



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DRESDEN

Institut für Energietechnik, Professur Verbrennung, Wärme- und Stoffübertragung

# Verbrennung und Dampferzeugung

- universitäres Fernstudium -

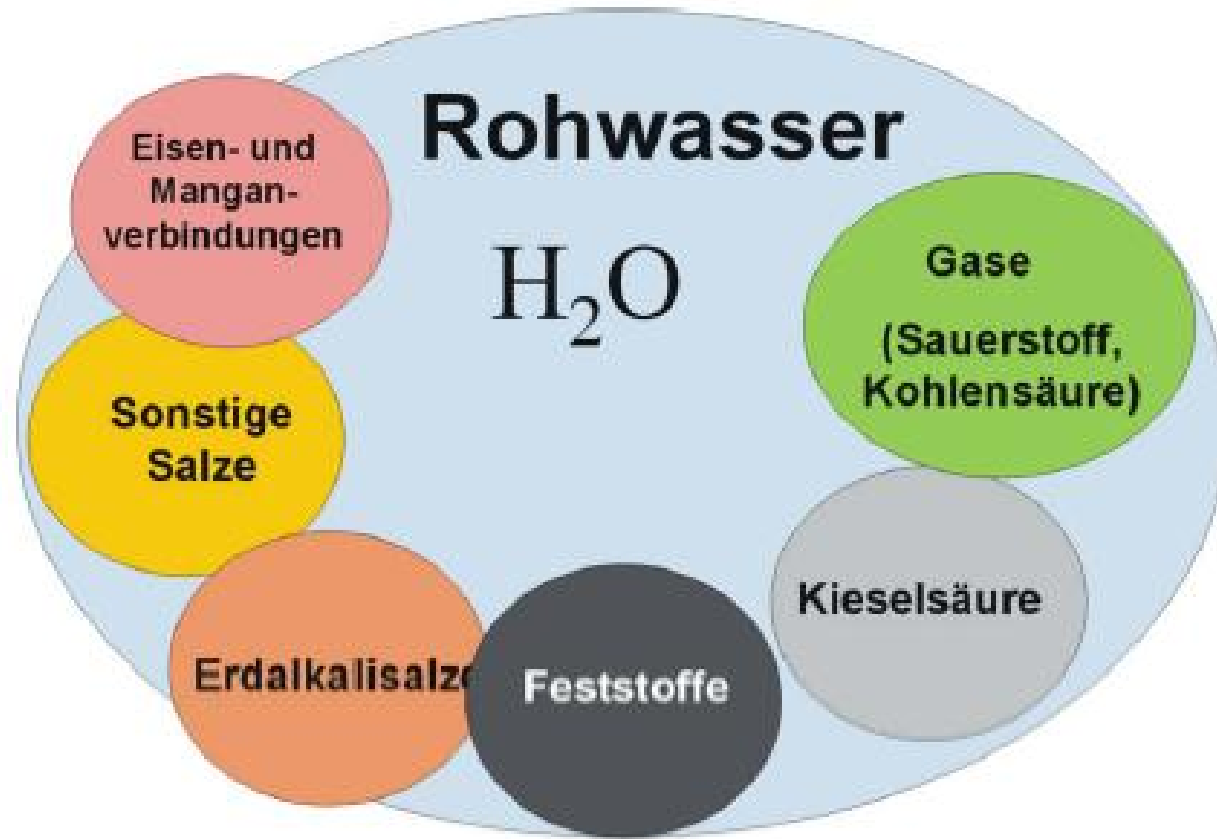
Wasseraufbereitung, Kühlsysteme,  
Verschmutzungen im Dampferzeuger

# - Wasser und Wasseraufbereitung -

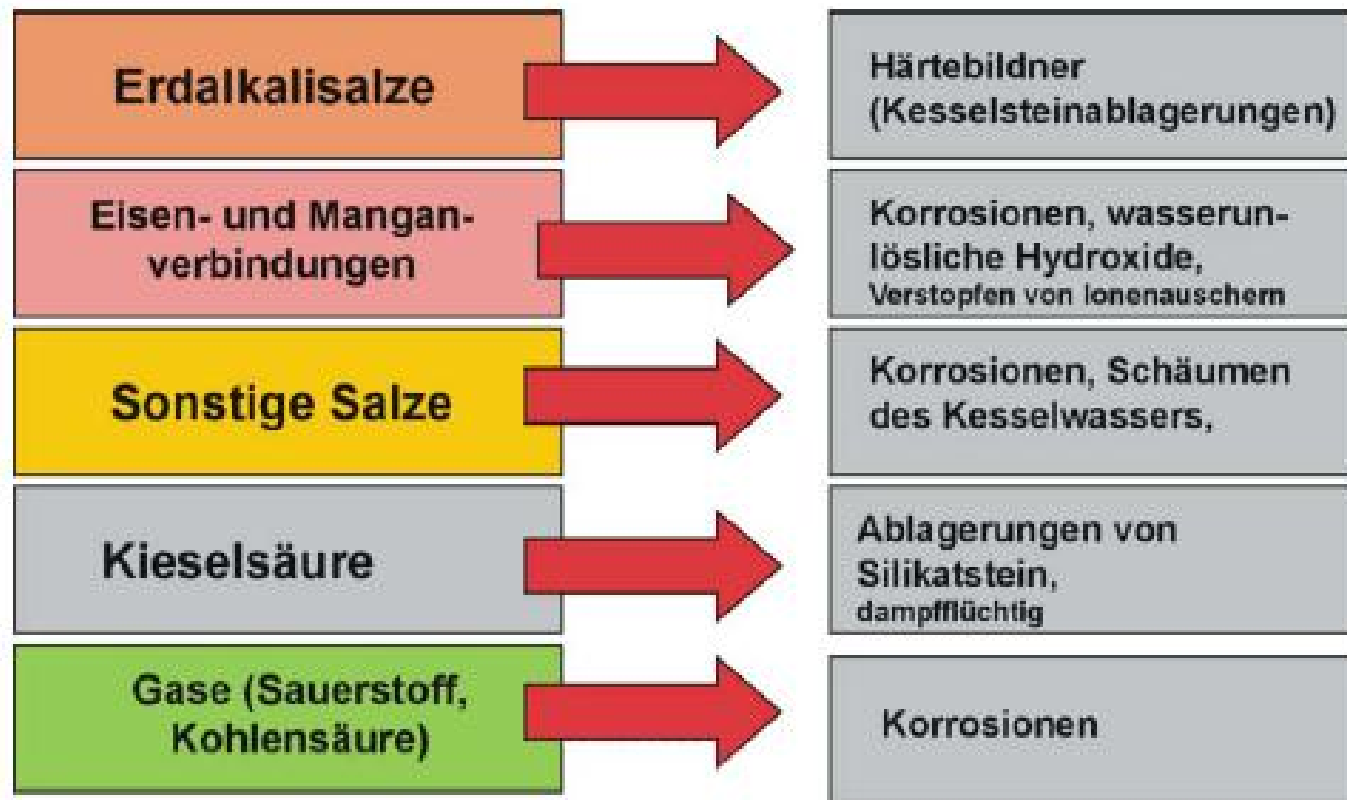
# Speisewasser

**Das Wasser in Dampfkraftwerken, das dort in einem Kreislauf seinen Aggregatzustand ändert und dabei den Strom erzeugt, muss von besonderer Reinheit und weitgehend frei von Verunreinigungen wie Mineralsalzen sein, um zu vermeiden, dass der Betrieb eines Kraftwerkes durch Korrosionen und Ablagerungen gestört wird. Solch reines Wasser heißt "Deionat".**

# Bestandteile des Rohwassers



# Auswirkung der Bestandteile des Rohwassers auf den Betrieb eines Dampfkessels



Für das im Kesselbetrieb verwendete Wasser wird unterschieden zwischen ....

Kesselspeisewasser

Wird dem Kessel unmittelbar zugespeist, ganz gleich ob es irgend eine Behandlung erfahren hat oder nicht.

Kesselinhaltswasser

Im Kessel befindliche Wasser, das bereits dem Siedeprozess unterworfen wurde.

Kondensat

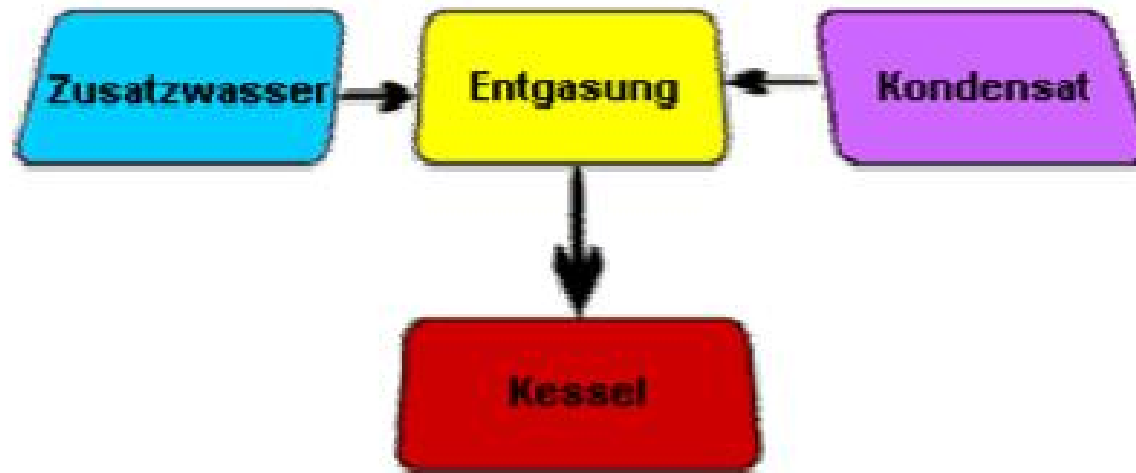
Entsteht aus Dampf, der bei der Abgabe seiner Wärme wieder zu Wasser kondensiert

## Wasseraufbereitungsverfahren

Unter dem Begriff der 'Wasseraufbereitung' wird allgemein jede chemische oder physikalisch-chemische Behandlung eines Wassers zu einem bestimmten Zweck verstanden. Der Verwendungszweck ist stets mit spezifischen Qualitätsanforderungen verbunden. Wasseraufbereitung beinhaltet also sowohl einen Entzug bestimmter Wasserinhaltsstoffe, als auch das Hinzufügen bestimmter Additive.

Zweckmäßig ist eine Einteilung von Wasseraufbereitungsmaßnahmen unter dem Gesichtspunkt nacheinander ablaufender Verfahrensschritte, auch wenn eine scharfe Trennung nicht immer möglich ist.

## Wasseraufbereitungsverfahren



In der Regel ist eine Vollenthärtung und eine sauerstofffreie Betriebsweise zwingend vorgeschrieben. Weitere begrenzende Parameter sind der Eisengehalt im Speisewasser, sowie die Alkalität und der Kieselsäuregehalt im Kesselwasser.



## Anforderungen an die Wasserqualität (Speisewasser)

Für einen störungsfreien Betrieb des Dampferzeugers und der Turbine sowie für eine lange Lebensdauer der Anlage ist die Beschaffenheit des Speisewassers von ausschlaggebender Bedeutung.

Die Anforderungen, die an die Qualität gestellt werden, hängen von der Bauart des Dampferzeugers und von seinem Arbeitsdruck ab.

# Anforderungen an die Wasserqualität (Speisewasser)

Geltungsbereich für Dampferzeuger bis max. 25 bar  
aus Chromnickelstahl der Qualität 1.4404 oder besser.

	<b>Vollentsalztes Wasser</b>	<b>Weichwasser (enthärtetes Wasser)</b>
• Aussehen:	klar, farblos, frei von Schwebstoffen.	klar, farblos, frei von Schwebstoffen
• Härte:	< 0,1 °fH (0,01 mmol/l)	< 0,1 °fH (0,01 mmol/l)
• CO <sub>2</sub> gebunden:	< als 25 mg/l	< als 25 mg/l
• O <sub>2</sub> :	< 0,02 mg/l	< 0,02 mg/l
• Öl:	< 1 mg/l	< 1 mg/l
• pH:	> 9	> 9
• Permanganatverbrauch:	< 10 mg/l	< 10 mg/l
• Leitfähigkeit bei 25°C	< 20 µS/cm	< 750 µS/cm
• Trübung, Färbung, Härtebildner, Chloride	mit den üblichen Analysemethoden . nicht nachweisbar	mit den üblichen Analysemethoden . nicht nachweisbar

# Anforderungen an die Wasserqualität (Kesselwasser)

Geltungsbereich für Dampferzeuger bis max. 25 bar  
aus Chromnickelstahl der Qualität 1.4404 oder besser.

