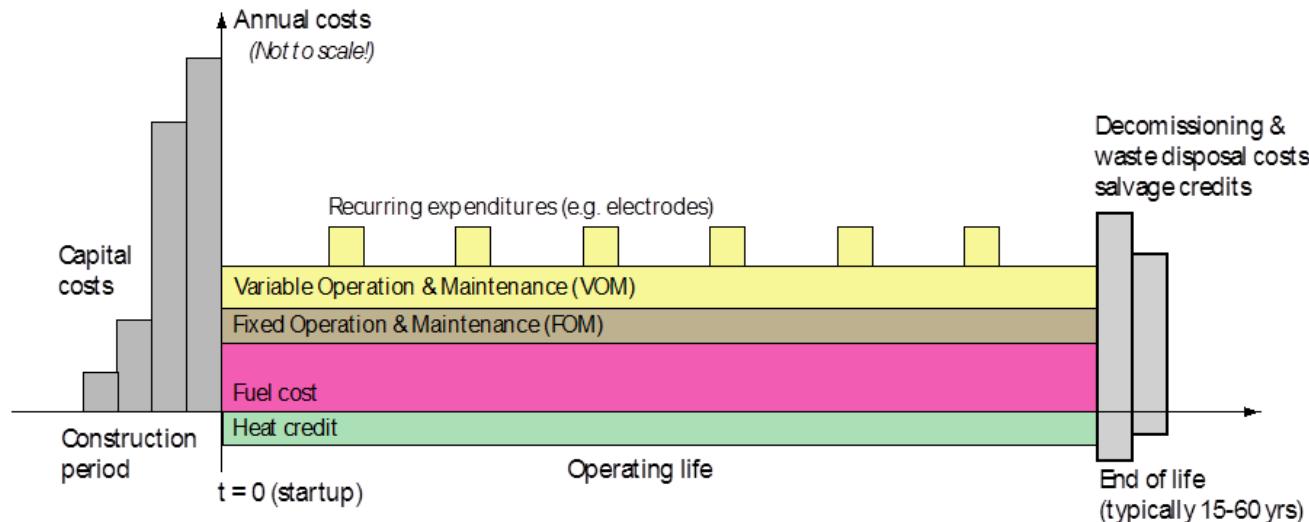
Quelle: Bauer&Hirschberg et al. 2017

Stromproduktionskosten

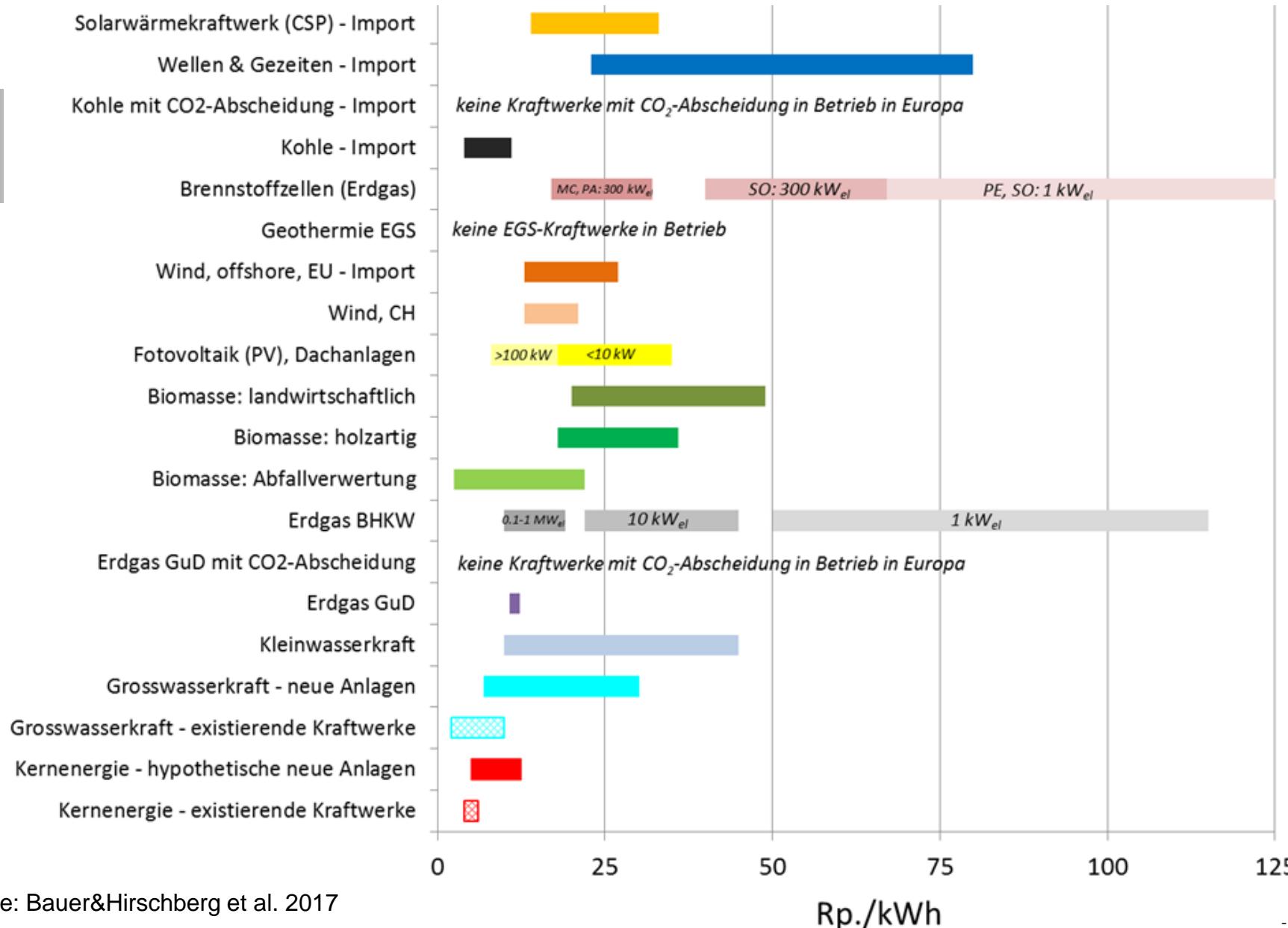
«Levelized costs of electricity» (LCOE)

Konsistenz:

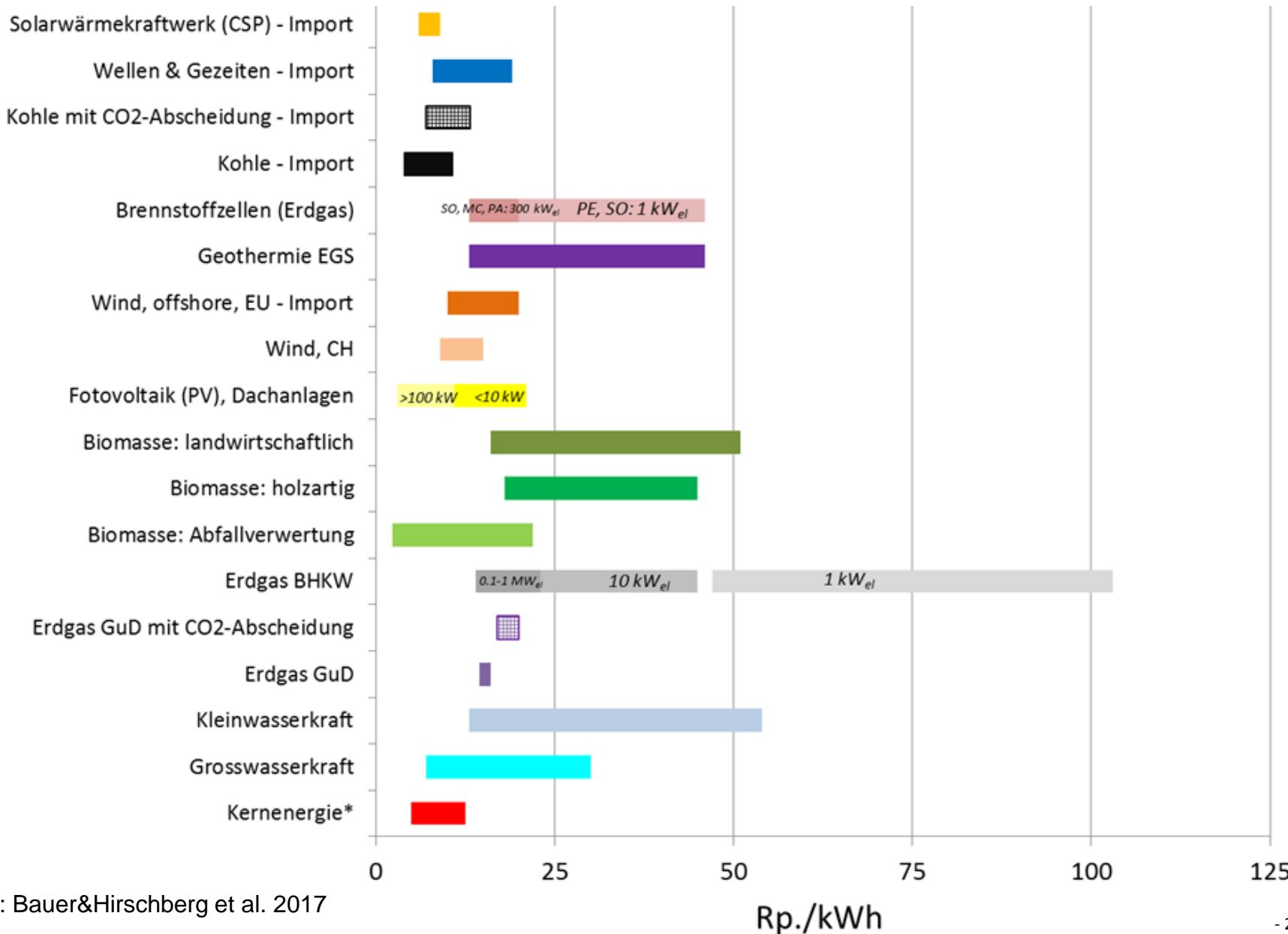
Brennstoffkosten, Zinssatz, Zukünftige Entwicklung, Wärmegutschriften



