

Einführung in die Energiewirtschaft

8) Der Endenergieträger Elektrizität

8.1. Nachfrage nach Elektrizität

8.2. Technologien zur Strombereitstellung

8.3. Kenngrößen der europäischen / deutschen Elektrizitätswirtschaft

8.4. Entwicklung der Elektrizitätswirtschaft

8.5. Märkte der Elektrizitätswirtschaft

8.6. Stoffströme bei der Strombereitstellung

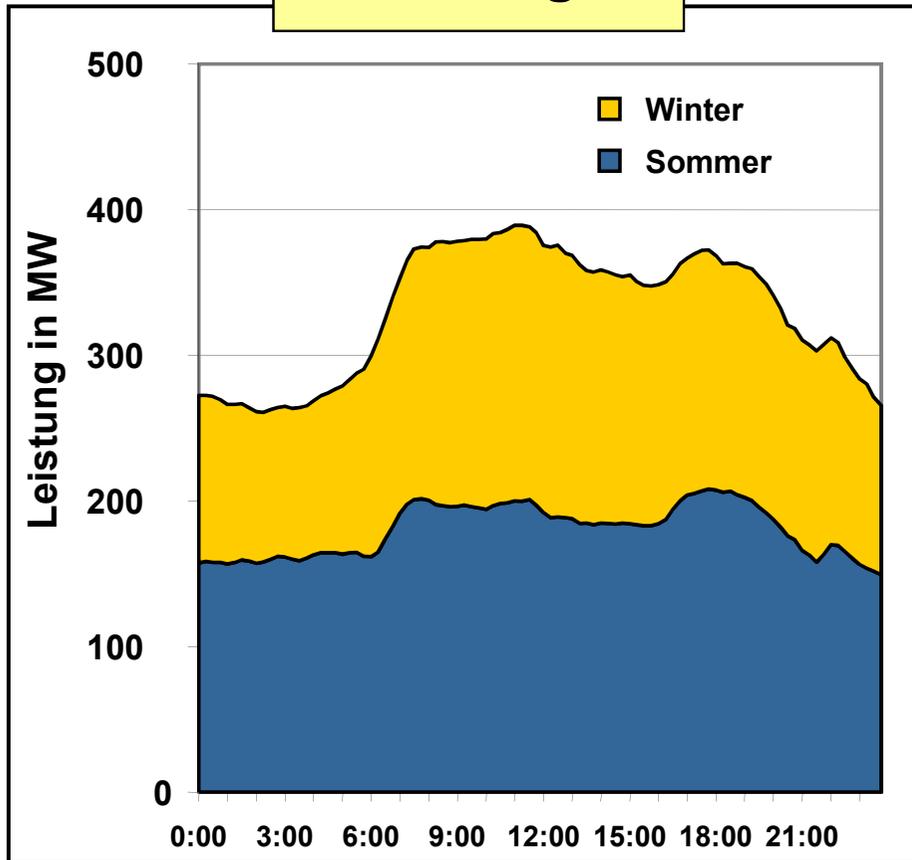
8.7. Rahmenbedingungen der deutschen Elektrizitätswirtschaft

Definition Lastganglinie

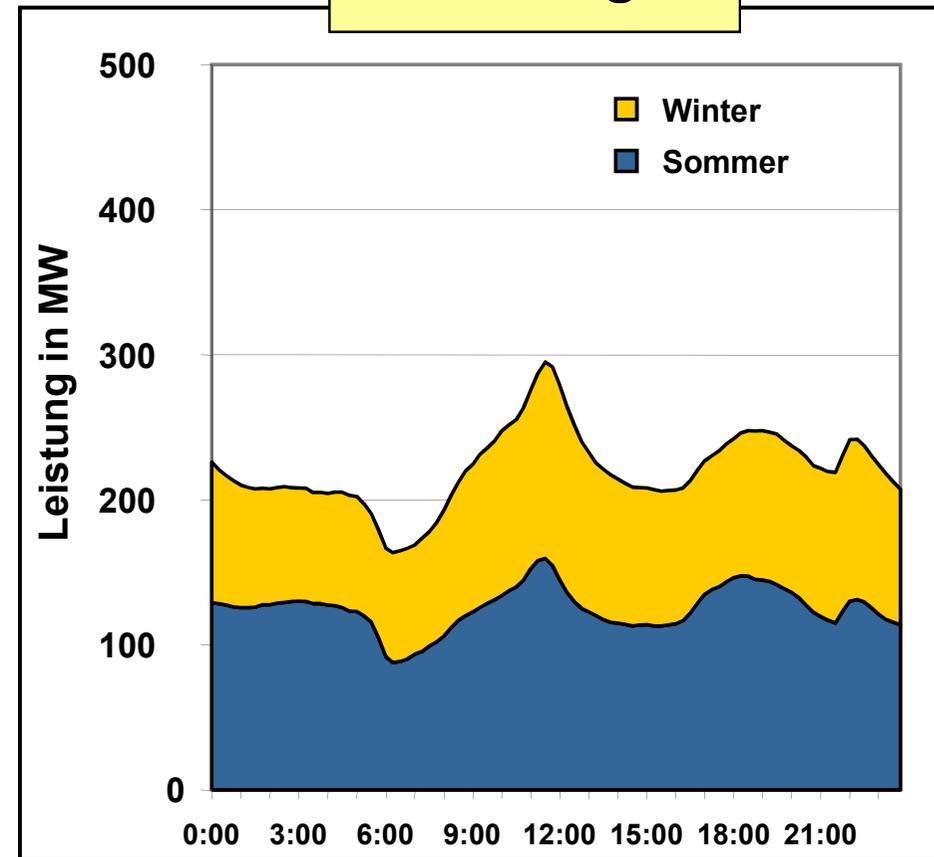
- ... stellt die (ggf. gemessene und i. d. R. viertelstündlich gemittelte) **Leistungsaufnahme** eines/ mehrerer Abnehmer (Verbraucher) über einen bestimmten Zeitraum (Messperiode) dar.
- ...lässt sich als Reihe interpretieren bei der sich
 - saisonale
 - wöchentliche
 - tägliche
 - stochastische
- Anteile zu einer Gesamtfunktion überlagern.

Bsp. Tageslastgang

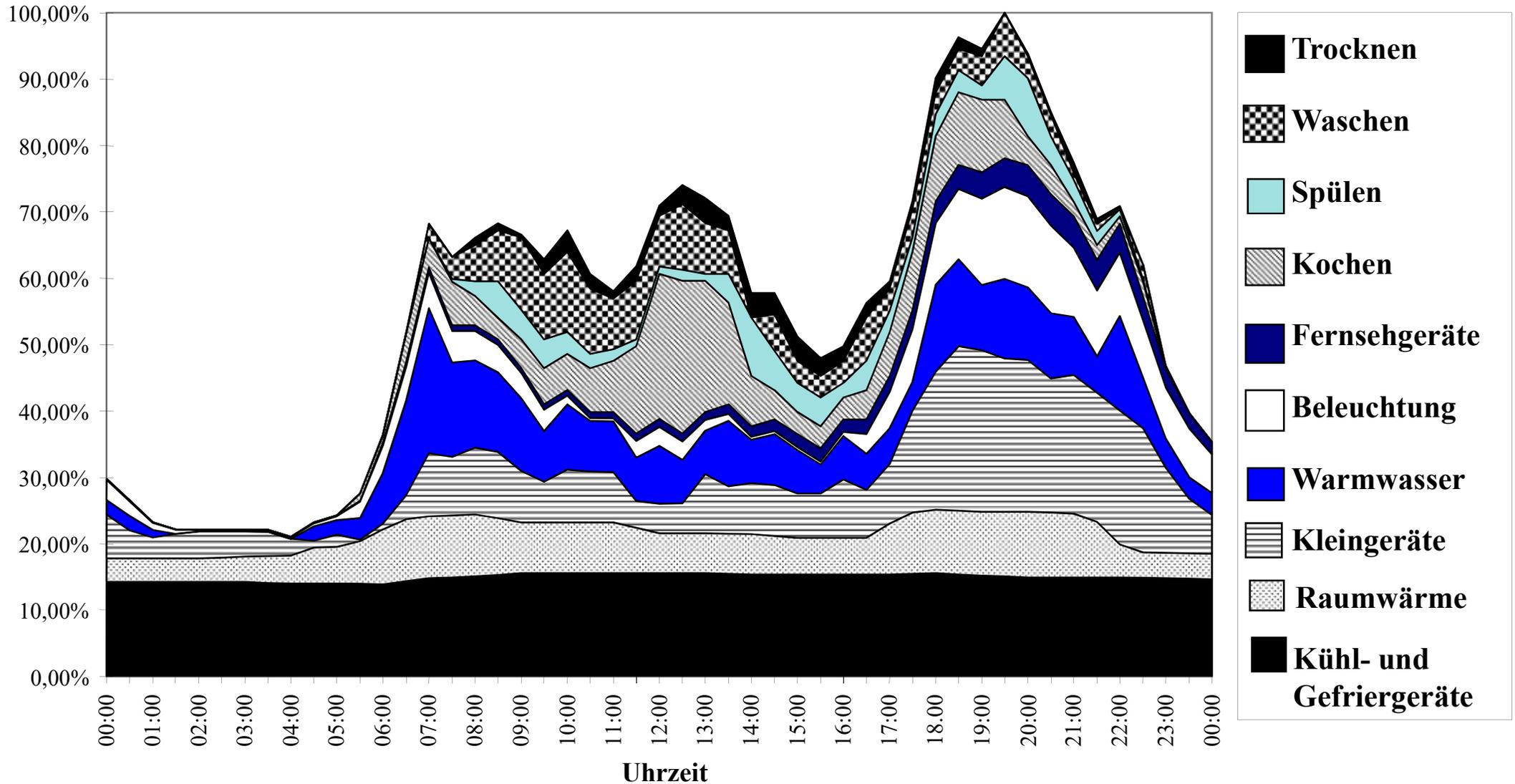
Werktag



Sonntag



Lastganglinien von Haushaltsanwendungen



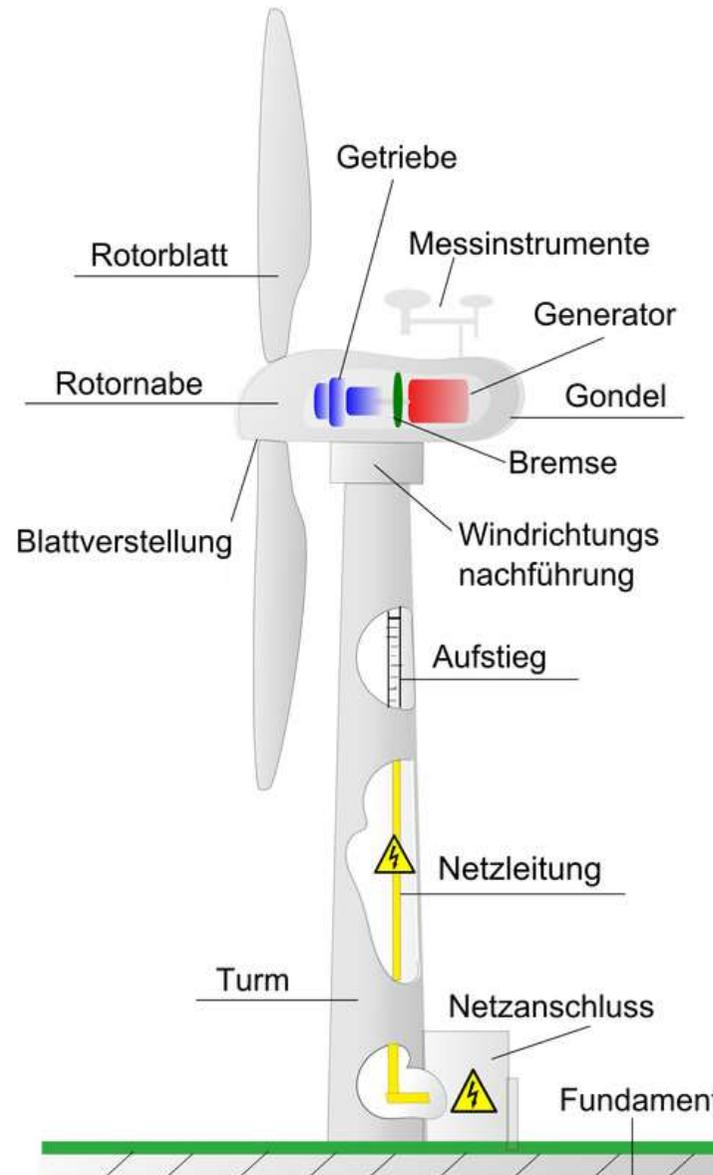
Technologien zur Strombereitstellung

- Erneuerbare Energien:
 - Laufwasserkraftwerke / (Pump-)Speicherkraftwerke
 - Windkraftanlagen
 - Fotovoltaik / Konzentrierende Kollektoren
 - ...

