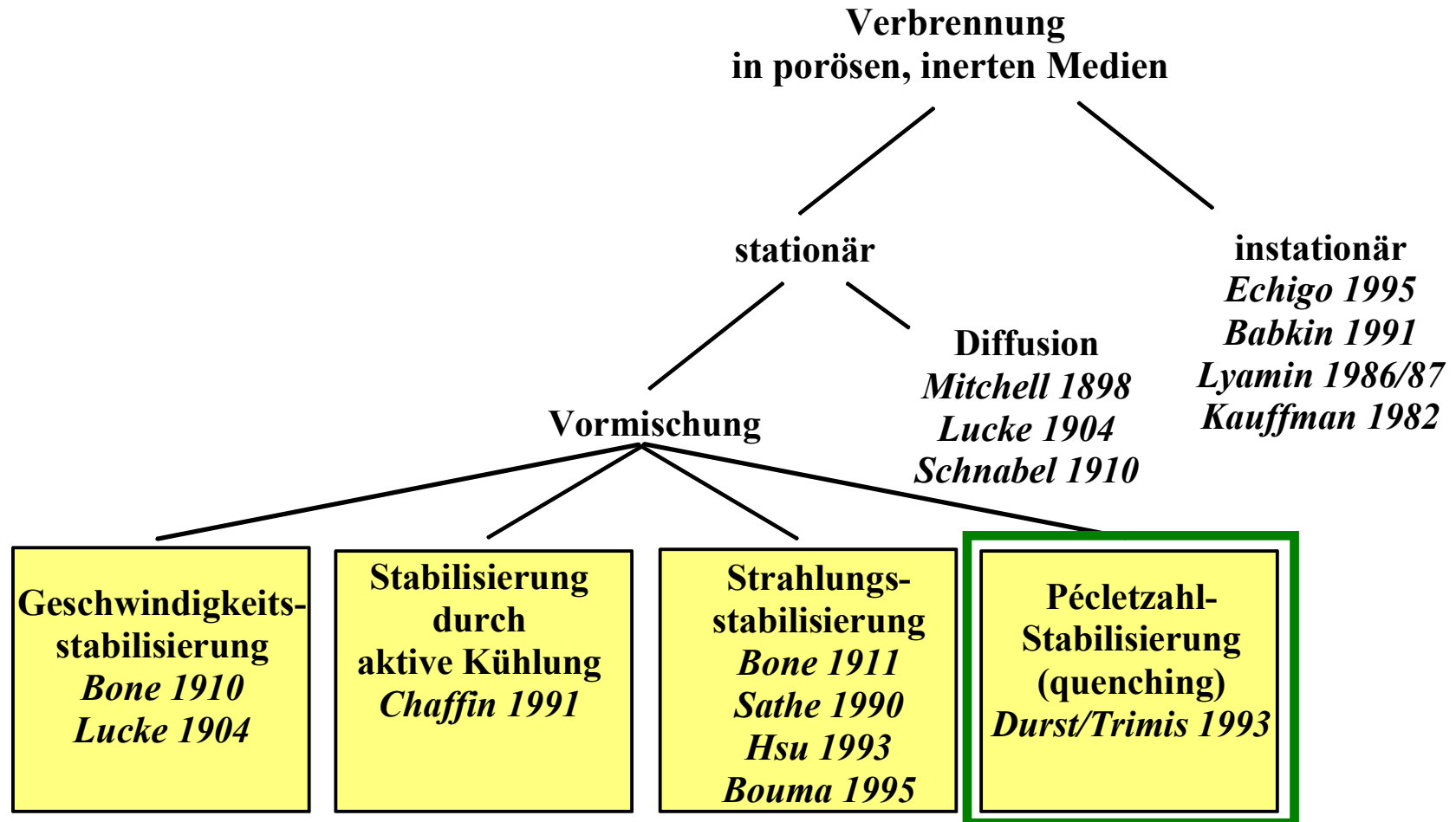


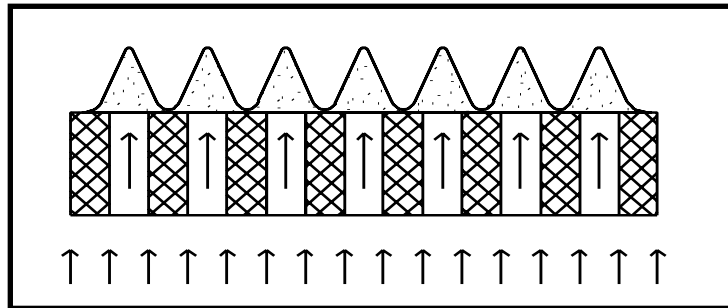
Angewandte Thermofluiddynamik

Dr.-Ing. F. v. Issendorff

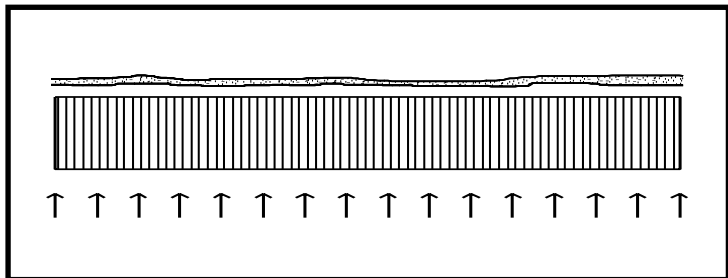
Stabilisierung des Verbrennungsprozesses in porösen Medien



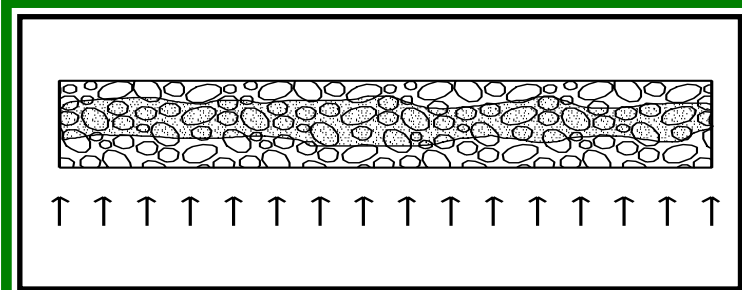
Stabilisierung des Verbrennungsprozesses an einer porösen Oberfläche und in einem porösen Medium



Einzelne Flammen

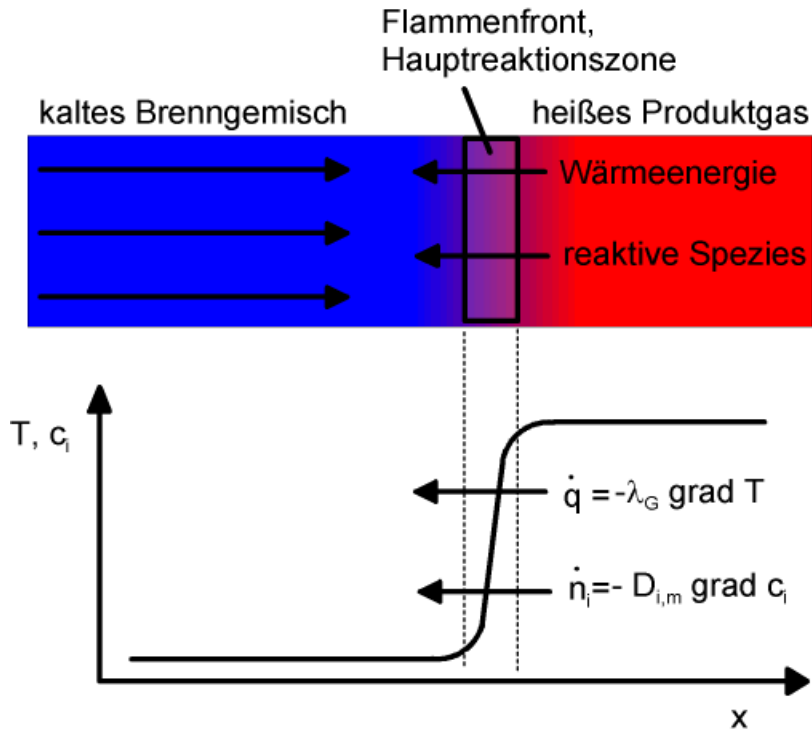


Flamment Teppich



Verbrennung im
porösen Medium





Die Flammenfront breitet sich hauptsächlich durch Wärme- und Stofftransportmechanismen aus

