

8. Kolloquium BVT/Stand der Technik, Dresden, 28.11.2018

Neue TA Luft – Herausforderungen für die thermische und katalytische Nachverbrennung

Prof. Dr.-Ing. Torsten Reindorf
Hochschule Trier

Trier University
of Applied Sciences

H O C H
S C H U L E
T R I E R

Änderungen der TA Luft

- Thermische und katalytische Nachverbrennung sind Standard-Verfahren für die Minderung organischer Schadstoffe – insbesondere VOC – und von Geruch.
- Daher sind vor allem Änderungen der TA Luft relevant in den Abschnitten:
 - 5.2.5 Organische Stoffe
 - 5.2.7 Karzinogene, keimzellmutagene oder reproduktionstoxische Stoffe sowie schwer abbaubare, leicht anreicherbare und hochtoxische organische Stoffe
 - 5.2.8 Geruchsstoffe
- Dort sind u.a. folgende Veränderungen vorgesehen (ohne Anspruch auf Vollständigkeit):

Änderungen der TA Luft

- 5.2.5 Organische Verbindungen
 - Methanol in Klasse I eingestuft (20 mg/m³)
 - Octamethylcyclotetrasiloxan jetzt Klasse I (20 mg/m³) statt Klasse II (0,10 g/m³)
- 5.2.7.1.1 Karzinogene Stoffe
 - Benzol jetzt Klasse II (0,5 mg/m³) statt Klasse III (1 mg/m³)
 - **neu aufgenommen: Formaldehyd mit Sonderregelung (5 mg/m³)**
 - neu aufgenommen: Quarzfeinstaub PM₄ (0,5 mg/m³)
- 5.2.7.1.2 Keimzellmutagene Stoffe
 - Grenzwert (0,15 g/h bzw. 0,05 mg/m³) statt Zielwert
- 5.2.7.1.3 Reproduktionstoxische Stoffe
 - Grenzwert (2,5 g/h bzw. 1 mg/m³) statt Zielwert
- 5.2.7.2 Schwer abbaubare, leicht anreicherbare und hochtoxische organische Stoffe
 - Dioxine und Furane ergänzt um PCB

Änderungen der TA Luft

- 5.2.8 Geruchsstoffe
 - Absatz „Bei der Festlegung des Umfanges der Anforderungen im Einzelfall...“ wurde gestrichen.
 - ergänzt: „Bevorzugt sollen [als Emissionsbegrenzung] Geruchsstoffkonzentrationen festgelegt werden“ (statt Emissionsminderungsgrad).
 - außerdem:
„Werden Abgasreinigungseinrichtungen mit Verbrennungstemperaturen von mehr als 800 °C eingesetzt und werden die Abgase nach Nummer 5.5 abgeleitet, soll auf die Festlegung einer Geruchsstoffkonzentration als Emissionsbegrenzung verzichtet werden.“

- Ob das Alles so kommt ist natürlich noch fraglich.

Formaldehyd

- Für Formaldehyd sollen bei bestimmten Anlagenarten von der 5 mg/m³ Regel abweichende Grenzwerte eingeführt werden, z.B.
 - **Verbrennungsmotoranlagen mit Biogas**, Deponiegas, etc.,
 - Herstellung von
 - Kunstharzen,
 - Endlosglasfasern, Mineralfasern,
 - Papier, Karton oder Pappe,
 - **Holzspanplatten**, Holzfaserplatten oder Holzfasermatten,
 - Beschichten, Imprägnieren, Kaschieren, Lackieren oder Tränken von Glas- oder Mineralfasern oder Papieren,
 - **Textilveredlung** durch Thermofixieren, Thermosolieren, Beschichten, Imprägnieren oder Appretieren,
 - Räuchern von Fleisch- oder Fischwaren,
 - Herstellung oder Raffination von Zucker unter Verwendung von Zuckerrüben oder Rohrzucker,
 - **Rösten** oder Mahlen **von Kaffee**, Abpacken von gemahlenem Kaffee, Rösten von Kaffee-Ersatzprodukten, Getreide, Kakaobohnen oder Nüssen.
- Außerdem:
 - diverse Sonderregelungen,
 - unterschiedliche Übergangsfristen.

Formaldehyd

Bei den hier betrachteten Nachverbrennungsanlagen kann Formaldehyd auf zwei Arten ins Reingas gelangen:

- **Pfad 1**

Es ist bereits im Abgas enthalten und tritt ins Reingas über.



- **Pfad 2**

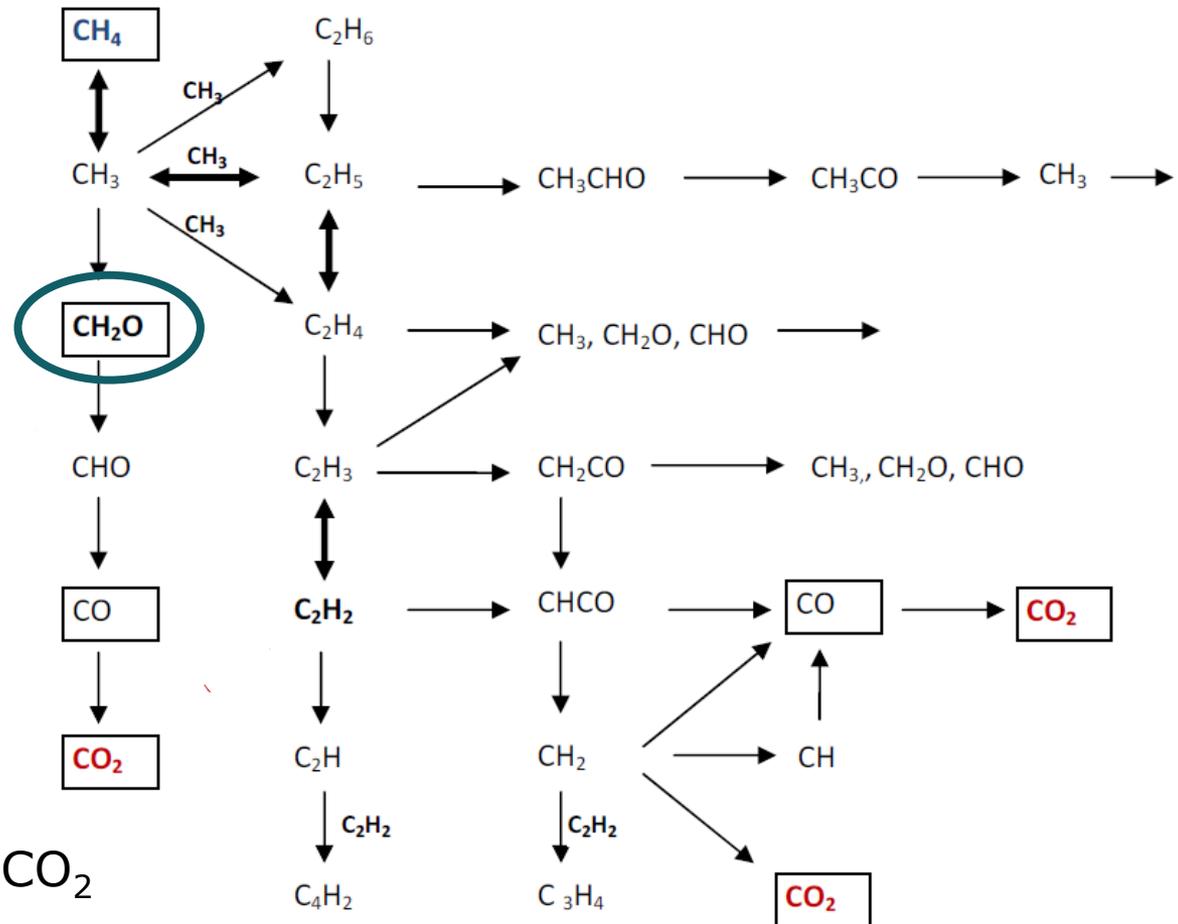
Es entsteht als Nebenprodukt bei unvollständiger Verbrennung.



