

KAPITEL: KRAFT-WÄRME-KOPPLUNG TECHNOLOGIEN

PROF. MARIO ADAM



Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung – Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International Lizenz. Ausgenommen von der Lizenz sind die verwendeten Logos sowie alle anders gekennzeichneten Elemente. <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.de>

Ein Kooperationsvorhaben empfohlen durch die:



INNOVATION DURCH KOOPERATION

Gefördert durch:

Ministerium für
Kultur und Wissenschaft
des Landes Nordrhein-Westfalen



a d a m



Erneuerbare Energien und Effizienztechnologien

Prof. Dr.-Ing. Mario Adam

E² - Erneuerbare Energien und Energieeffizienz
ZIES - Zentrum für Innovative Energiesysteme

Hochschule Düsseldorf
Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik

Kapitel „Kraft-Wärme-Kopplung“

Technologien

Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)

Gleichzeitige Produktion von Strom (bzw. Kraft) und Wärme

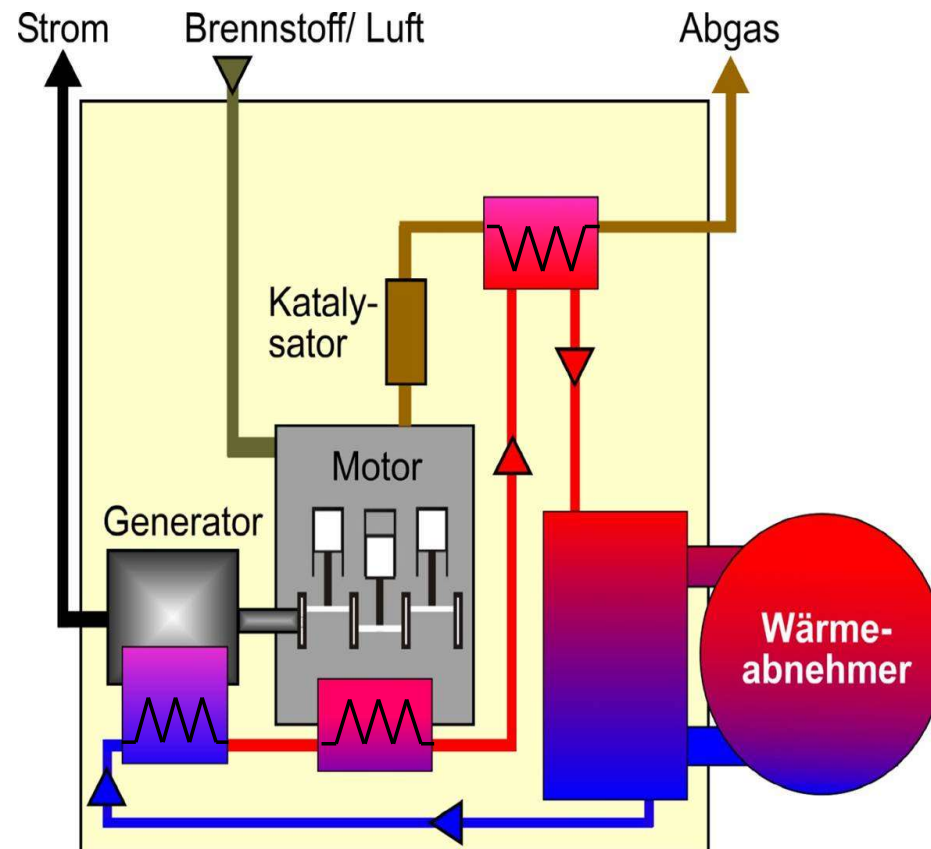
Eingesetzte Technologien

- Blockheizkraftwerke (BHKW)
 - Hubkolbenmotoren
 - Stirlingmotoren
 - Brennstoffzellen
- Turbinen
 - Gasturbinen
 - Dampfturbinen bzw. klassische Dampfkraftprozesse zur Stromerzeugung + Wärmeauskopplung

Gesamtwirkungsgrade

- thermisch + elektrisch bis 100%

Beispiel: BHKW mit Hubkolbenmotor



BHKW - Hubkolbenmotor

Eigenschaften

- bewährte BHKW-Standardtechnik!
- viele Hersteller, viele Leistungsstufen (von kW bis MW)
- $\eta_{\text{elektrisch}} = 25 \dots 50\%$
- Nutzwärmetemperatur = $80 \dots 130^\circ\text{C}$

Gerätebeispiele

- klein: „Dachs“, Fa. SenerTec
 - $5,5 \text{ kW}_{\text{el}}$, $14,8 \text{ kW}_{\text{th}}$
 $\eta_{\text{el}} = 27 \%$, $\eta_{\text{th}} = 73 \%$ (mit Brennwert-WÜ)
 - Erdgas-Ottomotor oder Diesel-Motor
- groß: TCG 2032 V16, Fa. MWM
 - $4,3 \text{ MW}_{\text{el}}$, $3,7 \text{ MW}_{\text{th}}$
 - $\eta_{\text{el}} = 44,1 \%$, $\eta_{\text{th}} = 42,7 \%$
 - L x B x H: $9,2 \text{ m} \times 2,8 \text{ m} \times 3,4 \text{ m}$

