

**BMUKN-UMWELTINNOVATIONSPROGRAMM**

**Abschlussbericht**

**zum Vorhaben**

**Verfahrens- und anlagentechnische Demonstration eines neuartig integrierten Heißgasfilter-Katalysator Systems (HGF-SCR) zur ressourcenschonenden und hochverfügbaren Reduktion der NO<sub>x</sub>- und NH<sub>3</sub>-Emissionen in Zementdrehofenabgasen**

KfW-Aktenzeichen: NKa3-003606

**Zuwendungsempfängerin**

Zement- und Kalkwerke OTTERBEIN GmbH & Co. KG

**Umweltbereich**

Luft

**Laufzeit des Vorhabens**

01.04.2022 - 30.03.2025

**Autoren**

Klaus Bauer (BarConsult)

Robin Harraß (VDZ Service GmbH)

Christian Müller (Zement- und Kalkwerke OTTERBEIN GmbH & Co. KG)

Stefan Schäfer (VDZ Technology gGmbH)

Tilman Scholten (Zement- und Kalkwerke OTTERBEIN GmbH & Co. KG)

Marc Sesselmann (Zement- und Kalkwerke OTTERBEIN GmbH & Co. KG)

Ute Zunzer (VDZ Technology gGmbH)

**Gefördert mit Mitteln des Bundesministeriums für  
Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit**

**Datum der Erstellung**

21.11.2025

## Berichts-Kennblatt

	KfW-Aktenzeichen: NKa3-003606
<b>Titel des Vorhabens:</b> Verfahrens- und anlagentechnische Demonstration eines neuartig integrierten Heißgasfilter-Katalysator Systems (HGF-SCR) zur ressourcenschonenden und hochverfügbaren Reduktion der NO <sub>x</sub> - und NH <sub>3</sub> -Emissionen in Zementdrehofenabgasen	
<b>Autoren:</b> Bauer, Klaus (BarConsult) Harraß, Robin (VDZ Service GmbH) Müller, Christian (Zement- und Kalkwerke OTTERBEIN GmbH & Co. KG) Schäfer, Stefan (VDZ Technology gGmbH) Scholten, Tilman (Zement- und Kalkwerke OTTERBEIN GmbH & Co. KG) Sesselmann, Marc (Zement- und Kalkwerke OTTERBEIN GmbH & Co. KG) Zunzer, Ute (VDZ Technology gGmbH)	<b>Vorhabenbeginn:</b> 01.04.2022  <b>Vorhabenende:</b> 30.03.2025
<b>Zuwendungsempfängerin:</b> Zement- und Kalkwerke OTTERBEIN GmbH & Co. KG Hauptstraße 50 36137 Großenlüder-Müs	<b>Veröffentlichungsdatum:</b>  <b>Seitenzahl:</b> 61
Gefördert im BMUKN-Umweltinnovationsprogramm des Bundesministeriums für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit	
<b>Kurzfassung:</b> Im Zementwerk der Zement- und Kalkwerke (ZKW) OTTERBEIN wurde weltweit erstmals eine Heißgasfilter-SCR-Anlage (HGF-SCR) an einer Zementdrehofenanlage installiert. Das Abgasreinigungssystem integriert Heißgasentstaubung mittels keramischer Filterkerzen und SCR-Katalysator zur Reduktion von NO <sub>x</sub> und NH <sub>3</sub> . Im Unterschied zu klassischen High-Dust-SCR-Anlagen erfolgt die Entstaubung bereits vor dem SCR-Katalysator. Es findet allerdings keine Temperaturabsenkung statt, so dass der SCR-Katalysator im entstaubten heißen Abgas ohne die bei Low-Dust-Katalysatoren erforderliche Wiederaufheizung des Abgases betrieben werden kann.  Erste Betriebserfahrungen zeigen: <ul style="list-style-type: none"><li>- Hohe Effektivität der Kombination aus Heißgasentstaubung mit keramischen Filterkerzen und katalytischer Entstickung zur Reinigung von Vorwärmer-Abgasen;</li><li>- Hohe Verfügbarkeit der Heißgasentstaubung mit integriertem SCR-Katalysator;</li><li>- Einsparung thermischer Energie gegenüber dem „End of Pipe“-Low-Dust-SCR-Verfahren, welches systembedingt eine Wiederaufheizung der Ofenabgase erfordert.</li></ul> Der Betrieb der HGF-SCR-Anlage erlaubt die gezielte Staubführung nach Vorwärmer, wodurch ermöglicht wird, externe Ofenstaubkreisläufe über die Rohmaterialtrocknung zu unterbinden. Dies erleichtert dauerhaft die Produktqualitätssteuerung und verbessert die Anlagenverfügbarkeit sowie die Betriebssicherheit.  Von einer Übertragbarkeit der Technologie innerhalb der Zementindustrie ist auszugehen, sofern entstaubte Ofenabgase z. B. zur Stromgewinnung oder für thermische Verbundprozesse genutzt werden sollen. Die Entstaubung in einem heißen Abgas kann z. B. die Effizienz einer Wärmeauskopplung zur Stromerzeugung steigern. Langfristig wird auch die Möglichkeit der Integration in Oxyfuel-Systeme zur CO <sub>2</sub> -Abscheidung gesehen, da durch die frühzeitigere Entstaubung des heißen Abgases, die nachfolgende Minderung weiterer Abgaskomponenten erleichtert und effizienter gestaltet werden kann.  Unerwarteterweise bereitete der Abtransport des im HGF-SCR abgeschiedenen Staubes mit bewährten Technologien (Förderschnecken, Kühlschnecke zur Temperaturabsenkung, Luftförderrinnen) für solch einen, im Hinblick auf seine Eigenschaften nicht ungewöhnlichen Staub, anhaltende Probleme (Materialwächern, Staubkühlung, Rückstau). Optimierungen im Bereich des peripheren Staubhandlings dauern zum Berichtszeitpunkt an. In der Folge war die Verfügbarkeit der Gesamtanlage über die Projektlaufzeit beeinflusst; die Funktionsfähigkeit des Teilbereichs „Abgasreinigung“ (Heißgasentstaubung und katalytische Entstickung) jedoch nicht.	

**Schlagwörter:**

Ammoniak, Emissionsminderung, Entstaubung, Heißgasfiltration, HGF-SCR, SCR, NO<sub>x</sub>-Minderung, Selektive katalytische Reduktion, Stickstoffoxide, Zement, Zementklinker, Zementklinkerproduktion

Anzahl der gelieferten Berichte  
Elektronischer Datenträger: PDF-Format

Sonstige Medien:  
Veröffentlichung im Internet geplant auf  
der Webseite:  
[www.umweltinnovationsprogramm.de](http://www.umweltinnovationsprogramm.de)

## Zusammenfassung

Mit dem Vorhaben des integrierten Heißgasfilter-Katalysator-Systems (HGF-SCR) ist im Zementwerk der Zement- und Kalkwerke (ZKW) OTTERBEIN weltweit erstmalig diese Art eines prozessintegrierten Gasreinigungssystems installiert worden.

Der Anlass des Vorhabens war gegeben durch die Besonderheit der im Zementwerk der ZKW OTTERBEIN zum Einsatz kommenden Verfahrenstechnik. Diese besteht darin, dass die Rohmaterialtrocknung für alle am Standort benötigten Produkte mit den Abwärmern der Zementdrehofenanlage ohne zusätzliche Wärmeströme gemeinsam erfolgt. Der im thermischen Verbund mit dem Trockner betriebene Zementdrehofen ist ständig im „Verbundbetrieb“, wobei das für den Zementdrehofen benötigte Ofenmehl in einer separat betriebenen Rohmühle nach entsprechender Siebung der getrockneten Materialien plus geringer Mengen an Additiven (Sand/Eisenträger) vermahlen wird. Diese für ZKW OTTERBEIN spezifische Ausgangslage und die dazu nicht befriedigenden Lösungen gegebener Katalysator-Verfahren auf dem Markt, haben nach entsprechenden Recherchen dazu geführt das neuartige Verfahren zu entwickeln.

Das für die Zementindustrie neuartige Verfahren zeichnet sich durch eine Heißgasentstaubung mittels keramischer Filterkerzen mit systemintegrierter SCR-Technologie zur Minderung der  $\text{NO}_x$ - und  $\text{NH}_3$ -Emissionen aus. Das System bestehend aus Heißgasfilter und nachgeschaltetem Katalysator in einer technischen Einheit erlaubt den Einsatz unmittelbar nach dem Zyklonvorwärmer einer Zementdrehofenanlage. Hierdurch können erhebliche Vorteile gegenüber dem Stand der Technik generiert werden. So lassen die bisherigen Betriebserfahrungen erkennen, dass das HGF-SCR-System eine hohe Effektivität bzgl. der Emissionsreduzierung aufweist.

Das Vorhaben wurde durch ein umfangreiches Messprogramm begleitet, dessen Ergebnisse im Bericht aufgeführt sind.

In den hier betrachteten ersten beiden Betriebsjahren (März 2023 - März 2025) konnte keine signifikante chemische Deaktivierung oder ein mechanischer Verschleiß der Katalysatorelemente beobachtet werden. Dies deutet darauf hin, dass im Vergleich zur High-Dust-SCR-Technologie, die mit den staubbeladenen heißen Gasen nach Vorwärmer direkt beaufschlagt wird, längere Standzeiten erzielt werden können. Vorteile daraus sind die Einsparungen wertvoller Ressourcen zur Katalysatorherstellung (Wolfram, Vanadium, Titan) und die für deren Herstellung und Verarbeitung notwendigen Energieaufwendungen.

Auf die Standzeit der Katalysatoren bei High-Dust-Anlagen wirkt neben dem Strahlverschleiß aus der eigentlichen Staubbeladung des Ofenabgases nach Vorwärmer auch die chemische Zusammensetzung der Ofenstäube. Beobachtungen haben erkennen lassen, dass insbesondere schwefelarme Abgasatmosphären zu erhöhten Deaktivierungen der Katalysatoren führen [1].

Mit der Entwicklung eines für ZKW OTTERBEIN geeigneten HGF-SCR-Verfahrens sollten gleichzeitig die üblichen äußeren Ofen-Staubkreisläufe<sup>1</sup> über Rohmühle und Rohmehlsilo gezielt unterbunden werden, um die sich daraus ergebenden erheblichen Vorteile hinsichtlich der Qualitätssteuerung und damit der Anlagenverfügbarkeit/ Sicherheit zu erschließen.

Bedingt durch notwendige, noch nicht abgeschlossene Optimierungen im Bereich der peripheren Einrichtungen (zum Staubhandling), welche die eigentliche Gasreinigung nicht nachteilig beeinflussen, werden vorrangig die Erfolge des neuen Gasreinigungs-Systems dargestellt. Die noch ausstehenden Optimierungen beschränken sich auf den Bereich des Staubhandlings, für welches zwar vielfach eingesetzte und bewährte Technologien (Förderschnecken, Kühlschnecke zur Temperaturabsenkung,

---

<sup>1</sup> Ofen-Staubkreisläufe: Ofen-Staubkreisläufe werden in innere und äußere Kreisläufe unterschieden:

Innere Kreisläufe ergeben sich bspw. im Zyklonwärmetauscher, äußere Kreisläufe ergeben sich unter Einbeziehung von weiteren Anlagen, bspw. Rohmühle oder Silos. Bei externen Kreisläufen ist zu beachten, dass ein zeitlicher Versatz zwischen Austritt und Wiedereintritt in den Kreislauf am Ofen besteht.

Luftförderrinnen) gewählt wurden, welche sich nichtsdestotrotz als unerwartet problembehaftet erwiesen haben. Eine Umsetzung der Maßnahmen ist für Q4/2025 geplant.

Ungeachtet der systemintegrierten SCR-Technologie zur Minderung der NO<sub>x</sub>- und NH<sub>3</sub>-Emissionen wird auch der grundsätzliche Einsatz einer Heißgasentstaubung mittels keramischer Filterkerzen für die Reinigung von Vorwärmer-Abgasen bestätigt.

Die HGF-SCR-Technologie ist grundsätzlich auch für andere Anlagen mit Zyklonvorwärmer-Technologie geeignet. Werksspezifische Besonderheiten müssen im Einzelfall berücksichtigt werden.

## Summary (English)

With the development of the integrated hot-gas filter catalyst system (HGF-SCR), this type of process-integrated gas cleaning system has been installed for the first time worldwide at the cement plant of Zement- und Kalkwerke (ZKW) OTTERBEIN.

The motivation for this project arose from the specific process technology used at the ZKW OTTERBEIN cement plant. This technology is characterized by the fact that raw material drying for all products required at the site is carried out jointly using waste heat from the rotary cement kiln system, without additional heat sources. The rotary kiln, which operates in thermal conjunction with the dryer, is continuously run in “combined operation,” with the kiln feed being ground in a separately operated raw mill after appropriate screening of the dried materials and the addition of small amounts of additives (sand/iron carriers). This situation, which is specific to ZKW OTTERBEIN, and the unsatisfactory solutions offered by existing catalyst technologies on the market led, after extensive research, to the development of this novel process.

This innovative process for the cement industry features hot-gas dedusting using ceramic filter candles with system-integrated SCR technology for reducing NO<sub>x</sub> and NH<sub>3</sub> emissions. The system—consisting of a hot-gas filter and a downstream catalyst within a single technical unit—allows installation directly after the cyclone preheater of a rotary kiln system. This enables significant advantages compared to the current state of the art. Operational experience to date indicates that the HGF-SCR system shows high effectiveness with respect to emission reduction.

The project was accompanied by an extensive measurement program, the results of which are presented in the report.

In the first two years of operation considered here (March 2023–March 2025), no significant chemical deactivation or mechanical wear of the catalyst elements was observed. This suggests that, compared to high-dust SCR technology—which is directly exposed to dust-laden hot gases after the preheater—longer service lifetimes can be achieved. The advantages include savings of valuable resources required for catalyst production (tungsten, vanadium, titanium) as well as the energy required for their manufacturing and processing.

In high-dust systems, catalyst lifetime is affected not only by erosive wear from the dust load of the kiln exhaust gas after the preheater but also by the chemical composition of the kiln dusts. Observations have shown that particularly low-sulfur exhaust atmospheres lead to increased catalyst deactivation [1].

The development of an HGF-SCR process suitable for ZKW OTTERBEIN was also intended to deliberately eliminate the usual external kiln dust cycles<sup>2</sup> through the raw mill and raw-meal silo, in order to realize the resulting significant advantages for quality control and thus for plant availability and operational safety.

Due to necessary but not yet completed optimizations in the area of peripheral equipment (for dust handling), which do not adversely affect the actual gas cleaning process, the focus here is on presenting the achievements of the new gas-cleaning system. The remaining optimizations are limited to dust-handling equipment, for which widely used and proven technologies (screw conveyors, cooling screw for temperature reduction, air-slide conveyors) were selected, yet these have nonetheless proven unexpectedly problematic. Implementation of the measures is planned for Q4/2025.

Regardless of the system-integrated SCR technology for reducing NO<sub>x</sub> and NH<sub>3</sub> emissions, the fundamental suitability of hot-gas dedusting with ceramic filter candles for cleaning preheater exhaust gases is confirmed.

---

<sup>2</sup> Kiln Dust Cycles: Kiln dust cycles are distinguished between internal and external cycles. Internal cycles occur, for example, in the cyclone heat exchanger; external cycles arise when additional equipment—such as the raw mill or silos—is involved. For external cycles, it must be noted that there is a time delay between the exit from and re-entry into the kiln circuit.

The HGF-SCR technology is, in principle, also suitable for other plants with cyclone-preheater technology. Plant-specific requirements must be considered on a case-by-case basis.

**Inhaltsverzeichnis**

<b>Zusammenfassung</b>	<b>4</b>
<b>Summary (English)</b>	<b>6</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>10</b>
1.1 Ausgangssituation	10
1.1.1 Branche in Deutschland	10
1.1.2 Situation im Werk OTTERBEIN	10
1.2 Ziel- und Aufgabenstellung des Vorhabens	12
1.3 Das HGF-SCR-Verfahren	13
<b>2 Technische Umsetzung</b>	<b>15</b>
2.1 Auslegung und Aufbau der HGF-SCR-Anlage	15
2.1.1 Komponentenauswahl des Anlagenlieferanten	15
2.2 Aufbau und Funktion der HGF-SCR-Anlage	16
2.3 Zeitplanung	18
2.4 Bau und Montage	20
<b>3 Betriebserfahrungen und Emissionswerte</b>	<b>22</b>
3.1 Entwicklung der Emissionswerte (Dauerbetrieb)	22
3.1.1 Emissionsmesswerte kontinuierlicher Messungen	22
3.1.2 Reduktionsmittelbedarf	25
3.2 Ergebnisse aus dem projektbegleitenden Messprogramm	26
3.2.1 Überblick Messkampagnen	26
3.2.2 Betriebliche und technische Randbedingungen bei den Messungen	27
3.3 NO <sub>x</sub> - und NH <sub>3</sub> -Emissionen	29
3.3.1 Allgemeines	29
3.3.2 Begrifflichkeiten und Definitionen, Messstellen	30
3.3.3 NO <sub>x</sub> -Minderung, NH <sub>3</sub> -Umsatz und NH <sub>3</sub> -Schlupf	32
3.3.4 Verhältnis NO zu NO <sub>2</sub>	34
3.4 N <sub>2</sub> O-Emissionen	34
3.5 Einfluss auf weitere Abgaskomponenten	35
3.5.1 Quecksilber	35
3.5.2 Kohlenstoffmonoxid	35
3.5.3 Schwefeloxide	36
3.5.4 Gesamtkohlenstoff und organische Einzelverbindungen	37
3.5.4.1 Benzol	37
3.5.4.2 Formaldehyd	38
3.5.5 Hochtoxische organische Verbindungen	38
3.5.5.1 Dioxine, Furane (PCDD/F) und dioxinähnliche PCB (dl-PCB)	38
3.5.5.2 Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe	39
3.6 Begleitende Feststoffanalysen	40
3.7 Erfassung des elektrischen Energiebedarfs der HGF-SCR-Anlage	40
<b>4 Betriebssicherheit und Verfügbarkeit der Anlage</b>	<b>42</b>
4.1 An- und Abfahrvorgänge	42
4.2 Anlagentechnische Herausforderungen (Lessons Learned)	42
4.3 Inbetriebnahme und Betriebserfahrungen	44
4.4 Ermittlung der Verfügbarkeit	45
4.5 Beurteilung der technischen Risiken aus der Vorüberlegung	46
4.6 Beurteilung der Verfügbarkeit	48
<b>5 Wirtschaftlichkeit</b>	<b>50</b>

---

5.1	Investitionskosten	50
5.2	Ersatz der Katalysatorelemente	50
5.3	Ersatz HGF-Kerzen	50
5.4	Elektrischer Energiebedarf	50
5.5	Mehrverbrauch Reduktionsmittelbedarf	51
5.6	Betriebskosten der HGF-SCR-Anlage	51
<b>6</b>	<b>Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die Branche</b>	<b>53</b>
6.1	Wesentliche technischen Herausforderungen, Maßnahmen und Ursachen	53
6.1.1	Kühlschneckenkapazität	53
6.2	Projektspezifische Aspekte und technische Risikobeurteilung	56
6.3	Generelle Schlussfolgerungen	57
<b>7</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>59</b>
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>60</b>

## 1 Einleitung

Die Zement- und Kalkwerke OTTERBEIN sind ein traditionsreiches Familienunternehmen in 5. Generation, gegründet im Jahr 1889 von Georg Otterbein. Das Sortiment umfasst über 100 verschiedene Produkte in den Sparten Zement, Kalk, Putz und Mörtel sowie mineralische Anstriche. Am Standort in Großenlüder-Müs in Hessen wird seit 1982 in einer Drehofen-Anlage Zementklinker hergestellt.

### 1.1 Ausgangssituation

#### 1.1.1 Branche in Deutschland

In Deutschland wurden zum Zeitpunkt des Antrages 38 Drehofenanlagen betrieben [2]. An 20 dieser Anlagen wird das SCR-Verfahren (Selektive-Katalytische-Reduktion) zur Minderung von Stickstoffoxidemissionen angewendet. An zwei Ofenanlagen wird das DeCONOX-Verfahren eingesetzt und an einer Anlage ein Verfahren mit katalytischen Filterschläuchen.

Die katalytischen Verfahren werden in der Zementindustrie hinsichtlich der Positionierung in Rohgas- (High-Dust-SCR) und Reingas- („End of Pipe“-Low-Dust-SCR) Installationen unterschieden.

Aus High-Dust-Anlagen wurden in den Jahren vor Projektbeginn von einigen Werken erhebliche Standortprobleme (reduzierte Verfügbarkeiten) der kostenintensiven Katalysatorelemente berichtet. Dies wurde auf werksspezifische Rahmenbedingungen (u. a. erhöhte Kalium-Gehalte im Rohmaterial in Verbindung mit geringen SO<sub>2</sub>-Gehalten) zurückgeführt, wobei der zugrunde liegende Mechanismus bislang nicht abschließend geklärt werden konnte. [1].

Weiterhin zeigten die Erfahrungen aus der Branche, dass auch die hohen Staubbeladungen, die durch den Katalysator geführt werden, in einigen Fällen zu Problemen mit der Abreinigung geführt haben [3].

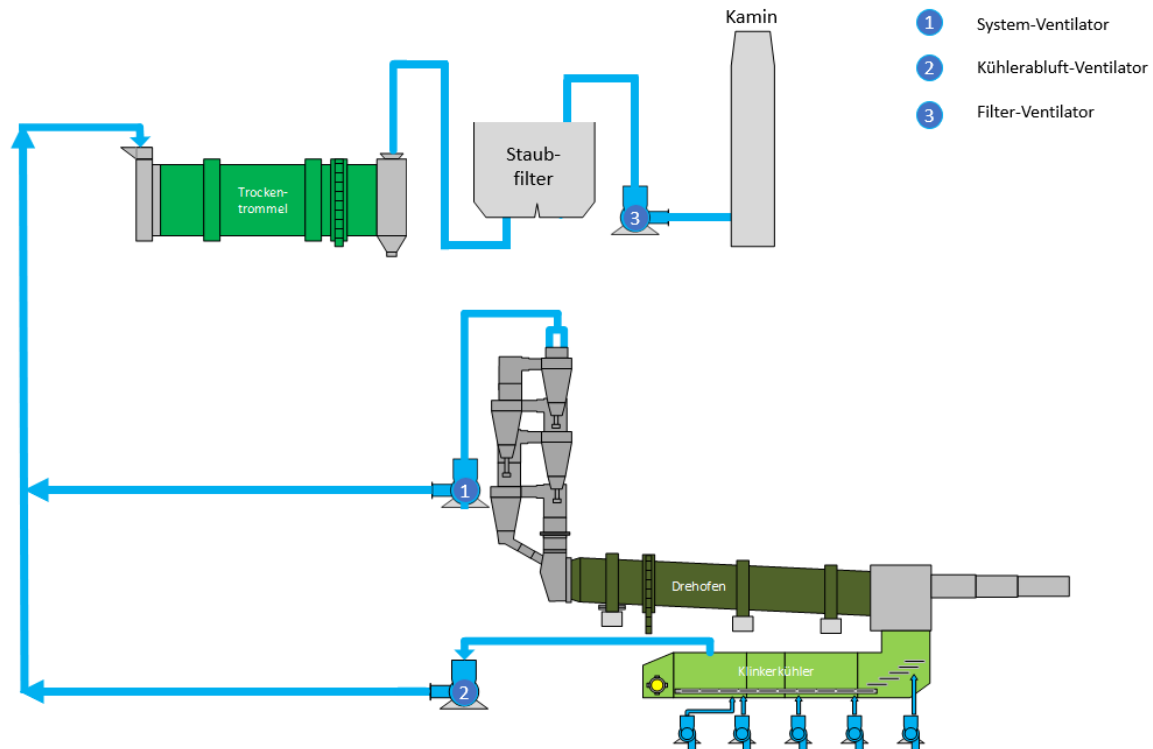
Demgegenüber wurde der Betrieb der „End of Pipe“-Low-Dust-Installationen als weitestgehend störungsfrei arbeitend beschrieben [4].

An 15 Ofenanlagen (darunter 12 Vorcalcineranlagen) kamen optimierte, teils werksspezifisch effizienzgesteigerte, SNCR-Verfahren zur Minderung der Stickstoffoxide zum Einsatz. Entsprechend der jeweiligen ofentechnischen Rahmenbedingungen werden auch bei Einsatz optimierter SNCR-Verfahren alle betrieblichen und emissionsschutzrechtlichen Anforderungen an die Reduktionstechnologie erfüllt.

#### 1.1.2 Situation im Werk OTTERBEIN

Die ZKW OTTERBEIN betreiben am Standort ein Zementwerk, rohmaterialtechnisch im Verbund mit einem Kalkwerk und einem Putz- und Mörtelwerk. Die für die Prozesse benötigten Rohmaterialien (Kalkstein und Mergel) werden größtenteils gemeinsam in einer Trockneranlage mit den Abwärmeströmen (Vorwärmerabgas und Kühlerabluft) aus dem Zementprozess getrocknet. Die Rohmühle wird nicht im Gasverbund mit der Drehofen-/Trockner-Anlage betrieben.

Wie dem nachfolgenden **Bild 1-1** zu entnehmen ist, wird der Abgas-/Abluftstrom nach Trockneranlage in einem Schlauchfilter entstaubt und über den Reingaskamin abgeführt.



**Bild 1-1** Status Quo, vor Umsetzung des HGF-SCR-Systems

Das für die Klinkerproduktion benötigte Rohmehl setzt sich zusammen aus einem Teil der vorgetrockneten Rohmaterialien und den erforderlichen Additiven (Sand und Eisenträger), die vor einer autark betriebenen Vertikalmühle zugeführt und gemeinsam aufgemahlen werden.

