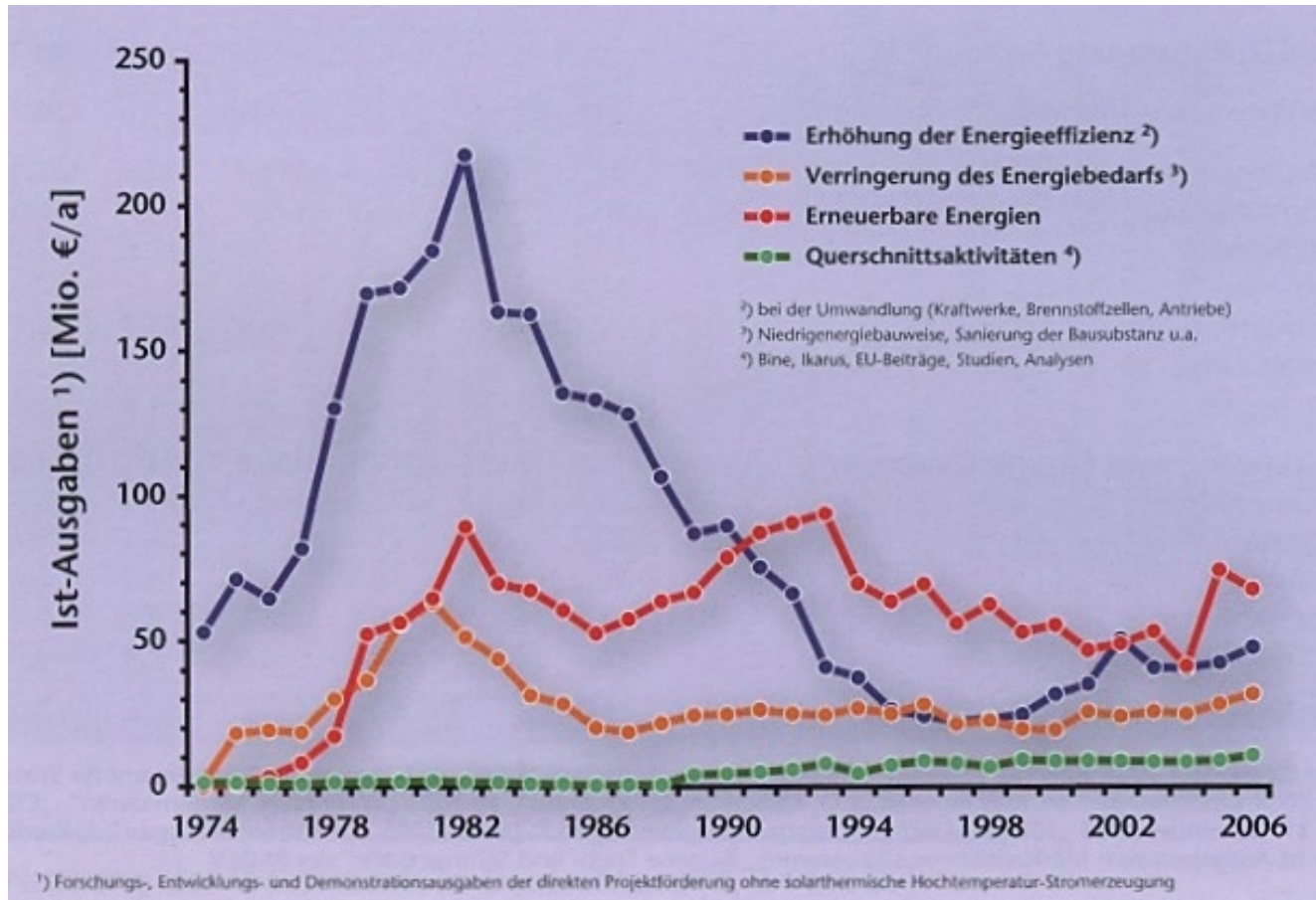




# **Vorlesung Solar-KW (Rest) Geothermie, WEK**

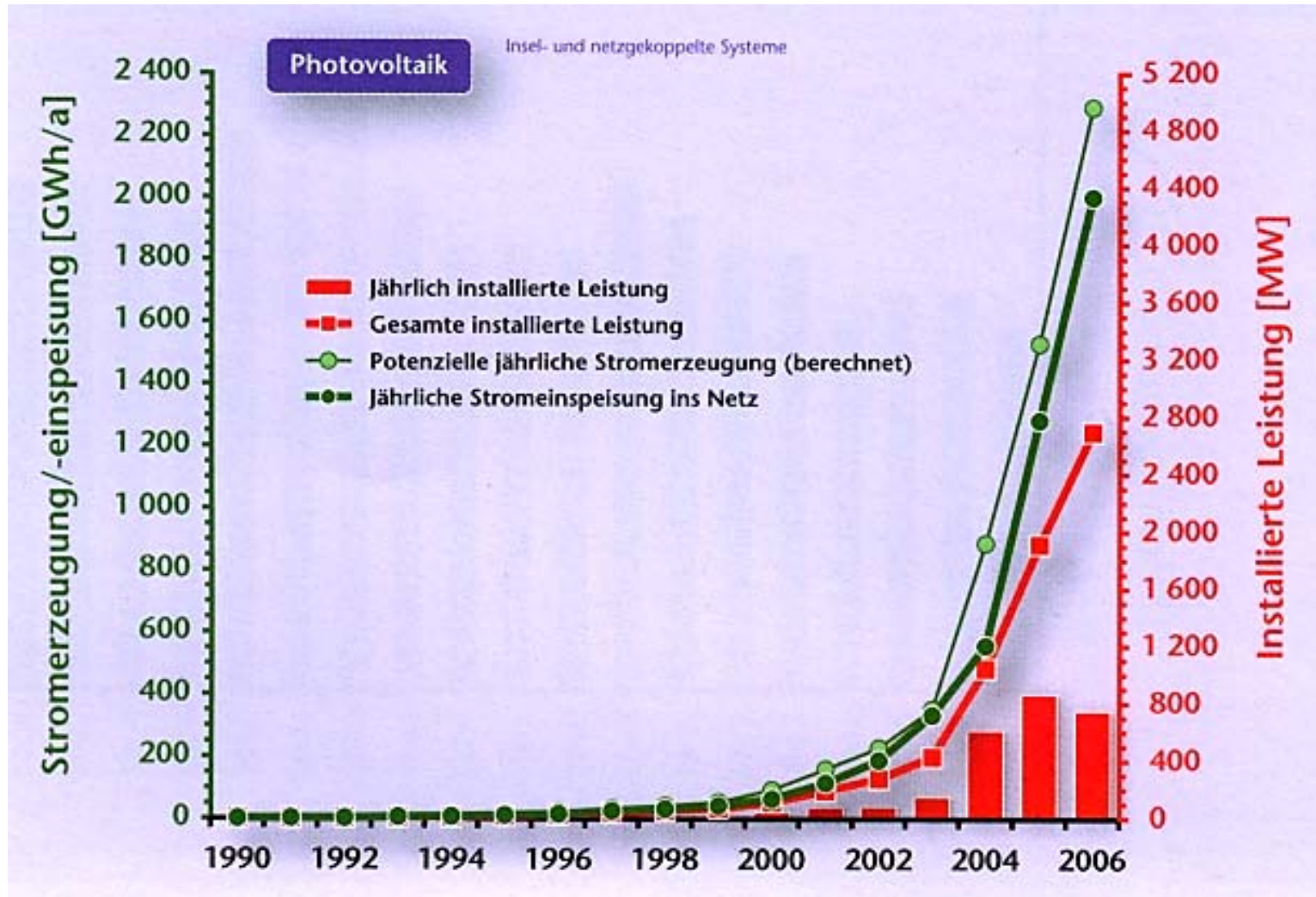
**Prüfungsterminvereinbarung!!!**

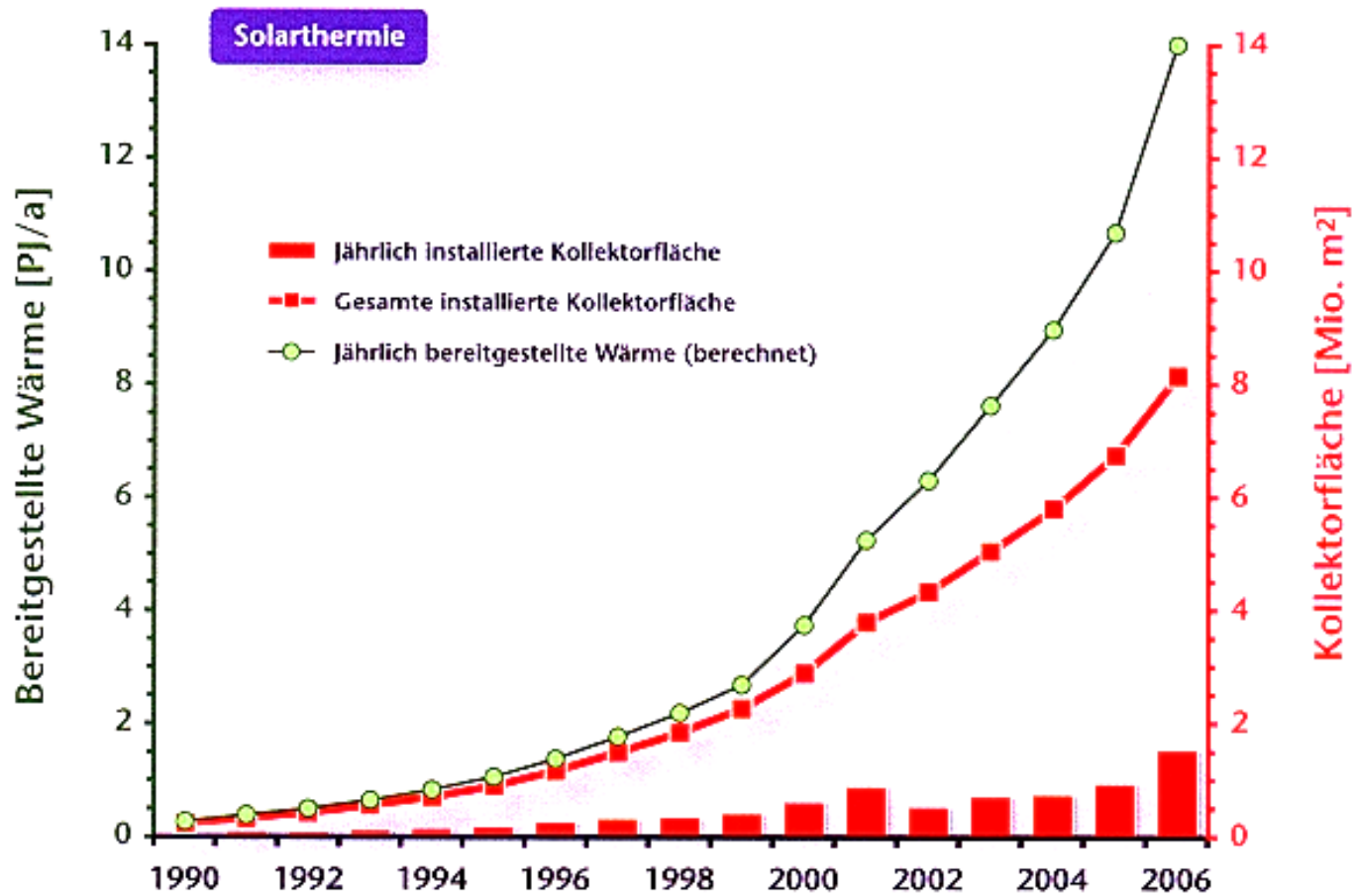
Dresden, 25.06.2007



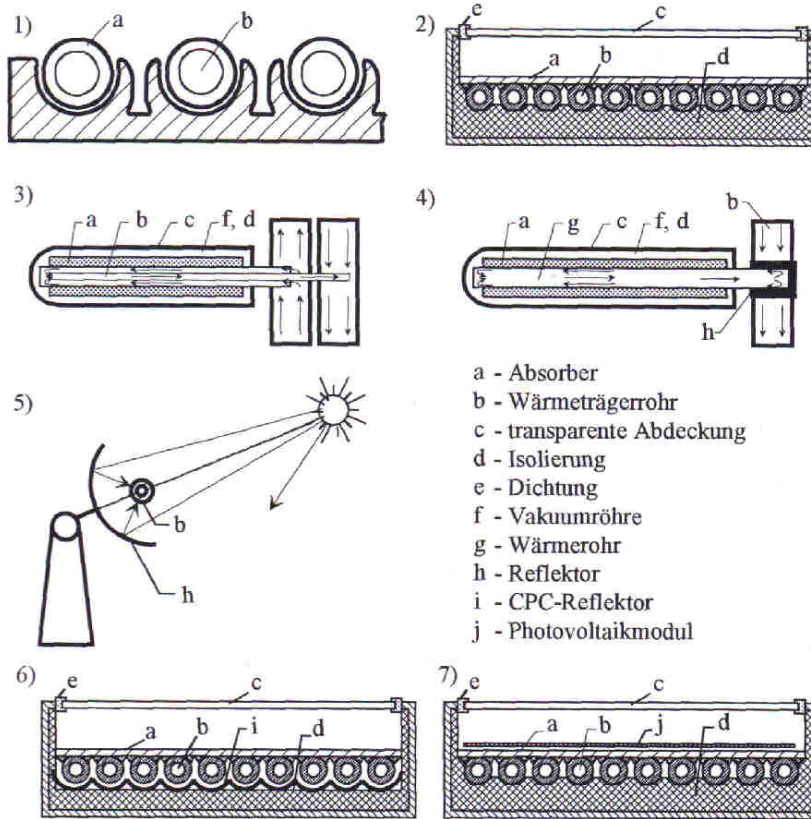
Förderprogramm	Fördermittel [Mio. €/a]													
	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
<b>Marktanreizprogramm</b>	–	3,8	8,9	18,9	5,6	9,8	17,9	107,2	250,4	189,1	135,1	203,1	456,4	302,4
• ausgezahlte Bafa-Zuschüsse <sup>1)</sup>	–	3,8	8,9	18,9	5,6	9,8	16,8	47,4	133,5	103,5	77,0	118,4	121,5	148,0
• KfW-Darlehenszusagen <sup>2)</sup>	–	–	–	–	–	–	1,1	59,8	116,9	85,6	58,1	84,7	334,9	154,4
<b>KfW-CO<sub>2</sub>-Einsparung Gebäude <sup>3)</sup></b>	–	–	–	–	–	–	36,7	26,3	64,1	65,8	148,4	280,2	2 052,0	9 500
<b>Solarstromerzeugung <sup>4)</sup></b>	–	–	–	–	–	–	51,7	203,2	416,3	392,6	651,6	0,0	549,1	399,4
<b>KfW-Umweltprogramm <sup>5)</sup></b>	54,7	109,1	96,5	131,6	195,4	348,3	517,4	655,2	798,2	591,4	606,6	538,9	690,2	760,4
• Windenergie	45,8	88,1	86,3	106,9	148,7	263,4	455,5	608,4	742,8	564,9	524,8	269,9	282,1	231,4
• Wasserkraft	5,2	10,1	3,4	5,5	13,1	10,9	12,7	13,1	4,9	2,2	2,2	12,5	25,5	13,7
• Biomasse	3,7	10,4	6,8	5,8	2,3	10,5	22,5	29,6	41,6	20,1	52,1	9,4	41,2	198,6
• Sonnenenergie	0,0	0,4	0	12	26,4	53,9	21,7	2,5	7,1	4,2	27,2	247,1	334,3	300,4
• Geothermie	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,2	0,0	7,1	16,3
• Sonstiges	0,0	0,1	0,1	1,4	4,9	9,6	5,1	1,6	1,9	–	–	–	–	–
<b>ERP-Umwelt- und Energiesparprogr.</b>	159,4	272,2	242,1	317,3	406,6	573,1	811,1	938,4	1 091,8	1 254,7	1 865,7	1 264,0	2 010,7	2 029,2
• Windenergie	109,4	224,5	213,5	275,2	368,1	529,4	806,4	911,9	1 034,4	1 207,7	1 765,8	792,9	1 388,4	1 088,3
• Wasserkraft	12,4	20,5	10,9	23,9	28,5	24,5	1,7	0,2	1,7	1,5	4,8	71,9	73,0	16,3
• Biomasse	37,4	20,2	17,6	16,8	7,4	15,9	2,6	25,9	49,9	34,2	55,2	10,4	115,3	389,0
• Sonnenenergie	0,2	1,9	0	0,8	1,6	0,8	0,3	0,4	5	11,1	25,6	148,0	434,0	532,0
• Sonstiges	0,2	5,2	0,2	0,7	0,9	2,4	0,2	0	0,8	0,2	14,2	0,0	0,0	3,6
<b>BMELV-Programm <sup>6)</sup></b>	–	–	–	–	–	–	–	1,15	2,86	7,95	7,8	6,2	4,3	2,55

