



ecra

european cement research academy

European Cement Research Academy

European Cement Research
Academy GmbH

Tannenstrasse 2
40476 Duesseldorf, GERMANY

Phone: +49-211-23 98 38-0

Fax: +49-211-23 98 38-500

info@ecra-online.org

www.ecra-online.org

Chairman of the Technical
Advisory Board : Ernest Jelito

Managing Director: Martin Schneider

Registration office: Duesseldorf
Court of registration: Duesseldorf
Commercial registration no.: 47580

Technical Report

A-2019/1789

Einschätzung des Stands der Technik bezüglich Emissionsreduktionen in der Zementindustrie in der Schweiz und in den Nachbarländern

Einschätzung des Stands der Technik bezüglich Emissionsreduktionen in der Zementindustrie in der Schweiz und in den Nachbarländern

Auftraggeber: Bundesamt für Umwelt BAFU
Abteilung Luftreinhaltung und Chemikalien
Sektion Industrie und Feuerungen
CH-3003 Bern

und

cemsuisse
Verband der Schweizerischen Zementindustrie
Marktgasse 53
3011 Bern

Auftragsdatum: 27.06.2019 (BAFU) bzw.
05.07.2019 (cemsuisse)

Bestell-Nr. des Auftraggebers: 00.0483.PZ / S234-0964 (Vertrags-Nr. BAFU)
2019021 (Vertrags-Nr. cemsuisse)

Unsere Auftragsnummer: A-2019/1789

Projektleiter: Dr.-Ing. Volker Hoenig

Bearbeiter: Dr. Helmut Hoppe

Ausgestellt am: 26.09.2019

Berichtsumfang: 24 Seiten

Diese Studie wurde im Auftrag des BAFU und von cemsuisse verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Aufgabenstellung	4
2	Vorgaben zur Emissionsminderung in der Schweiz	5
3	Gesetzliche Vorgaben und Vollzug in Europa, Deutschland, Frankreich, Österreich und Italien	6
3.1	Deutschland	6
3.2	Frankreich	9
3.3	Österreich	9
3.4	Italien	10
4	Stand der Technik für die Emissionsminderung	11
4.1	Stickstoffoxide und Ammoniak	11
4.2	Staub	13
4.3	Gesamtkohlenstoff	13
5	Bewertung der in den Schweizer Zementwerken eingebauten Minderungstechnologien	15
6	Ökonomische und gesamtökologische Aspekte sowie wirtschaftliche Tragbarkeit	17
7	Fazit	20
8	Literatur	22

1 Einleitung und Aufgabenstellung

Die European Cement Research Academy (ECRA) wurde von cemsuisse und dem Bundesamt für Umwelt (BAFU) beauftragt, den Stand der Emissionsminderung in der Zementindustrie für die Komponente NO_x sowie von Staub und Gesamtkohlenstoff darzustellen. Hintergrund für diese Aufgabenstellung sind aktuelle Bestrebungen der Umweltpolitik, den Emissionsgrenzwert für NO_x weiter abzusenken. Ein entsprechender Vorstoß (Motion) wurde im Nationalrat im März 2018 abgelehnt. Der Bundesrat stellte aber eine Neubeurteilung einer möglichen Absenkung des NO_x -Grenzwertes im Jahr 2020 in Aussicht.

In dem vorliegenden Technischen Bericht bestand die Aufgabenstellung, zunächst die umweltrechtlichen Vorgaben für die Emissionen der genannten Luftschadstoffe in der Schweiz und in einzelnen europäischen Nachbarländern darzustellen. Anschließend sollte der Stand der Emissionsminderung für diese Komponenten zusammengefasst und dargestellt werden, inwieweit diese Verfahren in den Schweizerischen Zementwerken angewendet werden bzw. welches Potenzial für eine weitere Verbesserung der Emissionssituation besteht. Dabei sollte auch eine gesamtökologische und wirtschaftliche Bewertung durchgeführt werden.

Die Ergebnisse dieser Betrachtungen sind in dem nachfolgenden Technischen Bericht zusammengestellt.

2 Vorgaben zur Emissionsminderung in der Schweiz

Das in der Schweiz geltende gesetzliche Regelwerk zur Reinhaltung der Luft ist die Luftreinhalte-Verordnung (LRV) [1]. Wie in Art. 15 der LRV beschrieben, sind für die Beurteilung der Emissionen zunächst Stundenmittelwerte zu bilden. Bei kontinuierlicher Messung der Abgaskomponenten gelten die Emissionsgrenzwerte als eingehalten, wenn

- kein Tagesmittelwert den Emissionsgrenzwert überschreitet
- 97 % der Stundenmittelwerte das 1,2fache des Grenzwertes nicht überschreiten
- keiner der Stundenmittelwerte das Zweifache des Grenzwertes überschreitet.

In Anhang 2 Ziffer 11 der LRV sind Emissionsgrenzwerte (jeweils bez. auf 10 % O₂) für Zementöfen und Kalkklinkeröfen festgelegt. Für die hier zu betrachtenden Abgaskomponenten gelten aktuell folgende Grenzwerte:

Staub:	20 mg/m ³
NO _x :	500 mg/m ³
Gasförmige organische Stoffe:	80 mg/m ³

Die Grenzwerte für gasförmige organische Stoffe im Allgemeinen Teil (Anhang 1) der LRV haben keine Geltung für Zementöfen. Die Emissionen werden als Gesamtkohlenstoff angegeben.

Die NO_x-Emissionen sollen nach den Vorgaben der LRV aber so weit begrenzt werden, wie es technisch und betrieblich möglich und wirtschaftlich tragbar ist, d. h. es ist ein Gebot zur Dynamisierung enthalten.

Darüber hinaus ist für die Komponente NO_x eine Branchenvereinbarung [2] relevant, die seit 1998 zwischen der Schweizerischen Zementindustrie und den Standortkantonen besteht. In der aktuellen Fassung gilt sie für den Zeitraum vom 01.01.2017 bis zum 31.12.2021 und verpflichtet die schweizerische Zementindustrie, seit dem 01.01.2019 einen branchenspezifischen Mittelwert von 430 mg/m³ einzuhalten, welcher ab dem 01.01.2020 auf 400 mg/m³ sinkt. Werksspezifisch hat sich die Industrie verpflichtet, aktuell 480 mg/m³ und ab dem 01.01.2020 einen Mittelwert von 450 mg/m³ einzuhalten. Diese Reduktionen stellen eine Verschärfung gegenüber der LRV dar. Darüber hinaus gibt es aktuelle Überlegungen der Politik bezüglich einer weiteren Absenkung der NO_x-Grenzwerte.

Für die Beurteilung des NO_x-Grenzwertes ist weiter relevant, dass nach Anhang 1 Ziffer 6 der LRV (Allgemeine vorsorgliche Emissionsbegrenzungen) ein NH₃-Grenzwert von 30 mg/m³ gilt.

3 Gesetzliche Vorgaben und Vollzug in Europa, Deutschland, Frankreich, Österreich und Italien

Auf europäischer Ebene ist für die Emissionen von Industrieanlagen die sogenannte Industrial Emissions Directive (IED) [3] aus dem Jahr 2010 von besonderer Bedeutung. In Anhang VI Teil 4 dieser Richtlinie sind Emissionsgrenzwerte für Zementöfen festgelegt, in denen Abfälle mitverbrannt werden. Für die hier zu betrachtenden Abgaskomponenten haben die Grenzwerte (Tagesmittelwerte, bezogen auf 10 % O₂) folgenden Wert:

Gesamtstaub:	30 mg/m ³
NO _x :	500 mg/m ³
TOC:	10 mg/m ³

(Möglichkeit zur Genehmigung von Ausnahmen ist vorgesehen, wenn die Emissionen nicht durch die Mitverbrennung von Abfällen entstehen. Die TOC-Emissionen sollen auch nicht durch den Einsatz von alternativen Rohmaterialien verursacht werden.)

Im Zusammenhang mit der Bewertung des NO_x-Grenzwertes ist von Bedeutung, dass in der IED kein Grenzwert für die Komponente NH₃ festgelegt wurde.