Die Ausgangslage im Zementwerk der ZKW OTTERBEIN vor Projektumsetzung war somit gekennzeichnet durch

- einen Dauerverbundbetrieb<sup>3</sup> zwischen Drehofen und Trockentrommel zur Versorgung der Werksteile Zement, Kalk und Putz/Mörtel unter Nutzung von Vorwärmerabgas und Kühlerabluft,
- eine im Vergleich zu anderen Zementdrehofenanlagen geringe Ofenleistung von 650 t Klinker/Tag,
- einen besonders Alkali-reichen und Schwefel-armen Rohstoff,
- eine Alternativbrennstoffrate von ca. 40 - 45 % im Jahresmittel,
- und den Einsatz des werkseitig entwickelten, effizienz-gesteigerten SNCR<sup>4</sup> unter Nutzung von 40 %-iger Harnstofflösung zur NO<sub>x</sub>-Minderung an mehreren Eindüspositionen.

Die Erfahrungen mit der HGF-SCR-Technologie und die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse sind unabhängig von der Betriebsweise und können auf andere Zementwerke mit Zyklonvorwärmanlagen übertragen werden.

Die an der Drehofenanlage der ZKW OTTERBEIN eingesetzte und weiterentwickelte SNCR-Technologie erlaubte vor Umsetzung des Vorhabens, die hohen Umweltschutzstandards zu erfüllen und die gesetzten Emissionsgrenzwerte zu unterschreiten.

<sup>3</sup> Die Dauerverbundschaltung im Zementwerk der ZKW OTTERBEIN stellt in der deutschen Zementindustrie eine Besonderheit dar. In anderen Werken wird die Rohmühle im thermischen Gasverbund mit dem Drehofen betrieben. Der Ofenbetrieb unterteilt sich dabei in Phasen des Direkt- und des Verbundbetriebs. Die Betriebsweise im Zementwerk der ZKW OTTERBEIN ist in Bezug auf die Gasreinigung nach Vorwärmer als günstig zu beurteilen, da die Betriebsbedingungen an der Emissionsminderungsanlage über Tage und Wochen unverändert bleiben und eine gute Feinjustage der Betriebsparameter erlauben.

<sup>4</sup> Eigenentwicklung der ZKW OTTERBEIN

Dennoch wurde die Entscheidung zum Bau einer katalytischen Abgasreinigungsanlage getroffen. Wesentliches Ziel war es dabei, ein Verfahren zu etablieren, dass, neben einer weitergehenden Emissionsminderung, wartungsarm und möglichst energieeffizient betrieben werden kann.

Insbesondere folgende Aspekte sind in die Entscheidungsfindung mit eingeflossen:

- detaillierte Bewertung der verfügbaren Technologien gemäß des „Stands der Technik“: High-Dust- sowie Low-Dust-Schaltungen.
- Würdigung der Erfahrungen aus anderen Zementwerken mit High-Dust-Anlagenschaltungen. Die Rohgas-Staub-Bedingungen nach Vorwärmer der Drehofenanlage der ZKW OTTERBEIN weisen hohe Kaliumgehalte infolge der Rohmehlqualität bei einem sehr geringen  $\text{SO}_2$ -Gehalt der Abgase nach Vorwärmer auf. Demnach wären reduzierte Standzeiten einer High-Dust-Gasreinigung mit nach sich ziehenden Wartungskosten zu erwarten gewesen.
- Die „End of Pipe“-Low-Dust-Schaltung weist aufgrund der thermischen Verbund-Anlagenschaltung mit dem Ziel den gesamten Rohstoff für den Standort zu trocknen, den Nachteil einer ansonsten spezifisch erhöhten Gasmenge (Gemisch aus Kühlerabluft und Vorwärmerabgas) auf. Die „End of Pipe“-Lösung erfordert zudem eine Gaskonditionierung durch Wärmeverschiebung und entsprechender Erwärmung durch Zufeuerung.

Die Prüfung hat ergeben, dass keine der etablierten Techniken die vorstehend genannten Anforderungen der ZKW OTTERBEIN zufriedenstellend erfüllt, so dass in Zusammenarbeit mit einem Anlagenbauer die erstmalige Umsetzung der neuartigen Technologie „HGF-SCR“, bestehend aus Heißgasfilter (HGF) mit prozessintegrierter Katalysatoranlage (SCR), angegangen wurde. Entwicklung der neuartigen Technologie „HGF-SCR-Anlage“ mit einem renommierten Anlagenbauer.

## 1.2 Ziel- und Aufgabenstellung des Vorhabens

Entscheidungsrelevant für die Wahl der HGF-SCR-Technologie waren somit für ZKW OTTERBEIN nicht nur betriebstechnische Aspekte, sondern auch die Möglichkeiten zur Weiterentwicklung des Stands der Technik in der Zementindustrie.

- Sichere Unterschreitung der  $\text{NO}_x$ -Konzentration im Abgas nach HGF-SCR-Anlage bei Reduktion von max.  $1.000 \text{ mg/m}^3$  im Rohgas nach Vorwärmer auf  $\leq 150 \text{ mg/m}^3$  im Jahresmittel und der  $\text{NH}_3$ -Konzentration von im Tagesmittel max.  $30 \text{ mg/m}^3$ ; Zielwert:  $< 10 \text{ mg/m}^3$  (jeweils N. tr., bez.  $10 \text{ Vol.-% O}_2$ ) mit hoher Verfügbarkeit von wenigstens 98 %.
- Nachweis der Eignung des Systems Heißgasfilter (HGF) mit prozessintegrierter / unmittelbar nachgeschalteter Katalysatoranlage (SCR) zur Reduktion von  $\text{NO}_x$ - und  $\text{NH}_3$ -Emissionen mit eindeutigen Schnittstellen (u.a. hinsichtlich des Ofenstaubs) direkt nach dem Vorwärmer der Klinkerdrehofen-Anlage.
- Durch den Einsatz der HGF-SCR-Anlage direkt nach Vorwärmer ist die Bereitstellung eines staubfreien, entstickten Abgases für zukünftige Folgenutzungen, wie z. B. zur Stromerzeugung oder zur Trocknung von alternativen Brennstoffen möglich.
- Hohe Standzeit (von  $> 6$  Jahren) der katalytischen Elemente bei Einsatz eines staubfreien Vorwärmerabgases ohne vorherige Temperatursenke / Kondensation von Abgasbestandteilen in Folge des Betriebes eines Wärmeverschiebungssystems.
- Steuerung über zentralen Drehofenleitstand sowie geringer Wartungsaufwand durch den Entfall des Wärmeverschiebungssystems bei konventionellen Low-Dust-Verfahren.

Im Rahmen des Projektes sollte die HGF-SCR-Technologie hinsichtlich diverser Aspekte intensiv untersucht und geprüft werden. Hierzu zählten die Ermittlung der energetischen und wirtschaftlichen Verfügbarkeit, die Ermittlung technischer Kennzahlen, die Untersuchung möglicher Nebenreaktionen im Rahmen des projektbegleitenden Messprogramms sowie die Klärung möglicher Wechselwirkungen zur Beeinflussung der Standzeit der Anlagenkomponenten.

Überdies sind die wesentlichen Merkmale des neuartigen Verfahrens der Gasreinigung im Hinblick auf die damit erreichbaren positiven Umweltaspekte zu erörtern und folgende betriebsrelevante Fragen zu beantworten: (Verweis auf Pkt. 6.2 Projektspezifische Aspekte und Risikobewertung)

1. Können mit der neuartigen Heißgasentstaubung mittels keramischer Filterkerzen die mit Ofenstaub beladenen heißen Abgasströme nach einem Zyklonwärmetauscher einer Zementdrehofenanlage mit einer langen Standzeit von mehreren Jahren (Zielgröße: 7 Betriebsjahre) und hoher Betriebssicherheit entstaubt werden?
2. Wie verhalten sich die abzuscheidenden Stäube im Hinblick auf Ansatzbildungen (bspw. ungenügende Abreinigung der Filterkerzen oder Verstopfung von Förderschnecken) und Druckverlustverläufe über längere Betriebslaufzeiten?
3. Lassen sich geforderte Standzeiten für einen regulären Anlagenbetrieb bestätigen?
4. Durch die integrierte SCR-Technologie zur Minderung der NO<sub>x</sub>- und NH<sub>3</sub>-Emissionen kann auf die ansonsten erforderliche Wiederaufheizung entsprechend dem „End of Pipe“-Low-Dust-SCR-Verfahren verzichtet werden.

Kann die Erwartung bestätigt werden, dass durch die fehlende Temperatursenke infolge des nicht erforderlichen Abkühlens und des kosten- und CO<sub>2</sub>-intensiven Wiederaufheizens der Abgase keine nachteiligen Effekte durch die Auskondensierung von Gasbestandteilen auftreten, welche gegebenenfalls einen gesicherten Anlagenbetrieb dieser systemintegrierten Lösung zur Minderung der NO<sub>x</sub>- und NH<sub>3</sub>-Emissionen einschränken?

5. Wie beeinflusst das Verfahren die Ofenfahrweise des Zementdrehofens?
6. Führt das HGF-SCR-Verfahren zur erhöhten Emissionen von Dioxinen und Furanen?

### 1.3 Das HGF-SCR-Verfahren

Bei Konzeptionierung der HGF-SCR-Technologie sollten die individuellen Vorzüge sowohl von Low-Dust- (Standzeit, Verfügbarkeit) als auch High-Dust- (Entstickung des Vorwärmerabgases, kein Wärmevershub) Schaltung kombiniert werden. In Gasflussrichtung folgt auf die Heißgasentstaubung in Verbundschaltung mit einer systemintegrierten Low-Dust-SCR-Einheit zur Minderung der NO<sub>x</sub>- und NH<sub>3</sub>-Emissionen. (Während Stickstoffoxidemissionen überwiegend prozessbedingt bei der Verbrennung entstehen, können NH<sub>3</sub>-Emissionen aus dem Rohmaterial oder dem Reduktionsmittel bspw. Harnstofflösung stammen.)

Der Aufbau der Filtrationseinheit entspricht grundsätzlich dem Prinzip des in der Zementindustrie bewährten Schlauchfilters. Die Einsatztemperatur der keramischen Filterkerzen liegt jedoch deutlich über der von textilen Filtermedien und erlaubt somit den Einsatz für die direkte Entstaubung der heißen Vorwärmerabgase.

In Abgrenzung zu den High-Dust- sowie „End of Pipe“-Low-Dust-SCR-Schaltungen waren vor Projektbeginn folgende Arbeits-Hypothesen wegweisend:

- Das im Heißgasfilter entstaubte Abgas führt zu deutlich verlängerten Standzeiten der Katalysatorelemente im Vergleich zur High-Dust-SCR-Technologie. Da keine mechanische Erosion durch Staub und keine chemische Deaktivierung vorliegen, treten die entsprechenden Reaktionsmechanismen nicht auf. Für die Entstaubung des Rohgases nach Zyklonvorwärmer wird

die Temperatur nicht maßgeblich abgesenkt, womit auf eine Wiederaufheizung der Abgase vor Eintritt in den Katalysator verzichtet werden kann.

- Die Auslegung des Katalysators ähnelt dem einer Low-Dust-SCR-Anlage. Durch die verringerte Staubbeladung kann ein engeres Pitch-Maß bei den Katalysatorelementen gewählt werden. Dies erlaubt, dass die katalytisch wirksame Oberfläche bei spezifisch geringerem Volumen des Katalysators zur Verfügung steht, v.a. im Vergleich mit einer High-Dust-SCR-Anlage.
- Durch die systembedingte Heißgasentstaubung werden Ofen-Staubkreisläufe beeinflussbar. Hieraus ergeben sich erhebliche Vorteile hinsichtlich der Anlagenverfügbarkeit und Betriebssicherheit sowie der Homogenität des ermahlenden Rohmehls. Der äußere Staubkreislauf über die Rohmühle wird durch die beschriebene Technologie unterbrochen und ermöglicht eine verbesserte Ofenmehl-Qualitätssteuerung, gemessen an der Standardabweichung im Kalkstandard.
- Vor Projektbeginn wurde von einer Verfügbarkeit von > 98 % ausgegangen. Damit ist gegenüber den, vor Projektbeginn etablierten SCR-Technologien, eine signifikante Verbesserung zu erwarten. Die hohe Verfügbarkeit ist das Ergebnis der eindeutig systemdefinierten Prozessstufen (Entstaubung und Entstickung) ohne Notwendigkeit einer Wärmeverschiebung (siehe Low-Dust-SCR).
- Die Kombination von Heißgasfilter und SCR führt nicht zu erhöhten Emissionen von Dioxinen und Furanen an der Zementdrehofenanlage

## 2 Technische Umsetzung

### 2.1 Auslegung und Aufbau der HGF-SCR-Anlage

Zur Umsetzung des Projekts wurde ein „Semi“-EPC-Vertrag (Engineering-Procurement-Construction) mit der Firma Scheuch aus Österreich geschlossen. Der Tiefbau sowie die Umsetzung im Prozessleitsystem lagen im Verantwortungsbereich von ZKW OTTERBEIN, daher die Begrifflichkeit „Semi“-EPC, die Beauftragung der Gutachtenerstellung und das Genehmigungsverfahren lagen in der Verantwortung des Bauherrn.

Die gesamte Anlagentechnik lag demzufolge hinsichtlich Auslegung, Beschaffung und Errichtung bei der Firma Scheuch. Besonderes Augenmerk wurde auf eine kompakte Platzierung aller Funktionsgruppen gelegt, wodurch ein umbauter Raum von ca. 12 m × 12 m in der Grundfläche bei einer Höhe von ca. 25 m erzielt wurde. Die für die Auslegung notwendigen Parameter und Größen (siehe **Tabelle 2-1**) wurden teils in Ofenaudits und teils im Rahmen der Betriebsdatenerfassung ermittelt.

**Tabelle 2-1** Auslegungsdaten<sup>5</sup> für die HGF-SCR seitens des Anlagelieferanten

Volumenstrom	50.000 m <sup>3</sup> /h, N., feucht
Dichte	ca. 1,4 kg/m <sup>3</sup> , N., feucht
Wärmekapazität	ca. 1,1 kJ/(kg K)
Temperatur	400 °C (460 °C Spitzentemperatur)
Feuchtegehalt	ca. 9 Vol.-%, feucht
O <sub>2</sub> -Gehalt	ca. 4,5 Vol.-%, feucht
CO <sub>2</sub> -Gehalt	ca. 27 Vol.-%, feucht
SO <sub>2</sub> -Gehalt	< 10 mg/m <sup>3</sup> , N., trocken
Staub	≤ 100 g/m <sup>3</sup> , N., trocken

#### 2.1.1 Komponentenauswahl des Anlagelieferanten

**Tabelle 2-2** Technische Eckdaten Heißgasfilter

Filtertyp	fipp 18t-44-12/2e00
Anzahl Kerzen	1080 Stk
Durchmesser	150 mm
Länge	4.000 mm
Filterfläche	~1,83 m <sup>2</sup> /Kerze, entspricht ca. 1976 m <sup>2</sup>
Filterflächenbelastung max.	~1,04 m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> · min)
Abreinigungssystem	Impulsabreinigung

**Tabelle 2-3** Technische Eckdaten HGF-SCR

SCR-Wabenkatalysator	Type SLD-10/2
Bestandteile der Katalysatorelemente	WO <sub>3</sub> , V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , TiO <sub>2</sub>
Katalysatorfläche	10 m <sup>2</sup>
Katalysatorlänge	1.300 mm
Katalysatorvolumen	13 m <sup>3</sup>
Installierte Lagenanzahl	1 Stück
Mögliche Lagenanzahl im Reaktor	2 Stück

<sup>5</sup> alle Angaben jeweils nach Vorwärmer

## 2.2 Aufbau und Funktion der HGF-SCR-Anlage

Die HGF-SCR-Anlage wurde an der Position nach Wärmetauscher vor Trockentrommel zur Einfügung in die Abgasleitung eingeplant. Es waren folgende Funktionsbereiche Gegenstand der Gesamtanlage:

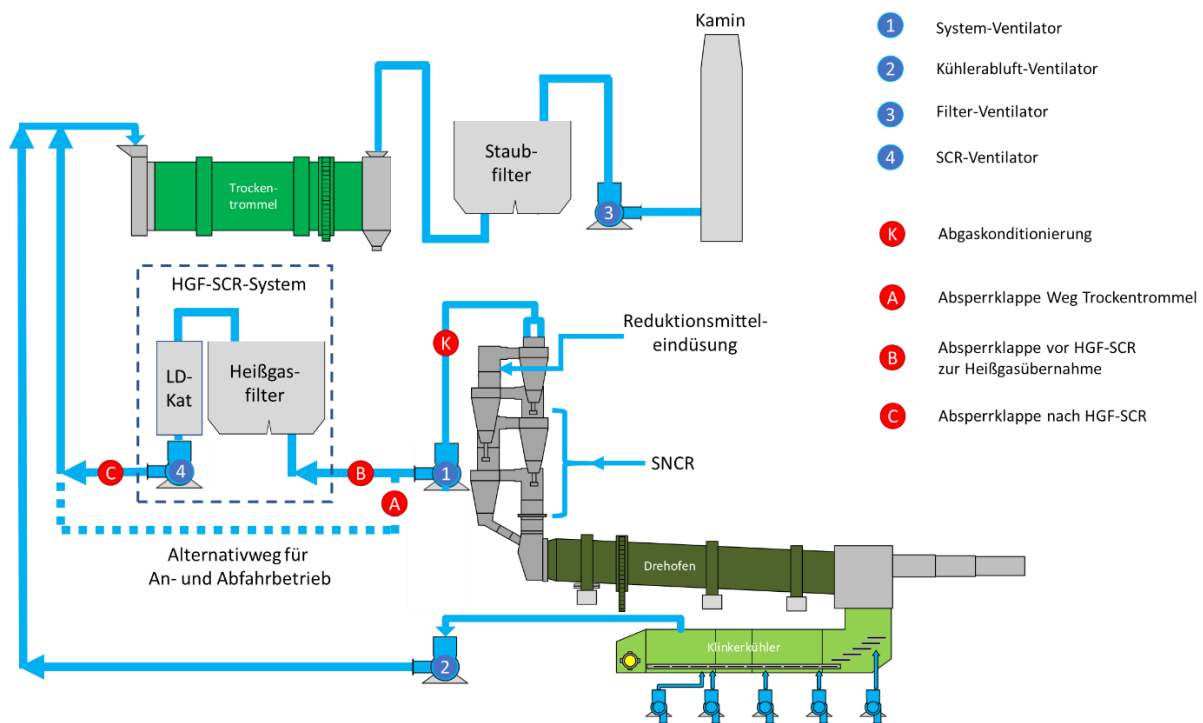


Bild 2-1 Anlagenschaltung mit HGF-SCR-Anlage

Die Ofenabgase werden entsprechend der nachfolgenden Verfahrensschritte behandelt:

### 1. Reduktionsmitteleindüsung

Das für die Entstickungsreaktion notwendige Reduktionsmittel wird durch die Eindüsung von 40 %-iger wässriger Harnstofflösung im Steigschacht (Bestands-SNCR) und/oder vor der obersten Zyklonstufe des Vorwärmers zur Verfügung gestellt. Die Wahl der Reduktionsmittelaufgabe erlaubt im Langzeitbetrieb eine Optimierung hinsichtlich der Katalysatorlebensdauer. Durch eine gewisse Verlagerung des Reduktionsmittels in den Steigschacht erfolgt eine Reduzierung der erforderlichen katalytischen Reduktion in der HGF-SCR, welches wiederum zu verlängerten Standzeiten des Katalysators führt. Analog dazu führt eine anteilig erhöhte Reduktionsmittelzugabe in der obersten Zyklonstufe anstelle der SNCR-Position zu einer vermehrten katalytischen Reduktion.

Grundsätzlich könnte als Reduktionsmittel auch Ammoniakwasser zur Anwendung kommen. Im Rohmaterial vorhandene Ammonium-Verbindungen werden ebenfalls umgesetzt, sodass die  $\text{NH}_3$ -Emissionen zuverlässig vermindert werden sollten.

### 2. Abgaskonditionierung

Für den effizienten Betrieb des Katalysators wird für die Anwendung im Werk OTTERBEIN ein Temperaturfenster von ca. 350 °C - 400 °C angestrebt. Dieser Temperaturbereich ist die für Zementdrehofen-Anlagen mit Zyklonvorwärmer übliche Rohgasaustrittstemperatur. Durch eine Konditionierung der Abgastemperatur soll der Katalysator am Betriebspunkt mit der höchsten Aktivität, die über Langzeituntersuchungen zu ermitteln ist, betrieben werden. Negative Effekte, welche die Deaktivierungsrate erhöhen, sollen dadurch weitestgehend vermindert werden.

Aus Gewährleistungsgründen bzgl. der Standzeit, seitens des Anlagenlieferanten, wird der Katalysator derzeit mit einer Temperatur von max. 350 - 360 °C betrieben. Vorgesehen ist zu einem späteren Zeitpunkt die Temperatur gegebenenfalls bis auf max. 400 °C zu erhöhen, um so dem Rohmaterialtrockner größere Wärmemengen zuführen zu können.

Die Konditionierung des Abgases erfolgt durch Eindüsung von Wasser in der Falleitung nach dem Vorwärmerturm, vor dem Ofengebläse an der Position K (siehe **Bild 2-1**).

Bei der Anlagenschaltung im Zementwerk der ZKW OTTERBEIN wird der Wärmestrom nach Vorwärmer in der Trockentrommel für die Kalksteintrocknung genutzt. Je höher die Abgastemperatur nach Vorwärmer ist, desto mehr Trocknungspotential steht zur Verfügung.

### 3. Heißgasfilter

Unmittelbar nach dem Ofengebläse werden die zu behandelnden Ofenabgase durch den SCR-Ventilator durch das System gesaugt, beginnend mit der vollständigen Entstaubung des Abgases durch die Heißgasfiltration mittels keramischer Filterkerzen.

Das staubbeladene Drehrohrofenabgas tritt in das Filtergehäuse ein und wird durch ein Prallblech am Eintritt eines jeden „Moduls“ nach oben und unten umgelenkt. Die Filterkerzen sind in zwei Kammern (entsprechend den Filterseiten) mit jeweils drei Modulen organisiert. Diese Aufspaltung des Abgasstroms hat nicht nur eine Vorabscheidung von groben Partikeln zur Folge, sondern bewirkt nach Aussage des Anlagenlieferanten auch eine sogenannte Top-Down-Strömung, die das Absetzverhalten der Partikel begünstigt. Die Durchströmung der Filterelemente erfolgt von außen nach innen.

Die Staubpartikel werden an der Oberfläche des Filtermediums zurückgehalten, das Ofenabgas durchströmt das Filtermedium und tritt als Reingas aus. Der sich dabei aufbauende Filterkuchen wird periodisch über eine Filterdifferenzdruckregelung abgereinigt und fällt in die Staubsammeltrichter. Austragsschnecken fördern das abgeschiedene Material kontinuierlich aus dem Filter in Richtung einer Kühlschnecke und nachgeschalteter pneumatischer Förderanlage.

Die Heißgasfilterkerzen sind am Filterkopf im Lochboden befestigt und hängen in den Rohgasraum hinein. Die Regenerierung erfolgt kontinuierlich in periodischen Zeitabständen und wird in Abhängigkeit des aktuellen Filterwiderstandes/-differenzdrucks vom Abreinigungs-Steuergerät ausgelöst.

Der Anlagenbauer beschreibt das Abreinigungssystem wie folgt:

- Das IMPULS-Abreinigungssystem besteht im Wesentlichen aus Druckluftspeicher, Membranventil und Blasrohr. Das am Druckluftspeicher, in dem sich Druckluft mit einem Druck von 2 bis 6 bar befindet, angebaute Membranventil wird für kurze Zeit (60 bis 200 ms) geöffnet. Auf Grund dieser kurzen Öffnungszeit entsteht im Düsenrohr (auch Treibstrahlrohr) eine Druckwelle, die mit hoher Geschwindigkeit über die Treibstrahldüsen läuft und dabei in den Reingasraum und in der weiteren Folge in den Einströmbereich des Filterelements expandiert. Dabei reißt dieser gepulste Freistrahls aus der primären Druckluft bei seinem Weg zum Filterelement umhüllendes Reingas mit.
- Der Austritt der Mischluft aus dem Injektor erzeugt eine Druckwelle vertikal in Richtung Filterelement.
- Dort kommt es zunächst zu einem Druckstau, da die Abreinigungsluft auf den Bodenbereich des Filterelements aufprallt und von dort zurückgeworfen wird. Diese rücklaufende Druckwelle durchspült das Filtermedium von innen nach außen und bewirkt dadurch das Abreinigen des Staubes.

- Der im Heißgasfilter abgeschiedene Staub wird in einer Kühlschnecke gekühlt und mittels Schnecken, sowie pneumatischen Förderanlagen nach Wiegezellen in den Vorwärmer zurückgeführt und/oder wahlweise zur Weiterverwendung zur Zementmahanlage bzw. zu anderen Produktionsbereichen gefördert.

#### 4. SCR-Katalysator (Low-Dust-Position)

Wie aus Anwendungen in der Zementindustrie vor Projektbeginn bestätigt, zeichnet sich ein SCR-Katalysator durch eine hohe Wirksamkeit der NO<sub>x</sub>- und NH<sub>3</sub>-Minderung sowie eine deutliche Verminderung organischer Verbindungen (TOC) aus. Nach der Entstaubung wird das heiße Abgas durch die Parallelstromkatalysatorelemente in Wabenbauform geleitet. Da die Anordnung des SCR-Katalysators nach Heißgasfilter erfolgt, kann ein enges Pitch-Maß bei den Katalysatorelementen gewählt werden kann. Dies erlaubt, dass die katalytisch wirksame Oberfläche bei spezifisch geringerem Volumen zur Verfügung steht, v.a. im Vergleich mit einer High-Dust-SCR-Anlage.