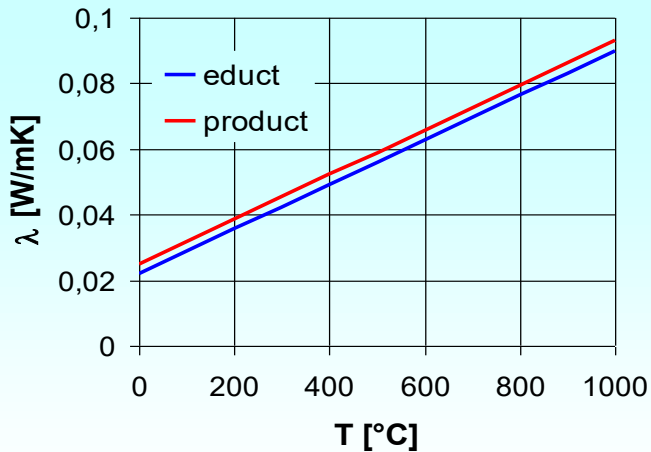
Die **laminare Brenngeschwindigkeit s_L** ist die minimale Anströmungsgeschwindigkeit, damit sich eine laminare Flamme nicht entgegen der Strömung ausbreitet.

Sie wird durch den Wärme- und Stofftransport limitiert.

Verbrennung in porösen Medien - Vergleich mit freien Flammen

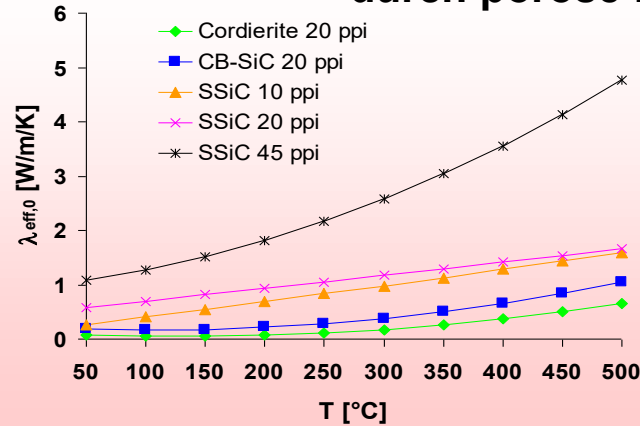


Freie laminare Flamme

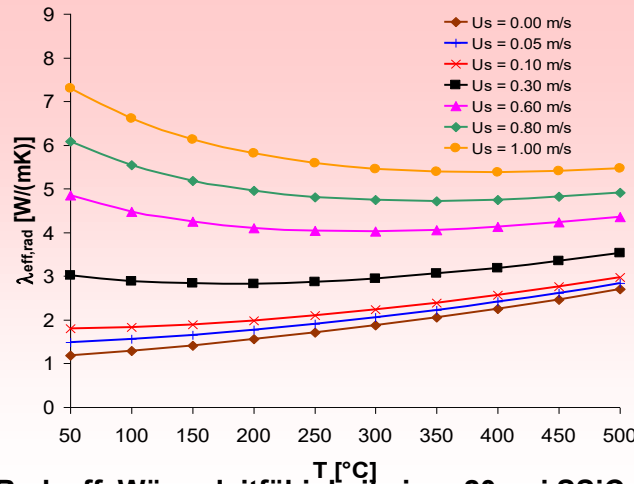


Wärmeleitfähigkeit eines Methan/Luft-Gemisches bei $\lambda = 1,3$

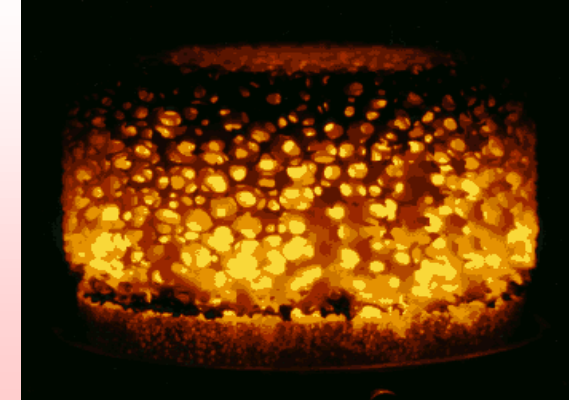
Verbesserung des Wärmetransportes durch poröse inerte Medien



Effektive Ruhe-Wärmeleitfähigkeit von verschiedenen keramischen Schaumstrukturen



Rad. eff. Wärmeleitfähigkeit einer 20 ppi SSiC Schaumstruktur bei verschiedenen Leerrohrgeschwindigkeiten



**10 bis 30-fache
Flammengeschwindigkeit
bei niedrigeren
Spitzentemperaturen**

Stabilisierung des Verbrennungsprozesses in porösen Medien

Flammenausbreitung bei einer modifizierten
Péclet-Zahl:

$$Pe \geq 65 \quad \text{Babkin et al (1991)}$$

$$Pe = \frac{s_L d_{p,eff} \rho_f c_{p,f}}{\lambda_f} = \frac{s_L d_{p,eff}}{a_f} = \frac{\text{Wärmeproduktion}}{\text{Wärmeabfuhr}}$$