Gemäß Anhang 6, Teil 6 der IED gelten die Emissionsgrenzwerte als eingehalten, wenn die Werte des 95 %-Vertrauensbereiches (Konfidenzintervall), die für die Emissionsgrenzwerte bestimmt werden, bestimmte Prozentsätze des Emissionsgrenzwertes nicht überschreiten. Für die Komponente Stickstoffdioxid sind dies 20 %, für Gesamtstaub und TOC 30 % des Emissionsgrenzwertes. Die validierten Werte werden durch Abzug des Konfidenzintervalls von den gültigen Stundenmittelwerten berechnet.

Die IED-Richtlinie wurde von den Mitgliedsstaaten der EU in nationales Recht umgesetzt. In den meisten Ländern wurden dabei die Vorgaben der EU vollständig übernommen („1:1-Umsetzung“), während in einzelnen anderen Ländern verschiedene Anforderungen der IED weiter verschärft wurden. Auf dieser Grundlage werden dann von den zuständigen Behörden in den jeweiligen Staaten die Genehmigungsbescheide für die einzelnen Zementwerke erteilt. Dabei werden die in der IED vorgesehenen Möglichkeiten genutzt, für einzelne Komponenten rohmaterialbedingte Ausnahmen zu erteilen (z. B. für SO₂, TOC, Hg). Dafür ist eine Beurteilung der individuellen Rohmaterialsituation an den einzelnen Standorten erforderlich. Dies erfolgt z. B. in Deutschland durch Laboruntersuchungen, bei denen die Freisetzung der besagten Komponente aus den natürlich vorkommenden Rohmaterialien untersucht wird (und daraus eine rohmaterialbedingte Abgaskonzentration berechnet wird). Diese Vorgehensweise wurde auch bereits in anderen europäischen Staaten gewählt und von den zuständigen Behörden akzeptiert.

3.1 Deutschland

Für Zementwerke, in denen Abfälle bzw. alternative Brennstoffe mitverbrannt werden, ist die 17. Verordnung zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (17. BImSchV) [4] in der Fassung vom 2. Mai 2013 das relevante gesetzliche Regelwerk. Darin wurde auch die IED in nationales Recht umgesetzt und einzelne Anforderungen verschärft.

In Anlage 3 Nr. 2 der 17. BImSchV sind Emissionsgrenzwerte (Tagesmittelwerte/TMW und Halbstundenmittelwerte/HMW) für Anlagen zur Herstellung von Zementklinker, in denen Ab-

fälle mitverbrannt werden (praktisch in allen deutschen Werken mit Klinkerproduktion), festgelegt. Die Werte sind auf einen Bezugssauerstoffgehalt von 10 % zu beziehen. Die gemessenen Abgaskonzentrationen im An- und Abfahrbetrieb werden vom Messwertrechner gesondert klassiert, also nicht in die Berechnung der Halbstunden- und Tagesmittelwerte einbezogen. Kriterien für den An- und Abfahrbetrieb werden werksspezifisch festgelegt.

Für die hier zu betrachtenden Komponenten gelten folgende Werte:

Gesamtstaub:	10 / 30 mg/m ³ (TMW / HMW)
NO _x :	200 / 400 mg/m ³ (TMW / HMW als doppelter TMW)
Gesamt-C:	10 mg/m ³ (TMW, HMW in der Regel als doppelter TMW) (rohstoffbedingte Ausnahmen möglich).

Die Anforderungen der 17. BImSchV gelten seit dem 01.01.2016, doch für die Komponente NO_x seit dem 01.01.2019. Für die Bewertung der NO_x-Emissionen ist ebenfalls relevant, dass ein NH₃-Grenzwert von 30 mg/m³ (TMW; meist zweifacher TMW als HMW) gilt, wenn zur Minderung der NO_x-Emissionen das SNCR- oder SCR-Verfahren angewendet wird. Wenn keines der beiden Verfahren angewendet wird, ist kein NH₃-Grenzwert einzuhalten.

In den vergangenen Jahren wurden zahlreiche Gespräche zwischen Vertretern der Umweltbehörden und der Zementindustrie geführt, in denen die Umsetzung der 17. BImSchV in der Zementindustrie – insbesondere die Einhaltung der NO_x- und NH₃-Grenzwerte – diskutiert wurde. Insbesondere bei Anwendung des SNCR-Verfahrens zur NO_x-Minderung ist es an vielen Ofenanlagen nicht möglich, den NH₃-Grenzwert im Direktbetrieb der Ofenanlage sicher einzuhalten, bedingt durch NH₃-Schlupf und/oder rohstoffmaterialbedingte NH₃-Emissionen. Daraus resultierend wurde vom Länderausschuss für Immissionsschutz (LAI) im Jahr 2015 ein sogenanntes Eckpunktepapier [5] verfasst, in dem folgende Randbedingungen genannt sind, unter denen zukünftig noch Ausnahmen für die Komponente NH₃ nach § 24 der 17. BImSchV erteilt werden könnten:

- Zunächst wurde festgelegt, dass es sich bei dem NH₃-Grenzwert von 30 mg/m³ (siehe Anlage 3 Nr. 2.1h der 17. BImSchV) um einen Summengrenzwert handelt, der sowohl die rohstoffbedingten NH₃-Emissionen als auch den sogenannten NH₃-Schlupf aus dem NO_x-Minderungsverfahren umfassen soll.
- Weiterhin wurde konstatiert, dass das SCR-Verfahren nach Durchführung der Demonstrationsprojekte in Mergelstetten [22] und in Rohrdorf [23] als Stand der Technik¹ angesehen wird und damit die gleichzeitige Einhaltung der Emissionsgrenzwerte für NO_x und NH₃ grundsätzlich möglich ist.
- Da das im Abgas vorhandene „rohstoffbedingte NH₃“ im SCR-Katalysator als Reduktionsmittel zur NO_x-Minderung verwertet wird, sind aus Sicht des LAI rohstoffbedingte Ausnahmen für den NH₃-Grenzwert nicht mehr erforderlich.
- Gleichzeitig wird aber die Technologieoffenheit des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BImSchG) [25] eingeräumt, wonach außer dem SCR-Verfahren auch andere NO_x-Minderungsverfahren angewendet werden können. Dies kommt dann zum Tragen, wenn die Anforderungen der 17. BImSchV auch ohne die Anwendung des SCR-Verfahrens weitestgehend erfüllt werden und die Anwendung des aufwändigen SCR-Verfahrens daher unverhältnismäßig wäre.

¹ unterschiedliche Definitionen des „Standes der Technik“ in verschiedenen Ländern; siehe auch Kap. 4

- Es wurden folgende Voraussetzungen für die Erteilung einer Ausnahmeregelung für den NH₃-Grenzwert festgelegt:
 - Im Verbundbetrieb müssen die NH₃-Emissionsgrenzwerte der 17. BImSchV von 30 bzw. 60 mg/m³ (TMW / HMW) eingehalten werden.
 - Im Direktbetrieb soll ein NH₃-Emissionsgrenzwert von 60 mg/m³ im Tagesmittel gelten. Der Anteil des Direktbetriebs soll 15 % der jährlichen Betriebsstunden nicht überschreiten.
 - Es soll zusätzlich ein NH₃-Emissionsgrenzwert von 25 mg/m³ im Jahresmittel gelten.
 - Die Ausnahmen für den NH₃-Emissionsgrenzwert sind zeitlich zu befristen.
 - Die Anträge sind fundiert zu begründen. Dabei soll aus technischer und wirtschaftlicher Sicht dargelegt werden, warum die Anwendung des SCR-Verfahrens unverhältnismäßig wäre.

Die Verfügbarkeit der SCR-Anlagen ist mittlerweile relativ hoch (> 95 %). Während des Ausfalls einer SCR-Anlage sehen die Genehmigungen in der Regel die Anwendung des SNCR-Verfahrens vor und die Einhaltung eines NO_x-Grenzwertes von 350 mg/m³. In der derzeit in Revision befindlichen Technischen Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft) [27] soll eine entsprechende Regelung für bis zu 5 % der Ofenlaufzeit aufgenommen werden.

