



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

Institut für Energietechnik, Professur Verbrennung, Wärme- und Stoffübertragung

Verbrennung und Dampferzeugung

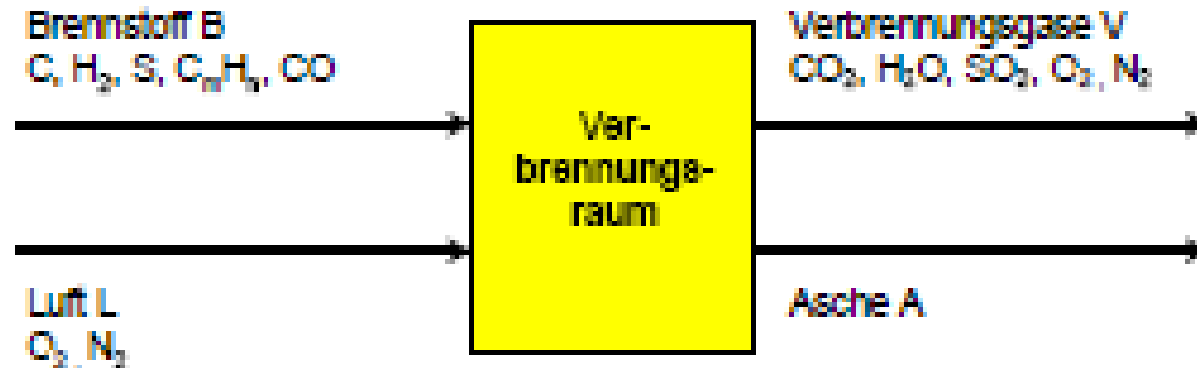
**- universitäres Fernstudium -
Verbrennung, Vergasung, Pyrolyse**



Eine **Verbrennung ist eine schnelle Redoxreaktion eines Brennstoffes mit Sauerstoff unter Abgabe von Wärme, bei der die Oxidation bis zur höchsten erreichbaren Oxidationsstufe erfolgt.**

- *Grundlagen* -

Verbrennungsprozesse sind irreversible chemische Reaktionen verschiedener Stoffe mit Sauerstoff



Vollständige Verbrennung unter konstantem Druck in einem offenen System

Brennbare Bestandteile:

■ bei festen und flüssigen Brennstoffen

Kohlenstoff	C
Wasserstoff	H ₂
Schwefel	S

■ bei Brenngasen

Kohlenmonoxid	CO
Kohlenwasserstoff	C _n H _m
Wasserstoff	H ₂
Schwefelwasserstoff	H ₂ S

Nicht brennbare Bestandteile sind ...

**) fördert aber die Verbrennung*

Kohlendioxid	CO ₂
Stickstoff	N ₂
Sauerstoff *)	O ₂



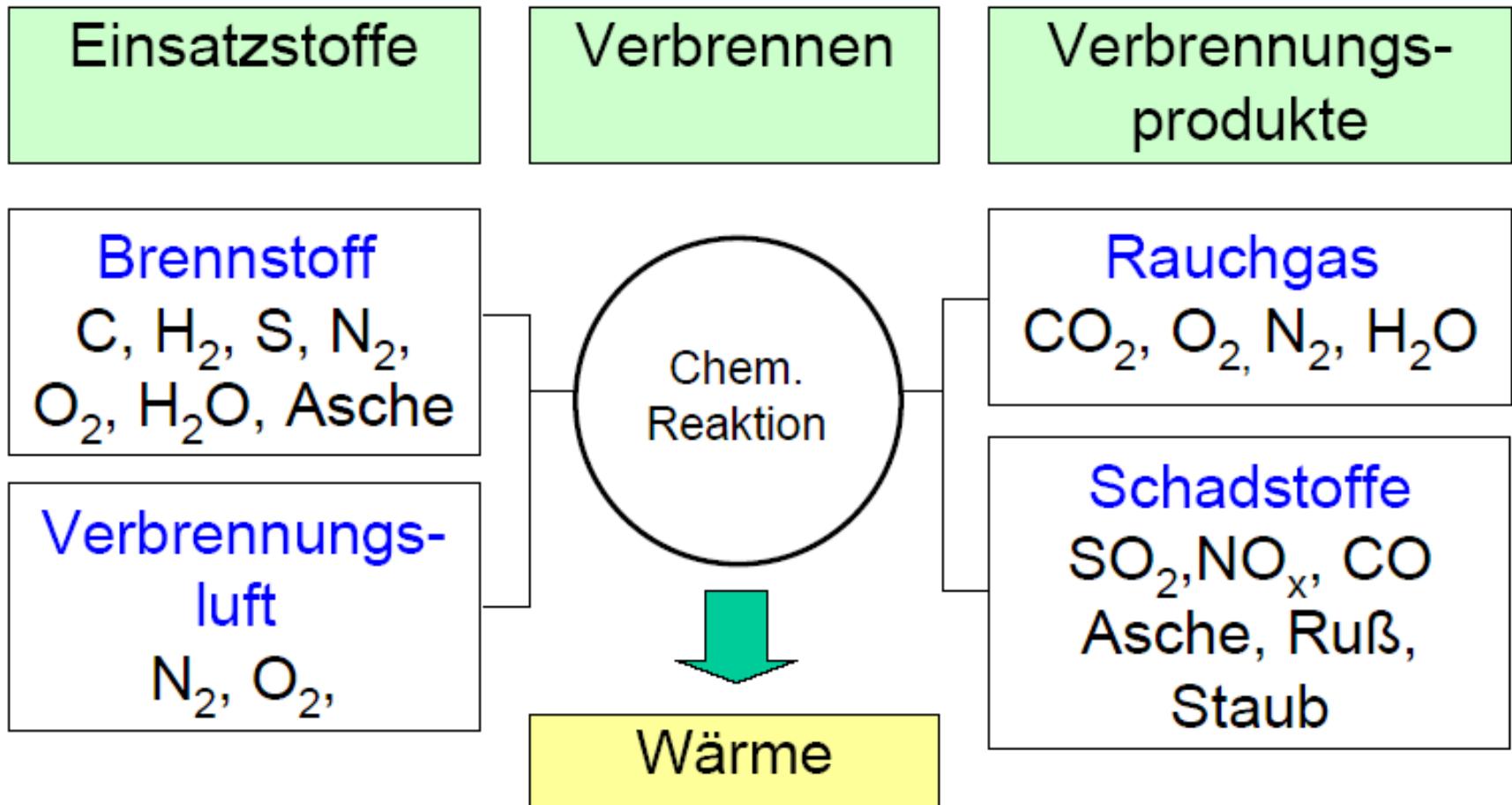
Verbrennung typischer Bestandteile von Brenngasen:



Voraussetzungen der Verbrennung:

- **Brennbares Material in ausreichender Menge**
- **Oxidationsmittel, meist Sauerstoff**
- **Das richtige Mengenverhältnis des brennbaren Stoffes mit der Umgebungsluft oder dem reaktiven Gas**
- **Oxidationsmittel und brennbares Material müssen gut vermischt sein.**

Verbrennungsreaktionen



Der Verbrennungsvorgang wird durch Erwärmung des Brennstoffes

- auf seine Zündtemperatur,
- durch einen Zündfunken oder
- eine Zündflamme

eingeleitet und durch die frei werdende Wärme weiter unterhalten

Eine **vollständige Verbrennung** führt komplett bis zu den höchsten Oxidationsstufen CO_2 , H_2O und SO_2 .

Bei einer **unvollständigen Verbrennung** bleiben Verbindungen niedrigerer Oxidationsstufe erhalten wie z.B. CO , Ruß, Teer...

Bei einer **unvollkommenen Verbrennung** bleibt ungenutzter Brennstoff übrig.

Für eine möglichst vollständige Verbrennung der eingesetzten Brennstoffe müssen einige Bedingungen erfüllt sein:

- ausreichend große Luftmenge
- ausreichend großer Sauerstoffgehalt in der Luft
- ausreichend bemessener Brennraum
- Abführung der Abgase
- Einstellung der Zündtemperatur zur Einleitung der Verbrennungsluft
- ausreichend hohe Reaktionsgeschwindigkeit zur Umsetzung des Brennstoffes

Luftzahl

ist das Verhältnis zwischen tatsächlichem und theoretischem Luftvolumenstrom bzw. Luftmassenstrom

$$n = \frac{\dot{V}_L}{\dot{V}_{L\text{theor}}} = \frac{\dot{m}_L}{\dot{m}_{L\text{theor}}}$$

Die Luftzahl ist abhängig

- vom Brennstoff
- von der Konstruktion der Feuerung
- von der momentanen Kesselleistung