Kosten der Stromproduktion: 2015/2016



Kosten der Stromproduktion 2050

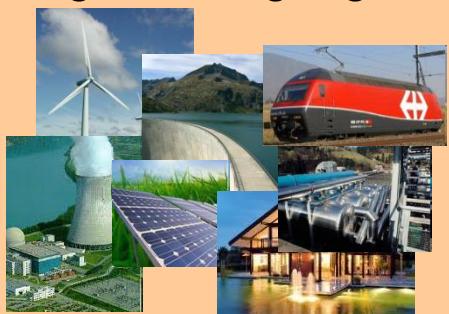


Szenarioanalysen

- In der Schweizer Energieversorgung gibt es bedeutende ***Unsicherheiten***
- Diese Unsicherheiten können ***die gesamte Energieversorgung*** beeinflussen

Heute

Schweizer Energieversorgung



Klimapolitik?

Zukünftige Stellung von Geothermie, CCS,... ?

Rolle der Atomenergie?

Ziel:

- Analysieren, inwiefern diese Unsicherheiten die zukünftige Stellung von spezifischen Technologien beeinflussen können.
- Unter welchen Bedingungen sind spezifische Technologien robust?

Zukunft

Schweizer Energieversorgung



Technologieentwicklung?

Entwicklung der Energiepreise?

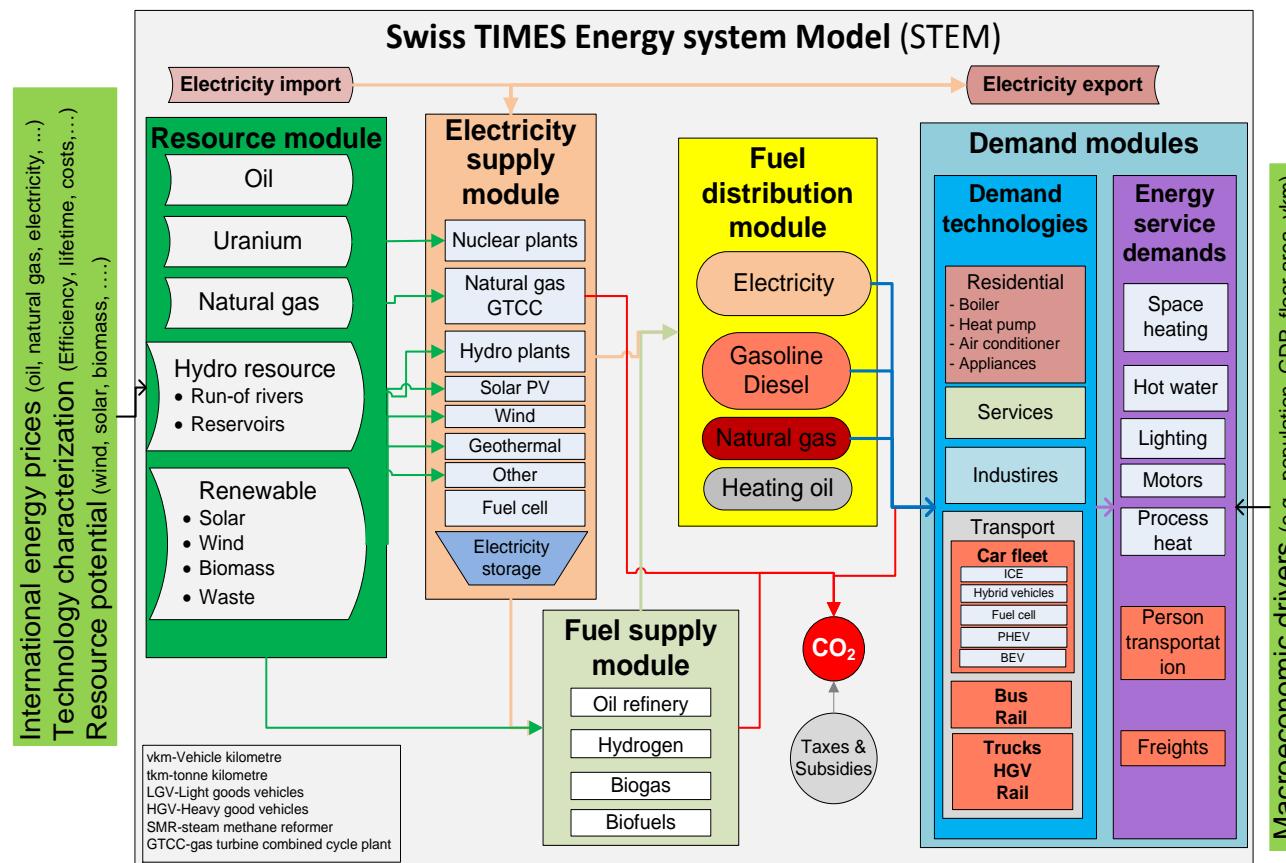
Objective of the scenario study

Providing insights regarding the penetration of storage technologies and other flexibility options in the Swiss energy system

Integrated scenario analysis based on an optimization algorithm which aims at minimizing the discounted energy system cost over the period of 2015 – 2050

Das Schweizer TIMES-Energiesystemmodell

- Abbildung des gesamten Schweizer Energiesystems unter Kostenoptimierungsbedingung
 - Langer Zeithorizont (>2050) kombiniert mit hoher unterjährigen Auflösung (288 Typstunden)
 - Detaillierte Module für den Umwandlungssektor sowie verschiedene Nachfragesektoren

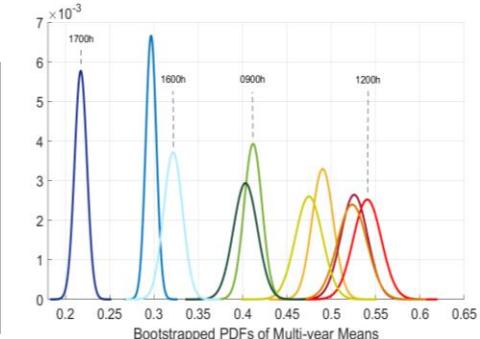


Speicherrelevante Modellspezifika von STEM

01

Variabilität erneuerbarer Energien

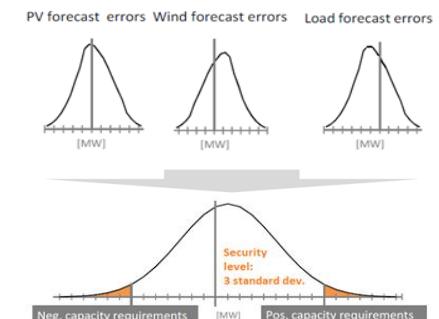
Basierend auf historischen Ganglinien für das Wind und Sonnenenergiedargebot; Modell unterstellt Sicherstellung der Versorgungssicherheit mit ausreichend gesicherter Leistung/Erzeugung



02

Märkte für Systemdienstleistungen

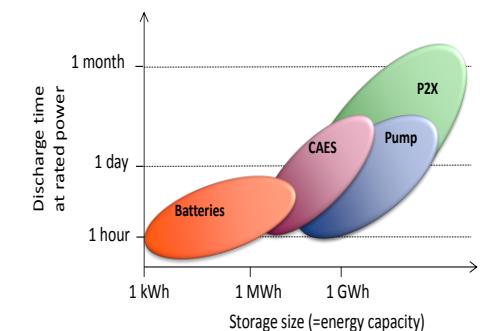
Kraftwerke im Wettbewerb zur Stromerzeugung sowie zur Bereitstellung von Reserveleistung; Speichertechnologien können an den Märkten für Systemdienstleistungen als "Virtuelle Kraftwerke" teilnehmen



