

Betrieb und Instandhaltung von Energieanlagen

Wirkungsgrad und Verfügbarkeit

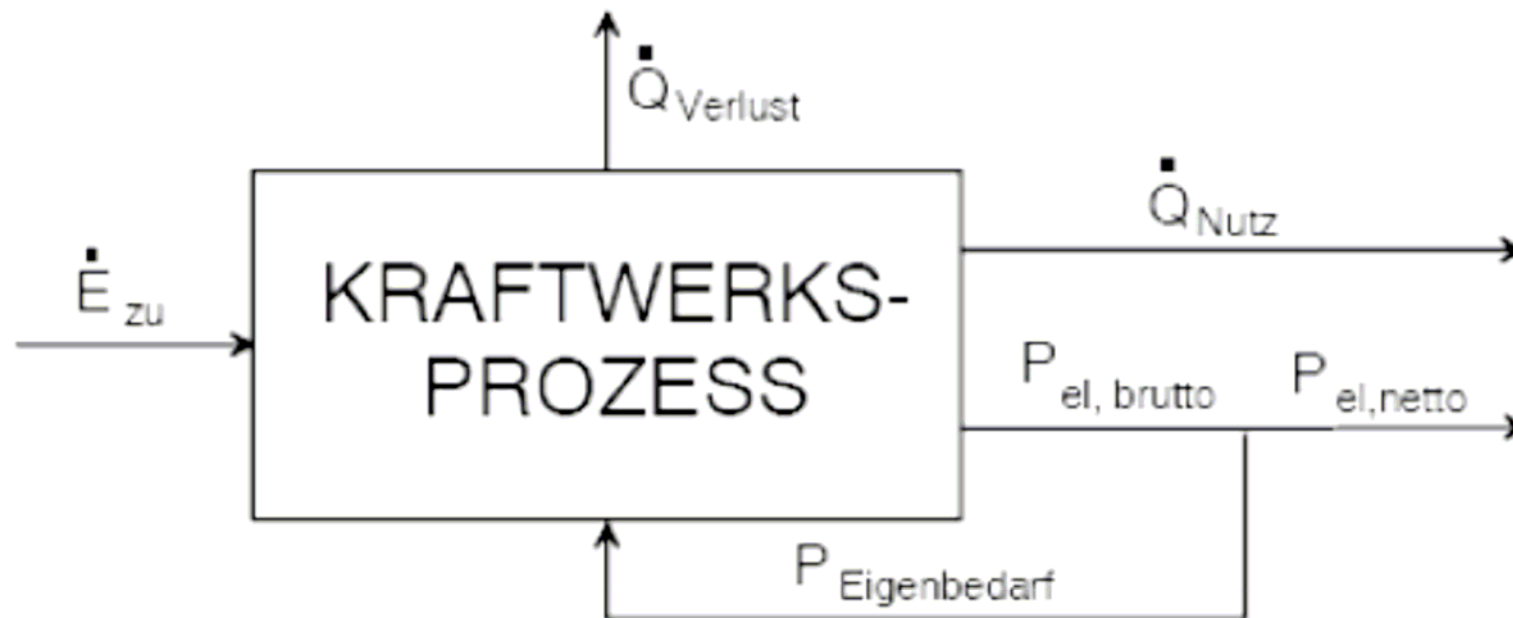
- Wirkungsgrad -

Im Allgemeinen gibt der Wirkungsgrad (griechischer Buchstabe Eta) das Verhältnis zwischen Aufwand und dem letztlich gewonnenen Nutzen an. Meistens wird der Leistungswirkungsgrad verwendet. Er ist das Verhältnis zwischen abgeführter Leistung P_{ab} zu zugeführter Leistung P_{zu} .

$$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}}$$

Da die Nutzenergie immer kleiner ist als die aufgewendete Energie, liegt der Wirkungsgrad zwischen 0 % und 100 %.

Bilanzierung der Energieumwandlung am Beispiel eines thermischen Kraftwerkes



Wirkungsgraddefinitionen für Dampfkraftwerke (1)

		Kondensations- kraftwerk (KW)	Heizkraftwerk (HKW)
thermischer Wirkungsgrad des verlustlosen Kreisprozesses	$\eta_{th, is}$	$\frac{P_{is}}{\dot{Q}_{zu}}$	$\frac{P_{is} + \dot{Q}_H}{\dot{Q}_{zu}}$
Vergleichsgütegrad der Expansion, meistens als innerer oder isentropen Turbinenwirkungs- grad bezeichnet	$\eta_{T, is}$	$\frac{P}{P_{is}}$	
thermischer Wirkungsgrad des Kreisprozesses	η_{th}	$\frac{P_{is}}{\dot{Q}_{zu}} = \eta_{th, is} \cdot \eta_{T, is}$	$\frac{P_{is} + \dot{Q}_H}{\dot{Q}_{zu}} = \frac{P_{is} \cdot \eta_{T, is} + \dot{Q}_H}{\dot{Q}_{zu}}$

Wirkungsgraddefinitionen für Dampfkraftwerke (2)

		Kondensations- kraftwerk (KW)	Heizkraftwerk (HKW)
Rohrleitungs- wirkungsgrad zwischen Kesselhaus und Turbine	η_L		$\frac{\dot{Q}_{zu}}{\dot{Q}_K}$
Kessel- wirkungsgrad	η_K		$\frac{\dot{Q}_K}{\dot{Q}_{Br}}$
mechanischer Wirkungsgrad	η_m		$\frac{P_m}{P}$
Generator- wirkungsgrad	η_G		$\frac{P_{el}}{P_m}$

Wirkungsgraddefinitionen für Dampfkraftwerke (3)

		Kondensations- kraftwerk (KW)	Heizkraftwerk (HKW)
effektiver Bruttowirkungs- grad, beim KW gleich $\eta_{el,br}$ beim HKW gleich $\eta_{ges,br}$	$\eta_{el,br}$	$\frac{P_{el}}{\dot{Q}_{Br}} = \eta_{th,js} \cdot \eta_{T,js} \cdot \eta_L \cdot \eta_K \cdot \eta_m \cdot \eta_G$	$\frac{P_{el} + \dot{Q}_H}{\dot{Q}_{Br}} = \frac{P_{Is} \cdot \eta_{T,js} \cdot \eta_m \cdot \eta_G + \dot{Q}_H}{\dot{Q}_{Br}}$
effektiver Nettowirkungsgrad, beim KW gleich $\eta_{el,n}$ beim HKW gleich $\eta_{ges,n}$	$\eta_{e,n}$	$\frac{P_{el} - P_{EB}}{\dot{Q}_{Br}}$	$\frac{P_{el} - P_{EB} + \dot{Q}_H - \dot{Q}_{HEB}}{\dot{Q}_{Br}}$

Wirkungsgraddefinitionen für Dampfkraftwerke (4)

\dot{Q}_{Br} - Brennstoffwärmestrom

\dot{Q}_K - im Kessel an den Wasser/Dampf-Kreislauf übertragener Wärmestrom

\dot{Q}_{zu} - dem Kreisprozess zugeführter Wärmestrom

\dot{Q}_H - abgegebener Heizwärmestrom

P_{is} - isentrope Turbinenleistung

P - innere Turbinenleistung

P_m - mechanische Leistung an der Turbinenwelle

P_{el} - elektrische Bruttoleistung (Klemmleistung am Generator)

P_{EB} - elektrische Eigenbedarfsleistung

$\dot{Q}_{H,EB}$ - Eigenbedarf an Heizwärmestrom



Eta - das
Zeichen für
Energievernunft

Prozesskette eines Kohle-Kraftwerkes mit Einzelwirkungsgraden



Basis und Berechnungsverfahren zur Bestimmung des Wirkungsgrades eines Dampferzeugers ist die DIN 1942

Der Wirkungsgrad kann auf zweifache Weise bestimmt werden

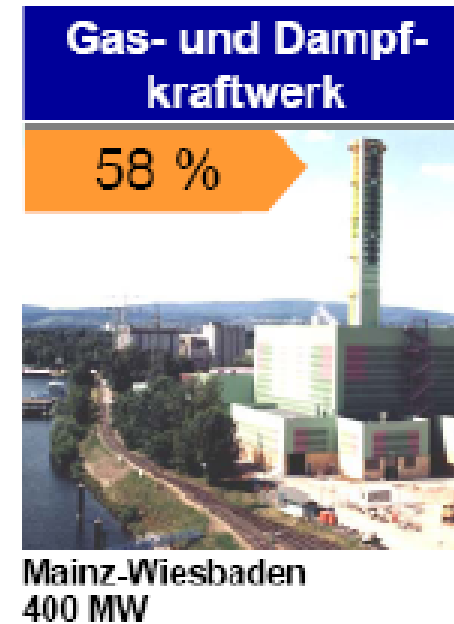
direkte Methode

ermittelt als das Verhältnis der von Wasser und Dampf aufgenommenen Wärmeenergie zu der Energie, die in der gleichen Zeit dem Dampferzeuger durch Brennstoff, Luft usw. zugeführt wird.