	<b>Vollentsalztes Wasser</b>	<b>Weichwasser (enthärtetes Wasser)</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Aussehen:</li><li>• Säurekapazität <math>K_s</math> 8,2</li><li>• pH: (bei 25°C)</li><li>• Leitfähigkeit:</li><li>• Phosphat (<math>P_2O_5</math>):</li><li>• Kieselsäure (<math>SiO_2</math>):</li><li>• Chloride</li><li>• Resthärte</li><li>• <math>O_2</math></li><li>• Sauerstoffbindemittel</li></ul>	<p>klar, farblos, frei von Schwebstoffen.</p> <p>0.5-5 mmol/l</p> <p><math>\geq 9,5</math> max. 11.5</p> <p><math>&lt; 2000 \mu S/cm</math></p> <p>15 - 30 mg/l</p> <p><math>&lt; 50 mg/l</math></p> <p>max. 5 mg/l</p> <p><math>&lt; 0,01 mmol/l</math></p> <p><math>&lt; 0,02 mg/l</math></p> <p>Gemäss Spezifikation Lieferant der Wasseraufbereitungsanlage</p>	<p>klar, farblos, frei von Schwebstoffen</p> <p>0.5-5 mmol/l</p> <p><math>\geq 9,5</math> max. 11.5</p> <p><math>&lt; 5000 \mu S/cm</math></p> <p>15 - 30 mg/l</p> <p><math>&lt; 50 mg/l</math></p> <p>max. 5 mg/l</p> <p><math>&lt; 0,01 mmol/l</math></p> <p><math>&lt; 0,02 mg/l</math></p> <p>Gemäss Spezifikation Lieferant der Wasseraufbereitungsanlage</p>

## Leitfähigkeit (*conductivity*)

Art	Leitfähigkeit ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )
Destilliertes Wasser	0
Regenwasser	5 - 30
Grundwasser (Süßwasser)	30 - 2000
Meerwasser	45.000 - 55.000

Für die grobe Schätzung der gesamten gelösten Bestandteile in mg/L in Süßwasser genügt es, die gemessene Leitfähigkeit des Wassers in Mikro-Siemens pro Zentimeter mit 0,65 zu multiplizieren.

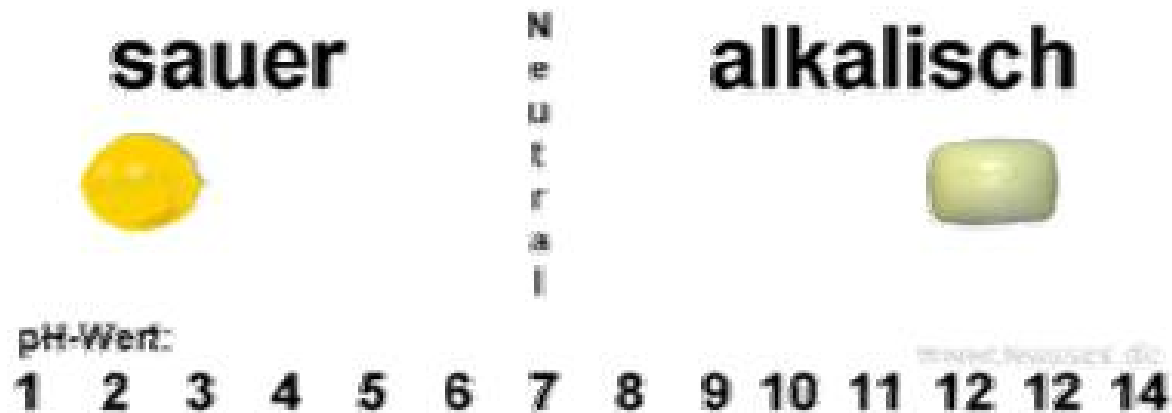
Die **elektrische Leitfähigkeit** gibt die Fähigkeit eines Stoffes an, elektrischen Strom zu leiten.

Sie ist der Kehrwert des spezifischen elektrischen Widerstandes.

Die elektrische Leitfähigkeit ist ein Maß für die Summe aller im Wasser gelösten **Ionen**, bzw. der gelösten **Salze**. Bei natürlichen Wässern verursachen die **Härtebildner** (Gesamthärte, Karbonathärte) den größten Teil der elektrischen Leitfähigkeit.

## pH-Wert

Der **pH-Wert** ist ein Maß für die Wasserstoffionenkonzentration und damit für die Säurekonzentration in wässrigen Lösungen



Der pH-Wert sagt aus, ob eine wässrige **Lösung sauer, neutral oder alkalisch** ist.



## Wasserhärte

Wasser enthält als natürliche Bestandteile - nach seinem Aufenthalt im Boden - eine Reihe gelöster Stoffe wie z.B. Kalzium und Magnesium, die je nach geologischen Verhältnissen im Untergrund anteilig unterschiedlich sind. Kalzium und Magnesium werden als Härtebildner bezeichnet; ihr Vorhandensein bestimmt die Gesamthärte im Wasser. Die Härte des Wassers wird in Millimol pro Liter (mmol/l) angegeben.

## Funktionsweise

### - Kationenaustauscher

Die erste Stufe der Entsalzung erfolgt in einem Kationenfilter, der einen starksauren Kationenaustauscher enthält. Hier werden sämtliche Kationen, wie Ca, Mg, Na, und K, gegen H-Ionen des Harzes ausgetauscht.

### - CO<sub>2</sub>-Rieseler

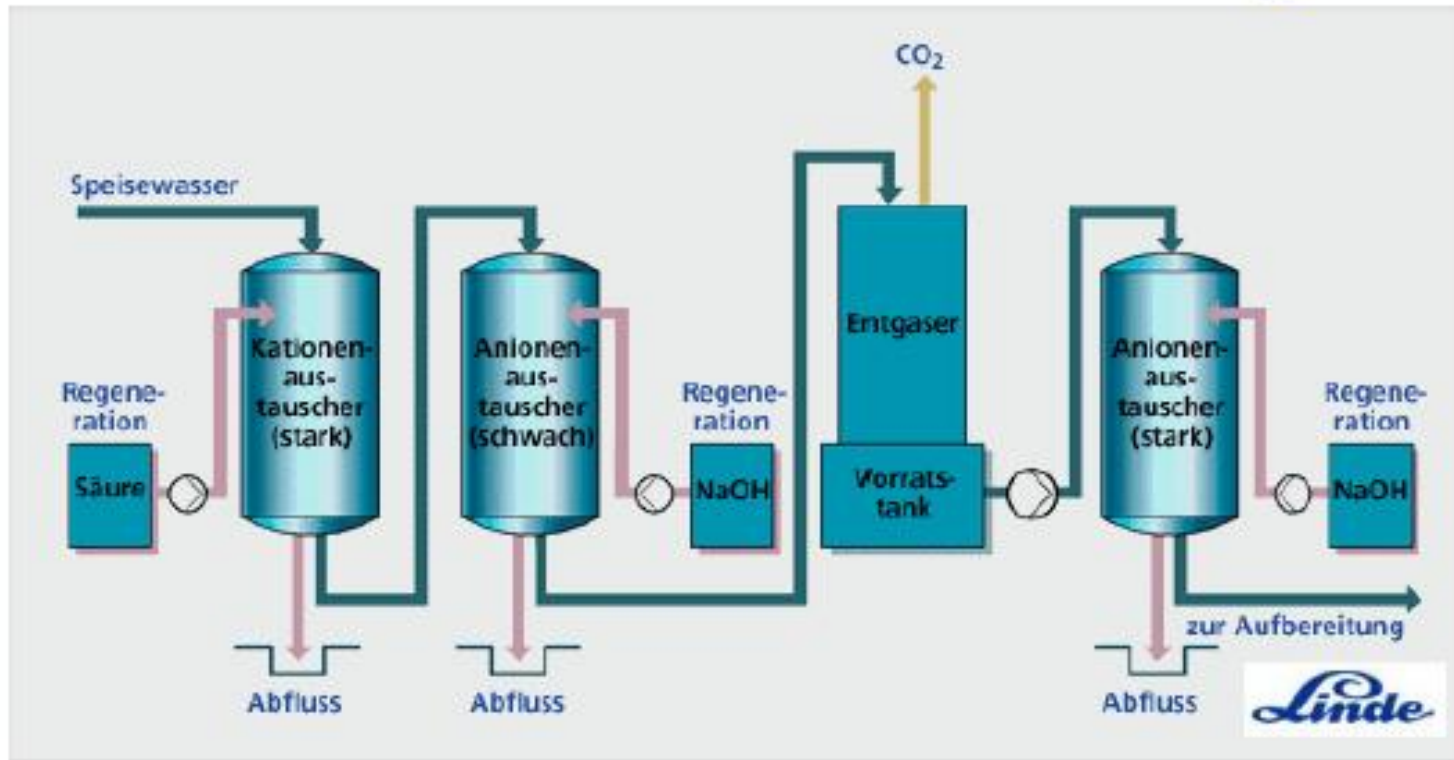
Hier wird die aus der Karbonathärte des Rohwassers freigewordene Kohlensäure ausgetrieben. Dies geschieht, indem das Wasser in einer Filterschicht fein verteilt wird, um die Wasseroberfläche zu vergrößern.

### - Anionenaustauscher

Im Anionenaustauscher folgt der Austausch der Anionen (Cl, NO<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub>, HCO<sub>3</sub> und HSiO<sub>3</sub>) des nun schon entbasten Wasser gegen die OH-Ionen des Austauschers.

# Entsalzung

## Verfahren zur Erzeugung von Kesselspeisewasser durch Einsatz von Ionenaustauschertechnologie





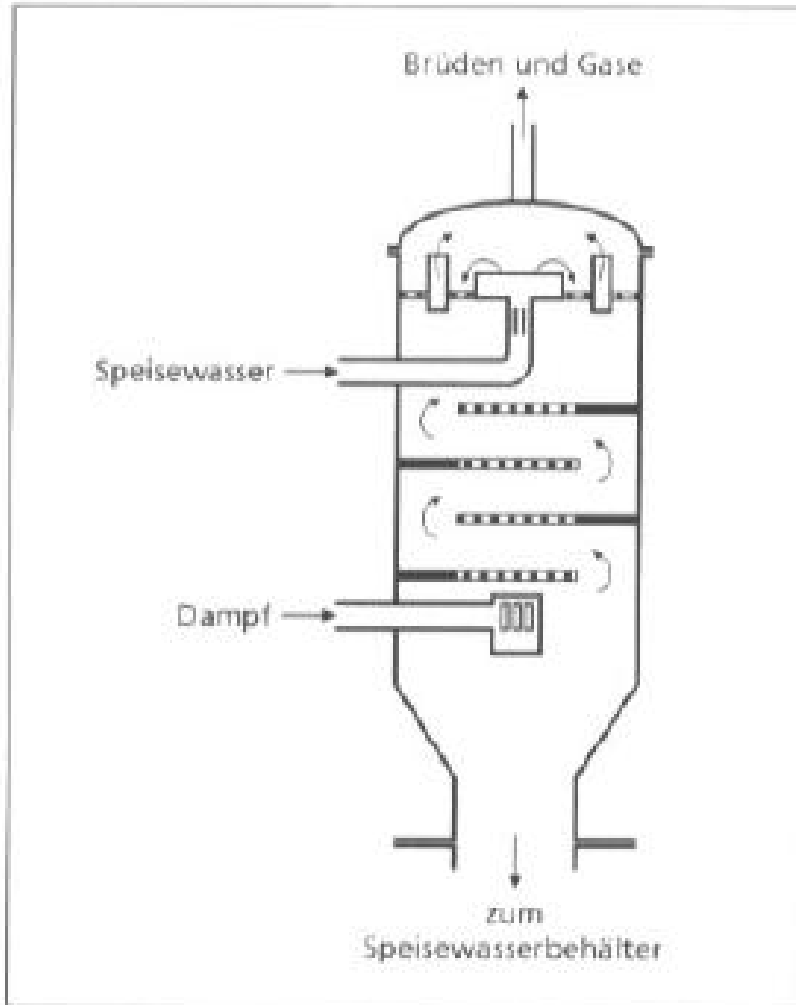
## Zweck der thermischen Entgasung

Abscheiden der im Wasser gelösten Gase, insbesondere Kohlendioxid  $\text{CO}_2$  und Sauerstoff  $\text{O}_2$ , die unerwünscht sind, weil sie Korrosionen verursachen können.