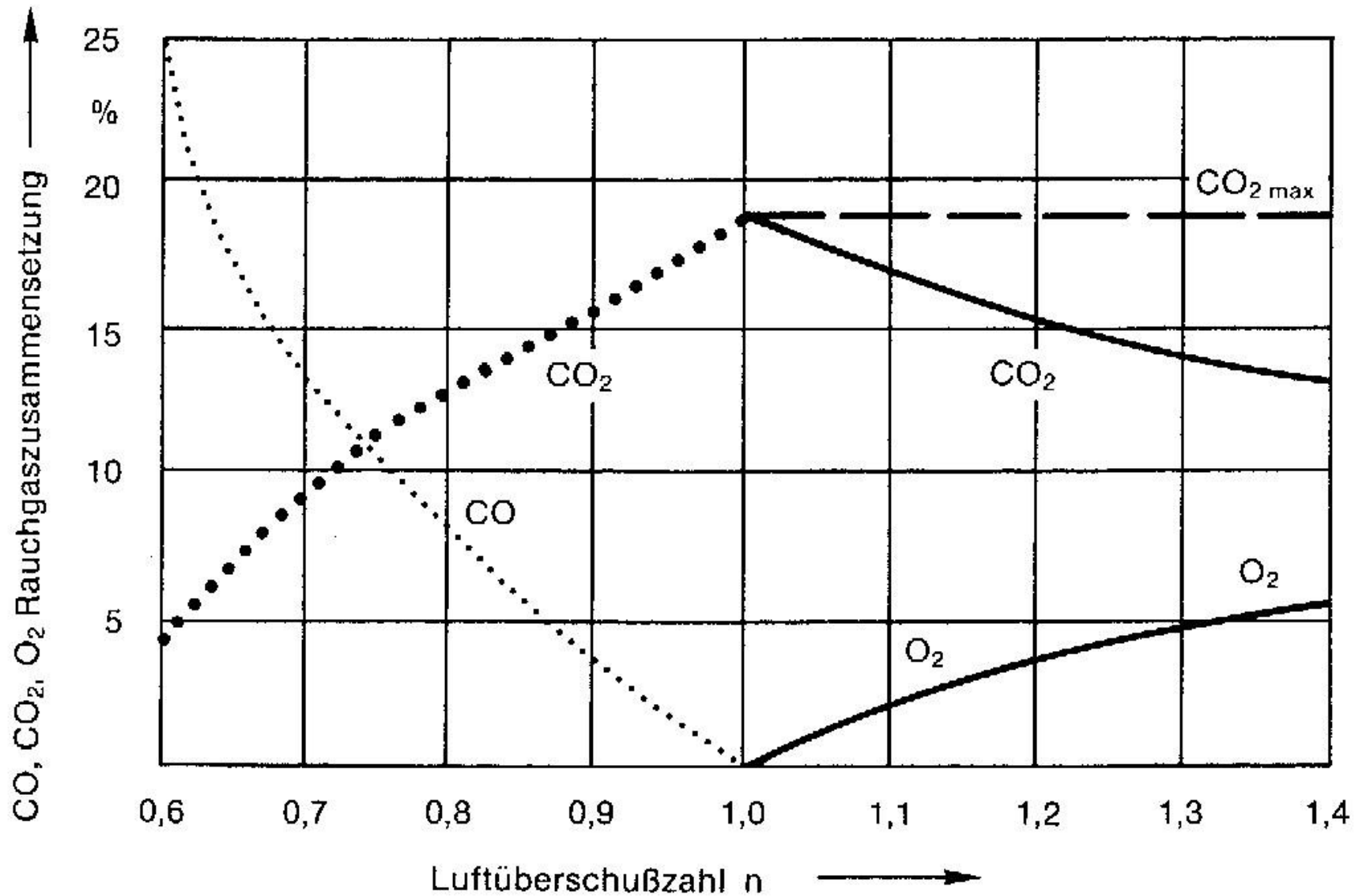
Wirkung einer Luftzahländerung auf die Verbrennung

bei steigender Luftzahl	bei fallender Luftzahl
CO ₂ -Gehalt ↓	CO ₂ -Gehalt ↑
O ₂ -Gehalt ↑	O ₂ -Gehalt ↓
Feuerraumtemperatur ↓	Feuerraumtemperatur ↑
Eigenbedarf der Ventilatoren ↑	Eigenbedarf der Ventilatoren ↓
Luft- und Rauchgasstrom ↑	CO-Verlust ↑
Abgasverlust ↑	

Verbrennung und Luftzahl λ

Beispiele typischer Luftzahlen

Verbrennungstyp	Luftzahl λ
Feuerung auf einem Rost (unbeweglich)	1,3 ... 1,7
Feuerung mit Wanderrost	1,3 ... 1,4
Ölbrenner	1,2 ... 1,5
atmosphärischer Gasbrenner	1,2 ... 1,5
Kohlenstaubfeuerung	1,1 ... 1,3
Gas-Gebläsebrenner	1,1 ... 1,3
Verbrennungsmotor	0,8 ... 1,2



- Verbrennungsablauf -

Verbrennungsvorgang

```
graph TD; A[Verbrennungsvorgang] --> B[homogen]; A --> C[heterogen];
```

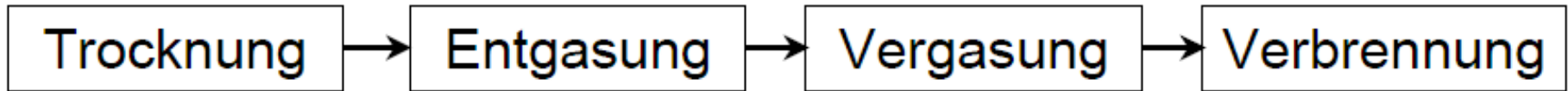
homogen

heterogen

Reaktionspartner
besitzen gleichen
Aggregatzustand
(z. B. Gasverbrennung)

Reaktion zwischen dem
festen oder flüssigen
Brennstoff und dem
Oxidator Sauerstoff

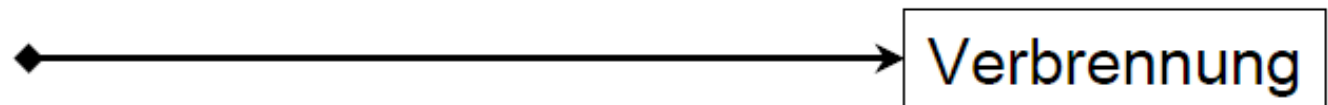
Fester Brennstoff :



Flüssiger Brennstoff :



Gasförmiger Brennstoff :



Trocknung

Durch die Erwärmung wird dem feuchten Brennstoff das Wasser entzogen. Die Umwandlung des im Brennstoff enthaltenen Wassers in Wasserdampf verbraucht viel Wärmeenergie (2.257 kJ/kg Wasser).

Entgasung

Bei weiterer Erwärmung werden flüchtige Verbindungen ausgetrieben, es kommt es zur Bildung von Schwelgasen, die auch toxische aromatische Kohlenwasserstoffverbindungen enthalten können. Als feste Rückstände fallen Koks und mineralische Reststoffe an.

Vergasung

Bei weiterer Erwärmung wird der aus dem Entgasungsprozess zurückgebliebener feste Kohlenstoff (Koks) mit dem vorhandenen Wasserdampf und Kohlendioxid (CO_2) zu dem brennbaren Gas Kohlenmonoxid (CO) umgesetzt.

Verbrennung

Bei hoher Temperatur werden die durch Entgasung und Vergasung entstandenen brennbaren Gase durch Reaktion mit dem Sauerstoff aus der Verbrennungsluft zu Kohlendioxid (CO_2) und Wasser (H_2O) umgesetzt. Bei einer vollständigen Verbrennung (ausreichende Zufuhr von Sauerstoff!) wird die im Abfall enthaltene Energie in Wärme freigesetzt.

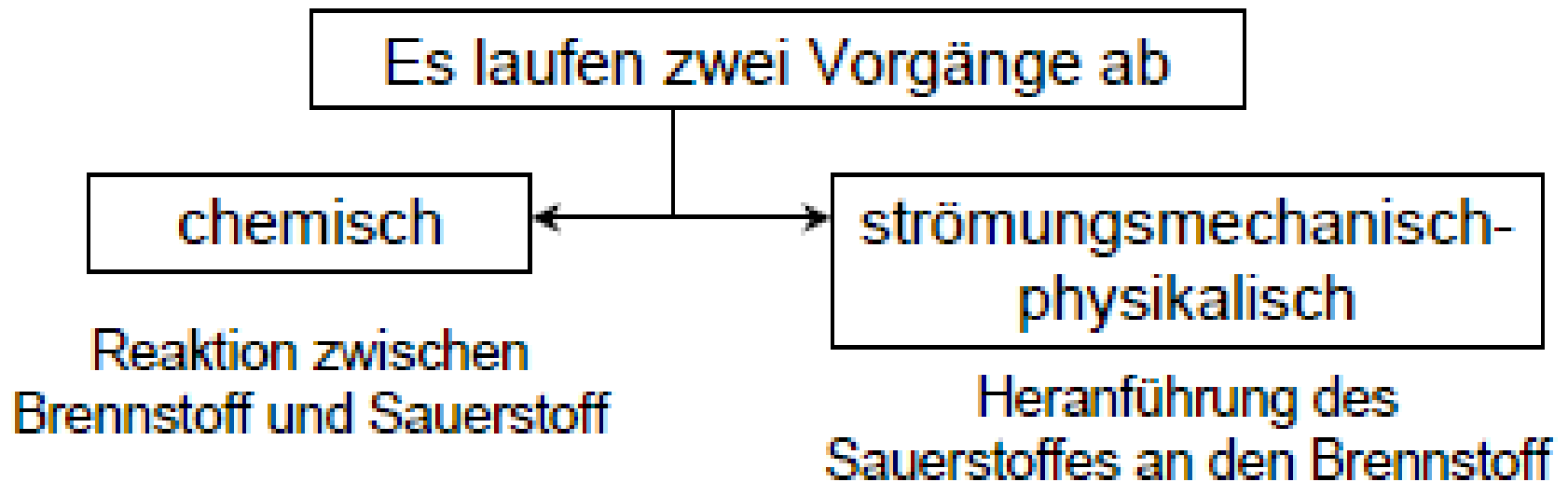
Verdampfung

Als Verdampfen oder auch Sieden bezeichnet man das Übergehen eines Stoffes vom flüssigen in den gasförmigen Aggregatzustand. Den Vorgang selbst bezeichnet man als Verdampfung, die erforderliche Wärme als Verdampfungsenthalpie.

Während des Übergangs bleibt die Temperatur konstant, sofern auch der Druck konstant bleibt. Sämtliche zugeführte Wärme wird in die Zustandsänderung investiert.