Für die Komponente Gesamtkohlenstoff kann die zuständige Behörde nach Anlage 3 Nr. 2.1.2 Ausnahmen erteilen, wenn dies auf Grund der Zusammensetzung der natürlichen Rohstoffe erforderlich ist und wenn auszuschließen ist, dass zusätzliche Gesamt-C-Emissionen durch die Verbrennung von Abfällen entstehen. Dazu werden in der Regel Laboruntersuchungen durchgeführt, bei denen das rohstoffbedingte Emissionsniveau ermittelt wird. Auf Grundlage dessen werden Emissionsgrenzwerte festgelegt, die bis 100 mg/m³ oder in Einzelfällen bis 200 mg/m³ betragen können.

In den Gesprächen zwischen den Vertretern der Zementindustrie und der Umweltbehörden war ebenfalls vereinbart worden, dass von den Zementwerken sogenannte Maßnahmenpläne zur Umsetzung der Anforderungen der 17. BImSchV vorzulegen waren. Insbesondere Unternehmen mit mehreren Werken wurde die Möglichkeit eingeräumt, die erforderlichen Investitionen und Baumaßnahmen für bestimmte Sekundärmaßnahmen zur Emissionsminderung nach und nach durchzuführen, so dass sich die umzusetzenden Maßnahmen über einen Zeitraum von mehreren Jahren erstrecken können und möglicherweise erst in 2-3 Jahren abgeschlossen sind. Dies betrifft insbesondere Maßnahmen zur katalytischen NO_x-Minderung. Aktuell sind in der deutschen Zementindustrie 15 SCR-Anlagen in Betrieb und weitere in Bau bzw. in Planung (Stand 8/2019). Für die Komponente Gesamt-C werden in der Regel weiterhin Ausnahmen erteilt, wenn die Emissionen überwiegend rohstoffbedingt sind. Ergänzend ist zu erwähnen, dass unter den 15 Anlagen zur katalytischen NO_x-Minderung zwei DeCONO_x-Anlagen sind (Werk Allmendingen (SCHWENK), Werk Geseke (Dyckerhoff)), mit denen sehr niedrige Gesamt-C-Emissionen erreicht werden können.

Insgesamt wird in Deutschland in 53 Werken Zement produziert [6], darunter sind 37 Werke mit Klinkerproduktion und 16 Mahlwerke.

3.2 Frankreich

Die europäische IED wurde in Frankreich mit der Verordnung N°2012-7 vom 5.1.2012 in nationales Recht umgesetzt [28] und keine weitergehenden Verschärfungen vorgenommen. Entsprechend gelten die Emissionsgrenzwerte der IED (1:1-Umsetzung).

Gesamtstaub:	30 mg/m ³
NO _x :	500 mg/m ³
TOC:	10 mg/m ³

(Möglichkeit zur Genehmigung von Ausnahmen ist vorgesehen, wenn die Emissionen nicht durch die Mitverbrennung von Abfällen entstehen. Die TOC-Emissionen sollen auch nicht durch den Einsatz von alternativen Rohmaterialien verursacht werden.)

Die Mitverbrennung von Abfällen ist in einer Verordnung aus dem Jahr 2002 (Version vom 20. August 2019) geregelt [29], in deren Anhang II für Zementwerke die Grenzwerte der IED für die Komponenten NO_x, Staub und TOC enthalten sind. Darüber hinaus ist dort ein NH₃-Grenzwert von 50 mg/m³ im Tagesmittel vorgeschrieben.

In Frankreich waren im Jahr 2017 29 Zementwerke mit Klinkerproduktion und 19 Mahlwerke in Betrieb [7].

3.3 Österreich

Das maßgebliche gesetzliche Regelwerk für Zementwerke, die Abfälle mitverbrennen, ist in Österreich die Abfallverbrennungsverordnung (AVV) [8]. Darin sind in Nr. 2 für die hier betrachteten Abgaskomponenten folgende Emissionsgrenzwerte (bezogen auf 10 % O₂) festgelegt:

Staub:	20 / 30 mg/m ³ (TMW / HMW)
NO _x :	500 mg/m ³ (zunächst nur für Neuanlagen, doch seit Oktober 2007 gilt dieser Grenzwert auch für bestehende Anlagen)
gas- und dampff. organ. Stoffe:	10 mg/m ³ (angeg. als organisch gebundener Kohlenstoff) (Ausnahmen bis maximal 120 mg/m ³ möglich, wenn die Emissionen aus dem Rohmaterial stammen.)

Wird bei einem Verfahren zur NO_x-Minderung Ammoniak als Reduktionsmittel eingesetzt, so hat die Behörde auch einen NH₃-Grenzwert festzulegen.

Bezüglich des NO_x-Grenzwertes hat auch die österreichische Zementindustrie vor ca. 10 Jahren eine freiwillige Reduktionsvereinbarung [9] unterzeichnet. Sie hat sich verpflichtet, ab dem Jahr 2010 im Branchenmittel eine Emissionskonzentration von 405 mg/m³ einzuhalten und ab dem Jahr 2012 einen Wert von 395 mg/m³. In zwei Zementwerken wurde die katalytische NO_x-Minderung erprobt und somit erwartet, dass in diesen beiden Werken ein NO_x-Grenzwert von 200 mg/m³ eingehalten werden könnte. Diese Erwartung wurde erfüllt und die Branchenvereinbarung eingehalten, d. h. sowohl die angestrebten NO_x-Emissionskonzentrationen wurden erreicht als auch die angekündigten SCR-Projekte (Semi-Dust-SCR-Verfahren Werk Mannersdorf, DeCONOX-Verfahren Werk Kirchdorf) konnten durchgeführt werden. Seit dem Frühjahr 2019 ist eine weitere DeCONOX-Anlage im Zementwerk Leube in Betrieb, so dass die NO_x-Emissionen im Branchenmittel weiter abnehmen werden.

Darüber hinaus ist für Zementwerke, die nicht der AVV unterliegen (Werke ohne Abfalleinsatz bzw. Mahlwerke), die sogenannte Zementverordnung [10] relevant, nach der u.a. folgende Emissionsgrenzwerte einzuhalten sind:

Staub:	20 / 30 mg/m ³ (TMW / HMW)
NO _x :	500 mg/m ³
TOC:	kein Grenzwert.

Für gas- und dampfförmige organische Stoffe ist in der Zementverordnung kein Emissionsgrenzwert festgelegt. Die Gesamtkohlenstoff-Emissionen wurden aber in den letzten Jahren ebenfalls nach und nach verringert durch die Installation der bereits erwähnten DeCONOX-Anlagen (plus eine weitere im Werk Wietersdorf, ausgeführt als RTO) und einer RTO (Regenerative Thermische Oxidation) im Zementwerk Wopfung.

Insgesamt sind in Österreich acht Zementwerke mit Klinkerproduktion in Betrieb an den Standorten Mannersdorf, Retznei, Kirchdorf, Gmunden, St. Leonhard, Vils, Wietersdorf und Waldegg/Wopfung [11]. Darüber hinaus wird noch Zement im Mahlwerk in Eiberg produziert.

3.4 Italien

Die europäische IED wurde im März 2014 in italienisches Recht umgesetzt [12] und dabei die europäischen Grenzwerte (siehe Anhang VI Teil 4 Nr. 2 der IED) übernommen (1:1-Umsetzung). Demnach gelten für Zementwerke, die Abfälle mitverbrennen, folgende Emissionsgrenzwerte im Tagesmittel:

Gesamtstaub:	30 mg/m ³
NO _x :	500 mg/m ³
TOC:	10 mg/m ³

Für Zementwerke, die keine Abfälle mitverbrennen, werden in der Regel Grenzwerte entsprechend den BAT-Schlussfolgerungen [20] festgelegt, in der Regel der obere Wert des BAT-AEL (best available technique – achievable emission level) für die jeweilige Komponente.