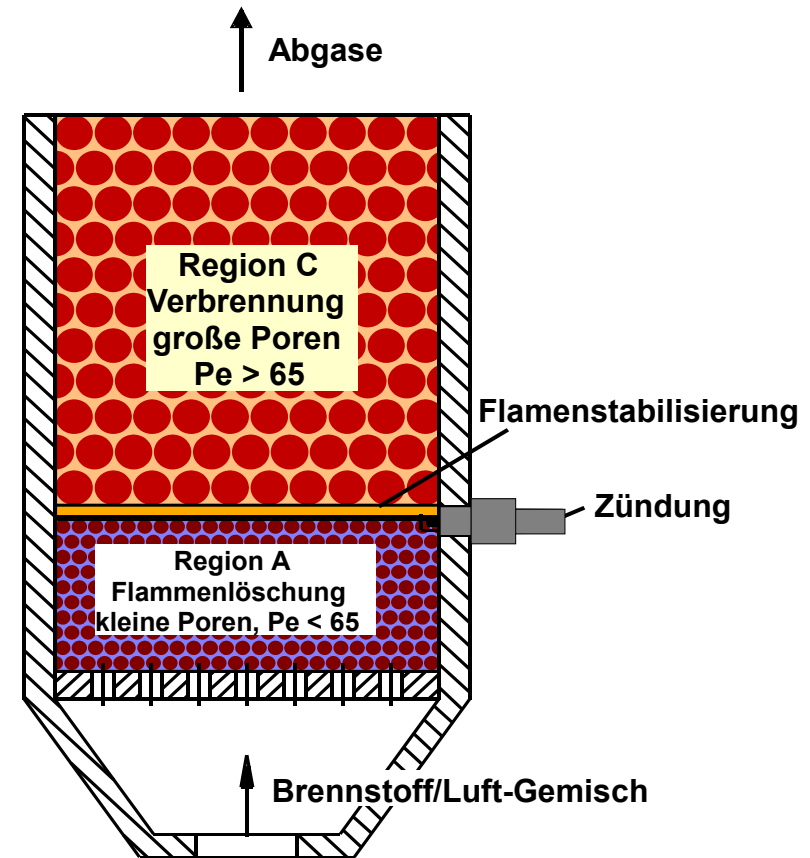
s_L : laminare Flammengeschwindigkeit

$d_{p,eff}$: äquivalenter Porendurchmesser

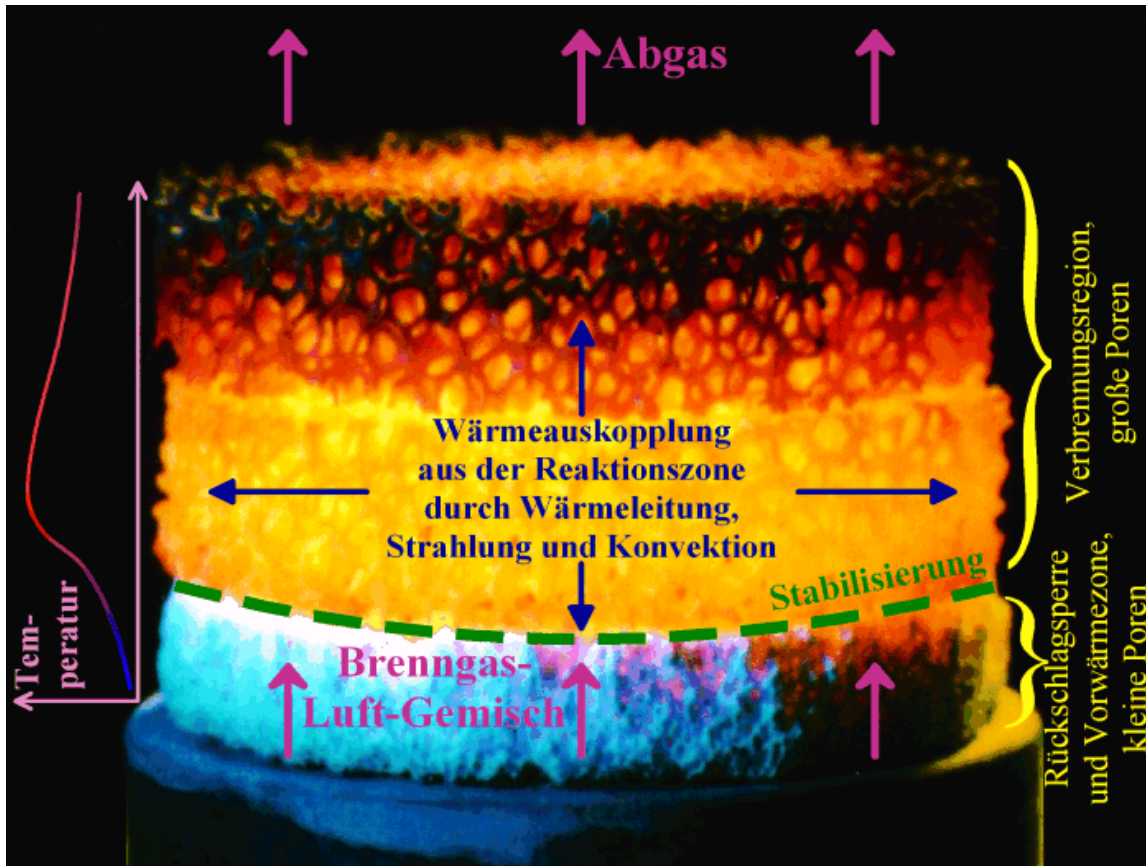
$c_{p,f}$: Wärmekapazität des Gasgemisches

ρ_f : Dichte des Gasgemisches

λ_f : Wärmeleitfähigkeit des Gasgemisches

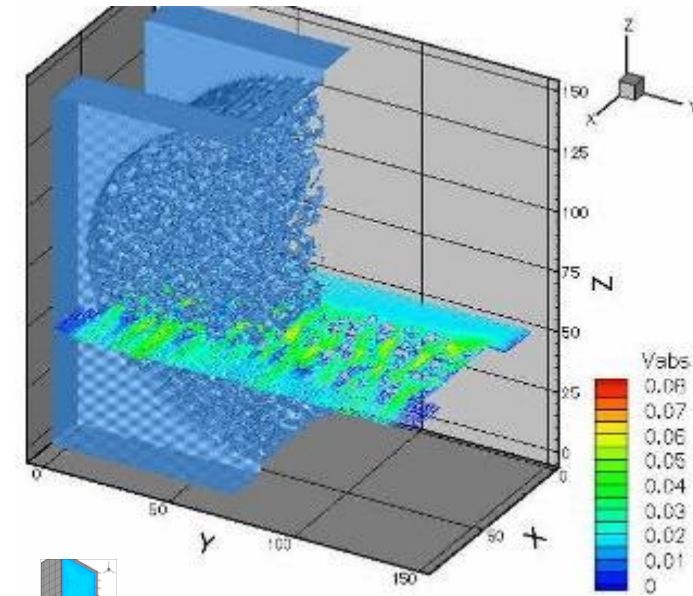


Vorteile der stabilisierten Verbrennung in porösen inertem Medien



- Steuerbares, homogenes Temperaturniveau
- Geringe Schadstoffemissionen
- Hohe Verbrennungsstabilität
- Sehr großer Leistungsmodulationsbereich
- Sehr kompakte Bauweise
- Komplexe Brennraumgeometrien möglich

Eine „direkte“ numerische 3-D Simulation mit Auflösung der porösen Strukturen, Berücksichtigung aller Wärmetransportmechanismen und der chemischen Reaktionskinetik übersteigt die heutigen Rechenkapazitäten. Mit **CT-Aufnahmen** und **Lattice-Boltzmann** Verfahren ist es jedoch möglich die Strömung durch Porenkörper ohne Wärmetransport und chemische Reaktionen zu berechnen.



Mit **Finite-Volumen-Verfahren** ist eine Simulation möglich, es muss vor allem der **Wärmetransport** modelliert werden.



Effekte beim Wärmetransport im Porenkörper :

- Wärmeleitung im Fluid
- Konvektion im Fluid
- Wärmeleitung im Feststoff
- Wärmeübergang zwischen Fluid und Feststoff
- Strahlung des Feststoffes
- erhöhter konvektiver Transport im Fluid durch Quervermischung

Es ist nicht möglich alle Strukturen des Porenkörpers aufzulösen.

→ **Homogenisierungsansatz:**

Es wird eine homogene Verteilung des Feststoffs im Raum angenommen und effektive Eigenschaften zugewiesen

$$\frac{\partial(\rho v_{s,j})}{\partial x_j} = 0 \quad \text{Massenerhaltung, s: „superficial velocity“}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho v_{s,j} v_{s,i} - \mu \frac{\partial v_{s,i}}{\partial x_j} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial v_{s,j}}{\partial x_i} \right) + \rho g_i \quad \text{Impulserhaltung}$$

$$\frac{dp}{dx_i} = -\frac{\mu}{k_{1,ij}} v_{s,j} - \frac{\rho}{k_{2,ij}} |v_{s,j}| v_{s,j} \quad \text{Modellierung des zusätzlichen Druckverlustes nach Forchheimer Gleichung}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho v_{s,j} c_p T_g - \lambda_g \varepsilon \frac{\partial T_g}{\partial x_j} \right) = \varepsilon \sum_{k=1}^{N_s} \dot{\omega}_k \Delta h_{j,k}^0 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\sum_{k=1}^{N_s} \rho h_k \varepsilon D_k \frac{\partial Y_k}{\partial x_j} \right) - \alpha A_V (T_s - T_g)$$

Energiegleichung Gasphase, chemische Reaktionen, volumengemittelter Wärmeaustausch (αA_V) mit poröser Matrix

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left(-\lambda_{s,eff,j} \frac{\partial T_s}{\partial x_j} \right) = S_R - \alpha A_V (T_s - T_g)$$

Energiegleichung poröse Matrix, effektive Wärmeleitung $\lambda_{s,eff}$, separate Behandlung der Strahlung (Quellterm S_R) über zusätzliche Modellierung, volumetrischer Wärmeaustausch (αA_V) mit Gasphase

$$\lambda_{s,eff,j} = \lambda_{s,eff,0} + \frac{\rho U c_{p,f} d_{p,eff}}{K_j}$$

Effektive Wärmeleitung setzt sich aus eff. Ruhewärmeleitfähigkeit und Effekt der Dispersion/Quervermischung (geschwindigkeitsabhängig) zusammen