03

Strombasierte Speichersysteme

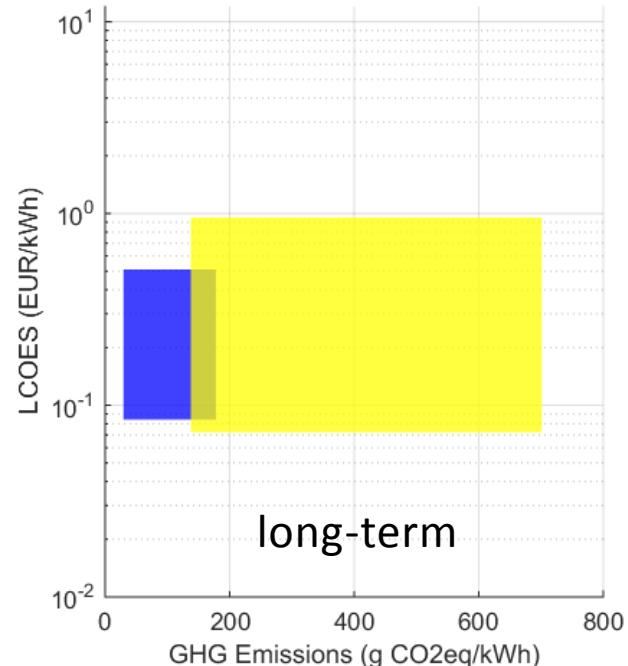
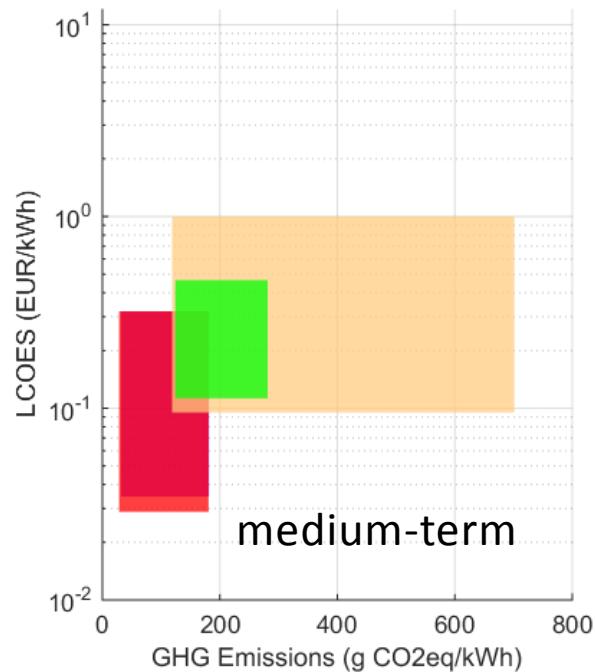
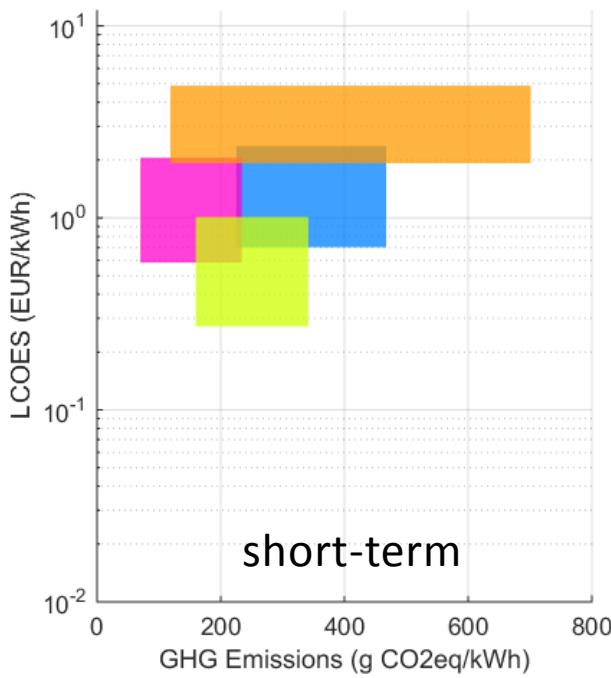
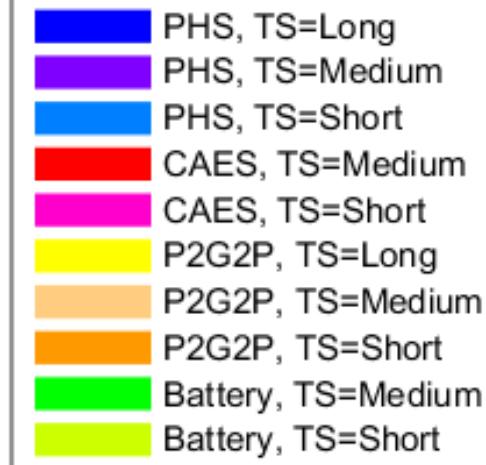
Pumpspeicherkraftwerke, Batterien unterschiedlicher Grösse und Speicherdauer sowie für verschiedene Anwendungsbereiche, Druckluftspeicher, Power-to-X Systeme



P-2-Storage-2-P: Costs vs GHG emissions

Power rating: 100 MW

Source: Zhang et al., 2017



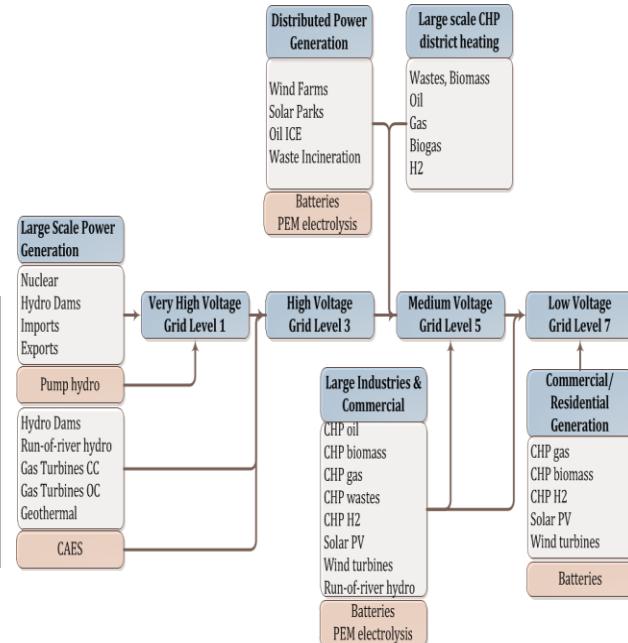
Considering variation of system cost, efficiencies and lifetimes, electricity sources and prices
 electricity price: 0-15 Rp./kWh
 GHG intensity: 20-120 g CO₂eq/kWh (wind power – CH supply mix)

Stromnetzrelevante Modellspezifika von STEM

01

Abbildung unterschiedlicher Netzebenen

Übertragungskosten und –verluste in Abhängigkeit von der Netzebene; Modellierung spezifischer Kraftwerkstypen je Netzebene; Berücksichtigung der wichtigsten Bedingungen für den Kraftwerkseinsatz

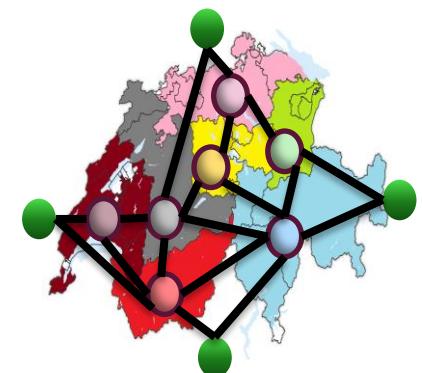


* Grid levels 2, 4 and 6 correspond to transformers

02

Abbildung der Netztopologie

Modellierung des Übertragungsnetzes mit 15 Knoten, welche 316 bidirektionale Verbindungen darstellen; Unterscheidung von 7 Schweizer Regionen, 4 Knoten für den Stromaussenhandel mit den Nachbarländern und 4 Knoten für die derzeitig existierenden Kernkraftwerke



Zwei Szenarien – Basis (**Baseline**) & Klimaschutz (**Climate**) und ihre wichtigsten Charakteristika:



Nachfrage nach Energiedienstleistungen

Basierend auf dem "Weiter Wie Bisher" (WWB) Szenario der Schweizer Energie Strategie einheitlich in beiden Szenarien; inkl. endogener Energieeinsparmassnahmen



Optionen zur Strombereitstellung

Ausstieg aus der Kernenergie bis 2035; Möglichkeit zum Stromaussenhandel sowie des Zubaus grosser Erdgaskraftwerke neben zahlreichen Optionen zur Nutzung erneuerbarer und nicht-erneuerbarer Energien