Formaldehyd

Pfad 2: Verbrennung von Methan (Beispiel)

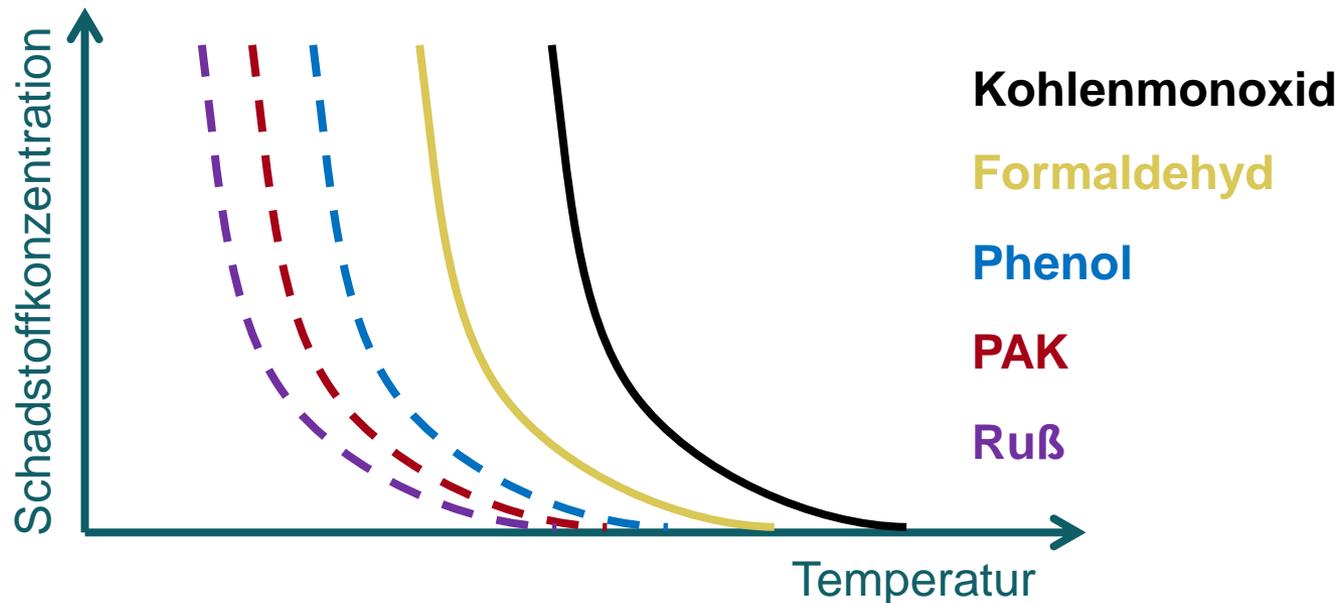
- Formaldehyd CH_2O ist eine der letzten Oxidationsstufen vor Kohlenmonoxid.
- Dies gilt für andere Kohlenwasserstoffe auf ähnliche Weise.
- Allgemeines Schema:
 $\text{C}_x\text{H}_y \rightarrow \dots \rightarrow \text{CH}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} \rightarrow \text{CO}_2$



Quelle: Warnatz 1983

Formaldehyd

Pfad 2: Einfluss der Verbrennungstemperatur



Schematische Darstellung für homogene Gasphasenreaktionen!

(vgl. z.B. Fritz+Kern 1992)

Formaldehyd

Gegenmaßnahmen:

- Brenner richtig einstellen,
- höhere Verbrennungstemperatur,
- bessere Durchmischung,
- bessere Brenner,
- längere Verweilzeit.

Nachteile:

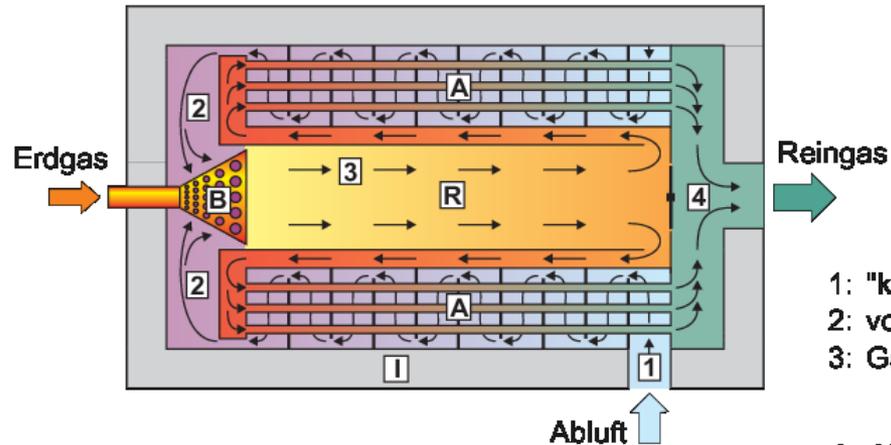
- größerer Bedarf an Zusatzbrennstoff,
- höhere Betriebskosten,
- ggf. größere Investitionskosten,
- mehr Stickoxide.

Thermische Nachverbrennung

mit rekuperativer Abluftvorwärmung (TNV-Anlagen)

Funktionsschema

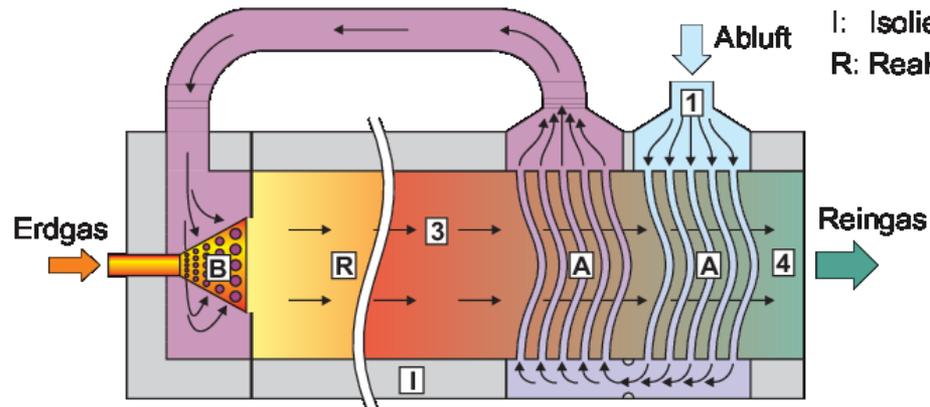
I. Kompaktanlage



- 1: "kalte" Abluft
- 2: vorgewärmte Abluft
- 3: Gas im Reaktionsraum

- A: Abluftvorwärmer (rekuperativ)
- B: Brenner
- I: Isolierung
- R: Reaktionsraum

