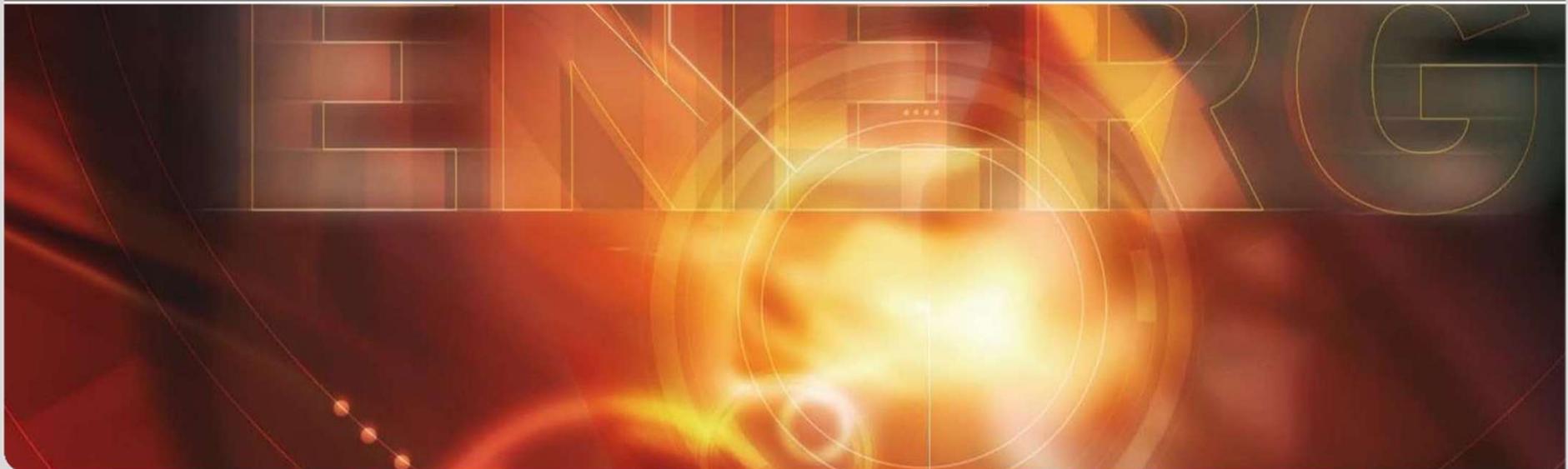


# Heutige Situation und Energiestrategien

**Energieforschungsgespräche Disentis 2021**

**Dr. Thomas-Walter Tromm**

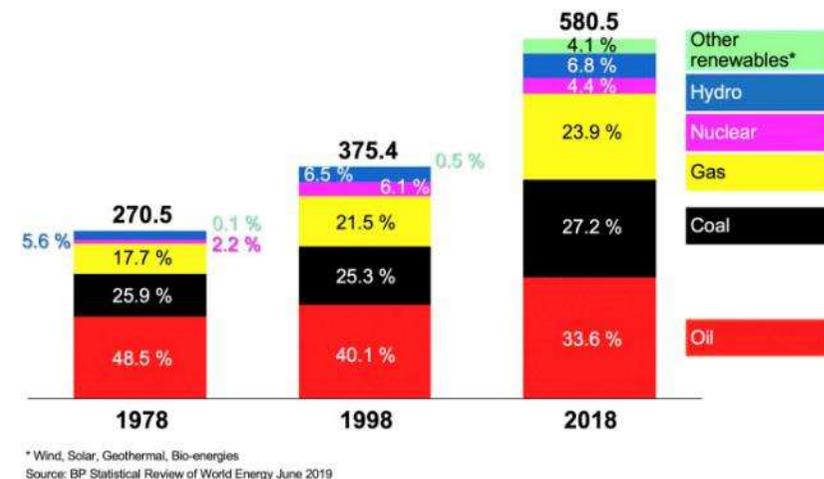
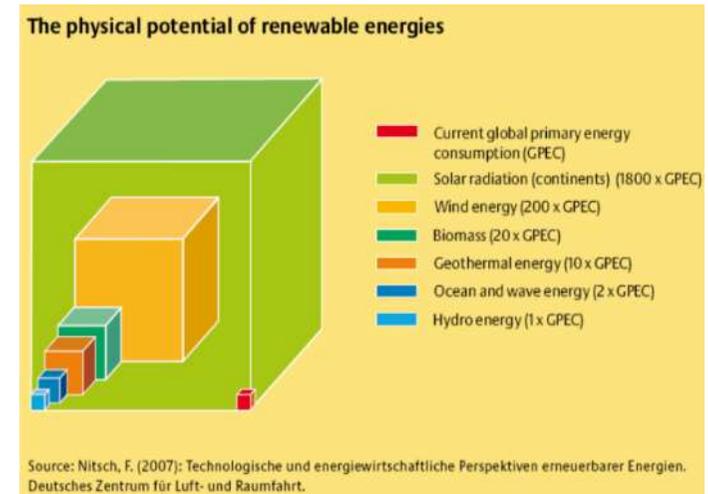
Institut für Thermische Energietechnik und Sicherheit



# Heutige Situation und Energiestrategien

## Gliederung:

- Situation weltweit
- In Europa
  - Ausgewählte Beispiele:
  - Deutschland
  - Schweiz

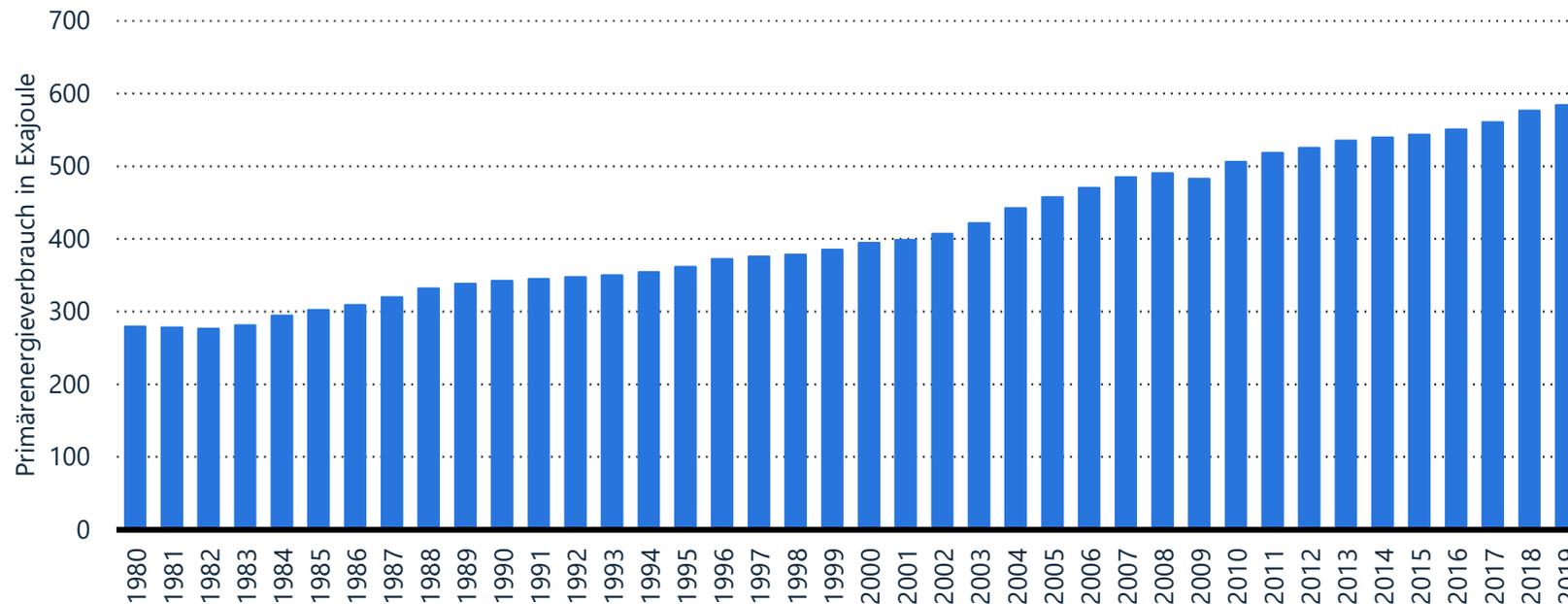


Weltenergiebedarf: ca. 160.000 TWh/a

World Energy Council, 2019

# Weltweiter Primärenergieverbrauch in den Jahren von 1980 bis 2019 (in Exajoule = 278 TWh)

Weltweiter Primärenergieverbrauch bis 2019



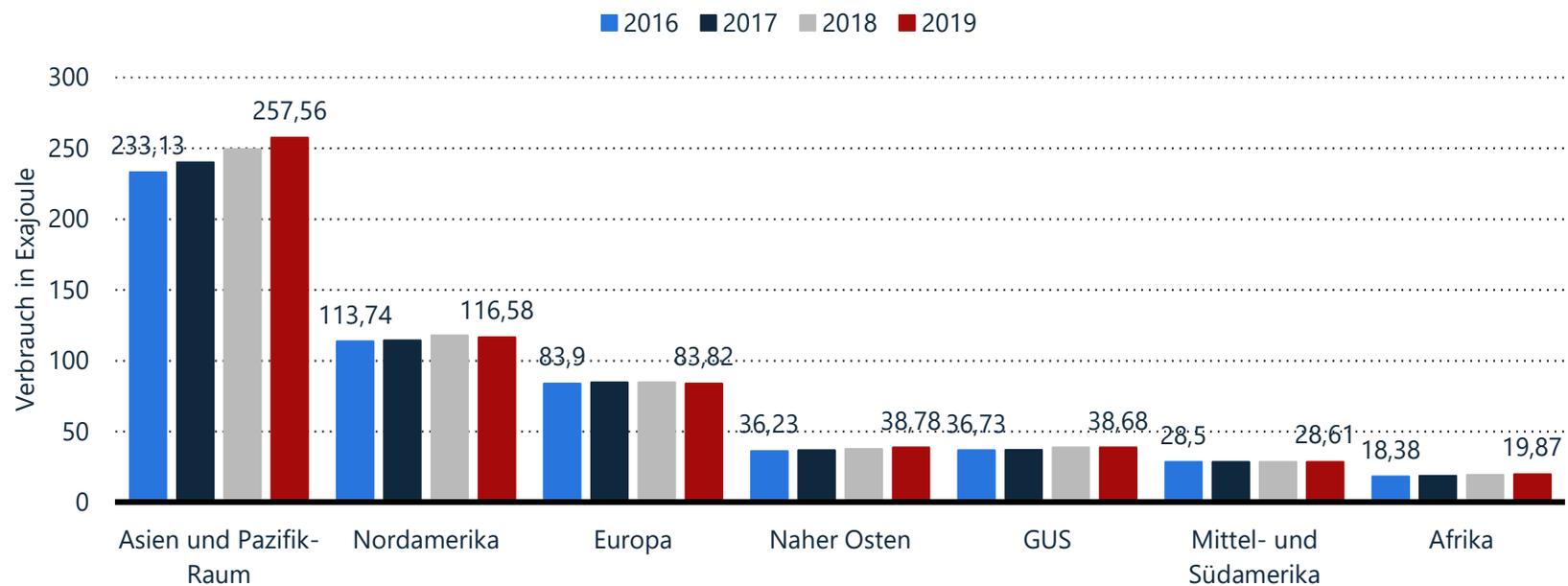
**Hinweis(e):** Weltweit

Weitere Angaben zu dieser Statistik, sowie Erläuterungen zu Fußnoten, sind auf [Seite 8](#) zu finden.

**Quelle(n):** BP; ID 42226

4

# Primärenergieverbrauch nach Regionen weltweit in den Jahren 2016 bis 2019 (in Exajoule)



**Hinweis(e):** Weltweit

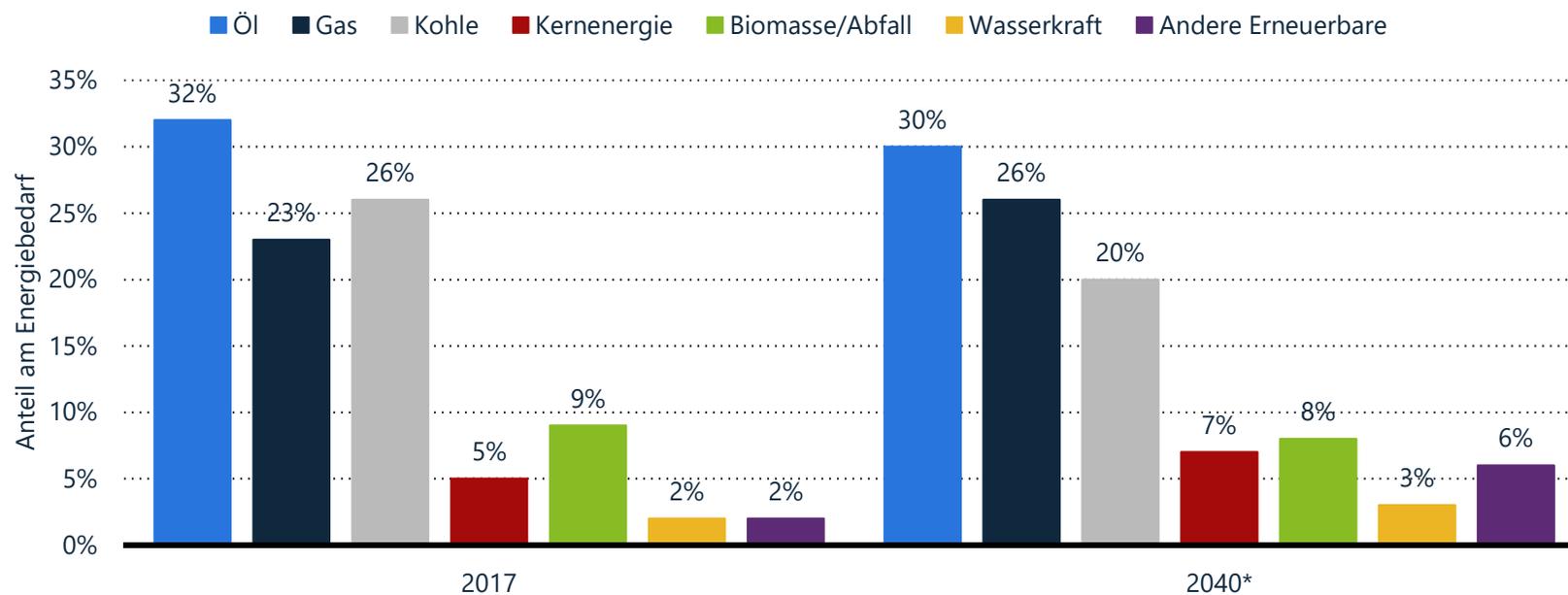
Weitere Angaben zu dieser Statistik, sowie Erläuterungen zu Fußnoten, sind auf [Seite 8](#) zu finden.