Klimapolitik (unterschiedliche Szenarioannahmen)

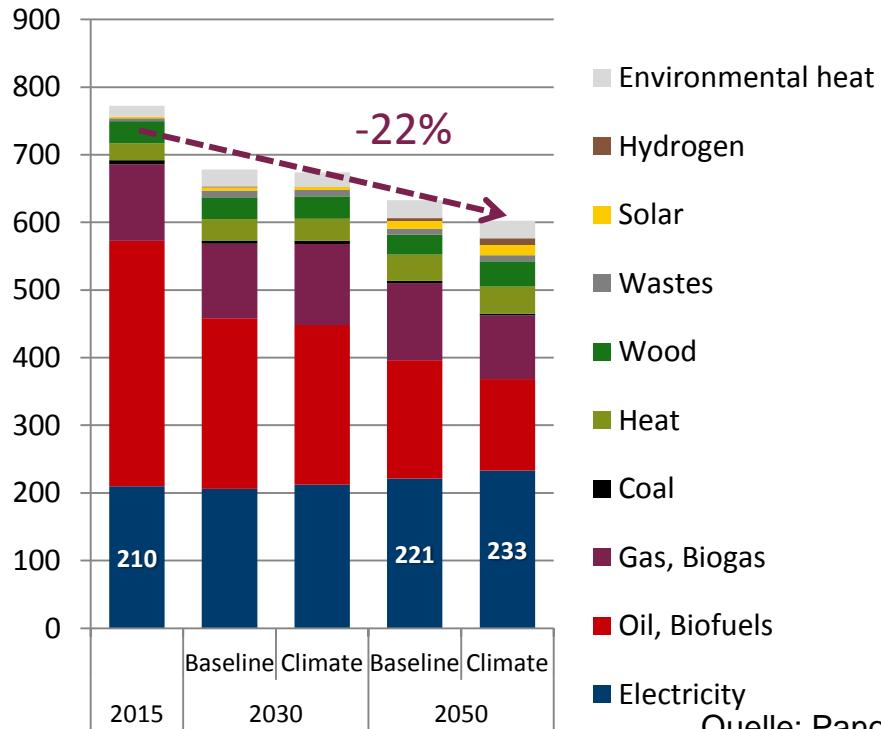
Basisszenario: Anstieg der CO₂ Steuer auf 140 CHF/tCO₂ in 2050

Klimaschutzszenario : -50% CO₂ Emissionsreduktion in 2050 ggü. 1990
(Implementierung der Schweizer Klimaziele des Paris-Abkommens (NDC) climate pledges)

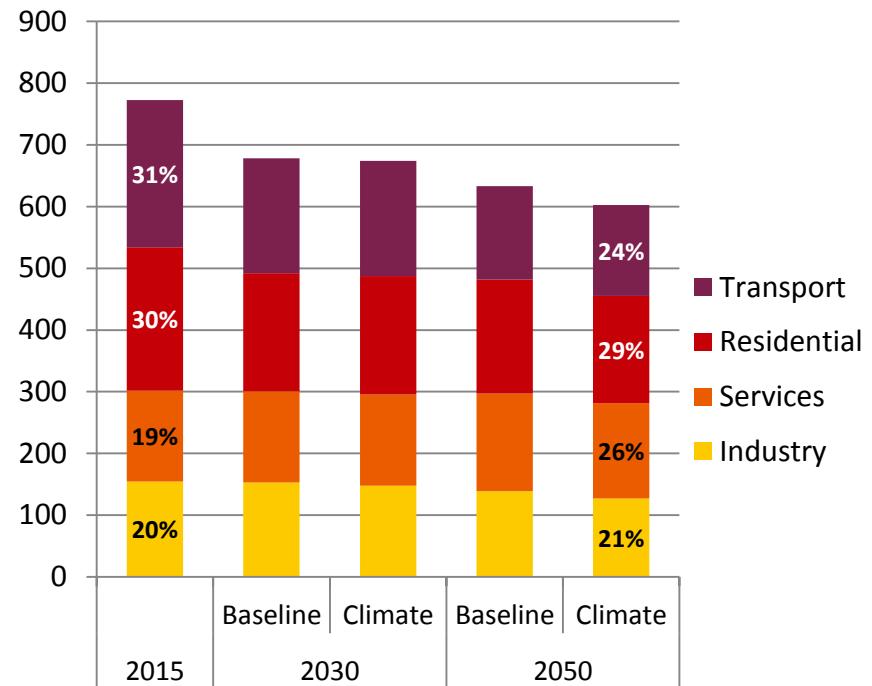
Endenergieverbrauch (exkl. internationaler Luftverkehr)

- Nur leichter Anstieg der Stromnachfrage bis 2030 aufgrund von Effizienzsteigerungen
- ... jedoch verstärkter Anstieg nach 2030 durch neue Stromanwendungen (Verkehr & Wärme)

Final energy consumption in all sectors (PJ)



Final energy consumption by sector (PJ)

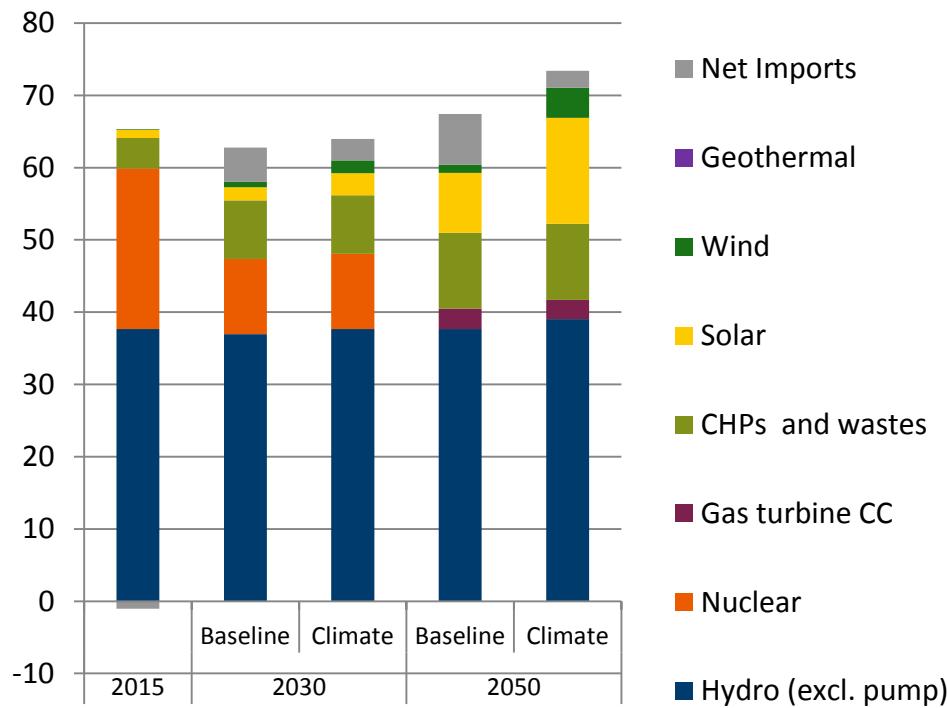


Quelle: Panos&Kober 2017

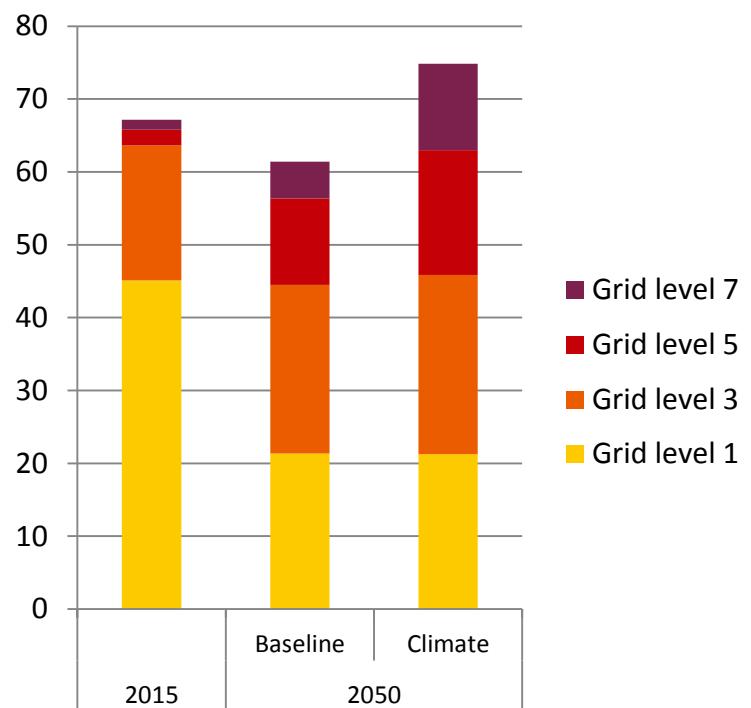
Strombereitstellung

- Variable erneuerbare Energien mit 27% Bereitstellungsanteil im Klimaszenario in 2050
- Stromerzeugung auf der Niederspannungsebene (level 7) steigt auf bis zu 16% Anteil an
- Stromerzeugung aus Erdgas zur Bedarfsdeckung in den Wintermonaten