Daten für das Jahr 2006 zum Teil vorläufig <sup>1)</sup> Bundesamt für Wirtschaft (BAW), ab 1. Januar 2001 Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (Bafa) <sup>2)</sup> seit Programmstart am 1. September 1999 <sup>3)</sup> bis 2004 Kreditzusagen des KfW-eigenen „CO<sub>2</sub>-Minderungsprogramms“, ab 2005 „Wohnraum Modernisieren“, „CO<sub>2</sub>-Gebäudesanierungsprogramm“ und „Ökologisch Bauen“ <sup>4)</sup> bis 31. Dezember 2003 „100 000-Dächer-Solarstromprogramm“, ab 1. Januar 2005 „Solarstrom erzeugen“ <sup>5)</sup> Kreditzusagen im Rahmen der entsprechenden Programme <sup>6)</sup> nur Ist-Ausgaben zum Markteinführungsprogramm „Biogene Treib- und Schmierstoffe“ des BMELV





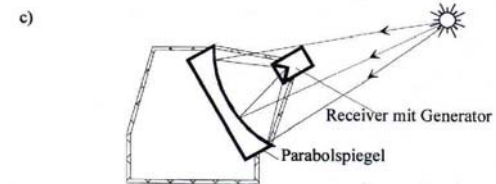
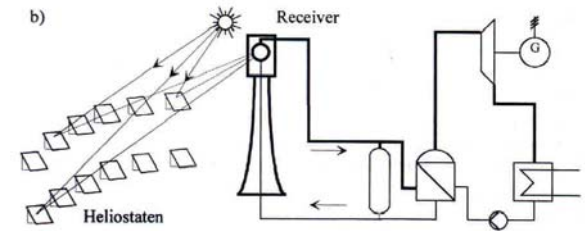
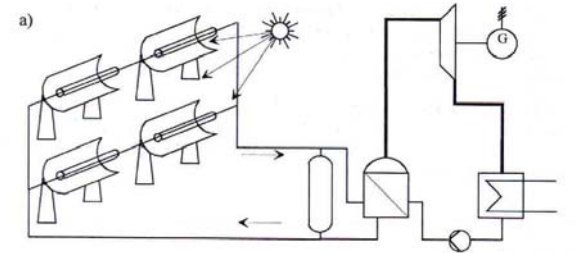
# Kollektoren



- a - Absorber
- b - Wärmeträgerrohr
- c - transparente Abdeckung
- d - Isolierung
- e - Dichtung
- f - Vakuumröhre
- g - Wärmerohr
- h - Reflektor
- i - CPC-Reflektor
- j - Photovoltaikmodul

Schnittdarstellung ausgewählter Kollektoren

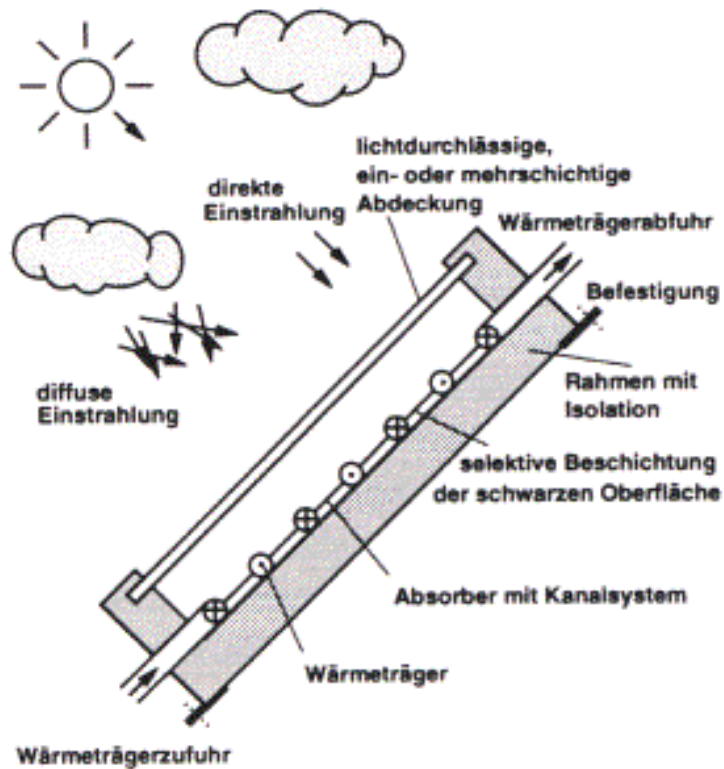
- 1) Kunststoffabsorber; 2) Flachkollektor; 3) direkt durchflossener Vakuum-Röhrenkollektor; 4) Vakuum-Röhrenkollektor mit Wärmerohr; 5) Parabolrinnenkollektor; 6) Kollektoren mit CPC-Reflektoren; 7) Multisolar®



Solarthermische Kraftwerke (Prinzipaufbau)

- a) Parabolrinnenkraftwerk b) Solarturmkraftwerk c) Dish/Stirling-Anlage

# Aufbau Sonnenkollektoren (Haustechnik)



# Geothermische Energie

## (i) Wärmefluß

"Geothermische Tiefenstufe":

im Normalfall: 10...25...40 K/km

Sonderfälle: 40...75...100 "

Wärmeleitfähigkeit des Gesteins:  $\lambda = 1,5 \dots \underline{2,5} \dots 5,0$  W/mK

Wärmefluß aus dem Erdinneren (überwiegend aus radioaktivem Zerfall von U etc.), im Normalfall:  $q = \lambda \Delta t/s = (1,5 \dots 5,0)(10 \dots 100)/1000 = 0,015 \dots \underline{0,06} \dots 0,5$  W/m<sup>2</sup>

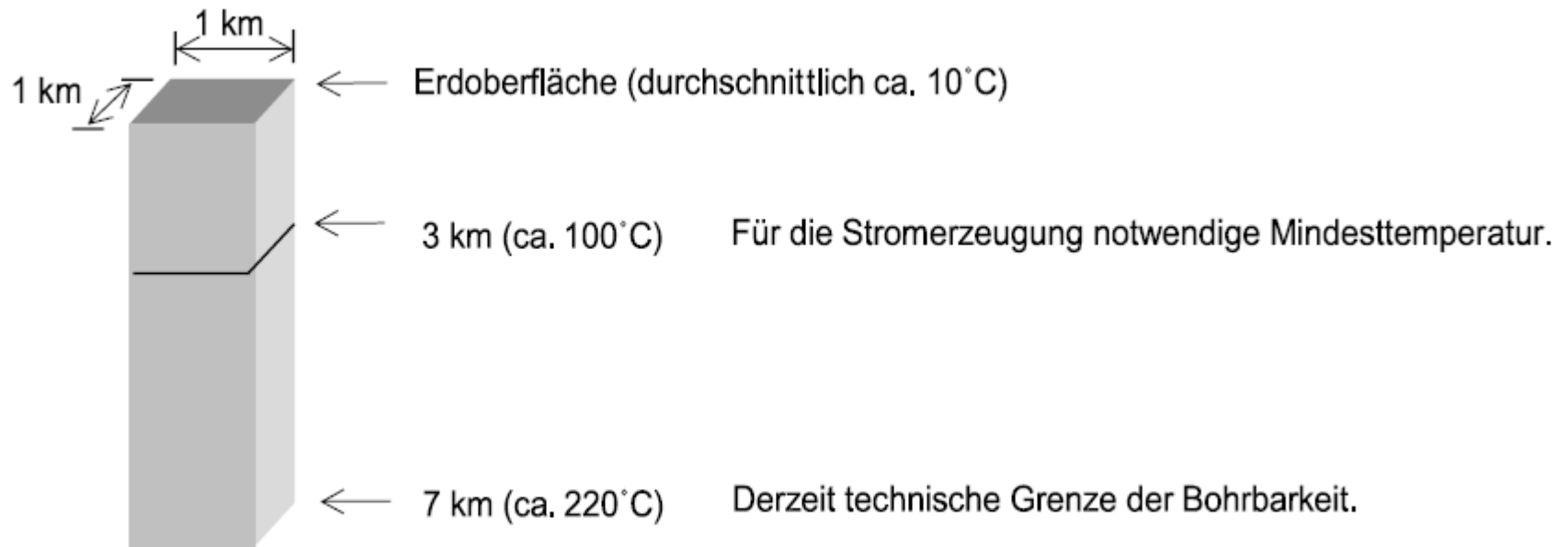
## (ii) Geysir-Dampfkraftwerke

An einigen Stellen der Erde (Lardarello, Italien; San Francisco; Island; Indonesien; Japan; etc.) Naturdampf von 200 °C und mehr an oder knapp unter der Oberfläche. In Dampfkraftwerken ausnutzbar (derzeit über 1000 MW).

Das **technische Gesamtpotenzial** zur geothermischen Stromerzeugung in Deutschland liegt bei ca. 1.200 Exa Joule (etwa 300.000 TWh), was etwa dem 600fachen des deutschen Jahresstrombedarfes von ca. 2 Exa Joule entspricht. **95 % des Potenzials entfallen auf kristalline Gesteine, 4 % auf Störungszonen und etwa 1 % auf Heißwasser-Aquifere.**



# Geothermische Energie



Quelle: nach Jung et al. 2002, S. 5 (ergänzt)

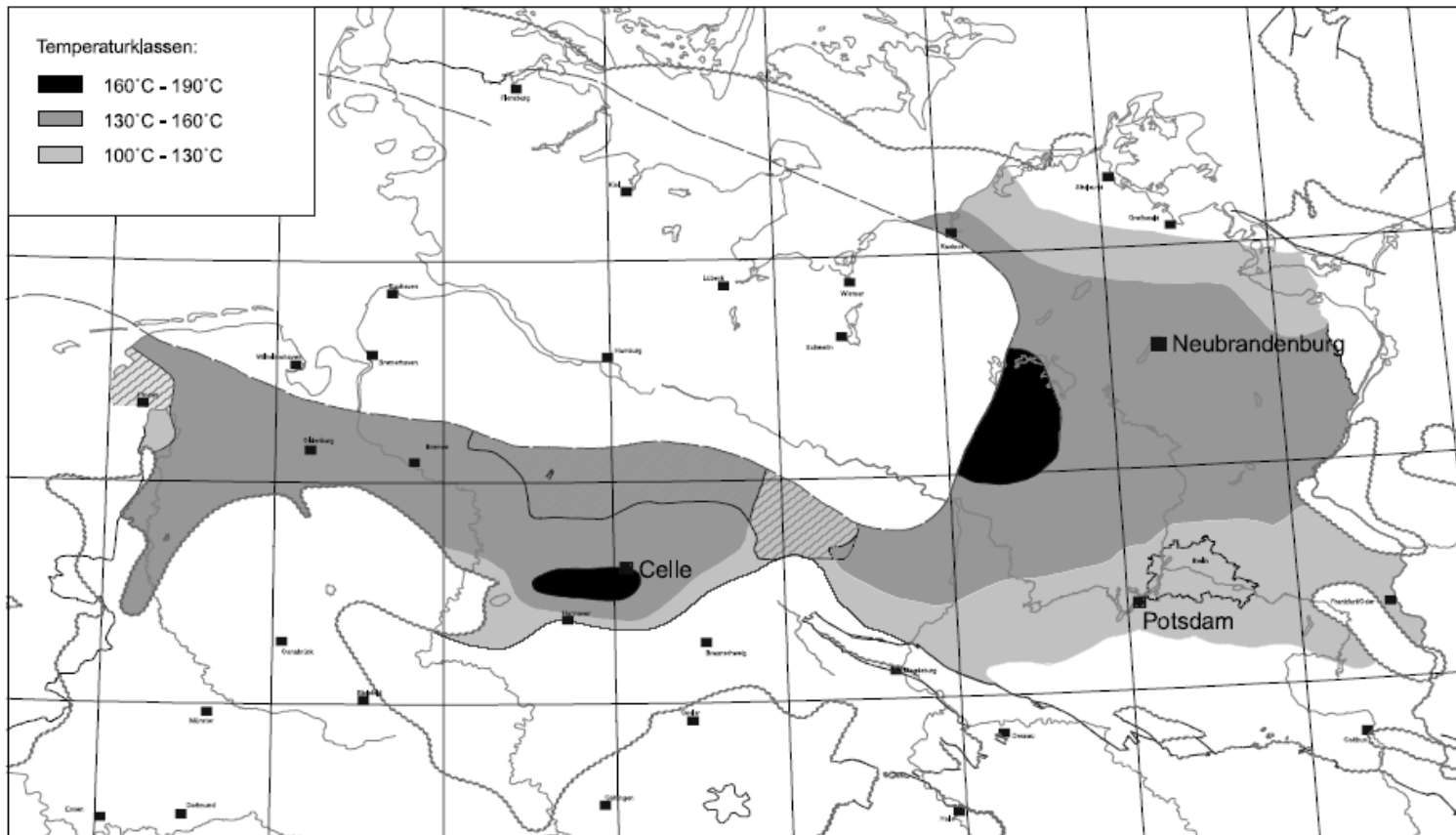
**Bedingung für Stromerzeugung:**  
**Mindestfließrate 50 m<sup>3</sup>/h**  
**Mindesttemperatur 100 °C**

# Geothermische Energie

Bild zeigt einen schematischen Ausschnitt aus der oberen Erdkruste. Der Wärmehalt dieses  $1 \times 1 \times 7 \text{ km}^3$  Quaders beträgt etwa 1,3 Exa Joule ( $\text{EJ} = 10^{18} \text{ Joule}$ ). Diesem Gesteinsquader kann Wärme entnommen werden. Die entnommene Wärme wird partiell regeneriert zum einen durch die spezifische, örtliche Wärmeproduktion (aus dem Zerfall radioaktiver Isotope des Urans, Thoriums und Kaliums) und zum anderen durch den natürlichen Wärmestrom (der aus dem Erdinnern beständig an die Erdoberfläche fließt und von dort in den Weltraum abgestrahlt wird). Allerdings liegt die spezifische (örtliche) Wärmeproduktion bei den meisten Gesteinen nur in der Größenordnung von  $1 \mu\text{W}/\text{m}^3$  und beträgt daher in dem betrachteten Gesteinsquader ca. 4 kW. Der natürliche Wärmestrom aus dem Erdinnern liegt bei ca.  $70 \text{ kW}/\text{km}^2$ . Beides zusammen reicht nicht aus, um die bei einer Stromerzeugung dem Quader zu entnehmende thermische Leistung von mehreren MW auszugleichen.

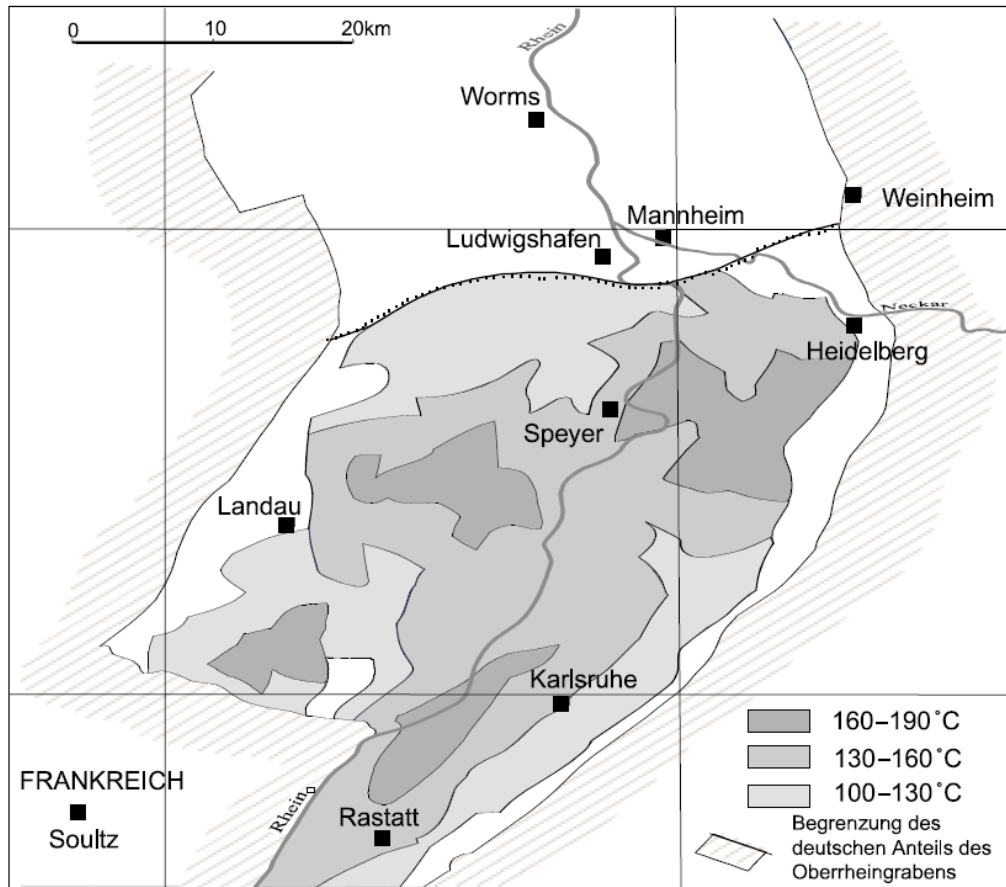
In diesem Sinne steht eine Erdwärmennutzung immer für „lokalen Abbau“ der gespeicherten Wärmeenergie. Geothermische Energie kann also nur in einem weiteren Sinne zu den regenerativen Energien gerechnet werden.