II. Komponentenanlage

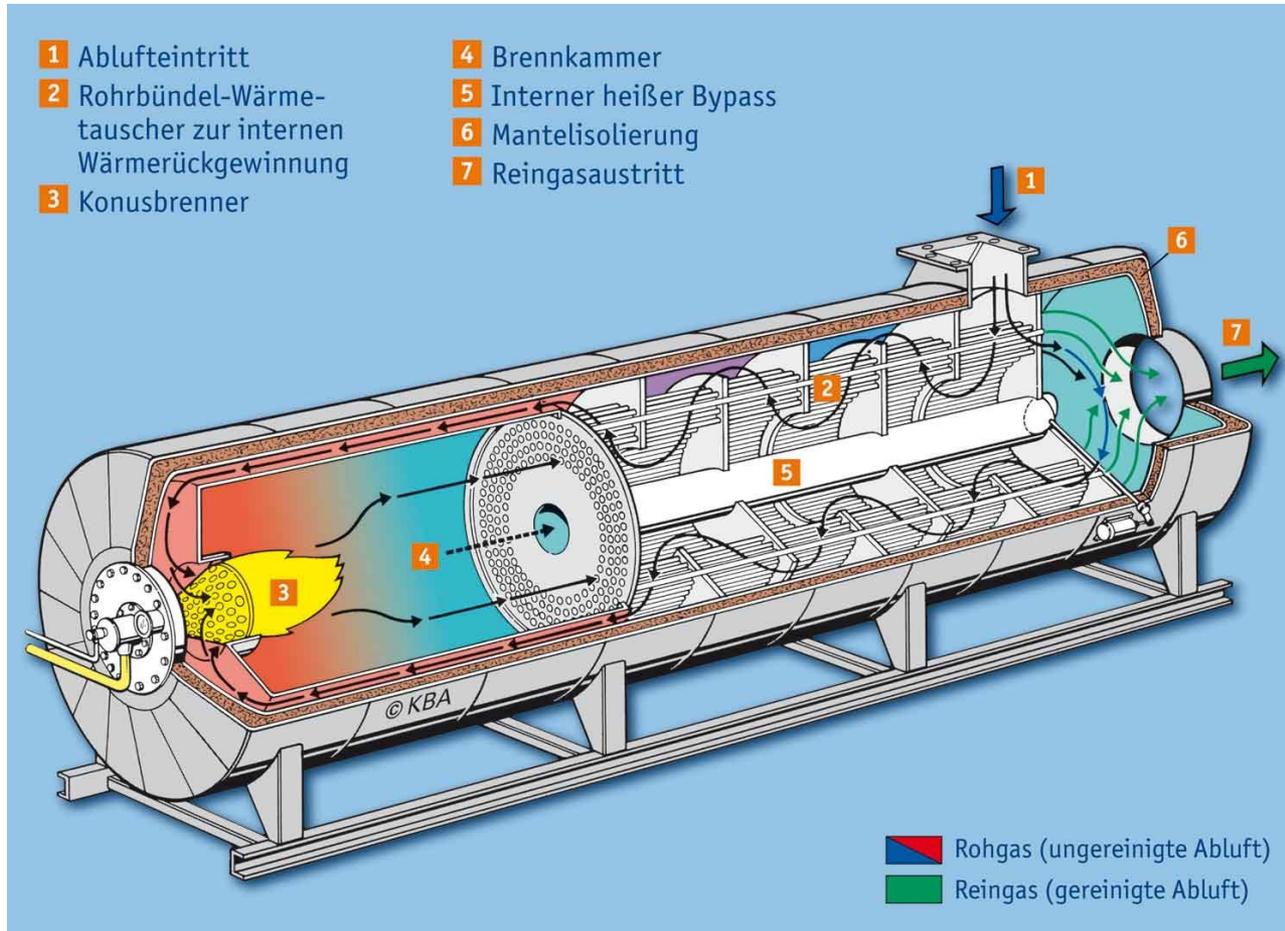


Quelle: Carlowitz+Neese 2003

Thermische Nachverbrennung

mit rekuperativer Abluftvorwärmung (TNV-Anlagen)

Beispiel



Quelle: KBA CleanAir

(TNV-Anlagen)

- Abgas- und Reingasseite sind apparativ vollständig voneinander getrennt.
- Dadurch ist eine Kontamination des Reingases ausgeschlossen, außer
 - bei Rissen in der Brennkammer oder dem Wärmeübertrager,
 - bei heißem Bypass, wenn die Brennkammer nicht ausreichend dimensioniert ist.

⇒ **Pfad 1 ist unter normalen Umständen unkritisch.**

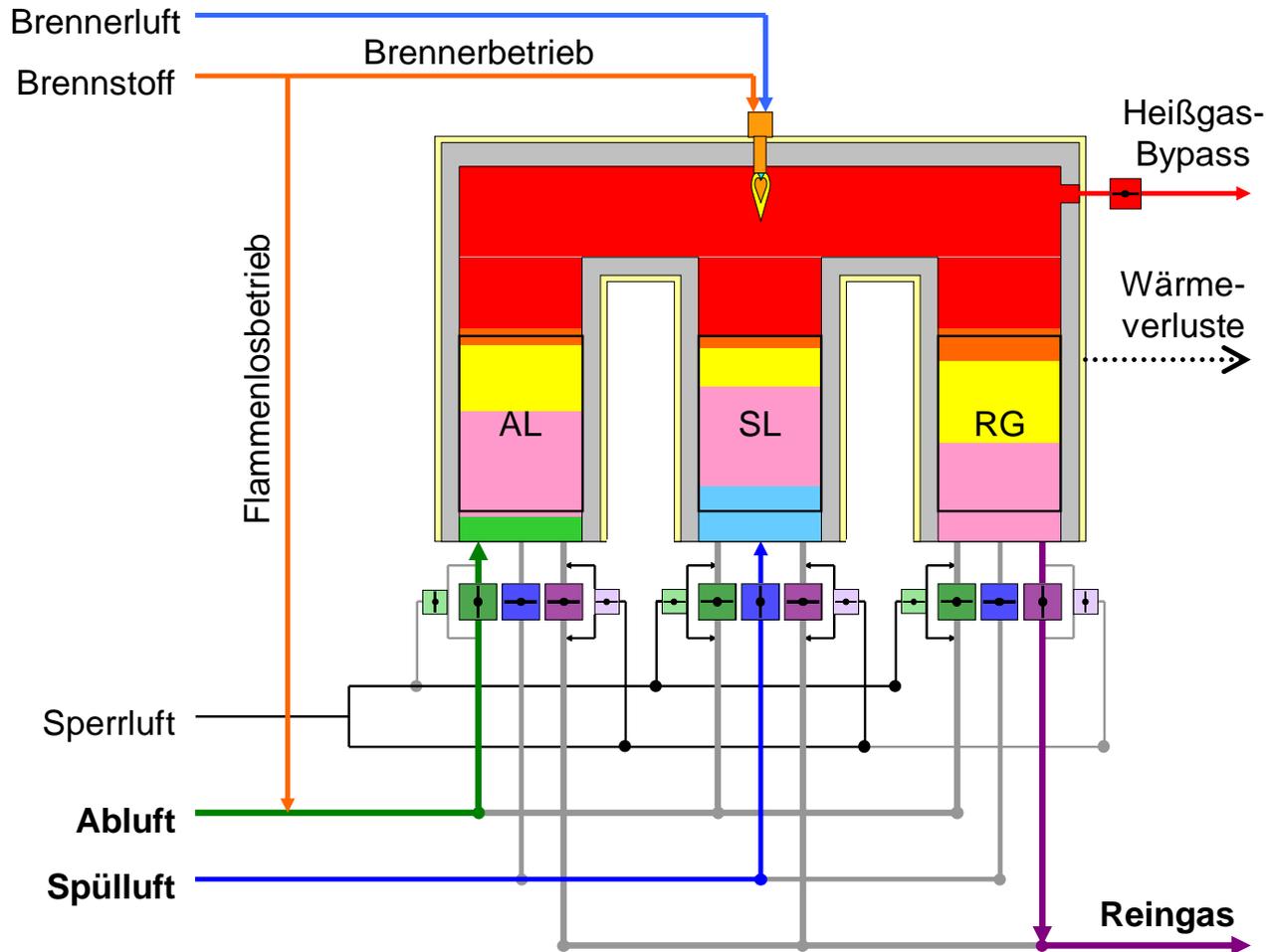
- Verbrennungstemperatur kann erhöht werden.
- Brenner kann gegen einen besseren getauscht werden.
- Neuanlagen können ggf. besser konstruiert werden.