**Micro-BHKW „Dachs“
Fa. Senertec**



800 l
Puffer-
speicher
mit
Frisch-
wasser-
station

**Groß-BHKW TCG 2032
V16, Fa. MWM**

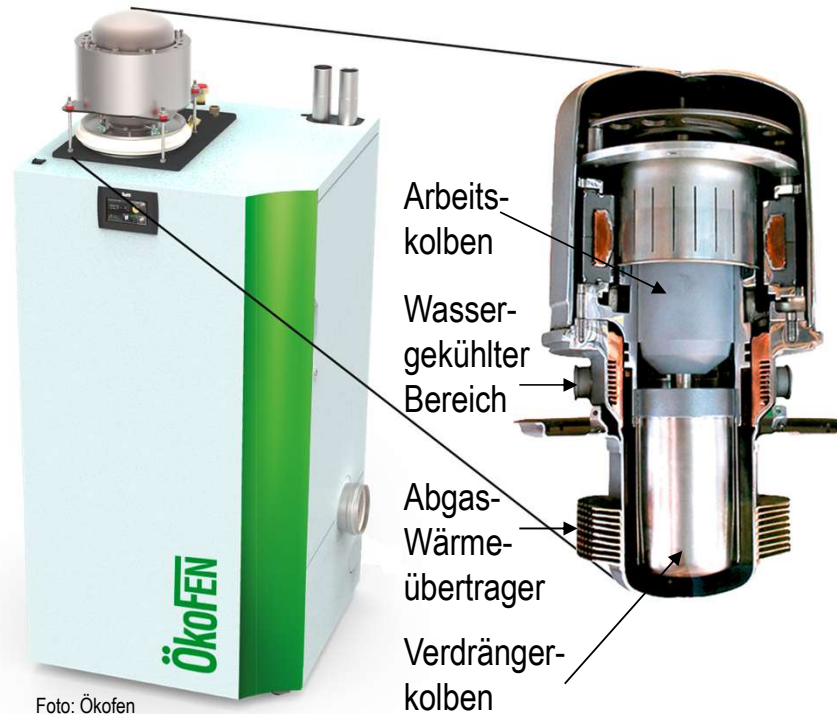


Foto: Caterpillar Energy
Solutions, CC BYNC-ND 2.0

BHKW - Stirling-Motor

Funktionsprinzip und Eigenschaften

- Damit ein Stirling-Motor läuft, muss er an einer Stelle des geschlossenen Kreisprozesses beheizt und an einer anderen Stelle gekühlt werden (über Wärmeübertrager).
- Beheizung: durch Abgas einer stationären externen Verbrennung
- Kühlung: durch Abfuhr von Wärme z.B. an Heizungswasser
- $\eta_{\text{elektrisch}}$ nur 10 - 20 %



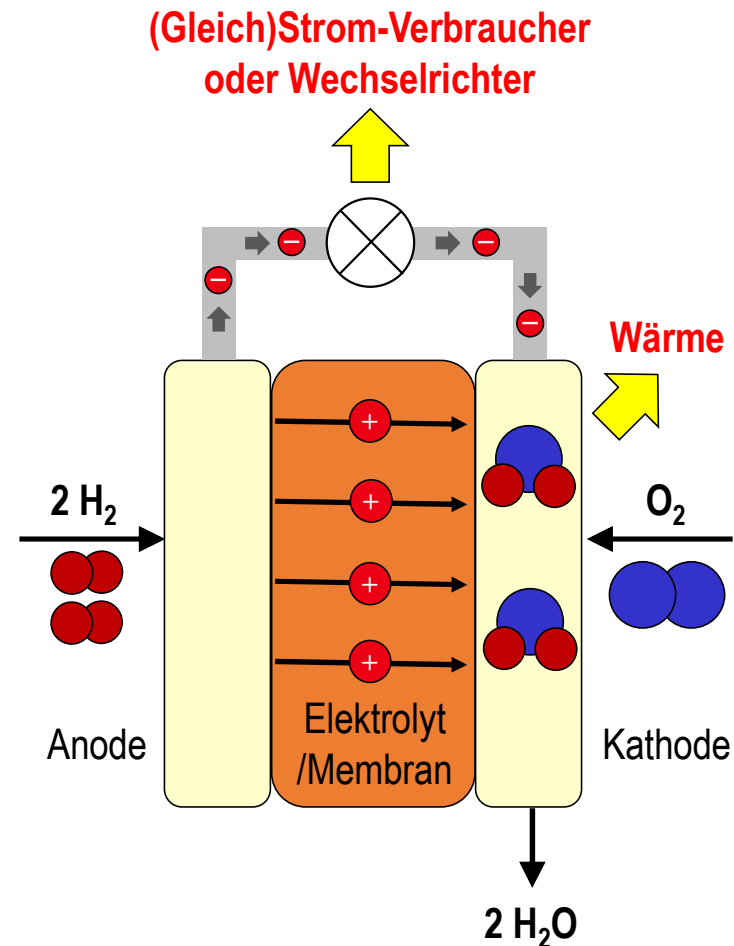
Motor der Microgen Engine Corporation

- von mehreren Herstellern für „Stromerzeugende Heizungen“ genutzt z.B. mit Holzpellets (Fa. Ökofen); wenige Produkte am Markt
- ca. 0,5 ... 1 kW_{el} ($\eta_{\text{el}} = 15 \%$), ca. 3 ... 6 kW_{th}

BHKW - Brennstoffzelle

Funktionsprinzip und Eigenschaften

- „kontrollierte“ Reaktion von H_2 und O_2 zu H_2O („kalte Verbrennung“)
- Wichtige Brennstoffzellentypen
 - PEM-Brennstoffzelle: mit Protonen leitender Membran, ca. 80°C Betriebstemperatur, direkt mit H_2 betrieben oder vorgeschaltete CH_4 -Reformierung, gut regelbar
 - SOFC: Oxidkeramische Brennstoffzelle, Betriebstemperatur ca. 500°C , interne Methan-Reformierung, verträgt häufiges An-/Abfahren nicht so gut
- Vorteile: großes $\eta_{\text{elektrisch}}$ (35 ... 60 %), Leistung modular skalierbar von W ... MW
- Nachteile: geringe Lebensdauer des Brennstoffzellen-Stacks, hohe Kosten, Wasserstoff-Erzeugung aus Erdgas
- volatiler, aufstrebender Markt