**Quelle(n):** BP; ID 12889

4

statista

# Prognose zur Verteilung des weltweiten Energiebedarfs nach Energieträger bis 2040



Hinweis(e): Weltweit

Weitere Angaben zu dieser Statistik, sowie Erläuterungen zu Fußnoten, sind auf [Seite 8](#) zu finden.

Quelle(n): Exxon Mobil; ID 28694

2

# Technologien

## Erneuerbare Energiequellen:

(im Vortrag beschränkt auf Sonnenenergie und Windkraft)

■ Sonnenenergie



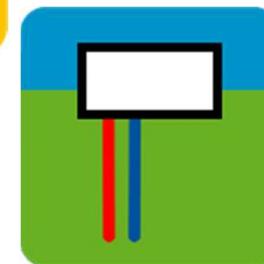
■ Windkraft



■ Bioenergie



■ Geothermie



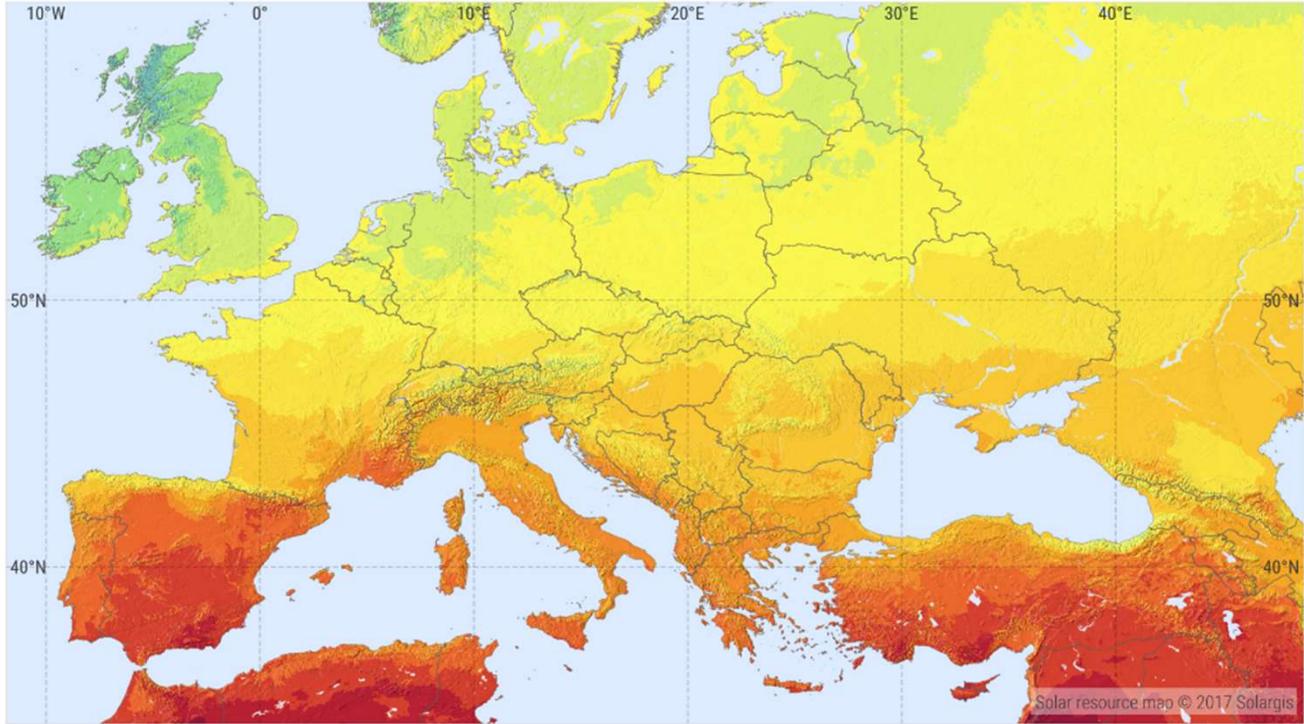
■ Wasserkraft



# SOLARGIS Map Europe, Solareinstrahlung

## PHOTOVOLTAIC POWER POTENTIAL EUROPE

SOLARGIS



Average annual sum of PVOUT, period 1994-2016

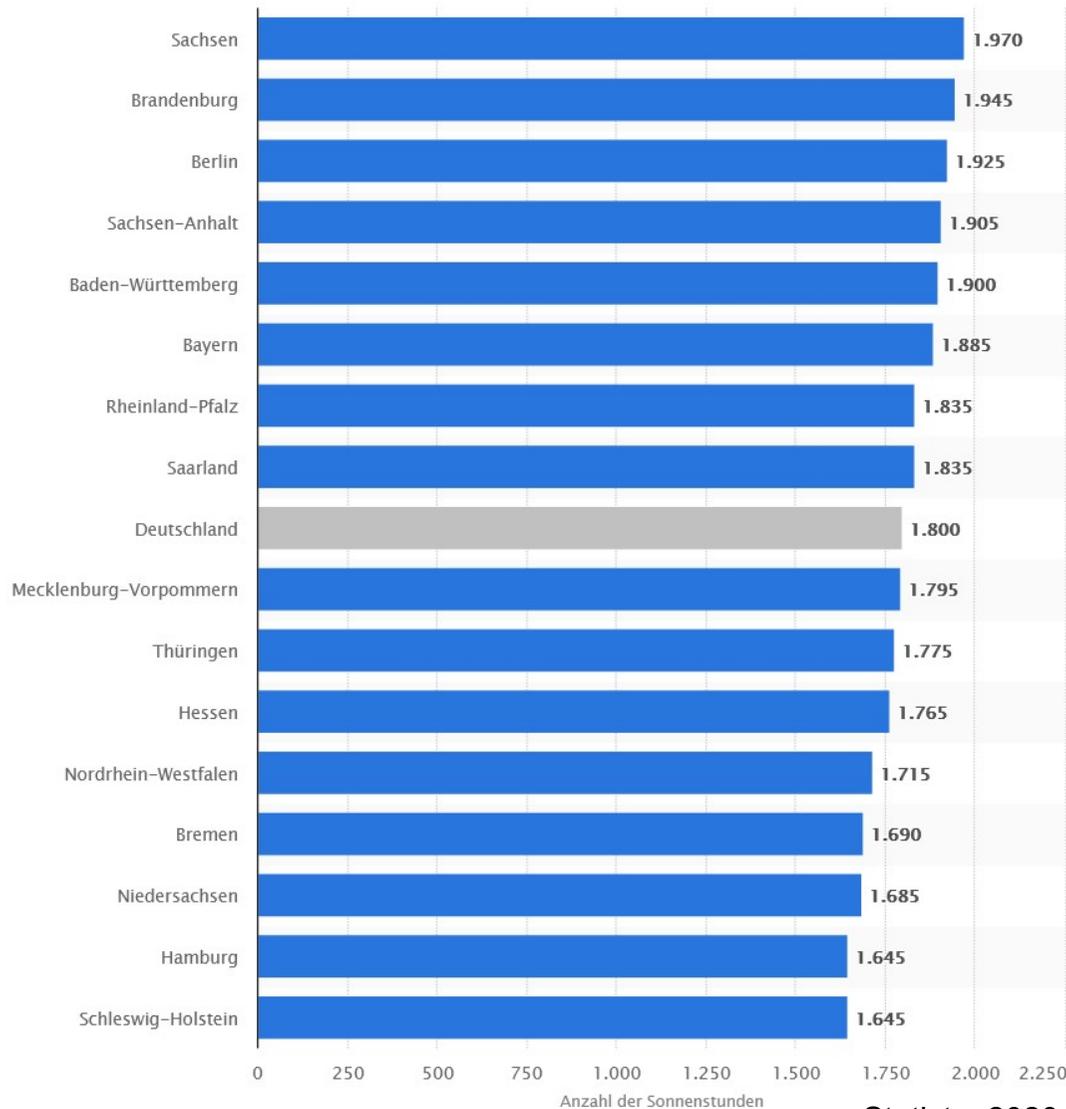


800 1000 1200 1400 1600 1800 kWh/kWp

This map is licensed by Solargis under the Creative Commons Attribution license (CC BY-SA 4.0). You are encouraged to use content of the map to benefit yourself and others in creative ways. For more information, please visit <http://solargis.com/download>.

Quelle: SOLARGIS

# Anzahl der Sonnenstunden in Deutschland



Statista, 2020

## Deutschland:

- Solarenergie 1000 kWh/(m<sup>2</sup>a)
- Durchschnitt: 115 W/m<sup>2</sup>
- Einstrahlung im Sommer = 5x Winter

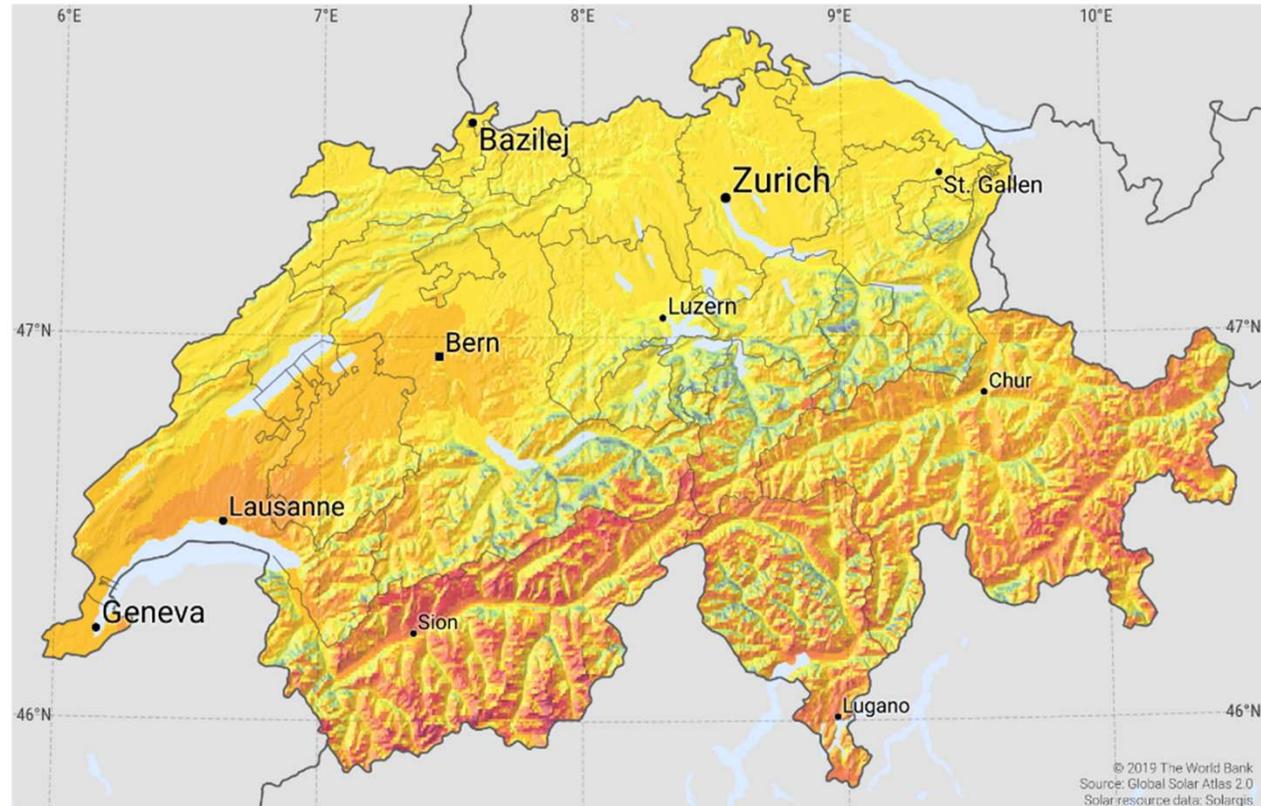
## Saudi-Arabien: 2500 kWh/(m<sup>2</sup>a)