Mit steigender Temperatur nimmt die Löslichkeit der Gase im Wasser ab. Je höher ein Wasser erhitzt wird, um so mehr entweichen im Wasser enthaltene Gase.

## Wirkungsweise der thermischen Entgasung

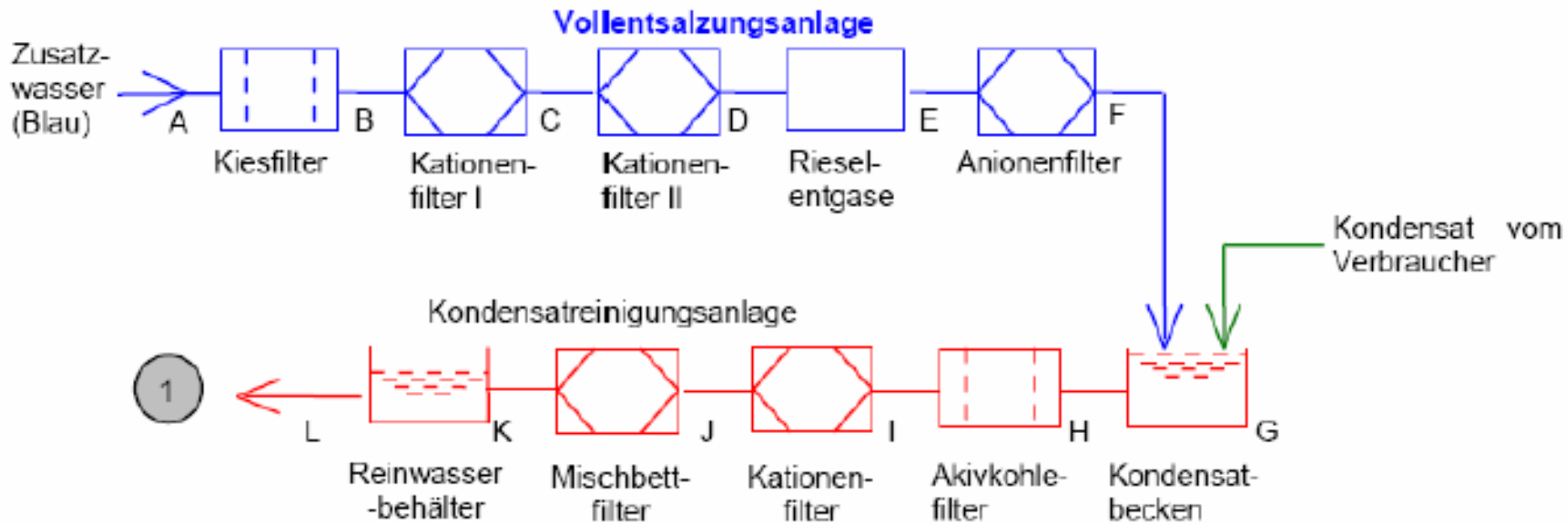
Bei der thermischen Entgasung wird das Gemisch aus Kondensat und Frischwasser über Verrieselungseinrichtungen wie Rieselkaskaden oder Füllkörpereinsätze geleitet. Im Gegenstrom hierzu wird Heizdampf in den Entgaser eingeleitet, der das Wasser auf Siedetemperatur aufheizt. Da die Löslichkeit für Sauerstoff und Kohlendioxyd im Siedepunkt des Kondensats fast null ist, gehen diese Stoffe gasförmig in den Heizdampf über und werden über den Brüdenabgang im Entgaserdom abgeführt.

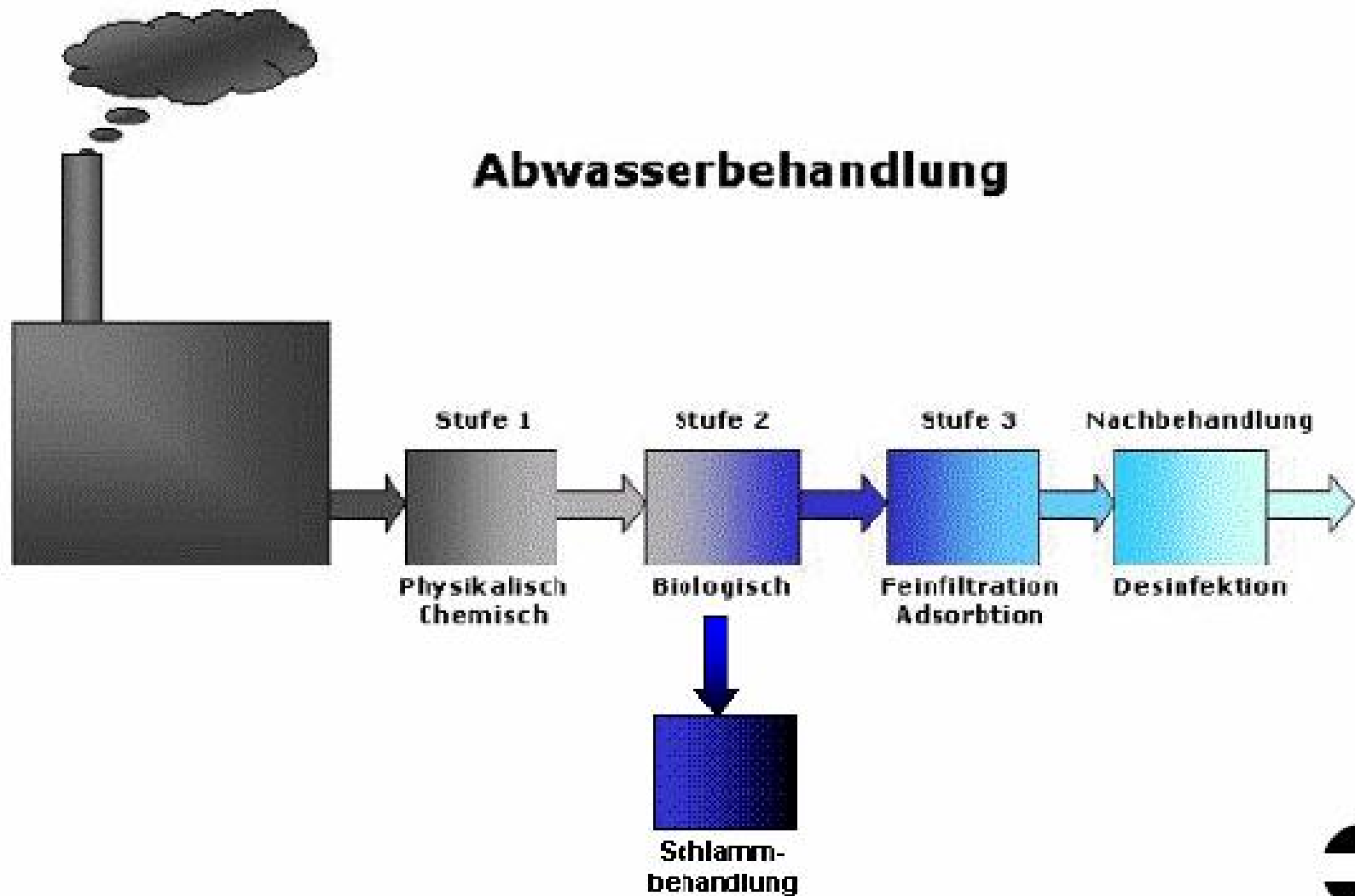


## Rieselentgaser

Rieselentgaser haben die Aufgabe ohne Zusatz von Chemikalien dem Wasser die Kohlensäure zu entziehen. Dabei werden die gelösten gasförmigen Stoffe thermisch aus dem Wasser entfernt.

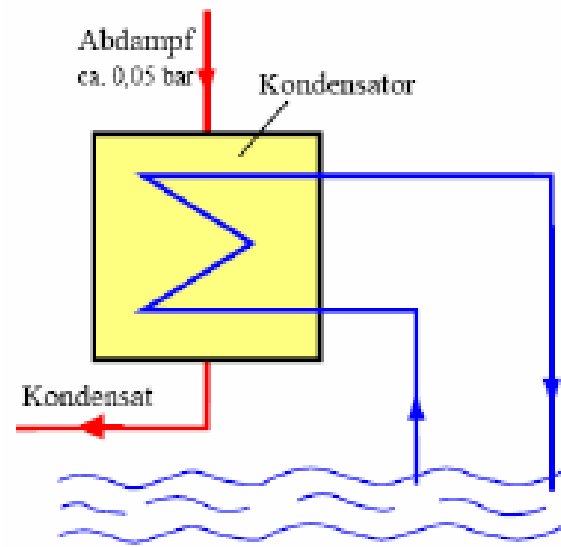
# Wasseraufbereitung



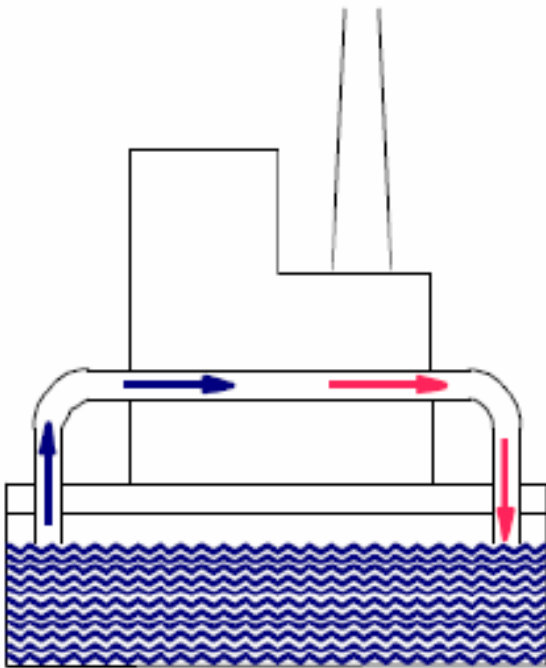


# Kühlsysteme

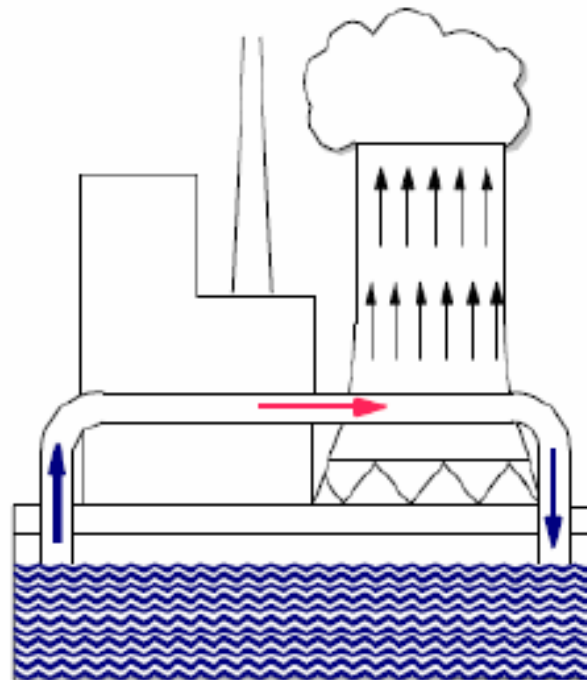
Nach Art und Verwendung des Kühlmediums können verschiedene Kühlverfahren unterteilt werden:



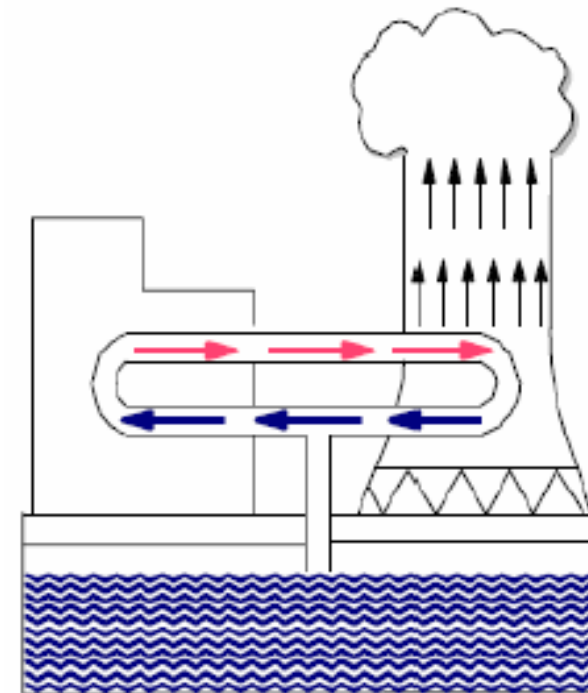
## Kühlarten bei Wärmekraftwerken



Frischwasserkühlung  
Durchlaufkühlung

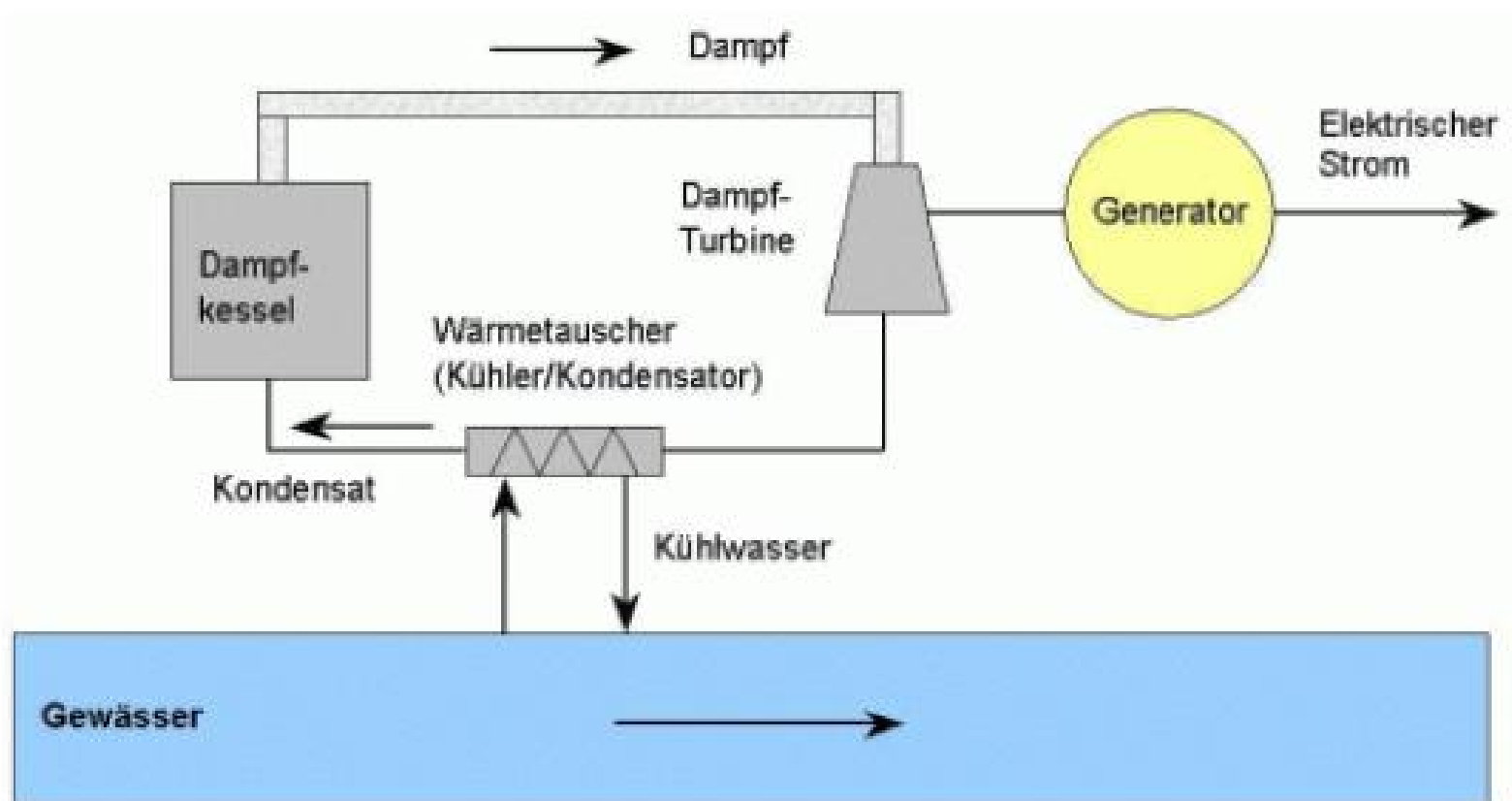


Frischwasserkühlung  
Ablaufkühlung



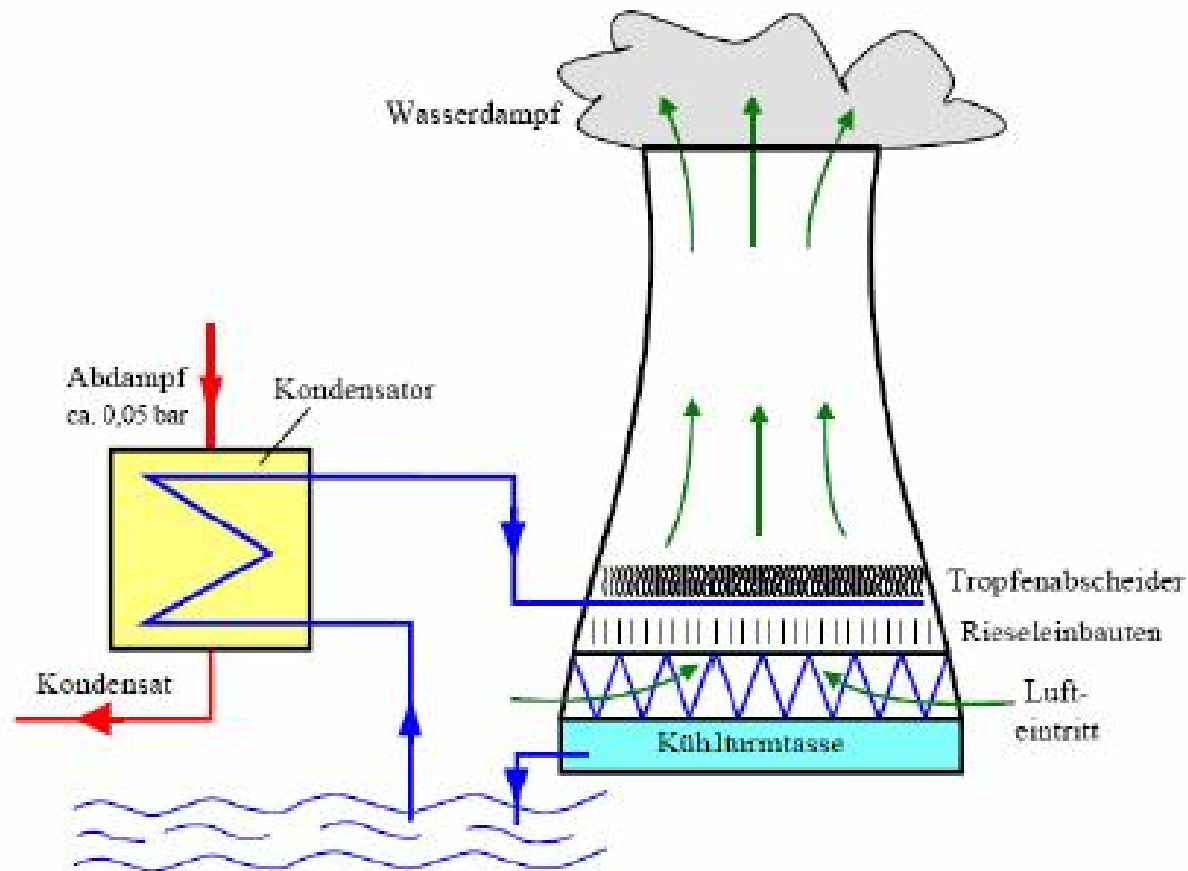
Rücklaufkühlung  
Kreislaufkühlung

# Prinzipielle Anordnung der Anlagen in einem Wärmekraftwerk bei Durchlaufkühlung

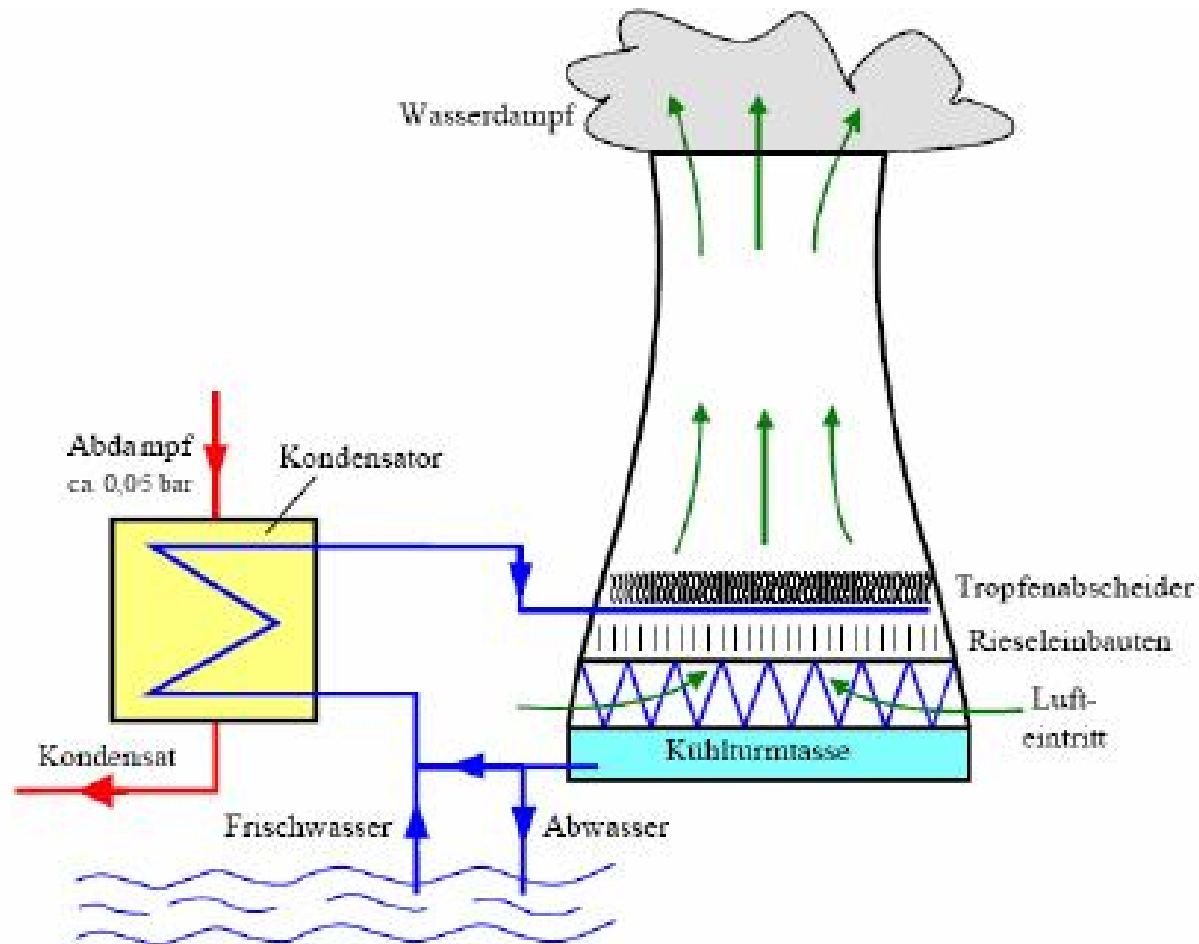




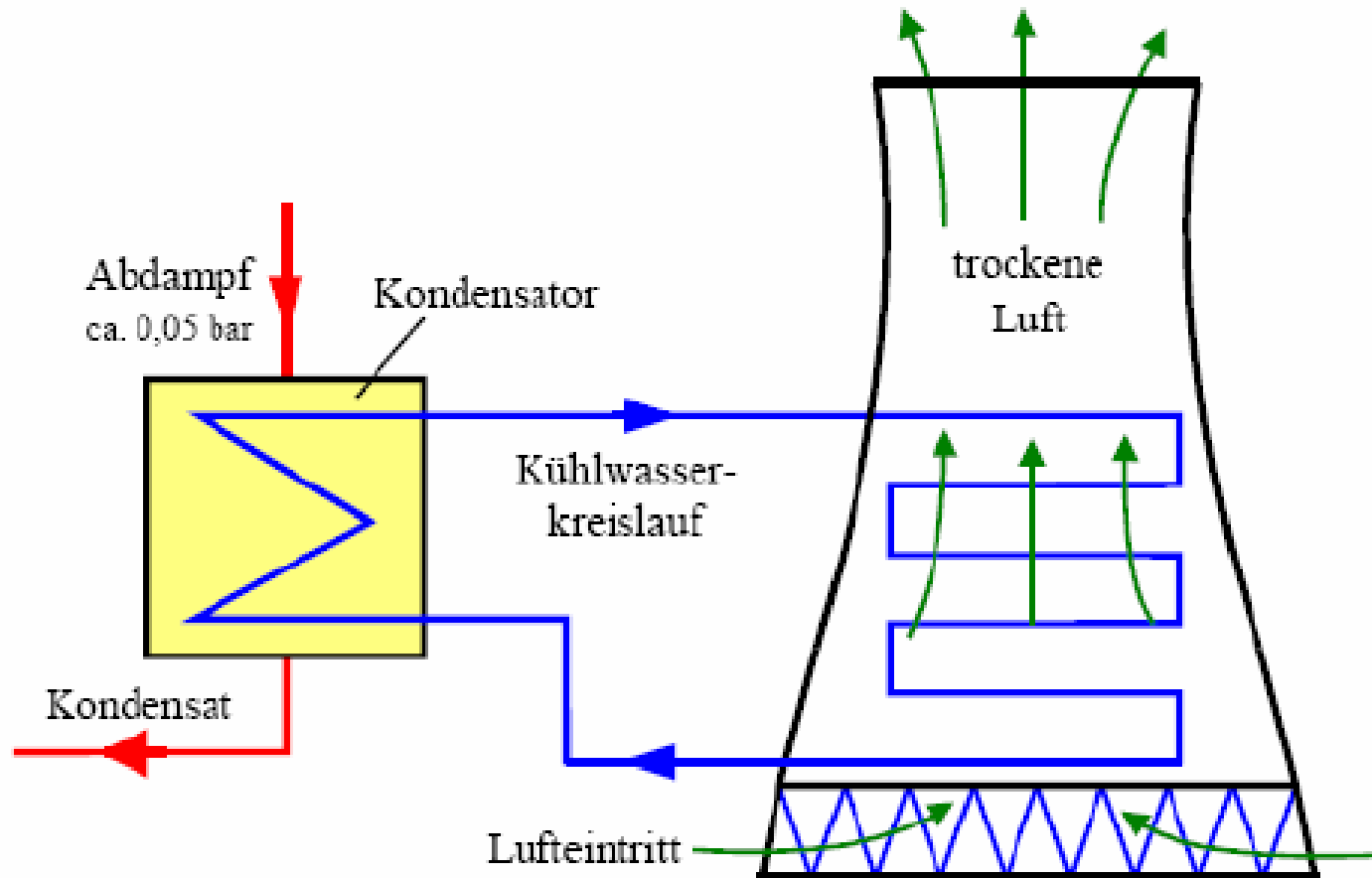
# Ablaufkühlung mit Nasskühlturm



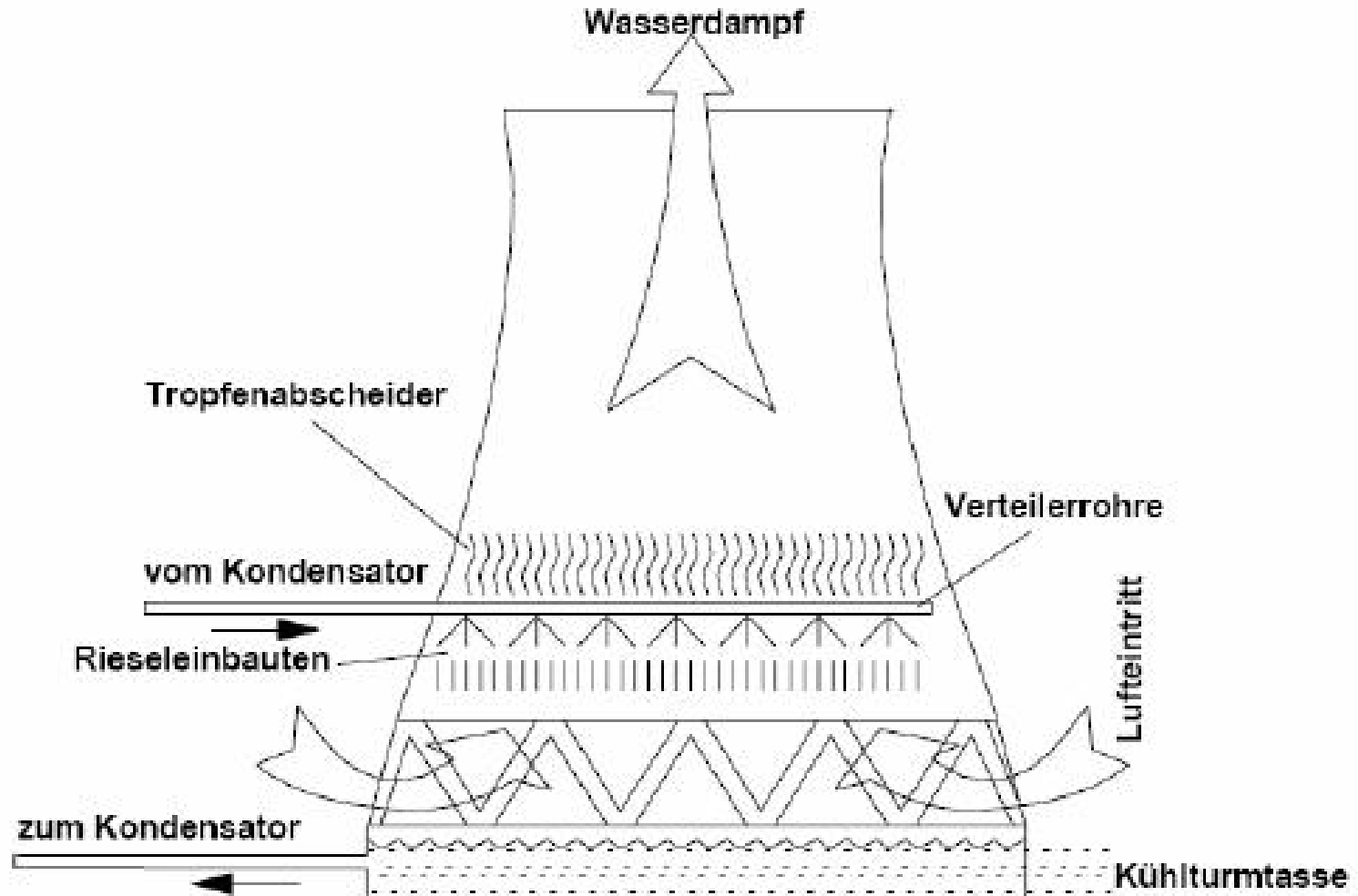
# Kreiskühlung mit Nasskühlturm

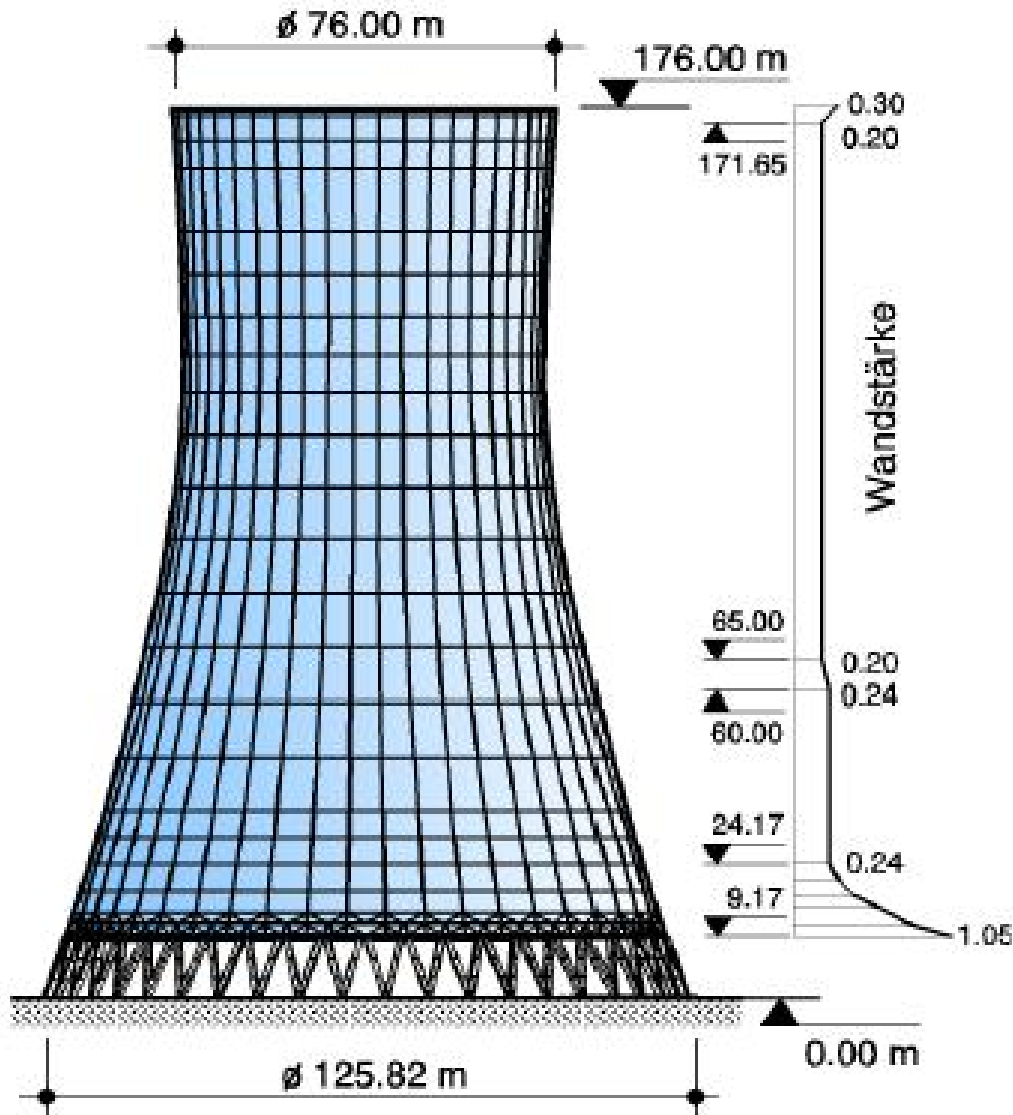


# Kreiskühlung mit Trockenkühlturm



# Naturzugkühlturm mit Nasskühlung





# Kraftwerk Boxberg IV (800 MW)

## Naturzugkühlturm

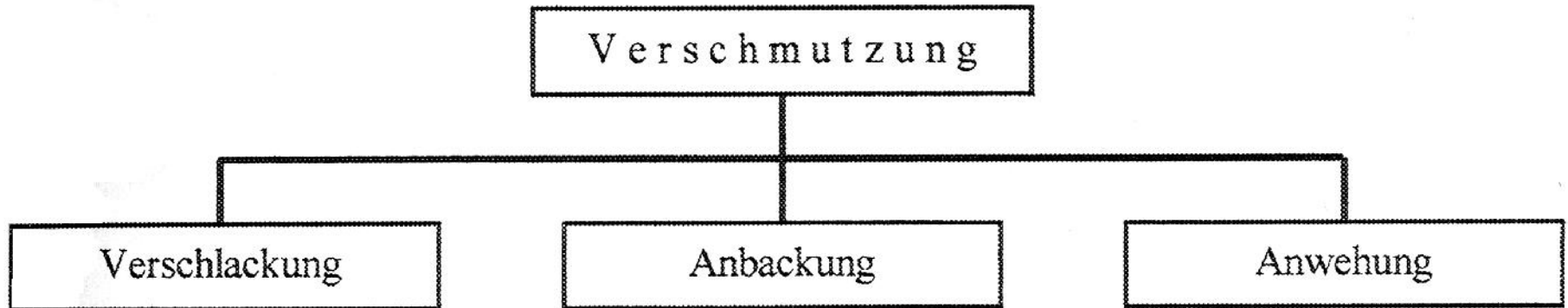


**VATTENFALL**



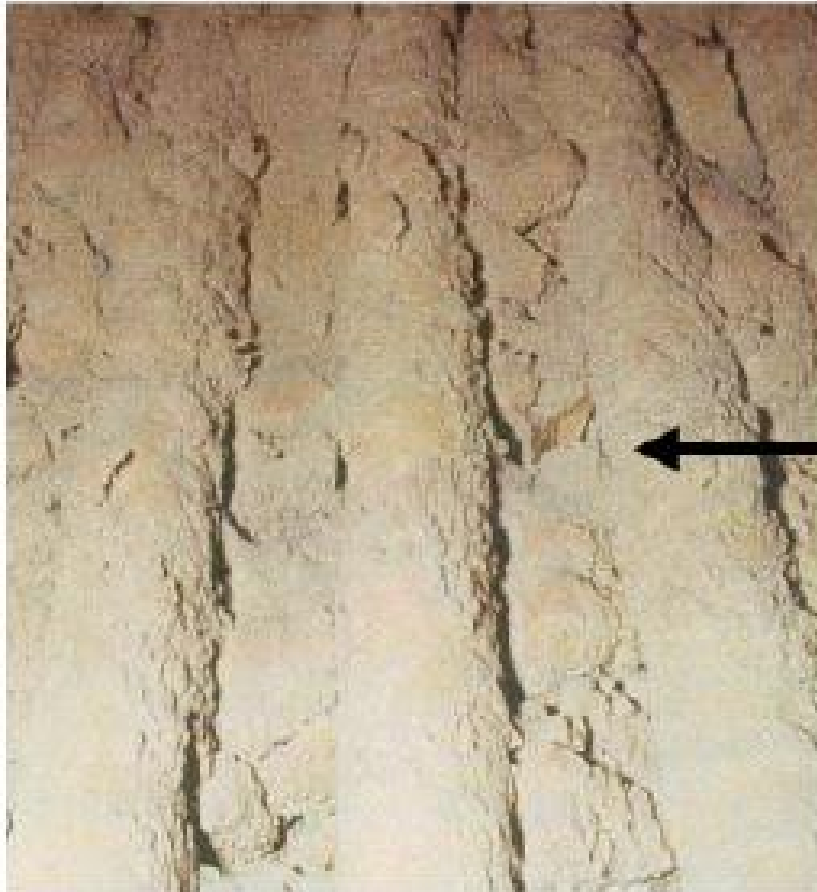
# - Korrosion und Verschmutzung -

# - Rauchgasseitige Heizflächenverschmutzung -

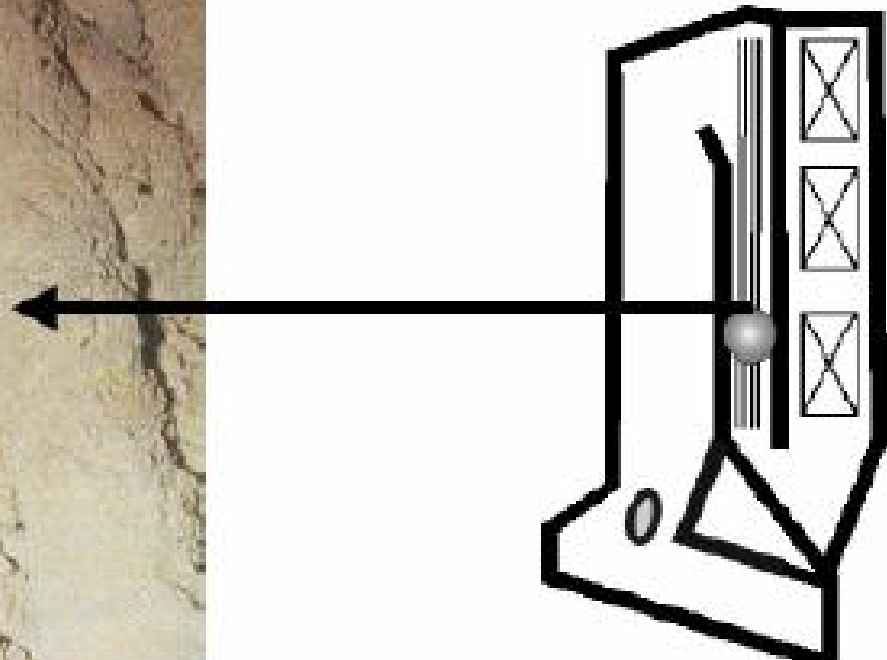




