

Die Weiterentwicklung des Energiesystems

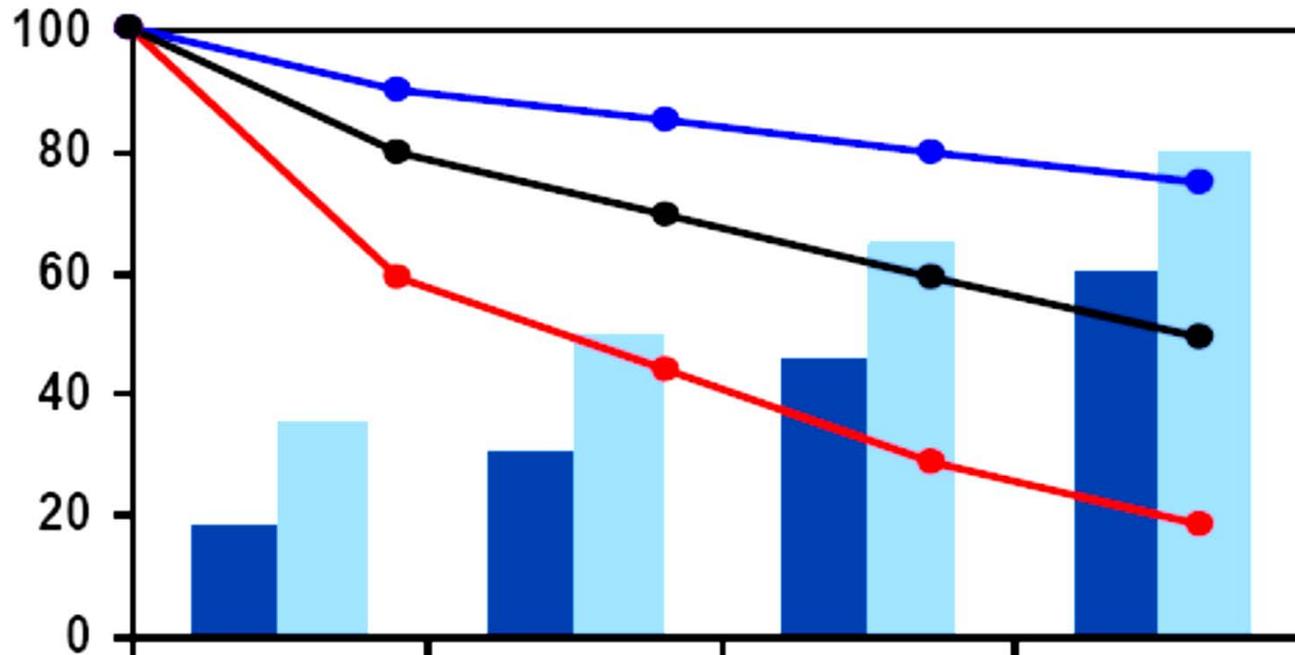
Forschung und Perspektiven für die Energiewende

Dr.-Ing. Dipl.-Phys. Karl-Friedrich Ziegahn

Bereichsleiter des Bereichs „Natürliche und gebaute Umwelt“ am KIT



Ziele der Bundesregierung bis 2050



Maßnahmen:

- Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien
- Steigerung der Energieeffizienz

— Treibhausgasemissionen (100%=1990)

— Primärenergieverbrauch (100%= 2008)*

— Stromverbrauch(100%= 2008)*

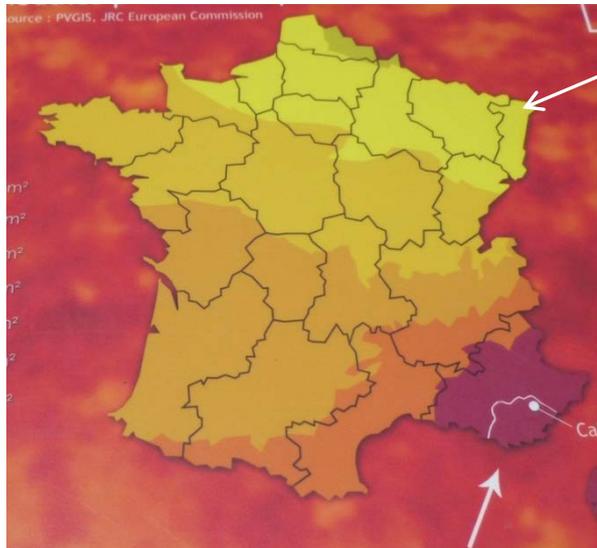
■ Anteil erneuerbarer Energien am Bruttoendenergieverbrauch

■ Anteil der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien am Bruttostromverbrauch

Solarenergie in Frankreich



- Beispiel: Callian Haute Deffens (Var)
- Baujahr 2011
- 20 ha Fläche
- 7,4 MW installierte Leistung
- erwartete 2 790 h Sonnenschein / a
- ≈ 10 GWh / a



Nutzungsgrad der Erneuerbaren Energien in Baden-Württemberg (2005-2010)

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	Durchschnitt
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Windenergie	13,6	13,9	16,6	16,6	13,8	13,2	14,6
Photovoltaik	7,3	8,6	8,7	8,7	8,8	8,1	8,4
Biomasse	65,7	88,8	87,4	76,8	72,3	70,6	76,9
Wasserkraft	72,3	76,4	77,5	68,9	65,7	70,4	71,9

(Quelle: StaLa 2011a; UM BW 2011a)

Zum Vergleich USA



- 64% Zunahme der Produktion der US Öl- und Gasindustrie in 5 Jahren: 9,6 Mio. Barrel (2014) = Rekord aus 1970
- Energie-Importabhängigkeit von 60% (2005) auf 24% (2015) gesunken
- Fracking-Technologie senkt die Produktionskosten und steigert die Öl- und Erdgas-Förderung
- Gas ersetzt zunehmend Kohle – der Kohle-Preis sinkt
- der CO₂ Ausstoß sinkt
- Kohle wird international billiger und zunehmend in Europa, insbesondere in Deutschland eingesetzt

6. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung

„Forschung für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung“



- Erneuerbare Energien
- Energieeffizienz und Ressourcenschonung
- Speicherung, Verteilung und intelligente Netze
- Energiesystemanalyse und sozioökonomische Forschung
- Kernenergie in Deutschland sicher beenden – Kompetenzen erhalten
- Fusionstechnologie

Förderung

Projektorientierte Förderung

- Fördervolumen **Bund** 2013: **480** Millionen Euro¹⁾
- Universitäten, Forschungseinrichtungen und Unternehmen
- 3491 geförderte Projekte (2014), davon fast 90 % im **Bereich EE, Speicher/Netze, Energieeffizienz**
- Fördervolumen **Länder** 2013: 310 Millionen Euro

Institutionelle Förderung

- Fördervolumen Bund 2013: **300** Millionen Euro¹⁾
- Helmholtz-Gemeinschaft (HGF)
- Max-Planck-Gesellschaft (MPG)
- Fraunhofer-Gesellschaft (FhG)
- Leibniz-Gemeinschaft (WGL)

¹⁾ Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: Bundesbericht Energieforschung 2015 – Forschungsförderung für die Energiewende, April 2015. Berlin

Erheblicher Beitrag der Länder zur projektorientierten Förderung

Die Helmholtz Energieforschung

Acht Helmholtz-Zentren

Sieben Forschungs-Programme 2015-2019 (PoF 3)



Große Infrastrukturen, z.B.