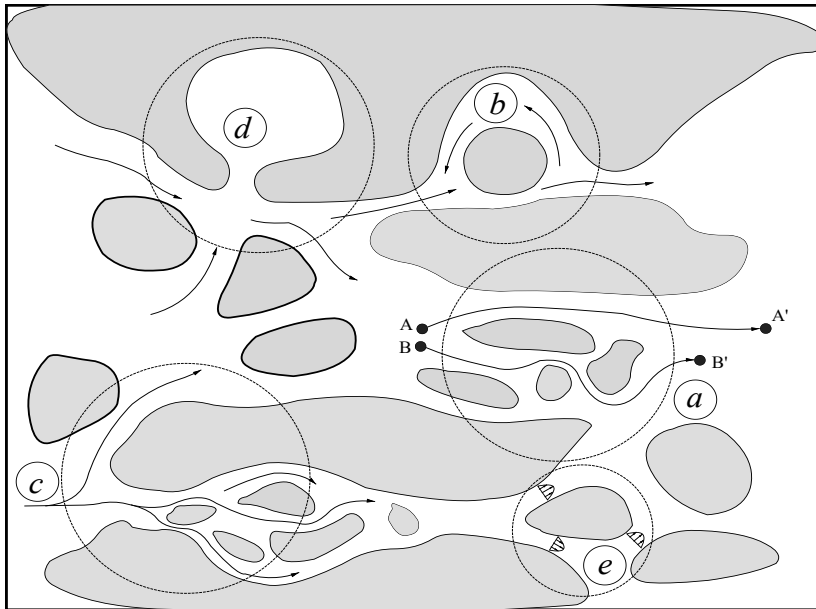
$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho v_{s,j} Y_k - \rho \varepsilon D_{k,eff} \frac{\partial Y_k}{\partial x_j} \right) = \varepsilon \dot{\omega}_k \quad \text{Spezieserhaltung, chemische Reaktionen, Einfluss der Dispersion}$$

Einfluss der Dispersion auf den Diffusionskoeffizienten

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho \varepsilon U_j Y_k - \rho D_{k,eff} \frac{\partial Y_k}{\partial x_j} \right) = \varepsilon \dot{\omega}_k$$

Dispersion wird hervorgerufen durch

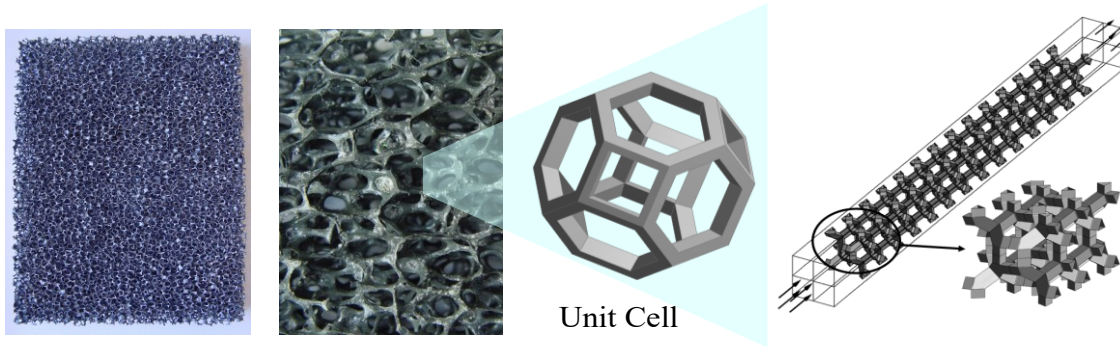
- a) Tortuosität des porösen Mediums
- b) Rezirkulationen
- c) unterschiedliche Zugänglichkeit und Durchströmungslängen von Poren
- d) nicht durchströmbaren Poren
- e) Inhomogenitäten im Strömungsfeld



Verschiedene Dispersionsmechanismen in porösen Medien Boukhezar, N.; (2004)

Einfluss der Dispersion in transversaler Richtung häufig bekannt

→ longitudinal ?