⇒ **Pfad 2 ist recht gut beherrschbar.**

Thermische Nachverbrennung

mit regenerativer Abluftvorwärmung (RNV-Anlagen)

Funktionsschema

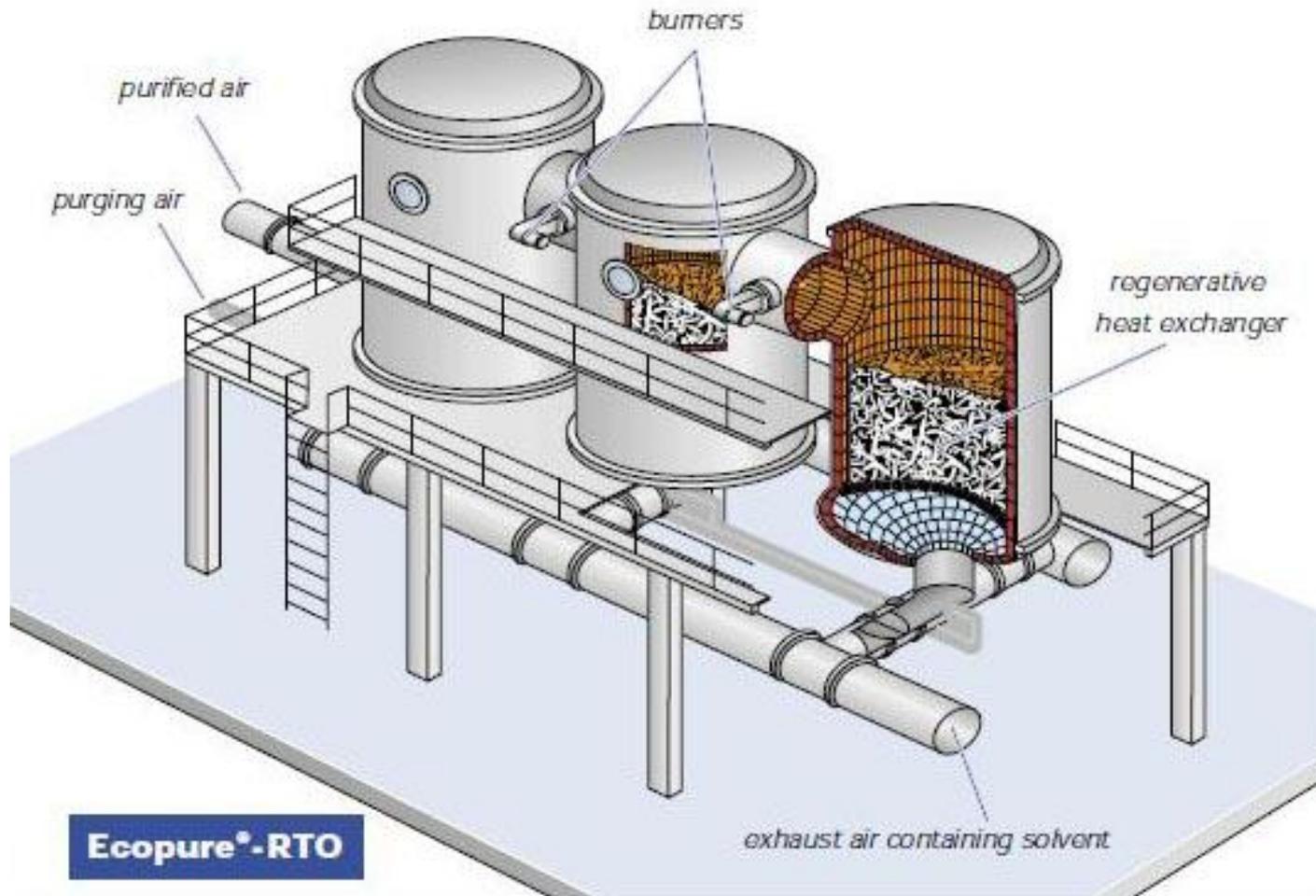


Quelle: Reindorf 2015

Thermische Nachverbrennung

mit regenerativer Abluftvorwärmung (RNV-Anlagen)

Beispiel



Quelle: DÜRR

mit regenerativer Abluftvorwärmung (RNV-Anlagen)