Gasturbine

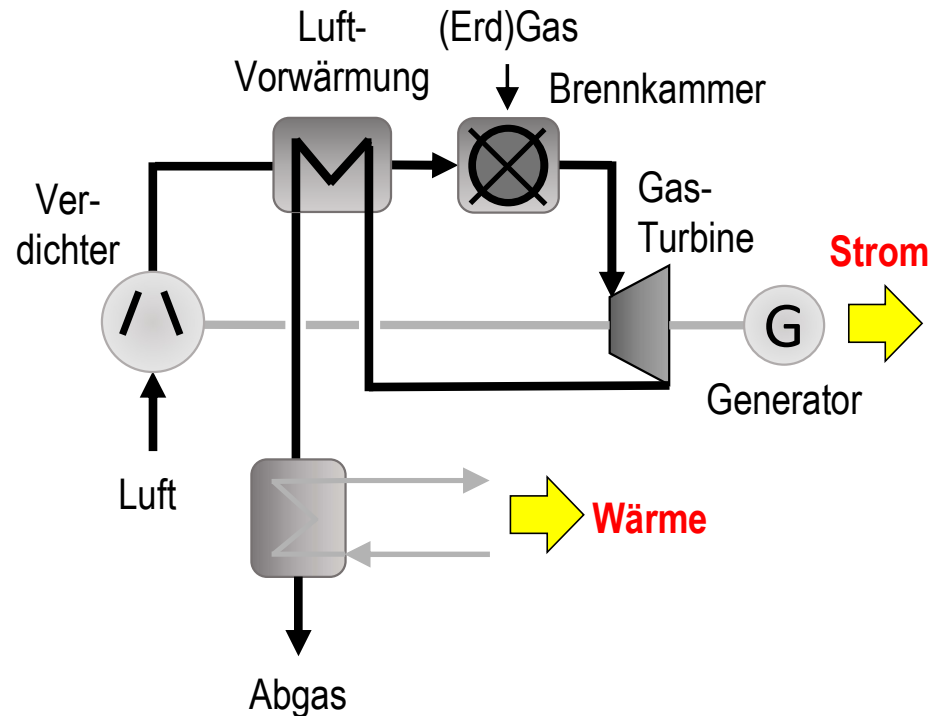
Eigenschaften

- bewährte Technik
- mehrere Hersteller
- viele Leistungsstufen
(von rd. 50 kW - 500 MW)
- auch Hochtemperatur-
Wärme bis 500°C lieferbar
- kompakt gebaute Aggregate
mit hoher Leistungsdichte

Gerätebeispiele

- klein: Mikrogasturbine
Capstone C50
 - 50 kW_{el}
 - $\eta_{el} = 26\%$
- groß: Siemens SGT5-8000H
 - 450 MW_{el}
 - $\eta_{el} = 41\%$

Funktionsprinzip



Dampfturbine in (GuD-) Heizkraftwerk

Eigenschaften

- bewährte Technik
- große Leistungen

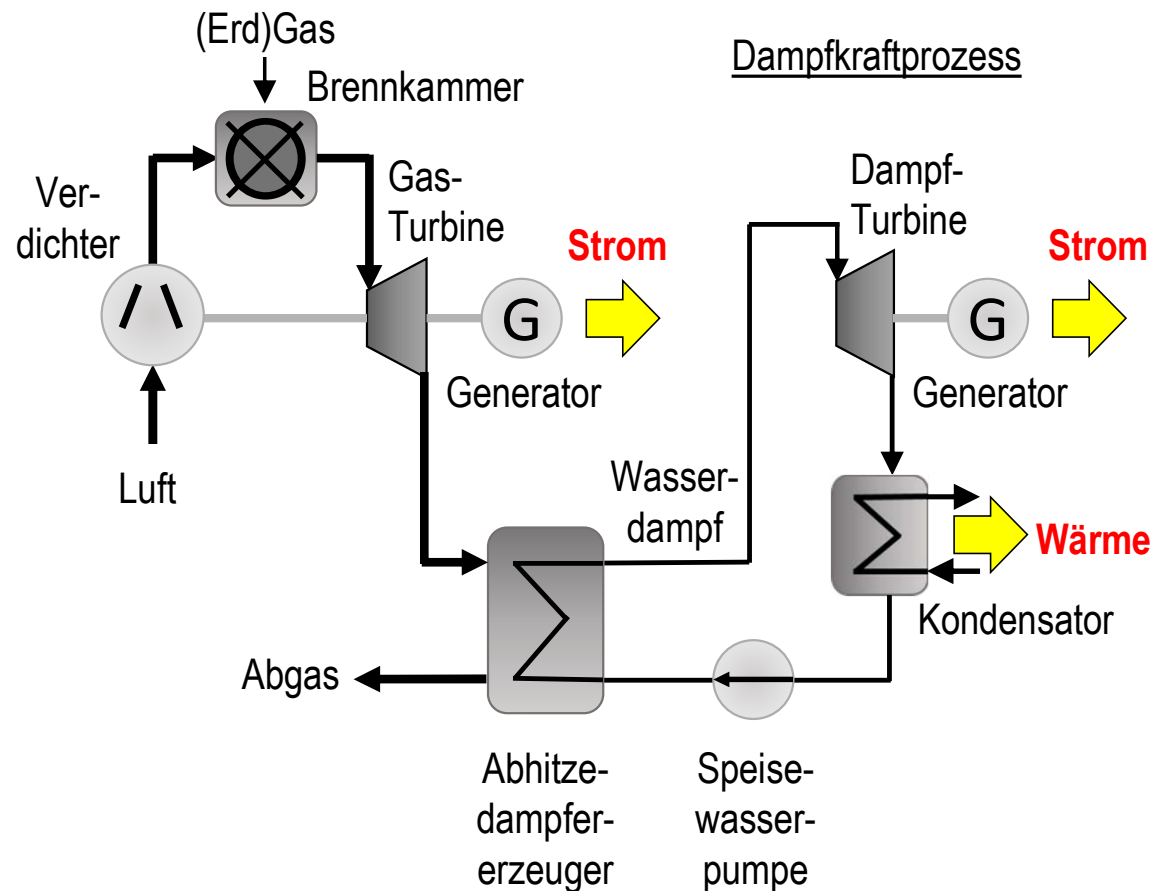
Dampfturbine in Heizkraftwerk

- konventioneller Dampfkraftprozess
- beheizt durch Verbrennung von Kohle, Müll, Biomasse, Erdgas etc.