- Dampfkraftwerke

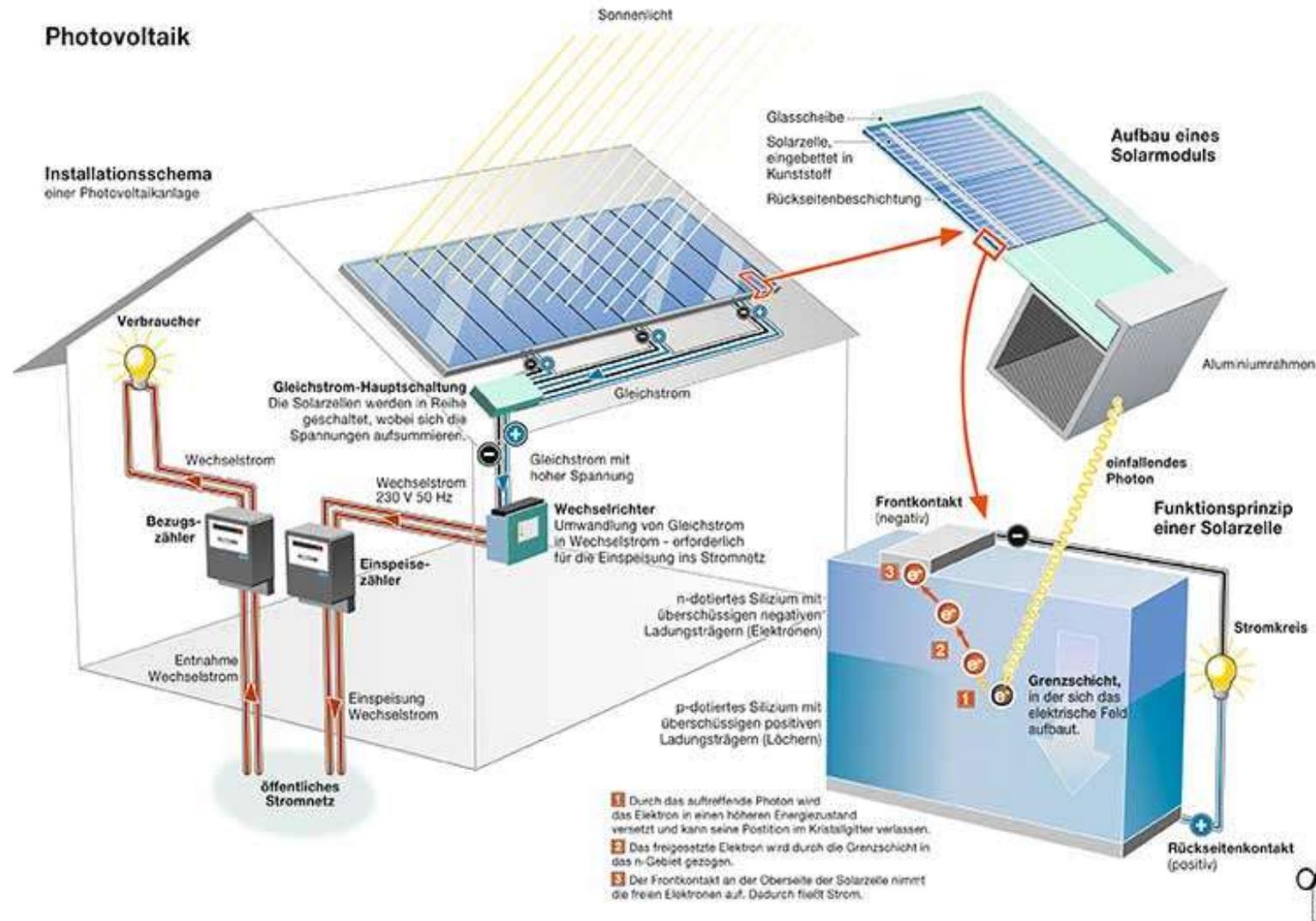
- Gasturbinen

Prinzipieller Aufbau einer Windkraftanlage



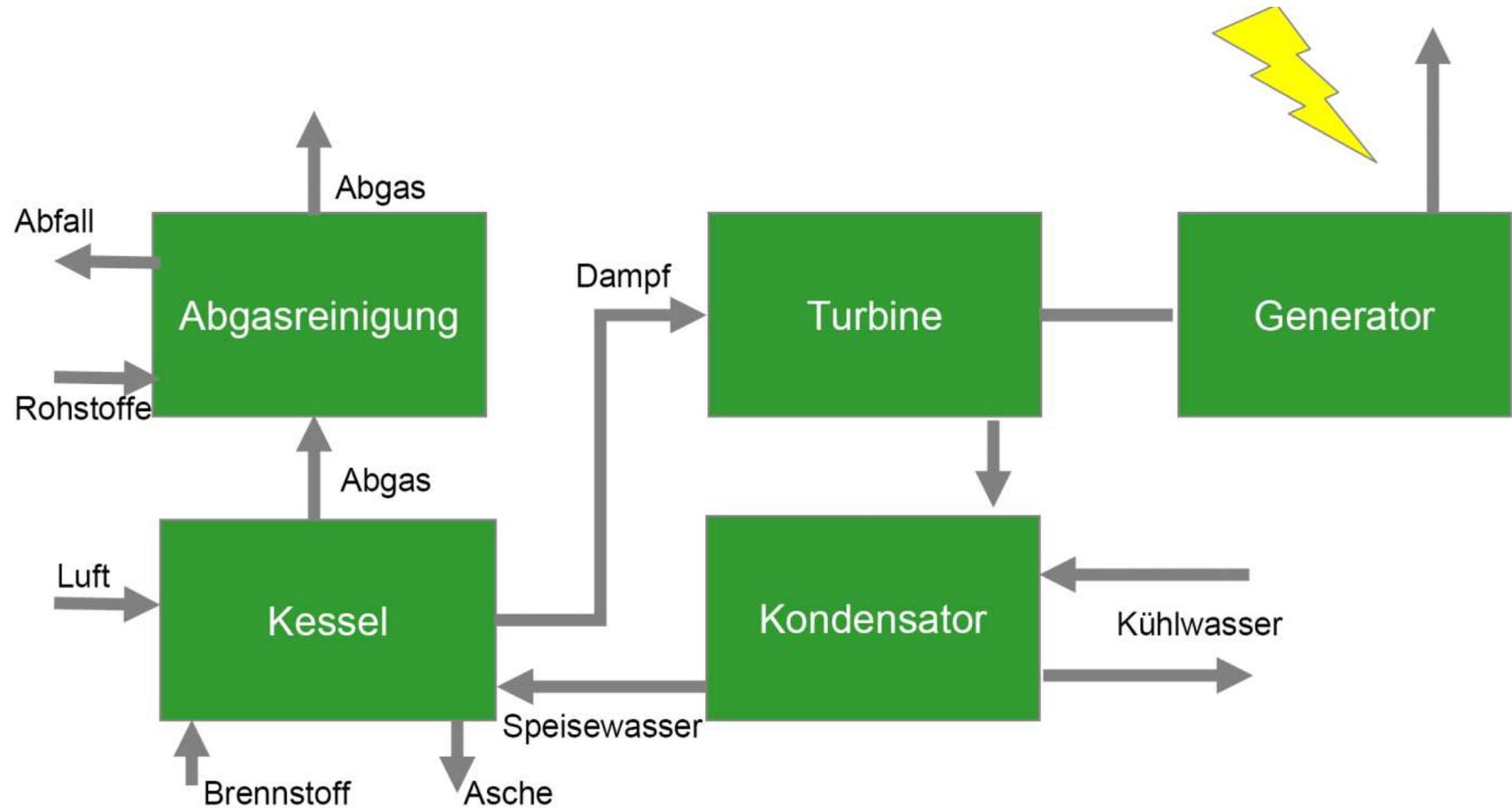
Quelle: energienpoint.de

Prinzipieller Aufbau einer PV-Anlage



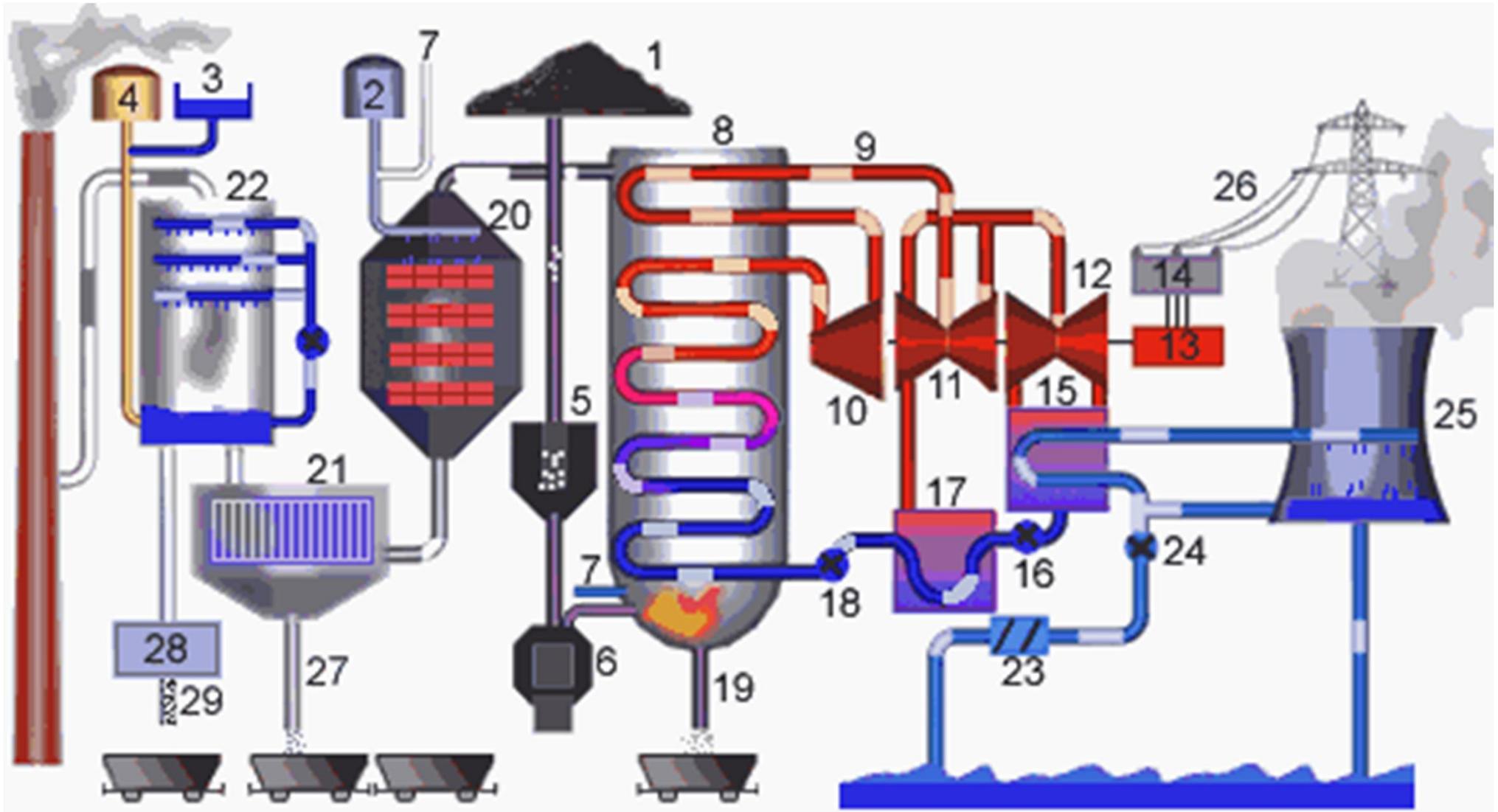
Quelle: photovoltaiksolarstrom.de

Prinzipieller Aufbau eines Dampfkraftwerkes



Quelle: Pfaffenberger 1998

Prinzipieller Aufbau eines Steinkohlekraftwerkes



Quelle: E.on

Prinzipieller Aufbau eines Steinkohlekraftwerkes

Versorgung

- 1 Bekohlungsanlage
- 2 Ammoniak (NH₃)-Lagerbehälter
- 3 Prozeß- und Betriebswasser
- 4 Kalk

Prozeß

- 5 Kohlenbunker
- 6 Kohlenmühle
- 7 Frischluftgebläse
- 8 Dampferzeuger
- 9 Dampf

- 10 Hochdruckturbine
- 11 Mitteldruckturbine
- 12 Niederdruckturbine
- 13 Generator
- 14 Transformator
- 15 Kondensator
- 16 Kondensatpumpe
- 17 Regenerative Vorwärmung
- 18 Kesselspeisepumpe
- 19 Naß-Entascher
- 20 Entstickung: Katalysator
- 21 Entstaubung: Elektrofilter

- 22 Entschwefelung: SO₂-Wäscher

- 23 Kühlwasserreinigung
- 24 Kühlwasserpumpe
- 25 Kühlturm
- 26 Netz

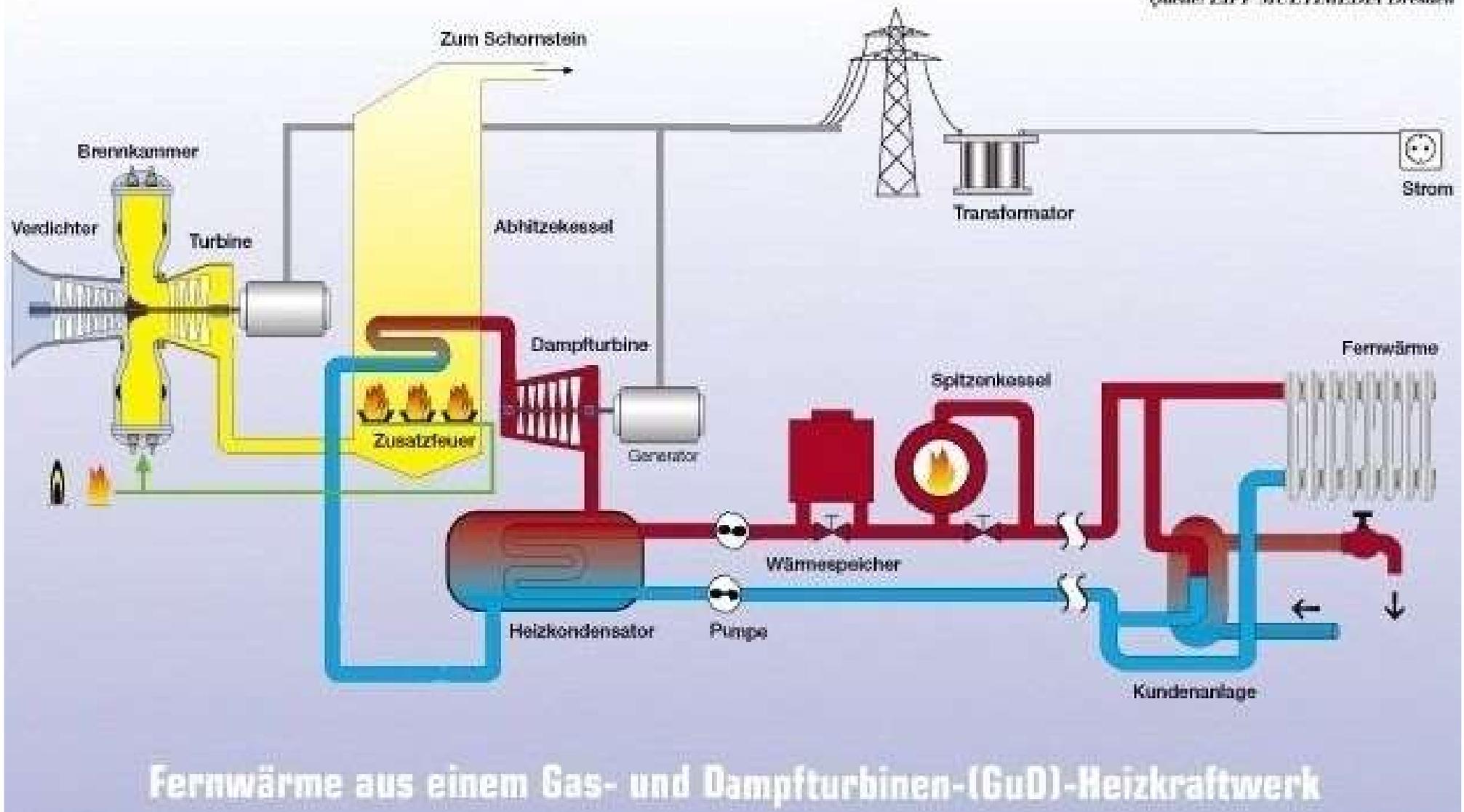
Verwertung

- 27 Flugasche als Betonzusatzstoff
- 28 Gipsentwässerung
- 29 Gips für die Bauindustrie