Das innovative Anlagendesign bietet zentrale Vorteile, die zu einer wesentlich effizienteren Ressourcennutzung und geringen laufenden Betriebskosten führen: Durch die vorgeschaltete Heißgasfiltration wird der Katalysator im entstaubten Reingas betrieben, wodurch die Deaktivierung des Katalysators vermindert wird. Zusätzlich erlaubt die konstruktive Anordnung von Filtration und Entstickung, dass bei Bedarf jeweils das Filtermedium oder der Katalysator gezielt ausgetauscht werden können. Das Anlagendesign ist so gewählt, dass der Katalysator vor der Beaufschlagung mit Ofenabgas aufgeheizt bzw. beim Abfahren mit Frischluft gespült werden kann. Durch den Aufheizkreis sollen grundsätzlich Taupunkt-Unterschreitungen sowie Ammoniumsulfat-Ablagerungen und eine mögliche Deaktivierung, verursacht durch die Kondensation von Alkalien, verhindert werden.

#### 5. Stützventilator (SCR-Ventilator)

Zur Überwindung des zusätzlichen Gesamt-Druckverlustes wurde ein zusätzliches Gebläse (blaue Markierung 4 in **Bild 2-1**) installiert. Nach Durchströmen der HGF-SCR-Anlage werden die gereinigten, heißen Abgase zur vorhandenen Anlage zur Trocknung von Rohmaterialien geleitet. Bei alternativen Schaltungen würden die entstaubten und entstickten Gase nach Vorwärmer bspw. zu einer Rohmühle geleitet werden können.

Im Zementwerk der ZKW OTTERBEIN wird das Gas aus dem Trockner vor Ableiten über den Kamin in einem bestehenden Schlauchfilter entstaubt.

#### 6. Absperrklappen

Die mit Sperrluft beaufschlagten Absperrklappen A, B und C in **Bild 2-1** dienen zur Konditionierung der Ofenabgase in der HGF-SCR-Anlage, womit der direkte Weg vom Vorwärmer zum Trockner mit der Absperrklappe A geschlossen wird. Bevor die Anlage angefahren wird, muss mittels eines elektrischen Aufheizkreises die Anlage zur Vermeidung von Kondensation vorgewärmt werden. Mit dem Abschalten der HGF-SCR-Anlage ist unmittelbar zuvor die Absperrklappe B der Direktweg zu öffnen und im Anschluss die Absperrklappen A entsprechend zu schließen.

Überdies bleibt für den An- und Abfahrbetrieb ein Direktweg zum Trockner funktionstüchtig.

### 2.3 Zeitplanung

Von der Firma Scheuch wurde ein Zeitrahmen von rd. 16 Monaten für die Projektabwicklung vorgesehen. Das Projekt beinhaltet die Pakete Genehmigungsverfahren, Projektmanagement sowie Hardware und Dienstleistung.

Die Montage erfolgte zügig und die Anlage wurde pünktlich zum Abschluss der Winterreparatur 2023 zur Warminbetriebnahme bereitgestellt.

Heißgasfilter-Katalysatoranlage HGF-SCR		Q4/20	Q1/21	Q2/21	Q3/21	Q4/21	Q1/22	Q2/22	Q3/22	Q4/22	Q1/23	Q2/23
<b>Terminsiene Genehmigungsverfahren beinhaltet</b>		<b>Verantw.</b>										
Genehmigungsverfahren	ZKw	■	■	■								
Abstimmung Otterbein/UBA	ZKw											
Übergabe Skizze an UBA	ZKw											
Übergabe Antrag an UBA	ZKw											
Förderbescheid	ZKw											
<b>Terminsiene Projektmanagment beinhaltet</b>												
Projekt-Zusage (Bestellung - Vertragsausarbeitung final)	ZKw - Anlagenbauer					■						
Projektierungsphase Anlagenbauer	Anlagenbauer/ZKw						■	■	■	■	■	■
Projektbesprechung in Großenlüder-Müs	Anlagenbauer/ZKw											
Terminplan Ausarbeitung	Anlagenbauer/ZKw											
Anlagenplanung 1. Entwurf für Freigabe (1Woche für Prüfung)	Anlagenbauer						■					
Anlagenplanung 2. Entwurf + Freigabe	Anlagenbauer							■				
General layout drawing-Finales Grundkonzept (Freigabe)	ZKw								■			
Berechnung der Statik inkl. Abgabe Fundamentleitplan	Anlagenbauer									■		
Motor & Verbraucherliste (ohne Kunden-TAG)	Anlagenbauer										■	
R&I Fließbild (ohne Kunden-TAG)	Anlagenbauer											■
Motor & Verbraucherliste (Final)	Anlagenbauer											■
R & I Fließbild (Final)	Anlagenbauer											■
Prozessbeschreibung inkl. Startsequenzen	Anlagenbauer											■
Start Bauteillieferung	Anlagenbauer											■
Fundament Erstellung Kundenseitig	ZKw											■
Start Vormontage bis zur Fertigstellung	Anlagenbauer											■
Ofenstillstand Winterrevision 2023	ZKw											■
Dokumentation Anlage (as built)	Anlagenbauer											■
<b>Terminsiene Hardware &amp; Dienstleistung beinhaltet</b>												
Konstruktion & Finale Auslegungen (Filter, Stahlbau, KAT, Rohrteile, Venti)	Anlagenbauer											
Fertigung und Beschaffung diverser Zukaufgüter	Anlagenbauer											
Montage Mechanik	Anlagenbauer											
Montage Schalt- und Steueranlage (MCC + PLC)	ZKw											
Montage Verkabelung	Anlagenbauer											
Kalt-Inbetriebnahme	Anlagenbauer											
Stillstand Flamme-Flamme (Umschlußphase)	ZKw											
Warm-Inbetriebnahme	Anlagenbauer											
Optimierungsphase der Anlage	Anlagenbauer/ZKw											
Winterrevision 2023	ZKw											

Bild 2-2 Zeitplan

Die erste Gasübernahme war am 20.03.2023, wobei sich die Inbetriebnahme des erstmalig konzipierten Systems schwierig gestaltete. Nähere Ausführungen hierzu werden in **Kapitel 4.3** (Inbetriebnahme und Betriebserfahrungen) behandelt.

In Folge der verlängerten Phase der Warminbetriebnahme und eines unvorhergesehenen, aber nicht im Zusammenhang mit der HGF-SCR-Anlage stehenden Ereignisses (Brand), ergaben sich Verschiebungen im Zeitstrahl und in deren Folge auch bei der Terminierung im projektbegleitenden Messprogramm.

## 2.4 Bau und Montage

Die nachfolgende Tabelle listet weitere Firmen auf, die neben dem Lieferanten der HGF-SCR-Anlage an der Lieferung und Montage weiterer technischer Komponenten im Rahmen des Projekts beteiligt waren.

**Tabelle 2-4** Am Bau beteiligte Firmen

Lieferant	Bereich
KIMA Gesellschaft für elektronische Steuerungstechnik und Konstruktion mbH	Steuerungstechnik
GEDA GmbH	Aufzug zur HGF-SCR-Anlage
Eichenauer Kälte- und Klimatechnik GmbH & Co. KG	Kühlanlage für Staubhandling
ENOTEC GmbH	Ofeneinlaufmessung
Schöll Energie- und Steuerungstechnik GmbH	Niederspannungsverteilung
SICK AG	Quecksilber-Messgerät



**Bild 2-3** Impressionen von der Baustelle

Der Raum zur Errichtung war eng begrenzt durch den Wärmetauscher, die Rohmehlsilos sowie einen erhöht ausgeführten Bandtransport. Der Katalysator, Filterpenthouse (Einhausung am Filterkopf) sowie die Austragstrichter wurden bodenstehend vormontiert und isoliert. Anschließend wurden sie mittels Autokrans in ihre Position im Stahlbau hineingehoben.



**Bild 2-4** Werksansicht der HGF-SCR-Anlage vor dem bestehenden Wärmetauscharturm

### 3 Betriebserfahrungen und Emissionswerte

#### 3.1 Entwicklung der Emissionswerte (Dauerbetrieb)

Nach den Regelungen der 17. BImSchV werden die Konzentrationen verschiedener Emissionskomponenten in Zementwerken kontinuierlich gemessen. Über die vorhandenen kontinuierlichen Messeinrichtungen können daher unmittelbar Aussagen über die Wirksamkeit der HGF-SCR-Anlage im Betrieb getroffen werden. In den folgenden Kapiteln sind die Konzentrationen entsprechender Abgaskomponenten dargestellt und der Einfluss der HGF-SCR-Anlage auf verschiedene Abgaskomponenten dargestellt.

Direkte Umweltentlastungen in Form von Emissionsminderungen sind durch die Verminderung der  $\text{NO}_x$ -/ $\text{NH}_3$ -Emissionen aufzuführen. Aufgrund der hohen Effizienz der HGF-SCR-Anlage wurde zu Projektbeginn ein Zielwert von  $< 10 \text{ mg/m}^3$  für  $\text{NH}_3$  (Grenzwert gemäß 17. BImSchV im Tagesmittel  $30 \text{ mg/m}^3$  (N. tr., bez. 10 Vol.-%  $\text{O}_2$ )) angestrebt.

Die zu erwartende höhere Verfügbarkeit der HGF-SCR-Technik im Vergleich zu anderen SCR-Anlagenschaltungen dürfte dazu führen, dass der gesetzliche Grenzwert über einen längeren Zeitraum je Ofenreise unterschritten werden kann, wodurch die emittierte  $\text{NO}_x$ -Fracht gegenüber dem Stand der Technik auch bei gleicher Konzentration verringert wird. Als Zielwert wurde zu Projektbeginn zudem ein  $\text{NO}_x$ -Jahresmittelwert von  $\leq 150 \text{ mg/m}^3$  (N. tr., bez. 10 Vol.-%  $\text{O}_2$ ) nach HGF-SCR-System avisiert.

Darüber hinaus werden durch das katalytische Verfahren organische Emissionen zu einem hohen Anteil vermindert. Erfahrungen von im Betrieb befindlichen SCR-Katalysatoren zeigen, dass organische Verbindungen auf der Oberfläche von SCR-Katalysatoren teilweise oxidiert werden. Bei Messungen wurde eine Minderung der Gesamtkohlenstoffemissionen am Katalysator zwischen 40 und 70 % festgestellt. Während kurzkettige Kohlenwasserstoffe ( $\text{C}_1/\text{C}_2$ ) nur zu 10 bis 30 % gemindert wurden, stieg die Oxidationsrate mit der Größe der Moleküle. Darüber hinaus wurden hochtoxische Kohlenwasserstoffe wie PCDD/F (50 bis 95 %) und Benzol (17 bis 48 %) effektiv gemindert [5]. Ein indirekter Minderungseffekt ergibt sich für das Element Quecksilber, das auf der Katalysatoroberfläche von der elementaren in die ionische Form überführt wird. Das ionisch gebundene Quecksilber wird verstärkt auf dem Staub im Abgasweg abgeschieden und kann so deutlich effizienter aus dem Prozess ausgeschleust werden. Von diesem Nebeneffekt wurde auch in anderen SCR-Projekten berichtet [3].

##### 3.1.1 Emissionsmesswerte kontinuierlicher Messungen

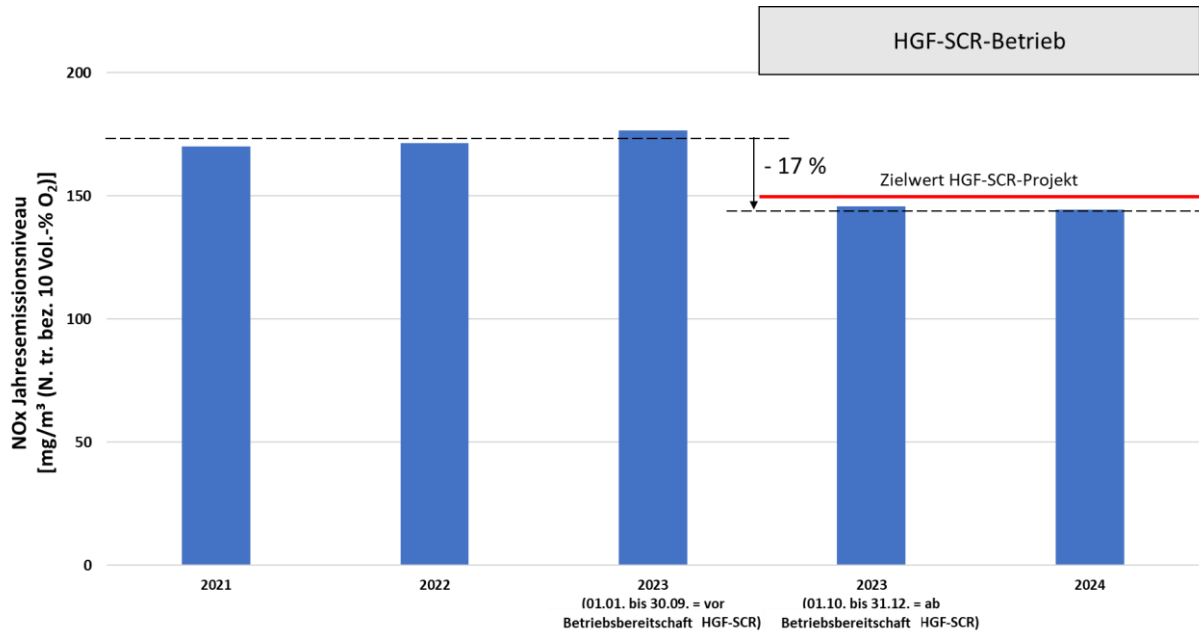
Im Folgenden werden die Emissionsmesswerte der kontinuierlichen Messungen aufgelistet und bewertet. Die angegebenen Minderungsraten entsprechen näherungsweise der prozentualen Minderung der Emissionsfracht.

##### **$\text{NO}_x$**

Die gemessenen  $\text{NO}_x$ -Jahresmittelwertkonzentrationen sind in **Bild 3-1** dargestellt. Bereits vor Inbetriebnahme der HGF-SCR-Anlage lagen die Emissionen auf geringem Niveau.

Nach der Erreichung der Betriebsbereitschaft der HGF-SCR-Anlage konnte ein Emissionsniveau unter dem gesetzten Zielwert von  $150 \text{ mg/m}^3$  (N. tr., bez. 10 Vol.-%  $\text{O}_2$ ) sicher erreicht werden. Gegenüber dem Ausgangszustand reduzierten sich die  $\text{NO}_x$ -Emissionen so um 17 %.

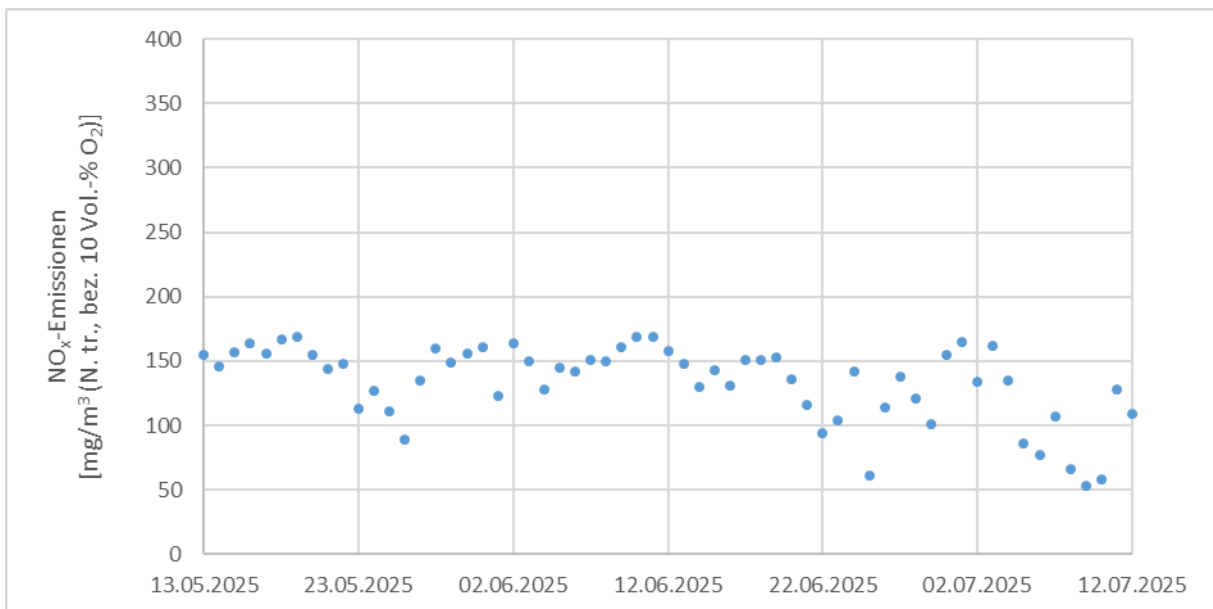
Die in **Bild 3-1** dargestellten Jahresmittelwerte wurden auf Grundlage von Halbstundenmittelwerten gebildet.



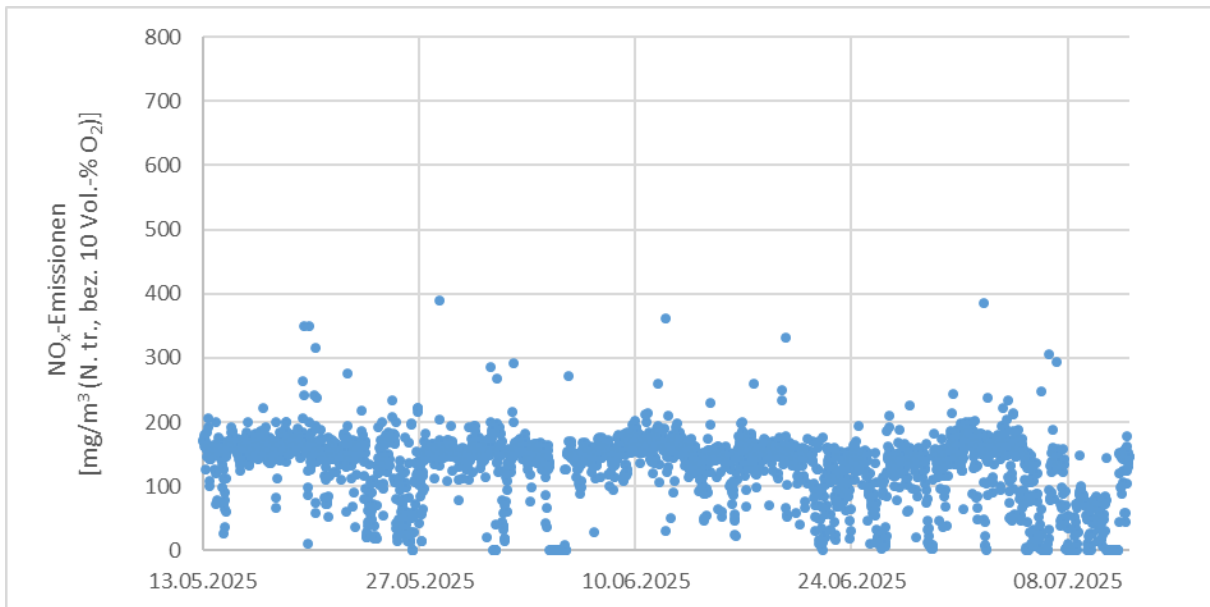
**Bild 3-1** Gemessenes NO<sub>x</sub>-Emissionsniveau am Hauptkamin in den Jahren 2021 bis 2024

In **Bild 3-2** und **Bild 3-3** sind die am Hauptkamin der Drehofenanlage gemessenen Tagesmittelwerte und Halbstundenmittelwerte für NO<sub>x</sub> über einen zusammenhängenden Zeitraum (Mai bis Juli 2025) dargestellt. In diesem Zeitraum lagen bereits ausreichende Betriebserfahrungen mit der HGF-SCR vor. Die Darstellungen bestätigen das erwartete stabile Emissionsniveau von NO<sub>x</sub>.

Die kurzzeitigen Schwankungen der Halbstundenmittelwerte (**Bild 3-3**) sind auf Phasen des Betriebs der SNCR zurückzuführen. Die geltenden Emissionsbegrenzungen von 200 mg/m<sup>3</sup> im Tagesmittel und 400 mg/m<sup>3</sup> im Halbstundenmittel werden in allen Fällen eingehalten.



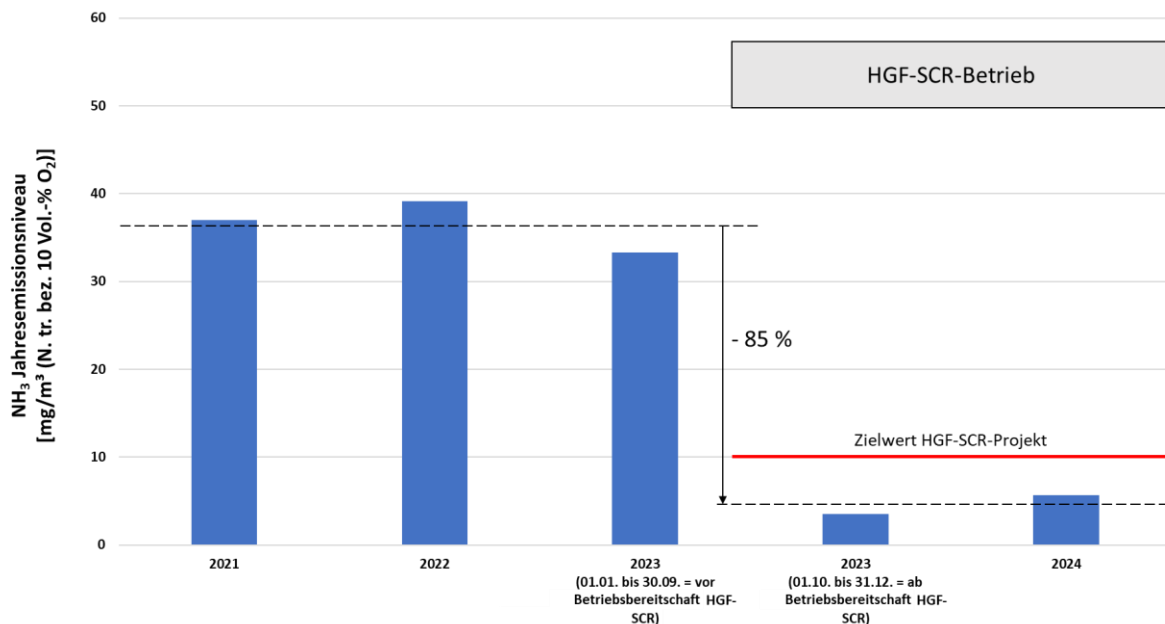
**Bild 3-2** Emissionsniveau NO<sub>x</sub> (Tagesmittelwerte) am Hauptkamin



**Bild 3-3** Emissionsniveau NO<sub>x</sub> (Halbstundenmittelwerte) am Hauptkamin

### NH<sub>3</sub>

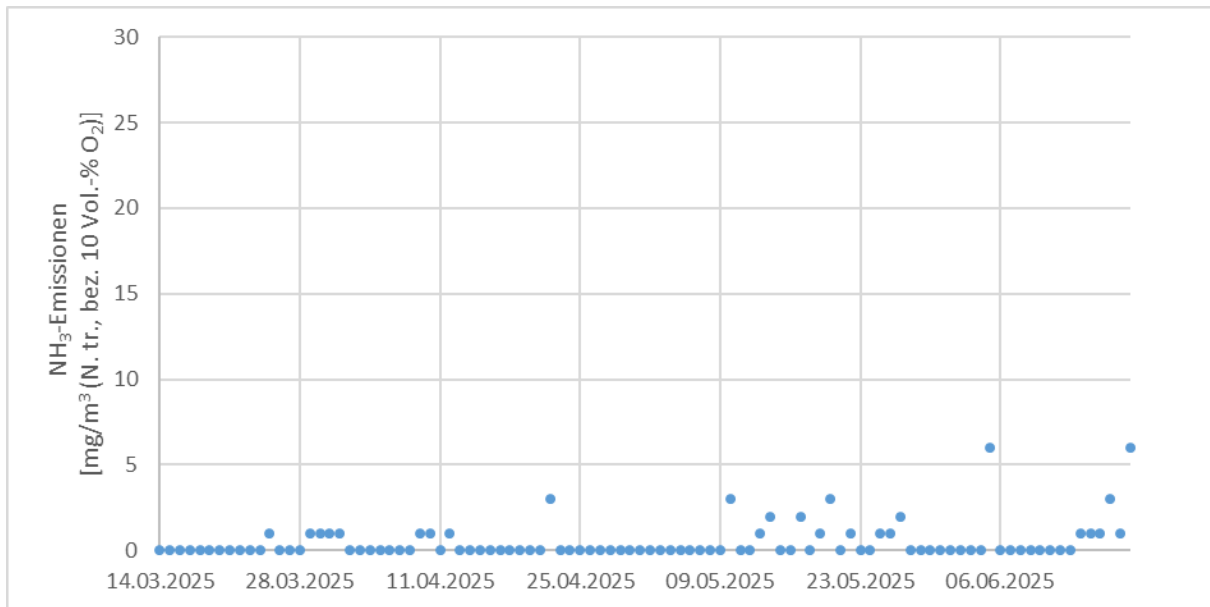
In **Bild 3-4** sind die Jahresmittelwerte der NH<sub>3</sub>-Emissionen vor und nach Inbetriebnahme der HGF-SCR dargestellt. Nach Erreichung der Betriebsbereitschaft der HGF-SCR-Anlage sanken die NH<sub>3</sub>-Emissionen im langfristigen Mittel signifikant um rund 85 % ab.



