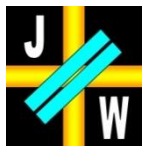


# **Verfahren zur Reduktion von Schadstoffen in Zementofensystemen**

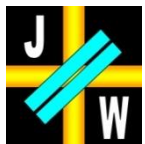
**Josef Waltisberg, dipl. Ing. ETH**

Vortrag vom 19.11.2021 in Dotternhausen/Deutschland  
Verein für Natur- und Umweltschutz Zollernalb (NUZ) e.V.



# Thema dieses Vortrages

- Dieser Vortrag zeigt die Möglichkeiten auf, Schadstoffe (Stickoxide, Ammoniak, Kohlenmonoxid, organische Verbindungen, Benzol, Dioxine und Furane) in Zementwerken durch spezielle Verfahren zu reduzieren.
- Ausgeklammert werden betriebliche Massnahmen mit denen sich ebenfalls Schadstoffe reduzieren lassen, wie etwa spezielle Brenner, gestufte Verbrennung, etc.  
In der Regel sind solche Massnahmen ausgeschöpft, bevor spezielle Verfahren Anwendung finden.



# Betrachtete Schadstoffe

- **Stickoxide (NO<sub>x</sub>)**

NO<sub>x</sub> = Stickstoffmonoxid (NO) + Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>)

NO<sub>2</sub> bildet sich im Wesentlichen an der freien Umgebung, also muss NO im Zementofensystem reduziert werden.

- **Ammoniak (NH<sub>3</sub>)**

Stark stechend riechendes («Stinker»), farbloses und giftiges Gas

---

- **Organische Verbindungen (TOC = Total Organic Carbon )**

Die emittierten organischen Verbindungen werden als Summe des emittierten organischen Kohlenstoffs angegeben

- **Benzol (C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>)**

Die Verbindung Benzol, im TOC enthalten, ist krebserzeugend und wird separat gemessen

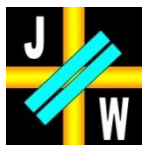
- **Kohlenmonoxid (CO)**

Unvollständige Verbrennung von kohlenstoffhaltigen Stoffen bei unzureichender Sauerstoffzufuhr.

- **Dioxine und Furane**

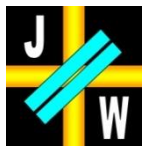
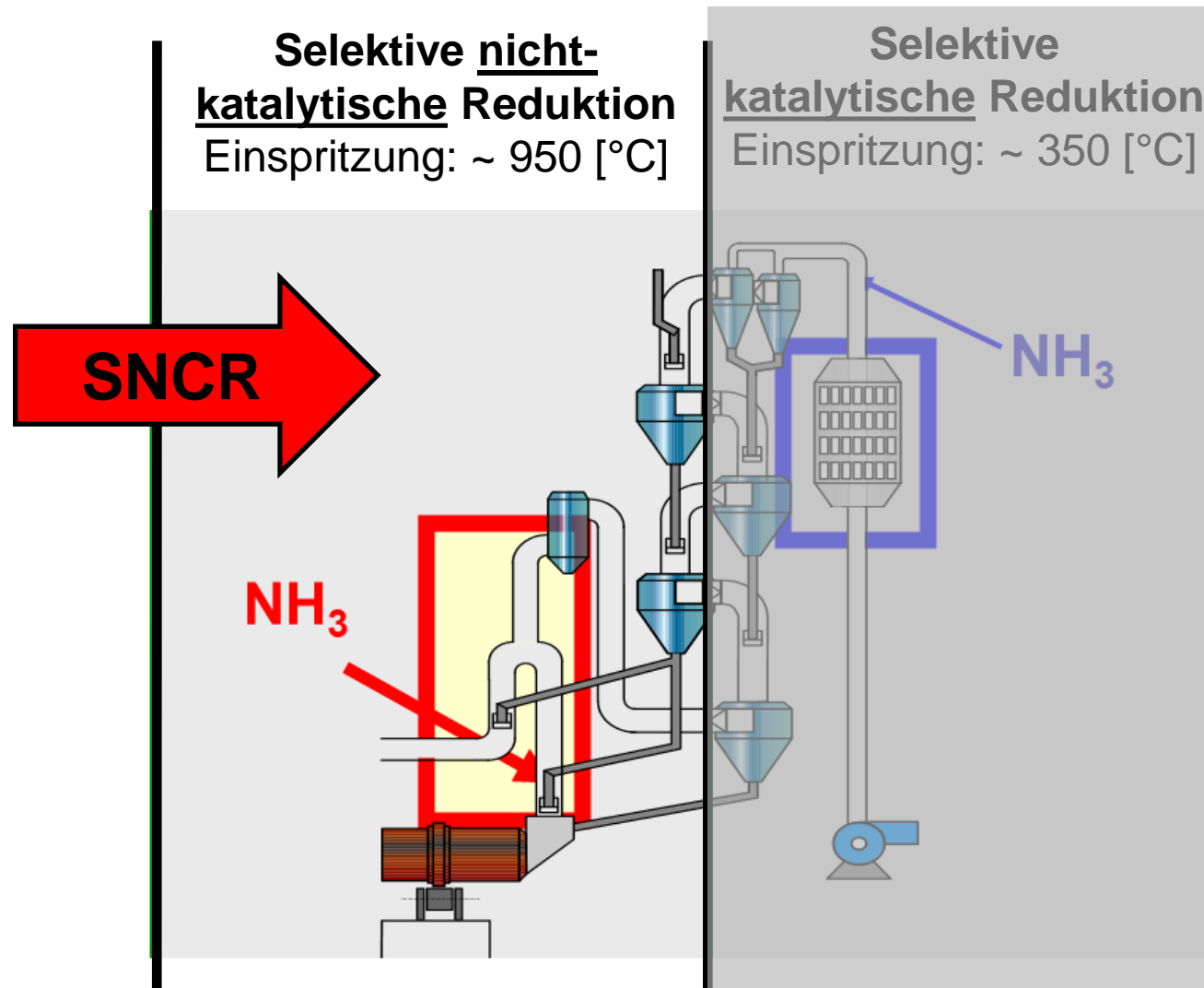
(Polychlorierte Dibenzo-p-Dioxine und Dibenzofurane (PCDD/DF))

Oft als «Seveso-Gift» bezeichnet → 18 verschiedene Verbindungen, welche als Summe angegeben werden.



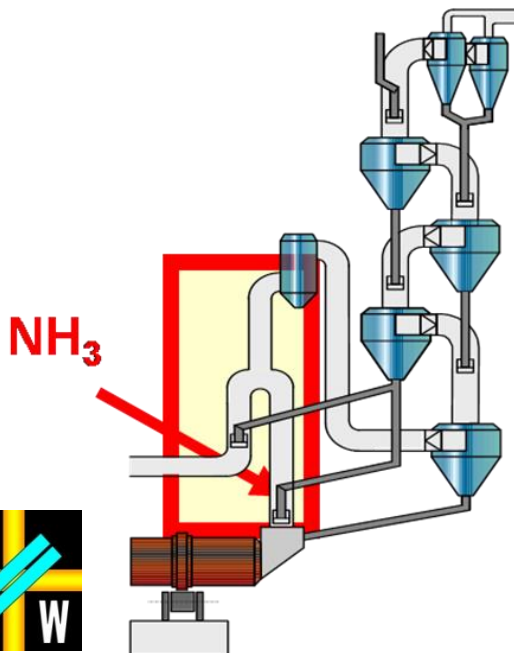
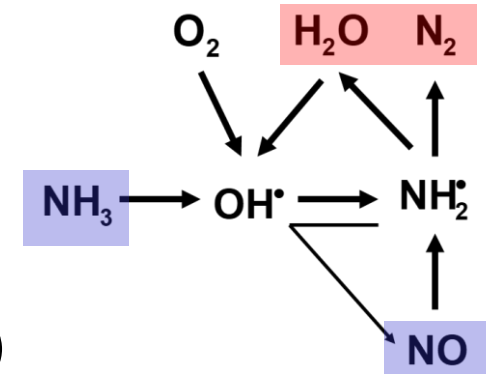
# Selektiv nicht-katalytische Reduktion

## SNCR - Selective Non Catalytic Reduction



# SNCR-Verfahren – Reaktion NO/NH<sub>3</sub>

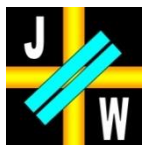
Ammoniak (NH<sub>3</sub>) reagiert bei hohen Temperaturen mit Stickstoffmonoxid (NO) zu Stickstoff (N<sub>2</sub>) und Wasser (H<sub>2</sub>O)



Die entscheidenden Parameter sind:

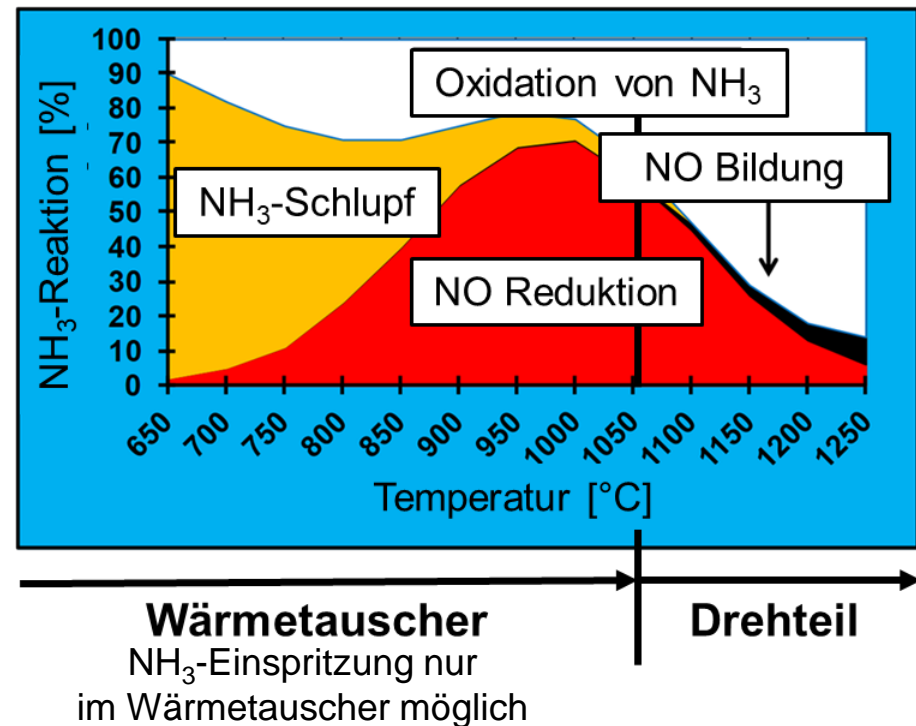
- Temperatur in der Reaktionszone «Temperaturfenster»
- Verweilzeit in der Reaktionszone
- Molares Verhältnis zwischen NH<sub>3</sub> und NO

Abhängigkeit von der Konstruktion des Wärmetauscher und des Kalzinators, etc.