GuD-Heizkraftwerk

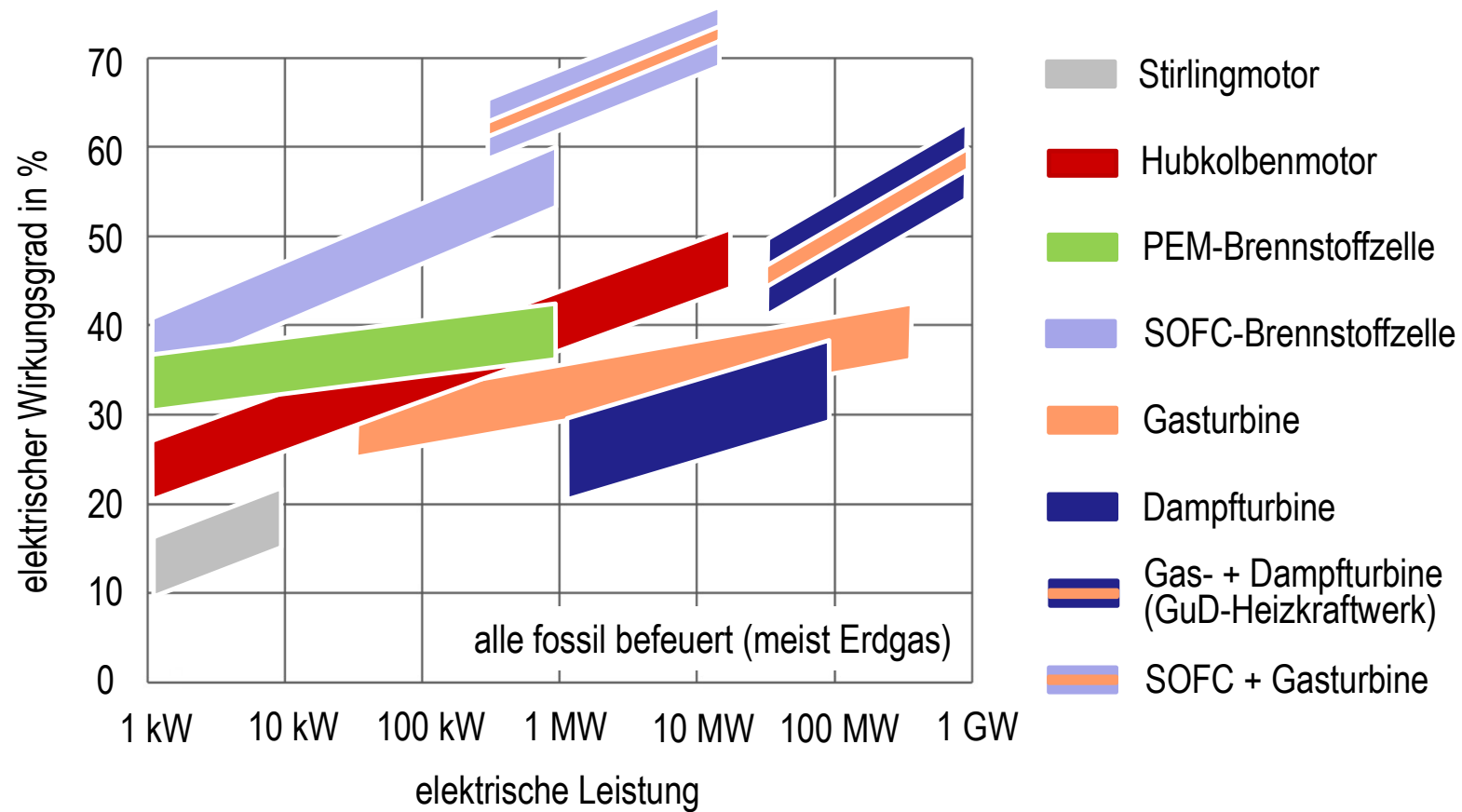
- Dampfkraftprozess, beheizt vom Abgas einer vorgeschalteten Gasturbine
- $\eta_{\text{elektrisch}}$ bis über 60%

Funktionsprinzip GuD-Heizkraftwerk



KWK-Technologien - Überblick

- elektrischer Wirkungsgrad: gerätespezifisch, steigt mit der Geräte-Nennleistung
- elektrischer + thermischer Wirkungsgrad = 80 ... 90% (100% bei Brennwertnutzung)



KAPITEL: KRAFT-WÄRME-KOPPLUNG

ÖKOLOGISCHE BEWERTUNG: ENERGIEEFFIZIENZ, PRIMÄRENERGIEFAKTOR PROF. MARIO ADAM



Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung – Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International Lizenz. Ausgenommen von der Lizenz sind die verwendeten Logos sowie alle anders gekennzeichneten Elemente. <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.de>

Ein Kooperationsvorhaben empfohlen durch die:



INNOVATION DURCH KOOPERATION

Gefördert durch:

Ministerium für
Kultur und Wissenschaft
des Landes Nordrhein-Westfalen



a d a m

Erneuerbare Energien und Effizienztechnologien



Prof. Dr.-Ing. Mario Adam

E² - Erneuerbare Energien und Energieeffizienz
ZIES - Zentrum für Innovative Energiesysteme