indirekte Methode

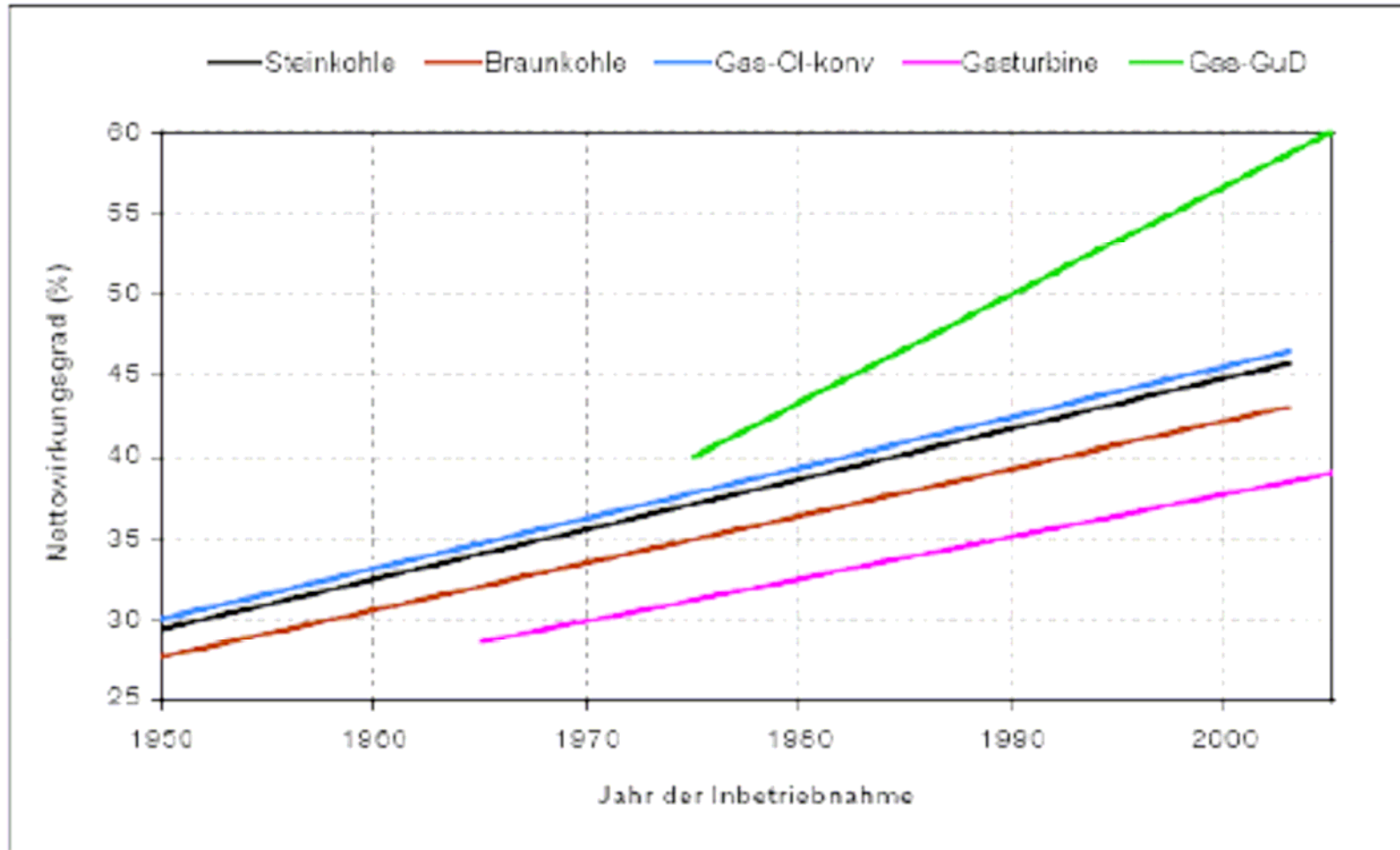
ermittelt über die Verluste des Dampferzeugers

Entwicklung der Wirkungsgrade bei fossilbefeuerten Kraftwerken

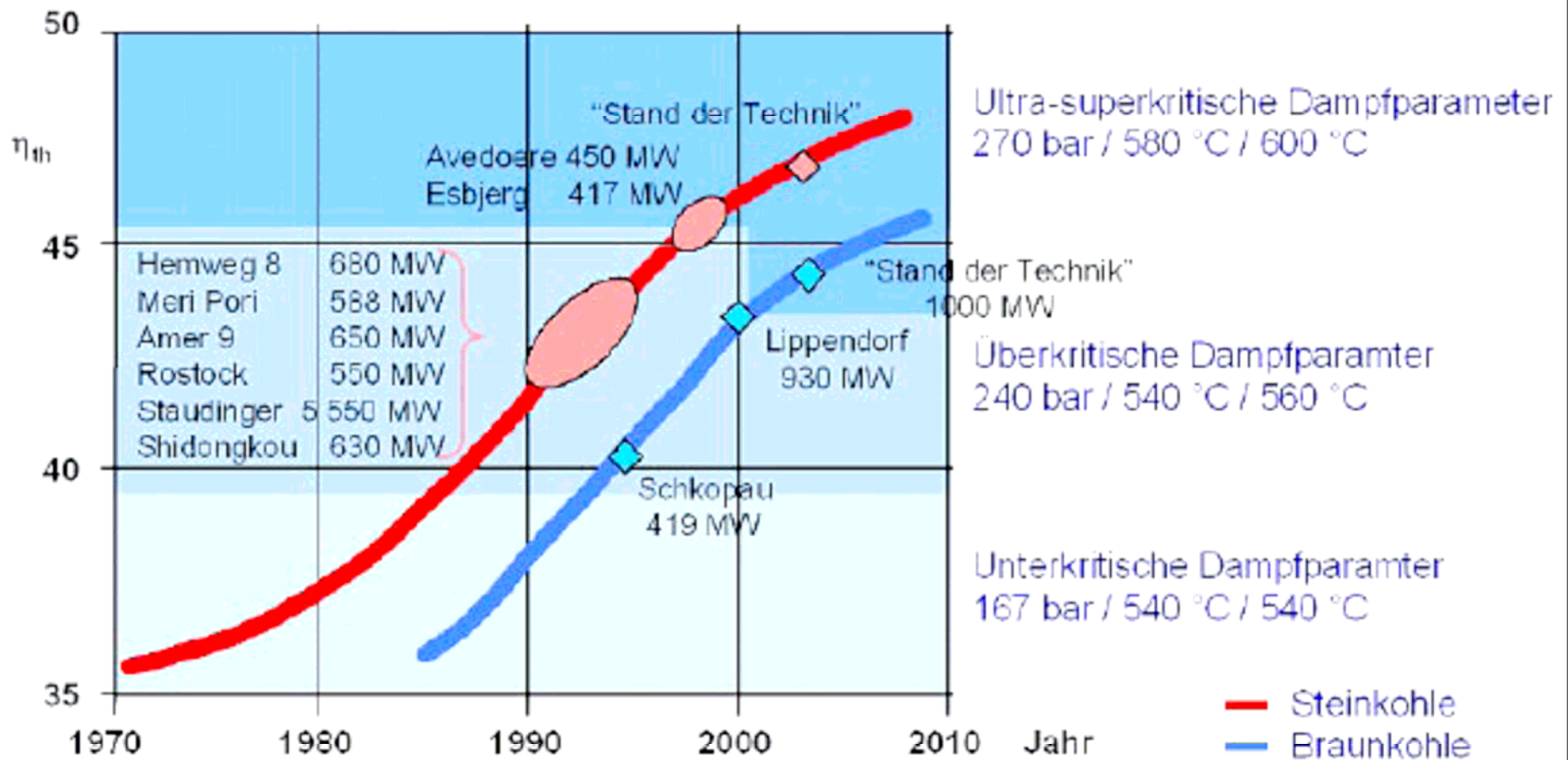


Entwicklung des Wirkungsgrades					
1992:	36 %*	1992:	43 %	1992:	52 %
2005:	43 %	2005:	47 %	2005:	58 %
Ziel 2020:	> 50 %	Ziel 2020:	> 53 %	Ziel 2020:	> 60 %

Wirkungsgradentwicklung



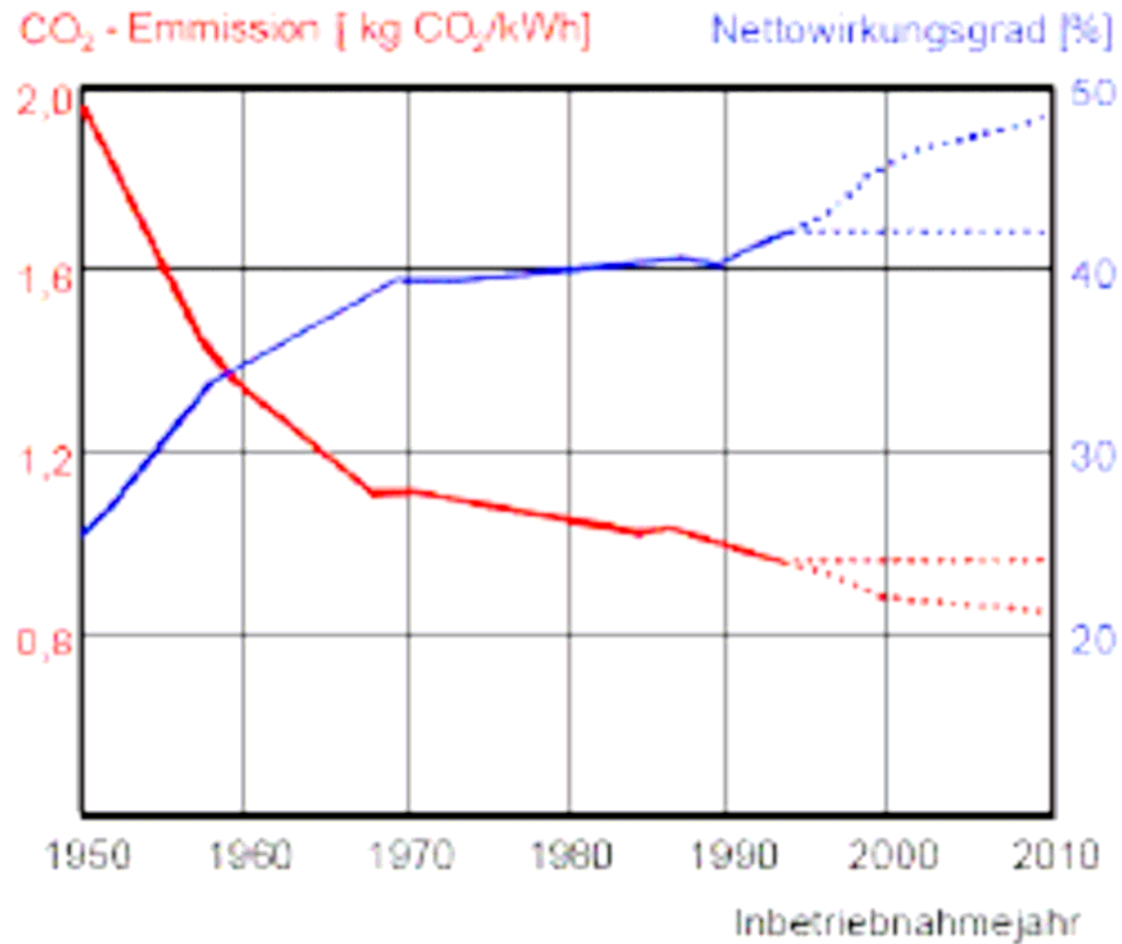
Wirkungsgradentwicklung von Kohlekraftwerken



Kraftwerkstyp	Wirkungsgrad in %	(Arbeits-) Verfügbarkeit in %	Kraftwerkseinsatz zeitlich planbar
Steinkohle	47	95	Ja
Braunkohle	45	95	Ja
Erdgas GuD*	58	95	Ja
Wasserkraft	85	50	Bedingt
Wind	40	20	Nein
Sonne Fotovoltaik	15	10	Nein
Solarthermisches Kraftwerk	30	10	Nein
Kernkraftwerk LWR**	35	95	Ja
Auto Benzin	20		
Auto Diesel	25		
E-Motor	95		