# Geothermische Energie – Norddeutsches Becken



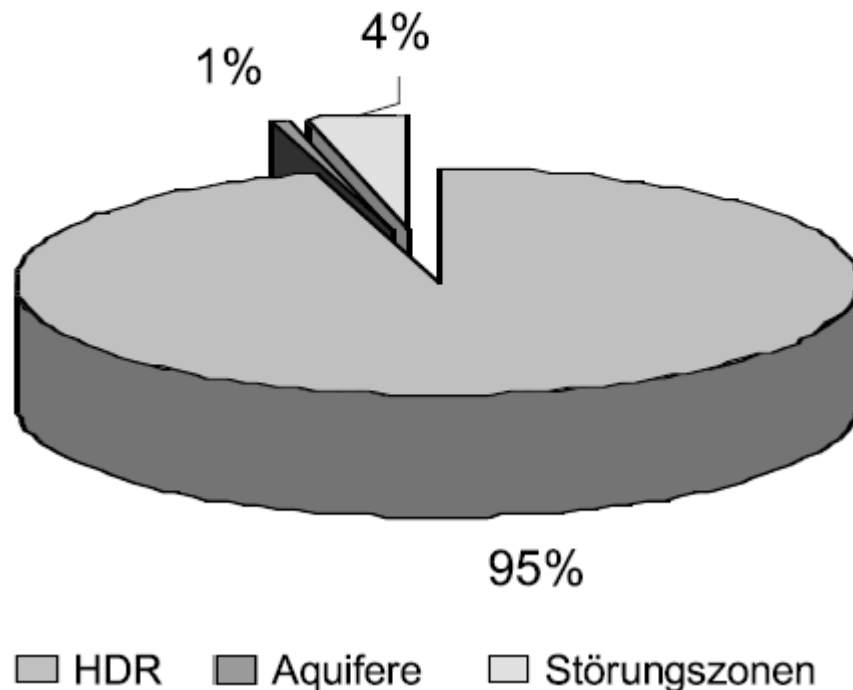
Quelle: nach Jung et al. 2002, S. 29

# Geothermische Energie – Oberrheingraben



# Geothermische Energie – Potenzial

## Strompotenzial



Anteil der drei Reservoirtypen am technischen Potenzial geothermischer Stromerzeugung

## Hot-Dry-Rock:

2 Bohrungen, Abstand 1-2 km  
80 bar Druckdifferenz  
50 m<sup>3</sup>/h Fließrate

## Aquifere

sind hochpermeable Gesteinsschichten, die ausreichend durchlässiges Material enthalten, um signifikante Mengen an Wasser zu speichern oder weiterzuleiten. Dabei handelt es sich entweder um hochporöse Sandsteine oder um andere stark geklüftete oder verkarstete Sedimentgesteine.

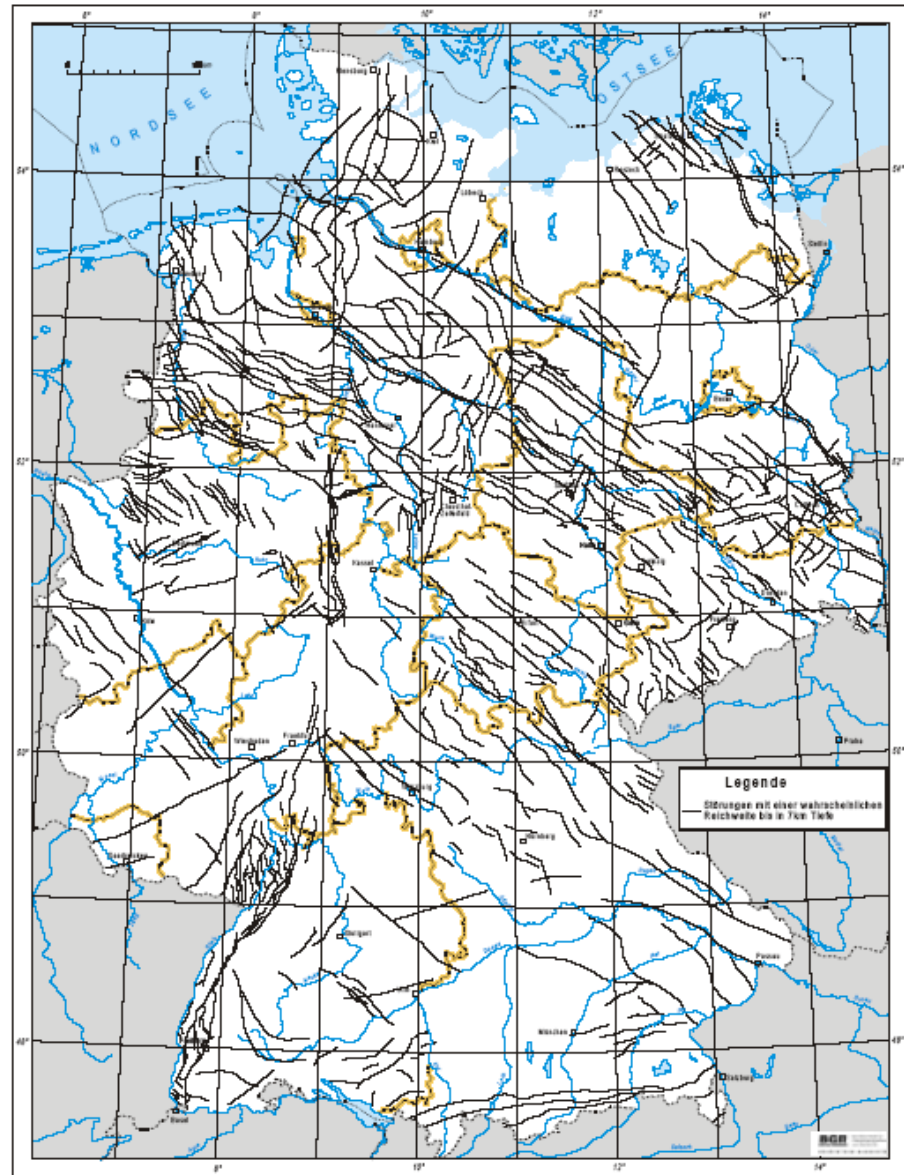
## Störungen

sind Bruchzonen oder Bruchflächen, die in Sediment- wie auch in kristallinem Gestein auftreten können. Ihr Auftreten erhöht das hydraulische Leitvermögen der Gesteinsschichten beträchtlich.

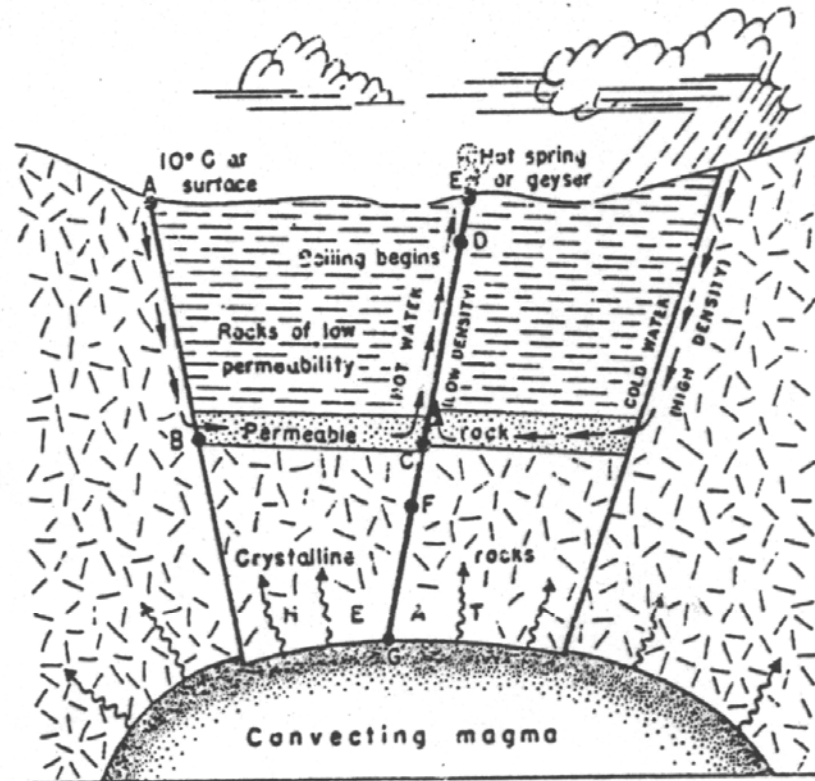
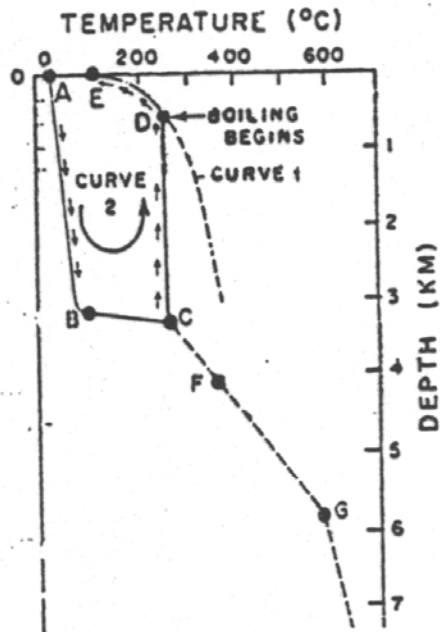
# Geothermische Energie

## Karte der Tiefenstörungen in Deutschland

Störungslinien, die sich näher als 5 km nebeneinander befinden, wurden zusammengelegt, da solche Störungen in Tiefen von wenigen Kilometern i.d.R. zu einer Störung Verschmelzen.



# Geothermische Energie



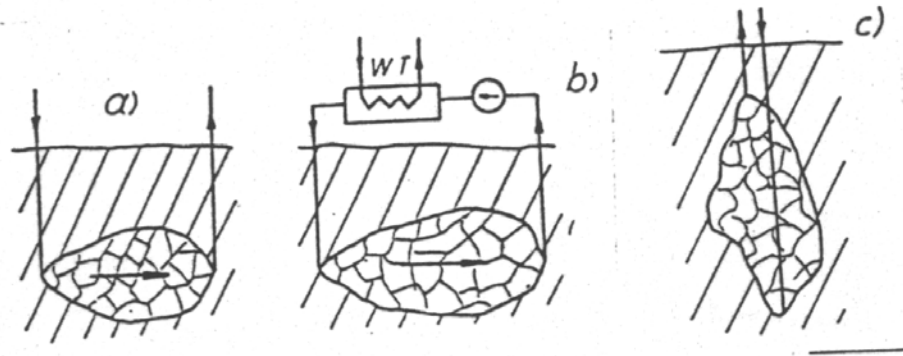
# Geothermische Energie

## (iii) Geothermisches Heißwasser

Oft aus Ölbohrungen (Waltersdorf und Loipersdorf, Stmk.). Verwendung im Fernwärmenetz (Paris), allenfalls Stromerzeugung mit Dampfturbine ( $H_2O$  oder Isobutan) über Wärmetauscher (Mineralstoff-Abscheidung!).

## (iv) Hot-Dry-Rock-Verfahren

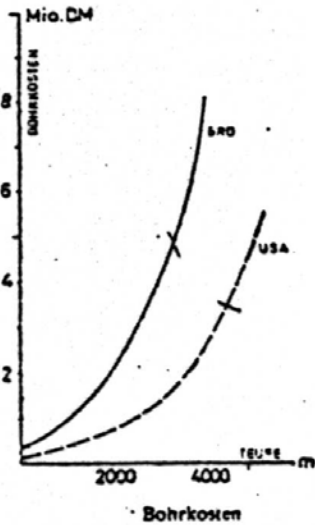
Einpressen von Speisewasser in künstlich gebrochene Kaverne. In Entwicklung.



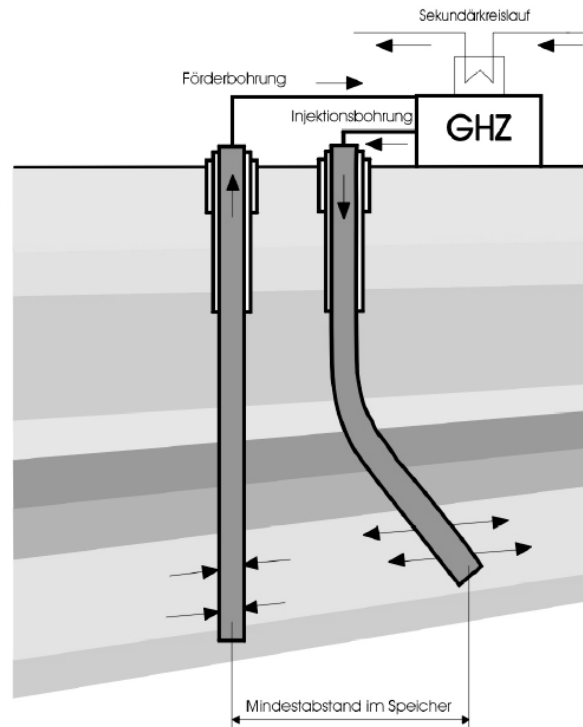


# Geothermische Energie

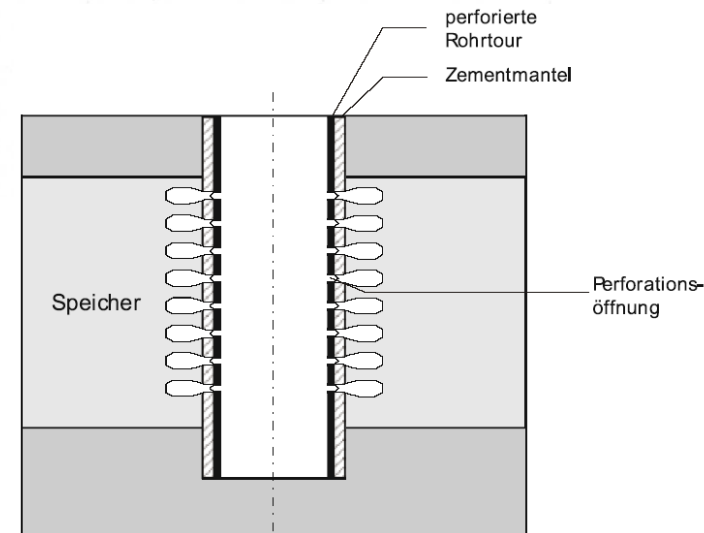
## (v) Bohrkosten



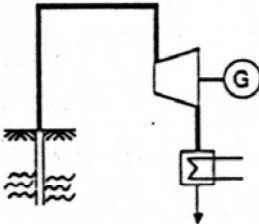
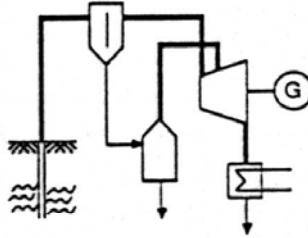
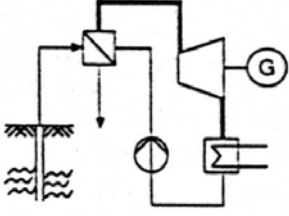
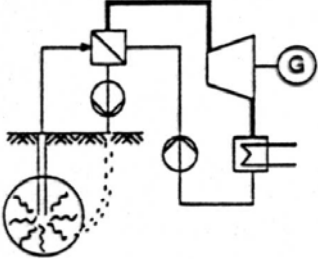
Bohrkosten steigen überproportional mit Tiefe (Bohrtiefe). Daher neuerdings (z.B. in F) geringere Bohrtiefen mit geringerer Wassertemperatur bevorzugt und Temperaturerhöhung mit Wärmepumpe (Gegenteil zum Vorschalt-Kraftwerk)



Cased-Hole-Komplettierung einer Bohrung



# Geothermische Energie - Schaltungen

	direkt		indirekt	
<b>Prinzip:</b>	<p>1 Direkt- entspannung</p> 	<p>2 Entspannungs- Verdampfung</p> 	<p>3 Wärmetausch</p> 	<p>4 Wärmetausch (Hot-Dry-Rock-Verfahren)</p> 
<b>Wärmeträger</b>	trockener Dampf	Naßdampf	Naßdampf, Heißwasser	Heißwasser
<b>Druckbereich:</b>	rund 5—8 bar	rund 2—5 bar	rund 2—5 bar	rund 3—6 bar
<b>Temperaturbereich:</b>	rund 150—180 °C	rund 120—150 °C	rund 120—150 °C	rund 120—150 °C
<b>Qualitätserwartungen:</b>	reiner Dampf	nicht korrosiv	korrosiv	wenig korrosiv
<b>Arbeitsmedium:</b>	trockener Dampf	Sattdampf	organische Arbeitsmittel Kältemittel	Wasserdampf, organische Arbeitsmittel Kältemittel
<b>ausgeführte Anlagen:</b>	The Geysers, California Lardarello, Italien	Cerro Prieto, Mexico Philippinen,	USA	
<b>installierte Leistung weltweit:*</b>	rund 2350 MW	rund 2334 MW	rund 77 MW	Konzepte in Erprobung

# Gewinnungsfaktor

$$R = R_G \cdot R_T$$

R Gewinnungsfaktor (recovery factor) [ ]

$R_G$  Geometriefaktor [ ]

$R_T$  Temperaturfaktor [ ]

$$R_G = R_{FM}$$

$R_F$  Flächenfaktor [ ]

$R_M$  Mächtigkeitsfaktor [ ]

$$R_T = (T_G - T_{IN}) / (T_G - T_S)$$

$T_G$  Temperatur des Gesteins [°C]

$T_{IN}$  Injektionstemperatur [°C]

$T_S$  Temperatur an der Erdoberfläche [°C]

Der **Flächenfaktor  $R_F$**  berücksichtigt, dass nur ein Teil Fläche (z.B. des Aquifers) ausgekühlt wird. Der **Mächtigkeitsfaktor  $R_M$**  berücksichtigt, dass auch in vertikaler Richtung der vorhandene Wärmehalt nicht vollständig entzogen werden kann.