# SNCR-Verfahren – «Temperaturfenster»

Reaktion von Ammoniak bei einem bestimmten Molverhältnis  $\text{NH}_3/\text{NO}$  und einer bestimmten Reaktionszeit



**Rot:** Reduktion von NO zu Stickstoff und Wasser(dampf) im sogenannten «Temperaturfenster»

**Gelb:** Ammoniak verlässt die Reaktionszone ohne Reaktion «Ammoniakschlupf»

**Weiss:** Oxidation von Ammoniak

**Schwarz:** Bildung von NO aus Ammoniak



# SNCR-Verfahren – «Ammoniakschlupf»

## «Ammoniakschlupf»

NO <sub>x</sub> Zielwert	Betriebsart	Mittelwert	Maximaler Wert	Molverhältnis NH <sub>3</sub> /NO
Keine Reduktion	Verbund	< 10		
	Direkt	20 - 40		
350 [mg/m <sup>3</sup> ]	Verbund	2	16	0.66
	Direkt	44	99	0.83
	Average *)	11	30	
200 [mg/m <sup>3</sup> ]	Verbund	7	68	1.3
	Direkt	103	202	1.4
	Average *)	21	115	

Verbund: laufende Mühle  
Direkt: gestoppte Mühle

Publikation: Bayrisches Umweltamt:  
«Möglichkeiten und Grenzen der  
SNCR-Technik bei einer klassischen  
Drehrohrofenanlage der  
Zementindustrie» im Zementwerk  
Harburg der Märker Zement GmbH

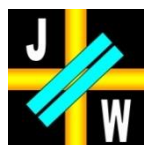
Werte in [mg/m<sup>3</sup>] bei aktuellem Sauerstoff  
\*) Gewichteter Mittelwert Direkt/Verbund

→ Geruchsprobleme ?

17. BImSchV: Ammoniak, sofern zur Minderung der Emissionen von Stickstoffoxiden ein Verfahren zur selektiven katalytischen oder nichtkatalytischen Reduktion eingesetzt wird: 30 [mg/m<sup>3</sup>]

Tagesmittelwert und kein Halbstundenmittelwert → Geruchsprobleme ?

**Gefahr: Den Teufel (NO) durch den Beelzebub (NH<sub>3</sub>) austreiben!**



**Hocheffiziente SNCR-Technik:** Das ist eine optimierte SNCR-Anlage mit verschiedenen Einspritzpunkten, besserer NH<sub>3</sub>-Verteilung, etc.

→ Das Gesagte gilt auch für diese Anlagen

# ZUSAMMENFASSUNG

## Selektiv nicht-katalytische Reduktion - SNCR

### Stickoxide (NO<sub>x</sub>)

Reduktion von NO<sub>x</sub>, aber Anstieg der Ammoniak-Emissionen

Problem: NH<sub>3</sub>-Grenzwert der 17. BImSchV

Bei gewissen Zementwerken reicht SNCR um die NO<sub>x</sub>-Emissionen unter 200 [mg/m<sup>3</sup>] (Grenzwert) zu reduzieren, bei anderen nicht.

### Kohlenmonoxid (CO)

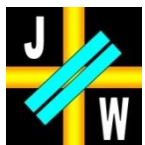
Keine Reduktion

### TOC, Benzol, Dioxine und Furane

Keine Reduktion von TOC, Benzol, Dioxine und Furane

### Meine Meinung:

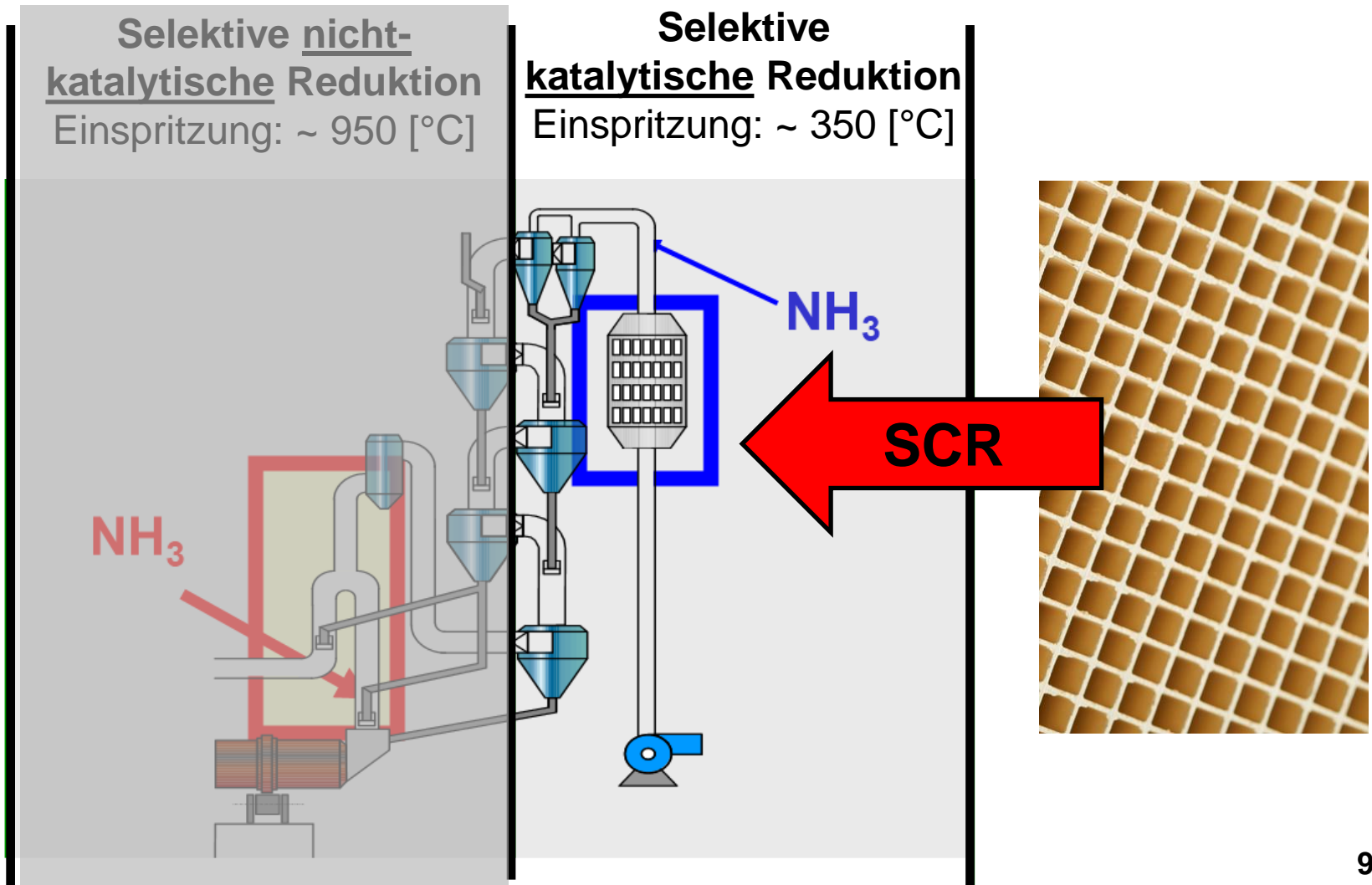
Das Verfahren sollte bei Einsatz von Abfällen nicht mehr allein angewendet werden, höchstens in Kombination mit anderen Verfahren (z.B. SCR, RTO)





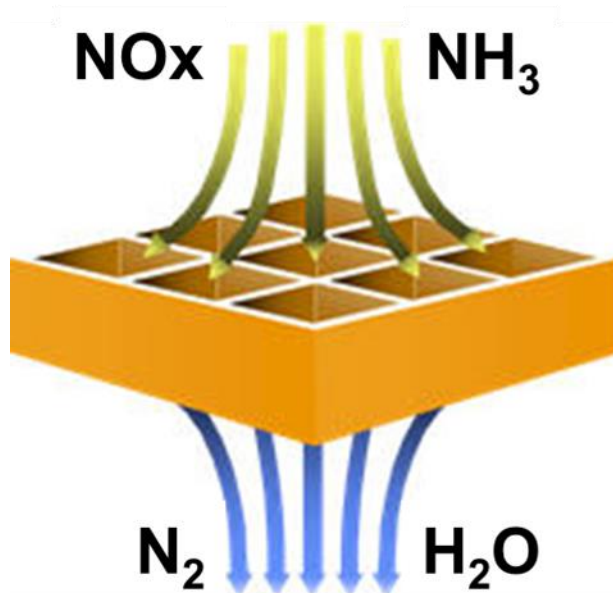
# Selektiv katalytische Reduktion

## SCR - Selective Catalytic Reduction

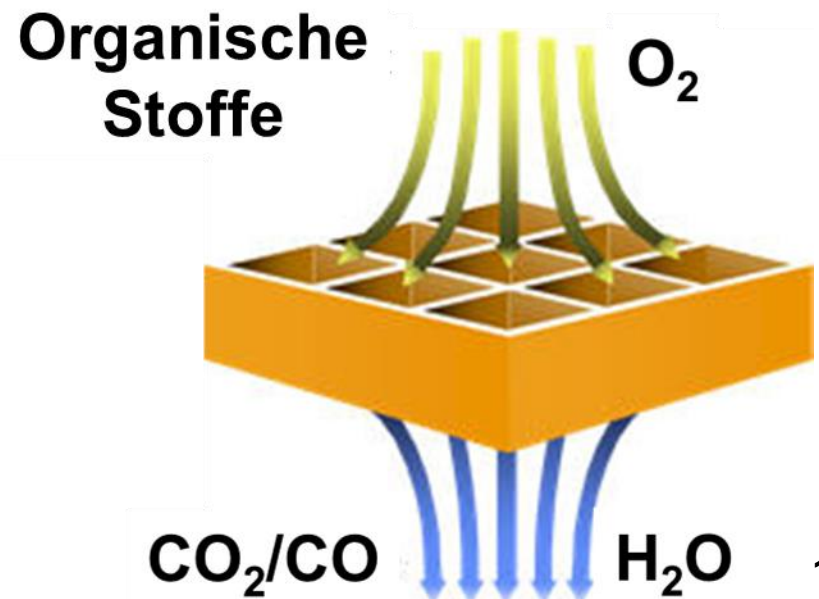


# SCR-Verfahren – Reaktionen

1. Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) reagiert bei Temperaturen um 250 bis 400 [ $^{\circ}\text{C}$ ] bei Anwesenheit eines Katalysators mit Stickstoffmonoxid ( $\text{NO}$ ) und Stickstoffdioxid ( $\text{NO}_2$ ) zu Stickstoff ( $\text{N}_2$ ) und Wasser ( $\text{H}_2\text{O}$ )