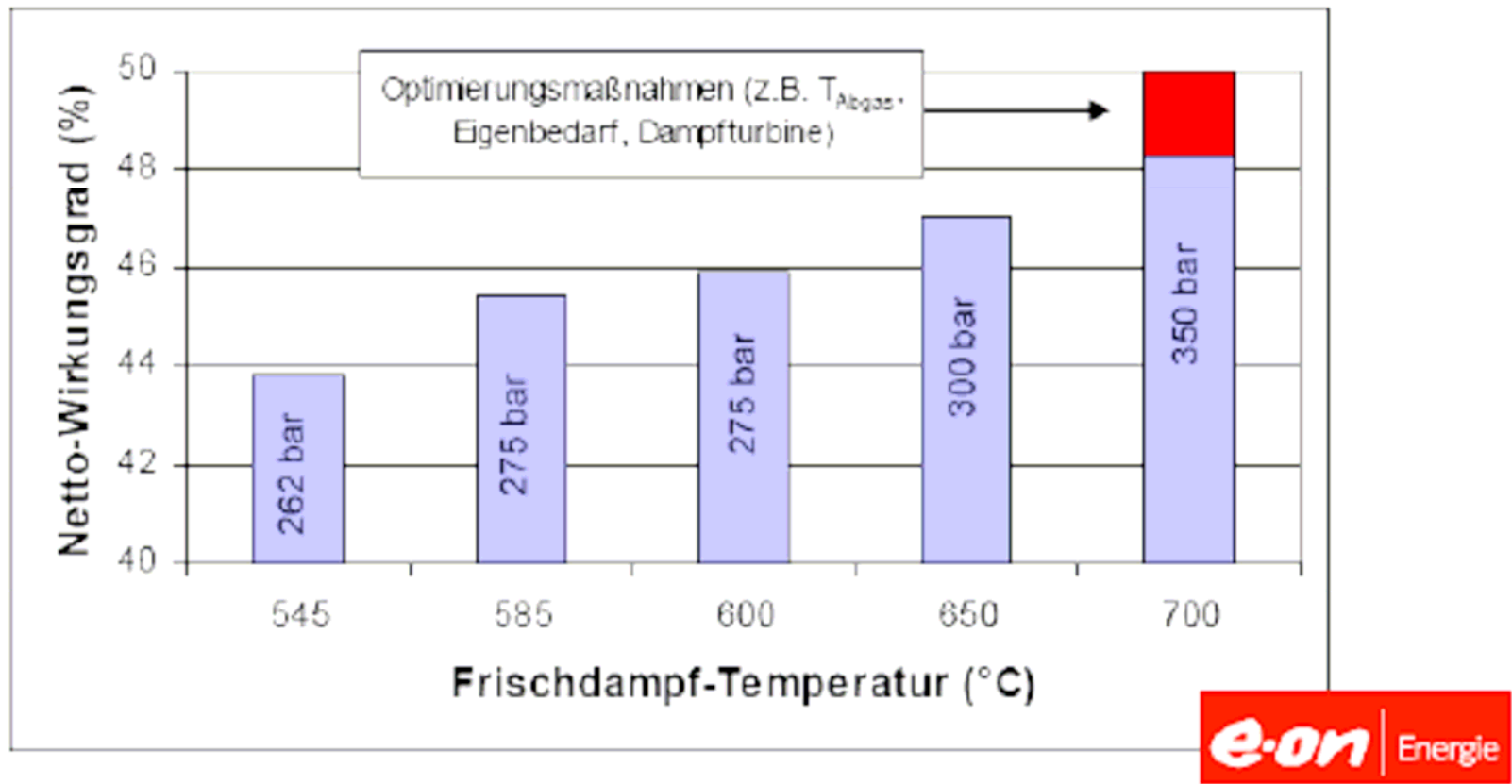
* GuD = Gas- und Dampfturbine

** LWR = Leichtwassereaktor

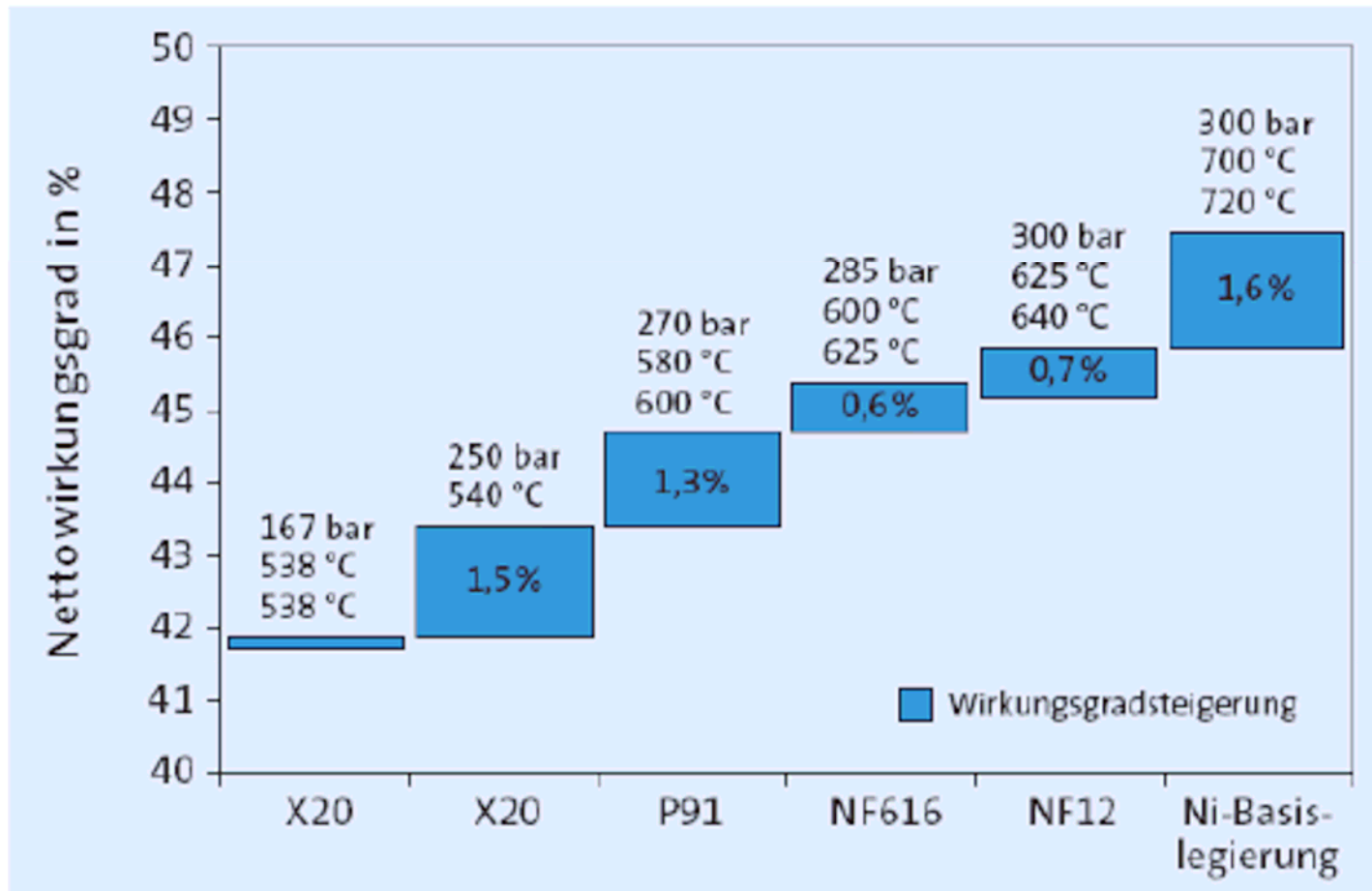


Entwicklung von Wirkungsgrad und Emission

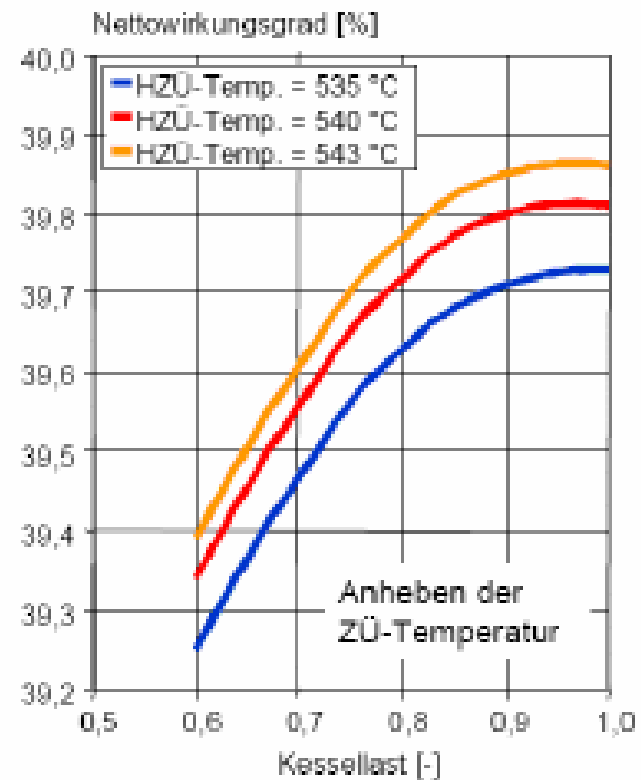
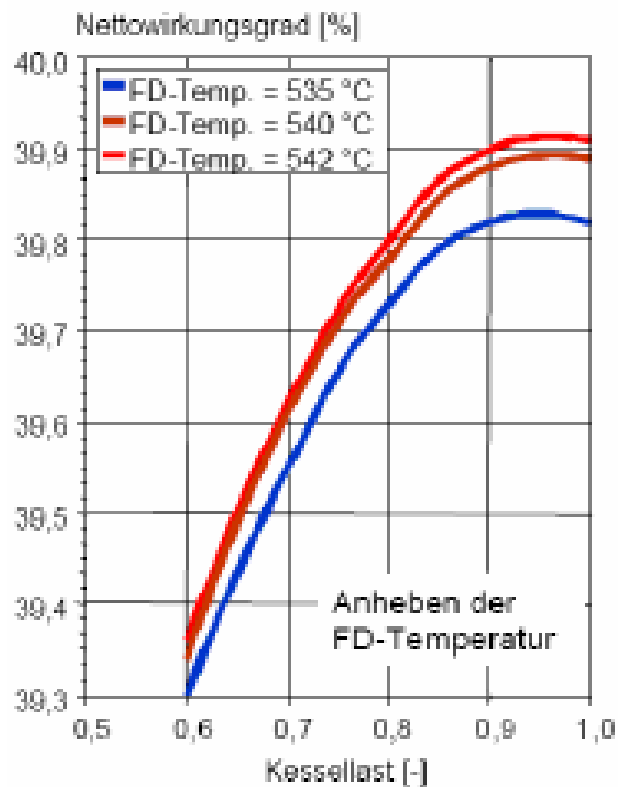
Wirkungsgradsteigerung durch Werkstoffentwicklung und Optimierung von Komponenten