- Durchschnitt: 285 W/m<sup>2</sup>
- Erde: Durchschnitt 230 W/m<sup>2</sup>

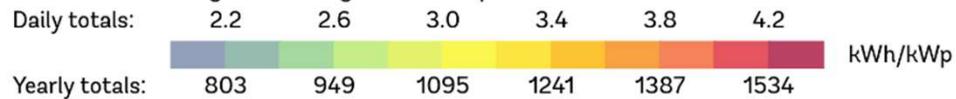
SOLAR RESOURCE MAP

## PHOTOVOLTAIC POWER POTENTIAL

### SWITZERLAND

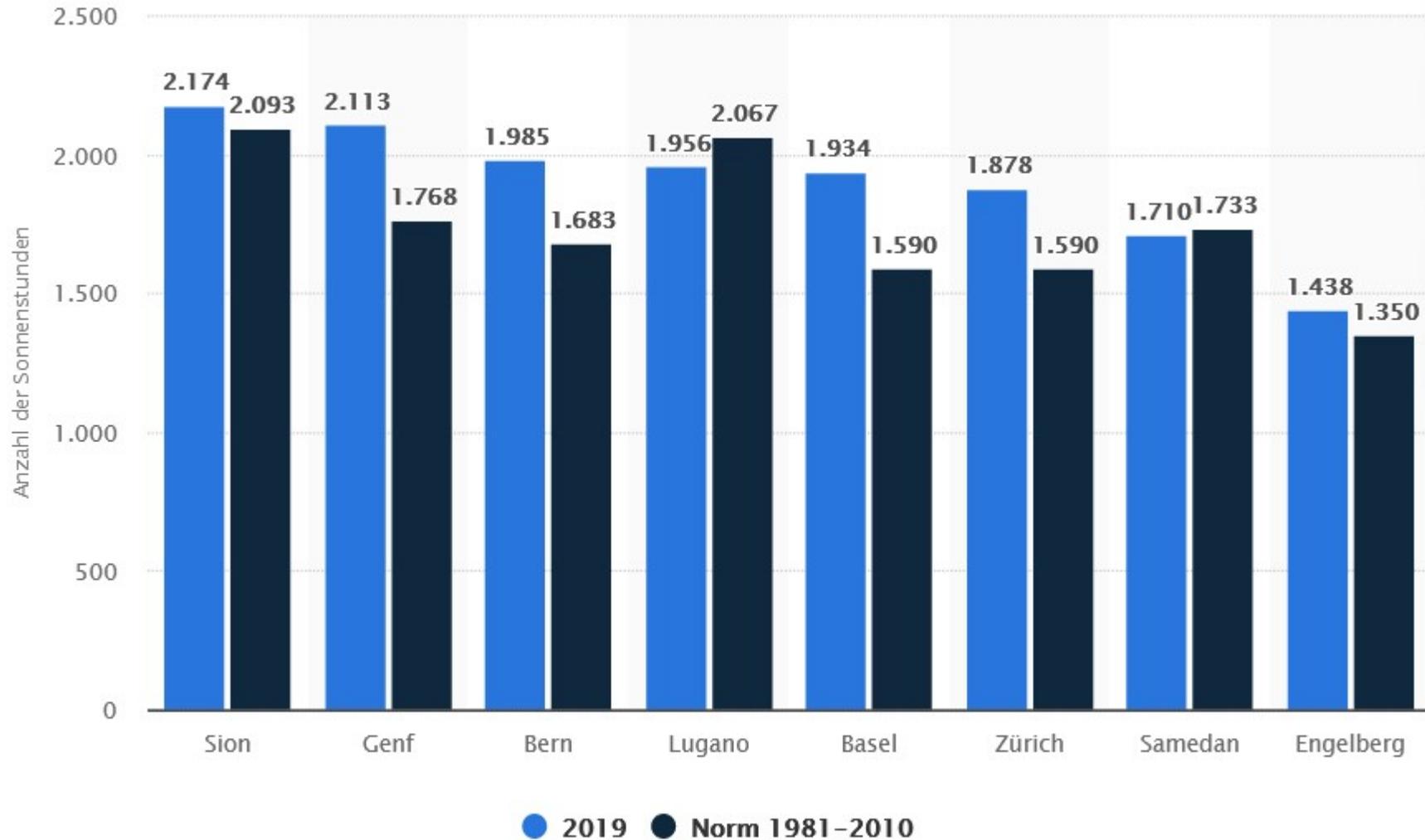


Long term average of PVOUT, period 1994-2018

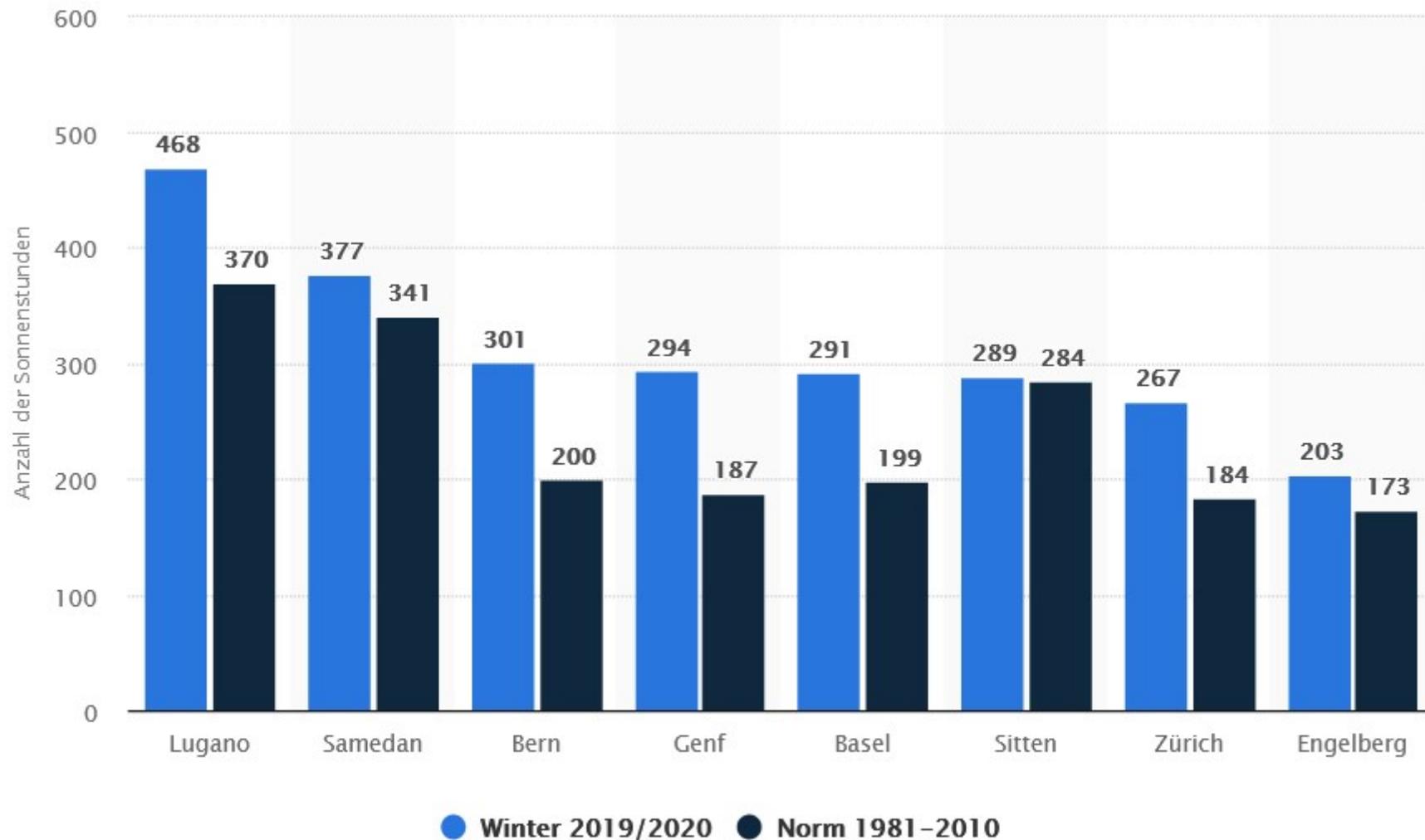


This map is published by the World Bank Group, funded by ESMAP, and prepared by Solargis. For more information and terms of use, please visit: <http://globalsolaratlas.info>.

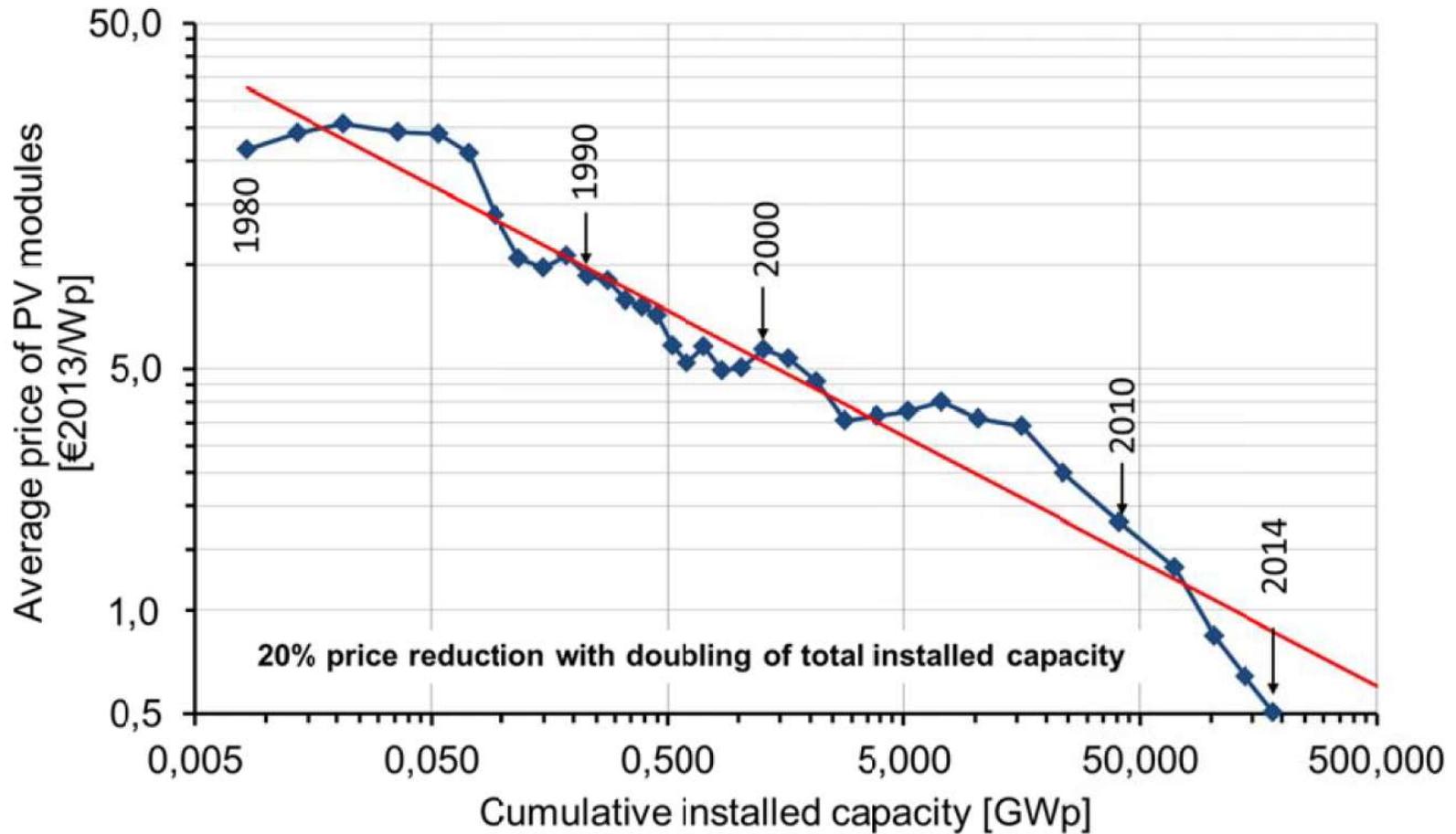
# Anzahl der Sonnenstunden der Schweiz, 2019



# Anzahl der Sonnenstunden der Schweiz, Winter 2019/2020



# Photovoltaik – technologische Lernkurve



PSE AG, Fraunhofer ISE, Unlimited/Navigant Consulting/EuPD 2015

## Siliziumsolarzellen-Herstellung

Herstellung+Installation Si -PV benötigt 8.300 kWh/kW

Beispiel: 50 Millionen kW PV Leistung bis 2030 installieren (Verdoppelung).

Dafür Energiebedarf:  $4 \cdot 10^{11}$  kWh Energie

Rheinhafen - Dampfkraftwerk Karlsruhe

Leistung: 2 GW,

→ 11 Jahre Betrieb um nötige Energie aufzubringen



# Konzentrierende Solarthermie

- Mit Spiegeln oder Linsen wird das Sonnenlicht gebündelt und in Wärme umgesetzt, um einen Wärmeträger zu erhitzen.
- Dies kann Wasser, eine Salzschnmelze, ein Gas oder ein flüssiges Metall sein
- In einem konventionellen Kraftwerksprozess wird ein Teil der Wärmeenergie in elektrischen Strom umgewandelt
- Wärmespeicher können auch in Dunkelzeiten elektrische Energie bereitstellen.
- Einsatz in sonnenreichen Regionen der Erde



## Diadem der Wüste

Die Luftaufnahme aus dem Frühsommer 2017 zeigt, wie mehr und mehr Reflektoren um den Turm für NOORo III (Ouarzazate, Marokko) installiert wurden. Kommerzieller Betrieb Q2, 2019  
Quelle: ACWA-Power

# Hochtemperatur-Strom-Wärme-Strom-Speicher



# Windkraft

Herausforderungen:

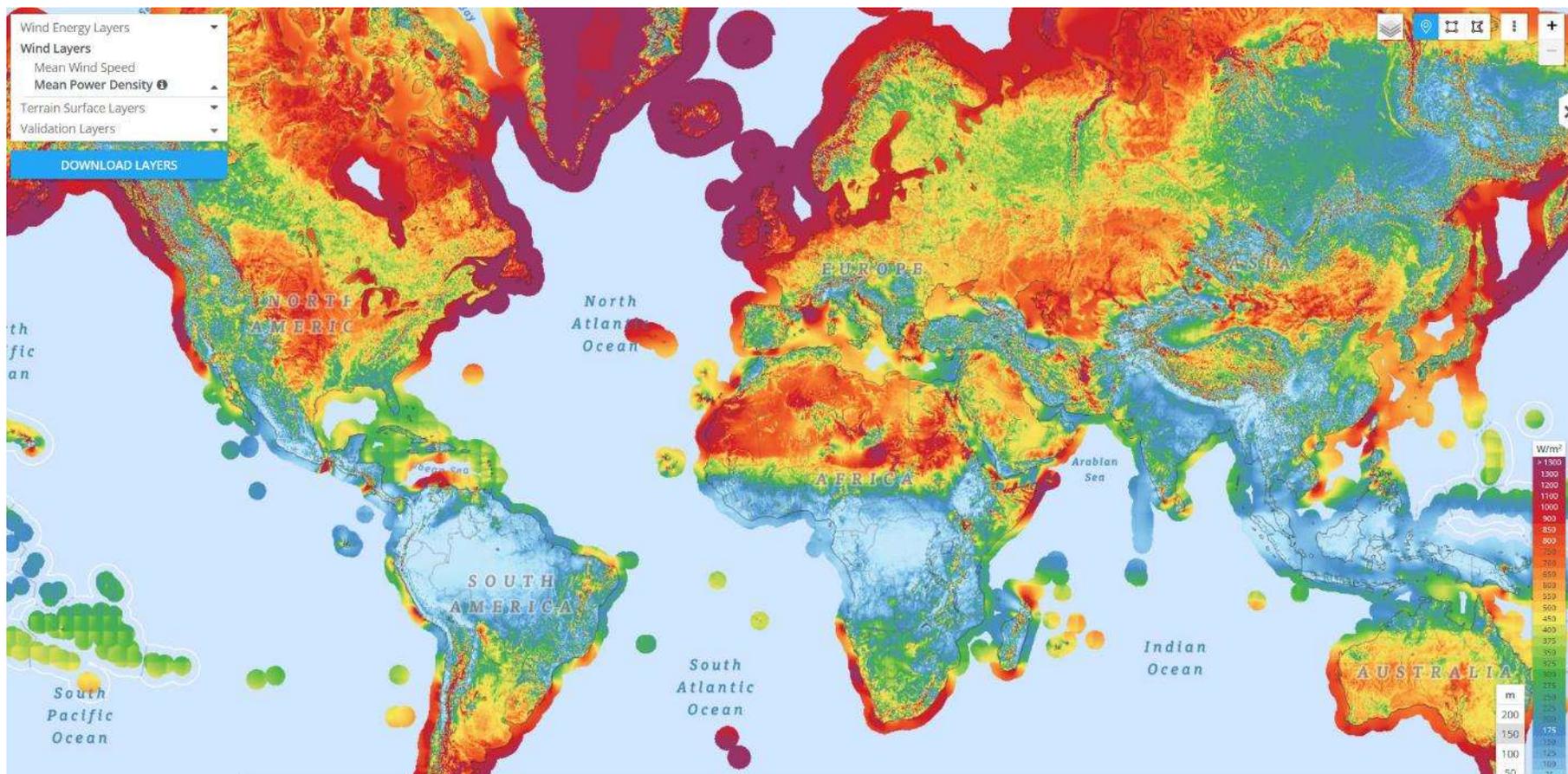
- Konstruktion und Bau
- Bauwerksgründungen, insbesondere Offshore
- Turm- bzw. Mastkonstruktionen, insbesondere Stahl- und Betonbau
- Getriebetechnik
- SUPRAPOWER: Supraleitende Generatoren
- Faserverbundwerkstoffe und Leichtbaukonstruktionen für Rotorblätter
- Produktionsverfahren für Rotorblätter (z.B. Mikrowellen, Gewebelege-Roboter)
- Zuverlässigkeit und Lebensdauer