In Italien wurde das SCR-Verfahren u. a. durch die High-Dust-SCR-Anlage in Monselice [13], die im Jahr 2006 in Betrieb gegangen ist, weiterentwickelt. Im Jahr 2014 wurde im Werk Rezzato eine neue Ofenlinie mit einer SCR-Anlage gebaut und dabei weitere wertvolle Betriebserfahrungen gewonnen [14]. Auch an einer Lepolofenanlage, die heute nicht mehr in Betrieb ist, wurde zeitweise eine SCR-Anlage betrieben, und zwar zur Minderung der NH₃-Emissionen [15]. Anlass für den Bau dieser Anlagen war jedoch nicht die Einhaltung der landesweit gültigen Grenzwerte, sondern jeweils spezielle lokale Gegebenheiten (Forderungen nach Minderung von NO_x, NH₃, organischen Verbindungen/“Geruchsstoffen“).

In Italien waren im Jahr 2017 56 Werke mit Klinkerproduktion und 18 Mahlwerke in Betrieb [7].

4 Stand der Technik für die Emissionsminderung

Seit fast 20 Jahren hat auf europäischer Ebene der sogenannte BAT-Prozess eine entscheidende Bedeutung für die Einstufung und Beurteilung von Emissionsminderungsmaßnahmen in verschiedenen industriellen Bereichen. Auslöser dieser Aktivitäten war die damalige IPPC-Richtlinie (Integrated Pollution Prevention and Control) [16], die die Anwendung von sogenannten „Best Available Techniques“ (BAT; deutsch: Beste Verfügbare Techniken“) vorsah. Die Zementindustrie war eine der ersten Branchen, für die bereits im Jahr 2001 ein BAT Reference Document (BVT-Merkblatt) [17] erstellt worden war. Im Jahr 2010 wurde die IED verabschiedet, in die die Inhalte mehrerer bestehender Richtlinien (u. a. die IPPC-Richtlinie) aufgenommen wurden [3]. Die Einstufung von Emissionsminderungsverfahren als BAT kommt dem bereits seit langer Zeit verwendeten Begriff „Stand der Technik“ nahe, der nach wie vor in umweltrechtlichen Regelwerken verwendet wird. Er ist jenem in der Schweiz jedoch nicht gleichzusetzen (siehe Aspekt der „wirtschaftlichen Tragbarkeit“ weiter unten).

Die BVT-Merkblätter haben eine hohe Bedeutung für die zuständigen Behörden bei der Festlegung von Emissionsgrenzwerten und für die Anlagenbetreiber bei der Auswahl möglicher Emissionsminderungsverfahren. Dabei spielt die technische und wirtschaftliche Verhältnismäßigkeit eine wichtige Rolle, d.h. eine Investition in ein aufwändiges Emissionsminderungsverfahren sollte zum Einen auch eine relevante Verbesserung der Umweltleistung zur Folge haben, zum Anderen für einen Betreiber aber nur dann erforderlich werden, wenn eine ausreichend lange Betriebszeit der spezifisch betrachteten Anlage zu erwarten ist. In der Schweiz hingegen wird bezüglich Beurteilung der wirtschaftlichen Tragbarkeit von Emissionsbegrenzungen auf einen mittleren und wirtschaftlich gesunden Betrieb der betreffenden Branche abgestellt (Art. 4 LRV).

Im Jahr 2010 wurde ein novelliertes BAT-Referenzdokument publiziert [18], in dem auch die Weiterentwicklungen der letzten Jahre berücksichtigt waren. Kurz darauf wurde im Jahr 2013 eine weitere Fassung veröffentlicht [19], in der auch die sogenannten „BAT Conclusions“ (deutsch: „BVT-Schlussfolgerungen“) [20] enthalten sind.

In Deutschland wurde in den letzten Jahren die VDI-Richtlinie 2094 (Emissionsminderung Zementwerke) überarbeitet und im Juli 2019 ein Entwurf publiziert [21]. Darin ist ebenfalls eine aktuelle Beschreibung der Emissionsminderungsverfahren für die wichtigsten Abgaskomponenten des Klinkerbrennprozesses enthalten, darunter auch der hier zu betrachtenden Komponenten Staub, NO_x und Gesamtkohlenstoff. Die VDI-Richtlinie 2094 berücksichtigt die in Deutschland erfolgten technischen Entwicklungen in der Abgasreinigung bis Ende 2018.

In den folgenden Unterkapiteln werden die wichtigsten Informationen zu den verfügbaren Minderungsmaßnahmen bzw. -verfahren zusammengefasst und ihr jeweiliger Entwicklungsstand bewertet.

4.1 Stickstoffoxide und Ammoniak

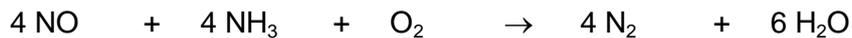
Nach der aktuellen Fassung des BAT-Referenzdokuments (Zement-BREF) gelten folgende NO_x-Minderungsmaßnahmen als BAT in der Zementindustrie:

- Flammenkühlung
- Low NO_x-Brenner
- Mittenfeuerung
- Zugabe von Mineralisatoren

- Prozessoptimierung
- gestufte Verbrennung im Calcinator
- SNCR-Verfahren
- SCR-Verfahren (unter der Voraussetzung einer Weiterentwicklung der Katalysatoren und des Verfahrens)

Die Anwendung sogenannter Primärmaßnahmen (siehe oben: Flammenkühlung bis gestufte Verbrennung) weist in der Regel nur ein vergleichsweise geringes Minderungspotenzial auf. Erst mit Sekundärmaßnahmen wie dem SNCR- oder dem SCR-Verfahren lassen sich hohe bis sehr hohe NO_x-Minderungsraten erreichen. In der aktuellen Fassung des Zement-BREFs wurde für die Komponente NO_x ein erreichbares Emissionsniveau (BAT-AEL; BAT achievable emission level) von < 200 bis 450 mg/m³ (Ofenanlagen mit Zyklonvorwärmer) festgelegt. Das untere Ende dieses Emissionsbereiches ist in der Regel nur durch die Anwendung der genannten Sekundärmaßnahmen (SNCR- und SCR-Verfahren) erreichbar. Ein Vorteil des SCR-Verfahrens besteht darin, dass ein sehr niedriges NO_x-Niveau auch bei gleichzeitig sehr niedrigen NH₃-Emissionen erreicht werden kann.

Das SNCR-Verfahren (selektive nicht-katalytische Reduktion) wird seit Ende der 1980er Jahre an Zementofenanlagen angewendet und wurde seitdem durch zahlreiche systematische Untersuchungen immer weiter optimiert. Die Eindüsung des Reduktionsmittels, meistens Ammoniak-Lösung, erfolgt dabei in einem Temperaturfenster zwischen 850 und 1.050 °C. Dabei findet folgende Minderungsreaktion statt:



Es handelt sich um eine equimolare Reaktion, bei der im Idealfall ein NH₃/NO-Molverhältnis von 1 einzustellen ist.

Bei Anwendung des SNCR-Verfahrens besteht die Gefahr, dass zum Erreichen eines NO_x-Emissionsniveaus um 200 mg/m³ in vielen Fällen eine deutlich überstöchiometrische Eindüsung des Reduktionsmittels erforderlich ist und dabei der NH₃-Schlupf ansteigt. Dieses Problem konnte auch durch die Anwendung des he-SNCR-Verfahrens (High-Efficiency-SNCR) nicht endgültig gelöst werden, d. h. die sichere Einhaltung eines NH₃-Grenzwertes von 30 mg/m³ war damit nicht möglich. Darüber hinaus trägt NH₃, das nach der Aufgabe des Ofenmehls im Vorwärmer aus den im Rohmaterial enthaltenen Ammoniumverbindungen freigesetzt wird, zu den gesamten NH₃-Emissionen bei. Das BAT-Referenzdokument sieht bei Anwendung des SNCR-Verfahrens für die Komponente NH₃ ein erreichbares Emissionsniveau von 30 – 50 mg/m³ vor, das aber je nach NO_x-Ausgangsniveau (d. h. NO_x-Niveau vor Anwendung der Minderungsmaßnahme) und erforderlicher Reduktionsrate auch höher liegen kann. Für die Komponente Ammoniak sind in der Zementindustrie bisher keine speziellen Minderungsverfahren im Einsatz.