# Verschlackter Schottenüberhitzer



Ort der Aufnahme

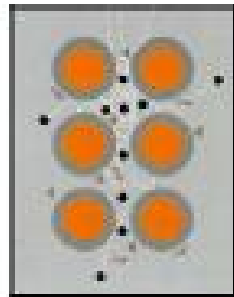


# Maßnahmen gegen Heizflächenverschmutzung



RG - Temperaturen optimieren!  
Rohrteilung beachten!  
Gasgeschwindigkeit

Reinigung bei Stillstand  
(Bürsten, Schaben, Strahlen)  
Reinigung während des Betriebes  
(Bläser, Kugelregen!)

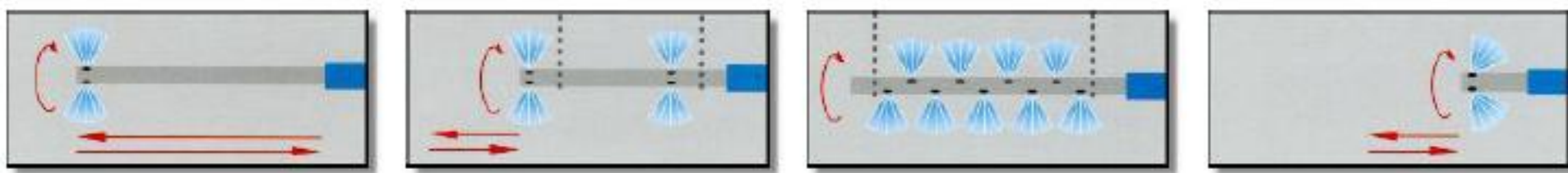


## (Rauchgasseitige) Heizflächenverschmutzung

### Heizflächenreinigungssysteme

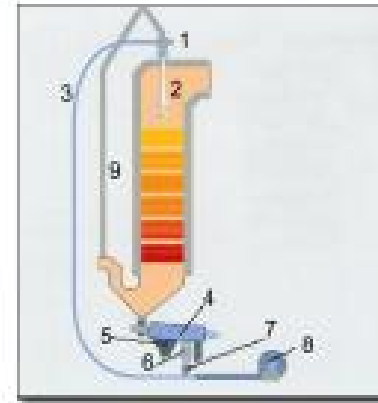
#### Rußbläser:

Dampf, Pressluft und Wasser dienen je nach Bedarf und Verfügbarkeit den Rußbläsern als Reinigungsmedium. Das unter Druck stehende Reinigungsmedium wird in den Düsen in Geschwindigkeit umgesetzt. Mit der erzeugten kinetischen Energie des Blasstrahles werden die Heizflächen gereinigt. Es gibt verschiedene Rußbläsertypen, entsprechend dem Anwendungszweck.