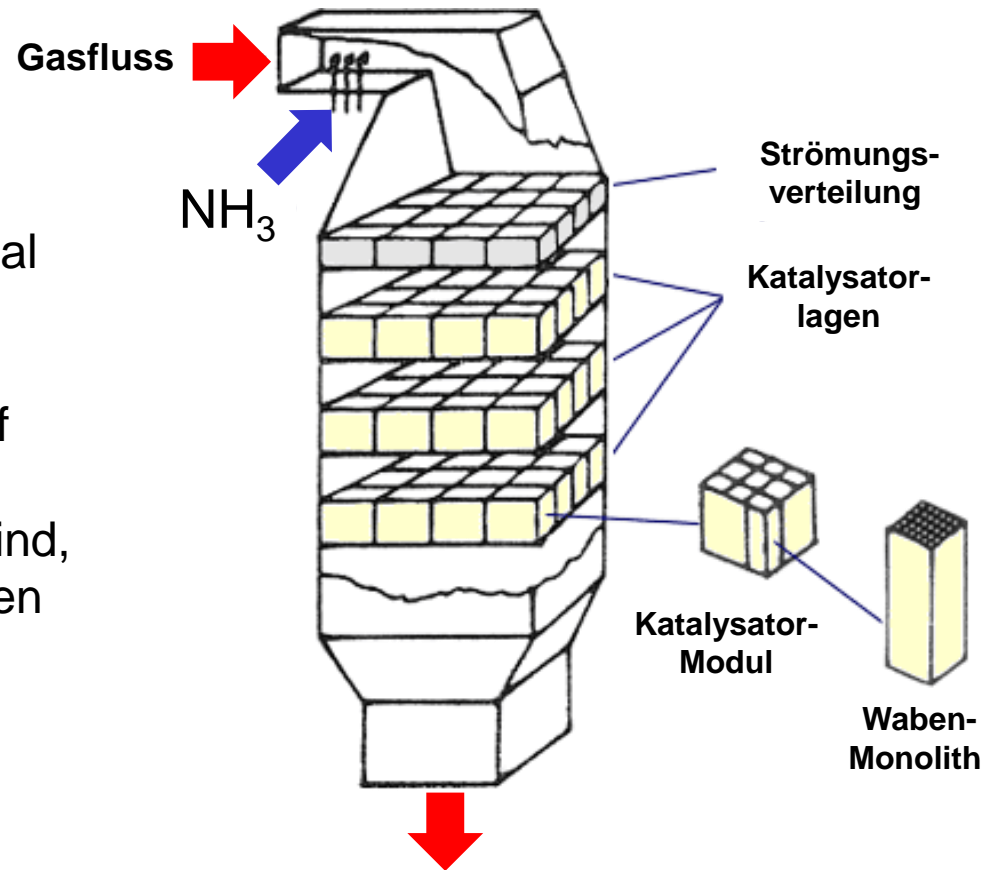
2. «Zusätzliche Reaktion»  
Reduktion organischer Abgaskomponenten am gleichen Katalysator (z.B. TOC, Benzol, Dioxine + Furane) zu Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) oder Kohlenmonoxid ( $\text{CO}$ ) und Wasser ( $\text{H}_2\text{O}$ )



# SCR-Verfahren – Katalysator

Der bei SCR-Anwendungen verwendete Katalysator besteht normalerweise aus:

- einer monolithischen Wabe aus einem Keramiksubstrat mit imprägniertem Katalysator, der homogen in das Katalysatormaterial eingemischt ist
- oder
- aus Katalysatormaterialien, die auf den Oberflächen eines Keramiksubstrats abgeschieden sind, das auf einer flachen oder gewellten Platte gelagert ist.



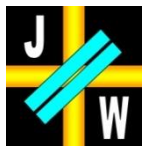
# SCR-Verfahren – Katalysator

## Aktives Katalysatormaterial

- Das aktive Katalysatormaterial besteht typischerweise aus Titandioxid ( $\text{TiO}_2$ ), Vanadiumpentoxid ( $\text{V}_2\text{O}_5$ ), Wolframtrioxid ( $\text{WO}_3$ ) und Molybdäntrioxid ( $\text{MoO}_3$ ) in verschiedenen Kombinationen.

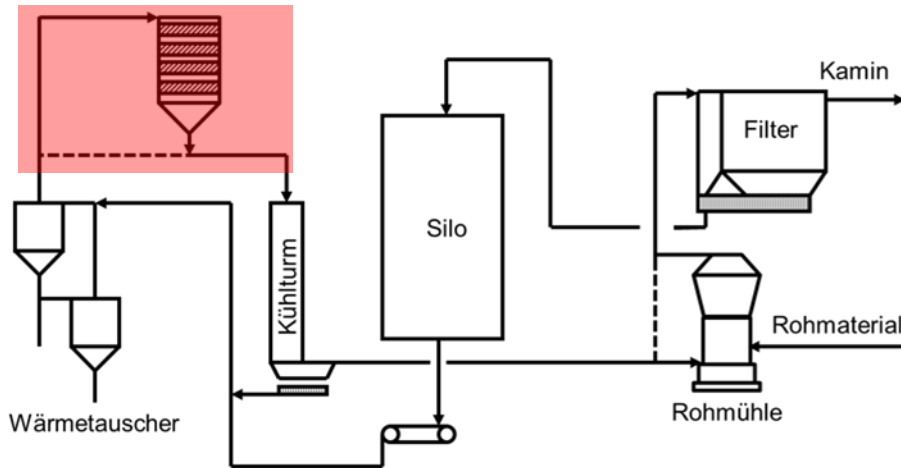
## «Massgeschneiderte Zusammensetzung»

- Die Zusammensetzung, auch als Formulierung bezeichnet, wird vom Katalysatorhersteller auf eine bestimmte SCR-Anwendung (Gaszusammensetzung) angepasst.



# Typen von SCR Systemen

## High-Dust SCR

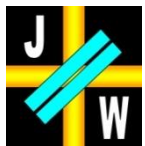
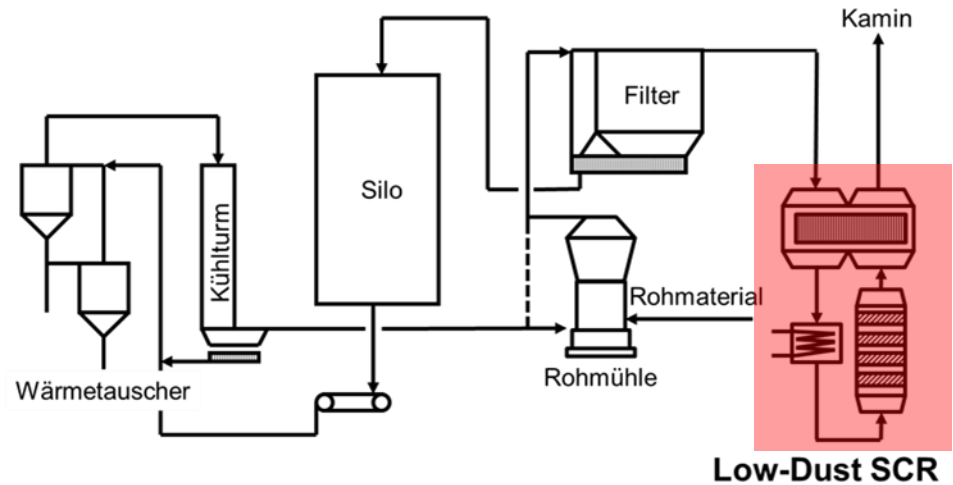


## High-Dust SCR

- Einbau nach dem Wärmetauscher (optimale Temperatur)
- Hoher Staubanteil im Abgas

## Low-Dust SCR

- Einbau vor dem Kamin (Temperatur zu tief → Aufheizung)
- Reingas mit wenig Staub



# «High-Dust-Lösung» Schwenk, Mergelstetten (Deutschland)

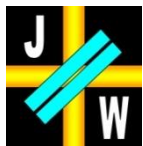
## Literatur:

BMU-Umweltinnovationsprogramm; Abschlussbericht zum Vorhaben Minderung von NO<sub>x</sub>-Emissionen in einer Drehofenanlage mittels SCR-Technologie  
Detlef Edelkott und Jürgen Thormann, Schwenk Zement

Volker Hoenig, Helmut Hoppe, Martin Oerter, Cornelia Seiler. Verein deutscher Zementwerke (VDZ)