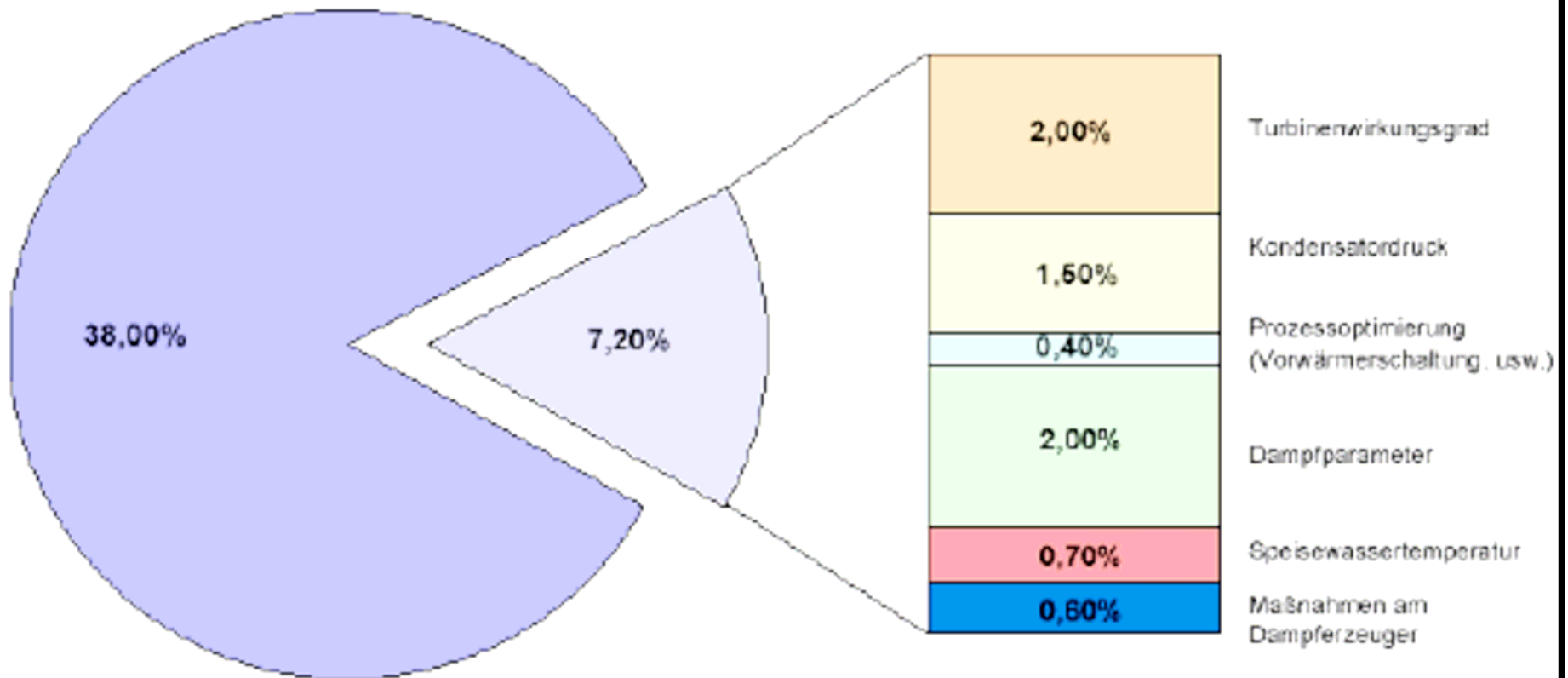
Wirkungsgradsteigerung durch Weiterentwicklung der Werkstoffe



Wirkungsgradverbesserung durch Dampftemperaturenanhebung (Beispiel: 900-MW-Steinkohleblock)

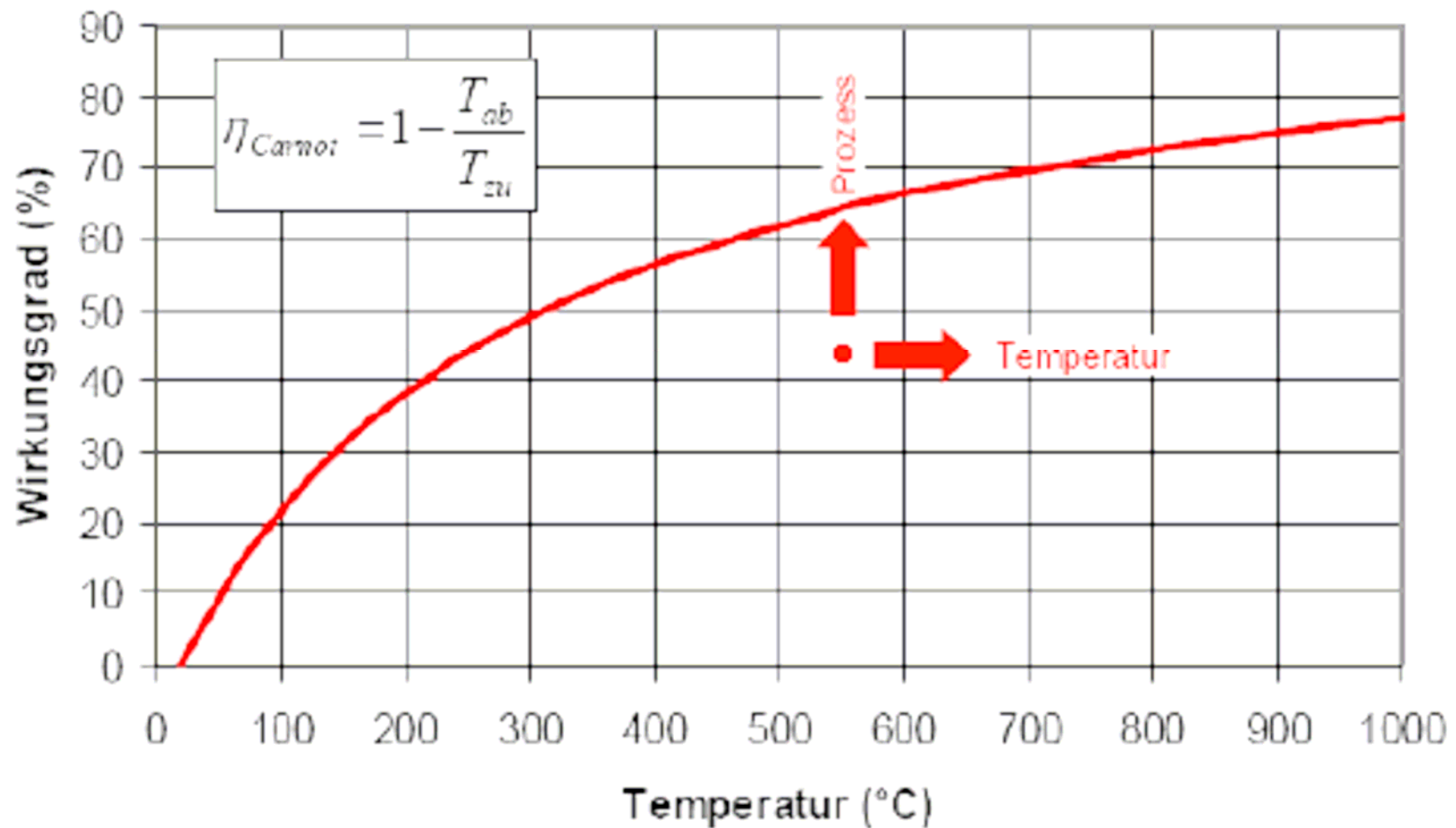


Wirkungsgradsteigerung von Dampfkraftwerken

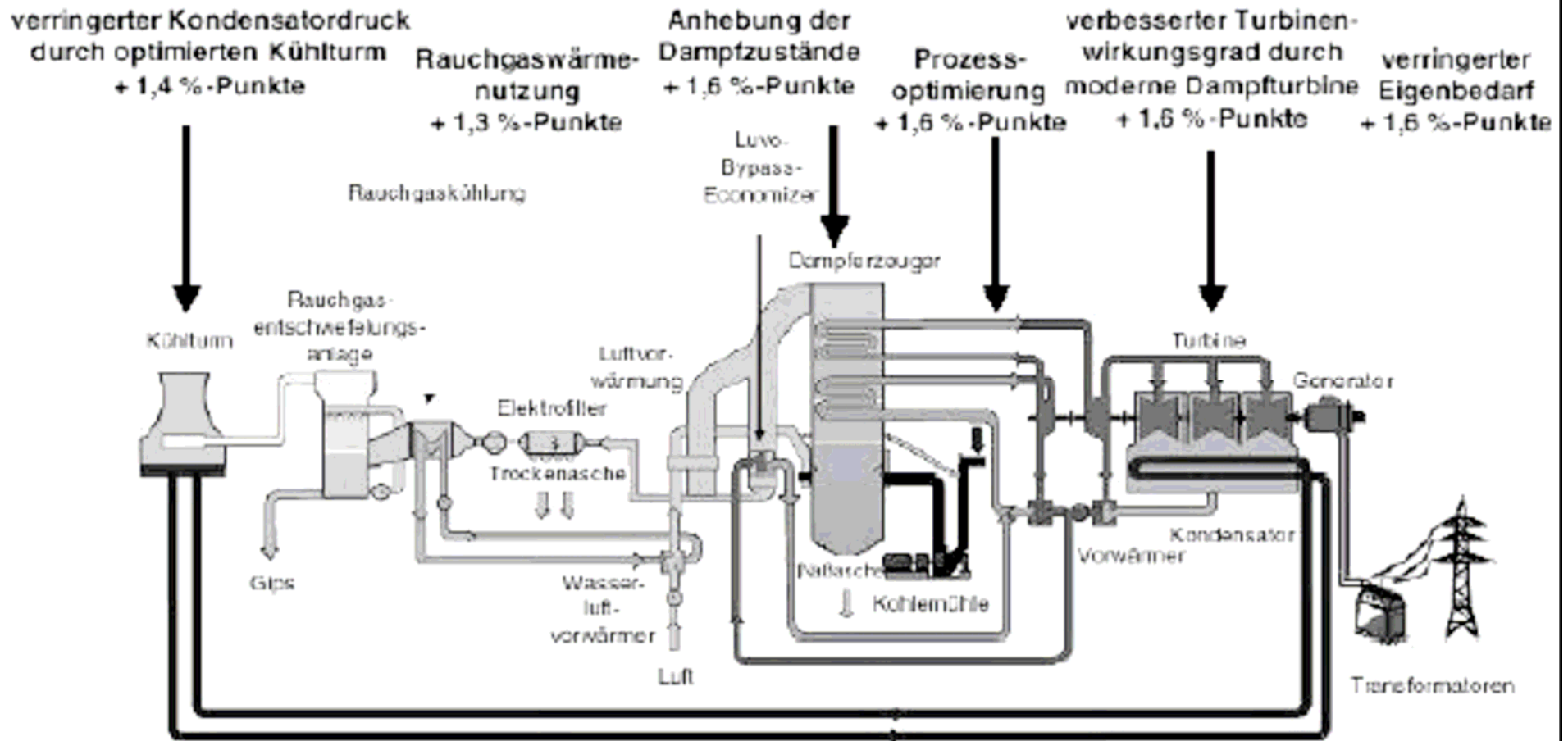


[Quelle: Scheffknecht et al. (2002), S. 51]