## Kugelregenanlage:

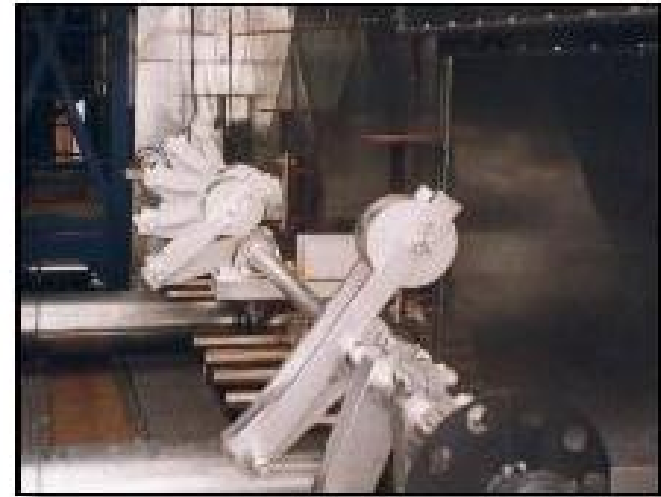
Bei einer Kugelregenanlage werden kleine Weichstahlkugeln pneumatisch in den oberen Kesselbereich gefördert. Über ein spezielles Verteilersystem durchfallen die Kugeln die Heizflächen in Schwerkraftrichtung. Durch die Fallenergie der Kugeln werden die Verschmutzungen von den Heizflächen gelöst und am Trichterablauf abgezogen.



1. Kugelabscheider
2. Verteiler
3. Förderleitung
4. Siebmaschine
5. Staubtrichter
6. Kugelsammelbehälter
7. Dosierventil mit Injektor
8. Gebläse

## Klopfeinrichtungen:

Der Einsatz dieser Reinigungseinrichtung ist vornehmlich bei waagerechten Kesselzügen üblich. Hängende Verdampfer, Überhitzer und ECO's können so durch Klopfen abgereinigt werden. Die Schlagenergie kann durch mechanisch angetriebene Hämmer erzeugt werden oder durch einen pneumatisch angetriebenen Schlagzylinder.