Nettostrombereitstellung (TWh)

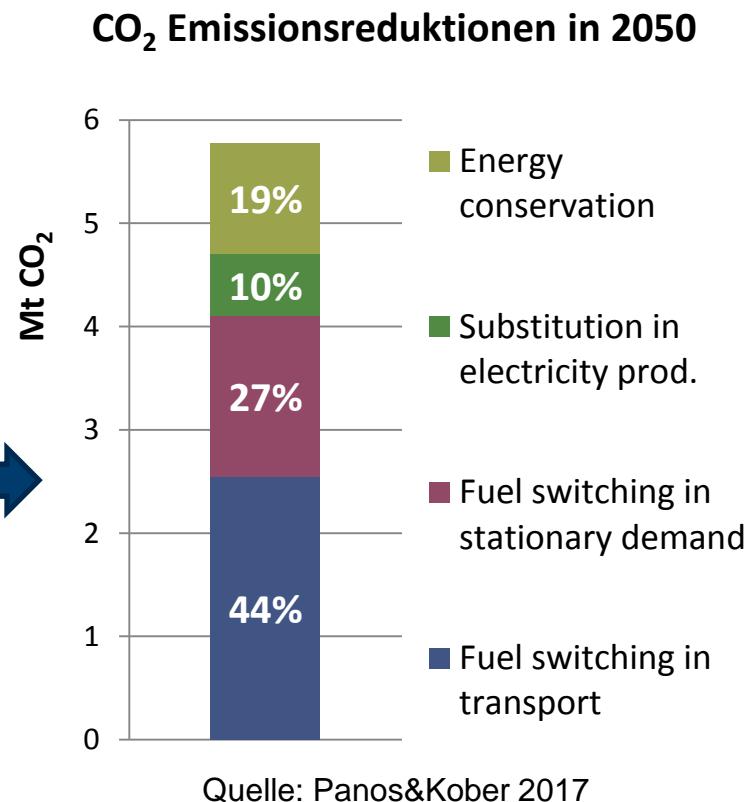
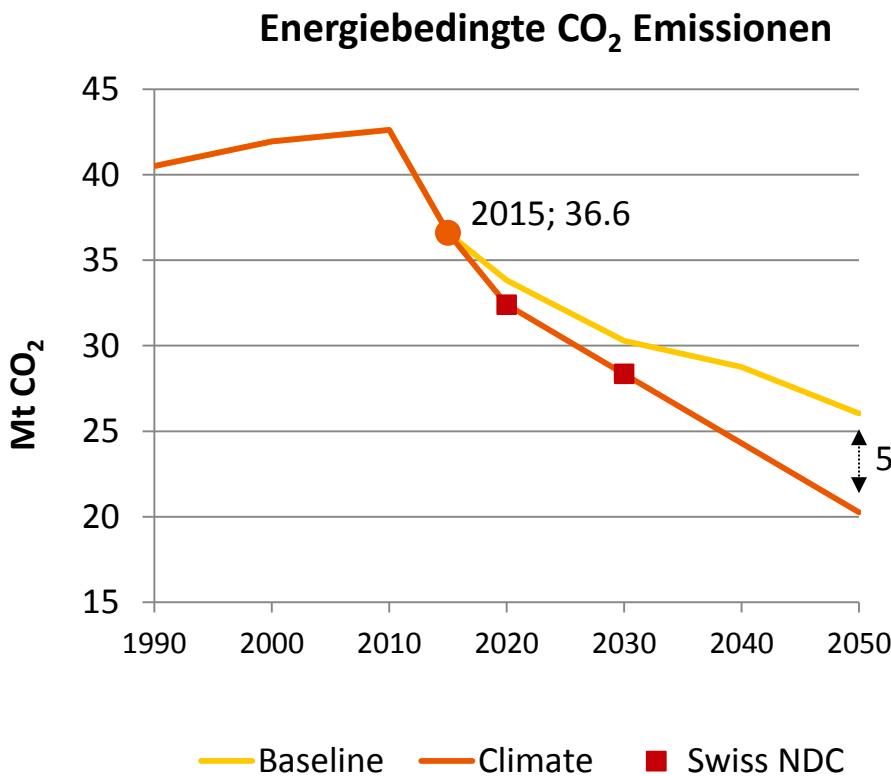


Erzeugung je Netzebene (TWh)

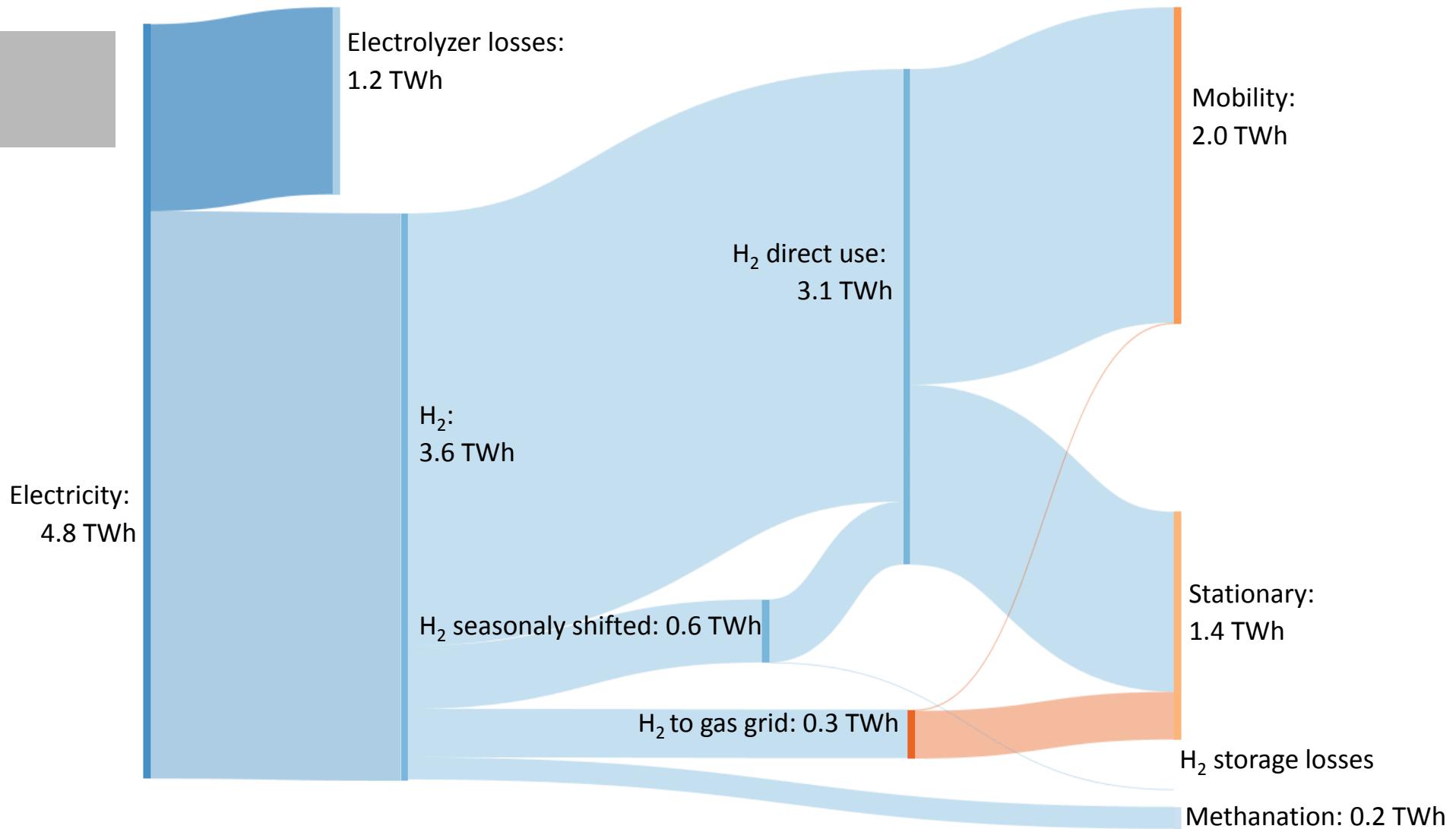


Energiebedingte CO₂ Emissionen (exkl. internationaler Luftverkehr)