**Bild 3-4** Gemessenes NH<sub>3</sub>-Emissionsniveau am Hauptkamin in den Jahren 2021 bis 2024

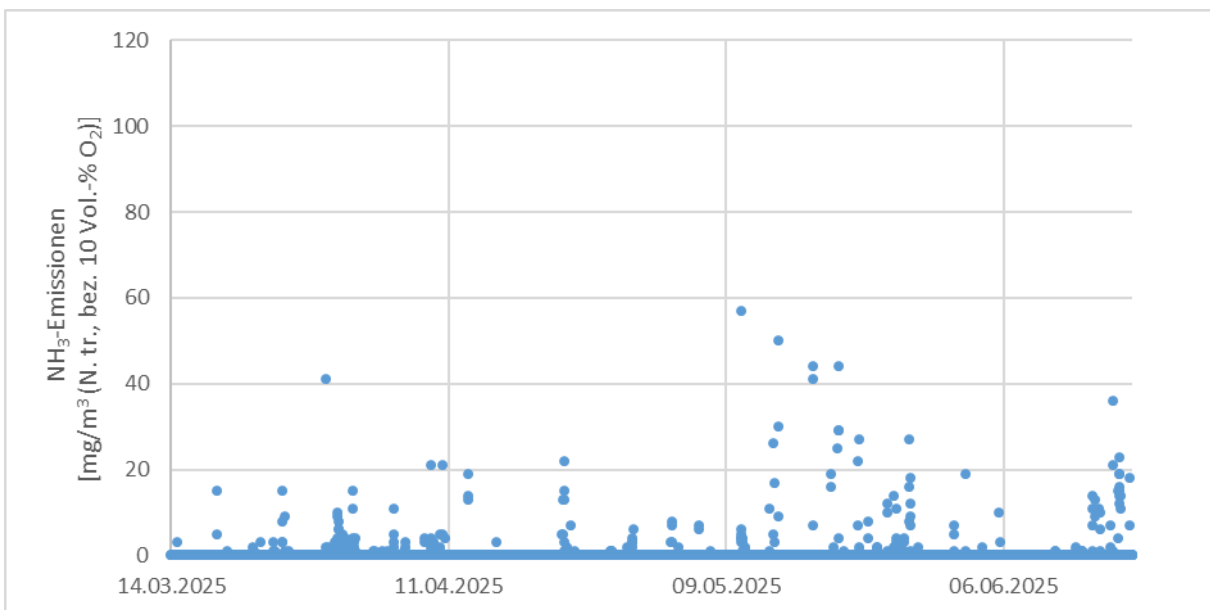
Das Emissionsniveau lag unter dem angestrebten Zielwert von 10 mg/m<sup>3</sup> (N. tr., bez. 10 Vol.-% O<sub>2</sub>) und deutlich unter dem aktuellen Grenzwert von 30 mg/m<sup>3</sup> (N. tr., bez. 10 Vol.-% O<sub>2</sub>); jeweils bezogen auf Tagesmittelwerte.

Durch den Betrieb der HGF-SCR-Anlage wird ein sehr stabiles und niedriges Emissionsniveau für die Komponente NH<sub>3</sub> erzielt. Typisch sind NH<sub>3</sub>-Emissionswerte <10 mg/m<sup>3</sup> (N. tr., bez. 10 Vol.-% O<sub>2</sub>).



**Bild 3-5** Emissionsniveau  $\text{NH}_3$  (Tagesmittelwerte) am Hauptkamin

Kurzzeitige Emissionswerte  $> 30 \text{ mg/m}^3$  (N. tr., bez. 10 Vol.-%  $\text{O}_2$ ) stehen in Verbindung mit Phasen des SNCR-Betriebs, in denen die HGF-SCR-Anlage nicht betrieben wurde. Indikativ zeigt **Bild 3-6** die Halbstundenmittelwerte über einen zusammenhängenden Zeitraum von drei Betriebsmonaten, gemessen am Hauptkamin der Drehofenanlage.



**Bild 3-6** Emissionsniveau  $\text{NH}_3$  (Halbstundenmittelwerte) am Hauptkamin

### 3.1.2 Reduktionsmittelbedarf

Im Vergleich zu einer reinen SNCR-Fahrweise, bewirkt die HGF-SCR-Anlage ein stabileres und geringeres Emissionsniveau und damit einen insgesamt größeren Freiheitsgrad in der Ofenfahrweise. Der alleinige Einsatz des SNCR-Verfahrens hat primäre Maßnahmen erfordert (z. B. geringerer Luftüberschuss, ...), die jedoch auch die Ofenfahrweise und die Produktqualität beeinflusst haben.

Durch Einsatz der HGF-SCR kann die Ofenfahrweise allein auf die Produktqualität optimiert ausgerichtet werden. Hierdurch kommt es im Vergleich zur vorherigen Ofenfahrweise als Sekundäreffekt zu einer vermehrten anlagenspezifischen Bildung von Stickstoffoxiden durch den thermischen Prozess. In der

Folge steigt der absolute Bedarf an Reduktionsmittel gegenüber dem Normalbetrieb mit SNCR vor Einbau der HGF-SCR an. Der Reduktionsmittelbedarf ist abhängig von der Menge an NO<sub>x</sub> aus dem Prozess, sowie von rohmaterialbedingten NH<sub>3</sub>-Konzentrationen.

Um den Mehrbedarf beurteilen zu können, wurden Zeiträume mit reiner SNCR-Fahrweise, sowie HGF-SCR-Fahrweise herangezogen bei denen

- ein stabiler Drehofenbetrieb und
- eine gleichmäßige Rohmehlaufgabe auf einem vergleichbaren Niveau vorlag.

Der sich ergebene Harnstoffmehrbedarf von 0,98 Liter/t Klinker entspricht unter der vereinfachten Annahme eines insgesamt stöchiometrischen Umsatzes (**Gleichung 5**) einer zusätzlichen Minderung von 200 bis 250 mg/m<sup>3</sup> NO<sub>x</sub> (als NO<sub>2</sub>, bez. 10 Vol.-% O<sub>2</sub>) in SNCR und HGF-SCR-Anlage.

### 3.2 Ergebnisse aus dem projektbegleitenden Messprogramm

Im Rahmen des HGF-SCR Projekts wurden zwischen Juli 2022 bis Oktober 2024 vier begleitende Messkampagnen durch die VDZ Technology gGmbH durchgeführt, die sich auf unterschiedliche Aspekte des Anlagenbetriebs konzentrierten und die Auswirkungen auf NO<sub>x</sub> und andere Ofenabgasbestandteile untersuchten.

#### 3.2.1 Überblick Messkampagnen

Eine Übersicht der Messkampagnen mit den jeweiligen Untersuchungsschwerpunkten ist in **Tabelle 3-1** dargestellt.

**Tabelle 3-1** Übersicht über die begleitenden Messkampagnen mit inhaltlichen Schwerpunkten

Zeitraum	Messkampagne	Schwerpunkte
05., 07. u. 28.07.2022	1	Referenzmessung zur Aufnahme des Anlagenzustands vor Inbetriebnahme der HGF-SCR-Anlage
05.-07.12.2023	2	Untersuchungen zum Betrieb der HGF-SCR-Anlage mit Fokus auf den Abbau von Stickstoffoxidverbindungen und zusätzlicher Erfassung weiterer Abgasbestandteile
11.-13.06.2024 26./27.08.2024	3	Untersuchungen zum Betrieb der HGF-SCR-Anlage mit Fokus auf Quecksilber, die Quecksilber-Bindungsform und organische Verbindungen, insbesondere hochtoxische Abgasbestandteile
22.-24.10.2024	4	Untersuchungen zum Betrieb der HGF-SCR-Anlage mit Fokus auf einen dauerhaften Anlagenbetrieb über einen Zeitraum von 72 Stunden

In **Tabelle 3-2** ist dargestellt, welche Parameter und Kenngrößen Bestandteil der einzelnen Messkampagnen waren. Dabei wurden ausgewählte Kenngrößen regelmäßig bei jeder Messkampagne bestimmt, um den Einfluss der HGF-SCR-Technologie über einen längeren Zeitraum zu evaluieren und gegebenenfalls stattfindende Veränderungen zu dokumentieren. Einige der Parameter werden werksseitig im Dauerbetrieb kontinuierlich erfasst. Sie wurden anschließend durch den VDZ mit ausgewertet.

**Tabelle 3-2** Übersicht über die untersuchten Parameter und Kenngrößen bei den Messkampagnen im Rohgas vor und nach SCR-Katalysator

Abgaskomponente	Messkampagne	Schwerpunkte
NO <sub>x</sub> , CO, CO <sub>2</sub> , O <sub>2</sub>	1-4	kontinuierliche Messung
NH <sub>3</sub>	1-4	kontinuierliche und diskontinuierliche Messung
Gesamt-C	1-2	kontinuierliche Messung
SO <sub>2</sub>	1-4	kontinuierliche und diskontinuierliche Messung
Hg und Hg-Speziierung	1-3	diskontinuierliche Messung
HCl	1-4	diskontinuierliche Messung
N <sub>2</sub> O	1-3	kontinuierliche u. diskontinuierliche Messung
PCCD/F, PCB (WHO)	1-3	diskontinuierliche Messung
PAH	1-3	diskontinuierliche Messung
Benzol	1-3	diskontinuierliche Messung
Formaldehyd	1-3	diskontinuierliche Messung
Rohgasstaubgehalt	1-4	diskontinuierliche Messung
<b>Abgastechnische Randbedingungen</b>		
Volumenstrom Rohgas	1-4	diskontinuierliche Messung
Abgastemperaturen	1-4	kontinuierliche und diskontinuierliche Messung
Abgasfeuchte	1-4	kontinuierliche und diskontinuierliche Messung
<b>Sonstiges</b>		
Reduktionsmittelverbrauch SCR-Anlage	2-4	kontinuierliche Messung
Reduktionsmittelverbrauch SNCR-Anlage	1-4	kontinuierliche Messung
Brennstoffeinsatz	1-4	kontinuierliche Messung
Ofenmehlaufgabe	1-4	kontinuierliche Messung

Begleitende Feststoffprobenahmen waren ebenfalls Bestandteil jeder Messkampagne. Dabei wurden insbesondere (Tages-)Mischproben der Ofenmehle und Stäube auf ihren Gehalt an Ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) analysiert, um weitere Erkenntnisse über das Kreislaufverhalten von NH<sub>4</sub><sup>+</sup> im Ofensystem bei Betrieb der HGF-SCR-Anlage zu erhalten. Eine Übersicht der beprobten Feststoffe und der durchgeführten Analysen ist in **Tabelle 3-3** dargestellt.

**Tabelle 3-3** Übersicht über die Feststoffuntersuchungen bei den Messkampagnen

Abgaskomponente	Messkampagne	
Ofenmehl (Aufgabegut)	1-3	Tagesmischproben
HGF-Staub	3	Tagesmischproben
Schlauchfilterstaub	1-3	Tagesmischproben

### 3.2.2 Betriebliche und technische Randbedingungen bei den Messungen

Um die ermittelten Abgaskonzentrationen und Kenngrößen der verschiedenen Versuchsreihen vergleichen zu können, ist die Beurteilung der im jeweiligen Messzeitraum vorliegenden betrieblichen und technischen Abgasrandbedingungen erforderlich. Der Klinkerbrennprozess in Drehofenanlagen der Zementindustrie ist ein dynamischer Prozess, der natürlichen Schwankungen unterworfen ist. So kann beispielsweise das NO<sub>x</sub>-Ausgangsniveau aufgrund des Ofenbetriebs (Rohmaterial, Brennstoffzufuhr,

Flammentemperatur, etc.) innerhalb kurzer Zeit stark schwanken. Auch die Auslastung und Tagesleistung der Anlage sowie der Einsatz alternativer Brennstoffe können je nach Ofenbetrieb, Ansatzbildung in Ofen und Vorwärmer und Verfügbarkeit im Regelbetrieb schwanken. Im Vordergrund steht dabei stets die sichere und wirtschaftliche Herstellung eines Produktes bei gleichzeitig strenger Einhaltung der Qualitätsstandards und der geltenden Emissionsgrenzwerte. Aus diesem Grund wurden die geplanten Messungen, falls erforderlich, den aktuellen Gegebenheiten vor Ort angepasst und auftretende Abweichungen entsprechend dokumentiert.

Darüber hinaus muss bei einem Vergleich der Ergebnisse aus den verschiedenen Messkampagnen untereinander berücksichtigt werden, dass zwischen den Messkampagnen 2 und 3 eine Kreislaufentlastung zur Reduzierung der inneren Kreisläufe<sup>6</sup> in Betrieb genommen wurde. Zudem konnte die Steuerung der Harnstoff-Eindüsung bei den Messkampagnen 1 bis 3 nur manuell gefahren werden. Eine automatische Dosierung war erst bei der 4. Messkampagne möglich.

Aufgrund dieser Umstände ergaben sich bei der 4. Messkampagne höhere NO<sub>x</sub>-Minderungsraten und eine bessere Harnstoff-Ausbeute. Es ist davon auszugehen, dass sich der Vorteil der automatischen Regelung und Dosierung der Harnstofflösung langfristig bestätigen wird.

Während der Messkampagnen traten zeitweise kleinere technische Betriebsstörungen (z. B. Zyklonverstopfung, Falschlufteinbruch auf Grund von Reparaturarbeiten) auf. Dies hatte keinen signifikanten Einfluss auf die NO<sub>x</sub>-Minderungsleistung bzw. die sichere Einhaltung der NO<sub>x</sub>- und NH<sub>3</sub>-Emissionsgrenzwerte.

In **Tabelle 3-4** sind die wichtigsten betrieblichen und technischen Randbedingungen während der Messungen aufgeführt, die im Rahmen einer vergleichenden Betrachtung und Bewertung berücksichtigt werden sollten.

Die Darstellungen in **Tabelle 3-4** zeigen, dass die produzierte Klinkermenge bei allen Messkampagnen vergleichbar war. Auch der Brennstoffmix sowie der Einsatz alternativer Brennstoffe blieben mit Ausnahme eines Wechsels von Braunkohle zu Steinkohle zwischen den beiden Abschnitten der ersten Messkampagne nahezu unverändert. Spezielle Versuchseinstellungen wurden lediglich während des 2. Teils der 3. und der 4. Messkampagne geplant, um die Unterschiede zwischen SNCR-, SCR, und SNCR-/SCR-Mischbetrieb zu untersuchen.

Ein weiterer Unterschied war die zeitliche Dauer der einzelnen Versuchstage. Je nach Ofenbetrieb und Versuchseinstellung schwankte die Dauer zwischen 5 und 18 Stunden. Die Ergebnisse erlauben somit zwar eine gute Abschätzung der Effizienz und Wirksamkeit bestimmter Versuchs- und Regelungseinstellungen, doch zur Ermittlung von aussagekräftigen Zahlenwerten zu NO<sub>x</sub>-Minderungsraten, Betriebsmittelverbräuchen und zu den Betriebskosten ist die Kombination der Ergebnisse mit den Erfahrungswerten aus dem Langzeitbetrieb unerlässlich.

---

<sup>6</sup> Im Drehofenprozess können Verdampfungs-Kondensations-Kreisläufe von chlor- und schwefelhaltigen Bestandteilen zur Ansatzbildung im Wärmetauscher führen. Die Kreislaufbildung wird durch die beschriebene Anlage begrenzt.

**Tabelle 3-4** Betriebliche und technische Randbedingungen während der HGF-SCR-Messkampagnen

Abgaskomponente	Ofenbetrieb allgemein	HGF-SCR-Anlage	Nach SCR <sup>a)</sup>
M1: 05., 07. u. 28.07.2022 (Referenzmessung vor HGF-SCR Inbetriebnahme) 3 Messtage	Messungen mussten aufgrund von Ofenstörungen unterbrochen werden. Die Messtage wurden daher mit Unterbrechungen und nicht in Folge durchgeführt.  Klinkerproduktion: 480 - 540 t/d Alternative Brennstoffe: 50 bis < 60 % Brennstoffmix: Kohle <sup>b)</sup> , Petrolkoks, Fluff, Tiermehl	noch nicht installiert	NO <sub>x</sub> -Niveau im Reingas ca. 160 - 400 mg/m <sup>3</sup> NO <sub>x</sub> als NO <sub>2</sub> bez. 10 Vol.-% O <sub>2</sub> NH <sub>3</sub> -Niveau im Reingas ca. 20 - 55 mg/m <sup>3</sup> bez. 10 Vol.-% O <sub>2</sub> (Mittelwerte der täglichen Messzeiträume)
M2: 05.-07.12.2023 3 Messtage	Klinkerproduktion: 430-520 t/d Alternative Brennstoffe: 50 - 60 % Brennstoffmix: Steinkohle, Petrolkoks, Tiermehl, Fluff	aufgrund eines Brandes vor der Messung keine automatische Regelung der Harnstoff-Eindüsung möglich	NO <sub>x</sub> -Niveau nach SCR ca. 120 - 150 mg/m <sup>3</sup> NO <sub>x</sub> als NO <sub>2</sub> bez. 10 Vol.-% O <sub>2</sub> NH <sub>3</sub> -Niveau im Reingas ca. < 5 - 10 mg/m <sup>3</sup> bez. 10 Vol.-% O <sub>2</sub> (Mittelwerte der täglichen Messzeiträume)
M3: 11.-13.06.2024 u. 26./27.08.2024 4 Messtage	Klinkerproduktion: 480-540 t/d Alternative Brennstoffe: 50 - 60 % Brennstoffmix: Steinkohle, Petrolkoks, Tiermehl, Fluff	Mischbetrieb SNCR+SCR	NO <sub>x</sub> -Niveau nach SCR ca. 30 <sup>c)</sup> - 160 mg/m <sup>3</sup> NO <sub>x</sub> als NO <sub>2</sub> bez. 10 Vol.-% O <sub>2</sub> NH <sub>3</sub> -Niveau im Reingas ca. <5 - 45 mg/m <sup>3</sup> bez. 10 Vol.-% O <sub>2</sub> (Mittelwerte der täglichen Messzeiträume)
M4: 22.-24.10.2024 3 Messtage	Klinkerproduktion: 470-490 t/d Alternative Brennstoffe: 60 - 65 % Brennstoffmix: Steinkohle, Petrolkoks, Tiermehl, Fluff	Mischbetrieb SNCR+SCR	NO <sub>x</sub> -Niveau nach SCR ca. 110 - 160 mg/m <sup>3</sup> NO <sub>x</sub> als NO <sub>2</sub> bez. 10 Vol.-% O <sub>2</sub> NH <sub>3</sub> -Niveau im Reingas ca. 5 - 20 mg/m <sup>3</sup> bez. 10 Vol.-% O <sub>2</sub> (Mittelwerte der täglichen Messzeiträume)

<sup>a)</sup> Referenzmessung erfolgte am Kamin

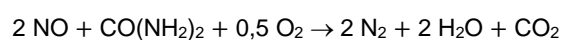
<sup>b)</sup> 05.+07.07.: Braunkohle; 28.07.: Steinkohle

<sup>c)</sup> Die während dieses Messzeitraumes gemessenen NO<sub>x</sub>-Werte stellen eine Momentaufnahme unter günstigsten Betriebsbedingungen dar. Die bisherige Betriebserfahrung zeigt, dass eine dauerhafte Reproduzierbarkeit dieses Emissionsniveaus nicht gewährleistet werden kann.

### 3.3 NO<sub>x</sub>- und NH<sub>3</sub>-Emissionen

#### 3.3.1 Allgemeines

Die Reduktion des NO mit Harnstoff basiert auf einer Reaktion in einem Temperaturbereich von 800 °C - 1000 °C, die in Anwesenheit von Sauerstoff abläuft. Dabei reagieren die Moleküle aus der eingedüsten Harnstofflösung mit den NO- und NO<sub>2</sub>-Molekülen zu molekularem Stickstoff, Wasser und Kohlenstoffdioxid nach **Gleichung 1**.



**Gleichung 1**

Beim SCR-Verfahren liegt die erforderliche Reaktionstemperatur auf relativ niedrigem Niveau in einem Temperaturfenster von 250 - 400 °C.

Auch bei hohem NO<sub>x</sub>-Eintrittsniveau und hohen angestrebten NO<sub>x</sub>-Minderungsraten erfolgt im Vergleich zum SNCR-Verfahren der Umsatz des Reduktionsmittels annähernd äquimolar, sodass ein vergleichsweise geringerer NH<sub>3</sub>-Schlupf am Austritt des SCR-Reaktors resultiert. Tritt ein Überangebot an NH<sub>3</sub> aus Rohmaterial, SNCR-Schlupf oder eingedüster Harnstofflösung in den Katalysator ein, wird dieses nicht vollständig abgebaut. Die vorliegenden Betriebserfahrungen zeigen, dass dieses Risiko erfolgreich zu beherrschen ist.

### 3.3.2 Begrifflichkeiten und Definitionen, Messstellen

Wesentliche Kenngrößen zur Beurteilung der Effizienz der NO-Minderung mittels SCR sind der NO<sub>x</sub>-Abbau, die NH<sub>3</sub>-Ausbeute und das NH<sub>3</sub>/NO<sub>x</sub>-Molverhältnis. Sie stellen den Zusammenhang her zwischen dem tatsächlich abgebauten NO<sub>x</sub> und der dafür aufgewendeten Harnstofflösung. Die nicht für den NO<sub>x</sub>-Abbau genutzte Harnstofflösung geht als NH<sub>3</sub>-Schlupf in die Emission.

Die Berechnung der NO<sub>x</sub>-Minderungsrate erfolgt anhand der Formel:

$$\text{NO}_x\text{-Minderungsrate} = \frac{\Delta(\text{NO} + \text{NO}_2)\text{-Molenstrom (vor - nach Reaktion)}}{(\text{NO} + \text{NO}_2)\text{-Molenstrom zu Reaktionsbeginn}} \quad \text{Gleichung 2}$$

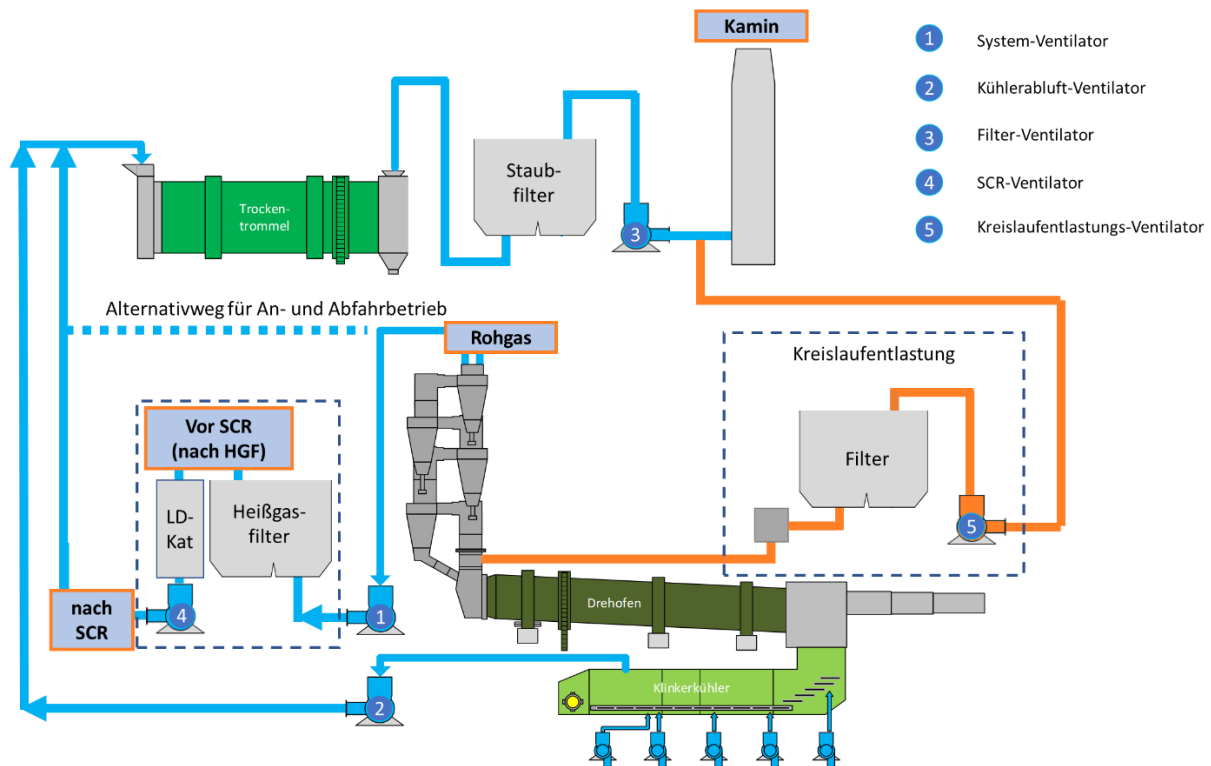
Die Berechnung des Molverhältnisses erfolgt anhand der Formel:

$$\text{NH}_3/\text{NO}_x\text{-Molverhältnis} = \frac{\text{NH}_3\text{-Molenstrom zu Reaktionsbeginn}}{(\text{NO} + \text{NO}_2)\text{-Molenstrom zu Reaktionsbeginn}} \quad \text{Gleichung 3}$$

Die Berechnung der NH<sub>3</sub>-Ausbeute erfolgt gemäß der Formel:

$$\text{NH}_3\text{-Ausbeute} = \frac{\Delta(\text{NO} + \text{NO}_2)\text{-Molenstrom (vor - nach Reaktion)}}{\text{NH}_3\text{-Molenstrom zu Reaktionsbeginn}} \quad \text{Gleichung 4}$$

Die vorgenannten Kenngrößen wurden bei allen Messreihen bestimmt. Im Folgenden **Bild 3-7** sind die jeweiligen Messstellen an der SCR-Anlage dargestellt.



**Bild 3-7** Messstellen der Abgaskomponenten zur Bestimmung von Minderungsraten, Molverhältnis und  $\text{NH}_3$ -Ausbeute (Messstellen im Rahmen des Messprogramms sind mit orangem Rahmen markiert)

Die jeweiligen  $\text{NO}_x$ -Konzentrationen im Abgas sowie der Sauerstoffgehalt an den Messstellen wurden durch kontinuierliche Messungen ermittelt. Alle erfassten Konzentrationen wurden unabhängig vom vorliegenden Sauerstoffgehalt auf einen Sauerstoffgehalt von 10 Vol.-% bezogen. (s. Erläuterung zum Sauerstoffbezug im **Anhang**).

Zur Berechnung des  $\text{NO}_x$ -Molenstroms bei Reaktionsbeginn bzw. -ende wurden die Messwerte (Mittelwerte der Konzentration über den jeweiligen Messzeitraum) der kontinuierlichen  $\text{NO}_x$ -Messungen vor Katalysator (nach Reduktionsmitteleindüsung und Heißgasfilter (HGF)) und am Austritt nach SCR verwendet. Messwerte, die in  $\text{mg/m}^3 \text{NO}$  oder  $\text{mg/m}^3 \text{NO}_2$  vorlagen, wurden in molare Werte umgerechnet. Der für die Berechnung des Molenstroms benötigte Volumenstrom in den jeweiligen Messzeiträumen und an den jeweiligen Messstellen wurde über die mittlere Abgasmenge im Rohgas nach Vorwärmer bestimmt.