# Wirkungsgrad

Temp.-Kl. [°C]	<i>Heißwasser-Aquifere</i>			<i>Störungen</i>			<i>kristalline Gesteine</i>			$\eta$
	<i>Strom</i>	<i>R</i>		<i>Strom</i>	<i>R</i>		<i>Strom</i>	<i>R</i>		
		<i>KWK oW</i>	<i>KWK mW</i>		<i>KWK oW</i>	<i>KWK mW</i>		<i>KWK oW</i>	<i>KWK mW</i>	
100–130	14	20	27	2,4	2,9	3,2	2,4	2,9	3,2	10,3
130–160	18	23	28	4,0	4,9	5,3	4,0	4,9	5,3	11,7
160–190	21	25	29	4,6	5,5	6,4	4,6	5,5	6,4	12,6
190–220				5,0	5,8	6,5	5,0	5,8	6,5	13,1
220–250							5,3	6,0	6,6	13,5

oW = ohne Wärmepumpe, mW = mit Wärmepumpe, Brutto-Wirkungsgrad (ohne Abzug des Eigenbedarfes)

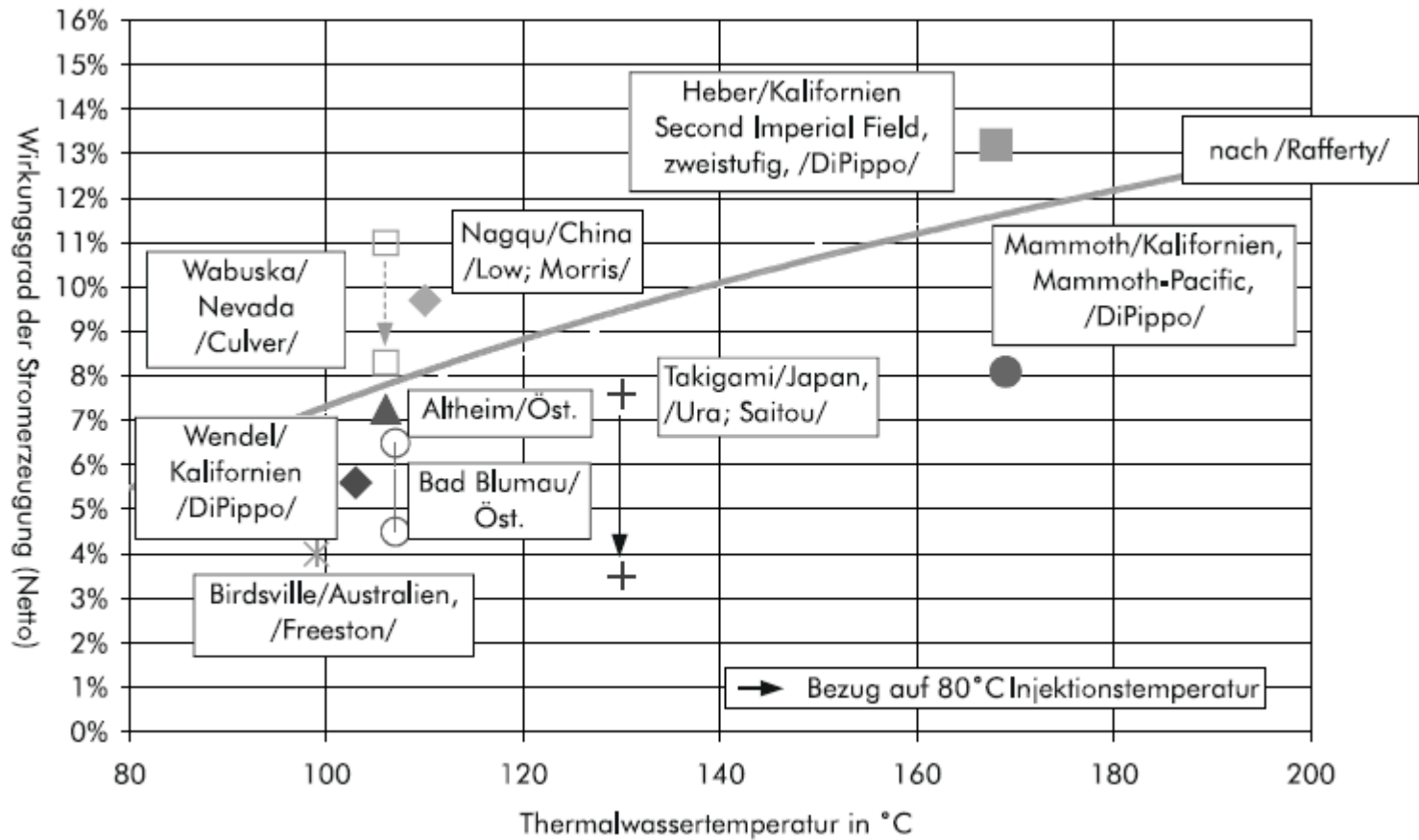
Quelle: Jung et al. 2002, S. 22

Region	Förderleistung, -temperatur, -rate <sup>3)</sup> , Bohrtiefe <sup>4)</sup>					B	W	KT	L	IBN <sup>4)</sup>
	[MW] <sup>1)</sup>	[MW] <sup>2)</sup>	[°C]	[m <sup>3</sup> /h]	[m]					
<b>Norddeutsches Becken</b>										
• Groß Schönebeck	≈10	≈1	150	> 50	4 294	D	–	?	A	2008
• Neustadt-Glewe	1,3 bis 3,5	0,2	97	≤ 110	2 250	D	+	O	A	2003
<b>Oberrheingraben</b>										
• Bruchsal	4	≈0,5	118	86	2 500	D	+	?	A	2007
• Landau	≈22	≈2,5	≈150	≈250	3 000	D	+	O	A	2007
• Offenbach, Bellheim	≈30 bis 45	≈4,8 bis 6,0	≈160	≈360	≈3 500	D	?	K	A	2008
• Speyer <sup>5)</sup>	≈24 bis 50	≈5,4	160	≈450	2 900	T <sup>6)</sup>	+	O	A	2009
<b>Süddeutsches Molassebecken</b>										
• Unterhaching	> 30	≈3,4	122	≤ 540	3 300	D	+	K	A	2007

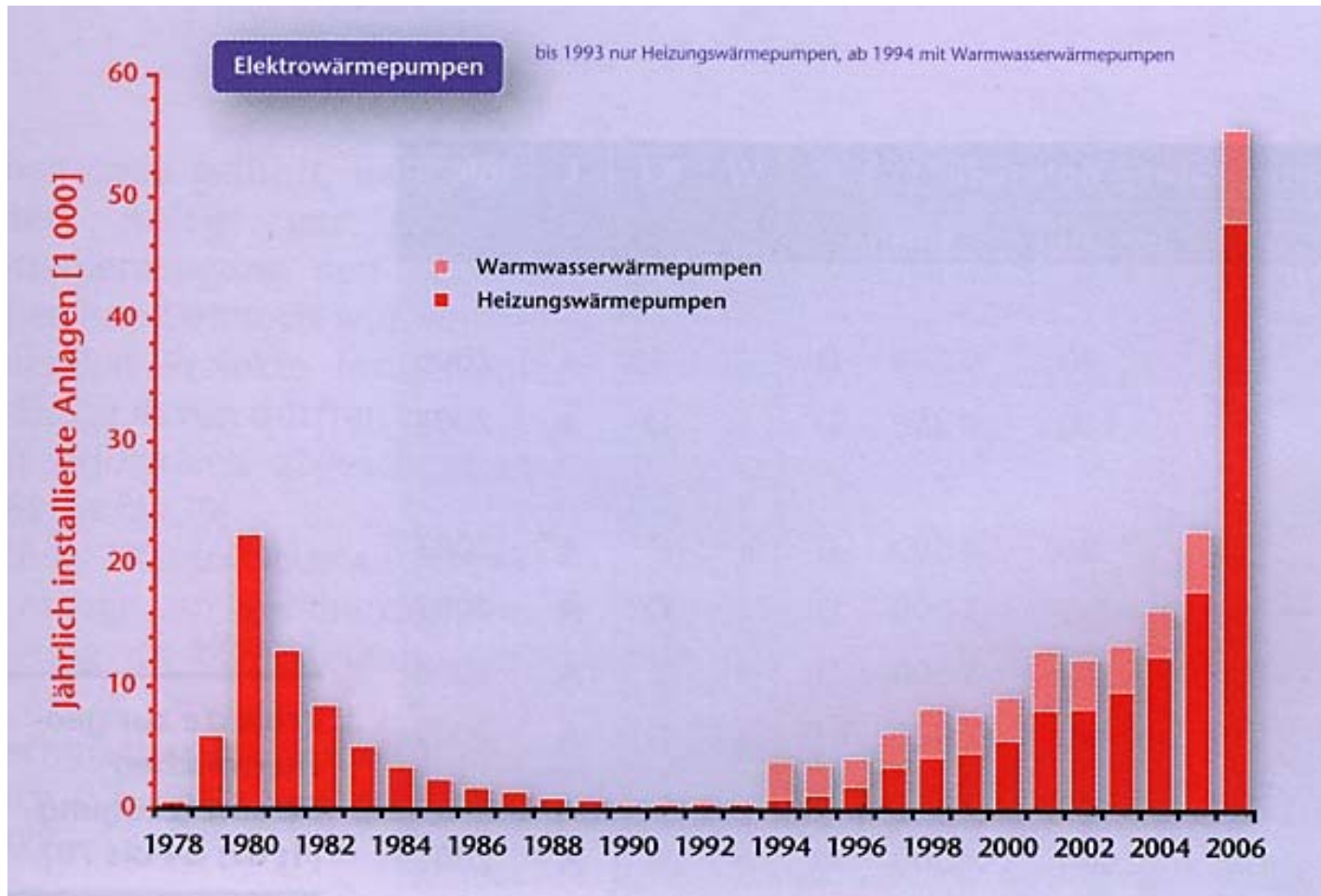
- 1) geothermisch
- 2) elektrisch
- 3) zu Vergleichszwecken normiert
- 4) z.T. geplant
- 5) Projekt ruhend
- 6) mindestens

- |     |                        |
|-----|------------------------|
| A   | Aquifer                |
| B   | Bohrlochkonzept        |
| D   | Dublette               |
| IBN | Inbetriebnahme         |
| K   | Kalina Cycle           |
| KT  | Konversionstechnologie |
| L   | Lagerstätte            |
| O   | ORC                    |
| T   | Triplette              |
| W   | Wärmenutzung           |

# Geothermische Energie - Wirkungsgrade



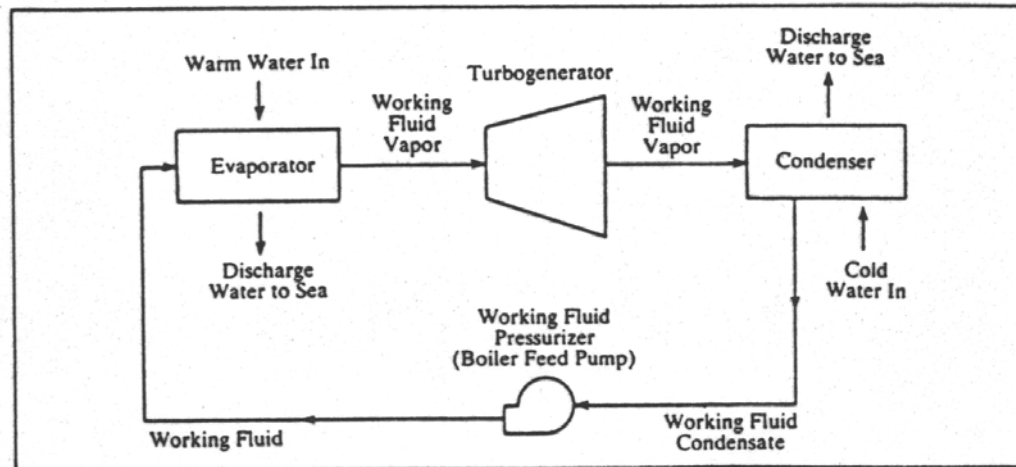
Wirkungsgrade von ORC-Systemen



# Ozeanisches Wärmekraftwerk

## 4.9.3 Ozeanisches Wärmekraftwerk (OTEC, Ocean Thermal Energy Conversion)

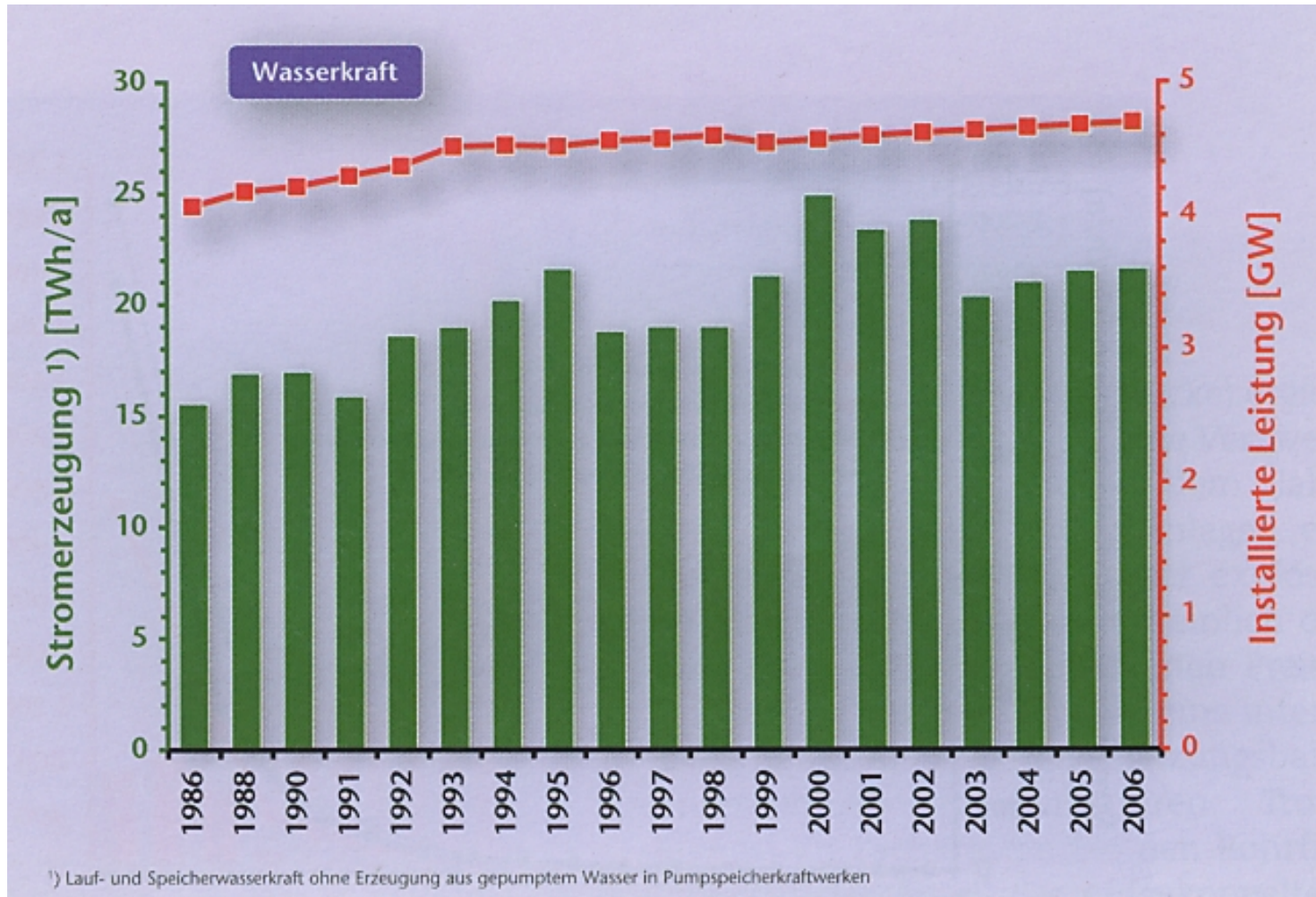
Der Temperaturunterschied tropischer Meere zwischen warmem Oberflächenwasser (ca. 25 °C) und kaltem Tiefenwasser (ca. 10...15 °C) kann im Prinzip für einen Dampfprozeß verwendet werden (niedrigsiedende Flüssigkeit). Wirkungsgrad sehr niedrig (Carnot !), thermische Leistung je MW el. Leistung hoch, Wärmetauscher (Dampferzeuger und Kondensator) werden trotz hoher WÜZ groß, aber wie beim Sonnenkraftwerk keine Brennstoffkosten.