- Realisierung der Schweizer Minderungszusagen erfordert substantielle CO₂ Einsparungen
- Energieeffizienz und Elektrifizierung der Endnachfrage als Säulen der Dekarbonisierung



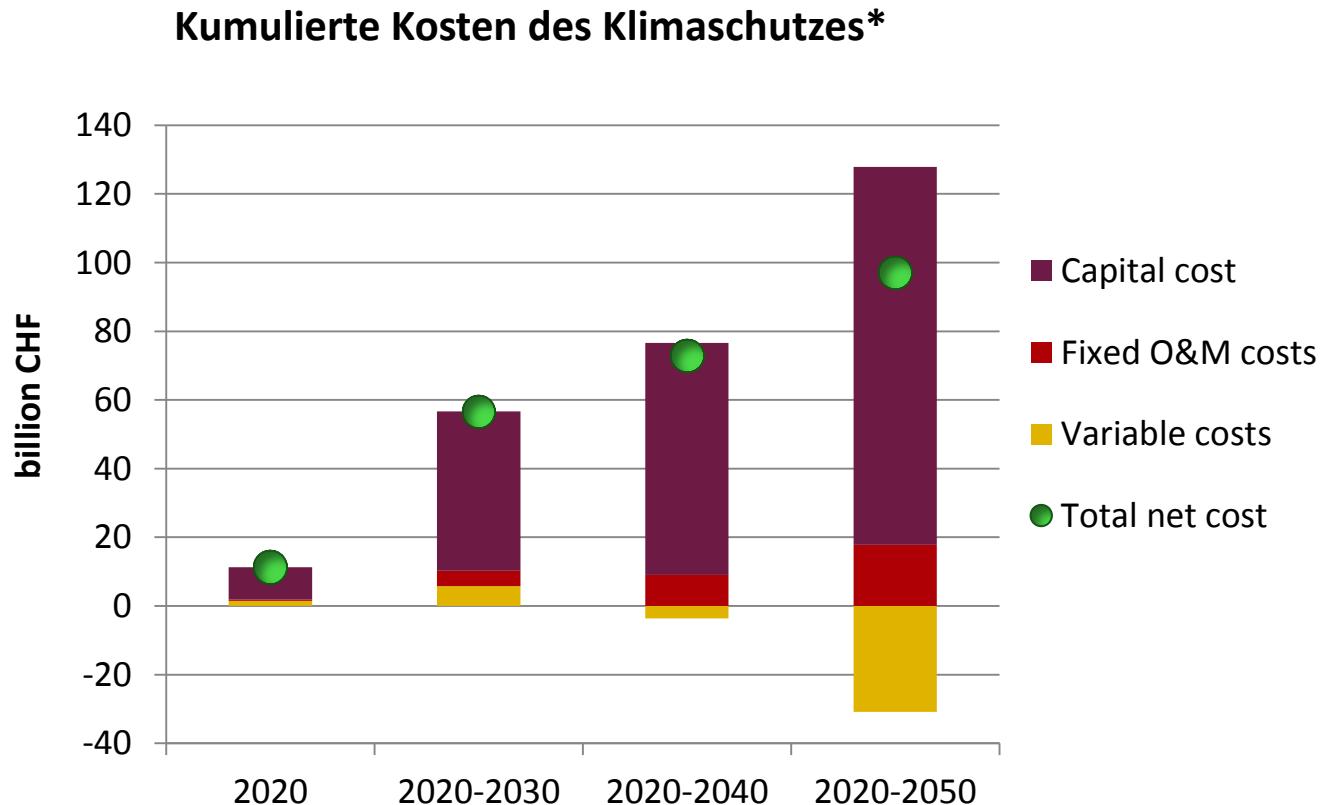
Power to gas pathways in the Climate scenario in 2050



Quelle: Panos&Kober 2017

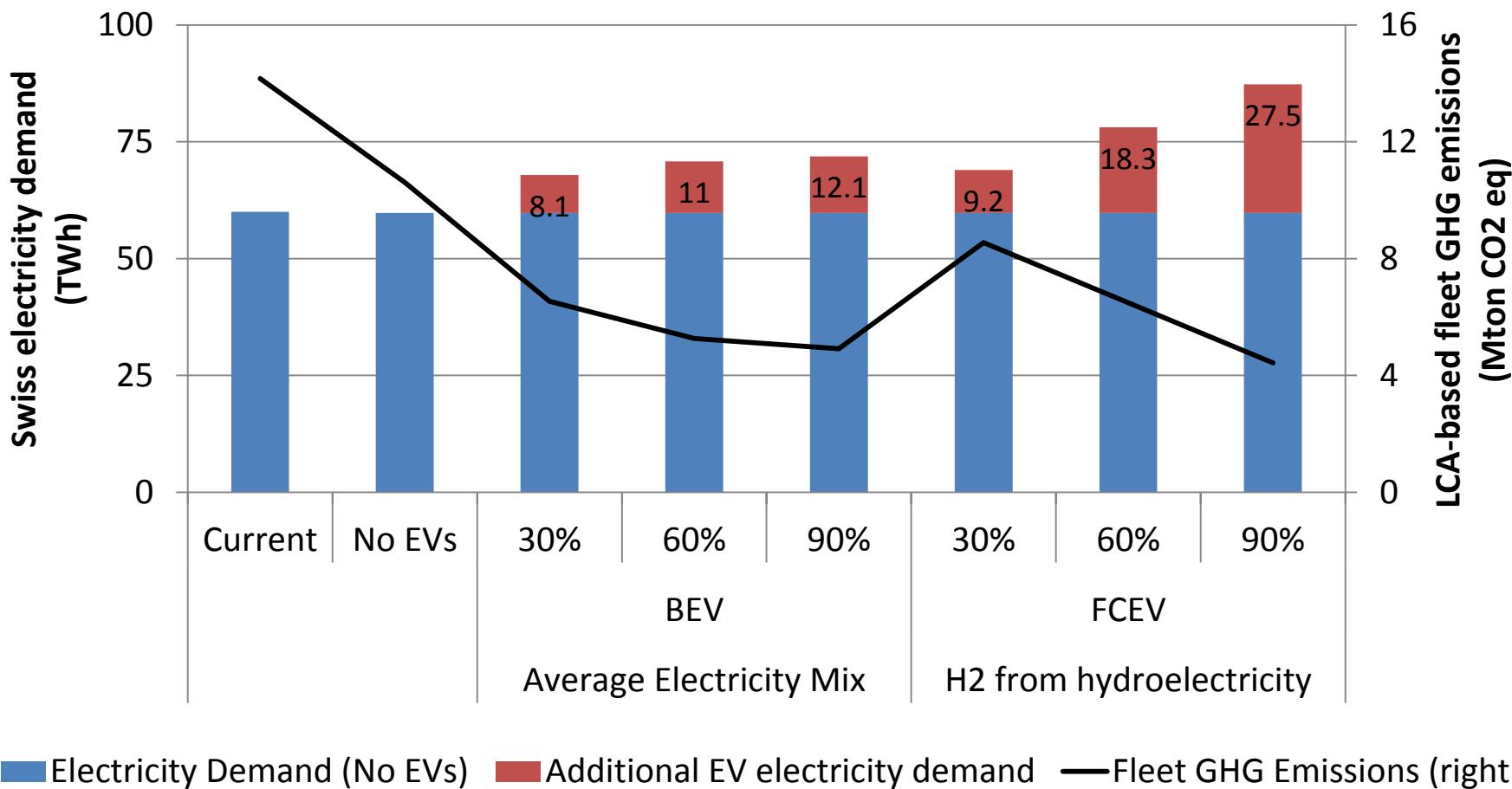
Systemkosten

- Verlagerung von variablen Kosten hin zu Kapitalkosten über den Betrachtungszeitraum
- Kosten für Klimaschutz* je Einwohner 190-400 CHF/a (durchschn. (2020-2050) 360 CHF/a)



Quelle: Panos&Kober 2017

Car fleet scenarios 2050 – implications of electrification: The «good» case for climate