Der  $\text{NH}_3$ -Molenstrom bei Reaktionsbeginn wurde entweder über eine kontinuierliche  $\text{NH}_3$ -Messung (Mittelwerte der Konzentration über den jeweiligen Messzeitraum) nach Heißgasfilter und vor SCR nach Reduktionsmittelzugabe oder Einzelmessungen ermittelt. Dadurch wurden sowohl die im Rohgas vorhandenen  $\text{NH}_3$ -Konzentrationen aus dem Rohmaterial als auch die eingedüste Harnstoffmenge berücksichtigt. Der Molenstrom aus Harnstofflösung (40 %) Reduktionsmitteleindüsung berechnet sich wie folgt:

$$\text{NH}_3\text{-Molenstrom} = \frac{\text{Reduktionsmittel in l/h} \times 0,4 \times \text{Dichte (Harnstofflsg.)} \times 1.000 \text{ g/kg} \times 2}{\text{Molare Masse Harnstoff (CO(NH}_2)_2)}$$

**Gleichung 5**

Dichte Harnstofflösung: 1,11 kg/l  
molare Masse  $\text{CO(NH}_2)_2$ : 60 g/mol

Der Faktor 2 zur Berechnung des  $\text{NH}_3$ -Molenstromes aus der zugegebenen Menge an Harnstofflösung ergibt sich dadurch, dass aus einem Molekül Harnstoff theoretisch zwei  $\text{NH}_2$ -Radikale für die Reaktion freigesetzt werden können.

Mit dem SCR-Verfahren kann erfahrungsgemäß ein nahezu vollständiger  $\text{NH}_3$ -Umsatz erreicht werden sofern genügend  $\text{NO}_x$  im Rohgas vorhanden und keine starke  $\text{NH}_3$ -Überdosierung vorliegt. Es können deshalb hohe Minderungsraten bei gleichzeitig niedrigem  $\text{NH}_3$ -Schlupf und gleichzeitig optimierter Anlagenfahrweise erzielt werden. Der Gesamtverbrauch an Reduktionsmittel kann aufgrund der Anlagenfahrweise leicht ansteigen.

### 3.3.3 $\text{NO}_x$ -Minderung, $\text{NH}_3$ -Umsatz und $\text{NH}_3$ -Schlupf

In der nachfolgenden **Tabelle 3-5** sind die berechneten Werte für  $\text{NO}_x$ -Minderung,  $\text{NH}_3$ -Umsatz und  $\text{NH}_3$ -Schlupf für die einzelnen Messkampagnen zusammenfassend dargestellt. Für eine übergreifende Gesamtbewertung muss berücksichtigt werden, dass, wie bereits in **Kapitel 3.2.2** beschrieben, die betrieblichen und technischen Randbedingungen bei den verschiedenen Messkampagnen leicht unterschiedlich waren. Dies betraf sowohl den Ofenbetrieb, die Dauer der einzelnen Messzeiträume und die zum Zeitpunkt der Messungen vorherrschenden  $\text{NO}_x$ - und  $\text{NH}_3$ -Ausgangsniveaus.

Dennoch ließen sich zusammenfassend folgende Erkenntnisse aus den Messreihen gewinnen:

- Bei unter- bis nahstöchiometrischem  $\text{NH}_3/\text{NO}$ -Molverhältnis betrug die  $\text{NO}_x$ -Minderungsrate im SCR-Katalysator zwischen ca. 50 und 75 %.
- Aufgrund des Umsatzes bei der Reduktion trat nur geringer  $\text{NH}_3$ -Schlupf auf.
- An einzelnen Messtagen wurden nach SCR auch  $\text{NO}_x$ -Konzentrationen unterhalb des Zielwerts von  $150 \text{ mg/m}^3$  (N. tr. bez. 10%  $\text{O}_2$ ) erreicht. Dies zeigt einerseits die technischen Möglichkeiten der Anlagentechnologie und zeugt von der hohen katalytischen Aktivität der Katalysatorelemente im Messzeitraum.

Das sind Ergebnisse, die man grundsätzlich auch bei anderen Drehofenanlagen der Zementindustrie bei Einsatz einer HGF-SCR erwarten könnte. Die jeweils anlagenspezifischen Ausgangsbedingungen können sich jedoch an verschiedenen Standorten, z. B. im Hinblick auf Temperaturprofil, Abgaszusammensetzung und Anlagenschaltung erheblich unterscheiden. Diese müssen daher bereits in der Anlagenplanung zwingend berücksichtigt werden.

Tabelle 3-5 NO<sub>x</sub>-Minderungsrate, NH<sub>3</sub>-Umsatz und NH<sub>3</sub>-Schlupf und NO<sub>x</sub>-Ausgangskonzentration bei allen Versuchseinstellungen der Messkampagnen

Messkampagne	Messkampagne 1 Juli 2022 (vor HGF-SCR-Inbetriebnahme)	Messkampagne 2 Dezember 2023	Messkampagne 3 Juni/August 2024	Messkampagne 4 Oktober 2024
Datum	05.07.2022 07.07.2022 28.07.2022	05.12.2023 06.12.2023 07.12.2023	11.06.2024 12.06.2024 13.06.2024 26.-27.08.2024	22.10.2024 23.10.2024 24.10.2024
Messzeitraum	09:00 - 16:00 08:30 - 16:30 13:00 - 20:00	09:30 - 16:00 08:30 - 17:00 08:00 - 16:30	11:30 - 16:30 08:00 - 16:00 08:00 - 16:00 17:00 - 12:00	12:00 - 24:00 00:00 - 24:00 00:00 - 24:00
NO <sub>x</sub> -Konz. vor SCR (Messkampagne 1: Rohgas) [mg NO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> ] N.tr. bez. 10% O <sub>2</sub>	345 340 380	348 327 231	458 405 396 448	589 590
NO <sub>x</sub> -Konz. nach SCR [mg/m <sup>3</sup> ] N.tr. bez. 10% O <sub>2</sub>	---	134 152 120	159 92 <sup>a)</sup> 32 <sup>a)</sup> 161	94 <sup>a)</sup> 124
NO <sub>x</sub> -Minderungsrate SCR gesamt [%]	---	62 52 54	65 77 92 65	85 79
NH <sub>3</sub> /NO <sub>x</sub> -Molverhältnis SCR gesamt [-]	---	---	0,81 1,18 1,18 0,69	1,25 0,85
NH <sub>3</sub> -Ausbeute SCR gesamt [%]	---	---	81 66 78 95	72 97
NH <sub>3</sub> -Konz. nach SCR (Messkampagne 1: Rohgas) [mg/m <sup>3</sup> ] N.tr. bez. 10% O <sub>2</sub>	18 <sup>b)</sup> 8 <sup>b)</sup> 53 <sup>b)</sup>	3 <sup>b)</sup> 11 <sup>b)</sup> 7 <sup>b)</sup>	45 <sup>b)</sup> 4 <sup>b)</sup> 4 <sup>b)</sup> 4	14 6 21

a) Die während dieses Messzeitraumes gemessenen NO<sub>x</sub>-Werte stellen eine Momentaufnahme unter günstigsten Betriebsbedingungen dar. Die bisherige Betriebserfahrung zeigt, dass eine dauerhafte Reproduzierbarkeit des im Versuchszeitraum ermittelten, niedrigen Niveaus nicht gewährleistet werden kann.

b) Nasschemisch bestimmt

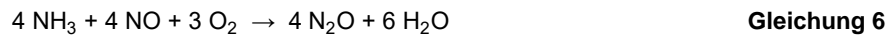
### 3.3.4 Verhältnis NO zu NO<sub>2</sub>

Das Verhältnis von NO zu NO<sub>2</sub> im Abgas von Drehofenanlagen der Zementindustrie beträgt üblicherweise ca. 95:5. Bei kontinuierlichen Messungen im Rahmen der 3. Messkampagne wurde dies bestätigt. Der NO<sub>2</sub>-Anteil betrug vor SCR etwa 4 % und wurde über den SCR-Katalysator auf etwa 3 % reduziert. Somit hat der SCR-Katalysator keinen Einfluss auf die Höhe des NO<sub>2</sub>-Anteils. Eine Bildung findet nicht statt.

### 3.4 N<sub>2</sub>O-Emissionen

Distickstoffmonoxid (N<sub>2</sub>O) kann beim Einsatz von Harnstoff zur NO<sub>x</sub>-Minderung als unerwünschtes Nebenprodukt gebildet werden. Nach Literaturangaben ist diese Nebenreaktion insbesondere bei Einsatz des SNCR-Verfahrens relevant, sofern das optimale Temperaturfenster für die NO<sub>x</sub>-Minderung nicht eingehalten wird. Ein SCR-Katalysator stellt die geeignete Minderungsmaßnahme dar, um dieser unerwünschten N<sub>2</sub>O-Bildung entgegenzuwirken.

Eine mögliche Reaktionsgleichung zur Bildung von N<sub>2</sub>O unter den Temperaturen im Vorwärmer (400 °C bis 900 °C) der Drehofenanlage lautet:



Die Umweltrelevanz von N<sub>2</sub>O liegt in seiner Wirkung als Treibhausgas. An Drehofenanlagen der Zementindustrie wird es nur in Ausnahmefällen gemessen, so dass praktisch keine Vergleichswerte dazu vorliegen.

Im Rahmen des UBA-Projekts wurden Vergleichsmessungen zur Ermittlung der N<sub>2</sub>O-Konzentrationen vor und nach der HGF-SCR-Anlage durchgeführt. In **Tabelle 3-6** sind die Ergebnisse dargestellt:

**Tabelle 3-6** Ergebnisse der N<sub>2</sub>O-Messungen an den Messstellen vor HGF-SCR und Reingaskamin während der durchgeführten Messkampagnen

	N <sub>2</sub> O-Konzentration in [mg/m <sup>3</sup> ]*	
	vor HGF-SCR (Messkampagne 1: Rohgas)	Reingaskamin
M1 (vor HGF-SCR Inbetriebnahme)	30	Messwerte unplausibel
M2	90	46
M3	92	34

\* Mittelwert aller Messtage

Bei der Bewertung der Messergebnisse ist zu beachten, dass die Messbedingungen an der Messstelle vor HGF-SCR nicht normkonform waren. Es lagen sehr hohe Staubgehalte vor, die auf dem Filter der Entnahmesonde abgeschieden wurden und möglicherweise einen Einfluss auf die Höhe des N<sub>2</sub>O-Messwertes hatten. Nicht vollständig auszuschließen ist, dass es während der Probenahme zu einer Artefaktbildung kam, die zu einer Bildung von N<sub>2</sub>O im Probenahmeweg geführt hat. Für die Bewertung sollten daher vorrangig die Messwerte im Reingaskamin herangezogen werden.

Eine Bildung von N<sub>2</sub>O in SCR-Anlagen findet nach Literaturangaben nicht oder allenfalls nur geringfügig statt [6], [7], sodass von keinem signifikanten Einfluss der HGF-SCR-Anlage auf die Konzentrationen an N<sub>2</sub>O auszugehen ist.

### 3.5 Einfluss auf weitere Abgaskomponenten

#### 3.5.1 Quecksilber

Quecksilbermessungen entlang des Abgasweges vom Vorwärmerausgang über die HGF-SCR-Anlage bis zum Kamin wurden im Rahmen der 1. bis 3. Messkampagne durchgeführt. Hierbei zeigte sich ein, für dieses Element, an Drehofenanlagen der Zementindustrie typisches Bild.

Das bei den Temperaturen vor HGF-SCR noch gasförmig vorliegende Quecksilber kondensiert bei der Abkühlung entlang des Abgasweges an Rohmaterialpartikeln aus und wird hierüber teilweise aus dem Ofensystem ausgeschleust. Die während der Messkampagnen im Reingaskamin diskontinuierlich gemessenen Quecksilber-Konzentrationen bestätigten die Messergebnisse der werkseigenen kontinuierlich betriebenen Quecksilbermesseinrichtung. Insgesamt bewegen sich die im Reingas der Drehofenanlage gemessenen Quecksilberkonzentrationen auf einem sehr niedrigen Emissionsniveau [1], im einstelligen  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ -Bereich.

Bereits aus früheren Untersuchungen [3], [4] an SCR-Katalysatoren ist bekannt, dass durch die am Katalysatormaterial ablaufenden Umwandlungsreaktionen u. a. auch die Bindungsform des Quecksilbers verändert werden kann. Elementares Quecksilber ( $\text{Hg}^0$ ), welches vor einem SCR-Katalysator gasförmig vorliegt, wird beim Durchgang durch die Katalysatorelemente größtenteils in oxidiertes Quecksilber ( $\text{Hg}^{2+}$ ) umgewandelt.

Aufgrund seines geringeren Dampfdrucks adsorbiert oxidiertes Quecksilber ( $\text{Hg}^{2+}$ ) beim Abkühlen im weiteren Abgasweg besser als elementares Quecksilber ( $\text{Hg}^0$ ) an Staub- und Rohmaterialpartikeln. Dies kann insgesamt zu einem geringeren Quecksilber-Emissionsniveau am Kamin führen, sofern eine effiziente Staubabscheidung erfolgt.

**Tabelle 3-7** Ergebnisse der Quecksilber-Messungen an den Messstellen vor HGF-SCR und Reingaskamin während der durchgeführten Messkampagnen

	Hg-Konzentration in [ $\text{mg}/\text{m}^3$ ]*	
	vor HGF-SCR (Messkampagne 1: Rohgas)	Reingaskamin
M1 (vor HGF-SCR Inbetriebnahme)	---	< 0,005**
M2	0,019	0,001**
M3	0,009 davon 44 % $\text{Hg}^{2+}$	0,002** davon 91 % $\text{Hg}^{2+}$

\* Mittelwert aller Messtage

\*\* kont. Werksmessung

Im Rahmen der 3. Messkampagne wurde eine Zunahme des Anteils an oxidiertem Quecksilber von 44 % auf 91 % gemessen. Der Emissionsgrenzwert für Hg von  $0,03 \text{ mg}/\text{m}^3$  (TMW) bzw.  $0,05 \text{ mg}/\text{m}^3$  (HMW) wurde mit deutlichem Abstand sicher eingehalten, die Werte lagen durchschnittlich unter  $0,005 \text{ mg}/\text{m}^3$  (N. tr. bez. auf 10%  $\text{O}_2$ ).

Aufgrund der grundsätzlich geringen Quecksilber-Ausgangskonzentration konnte ein zusätzlicher Entlastungseffekt aufgrund der Umwandlung der Bindungsform bislang nicht bestätigt werden.

#### 3.5.2 Kohlenstoffmonoxid

Bei allen Messkampagnen wurde die CO-Konzentration an verschiedenen Messstellen kontinuierlich gemessen. Eine Übersicht der Messergebnisse aus den Messkampagnen 1 bis 3 ist in **Tabelle 3-8** dargestellt. Es ist bekannt, dass es durch den unvollständigen Abbau von langkettigen Kohlenwasserstoffen in SCR-Katalysatoren zu einer leichten Zunahme an Kohlenstoffmonoxid kommen kann. Aufgrund der sehr geringen Gehalte an organischen Verbindungen im Vorwärmerabgas (siehe **Kapitel 3.5.4**) konnte dieser Effekt nicht beobachtet werden. Die gemessenen CO-Konzentrationen lagen auf einem

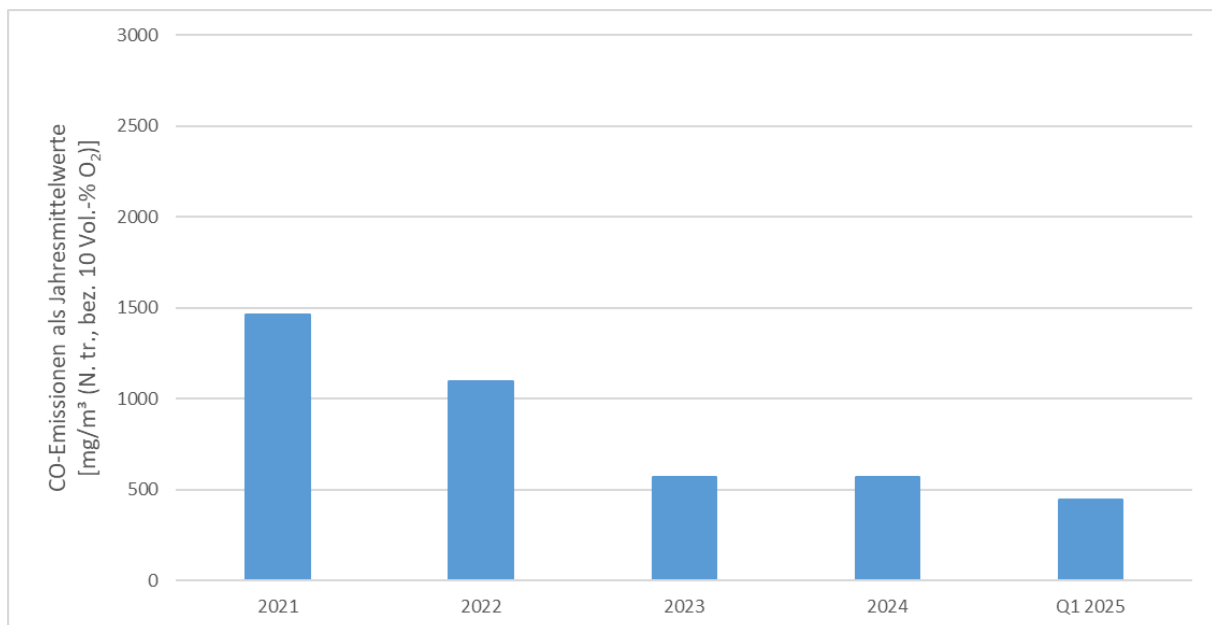
vergleichbaren Niveau, sodass von keiner wesentlichen Auswirkung der HGF-SCR-Anlage auf die Komponente ausgegangen werden kann.

Die durch die HGF-SCR-Anlage mögliche, optimierte Anlagenfahrweise (**Kapitel 3.1.2**) zeigt sich in einem positiven Effekt auf die Emission an Kohlenstoffmonoxid, die sich im langfristigen Vergleich der Jahresmittelwerte um etwa zwei Drittel verringert haben (**Bild 3-8**).

**Tabelle 3-8** Ergebnisse der CO-Messungen an den Messstellen vor HGF-SCR und Reingaskamin während der durchgeführten Messkampagnen

	CO-Konzentration in [mg/m <sup>3</sup> ]*	
	vor HGF-SCR (Messkampagne 1: Rohgas)	Reingaskamin
M1 (vor HGF-SCR Inbetriebnahme)	1959	1909
M2	1036	737
M3	403	458

\* Mittelwert aller Messtage



**Bild 3-8** Gemessenes CO-Emissionsniveau am Hauptkamin in den Jahren 2021 bis 2025 (Werksmessung)

### 3.5.3 Schwefeloxide

Aufgrund des schwefelarmen Rohmaterials wurden erwartungsgemäß nur sehr geringe Konzentrationen an Schwefeloxiden im Rohgas vor HGF-SCR sowie im Kamin bzw. nach HGF-SCR gemessen. Ein Einfluss der HGF-SCR auf die Schwefeloxid-Emissionen kann auf Grund der vorliegenden geringen Konzentrationen im Rohgas nicht festgestellt werden.

**Tabelle 3-9** Ergebnisse der SO<sub>2</sub>-Messungen an den Messstellen vor HGF-SCR und Reingaskamin während der durchgeführten Messkampagnen

	SO <sub>2</sub> -Konzentration in [mg/m <sup>3</sup> ]*	
	vor HGF-SCR (Messkampagne 1: Rohgas)	Reingaskamin
M1 (vor HGF-SCR Inbetriebnahme)	3,2	< 1,0**
M2	1,1	0,9
M3	1,2	1,2
M4	3,2	< 1,0**

\* Mittelwert aller Messtage

\*\* kont. Werksmessung

### 3.5.4 Gesamtkohlenstoff und organische Einzelverbindungen

Die Konzentrationen von Gesamtkohlenstoff (Gesamt-C) wurde im Rahmen der 1. Messkampagne im Rohgas und im Kamin sowie im Rahmen der 2. Messkampagne vor und nach dem HGF-SCR-Reaktor kontinuierlich gemessen.

Bereits vor Inbetriebnahme der HGF-SCR (M1) lag an der Drehofenanlage ein geringes Konzentrationsniveau an Gesamt-C von  $10 \text{ mg/m}^3$  (N. tr., bez. auf 10 Vol.-%  $\text{O}_2$ ) im Kamin vor. Durch den Einsatz der HGF-SCR-Anlage konnte eine Verringerung auf ein Emissionsniveau von  $3 \text{ mg/m}^3$  (N. tr., bez. auf 10 Vol.-%  $\text{O}_2$ ) beobachtet werden. Dies entspricht einem Abbau der Gesamt-C-Konzentration von ca. 70 %. Dieses Ergebnis bestätigt den im Rahmen von Messungen an anderen SCR-Anlagen der Zementindustrie ermittelten signifikanten Rückgang der Emissionen von organischen Verbindungen von 40 - 60 % [4] bzw. mehr als 70 % [3].

Zu berücksichtigen ist hierbei, dass dieser Abbau für die Zeitdauer des jeweiligen Versuchs ermittelt wurde und durch die Langzeitauswertung der kontinuierlich arbeitenden Werksmessung bestätigt werden muss. Die im Rohgas vor der HGF-SCR-Anlage gemessenen Werte sind aufgrund der schwierigen Messbedingungen (hohe Staubbelastung, ggf. Gasstrahlenbildung) an dieser Stelle nur bedingt aussagefähig. Insgesamt bestätigen sie das geringe Niveau organischer Emissionen an der Drehofenanlage.

**Tabelle 3-10** Ergebnisse der Gesamt-C-Messungen an den Messstellen vor HGF-SCR und Reingaskamin während der durchgeführten Messkampagnen

	Gesamt-C-Konzentration in $[\text{mg/m}^3]^*$	
	vor HGF-SCR (Messkampagne 1: Rohgas)	Reingaskamin
M1 (vor HGF-SCR Inbetriebnahme)	4**	10***
M2	2**	3***

\* Mittelwert aller Messtage

\*\* Werte aufgrund der schwierigen Messbedingungen (hohe Staubbelastung, ggf. Gasstrahlenbildung) nur bedingt aussagefähig

\*\*\* kont. Werksmessung

Bei den Messkampagnen M3 und M4 wurde die Gesamt-C-Messung aufgrund des vorliegenden niedrigen Emissionsniveaus nicht mehr ausgewertet.

#### 3.5.4.1 Benzol

Benzol kann bei der thermischen Zersetzung organischer Bestandteile des Rohmaterials im Vorwärmer von Drehofenanlagen der Zementindustrie entstehen. Die während der Messkampagnen 1 bis 3 im Rohgas / HGF-SCR sowie im Kamin gemessenen Konzentrationen an Benzol waren sehr gering. Dies war bereits aufgrund der insgesamt niedrigen Gesamt-C-Messergebnisse zu erwarten. Vor der Inbetriebnahme des HGF-SCR wurde im Kamin eine Emissionskonzentration von  $0,4 \text{ mg/m}^3$  (N. tr., bez. auf 10 Vol.-%  $\text{O}_2$ ) gemessen. Nach Einbau des HGF-SCR lagen alle Messwerte unterhalb der Bestimmungsgrenze des Messverfahrens.

Aus vorhergehenden Untersuchungen ist bekannt, dass bei Einsatz von SCR-Katalysatoren ein deutlicher Abbau von Benzol in den Katalysatorlagen erreicht werden kann. Im vorliegenden Fall wird auf die Angabe einer Minderungsrate aufgrund der insgesamt sehr niedrigen Messwerte verzichtet.

**Tabelle 3-11** Ergebnisse der Benzol-Messungen an den Messstellen vor HGF-SCR und Reingaskamin während der durchgeführten Messkampagnen

	Benzol-Konzentration in [mg/m <sup>3</sup> ]*	
	vor HGF-SCR (Messkampagne 1: Rohgas)	Reingaskamin
M1 (vor HGF-SCR Inbetriebnahme)	0,7	0,4
M2	<0,1	<0,1
M3	---**	<0,1

\* Mittelwert aller Messtage

\*\* keine Probenahme

### 3.5.4.2 Formaldehyd

Die Messungen von Formaldehyd lassen bei Vergleich der Messwerte im Reingaskamin ebenfalls auf eine Reduktion im SCR-Katalysator schließen. In der 2. und 3. Messkampagne wurden Abnahmen von im Mittel mehr als 60 % gemessen. Aufgrund der sehr geringen Konzentrationen von deutlich weniger als 1 mg/m<sup>3</sup> hat die Höhe der erreichten Minderungsraten jedoch keine hohe Aussagekraft. Dies gilt auch für eine vermeintliche Erhöhung der Konzentration während der ersten Messkampagne unter Berücksichtigung der schwierigen Messbedingungen (hohe Staubbelastung, ggf. Gasstrahlenbildung) im Rohgas/vor HGF-SCR.

**Tabelle 3-12** Ergebnisse der Formaldehyd-Messungen an den Messstellen vor HGF-SCR und Reingaskamin während der durchgeführten Messkampagnen

	Formaldehyd-Konzentration in [mg/m <sup>3</sup> ]*	
	vor HGF-SCR (Messkampagne 1: Rohgas)	Reingaskamin
M1 (vor HGF-SCR Inbetriebnahme)	0,5	1,8
M2	0,4	<0,1
M3	0,3	<0,1

\* Mittelwert aller Messtage

### 3.5.5 Hochtöxische organische Verbindungen

Durch Messungen vor und nach HGF-SCR wurde untersucht, ob der Katalysator zu einem Abbau von hochtoxischen organischen Verbindungen beiträgt. Die Messungen vor HGF-SCR erfolgten in Anlehnung an die geltenden Normen für Reingasmessungen.