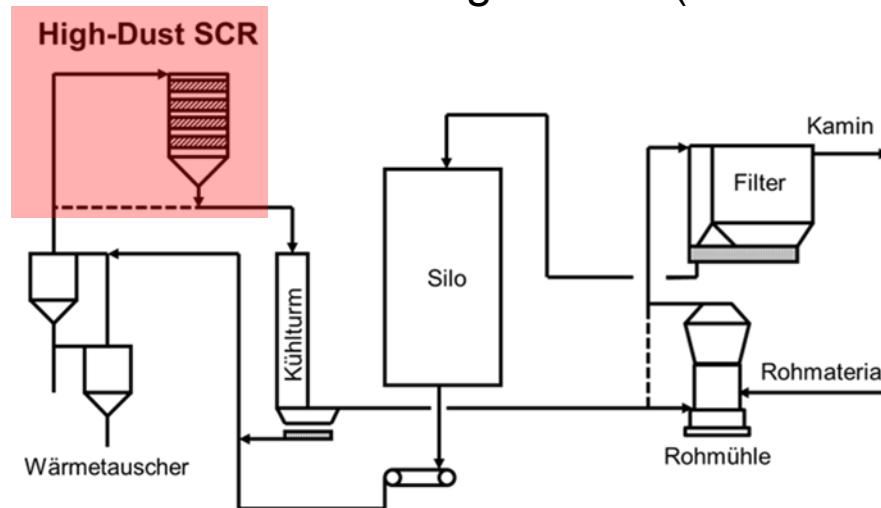
KfW-Aktenzeichen MB e1-001599

[www.umweltinnovationsprogramm.de/sites/default/files/benutzer/36/dokumente/zement\\_schwenk\\_ab\\_scr\\_high\\_dust\\_2014.pdf](http://www.umweltinnovationsprogramm.de/sites/default/files/benutzer/36/dokumente/zement_schwenk_ab_scr_high_dust_2014.pdf)



# Mergelstetten – SCR-Installation

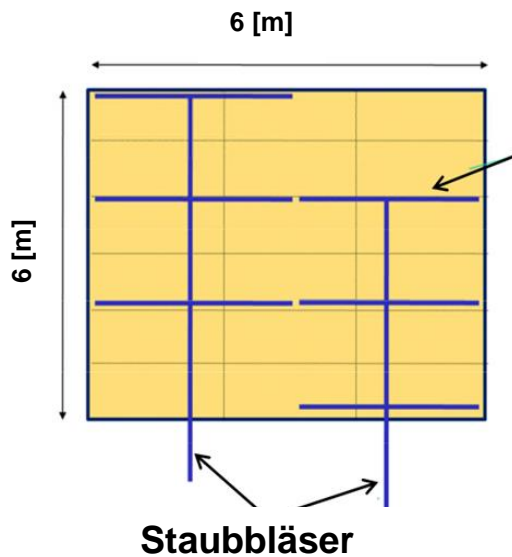
- Lieferant: Cemcat / ELEX
- Inbetriebnahme: Mitte 2011
- Typ: «High Dust» (hinter Vorwärmer)



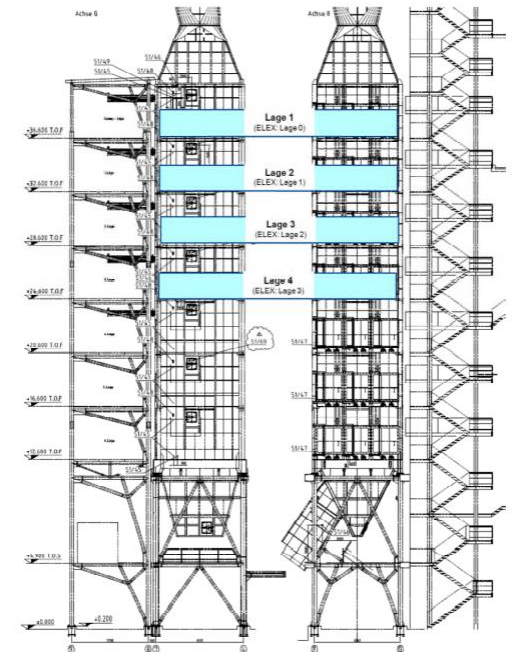
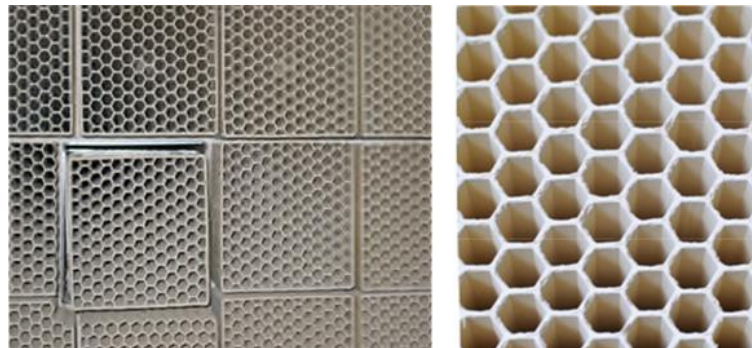
- Abmessungen: Höhe 42 [m]
- Durchfluss: Vertikal von oben nach unten
- Reduktionsmittel: 25 [%]  $\text{NH}_3$ -Lösung oder 40 [%] Harnstofflösung
- Regelung: Dynamisch (über NO-Signal Reingas) und manuell
- SNCR: Die SNCR-Installation wurde nicht abgebaut  
**Kombination SNCR + SCR**  
(Vorteil: Katalysator wird kleiner)

# Mergelstetten – Katalysator

- Hersteller: CERAM Frauental (D)
- Anzahl Lagen: 4
- Typ: Wabenkatalysator (Sechseckwabe)  
unterste Stufe 4 seit 02/2011: Quadratwabe
- Teilung (Pitch): 13.6 [mm] Sechseckige Wabe
- Zusammensetzung: Titandioxid ( $\text{TiO}_2$ )  
Wolframtrioxid ( $\text{WO}_3$ ) ~ 4,5 - 4,7 [%]  
Vanadiumpentoxid ( $\text{V}_2\text{O}_5$ ) ~ 2 [%]



18 Module



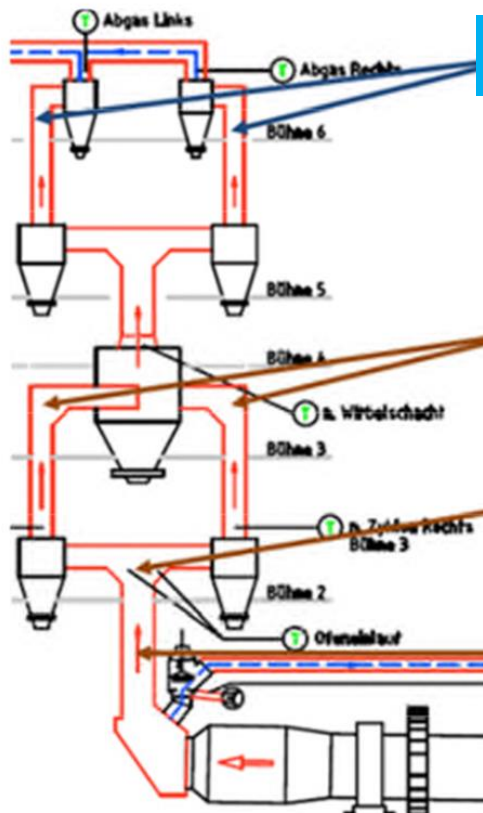


# Mergelstetten – Einspritzpunkte SCR + SNCR

## Kombination SNCR + SCR

Die SNCR-Anlage wurde nicht abgebaut sondern wird weiter verwendet

- Mehr Flexibilität
- Katalysator wird kleiner
- Mehr Verbrauch von Ammoniak oder Harnstoff als eine reine SCR

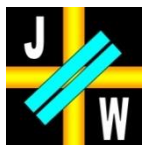


Stufe 6: Einspritzung SCR

Stufe 3: Einspritzung SNCR  
Temperatur: ~ 750 [°C]

Stufe 2: Einspritzung SNCR  
Temperatur: ~ 880-950 [°C]

Stufe 1: Einspritzung SNCR  
Temperatur: ~ 1'200 [°C]



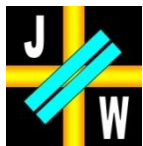
# NO<sub>x</sub>-/NH<sub>3</sub>-Emissionen zwischen 2010 and 2019

2010/2011 Versuchsbetrieb

Jahresmittelwerte (1013 [mbar], 0 [°C], trocken, 10 [%] O<sub>2</sub>)

\*) Persönliche Information

Jahr	NO <sub>x</sub> [mg/m <sup>3</sup> ]	NH <sub>3</sub> [mg/m <sup>3</sup> ]	Verfügbarkeit SCR
2010	254	9	60
2011	231	12	75
2012	196	9	93
2013	192	8	93
2014	185	3	95+
2015 - 2019 *)	< 200	< 10	95+



# Reduktion von Kohlenmonoxid (CO) und von organischen Verbindungen (TOC)

## Kohlenmonoxid CO

- Kein Reduktionseffekt in der SCR-Anlage (unterhalb der Messgenauigkeit)

## Flüchtige organische Verbindung TOC

- 10 - 20 [mgC/m<sup>3</sup>] reduziert um ca. 70 [%]

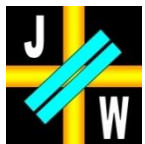
## Benzol (krebserregender Stoff)

- Von < 2 [mg/m<sup>3</sup>] vor der SCR-Anlage auf < 0.6 [mg/m<sup>3</sup>] im Kamin also etwa 30 [%]

## Dioxine und Furane

Polychlorierte Dibenzo-p-Dioxine und Dibenzofurane (PCDD/DF)

- Reduktionsrate ca. 50 bis 60 [%]
- Emission am Kamin < 0.001 [ngTE/m<sup>3</sup>] (Limite: 0.1 [ngTE/m<sup>3</sup>])

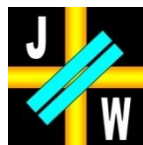


# Mergelstetten – Betriebskosten

	Bedarf	Betriebskosten	
		[Euro/t Klinker]	[Euro/Jahr] *)
Katalysator	1 Lage pro Jahr	0.30	326'400
Elektrizität	5.0 [kWh/t Klinker]	0.40	435'200
Reduktionsmittel	3.5 [kg/t Klinker]	0.42	456'960
<b>Summe</b>		<b>1.12</b>	<b>1'218'560</b>