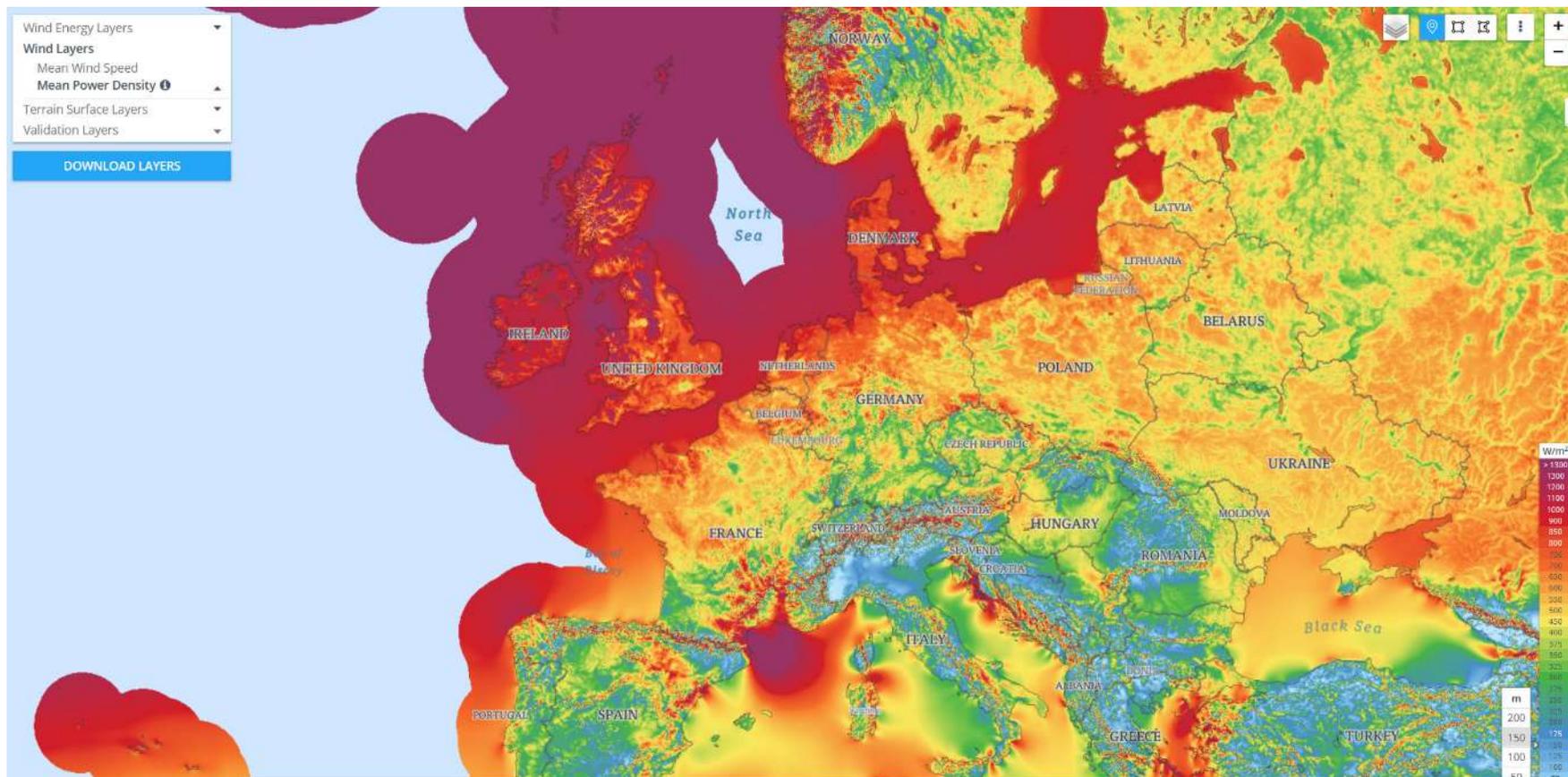
# Global Wind Atlas

## DTU Wind Energy, Danish Technical University

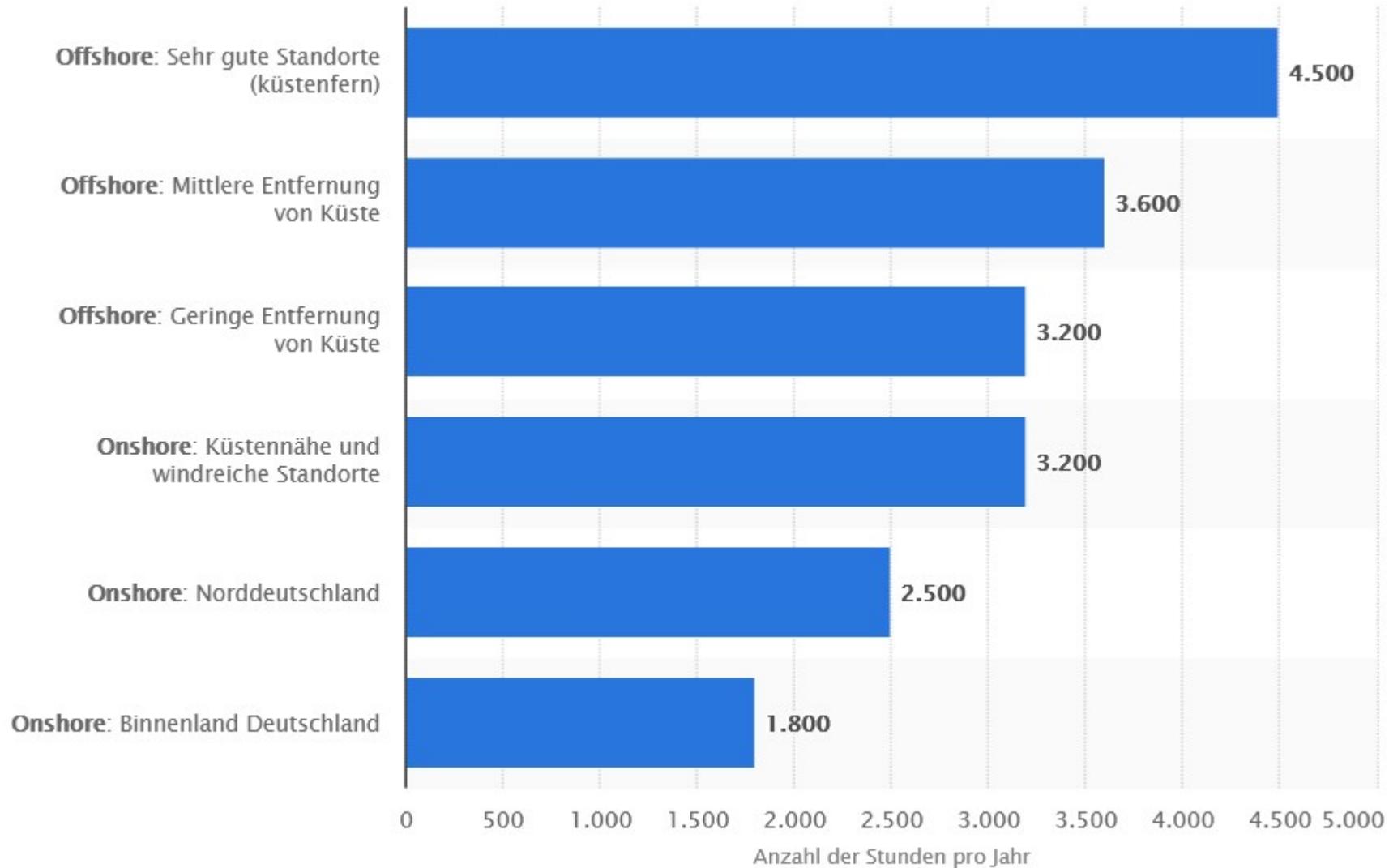
DTU Wind Energy is one of the largest and most well-known university department for wind energy in the world with 250 employees.



# Windatlas Ausschnitt Europa



# Anzahl der Wind-Volllaststunden nach typischen Standorten für Windenergieanlagen in Deutschland im Jahr 2018 (in Stunden pro Jahr)



# Forschungsprojekte zu Offshore-Windkraftanlagen in tiefen Gewässern

## GICON-SOF Off-shore Projekt Großmann Ingenieur Consult



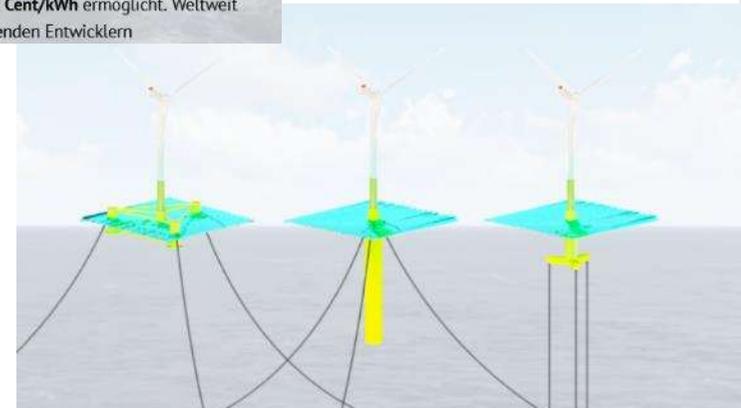
### DAS GICON®-SOF

TECHNISCHE ANTWORT AUF DIE ZUKUNFTSFRAGEN DER OFFSHORE-WINDINDUSTRIE

Offshore-Windkraft ist eine der wichtigsten Säulen der ökologisch-regenerativen Energieversorgung. Der Bau klassischer Offshore-Windenergieanlagen ist gegenwärtig jedoch mit gewaltigen technischen, ökologischen und finanziellen Herausforderungen verbunden. Diese **Kosten und Risiken zu minimieren** ist für die Offshore-Windindustrie von entscheidender Bedeutung. Eine weitere existentielle Frage der Branche ist die **Erschließung neuer Wassertiefen mit hohem Windertrag**. 75% der weltweiten Offshore-Potentiale befinden sich in Gebieten mit Wassertiefen von mehr als 30 Metern, immerhin zwei Drittel in Tiefen über 50 Metern.

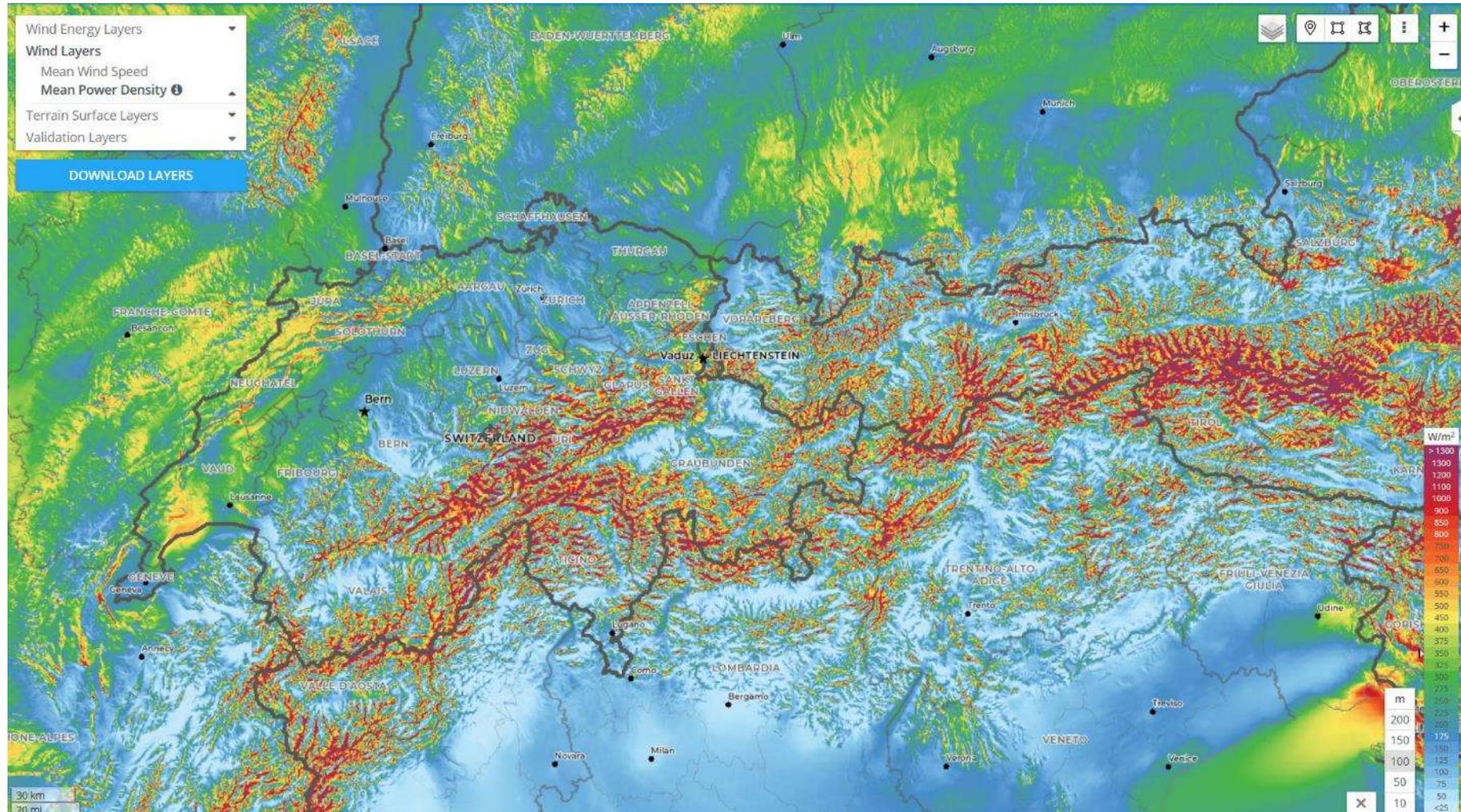
**Das GICON®-SOF (Schwimmendes Offshore-Fundament) bietet für diese beiden Zukunftsfragen die ideale Lösung.**