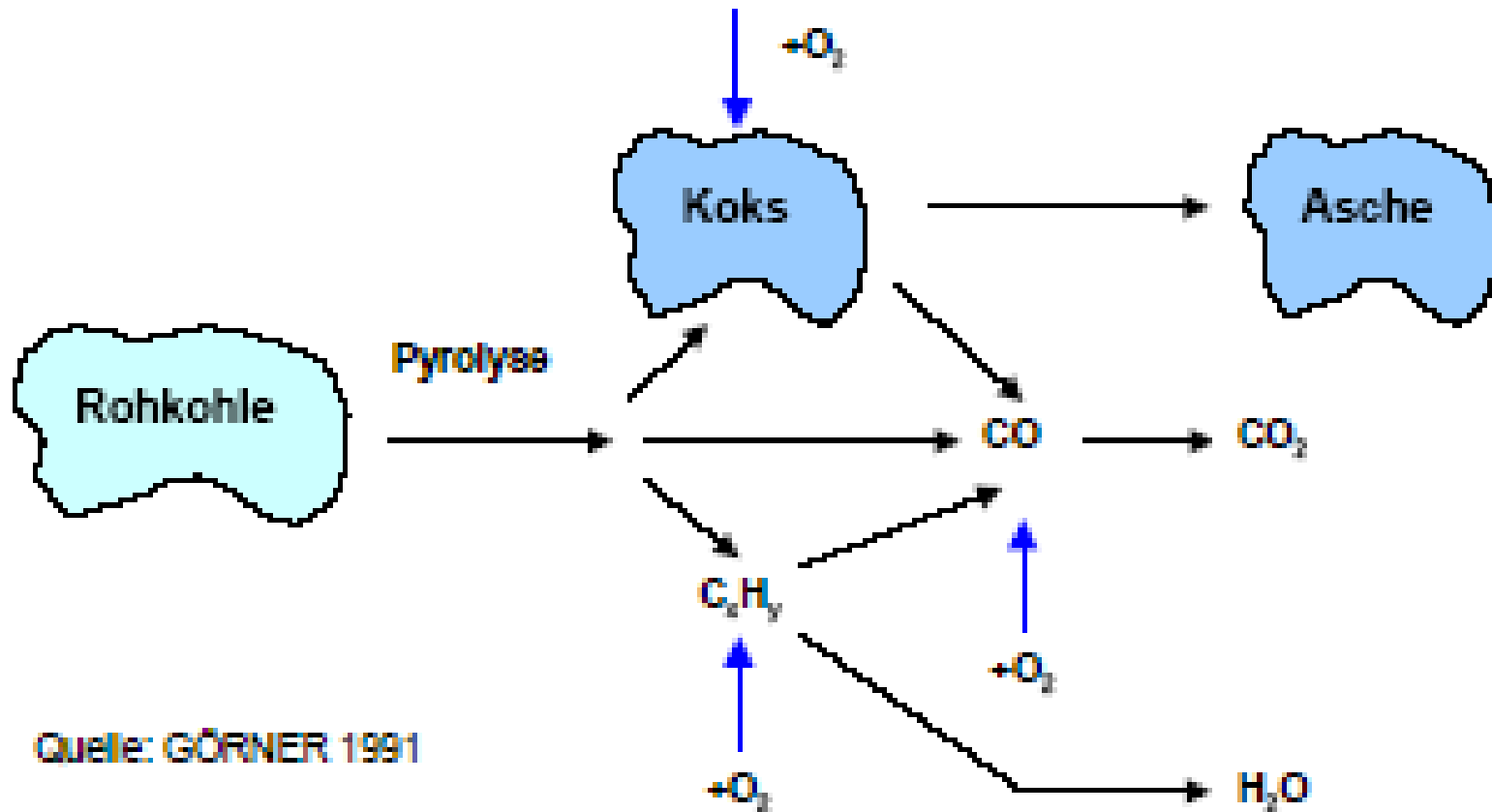
Dynamik der Verbrennung

Wird ein Brennstoff verbrannt, muss der notwendige Sauerstoff herangeführt, die Temperatur über die Zündtemperatur angehoben und die Zufuhr von Sauerstoff sowie die Abfuhr der Verbrennungsprodukte gesichert werden.

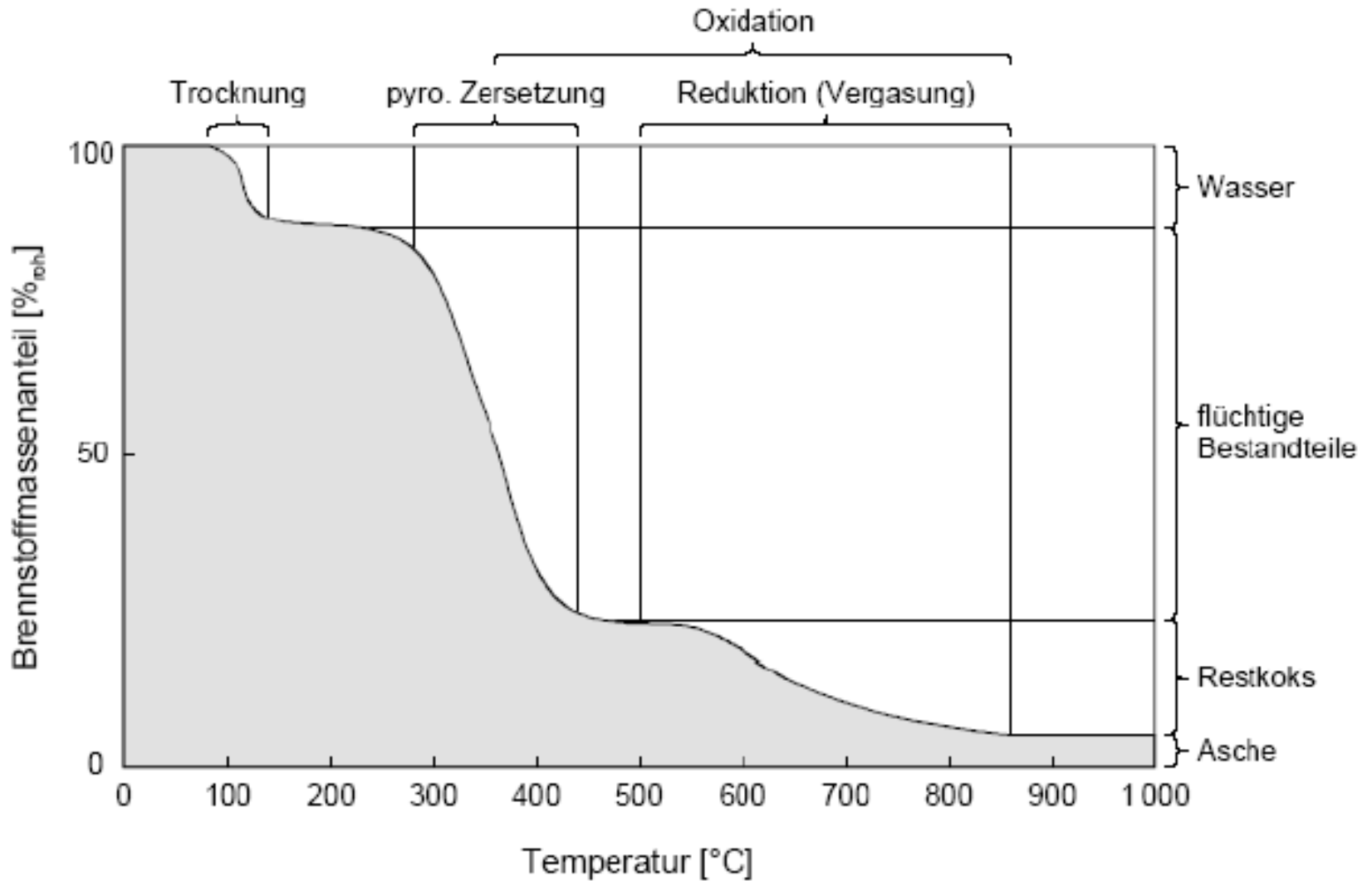


Die Addition der Zeit für den physikalischen Transportvorgang und der chemischen Reaktionszeit ergibt die Brennzeit