- Helmholtz-Institut Ulm
- Energy Lab 2.0

- 1. Energieeffizienz, Materialien und Ressourcen**
- 2. Erneuerbare Energien**
- 3. Speicher und vernetzte Infrastrukturen**
- 4. Zukünftige Informationstechnologien**
- 5. Technologie, Innovation und Gesellschaft**
- 6. Nukleare Entsorgung, Sicherheit und Strahlenforschung**
- 7. Kernfusion**

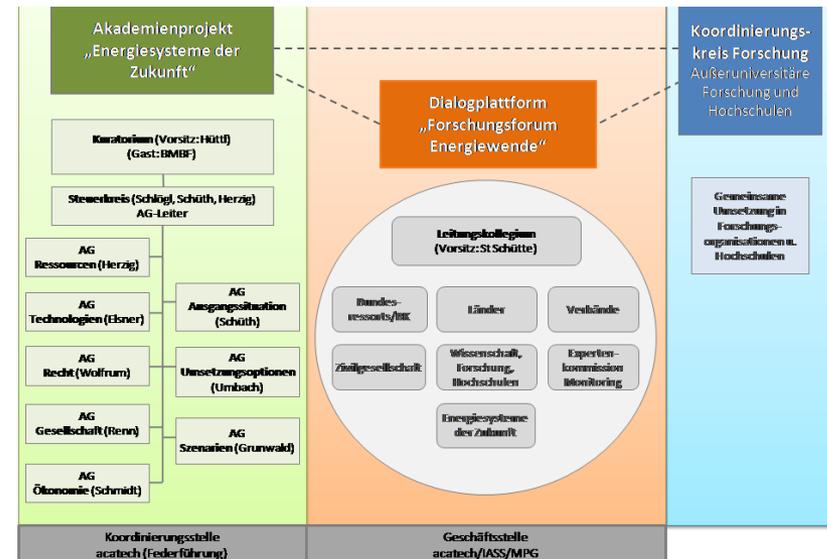
Vernetzung der Forschungsarbeiten

Europäische Ebene



- Horizon 2020
- SET-Plan
- KIC InnoEnergy

Nationale Ebene

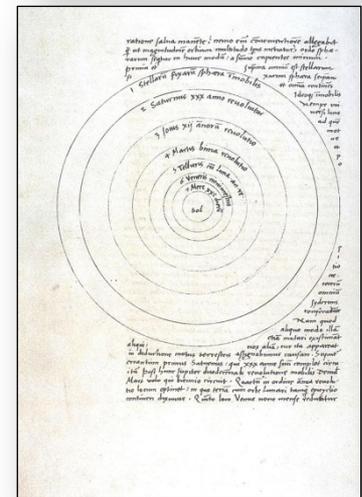


- Koordinierungskreis Forschung
- Acatech: Energiesysteme der Zukunft
- Dialogplattform Forschungsforum Energiewende

Zahlreiche Plattformen zur Koordinierung und Vernetzung

Kopernikus-Projekte für die Energiewende

- Mathematiker und Astronom **Nikolaus Kopernikus**
- „kopernikanische Wende“ → Energiewende erfordert **Paradigmenwechsel**
- „**Kopernikus**“ = Exzellenz der wissenschaftlichen Erkenntnis; Wandel der Sichtweise in der Gesellschaft
- **Wirtschaft ist von Anfang an beteiligt**
→ übernimmt später die Führung
- Projekte werden **dynamisch nachgesteuert**
→ aktuelle Entwicklungen werden aufgenommen
- Auswahl der Projektpartner nach **Kompetenz**
- Eigene **Governance-Struktur**, starke **Projektleitung/Koordination**



Kopernikus-Projekte für die Energiewende

Auf Grundlage der strategischen Forschungsagenda Energiewende wurde ein neues Förderprojekt veröffentlicht mit vier Themen:



- Neue Netzstrukturen
- Flexiblere Nutzung erneuerbarer Ressourcen: Power-to-X
- Ausrichtung von Industrieprozessen auf fluktuierende Energieversorgung
- Systemintegration: Transformation und Vernetzung der Energieversorgung

Fördervolumen 40 Millionen Euro, 10 Jahre Laufzeit, Schwerpunkt auf Technologien und Wirtschaftlichkeit

Herausforderungen der Energiewende in Deutschland

- Energiespeicherung
- Energieverteilung und Netzertüchtigung
- Senkung Energieverbrauch durch Effizienzsteigerung
- Nachfragesteuerung
- Handlungskonzept der Bundesregierung



Wind im Norden, Sonne im Süden: Zentraleuropa wird Drehscheibe für Stromtausch und Stromhandel

- Höchstspannungsnetz: 380 / 400 kV
- Höchstspannungsnetz: 220 kV
- Hochspannungsnetz: 110 kV
- Mittelspannungsnetz: 10 ... 30 kV
- Niederspannungsnetz: 0,4 kV



Netzentwicklungsplan Szenario C (2022)



Quelle:

www.netzentwicklungsplan.de

Energiespeicherung

Elektrische / elektrochemische Energie:

- Kondensatoren („Super Caps“)
- Batterien, z.B. Redox-Flow

Lageenergie:

- Pumpspeichersee

Kinetische Energie:

- Schwungradprinzip
- Druckluftspeicher

Chemische Energie

- Wasserstoff
- Kohlenwasserstoffe (flüssig, gasförmig)

Wärmeenergie

- Latentwärmespeicher (PCM)
- Wärmereservoir



Energiespeicherung

Elektri

Lageer

Kineti

Chemie

Wärmeenergie

- Latentwärmespeicher (PCM)
- Wärmereservoir

Von Kohlehalde
und Wassersto

Energiespeicher –
zentrale Elemente
der Energieversorgung

POSITIONSPAPIER

Energiespeicher

Der Beitrag der Chemie

, gasförmig)

Chemie
Ingenieur
Technik

Übersichtsbeitrag

17

Energiespeicherung als Element einer sicheren Energieversorgung

Florian Ausfelder^{1,2,*}, Christian Beilmann³, Martin Bertau⁴, Sigmar Bräuninger⁵, Angelika Heinzl⁶, Renate Hoer⁷, Wolfram Koch⁸, Falko Mahlendorf⁹, Anja Metzeltin⁸, Marcell Peuckert¹⁰, Ludolf Plass¹⁰, Konstantin Räuhele⁶, Martin Reuter¹¹, Georg Schaub¹², Sebastian Schliebahn¹³, Ekkehard Schwab⁷, Ferdi Schüth¹⁴, Detlef Stolten¹⁵, Gisa Teßmer¹⁶, Kurt Wagemann¹ und Karl-Friedrich Ziegahn¹⁴

DOI: 10.1002/cite.201400183

© 2015 The Authors. Published by Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited and is not used for commercial purposes.