\*) Produktion 3'400 [t/Tag] und 320 Tage Betrieb

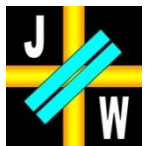
Das ist deutlich weniger als 1 [%] der Jahreseinnahmen  
aus dem Verkauf des Zements



# «Low-Dust-Lösung» Rohrdorfer Zement (Deutschland)

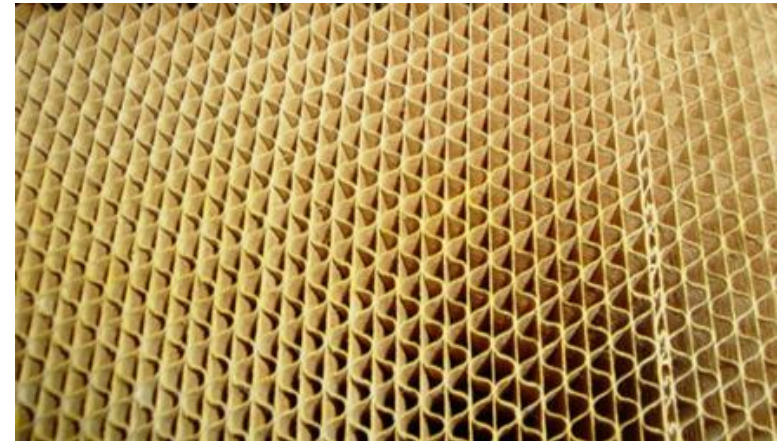
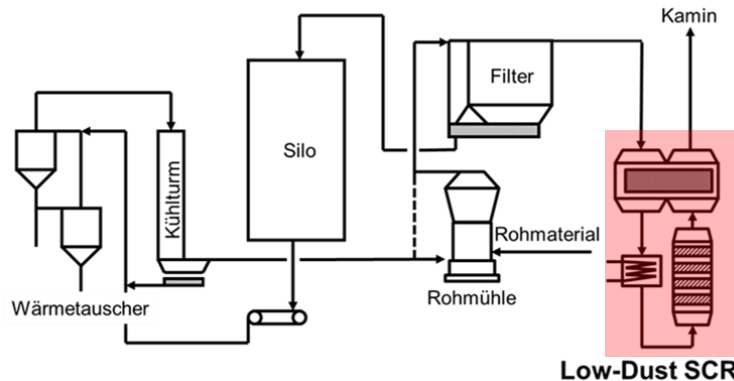
## Literatur:

Abschlussbericht zum Vorhaben  
Katalytische Low-Dust-Entstickung des  
Abgases an einer Drehofenanlage der  
Zementindustrie (Reingas – SCR)  
Dipl.-Ing. Katharina Rechberger, Gebr.  
Wiesböck & Co. GmbH  
Dr.-Ing. Nils Bodendiek,  
Forschungsinstitut der Zementindustrie  
GmbH  
KfW-Aktenzeichen NKa3 – 001706  
[www.umweltinnovationsprogramm.de/sites/default/files/benutzer/36/dokumente/abschlussbericht\\_rohrdorf\\_final.pdf](http://www.umweltinnovationsprogramm.de/sites/default/files/benutzer/36/dokumente/abschlussbericht_rohrdorf_final.pdf)



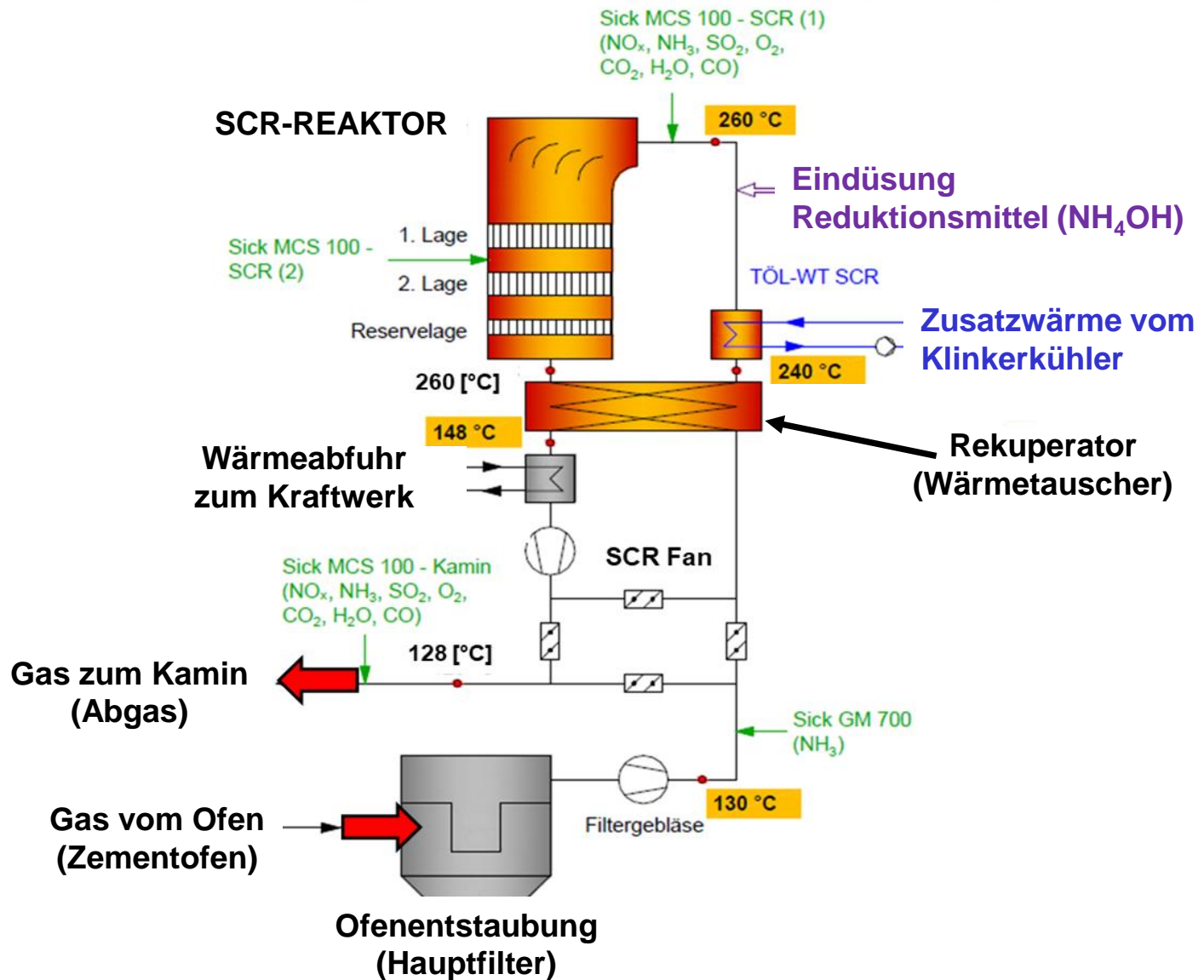
# Rohrdorf – SCR-Einheit

- Lieferant: GEA Bischoff
- Inbetriebnahme: Mitte 2011
- Typ: «Low Dust» (direkt hinter dem Filtersystem; zusätzliche Wärme vom Klinkerkühler)



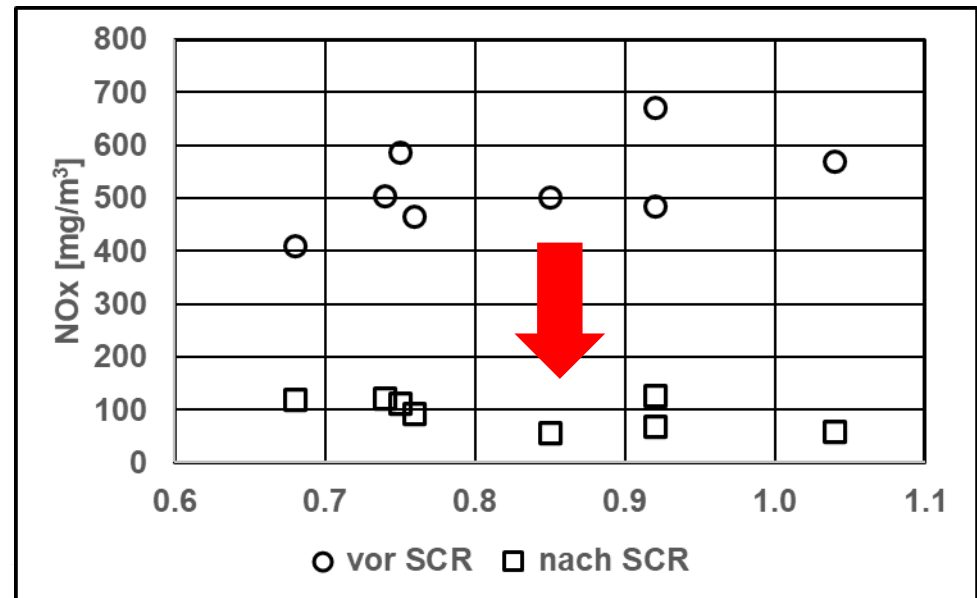
- Gastemperatur: 250 [°C]
- Katalysator: Sinusförmiger Titandioxid ( $\text{TiO}_2$ ) - Wabenkörper auf einer Glasfasermatrix, imprägniert mit ca. 3 [%] der aktiven Substanz mit Vanadiumpentoxid ( $\text{V}_2\text{O}_5$ ) und ca. 3 [%] Wolframtrioxid ( $\text{WO}_3$ )

# Auslegung der «Low-Dust-Installation»



# Resultate der verschiedenen Versuche

Molverhältnis	Vor SCR	Nach SCR	Reduktion
	[mg/m <sup>3</sup> ]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[%]
0.85	501	55	89.0
0.92	485	68	86.0
0.92	671	127	81.1
1.04	568	57	90.0
0.74	503	121	75.9
0.75	586	111	81.1
0.68	408	118	71.1
0.76	464	93	80.0



Die Emission von Ammoniak lag bei maximal 18 [mg/m<sup>3</sup>] im Direktbetrieb (gestoppte Mühle) und 1 [mg/m<sup>3</sup>] im Verbundbetrieb (laufende Mühle)