# - Wasserseitige Verschmutzung -

## **Bildung:**

- **aus gelösten Wasserinhaltsstoffen**
  - **Härtebildnern**
  - **anderen Salzen**
  - **Siliziumverbindungen**
- **durch Temperatur- und Druckänderung (Carbonathärte)**
- **Verdampfung von Wasser (Lösungsmittel)**

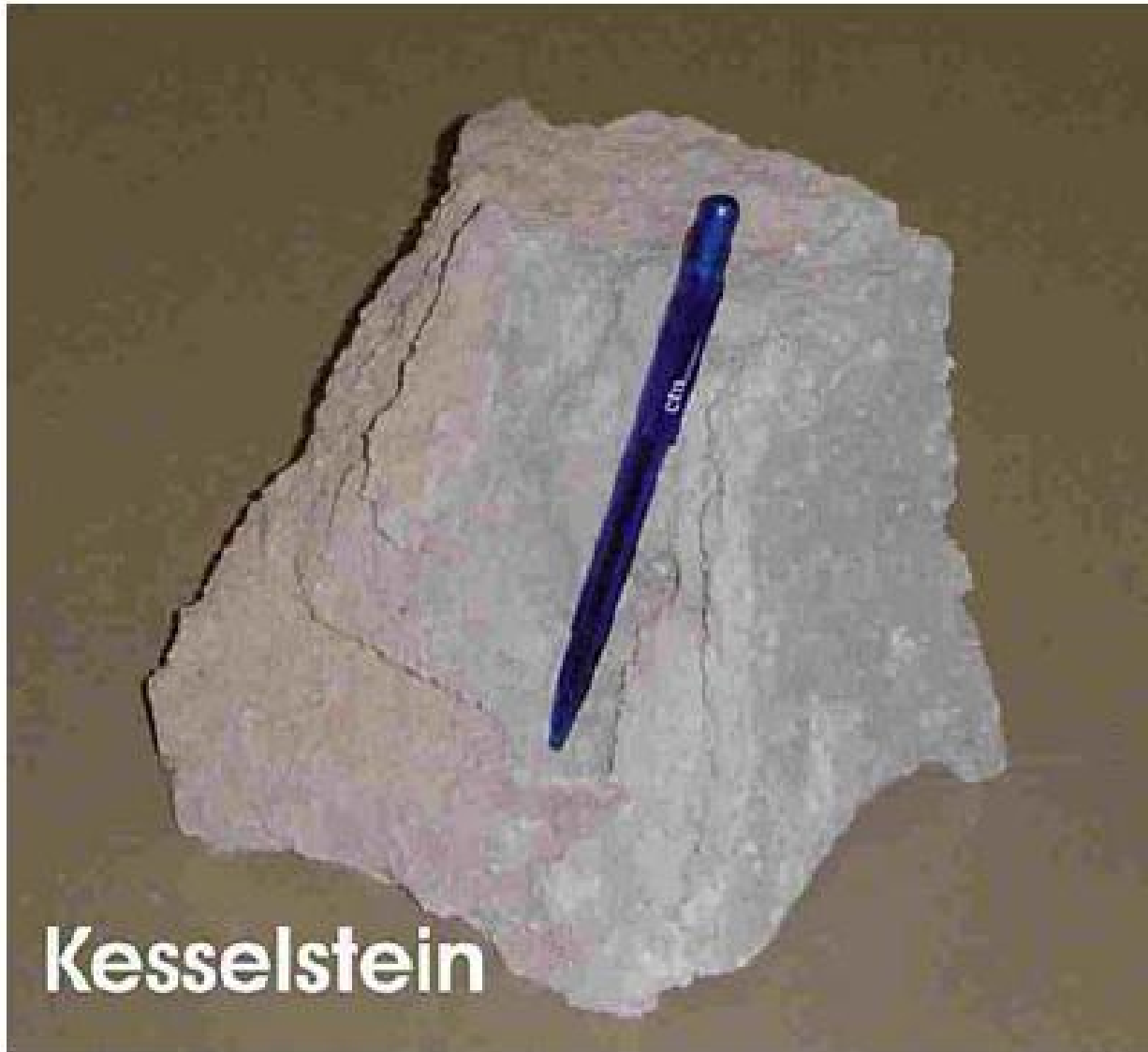
# Energieverlust durch Härtebeläge







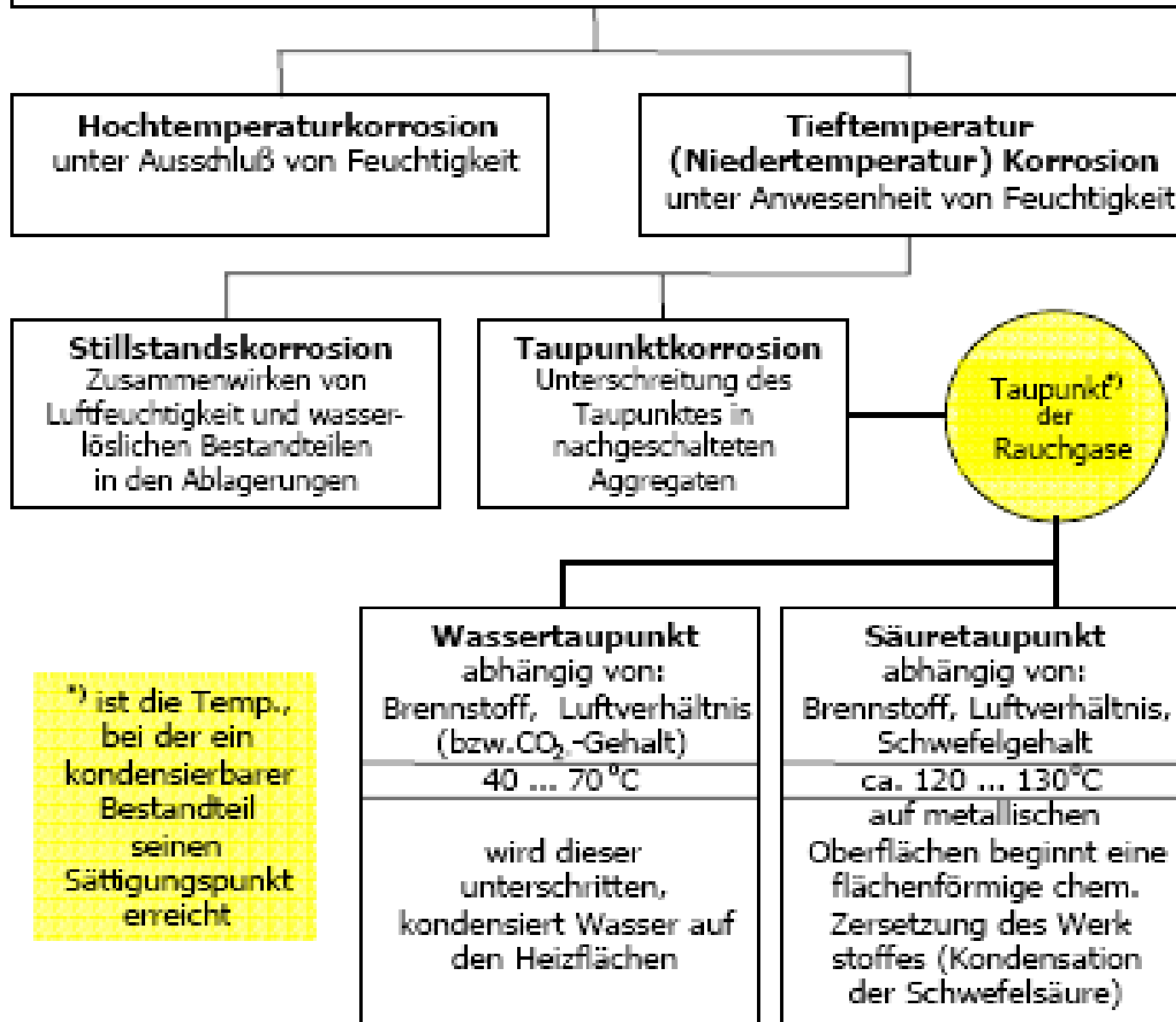




# - Korrosion -

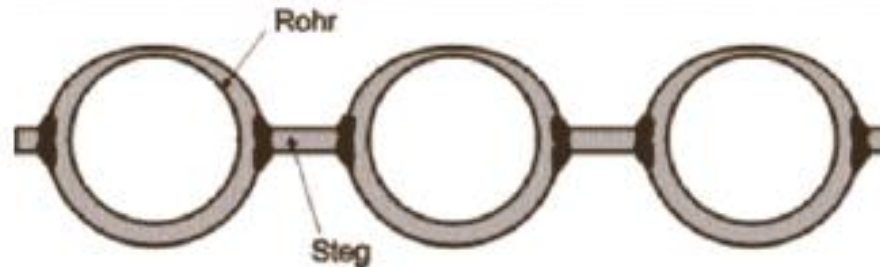
# Korrosion

Reaktion eines metallischen Werkstoffes mit seiner Umgebung, die eine messbare Veränderung des Werkstoffes bewirkt und zu einer Beeinträchtigung eines metallischen Bauteiles oder eines ganzen Systems führen kann.



<sup>\*</sup> ist die Temp.,  
bei der ein  
kondensierbarer  
Bestandteil  
seinen  
Sättigungspunkt  
erreicht

## Erosions- und Korrosionserscheinungen an einer Flossenrohrwand



Quelle: <http://archiv.tu-chemnitz.de/pub/1999/0034/data/>

Die Kessel von Kraftwerken und speziell von Müllverbrennungsanlagen unterliegen durch Angriffe der Rauchgase, der Feststoffe im Rauchgasstrom und der Brennstoffe lokal erhöhter Erosion und Korrosion. Die Wandungen der einzelnen Rohre der Membran- oder Flossenrohrwände werden dadurch stark geschwächt.

# - Wasserseitige Korrosion -

# Grundtypen der Wasser-/dampfseitigen Korrosion

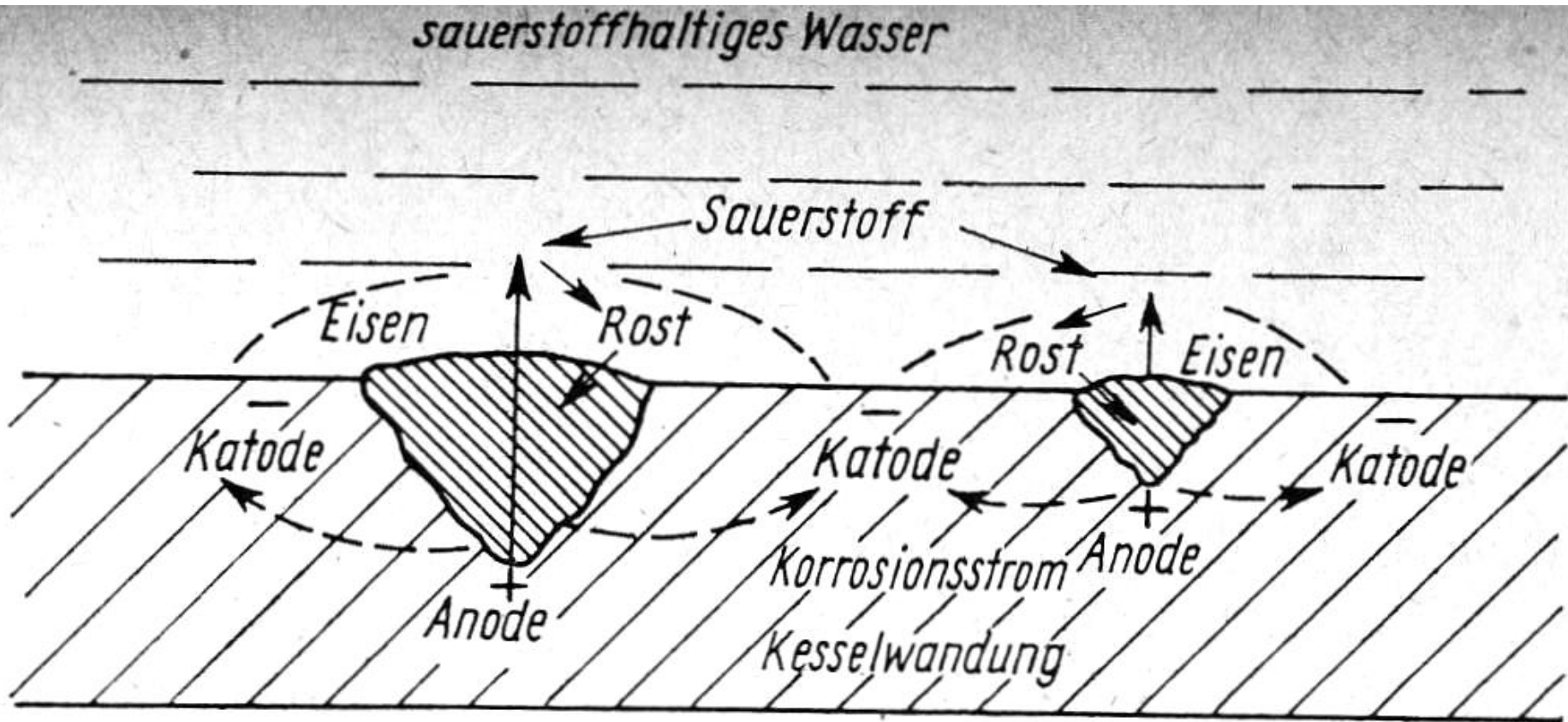
Art der Korrosion	chemische Grundreaktion	wo tritt die Korrosion auf?	Abhilfe, chem. Fahrweise
Säurekorrosion	$\text{Fe} + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{Fe}^{++} + \text{H}_2$	wässrige Lösungen <sup>1)</sup> d.h. Wasser und Nassdampf	1) pH-Wert erhöhen (alkal. Fahrweise des Speisewassers) 2) Mindest-pH-Wert einhalten (neutrale und kombinierte Fahrweise des Speisewassers)
Sauerstoffkorrosion		wässrige Lösungen, jedoch nicht bei Siedezustand <sup>2)</sup>	a) O <sub>2</sub> -Gehalt minimieren (Hydazin $\text{N}_2\text{H}_4 + \text{O}_2 \rightarrow \text{N}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ ) b) Sehr gutes Speisewasser (bei neutraler bzw. kombinierter Fahrweise)
Heißwasseroxydation Heißdampfxydation	$3\text{Fe} + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 + 4\text{H}_2$	höhere Temperaturen (Beginn ab ca. 250 °C)	a) höher legierte Werkstoffe b) stabile Magnetitschutzschicht (Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> )