Hochschule Düsseldorf
Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik

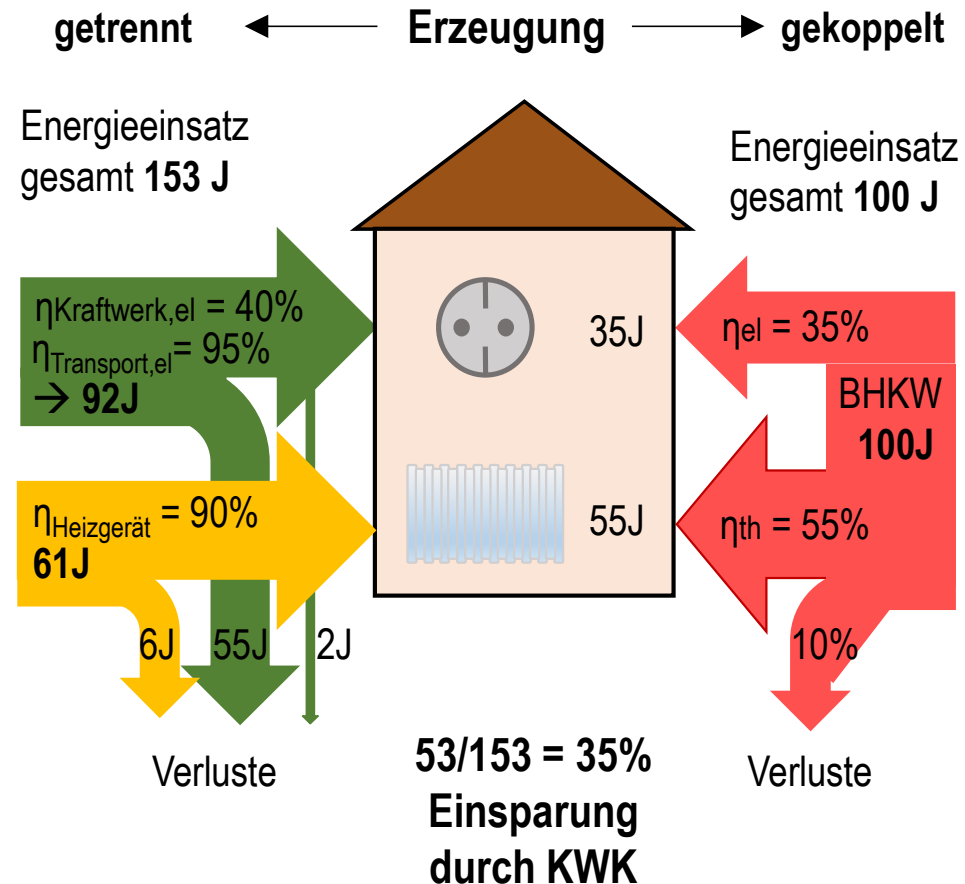
Kapitel „Kraft-Wärme-Kopplung“

Ökologische Bewertung: Energieeffizienz, Primärenergiefaktor

KWK - Endenergieeinsparung

Endenergieeinsparung im Vergleich zur getrennten Strom/Wärme-Erzeugung

- Beispiel Bild → **35%** Einsparung
- abhängig von angesetzten Geräte-Wirkungsgraden
- Vergleich Stirling-BHKW ($\eta_{el} = 15\%$, $\eta_{th} = 85\%$) mit Gas-GuD-Kraftwerk ($\eta_{el} = 60\%$) und Brennwert-Kessel ($\eta_{th} = 100\%$) → **10%** Einsparung
- Vergleich großes Hubkolben-BHKW ($\eta_{el} = 45\%$, $\eta_{th} = 42\%$) mit altem Kohle-Kraftwerk ($\eta_{el} = 35\%$) und NT-Kessel ($\eta_{th} = 80\%$) → **45%** Einsparung
- weiterer BHKW-Vorteil: verbrauchsnahe Stromerzeugung → geringe Stromnetzbelastung



KWK - Primärenergiefaktor f_p der Wärme (I)

Berechnung nach aktueller Norm (GEG bzw. DIN 18599 Anlage 4)

$$f_{p,KWK,Wärme} = \frac{PE_{KWK} - PE_{KWK,Stromgutschrift}}{Q_{KWK,Wärme}}$$

mit

- $Q_{KWK,Wärme}$: in der KWK-Anlage produzierte Wärme
- PE_{KWK} : in der KWK-Anlage eingesetzte Primärenergie, z.B. Erdgasverbrauch * 1,1 mit $f_{p,Erdgas} = 1,1$
- $PE_{KWK,Stromgutschrift}$: Primärenergie-Gutschrift für den von der KWK-Anlage produzierten Strom
= KWK-Stromproduktion * 2,8
mit $f_{p,KWK,Stromgutschrift} = 2,8$,
begründet durch Verdrängung von **Kohlestrom** in Mittel- und Spitzenlast

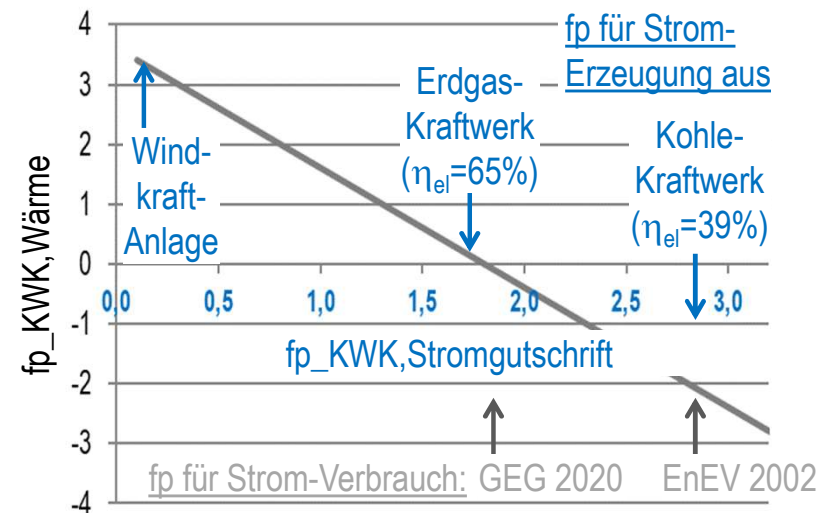
Beispiel

Erdgas-GuD-Kraftwerk in Düsseldorf
600 MW_{el}, 300 MW_{th}, $\eta_{el} = 61\%$

$$f_{p,KWK,Wärme} = [(600/0,61)*1,1 - 600*2,8] / 300 = -1,99$$

→ $f_p = 0,0$ (f_p -Werte < 0 sind nicht erlaubt)