GICON hat mit dem SOF eine schwimmende Plattform für Offshore-Windenergieanlagen entwickelt, die in Wassertiefen **von 45 bis 350 Metern und mehr** einsetzbar ist und Stromgestehungskosten **5 bis 8 Cent/kWh** ermöglicht. Weltweit zählt GICON damit zu den führenden Entwicklern

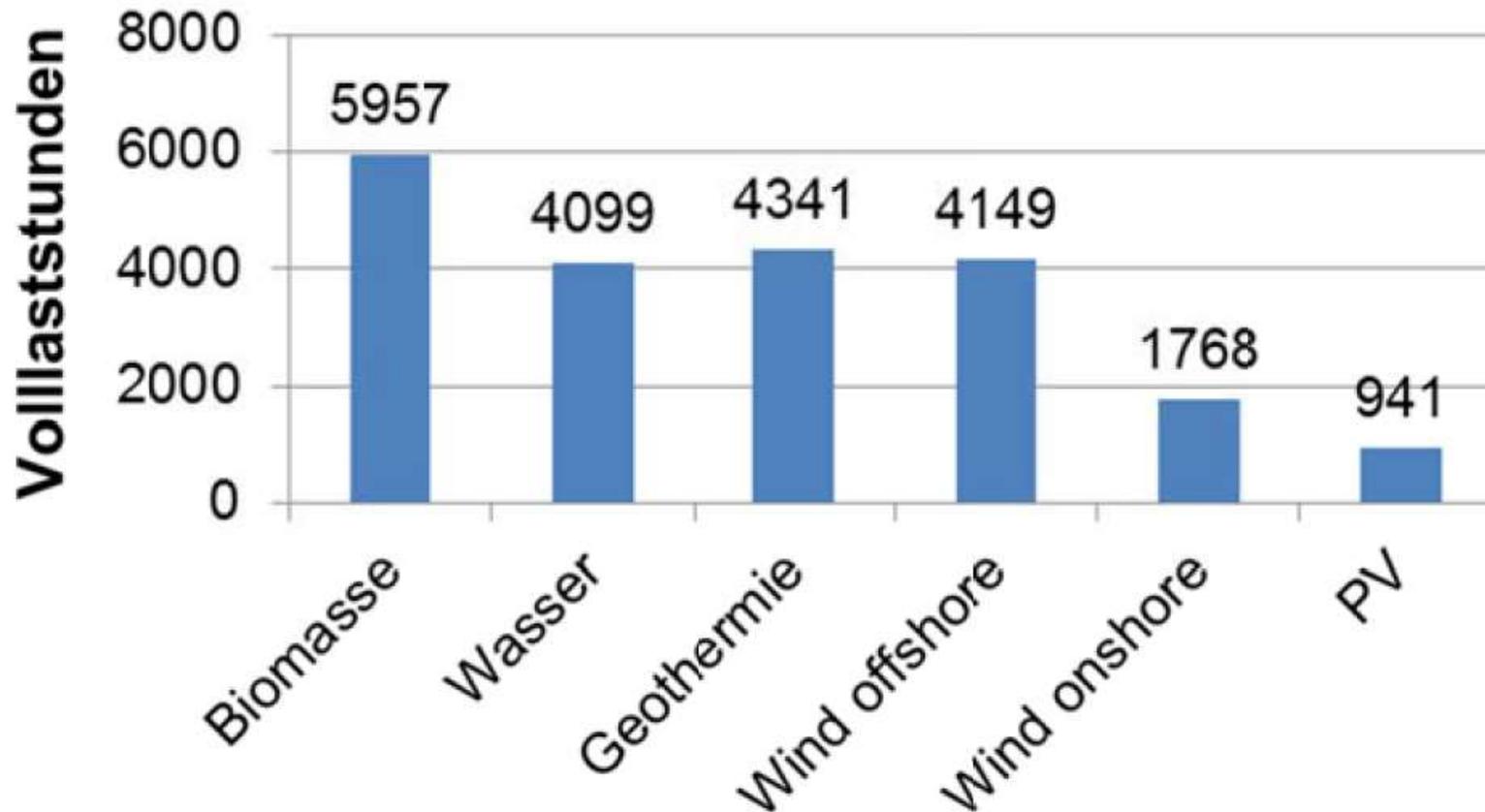


Semi-Submersible | Spar-Buoy | Tension-Leg-Plattform | Source: Daniel Walia, Chair for Windenergy Technology, University of Rostock

# Windatlas Ausschnitt Schweiz



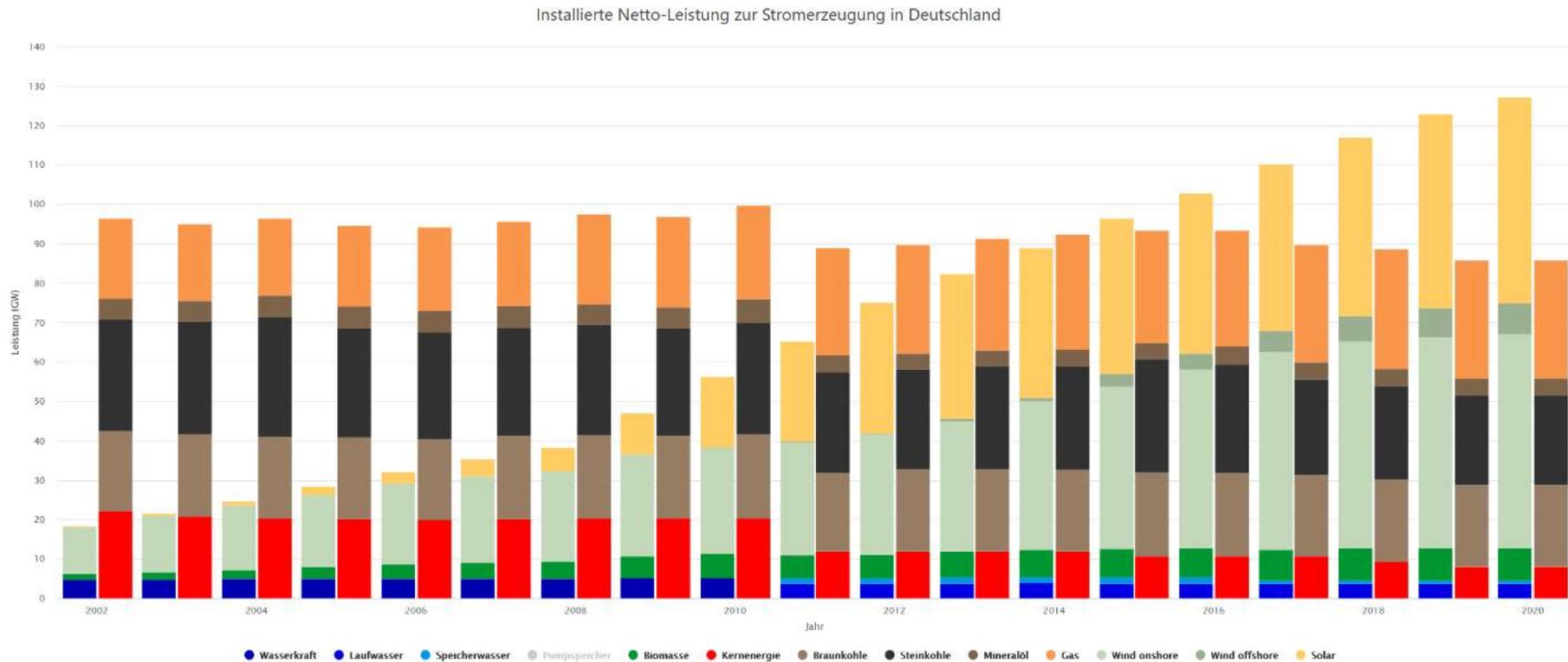
# Vollbenutzungsstunden



Prognostizierte Vollbenutzungsstunden für ganzjährig betriebene Anlagen, gemittelte Daten für die Jahre 2012 bis 2016; Fraunhofer ISE: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/veroeffentlichungen-pdf-dateien/studien-und-konzeptpapiere/aktuelle-fakten-zur-photovoltaik-in-deutschland.pdf>

# Speicherfähigkeit bzw. Strom-Kapazitätsmarkt

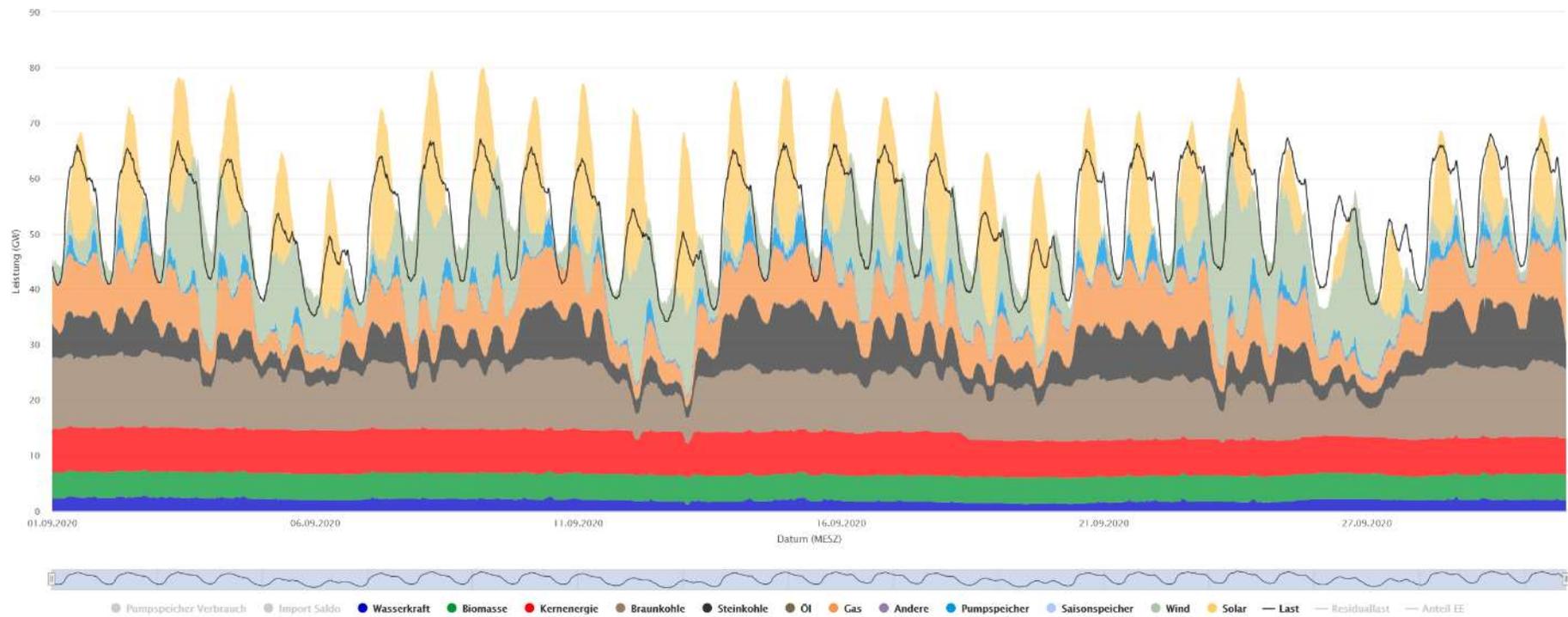
## Installierte Leistung zur Stromerzeugung in Deutschland, 2002 bis 2020