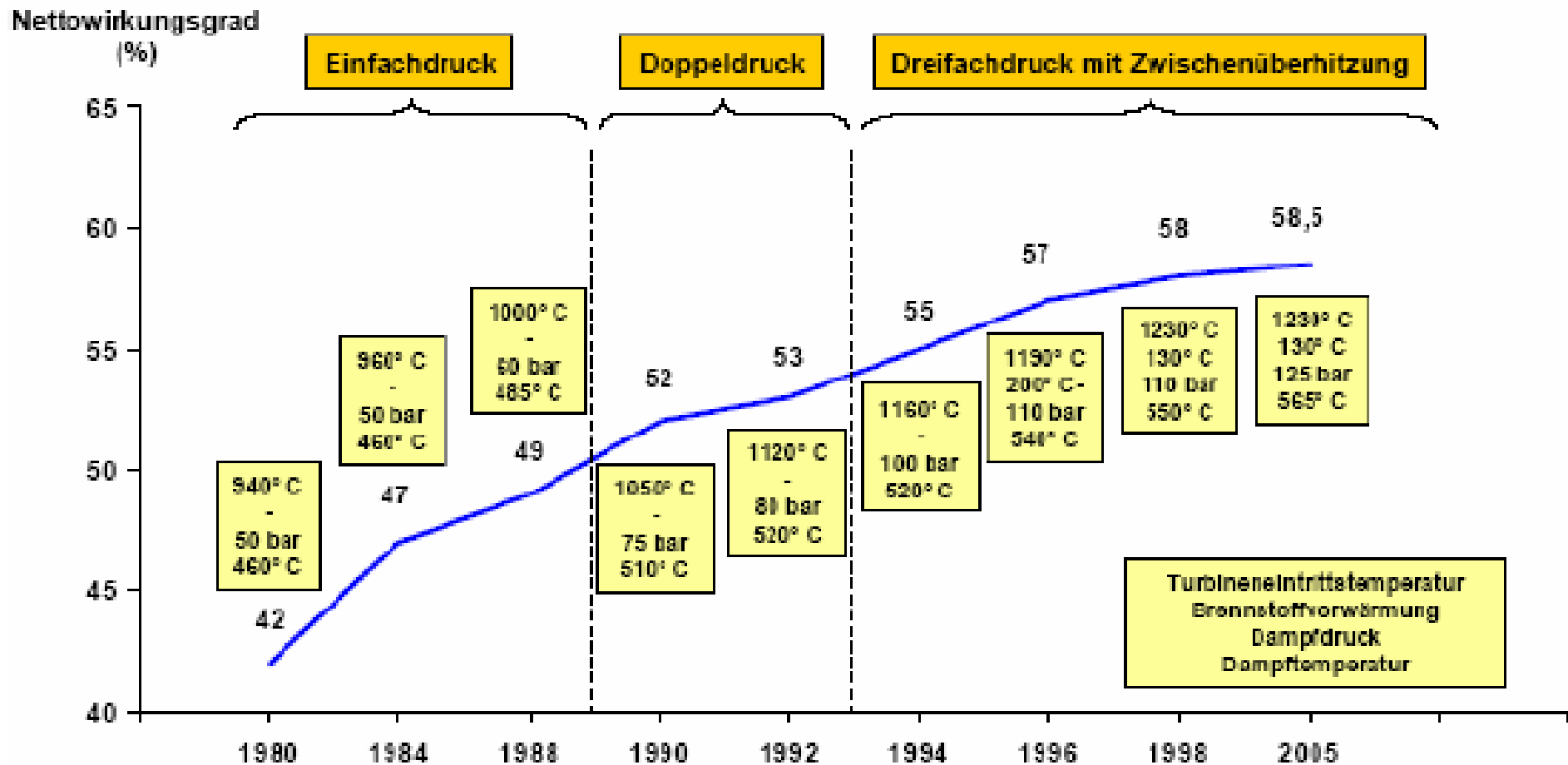
Wirkungsgradsteigerung in Wärmekraftwerken



Betrieb und Instandhaltung von Energieanlagen



Entwicklung der GuD-Technologie



- Verfügbarkeit -

Die Verfügbarkeit
kennzeichnet die Fähigkeit von Kraftwerken, ihre betriebliche Funktionen zu erfüllen, d.h. in der Regel Brennstoffenergie in Endenergie (elektrische Energie und Nutzwärme) umzuwandeln.

In Anlehnung an eine Empfehlung des VGB
- Arbeitskreises Verfügbarkeit wird die
Zeitverfügbarkeit über die Kennziffer

$$K_T = \frac{T_{\text{Kalender}} - \sum T_{\text{Nichtverfügbarkeit}}}{T_{\text{Kalender}}}$$

ermittelt.

Ebenfalls geläufig ist die Darstellung:

$$V_D = \frac{\tau_V}{\tau_N}$$

$$V_D = \frac{\tau_N - \Delta\tau_{NV}}{\tau_N} = \frac{\tau_B + \tau_R}{\tau_N}$$

τ_N - Nennzeit

$\Delta\tau_{NV}$ - Nichtverfügbarkeitszeit

τ_B - Betriebszeit

τ_R - Bereitschaftszeit

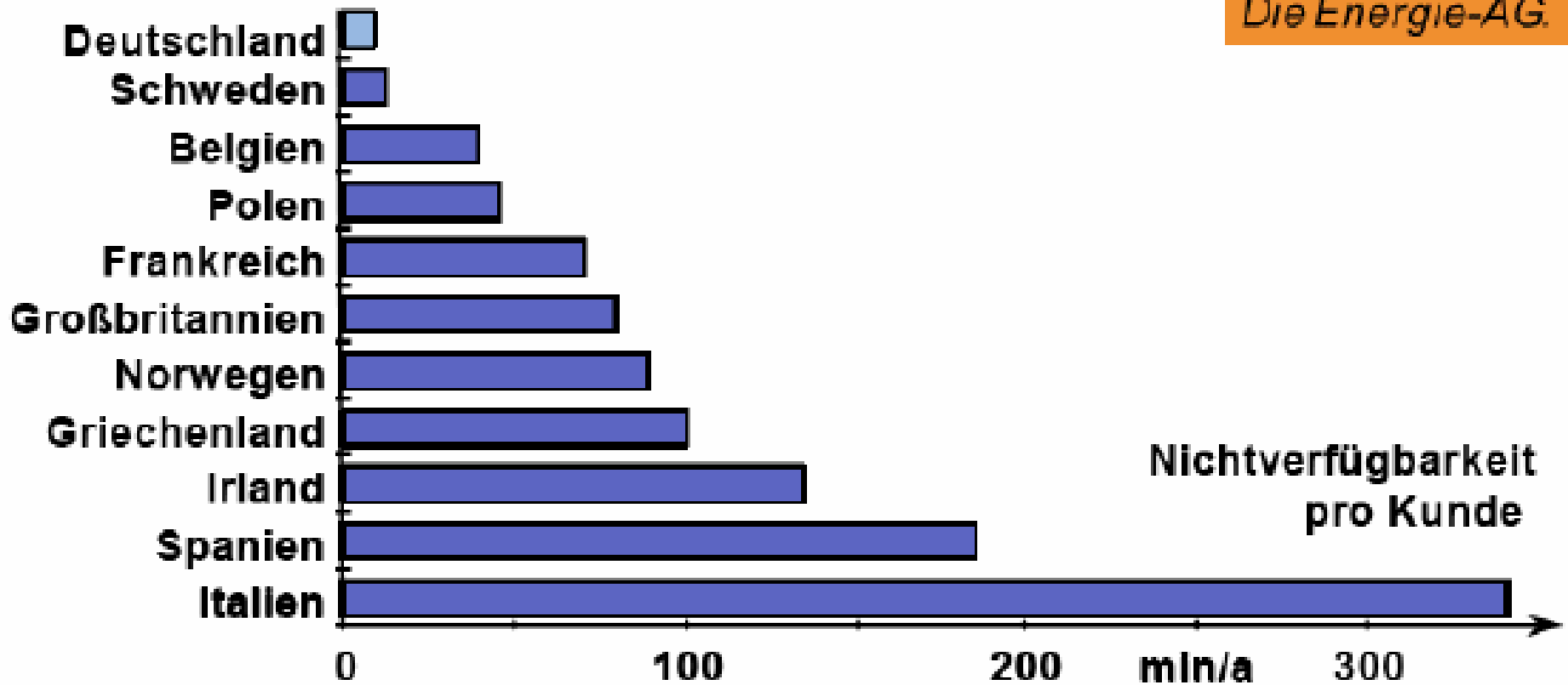
Arbeitsverfügbarkeit:

Arbeitsverfügbarkeit

$$k_A = \frac{A_B + A_R}{A_N} = \frac{\text{Betriebsarbeit} + \text{Bereitschaftsarbeit}}{\text{Nennarbeit}}$$

Die Arbeitsverfügbarkeit ist der umfassende Kennwert zur Gesamtbeurteilung der Verfügbarkeit einer Anlage und erlaubt einen langfristigen Qualitätsvergleich. Sie berücksichtigt alle Leistungsminderungen und Stillstände

Nichtverfügbarkeit in Europa



Quelle: Schwaab, A. (RWE Net AG), 2000

Verfügbarkeit der Kraftwerke

Bei der Kraftwerkseinsatzplanung stellt die Verfügbarkeit der Kraftwerke eine wesentliche betriebstechnische Einschränkung dar.