Bei dem SCR-Verfahren (selektive katalytische Reduktion) erfolgt die gleiche Abbaureaktion zwischen NO und NH₃ an einem Katalysator, und zwar in einem niedrigeren Temperaturbereich von ca. 250 – 400 °C. Man unterscheidet dabei zwischen dem sogenannten High-Dust-Verfahren (HD-SCR), bei dem der Katalysator im staubbeladenen Rohgas nach dem Wärmetauscharturm installiert ist, und dem „Tail-End-“ oder „Low-Dust-Verfahren“ (LD-SCR), das im entstaubten Reingas am Ende der Prozesskette installiert wird. Im letzteren Fall muss das Abgas z.B. durch eine Wärmeverschiebung wieder aufgeheizt werden, um das Temperaturfenster für das SCR-Verfahren zu erreichen. Die dabei zu erreichende Mindesttemperatur im

Katalysator hängt u. a. stark von der SO_2 -Konzentration im Abgas ab. Bei zu niedrigerer Temperatur besteht die Gefahr der Bildung und Ablagerung von Ammoniumsulfatverbindungen, die eine rasche Deaktivierung des Katalysators bewirken.

In diesem Zusammenhang muss aber auch erwähnt werden, dass in jüngster Zeit bei der Durchführung einzelner SCR-Projekte in der deutschen Zementindustrie betriebliche Probleme aufgetreten sind (Abreinigungsprobleme, Katalysatordeaktivierung bis hin zur Zerstörung der Katalysatormodule), deren Ursachen noch nicht vollständig aufgeklärt werden konnten. Dabei handelt es sich nicht um grundlegende Probleme, die mit der Anwendung dieses Minderungsverfahrens verbunden sind, sondern um spezifische Gegebenheiten an der jeweiligen Ofenanlage. Daher ist auch heute noch von jedem Zementwerk, in dem eine SCR-Anlage installiert werden soll, eine ausreichende Zeit für die Optimierung der jeweiligen Anlage vorzusehen. Unter bestimmten Umständen ist auch ein vorheriger Pilotversuch zu empfehlen, um die richtige Katalysatorauslegung bzw. -auswahl zu ermitteln.

Das SCR-Verfahren kann auch als Minderungsmaßnahme für NH_3 gesehen werden, zumindest solange, wie ein ausreichend hohes NO_x -Niveau vorliegt. Ist dies nicht der Fall (z. B. bei sehr hohen rohstoffbedingten NH_3 -Emissionen und geringem NO_x -Niveau), können auch nach einer SCR-Anlage höhere NH_3 -Emissionskonzentrationen auftreten.

Neuere Verfahren, die erst in den letzten Jahren entwickelt wurden wie das DeCONOX-Verfahren (Multikomponenten-Minderungsverfahren für NO_x , CO und Gesamt-C) sind im BAT-Referenzdokument noch nicht aufgeführt, werden aber in der novellierten VDI-Richtlinie 2094 als „Emerging Technique“ beschrieben [21].

4.2 Staub

Im BAT-Referenzdokument sind verschiedene Entstaubungsverfahren für Ofenabgase als BAT eingestuft, nämlich der Einsatz von:

- Elektrofiltern
- Gewebefiltern
- Hybridfiltern.

Das bei Anwendung dieser Filtereinrichtungen erreichbare Emissionsniveau (BAT-AEL) liegt bei $< 10 - 20 \text{ mg/m}^3$. Die genannten Verfahren gelten auch als Stand der Technik in der Zementindustrie, da Betriebserfahrungen von unzähligen Anlagen in der Zementindustrie vorliegen.

4.3 Gesamtkohlenstoff

Im Zement-BREF ist bisher keine Sekundärmaßnahme zur Begrenzung der Gesamt-C- bzw. TOC-Emissionen als BAT eingestuft. Lediglich für den Fall, dass Rohmaterialien mit erhöhten VOC-Gehalten eingesetzt werden, wird gefordert, dass dies nicht über den Rohmühlenpfad erfolgen soll, da ein Abbau der organischen Verbindungen dann nicht möglich ist (d. h. solche Stoffe sollten im „Heißbereich“ der Ofenanlage aufgegeben werden, um einen Abbau von TOC zu ermöglichen). Ein erreichbares Emissionsniveau (BAT-AEL) wird für diese Komponente nicht angegeben.

Im Entwurf der neuen VDI-Richtlinie 2094 [21] wird ebenfalls auf diese Inputbegrenzung über den Rohmühlenpfad hingewiesen, insbesondere bei Einsatz bestimmter alternativer Rohmaterialien. Darüber hinaus werden Erfahrungen aus den bisher durchgeführten SCR-Projekten berichtet, nach denen Gesamt-C-Minderungsraten von 40 – 70 % erreicht wurden. Dies trifft allerdings nicht auf Methan und C₁/C₂-Kohlenwasserstoffe zu, die an SCR-Katalysatoren praktisch nicht gemindert werden. In einem späteren Kapitel dieser VDI-Richtlinie werden auch in Entwicklung befindliche Verfahren vorgestellt, darunter die Regenerative Thermische Nachverbrennung (RTO) und das DeCONOX-Verfahren.

Während es über die RTO erste Betriebserfahrungen aus einem Zementwerk in Österreich gibt, liegen über die Anwendung des DeCONOX-Verfahrens Ergebnisse von zwei Anlagen in Österreich und zwei in Deutschland vor. In allen Fällen wird berichtet, dass durch die Anwendung dieser Verfahren ein sehr niedriges Emissionsniveau erreichbar ist, so dass z. B. der Grenzwert der IED eingehalten werden könnte (in Deutschland haben fast alle Werke eine Ausnahme für den Gesamt-C-Grenzwert). Längerfristige Betriebserfahrungen gibt es bisher nur aus dem österreichischen Werk Kirchdorf. Daher sind diese Verfahren noch weit davon entfernt, als Stand der Technik oder als BAT in der Zementindustrie zu gelten.

Das Polvitec-Verfahren der Fa. Polysius (heute: thyssenKrupp Industrial Solutions), bei dem verschiedene Abgaskomponenten an einem Aktivkohle-Adsorber gebunden bzw. umgesetzt werden, führt auch zu einer merklichen Minderung der Gesamt-C-Emissionen, doch wurde es in nur einem einzigen Zementwerk installiert (und wird heute von diesem Anlagenbauer auch nicht mehr angeboten). Daher ist eine fundierte Bewertung dieses Multikomponenten-Minderungsverfahrens (SO₂, Hg, TOC) kaum möglich.

5 Bewertung der in den Schweizer Zementwerken eingebauten Minderungs-technologien

In der Schweiz sind sechs Zementwerke mit Klinkerproduktion in Betrieb. Davon gehören drei Werke zum LafargeHolcim-Konzern (Eclépens, Siggenthal, Untervaz), zwei Werke zu Juracement (Wildeg, Cornaux) und damit zur irischen CRH-Gruppe und das Werk Reuchenette zu Ciments Vigier (und damit zur französischen Vicat-Gruppe).