<sup>1)</sup> d.h. nicht im Überhitzer, nicht im überhitzten Teil der Turbine

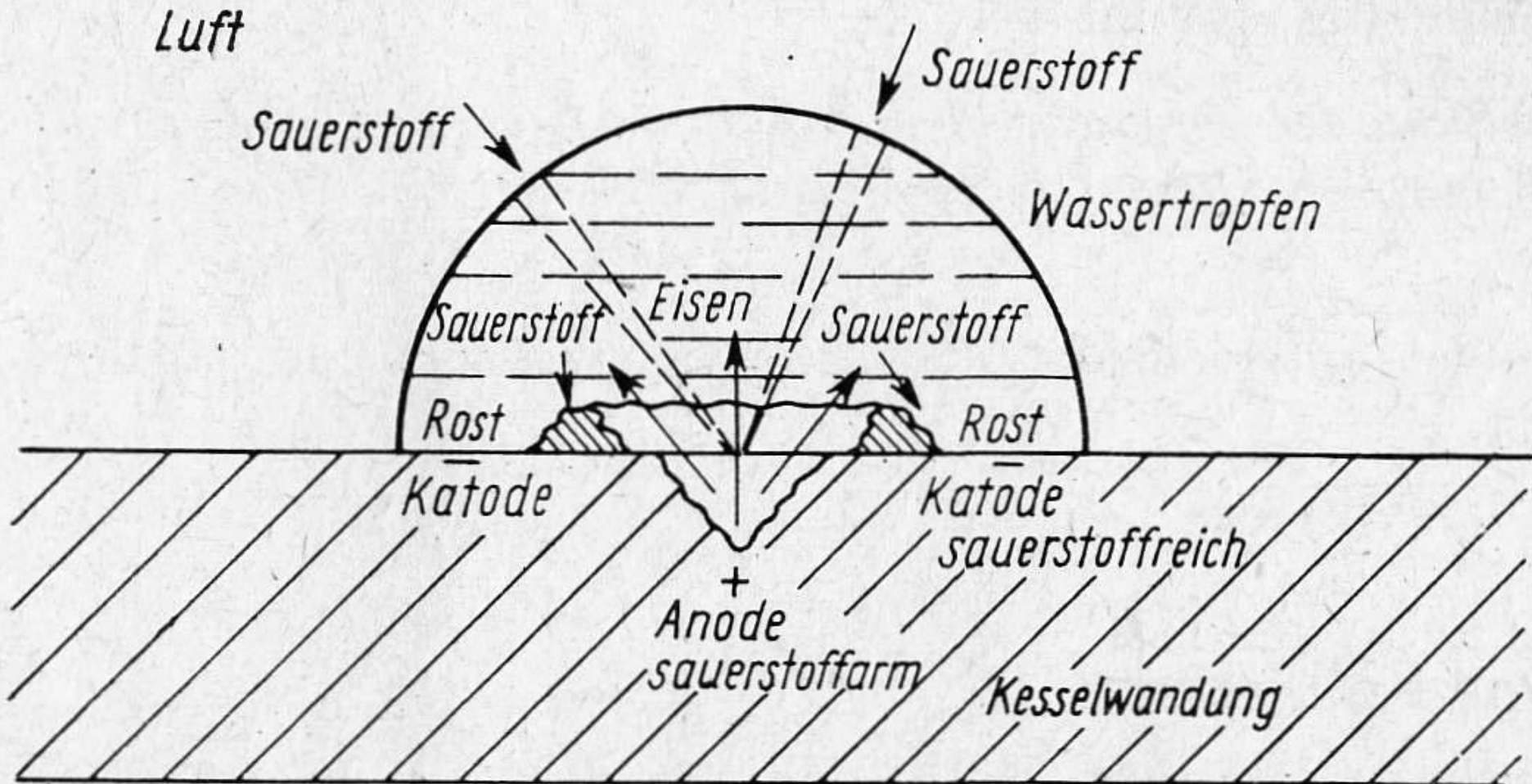
<sup>2)</sup> d.h. nicht im Verdampfer ab Verdampfungsbeginn, nicht im überhitzten Teil der Turbine



# Korrosion in sauerstoffhaltigem Wasser



# Korrosion am Übergang Luft-Wasser-Stahl





## Spannungsrisskorrosion im Rohrinneren

Diese Korrosionsart entsteht z.B. dann, wenn sich das Kesselwasser durch Verdampfung in einem Spalt oder unter Ablagerungen aufkonzentriert.



### Säureangriff in einem wasserseitigen Kesselrohr

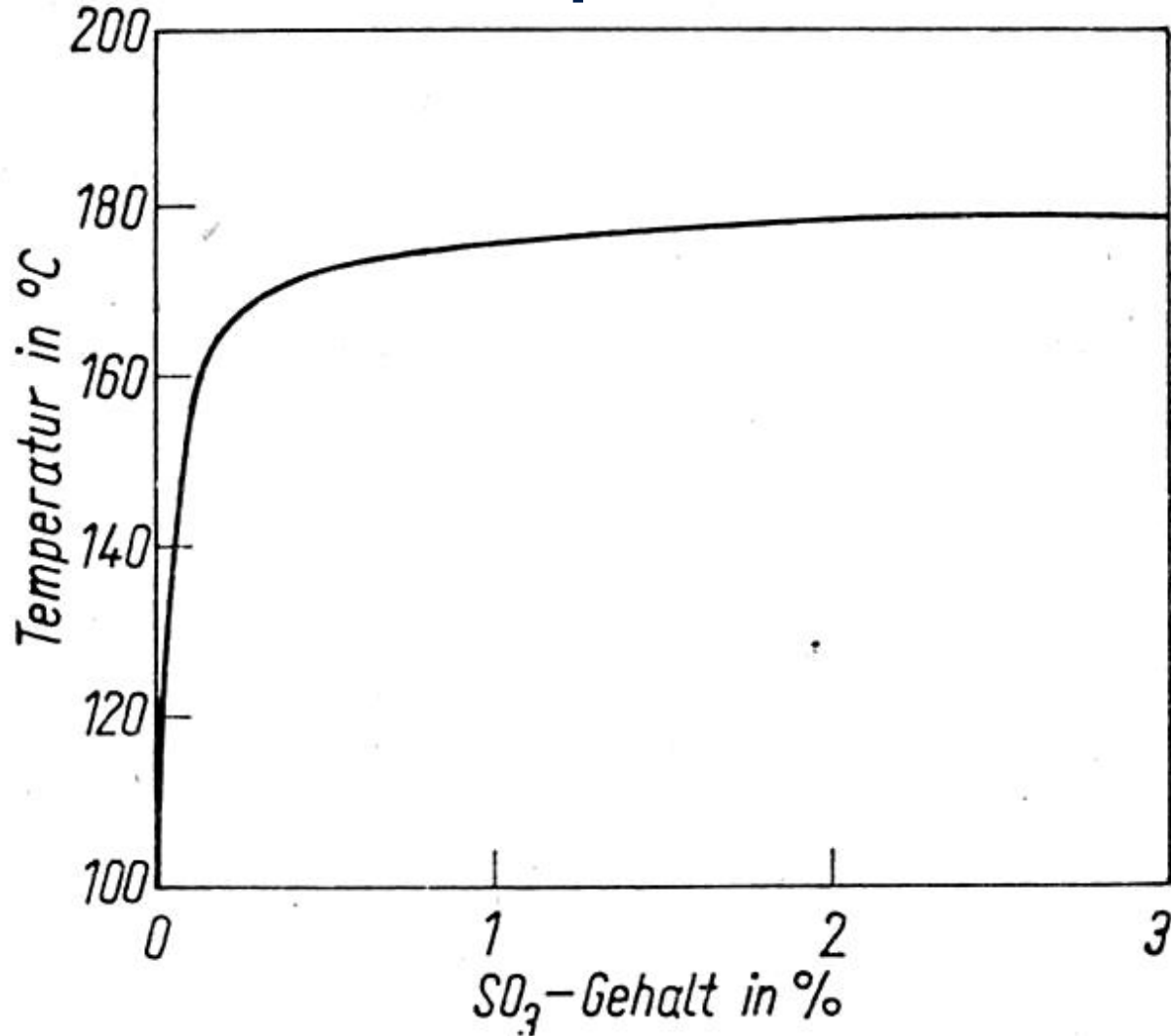
Kesselreinigungen mit Säuren oder Leckagen von Mineralsäuren im Kessel führen zu extremer Flächenkorrosion. Bei dieser Schadensbeobachtung sollte der Anlagenteil außer Betrieb genommen.

# - Rauchgasseitige Korrosion -

# Rauchgasseitige Korrosion:

- **Hochtemperaturkorrosion**
  - **durch Alkalien (Salzkohle, Halmgut...) oder Vanadium (Rohöl, schweres Heizöl) im Rauchgas**
  - **Auflösen von Metallen, etwa Stahl**
  - **verstärkt bei flüssigen Schlacken**
- **Taupunktkorrosion**
  - **bei Unterschreiten des Taupunktes kondensieren Flüssigkeiten aus (Wasser oder Säure bei SO<sub>2</sub>- oder HCl-Gehalt)**
  - **Säurekorrosion**

# Abhängigkeit des Säuretaupunktes vom Schwefelgehalt



# - Korrosionsvorbeugung -



## Stillstandskorrosion

Vermeidung durch

Trockenkonservierung

Nasskonservierung

lange Stillstandszeiten

kurze Stillstandszeiten  
(bis zu 6 Monate)



„Austrocknen“  
des Kessels



Sauerstoffbindemittel im  
Kesselwasser

## Verbrennung und Dampferzeugung (Fernstudium)

Kesseltyp	chemische Konditionierung, Fahrweise	Sauerstoff
Umlaufkessel	<p><b>Alkalische Fahrweise (pH ca. 9,5)</b>                      Feststoffalkalisierung (Natriumphosphat / NaOH)                      allein oder zusammen mit flüchtiger Alkalisierung (NH<sub>3</sub>)                      nur flüchtige Alkalisierung (sehr gutes Speisewasser                      z.B. Kondensatreinigung und kein Kupfer im                      Kondensator)</p>	<p>keine (sehr gutes Speisewasser)                      chemische Sauerstoffeinbindung (Hydrazin);                      verhindert Sauerstoffkorrosion</p> <p>keine (sehr gutes Speisewasser)                      chemische Sauerstoffeinbindung (Hydrazin)</p>
Durchlaufkessel	<p><b>Alkalische Fahrweise (pH ca. 9,5)</b>                      da keine Trommel, nur flüchtige Alkalisierungsmittel                      (NH<sub>3</sub>) möglich</p>	<p>keine (sehr gutes Speisewasser)                      chemische Sauerstoffeinbindung (Hydrazin)</p>
	<p><b>neutrale Fahrweise (pH ca. 7)</b>                      bei sehr gutem Umlaufwasser (Kondensatreinigung)</p>	<p>Sauerstoffzugabe (gasförmig oder H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)                      damit reagiert Fe(II) zu Fe(III)</p>
	<p><b>kombinierte Fahrweise</b>                      bei sehr gutem Umlaufwasser (Kondensatreinigung)                      flüchtige Alkalisierungsmittel (NH<sub>3</sub>)</p>	<p>Sauerstoffzugabe (gasförmig oder H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)                      damit reagiert Fe(II) zu Fe(III)</p>