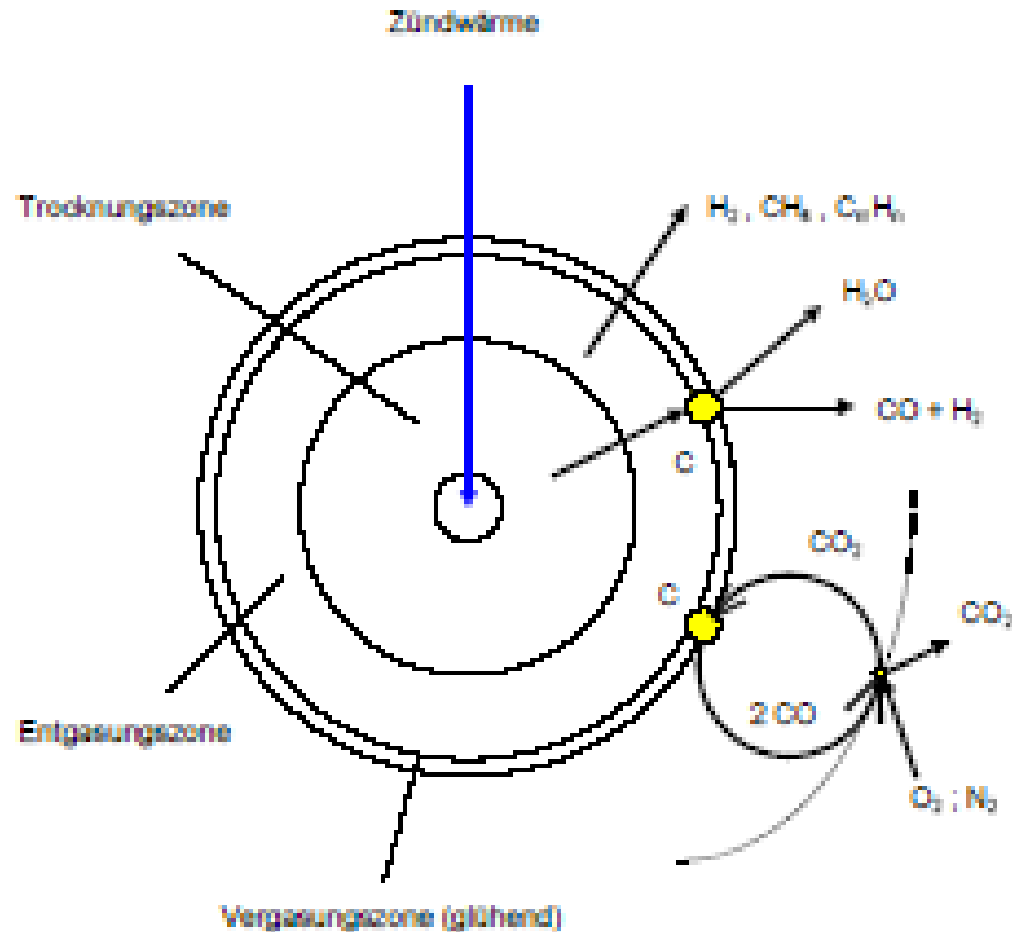
Schematisiertes Kohleabbbrandmodell



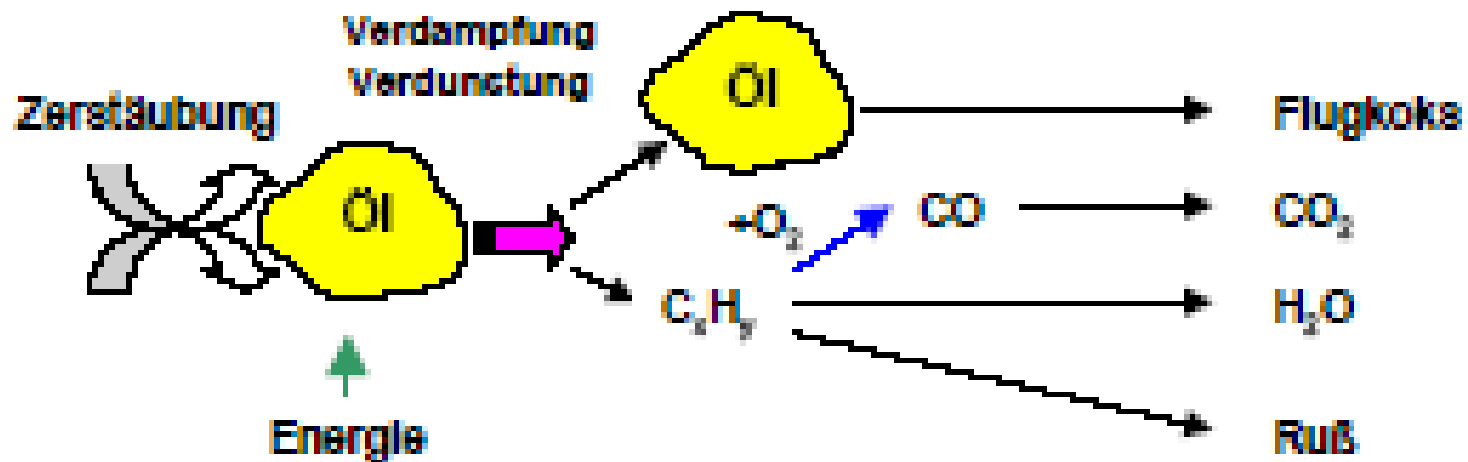
Quelle: GÖRNER 1991



Vorgänge am Brennstoffstück (schematisch)



Hauptreaktionsschritte bei der Ölverbrennung



Quelle: GÖRNER 1991

Ausbrandgüte / Einflussgrößen

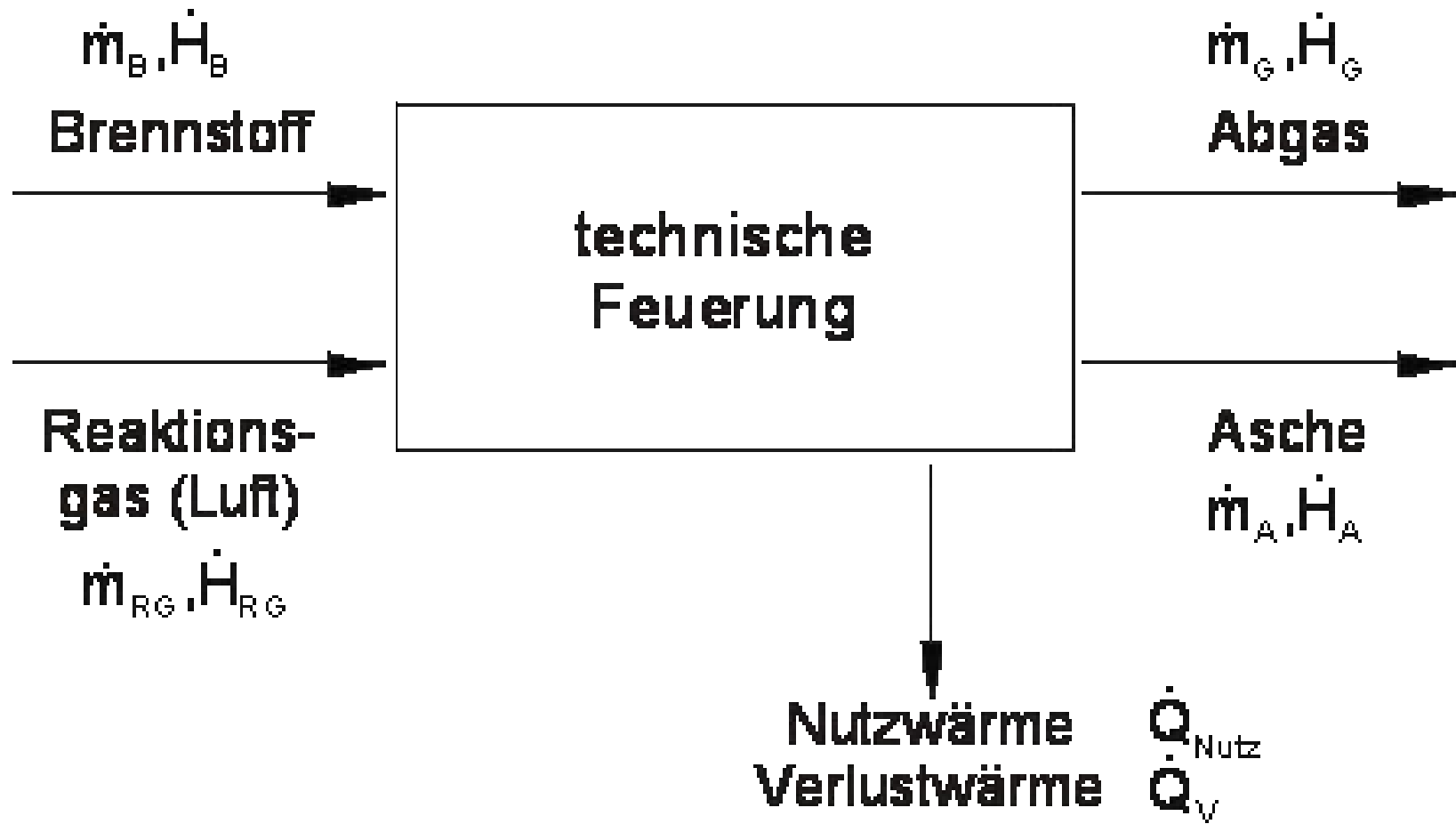
- **Feuerungstechnik (Feuerraumgestaltung, Verbrennungs- und Luftstufung, Regelungstechnik, Anlagendimensionierung)**
- **Feuerungseinstellung (Brennstoffzufuhr, Luftverteilung, Luftmenge)**
- **Lastzustand (Teillast, Mittellast, Nennlast)**
- **Brennstoffbeschaffenheit (Stückigkeit, Feuchte, Ascheschmelzverhalten)**

© Bayerisches Landesamt für Umweltschutz

- Verbrennungsrechnung -

Die Verbrennungsrechnung
umfasst die Stoff-, Massen-, und Energiebilanz der Verbrennung.
Dabei wird von einer vollständigen
Verbrennung und für die Energiebilanz von
adiabaten Verhältnissen ausgegangen.

Prinzipskizze Verbrennung - Bilanzkreis



Für die Verbrennungsrechnung sind zwei Ausgangspunkte möglich:

- **die exakte Zusammensetzung des Brennstoffes ist bekannt → Berechnung mit dieser Zusammensetzung (Brenngase, einige Flüssigbrennstoffe wie Ethanol)**
- **nur die Elementarzusammensetzung ist bekannt → Berechnung mit Elementarzusammensetzung (Festbrennstoffe, Erdöl, Heizöl, Benzin u.ä.)**

Verbrennungsrechnung

liefert ...

- Verbrennungsluftströme (Luftbedarf)
- Rauchgasströme (Rauchgasmenge) *und*
- Zusammensetzung der Rauchgase *sowie die*
- *adiabate* (theoretische) Verbrennungstemperatur

Berechnung für feste Brennstoffe



Sauerstoffbedarf

$$O_{2\min} = (8 / 3) c + 8 (h - o/8) + 1s \quad [\text{kg } O_2 / \text{kg Br.}]$$

theoretischer Luftbedarf

$$L_{\min} = O_{2\min} / 0,21 \quad [\text{m}_n^3 / \text{kg Br.}]$$

$$L_{\min} = O_{2\min} / 0,23 \quad [\text{kg/kgBr.}]$$

Realer Luftbedarf:

$$L = \lambda L_{\min} = L_{\min} + \Delta L \quad \left[\text{m}_n^3 / \text{kg Br.} \right] \text{ oder } \left[\text{kg/kg Br.} \right]$$

mit Luftzahl λ

Mindestrauchgasmenge:

trocken

$$R_{\min}^{\text{tr}} = (11/3)c + 2s + 0,765 L_{\min} + n \quad \left[\text{kg/kg Br.} \right]$$

$$W = 9h + w \quad \left[\text{kg/kg Br.} \right]$$

feucht

$$R_{\min}^{\text{f}} = R_{\min}^{\text{tr}} + W \quad \left[\text{kg/kg Br.} \right]$$

Berechnung für gasförmige Brennstoffe

Sauerstoffbedarf

$$O_{2\min} = 0,5 (CO + H_2) + \sum (x + y/4) C_x H_y - O_2 \quad [m_n^3 O_2 / m_n^3 Br.]$$

Mindestrauchgasmenge: trocken

$$R_{\min}^{\text{tr}} = \underbrace{CO + CO_2 + \sum x C_x H_y}_{CO_2} + \underbrace{0,79 L_{\min} + N_2}_{N_2} \quad [m_n^3 / m_n^3 Br.]$$

feucht

$$R_{\min}^{\text{f}} = R_{\min}^{\text{tr}} + H_2 + (y/2) C_x H_y$$

reale Rauchgasmengen

$$R^{\text{tr}} = R_{\text{min}}^{\text{tr}} + (n - 1) L_{\text{min}} \quad [\text{kg/kg Br.}] \quad \text{oder} \quad [\text{m}^3_{\text{n}} / \text{kg Br.}]$$

$$R^{\text{f}} = R_{\text{min}}^{\text{f}} + (n - 1) L_{\text{min}} = R^{\text{tr}} + W$$

Es sollen der untere Heizwert und der Mindest- sowie der tatsächliche Verbrennungsluftbedarf bei einer Luftüberschusszahl $\lambda=1,3$ für Braunkohle mit folgender Elementaranalyse (jeweils in Gew.-%)

C	H	S	N	O	Asche	Wassergehalt
32	3	1	1	8	5	50

berechnet werden.