Quelle: E.on

Prinzipieller Aufbau eines GuD-Heizkraftwerks

Quelle: LIPP MULTIMEDIA Dresden



Vergleich verschiedener Neubau-Kraftwerke

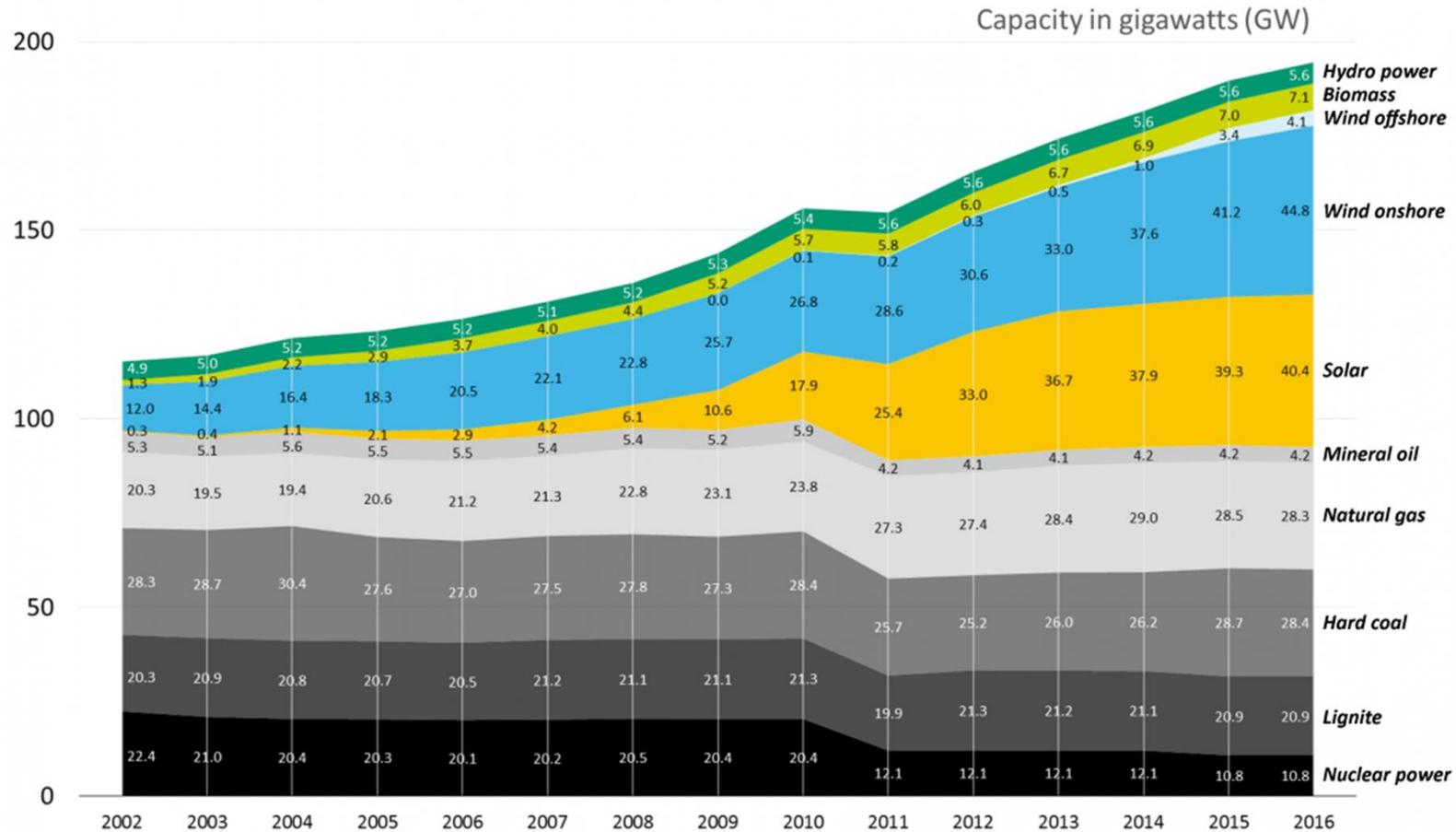
	Wirkungsgrad [%] bzw. Volllaststunden (Vlh)	Investition [€/kW _{el}]	Brennstoff [Cent/kWh]	CO ₂ - Emissionen [kg/kWh]
Steinkohle	46	1300	0,6	0,338
Braunkohle	44	1400	0,36	0,396
Gas (GT)	45	650	2	0,2
Gas (GuD)	60	800	2	0,2
PV	900	1600	-	-
Wind Onshore	2000	1800	-	-

[IIP 2017], [VGB 2011]

Kenngrößen: Kapazitäten in Deutschland

Installed net power generation capacity in Germany 2002 - 2016.

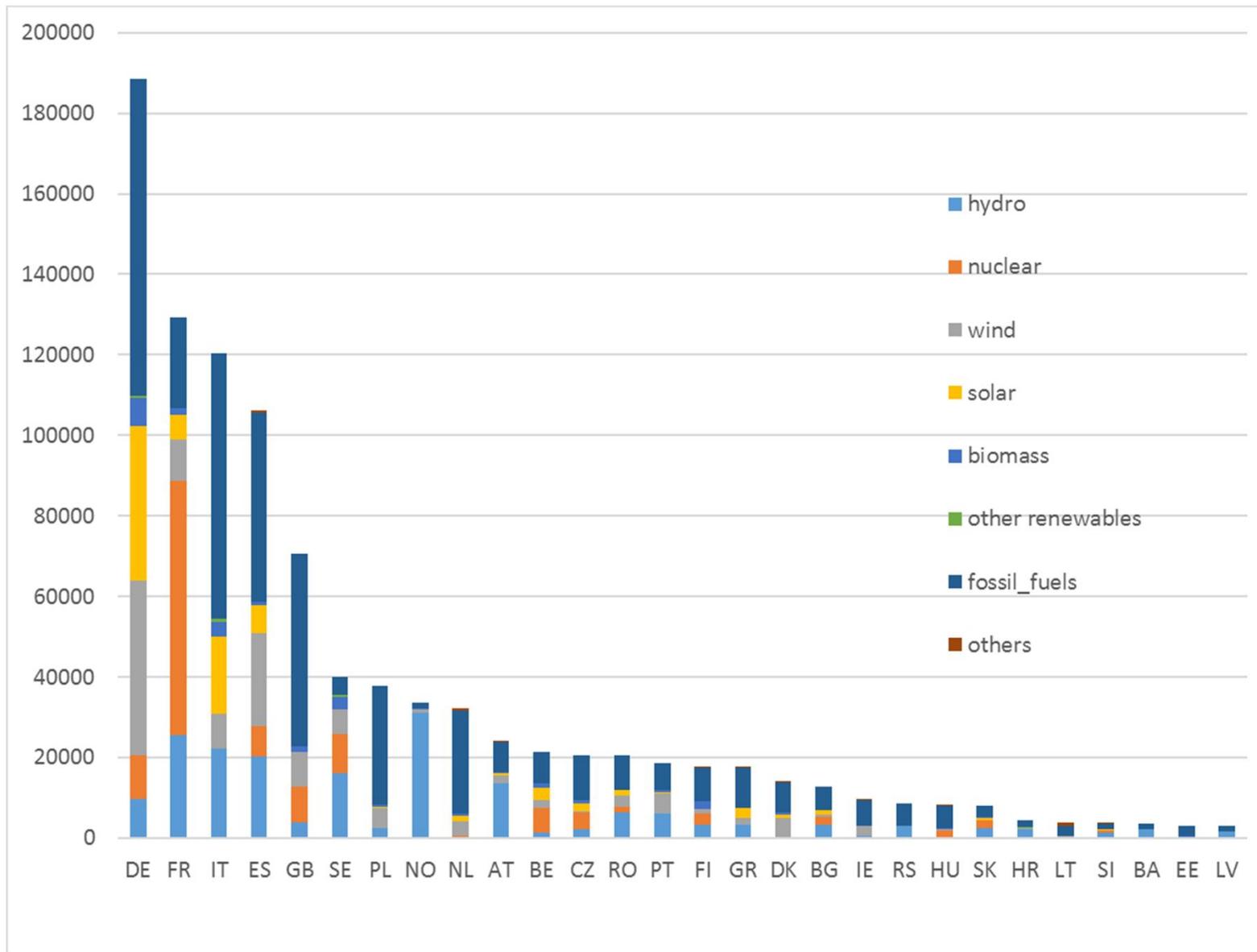
Data: Fraunhofer ISE 2016.



CC BY SA 4.0

Kenngrößen: Kapazitäten in Europa

[Net Generating Capacity 2015 in MW]



Source: ENTSO-E

Kenngrößen der dt. Elektrizitätswirtschaft: Netze

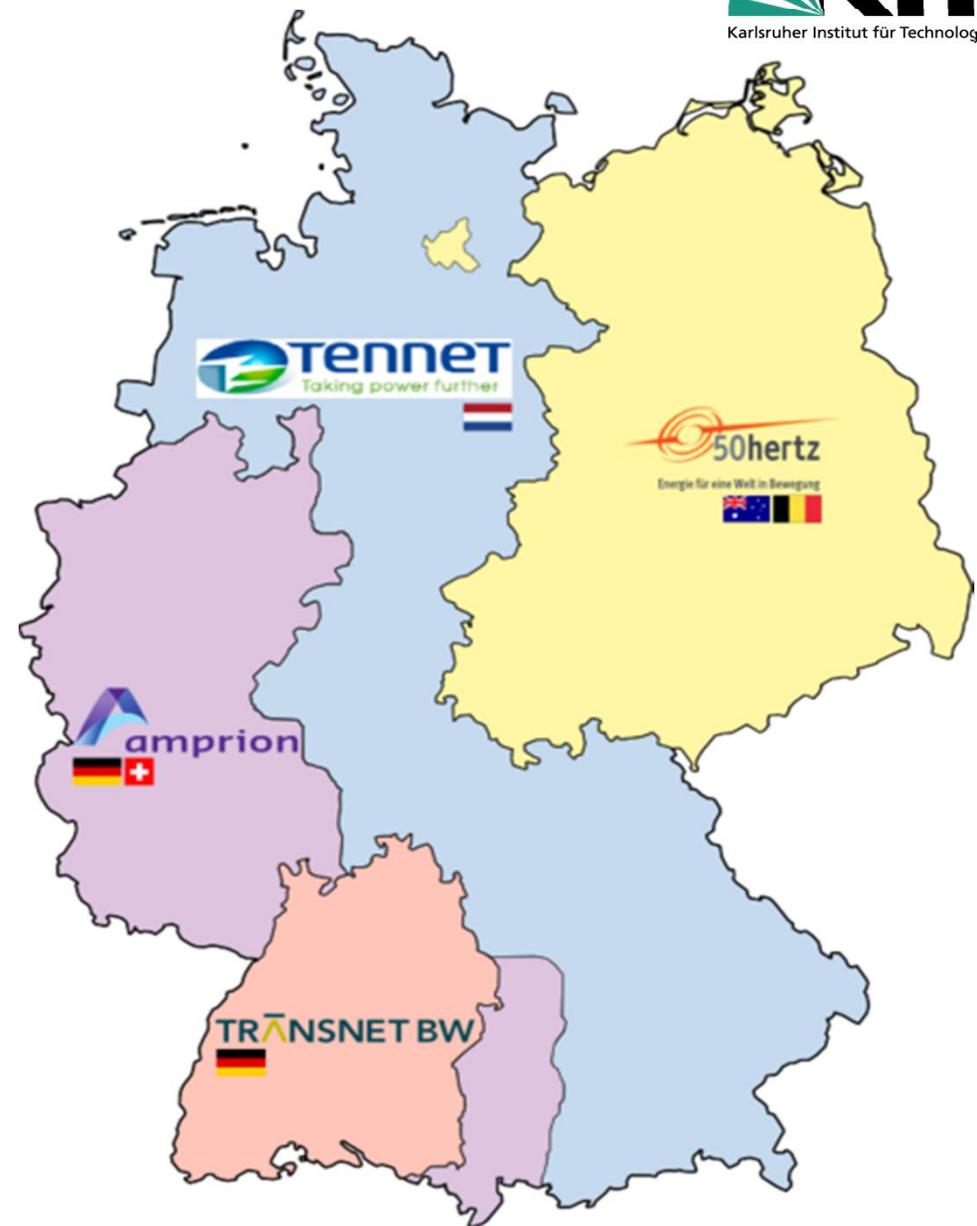
Netzstrukturdaten 2015

	ÜNB	VNB	Summe
Netzbetreiber (Anzahl)	4	817	821
Stromkreislänge (in km)	36.001	1.780.856	1.816.857
davon Höchstspannung	35.610	360	35.970
davon Hochspannung	391	96.267	96.658
davon Mittelspannung	0	511.164	511.164
davon Niederspannung	0	1.173.065	1.173.065
Zählpunkte von Letztverbrauchern	535	50.298.514	50.299.049
davon Industrie- und Gewerbekunden sowie weitere Nicht-Haushaltskunden		3.015.426	3.015.426
davon Haushaltskunden		47.283.088	47.283.088

bundesnetzagentur.de

Übertragungsnetzbetreiber

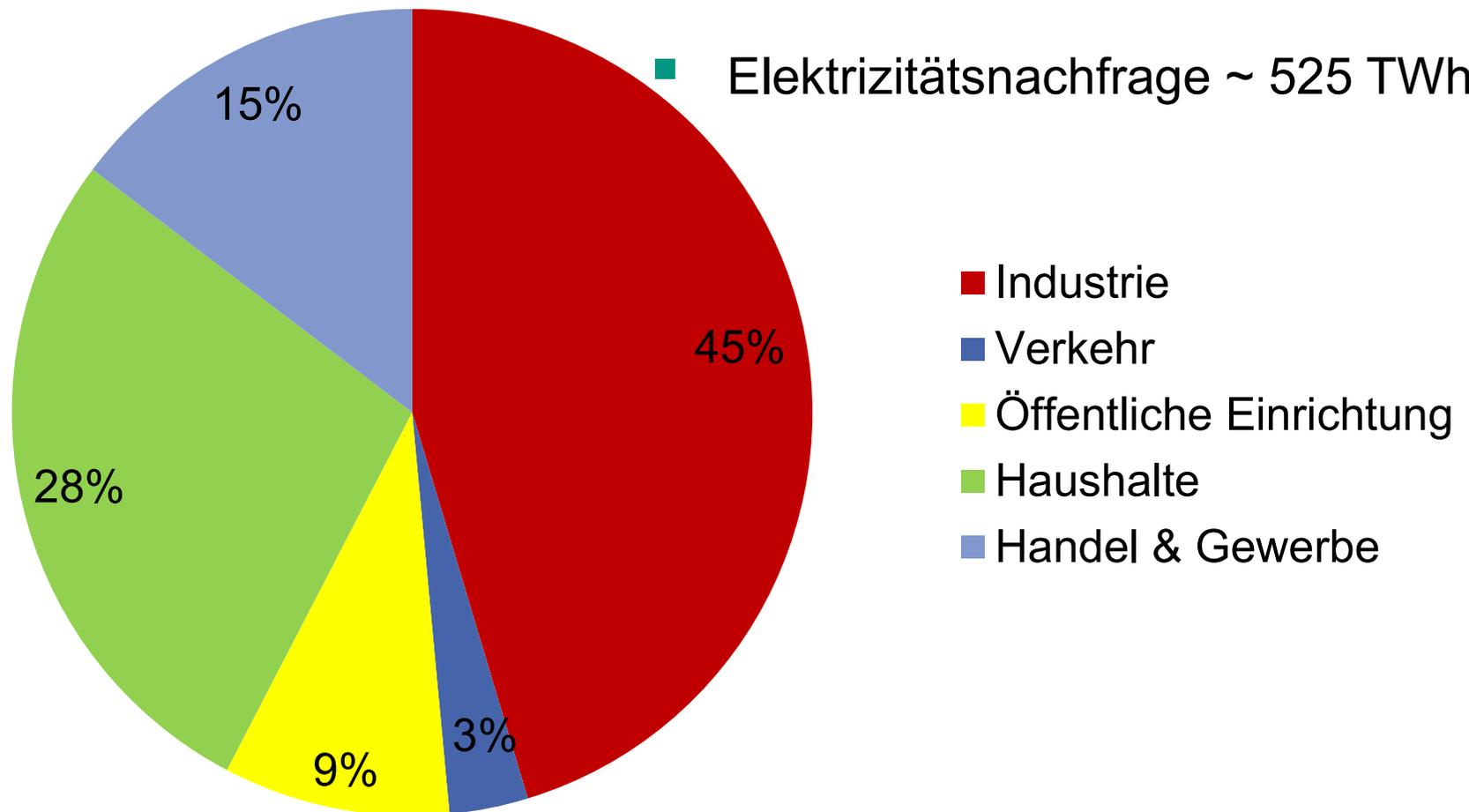
- 50Hertz Transmission GmbH
 - urspr. Vattenfall
- TenneT TSO GmbH
 - urspr. E.ON
- TransnetBW GmbH
 - urspr. EnBW
- Amprion GmbH
 - urspr. RWE