$f_{p,KWK,Wärme}$ in Abhängigkeit von $f_{p,KWK,Stromgutschrift}$



KWK - Primärenergiefaktor f_p der Wärme (II)

Berechnung nach Carnot-Methode

(„Exergie-Allokation“ nach
DIN EN 15316-4-5:2017-09)

$$f_{p,KWK,Wärme} = Q_{\text{Brennstoff für Wärme}} \cdot f_{p,Brennstoff}$$

$$Q_{\text{Brennstoff für Wärme}} = \frac{\text{Exergie(Wärme)}}{\text{Exergie(Wärme)} + \text{Exergie(Strom)}}$$

mit

- $\text{Exergie(Wärme)} = \text{Wärmemenge/-leistung} \cdot \eta_{\text{Carnot}}$

$$\eta_{\text{Carnot}} = \frac{\text{Temperatur der Wärme} - \text{Umgebungstemperatur}}{\text{Temperatur der Wärme}}$$

(Temperaturen in Kelvin, d.h. T in °C + 273,15 K;
Exergie der Wärme steigt mit Temperatur der Wärme!)

- $\text{Exergie(Strom)} = \text{Strommenge/-leistung}$

(Strom = 100% Exergie)

Beispiel

Erdgas-GuD-Kraftwerk in Düsseldorf
600 MW_{el}, 300 MW_{th}, $\eta_{\text{el}} = 61\%$
(Fernwärmetemperatur = 100°C)

$$f_{p,KWK,Wärme} = 0,118 \cdot 1,1 = \mathbf{0,13}$$

mit

$$f_{p,Erdgas} = 1,1$$

$$Q_{\text{Brennstoff für Wärme}} = \frac{80,4 \text{ MW}}{80,4 \text{ MW} + 600 \text{ MW}} = 0,118$$

$$\begin{aligned} \text{Exergie(Wärme)} &= 300 \text{ MW} \cdot 0,268 \\ &= 80,4 \text{ MW} \end{aligned}$$

$$\eta_{\text{Carnot}} = \frac{373 \text{ K} - 273 \text{ K}}{373 \text{ K}} = 0,268$$

$$\text{Exergie(Strom)} = 600 \text{ MW}$$

KAPITEL: KRAFT-WÄRME-KOPPLUNG
**BEITRIEBSARTEN, GERÄTEDIMENSIONIERUNG,
WIRTSCHAFTLICHKEIT**
PROF. MARIO ADAM



Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung – Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International Lizenz. Ausgenommen von der Lizenz sind die verwendeten Logos sowie alle anders gekennzeichneten Elemente. <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.de>

Ein Kooperationsvorhaben empfohlen durch die:



INNOVATION DURCH KOOPERATION

Gefördert durch:

Ministerium für
Kultur und Wissenschaft
des Landes Nordrhein-Westfalen



a d a m



Erneuerbare Energien und Effizienztechnologien

Prof. Dr.-Ing. Mario Adam

E² - Erneuerbare Energien und Energieeffizienz
ZIES - Zentrum für Innovative Energiesysteme

Hochschule Düsseldorf
Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik

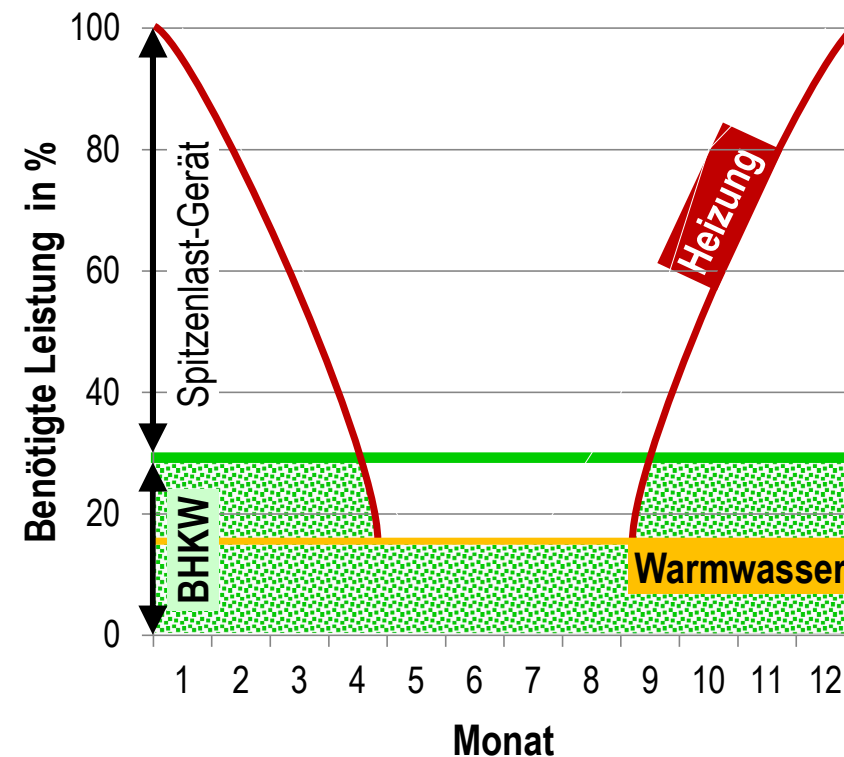
Kapitel „Kraft-Wärme-Kopplung“

Betriebsarten, Gerätedimensionierung, Wirtschaftlichkeit

KWK - Wärmegeführter Betrieb (I)