Unterer Heizwert:

$$H_u = 34,8 C + 93,9 H + 10,46 S + 6,28 N - 10,8 O - 2,5 W$$

$$H_u = 34,8 \cdot 0,32 + 93,9 \cdot 0,03 + 10,46 \cdot 0,01 + 6,28 \cdot 0,01 - 10,8 \cdot 0,08 - 2,5 \cdot 0,5 = \mathbf{12 \text{ MJ/kg}}$$

Mindestluftbedarf:

$$L_{\min} = 8,88 C + 26,44 H + 3,33 (S - O)$$

$$L_{\min} = [8,88 \cdot 0,32 + 26,44 \cdot 0,03 + 3,33 (0,01 - 0,08)] = \mathbf{3,4 \text{ m}^3/\text{kg}}$$

Tatsächlich erforderliche Verbrennungsluftmenge:

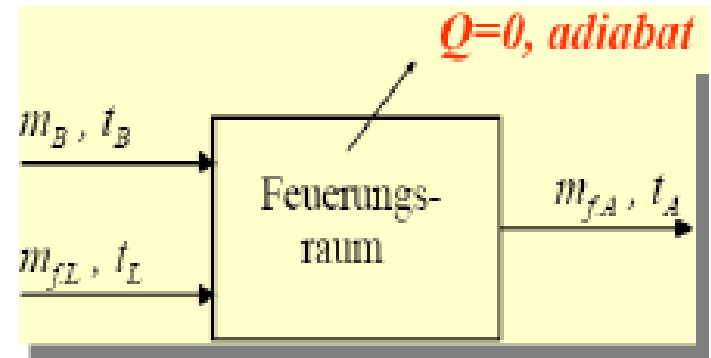
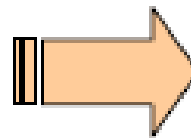
$$L = \lambda L_{\min} = 1,3 \cdot 3,4 \text{ m}^3/\text{kg} = \mathbf{4,42 \text{ m}^3/\text{kg}}$$

- Verbrennungstemperatur -

adiabate (theoretische) Verbrennungstemperatur

... ist die Temperatur, die das Abgas aufweisen würde, sofern aus dem Feuerraum keine Wärme an die Umgebung abgeführt wird.

Sie ergibt sich somit aus der Energiebilanz für ein adiabates System



Heizwerte und theoretische Verbrennungstemperaturen

	H_u	T_{ad}
Erdgas	30 800 kJ/m _N ³	2 000°C
Öl	39 000 kJ/kg	2 000°C
Steinkohle	32 000 kJ/kg	2 000°C
Braunkohle	8 000 kJ/kg	1 500°C
Ölschiefer	4 000 kJ/kg	1 100°C

Die Feuerraumtemperatur (reale Verbrennungstemperatur) ist abhängig von:

- Brennstoffheizwert**
- Luftüberschuss**
- Brennkammeregestaltung**
- Wärmeaufnahme der Brennkammerwände**
- Heizflächenverschmutzung**
- Luftvorwärmung**
- Brennstoffumsatz pro Zeiteinheit**
- Brennkammerbelastung**

- Vergasung, Pyrolyse -

Die Unterscheidung zwischen Pyrolyse, Vergasung und Verbrennung erfolgt anhand der Sauerstoffzufuhr.

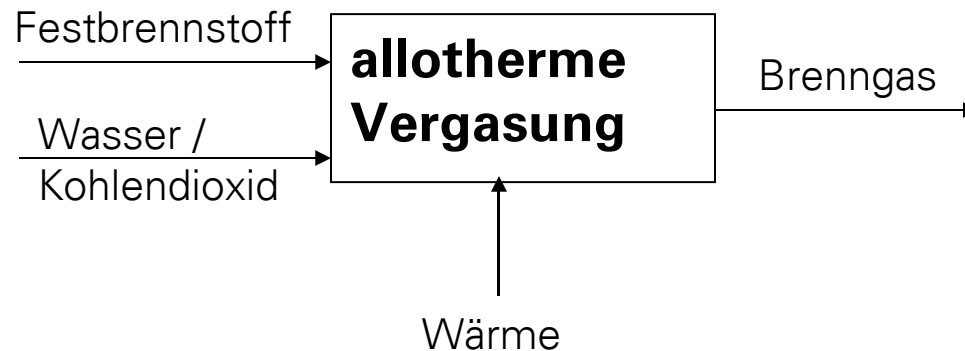
Die Pyrolyse findet unter Ausschluss von Sauerstoff statt, die Vergasung bei unterstöchiometrischer Sauerstoffzufuhr und die Verbrennung bei optimaler Sauerstoffzufuhr. Die Sauerstoffzufuhr wird durch die Kennzahl λ charakterisiert:

Pyrolyse	$\lambda = 0$
Vergasung	$0 < \lambda < 1$
Verbrennung	$\lambda > 1$

Vergasung:
Unterstöchiometrische Umsetzung
mit Luft oder anderem
Vergasungsmittel (Sauerstoff,
Dampf...)

Pyrolyse:
thermische Zersetzung ohne
Vergasungsmittel

Vergasung

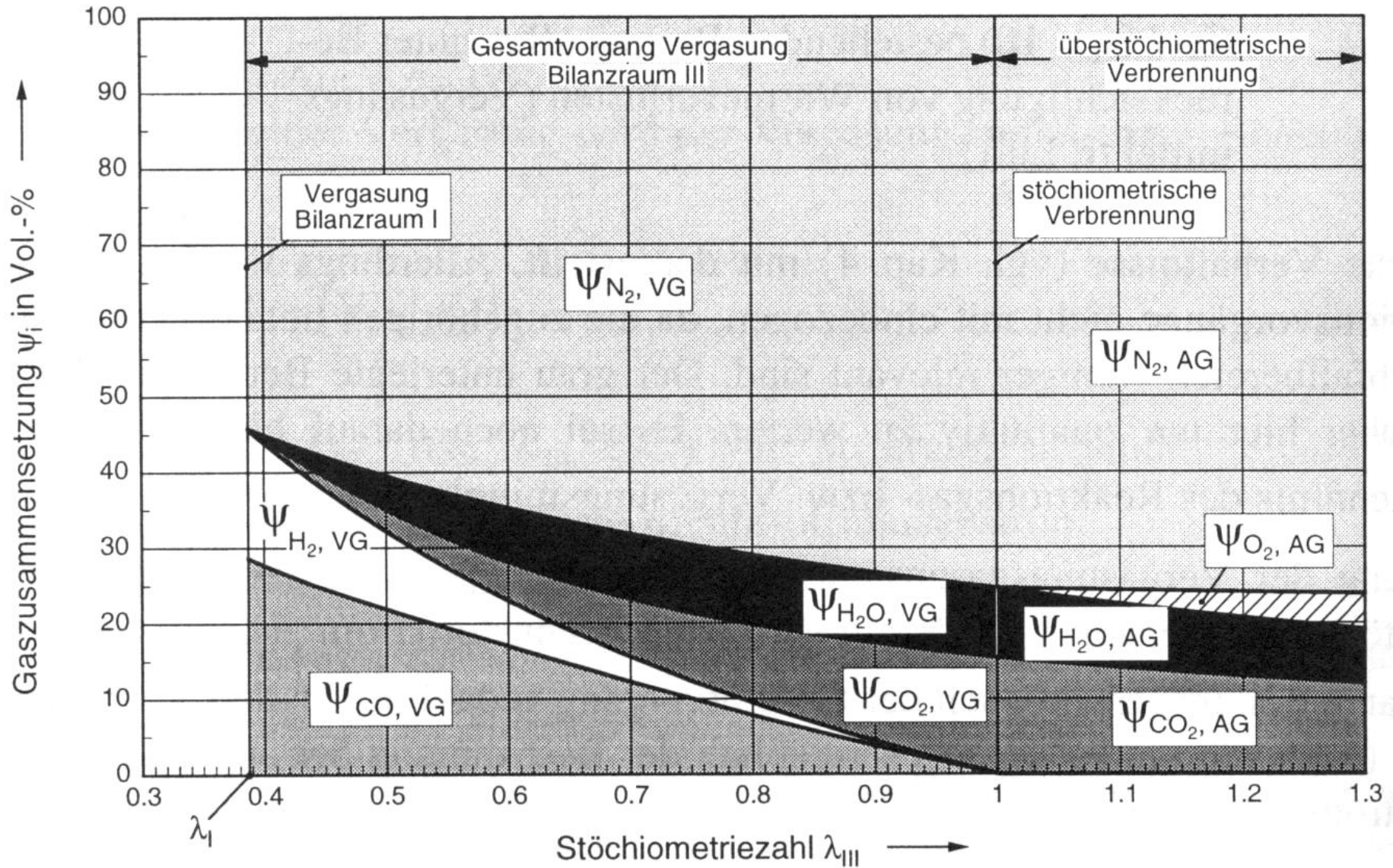




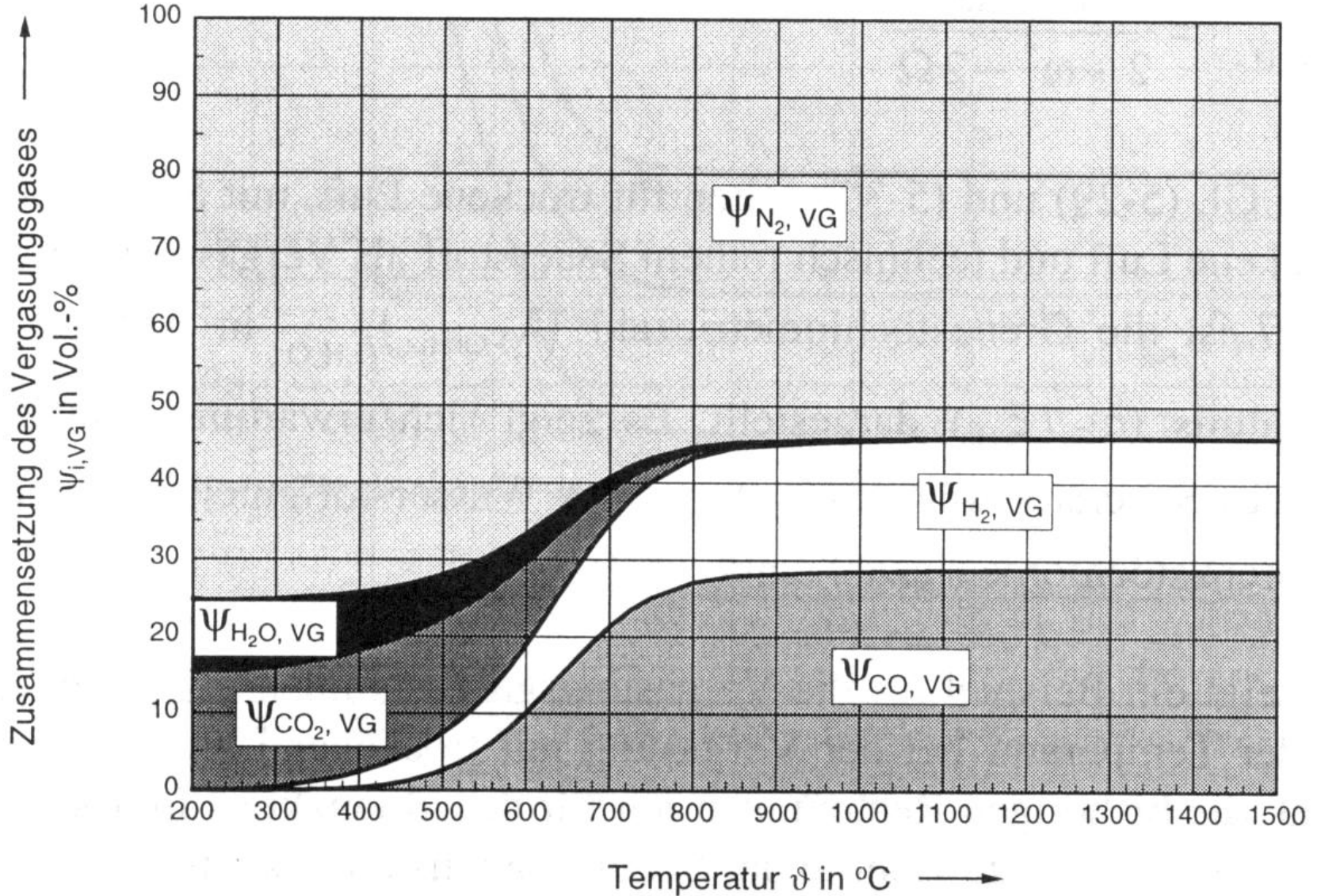
Verbrennung und Dampferzeugung (Fernstudium)