Quelle: Wikipedia

Kenngrößen der dt. Elektrizitätswirtschaft: Nachfrage

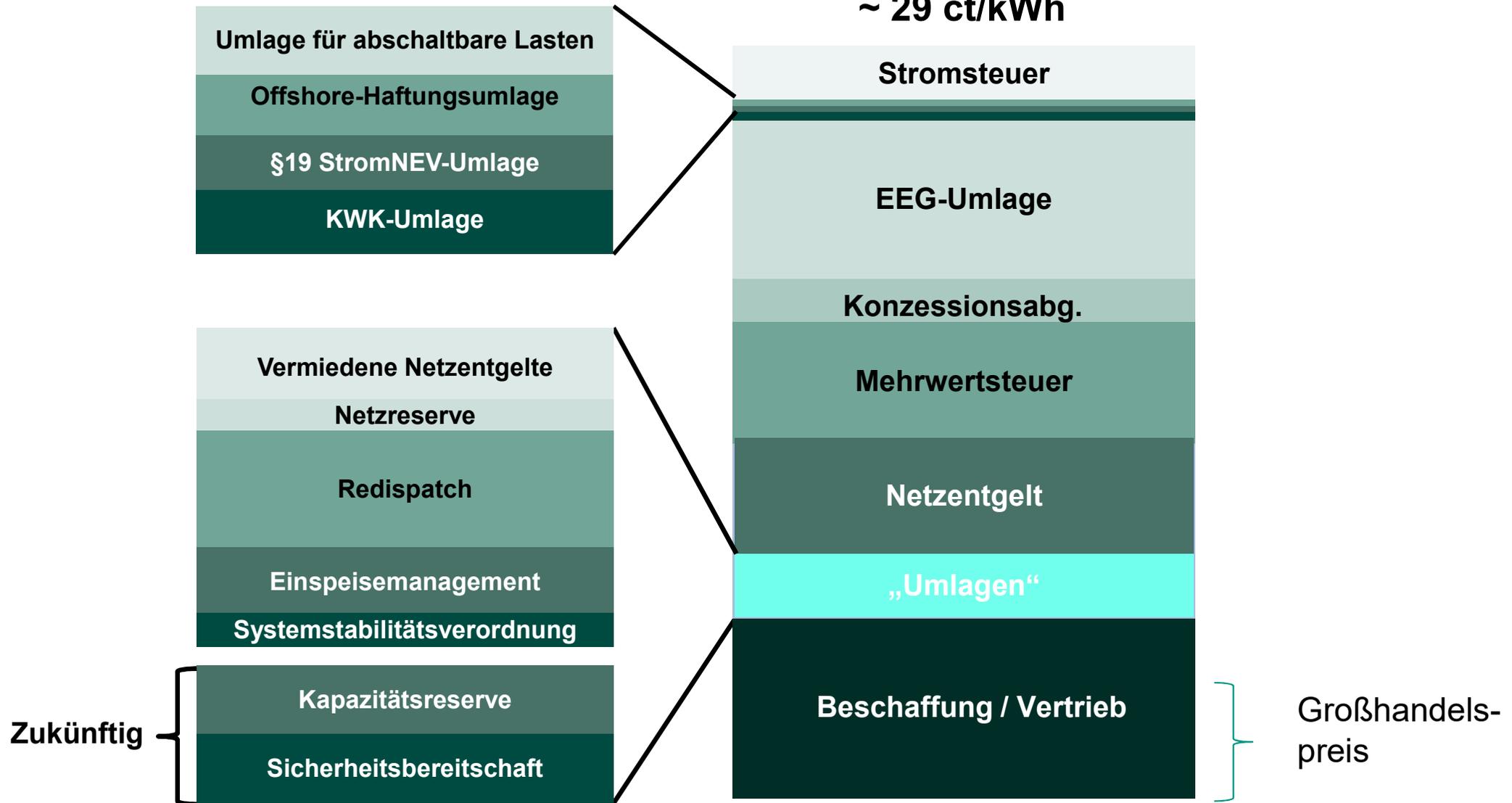
- Anzahl der Kunden ~ 45 Mio.
- Elektrizitätsnachfrage ~ 525 TWh_{el}



Quelle: Statistika 2016; E.ON 2012 - Facts & Figures, BDEW 2010

Kenngrößen: Strompreis für Haushalte in Deutschland (2015)

~ 29 ct/kWh



Quelle: BDEW; ET 5/2016

Entwicklung der Elektrizitätswirtschaft: Situation bis 1998

- Bis Mitte der 1990er Jahre wurde die gesamte Elektrizitätsversorgung als **natürliches Monopol** angesehen
- Begründung hierfür war die Annahme, dass der Markt von einem einzigen Unternehmen zu geringeren Kosten versorgt werden kann als durch mehrere Unternehmen
- Energiewirtschaftsgesetz von 1935:
 - gültig bis in die 1990er Jahre
 - besonderer Stellenwert der Energiewirtschaft
 - ...“die Energieversorgung so sicher und billig wie möglich zu gestalten“
 - ...“volkswirtschaftlich schädigende Auswirkungen des Wettbewerbs“

Entwicklung der Elektrizitätswirtschaft: Situation bis 1998

- Besonderheiten des regulierten Marktes:
 - Regionale Abgrenzung mit Hilfe von **Demarkationsverträgen** (jeder Versorger hatte ein abgegrenztes Versorgungsgebiet für das er verantwortlich war (Gebietsmonopole))
 - **Genehmigung** der Strompreise in der Höhe, dass die Gesamterlöse den Gesamtkosten (inklusive einer Verzinsung des Kapitals) entsprachen

Probleme einer solchen Kostenregulierung

- Nachvollziehbarkeit der Kostenrechnungen für die Aufsichtsbehörden ist fraglich (ineffiziente Marktregulierung)
- Kein Anreiz zu Kosteneinsparungen
- Kein Anreiz zu Innovationen
- Anreiz zum Aufbau von Überkapazitäten (Averch-Johnson-Effekt)

Gründe für die Liberalisierung des Strommarkts

- Hinterfragen des Vorhandenseins eines natürlichen Monopols im Bereich der Stromerzeugung (nicht in den Bereichen des Transports und der Verteilung)
- Kritik von Seiten konkurrierender Unternehmen angesichts des Vordringens der EVU in andere Märkte
- Hohe Strompreise
- Europaweite Bestrebungen zur Schaffung eines Europäischen Binnenmarkts

Der liberalisierte Elektrizitätsmarkt

- Kunden können ihren Versorger selbst wählen
- Entflechtung von vertikal integrierten Energieversorgungsunternehmen (Unbundling)
- Die Stromnetze müssen diskriminierungsfrei zur Durchleitung zur Verfügung gestellt werden (→ Bundesnetzagentur)
- Auf der Bereitstellungsseite bedarf es (neuer) Handelsmechanismen und Marktplätze

Märkte der Elektrizitätswirtschaft

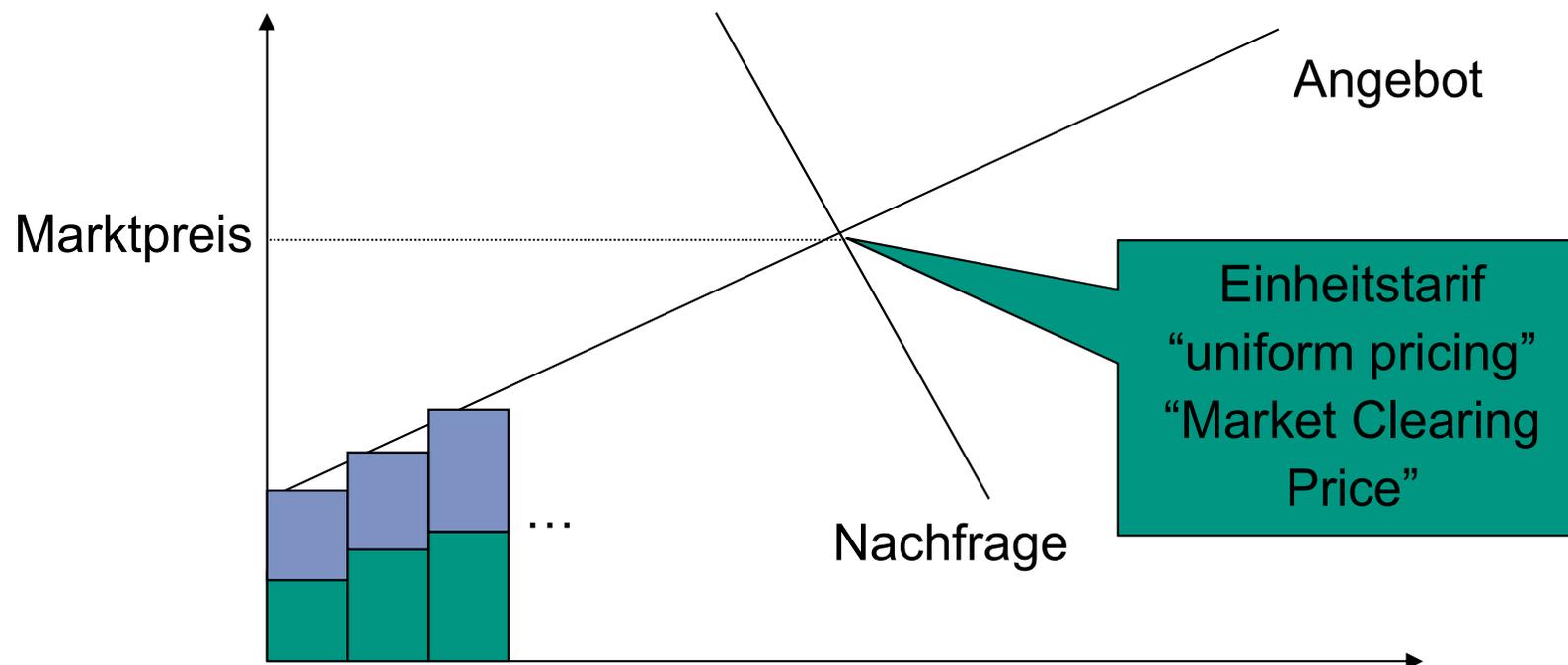
- OTC-Markt („Over the counter“)
 - bilaterale Verträge
 - oft über Strombroker vermittelt

- Großhandelsmarkt (Strombörse)
 - **Spotmarkt** und **Terminmarkt**
 - handelbare Stundenkontrakte (Stundenauktionen)
 - Kontrahierungen Baseload und Peakload

Spotmarkt (Kassamarkt)

- Handel mit physischer Erfüllung innerhalb kurzfristiger Zeiträume
 - Bspw. täglicher Handel für die Lieferung von Strom am darauf folgenden Tag (so genannter Day-Ahead-Markt).

- In Deutschland: EPEX SPOT, Paris



Gestrige Stundenkontraktpreise



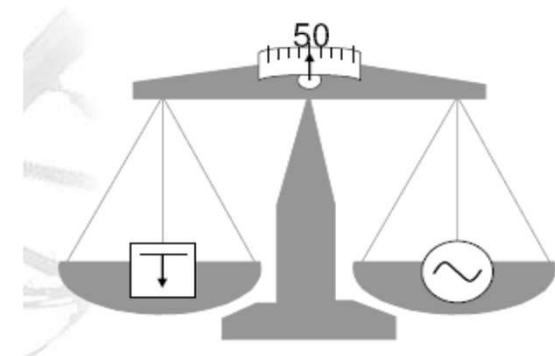
Quelle: EPEXSpot 2017

Terminmarkt

- In Deutschland: European Energy Exchange (EEX), Leipzig
- Am Terminmarkt werden Geschäfte getätigt, bei welchen die Erfüllung (Preis) zu einem späterem, vereinbarten Zeitpunkt im voraus fixiert wurde.
 - Ein **Future** ist die feste vertragliche Verpflichtung, eine festgelegte Menge Strom zu einem festgelegten Preis in einem festgelegten zukünftigen Zeitraum (Lieferperiode) zu kaufen (Futureskäufer) oder zu liefern (Futuresverkäufer).
 - Eine **Option** ist das Recht, eine festgelegte Menge Strom zu einem festgelegten Preis (Ausübungspreis) am Ausübungstag zu kaufen (Kaufoption, Call) oder zu verkaufen (Verkaufsoption, Put).

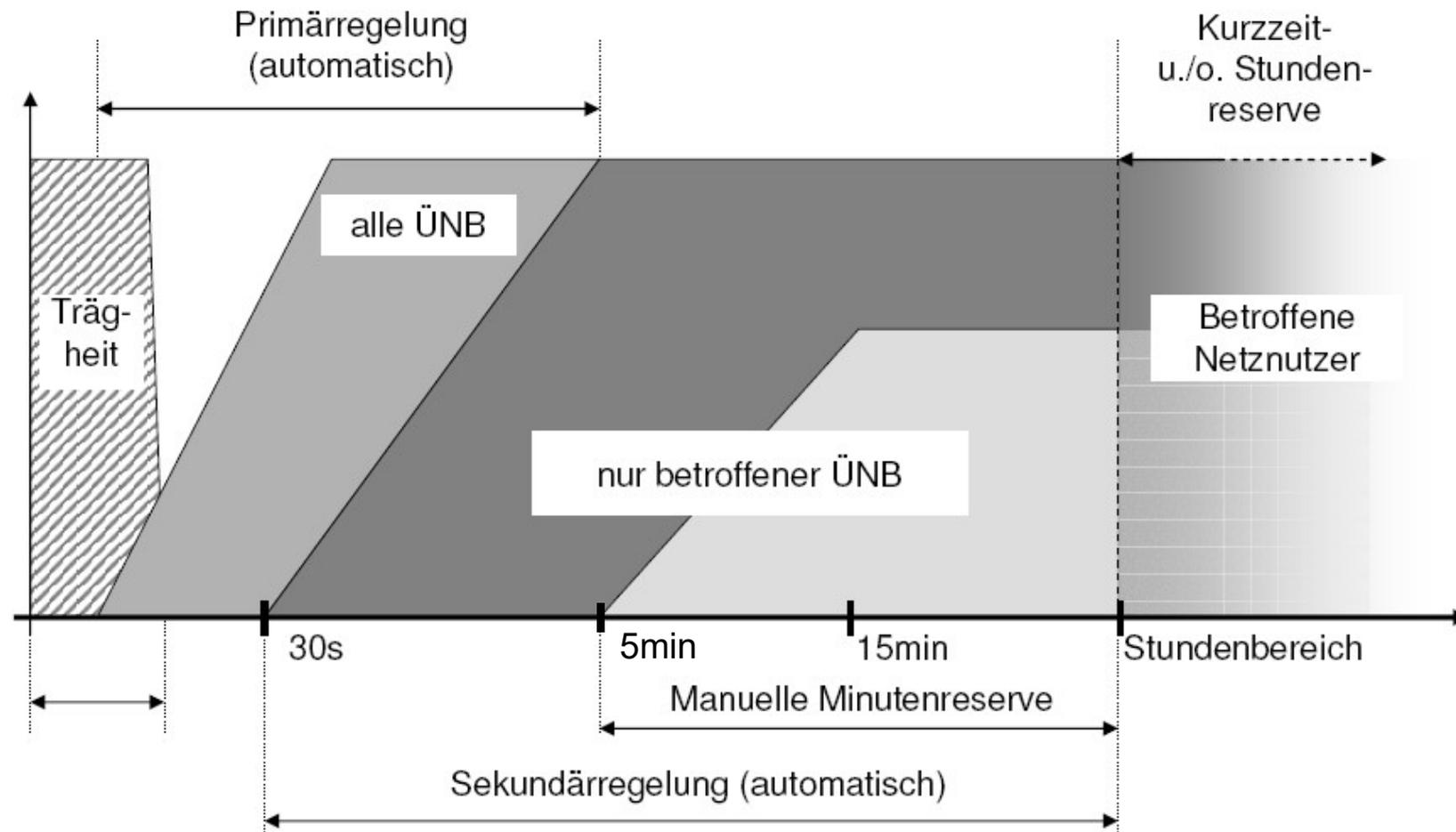
Exkurs: Systemdienstleistung

- Physikalische Grundlagen:
 - Elektrische Energie nicht in nennenswertem Umfang speicherbar!
 - Permanentes Gleichgewicht von Einspeisung und Entnahme notwendig!
(Störungen des Gleichgewichts führen zu Frequenzabweichungen vom Sollwert (50 Hz, Toleranzband 49,95 bis 50,05 Hz))
- Ursachen für Störungen des Gleichgewichts:
 - Unvorhersehbare Ereignisse (Erzeugungsausfälle, Netzstörungen)
 - Prognoseungenauigkeiten (verstärkte Nutzung stochastischer Energiequellen (v.a. Wind))



