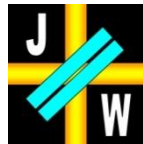


Reduktion der NO_x-Emissionen in Zementwerken mit der SCR-Technologie (Selective Catalytic Reduction)



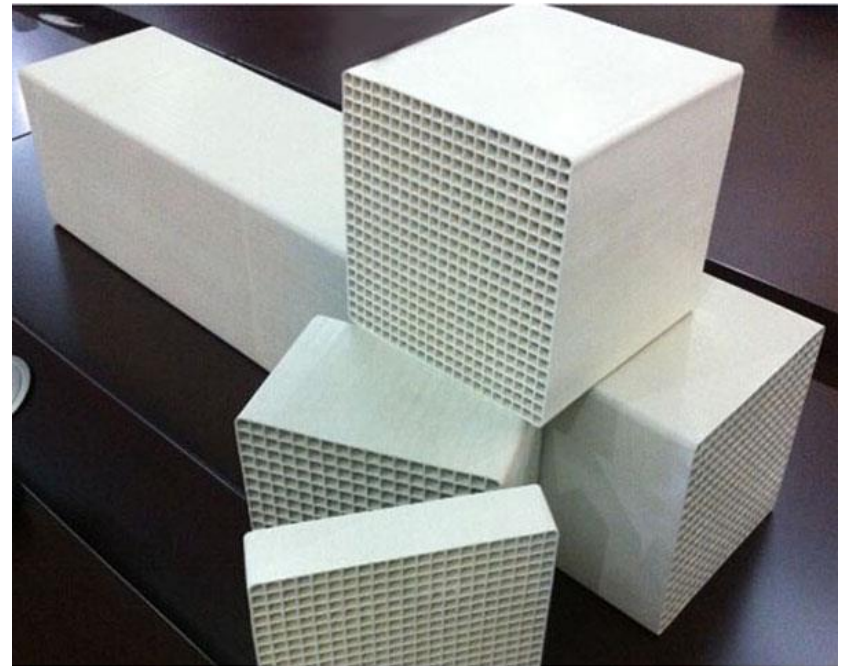
Josef Waltisberg

dipl.Ing. ETH

Eichhaldenweg 23

CH-5113 Holderbank / Switzerland

josef@waltisberg.com



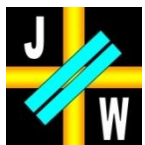
Bemerkungen zu diesem Bericht

- In diesem Bericht werden die wichtigsten Fakten der SCR-Technologie in Zementwerken dargestellt.
- Die verschiedenen Schaltungstypen («High-Dust», «Semi-Dust» und «Low-Dust») werden an gebauten und sich im Betrieb befindenden Installationen (Ausnahme: Solnhofen) besprochen und auch Daten genannt.
- In Deutschland und Österreich gibt es weitere Anlagen, aber Daten dieser Anlagen sind nur teilweise oder noch nicht veröffentlicht.

Josef Waltisberg

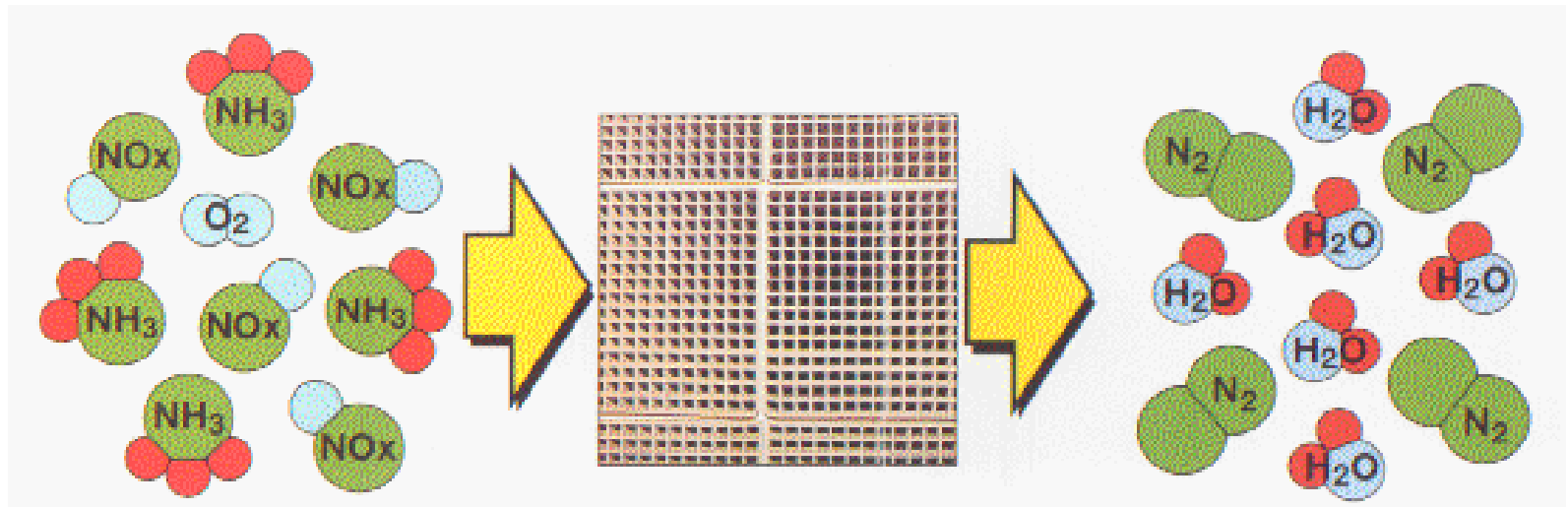
Hinweis zu einer Bezeichnung:

Organische Verbindungen werden als TOC (Total Organic Carbon) oder als VOC (Volatile Organic Compounds) angegeben. Diese beiden Bezeichnungen bezeichnen das Gleiche, nämlich die Summe der emittierten organischen Verbindungen, angegeben als Kohlenstoff, Einheit: [mgC/m³]



Selektive Katalytische Reduktion

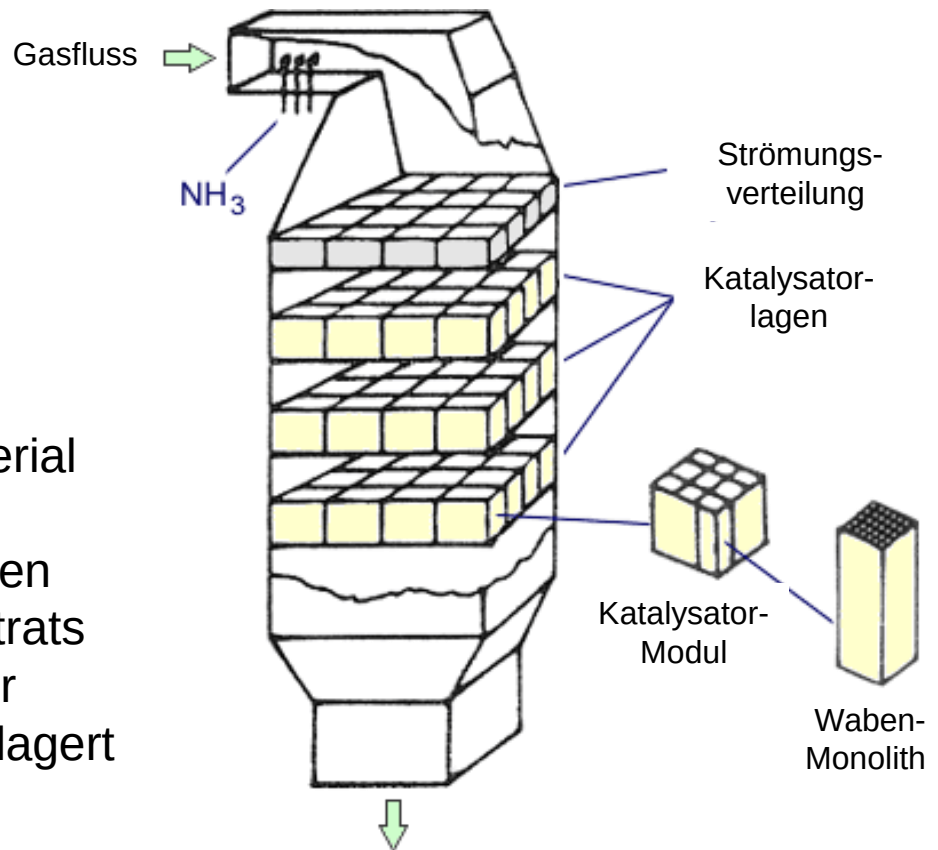
1. Reduktion von Stickstoffoxiden (NO_x) mit Hilfe eines Katalysators
2. Reduktion anderer Abgaskomponenten am gleichen Katalysator (z.B. VOC/TOC, PAH, PCB, «Dioxine»)



Katalysator

Der in SCR-Anwendungen verwendete Katalysator besteht normalerweise aus:

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



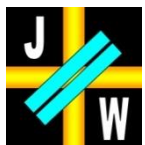
Katalysator

Metalloxid

- Das Metalloxid fungiert als poröse Basis mit einem hohen Verhältnis von Oberfläche zu Volumen, das durch das Vorhandensein von mikroskopisch kleinen Poren innerhalb der Metalloxidbasis entsteht. Auf dieser Metalloxidbasis, typischerweise Titandioxid (TiO_2), werden ein oder mehrere Metalloxidkatalysatoren in verschiedenen Konzentrationen abgeschieden. In SCR-Anwendungen besteht das aktive Katalysatormaterial typischerweise aus Vanadiumpentoxid (V_2O_5), Wolframtrioxid (WO_3) und Molybdäntrioxid (MoO_3) in verschiedenen Kombinationen.