In allen genannten Werken werden Primärmaßnahmen zur NO_x-Minderung angewendet. Zur Begrenzung der Gesamt-C-Emissionen Input-Kontrollen durchgeführt und Maßnahmen zur Prozessoptimierung angewendet. Darüber hinaus werden die folgenden Sekundärmaßnahmen angewendet:

Eclépens:

NO_x-Minderung: - gestufte Verbrennung im Calcinator
- SNCR-Verfahren
Entstaubung: - Gewebefilter

Siggenthal:

NO_x-Minderung: - SNCR-Verfahren
Entstaubung: - Gewebefilter
Gesamt-C-Minderung: - Aktivkohlefilter

Untervaz:

NO_x-Minderung: - SNCR-Verfahren
Entstaubung: - Gewebefilter

Wildeg:

NO_x-Minderung: - gestufte Verbrennung im Calcinator
- SNCR-Verfahren
Entstaubung: - Gewebefilter

Cornaux:

Entstaubung: - Gewebefilter

Reuchenette:

NO_x-Minderung: - SNCR-Verfahren
- Calcinator mit separater Brennkammer
Entstaubung: - Gewebefilter

In fast allen Werken wird das SNCR-Verfahren als leistungsfähige Sekundärmaßnahme zur NO_x-Minderung angewendet, allerdings nicht im Werk Cornaux. In diesem Werk ist ein Le-polofen in Betrieb, an dem das SNCR-Verfahren in der Regel ein geringeres Minderungspotenzial hat als an einer Ofenanlage mit Zyklonvorwärmer. Dies wird auch im BAT-Referenzdokument berücksichtigt und dem SNCR-Verfahren ein höheres erreichbares Emissionsniveau (BAT-AEL) und ein höherer NH₃-Schlupf zugeordnet.

Möglicherweise ist in den Werken mit SNCR-Anlage das Minderungspotenzial des SNCR-Verfahrens noch nicht ausgeschöpft, doch dabei ist stets zu beachten, dass der NH_3 -Grenzwert durch einen ansteigenden Schlupf nicht überschritten wird. Katalytische NO_x -Minderungsverfahren werden in den schweizerischen Zementwerken bisher nicht angewendet.

Zur Entstaubung der Ofenabgase werden in allen Werken Gewebefilter eingesetzt. Dies entspricht dem Stand der Technik in der Zementindustrie und gilt auch als BAT. Damit lassen sich die europäischen und nationalen Emissionsgrenzwerte sicher einhalten.

Zur Minderung der Gesamtkohlenstoffemissionen werden in den Schweizerischen Werken in der Regel Primärmaßnahmen wie Prozessoptimierungen und Input-Kontrollen angewendet. Die Anwendung von Primärmaßnahmen entspricht dem Stand des Zement-BREFs, da vor einigen Jahren Sekundärmaßnahmen wie eine RTO oder das DeCONOX-Verfahren noch nicht in der Zementindustrie erprobt bzw. verfügbar waren. Auch heute sind beide Verfahren noch nicht als Stand der Technik zu sehen (allenfalls als „Emerging Techniques“), da bisher nur sehr wenige Betriebserfahrungen vorliegen. Auch die Gesamt-C-Minderung mit einem Aktivkoks-Adsorber (Polvitec-Verfahren) in dem Werk Siggenthal kann nach wie vor nicht als Stand der Technik gesehen werden, da dieses Verfahren weltweit nur in einem einzigen Zementwerk erprobt wurde.

6 Ökonomische und gesamtökologische Aspekte sowie wirtschaftliche Tragbarkeit

Im BAT-Referenzdokument sind das SNCR-Verfahren ohne Einschränkungen und auch das SCR-Verfahren mit den zum Zeitpunkt der Erstellung des Dokuments noch vorhandenen Einschränkungen als BAT zur NO_x-Minderung eingestuft. Im europäischen BAT-Konzept spielen auch die wirtschaftlichen Aspekte bei der Anwendung von Emissionsminderungsmaßnahmen eine wesentliche Rolle, d. h. das Kosten/Nutzen-Verhältnis ist dabei zu beachten. Im Unterschied zum BAT-Konzept wird in der LRV die wirtschaftliche Tragbarkeit aber nicht auf einen einzelnen Betrieb bezogen, sondern auf einen „mittleren und wirtschaftlichen Betrieb“ der Branche (siehe Art. 4 der LRV).

Die für beide Sekundärmaßnahmen erforderlichen Investitionskosten sind sehr unterschiedlich; für das SNCR-Verfahren in der Regel ein Betrag von bis zu 1 Mio. €, während für das SCR-Verfahren ca. 10 Mio. € aufzuwenden sind (\pm 3 Mio. € für größere Anlagen mit einer Klinkerkapazität über 3.000 t/d bzw. der niedrigere Bereich kleinere Anlagen mit einer Klinkerkapazität unter 1.500 t/d).

Bei Anwendung des SNCR-Verfahrens werden die Betriebskosten in erster Linie durch den Verbrauch an Reduktionsmittel bestimmt. Der Betrieb einer SCR-Anlage verursacht nicht unbeträchtliche laufende Kosten, nämlich für

- den zusätzlichen Stromverbrauch (Abreinigung, Druckverlust)
- den Verbrauch an Reduktionsmittel (z.B. NH₃-Lösung)
- Katalysatorkosten.

Bei den SCR-Demonstrationsprojekten der deutschen Zementindustrie in den Werken Mergelstetten [22] und Rohrdorf [23] wurden spezifische Betriebskosten der SCR-Anlage von 1,12 €/t Klinker (Mergelstetten) bzw. 0,50 €/t Klinker (Rohrdorf) ermittelt. Als spezifische Gesamtkosten resultierten in beiden Fällen über 2 €/t Klinker (bei einer Abschreibungszeit von 10 bzw. 15 Jahren). Entsprechend sind nicht nur die Betriebskosten, sondern auch die mögliche Amortisationsdauer von Relevanz für die wirtschaftliche Tragbarkeit.

Im Zement-BREF für die Zementindustrie werden ebenfalls Angaben zu den Kosten des SNCR-Verfahrens gemacht. Die Angaben beziehen sich auf eine Ofenanlage mit einer Klinkerkapazität von 3.000 t/d und eine NO_x-Minderungsrate von 85 %. Demnach liegen die Investitionskosten zwischen 0,5 und 1,5 Mio. € und die Betriebskosten bei 0,3 bis 0,5 €/t Klinker.

Aktuelle Kosten für das SNCR- und das SCR-Verfahren (sowohl High-Dust- als auch Low-Dust-SCR) wurden im vergangenen Jahr bei einem VDZ-Kongress präsentiert [24]. Die folgende Tabelle 6.1 zeigt sowohl die Investitions- als auch die Betriebskosten. Die Betriebskosten des LD-SCR-Verfahrens sind wegen der längeren Standzeit des Katalysatormaterials (ca. 10 Jahre) deutlich günstiger als beim HD-SCR-Verfahren (ca. 2-4 Jahre). Dagegen sind die Investitionskosten des LD-SCR-Verfahrens wegen des erforderlichen Wärmeverschiebesystems höher als beim High-Dust-Verfahren.

Tab. 6.1: Kosten von Sekundärmaßnahmen zur NO_x-Minderung (Basis: 3.000 t/d-Anlage)

Kosten	NO _x -Minderungsverfahren		
	SNCR	HD-SCR	LD-SCR
Investitionskosten (in Mio. €)	1	10	15
Betriebskosten (in €/t Klinker)	0,7	0,8 – 1,5	0,5
Gesamtkosten (in €/t Klinker)	0,8	2 - 3	2,5 - 3

Aktuell werden die spezifischen Gesamtkosten für das SNCR-Verfahren bei bis zu 1 €/t Klinker liegen, die für das SCR-Verfahren bei über 2 €/t Klinker. Dies bedeutet, dass bei der Notwendigkeit zur Installation einer SCR-Anlage bei einer angenommenen Klinkerproduktion von 1 Mio. t/a Mehrkosten von 1 Mio. pro Jahr resultieren – und das über die gesamte Abschreibungsdauer der Anlage (z. B. 15 Jahre). Die verbesserte Umwelleistung der SCR-Anlage würde im Wesentlichen darin bestehen, sicher einen NO_x-Grenzwert von 200 mg/m³ einhalten zu können und gleichzeitig die Einhaltung eines NH₃-Emissionsniveaus unter 30 mg/m³ zu ermöglichen. Der Betrieb einer SCR-Anlage führt gleichzeitig zu einem höheren elektrischen Energiebedarf (5 – 6 kWh/t Klinker), während im Vergleich zu einem SNCR-System geringere Mengen an Ammoniak- oder Harnstoff-Lösung eingesetzt werden müssen. Solche Überlegungen sind – wie auch jene zur Verhältnismäßigkeit hinsichtlich Kosten, Amortisationsdauer und Gesamtfrachtanteil – bei einer Betrachtung der Kosten in Bezug auf den erreichten Umweltnutzen mit einzubeziehen.