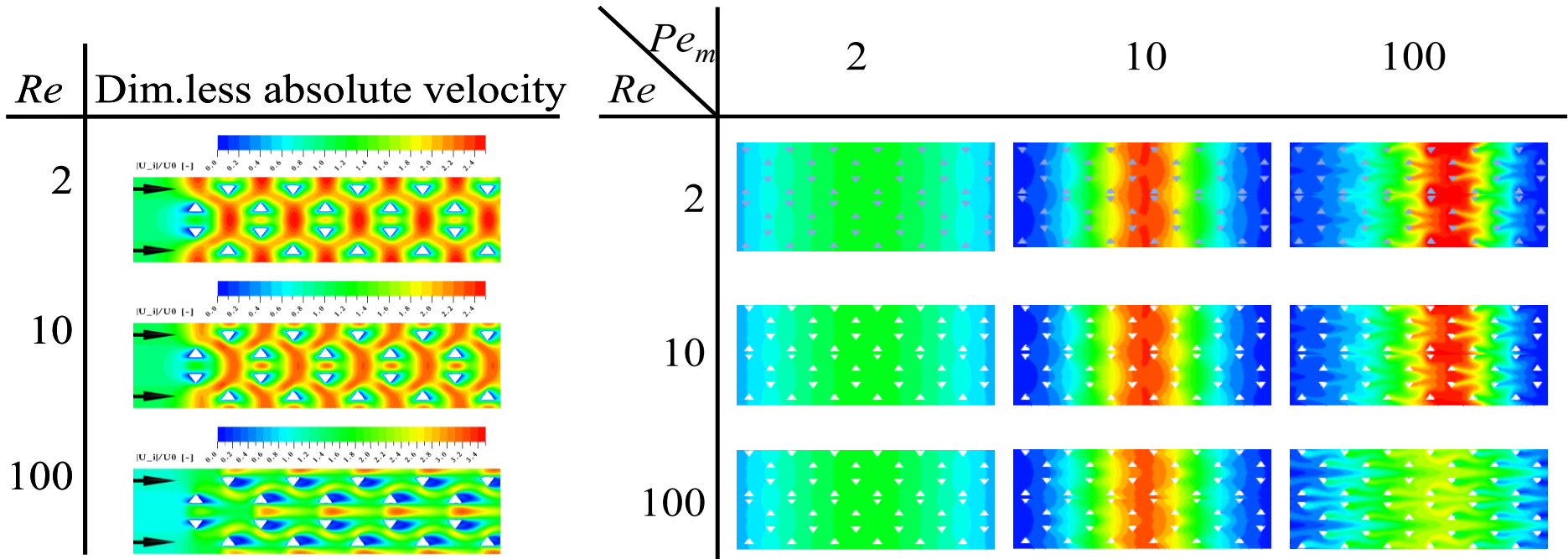
$$Re = \frac{U_0 d_h}{\epsilon \nu}$$

$$Pe_m = \frac{U_0 d_h}{\epsilon D_m}$$

$$d_h = \frac{4\epsilon}{A_V}$$

Flow Distribution

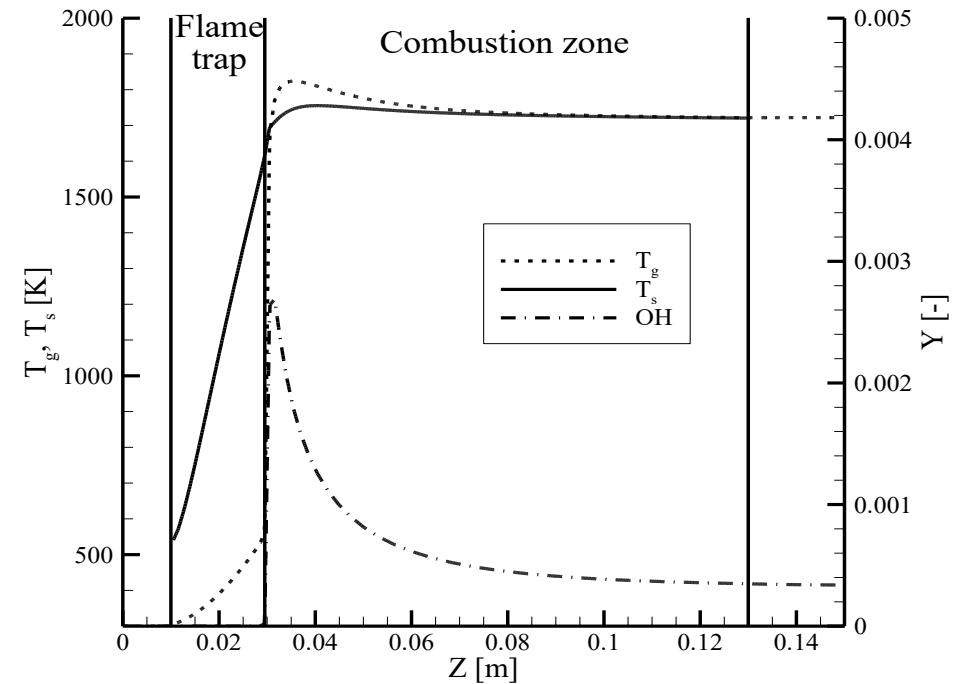
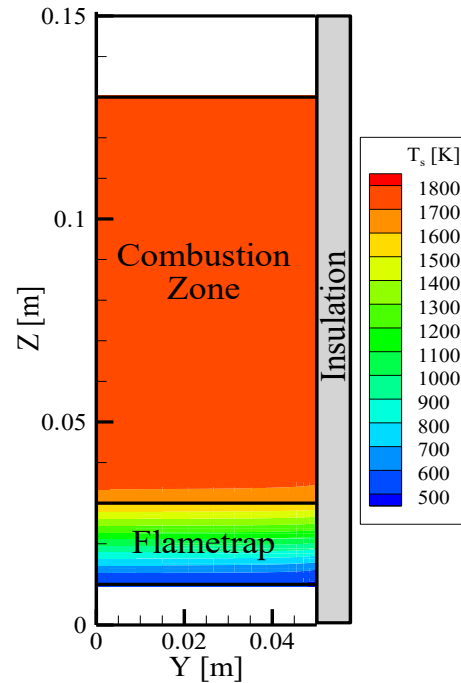
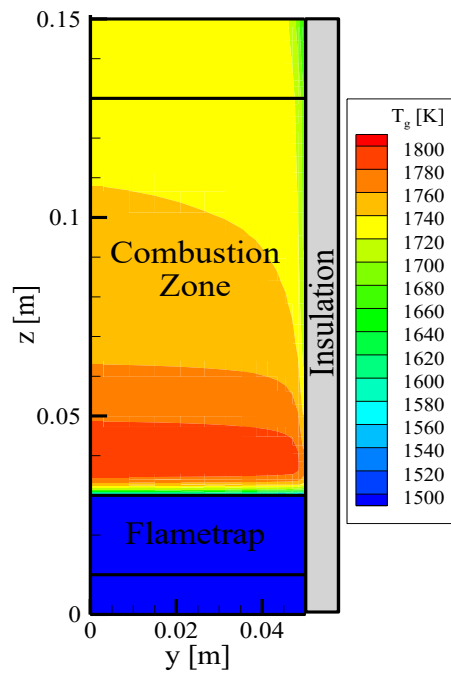
Tracer Distribution



Gasphase

Festkörperphase

Temperaturen und OH-Massenbruch, Brennerzentrum



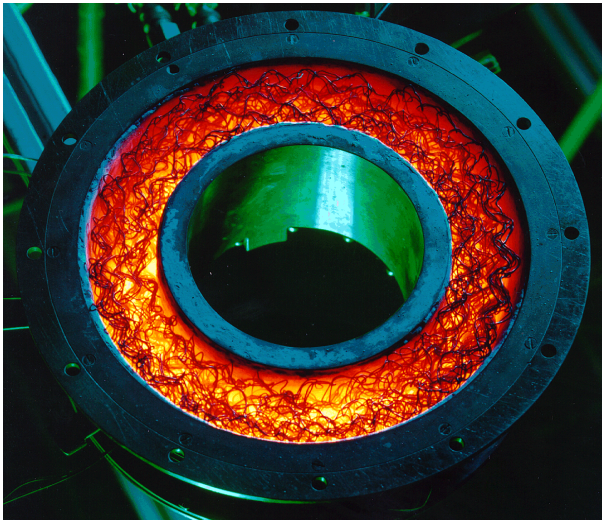
Randbedingungen

$p/A = 1500 \text{ kW/m}^2$

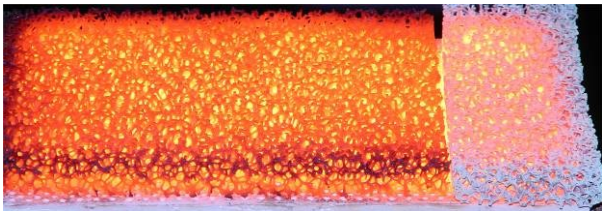
$\lambda = 1.3$

Fuel: 40% CH_4 , 60% CO_2

Für Verbrennungsprozesse innerhalb von porösen Medien werden geeignete Materialien benötigt mit:

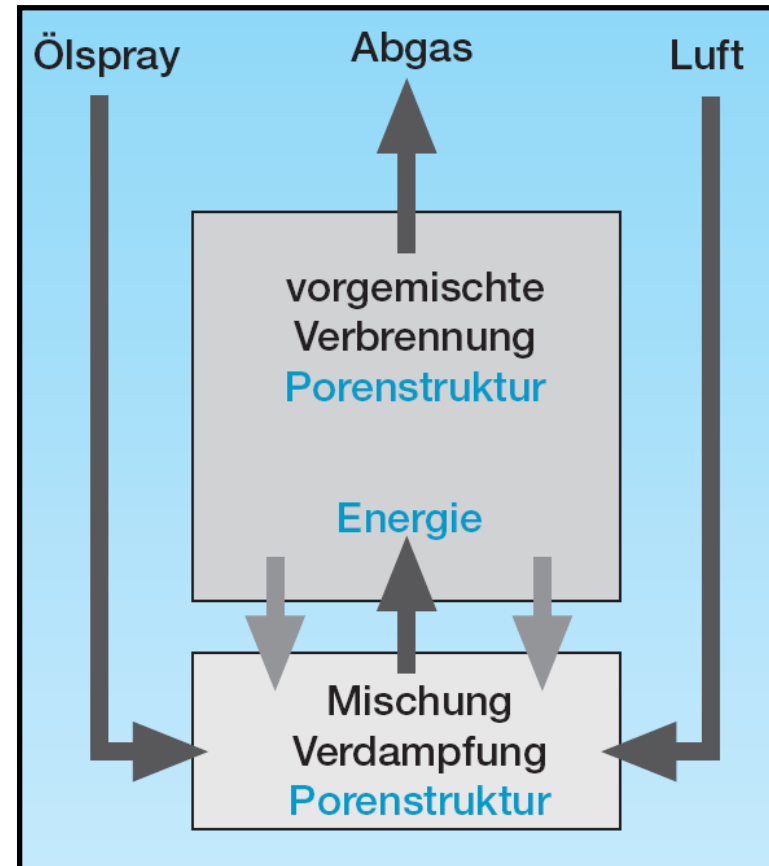
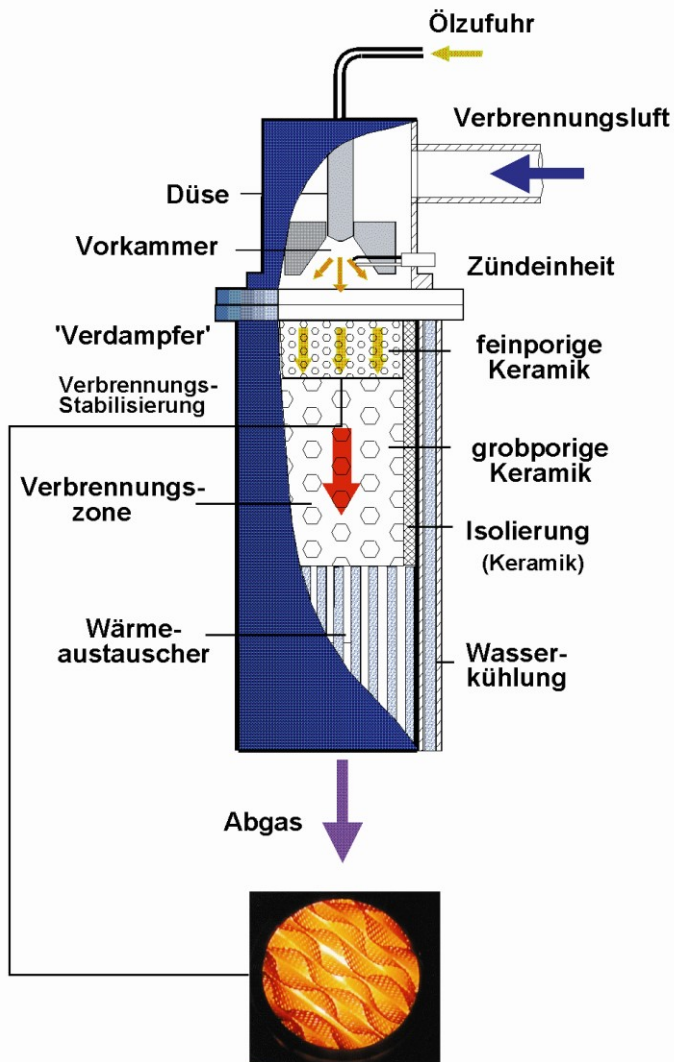