Source: Federal Ocean Energy Technology Program, United States Department of Energy, 1985.



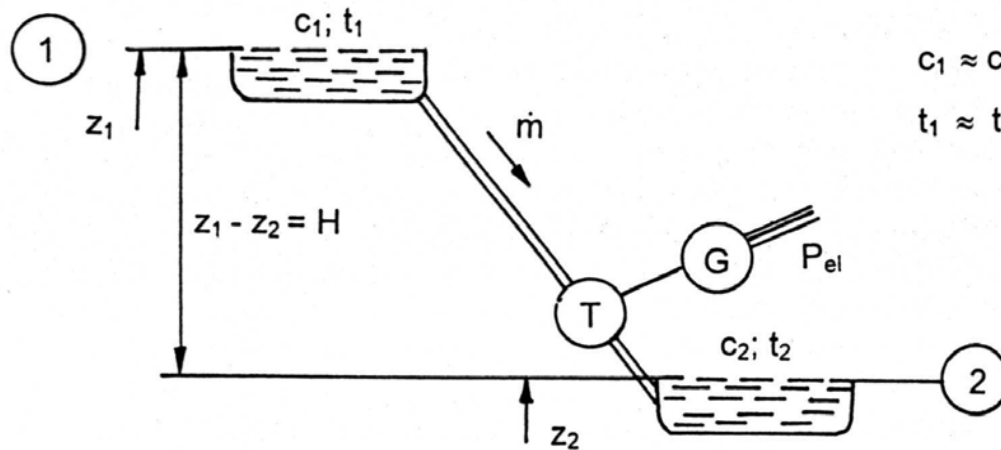
# Nutzung der Wasserkraft in Deutschland



# Wasserkraftwerke

## Wasser

Energiebilanz ① → ②



$$W = g(z_1 - z_2)$$

$$P_{el} = \eta_{el} \cdot \dot{m} \cdot g(z_1 - z_2)$$

# Wasserkraftwerke

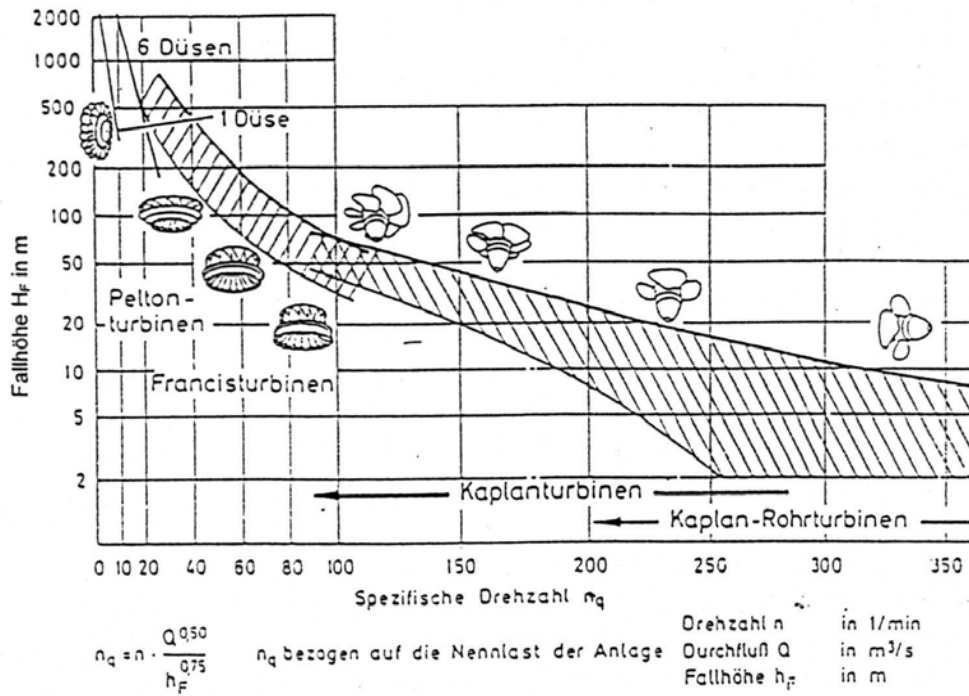
Dabei ist der Massenstrom nicht beliebig einstellbar und jahreszeitlich konstant.

$$\dot{m} \neq \text{const.}$$

Die Höhendifferenz eines Wasserkraftwerkes

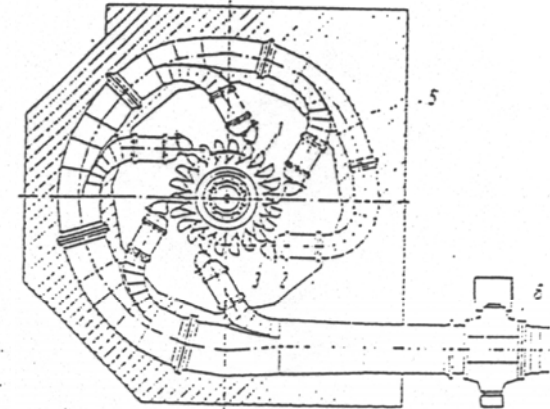
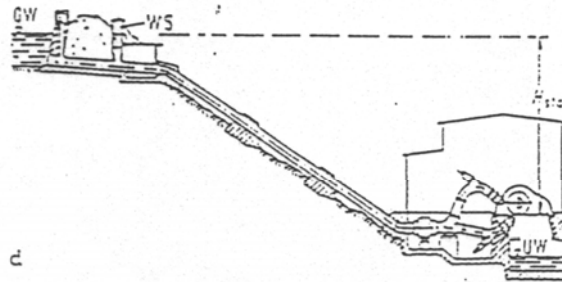
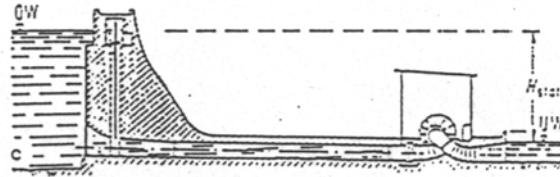
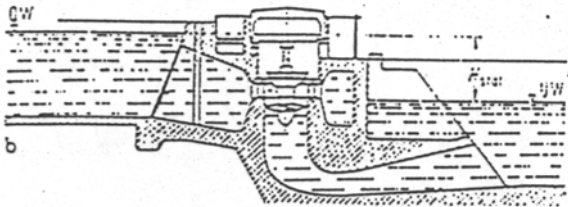
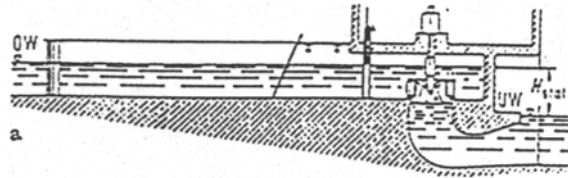
$$H = z_1 - z_2$$

bestimmt auch die Ausführung der Wasserturbine.



Anwendungsbereiche der verschiedenen Bauarten von großen Wasserturbinen, nach Voith

# Wasserkraftwerke



## Wasserkraftwerke

- a Niederdruckanlage mit Seitenkanal mit Francisturbine;
- b Niederdruckanlage im Fluss mit Kaplanurbine;
- c Hochdruckanlage an einer Talsperre mit Francisturbine
- d Hochdruckanlage im Gebirge mit Peltonturbine.

OW            Oberwasser  
 UW            Unterwasser  
 WS            Wasserschloss

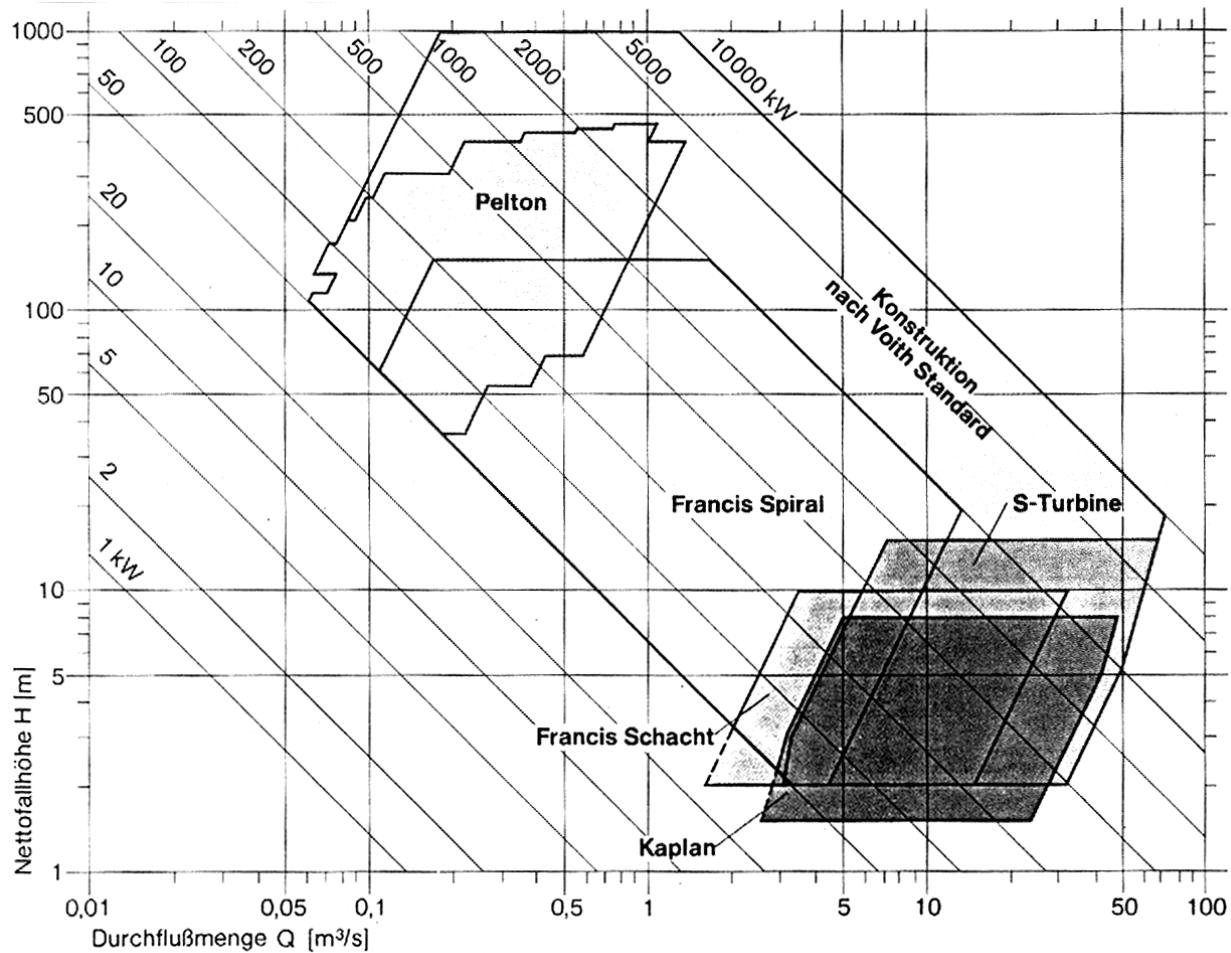
**Peltonturbine mit sechs innengesteuerten Düsen**  
 (Voith Strahlkreisdurchmesser 4,35 m,  $H_N = 413$  m,

$$\dot{V}_N = 45,1 \text{ m}^3 / \text{s} / n = 180 \text{ min}^{-1}, P_N = 167 \text{ MW}.$$

- 1 Laufrad
- 2 Düse
- 3 Strahlableiter
- 4 Innensteuerung der Düsennadel (Schließstellung)
- 5 Ringleitung
- 6 Absperrorgan



# Wasserkraftwerke – Auswahl der Turbinentypen



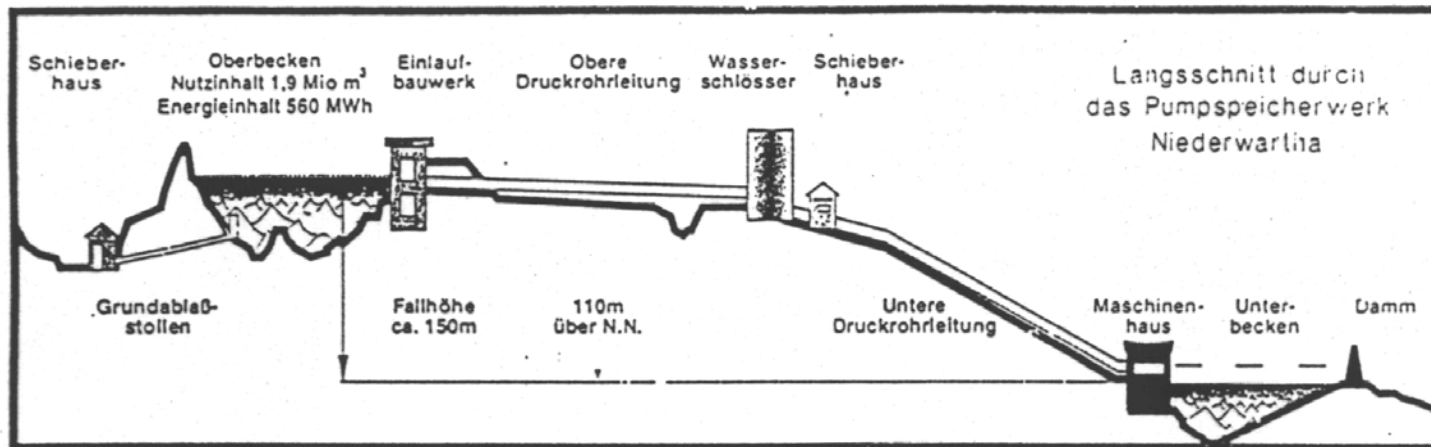
# Wasser-KW genutztes und nutzbares Potenzial

Bundesland	genutztes Potential [MW]	derzeitige Stromerzeugung [Mrd. kWh]	nutzbares Potential [MW]	mittelfristige Stromerzeugung [Mrd. kWh]
Bayern	2835	13,2	3229,6	16,2
Baden-Württemberg	1073,9	5,0	1894	9,5
Brandenburg	4,3	0,02	39,9	0,2
Hessen	236,3	1,1	259,2	1,3
Mecklenburg-Vorpommern	2,1	0,01	20	0,1
Niedersachsen	62,3	0,29	89,7	0,45
Nordrhein-Westfalen	214,8	1,0	319	1,6
Rheinland-Pfalz	262	1,22	329	1,65
Saarland	15,5	0,072	13	0,09
Sachsen	15	0,07	139,6	0,7
Sachsen-Anhalt	5,6	0,026	99,7	0,5
Schleswig-Holstein	2,8	0,013	4	0,02
Thüringen	69,3	0,325	159,5	0,8
<b>Gesamt</b>	<b>4800</b>	<b>22,35</b>	<b>6800</b>	<b>33,11</b>

# Pumpspeicher-Wasserkraftwerke

In zunehmendem Maße wird deshalb wegen  $\dot{m} \neq \text{const.}$  und zum Ausgleich von tageszeitlichen Lastspitzen das Pump-Speicher-Wasserkraftwerk eingesetzt.