EV: Electric Vehicles

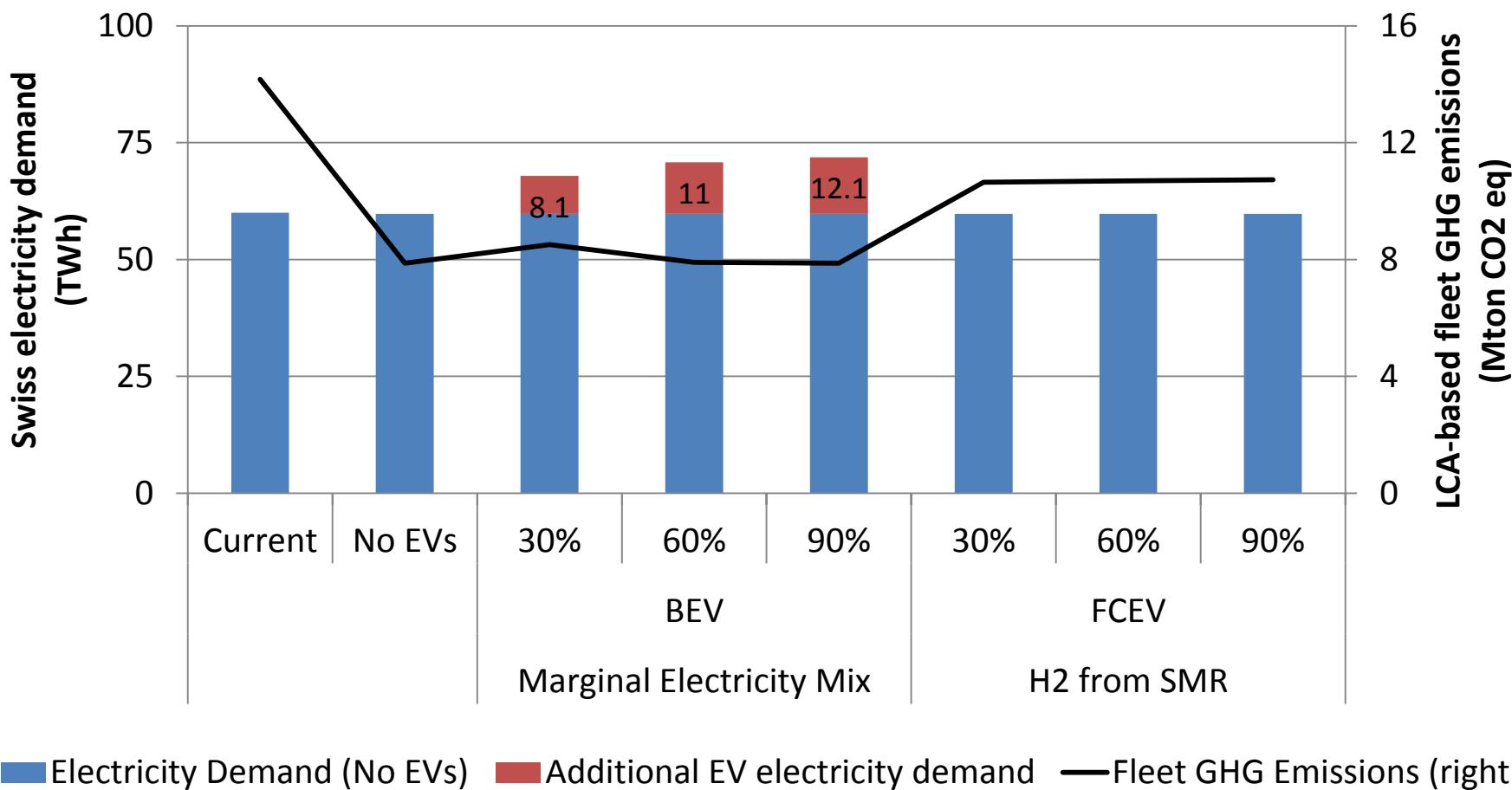
BEV: Battery Electric Vehicles

FCEV: Fuel Cell Electric Vehicles

2050 electricity demand: POM

Source: Hirschberg et al. 2016

Car fleet scenarios 2050 - implications of electrification: The «bad» case for climate



■ Electricity Demand (No EVs) ■ Additional EV electricity demand — Fleet GHG Emissions (right)