Exkurs: Systemdienstleistung

Technischer Ablauf des Regelleistungseinsatzes:



Quelle: Universität Dortmund

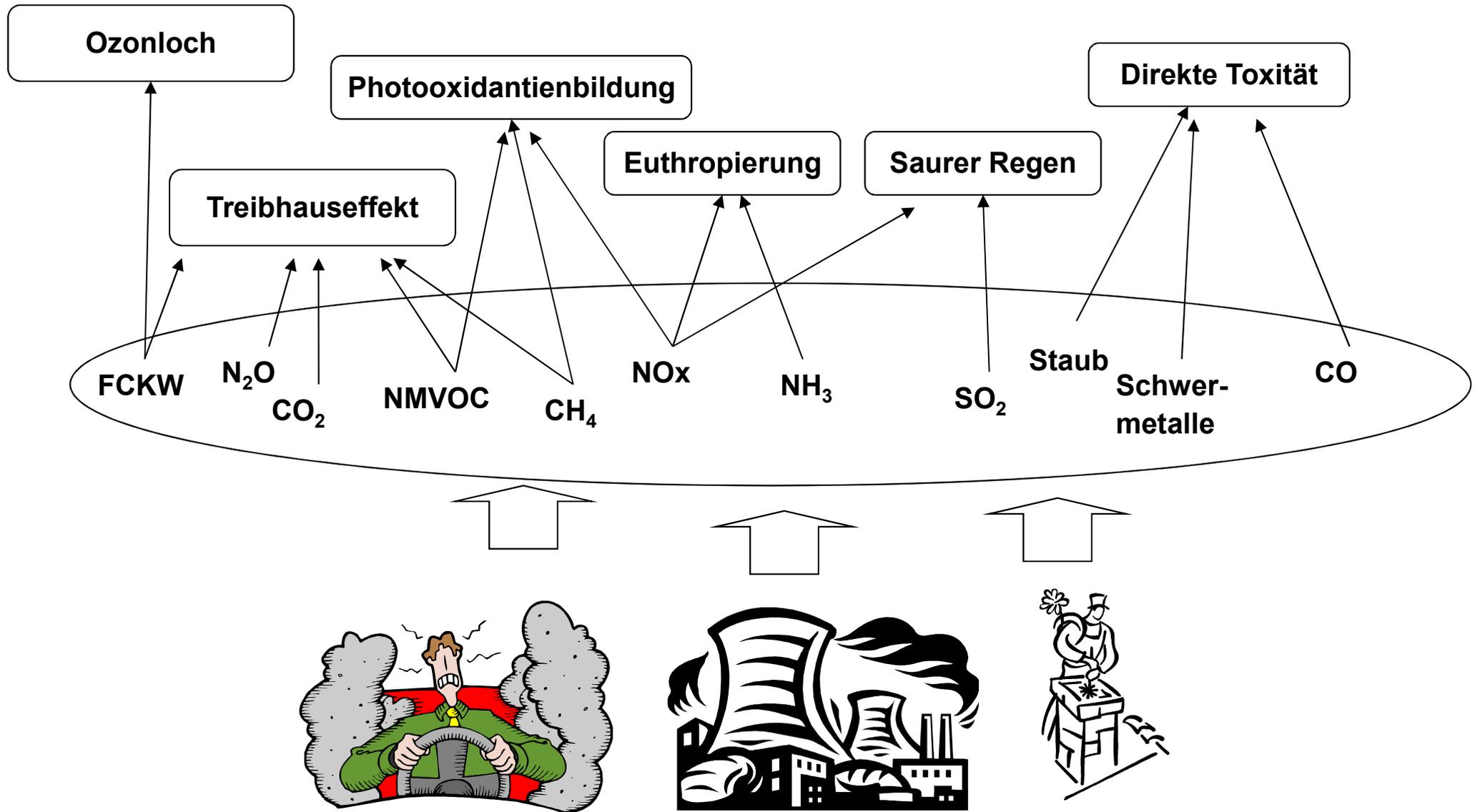
Märkte für Regelenergie: Ausschreibungswettbewerb

- Primärregelung: Sekundenbereich; sofort bei Erzeugungseingpass; wird bereitgestellt durch Kraftwerke die am Netz und nicht bereits bis an die Grenze ihrer Leistungsfähigkeit beansprucht sind
 - Ausschreibung durch Übertragungsnetzbetreiber
- Sekundärreserve: Sekunden- bis Minutenbereich; löst innerhalb weniger Minuten die Primärregelung vollkommen ab
 - Ausschreibung durch Übertragungsnetzbetreiber
- Minutenreserve: Ablösung der Sekundärreserve
 - Tägliche Ausschreibung durch Übertragungsnetzbetreiber

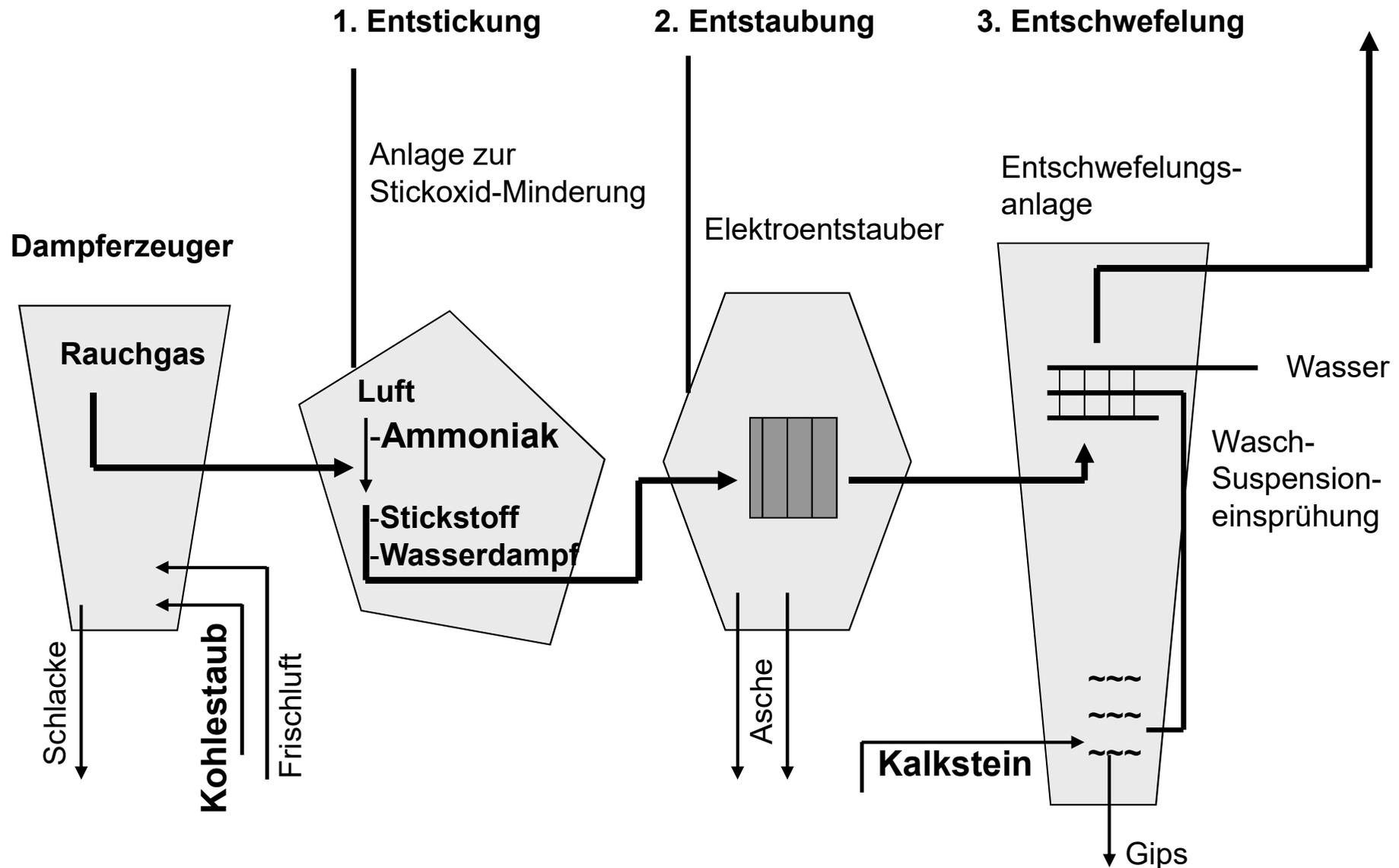
Stoffströme bei der Strombereitstellung

Primärenergie-träger	Schadstoffe						
	SO ₂	NO _x	CO	VOC	Staub	CO ₂	Radio-aktivität
				 <p><u>V</u>olatile <u>O</u>rganic <u>C</u>ompounds</p>			
Kohle	X	X	X	X	X	X	(X)
Erdöl	X	X	X	X	X	X	
Erdgas		X	X	X		X	
Kernenergie							X

Zuordnung von Umwelt- und Gesundheitsproblemen zu Emissionen aus der Energieversorgung



Stufen der Rauchgasreinigung in Großkraftwerken



Rahmenbedingungen der deutschen Elektrizitätswirtschaft

- Binnenmarktrichtlinie Strom
 - Energiewirtschaftsgesetz (EnWG)
- Energiebesteuerung
 - Stromsteuer / Mineralölsteuer (für Gas und Öl nicht für Kohle)
- Emissionsgrenzwerte
- Erneuerbare-Energien-Gesetz
- Kraft-Wärme-Kopplungs-Gesetz
- Kernenergieausstieg
- CO₂-Emissionshandel
- ...

Emissionsgrenzwerte

	Emissionsgrenzwerte (Bundesimmissionsschutzgesetz)
Staub	20 mg/m ³
SO ₂ (>100 MW)	200 mg/m ³
NO _x (>100 MW)	200 mg/m ³
Hg	0,03 mg/m ³

Kernenergieausstieg

- Kein Neubau von Kernkraftwerken (KKW)
- Beschluss im Sommer 2011: Vollständiger Verzicht auf die Stromerzeugung in deutschen Kernkraftwerken bis Ende 2022
 - Nach Atomgesetznovelle noch neun Kernkraftwerke (ca. 12,8 GW) in Betrieb
 - In 2015 ging Kernkraftwerk Grafenrheinfeld (ca. 1.4 GW) außer Betrieb
- Noch sind acht Kernkraftwerke (ca. 11.4 GW, brutto) in Betrieb.
- Diese 8 Reaktoren gehen bis spätestens 2022 vom Netz:
 - Kernkraftwerk Gundremmingen B bis Ende 2017
 - Kernkraftwerk Philippsburg 2 bis Ende 2019
 - die Kernkraftwerke Grohnde, Gundremmingen C und Brokdorf bis Ende 2021
 - Isar 2, Emsland und Neckarwestheim 2 spätestens bis Ende 2022

Quelle: bmwi.de

CO₂-Emissionshandel

- Kosteneffizientes Instrument zur Minderung von Emissionen

Start

- Ökologische Treffsicherheit durch CO₂ Preis als Indikator

CO₂-Reduktion

Handel



bisheriger CO₂-Ausstoß
5.000 t



bisheriger CO₂-Ausstoß
5.000 t

verfügbare Zertifikate	4.500 t	verfügbare Zertifikate	4.500 t
tatsächlicher CO ₂ -Ausstoß	4.000 t	tatsächlicher CO ₂ -Ausstoß	5.000 t



Das Ziel der CO₂-Minderung ist erreicht. Anlage A hat mit dem Verkauf der Zertifikate Geld verdient. Anlage B hat sich aufwändige Investitionen erspart.

Der Europäische CO₂-Emissionshandelsmarkt

- Bislang berücksichtigte Gase
 - Kohlendioxid

- Bislang berücksichtigte Minderungsverpflichtete
 - Energieversorgungsunternehmen
 - Energieintensive Industriebetriebe

- Verpflichtungsperioden
 - 2005-2007, 2008-2012, 2013-2020

- Sanktionsmechanismen
 - 40 €/t CO₂ in 2005-2007
 - 100 €/t CO₂ in 2008-2012

Einführung in die Energiewirtschaft

9) Der Endenergieträger Wärme

9.1. Technologien zur gekoppelten Strom- und Wärmebereitstellung (KWK)

9.2. Technologien zur Wärmebereitstellung

9.3. Wärmetransport

9.4. Wärmenachfrage

Gekoppelte Strom- und Wärmebereitstellung – Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)

- Bei reiner Stromerzeugung (mit so genannten Kondensationsturbinen) wird der Dampf bis auf sehr geringe Drücke entspannt (ca. 0,04 bar; ca. 30 °C)
 - Wärme kann nicht weiter genutzt werden
- Zur gleichzeitigen Strom- und Wärmebereitstellung bieten sich Verfahren der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) an
 - Großanlagen
 - Gegendruckanlage
 - Entnahmekondensationsanlage
 - Dezentrale Anlagen (BHKW)

Technologien zur reinen Wärmebereitstellung

- Heizwerke

- Nahwärmesysteme
 - Kennzeichen: Hohe Investitionen für die Anlage und die Wärmeverteilung
 - Beispielweise auf Basis von BHKWs, solarthermischen Anlagen etc.

- Niedertemperaturtechnik (Öl und Gas)
 - Die Kesseltemperatur wird bei steigender Außentemperatur abgesenkt.
 - Eine Regelung sorgt dafür, dass das Kesselwasser jeweils nur so weit erwärmt wird, wie es notwendig ist, um das Haus bei der gerade herrschenden Außentemperatur zu beheizen.