«Massgeschneiderte Zusammensetzung»

- Die Zusammensetzung, auch als Formulierung bezeichnet, wird vom Katalysatorhersteller auf eine bestimmte SCR-Anwendung angepasst.
 - ▶ Einige Katalysatorformulierungen sind reaktiver (typischerweise solche mit höherem V_2O_5 -Gehalt)
 - ▶ Einige begrenzen die SO_2 -Oxidation zu SO_3 (typischerweise solche mit höherem WO_3 -Gehalt und niedrigerem V_2O_5 -Gehalt)
 - ▶ Einige (z. B. solche mit höheren MoO_3 -Gehalten) sind weniger anfällig für die Vergiftungseffekte bestimmter Spezies im Abgasstrom (z. B. Schwermetalle; Thallium).

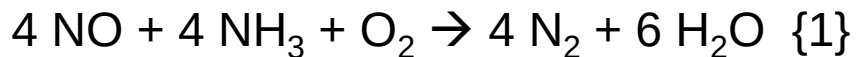


Chemische Reaktionen am Katalysator

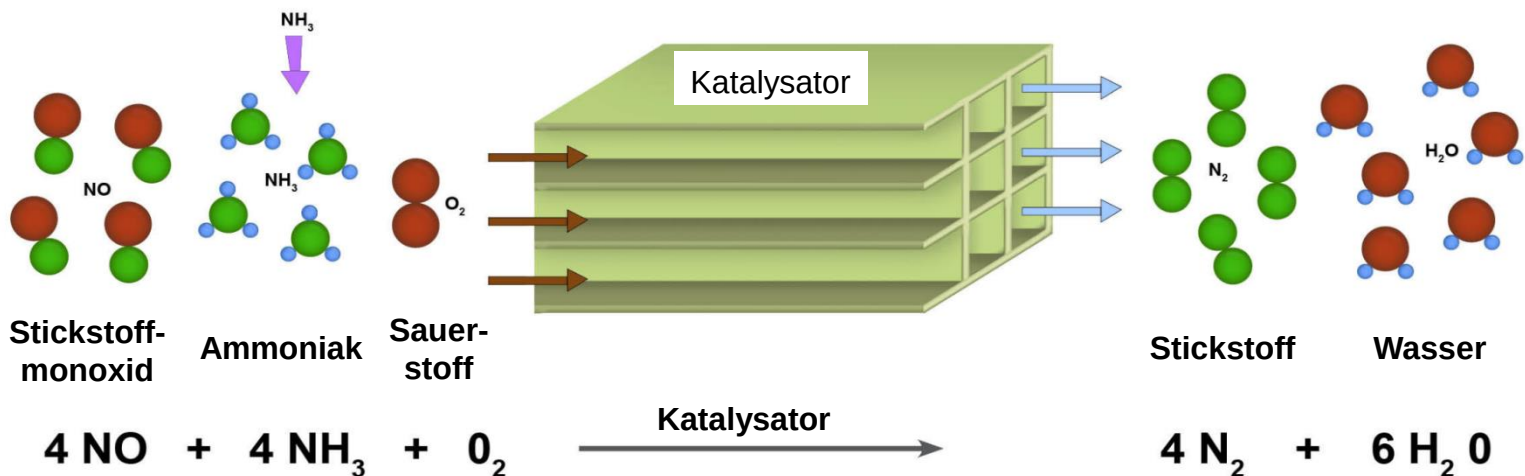
- **Hauptreaktion mit NO; Gleichung {1}:**

NO und das Reagenz Ammoniak (NH_3) reagieren in Gegenwart eines Katalysators zu molekularem Stickstoff (N_2) und Wasserdampf (H_2O):

Hauptreaktion mit NO:



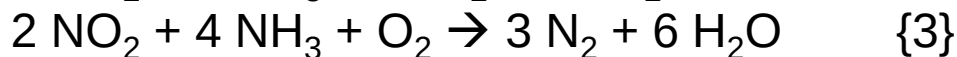
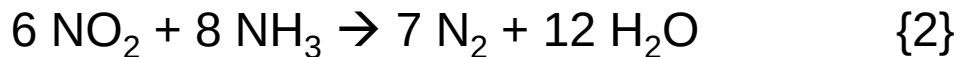
Ammoniak muss in den Mikroporen des Katalysators gespeichert werden, bevor NO reduziert wird. Da die Katalysatorelemente Ammoniak bis zu einem gewissen Grad in ihren Mikroporen speichern, wird das Ammoniak nicht unbedingt sofort nach der Injektion verbraucht. Umgekehrt kann die Reaktion noch einige Zeit nach Beendigung der Injektion weiterlaufen. Der Katalysator selbst ist kein Reaktant und wird bei dem Prozess nicht verbraucht.



Chemische Reaktion am Katalysator

- **Reaktion mit NO₂; Gleichungen {2} und {3}:**

NO₂, das in sehr geringer Konzentration in den Zementabgasen vorhanden ist (< 5 [%] des NO_x), wird ebenfalls auf ähnliche Weise reduziert wie NO:



- **Reaktion mit SO₂; Gleichung {4}:**

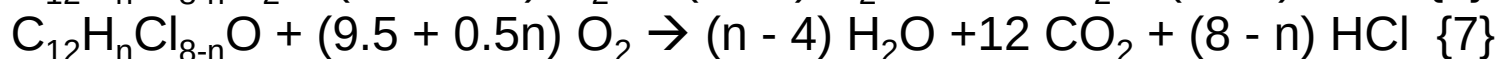
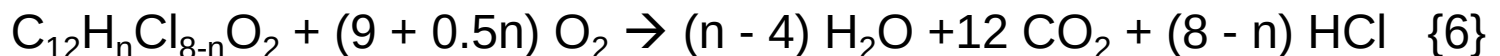
Eine Reaktion mit SO₂ kann ebenfalls stattfinden:



- **Reaktion mit Organischen Verbindungen VOC/TOC; Gleichung {5}:**

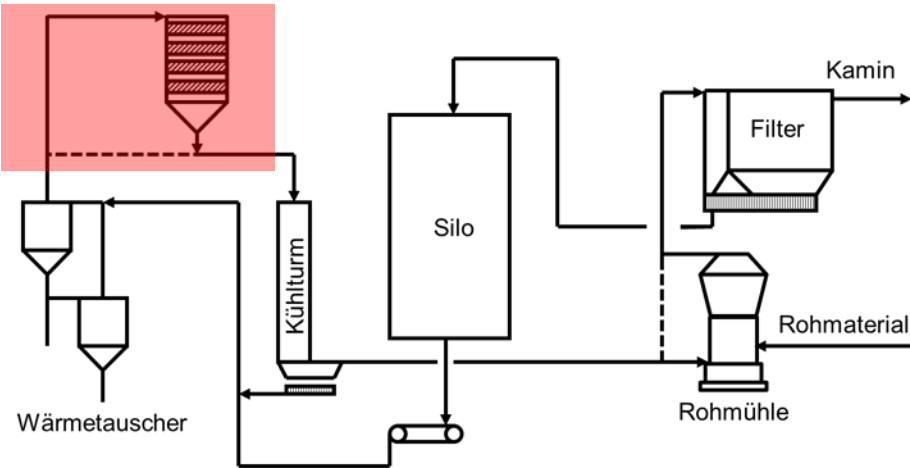


- **Reaktion mit «Dioxinen und Furanen»; Gleichung {6} und {7}:**

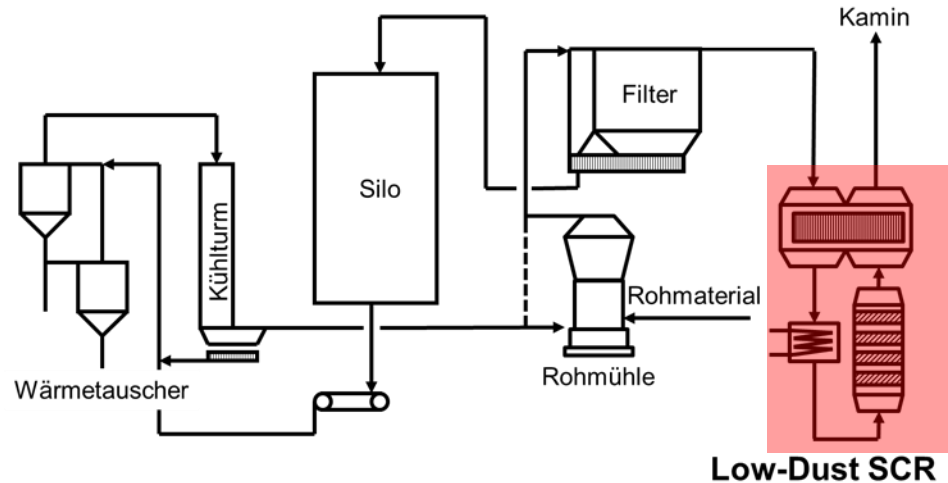
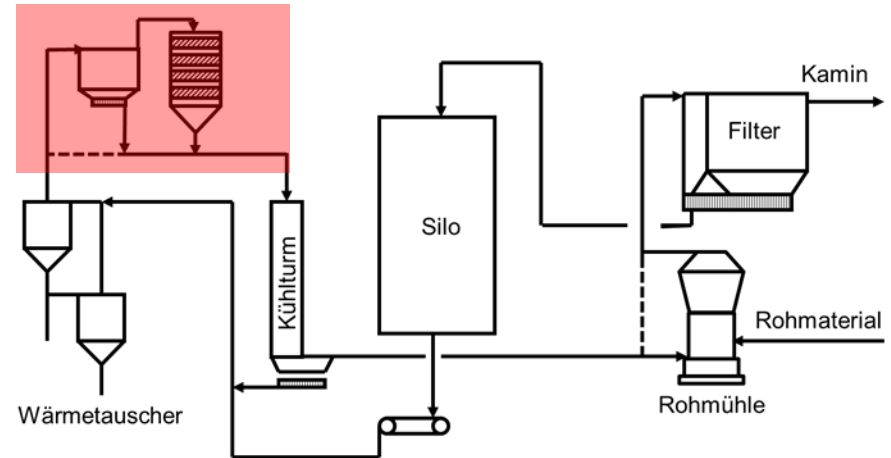


Typen von SCR Systemen

High-Dust SCR

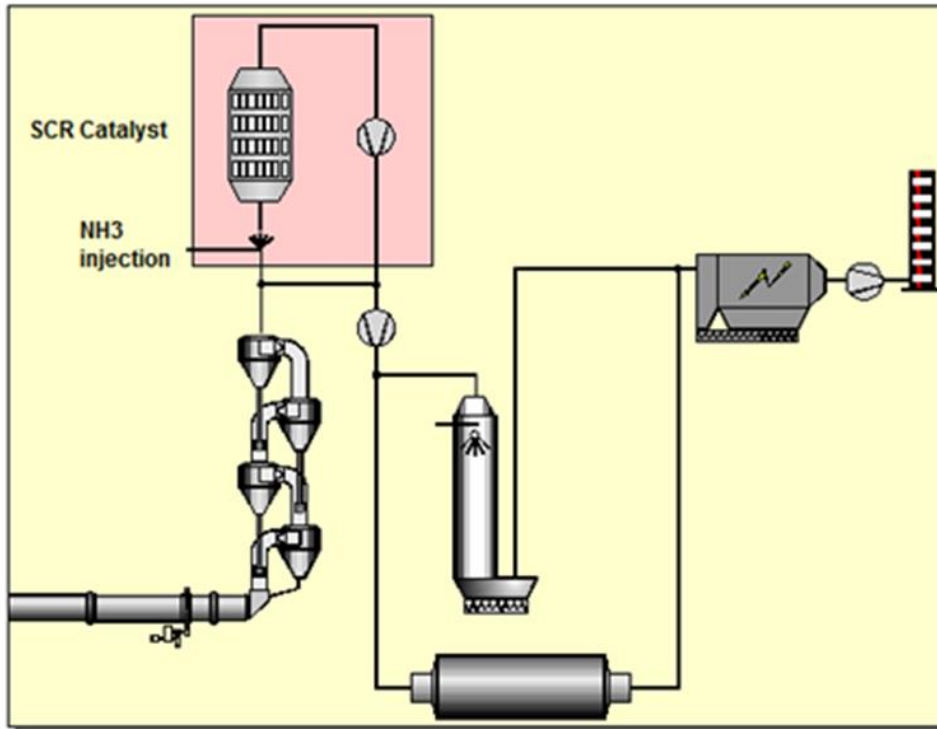


Semi-Dust SCR



High-Dust = «Hochstaub»
Semi-Dust = «Halbstaub»
Low-Dust = «Staubarm»

«High-Dust-» und «Semi-Dust» Lösungen



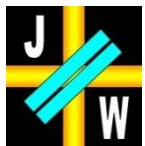
Katalysator direkt hinter dem Vorwärmer:

- Hoher Staubgehalt (Größenordnung: 10 bis 80 [g/m³])
«Semi-Dust» = «High-Dust» mit Vorentstaubung (Heissgasfilter)
- Gastemperatur mehr oder weniger im optimalen Bereich von 300 bis 350 [°C]

Beispiele:

- Solnhofner Portland Zement AG, Germany
- Cementeria di Mont Selice, Italy
- Schwenk Zement KG, Mergelstetten, Germany

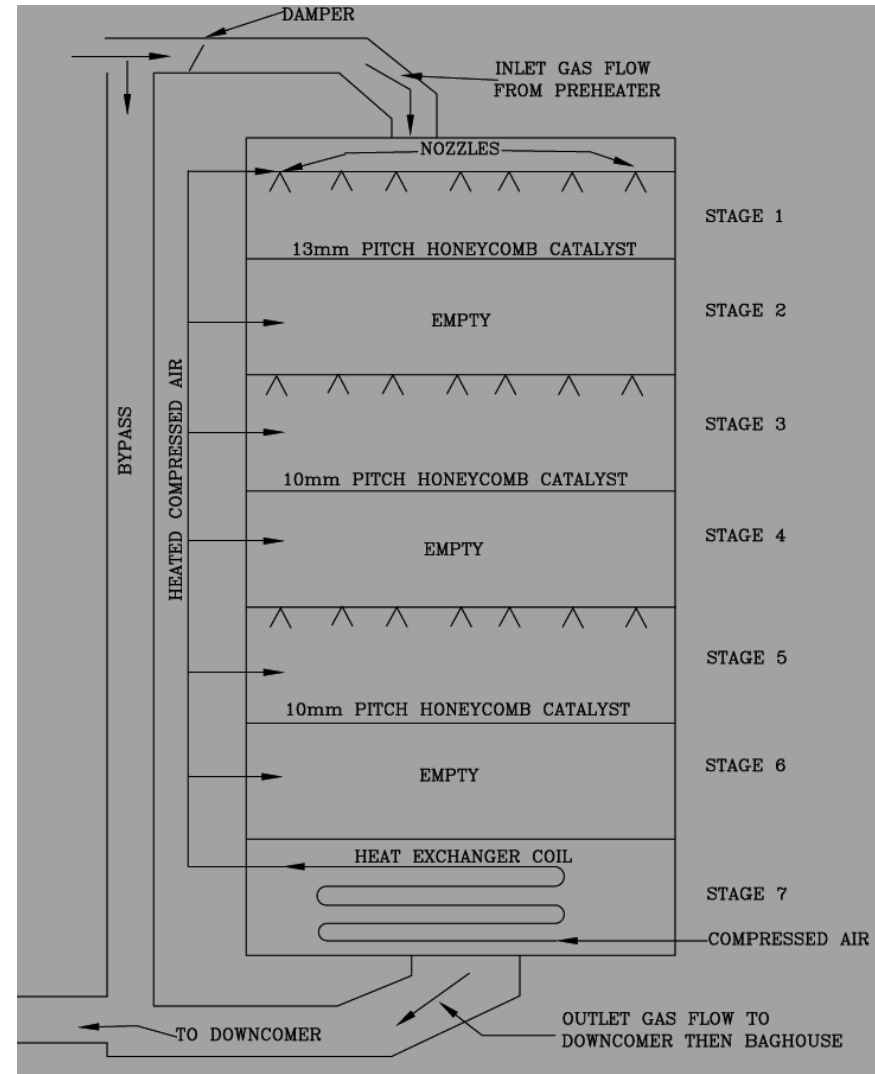
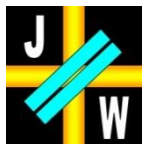
**« High-Dust-Lösung »
Solnhofner
Portland Zement AG
Deutschland**



Aufbau der Katalysatoreinheit

Konstruktion mit 6 Katalysatorschichten;
aber nur 3 «beladen»

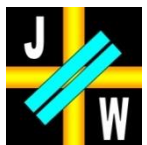
- Die erste SCR-Schicht enthält einen Wabenkatalysator mit einer Teilung (Pitch) von 13 [mm].
- Die zweite Schicht ist leer.
- Die dritte Schicht enthält einen Wabenkatalysator mit 10 [mm] Teilung.
- Die vierte Schicht ist leer.
- Die fünfte Schicht enthält einen Wabenkatalysator mit einer Teilung von 10 [mm].
- Die sechste Schicht ist leer.