Auslöser sind:

- deterministische
- stochastische

Ereignisse

Deterministische Ereignisse:

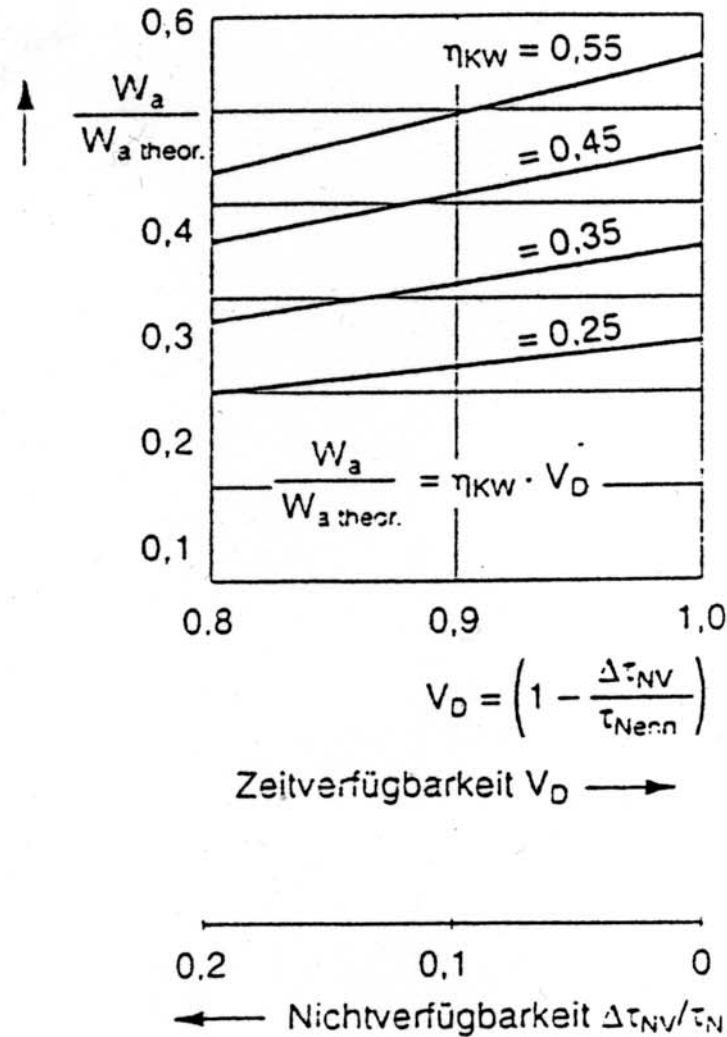
Planbare Nichtverfügbarkeiten, wie die Jahresrevision eines Kraftwerkes.

Stochastische Ereignisse:

Im Wesentlichen in Form von unvorhersehbaren Blockausfällen.

Um die Nutzungsdauer eines (mechanischen) Bauteils zu beurteilen, müssen folgende Fragestellungen einer Bewertung unterzogen werden:

- ▶▶ Welche Schädigungsmechanismen sind für den Werkstoff bei den vorliegenden festigkeitstechnischen, thermohydraulischen und wasserchemischen Einsatzbedingungen relevant?
- ▶▶ Welche Schädigungsrate ist unter den gegebenen Bedingungen für das Bauteil zu erwarten?
- ▶▶ Welche Grenzbedingung wird durch den Schädigungsfortschritt erreicht bzw. unterschritten und limitiert die Lebensdauer des Bauteils?



- W_a – Jahresarbeit
- $W_{a,theor.}$ – $\dot{m}_{Br} \cdot Q_i \cdot \tau_{Nenn}$
theor. mögliche Jahresarbeit
- \dot{m}_{Br} – Brennstoffmengenstrom
- Q_i – Heizwert
- τ_{Nenn} – 8760 h
- $\Delta\tau_{NV}$ – Nichtverfügbarkeit (Zeit)

Jahresarbeit $W_a = \int_0^{\tau_{Nenn} - \Delta\tau_{NV}} P \cdot d\tau$

$P = \eta_{KW} \cdot \dot{m}_{Br} \cdot Q_i$

Vereinfachung $P = \text{const.}$

$W_a = \eta_{KW} \cdot \dot{m}_{Br} \cdot Q_i \cdot (\tau_{Nenn} - \Delta\tau_{NV})$

$W_a = \eta_{KW} \cdot \dot{m}_{Br} \cdot Q_i \cdot \tau_{Nenn} \cdot \left(1 - \frac{\Delta\tau_{NV}}{\tau_{Nenn}}\right)$

$\frac{W_a}{\dot{m}_{Br} \cdot Q_i \cdot \tau_{Nenn}} = \eta_{KW} \left(1 - \frac{\Delta\tau_{NV}}{\tau_{Nenn}}\right)$

$\frac{W_a}{W_{a,theor.}} = \eta_{KW} \cdot V_D$

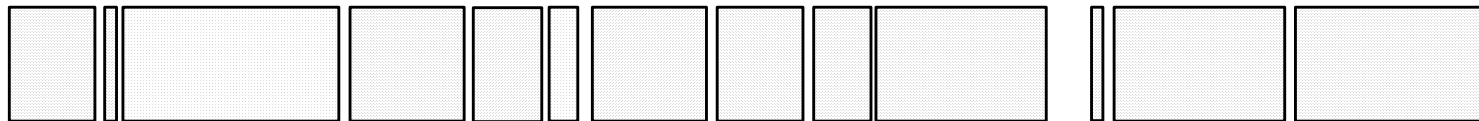
Verfügbarkeit einer GUD-Anlage in Abhängigkeit der Verfügbarkeit der Komponenten