Technologien zur reinen Wärmebereitstellung

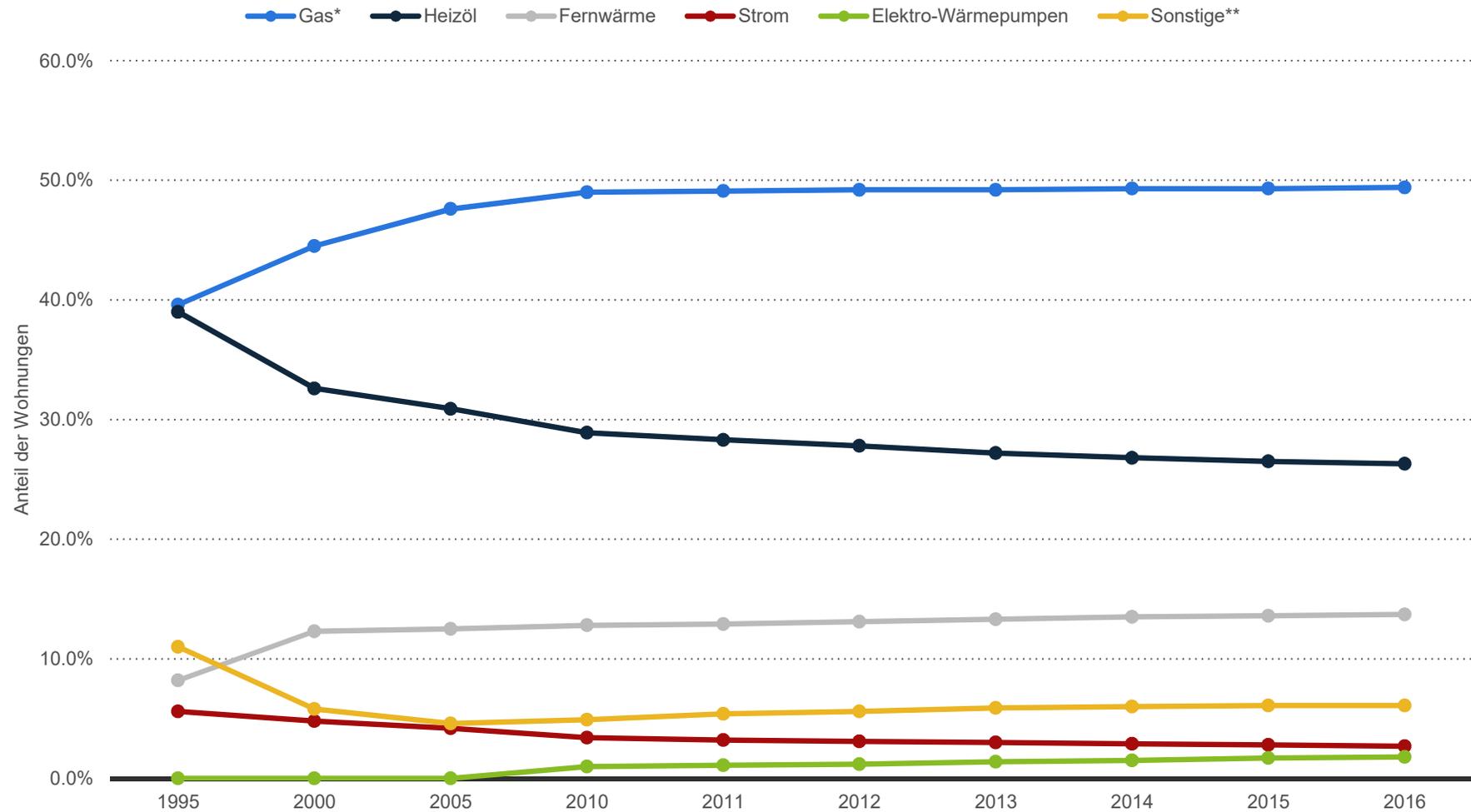
- Brennwerttechnik (Öl und Gas)
 - Bessere Brennstoffausnutzung, indem ein Teil des im Abgas enthaltenen Wasserdampfes kondensiert wird.

- Holzpellet-Heizung
 - Zwar liegen die Investition und die Wartungskosten noch über denen einer konventionellen Heizung, die Brennstoffkosten sind jedoch niedriger.
 - Holzpelletkessel verbrennen getrocknete und gepresste Holzspäne. Die Pellets werden mit einem Tankwagen geliefert und über Schläuche durch Druckluft zum Vorratsbehälter befördert.

- Wärmepumpe

- ...

Beheizungsstruktur des Wohnungsbestandes



Quelle: de.statista.com

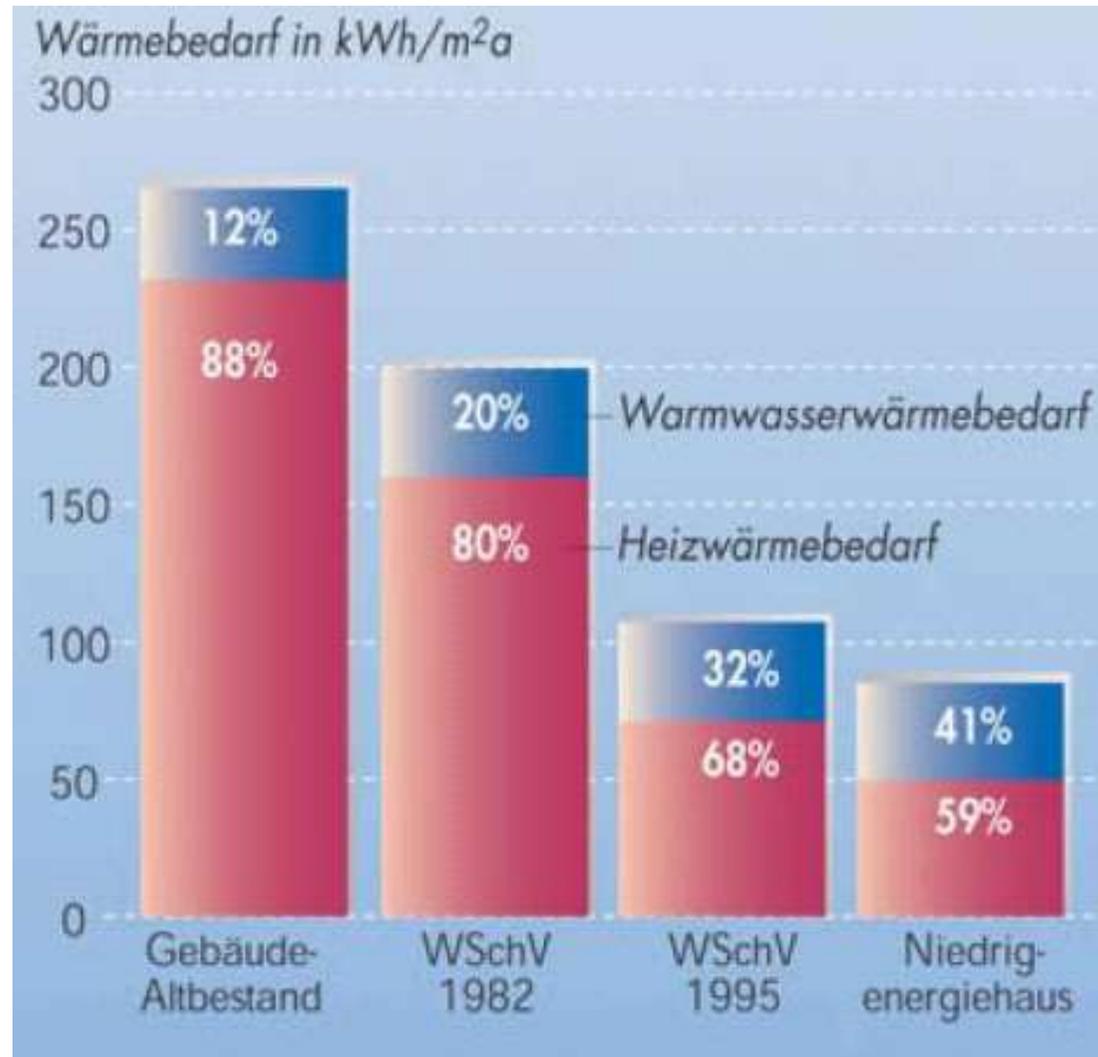
Wärmetransport

- Transport von zentraler Anlage
 - Heizwasser
 - Bei der Warmwasser-Fernheizung beträgt die maximale Vorlauftemperatur 120 °C, die Rücklauftemperatur liegt ungefähr bei 50 °C.
 - Heißwasser-Fernheizungen arbeiten ab einer Vorlauftemperatur von bis ca. 200 °C (Rücklauf etwa 70 °C). Sie werden insbesondere für industrielle Zwecke eingesetzt.
 - Dampf
 - Mit einem maximalen Druck von 12 bar in Großanlagen haben Dampf-Fernheizungen den Vorteil, dass keine Pumpen erforderlich sind.

Wärmeverteilung im Haus

- Verteilung mittels Rohrnetze, die gut wärmegeklämt sein sollten.
- Beheizung des Raums über Heizkörper
 - Thermostatventile an Heizkörpern sollten nicht verdeckt werden. Falls eine freie Umströmung durch die Raumlufte nicht möglich ist, sollten Fernfühler eingebaut werden.
 - Mit Hilfe von programmierbaren Thermostatventilen mit einstellbarem Zeitprogramm kann man in jedem Raum genau einstellen, zu welcher Zeit welche Temperatur vorherrschen soll.
- Beheizung des Raums über Fußbodenheizung
 - Vorteil: geringe Temperaturen
 - Nachteil: schlechte Regelfähigkeit

Heizwärmebedarf



Quelle: ikz.de

Reduktion des Wärmebedarfs

- Thermische Zonierung / Solare Architektur
- Kompakte Gebäudegestaltung
- Dichtheit der Gebäude
- Wärmeschutzverglasung
- Dämmung (Verbesserung des so genannten U-Werts)
 - Der U-Wert gibt an, wie groß die in Joule gemessene Wärmemenge ist, die durch einen Quadratmeter Wandfläche innerhalb einer Sekunde tritt, wenn die Lufttemperatur zu beiden Seiten der Wand sich um ein Grad Kelvin unterscheidet.
- Wärmerückgewinnung in Verbindung mit Lüftung

Niedrigenergiehäuser

■ Passivhaus

- Der Jahresheizwärmebedarf eines Passivhauses sollte unter $15 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ liegen
- Tlw. keine Heizung nur Lüftung mit Wärmerückgewinnung notwendig
 - Energiebeiträge aus der eingestrahlten Sonnenenergie, der Eigenwärme der Personen im Haus sowie der Wärmeabgabe von Geräten
 - Hoch effiziente Wärmerückgewinnung durch ein Lüftungssystem

■ Plusenergiehaus

- Passivhaus mit 100 Prozent regenerativer Energieversorgung und emissionsfreiem Betrieb. Zusätzlich wird ein Plus an Solarstrom an das öffentliche Netz abgegeben

Regulierung und Förderung im Wärmesektor

- Energieeinsparverordnung (EnEV) löste Wärmeschutzverordnungen ab
 - Der für Heizung und Warmwasser erforderliche Primärenergiebedarf wird begrenzt. Die Anforderung an den Primärenergiebedarf gibt lediglich das Energieverbrauchsziel vor.
- Die EnEV deckt auch die Anforderungen gemäß EU-Richtlinie energiesparrechtlich ab und führt z.B. den Energiepass ein.
- KfW-Förderprogramme für Niedrigenergiehäuser die beim Energiebedarf den Standard eines KfW-Effizienzhaus oder eines Passivhauses erreichen
 - Kredit mit niedrigen Zinsen
 - Investitionszuschüsse

Quelle: KfW 2012

Einführung in die Energiewirtschaft

10) Die Endenergieträger Kälte, Wasserstoff und Druckluft

10.1. Kälte

10.2. Wasserstoff

10.3. Druckluft

Bereitstellung von Kälte

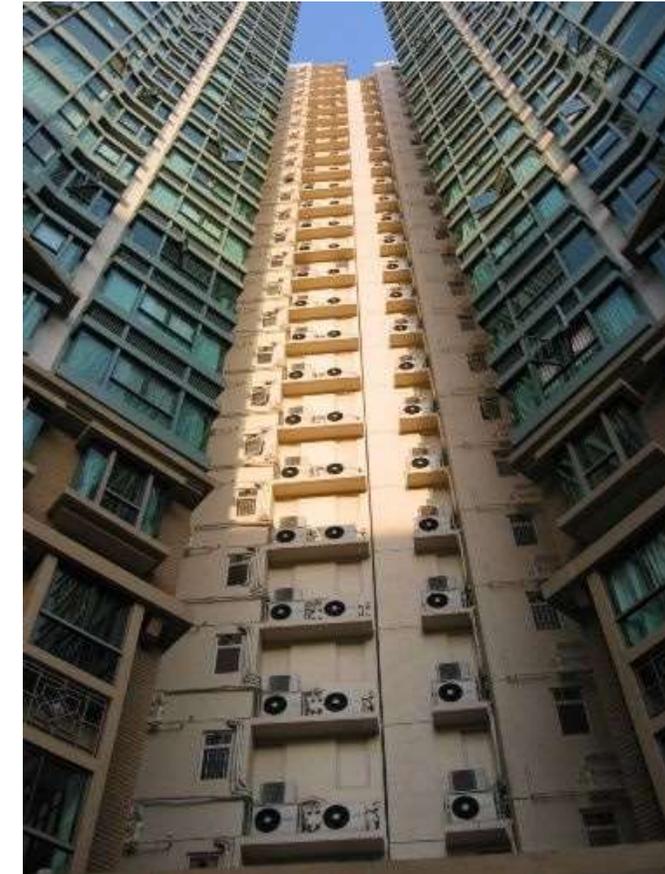
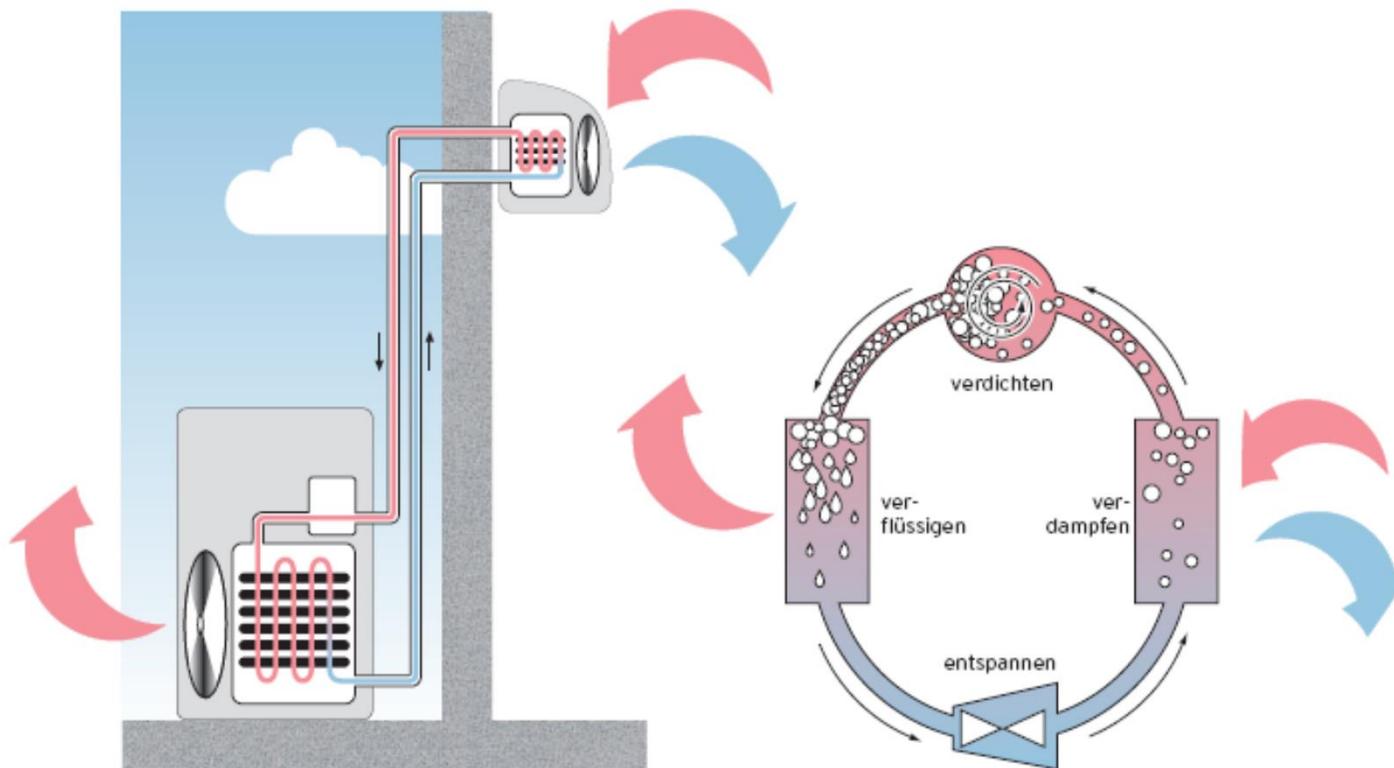
- Kälteerzeugung ist der Entzug von Wärme aus einem begrenzten Bereich.
- Ein weiterer Begriff, der oft mit Kältetechnik in Verbindung gebracht wird, ist die Klimatisierung.
 - Klimatisierung ist die Erzeugung eines erwünschten Raumklimas.
 - Klimatisierung umfasst nicht nur die Bereitstellung einer bestimmten Raumtemperatur, sondern auch die Einhaltung bestimmter Werte für Feuchte, Reinheit und Zusammensetzung der Luft.