Quelle: Energy-charts, Fraunhofer ISE

# Stromerzeugung Deutschland, September 2020

Stromerzeugung in Deutschland im September 2020

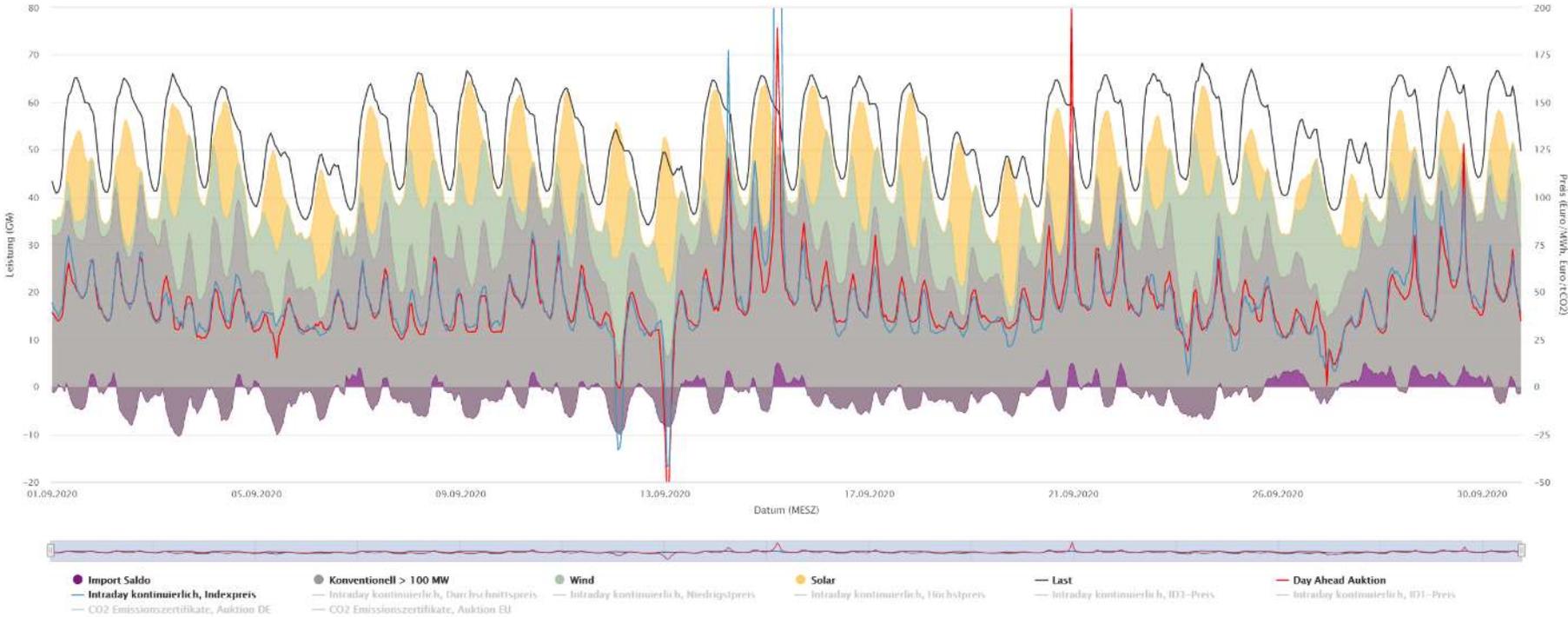


Quelle: Energy-charts, Fraunhofer ISE

# Börsenpreise Deutschland, September 2020



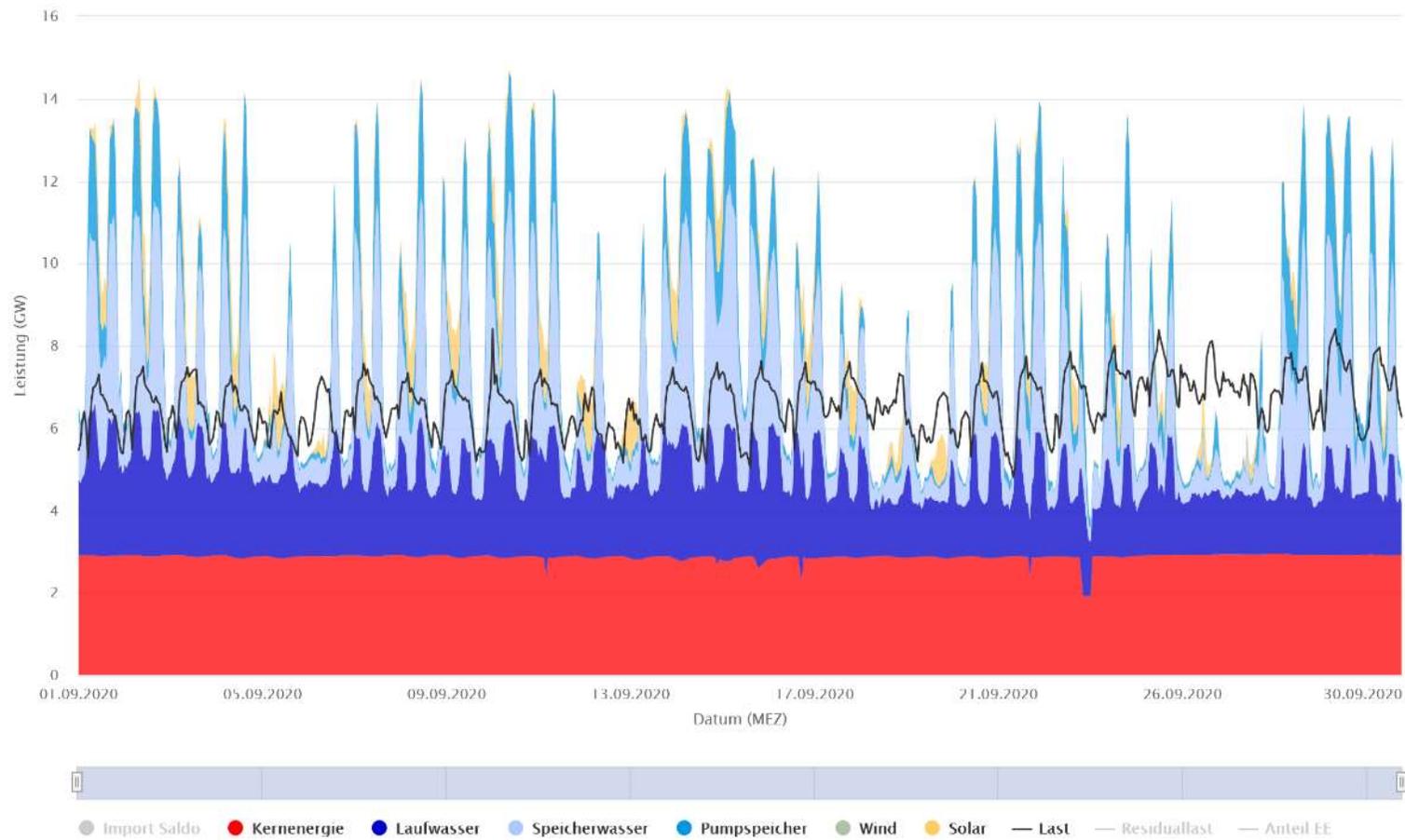
Stromproduktion und Börsenstrompreise in Deutschland im September 2020



Quelle: Energy-charts, Fraunhofer ISE

# Stromerzeugung Schweiz, September 2020

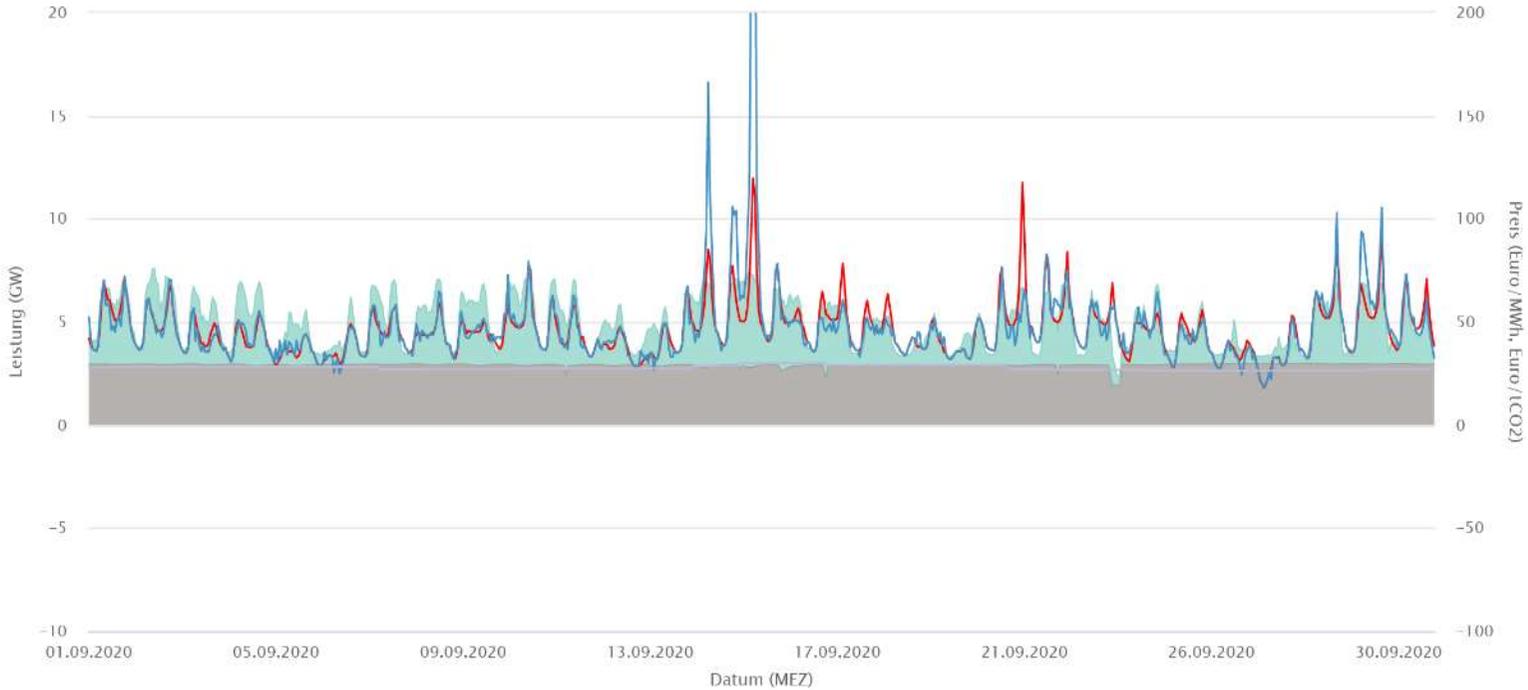
Stromerzeugung in der Schweiz im September 2020



# Börsenpreise Schweiz, September 2020



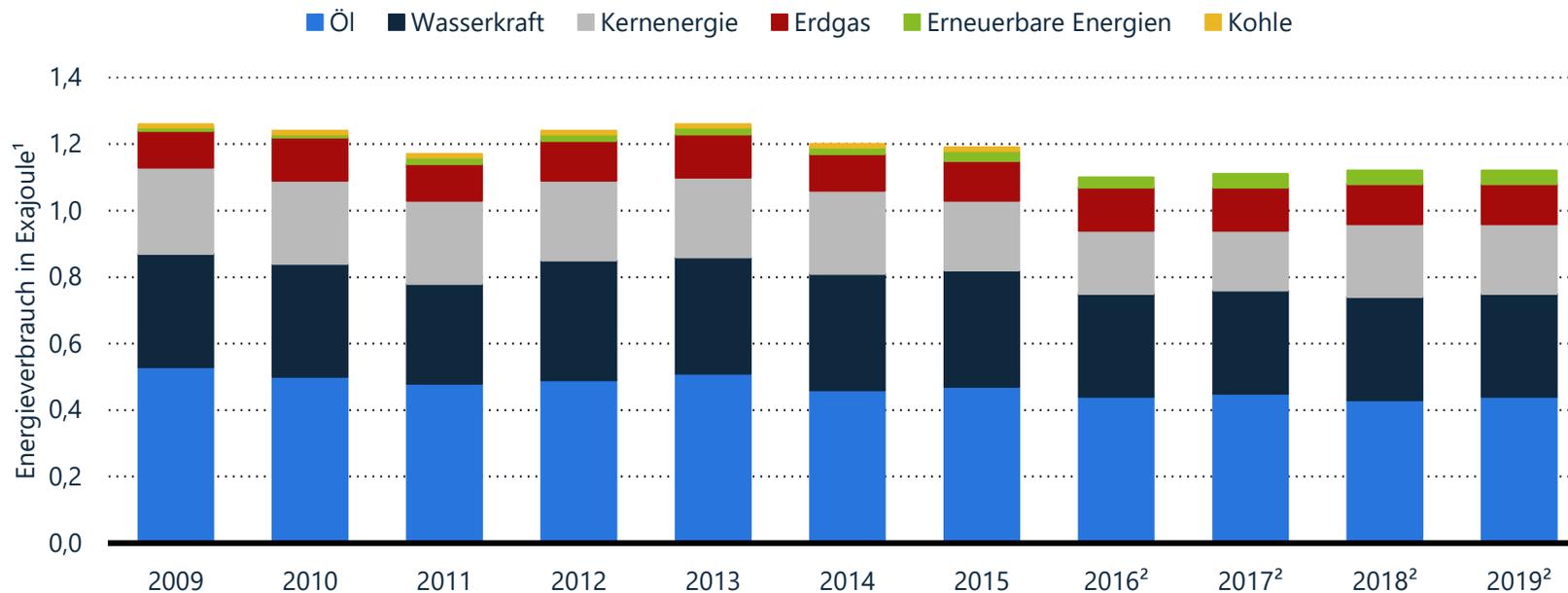
Stromproduktion und Börsenstrompreise in der Schweiz im September 2020



- Import Saldo
- Nicht Erneuerbar
- Erneuerbar
- Last
- Day Ahead Auktion
- Intraday kontinuierlich, Indexpreis
- Intraday kontinuierlich, Durchschnittspreis
- Intraday kontinuierlich, Niedrigstpreis
- Intraday kontinuierlich, ID3-Preis
- Intraday kontinuierlich, ID1-Preis
- Intraday Auktion, IDA2 Preis
- CO2 Emissionszertifikate, Auktion EU
- Intraday Auktion, IDA1-Preis

# Gesamtsituation: Primärenergie

## Primärenergieverbrauch der Schweiz nach Energieträger von 2009 bis 2019 (in Exajoule)



Hinweis(e): Schweiz

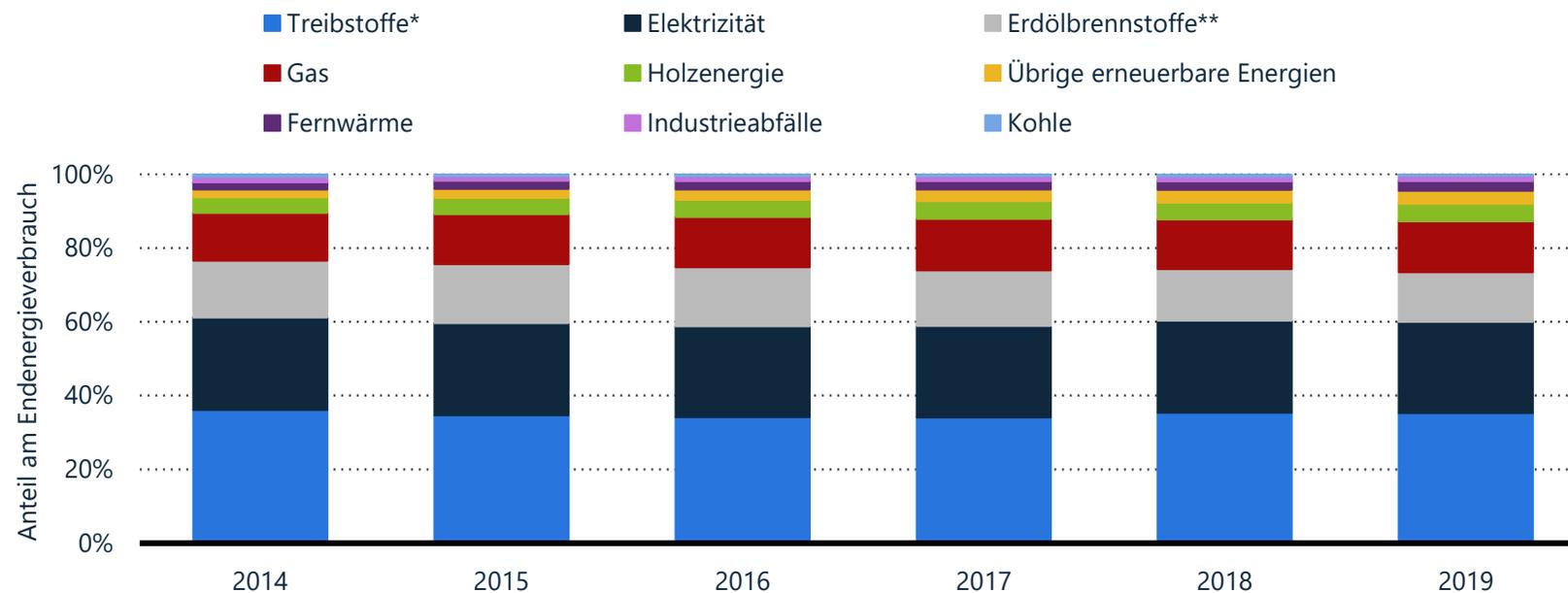
Weitere Angaben zu dieser Statistik, sowie Erläuterungen zu Fußnoten, sind auf [Seite 8](#) zu finden.

