

Bewährtes neu denken

vdz

**Umweltdaten der
deutschen
Zementindustrie
Environmental
Data of the German
Cement Industry
2021**

Inhalt / Contents

| | | |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| | Vorwort / Foreword | 5 |
| 1 | Zementherstellung / Cement manufacture | 7 |
| 2 | Produktions- und Strukturdaten / Production and structural data | 11 |
| 3 | Einsatzstoffe / Input materials | 15 |
| | 3.1 Rohstoffe / Raw materials | 16 |
| | 3.2 Brennstoffe / Fuels | 17 |
| 4 | Energie / Energy | 19 |
| 5 | Emissionen / Emissions | 23 |
| | 5.1 Treibhausgase / Kohlenstoffdioxid / Greenhouse gases / Carbon dioxide (CO ₂) | 25 |
| | 5.2 Staub / Dust | 26 |
| | 5.3 Stickstoffoxide / Nitrogen oxides (NO _x) | 26 |
| | 5.4 Ammoniak / Ammonia (NH ₃) | 28 |
| | 5.5 Schwefeldioxid / Sulphur dioxide (SO ₂) | 29 |
| | 5.6 Kohlenstoffmonoxid (CO) und organischer Gesamtkohlenstoff (Σ C) / Carbon monoxide (CO) and total organic carbon (TOC) | 30 |
| | 5.7 Dioxine und Furane / Dioxins und Furans (PCDD/F) | 31 |
| | 5.8 Polychlorierte Biphenyle / Polychlorinated biphenyls (PCB) | 32 |
| | 5.9 Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) / Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) | 33 |
| | 5.10 Benzol, Toluol, Ethylbenzol, Xylol / Benzene, toluene, ethylbenzene, xylene (BTEX) | 34 |
| | 5.11 Benzol / Benzene (C ₆ H ₆) | 35 |
| | 5.12 Formaldehyd / Formaldehyde (CH ₂ O) | 36 |
| | 5.13 Benzo(a)pyren / Benzo(a)pyren (C ₂₀ H ₁₂) | 36 |
| | 5.14 Gasförmige anorganische Chlorverbindungen / Gaseous inorganic chlorine compounds (HCl) | 37 |
| | 5.15 Gasförmige anorganische Fluorverbindungen / Gaseous inorganic fluorine compounds (HF) | 37 |
| | 5.16 Spurenelemente / Trace elements | 38 |
| | 5.16.1 Cadmium / Cadmium (Cd) | 40 |
| | 5.16.2 Thallium / Thallium (Tl) | 40 |
| | 5.16.3 Quecksilber / Mercury (Hg) | 41 |
| | 5.16.4 Antimon / Antimony (Sb) | 41 |
| | 5.16.5 Arsen / Arsenic (As) | 42 |
| | 5.16.6 Blei / Lead (Pb) | 42 |
| | 5.16.7 Chrom / Chromium (Cr) | 43 |
| | 5.16.8 Cobalt / Cobalt (Co) | 43 |
| | 5.16.9 Kupfer / Copper (Cu) | 44 |
| | 5.16.10 Mangan / Manganese (Mn) | 44 |
| | 5.16.11 Nickel / Nickel (Ni) | 45 |
| | 5.16.12 Vanadium / Vanadium (V) | 45 |
| | 5.16.13 Zinn / Tin (Sn) | 46 |
| | 5.16.14 Beryllium / Beryllium | 46 |
| | 5.16.15 Selen / Selenium (Se) | 47 |
| | 5.16.16 Tellur / Tellurium (Te) | 47 |
| | 5.16.17 Zink / Zinc (Zn) | 48 |
| | Literatur / Literature | 49 |
| | Impressum / Imprint | 51 |

Anmerkung: Zahlendarstellung in Tabellen und Grafiken entsprechend deutscher Regeln.

Note: Numerical expressions in tables and diagrams are shown using standard German punctuation.

Liebe Leserinnen und Leser,

in bewährter Tradition geben wir auch in diesem Jahr mit unserer neuen Auflage der „Umweltdaten der deutschen Zementindustrie“ einen umfassenden Überblick sowohl zum Rohstoff- und Energieeinsatz als auch zu den verschiedenen Emissionen der deutschen Zementhersteller. Das betrifft sowohl den Staub, Staubinhaltsstoffe als auch die anorganischen und organischen Abgasbestandteile. Weiterhin umfassen unsere Umweltdaten die Emissionen an Kohlenstoffdioxid, auf deren Minderung im Sinne der Dekarbonisierung der Zementherstellung ein ganz besonderes Augenmerk liegt.

Die Folgen des Krieges in der Ukraine und die Sanktionen gegen den russischen Staat betreffen auch die Zementherstellung in Deutschland. So sind Unternehmen, die Kohle aus Russland als Brennstoff verwenden, vom Kohleembargo der Europäischen Union betroffen, so dass sie den Brennstoff aus anderen Quellen beschaffen müssen. Darüber hinaus ist die Verfügbarkeit von Reduktionsmitteln und anderen Betriebsstoffen wie Ammoniakwasser, Harnstoff, Kalkhydrat und Herdofenkoks eingeschränkt.

Auch wenn das Tagesgeschäft in den Zementwerken dadurch – wie in anderen Industrien auch – für großen Herausforderungen steht, arbeitet die Zementindustrie weiterhin gemeinsam mit der gesamten Wertschöpfungskette Bau mit Hochdruck an ihren wichtigsten Umweltzielen: der Klimaneutralität bis zum Jahre 2045 sowie der Schonung natürlicher Ressourcen.