Technische Daten

Erste grosstechnische SCR-Installation in Deutschland

- Ofen: Normaler Vorwärmofen ohne Kalzinator; Produktion 1600 [t/Tag]
- SCR-Anlage
 - ▶ Lieferant: CemCat (ELEX)
 - ▶ Inbetriebnahme: 2001
 - ▶ Jedes Katalysatorbett enthält sechs Module. Jedes dieser Module enthält 144 Katalysatorelemente in einer 12 x 12-Anordnung. Die Gesamttiefe jeder Katalysatorschicht beträgt 900 [mm].
 - ▶ Katalysator hergestellt von KWH Katalylists GmbH, 45136 Essen
 - ▶ Garantierte Lebensdauer: 2 Jahre
 - ▶ Erwartete Lebensdauer: 3 - 4 Jahre
 - ▶ Nach 4 ½ Jahren (Januar 2006) wurde der Katalysator ausgetauscht
 - ▶ Es wird angenommen, dass der Katalysator eine Lebensdauer von 5 bis 6 Jahren erreichen könnte
- **Die SCR-Anlage in Solnhofen wurde aufgrund der aufwändigen Katalysatorreinigung und des mit SNCR erreichbaren Grenzwertes von 500 [mg/m³_N] nach wenigen Jahren wieder ausser Betrieb genommen**



«High-Dust-Lösung» Cementeria di Mont Selice (Italien)

Literature:

High Dust SCR Succeeds at Cementeria di
Monselice (I)

Ulrich Leibacher, ELEX, Schwerzenbach (CH);
Clemente Bellin, Cementeria di Monselice SpA (I)
and A.A. Linero, P.E., Tallahassee, Florida (USA)
www.aramis.admin.ch/Default.aspx?DocumentID=582&Load=true



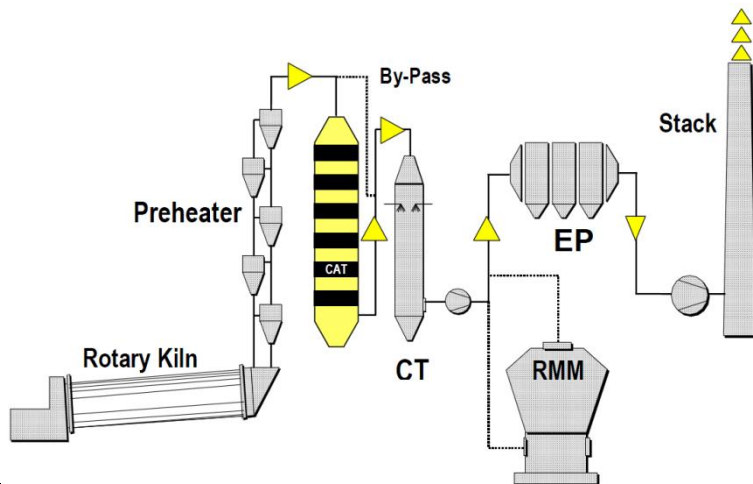
Ofensystem und Katalysator

Ofensystem

Kapacity: 2400 [t/day] (Auslegung)
1800 [t/day] (effektiv)

Vorwärmer (WT): 5 Stufen mit Kalzinator
Austrittstemperatur WT: 320 – 350 [°C]

Brennstoff: 80 [%] Petrolkoks + 20 [%] Kohle



Installation von CemCat (ELEX)

Katalysator

Lagen: 6, 1 in Reserve
nur 3 sind «beladen»
(kleinere Produktion)

Material: V_2O_5 (und andere Metalle)
als aktives Metall
 TiO_2 als keramische Basis



Testresultate 2006

		Auslegung	Test Ergebnisse	
Ofenleistung	[t/Tag]	2400	1800	
Gasvolumenstrom	[m ³ /h] 1)	160'000	110'000	
NO _x Austritt Wärmetauscher	[mg/m ³] 2)	2260	1530	1071
Molares Verhältnis	[NH ₃]/[NO]	0.905	0.98	0.2
NO _x Austritt Katalysator	[mg/m ³] 2)	232	75	612
NO _x Kamin	[mg/m ³] 2)	200	50	408
NO _x Reduktion	[%]	90	95	43
NH ₃ Schlupf	[mg/m ³] 2)	< 5	< 1	< 1
O ₂ Einlass Katalysator	[%]	2.5	2.7	
O ₂ Kamin (Direktbetrieb)	[%]	5	7.1	
O ₂ Kamin (Verbundbetrieb)	[%]		8.8	
Druckverlust	[mbar]	15	< 5	
NH ₄ OH (25 [%] - Lösung)	[kg/h]	445	204	34

1) Normalbedingungen (1013 [mbar], 0 [°C]), nass, aktueller Sauerstoff

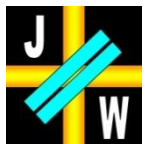
2) Normalbedingungen (1013 [mbar], 0 [°C]), trocken, aktueller Sauerstoff



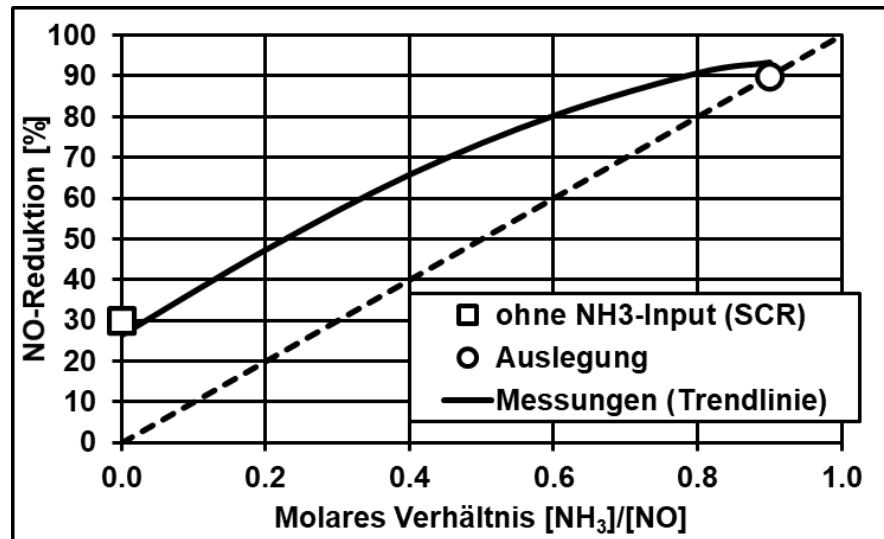
Resultate nach einem Jahr Betrieb

- Laufzeit seit März 2007: > 7000 [h]
- Verfügbarkeit: nahezu 100 [%]
- NO_x Reduktion (Testperiode) bis zu 97 [%]
- NH₃ (Testperiode): < 1 [mg/m³]
- Reduktion der organischen Verbindungen (VOC/TOC): 75 [%]
- Andere Feststellung: deutlich weniger Geruchsprobleme *)
- Kosten für 90 [%] Reduktion: 1 – 1.3 [€/t Klinker]

*) Die Anlage hatte vor der Installation der SCR immer Beschwerden über den Geruch



Messungen während des Betriebs



- Messwerte (Trendlinie) > als theoretische Linie (gestrichelte Linie). Ohne NH_4OH -Einsatz in der SCR-Anlage liegt die Reduzierung im Bereich von 30 [%] Reduktion
- Ammoniak im Abgas wurde vor der Installation der SCR-Anlage mit 50 - 150 $[mg/m^3]$ gemessen (Geruchsprobleme rund um die Anlage). Dieses Ammoniak ist rohstofflichen Ursprungs und wird im SCR-Prozess (vollständig) verbraucht. Dies führt zusammen mit dem eingespritzten NH_3 effektiv zu einem höheren molaren Verhältnis (eingespritztes $[NH_3]/[NO]$) und daher zu einer grösseren Reduktion.