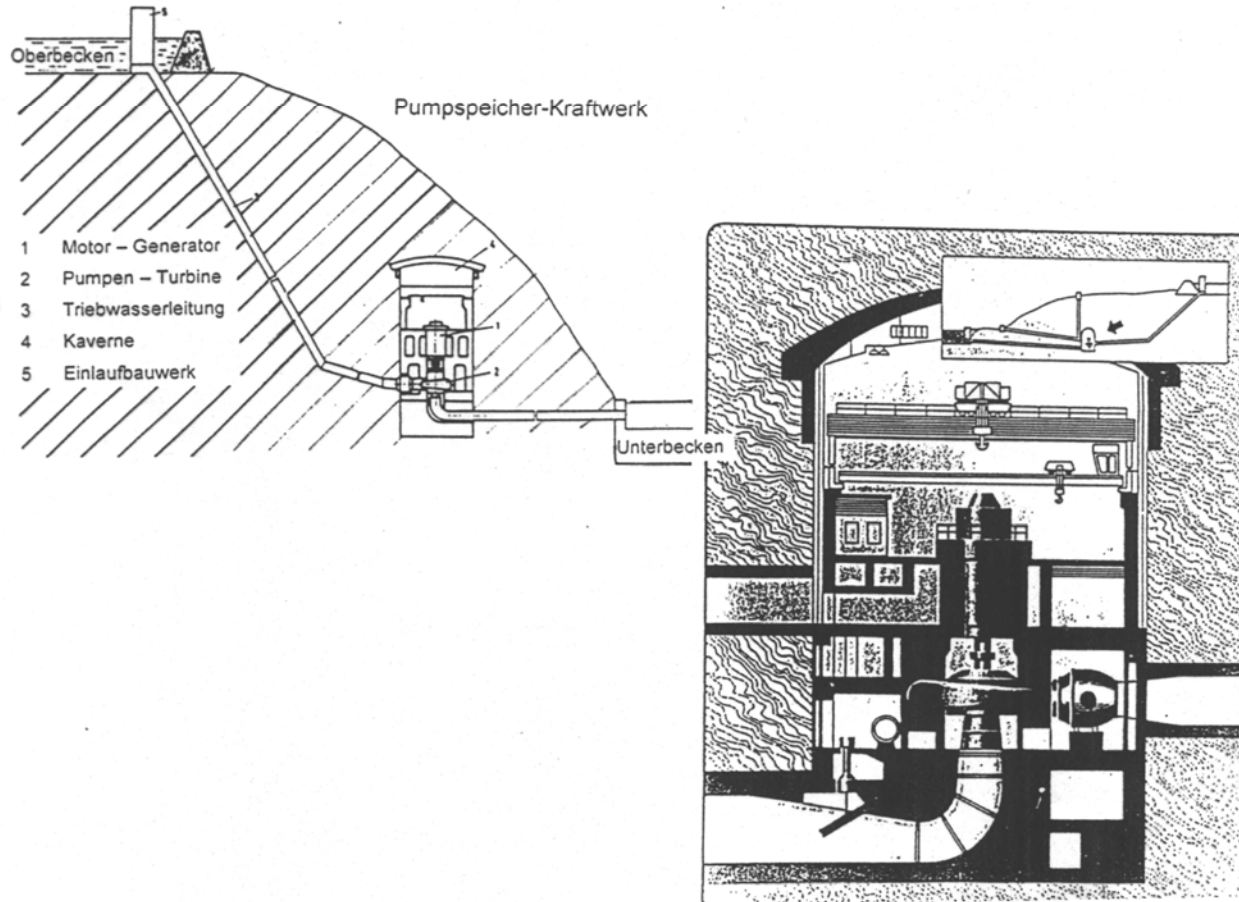
1. PSW – in Sachsen (D) in Niederwartha bei Dresden





# Pumpspeicher-Wasserkraftwerke

Ein modernes Kavernen-PSW ist das KW Markersbach (D)



# Pumpspeicher-Wasserkraftwerke



## **Pumpspeicher-Kraftwerk**

**Inbetriebnahme** 2003/2004,

**Arbeitsvermögen** 8480 MWh,

**Stauanlagen** Gesamtsystemmenge

Sommer 19,66 Mio. m<sup>3</sup>

Winter 18,87 Mio. m<sup>3</sup>

**Verbindung Oberbecken/Kaverne**

Art Druckstollen stahlgepanzert

Anzahl 2

Länge 817 m

Durchmesser 6,2 m

Mittlere Fallhöhe 302 m

**Verbindung Unterbecken/Kaverne**

Art Druckstollen betonausgekleidet

Anzahl 2

Länge 276 m

Durchmesser 8,2 m

**Nennleistung je Satz**

Turbinenbetrieb 265 MW

Pumpenbetrieb 261 MW

**von Stillstand auf Turbinenbetrieb** 98 s

**Schnellübergang von Pump- auf**

**Turbinenbetrieb** 99 s

**von Stillstand auf Pumpbetrieb** 250 s

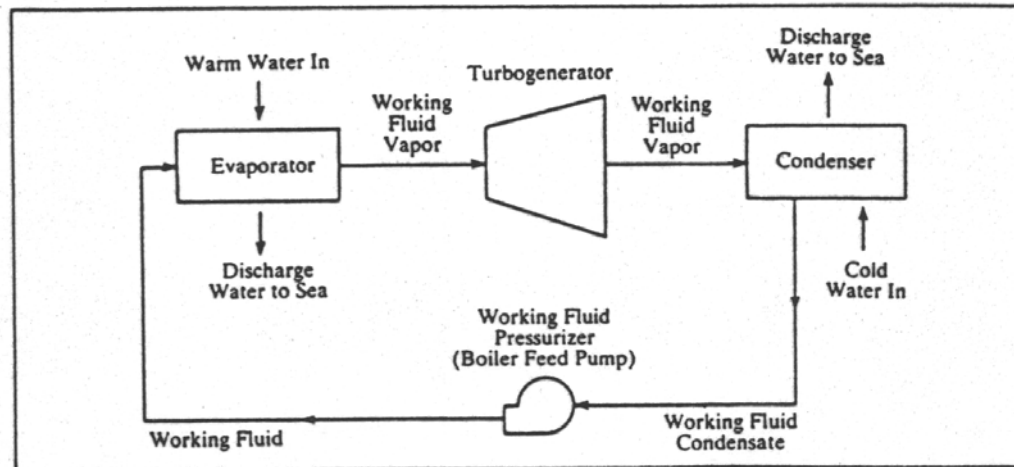
**Gesamtnennleistung** 1060 MW

8h-Volllastbetrieb

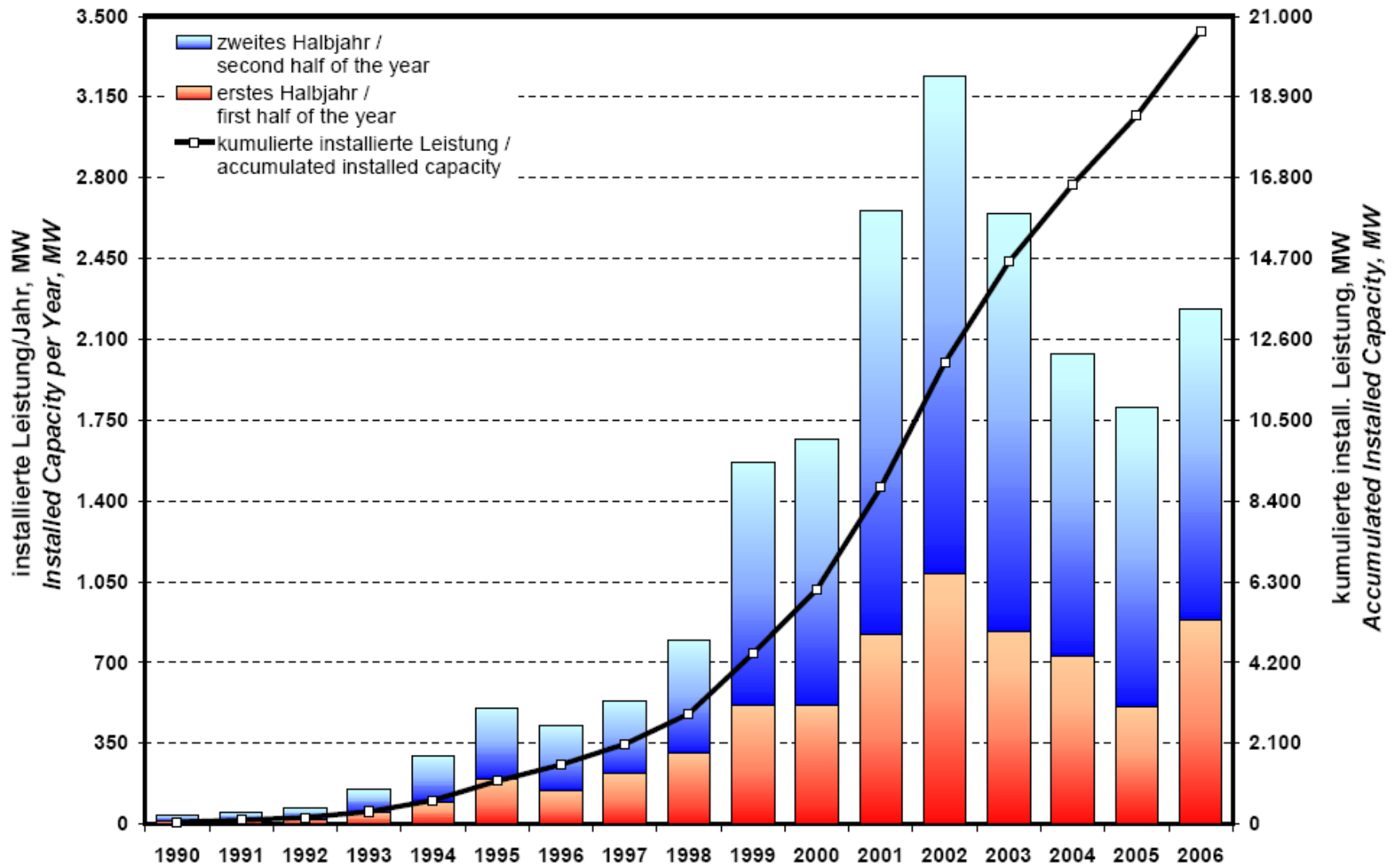
# Ozeanisches Wärmekraftwerk

## 4.9.3 Ozeanisches Wärmekraftwerk (OTEC, Ocean Thermal Energy Conversion)

Der Temperaturunterschied tropischer Meere zwischen warmem Oberflächenwasser (ca. 25 °C) und kaltem Tiefenwasser (ca. 10...15 °C) kann im Prinzip für einen Dampfprozeß verwendet werden (niedrigsiedende Flüssigkeit). Wirkungsgrad sehr niedrig (Carnot !), thermische Leistung je MW el. Leistung hoch, Wärmetauscher (Dampferzeuger und Kondensator) werden trotz hoher WÜZ groß, aber wie beim Sonnenkraftwerk keine Brennstoffkosten.



Source: Federal Ocean Energy Technology Program, United States Department of Energy, 1985.



Quelle: DEWI

# WEK (WEA)

**Der jährliche Zubau im nationalen Onshore-Markt wächst seit 2003 erwartungsgemäß langsamer.**

**Mit der Ende 2006 installierten Gesamtleistung bleibt Deutschland jedoch der größte Windenergiemarkt der Welt, gefolgt von Spanien.**

**Die Marke von 20.000 MW gesamt installierter Leistung in Deutschland wurde 2006 deutlich überschritten. Insgesamt waren nach der neuesten Statistik des Deutschen Windenergie-Instituts Ende 2006 in Deutschland 18.685 Windenergieanlagen mit einer Gesamtleistung von 20.622 MW installiert. Das entspricht einem Leistungszuwachs von zwölf Prozent gegenüber 2005. Rund 2,9 Milliarden Euro wurden in Deutschland in neue Windparks investiert. Den größten Zuwachs verzeichneten die Bundesländer Brandenburg (509 MW), Niedersachsen (378 MW), Sachsen-Anhalt (340 MW) und Rheinland-Pfalz (182 MW).**

Quelle: DEWI

# Stand 31.12.2006

	<b>A</b> Stand/Status 31.12.2006	<b>B</b> Nur/only 2006
<b>1. Gesamte Anzahl WEA</b> <i>1. Number of WT</i>	18.685	1.208
<b>2. Gesamte installierte Leistung, MW</b> <i>2. Installed Capacity, MW</i>	20.621,86	2.233,13
<b>In 1. A berücksichtigte Anzahl abgebauter WEA</b> <i>Number of WT removed and taken into account in 1. A</i>	244	79
<b>In 2. A berücksichtigte abgebaute Leistung, MW</b> <i>Capacity (MW) removed and taken into account in 2. A</i>	100,09	26,19
<b>In 1. A, B berücksichtigte Anzahl WEA (Repowering)</b> <i>Number of WT (repowering) taken into account in 1. A, B</i>	176	55
<b>In 2. A, B berücksichtigte Leistung (Repowering)</b> <i>Capacity (repowering) taken into account in 2. A, B</i>	332,05	136,40
<b>durchschnittl. installierte Leistung, kW/WEA</b> <i>Average Installed Power, kW/WT</i>	1.103,66	1.848,62

Quelle: DEWI

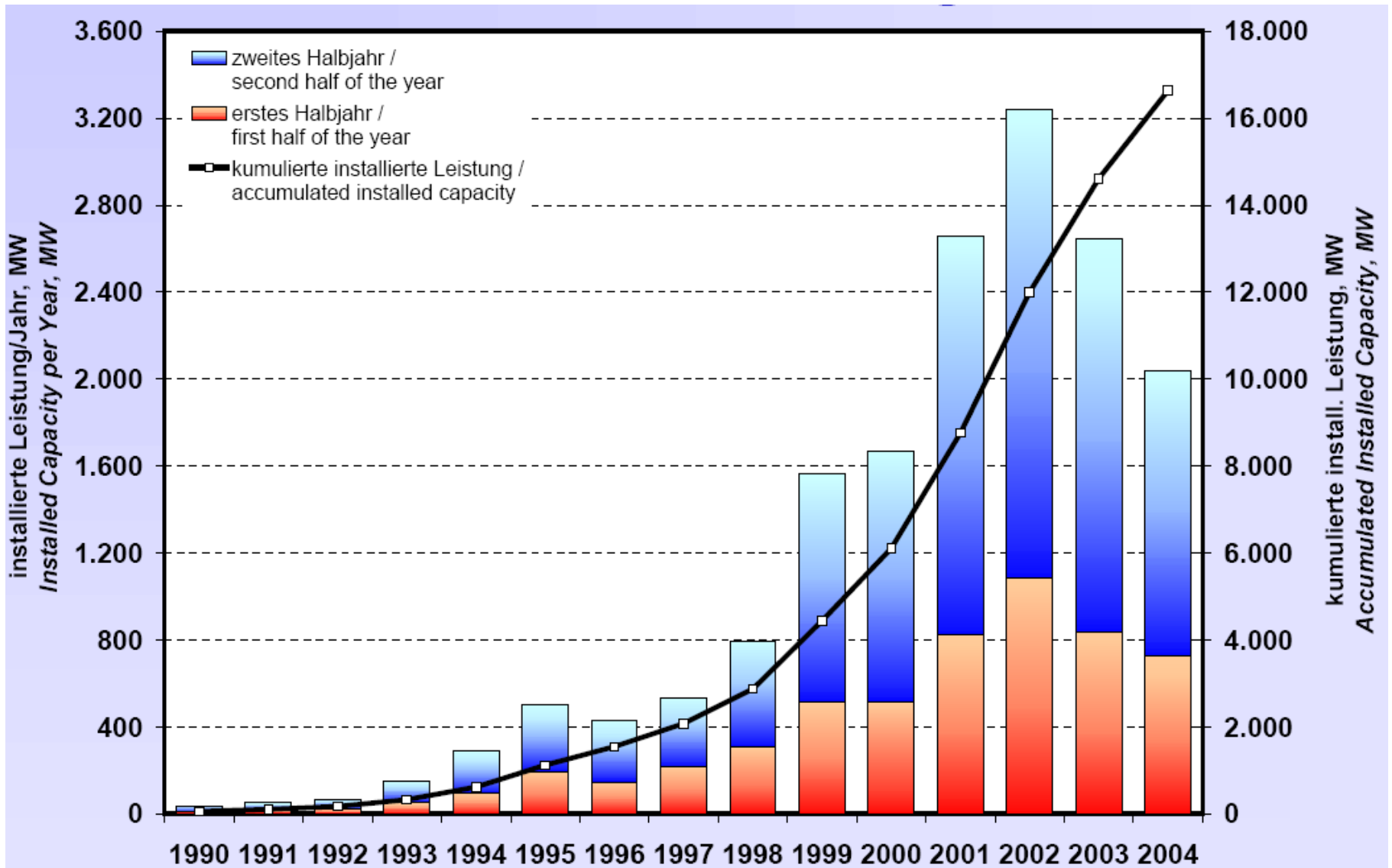
	Bundesland	Install. Leistung Gesamt 31.12.06 MW
1	Niedersachsen	5.282,54
2	Brandenburg	3.128,16
3	Sachsen-Anhalt	2.533,01
4	Nordrhein-Westfalen	2.392,26
5	Schleswig-Holstein	2.390,51