Quelle(n): BP; ID 42435

2

statista

## Struktur des Endenergieverbrauchs in der Schweiz nach der Art des Energieträgers von 2014 bis 2019



Hinweis(e): Schweiz

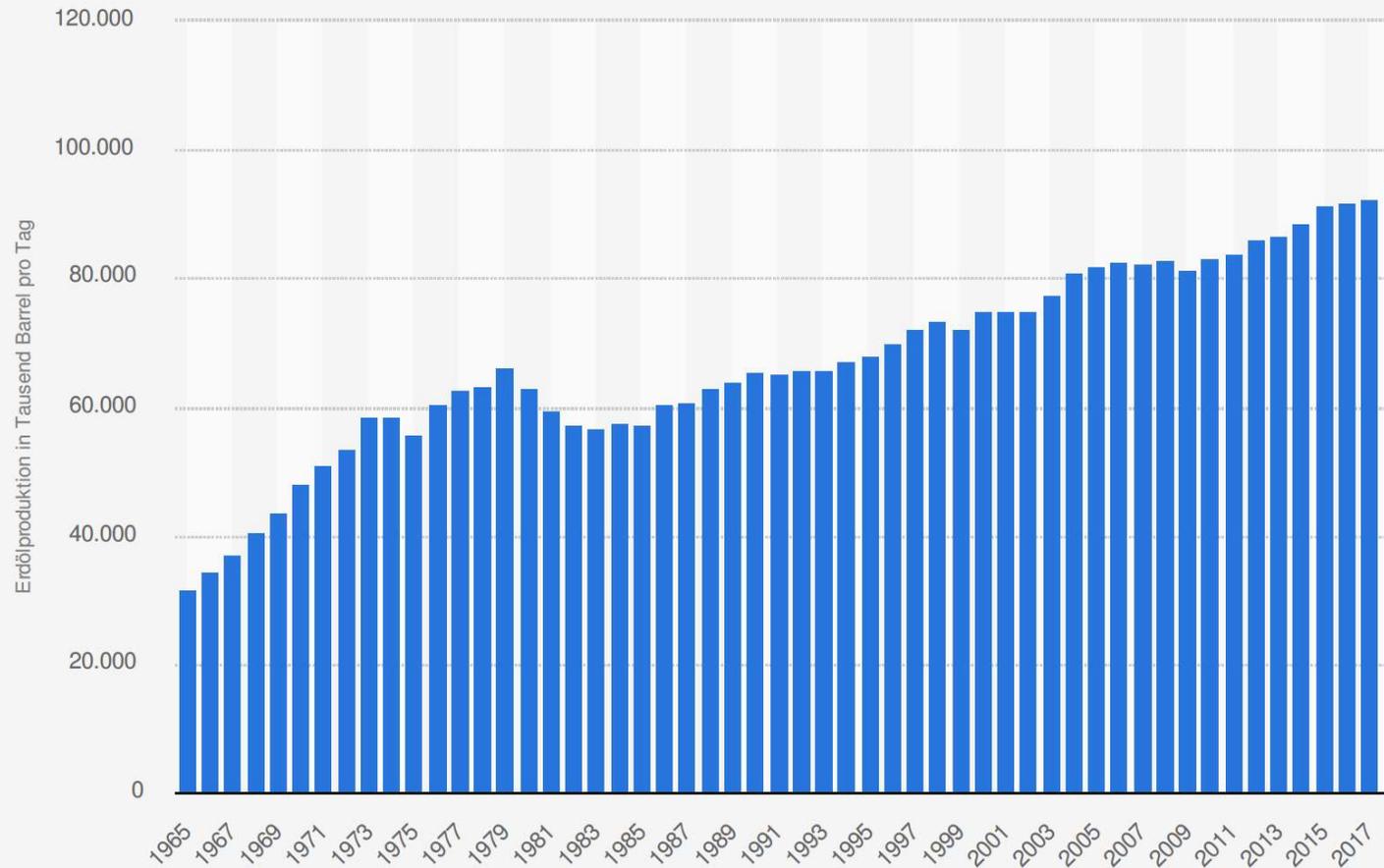
Weitere Angaben zu dieser Statistik, sowie Erläuterungen zu Fußnoten, sind auf [Seite 8](#) zu finden.

Quelle(n): BFE; ID 287913

2

statista

### Weltweite Erdölproduktion in den Jahren 1965 bis 2018 (in 1.000 Barrel pro Tag)

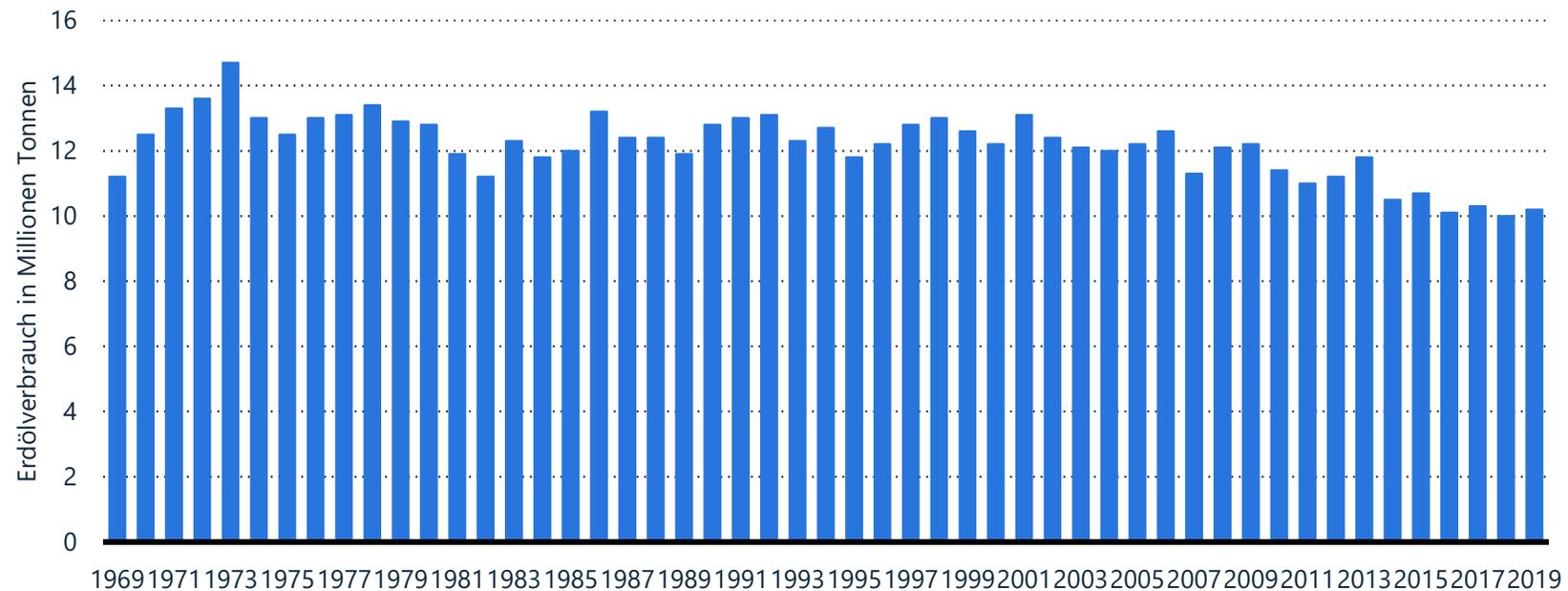


Quelle  
BP  
© Statista 2019

Weitere Informationen:  
Weltweit

BP. "Weltweite Erdölproduktion in den Jahren 1965 bis 2018 (in 1.000 Barrel pro Tag)." Chart. 11. Juni, 2019. Statista. Zugriffen am 21. Oktober 2019. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/40120/umfrage/welt-insgesamt--erdoelproduktion-in-tausend-barrel-pro-tag/>

## Erdölverbrauch in der Schweiz in den Jahren 1969 bis 2019 (in Millionen Tonnen)



**Hinweis(e):** Schweiz

Weitere Angaben zu dieser Statistik, sowie Erläuterungen zu Fußnoten, sind auf [Seite 8](#) zu finden.

**Quelle(n):** BP; ID 40593

2

statista

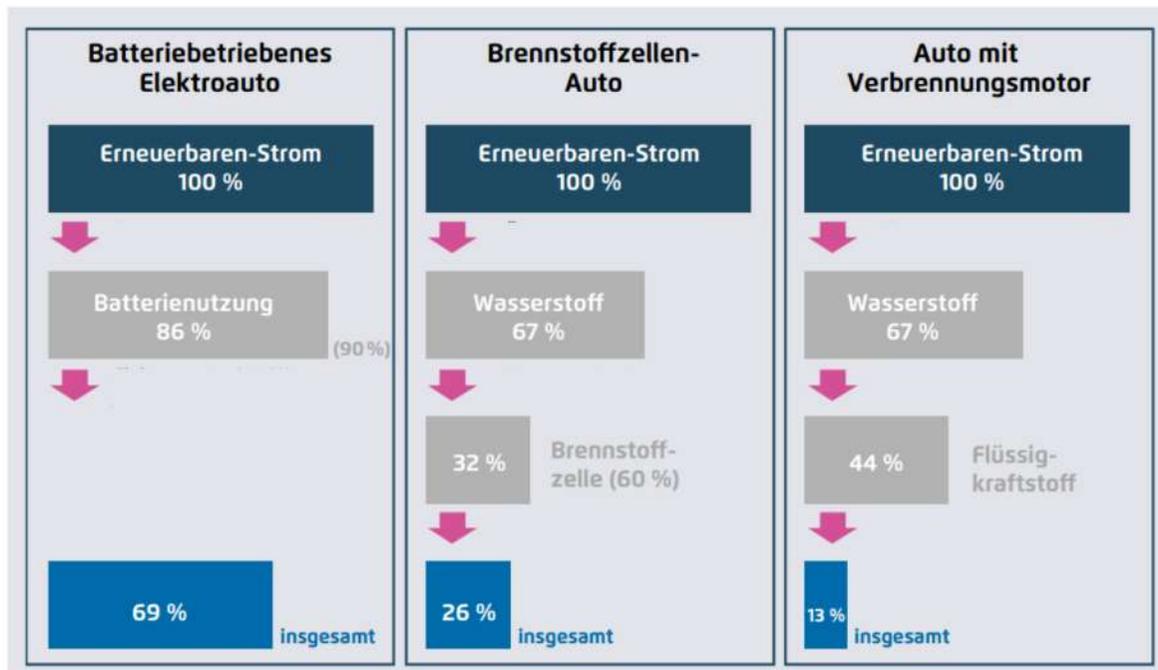
# Erneuerbare Energien im Primärenergieverbrauch

## Nutzung Erneuerbare Energien für den PKW

Bei Pkw ist Elektromobilität der Maßstab hinsichtlich einer effizienten Energienutzung.



Einzel- und Gesamtwirkungsgrade von Pkw mit unterschiedlichen Antrieben



→ Für die gleiche Fahrstrecke benötigt das Auto mit **Verbrennungsmotor** und PtL also etwa **fünfmal** so viel erneuerbaren Strom wie das batteriebetriebene Elektroauto.

→ Ein **Brennstoffzellen-Pkw** benötigt etwa **zweieinhalb-mal** so viel Strom.

## Nutzung Erneuerbare Energien für Verkehr, Wärme und Industrie

PtG/PtL sollten vorrangig dort zum Einsatz kommen, wo Strom nicht direkt genutzt werden kann.



Dekarbonisierungsoptionen	Prioritär direkte Stromnutzung*	Ergänzend synthetische Brennstoffe**	
		Wasserstoff***	CO <sub>2</sub> -basiertes PtG und PtL
<b>Verkehr</b>	Züge und Bahnen, Busse und Lkw auf kürzeren Strecken, Oberleitungs-Lkw und -Reisebusse auf längeren Strecken, Pkw, Zweiräder, Binnenschiffe (je nach Verwendungszweck)	Fernverkehrs-Lkw und -Busse abseits von Oberleitungen, Binnenschiffe (je nach Verwendungszweck)	Luft- und Seeschiffsverkehr, Fernverkehrs-Lkw und Busse abseits von Oberleitungen, Binnenschiffe (je nach Verwendungszweck)
<b>Wärme</b>	Niedertemperaturwärme mit Wärmepumpen in hinreichend gedämmten Gebäuden und in der Industrie	Brennstoffzellen-KWK in Bestandsgebäuden mit erheblichen Dämmrestriktionen	Bestandsgebäude mit erheblichen Dämmrestriktionen und Hybridheizungen mit unterstützendem Kessel
	Hochtemperaturprozesswärme mit direkt-elektrischen Verfahren (Widerstandsheizung, Plasma etc.)	Hochtemperaturprozesswärme für schwer elektrifizierbare Anwendungen	Hochtemperaturprozesswärme für schwer elektrifizierbare Anwendungen

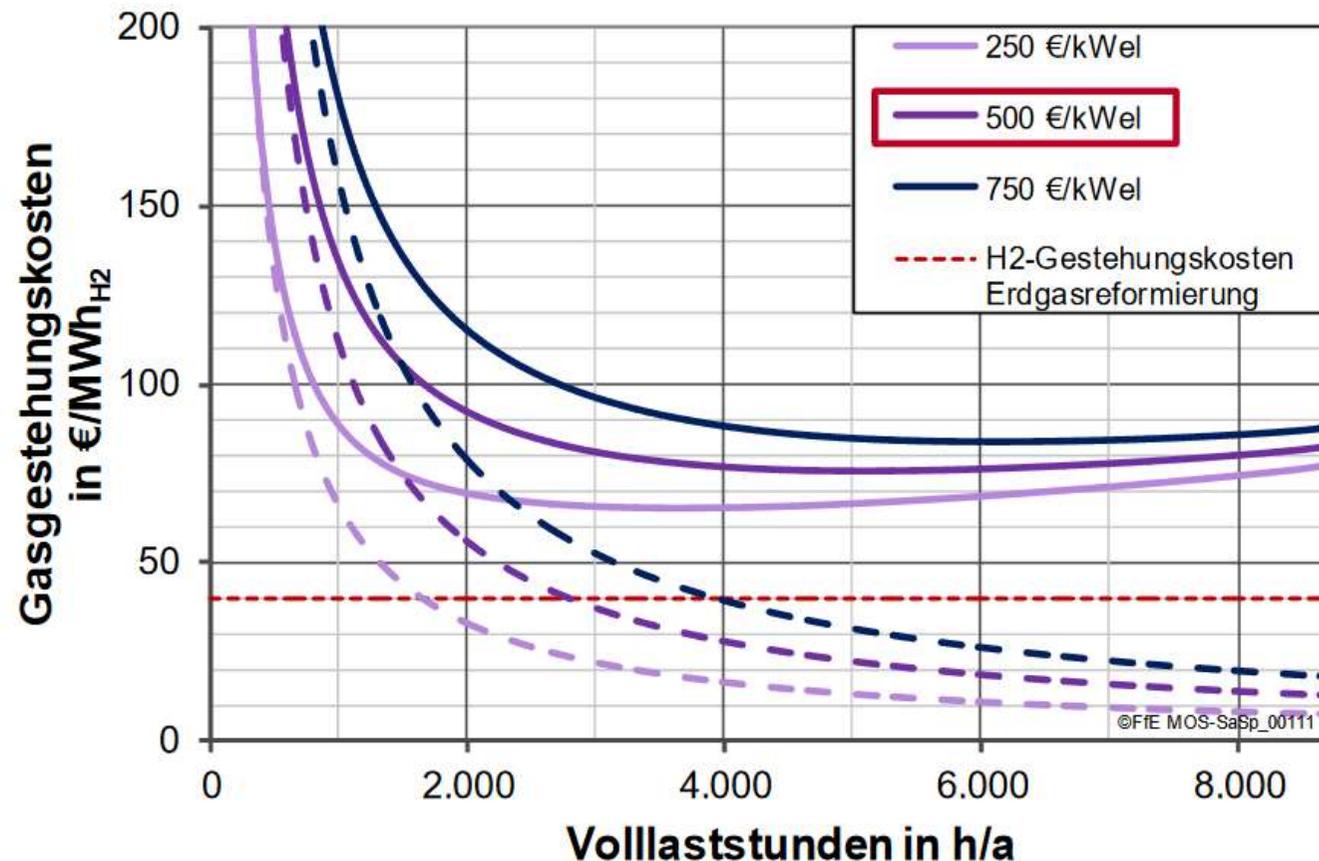
- Der **Straßenverkehr** ist prioritär direktelektrisch zu betreiben.
- **Fernverkehrs-Lkw und -Busse** werden möglicherweise PtG/PtL nutzen.
- **Wasserstoff** ist effizienter als CO<sub>2</sub>-basiertes PtG/PtL und deshalb zu priorisieren.
- PtG/PtL werden unbestritten im **Luft- und Seeverkehr** zum Einsatz kommen.