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

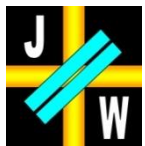
Literature:

BMU-Umweltinnovationsprogramm; Abschlussbericht
zum Vorhaben Minderung von NOx-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)

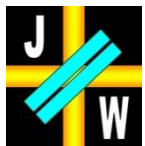
KfW-Aktenzeichen MB e1-001599

www.umweltinnovationsprogramm.de/sites/default/files/benutzer/36/dokumente/zement_schwenk_ab_scr_high_dust_2014.pdf



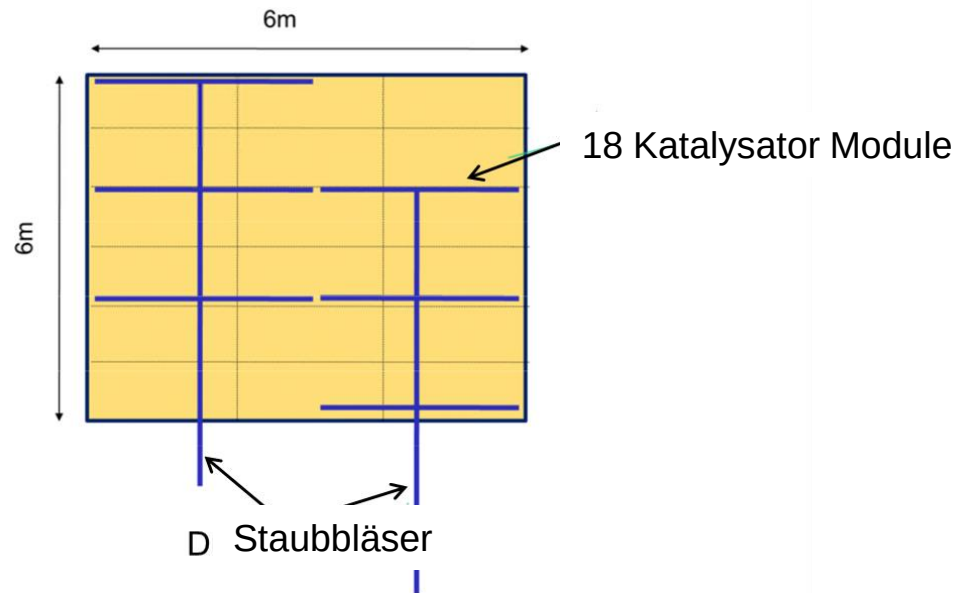
SCR-Installation

- Lieferant: Cemcat / ELEX
- Inbetriebnahme: Mitte 2011
- Typ: «High Dust» (hinter Vorwärmer)
- Abmessungen: Höhe 42 [m]
- Durchfluss: Vertikal von oben nach unten
- Rohgas: 360 - 420 [°C] maximal 220'000 [m³N/h]
(Normalbedingungen, nass)
- Reduktionsmittel: 25 [%] NH₃-Lösung oder 40 [%] Harnstofflösung
- Einspritzort: Vor der oberen Zyklonstufe
oder auf Stufe 6 des Wärmetauscherturms
- Menge: Maximal 1'200 [l/h]; 2 Lanzen
- Regelung: Dynamisch (über NO-Signal Reingas) und
manuell
- SNCR: Die SNCR-Installation wurde nicht eliminiert.
Kombination SNCR + SCR
(Vorteil: Katalysator wird kleiner)



Katalysator

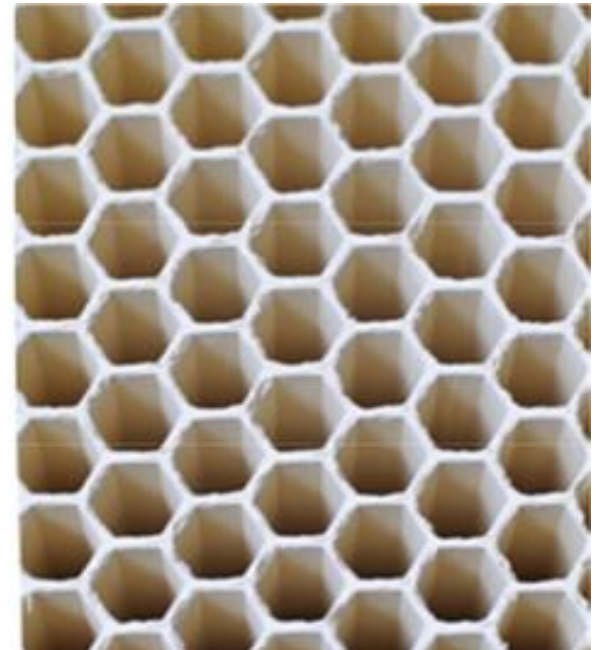
- Hersteller: CERAM Frauental (D)
- Dimension pro Lage: 6 x 6 [m] (18 Module pro Lage / 72 Elemente pro Modul)



- Abreinigung: 3 Luftkompressoren
(2 - 3 [bar], 120/130 [kW])
- Luftmenge: 3000- 5000 [m³_N/h]
2 Heissluftgebläse pro Schicht

Katalysator

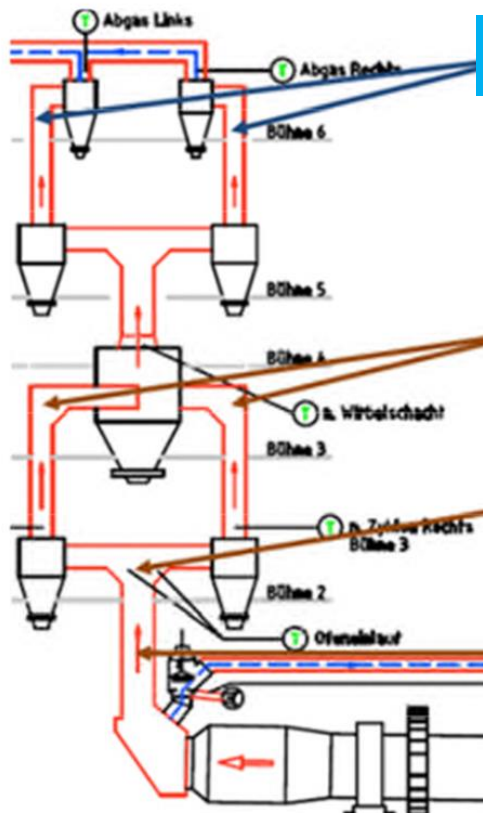
- Typ: Wabenkatalysator (Sechseckwabe)
unterste Stufe 4 seit 02/2011: Quadratwabe
- Teilung (Pitch): 13.6 [mm] Sechseckige Wabe
- Zusammensetzung: Titandioxid (TiO_2)
Wolframtrioxid (WO_3) ~ 4,5 - 4,7 [%]
Vanadiumpentoxid (V_2O_5) ~ 2 [%]



Einspritzpunkte SCR + SNCR

Kombination SNCR + SCR

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



Stufe 6: Einspritzung SCR

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

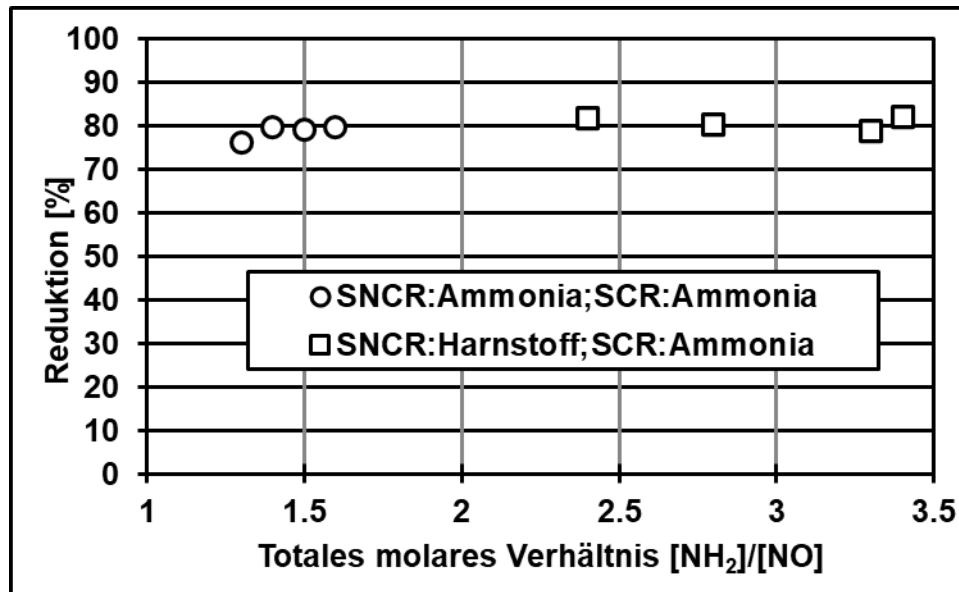
Stufe 2: Einspritzung SNCR
Temperatur: ~ 880-950 [°C]