- großer maximaler Anwendungsgrenztemperatur ($T > 1.400^{\circ}\text{C}$)
- exzellenter Temperaturwechselbeständigkeit
- moderater thermischer Expansion
- guten Wärmetransporteigenschaften
- hoher mechanischer und chemischer Beständigkeit



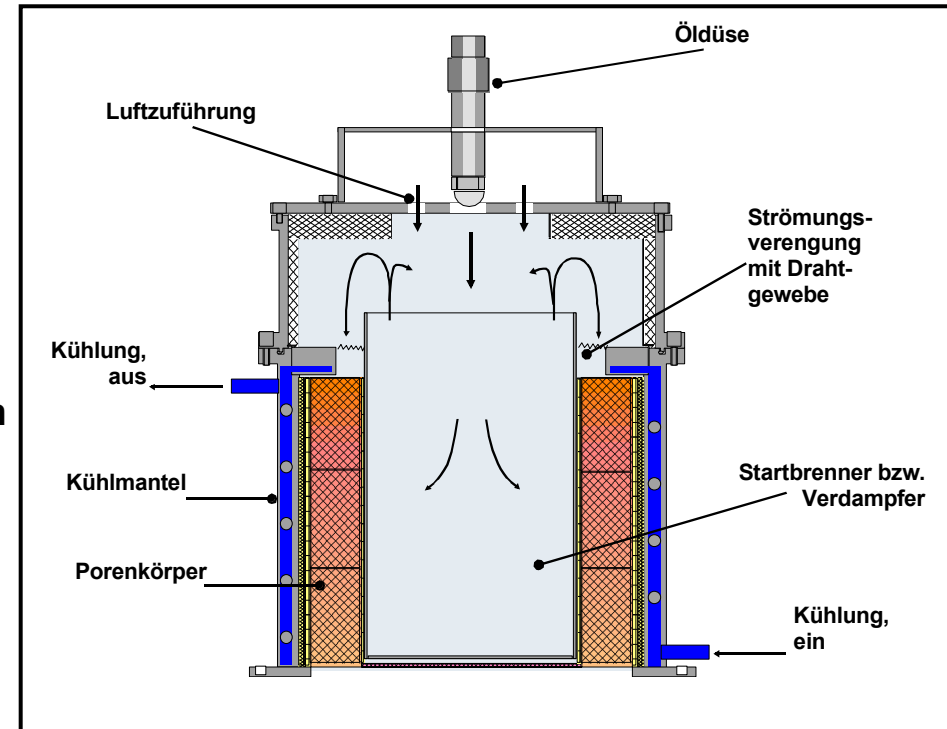
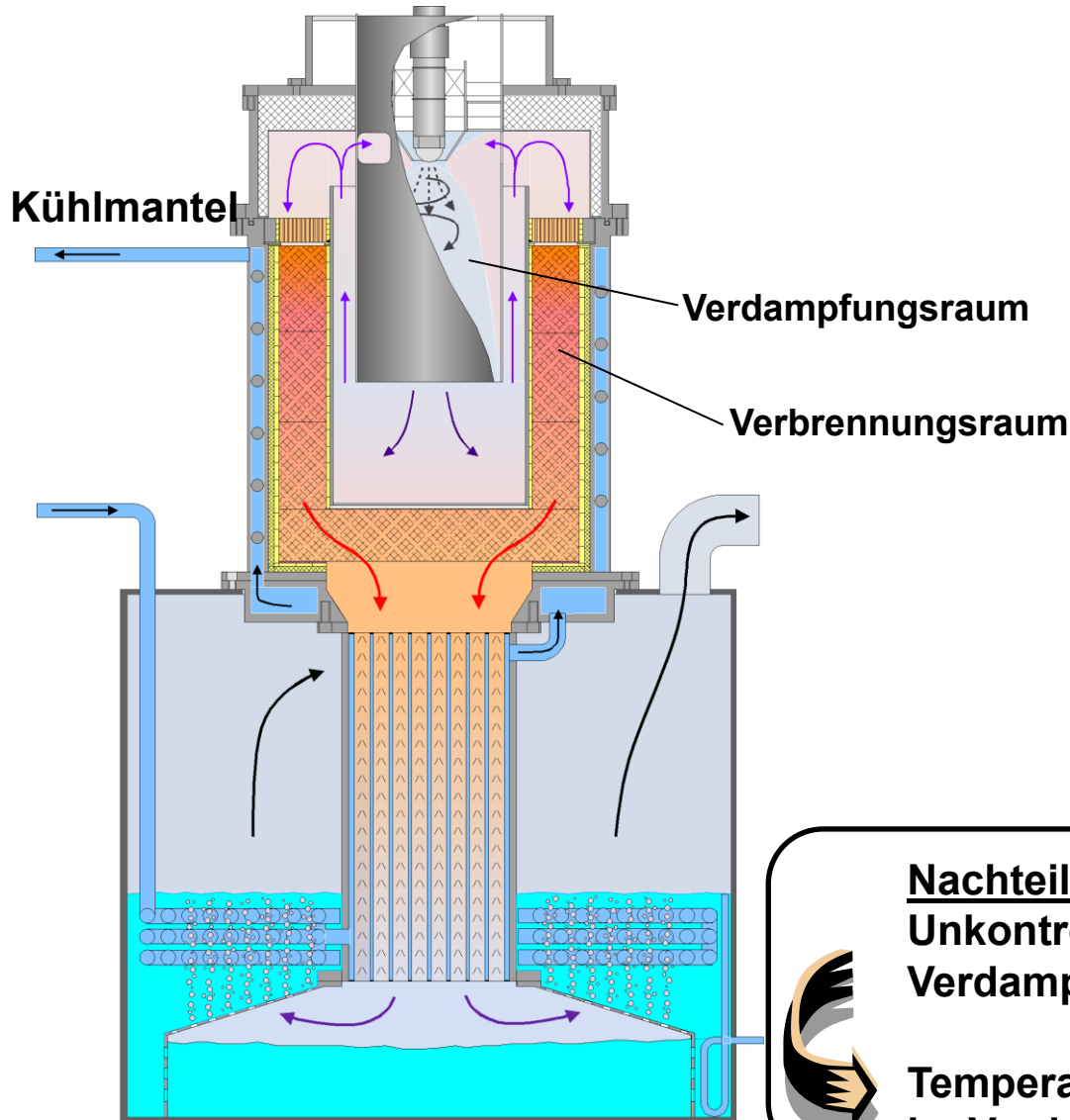
⇒ keramische Materialien und spezielle hochtemperaturbeständige Legierungen können angewandt werden

Verbrennung flüssiger Brennstoffe



Nachteile:
Ablagerung und Crackreaktionen des flüssigen Brennstoffes

Verbrennung flüssiger Brennstoffe



Modifizierter Brenner-Verdampfer-Einheit

Nachteile:

Unkontrollierbare Wärmeleitung in den Verdampfungsraum.