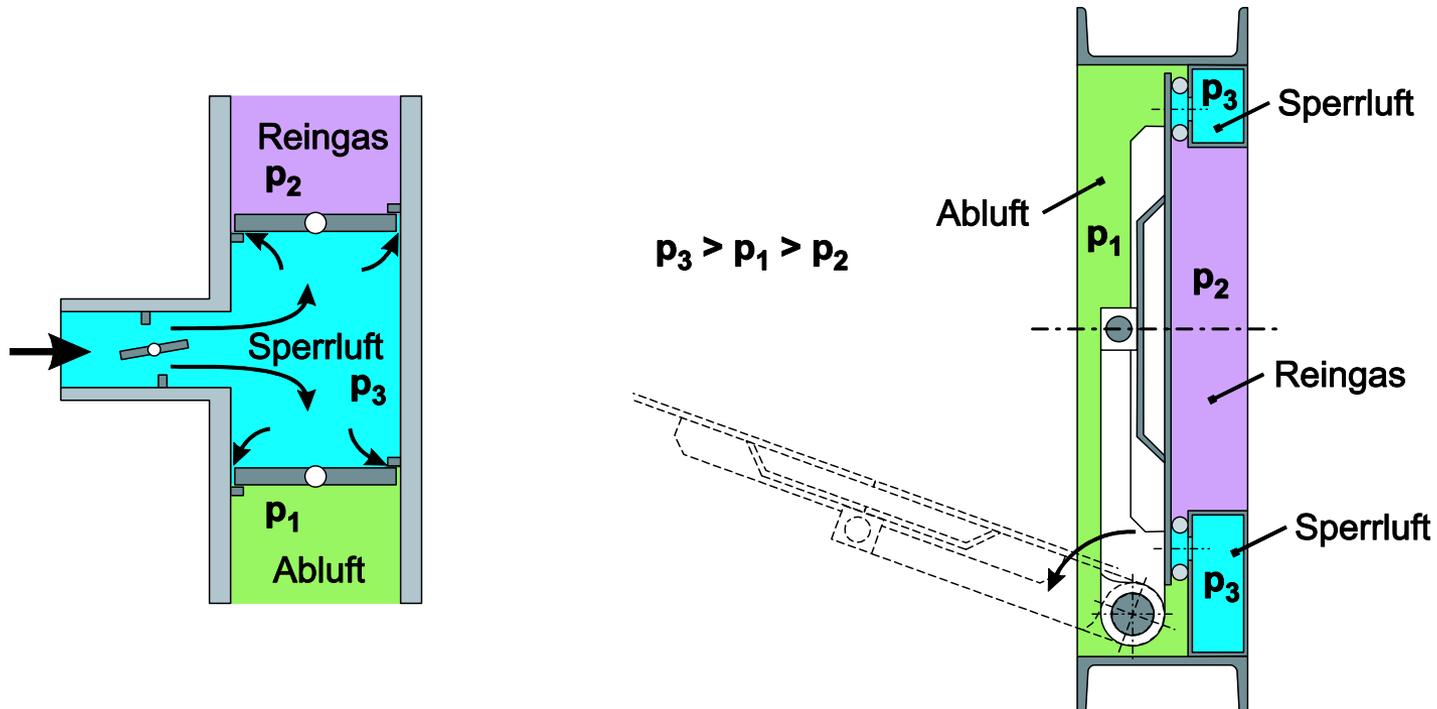
- **Pfad 2** (unvollständige Verbrennung) kann ggf. durch höhere Brennraumtemperatur verhindert werden und **ist unkritisch**.
- **Pfad 1 ist hier aber systemimmanent!**
- Möglichkeiten für Rohgas-Reingas-Kurzschlüsse
 - Löcher oder Risse:
 - in der Abtrennung zwischen den Regeneratoren bzw. Klappenkästen bei Kompaktanlagen.
 - Umschaltklappen:
 - schlecht anliegend (Klappe verzogen oder falsch eingestellt, Dichtung teilweise abgelöst oder defekt),
 - statischer Druck der Sperrluft zu niedrig,
 - Fehler in der Zyklussteuerung.
 - Spültakt:
 - Spülluftvolumen zu gering im Verhältnis zum Volumen des Klappenkastens,
 - statischer Druck in der Spülluftleitung zu niedrig.
 - Instationäre Effekte:
 - Kondensation im Abgastakt, Verdunsten im Reingastakt,
 - Diffusion in die Faserdämmung hinein bzw. heraus.
 - etc.

Thermische Nachverbrennung

mit regenerativer Abluftvorwärmung (RNV-Anlagen)

Fluiddynamische Dichtung

- Abgas (Abluft) wird gegenüber Reingas durch Sperrluft abgedichtet.
- Sperrluft muss höheren Druck haben als das Abgas!
- Sperrluft sollte möglichst gleichmäßig über die Dichtung ausströmen.

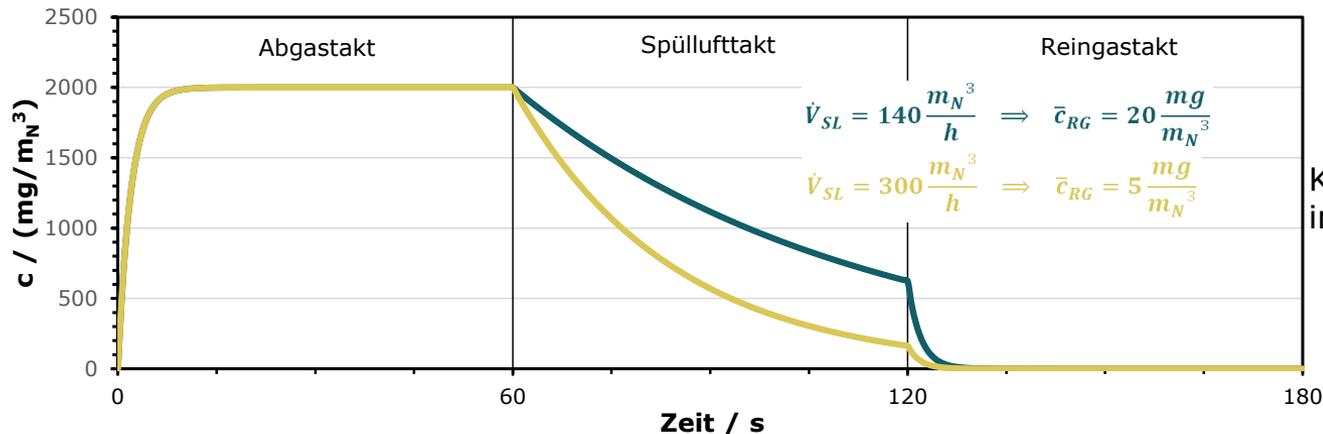


Quelle: Carlowitz 2001

mit regenerativer Abluftvorwärmung (RNV-Anlagen)

Spülung

- Bei der Spülung wird das im Klappenkasten verbliebene Abgas in Richtung Brennraum gefördert.
- Dabei mischen sich Spülluft und Abgas und das Abgas wird verdünnt (keine Kolbenströmung sondern eher Rührkessel).
- Eine Verdünnung bis auf eine Konzentration von null ist unmöglich!
- Je niedriger der Reingas-Grenzwert ist, desto größer muss der Spülluftstrom sein.



Berechnet für: Abgasstrom $3.600 \text{ m}^3/\text{h}$, Abgaskonzentration $2 \text{ g}/\text{m}^3$, Volumen des Klappenkastens 2 m^3 , Umschaltzeit 60 s , Reingas- und Spülluftkonzentration $0 \text{ g}/\text{m}^3$

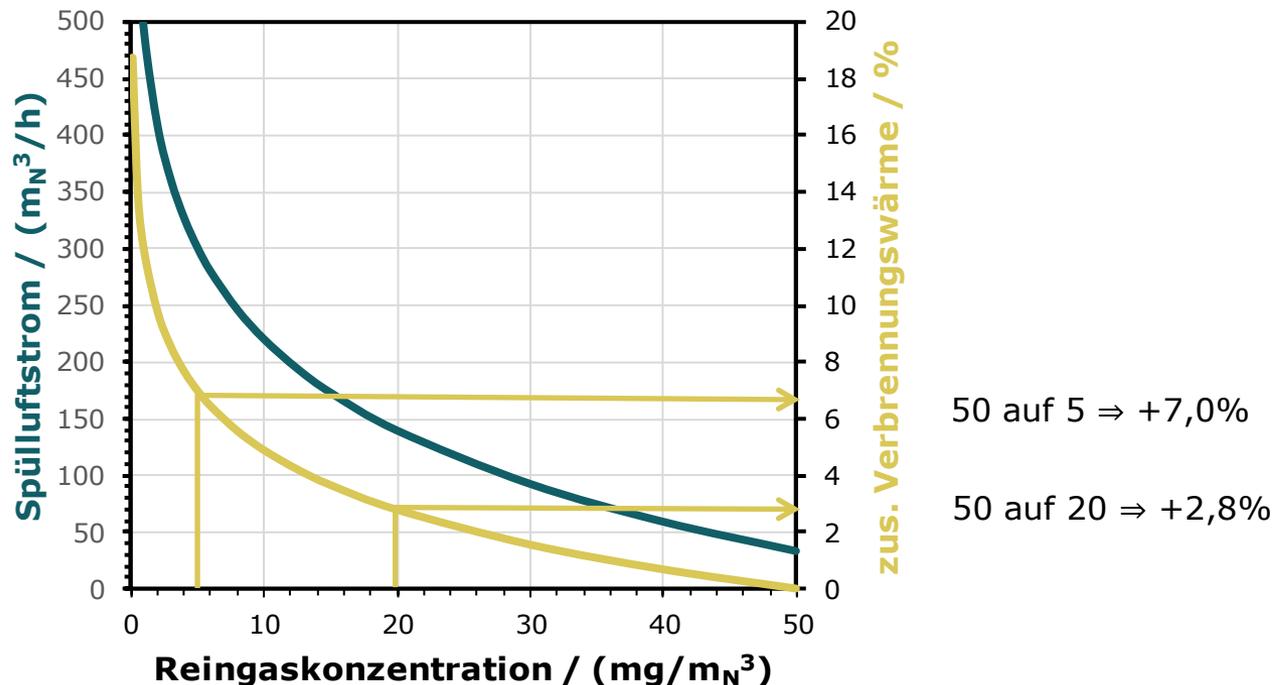
(Berechnungsansätze aus Reindorf 2015)