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

Kombination SNCR/SCR

Versuch mit Kombination SNCR / SCR

1. SCR-Anlage arbeitet mit Ammoniaklösung (0, 50, 100, 150 [l/h])
2. SNCR-Anlage wird auf eine Gesamtreduktion von 80 [%] geregelt
3. SNCR wird mit Ammoniaklösung oder mit Harnstofflösung betrieben, SCR nur mit Ammoniaklösung



Erklärung:

- NH_3 -Oxidation in der SNCR-Zone
- Unvollständige Zersetzung von Harnstoff wegen zu niedriger Temperatur
 $CO(NH_2)_2 \rightarrow NH_2 + CONH_2$

Emissionen zwischen 2010 and 2018

2010/2011 Versuchsbetrieb

Jahresmittelwerte (1013 [mbar], 0 [°C], dry, 10 [%] O₂)

*) Persönliche Information

Jahr	NOx [mg/m ³]	NH ₃ [mg/m ³]	Verfügbarkeit SCR
2010	254	9	60
2011	231	12	75
2012	196	9	93
2013	192	8	93
2014	185	3	95+
2015-2018 *)	< 200	< 10	95+

Reduktion von Kohlenmonoxid (CO) und von organischen Verbindungen

Kohlenmonoxid

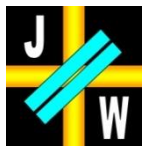
- Kein Reduktionseffekt in der SCR-Anlage

Flüchtige organische Verbindung (gesamter organischer Kohlenstoff)

- 10 - 20 [mgC/m³] reduziert um ca. 70 [%]
- Geringere Reduktion von kurzkettigen Verbindungen (C₁ und C₂)

Benzol (krebserregender Stoff)

- Von < 2 [mg/m³] vor der SCR-Anlage auf < 0.6 [mg/m³] am Kamin



Reduktion von organischen Verbindungen

Polyzyklische aromatische Verbindungen (PAKs gemäss EPA 610)

- Von 70 bis 90 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] vor der SCR auf < 5 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] am Kamin

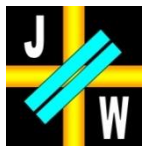
Polychlorierte Biphenyle (Summe der PCBs nach WHO)

- Sehr geringe Konzentration vor der SCR-Anlage (< 0.02 [ng/m^3])
- Reduktion in der SCR-Anlage, aber nicht genau bestimmbar
- Reduktionsrate zwischen < 10 und > 30 [%]

«Dioxine und Furane»

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

- Reduktionsrate ca. 50 bis 60 [%]
- Emission am Kamin < 0.001 [ngTE/m^3]

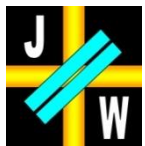


Betriebskosten

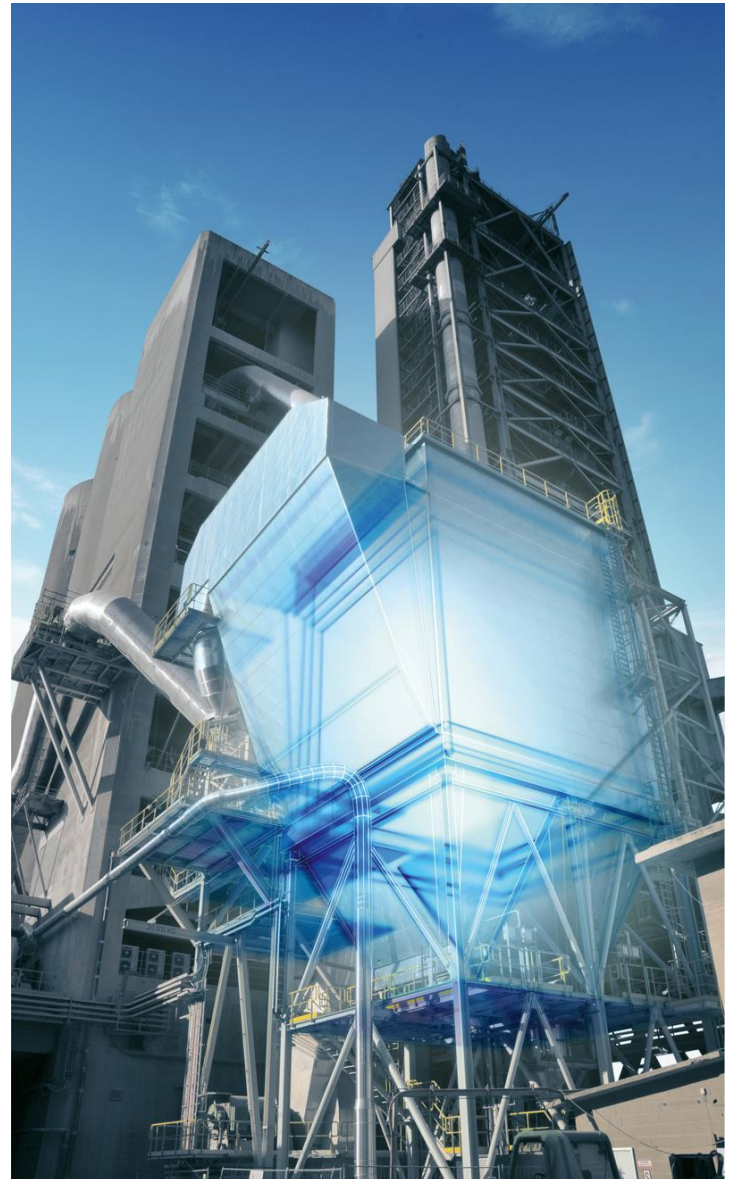
	Bedarf	Betriebskosten
Katalysator	1 Lage pro Jahr	0.30 [€/t Klinker]
Elektrizität	5.0 [kWh/t Klinker]	0.40 [€/t Klinker]
Reduktionsmittel	3.5 [kg/t Klinker]	0.42 [€/t Klinker]
Summe		1.12 [€/t Klinker]

«Semi-Dust-Lösung» Lafarge Perlmooser GmbH in Mannersdorf (Österreich)

Scheuch – Technology for Clean Air
Innovative SCR Technologies for NO_x-VOC-CO-Odor-Reduction
April 2016



Waltisberg
Consulting



«Semi-Dust SCR»

Erste «Semi-Dust-SCR-Anlage» weltweit bei Lafarge Mannersdorf, Österreich

Entwurfsdaten:

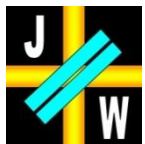
Produktion Ofen: 2500 [t/d]
Abgasvolumenstrom: 180'000 [m³_N/h]
Temperatur nach Vorwärmer: 290 - 350 [°C]
Staub nach Vorwärmer: 180 [g/m³] (vor dem Heissgasfilter; Elektrofilter)
und < 2 [g/m³] (nach Heissgasfilter)

Ziel:

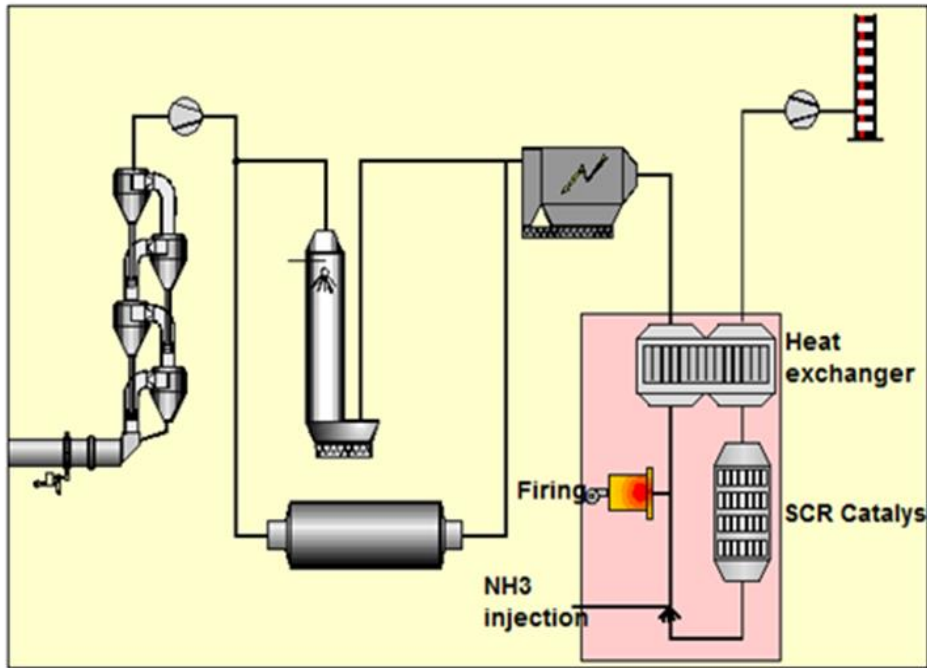
< 200 [mg/m³_N] NO_x (am Hauptkamin)
< 20 [mg/m³_N] NH₃