EV: Electric Vehicles

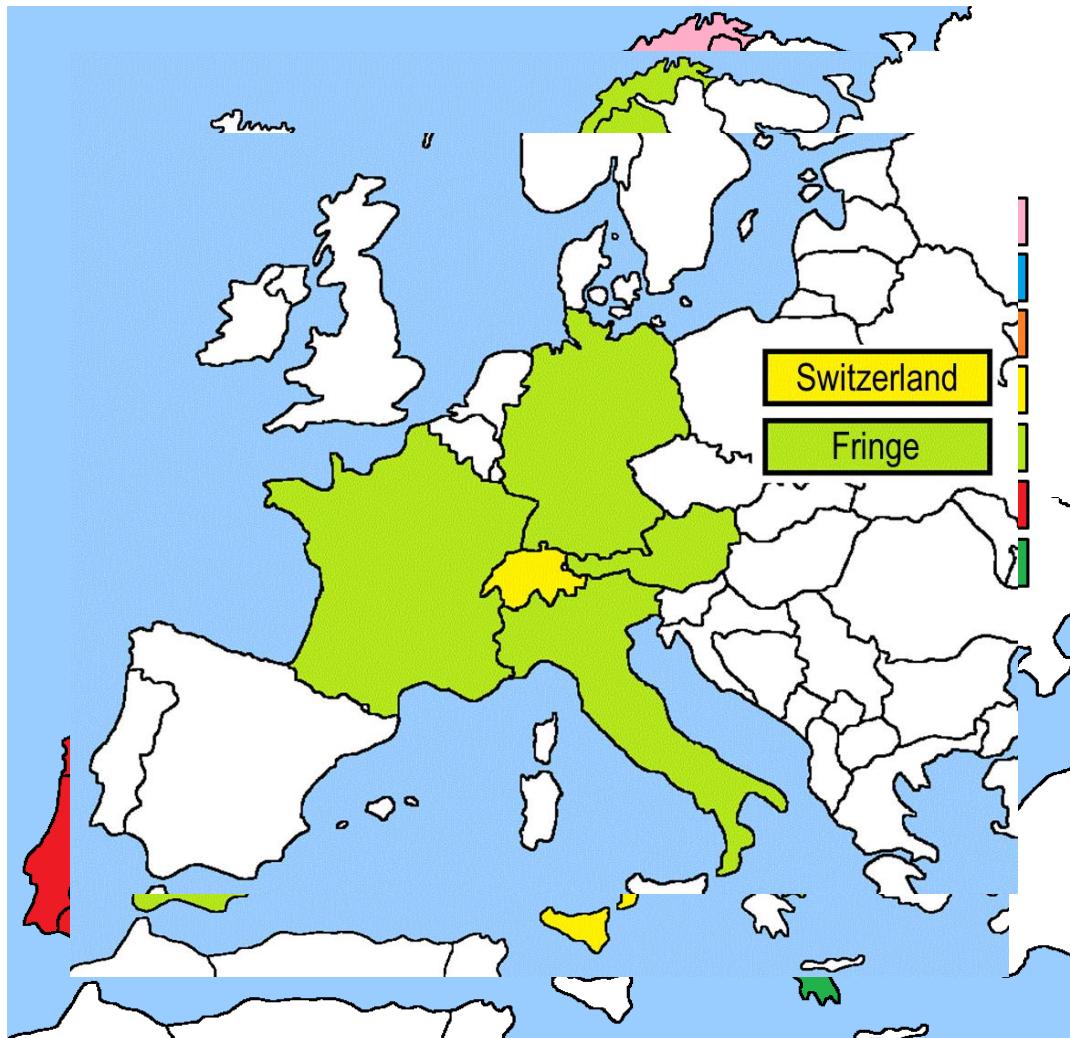
BEV: Battery Electric Vehicles

FCEV: Fuel Cell Electric Vehicles

2050 electricity demand: POM

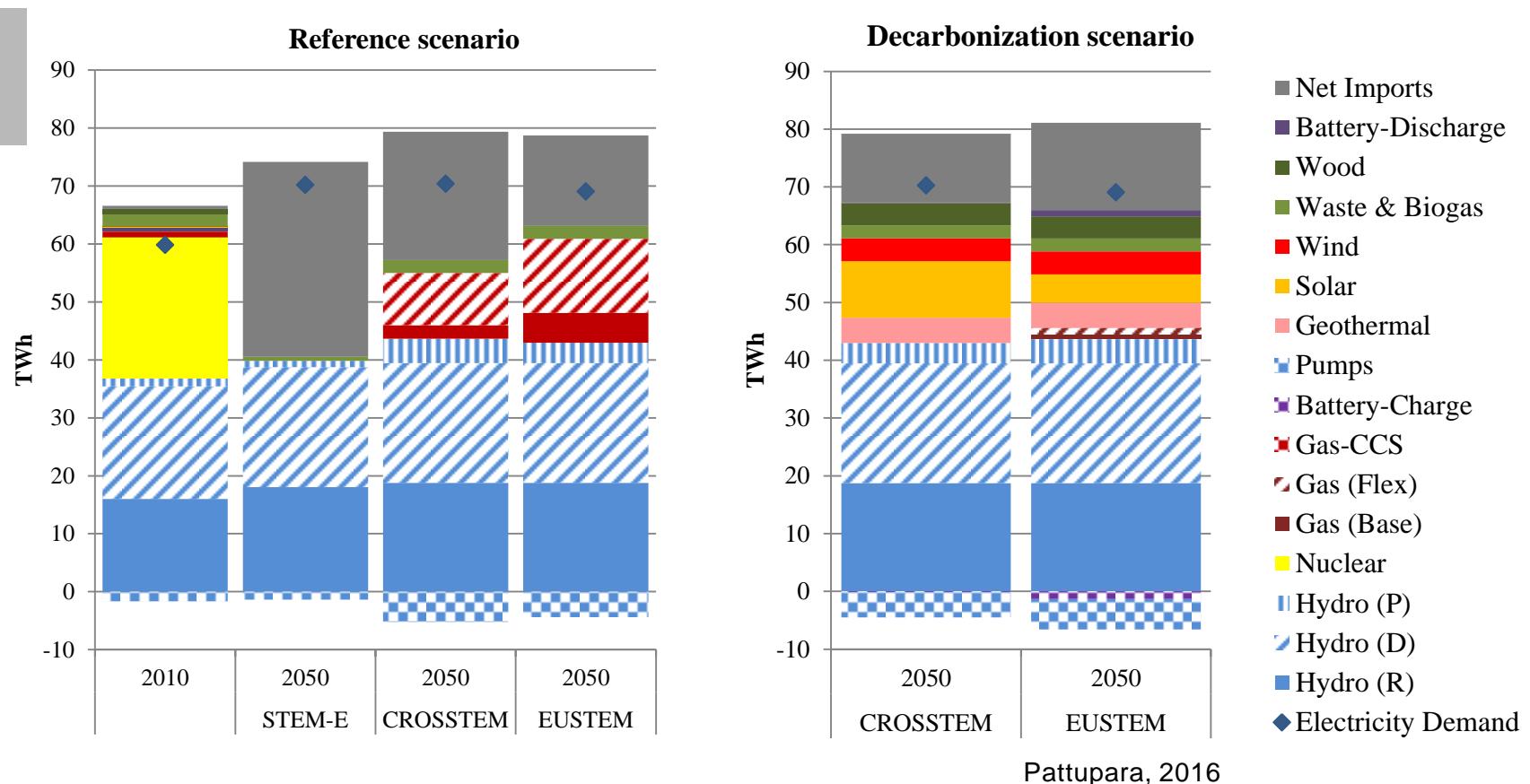
Source: Hirschberg et al. 2016

Evolution of the Swiss TIMES Electricity models



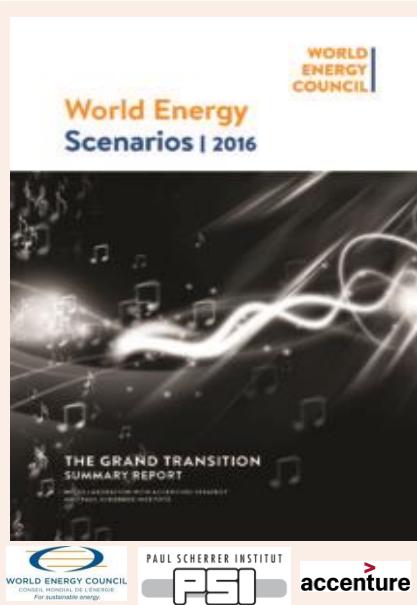
Results - Comparison previous models

Switzerland electricity generation mix (2050)

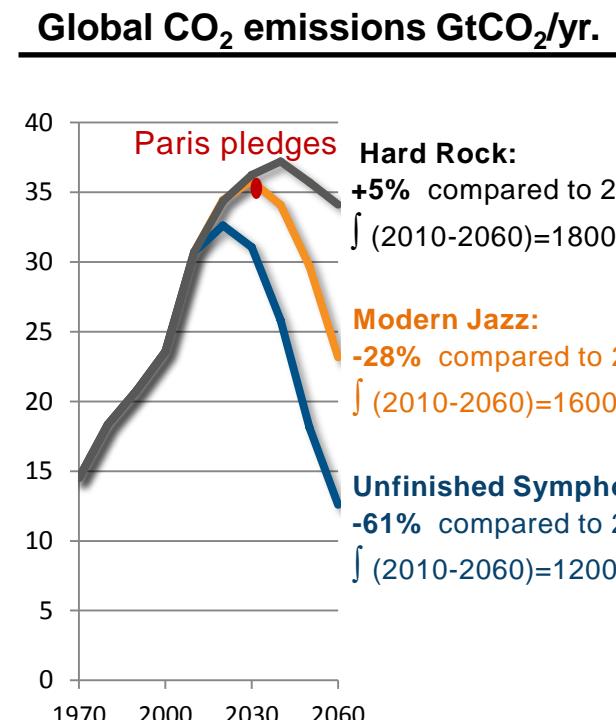
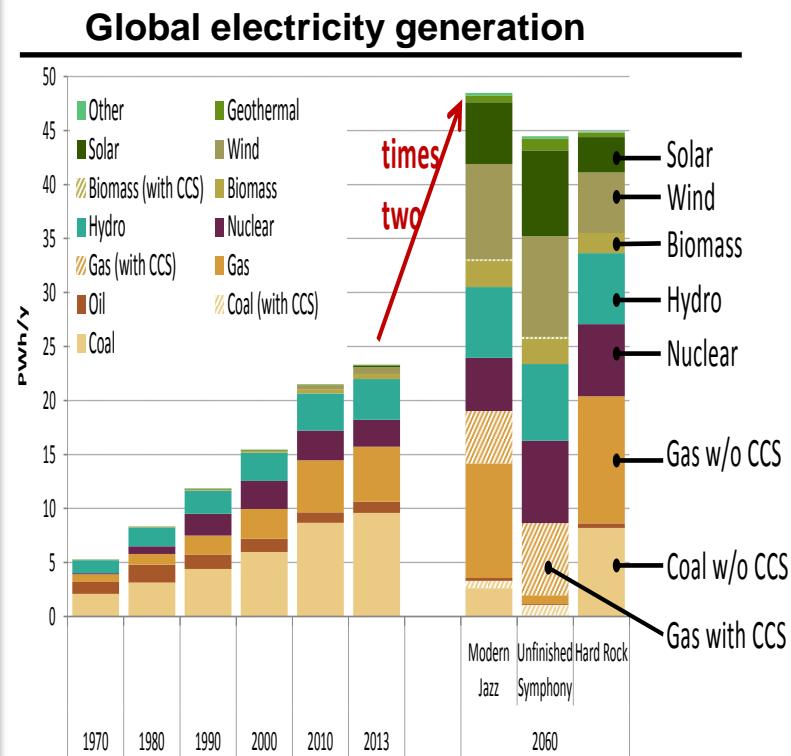


- Consistent Overestimation of renewable technologies (e.g. solar PV generation) in smaller models (almost 50% higher in CROSSTEM versus EUSTEM)
- Corresponding underrepresentation of flexible backup / storage technologies, leading to sub-optimal investment decisions. Rectified with EUSTEM

Global challenges in electricity supply



- Analysis with the GMM global energy systems model of LEA/PSI, shows that demand for electricity doubles by 2060
- Meeting this demand with cleaner energy sources requires substantial infrastructure investments and system integration to deliver benefits to all consumers
- Wind and solar continue to grow at an unprecedented rate and create new opportunities and challenges for the energy systems



Long-term scenarios assessed		
Modern Jazz (market oriented)		<ul style="list-style-type: none"> Market chooses technologies Technology innovation Energy access for all
Unfinished Symphony (regulation oriented)		<ul style="list-style-type: none"> Policies focusing on sustainability Unified climate action Targeted technology support
Hard Rock (fragmented policies)		<ul style="list-style-type: none"> Low global cooperation Focus on energy security Best fit local solutions

Conclusions

- **Full systems modeling**, utilizing the results from comprehensive inter-disciplinary technology assessment, necessary for exploring the overall system performance and impacts as well as requirements on grid and storage
- **Large uncertainties** for immature technologies, acceptance issues and demand development
- **Demanding climate policies induce high costs**
- **Electric mobility** is an opportunity also for reaching climate goals but faces challenges with regard to availability of large amounts of electricity with low carbon content, costs, ranges, overall environmental performance, infrastructure and remarkable improvements of conventional technologies.
- Continued **expansion of air travel** is the most difficult threat against reaching climate protection goals
- **Role of storage increases** in the long term both for electricity and heat supply in the Swiss energy system:
 - Integration of generation from renewable energy
 - Back-up power and reserve
 - Load levelling and peak shaving
 - Seasonal energy shifting
- **Need to pay more attention to:** security of supply, sustainability aspects, total costs of electricity (internal + external + induced system costs), geographical boundaries, behavior

Thank you for your attention!

Acknowledgements:

Christian Bauer

Tom Kober

Evangelos Panos

Contact:

Stefan Hirschberg

(stefan.hirschberg@psi.ch)