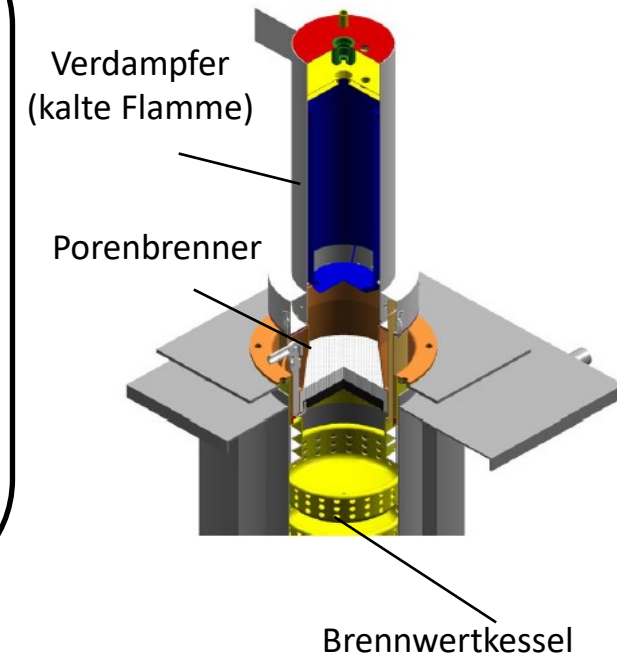
Temperaturerhöhung und anschließend Selbstzündung im Verdampfer

BIOFLAM-Projekt:

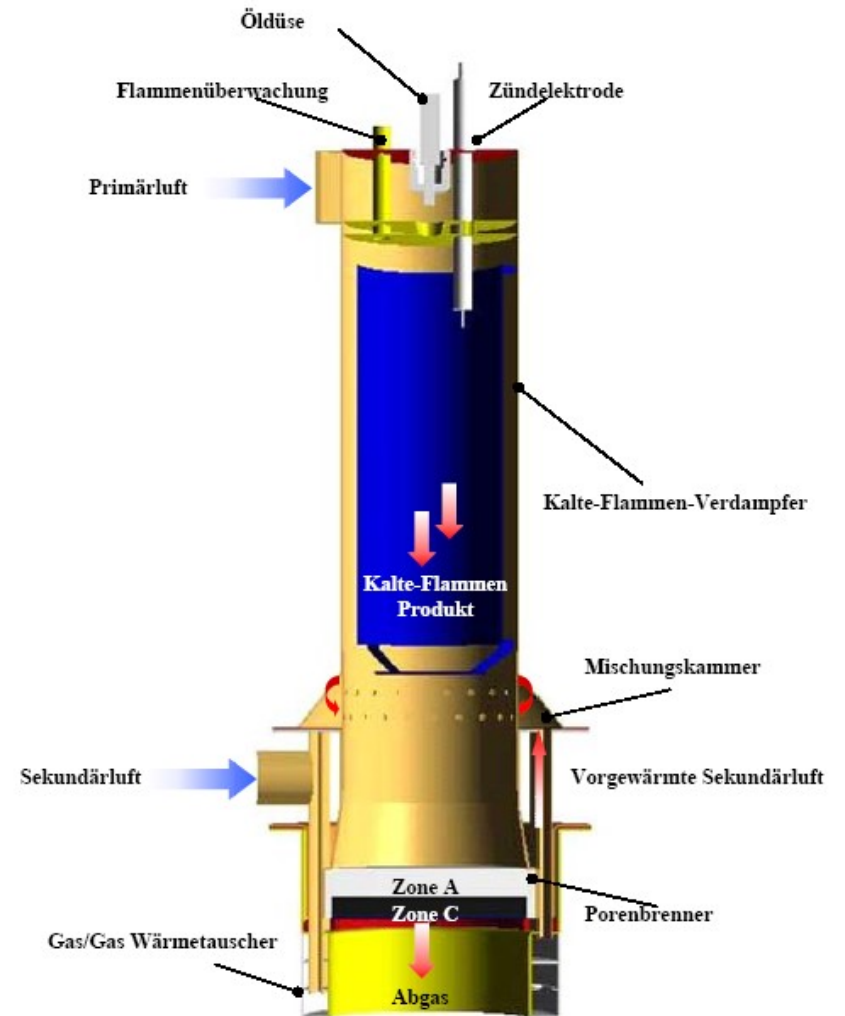
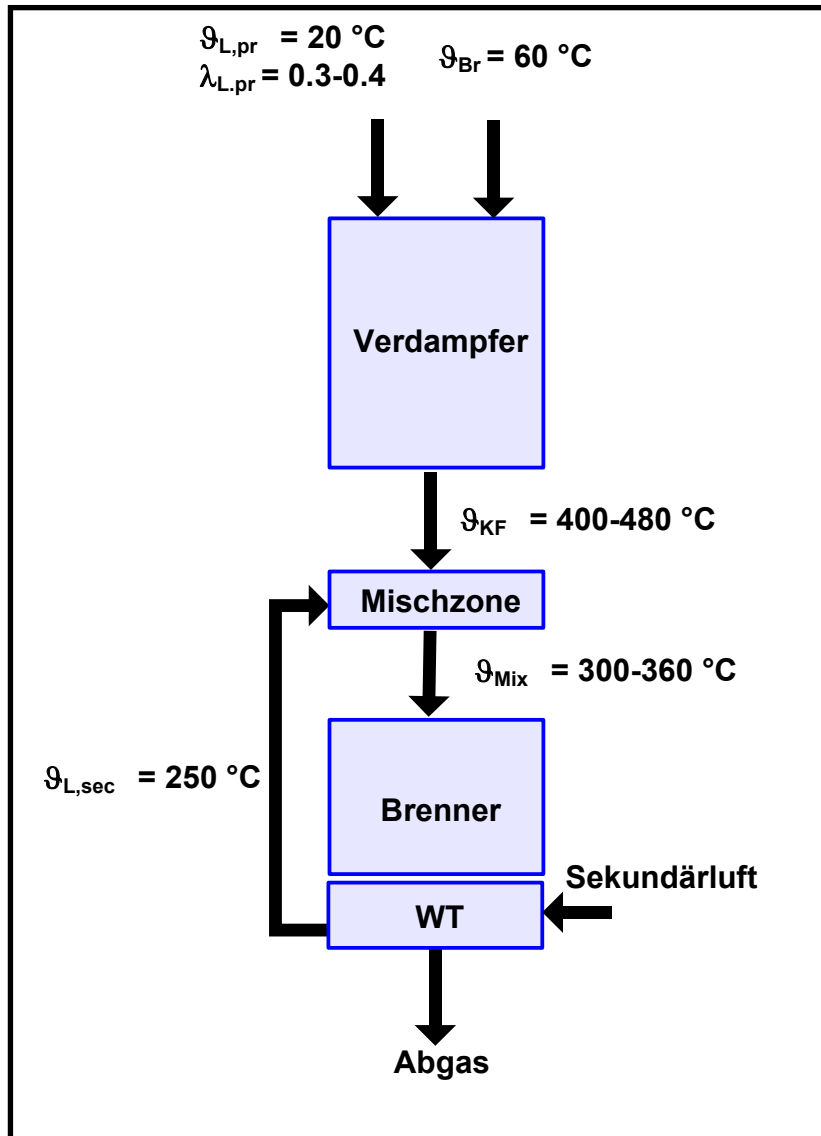
Einsatz von flüssigen Biobrennstoffen für neue Heiztechniken in Haushaltsanwendungen basierend auf Kalte Flammen Verdampfung und Verbrennung in porösen Medien.