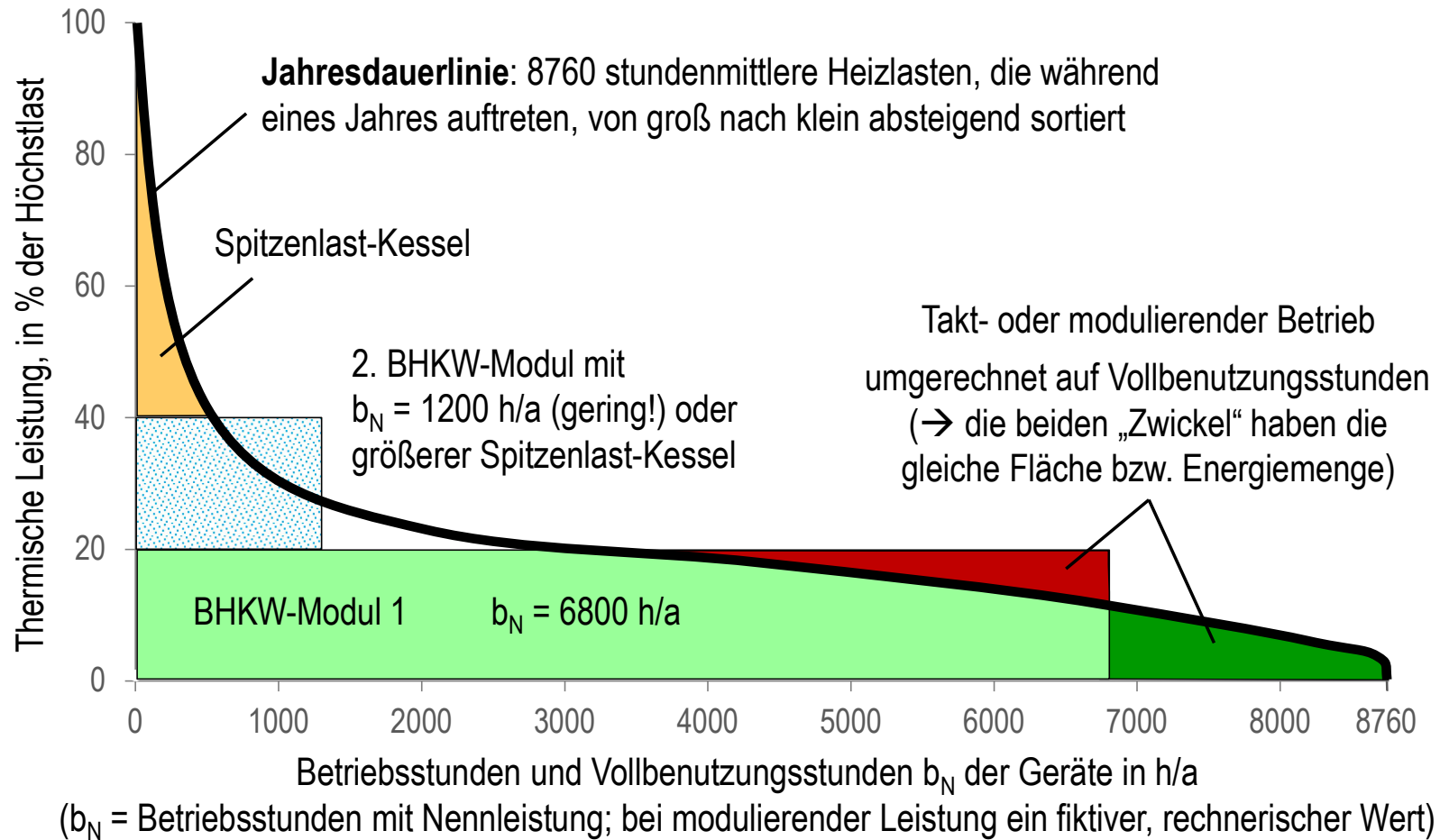
- Betrieb nur bei Wärmebedarf
(= Standardbetriebsweise)
- Auslegung auf Wärmegrundlast
 - lange BHKW-Laufzeit (>4500 h/a)
 - gute Wirtschaftlichkeit
 - typische BHKW-Leistung (thermisch) bezogen auf Wärme-Spitzenlast gesamt (= 100%):
 - 10 - 30 % bei Wohngebäuden
 - 15 - 40 % bei Nah-/Fernwärmenetzen, Hallenbädern, Krankenhäusern, ggf. Industriebetrieben
 - umso höher, je höher der Anteil des ganzjährigen Wärmebedarfs (+ zeitgleicher Strombedarf)
- gleichzeitig produzierter Strom wird selbst genutzt, überschüssiger ins Stromnetz eingespeist und verkauft (Verkaufspreis < Stromeinkaufspreis)

Jahresverlauf des Wärmebedarfs
für Raumheizung und Warmwasser
→ BHKW-Auslegung auf Grundlast



KWK - Wärmegeführter Betrieb (II)

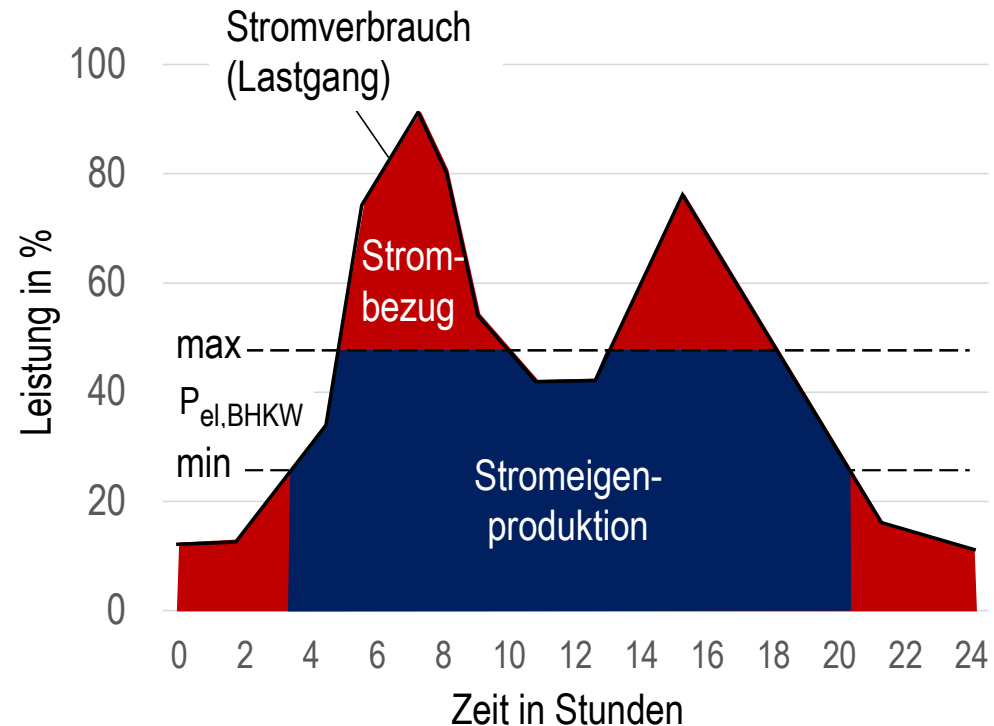
Beispielhafte KWK-Auslegung im Jahresdauerlinien-Diagramm