Je nach Verbindungsklasse wurden unterschiedliche Effekte festgestellt, die nachfolgend zusammengefasst werden.

#### 3.5.5.1 Dioxine, Furane (PCDD/F) und dioxinähnliche PCB (dl-PCB)

Im Rahmen der Messkampagnen wurde gezeigt, dass im Rohgas der Drehofenanlage nur sehr geringe Konzentrationen an PCDD/F sowie dioxinähnlichen PCB enthalten sind. Aufgrund der hohen Staubgehalte im Rohgas sind die an dieser Stelle des Prozesses ermittelten Messwerte nur eingeschränkt zu bewerten. Insgesamt zeigt sich allerdings, dass die Analysenwerte der einzelnen Kongenere bis auf wenige Ausnahmen unterhalb der jeweiligen Bestimmungsgrenzen des Messverfahrens lagen.

Im Kamin, d. h. nach dem HGF-SCR-Katalysator wurden erwartungsgemäß ebenfalls nur noch sehr geringe Konzentrationen an PCDD/F und dl-PCB gemessen. Eine Übersicht der Messergebnisse ist in **Tabelle 3-13** dargestellt.

**Tabelle 3-13** Übersicht der Messungen von PCDD/F und dl-PCB

Messkampagne	Komponente	Vor HGF-SCR (Messkampagne 1: Rohgas)	Reingaskamin
M1 (vor HGF-SCR In- betriebnahme)	PCDD/F [ng TE/m <sup>3</sup> ]	0,019	0,0015
	dl-PCB [ng TE/m <sup>3</sup> ]	0,0094	0,00046
	Summe [ng TE/m <sup>3</sup> ]	0,028	0,0019
M2	PCDD/F [ng TE/m <sup>3</sup> ]	0,0065	0,0035
	dl-PCB [ng TE/m <sup>3</sup> ]	0,0033	0,00080
	Summe [ng TE/m <sup>3</sup> ]	0,0098	0,0043
M3	PCDD/F [ng TE/m <sup>3</sup> ]	0,0026	0,0015
	dl-PCB [ng TE/m <sup>3</sup> ]	0,00063	0,00073
	Summe [ng TE/m <sup>3</sup> ]	0,0032	0,0023

Das geschlossene System der HGF-SCR-Anlage hat keine Auswirkungen auf die Konzentrationen an Dioxinen, Furanen und deren Vorläuferverbindungen. Ggf. entstandene Verbindungen werden im SCR-Katalysator abgebaut. Die geltende Emissionsbegrenzung von 0,1 ng TE/m<sup>3</sup> wird deutlich unterschritten.

Eine Entstehung von hochtoxischen organischen Verbindungen in Form von Dioxinen und Furanen (PCDD/F) wurde während der Antragsphase als technisches Risiko zu diesem Vorhaben identifiziert, da das Heißgasfilter im Temperaturbereich der De-Novo-Synthese (250 °C - 400 °C [5]) arbeitet, in dem bei ausreichender Verweilzeit und dem Vorhandensein geeigneter Vorläufersubstanzen (dl-PCB nach WHO, PCBz, PCPh) eine Bildung von Dioxinen, Furanen möglich ist.

Aus diesem Grund wurde das Verhalten dieser Komponenten in den ersten drei Messkampagnen eingehend untersucht.

Die Messungen zeigten, dass im Rohgas der Drehofenanlage keine signifikanten Mengen an PCDD/F oder PCB vorhanden sind. Nach dem Heißgasfilter, vor Eintritt in den SCR-Katalysator wurden höhere Konzentrationen an PCDD/F und PCB gemessen, so dass bei den Temperaturen im Heißgasfilter in geringem Umfang eine Bildungsreaktion vorliegt. Durch die unmittelbare Kombination mit dem SCR-Katalysator findet dann unmittelbar ein effizienter Abbau der PCDD/F und PCB von über 98 % statt.

Diese Messergebnisse bestätigen die Erfahrungen aus vorhergehenden Projekten an SCR-Katalysatoren.

### 3.5.5.2 Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe

Für die Verbindungsklasse der polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAH) wurde durch den Einsatz des HGF-SCR ein Abbau mehr als 95 % festgestellt. Die Messwerte für Benzo[a]pyren lagen bei allen Messungen unterhalb der Nachweisgrenze.

**Tabelle 3-14** Ergebnisse der PAH-Messungen an den Messstellen vor HGF-SCR und Reingaskamin während der durchgeführten Messkampagnen

	PAH-Konzentration in [mg/m <sup>3</sup> ]*	
	vor HGF-SCR (Messkampagne 1: Rohgas)	Reingaskamin
M1 (vor HGF-SCR Inbetriebnahme)	97,2	40,5
M2	42,3	1,3
M3	15,3	1,6

\* Mittelwert aller Messtage

### 3.6 Begleitende Feststoffanalysen

Bei allen durchgeführten Messkampagnen wurden Staubmessungen im Rohgas vor HGF-SCR durchgeführt. Der Staubgehalt lag zwischen 50 und 60 g/m<sup>3</sup> (N. tr.) und damit am unteren Ende der für Vorwärmerdrehrohröfen typischen Konzentrationen (50 bis 100 g/m<sup>3</sup> (N. tr.)). Im Heißgasfilter wird der Staub nahezu vollständig abgeschieden. Aufgrund der Gegebenheiten vor Ort ist eine Bestimmung des Staubgehalts nach Heißgasfilter nicht möglich.

Darüber hinaus wurde der Ammoniumgehalt der bei den Messkampagnen beprobten Stäube und Mehle bestimmt, um den äußeren Ammoniumkreislauf zu untersuchen [5].

Dieser äußere Kreislauf wird beispielsweise durch Freisetzung von Ammoniumverbindungen aus dem Rohmaterial und dem Heißgasfilterstaub beeinflusst. Im Heißgasfilter und dem nachfolgenden Trockner werden gasförmige Ammoniumverbindungen (vor allem NH<sub>3</sub>) wieder am Staub bzw. Rohmaterial adsorbiert. Über den Heißgasfilterstaub bzw. die Rohmühle und das ermahlene Ofenmehl wird es anschließend wieder dem Ofen zugeführt. Bei der Aufheizung des Ofenmehls im Vorwärmer werden die Ammoniumverbindungen wieder desorbiert und gasförmiges Ammoniak wird über das Rohgas ausgelesen. Auf diese Weise kann sich ein externer Ammoniumkreislauf zwischen Vorwärmer, Heißgasfilter und Trockner/Rohmühle aufbauen. Wird dieser Ammoniumkreislauf nicht ausreichend entlastet (z. B. durch Ausschleusen von Abgasfilterstäuben), kommt es zu einer Anreicherung von Ammoniumverbindungen. Dadurch könnte eventuell die Verwertung von ausgeschleusten Stäuben, z. B. in der Zementmahlung, eingeschränkt werden, da die Produktqualität des Zements nicht beeinträchtigt werden darf.

Die Ergebnisse der durchgeführten Ammoniumbestimmungen sind in **Tabelle 3-15** zusammengestellt.

**Tabelle 3-15** Ergebnisse der NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-Bestimmungen an Stäuben und Ofenmehl und (Messkampagne 1-3)

Versuchszeitraum	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -Gehalt Ofenmehl [mg/kg]	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -Gehalt Filterstaub [mg/kg]	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -Gehalt HGF-Staub [mg/kg]
ØJuli 2022 (vor HGF-SCR Inbetriebnahme)	126 (124 - 127)	265 (233 - 283)	--- a)
ØDezember 2023	117 (116 - 120)	293 (293 - 316)	--- b)
ØJuni 2024	99 (95 - 103)	202 (133 - 247)	217 (195 - 254)

a) HGF-SCR-Anlage noch nicht in Betrieb

b) keine Probenahme möglich

Die Ammoniumkonzentrationen in Ofenmehl und Filterstaub lagen mit 126 und 117 mg/kg bzw. 265 und 293 mg/kg während der ersten beiden Messkampagnen auf einem vergleichbaren Niveau. Während der 3. Messkampagne lagen die Konzentrationen etwas niedriger, was auf einen weniger stark ausgeprägten äußeren Ammoniumkreislauf hindeutet.

### 3.7 Erfassung des elektrischen Energiebedarfs der HGF-SCR-Anlage

Für die Erfassung, Bilanzierung und Darstellung der Ergebnisse zum elektrischen Energiebedarf wurde die HGF-SCR-Anlage fiktiv in verschiedene Anlagenteile unterteilt.

Im Anlagenteil „Heißgasfiltration und Katalysator“ sind alle für den Betrieb von Heißgasfilter und SCR benötigten Verbraucher berücksichtigt. Dies deckt somit den Gasweg ab:

- Kompressoren zur Druckluftherzeugung für Filterabreinigung, Zerstäuberluft sowie Pumpen und Ventile der Harnstoffeindüsung vor SCR und der Abgaskonditionierung
- Prozessventilator, weitere Ventilatoren (Sperrluftgebläse), Klappen, Aufheizkreislauf SCR, Messeinrichtungen, sowie Filteraustragsschnecken unterhalb des HGF
- Aufheizkreislauf vor Heißgasübernahme

Hierzu ist anzumerken, dass aufgrund des im Werk OTTERBEIN befindlichen thermischen Verbundbetriebes zwischen Drehofenanlage und Rohmaterialtrockner erforderlich war, für die HGF-SCR-Anlage eine notwendige "Abgaskonditionierung" zu installieren. Dies war erforderlich, um die vom Anlagenlieferanten geforderte Temperaturbegrenzung im Eintritt der HGF-SCR-Anlage zu gewährleisten. Im **Kapitel 2.2**, unter **2. Abgaskonditionierung**, sind hierzu bereits Informationen gegeben.

Der Anlagenteil „Staubhandling“ beinhaltet alle für den Staubtransport relevanten Verbraucher:

- Kühlschnecke und Kühlaggregat nach Heißgasfilteraustragsschnecken sowie zugehörige Pumpen des Wasserkreislaufes,
- Entstaubungen/Belüftungen im Bereich Wiegebehälter, Dosierschieber, Zellenradschleuse und Durchflussmessung
- Kompressoren zur Druckluftherzeugung für den pneumatischen Transport des HGF-Staubes zum Wärmetauscherturm oder zum Filterstaubsilo

Hierzu ist anzumerken, dass die technische Ausführung des gesamten Staubtransports von den Filteraustragsschnecken beginnend, für ZKW OTTERBEIN aufgrund der beengten Platzverhältnisse im Werk, diese unter Inkaufnahme von zu akzeptierenden Nachteilen zu konzipieren und auszuführen war. Im **Kapitel 4.2** (Lessons Learned) soll darauf näher eingegangen werden.

Im Anlagenteil „Allgemeines“ wird die Belüftung des Filter-Penthouses, sowie des Kompressorraumes abgedeckt.

## 4 Betriebssicherheit und Verfügbarkeit der Anlage

Die Betriebssicherheit und Verfügbarkeit der HGF-SCR-Anlage sind entscheidende Faktoren für die Wirtschaftlichkeit und den nachhaltigen Betrieb. Im Rahmen des Projekts wurden die maßgeblichen Laufzeiten und Betriebsstörungen von Beginn der Erstinbetriebnahme der Anlage kontinuierlich aufgenommen, bewertet und entsprechende Verbesserungen mit dem Anlagenlieferanten umgesetzt. Im **Kapitel 4.2** (Lessons Learned) soll darauf näher eingegangen werden.

### 4.1 An- und Abfahrvorgänge

Zum Schutz der HGF-SCR-Anlage müssen bestimmte Vorkehrungen getroffen werden. Dazu zählt u. a., dass bei einem Kaltstart der Anlage diese nicht unmittelbar mit Heißgas beaufschlagt werden kann. Der Katalysator würde einem Thermoschock unterliegen, welcher zu einem Schaden führen könnte. Um den Katalysator auf Betriebstemperatur zu bringen, ist zuvor ein Aufheizkreislauf mittels elektrisch vorgewärmter Luft (siehe hierzu nachfolgendes **Bild 4-2**) mit entsprechenden Temperaturvorgaben zu betreiben. Die Gasübernahme ist bei einer Gastemperatur nach Katalysator von 150 °C möglich. Im praktischen Betrieb hat es sich bewährt den Aufheizkreis 48 Stunden vor geplanter Heißgasübernahme zu starten.

Aufgrund des Feuchtegehalts des Rohgases aus dem Vorwärmer, muss außerdem sichergestellt werden, dass im Gasweg keine Kondensationsprozesse durch „noch“ kalte Oberflächen der Anlagentechnik stattfinden. Nach Abfahren darf auch kein feuchtes Rohgas im System verbleiben.

Hat der Katalysator die erforderliche Betriebstemperatur erreicht, wird das Rohgas aus dem Wärmetauscher durch Umstellen der Absperrklappen (A, B und C in **Bild 2-1** in **Kapitel 2.2**), vor und nach der HGF-SCR-Anlage auf die Anlage übernommen und der Direktweg zum existierenden Rohmaterial-Trockner wird mittels Klappe versperrt. Im Vorfeld der Heißgasbeaufschlagung sind u. a. alle relevanten Staubtransporte sowie die erforderlichen Aggregate der Filterabreinigung zuzuschalten.

Der Abfahrvorgang der HGF-SCR-Anlage entspricht der umgekehrten Klappenverstellung, Öffnung des Direktweges zum Rohmaterial-Trockner und anschließendes Sperren der Klappen vor und nach der HGF-SCR-Anlage.

### 4.2 Anlagentechnische Herausforderungen (Lessons Learned)

Zu den anlagentechnischen Herausforderungen zählen insbesondere die Absperrorgane, die jederzeit in voller Funktion mit geforderter Dichtheit zum Einsatz kommen müssen. Diese Absperrorgane dienen der sicheren Abschottung der HGF-SCR-Anlage von der in Betrieb befindlichen Drehofenanlage, so dass kurzfristig notwendig anstehende Wartungsarbeiten und/oder Inspektionen über geeignete Kontrollöffnungen vom Wartungspersonal auch an der Anlage durchgeführt werden können. Ein wesentlicher Punkt ist hierbei, dass in der Planungsphase schon darauf zu achten ist, dass für gewisse Wartungsarbeiten, wie z. B. das Austauschen von verschleißträchtigen Dichtungen, Klappenteilen oder Ähnlichem immer ausreichend Platz bemessen wird, um diese Tätigkeiten effizient und zügig durchführen zu können. Sollten die räumlichen Verhältnisse es zulassen, sollte auch gegebenenfalls eine weitestgehende hermetische Abriegelung eines Anlagenteils über dichtschießende Schieber in Erwägung gezogen werden. Klappen, die mittels Sperrluftgebläse abgedichtet werden, sollten jeweils separate Sperrluftgebläse zwecks Vermeidung gegenseitiger Beeinflussungen aufweisen.

Periphere Einrichtungen, wie z. B. weiterführende Staubtransporte und gegebenenfalls notwendige Siloräume zum Abpuffern von Staub sollten kürzere Störungen an diesen Einrichtungen überbrücken können, so dass kleinere Unterbrechungen / Störungen im peripheren Umfeld keinen nachteiligen Einfluss auf die Verfügbarkeit der Gasreinigung haben. Wie bereits unter **Kapitel 3.7** zum Anlagenteil „Staubhandling“ aufgeführt hat die räumliche Enge bzgl. der Anlagenaufstellung zu in Kauf zunehmenden

Nachteilen bzw. einzugehenden Kompromissen geführt (siehe hierzu **Bild 4-1**). Hierzu zählen u. a. beispielhaft genannte energieintensive pneumatische Transportsysteme, welche anstelle möglicher energiesparender mechanischer Transporte nur in Frage kommen konnten.



**Bild 4-1** Begrenzungen durch Silos und Transportband und Entfernung zur Abgasleitung des Ofens

Darüber hinaus mussten auf engstem Raum alle anlagentechnisch benötigten Verbindungen in Form von Schurren und Leitungen für Silo, Entstaubungen, Transporte, etc. dargestellt werden. Diese räumliche Enge hat zu einer nachvollziehbaren Komplexität geführt, die gerade im Hinblick auf notwendige Optimierungsmaßnahmen hinderlich war und zusätzliche Maßnahmen erforderlich machte. Neben dem zeitlichen Aufwand entsprechende Maßnahmen zügig umzusetzen, mussten auch aufwendige und zeitverzögernde Planungen im Bereich des Stahlbaus für notwendige Erweiterungen nachzurüstender Entstaubungen erfolgen bzw. noch hingenommen werden. Im nachfolgenden **Kapitel 4.6** (Beurteilung der Verfügbarkeit) finden sich hierzu weitere Ausführungen.

Bzgl. der anlagentechnischen Herausforderungen (Lessons Learned) gilt entsprechend der bislang gewonnenen Erkenntnisse festzuhalten, dass die Herausforderungen weniger im Bereich der neuartigen technischen Entwicklungen lagen, wie zunächst erwartet. Techniken, die gemäß dem bekannten Stand der Technik im Bereich des Anlagenbaus auch dem entsprechen sollten, haben zu Problemen geführt, die zu großen Verzögerungen geführt haben und auch jetzt erst zum Ende des Jahres 2025 behoben sein werden. Die Herausforderungen, so das Resümee, waren oder sind leider eher in altbewährten Techniken zu finden. Abgesehen von räumlichen Platzzwängen, die zwangsläufig zu größerer Komplexität führen, um alle Prozesse ohne entsprechende Puffer- oder Raumreserven zu ermöglichen, erscheinen die bereits bekannten Techniken in der Auslegung der HGF-SCR-Anlage und ihrer notwendigen Peripherie weniger Aufmerksamkeit erfahren zu haben.

Dies gilt für anlagentechnische Details, stellvertretend dafür, wie z. B. Rohrleitungen für staubbeladene Gasströme zu führen sein sollten ohne, dass es zu Ablagerungen oder schubweise Staubbeförderung kommt und wie z. B. Staubbiosierungen und Puffer-/Siloanlagen grundsätzlich zu entstauben bzw. technisch richtig zu belüften sind. Zu weiteren Details verweisen wir auf **Kapitel 6.1** (Wesentliche Maßnahmen).

Neben den anlagentechnischen (Hardware) Aspekten gab es auch Aspekte im Bereich des Projektmanagements, letztendlich der Begleitung eines Projekts durch den Anlagelieferanten. Stellvertretend

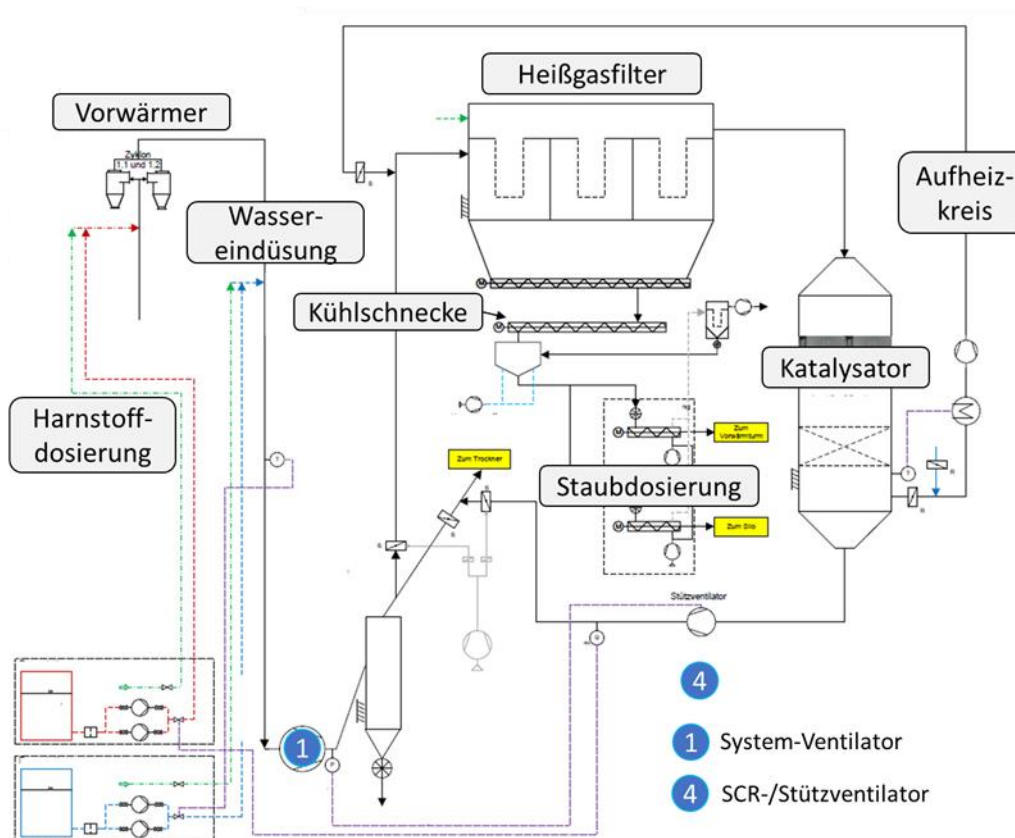
hierfür ist der Bereich einer effektiven Schwachstellenanalyse aufzuführen. Eine projektbegleitende Umsetzung ist dringlichst einzuplanen, wobei das Procedere zur zeitnahen Ergebnis-Umsetzung sicherzustellen ist.

### 4.3 Inbetriebnahme und Betriebserfahrungen

Die Inbetriebnahme gliederte sich in eine Kalt- und in eine Warminbetriebnahme mit Heißgasübernahme. Im Rahmen der Kaltinbetriebnahme wurden die elektrischen und mechanischen Abläufe geprüft sowie die korrekte Funktion sichergestellt.

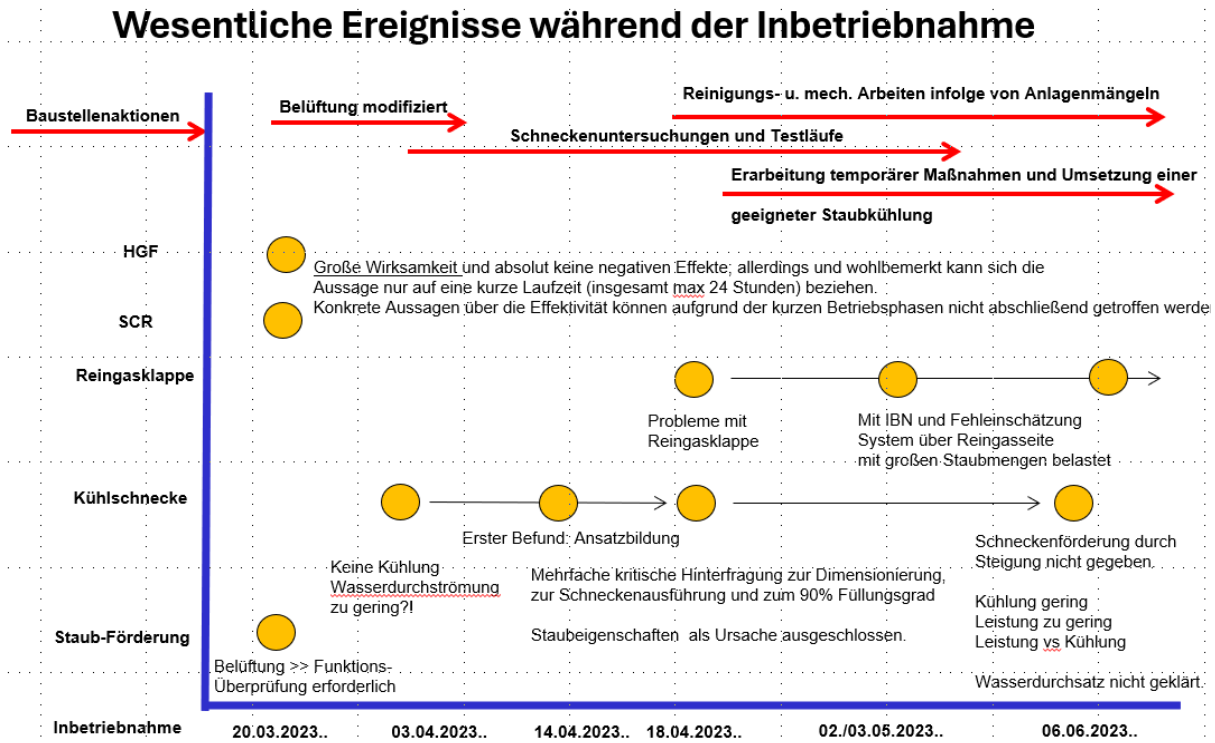
Die Warminbetriebnahme mit Heißgasübernahme erfolgte nach dem Umschluss mit der Ofenreise im März 2023.

Das Prozess-Flow Sheet ist im nachstehenden **Bild 4-2** dargestellt und soll für weitere Ausführungen bezüglich der Betriebserfahrungen immer wieder herangezogen werden.



**Bild 4-2** Flowsheet der HGF-SCR-Anlage

Die erste Gasübernahme erfolgte am 20.03.2023, wobei sich die Inbetriebnahme des in der Projektphase konzipierten Systems schwierig gestaltete. Dem nachfolgenden **Bild 4-3** sind Erläuterungen hierzu zu entnehmen.



**Bild 4-3** Auszug aus dem Inbetriebnahme-Tagebuch

Der Übergang in den Dauerbetrieb, d. h. in den regulären “Produktionsbetrieb”, erfolgte am 30.09.2023, wobei die Zielsetzungen hinsichtlich der nominalen Drehofenleistung noch nicht erfüllt werden konnten.

Verschiedene anlagentechnische Maßnahmen sind mit dem Anlagenlieferanten im Rahmen der Inbetriebnahme erfolgreich durchgeführt worden. Weitere anlagentechnische Maßnahmen sind bereits vereinbart. Hierzu zählen im Wesentlichen der Austausch der Kühlturbine und die Erweiterung der Be- und Entlüftungen für die Entstaubungen im Bereich des Staubhandlings. Diese Maßnahmen werden voraussichtlich bis zum 4. Quartal 2025 erfolgen, sofern alle planungstechnischen Vorarbeiten erfolgt und die Material-Lieferengpässe beseitigt sind. In **Kapitel 6** (Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die Branche) werden die technischen Herausforderungen, die Maßnahmen und die Ursachen näher erläutert.