# Reduktion von Kohlenmonoxid (CO) und Organischen Verbindungen

## TOC

TOC wurde von 40 bis 60 [mgC/m<sup>3</sup>] auf durchschnittlich 16 [mgC/m<sup>3</sup>] reduziert, eine Reduktion um 60 bis 70 [%]

## **Benzol** (krebserzeugende Substanz)

Mittlere Reduktion ca. 40 [%]; mittlere Emission: 1.4 [mg/m<sup>3</sup>]

## CO

Durchschnittlicher Emissionswert: 480 [mg/m<sup>3</sup>]

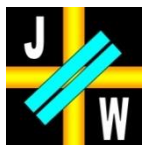
- Die Erhöhung der CO-Konzentration betrug im Mittel etwa 15 [%]
- Umwandlung der organischen Verbindungen (TOC) in CO entspricht einer CO-Erhöhung von etwa 15 [%]

## **Dioxine und Furane**

Polychlorierte Dibenzop-Dioxine und Dibenzofurane (PCDD/DF)

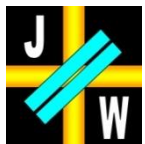
- Reduktionsrate von 80 bis 95 [%], wobei im Mittel 85 [%] in der ersten Schicht reduziert wurden
- Durchschnittlicher Emissionswert: 0.003 [ngTE/m<sup>3</sup>]

Hinweis: Alle Werte in Normalbedingungen (1013 [mbar], 0 [°C], trocken, 10 [%] O<sub>2</sub>)



# Rohrdorf – Betriebskosten

	<b>Bedarf</b>	<b>Annahme Kosten</b>	<b>Betriebskosten</b>
Katalysator	Wechsel in 10 Jahren	49'000 [€/Jahr]	0.05 [€/t Klinker]
Elektrizität	5.6 [kWh/t Klinker]	0.07 [€/kWh]	0.39 [€/t Klinker]
Reduktionsmittel	0.4 [l/t Klinker]	0.16 [€/l]	0.06 [€/t Klinker]
<b>Summe</b>			<b>0.50</b> <b>[€/t Klinker]</b>



# ZUSAMMENFASSUNG

## Selektiv katalytische Reduktion - SCR

### **Stickoxide NO<sub>x</sub> / Ammoniak NH<sub>3</sub>:**

Reduktion unter den Grenzwert von 200 [mg/m<sup>3</sup>]

Heutige Grenzwerte können also eingehalten werden

NH<sub>3</sub> wird ebenfalls reduziert

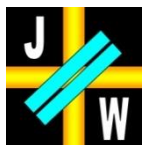
### **Organische Stoffe (TOC/Benzol/PCDD/DF):**

Reduktion um 30 bis 70 [%] maximal, abhängig vom Katalysator-material

### **Kohlenmonoxid CO:**

Keine Reduktion

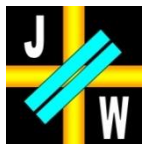
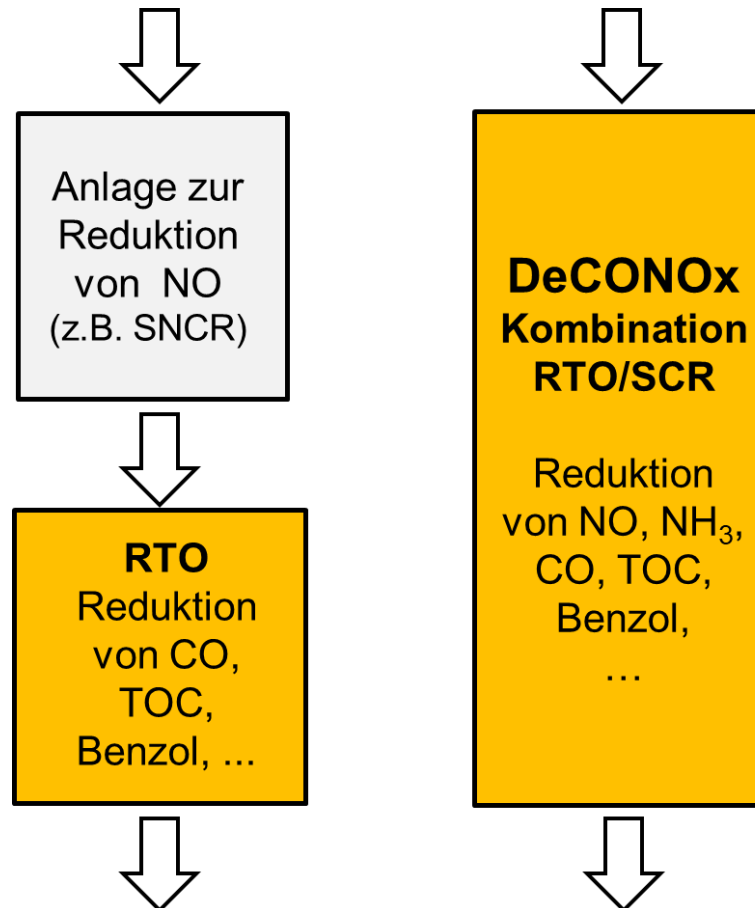
Bei hohen TOC-Werte → Erhöhung durch Oxidation im Katalysator  
(TOC + O<sub>2</sub> → H<sub>2</sub>O + CO)



# RTO und DeCONOx

RTO = Regenerative Thermische Oxidationsanlage

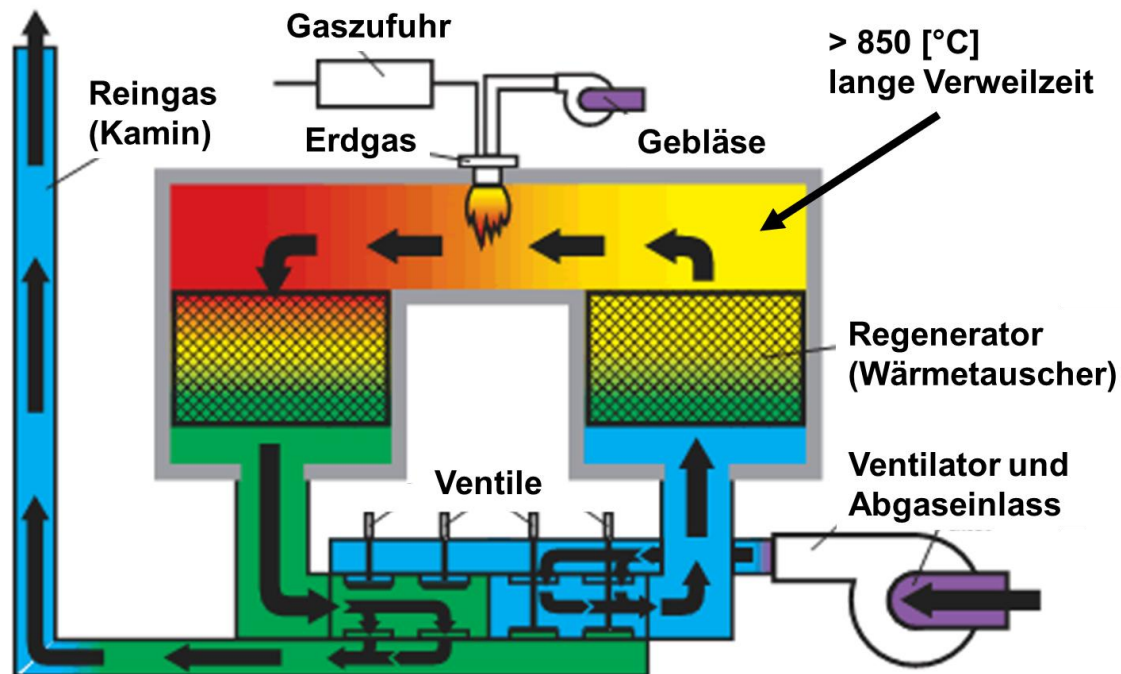
DeCONOx = Kombination RTO + SCR



# Regenerative Thermische Oxidation (RTO)

- Das Abgas (ca. 130 [°C]) wird über einen Ventilator in die Anlage geblasen
- Im Regenerator wird das Abgas aufgeheizt und in die Brennkammer geführt.
- Dort wird zusätzliche Wärme durch «saubere Brennstoffe» (z.B. Erdgas) zugeführt und eine Temperatur von  $> 850$  [°C] erreicht.
- In der Brennkammer werden CO, TOC und andere Verbindungen oxidiert
- Im (linken) Regenerator wird das Gas abgekühlt und ins Kamin geleitet