Bereitstellung von Kälte

- Kompressionskälteanlagen
 - Der Kompressionsprozess ist ein Kaltdampfprozess, der durch die Zuführung von mechanischer Verdichterarbeit realisiert wird.
 - Prinzip des Kältschranks / der Wärmepumpe
 - Kompressionskälteanlagen verursachen einen hohen Stromverbrauch, der tlw. in Spitzenlastzeiten anfällt.
 - Coefficient of Performance (COP) ~ 4
 - Leistungszahl: Verhältnis Kälteleistung zur eingesetzten Leistung
- Kälte wird über den Entzug von Wärme aus einem Kühlmittel erzeugt. Die Wärme dient zur Verdampfung der flüssigen Arbeitsmittellösung.

Funktionsprinzip einer Klimaanlage

- Vom Kompressor wird gasförmiges Kältemittel angesaugt und verdichtet. Das heiße Kältemittel wird im Verflüssiger unter Wärmeabgabe verflüssigt. Das flüssige Kältemittel wird im Verdampfer verdampft indem es der Raumluft Wärme entzieht.



Quelle: Wikipedia

Quelle: Vaillant

Bereitstellung von Kälte

- Neben den Kompressionskälteanlagen gibt es auch zahlreiche Anwendungen basierend auf wärmebetriebenen Kältemaschinen.
- Sog. **Absorptionskältemaschinen** ermöglichen es, mit dem Einsatz von Wärmeenergie, Kälte zu erzeugen.
- Nachteil: geringer COP $\sim 0,3 - 0,8$
- Vorteile:
 - In den Sommermonaten sind (Fern- und Nah-)Wärmenetze überwiegend schwach ausgelastet. Im gleichen Zeitraum wird in vielen Zweckbauten Kälte für Klimatisierungsaufgaben und in der Industrie für Kälteprozesse benötigt.
 - Werden Solarkollektoren für den Betrieb wärmebetriebener Kältemaschinen genutzt, kann der Energieertrag der Solaranlagen gesteigert werden.

Verteilung von Kälte

- In der Regel erfolgt die Kälteerzeugung dezentral (Transport von Strom bzw. Wärme zum Verbraucher)
 - Kälte wird entweder für gesamtes Gebäude erzeugt, dann erfolgt die Verteilung über Kaltwasserleitungen
 - Völlig dezentrale Kälteerzeugung mittels Klimaanlage
- Zentrale Erzeugung von Kälte über so genannte (Fern-)Kältenetze
 - Kaltwasser wird in isolierten Rohrleitungen transportiert
 - Die Vorlauftemperaturen des Kaltwassers betragen meist 5 – 6 °C, die Rücklauftemperaturen 12 – 15 °C.
 - (Fern-)Kältenetze sind bisher in der Bundesrepublik nur selten vorzufinden (z. B. in Hamburg, Chemnitz, Gera)
 - Skandinavien (Meerwasser)

Nachfrage nach Kälte

- Industrielle Prozesse und Verfahren
- Klimatisierung von Gebäuden und Fahrzeugen
 - In Deutschland werden pro Jahr ca. 800 – 1.000 Gebäude mit Vollklimaanlagen ausgestattet, von denen ca. 1/3 Altanlagen ersetzen.
 - Das entspricht einer jährlich installierten Kälteleistung von ca. 500 MW_{th}.
 - Haupteinsatzgebiete von Vollklimaanlagen sind im Bereich von Büro- und Verwaltungsgebäude, Krankenhäuser, Hotels und sonstigen Zweckbauten zu finden.
 - Schätzungen für die derzeit im Klimakältebereich installierte Kälteleistung inkl. Lebensmittelbranche und Industrie gehen von ca. 20 GW_{th} aus.

Bereitstellung von Wasserstoff

- Wasserstoff ist in der Natur vorwiegend in Wasser und organischen Molekülen gebunden.
- Wasserstoff ist damit sekundärer Energieträger, muss erst unter Energieaufwand aus seiner jeweiligen Verbindung gelöst werden.
 - Wasserstoff ist keine Energiequelle !

Verfahren zur Wasserstoffgewinnung

- Ungefähr die Hälfte des heute insgesamt erzeugten Wasserstoffs wird mittels Dampfreformierung gewonnen.
 - Dabei wird Wasserdampf mit Kohlenstoff aus fossilen Energieträgern zu Wasserstoff reduziert, als Abfallprodukt entsteht Kohlendioxid.
 - Die Dampfreduzierung ist jedoch heute das günstigste Verfahren zur Wasserstofferzeugung.
- Elektrolyse, bei der Wasser – unter Einsatz elektrischer Energie – in Sauerstoff und Wasserstoff aufgespalten wird.

Verteilung von Wasserstoff



- Schiff (flüssig unterhalb - 252,75°C)



- Bahn (gasförmig)



- Pipeline (i.d.R. gasförmig, 0,5-30 bar, 350-9 900 Nm³/h H₂)

Verteilung von Wasserstoff



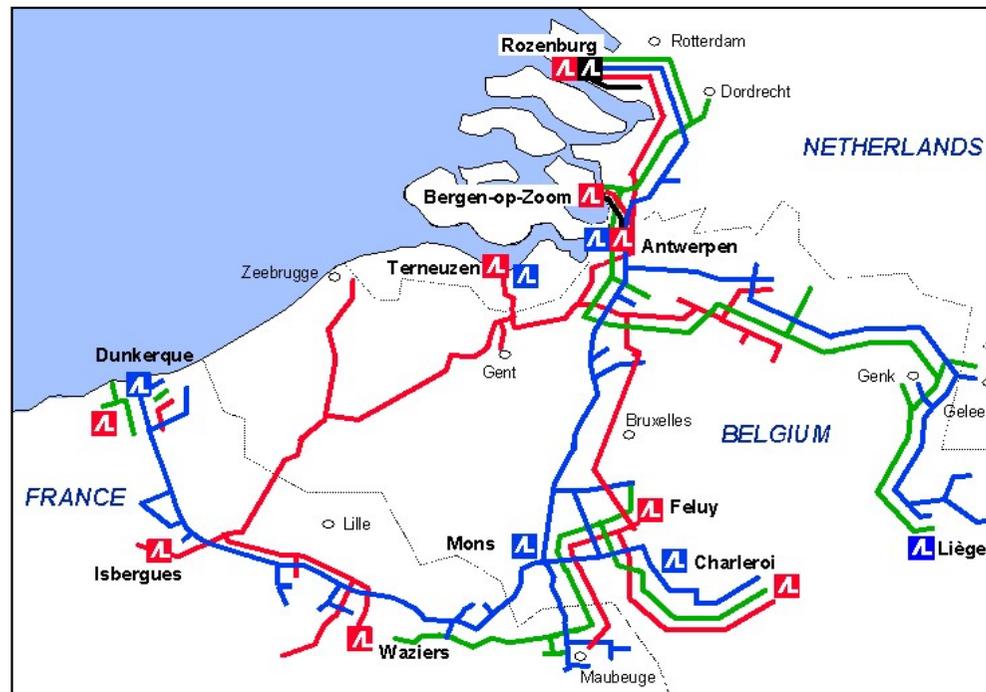
- Tiefkalter (kryogener) LKW
(flüssig, bis zu 37 000 Nm³ H₂)



- Wasserstoff per konventionellem LKW - „Flaschenbündel“
(gasförmig, bis zu 200 bar, bis zu 6000 Nm³ H₂)

Wasserstoffpipelinenetze

- In Europa existieren ca. 1500 km Wasserstoff-Pipelines
- In USA ca. 700 km Wasserstoff-Pipelines
- Ältestes Pipeline-Netz im Ruhrgebiet (ca. 210 km), seit über 50 Jahren
- Größtes Netz zwischen Frankreich, Niederlande und Belgien



- **Rot: H₂-Pipelines**
- **Grün: N₂-Pipelines**
- **Blau: O₂-Pipelines**

Quelle: ISI 2005

Bewertung der Verteilung von Wasserstoff

- Pipelines
 - Mangelnde Infrastruktur
 - Genehmigungsrechtliche Probleme
 - Gasförmiger H_2 (GH₂) in Erdgas-Pipelines möglich
 - Pipelines für flüssigen H_2 (LH₂) sind zu kostenintensiv (Problem: Kühlung)
 - Pipelines stellen günstigste Alternative dar bei hohem, konstantem Bedarf (z.B. in der Chemischen Industrie)
 - Pipelines fungieren auch als H_2 -Speicher, durch Druckregulation können so Spitzen in der Nachfrage ausgeglichen werden

Bewertung der Verteilung von Wasserstoff

- Flüssigwasserstofftransport per LKW
 - Keine spezielle Infrastruktur notwendig
 - Primärenergieaufwand gering
 - Für Anwendungen mittlerer H₂-Intensität wirtschaftlich am effektivsten, da flächendeckend und relativ große Speicherkapazitäten
- Flüssigwasserstofftransport per Schiff
 - Limitierung auf Wasserstraßen
 - Wirtschaftliche Lösung beim Ferntransport und großen Nachfragemengen
- Druckwasserstofftransport per konventionellem LKW
 - Keine spezielle Infrastruktur notwendig
 - Geeignet bei kleinen Nachfragemengen

Bereitstellung und Verteilung von Wasserstoff

- Die Produktion, die Verflüssigung und Komprimierung von H_2 sind sehr energieintensive Schritte.
- So liegt die Energieausbeute je nach Pfad für die H_2 -Herstellung zwischen 30 und 60 %.

Wasserstoffanwendung: Die Brennstoffzelle

- Brennstoffzellen wandeln die chemische Energie eines Stoffes (z.B. Wasserstoff) ohne Zwischenschritt direkt in elektrischen Strom um.
- Das Funktionsprinzip einer Brennstoffzelle ist der umgekehrte Vorgang einer Elektrolyse.
- In der Brennstoffzelle wird der Brennstoff Wasserstoff in einem elektrochemischen Prozess mit Sauerstoff unter Abgabe von Energie zum Endprodukt Wasser verbunden.
- Eine Brennstoffzelle besteht aus einer Anode, einer Kathode und einer dazwischen liegenden Trennschicht, dem Elektrolyten.

Brennstoffzellen

- Mobile Anwendungen
 - Im Verkehrsbereich

- Portable Anwendungen
 - Im Büro- und Kommunikationssektor
 - Militärische Anwendungen (U-Boote)

- Stationäre Anwendungen
 - Nutzungsvorteile durch die Nutzung der Abwärme, die bei der Stromproduktion aus der BZ entstehen, zur Raumwärme- oder Warmwasserproduktion.

Druckluftherzeugung (und –aufbereitung)

- Druckluft (Pressluft) ist verdichtete atmosphärische Luft
- Druckluftherzeugung mit Kompressoren
 - Kolbenkompressoren
 - Kolben saugt beim Aufwärtshub Luft an
 - Schraubenkompressoren
 - Gegenläufiges Arbeiten von 2 Drehkolben
 - Turbokompressoren
 - Mit Schaufeln versehene Laufräder beschleunigen die Luft
- Filtration zum Entfernen von Verunreinigungen aus der Druckluft

Druckluftverteilung

- Verteilung durch Druckluftleitungen
- Druckverluste durch Rohrwidestand abhängig von Strömungsgeschwindigkeit
 - Durchmesser entscheidend unter Berücksichtigung des gewünschten Volumenstroms und des zulässigen Druckabfalls
- Speicherung von Druckluft in Rohrleitungen

Druckluftanwendungen (Pneumatik)

- Sehr breites Anwendungsfeld, sehr flexibel einsetzbar
 - Energieträger zum Antrieb von Zylindern, Turbinen, Ventilen oder zum Transport (Rohrpost)
 - Reinigung durch Nutzung des Luftstroms zum Wegblasen von Partikeln und Flüssigkeiten (→ Metallspäne von Werkbänken)
 - In Industrieprozessen zur Kühlung und zur Stickstofferzeugung
 - Seit etwa Anfang des 20. Jahrhunderts Antrieb von Hämmern und Bohrern
 - Seit etwa 1960 Steuerungs- und Automatisierungstechnik
- Druckluftanwendungen sind schnell, präzise, flexibel und funkenfrei
- Diskontinuierlicher Verbrauch (→ Speicherung)

Druckluft in der Industrie

- Ca. 320.000 Druckluftanlagen in Europa
- EU-weit verbrauchen industrielle Druckluftanlagen ca. 80 TWh Strom pro Jahr.
 - Starker Anstieg erwartet
- Das größte Einsparpotenzial ist bei Leckageverlusten zu verzeichnen.
- Typischerweise gehen 20 bis 50 % der unter hohem Energieeinsatz erzeugten Druckluft auf dem Weg zum Endeinsatz verloren.
- Mangelnde Erfassung des Verbrauchs und des Bedarfs
- Noch zu geringe Nutzung der beim Verdichten anfallenden Wärme
 - Raumheizung bzw. Warmwassererwärmung