Über die Anwendung von Maßnahmen zur Minderung der Gesamt-C-Emissionen liegen erst wenige Betriebserfahrungen vor. Bei einer RTO oder bei dem DeCONOX-Verfahren ist mit ähnlichen Investitionskosten wie bei einer SCR-Anlage zu rechnen. Bei Betrieb einer DeCONOX ist eine entscheidende Frage, ob ein autothermer Betrieb möglich ist. Dies würde bedeuten, dass durch die Aufgabe bestimmter alternativer Roh- oder Brennstoffe die Konzentration von organischen Verbindungen und von CO so hoch ist, dass durch deren Verbrennung in der Brennkammer der DeCONOX-Anlage eine Temperatur über 850 °C erreicht werden kann (d.h. dies erfordert ein anderes Brenn- und Rohstoffkonzept als bei einem herkömmlichen Ofenbetrieb). Falls dies nicht der Fall ist und die Brennkammer mit Erdgas betrieben werden muss, ist ein deutlicher Anstieg der Betriebskosten und der CO₂-Emissionen unausweichlich. Auch bei Betrieb einer RTO ist ein Erdgasverbrauch für eine Stützflamme vorzusehen. Der Betrieb einer DeCONOX-Anlage führt auch zu einer erheblichen Erhöhung des elektrischen Energiebedarfs, der nach Inbetriebnahme in der Größenordnung von 11 bis 16 kWh/t Klinker (excl. und incl. Bypass-Gas) [26] lag und nach Optimierung auf unter 10 kWh/t Klinker [21] verringert werden konnte (entsprechend bis zu 20 % des Strombedarfs für die Klinkerherstellung bzw. etwa 10 % des gesamten Strombedarfs zur Zementherstellung). Auch die um ca. 30 °C höhere Reingastemperatur und die damit verbundenen Abgasverluste müssen in die Bewertung des DeCONOX-Verfahrens einbezogen werden. Es ist im Einzelfall zu prüfen, ob die aufzuwendenden Kosten für die Anwendung von Multikomponentenverfahren (z. B. DeCONOX oder RTO + SNCR) zu rechtfertigen sind, wenn mit diesen Verfahren eine umweltverträgliche Verwertung (ohne Belastung von anderen Umweltbereichen) von alternativen Roh- und Brennstoffen ermöglicht wird.

Bei der Entstaubung des Ofenabgases werden in den Schweizerischen Zementwerken bereits Gewebefilter eingesetzt, die dem Stand der Technik entsprechen und mit denen sich ein sehr niedriges Emissionsniveau erreichen lässt.

7 Fazit

Die European Cement Research Academy wurde von cemsuisse und dem BAFU beauftragt, eine Bewertung des Stands der Emissionsminderung für die Abgaskomponenten Gesamtstaub, NO_x und Gesamtkohlenstoff in der Schweizerischen Zementindustrie und in europäischen Nachbarländern vorzunehmen.

Dazu wurden zunächst die für die Luftreinhaltung maßgeblichen gesetzlichen Regelwerke dieser Länder genannt und die Grenzwerte der zu betrachtenden Komponenten aufgeführt. Auf europäischer Ebene hat die Industrial Emissions Directive (IED) dabei eine entscheidende Bedeutung. Während in vielen Mitgliedsstaaten die Anforderungen der IED 1:1 umgesetzt wurden, wurden bei der nationalen Umsetzung in Deutschland und in Österreich einzelne Grenzwerte verschärft. In der Schweiz bestehen für die Komponenten NO_x und Gesamtstaub bereits höhere Anforderungen als in der IED, während für Gesamt-C ein höherer Grenzwert gilt.

Das wichtigste Dokument, das auf europäischer Ebene den Stand der Emissionsminderung der Zementindustrie beschreibt, ist das BAT-Referenzdokument (BVT-Merkblatt) für die Zementindustrie, das allerdings den Stand aus dem Jahr 2010 widerspiegelt. Für die Komponente Staub lässt sich feststellen, dass in den Schweizerischen Zementwerken Gewebefilter zur Entstaubung des Ofenabgases eingesetzt werden, was dem aktuellen Stand der Technik entspricht und als BVT gilt. Zur Minderung der NO_x-Emissionen wird in fünf von sechs Werken das SNCR-Verfahren angewendet, das bereits zu Beginn des BAT-Prozesses und auch im ersten BAT-Referenzdokument als BAT galt. Lediglich in einem Werk mit einer Lepolofenanlage wird dieses leistungsfähige Verfahren nicht angewendet. Darüber hinaus werden verschiedene Primärmaßnahmen angewendet, mit denen sich das NO_x-Ausgangsniveau vor Anwendung des SNCR-Verfahrens vermindern lässt. Das SCR-Verfahren galt zum Zeitpunkt der Veröffentlichung des aktuellen BAT-Referenzdokuments nur mit Einschränkungen als BAT. Einige Aktivitäten zur Weiterentwicklung dieses Verfahrens wurden in den letzten Jahren durchgeführt und dabei Betriebserfahrungen von verschiedenen Zementwerken gesammelt. Diese neuen Erkenntnisse wurden bereits in dem Entwurf der novellierten VDI-Richtlinie 2094 zusammengefasst. In Deutschland wird das SCR-Verfahren von Behördenseite mittlerweile als Stand der Technik angesehen (vgl. Kap. 3.1). Allerdings wird dieser Begriff nicht gleich definiert wie in der Schweiz. In Deutschland wird die wirtschaftliche Verhältnismäßigkeit auf eine ausreichend lange Betriebszeit der spezifisch betrachteten Anlage bezogen. In der Schweiz hingegen wird bezüglich Beurteilung der wirtschaftlichen Tragbarkeit von Emissionsbegrenzungen auf einen mittleren und wirtschaftlich gesunden Betrieb der betreffenden Branche abgestellt. Auch ist festzuhalten, dass in jüngster Zeit bei der Durchführung einzelner SCR-Projekte in der deutschen Zementindustrie betriebliche Probleme aufgetreten sind (Abreinigungsprobleme, Katalysatordeaktivierung), deren Ursachen noch nicht vollständig aufgeklärt werden konnten. Daher ist auch heute noch von jedem Zementwerk, in dem eine SCR-Anlage installiert werden soll, eine ausreichende Zeit für die Optimierung der jeweiligen Anlage vorzusehen.

Für die Komponente Gesamt-C stellt sich die Situation so dar, dass im BAT-Referenzdokument für die Zementindustrie nur Primärmaßnahmen zur Emissionsminderung beschrieben sind. Nachgeschaltete Emissionsminderungsverfahren (Sekundärmaßnahmen) waren zum damaligen Zeitpunkt noch nicht verfügbar bzw. es gab noch keine Betriebserfahrungen mit der Anwendung potenziell geeigneter Verfahren an Zementofenanlagen. Da die Höhe der

Gesamt-C-Emissionen in sehr vielen Zementwerken überwiegend rohstoffbedingt ist, werden nach wie vor sehr viele Ausnahmen für die Grenzwerte dieser Abgaskomponente erteilt. Die in den letzten Jahren erfolgte technische Entwicklung von geeigneten Verfahren ist auch für die NO_x-Minderung im Entwurf der novellierten VDI-Richtlinie 2094 zusammengefasst. Darin werden z. B. das DeCONOX-Verfahren und die RTO zur Minderung der Gesamt-C-Emissionen als „Emerging Techniques“ beschrieben.