Regenerativer Thermischer Oxidator

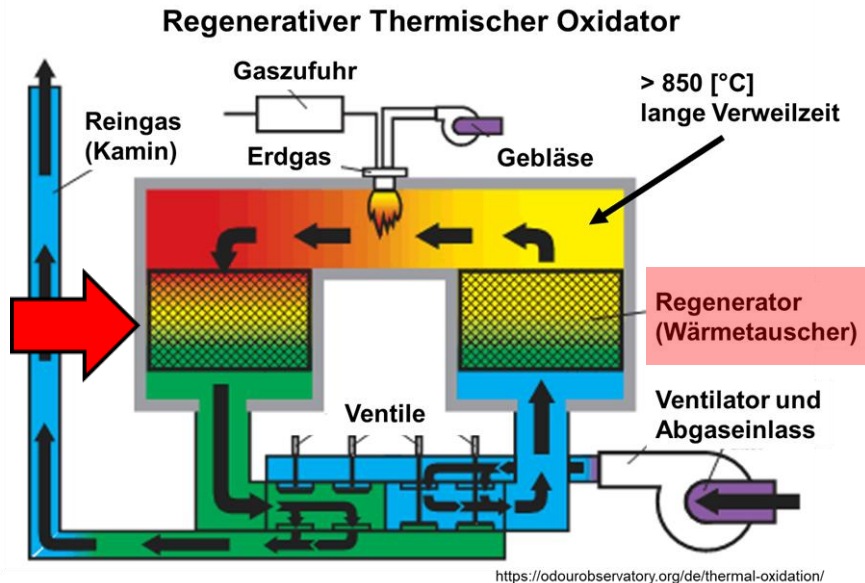


# DeCONOX - Kombination RTO + SCR

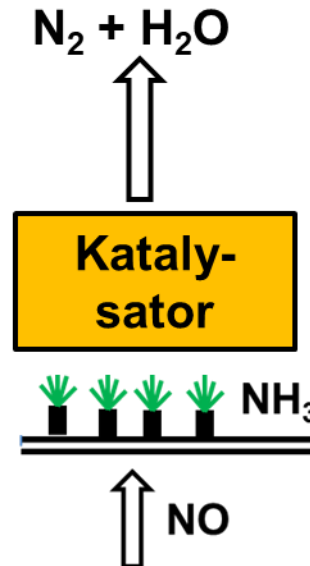
## DeCONOX

Regenerator wird in zwei Teile aufgeteilt und SCR dazwischen angeordnet

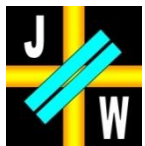
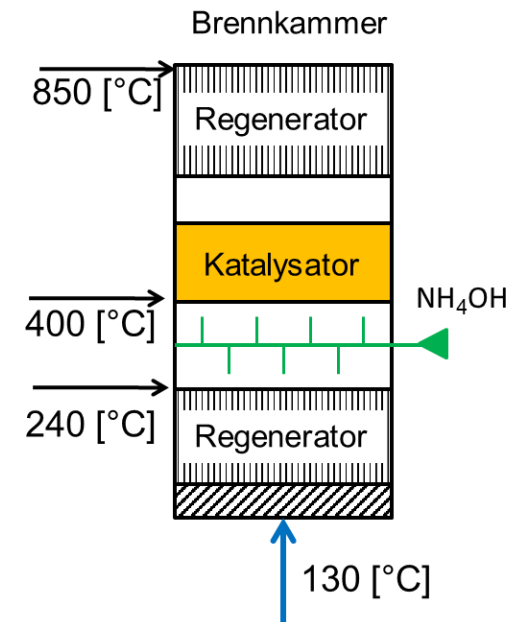
### RTO



### SCR



### DeCONOX



# DeCONOx

## Kirchdorfer Zementwerk

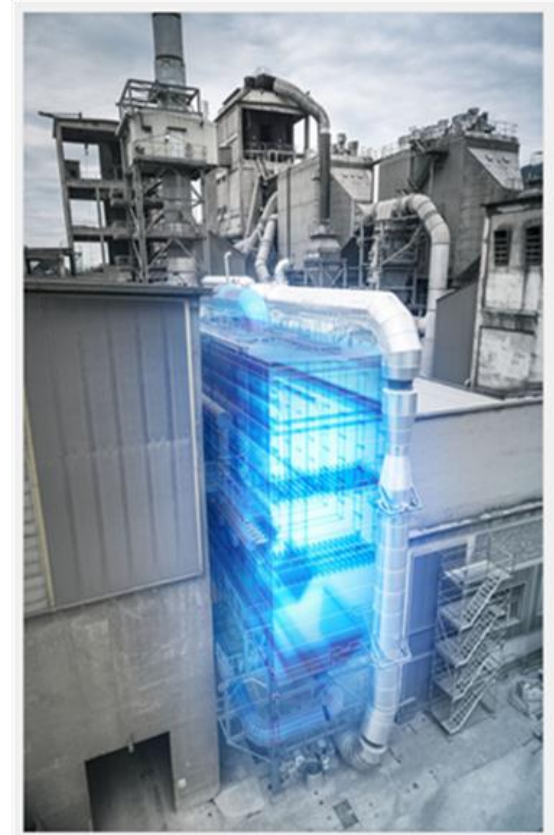
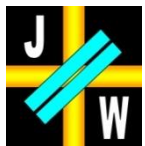
### Kirchdorf an der Krems, Österreich

#### Literatur:

Matthias Pfützner, Kirchdorfer Industries  
Kirchdorf Cement – The cement plant with the lowest emissions  
in the world; Global Cement 10th January 2017

G. Mauschitz, Technische Universität Wien, Vienna  
A. Secklehner, Kirchdorfer Zementwerk Hofmann Ges.m.b.H.,  
Kirchdorf an der Krems  
S. Hagn, Scheuch GmbH, Aurolzmünster, Austria  
The DeCONOx process - an example of advanced exhaust gas  
cleaning technology in the Austrian cement industry  
Cement International 2/2018/Vol 16

Scheuch GmbH  
Innovative SCR Technologies for  
NOx – VOC – CO – ODOR – Reduction  
April 2016



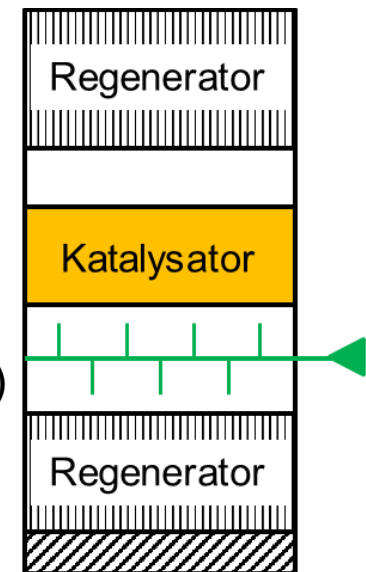
Weltweit erste DeCONOx-  
Anlage bei Kirchdorfer  
Zement

# Kirchdorf (A) – DeCONOX-System

## Einige Daten des Werkes:

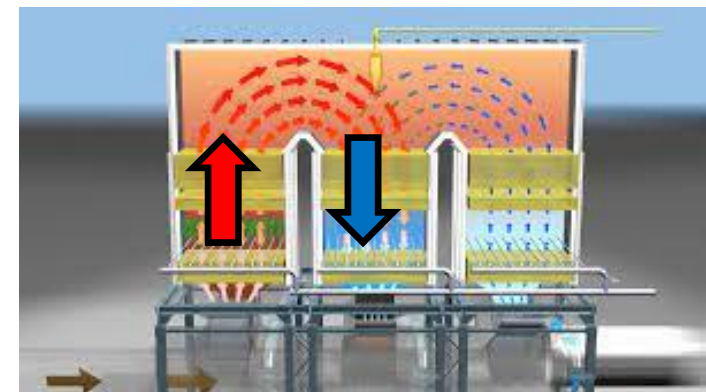
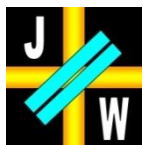
- Klinkerproduktion: 1'500 [t/d]
- Zementproduktion: 500'000 [t/Jahr]
- Abgasvolumen: 151'000 [m<sup>3</sup><sub>N</sub>/h]
- Alternative Brennstoffe: 91 [%] (2016):  
Altreifen und Abfällen  
aus Gewerbe und Industrie
- Temperatur: 120 [°C] – 220 [°C] (Austritt Filter)
- Dust: < 5 [mg/m<sup>3</sup>]

Schema eines Turms



## DeCONOX

- Installation «End of Tail» (vor dem Kamin)
- 5 Türme (2 mit Rohgas, 2 mit Reingas, 1 Turm zur Spülung mit Luft durchströmt)
- Katalysator: TiO<sub>2</sub>-Matrix mit V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> und WO<sub>3</sub>  
50 [m<sup>3</sup>] in 5 Türmen, Freiraum ~ 63 [%]



Variante mit 3 Türmen



# Kirchdorf – Emissionen 2017

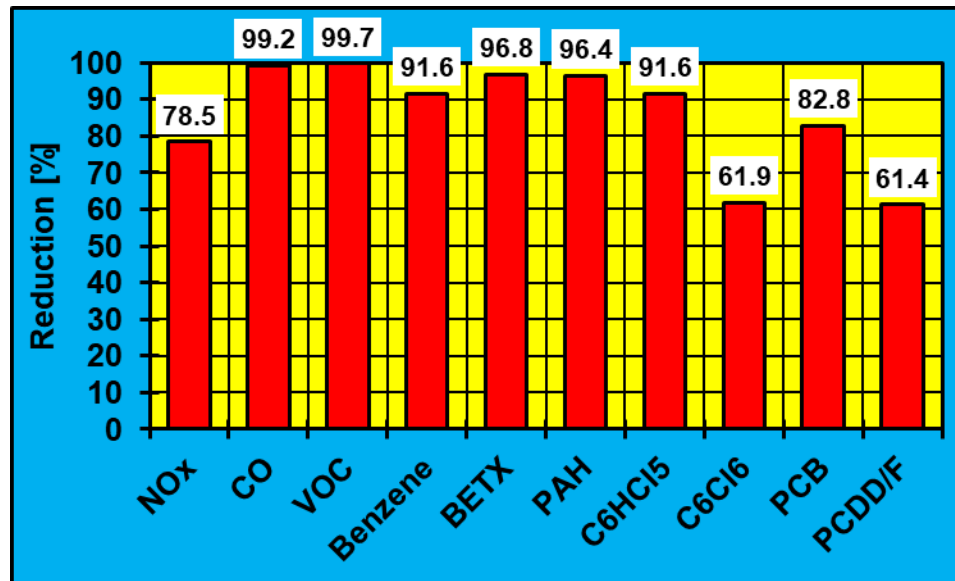
- Werte = Jahresmittel 2017 in [mg/m<sup>3</sup>] (1013 [mbar], 0 [°C], trocken, 10 [%] Sauerstoff)
- Österreichische Grenzwerte = Tagesmittelwerte  
389. Verordnung: Abfallverbrennungs-Sammelverordnung vom 25. Oktober 2002 bzw.  
Genehmigungsbescheid: AUWR-2006- 7/936-Wi und AUWR-2006-7/689-Wi

	<b>Grenz- wert</b>	<b>Mittelwert 2017</b>	<b>Bemerkung</b>
Staub	15	0.7	Gewebefilter
SO <sub>2</sub>	180	1	
<b>Reduktion durch DeCONOX</b>			
<b>NOx</b>	<b>400</b>	<b>149</b>	
<b>NH<sub>3</sub></b>	<b>30</b>	<b>4</b>	
<b>TOC</b>	<b>50</b>	<b>0</b>	< Nachweisgrenze (1 [mg/m <sup>3</sup> ])
<b>Benzol</b>	<b>?</b>	<b>&lt; 0.2</b>	Berechnet aus der Reduktionsrate
<b>CO</b>	<b>---</b>	<b>63</b>	04.03.2016 – 31.07.2017
<b>PCDD/DF</b>	<b>0.1</b>	<b>0.0006</b>	in [ngTE/m <sup>3</sup> ] (Nachweisgrenze)

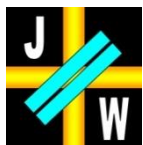


# Kirchdorf – Gemessene Reduktionen

- NO<sub>x</sub>, CO und TOC (= VOC):  
Durchschnitt der kontinuierlichen Messung zwischen dem 04. März 2016 und dem 31. Juli 2017  
Andere Verbindungen: Mittelwert aus drei Messungen
- Die Konzentration der Bestandteile der Komponenten PAK, C<sub>6</sub>HCl<sub>5</sub>, C<sub>6</sub>Cl<sub>6</sub>, PCD und PCDD/F ist daher gering und ihre Messung mit einer grösseren Unsicherheit behaftet. Die Reduktionsrate ist in jedem Fall > 60 bis 70 [%].