Verlässliche Aussagen zu den Betriebserfahrungen mit der neu gestalteten Gasreinigung HGF-SCR können dennoch bereits jetzt abgegeben werden. Die während der Inbetriebnahme aufgetretenen und zum Teil anhaltenden Störungen betreffen verschiedene periphere Funktionsbereiche der HGF-SCR-Anlage. Diese haben jedoch keinen unmittelbaren Einfluss auf die eigentliche Technologie des neu entwickelten Systems zur Abgasreinigung.

#### 4.4 Ermittlung der Verfügbarkeit

Die Berechnung der Verfügbarkeit erfolgt anhand der Heißgasübernahme auf das Heißgasfilter. Ab Zeitpunkt der Gasbeaufschlagung ist die Anlage in Betrieb.

Daraus ergeben sich die Betriebsstunden der Anlage. Die Verfügbarkeit der HGF-SCR-Anlage wird relativ zur Drehofenverfügbarkeit nach **Gleichung 7** berechnet, da die Anlage nur läuft, wenn auch der Drehofen läuft.

$$\text{Verfügbarkeit HGF-SCR} = \frac{\text{Betriebszeit Gasübernahme HGF-SCR}}{\text{Betriebszeit Drehofen}}$$

**Gleichung 7**

Die Verfügbarkeit der Anlage über den gesamten Projektzeitraum ist in der folgenden **Tabelle 4-1** dargestellt.

**Tabelle 4-1** Verfügbarkeit der HGF-SCR-Anlage

Jahr	Verfügbarkeit der HGF-SCR-Anlage <sup>7</sup>	Verfügbarkeit der HGF-SCR-Anlage gewichtet kumuliert <sup>8</sup>	Grund für reduzierte Verfügbarkeit
Q1 - 2023 (ab März)	3 %	3 %	Inbetriebnahme
Q2 - 2023	13 %	10 %	Kühlschneckenkapazität
Q3 - 2023	52 %	29 %	Staubhandling Modifikation Kühlschnecke
Q4 - 2023	96 %	46 %	
Durchschnitt 2023	46 %		
Q1 - 2024	98 %	98 %	Staubhandling Umbau Kühlschnecke
Q2 - 2024	95 %	96 %	
Q3 - 2024	88 %	93 %	Modifikation an Staubhandling/ Kühlschnecke
Q4 - 2024	90 %	92 %	
Durchschnitt 2024	92 %		
Q1 - 2025	96 %	96 %	
Durchschnitt 2025	96 %		

Der anfängliche Betrieb der HGF-SCR-Anlage unterlag starken Schwankungen. Es kam aus mehreren Gründen immer wieder zu Störungen des Anlagenbetriebs. Durch wiederholte Anpassungsarbeiten an der Anlage, kann zwischenzeitlich ein stabiler Betrieb der HGF-SCR gewährleistet werden. Deren Verfügbarkeit wurde allein durch Schwierigkeiten in nachgelagerten Bereichen beim Abtransport des ausgeschleusten Filterstaubs beeinträchtigt.

Die Verfügbarkeit der Gasreinigung selbst liegt im betrachteten Zeitraum bei annähernd 100 % der Drehofenbetriebszeit (exklusive An- und Abfahrvorgängen, sowie Stillstandszeiten von peripheren Anlagenteilen). Die reduzierte Verfügbarkeit im Jahr 2024 von ca. 92 % kann auf Störungen der peripheren Einrichtungen zurückgeführt werden. Diese Punkte werden kontinuierlich weiter verbessert und zeigen im laufenden Jahr 2025 bereits deutlichen Erfolg. Die kumuliert gewichtete Verfügbarkeit beschreibt die Verfügbarkeit der HGF-SCR-Anlage, gewichtet mit den zu den jeweiligen quartalsbezogenen Betrachtungszeitpunkten aufgelaufenen realen Betriebszeiten.

#### 4.5 Beurteilung der technischen Risiken aus der Vorüberlegung

Vor Projektbeginn wurde eine Analyse potenzieller technischer Risiken durchgeführt, die einen möglichen Einfluss auf die Verfügbarkeit der Anlage haben könnten.

Hierzu wurden durch den Anlagenlieferanten Scheuch im Hinblick auf die Risiken der Heißgasfiltration umfangreiche Voruntersuchungen und Überlegungen zu den Themen

- mechanischer Bruch
- übermäßiger Verschleiß durch die Staubbeaufschlagung
- Belegung mit Staub
- Verstopfung oder Verschließung der „Poren“

<sup>7</sup> Quotient der Betriebsstunden HGF-SCR-Anlage bezogen auf Betriebsstunden der Drehofenanlage im Quartal

<sup>8</sup> Quotient der Betriebsstunden HGF-SCR-Anlage bezogen auf Betriebsstunden der Drehofenanlage kumuliert im Kalenderjahr

der keramischen Kerze durchgeführt. Weiterhin konnten erste Erfahrungen aus anderen, bereits umgesetzten Projekten des Anlagenlieferanten, im Bereich der Kühlerabluft in Österreich mit genutzt werden. Nachfolgend werden die vor Projektbeginn entwickelten Einschätzungen zu den möglichen Risiken abschließend bewertet. Die allgemeinen Hinweise zur Planung von Heißgasfiltern der VDI-Richtlinie 3677 Bl. 3 [8] werden dabei im Grundsatz bestätigt.

### **Mechanischer Bruch der Kerzen**

Da ein Kerzenbruch grundsätzlich nicht ausgeschlossen werden kann (Kerze ist ähnlich einem Filterschlauch als Verschleißteil zu betrachten) ist der Filter mit reingasseitig angeordneten Absperreinrichtungen (Tellerventilen) ausgestattet. Diese erlauben es, Teilbereiche des Filters im Falle plötzlich auftretender Kerzenschäden außer Betrieb zu nehmen. Damit wird ein Staubdurchtritt verhindert und die Anlage kann bis zum nächsten geplanten Stillstand weiter betrieben werden. Mittels eines reingasseitig montierten Staubwächters wird der Zustand des Heißgasfilters permanent überwacht.

Das System hat sich bewährt, wobei es im regulären Betrieb bisher nur zu zwei Kerzenbrüchen gekommen ist. Ein größerer Schaden von ca. 25 gebrochenen Kerzen wurde zu Beginn der Inbetriebnahme durch einen Bedienungsfehler, u. a. im Zusammenhang mit den nicht dichtschießenden Absperrklappen, festgestellt.

### **Verschleiß durch Staub (Korrosion, Erosion)**

Bei den bislang im Einsatz befindlichen keramischen Filterelementen („Filterkerzen“) konnte kein Verschleiß an den Kerzen beobachtet werden.

Bei der Konstruktion und Auslegung des Filters wurde im Besonderen darauf geachtet, dass es zu keinen hohen Filtermittelanströmgeschwindigkeiten oder einer Staubstrahlenbildung kommt. Korrosive Erscheinungen wurden bis heute nicht festgestellt.

### **Belegung mit Staub sowie Möglichkeit der dauerhaften Abreinigung**

Die Kerzen werden in Abhängigkeit des Differenzdrucks mittels Druckluftimpulsen zuverlässig und betriebssicher abgereinigt. In der Entwicklungsphase wurde speziell auf die Regeneration der Filterelemente Augenmerk gelegt. Der Betrieb ist im Berichtszeitraum (März 2023 bis März 2025) zuverlässig gegeben und es konnten bzgl. des Filterdifferenzdrucks und den Druckluftimpulsen keine Ungleichmäßigkeiten festgestellt werden.

### **Vorschreitende Verstopfung/Verklebung/Verschließung der Poren**

Es konnte kein Eindringen des Staubes in das Kerzenmaterial beobachtet werden. Das deckt sich mit den Erfahrungen des Anlagenbauers aus anderen bislang realisierten Heißgasfilter-Projekten

Somit kam es bisher zu keinen Verstopfungen / Verklebungen oder Verschließen des Kerzenmaterials. Es wird davon ausgegangen, dass der Differenzdruckverlauf somit weiterhin weitestgehend stabil bleibt, auch über die nächsten Jahre.

### **Tausch von Katalysatorelementen**

Es kam während der bisherigen Betriebszeit zu keiner Störung durch mechanisch gebrochene Katalysatorelemente. Ein Tausch von Katalysatorelementen war daher nicht erforderlich.

Bei abnehmender katalytischer Aktivität können in einer – baulich bereits vorgesehenen – zweiten Ebene weitere Katalysatorelemente eingebracht werden, um die Abgasminderung weiterhin zu gewährleisten.

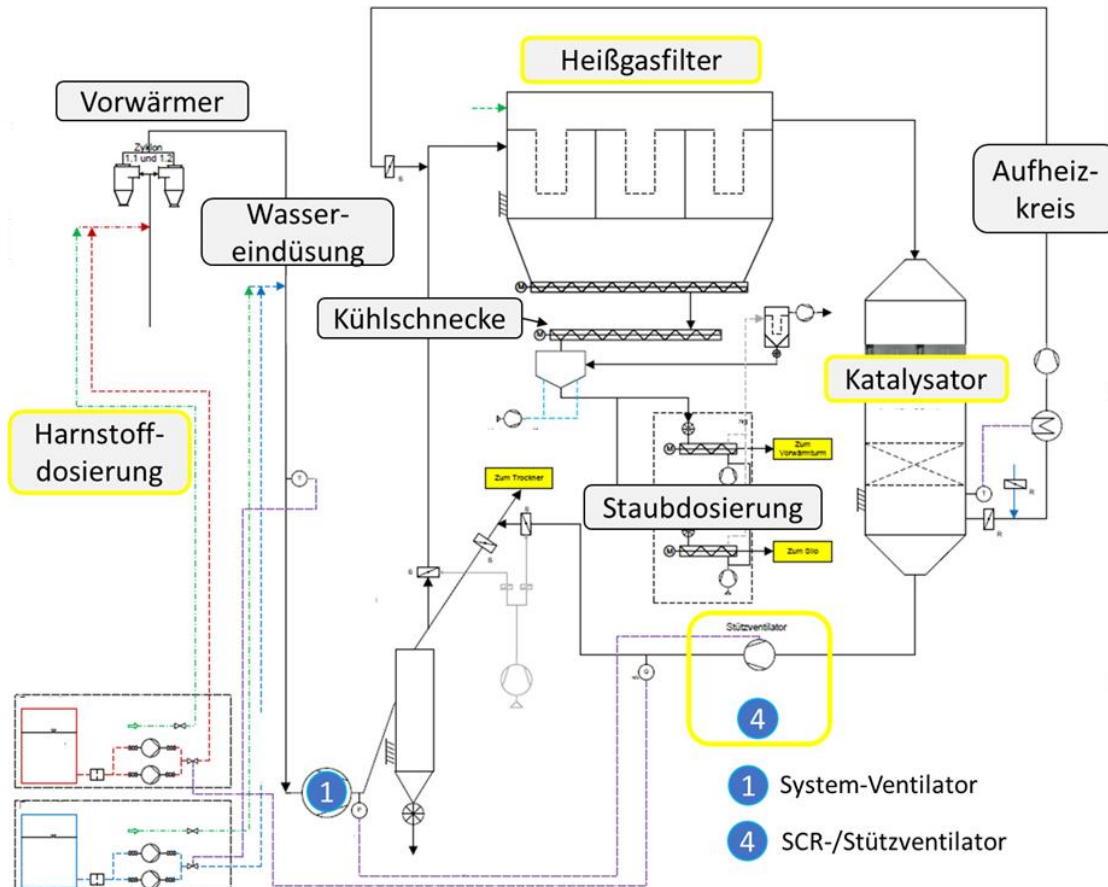
## Tausch von Heißgasfilterkerzen

Seit der Erstinbetriebnahme der Anlage im März 2023 kam es zu vereinzelt Kerzenbrüchen, welchen mit einem unmittelbaren Tausch der betreffenden Filterkerzen begegnet wurde. Ein Betrieb mit defekten Filterkerzen führt zu einer Beladung mit Staub auf den Katalysatorelementen. Kerzenbrüche können über die eingebaute Filterkerzenbruchüberwachung (Überwachung des Filterdifferenzdrucks in Verbindung mit den Druckluftimpulsen) zuverlässig detektiert werden.

Die Kerzenbrüche (s. a. **Kapitel 5.3**) können derzeit keinen direkten Ursachen zugeordnet werden. Berücksichtigt werden muss allerdings, dass es zu Beginn der Inbetriebnahme in 2023 infolge einer Fehlbedienung während einer Anlagenstörung zu erheblichen Staubeinträgen auf der Reingasseite gekommen ist und aufwendige Staubabsaugungen aus den Kerzen heraus notwendig wurden. Es bleibt zu vermuten, dass die Filterkerzen mit dem eingeführten Absaugschlauch übermäßig mechanisch beansprucht und vorgeschädigt worden sind. Ein Indiz auch dafür könnte sein, dass diese Kerzen einen Ausbruch zum Ende der Kerzen („Kerzenboden“) aufweisen und der Bruch nicht von der oben angeordneten Befestigung („Kragen“) ausgegangen ist.

## 4.6 Beurteilung der Verfügbarkeit

Die Verfügbarkeit der HGF-SCR-Anlage betrug im Jahr 2024, wie in **Kapitel 4.4** beschrieben, 92 %, erreicht im Jahr 2025 bereits 96 %. Der Zielwert von 98 % konnte aus verschiedenen Gründen nicht erreicht werden. Die Ursachen hierfür sind vielfältig und sollen im Nachfolgenden erläutert werden. Hierzu dient das folgende Schema der Gesamtanlage in **Bild 4-4**. Die Bezeichnungen wurden analog **Bild 4-2** in **Kapitel 4.3** vorgenommen.



**Bild 4-4** Flowsheet der HGF-SCR-Anlage

Zur Bewertung der Verfügbarkeit der eigentlichen Gasreinigung der HGF-SCR-Anlage sollten die in **Bild 4-4** gelb markierten Anlageneinrichtungen herangezogen werden. Die weiteren Einrichtungen sind für den erfolgreichen Betrieb zwingend erforderlich, dennoch zählen diese zu den peripheren Einrichtungen und sind jeweils abhängig von den werksspezifischen Rahmenbedingungen.

Die drastisch reduzierte Verfügbarkeit der HGF-SCR-Anlage im Jahr der Inbetriebnahme 2023 war nahezu ausschließlich auf diese peripheren Einrichtungen zurückzuführen, die nicht direkt der Gasreinigung zuzuordnen sind. Erst zum Ende des Jahres 2023 konnte die Verfügbarkeit durch anlagentechnische Verbesserungen erfolgreich erhöht werden, wobei zum Berichtszeitpunkt noch immer nicht alle Maßnahmen umgesetzt werden konnten. Auch muss festgehalten werden, dass die Störungen an den peripheren Einrichtungen nicht auf den Einsatz von sogenannten Prototypen, sondern auf nicht zu erwartende Probleme an Anlagenkomponenten, die nach dem Stand der Technik konzipiert sein sollten, zurückzuführen waren.

Mit Hilfe der nachfolgenden **Tabelle 4-2** sollen detaillierte Einblicke bezüglich der nicht erwartbaren Probleme und der erforderlichen Maßnahmen/Aktivitäten chronologisch ermöglicht werden. Darüber hinaus werden auch weitere Ausführungen zu den Maßnahmen im **Kapitel 6.1** „Technische Herausforderungen“ gegeben.

**Tabelle 4-2** Übersicht der Maßnahmen zur Verbesserung der Anlagenverfügbarkeit

Zeitraum	Maßnahmen
1. HJ 2023	Absperrklappen vor nach HGF-SCR-Anlage
	Staubhandling nach HGF-SCR-Anlage (Staubförderung nach Kühlschnecke)
	Kühlschneckenkapazität
2. HJ 2023	Staubhandling nach HGF-SCR-Anlage
	Modifikation der Kühlschnecke
1. HJ 2024	Staubhandling nach HGF-SCR-Anlage
	Umbau der Kühlschnecke
2. HJ 2024	Weitere Modifikation der Kühlschnecke
	Fortlaufende Modifikationen am Staubhandling nach HGF-SCR-Anlage
1. HJ 2025	Entscheidungsfindung für nochmaligen Umbau der Kühlschnecke und Erweiterung des Staubhandlings nach HGF-SCR-Anlage
2. HJ 2025	Voraussichtliche Inbetriebnahme der neuen Einrichtungen (Staubkühlung und -handling)

## 5 Wirtschaftlichkeit

Im Folgenden werden die Investitions- und Betriebskosten der Anlage dargestellt und bewertet. Aufgrund der Innovation in Bezug auf keramische Filterkerzen soll hier eine Bewertung der Kosten der Katalysatorelemente, der keramischen Kerzen, sowie der Wartungskosten abgegeben werden.

Die Betriebskosten lassen sich in folgende Gruppen einteilen:

- Kosten und Ersatz der Katalysatorelemente
- Kosten und Ersatz der keramischen Filterkerzen
- Elektrischer Energiebedarf der Anlage
- Kosten für Reduktionsmittel

### 5.1 Investitionskosten

Die Investitionskosten der HGF-SCR-Anlage bei den ZKW OTTERBEIN betragen insgesamt ca. 6.300.000 €.

### 5.2 Ersatz der Katalysatorelemente

In den ersten beiden Betriebsjahren war kein Austausch der Katalysatorelemente notwendig.

Die vom Hersteller prognostizierte Standzeit in Bezug auf die Aktivität der Katalysatorelemente liegt bei 6 Jahren.

### 5.3 Ersatz HGF-Kerzen

In den Jahren 2023, sowie 2024 wurden insgesamt 25 (~ 2 %) Heißgasfilterkerzen getauscht. Eine der Ursachen hierfür lag in einer Fehlbedienung der Anlage im Rahmen der Inbetriebnahme, wodurch ein Staubeintritt auf Reingasseite des Heißgasfilters resultierte. Bei der Reinigung der Reingasseite der Heißgasfilterkerzen kam es zu mehreren Kerzenbrüchen. Abgesehen von diesem einmaligen Ereignis, war während des regulären Anlagenbetriebs nur der Wechsel zweier Kerzen erforderlich.

Die prognostizierte Standzeit der Filterkerzen liegt bei 5 Jahren (Zielgröße: 7 Betriebsjahre).

### 5.4 Elektrischer Energiebedarf

Der Betrieb der Anlage ist mit einem Mehrverbrauch an elektrischer Energie für die Klinkerproduktion verbunden. Der elektrische Energiebedarf der HGF-SCR-Anlage ist in **Tabelle 5-1** dargestellt. Die Berechnung erfolgte entsprechend der in **Kapitel 3.7** beschriebenen Systematik.

**Tabelle 5-1** Energieverbrauch der einzelnen Anlagenbereiche der HGF-SCR-Anlage

Anlagenteil	Spezifischer Energiebedarf [kWh/t Klinker]
Heißgasfiltration/Gasweg	9,7
Harnstoffeindüsung	<0,1
Abgaskonditionierung	0,2
Allgemeines	0,2
<b>Summe Gasreinigung</b>	<b>10,2</b>
Staubhandling <sup>9</sup>	5,1
<b>Summe gesamt</b>	<b>15,3</b>

<sup>9</sup> Notwendiger Bedarf in Folge der standortspezifischen Rahmenbedingungen

Hierbei zu berücksichtigen ist, dass der spezifisch höhere Bedarf an elektrischer Energie im Vergleich zu anderen katalytischen Reduktionsverfahren durch die Größe der Drehofenanlage beeinflusst ist. Überdies ging der Anlagenbetrieb mit dem gewählten Anlagenkonzept im Betrachtungszeitraum über die sichere Erreichung der Emissions-Grenzwerte hinaus, was einen erhöhten elektrischen Energiebedarf zur Folge hatte.

Da der spezifische Energiebedarf stark von der Verfügbarkeit der Anlage, sowie den Betriebsbedingungen (Verbrennung, Ofenaufgabe etc.) abhängig ist, wurden zur Beurteilung des Verbrauches die Prozessdaten der projektbegleitenden Messzeiträume berücksichtigt. Innerhalb dieser Zeiträume war die Ofenanlage störungsfrei bei ähnlicher Ofenaufgabe.

Der Strombedarf ist hauptsächlich auf den zusätzlichen Widerstand durch den Heißgasfilter zurückzuführen, da die gesamte Luftmenge nach Wärmetauscherturm durch die HGF-SCR-Anlage geführt wird und somit ein Prozessventilator zur Überwindung des zusätzlichen Druckverlusts erforderlich wird.

### 5.5 Mehrverbrauch Reduktionsmittelbedarf

Im Vergleich zu einer reinen nicht-katalytischen Entstickung ergibt sich in der Verbundfahrweise mit SNCR und HGF-SCR, wie in **Kapitel 3.3.2** beschrieben, aufgrund der veränderten Ofenfahrweise in Verbindung mit dem insgesamt reduzierten Emissionsniveau ein Mehrbedarf an Reduktionsmittel in Höhe von 0,98 Liter/t Klinker.

**Tabelle 5-2** Reduktionsmittelmehrbedarf der HGF-SCR für die Klinkerherstellung

Betriebsmittel	spezifischer Reduktionsmittelmehrbedarf gegenüber SNCR-Fahrweise
40 %-ige Harnstofflösung	0,98 Liter/t Klinker

Dieser Anstieg lässt sich durch eine veränderte Ofenfahrweise sowie ein insgesamt reduziertes Emissionsniveau erklären. In **Kapitel 3.1.1** (Emissionsmesswerte kontinuierlicher Messungen) konnte gezeigt werden, dass die SCR-Fahrweise ein deutlich reduziertes Emissionsniveau aufweist.

### 5.6 Betriebskosten der HGF-SCR-Anlage

Die Betriebskosten der HGF-SCR-Anlage setzen sich aus den Kosten für den elektrischen Energieverbrauch, den Reduktionsmittelbedarf sowie den Wartungskosten für die Katalysatorelemente und die keramischen Filterkerzen zusammen.

Die in **Tabelle 5-3** angegebenen Daten sind während der projektbegleitenden Messungen erhoben worden. Zu beachten ist hierbei, dass die Anlage in diesen Zeiträumen mit reduzierter Leistung gefahren wurde. Die stündliche Rohmaterialaufgabemenge lag bei 34 – 36 t/h und somit unterhalb der Leistungsgrenze, für welche die HGF-SCR-Anlage ausgelegt ist. Entsprechend liegt der letztlich durch die Kühlschnecke zu kühlende Staubanteil ebenfalls unterhalb der Auslegung.

**Tabelle 5-3** Betriebskosten HGF-SCR, Zementwerk ZKW OTTERBEIN

Betriebsmittel	Verbrauch/Standzeit	spez. Betriebskosten
Katalysatormaterial	6 Jahre	0,06 €/t Kli.
Heißgasfilterkerzen	7 Jahre	0,46 €/t Kli.
Elektrischer Energiebedarf (Gasreinigung)	10,2 kWh/t Kli.	1,02 €/t Kli.*
Mehrbedarf Reduktionsmittel	0,98 Liter/t Klinker	0,26 €/t Kli.
<b>Summe Gasreinigung:</b>		1,80 €/t Kli.
Elektrischer Energiebedarf (Staubhandling)	5,1 kWh/t Kli.	0,51 €/t Kli.
<b>Summe gesamt:</b>		<b>2,31 €/t Kli.**</b>

\* fiktive Annahme von 10 Cent/kWh

\*\* Die Zahlen sind anlagenspezifisch. Eine Vergleichbarkeit mit anderen Werken bzw. UIP-Projekten ist in Anbetracht erweiterter emissionstechnischer Zielsetzungen und auch der gegebenen Ofenkapazität nicht 1:1 gegeben. Die Werte sind indikativ / als Hinweise zu verstehen.

Insgesamt ergeben sich auf Basis der Verbräuche im ersten Betriebsjahr 2024 Betriebskosten von 2,31 €/t Klinker. Die dargestellten Werte stellen eine Momentaufnahme dar und können sich durch Optimierungsmaßnahmen im weiteren Betriebsverlauf ändern.

## 6 Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die Branche

### 6.1 Wesentliche technischen Herausforderungen, Maßnahmen und Ursachen

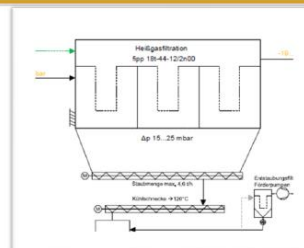
#### 6.1.1 Kühlschneckenkapazität

Der im Heißgasfilter abgeschiedene Staub sollte unmittelbar nach dem Filter auf ein Temperaturniveau gekühlt werden, welches neben dem Einsatz nachgeschalteter Transportsysteme auch eine problemlose Silierung ermöglicht, so dass gegebenenfalls Silofahrzeuge mit dem Heißgasfilterstaub (entsprechend Ofenabgasstaub) beschickt werden können. Die Zielvorgabe lautete, eine Temperatur von max. 120 °C zu erreichen.

Gewählt wurde eine Kühlschnecke, die aufgrund ihrer Größe und Bauform direkt unter der Heißgasentstaubung platziert ist. Mit der Förderung und gleichzeitigen Kühlung sollte auch der direkte Übergang in den darunter gelegenen Zwischenbehälter bewerkstelligt werden; ein wesentlicher Vorteil im Zusammenhang mit den beengten Raumverhältnissen.

Im Ergebnis ist festzuhalten, dass mit der vorgesehenen Kühlschnecke (**Bild 6-1**) keine ausreichende Kühlung bewerkstelligt und demzufolge die Ofenanlage nicht mit der ursprünglich vorgesehenen Leistung betrieben werden konnte. Vielfach kam es zu Anlagenstopps infolge der Überschreitung der zulässigen Staubtemperatur. Die Abschaltgrenze für die Staubtemperatur wurde während der Inbetriebnahmephase in mehreren Stufen auf bis zu 160 °C nach Kühlschnecke erhöht.

## Erkenntnisgewinn Kühlschnecke

**OTTERBEIN**


Schneckenförderung durch Steigung nicht gegeben.

Kühlung zu gering  
Leistung zu gering  
Leistung vs Kühlung

Wasserdurchsatz nicht geklärt.