Das Energiesystem steht vor einem grundlegenden Wandel. Ein System, das auf die konstante Bereitstellung durch fossile Energieträger ausgerichtet ist, soll durch die umfangreiche Integration erneuerbarer Energien eine nachhaltigere Energieversorgung gewährleisten. Die Herausforderung des Systemwechsels macht sich gegenwärtig in der Stromversorgung am deutlichsten bemerkbar, betrifft aber alle Bereiche des Energiesystems, wenn auch mit unterschiedlichen Auswirkungen. Im Energiesystem werden Energie und/oder Energieträger räumlich von Energieversorgungsnetzen verteilt, während die bedarfsgerechte Bereitstellung gegenwärtig dafür sorgt, dass der Energiebedarf zu jeder Zeit gedeckt wird. Energie aus erneuerbaren Quellen wird in der Regel nicht bedarfsgerecht bereitgestellt; ihr Anteil steigt. Energiespeicher sind eine Möglichkeit, das zeitlich versetzte Angebot mit der Nachfrage zur Deckung zu bringen. Energiespeicher sind Systeme, die eine Energiemenge kontrolliert aufnehmen, sie über einen im Kontext relevanten Zeitraum in einem Speichermedium zurückhalten und mit zeitlicher Verzögerung wieder kontrolliert abgeben können. Zu den Energiespeichern gehören nach dieser Definition auch Verfahrensketten, die diese Aspekte durch eine Kombination verschiedener Technologien abbilden. Als mechanische Großspeicher für elektrischen Strom dienen heute fast ausschließlich Pumpspeicherkraftwerke, die zukünftig durch Druckluftspeicherkraftwerke und eventuelle Luftzerlegungsanlagen ergänzt werden könnten. Im Bereich der elektrochemischen Energiespeicher befinden sich verschiedene Technologien im Forschungs-, Entwicklungs- und/oder Demonstrationsstadium für einen Einsatz in der stationären großtechnischen Stromspeicherung. Thermische Speichertechnologien beruhen auf der Speicherung von sensibler Wärme, der Ausnutzung von Phasenübergängen, Adsorption-/Desorptionsprozessen oder chemischen Reaktionen, die prinzipiell eine dauerhafte und verlustfreie Speicherung von Wärme ermöglichen können. Die Speicherung von Energie in Form chemischer Bindungen in stofflichen Speichern verläuft über Substanzen, die selbst als Energieträger oder Chemikalien verwendet werden können; sie befinden sich damit in direkter Konkurrenz zu alternativen Bereitstellungs- und Nutzungsvarianten. Die Schlüsseltechnologie hierbei ist auf abschbare Zeit die Elektrolyse von Wasser zu Wasserstoff und Sauerstoff. Wasserstoff kann wiederum durch verschiedene Verfahren in andere Energieträger umgewandelt werden. So lässt er sich in verschiedenen Sektoren des Energiesystems und/oder in energieintensiven Industrieprozessen stofflich nutzen. Teilfunktionen von Energiespeichern können auch von Industrieprozessen wahrgenommen werden. Dem Energiesystem in seiner Gesamtheit eröffnen sich neue Optionen, die bisher weitgehend getrennten Energieversorgungsströme zu verknüpfen und zu vernetzen. Neben der Möglichkeit, verstärkte erneuerbare Energien außerhalb des Stromsektors zu nutzen, ergeben sich auch neue Bedingungen für eine verstärkte Flexibilisierung, neuartige Synergieeffekte und zusätzliche Optimierungsmöglichkeiten. Anhand verschiedener Referenzfälle wird der mögliche Einsatz von Speichertechnologien aufgezeigt und bewertet.

Schlüsselwörter: Energiespeicher, Energieversorgung, Optimierung

F. Ausfelder, K.-F. Ziegahn, C. Beilmann et al.
Energiespeicherung als Element einer sicheren Energieversorgung
Chemie Ingenieur Technik 87 (2015) 17-89

Chemische Energieträger

- **Umwandlung in chemische Energieträger:** sie zeichnen sich durch eine **hohe Energiedichte** aus
- **Flüssige Kohlenwasserstoffe** haben dadurch ihre dominante Rolle bei **Mobilitätsanwendungen** gewonnen und werden in der Luftfahrt auch auf langen Sicht nicht ersetzt werden können
- Benzin, Diesel oder Alkohole ragen mit volumetrischen Dichten von **30 bis 35 MJ/l** über die anderen Energieträger weit hinaus



Virgin Atlantic, Boeing 747-400 mit Chef Richard Branson nach seinem Testflug mit Kokos- und Babassu-Öl