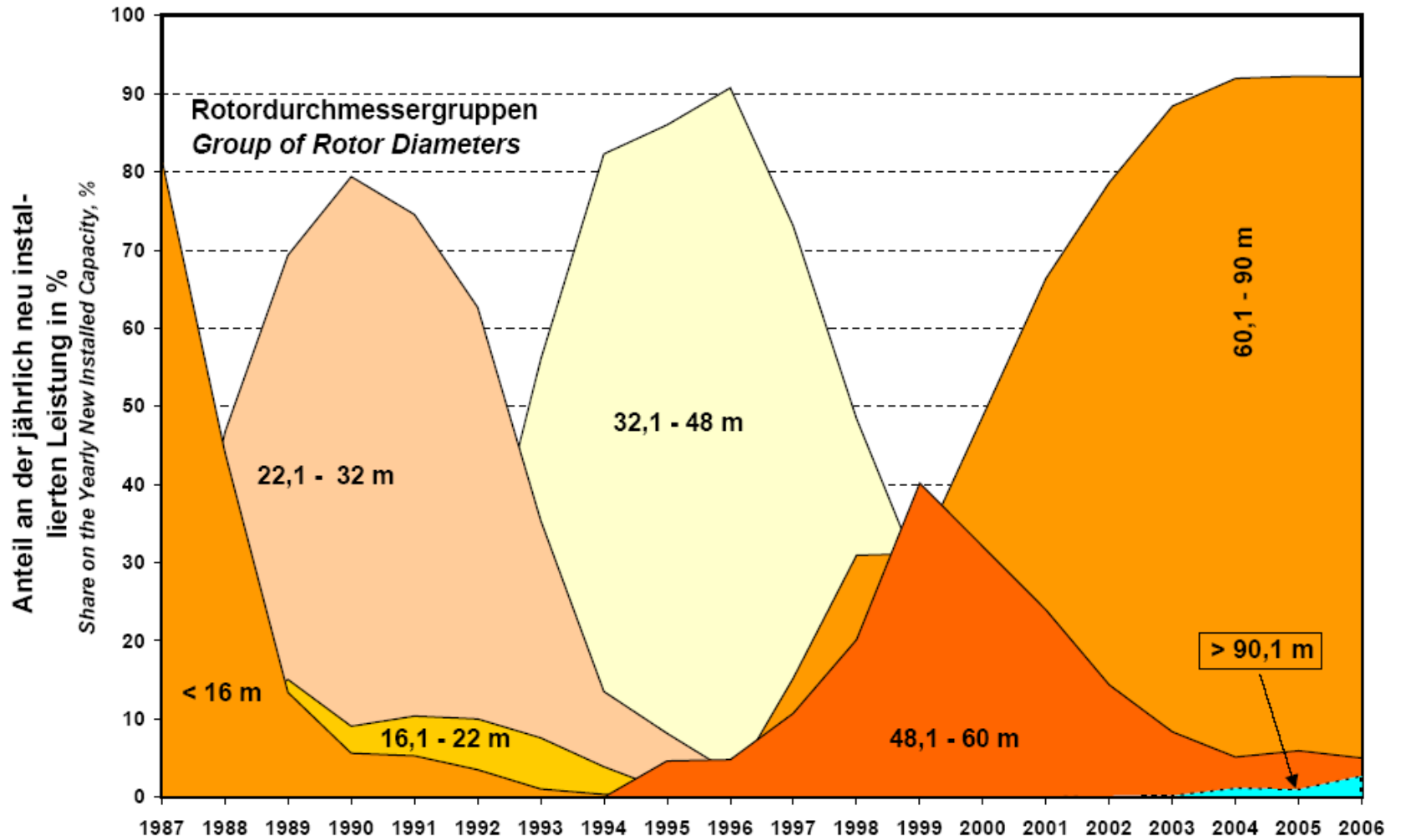
	Bundesland	Install. Leistung 01.01.-31.12.06 MW
1	Brandenburg	508,60
2	Niedersachsen	377,98
3	Sachsen-Anhalt	339,75
4	Rheinland-Pfalz	182,10
5	Nordrhein-Westfalen	167,70

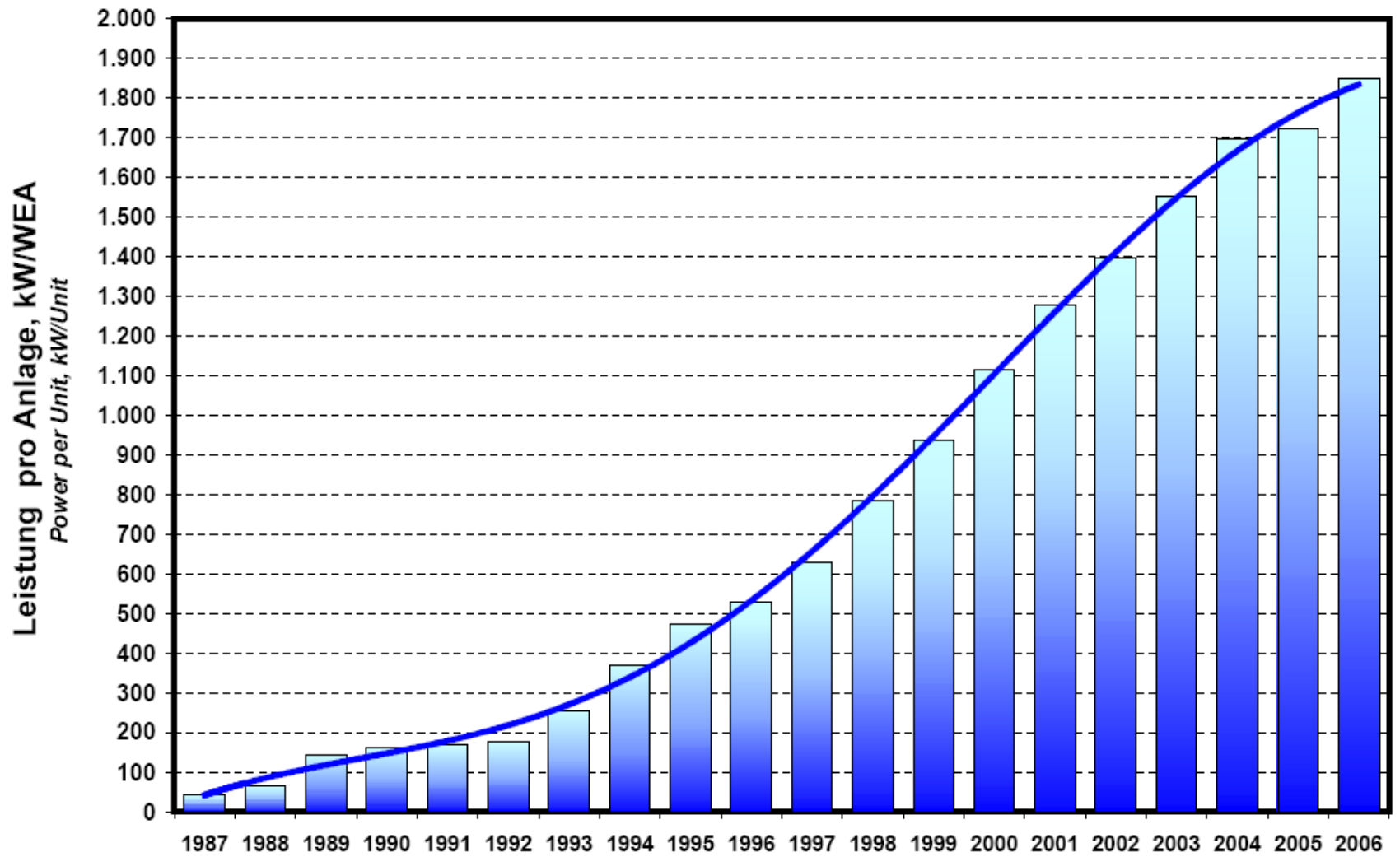
	Bundesland	Anteil am Netto- stromverbrauch %
1	Sachsen-Anhalt	37,51
2	Schleswig-Holstein	34,87
3	Mecklenburg-Vorpommern	33,37
4	Brandenburg	28,05
5	Niedersachsen	18,98

<b>Bundesland</b> <i>Federal State</i>	<b>Installierte Leistung bis 31.12.2006</b> <i>Installed Capacity until 31.12.2006</i> <b>MW</b>	<b>potenzieller Jah- resenergieertrag,</b> <i>Potential Annual Energy Yield</i> <b>GWh</b>	<b>Nettostromver- brauch 2006 *</b> <i>Energy Consump- tion 2006 *</i> <b>GWh</b>	<b>Anteil am Netto- stromverbrauch,</b> <i>Share on the Energy Consumption</i> <b>%</b>
<b>Sachsen-Anhalt</b>	2.533,01	5.097	13.587	37,51
<b>Schleswig-Holstein</b>	2.390,51	4.939	14.166	34,87
<b>Mecklenburg-Vorpommern</b>	1.233,20	2.257	6.762	33,37
<b>Brandenburg</b>	3.128,16	5.369	19.143	28,05
<b>Niedersachsen</b>	5.282,54	9.992	52.648	18,98
<b>Thüringen</b>	631,88	1.154	11.410	10,11
<b>Sachsen</b>	769,02	1.337	19.518	6,85
<b>Rheinland-Pfalz</b>	991,98	1.631	27.752	5,88
<b>Nordrhein-Westfalen</b>	2.392,26	4.214	135.525	3,11
<b>Bremen</b>	64,20	118	5.757	2,04
<b>Hessen</b>	449,66	708	38.764	1,83
<b>Saarland</b>	57,40	100	8.030	1,25
<b>Bayern</b>	339,18	475	77.631	0,61
<b>Baden-Württemberg</b>	325,18	363	80.357	0,45
<b>Hamburg</b>	33,68	59	15.051	0,39
<b>Berlin</b>	0,00	0	13.901	0,00
<b>gesamte Bundesrepublik</b> <i>Total Germany</i>	<b>20.621,86</b>	<b>37.812</b>	<b>540.000</b>	<b>7,00</b>



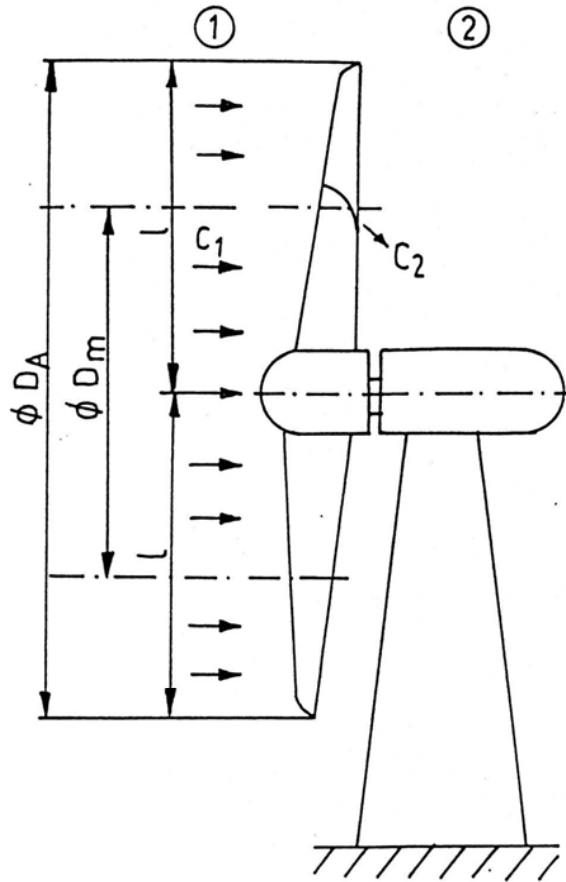






Die Energieumwandlung an einer Windkraftanlage kann vereinfacht durch die Bilanzen zwischen ① und ② ermittelt werden:

Wind – Energie

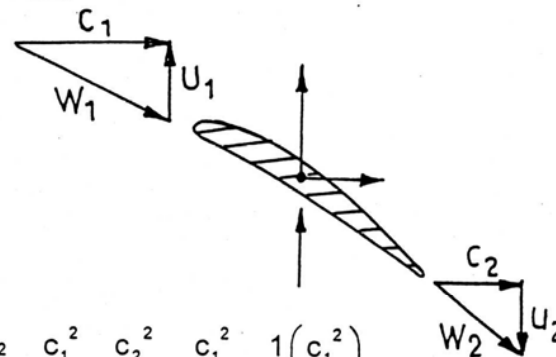


$$t_1 = t_2$$

$$z_1 = z_2$$

$$\frac{c_1^2}{2} = \frac{c_2^2}{2} + W/1^2$$

$$c_2 \approx \frac{1}{2} c_1 \text{ am Flügelende (Näherung)}$$



$$W/1^2 = \frac{c_1^2}{2} - \frac{c_2^2}{2} = \frac{c_1^2}{2} - \frac{1}{2} \left( \frac{c_1^2}{4} \right)$$

$$W/1^2 = \frac{3}{4} \cdot \frac{c_1}{2} \left[ \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} \hat{=} \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2} \cdot \frac{\text{m}}{\text{kg}} \hat{=} \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{kg}} \right]$$

# WEK (WEA)

## Die elektrische Leistung

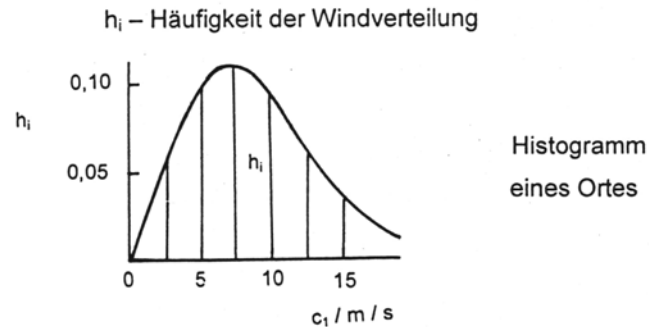
$$\begin{aligned} P_{el} &= \eta_{el} \cdot \dot{m} \cdot W /_1^2 \\ &= \eta_{el} \cdot A \cdot c_1 \cdot \rho \cdot \frac{3}{4} \cdot \frac{c_1^2}{2} \\ \underline{P_{el} &= \frac{3}{8} \cdot \eta_{el} \cdot A \cdot \rho \cdot c_1^3} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{m} &= \dot{V} \cdot \rho; & \dot{V} &= A \cdot c_1 \\ & & A &= \pi \cdot D_m \cdot l \\ \dot{m} &= A \cdot c_1 \cdot \rho \end{aligned}$$

# WEK (WEA)

Wichtig dabei ist die Kenntnis des möglichen Ertrages E

$$E = \sum_{i=1}^n h_i \cdot P_i \cdot \Delta\tau$$



$P_i$  - Leistung der Windkraftanlage

$\Delta_i$  - Nutzungszeit

Die Windkraftanlage arbeitet günstig im Bereich der Windgeschwindigkeiten

$$5 \leq c \leq 12 \quad / c \text{ [m/s]} /$$

Deutlich wird die starke Abhängigkeit von der lokalen Windintensität und Häufigkeit.

(Deshalb verlegt z.B. Dänemark die Standorte aufs Meer hinaus.)