Gasturbine



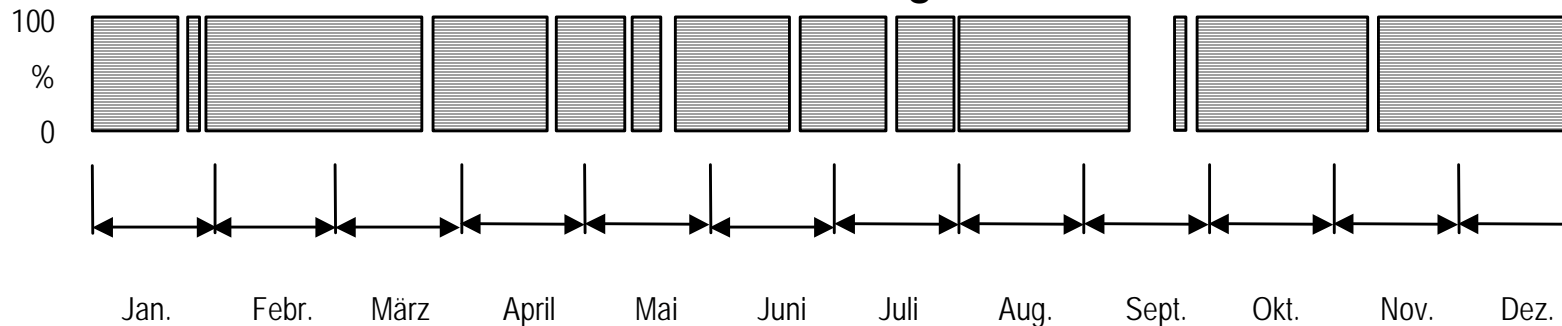
$V_{D\ GT} = 97,39$

Dampferzeuger

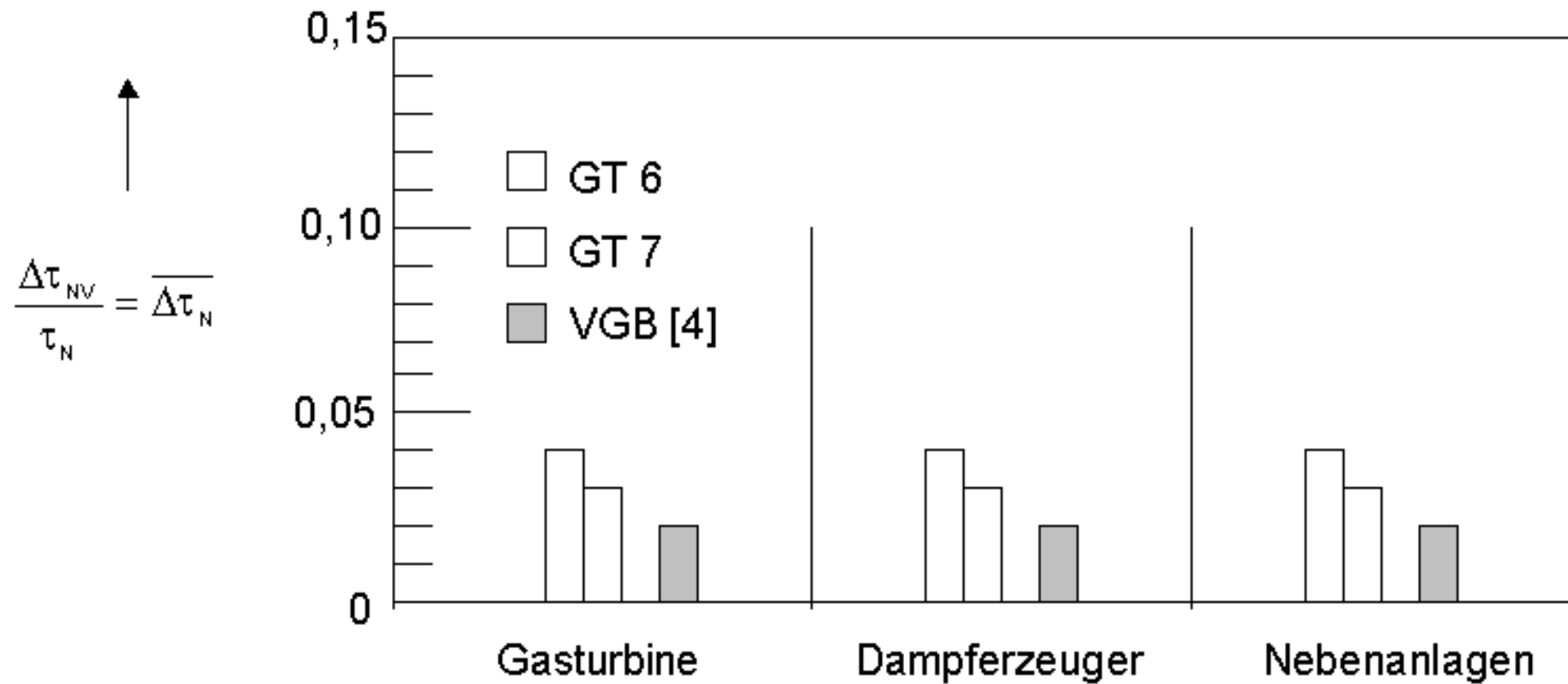


$V_{D\ DE} = 85,51$

GuD-Anlage



$V_{D\ GuD} = 84,52$



Nichtverfügbarkeit durch Schäden und planm. Reparaturen

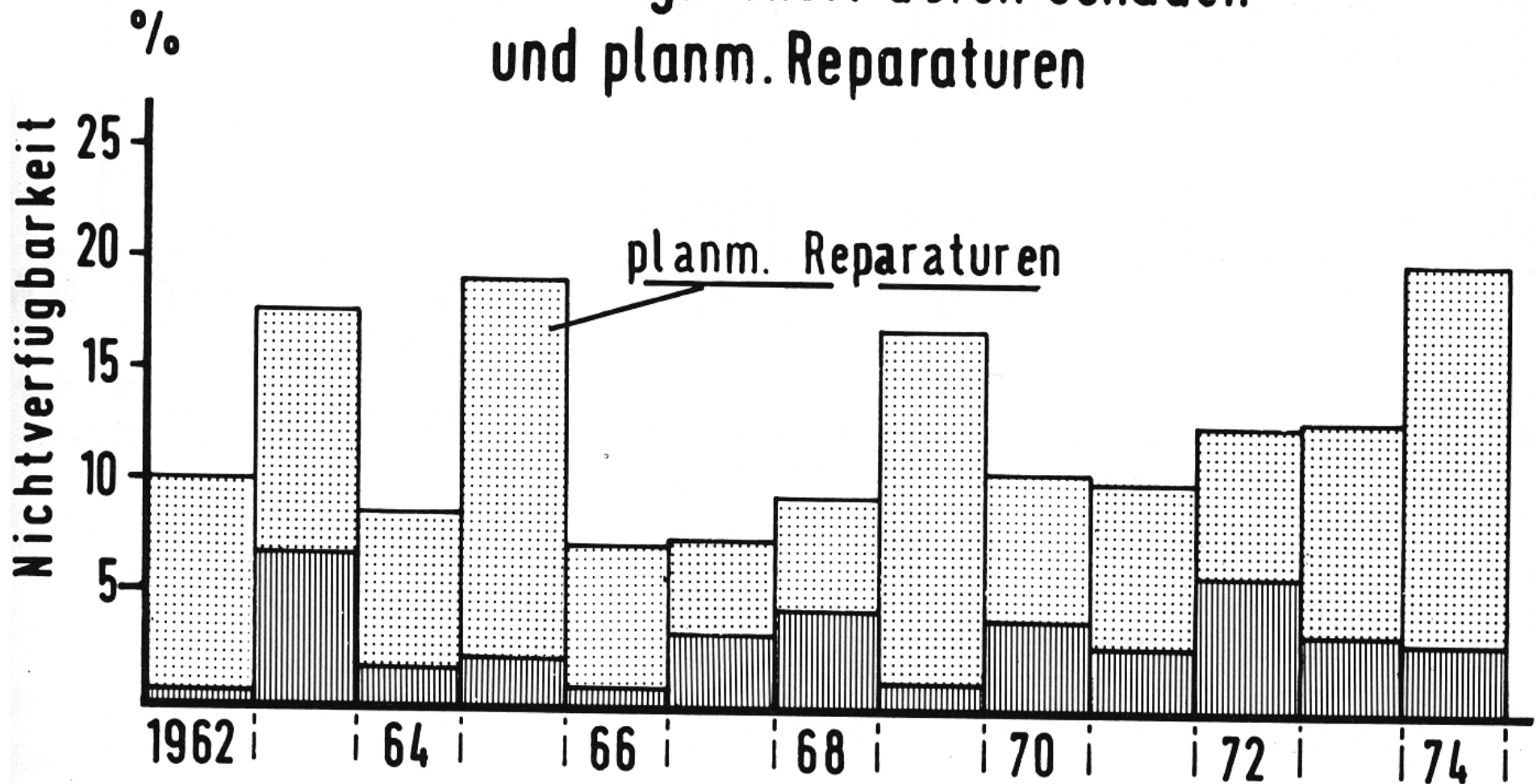


Bild 100.2: Nichtverfügbarkeit der Anlage durch Schäden und planmäßigen Instandhaltungen

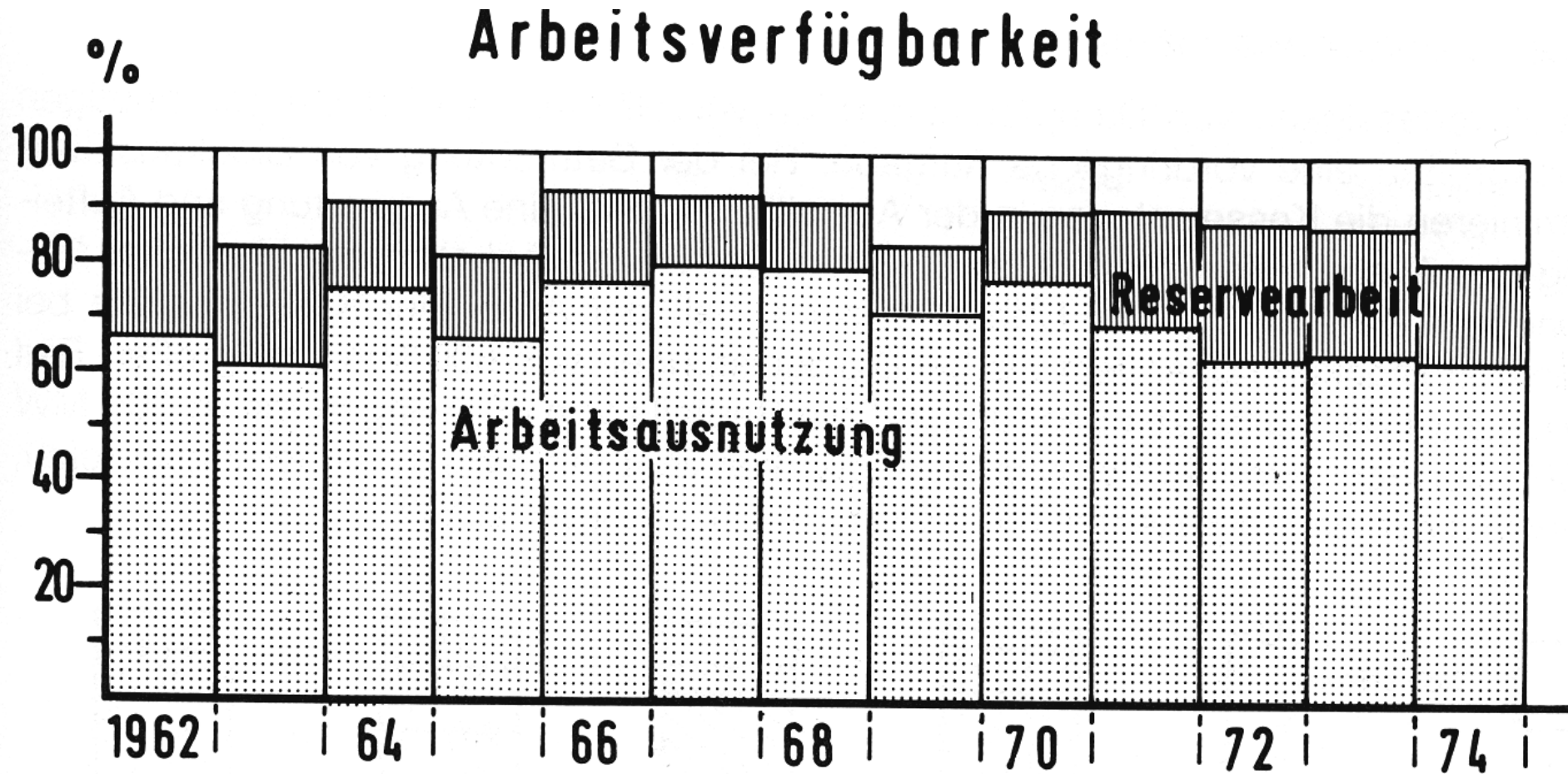


Bild 100.1: Arbeitsverfügbarkeit eines 150-MW-Blockes mit Schmelzfeuerung im Zeitraum von 12 Jahren

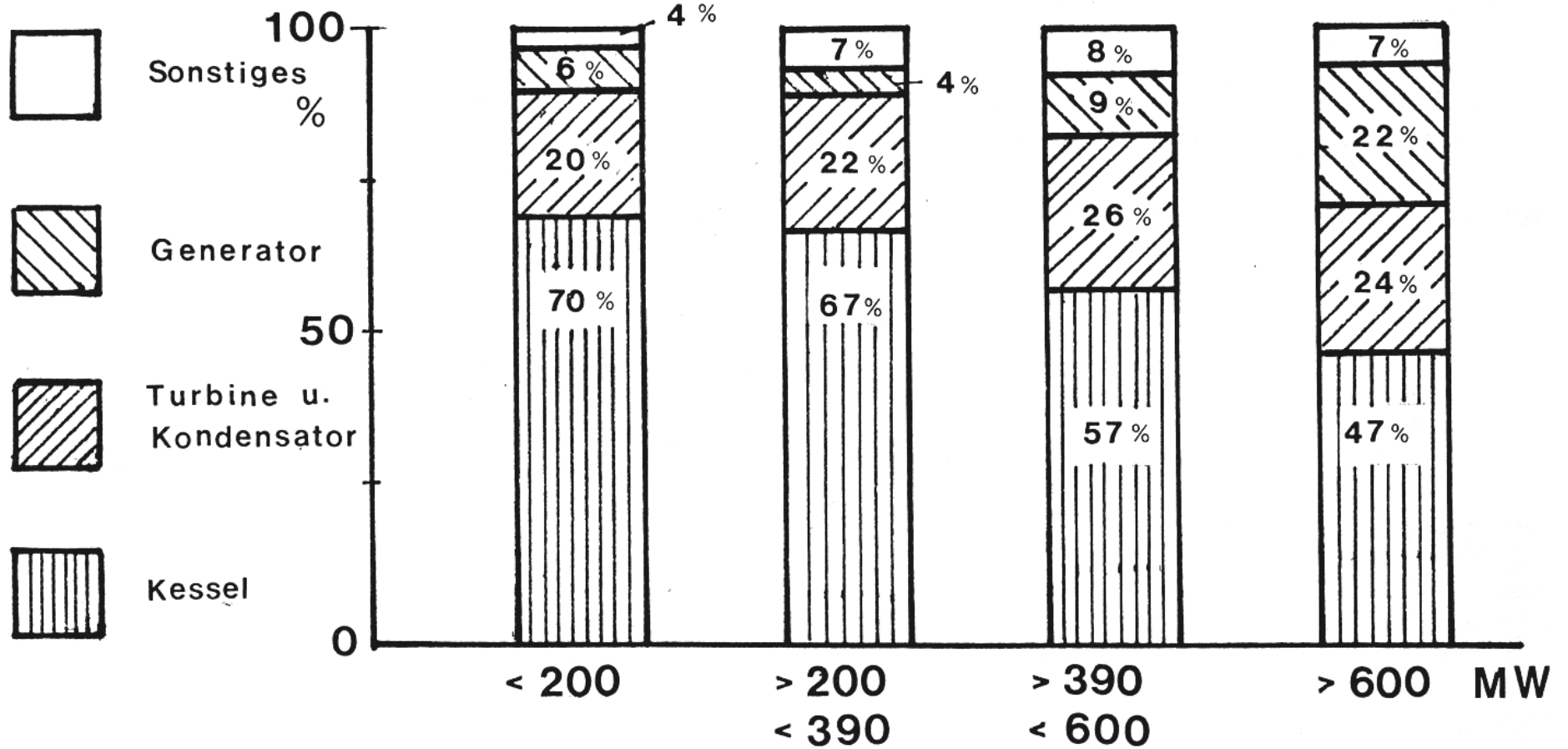


Bild 100.3: Ausfallquoten von Kraftwerksaggregaten verschiedener Blockgrößen (134, 135, 137)