Steigerung der Energieeffizienz

- Politische Ziele der Landesregierung Baden-Württemberg*

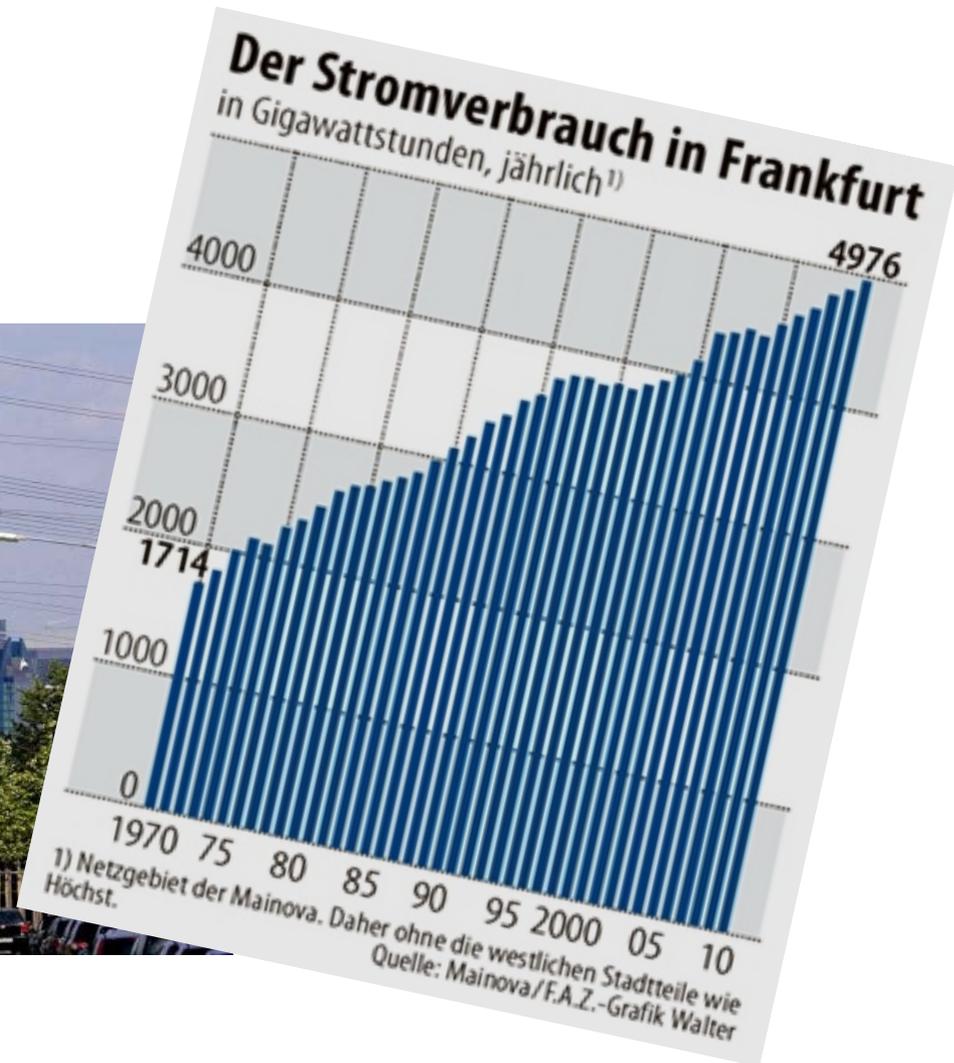
Sektor	Sektorziel 2020 gegenüber 1990	Sektorziel 2020 gegenüber 2010
Stromerzeugung	-15% bis -18%	-10%
Private Haushalte	-20% bis -28%	-30%
Industrie (energiebedingt)	-55% bis -60%	-38%
Industrie (prozeßbedingt)	-23%	-8%
Verkehr	-20% bis -25%	-26%

* Integriertes Energie- und Klimaschutzkonzept (IEKK)
Kabinettsbeschuß Februar 2012

Energieverbrauch und Energieeffizienz

- Zunehmende Energieeffizienz und demographische Faktoren **verringern** Stromverbrauch
- Neue Anwendungen und Lebensformen **steigern** den Stromverbrauch: Zahl der Einzelhaushalte nimmt zu, Elektromobilität, (gewollter) Einsatz von Wärmepumpen, Klimatisierung, neue Geräte im IuK-Bereich
- **Freiwillige** Energie-Effizienzmaßnahmen werden erfolgreich umgesetzt, wo sie einen offensichtlichen Return erbringen
- **Druck** auf Unternehmen und Verbraucher wächst, mehr zu tun: Chancen begreifen und nutzen
- **Finanzielle Anreize** beim Verbrauch bisher unzureichend, gesetzliche Vorgaben sind zu erwarten

Entwicklung Strombedarf Beispiel Frankfurt 1970 - 2010



- **Anpassung** des aktuellen Stromverbrauchs an eine schwankende Stromproduktion
- Produktionsprozesse mit **anpaßbarem** Energiebedarf identifizieren
- **Finanzielle Anreize** zur Nachfragesteuerung setzen
- **Begrenzung des Spitzenbedarfs** zum **Schutz der Netze** mit Anreizen oder Verordnungen zur **Lastverlagerung**
- **Lastabwurf-VO** ist ein administrativer Eingriff und problematisch für energierelevante und zeitkritische Produktionsprozesse
- Die **Wirtschaft** braucht klare Rahmenbedingungen bei der Nachfragesteuerung

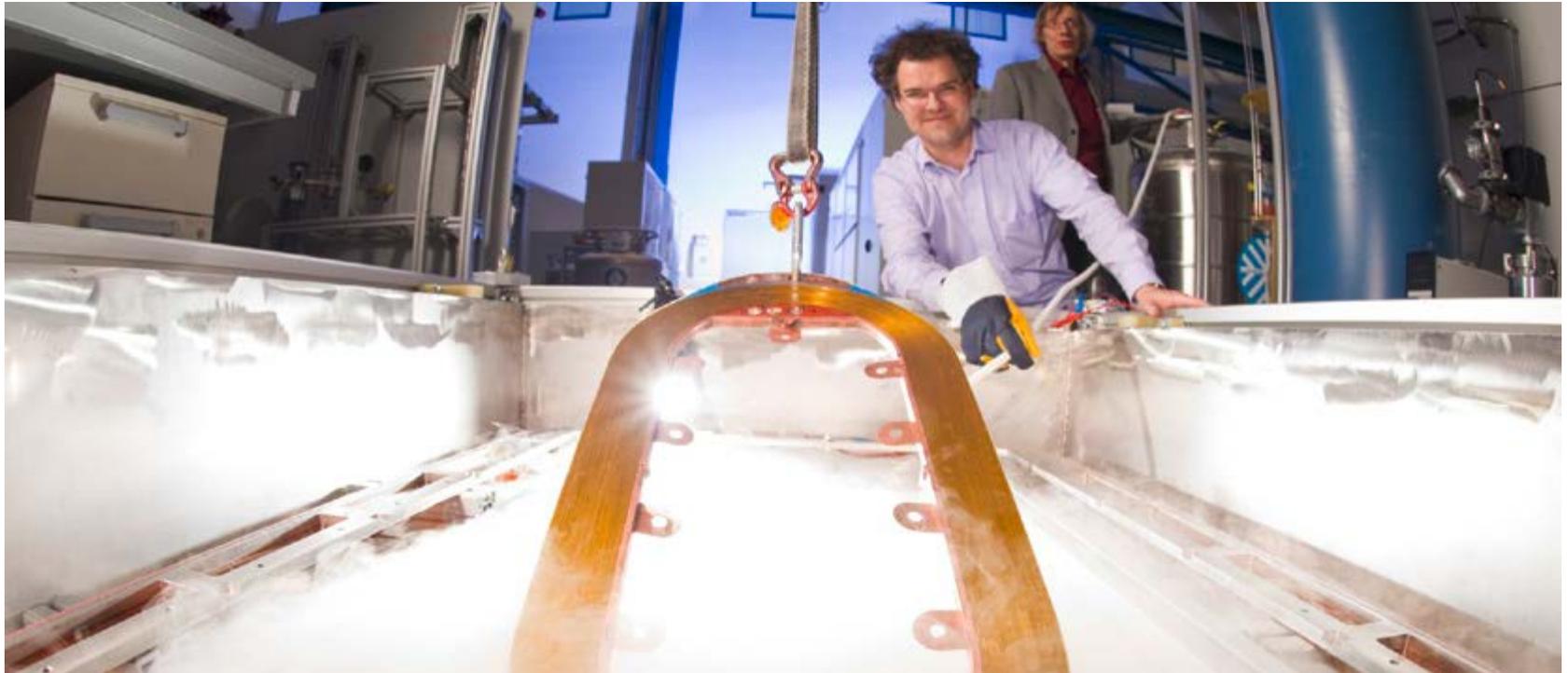
Kopplung von fluktuierenden Energieströmen mit dem Verbrauch in der industriellen Produktion