KWK - Stromgeführter Betrieb

- Betrieb in Abhängigkeit des eigenen Strombedarfs oder der erzielbaren Einspeiseerlöse
- nutzbare Vorteile
 - Reduktion teurer Strom-Spitzenlast beim Strombezug (→ Leistungspreis bei Großkunden)
 - Verkauf des Stroms zu Zeiten hoher Börsenpreise
 - vergütete Bereitstellung positiver Regelleistung zur Stromnetzstabilisierung (viele kleine BHKW als „Schwarmkraftwerk“)
- ggf. vorhandener Nachteil: kein gleichzeitiger Wärmebedarf → Wärme „wegwerfen“ oder speichern (wenn möglich)

Beispielhafter Zeitverlauf für stromgeführten Betrieb eines BHKW zur Reduktion von Stromspitzenlasten



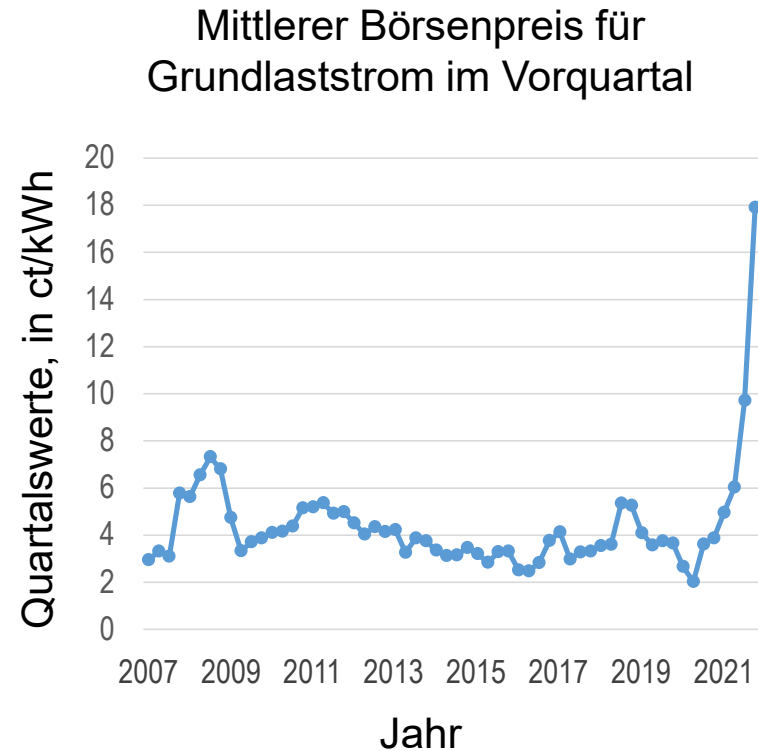
KWK - Brennstoffgeführter Betrieb

- Betrieb bei Vorhandensein von Brennstoff (und auf die Menge an Brennstoff ausgelegt)
- Typisches Beispiel
 - Nutzung von Biogas aus einer Biogasanlage zur Stromerzeugung mit einem BHKW
 - Nachteil: oft kein ausreichender Wärmebedarf an (ländlichen) Standorten von Biogasanlagen → häufig Abfuhr eines Großteils der Wärme an die Außenluft



Wirtschaftlichkeit von KWK - Weitere Einflussfaktoren

- KWK-Gesetz regelt vieles, aber nicht alles
- „Erlöse“ für den produzierten Strom
 - Stromeigennutzung
 - 15 ... 30 ct/kWh (Stromeinkaufspreis)
 - teils anteilige Zahlung von EEG-Umlage für selbst verbrauchten Strom
 - Stromeinspeisung
 - vermiedene Netzkosten (ca. 1 ct/kWh)
 - mittlerer Börsenpreis für Grundlaststrom im Vorquartal, volatil (siehe Bild)
 - bis zu 8 ct/kWh Förderung für 30.000 bzw. 60.000 Vollbenutzungsstunden
 - unattraktiver als Eigennutzung (i.d.R.)
- weitere Aspekte
 - Rückerstattung der Energiesteuer für den Brennstoff, z.B. 0,55 ct/kWh Erdgas (Ho)
 - BAFA-Zuschüsse für Mikro-BHKW



Quelle: BHKW Infozentrum

ORCA.nrw

Technology
Arts Sciences
TH Köln

RUHR
UNIVERSITÄT
BOCHUM

RUB



Hochschule
Bonn-Rhein-Sieg

Hochschule Düsseldorf
University of Applied Sciences
HSD

ISEA

Stromrichter-
technik und
Elektrische
Antriebe

RWTH AACHEN
UNIVERSITY

FH AACHEN
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Ein Kooperationsvorhaben empfohlen durch die:



INNOVATION DURCH KOOPERATION

Gefördert durch:

Ministerium für
Kultur und Wissenschaft
des Landes Nordrhein-Westfalen



Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung – Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International Lizenz. Ausgenommen von der Lizenz sind die verwendeten Logos sowie alle anders gekennzeichneten Elemente. <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.de>

a d a m