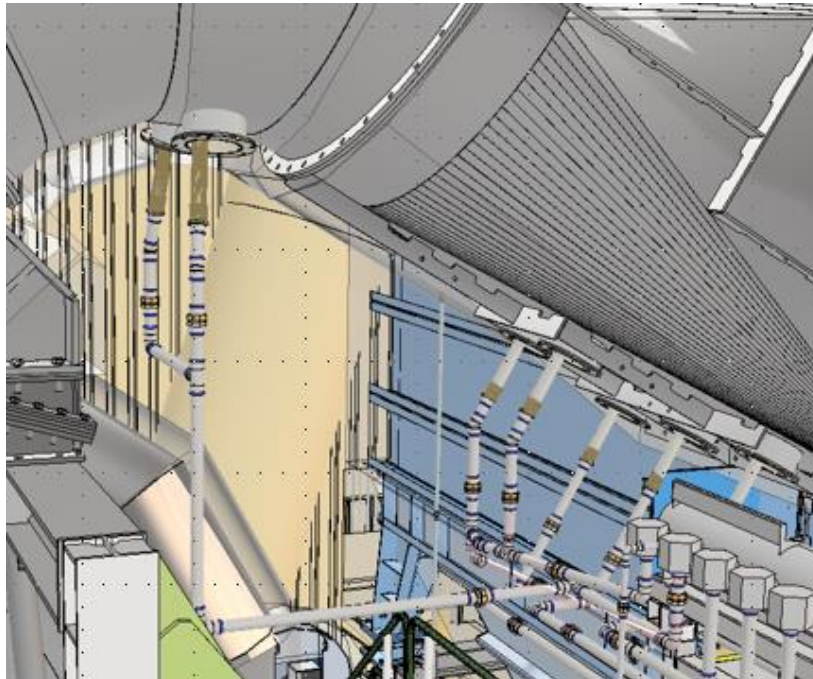
Copyright © 2022 by Zement- und Kalkwerke Otterbein GmbH & Co. KG. All rights reserved.

**Bild 6-1** Erkenntnisgewinne Kühlschnecke

Die Ursache der mangelnden Kühlung wurde nach verschiedenen Untersuchungen damit erklärt, dass der Kontakt zwischen den Staubpartikeln und der gekühlten Kühlschneckenwendel infolge der hohen Verdichtung und gegebenenfalls auch durch die ansteigende Förderung des Materials in der Kühlschnecke nicht ausreichend gegeben war. Die Kühlschnecke war nach Erstinbetriebnahme leicht ansteigend in Förderrichtung montiert. In einem Stillstand in der Projektlaufzeit wurde die Kühlschnecke auf eine waagerechte Position umgebaut. Die Kühlschnecke langsamer zu betreiben und durch einen erhöhten

Füllgrad die Kühlleistung durch vergrößerte Kontaktfläche zur gekühlten Wandung zu erhöhen, war infolge des dann drastisch reduzierten Material-Durchsatzes nicht möglich.

Zusätzlich wurde der Betrieb auch durch situativ übermäßigen Materialanfall (sog. "Material-Schwalls") aus dem Filtersystem, die wiederum eher auf Staubablagerung in den Gasleitungen zurückzuführen waren, nachteilig beeinflusst. Die Staubablagerungen, der vermutete Ursprung der "Material-Schwalls", wurden mittels entsprechender Druckluftabreinigungen im Heißgasfiltereintritt (**Bild 6-2**) teilweise gemindert, allerdings konnten die Effekte noch nicht vollständig beseitigt werden. Hierzu werden zum Berichtszeitpunkt noch Optimierungen vom Anlagenlieferanten im Zusammenhang mit den anderen Optimierungsmaßnahmen vorgenommen.

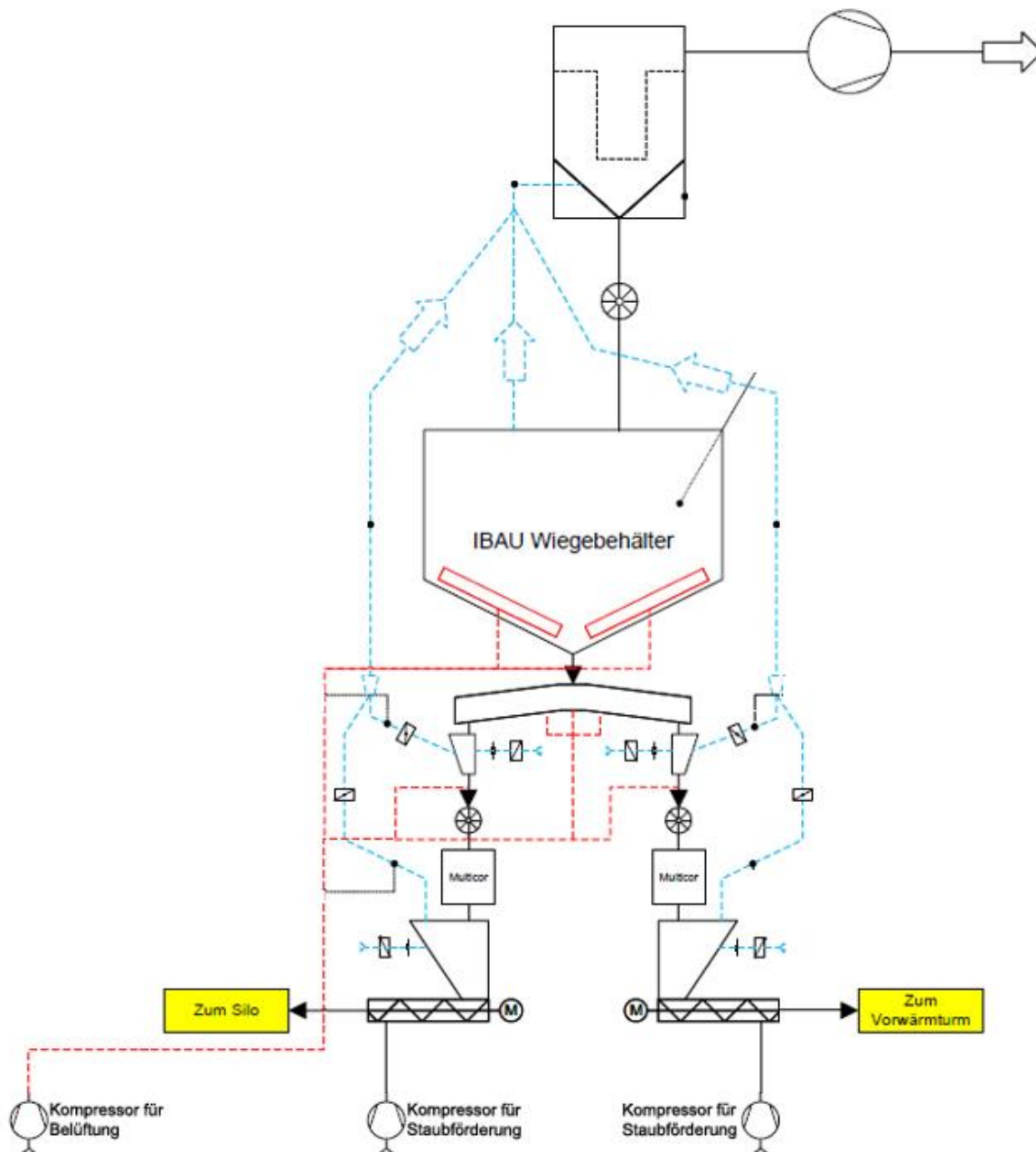


**Bild 6-2** Anordnung der Leitungen zur Druckluftabreinigungen im Heißgasfiltereintritt

In letzter Konsequenz wird im Oktober 2025 nach verschiedenen Optimierungsanläufen eine komplett neue Kühlschneckenwendel in Edelstahlausführung eingebaut. Zur Vermeidung einer isolierenden Verpelzung auf den Schneckenwendeln werden zwei in der Drehzahl unterschiedliche Schneckenwendeln zum Einsatz kommen. Zudem wird die Druckluftabreinigung zur Vermeidung der Materialansammlungen weiter modifiziert. Der Umbau erfolgt im Oktober 2025.

### 6.1.2 Staubhandling nach HGF-SCR-Anlage (Staubförderung nach Kühlschnecke)

Als eine zweite wesentliche Herausforderung ist die Staubförderung nach Kühlschnecke bzw. Puffersilo zu nennen. Wie dem nachfolgenden Schema (**Bild 6-3**) zu entnehmen ist, wird der Staub nach dem Wiegebehälter über zwei pneumatische Fördereinrichtungen wahlweise zum Silo oder zur Ofenanlage oder in verschiedenen Verhältnissen auch in beide Richtungen gefördert.



**Bild 6-3** Schema der Staubfördereinrichtungen (technische Details ausgeblendet)

Die Belüftungen zur problemlosen Förderung und Dosierung des Staubes sollten über eine zentrale Entstaubung geführt werden. Da Belüftungen an einzelnen Anlagenteilen bzw. Aggregaten fehlten, ist es immer wieder zu Staubansammlungen an kritischen Punkten innerhalb des Leitungsnetzes gekommen.

Zur Lösung des Problems wird eine Entkopplung der beiden Dosierstränge erfolgen. Darüber hinaus werden die Belüftungsleitungen nun mit Lufteintrittsklappen ausgerüstet, deren Öffnungsverhalten zur Einstellung des gewünschten Luftstroms geregelt werden kann. Zudem können die Dosierstränge bei getrennter Entstaubung mit höherem Luft-Durchsatz betrieben werden. Der Umbau erfolgt im Oktober 2025.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Planung und Entwicklung der vorstehend beschriebenen Umbaumaßnahmen viel Zeit beansprucht haben. Ursächlich hierfür waren vor allem die schwierigen Platzverhältnisse.

## 6.2 Projektspezifische Aspekte und technische Risikobeurteilung

Die unter **Kapitel 1.2** (Ziel- und Aufgabenstellung des Vorhabens), aufgeführten Punkte wurden mit vorherigen Ausführungen umfangreich erläutert und diskutiert. Darüber hinaus sollten zudem auch die wesentlichen Merkmale des neuartigen Verfahrens der Gasreinigung im Hinblick auf die aufgeführten positiven Aspekte erörtert und folgende betriebsrelevante Fragen beantwortet werden.

Diese sind:

1. Können mit der neuartigen Heißgasentstaubung mittels keramischer Filterkerzen die mit Ofenstaub beladenen heißen Abgasströme nach einem Zyklonwärmetauscher einer Zementdrehofenanlage mit einer langen Standzeit von mehreren Jahren (Zielgröße: 7 Betriebsjahre) und hoher Betriebssicherheit entstaubt werden?

Die Frage ist aufgrund der kurzen Laufzeit von nunmehr zwei Jahren noch nicht zu beantworten. Dennoch kann aufgrund der bisherigen Erkenntnisse, der nicht gegebenen Indizien des Verklebens und/oder des Verschleißes gemutmaßt werden, dass noch weitaus längere Betriebszeiten möglich sein müssten.

2. Wie verhalten sich die abzuscheidenden Stäube im Hinblick auf Ansatzbildungen und Druckverlustverläufen über längere Betriebslaufzeiten?

Die Druckverlust-Niveaus an Heißgasfilter und SCR-Katalysator sind im Berichtszeitraum auf stabilem Niveau. Eine signifikante Veränderung konnte an beiden Teilanlagen nicht festgestellt werden.

Mit derzeitigem Kenntnisstand gibt es keine Hinweise auf ungewöhnliches Materialverhalten. Die beobachteten Anhaftungen an Rohrleitungen und Oberflächen wurden mit dem Anlagenlieferanten in Zusammenhang mit dem Leitungsverlauf (Neigung) sowie der Oberflächenbeschaffenheit diskutiert. Sie sind Gegenstand der geplanten Optimierungsmaßnahmen.

3. Lassen sich die geforderten Standzeiten der Gasreinigung für einen regulären Anlagenbetrieb bestätigen?

Langzeituntersuchungen sind abzuwarten, wobei vorliegende Erkenntnisse, wie zuvor erläutert, einen optimistischen Ausblick erlauben.

4. Durch die integrierte SCR-Technologie zur Minderung der NO<sub>x</sub>- und NH<sub>3</sub>-Emissionen kann auf die ansonsten erforderliche Wiederaufheizung entsprechend dem „End of Pipe“-Low-Dust-SCR-Verfahren verzichtet werden. Kann die Erwartung bestätigt werden, dass durch die fehlende Temperatursenke infolge des nicht erforderlichen Abkühlens und des kosten- und CO<sub>2</sub>-intensiven Wiederaufheizens der Abgase keine nachteiligen Effekte durch die Auskondensierung von Gasbestandteilen auftreten, welche gegebenenfalls einen gesicherten Anlagenbetrieb einer systemintegrierten Lösung zur Minderung der NO<sub>x</sub>- und NH<sub>3</sub>-Emissionen einschränken?

Auch hier gilt, Langzeituntersuchungen sind abzuwarten. Die Emissionsdaten lassen zum Berichtszeitpunkt keine Minderungsveränderungen erkennen, wobei aus diesem Grund heraus auch noch keine stichpunktartigen Reaktivitätstests an den Katalysatorlagen vorzeitig durchgeführt wurden.

## 5. Wie beeinflusst das Verfahren die Ofenfahrweise des Zementdrehofens?

Unter Zugrundelegung, dass die vereinbarten Optimierungsmaßnahmen erfolgreich umgesetzt werden, sollte die Leistungsfähigkeit des Zementwerkes gegenüber dem vorherigen Leistungsstand bzgl. der Produktion verbessert werden.

Durch den Einsatz der HGF SCR-Anlage können die prozessrelevanten Parameter zur Herstellung eines qualitätsgesicherten Zementklinkers „freier“ gewählt werden, da die ansonsten gleichzeitige Berücksichtigung der emissionsrelevanten Prozessdaten im Vordergrund stehen mussten. Die Einstellungen der Brennbedingungen für das Produkt Klinker sind gezielt und ohne den direkten Einfluss auf die Emissionen wählbar. Mitunter mussten zuvor produktionstechnische Nachteile mit einhergehenden Leistungsnechten in Bezug auf Produktqualität und Energiebedarf kompensiert werden. Mit der HGF SCR-Anlage ist eine bessere und effiziente Schnittstelle bzgl. der Produktionsanforderungen und der Gasreinigung geschaffen.

## 6. Führt das HGF-SCR-Verfahren zur erhöhten Emissionen von Dioxinen und Furanen?

Das geschlossene System der HGF-SCR-Anlage hat keine Auswirkungen auf die Konzentrationen an Dioxinen, Furanen und deren Vorläuferverbindungen. Ggf. entstandene Verbindungen werden im SCR-Katalysator abgebaut. Die geltende Emissionsbegrenzung von 0,1 ng TE/m<sup>3</sup> wird deutlich unterschritten.

Im Rohgas der Drehofenanlage sind keine signifikanten Mengen an PCDD/F oder dl-PCB vorhanden. Nach dem Heißgasfilter, vor Eintritt in den SCR-Katalysator wurden höhere Konzentrationen an PCDD/F und dl-PCB gemessen, so dass bei den Temperaturen im Heißgasfilter in geringem Umfang eine Bildungsreaktion vorliegt. Durch die Kombination des Heißgasfilters mit dem SCR-Katalysator findet dann unmittelbar ein effizienter Abbau der PCDD/F und dl-PCB von über 98 % statt.

Für zukünftige Projekte, die die Nutzung eines HGF ohne Kombination mit einem SCR-Katalysator in Erwägung ziehen, ist diese Erkenntnis dringend zu berücksichtigen, da ggf. eine anderweitige Abgasreinigung von PCDD/F und dl-PCB erforderlich wird.

### 6.3 Generelle Schlussfolgerungen

Die Übertragbarkeit der Technik (Multiplikatoreffekte) des gewählten Verfahrens, der HGF-SCR-Anlage, mittels Heißgasentstaubung mit systemintegrierter katalytischer Reduktion ist eine in Deutschland komplett neue und erstmalige Anwendung. Die Technik ist zukunftsweisend für die nationale und internationale Zementindustrie.

Durch die erfolgreiche Umsetzung des Vorhabens sind Multiplikatoreffekte zu erwarten. Die Technologie ist auf andere Anlagen mit Zyklonvorwärmer-Technologie übertragbar. In Deutschland bestehen weitere Potentiale gegebenenfalls auch im Zusammenhang mit Produktions-Umstellungen infolge von Modernisierungsmaßnahmen. Es ist ein wichtiger Wegbereiter für zukunftsweisende Weiterentwicklungen, wie z. B. Stromerzeugung aus Abwärme, Materialtrocknung, thermische Nachverbrennung, separates Staubhandling etc.

International ist davon auszugehen, dass durch vergleichbare Grenzwertverschärfungen der umweltrelevanten Emissionen und auch infolge der nachhaltigen Ressourcenschonung effiziente Gasreinigungssysteme zum Einsatz kommen werden.

Im Hinblick auf die internationale Zementbranche bestehen darüber hinaus große Potentiale für diese Technologie, vor allem im Zusammenhang mit der Abwärmeverstromung (> 1000 Anlagen weltweit).

Ein neues Potential ist zu sehen im Zusammenhang mit den Entwicklungen im Bereich der Dekarbonisierung der Zementindustrie, also der CO<sub>2</sub>-Abscheidung bzw. -Nutzung (CCS- bzw. CCU- Technologie).

Dazu wurde in den vergangenen Jahren die Oxyfuel-Technologie für die Klinkerherstellung weiterentwickelt, um das CO<sub>2</sub> im Ofenabgas so weit aufzukonzentrieren, dass es effizient abgeschieden und einer weitergehenden Verwendung übergeben werden kann. Im Hinblick auf diese Entwicklungen der Zementofentechnologie ist zu erwarten, dass die HGF-SCR-Technologie besondere Bedeutung erlangen wird, da bei der Oxyfuel-Technologie das Ofenabgas nicht für die Rohmaterialtrocknung genutzt werden kann.

Die Abwärmenutzung muss nach heutigem Stand der Technik mittels Zyklonwärmetauschern erfolgen, die mit hoch staubbeladenem Ofenabgas betrieben werden – mit negativen Folgen hinsichtlich Betriebssicherheit und Wirkungsgrad. Mit Hilfe der HGF-SCR-Technologie kann der Abgasstrom direkt nach Austritt aus dem Zyklonvorwärmer entstaubt und damit wesentlich effizienter und mit höherer Verfügbarkeit genutzt werden.

## 7 Literaturverzeichnis

- [1] MATHEIS, Rüdiger. HD-SCR Kiln 2, Goellheim plant - Course of Action, Concept and Operational Experiences. In: VEREIN DEUTSCHER ZEMENTWERKE E. V. (Hg.). *8th International VDZ Congress*. Düsseldorf, 26.-28.09.2018
- [2] VEREIN DEUTSCHER ZEMENTWERKE E. V. (Hg.). *Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2021*. 2022
- [3] EDELKOTT, Detlef, Jürgen THORMANN, Volker HOENIG, Helmut HOPPE, Martin OERTER und Cornelia SEILER. *Minderung von NO<sub>x</sub>-Emissionen in einer Drehofenanlage der Zementindustrie mittels SCR-Technologie (High-Dust)*. Forschungsbericht, KfW-Aktenzeichen MBe-00159, 2014
- [4] RECHBERGER, Katharina und Nils BODENDIEK. *Katalytische Low-Dust-Entstickung des Abgases an einer Drehofenanlage der Zementindustrie (Reingas-SCR)*. Forschungsbericht, KfW-Aktenzeichen NKa3-001706, 2015
- [5] VDI 2094:2021-01 *Emissionsminderung – Zementwerke*
- [6] VDI 3476 Bl. 1:2012-01 *Verfahren der katalytischen Abgasreinigung – Selektive katalytische Reduktion*
- [7] SVOBODA, D. J. BAXTER und J. MARTINEC. Nitrous oxide emissions from waste incineration. *Chemical Papers*. 2006. **60**(1), 78-90
- [8] VDI 3677 Bl. 3:2012-11 *Filternde Abscheider – Heißgasfiltration*

## A Anhang

### Erläuterung zum Sauerstoffbezug

Nach den Regelungen der 17. BImSchV sind Konzentrationen bei der Angabe von Luftschadstoffemissionen auf einen Bezugssauerstoffgehalt von 10 Vol.-% zu beziehen. Sind Abgasreinigungseinrichtungen für eine Komponente in Betrieb, ist diese Umrechnung für diese Komponente nur bei Sauerstoffgehalten von mehr als 10 Vol.-% anzuwenden. Um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse untereinander zu wahren, wurden alle Ergebnisse daher unabhängig vom vorherrschenden Sauerstoffgehalt immer auf einen Gehalt von 10 Vol.-% bezogen.

#### Tabelle A-1 Kontinuierliche Messverfahren

Anmerkung: Bei den durchgeführten Messkampagnen wurden die Gasanalysegeräte des VDZ an verschiedenen Messstellen entlang des Abgaswegs der Drehrohrofenanlage eingesetzt, nämlich an den Messstellen „Rohgas“, „vor SCR“, „nach SCR“ und „Kamin“ und zur Überwachung an weiteren Messstellen im Betrieb. Es handelt sich entweder um Mehrkomponentenmessgeräte der Serie Advance Optima (ABB AG) oder PG 350 E (Horiba Europe GmbH). Darüber hinaus wurden bei jeweils zwei Messkampagnen auch ergänzende Gasanalysen mit FTIR-Analysatoren (Gasmot Technologies Oy) und FID-Analysatoren (SK-Elektronik GmbH und Testa GmbH) durchgeführt.

Hersteller	Bezeichnung/Typ	Messkomponente	Anzeigebereich	Einheit	Messprinzip/Bemerkung
ABB	Uras 14	CO	0 - 0,5	Vol.-% (N., tr.)	NDIR
ABB	Uras 14	CO	0 - 0,4	Vol.-% (N., tr.)	NDIR
ABB	Uras 14	CO	0 - 4	Vol.-% (N., tr.)	NDIR
ABB	Uras 14	CO	0 - 2500	mg/m <sup>3</sup> (N., tr.)	NDIR
ABB	Uras 28	CO	0 - 3000	ppm (N., tr.)	NDIR
Horiba	PG-350 E	CO	0 - 5000	ppm (N., tr.)	NDIR
ABB	Uras 14	CO <sub>2</sub>	0 - 40	Vol.-% (N., tr.)	NDIR
ABB	Uras 14	CO <sub>2</sub>	0 - 40	Vol.-% (N., tr.)	NDIR
ABB	Uras 28	CO <sub>2</sub>	0 - 100	Vol.-% (N., tr.)	NDIR
Horiba	PG-350 E	CO <sub>2</sub>	0 - 30	Vol.-% (N., tr.)	NDIR
ABB	Uras 28	NO <sub>x</sub>	0 - 1500	mg/m <sup>3</sup> (N., tr.)	NDIR
ABB	Uras 14	NO <sub>x</sub>	0 - 1500	mg/m <sup>3</sup> (N., tr.)	NDIR
ABB	Uras 14	NO <sub>x</sub>	0 - 4000	mg/m <sup>3</sup> (N., tr.)	NDIR
Horiba	PG-350 E	NO <sub>x</sub>	0 - 2000	mg/m <sup>3</sup> (N., tr.)	NDIR
ABB	Limas 11	NO	0 - 1500	mg/m <sup>3</sup> (N., tr.)	UV-Messung
ABB	Limas 11	NO <sub>2</sub>	0 - 200	mg/m <sup>3</sup> (N., tr.)	UV-Messung
ABB	EL3020	O <sub>2</sub>	0 - 25	Vol.-% (N., tr.)	elektrochemischer Sensor
ABB	AO2020	O <sub>2</sub>	0 - 25	Vol.-% (N., tr.)	elektrochemischer Sensor
ABB	Magnos 206	O <sub>2</sub>	0 - 25	Vol.-% (N., tr.)	magn.-mechan. Messung
Horiba	PG-350 E	O <sub>2</sub>	0 - 25	Vol.-% (N., tr.)	elektrochemischer Sensor
SK-Elektronik	Thermo-FID	TOC	0 - 100	mgC/m <sup>3</sup> (N., f.)	FID
Testa	iFiD	TOC	0 - 100	mgC/m <sup>3</sup> (N., f.)	FID
Gasmot	FTIR	diverse	---	---	FTIR

**Tabelle A-2** Diskontinuierliche Messverfahren

Messkomponente	Messort	Verfahren
Staub	Rohgas nach Vorwärmer	in Anlehnung an DIN EN 13284-1
NH <sub>3</sub>	Rohgas nach Vorwärmer, vor SCR, nach SCR, Kamin	DIN EN ISO 21877
HF	Rohgas nach Vorwärmer, vor SCR, nach SCR, Kamin	DIN CEN/TS 17340
SO <sub>2</sub>	Rohgas nach Vorwärmer, vor SCR, nach SCR, Kamin	DIN EN 14791
HCl	Rohgas nach Vorwärmer, vor SCR, nach SCR, Kamin	DIN EN 1911
Schwermetalle	Rohgas nach Vorwärmer, vor SCR, nach SCR, Kamin	DIN EN 14385
Benzol	Rohgas nach Vorwärmer, vor SCR, nach SCR, Kamin	DIN CEN/TS 13649
PCDD/F, PCBz, PCN, PCPh	Rohgas nach Vorwärmer, vor SCR, nach SCR, Kamin	DIN EN 1948-1/2/3
PCB	Rohgas nach Vorwärmer, vor SCR, nach SCR, Kamin	DIN EN 1948-4
PAH	Rohgas nach Vorwärmer, vor SCR, nach SCR, Kamin	VDI 3874
Formaldehyd	Rohgas nach Vorwärmer, vor SCR, nach SCR, Kamin	VDI 3862, Blatt 2
N <sub>2</sub> O	Rohgas nach Vorwärmer, vor SCR, nach SCR, Kamin	VDI 2469
Quecksilber (gesamt)	Rohgas nach Vorwärmer, vor SCR, nach SCR, Kamin	DIN EN 13211
Quecksilber (Speziierung)	Rohgas nach Vorwärmer, vor SCR, nach SCR, Kamin	DIN EN 13211, modifiziert zur Erfassung des oxidierten Anteils