# Bewertung von Kraftwerksprozessen

Technologie	Leistung	Wirkungsgrad		Stromkennzahl	Max. Vorlauf-temperatur °C
		Gesamt %	Elektrisch %		
<b>Heutige Systeme</b>					
Gas-Ottomotor-BHKW	< 50 kWe	80–90 <sup>1)</sup>	23–30	ca. 0,35	ca. 90
	50–500 kWe		30–34	0,5–0,6	
	500–2 000 kWe		32–37	0,6–0,7	
Diesel-BHKW	50–500 kWe	80–90 <sup>1)</sup>	35–40	0,75–0,8	ca. 90
	2–10 MWe		ca. 42	0,92–0,95	
Gasturbinen-HKW <sup>2)</sup>	1–3 MWe	80–85	20–23	0,5–0,6	100–450
	3–10 MWe		25–30	0,6–1,0	
	10–100 MWe		ca. 33		
Dampfturbinen-HKW Gegendruck	3–20 MWe	80–90	10–20	0,15–0,28	100–300
	20–100 MWe	80–90	20–30	0,23–0,45	
	100–300 MWe	80–90	30–35	0,4–0,6	
	Entnahmekondensation <sup>3)</sup>	100–300 MWe	80–90	30–35	
		(60–70)			
GuD-HKW Gegendruck	10–100 MWe	80–90	ca. 42	0,85–1,3	100–300 <sup>4)</sup>
	100–300 MWe	80–90	45–48	1,2–1,6	
	Entnahmekondensation <sup>3)</sup>	100–300 MWe	80–90	45–48	
		(60–70)			

# Bewertung von Kraftwerksprozessen

Neue Systeme					
Stirling-Motor-BHKW <sup>5)</sup>	10 kWe	ca. 85	30–35	0,55–0,7	ca. 90
Phosphorsaure Brennstoffzellen	0,2–1 MWe	ca. 85	40–45	0,9–1,3	ca. 150

Anmerkungen:

- Jahresnutzungsgrad der Anlagen ist i. d. R. etwas niedriger als der Wirkungsgrad;
- bei GuD-D, GT- und DT-Anlagen ist der Wirkungsgrad vom Temperaturniveau abhängig, hier wird ein kommunales Wärmenetz mit  $T_v = 70$  bis  $120$  °C angenommen;

1) ohne Brennwertnutzung, bei Brennwertnutzung erhöht sich der Gesamtwirkungsgrad auf ca. 90 bis 100 %;

2) ohne Zusatzfeuerung;

3) Daten gelten für max. Wärmeauskopplung, im Kondensationsbetrieb ist der elektrische Wirkungsgrad etwas höher, Werte in Klammern sind mittlere Jahreswerte;

4) bei Auskopplung nach der DT; bei Wärmeauskopplung nach GT können 400 bis 500 °C erreicht werden;

5) techn. Daten des Stirling-BHKW V 160 (als Kleinserie aufgelegt).

Quelle: Dienhardt, H., Nitsch, J.: Ökologische Bewertung der KWK. In: Energiewirtschaftliche Tagesfragen 45 (1995) 8



# Bewertung von Kraftwerksprozessen

Bewertung der gegenwärtig (Jahr 2000) und in den nächsten Jahrzehnten (Jahr 2015) effektiv einzusetzenden Kraftwerksprozesse

---

Es ist hierbei eine starke Differentierung zwischen

- (1) KW-Anlagen im Leistungsbereich 100 bis 5000 kW und
  - (2) Kraftwerksanlagen mit Leistungseinheiten von 100 über 500 bis 1000 MW
- aus technischen Gründen erforderlich.

(1) Kraftwerksanlagen  $P_{el}=100$  bis 5000 kW/Einheit.

# Bewertung von Kraftwerksprozessen

Prozeß	$\eta_{\text{netto}}$ – elektr. Wirkungs- grad	Techn. Reife im Jahr	
		2000	2015
Dampfkraftwerk	$\eta_{\text{netto}} \leq (0,2 \dots 0,25)$ wegen niedriger Frisch- dampf und hoher Konden- sationsparameter	Serienanlagen	Serienanlagen
• <u>Blockheizkraftwerk</u>	<u><math>\eta_{\text{netto}} \geq (0,25 - 0,35)</math></u>	<u>Serienanlagen</u>	<u>Serienanlagen</u>
• Dampfkraftwerk	$\eta_{\text{netto}} = (0,15 - 0,25)$	Serienanlagen	Serienanlagen
• Motoren	$\eta_{\text{netto}} \geq (0,25 - 0,35)$	Serienanlagen	Serienanlagen
• Gasturbinen	$\eta_{\text{netto}} = (0,2 - 0,22)$	Serienanlagen	Serienanlagen
• GuD	$\eta_{\text{netto}} = (0,22 - 0,32)$	Serienanlagen	Serienanlagen
• Brennstoffzelle	$\eta_{\text{netto}} = (0,4 - 0,55)$	Demoanlagen	Serienanlagen

# Bewertung von Kraftwerksprozessen

(2) Kraftwerksanlagen  $P_{el} = 100$  bis 500 bis 1000 MW/Einheit

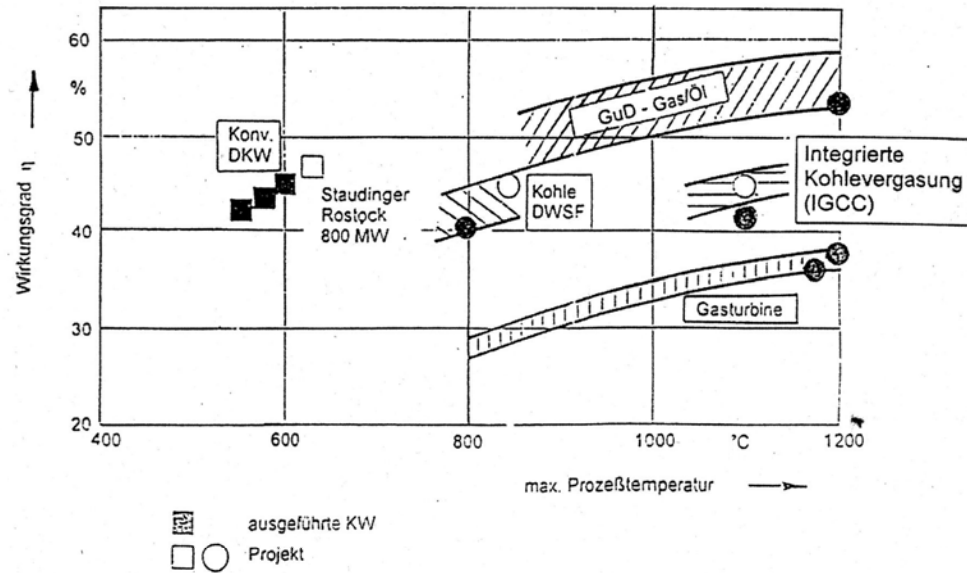
Prozeß	$\eta_{\text{netto}}$ – elektr. Wirkungsgrad	Technische Reife im Jahr	
		2000	2015
Dampfkraftwerk mit Kohle	$\eta_{\text{netto}} = 0,45$ bis $0,48$ $320 \text{ bar}/620^\circ\text{C} / \frac{620^\circ\text{C}}{650^\circ\text{C}} / 0,004 \text{ MPa}$	Prototypen > 500 MW	Serie > 500 MW
Druckwirbelschichtfeuerung mit Kohle	$\eta_{\text{netto}} = 0,40$ bis $0,45$ $\eta_{\text{netto}} = 0,5$ bei Teilvergasung ( $q_{\text{TET}} > 1100^\circ\text{C}$ )	100 MW Prototyp $0,40 - 0,45$	100 MW/350MW Serie $0,50$
IGCC mit Kohle	$\eta_{\text{netto}} \geq 0,40$ bis $0,45$ $\geq 0,50$	$0,4 - 0,45$ Prototyp	$\geq 0,50$ ( $T \geq 1200^\circ\text{C}$ )  Prototyp
Gasturbinenkraftwerk (Erdgas, Heizöl)	$\pi \geq 30$ ; $T_{\text{ET}} \geq 1200 - 1400^\circ\text{C}$ $\eta_{\text{netto}} = 0,38 - 0,42$	$0,38 - 0,42$ Serie	$0,45$ Serie
GuD (Erdgas, Heizöl)	Parameter von Gasturbinen- und Dampfkraftwerk wie oben!	$0,55 \dots 0,58$ Serie	$0,60 - 0,62$ Serie

# Bewertung von Kraftwerksprozessen

Die Prognose – Zeitraum 2015 – geht von einer kontinuierlichen Entwicklung der

- Thermodynamik der Prozesse
- Werkstoff- und Bauteiltechnik
- Lebensdauer und Zuverlässigkeit

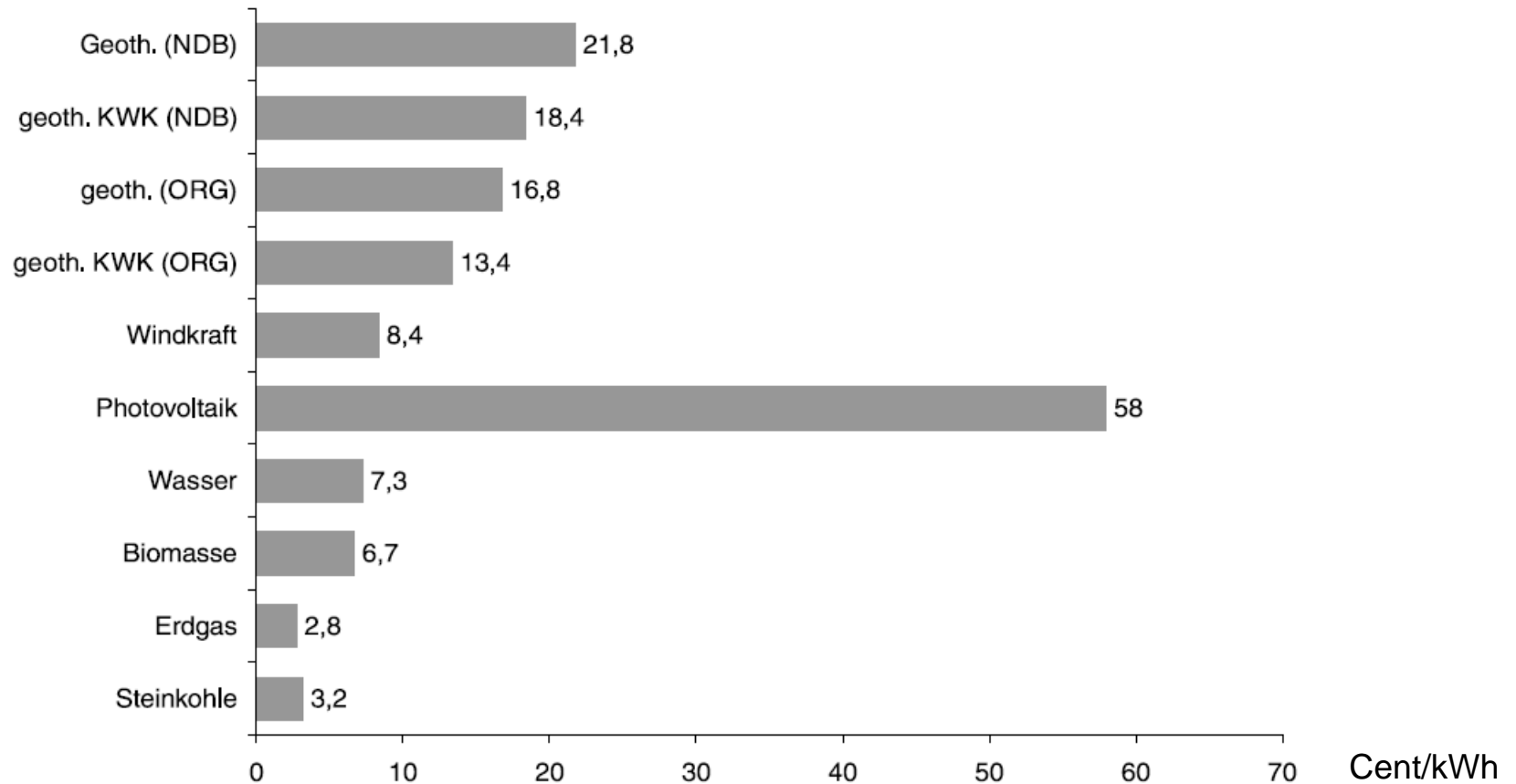
bei „sauberer“ Verbrennung aus.



Wirkungsgrade verschiedener Kraftwerksprozesse im Jahr 2000/2005

# Bewertung von Kraftwerksprozessen

Gestehungskosten einer Stromerzeugung aus regenerativen Energien, Erdgas, Steinkohle

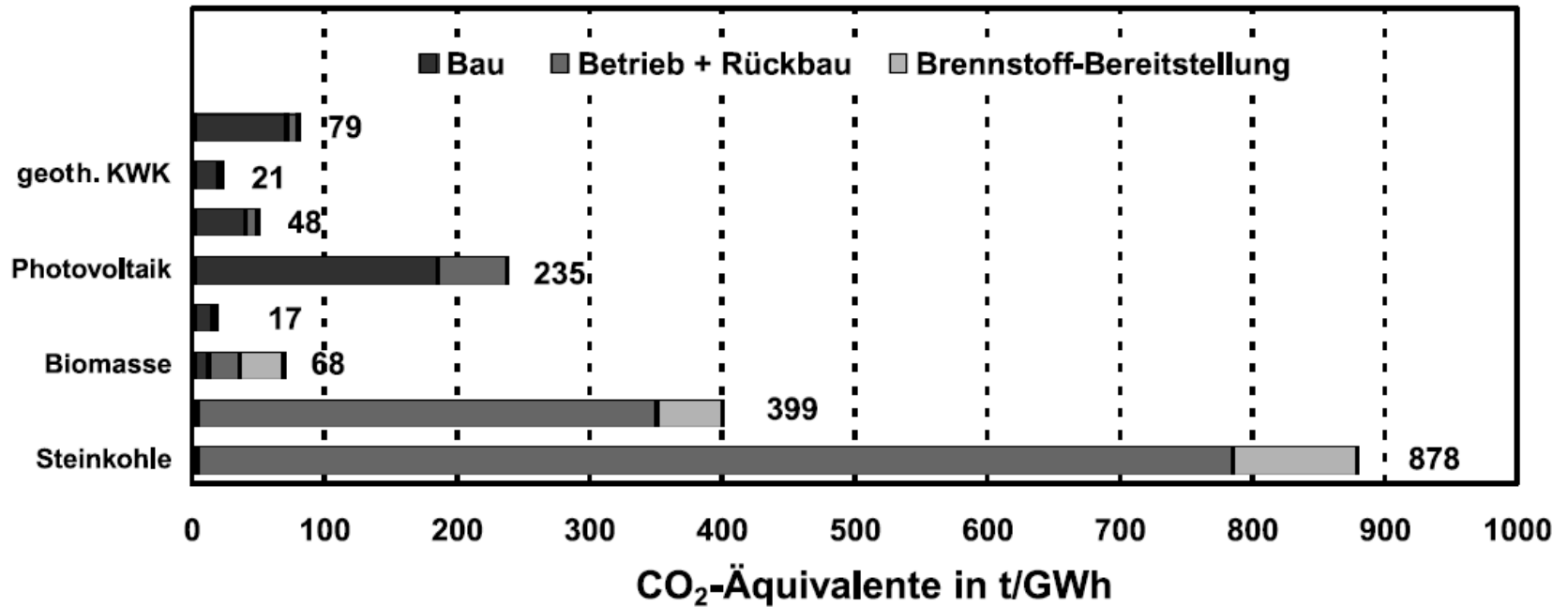


NDB = Norddeutsches Becken; ORG = Oberrheingraben

Quelle: Kaltschmitt et al. 2002a

# Bewertung von Kraftwerksprozessen

CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emissionen der untersuchten Stromerzeugungsoptionen und deren Aufteilung auf Bau, Betrieb und Rückbau sowie Brennstoff-Bereitstellung



Quelle: Kaltschmitt

# Bewertung von Kraftwerksprozessen

		<i>Geothermie- kraftwerke</i>	<i>Braunkohle- kraftwerke</i>
Leistung	MW	10	800
Anzahl	Stück	350	4,375
spez. Investitionskosten	Mio. Euro/MW	6,75	1,2
spez. Betriebskosten	Mio. Euro/TWh	14	15,45
Stromgestehungskosten	Euro/kWh	0,06	0,025
Primärenergieverbrauch	GJ/GWh <sub>e1</sub>	775	10.761
CO <sub>2</sub> -Äquivalente	t/GWh <sub>e1</sub>	59	1.199
SO <sub>2</sub> -Äquivalente	kg/GWh <sub>e1</sub>	324	4.320
Schwefeldioxid	kg/GWh <sub>e1</sub>	89	477
Stickstoffoxide	kg/GWh <sub>e1</sub>	271	869

Abschätzungen der (spezifischen) Kosten und Emissionen für den Fall einer geothermischen Stromerzeugung in Höhe von 5 % der Bruttostromerzeugung Deutschlands zur Substitution von Grundlaststrom aus Braunkohlekraftwerken