Thermische Nachverbrennung

mit regenerativer Abluftvorwärmung (RNV-Anlagen)

Spülung

- Je mehr Spülluft zugeführt wird, desto größer ist der Bedarf an Verbrennungswärme.



Berechnet für: Abgasstrom $3.600 \text{ m}^3/\text{h}$, Abgaskonzentration $2 \text{ g}/\text{m}^3$, Volumen des Klappenkastens 2 m^3 , Umschaltzeit 60 s , Reingas- und Spülluftkonzentration $0 \text{ g}/\text{m}^3$,
Bei $50 \text{ mg}/\text{m}^3$: Auslegungsvorwärmgrad = 95%, Verbrennungswärme = 100%

(Berechnungsansätze aus Reindorf 2015)

Thermische Nachverbrennung

mit regenerativer Abluftvorwärmung (RNV-Anlagen)

Beispielhafte Ergebnisse

- Annahmen:
 - Abgas-Normvolumenstrom 3.600 m_N³/h
 - Abgaskonzentration 2.000 mg/m³
 - ⇒ Schadstoffmassenstrom 7,2 kg/h
 - gefasste Emissionen 90% (≙ 7,2 kg/h)
 - diffuse Emissionen 10% (≙ 0,8 kg/h)
 - Abgastemperatur 50 °C
 - relative Abgasfeuchte 50 %
 - Brennraumtemperatur 850°C
- **Ausgangszustand (Reingaskonzentration 50 mg/m_N³)**
 - Vorwärmgrad 95%
 - gerade autotherm
 - C_{ges}-Abbau 97,5 %*
 - Schadstoff-Restmassenstrom 0,18 kg/h
 - diffuse Emissionen sind ≈ 4 mal größer

(*Einschließlich Schlupf)

mit regenerativer Abluftvorwärmung (RNV-Anlagen)

Beispielhafte Ergebnisse

• Vergleichszustand 1 (Reingaskonzentration 20 mg/m_N³)

- C_{ges}-Abbau 99,0 %*
- Schadstoff-Restmassenstrom 0,072 kg/h
- Veränderung zu Ausgangszustand
 - zusätzlicher Schadstoffabbau 0,108 kg/h (\triangleq 1,5%**)
 - zusätzlicher Wärmebedarf +2,8%
 - zusätzliche CO₂-Emissionen 0,64 kg/h***
- diffuse Emissionen sind \approx 11 mal größer

• Vergleichszustand 2 (Reingaskonzentration 5 mg/m_N³)

- C_{ges}-Abbau 99,75 %*
- Schadstoff-Restmassenstrom 0,018 kg/h
- Veränderung zu Ausgangszustand
 - zusätzlicher Schadstoffabbau 0,162 kg/h (\triangleq 2,25%**)
 - zusätzlicher Wärmebedarf +7,0%
 - zusätzliche CO₂-Emissionen 1,65 kg/h***
- diffuse Emissionen sind \approx 44 mal größer

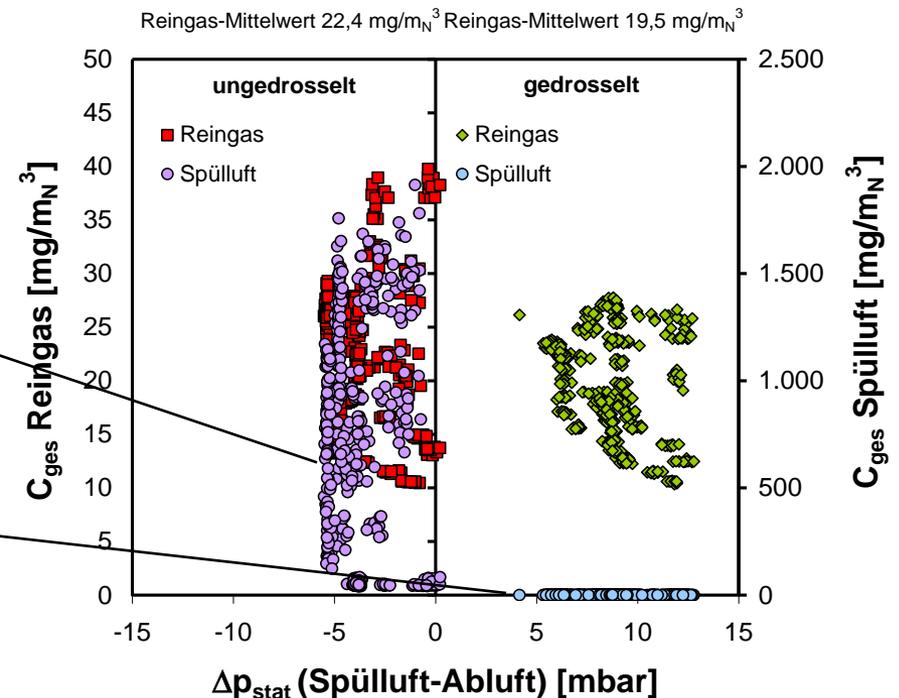
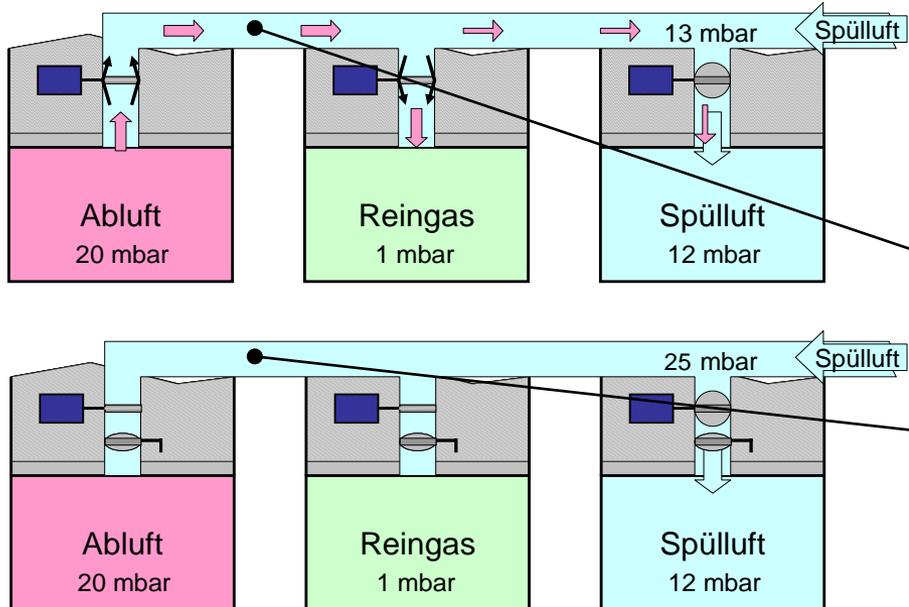
(*Einschließlich Schlupf; **bezogen auf den behandelten Schadstoffmassenstrom; ***bezogen auf Erdgas als Brennstoff)