Nr.	Reaktionsgleichungen	Reaktionsgas-enthalpie $\Delta H_{R,0}$ [kJ/mol]
Verbrennungsreaktionen (vollständige Oxidation)		
R1	$C + O_2 \rightarrow CO_2$	- 406,4
R2	$CO + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO_2$	- 283,6
R3	$H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O$	- 241,1
R4	$CH_4 + 2 O_2 \rightarrow CO_2 + 2 H_2O$	- 801,1
Teilverbrennungsreaktion (Teiloxidation)		
R5	$C + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO$	- 122,8
Boudouard - Reaktion		
R6	$C + CO_2 \rightarrow 2 CO$	+ 160,9
heterogene Wassergasreaktionen		
R7	$C + H_2O \rightarrow CO + H_2$	+ 118,4
R8	$C + 2 H_2O \rightarrow CO_2 + 2 H_2$	+ 75,9
homogene Wassergasreaktion		
R9	$CO_2 + H_2 \rightarrow CO + H_2O$	+ 42,5
heterogene Methanbildungsreaktion		
R10	$C + 2 H_2 \rightarrow CH_4$	- 87,4

Verbrennung und Dampferzeugung (Fernstudium)

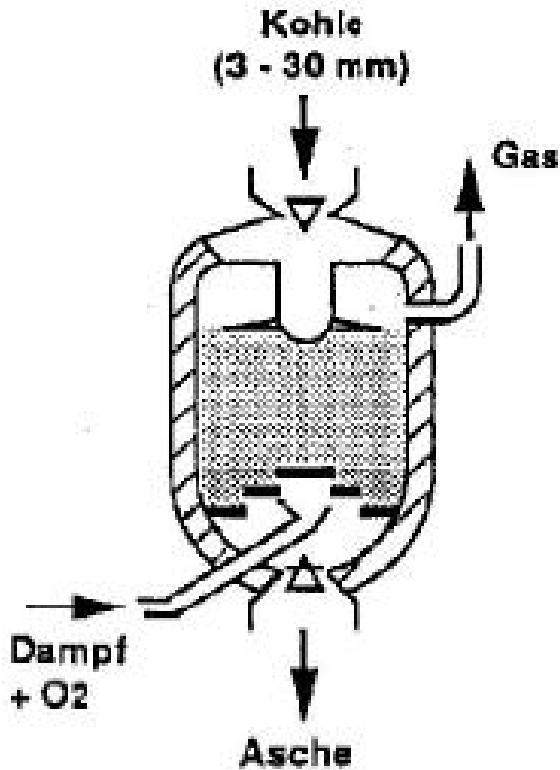


Verbrennung und Dampferzeugung (Fernstudium)