TÜV-Messkampagne
Juni 2012

[mg/m ³]	NO _x	NH ₃	VOC/ TOC
Vor SCR	837	235	25
Nach 1. Lage	273	21	13
Austritt SCR (Kamin)	158	2	8



«Low-Dust-Solution»



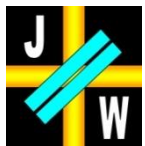
Katalysator hinter dem Staubfilter, direkt vor dem Kamin («Tail End»)

- Geringer Staubgehalt (in der Regel $< 10 \text{ [mg/m}^3\text{]})$
- Gastemperatur muss auf optimale Reaktionstemperatur erhöht werden (Wärmetauscher, Zusatzfeuerung oder Wärme aus dem Klinkerkühler)
- Beispiel:
Rohrdorfer ZementSüdbayerisches Portland-Zementwerk Gebr. Wiesböck & Co. GmbH; Deutschland

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

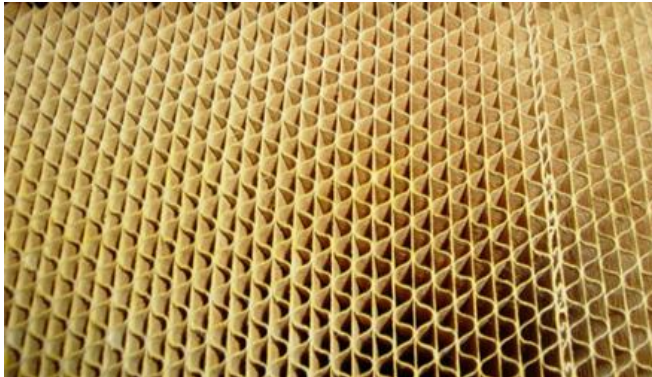
Literature:

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

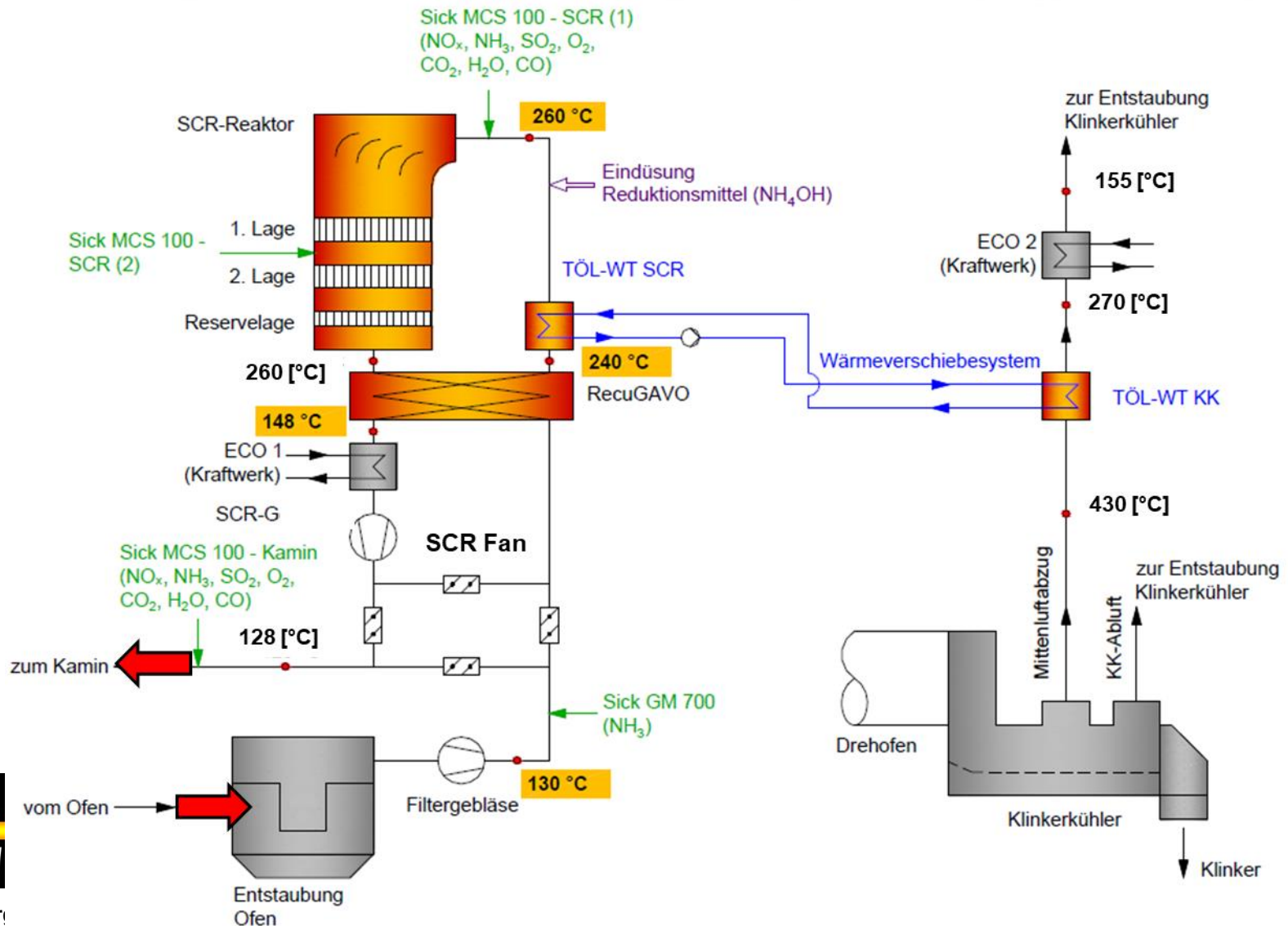


SCR-Einheit

- Lieferant: GEA Bischoff
- Inbetriebnahme: Mitte 2011
- Typ: "Low Dust" (direkt hinter dem Filtersystem; Wärmetauscher; zusätzliche Wärme vom Klinkerkühler)
- Gastemperatur: 250 [°C]
- Katalysator: Sinusförmiger Titandioxid (TiO_2)-Wabenkörper auf einer Glasfasermatrix, imprägniert mit ca. 3 [%] der aktiven Substanz Vanadiumpentoxid (V_2O_5). Zur Reduzierung der SO_2/SO_3 -Umsetzungsrate wurden zusätzlich ca. 3 [%] Wolframtrioxid (WO_3) zugesetzt.



Auslegung der «Low-Dust-Installation»



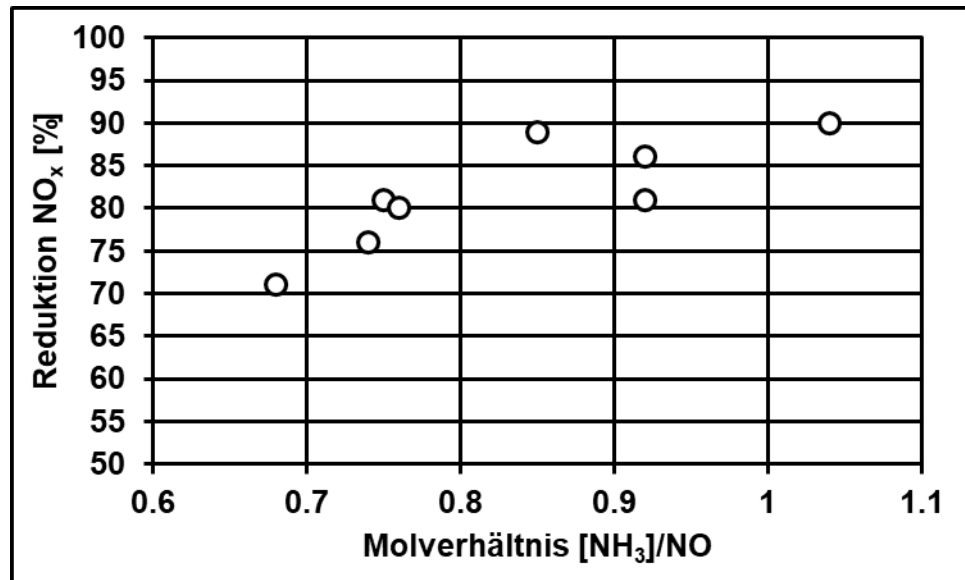
Resultate der verschiedenen Versuche

Messreihe		SCR-I		SCR-II		SCR-IV		SCR-V	
Datum		11.09.2012		12.05.2012		01.05.2013		01.10.2013	
Betriebsart		C	D	C	D	C	D	C	D
NOx vor SCR	[mg/m ³ *)	501	485	671	568	503	586	408	464
NOx nach SCR	[mg/m ³ *)	55	68	127	57	121	111	118	93
NOx-Rekuktion	[%]	89	86	81	90	76	81	71	80
Molverhältnis [NH ₃]/NO	[-]	0.85	0.92	0.92	1.04	0.74	0.75	0.68	0.76
NH ₃ nach SCR	[mg/m ³ *)	1	18	1	10	1	0	0	0