Thermische Nachverbrennung

mit regenerativer Abluftvorwärmung (RNV-Anlagen)

Spülung

- Druck der Spülluft muss höher sein als der Abgasdruck, sonst kann Abgas über die Spülluftleitung ins Reingas gelangen.
- Dies kann nur sichergestellt werden durch
 - sehr kleine Spülluftleitungen oder
 - zusätzliche Drosselklappen.



Quelle: Reindorf 2012

(RNV-Anlagen)

- **Bewertung:**

- Reingaskonzentrationen $< 5 \text{ mg/m}^3$ sind schwer zu erreichen.
- Außerdem müssen Hersteller den Wert langfristig garantieren können.

- **Ad-hoc-Maßnahmen:**

- Klappen einstellen, Klappenzyklus und Dichtungen überprüfen,
- statische Drücke überprüfen und ggf. anpassen (z.B. mit Drosselklappen),
- Spülluftstrom vergrößern, Zykluszeit verlängern
(\Rightarrow höherer Brennstoffbedarf).

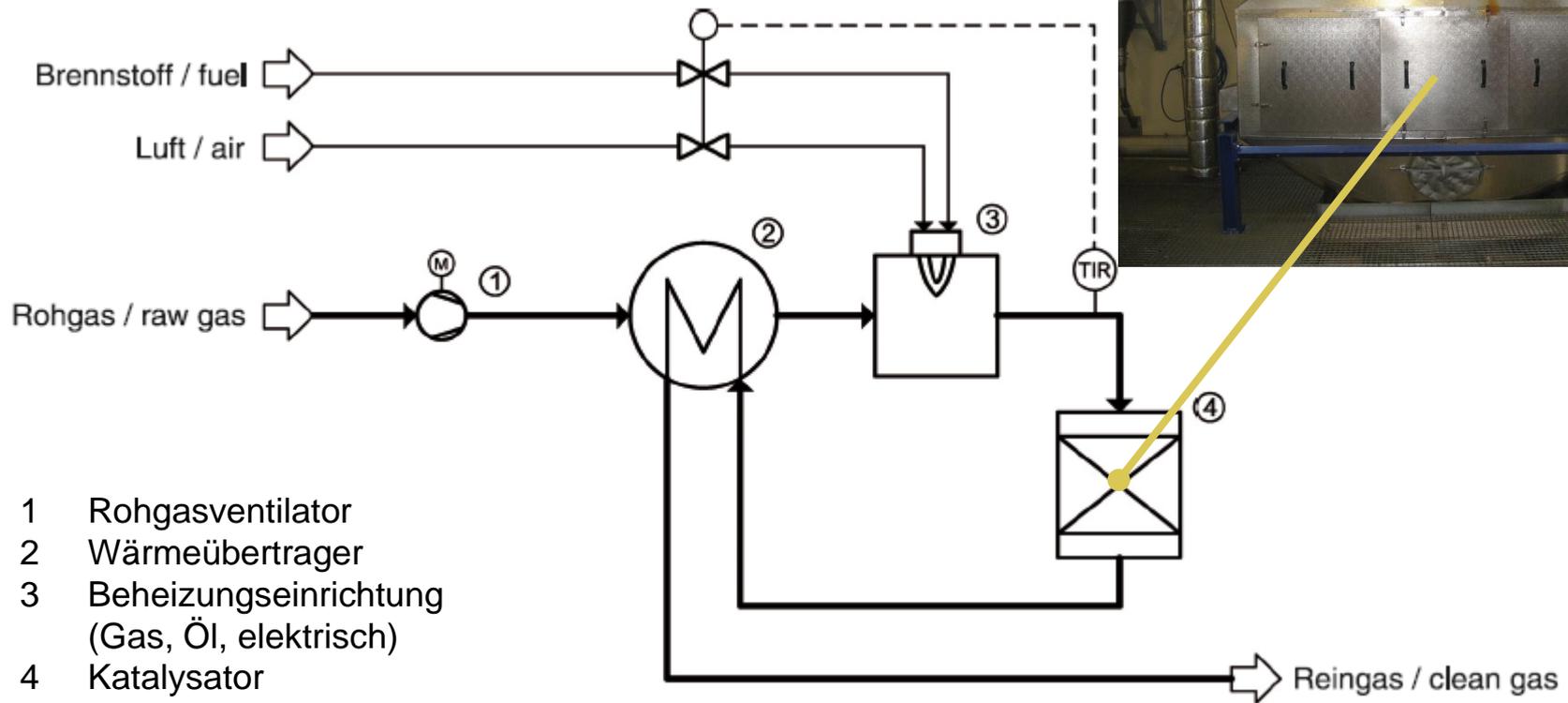
- **Forschung und Entwicklung ist notwendig:**

- Welche Konzentrationen hat das eigentliche Reingas aus dem Brennraum?
- Wie groß ist der „Schlupf“ über die Klappen und Leitungen?
- Welche Rolle spielen Kondensation/Verdunstung und Diffusion?
- Wie lässt sich der Luftkasten mit möglichst kleinem Volumen konstruieren, ohne dass die Anströmung des Regenerators verschlechtert wird?
- Wie kann man den Spültakt optimieren?

Katalytische Nachverbrennung

(KNV-Anlagen)