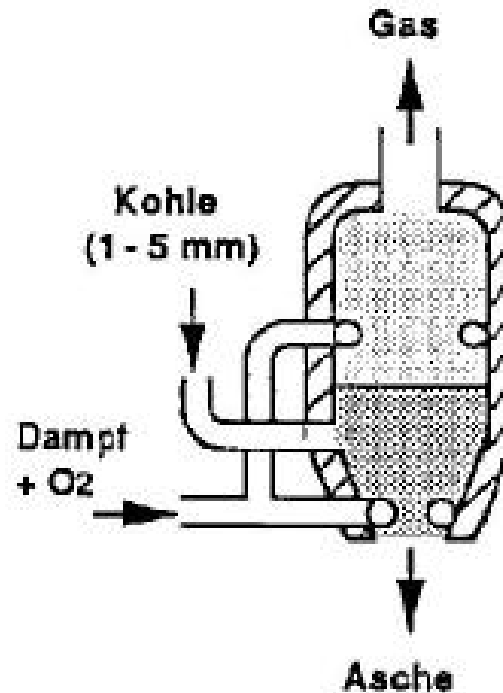
Festbett

800 - 1000 °C, 10 - 100 bar



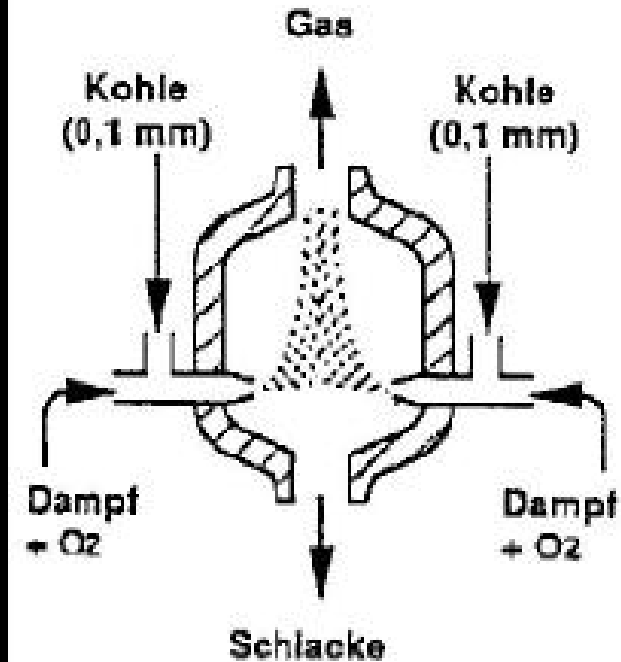
Wirbelbett

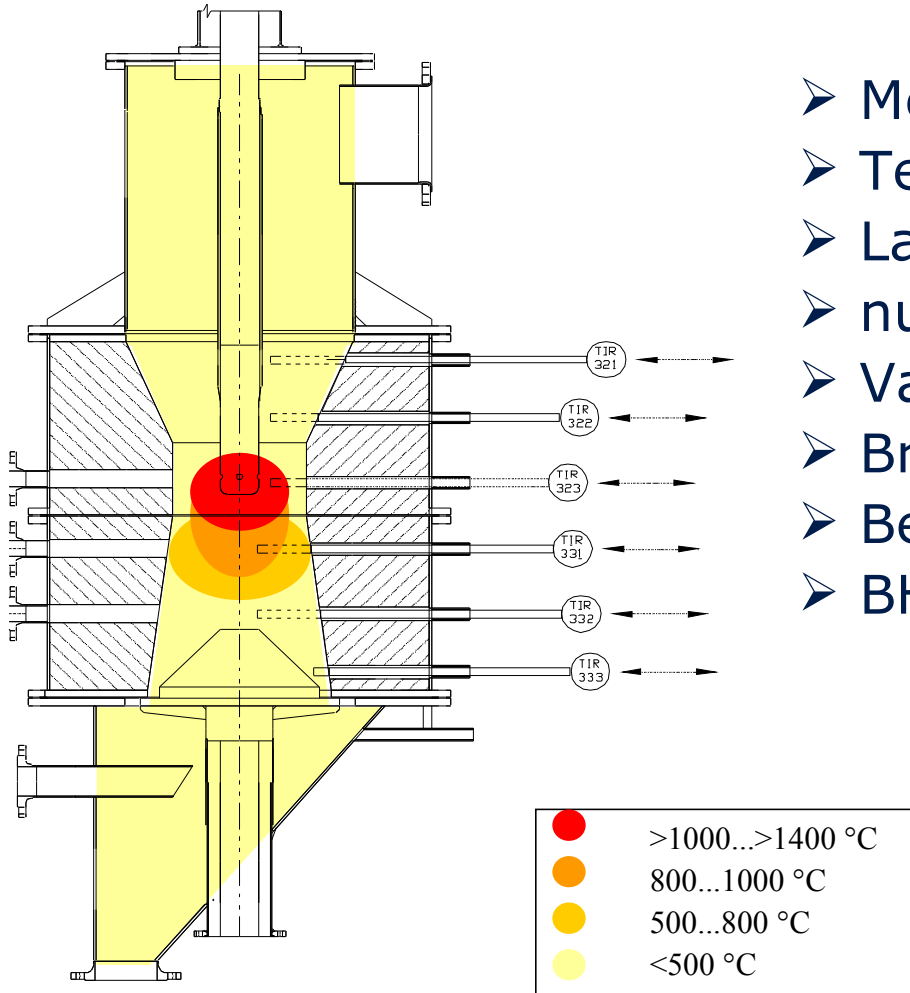
800 - 1000 °C, 10 - 25 bar



Flugstrom

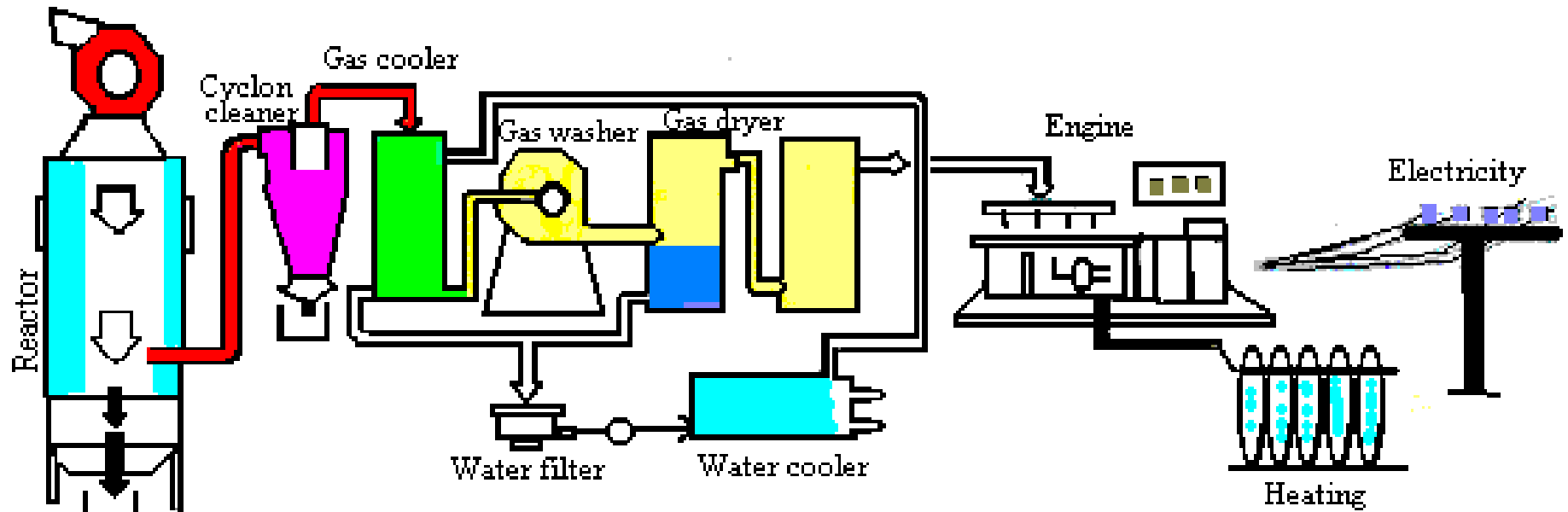
1500 - 1900 °C, 25 - 40 bar





- Messungen im Festbett
- Teillastuntersuchungen
- Lastwechselgeschwindigkeit
- numerische Simulation
- Validierung der Modelle
- Brennstoffvariationen
- Betriebsprognosen
- BHKW-Versuchsstand (im Aufbau)

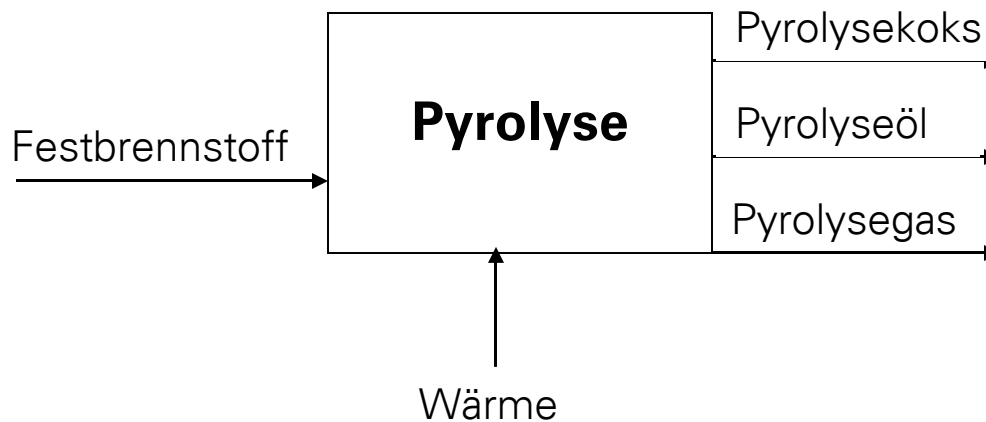
Verbrennung und Dampferzeugung (Fernstudium)

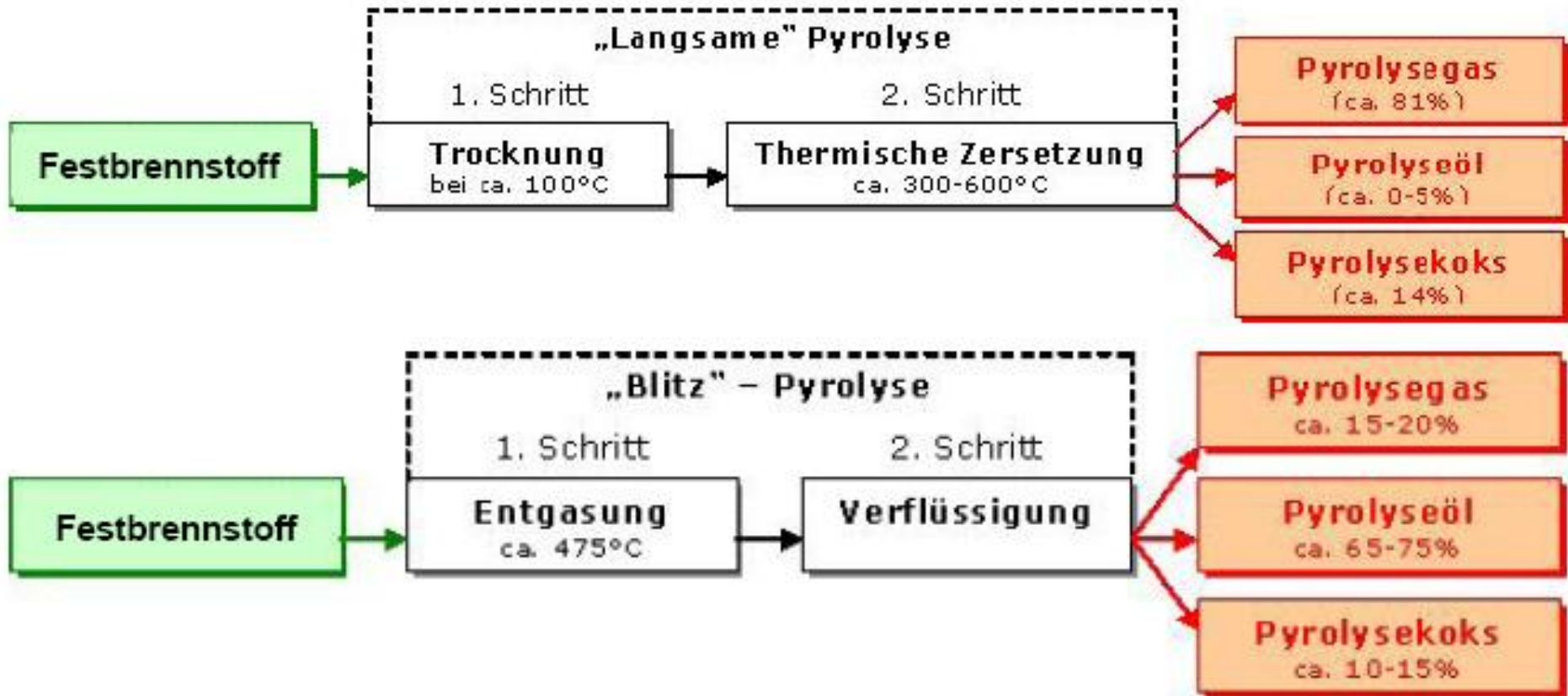


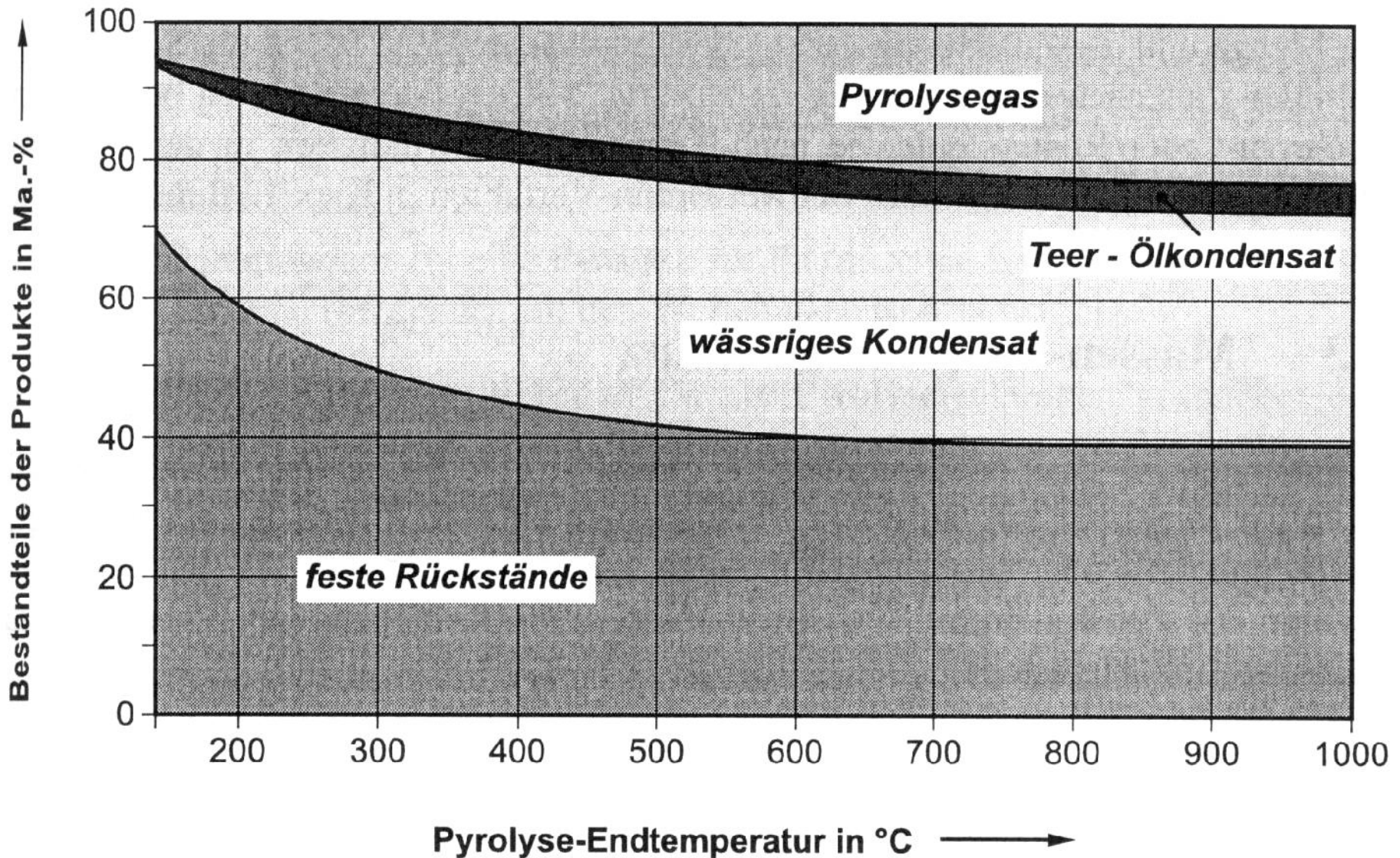
[University of Flensburg]