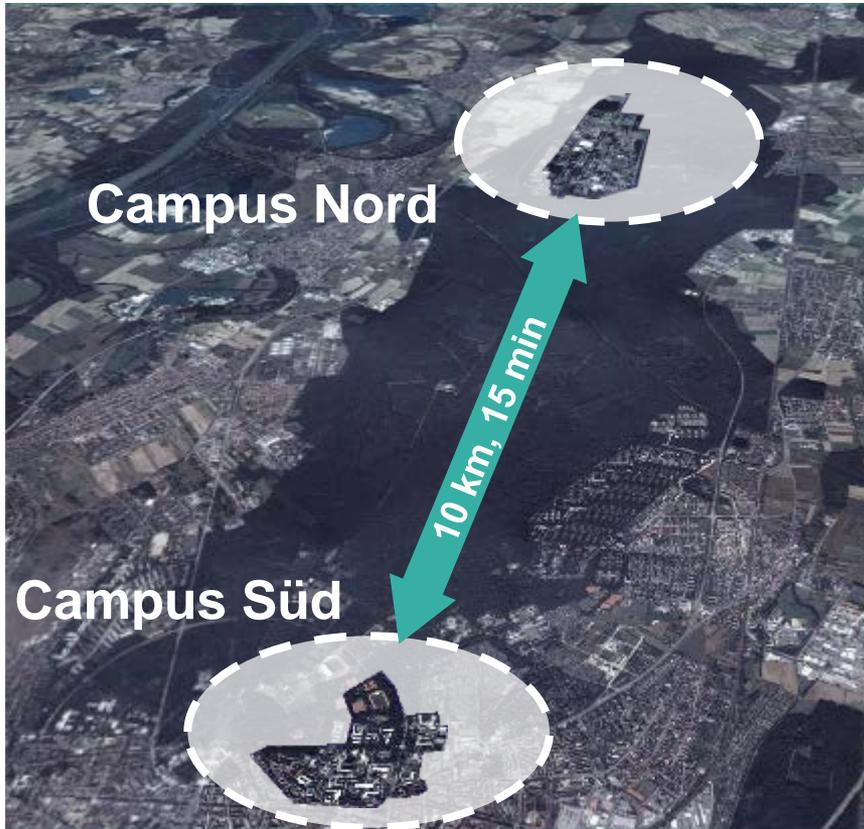
- Industrielle Produktionsprozesse an schwankende Versorgung koppeln, **zeittolerante Fertigungsschritte** durchführen, Nutzung von **Zwischenlagern** und Optimierung von **Teilprozessen**

Beispiele

- Heizen und Kühlen
 - Trocknungsprozesse
 - Laden von Wärmespeichern
 - Elektrochemische Beschichtung von Werkstoffen
 - Energieintensives Aufschmelzen von Materialien
-
- Finanzielle **Anreizsysteme**, um Produktion zeitnah auf die Verfügbarkeit der Energie abzustimmen







KIT in Zahlen

844	Mio. € Budget*
9.500	Mitarbeiter
355	Professoren
2.800	Studenten

Ziele

- Forschung
- Lehre
- Innovation

Energiespeicherung und -verteilung



- Supraleitende Komponenten
- Netzbetriebsmittel und Komponenten
- „Smart Grids“
- Virtuelle Kraftwerke
- Batteriespeicher
- Wasserstoffbasierte Energiespeicher



Erneuerbare Energien



- Biomasse (BTL)
- Wasserstoff aus feuchter Biomasse
- Geothermie
- Windenergie
- Wasserkraft
- Photovoltaik, insbesondere organische PV
- Konzentrierende Solarthermie



Effiziente Energienutzung



- Energieeffiziente Gebäude
- Energieeffiziente
 - Industrielle Prozesse
 - Technische Systeme





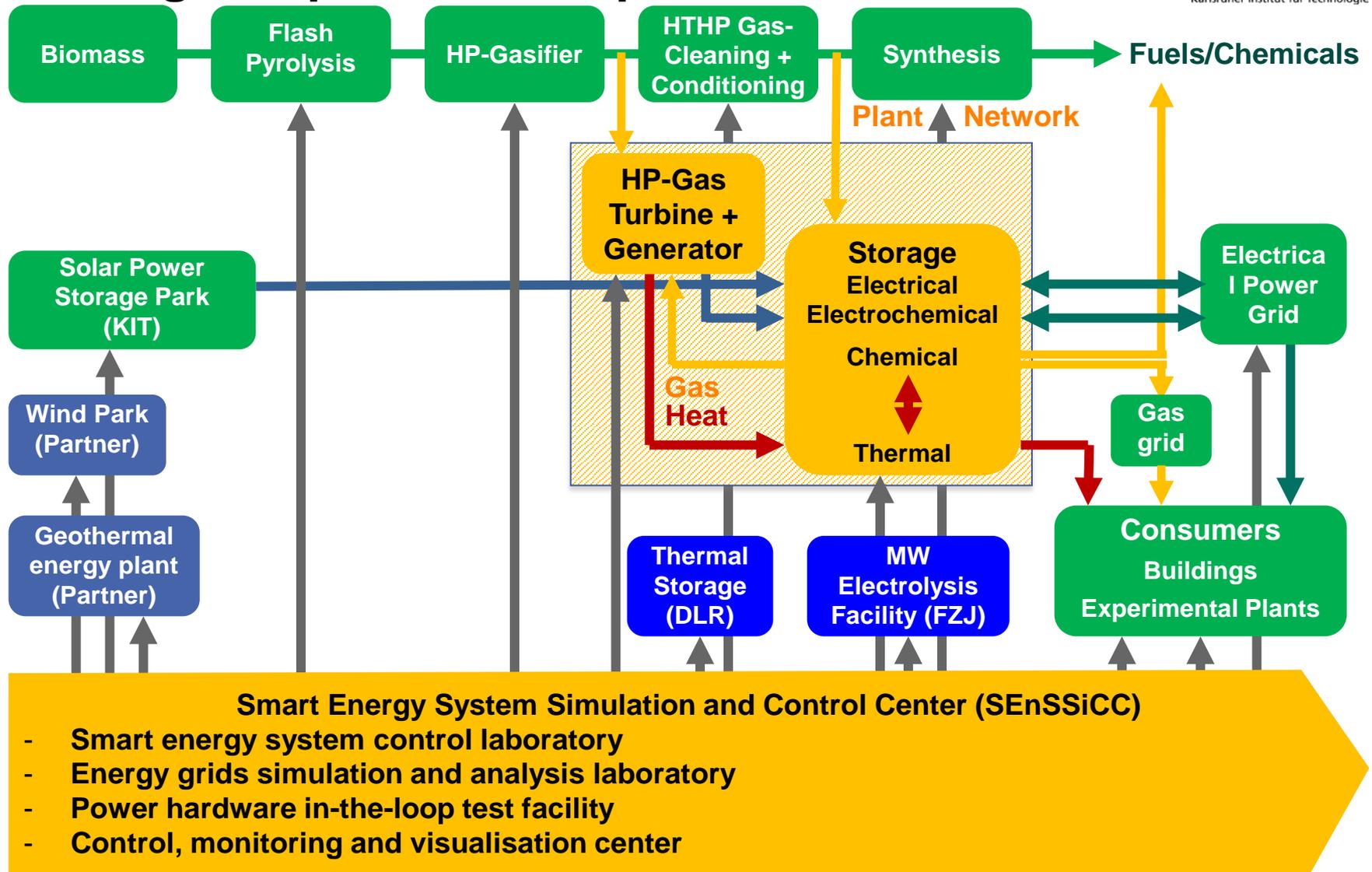
- Ganzheitliche Systemanalyse
- Entwicklung konsistenter Szenarien
- Interaktion von Energiesystemen und sozialen Megatrends
- Modellentwicklung
- Entwicklung strategischer Konzepte
 - Konzepte zum Nachfragemanagement
 - Identifikation von Leitkonzepten