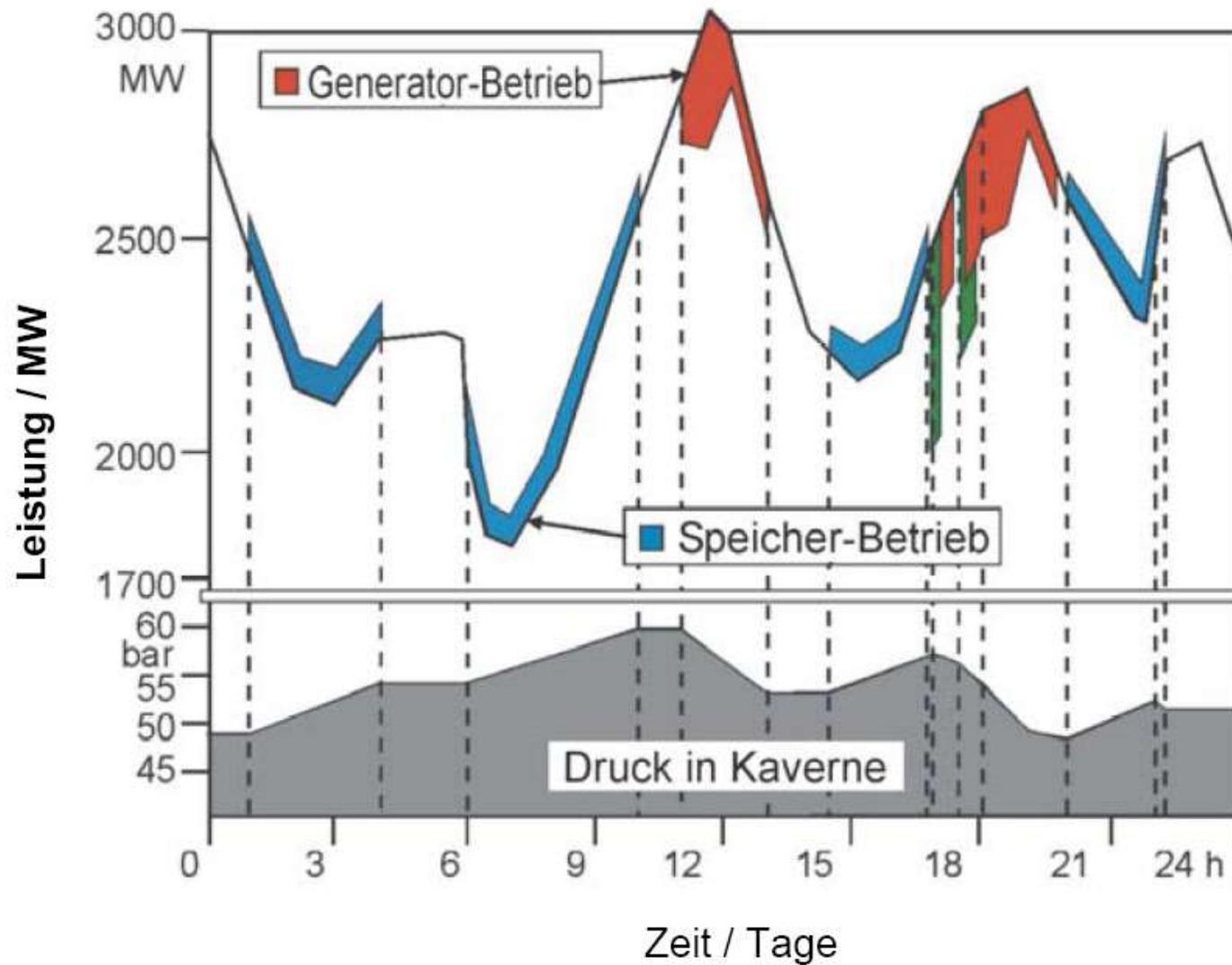
Druckluftspeicherkraftwerke

- Bislang korrekter Druckluftspeicher-Gasturbinen-Kraftwerke
 - Compressed Air Energy Storage (CAES)
- Als Druckluftspeicher werden unterirdische Kavernen verwendet.

Druckluftspeicherkraftwerke

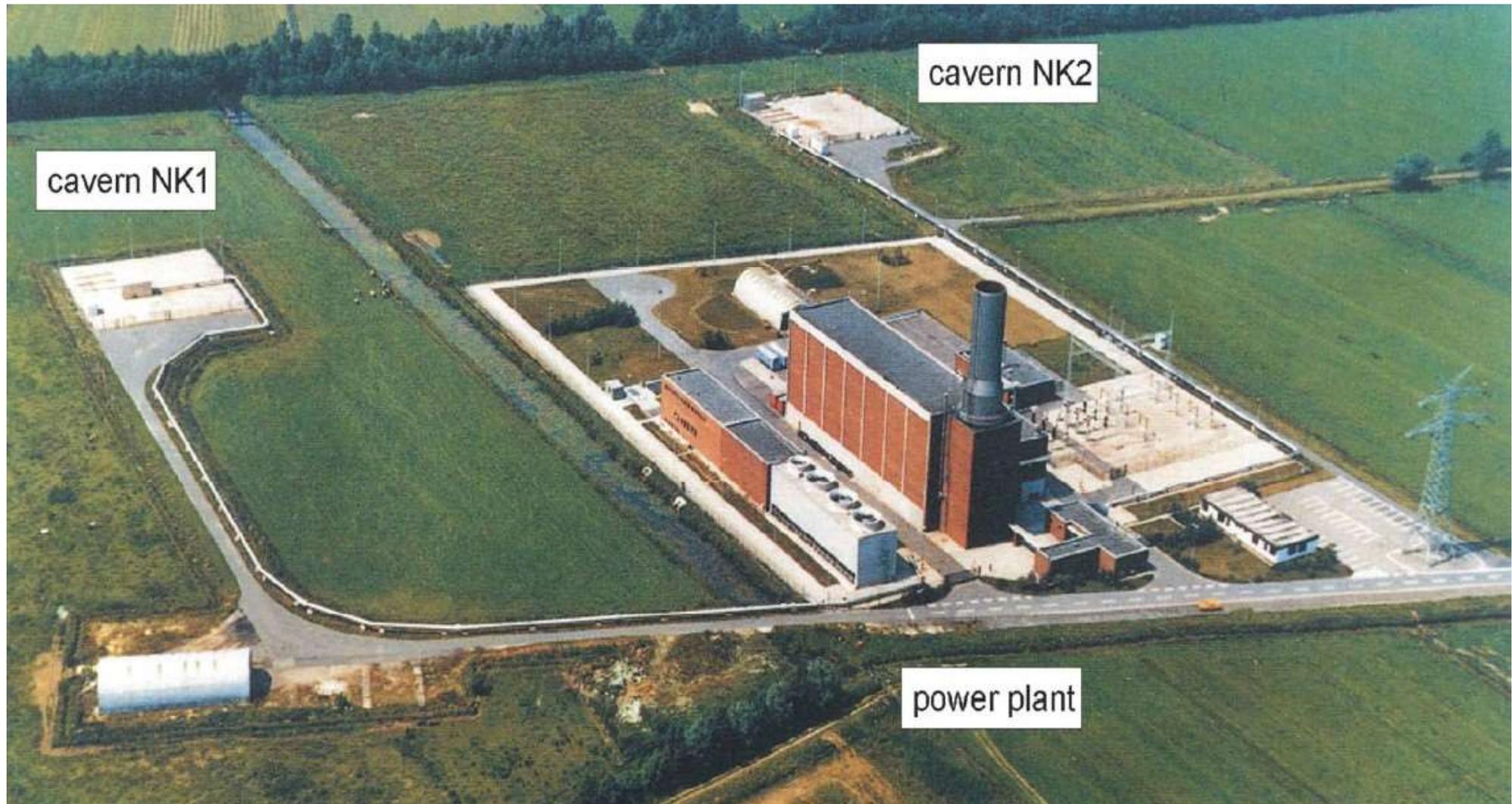
- Bislang korrekter Druckluftspeicher-Gasturbinen-Kraftwerke
 - Compressed Air Energy Storage (CAES)
- Als Druckluftspeicher werden unterirdische Kavernen verwendet.
- Bislang noch relativ geringer Wirkungsgrad
 - Option: Speicherung der bei Kompression entstehenden Wärme. Diese Wärme wird beim Entspannen zurückgeführt → höherer Wirkungsgrad (→ adiabatisches Druckluftspeicherkraftwerk)
- Ziel: Speicherung von Überschussenergie in Schwachlastzeiten

Druckluftspeicherbetrieb



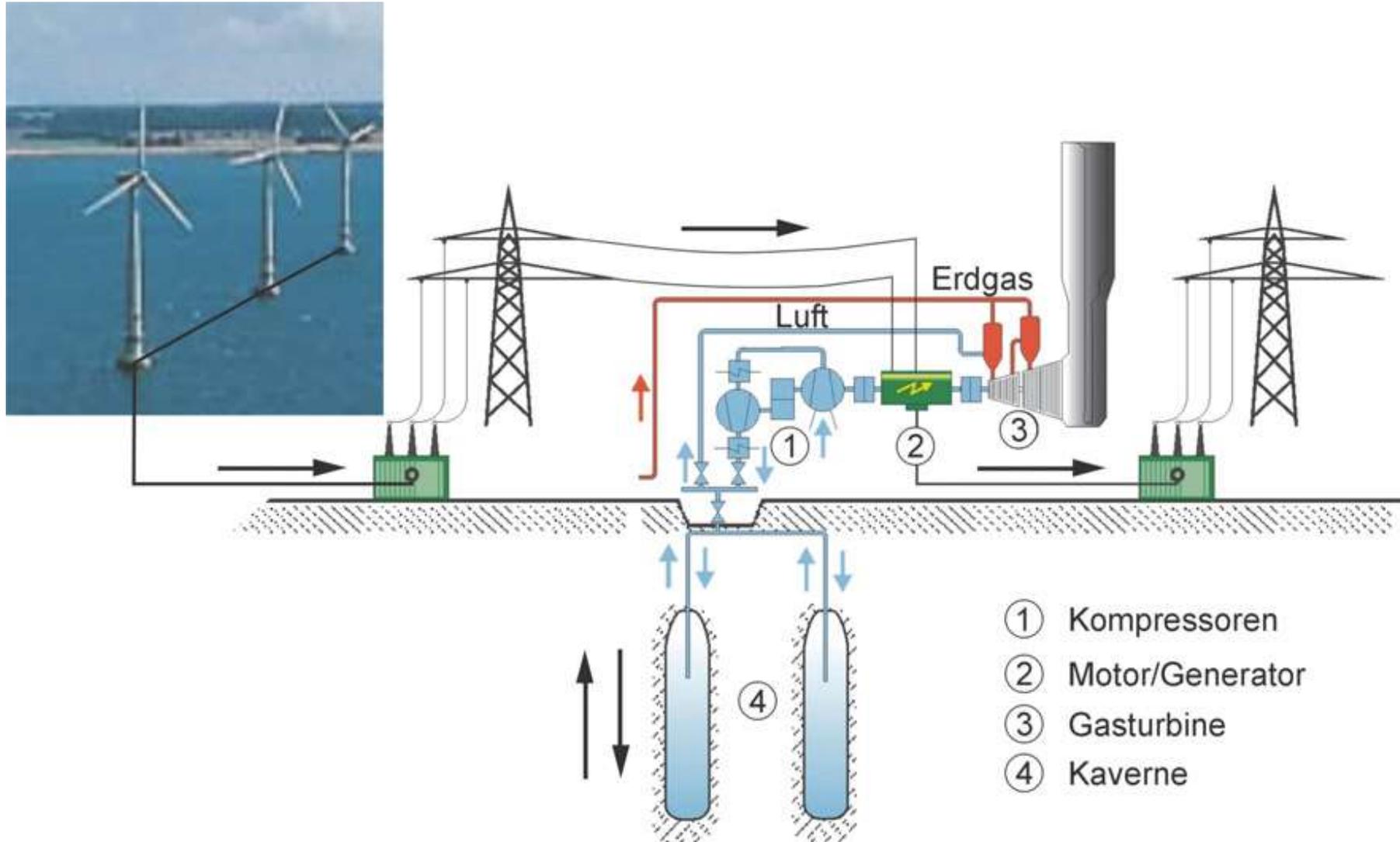
Quelle: Crotagino

Druckluftspeicherkraftwerk in Huntorf



Quelle: Crotogino

Funktionsweise von Druckluftspeicherkraftwerken

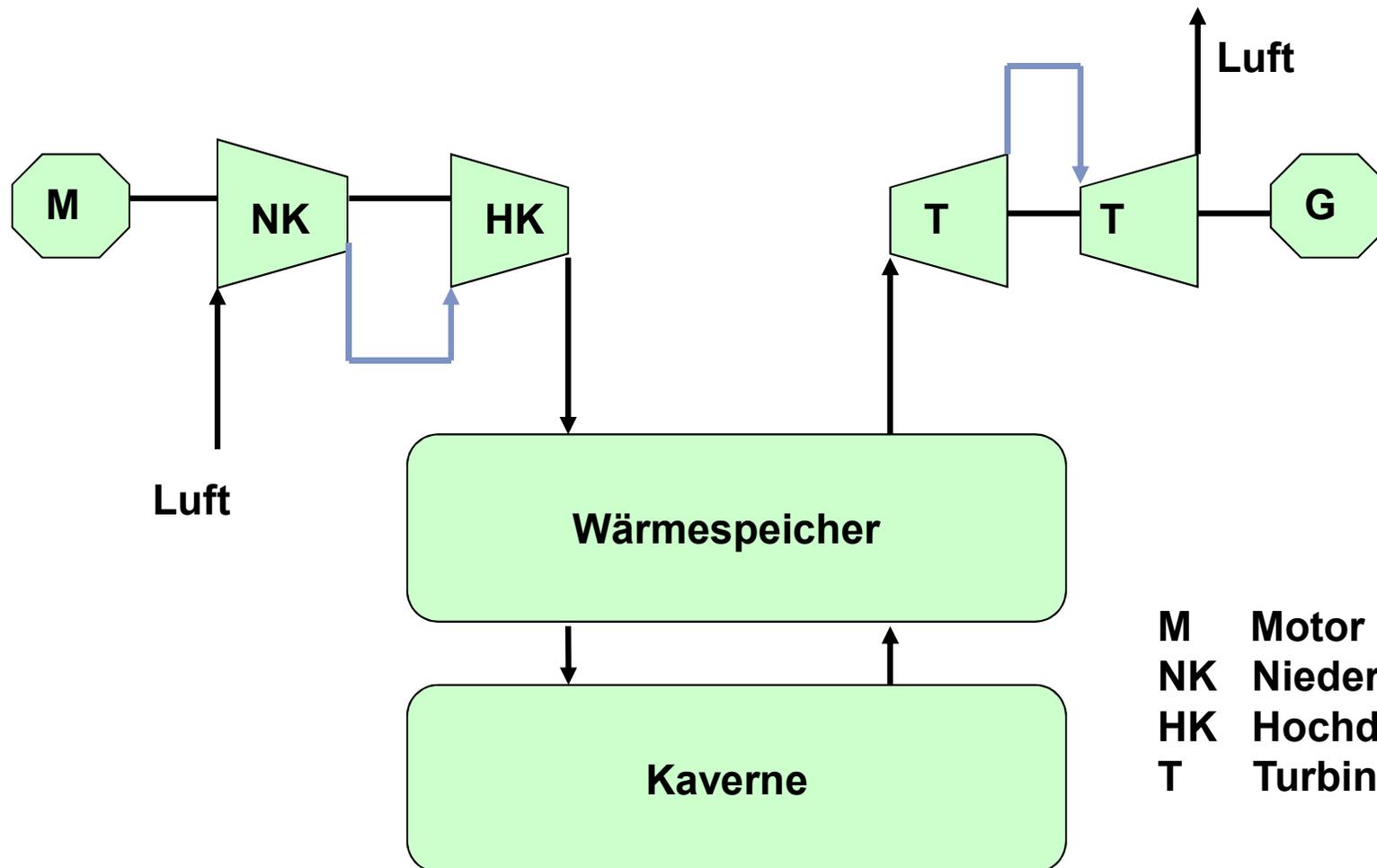


Quelle: Crotogino

Charakteristika des Kraftwerks Huntorf

■ Leistung	ca. 290 MWel
■ Errichtung	1978
■ Anfahrzeit	ca. 10 min
■ Leistungsband	100/290 MW
■ 2 Kavernen mit je	150.000 m ³
■ Kavernendruck	43...70 bar
■ Kavernentiefe	ca. 700 m
■ Gesamtwirkungsgrad	ca. 55 %

Adiabate Druckluftspeicherkraftwerke



 Angestrebter Wirkungsgrad ca. 75 % (Pumpspeicher ca. 80%)