Betrieb und Instandhaltung von Energieanlagen

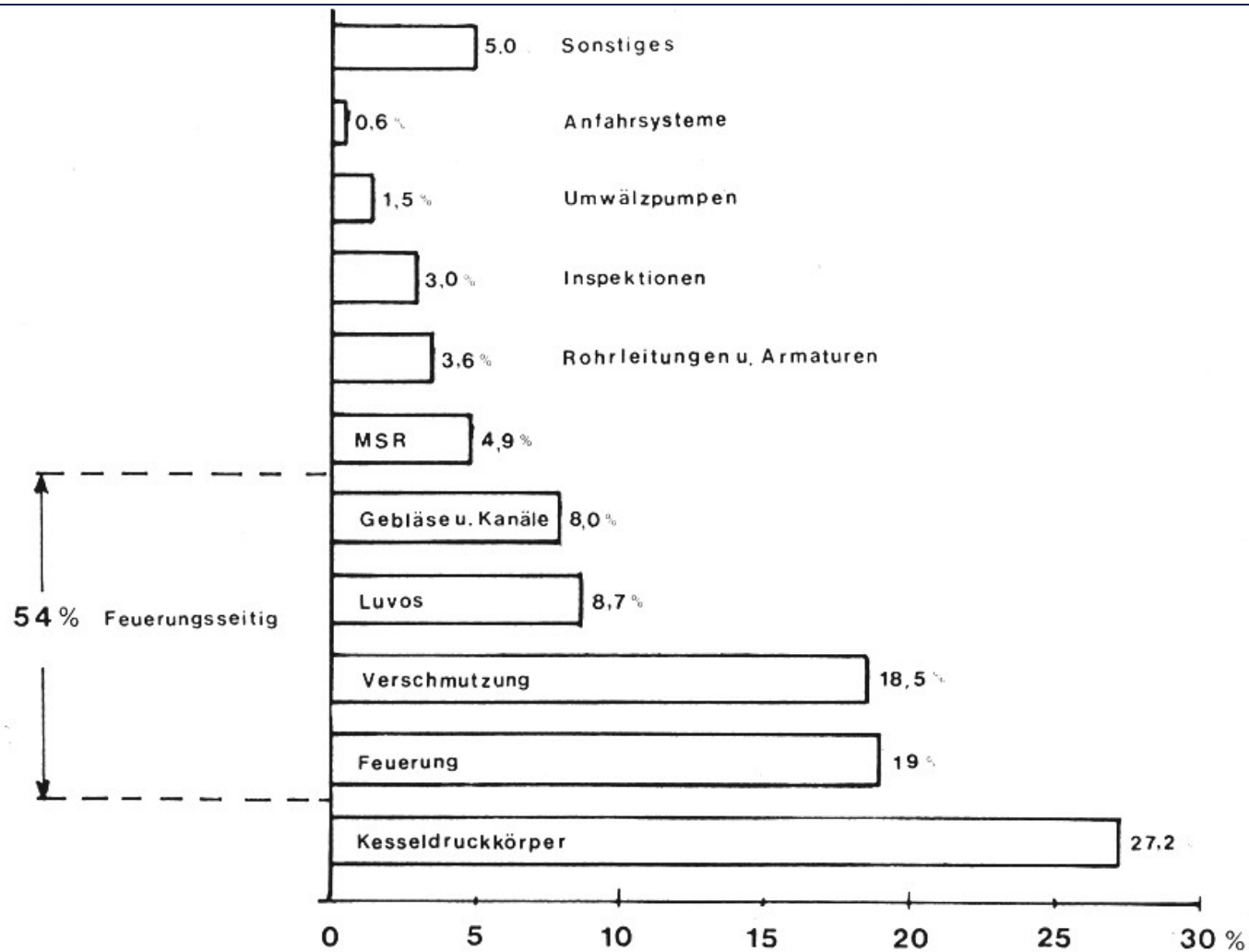


Bild 100.4: Nichtverfügbarkeit von Kesselbauteilen als Mittelwert von ca. 46 600-MW-Blöcken (134, 135)

Schadensursachen: Produktfehler / Betriebsfehler

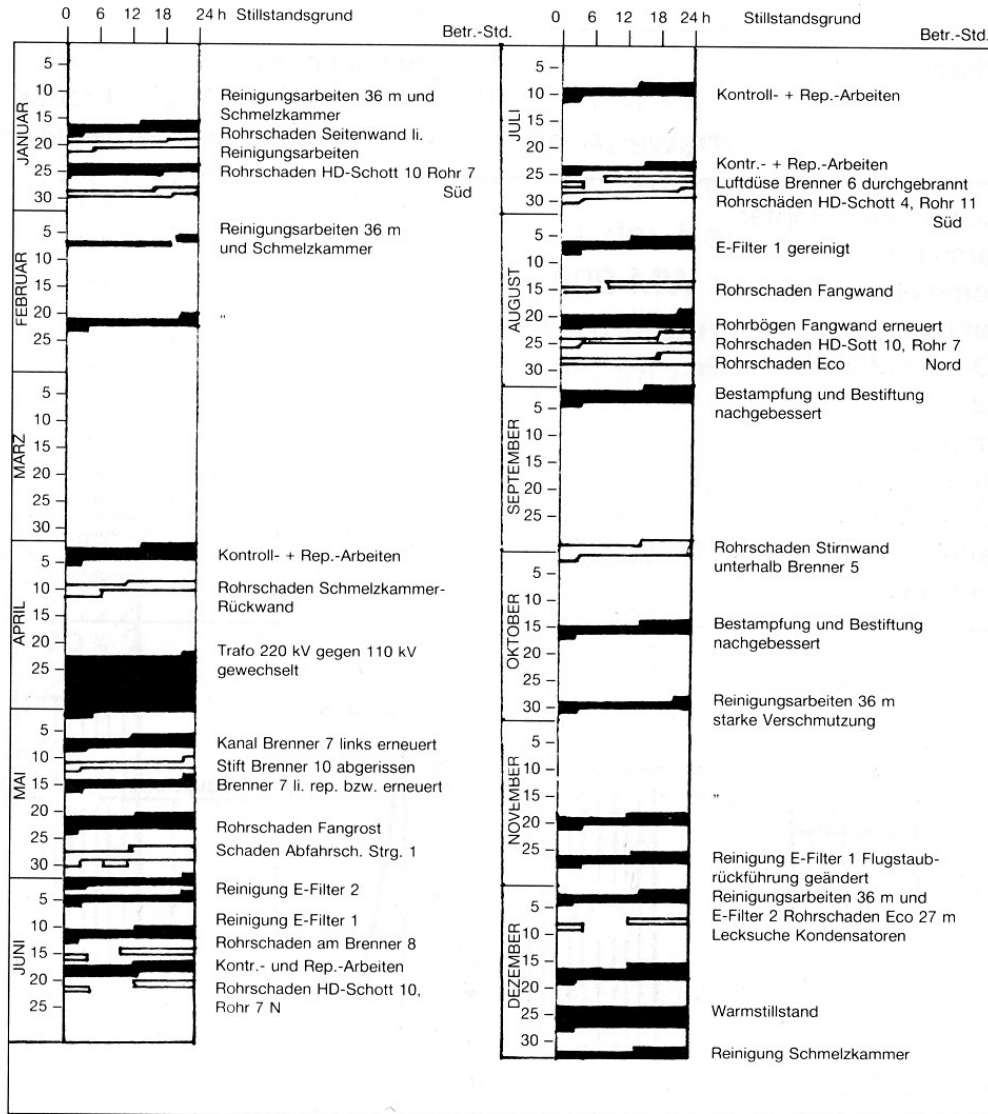
Schadensstellen	Schadenszahl %	Schadensursachen	
		Produkt- fehler (%)	Betriebs- fehler (%)
Eco und Verdampfer	23	62	38
Flammrohr	5	12	88
Trommel	3	75	25
Sammler	3	93	7
HD- und MD-Überhitzer	17	55	45
Kühler	4	84	16
Armaturen	4	72	28
Feuerungen	16	45	55
Luftvorwärmer	4	68	32
Halterungen und Mauerwerk	16	66	34
Sonstiges	5	60	40

Tabelle 8.6: Anteil der Hauptkomponenten an der Nichtverfügbarkeit

Anlagenteil	Erzwungene Totalausfälle	Planmäßige Stillstände
Dampferzeuger	62 %	51 %
Turbine	21 %	21 %
Generator	7 %	2 %
Kondensator	2 %	5 %
Sonstiges	8 %	21 %
	100 %	100 %

Betrieb und Instandhaltung von Energieanlagen

Block A



Beispiel: Dokumentation eines Betriebsablaufes

Erhöhen der Verfügbarkeit:

- **Weiterentwicklung in überschaubaren Schritten**
- **bewährte Bauelemente**
- **Nutzen von Betriebserfahrungen**
- **Turbinenbypass, Gleitdruck**
- **Sorgfältige Planung (Simulation...)**
- **Reserven bei Bemessung (Sicherheitszuschläge)**
- **Prüfung bei Herstellung und Montage**
- **geeignete Leittechnik**
- **Wartungsfreundliche Konstruktion**
- **Motivation und Schulung des Personals**
- **vorbeugende Reparaturen und Änderungen auch bei unvorhergesehenen Stillständen**