Energy Lab 2.0

- Große Forschungsinfrastruktur zur **Erforschung der Wechselwirkungen der verschiedenen Komponenten in einem zukünftigen, auf erneuerbaren Energie aufgebauten Energiesystem**
- Verbindung zwischen Pilotanlagen und ganzheitlichen Simulationen

Existing and planned components



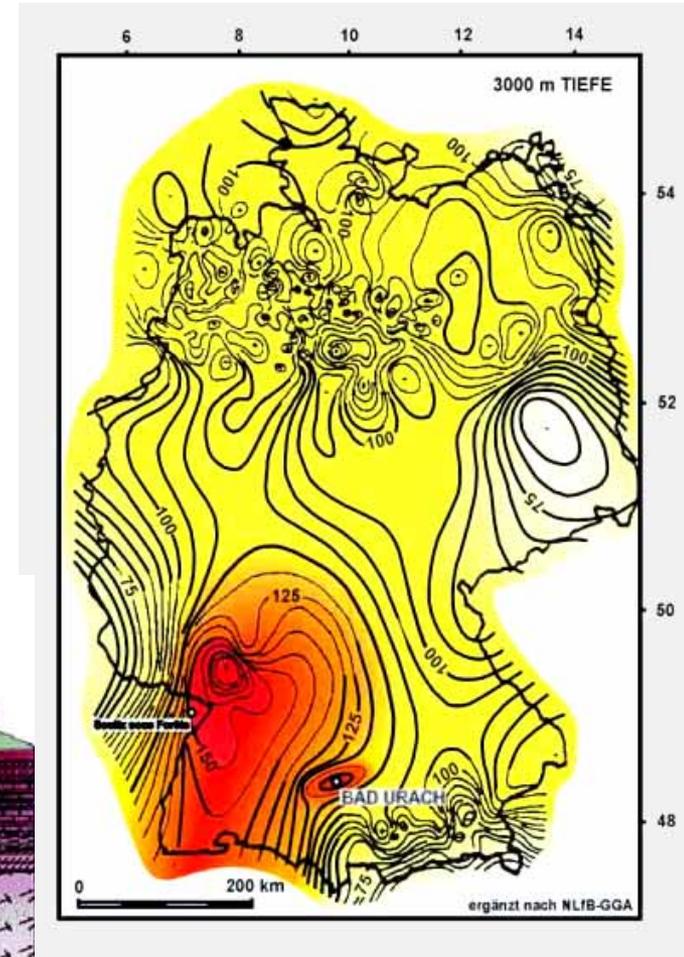
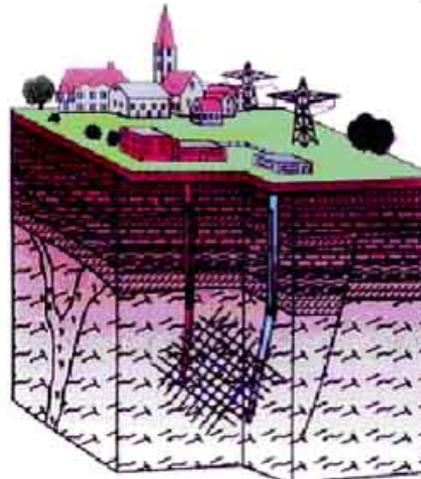
Nutzung der Niedertemperaturwärme aus der Erde

Geothermie ist

- praktisch unbegrenzt
- grundlastfähig, d.h. immer verfügbar
- nahezu emissionsfrei
- sparsam bei der Flächennutzung

Herausforderungen

- geringe Energiestromdichte
- niedriges Temperaturniveaunahe der Erdoberfläche



*Energiedichte
[GJ/m³]:*

Stroh: 1,5

Slurry: 25

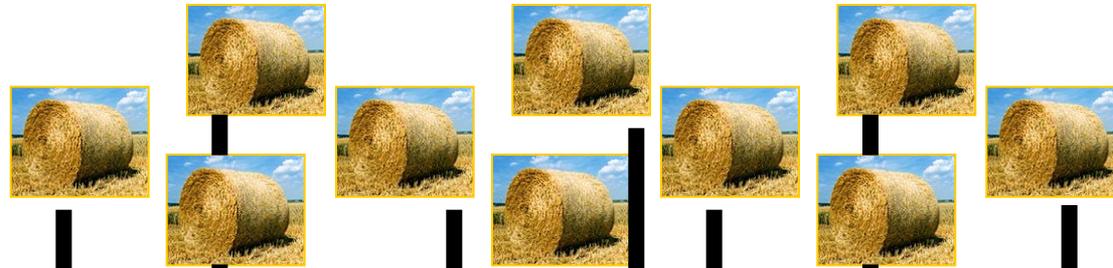
Diesel: 36

Regional verteilte Biomasse

Transportradius:

~ 25 km

250 km



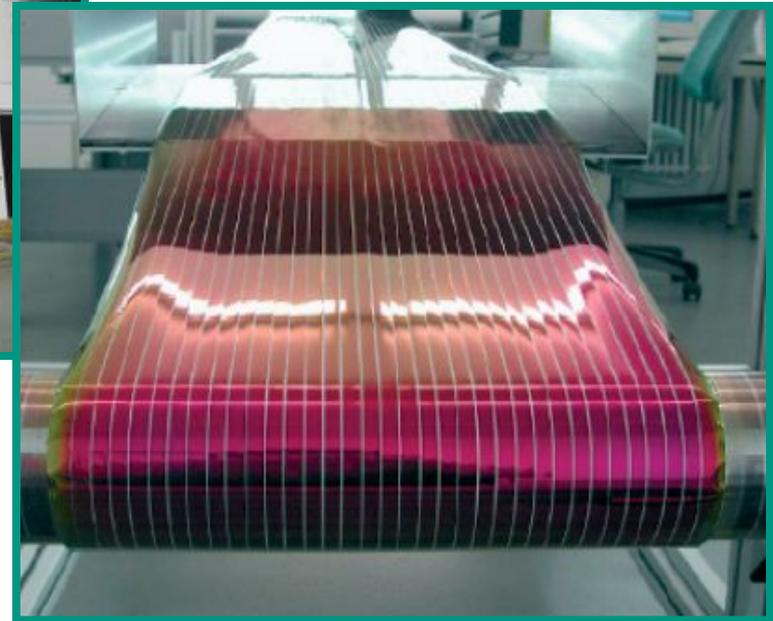
Dezentrale Erzeugung eines energiereichen Zwischenproduktes

Zentrale Synthesegas- und Kraftstoffproduktion

- Bauwerksgründungen, insbesondere Offshore
- Turm- bzw. Mastkonstruktionen, insbesondere Stahl- und Betonbau
- Getriebetechnik
- Supraleitende Generatoren
- Faserverbundwerkstoffe und Leichtbaukonstruktionen für Rotorblätter
- Produktionsverfahren für Rotorblätter (z.B. Mikrowellen, Gewebelege-Roboter)
- Zuverlässigkeit und Lebensdauer
- Windenergie-Speicherung in Redox-Flow-Batterien
- Netzintegration und Gesamtsystemanalysen
- Betriebsmanagement von Windenergiesystemen



Organische Solarzellen



Quelle: Dr. Alexander Colsmann

Wasserkraft

Laufwasserkraftwerke

- Flusskraftwerke, Ausleitungskraftwerke
- grundlastfähig; hohe Prognosegenauigkeit

Speicherkraftwerke

- Tages-, Monats-, Jahresspeicher
- mittellast-/spitzenlastfähig

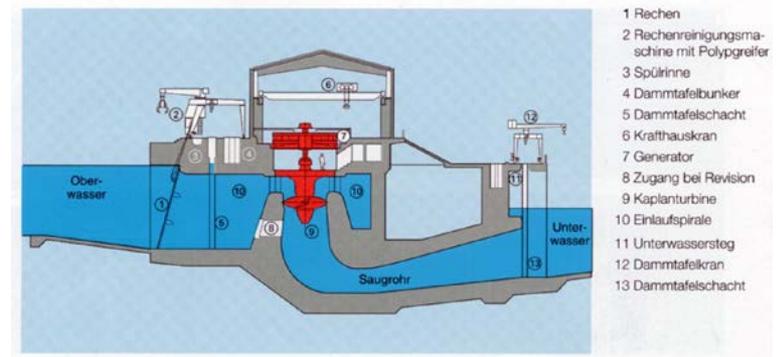
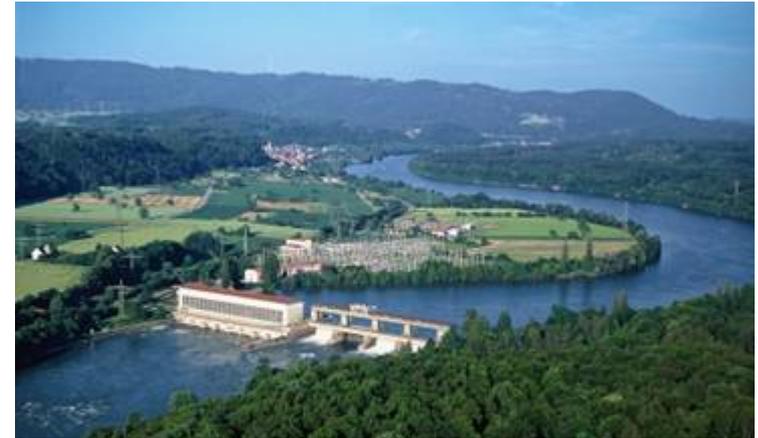
Pumpspeicherkraftwerke

- spitzenlastfähig; Lastglättung
- schwarzstartfähig

sowie

Gezeitenkraftwerke, Wellenkraftwerke, Gletscherkraftwerke ...

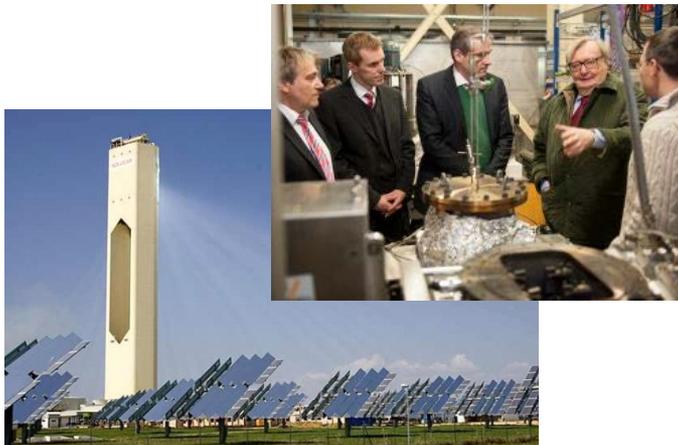
Flusskraftwerk KRS mit 120 MW größtes
Hochrheinkraftwerk



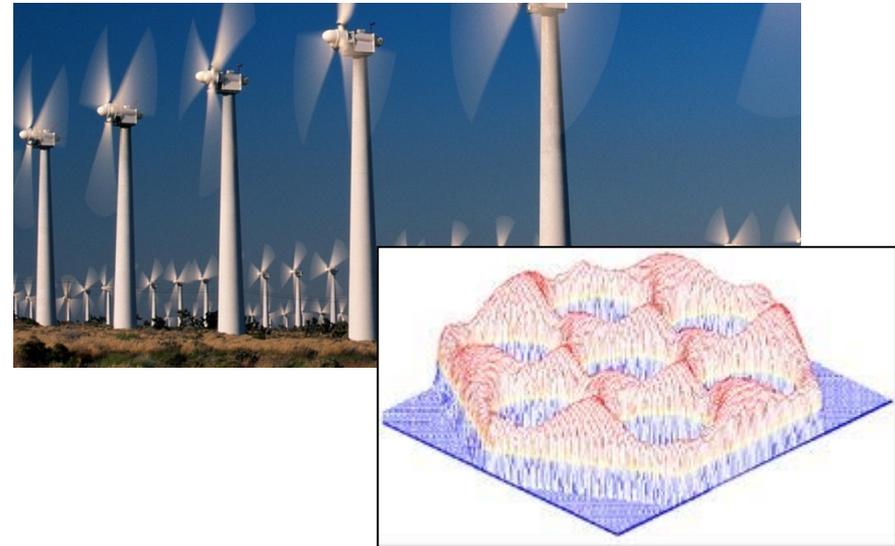
Prinzip Niederdruckanlage mit Kaplanmaschine