\*oder z.T. direkte EE-Nutzung wie Solarthermie; \*\* oder z.T. direkte EE-Nutzung wie Biomasse

\*\*\* Wasserstoff durch EE

## Wirtschaftliche Bewertung von Power2Gas

Wasserstoffgestehungskosten in Abhängigkeit der Volllaststunden für verschiedene Szenarien der spezifischen Investitionen (durchgehende Linien: inklusive Strombezugskosten, gestrichelte Linien: kostenloser Strombezug)



# Anforderungen an Erneuerbare Energien für Verkehr, Wärme und Industrie

**Power-to-Gas/Liquid-Anlagen brauchen hohe Volllaststunden und günstigen Erneuerbaren-Strom.**



Anzahl der Stunden pro Jahr



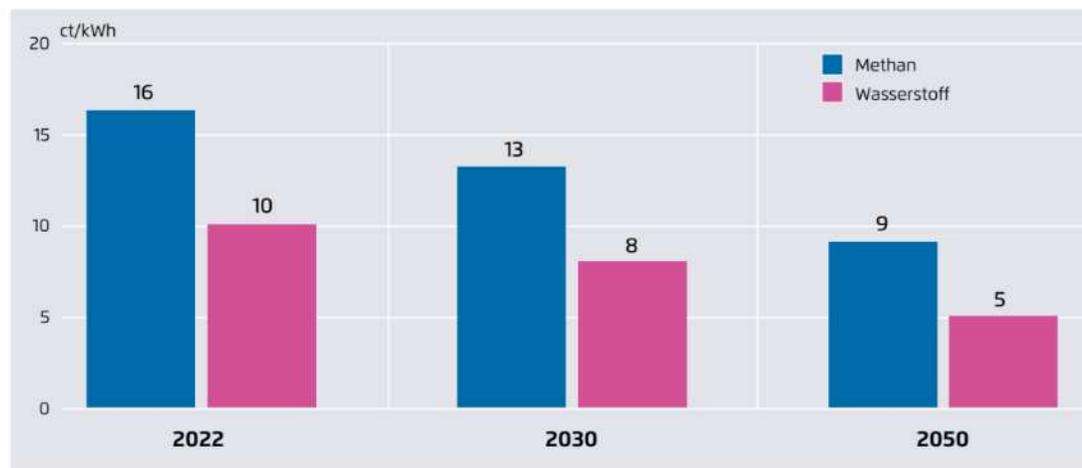
- **Anlagen-Auslastung** von mind. 3.000-4.000 Std./Jahr nötig wegen hoher Invest.-Kosten
- **„Überschussstrom“** mit < 2.000 Std./Jahr zu günstigen Preisen reicht nicht aus
- **Zusätzliche Erneuerbaren-Anlagen** nötig für PtG-/PtL-Betrieb: Offshore, PV & Onshore ~ 4.000 Std./Jahr
- **Vollkosten** der Erneuerbaren-Anlagen relevant

# Vergleich Wasserstoff PtX

Die Wasserstoffproduktion ist günstiger, erfordert aber eine Anpassung von Infrastruktur und Geräten.



Kosten der Methan- und Wasserstoffherstellung in ct/kWh

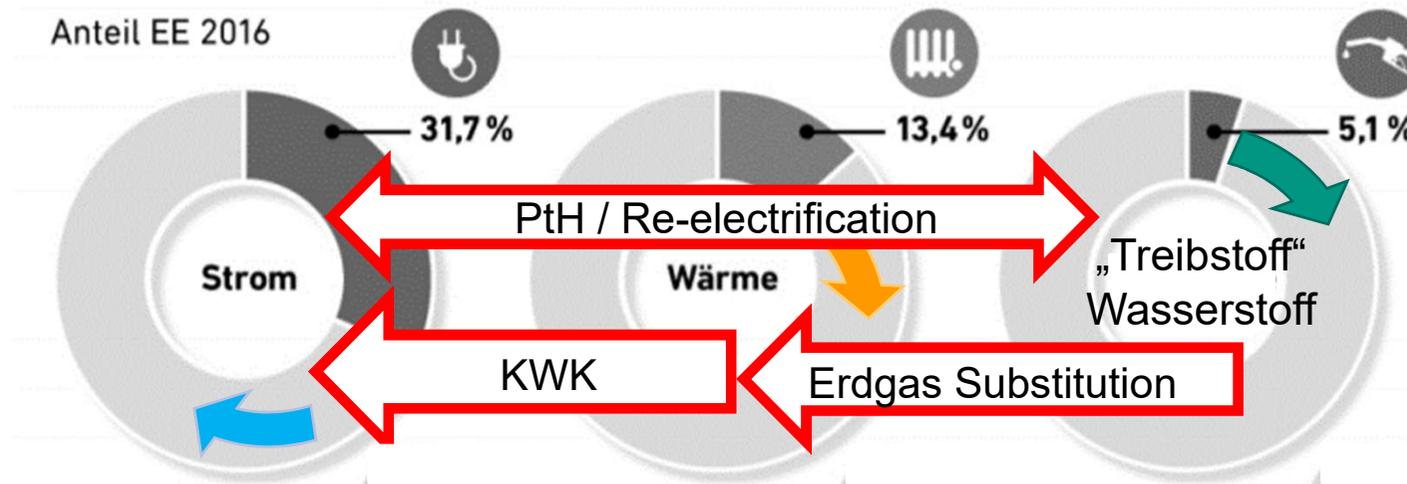


- Eine **Wasserstoff-Beimischung** zu Erdgas ist in heute in geringem Maße möglich.
- **Kostenintensive Umrüstungen** sind erwartbar bei mehr als 15% Wasserstoff-Anteil am Erdgas
- **Lokale Infrastrukturen** nur für Wasserstoff wären denkbar
- **Wasserstoff-Vorteil:** keine Unsicherheiten mit CO<sub>2</sub>-Abscheidung aus der Luft
- **Wasserstoff-Nachteil:** keine einfache Weiternutzung der existierenden Infrastruktur

Herstellung mit Photovoltaik in Nordafrika ohne Kosten des Transports nach Deutschland; eigene Berechnung basierend auf Frontier Economics (2018)

15

# Sektorenkopplung mit Wasserstoff zur flexiblen Integration von EE in allen Bedarfssystemen



## Spezifische Vorteile von Wasserstoff:

- Echte, tiefe Dekarbonisierung
- potentiell hohe Konversions-Effizienzen
- Dezentralisierung durch Integration von kleinen verteilten Erzeugern/Verbrauchern („Prosumer“)
- Ersetzen von konventionell erzeugtem Wasserstoff in industriellen Anwendungen
- saisonale Speicherung von EE

Quelle: FRAUNHOFER IEE / E4TECH (2018): DAS GEKOPPELTE ENERGIESYSTEM Nitsch, 2017

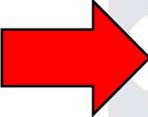
# Schlussfolgerungen der AGORA für PtX

## Die Schlussfolgerungen im Überblick.

1

Synthetische Brennstoffe werden eine wichtige Rolle bei der Dekarbonisierung von Chemie, Industrie und Teilen des Verkehrs spielen.

2



*Power-to-Gas-* und *Power-to-Liquid-*Anlagen brauchen für einen wirtschaftlichen Betrieb günstigen Erneuerbaren-Strom und hohe Volllaststunden. Sie können daher nicht mit Überschussstrom betrieben werden.

3

Synthetisches Methan und Öl kosten anfänglich in Europa etwa 20 bis 30 Cent pro Kilowattstunde. Die Kosten können bis 2050 auf etwa 10 Cent je Kilowattstunde sinken, wenn die global installierte *Power-to-Gas-/Power-to-Liquid-*Kapazität auf etwa 100 Gigawatt steigt.

4

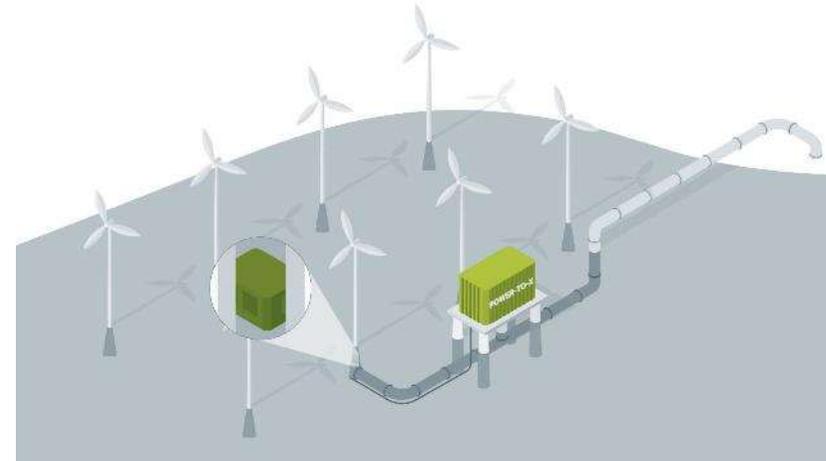
Wir brauchen einen Öl- und Gaskonsens, der den Ausstieg aus den Fossilen festlegt, effiziente Substitution priorisiert und über verpflichtende Nachhaltigkeitsregeln sowie Anreizinstrumente den Einstieg in synthetische Brennstoffe ermöglicht.

# Nationale Wasserstoffstrategie in Deutschland

Bedarf: Mehrere Hundertmillionen Tonnen Wasserstoff jährlich  
Aufbau von möglichst 5 Gigawatt Elektrolyse-Kapazität bis 2030

## Leitprojekt H<sub>2</sub>Mare: Wasserstoff direkt auf hoher See produzieren

Die direkte Herstellung Grünen Wasserstoffs in Offshore-Anlagen aus Windenergie ohne Netzanbindung kann die Kosten gegenüber der Erzeugung auf Land deutlich senken.



## Leitprojekt TransHyDE: Wasserstoff-Transport-Infrastruktur

Geeignete Transport-Infrastruktur für die Wasserstoffwirtschaft, insbesondere für den Import.



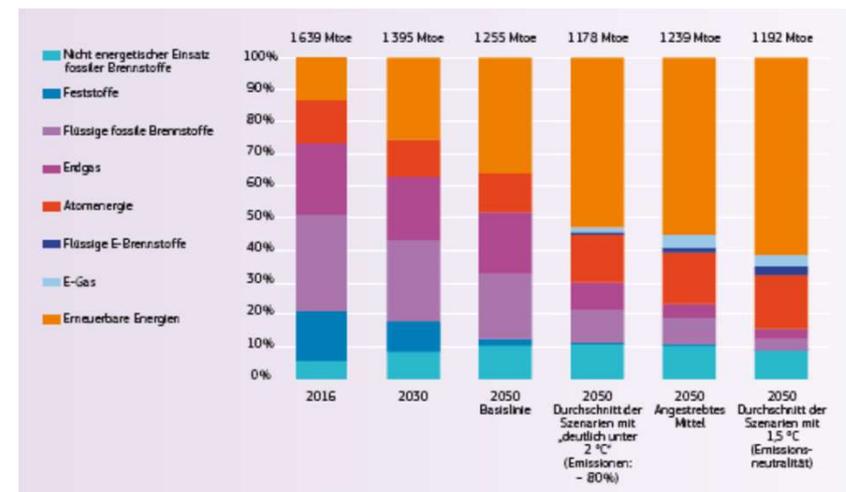
## Zusammenfassung: Die Vision der Europäischen Kommission

Sieben wichtige strategische Bausteine:

- bestmögliche Nutzung der Vorteile der **Energieeffizienz**, darunter emissionsfreie Gebäude;
- Maximierung des Einsatzes **erneuerbarer Energien** und der Nutzung von **Strom**, um die europäische Energieversorgung vollständig zu dekarbonisieren;
- Umstellung auf eine saubere, sichere und vernetzte **Mobilität**;
- eine wettbewerbsfähige europäische Industrie sowie die **Kreislaufwirtschaft** als Schlüssel zur Verringerung der Treibhausgasemissionen;
- Entwicklung einer angemessenen **intelligenten Netzinfrastruktur** und von **Vernetzbarkeit**;
- vollständige Nutzung der Vorteile der **Bioökonomie** und Anlage essenzieller **Kohlenstoffsinken**;
- Beseitigung der verbleibenden CO<sub>2</sub>-Emissionen durch **CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung (CCS)**.



Bruttoinlandsverbrauch EU bis 2050



# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

Th. Walter Tromm  
Karlsruher Institut für Technologie  
Institut für Thermische Energietechnik und Sicherheit

[walter.tromm@kit.edu](mailto:walter.tromm@kit.edu)