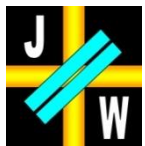


TOC/VOC	Flüchtige organische Verbindungen
BETX	Summe Benzol, Ethylbenzol, Toluol, Xylol
PAH	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
C <sub>6</sub> HCl <sub>5</sub>	Pentachlorbenzol
C <sub>6</sub> Cl <sub>6</sub>	Hexachlorbenzol
PCB	Polychlorierte Biphenyle
PCDD/F	Dioxine und Furane Dibenzo-p-Dioxine und Dibenzofurane



# Kirchdorf – Zusätzliche Informationen

- Zusätzlicher elektrischer Energiebedarf: 8 [kWh/t Klinker].
- NO<sub>x</sub>-Reduktion: 80 [l/h] wässrige Ammoniaklösung für eine Reduktion von 600 auf 140 [mg/m<sup>3</sup>]  
(1013 [mbar], 0 [°C], trocken, 10 [%] Sauerstoff)
- Informationen aus dem Werk:  
Zusätzliche Wärme für die Brennkammer (Erdgas; «sauberer Brennstoff») ist vernachlässigbar.
  - ▶ **Autothermer Betrieb:** Die Wärme wird durch die Oxidation des hohen Gehaltes an Kohlenmonoxid im Abgas (> 6'000 [mg/m<sup>3</sup>]) in der Brennkammer geliefert; Problem: Fehlkonstruktion des Kalzinators  
 $\text{CO} + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{Wärme}$
  - ▶ Im «Normalfall» sind nicht so hohe CO-Gehalte vorhanden und es muss «sauber Brennstoff» (z.B. Erdgas) zugeführt werden.
- **Akquisitionskosten: 7.3 Mio. Euro**



# ZUSAMMENFASSUNG

## RTO und DeCONOX

DeCONOX

SCR

### Stickoxide NO<sub>x</sub> / Ammoniak NH<sub>3</sub>:

Reduktion unter 200 [mg/m<sup>3</sup>], NH<sub>3</sub> wird ebenfalls reduziert  
Heutige Grenzwerte können eingehalten werden

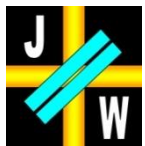
RTO

### TOC/Benzol/PCDD/DF:

Reduktion bis auf Spuren durch die Oxidation in der  
Brennkammer («Nachverbrennung»)  
Heutige Grenzwerte können problemlos eingehalten  
werden

### Kohlenmonoxid CO:

Reduktion von Kohlenmonoxid (CO) auf 100 [mg/m<sup>3</sup>] oder  
sogar darunter



# Anzahl Reduktionsanlagen in der Deutschen Zementindustrie

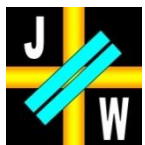
38 Ofenanlagen in der Deutschen Zementindustrie

17 Ofenanlagen reduzieren nur mit dem SNCR-Verfahren («Hocheffiziente SNCR-Technik»)

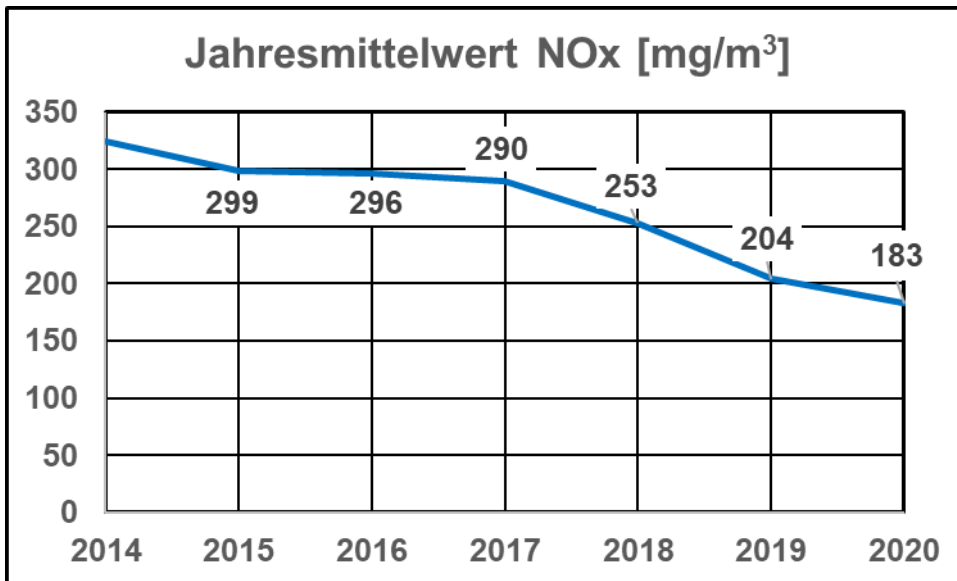
20 Ofenanlagen reduzieren mit folgenden Verfahren:

- 17 mit SCR-Anlagen
- 2 mit einem DeCoNOx-Verfahren
- 1 mit einem Verfahren mit katalytischen Filterschläuchen

In den 20 Ofenanlagen wird das SNCR-Verfahren entweder als Stand-By-Verfahren oder in Kombination mit Reduktions-Verfahren verwendet.



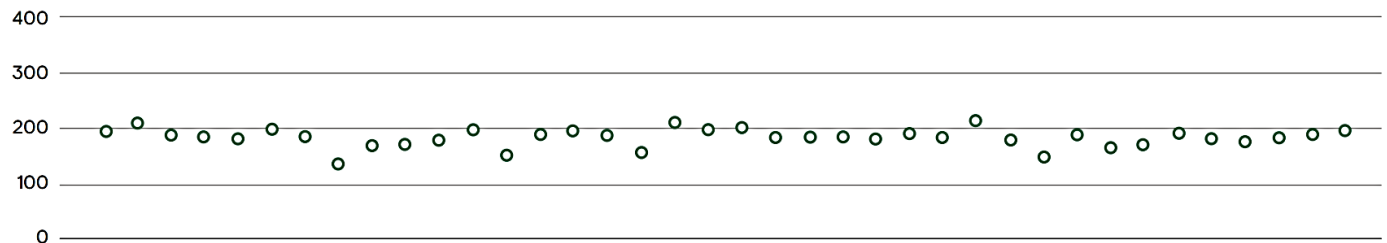
# Resultat der NOx-Reduktionsmassnahmen



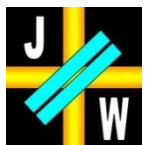
Grenzwert von 200 [mg/m<sup>3</sup>]  
gilt ab dem 01.01.2019

○ Messwerte im Reingas / Measurements in the clean gas

2020

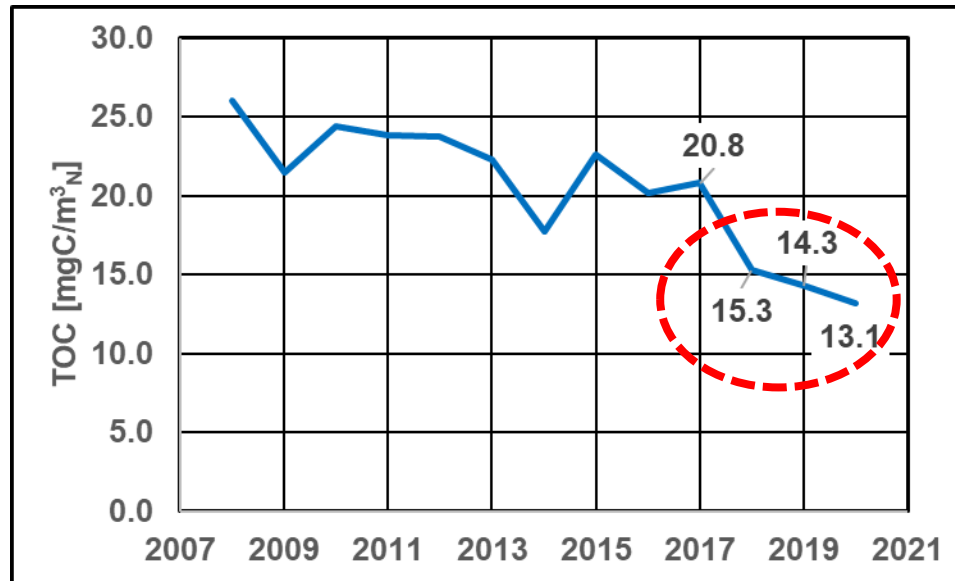


Jahresmittelwerte aus  
VDZ, Umweltdaten der Deutschen Zementindustrie (2014 bis 2020)

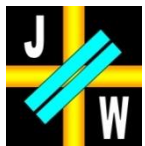


# Resultat der NOx-Reduktionsmassnahmen

Einfluss der SCR- und DeCONOx-Anlagen auf die Emission der flüchtigen organischen Stoffe (TOC)



Besten Dank für Ihre Aufmerksamkeit!



Waltisberg  
Consulting

**Josef Waltisberg**

Eichhaldenweg 23

5113 Holderbank / Schweiz

Mail: [josef@waltisberg.com](mailto:josef@waltisberg.com)

Homepage: [waltisberg.com](http://waltisberg.com)