C = Verbundbetrieb
(laufende Mühle)

D = Direktbetrieb
(gestoppte Mühle)

*) Normal, dry, 10 [%] O₂



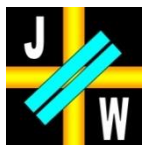
Verfügbarkeit der SCR

Die SCR-Anlage wird über den Bypass nicht Betrieben, wenn

1. Unterschreitung der erforderlichen Mindesttemperatur von 248 [°C] am Katalysatoraustritt
2. Überschreitung der maximal zulässigen SO₂-Konzentration des Abgases von 75 [mg/m³] (Normal, trocken, 10 [%] O₂) am Kamin
3. Überschreitung des maximal zulässigen Staubgehaltes des Abgases von 10 [mg/m³] (Normal, trocken, 10 [%] O₂) am Kamin

Verfügbarkeit der SCR-Anlage

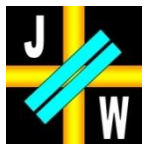
2013 – heute: > 95 [%]



Reduktion von Kohlenmonoxid (CO) und Organischen Verbindungen

Kohlenmonoxid und flüchtige organische Verbindungen (TOC = Total Organic Carbon)

- Die organischen Verbindungen wurden von 40 bis 60 [mgC/m³] auf durchschnittlich 16 [mgC/m³] reduziert, eine Reduktion um 60 bis 70 [%]
- Kurzkettige C₁/C₂-Verbindungen (Methan, Ethan, Ethen, ...) werden meist nur auf 10 bis 30 [%] reduziert. Insbesondere für Methan wurde keine signifikante Abnahme gefunden.
- Benzol (krebserzeugende Substanz)
Mittlere Reduktion: ca. 40 [%]; mittlere Emission: 1.4 [mg/m³]
- Die Erhöhung der CO-Konzentration betrug im Mittel etwa 15 [%], so dass der durchschnittliche Emissionswert nach der SCR-Anlage bei 480 [mg/m³] lag. Geht man von einer vollständigen Umwandlung der flüchtigen organischen Verbindungen in CO aus, entspricht dies einer CO-Erhöhung von etwa 15 [%]



Reduktion von Organischen Komponenten

Polyzyklische Aromatische Verbindungen (PAKs nach EPA 610)

- Reduktionsrate von 95 [%], wobei die Reduktion in der ersten Schicht bereits 85 [%] betrug. Durchschnittliche Emission um 2.5 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] (einschliesslich Naphthalin)
- Die Emission von Benzo(a)pyren lag unterhalb der Nachweisgrenze.

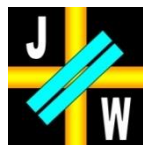
Polychlorierte Biphenyle (Summe der PCBs nach WHO2005)

- Reduktionsrate von 75 bis 95 [%], wobei im Durchschnitt 75 [%] in der ersten Schicht reduziert wurden.
- Durchschnittlicher Emissionswert: 0.0008 [$\text{ng TE}/\text{m}^3$]

«Dioxine und Furane»

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

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



Verhalten anderer Komponenten

Formaldehyd

Im SCR fand weder eine Bildung noch eine Reduktion von Formaldehyd statt.
Alle gemessenen Werte lagen unter 1 [mg/m³]

Quecksilber

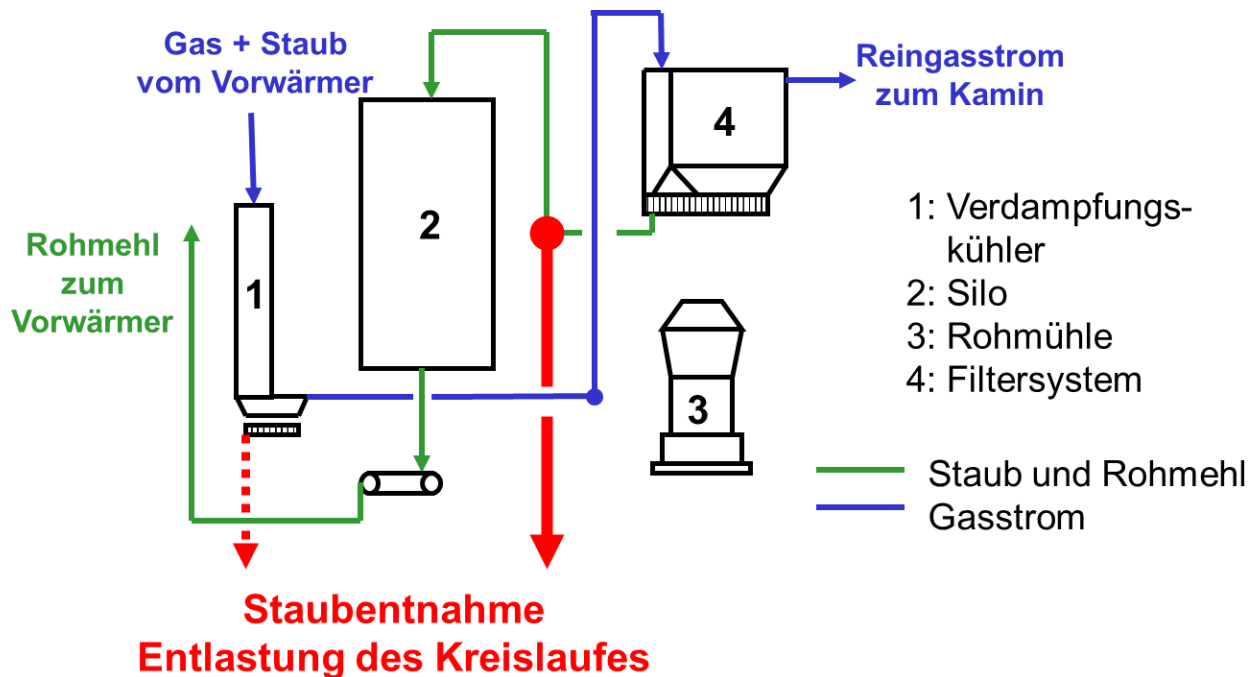
- Die durchgeführten Messungen zeigten, dass der SCR-Katalysator den Oxidationszustand des im Abgas enthaltenen Quecksilbers beeinflusst.

Versuchszeitraum	Messort	Anteil ionischer Quecksilber- Verbindungen ¹⁾ [%]	Anteil elementaren Quecksilbers ¹⁾ [%]
Verbundbetrieb	vor SCR	44%	56%
	nach Kat.-Lage 1	76%	24%
	nach SCR	93%	7%
Direktbetrieb	vor SCR	8%	92%
	nach Kat.-Lage 1	69%	31%
	nach SCR	69%	31%

1) Mittelwerte über alle Messkampagnen (bezogen auf die gemessenen Konzentrationen und auf 10% O₂)

Verhalten anderer Komponenten

- Der Emissionsgrenzwert für Hg von 0.03 (Tagesmittelwert) bzw. 0.05 [mg/m³] (Halbstundenmittelwert) wurde eingehalten, die Werte lagen durchschnittlich auf einem Niveau von 0.02 [mg/m³]. Dies ist dadurch möglich, dass die im Abgasfilter und Verdampfungskühler anfallenden Stäube im Direktbetrieb (gestoppte Mühle) komplett ausgeschleust und so der äussere Hg-Kreislauf begrenzt wird.
- Schema einer solchen Ausschleusung



Betriebskosten

	Bedarf	Annahme Kosten	Betriebskosten
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]
Summe			0.50 [€/t Klinker]