Zusammensetzung des Gases (Gleichstromvergaser)	
Substanz	Gehalt [Vol-%]
CO	18 - 28
H ₂	9 - 14
CO ₂	7 - 12
CH ₄	1 – 2,5
N ₂	Rest zu 100

Pyrolyse

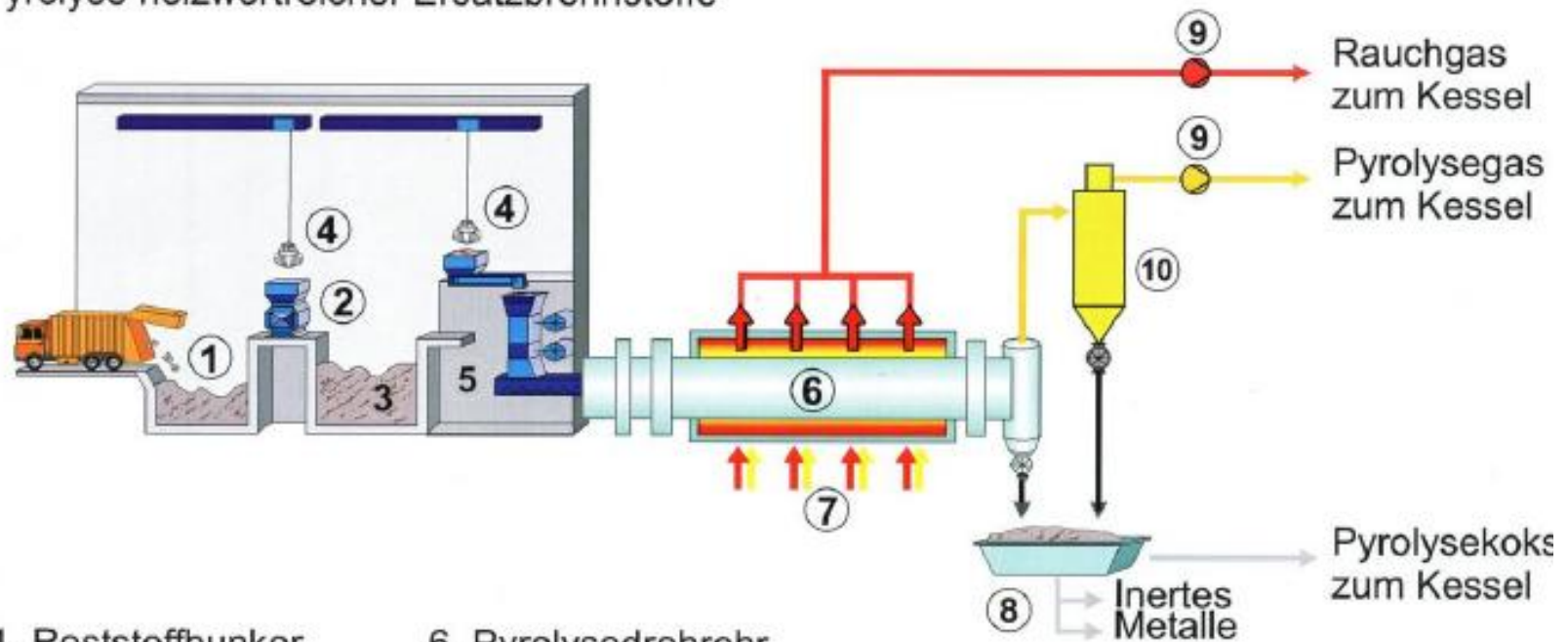




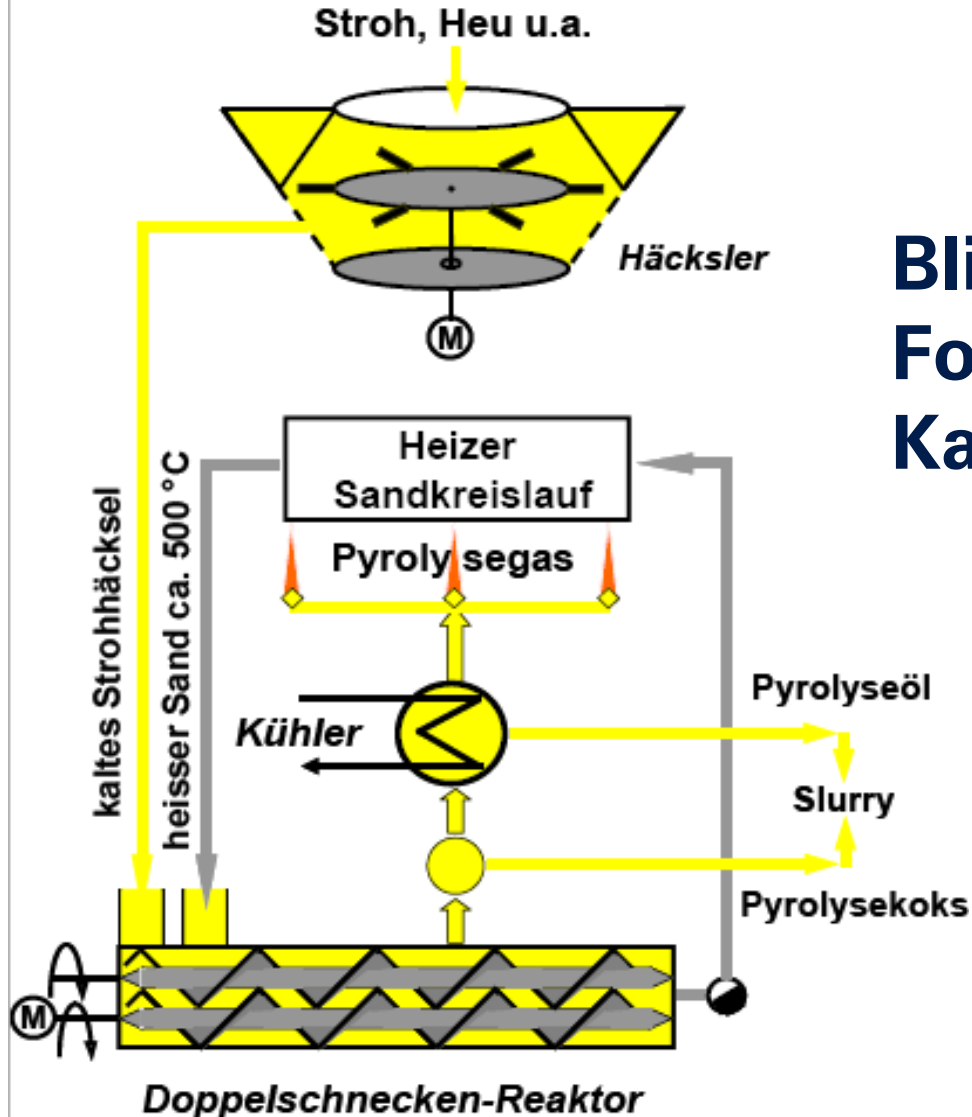


Bsp. Langsame Pyrolyse: ConTherm-Verfahren der Fa. TechTrade GmbH

Vorschaltanlage für Kraftwerke
Pyrolyse heizwertreicher Ersatzbrennstoffe



- | | |
|---------------------|------------------------------|
| 1. Reststoffbunker | 6. Pyrolysedrehrohr |
| 2. Zerkleinerer | 7. Brenneranlage |
| 3. Vorlagebunker | 8. Austrag Pyrolysefeststoff |
| 4. Krananlage | 9. Gebläse |
| 5. Materialschleuse | 10. Zyklonentstauber |



Blitzpyrolyse des Forschungszentrums Karlsruhe

[Dinjus 2007]

Eigenschaften der Brennstoffumwandlungsverfahren

Haupteinflußgrößen	Variationen		
Einsatzstoffe	physikalische Eigenschaften gasförmig, flüssig, pastös, fest (staubförmig oder stückig) chemische Eigenschaften Zusammensetzung ("Problemstoffe")		
Sauerstoffangebot	Thermolyse $\lambda = 0$	Vergasung $\lambda < 1$	Verbrennung $\lambda \geq 1$
Reaktionsgase	Luft, Sauerstoff, (Stickstoff, Kohlendioxid, Wasserdampf, rückgeführtes Abgas, usw.)		
Reaktorverhalten	Rührkessel (RK) vollkommene Durchmischung ($Pe = 0$)	Realer Reaktor $0 < Pe < \infty$	Kolbenströmer (KS) keine Durchmischung ($Pe \rightarrow \infty$)
Art der Stoffzufuhr	Eintragsimpuls, Drall, Zerstäubung, Dispergierung, usw. z. B. für Einsatzstoffe, Reaktionsgase, Zusatzstoffe		
Verweilzeit	kurz einige s	lang einige min bis h	sehr lang einige h bis d
Temperatur	Nieder- $\vartheta < 800 \text{ °C}$	bis 800 °C - 1000 °C	Hochtemperatur $\vartheta > 1000 \text{ °C}$ (ggf bis 2000 °C u. höher)
Druck	Nieder- $p \ll 0,1 \text{ MPa}$	Umgebungs- $p \approx 0,1 \text{ MPa}$	Hochdruck $p \gg 0,1 \text{ MPa}$
Zusatzstoffe	Additiv (z.B. zur Schadstoffeinbindung, zur Beeinflussung des Schmelzverhaltens usw.) Zusatzbrennstoff Bettbeeinflussung (z.B. Wirbelbett, Festbett, Umlaufbett, Trägermatrix, Ascherückführung usw.)		

Trocknen,
Schmelzen,
Verdampfen,
Sublimieren,
usw.