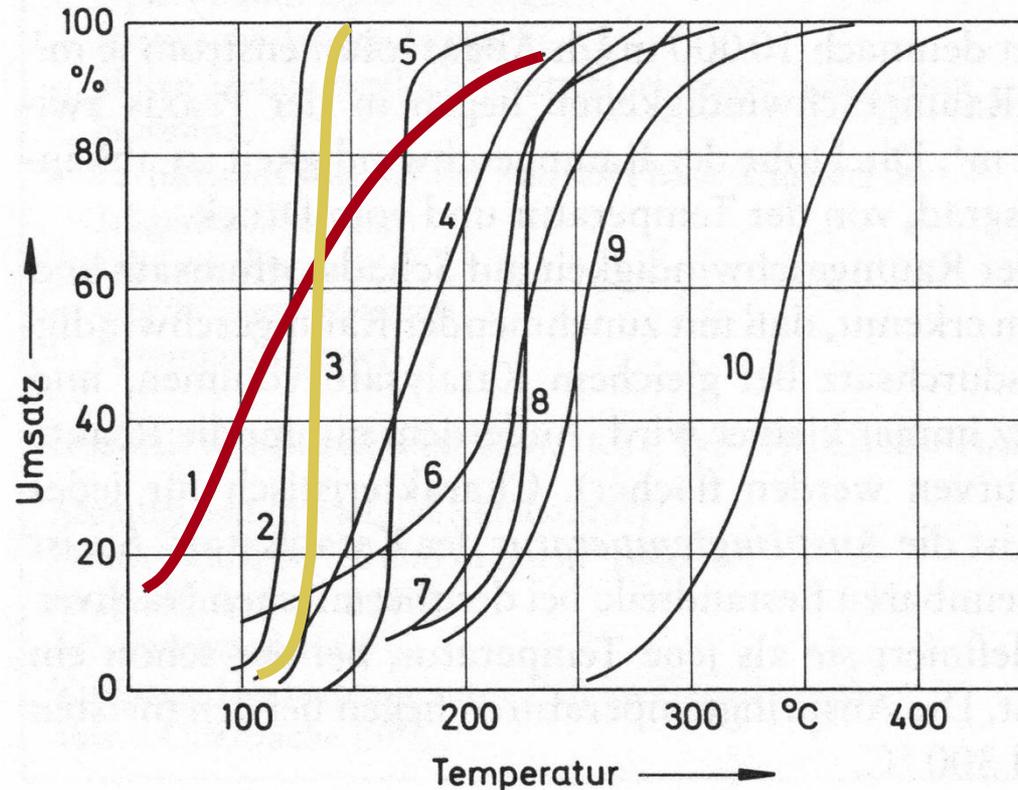
Funktionsschema



(KNV-Anlagen)

Pfad 2

- Umsatz von Formaldehyd hängt vom Katalysator ab.
- Temperatur ist weniger beeinflussbar (therm. Deaktivierung!).
- Teilweise Einsatz ohne Beheizungseinrichtung.



- 1 Formaldehyd
- 2 Ethylen
- 3 Kohlenmonoxid
- 4 Ethanol
- 5 Xylol
- 6 Butylamin
- 7 Butylacetat
- 8 Dioxan
- 9 Oktan
- 10 Propan

Quelle: Fritz+Kern 1992

Katalytische Nachverbrennung

(KNV-Anlagen)

Pfad 1

- Abgas kann an Katalysator vorbeiströmen, wenn die Abdichtung
 - zwischen Gehäuse und den Katalysatorpaketen,
 - zwischen den Katalysatorpaketen,
 - zwischen den einzelnen Katalysatorennicht (mehr) ordnungsgemäß funktioniert.
- Vor allem wenn sich aufgrund thermischer Spannungen das Gehäuse verformt hat.
- Scheint leicht lösbar, ist aber nicht trivial.

(KNV-Anlagen)

- **Bewertung:**
 - Reingaskonzentrationen $< 5 \text{ mg/m}^3$ sind mit dem richtigen Katalysator bei geringer Raumgeschwindigkeit, ausreichend hoher Temperatur und richtiger Ausführung in vielen Fällen erreichbar.
 - Die Frage ist mit welchem Katalysator und wie lange dieser hält.
- **Ad-hoc-Maßnahmen:**
 - Beheizungseinrichtung nachrüsten,
 - Temperatur erhöhen (dabei Anwendungsgrenzen beachten!),
 - besseren Katalysator verwenden,
 - zusätzliche Katalysatorlage integrieren.
- **Forschung und Entwicklung ist notwendig:**
 - Welcher Katalysator ist in welchem Anwendungsfall am besten geeignet?
 - Wie lange ist die Lebensdauer?

- **TNV-Anlagen:**
 - Werden gut in der Lage sein, die neuen Grenzwerte einzuhalten.
- **RNV-Anlagen:**
 - Nach heutigem Stand der Technik sind bereits 20 mg/m^3 manchmal nur schwer einzuhalten.
 - 5 mg/m^3 stellen bei hohen Abgaskonzentrationen eine enorme Herausforderung dar.
 - Eine weitere Verringerung wird systembedingt kaum erreichbar sein.
- **KNV-Anlagen:**
 - Die betroffenen Branchen (z.B. Kaffeeröstung, Biogas-BHKW) haben zwar Ausnahmeregelungen, werden sich aber anstrengen müssen, zumal bereits die bisherigen Grenzwerte teilweise nur schwer erreicht wurden.
- **Fazit:**
 - Investitionskosten, Energieaufwand und Sekundär-/Tertiäremissionen werden zunehmen.
 - In einigen Fällen werden evtl. KNV und RNV durch TNV-Anlagen ersetzt werden müssen.
 - Sinnvoller wären Primärmaßnahmen.

- (Carlowitz 2001) Carlowitz, O.: „Verfahren und Anlagen der thermischen und katalytischen Nachverbrennung von Abgasen mit organischen Inhaltsstoffen“. Fortschrittsberichte der Deutschen Keramischen Gesellschaft – Verfahrenstechnik 16 (3) (2001).
- (Carlowitz+Neese 2003) Carlowitz, O.; Neese, O.: Abgasreinigung. Unterlagen zum Seminar bei der CUTEC Institut GmbH, 2003.
- (Fritz + Kern 1992) Fritz, W.; Kern H.: Reinigung von Abgasen. Vogel Buchverlag, 3. Auflage, 1992.
- (Reindorf 2012) Reindorf, T.: „Ansätze zur Optimierung des Spülvorgangs bei thermischen Nachverbrennungsanlagen mit regenerativer Abluftvorwärmung“. Emissionsminderung 2012, Nürnberg 19./20.06.2012; VDI-Berichte 2165, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, ISBN 978-3-18-092165-5, S. 221-227 (2012).
- (Reindorf 2015) Reindorf, T.: Modellierung und Analyse des Betriebsverhaltens von thermischen Nachverbrennungsanlagen mit regenerativer Abluftvorwärmung. Dissertation, TU Clausthal, 2015.
<https://d-nb.info/1066604851/34>
- (Schricker et al. 2015) Schricker, B.; Davidovic, M.; Reindorf, T.: Entwicklung eines neuen katalytischen Verfahrens zur Minderung der Stickoxidemissionen ohne zusätzliche Hilfsstoffe am Beispiel von Kaffeeröstanlagen. Abschlussbericht über ein technisch orientiertes Forschungsvorhaben, gefördert unter dem Aktenzeichen 29661 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt. Luft- und Thermotechnik Bayreuth GmbH, Goldkronach, 2015.
<https://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-29661.pdf>
- (TA Luft 2018) Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit: Neufassung der Ersten Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft), Referentenentwurf vom 16.07.2018, Im Internet unter:
https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Glaeserne_Gesetze/19_Lp/ta_luft/entwurf/ta_luft_180716_refe_bf.pdf (abgerufen am 14.10.2018)
- (VDI 3476-2:2010) VDI 3476 – Blatt 2: Abgasreinigung Verfahren der katalytischen Abgasreinigung - Oxidative Verfahren, 2010.
- (Warnatz 1983) Warnatz, J.: „Hydrocarbon Oxidation at High Temperatures“, Berichte der Bunsengesellschaft für physikalische Chemie, 87(11) 1983:1008-1022

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit.

Kontakt:

Prof. Dr.-Ing. Torsten Reindorf
Hochschule Trier
Schneidershof
54293 Trier

reindorf@hochschule-trier.de
+49(0)651 / 998 76 76 8
+49(0)651 / 8103-327