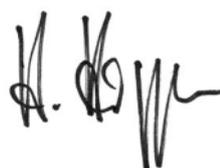
Eine wirtschaftliche und ökologische Bewertung der Anwendung verschiedener Emissionsminderungsverfahren wird je nach betrachteter Abgaskomponente unterschiedlich ausfallen. Für die Entstaubung der Ofenabgase werden bereits heute filternde Abscheider (Gewebefilter) eingesetzt, mit denen ein niedriges Emissionsniveau erreicht werden kann. Daher besteht offensichtlich kein Handlungsbedarf, in leistungsfähigere Minderungsverfahren zu investieren und eventuell auch erhöhte Betriebskosten zu tragen. Für die Komponente NO_x ist die Situation differenzierter zu sehen. Mit dem bereits in fünf Werken installierten SNCR-Verfahren lässt sich bereits ein niedriges NO_x-Niveau erreichen. Würde die Notwendigkeit zur Installation einer SCR-Anlage bestehen, so wäre eine weitere moderate Verbesserung der Umweltsituation erreichbar, nämlich für die Komponenten NO_x und NH₃ und in gewissem Maße auch für die Komponente Gesamt-C. Im Gegenzug erfordert aber die Installation des SCR-Verfahrens eine deutlich höhere Investition (ca. 10 Mio. € für eine mittelgroße Ofenanlage). Bei den Betriebskosten ist vor allem der erhöhte Stromverbrauch relevant (~ 5 kWh/t Klinker), der auch erhöhte CO₂-Emissionen zur Folge hat. Für die Minderung von Gesamt-C könnten auch Sekundärmaßnahmen wie das DeCONOX-Verfahren angewendet werden, doch wäre dafür eine erheblich größere Investition zu tätigen. Darüber hinaus wäre zu prüfen, ob mit dem geplanten Brennstoffkonzept eine autotherme Fahrweise der DeCONOX-Anlage möglich ist. Müsste die Brennkammer stattdessen mit Erdgas befeuert werden, so hätte dies erheblichen Einfluss auf die Betriebskosten der Anlage.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass in den Schweizerischen Zementwerken bereits heute Emissionsminderungsmaßnahmen für Staub, NO_x und Gesamt-C angewendet werden, die in Europa als BAT gelten. Im Bereich der NO_x-Minderung konnte das SCR-Verfahren in den letzten Jahren durch die Projekte in Deutschland, Österreich und Italien zwar weiterentwickelt werden, doch nach wie vor können betriebliche Probleme beim Betrieb einer SCR-Anlage auftreten, deren Ursachen noch aufgeklärt werden müssen. Zur Minderung der Gesamt-C-Emissionen werden in allen Schweizerischen Zementwerken Primärmaßnahmen angewendet. Von den potenziell geeigneten Verfahren für weitere Emissionsminderungen liegen bisher nur wenige Betriebserfahrungen vor, d. h. diese Verfahren entsprechen noch nicht dem Stand der Technik.

European Cement Research Academy GmbH



Dr.-Ing. Volker Hoenig



i.A. Dr. Helmut Hoppe

8 Literatur

- [1] Luftreinhalte-Verordnung (LRV) vom 16. Dezember 1985 (Stand am 16. April 2019)
- [2] NO_x-Branchenvereinbarung mit der Zementindustrie für die Periode vom 1. Januar 2017 bis zum 31. Dezember 2021
- [3] Richtlinie 2010/75/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 24. November 2010 über Industrieemissionen (integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung). Amtsblatt der Europäischen Union L334/17, 17.12.2010
- [4] 17. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über die Verbrennung und die Mitverbrennung von Abfällen – 17. BImSchV) vom 02. Mai 2013
- [5] Eckpunkte zur Umsetzung der novellierten 17. BImSchV in der Zementindustrie. Bund/Länder-Ausschuss für Immissionsschutz (LAI), Stand: 22.09.2015
- [6] VDZ-Website, Verein Deutscher Zementwerke e.V., Düsseldorf (siehe: <http://www.vdz-online.de>)
- [7] Global Cement Directory 2017
- [8] Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft und des Bundesministers für Wirtschaft, Familie und Jugend über die Verbrennung von Abfällen (Abfallverbrennungsverordnung – AVV); BGBl. II Nr. 389/2002 – Artikel 1, geändert durch BGBl. II Nr. 296/2007 und BGBl. II Nr. 476/2010
- [9] Freiwillige Vereinbarung betreffend NO_x-Emissionen der Zementindustrie ab dem Jahr 2010 zwischen der Österreichischen Zementindustrie und dem Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft und dem Bundesministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend
- [10] Gesamte Rechtsvorschrift für Begrenzung der Emission von luftverunreinigenden Stoffen (Zementverordnung 2007), Fassung vom 07.08.2019
- [11] VÖZ-Website, Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie, Wien (siehe: <https://www.zement.at>)
- [12] Decreto Legislativo 4 marzo 2014, n. 46: Attuazione della direttiva 2010/75/UE relativa alle emissioni industriali (prevenzione e riduzione integrate dell'inquinamento). Supplemento ordinario alla (Gazzetta Ufficiale, n. 72 del 27 marzo 2014 – Serie generale)
- [13] U. Leibacher, C. Bellin, A. Linero: High dust SCR solutions. International Cement Review, December 2006
- [14] G. Cinti, J. Riva: New 3000 t/d line in Rezzato, Italy. Cement International, Vol. 12(5), S. 44-49 (2014)
- [15] G. Cinti, E.-D. Cristea, F. Ferrari, C. Ferrario: Reverse SCR System for NH₃ Removal on Semidry Kiln. VDZ Congress 2009 – Process Technology of Cement Manufacturing. Verlag Bau + Technik GmbH, Düsseldorf, 2009

- [16] Council Directive 96/91/EC of 24 September 1996 concerning integrated pollution prevention and control. Official Journal L 257, 10.10.1996, S. 26-40
- [17] Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC) - Reference Document on Best Available Techniques in the Cement and Lime Manufacturing Industries. March 2000, European Commission
- [18] Reference Document on Best Available Techniques in the Cement, Lime and Magnesium Oxide Manufacturing Industries. March 2010, European Commission
- [19] Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Cement, Lime and Magnesium Oxide. European Commission, Joint Research Centre, 2013
- [20] Commission Implementing Decision of 26 March 2013 establishing the best available techniques (BAT) conclusions under Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council on industrial emissions for the production of cement, lime and magnesium oxide
- [21] VDI-Richtlinie 2094 (Entwurf, Juli 2019): Emissionsminderung Zementwerke. VDI/DIN-Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL) - Normenausschuss
- [22] BMU-Umweltinnovationsprogramm: Abschlussbericht zum Vorhaben *Minderung von NO_x-Emissionen in einer Drehofenanlage der Zementindustrie mittels SCR-Technologie*. KfW-Aktenzeichen MB e1 – 001599; 2014 (siehe: https://www.umweltinnovationsprogramm.de/sites/default/files/benutzer/36/dokumente/zement_schwenk_ab_scr_high_dust_2014.pdf)
- [23] BMU-Umweltinnovationsprogramm: Abschlussbericht zum Vorhaben *Katalytische Low-Dust-Entstickung des Abgases an einer Drehofenanlage der Zementindustrie (Reingas-SCR)*. KfW-Aktenzeichen NKa3 – 001706, 2015 (siehe: https://www.umweltinnovationsprogramm.de/sites/default/files/benutzer/36/dokumente/abschlussbericht_rohrdorf_final.pdf)
- [24] B. Haegermann: NO_x Abatement in the German Cement Industry. International VDZ Congress 2018, Düsseldorf, 26.-28.09.2018
- [25] 1. Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz – BImSchG) in der Fassung vom 17. Mai 2013
- [26] J. Thormann, R. Morris: Emissions Reduction by means of efficient combination of DeCONOx, XMercury and sludge drying systems. International VDZ Congress 2018, Düsseldorf, 26.-28.09.2018
- [27] Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft) vom 24. Juli 2002
- [28] Ordonnance n° 2012-7 du 5 janvier 2012 portant transposition du chapitre II de la directive 2010/75/UE du Parlement européen et du Conseil du 24 novembre 2010 relative aux émissions industrielles (prévention et réduction intégrées de la pollution). NOR: DEVP1126317R

- [29] Arrêté du 20 septembre 2002 relatif aux installations d'incinération et de co-incinération de déchets non dangereux et aux installations incinérant des déchets d'activités de soins à risques infectieux. NOR: DEVP0210351A; Version consolidée au 09 septembre 2019