Ausgangssituationen

- ❖ Konventionelle Ölheizungen haben einen im Vergleich Gasheizungen höheren Ausstoß an Stickoxiden und CO_2 pro kWh
- ❖ Konventionelle Ölheizungen können nicht mit Bioölen betrieben werden
- ❖ Bestehende Ölbrenner können kaum in der Leistung modulieren
- ❖ Die Brennwertechnik hat sich bei Ölheizungen noch durchgesetzt



Verbrennung flüssiger Brennstoffe

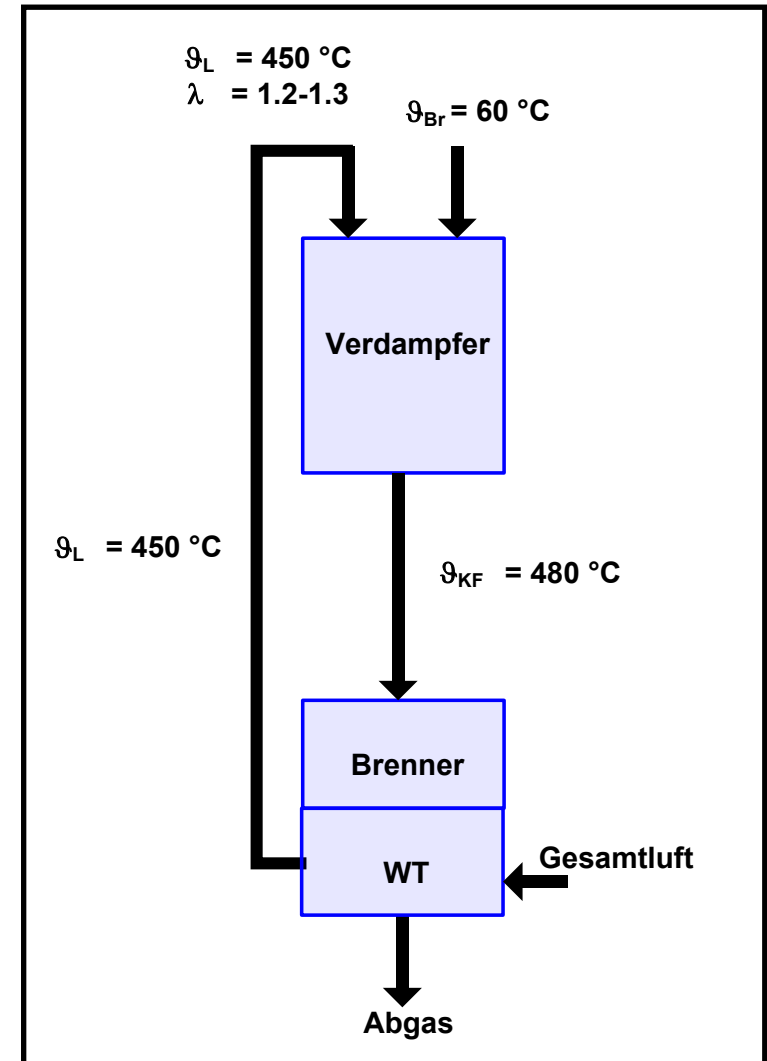
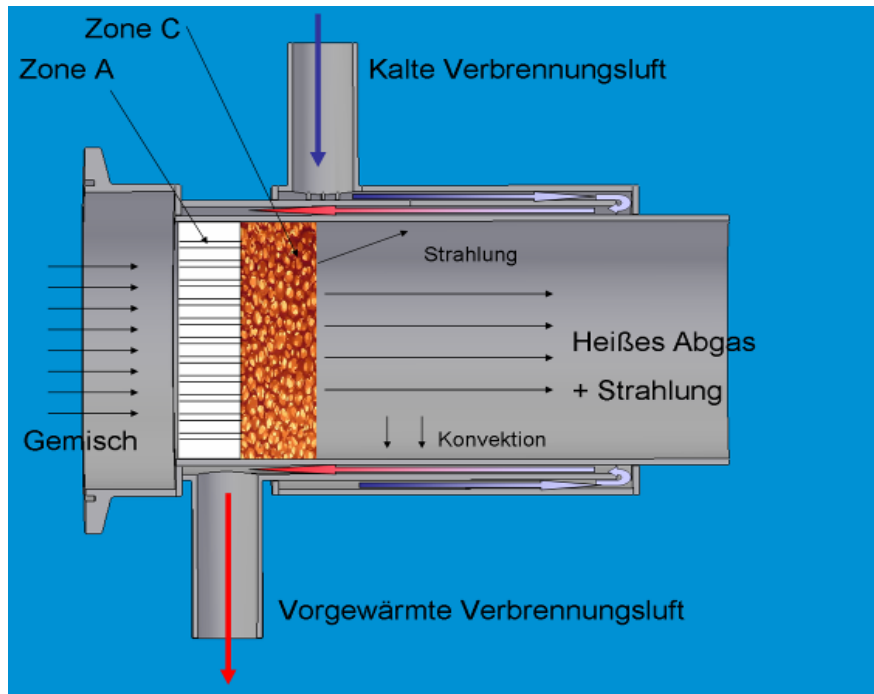


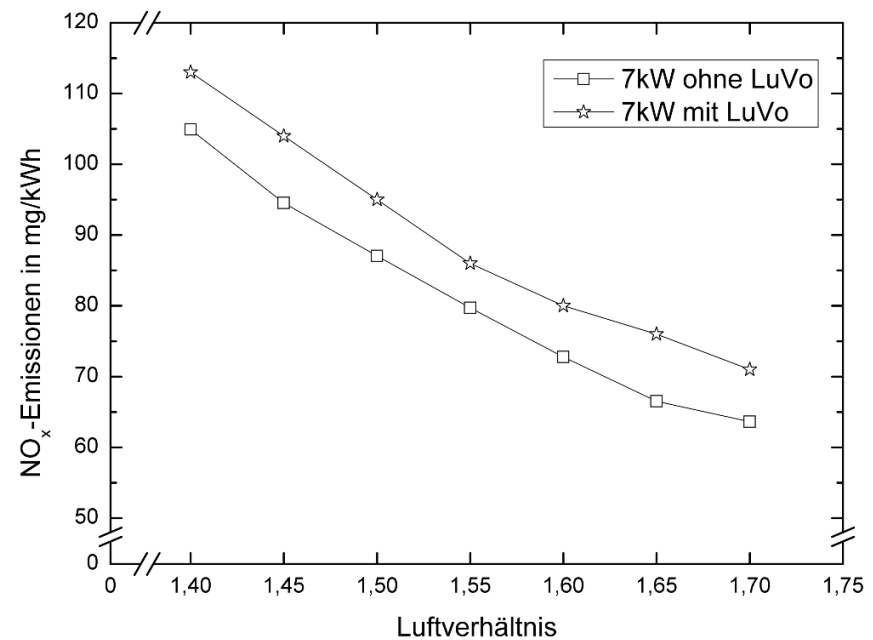
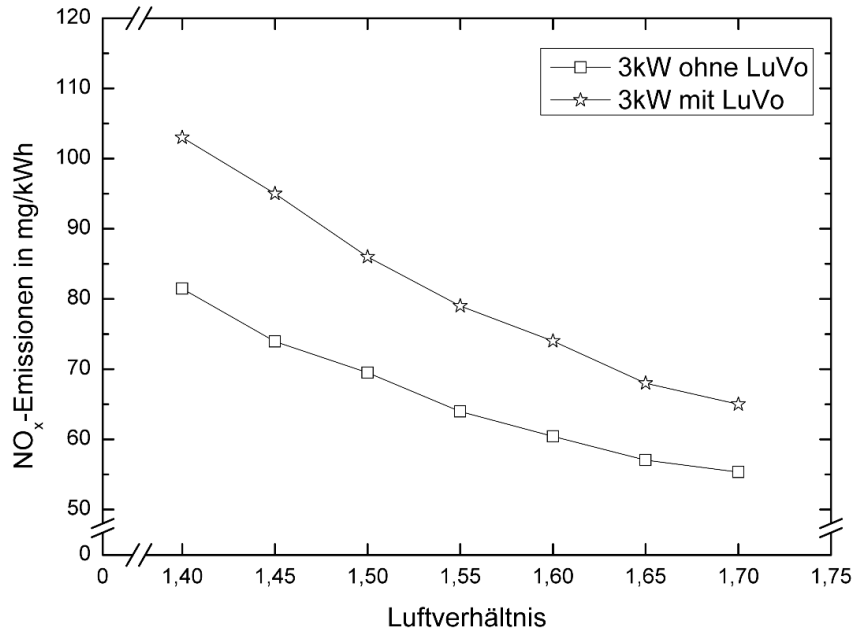
Verbrennung flüssiger Brennstoffe

PyrlInno - Die kleinste Ölheizung der Welt (Gebäudenenergieversorgung)

Brennstoffe

Heizöl EL
Rapsöl
Fame
Blends





Geringere Auskopplung von Energie durch Strahlung

- Höhere Temperatur in Verbrennungszone
- Höhere NO_x-Emissionen
- bei kleinen Leistungen stärker ausgeprägt, da Anteil der konvektiven Wärmeabfuhr geringer ist

Technische Umsetzung