Von Nuklear-Energie zu Erneuerbaren Energien

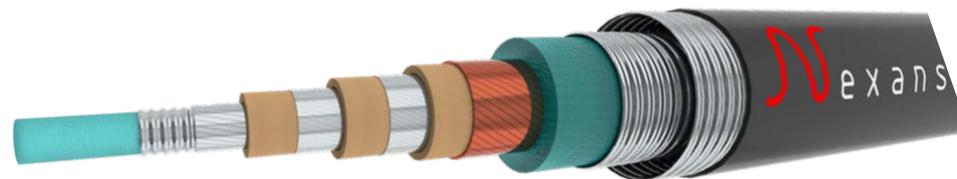
Flüssigmetalle: Konzentrierende Solarthermie



Umströmung von Brennelementen: Simulation von Windkraftfeldern



Supraleitung in Fusionstechnologie: Supraleitende Kabel für zukünftige Netze

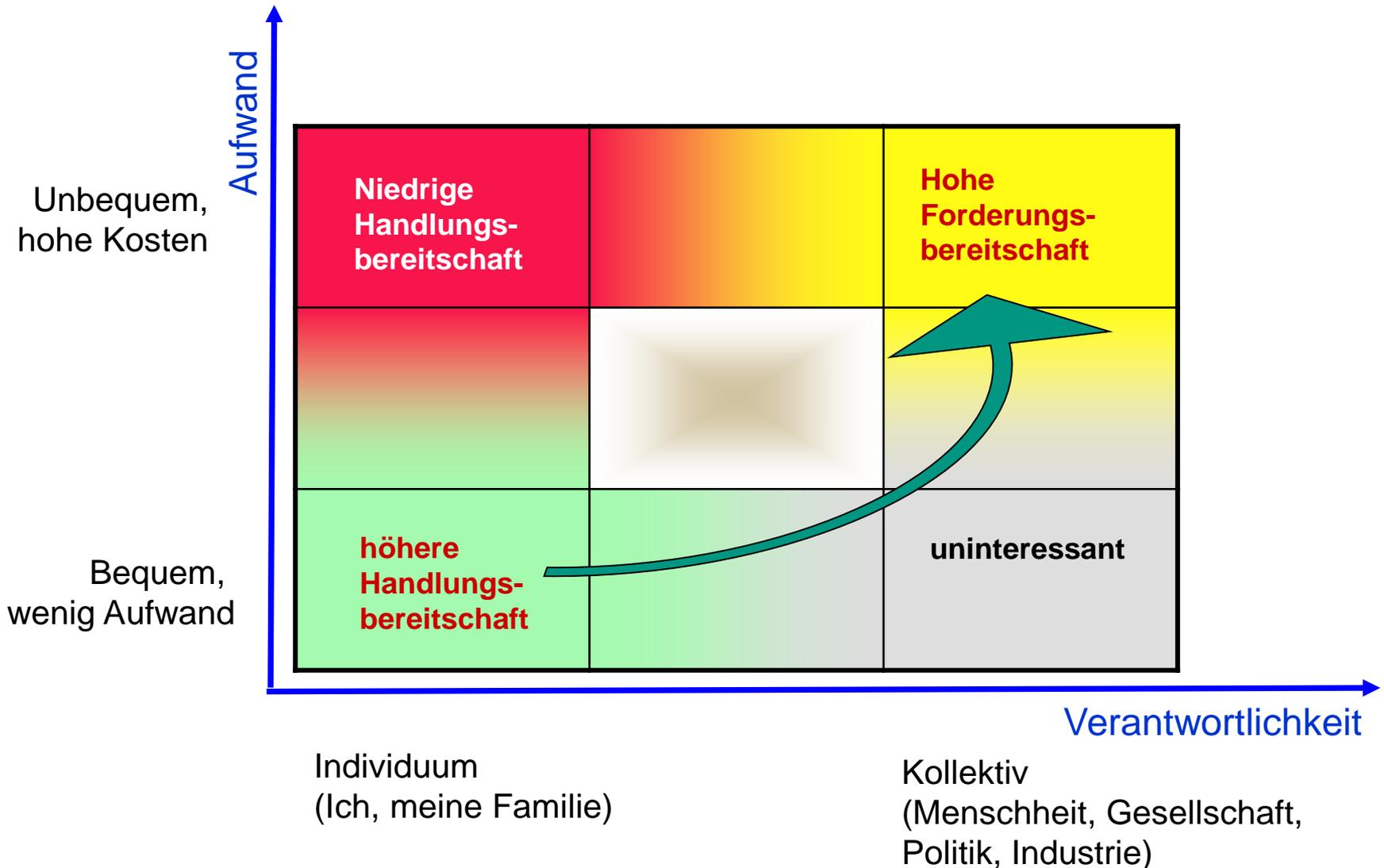


Soziale Akzeptanz von Energietechnologien

- Kerntechnik: Sicherheit, Endlager
- Kohlekraft: Klima, Endlichkeit der Vorräte
- Windkraft: Naturschutz, Anwohner
- Geothermie: Seismizitätsrisiko,
- Bioenergie: Nahrungs-Konkurrenz, Monokulturen
- Photovoltaik-Anlagen: Flächenverbrauch, Landschaftsschutz
- Übertragungsleitungen: Naturschutz, Elektromog



Der schizophrene Bürger



Mein persönliches Fazit

- Die Ziele der Energiewende sind unstrittig:
 - Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien
 - Steigerung der Energieeffizienz , d.h. Senkung des Energieverbrauchs
- Kein gesellschaftlicher Konsens besteht derzeit in
 - Wie schnell?
 - Welcher Aufwand?
 - Bis zu welchem Grad?
 - Welche Einschränkungen?
- Die Physik bestimmt die Politik – nicht umgekehrt
- Das Wecken falscher Erwartungen schadet dem Durchhaltevermögen
- Ich sehe auf absehbare Zeit keine ‚magische‘ Energielösung – eher eine mühsame, schrittweise Weiterentwicklung
- Investition in Bildung und Forschung schaffen Kreativität, Intelligenz und Erfindungsreichtum



A world map showing city lights at night, with the text "Energy is never lost" overlaid. The map is dark blue, and the city lights are shown as bright yellow and white dots. The text is in white, bold, sans-serif font.

“Energy is never lost”

Hermann von Helmholtz