Um einen Weg zur Dekarbonisierung von Zement und Beton aufzuzeigen, hat der VDZ seine Roadmap in 2020 veröffentlicht. Die Studie beschreibt verschiedene Hebel zur Reduzierung der CO₂-Emissionen und beziffert deren Beitrag in einem Klimaneutralitätsszenario. In diesem Szenario reduziert die Zementindustrie bis 2030 ihre CO₂-Emissionen bereits um rund 27 % gegenüber 2020 und um 45 % gegenüber 1990. Neben einer weiteren Steigerung der Energieeffizienz und des Anteils alternativer Brennstoffe (insbesondere durch den verstärkten Einsatz von Biomasse und grünem Wasserstoff) ist der Einsatz von CEM II/C- und CEM VI-Zementen ein wichtiger Baustein auf dem Weg zu einem Zementportfolio mit niedrigeren Klinkerfaktoren. Neben zum Teil neuen CO₂-effizienten Rohstoffen für die Klinker- und Zementherstellung (z.B. kalzinierter Ton und Betonbrechsand) und neben Innovationen in der Betonherstellung und im Betonbau werden die Bemühungen um eine vollständige Dekarbonisierung des Sektors auch auf der Kohlenstoffabscheidung im Zementwerk und der anschließenden Nutzung und Speicherung (CCUS) beruhen. Hier gibt es bereits erste Pilotvorhaben, die vor allem auf die Nutzung des Treibhausgases abstellen – zum Beispiel als synthetischer Kraftstoff für Flugzeuge oder als Rohstoff für die chemische Industrie.

Neben dem Klimawandel gewinnt ein weiteres wichtiges Thema zunehmend an Bedeutung: die Einsparung von natür-

Dear readers,

in keeping with our time-honoured tradition, this year's edition of the "Environmental data of the German cement industry" again provides an in-depth insight into the use of raw materials, energy input and the various emissions produced by German cement manufacturers. This encompasses not only the dust and dust bound constituents, but also the inorganic and organic exhaust gas compounds. A further aspect of our environmental data is information on carbon dioxide emissions, the reduction of which is a particular focal point in connection with the decarbonisation of cement production.

The consequences of the war in the Ukraine and sanctions against the Russian state are also of relevance with regard to cement production in Germany. Companies which use Russian coal as fuel are being affected by the European Union's coal embargo and are having to acquire fuel from other sources, for example. Another factor is the limited availability of reducing agents and other substances such as ammonia water, urea, slaked lime and open-hearth coke.

Despite the major challenges thus facing cement plants in their day-to-day operations – as is the case in other sectors as well – the cement industry remains fully committed to working together with the entire construction value chain to achieve its most important environmental targets: climate neutrality by 2045 and the preservation of natural resources.

The roadmap published by VDZ in 2020 outlines one means of bringing about the decarbonisation of cement and concrete. This study describes various instruments designed to reduce CO₂ emissions and evaluates the contribution of these in a climate neutrality scenario. According to this scenario, by 2030 the cement industry will already have cut its CO₂ emissions by around 27 % as compared to 2020 and about 45 % with respect to 1990. In addition to further enhancing energy efficiency and increasing the proportion of alternative fuels (in particular by making greater use of biomass and green hydrogen), the use of CEM II/C and CEM VI cements represents an important step in progressing towards a cement portfolio with lower clinker factors. Together with – in some cases new – CO₂-efficient raw materials for clinker and cement production (e.g. calcined clay and crushed sand) and innovations in the field of concrete production and construction, carbon capture at cement plants and its subsequent utilisation and storage (CCUS) will form the basis for attempting to achieve full decarbonisation in the sector. Initial pilot projects, primarily aimed at making use of the greenhouse gas – for example in the form of synthetic fuel for aircraft or as a raw material for the chemical industry – already exist in this connection.

As well as climate change, another topic is also increasingly gaining in significance: the reduced use of natural resources, a further factor associated with climate neutrality. Some 230 million tonnes of mineral and fossil primary raw materials,

lichen Ressourcen, die ebenfalls mit der Klimaneutralität verbunden ist. Für die Herstellung von Zement und Beton in Deutschland wurden im Jahr 2020 rund 230 Mio. t mineralische und fossile Primärrohstoffe benötigt, was etwa einem Fünftel der gesamten Rohstoffentnahme der deutschen Wirtschaft entspricht. Im Bewusstsein dieses Ressourcen-Fußabdrucks beschäftigen sich die Zement- und Betonhersteller unter dem Dach des VDZ und der European Cement Research Academy (ECRA) seit langem mit der Frage, wie die Herstellung von Baustoffen mit weniger natürlichen Rohstoffen auskommen kann. Neben ressourceneffizienterem Bauen wird der Schlüssel zur Einsparung von Primärressourcen bei der Zement- und Betonherstellung in der Mobilisierung von Betonfraktionen aus dem Rückbau von Gebäuden und Infrastrukturen liegen. Als Betonbrechsand und rezyklierte Gesteinskörnung können sie in die Klinker-, Zement- und Betonproduktion zurückfließen. Der VDZ arbeitet derzeit an einer Analyse, um die Potenziale entlang der Wertschöpfungskette zu beschreiben und Voraussetzungen für die Einsparung von Primärressourcen zu identifizieren.

Um den verschiedenen Erfordernissen des Klima- und Ressourcenschutzes sowie der Luftreinhaltung gerecht zu werden, sind enorme Investitionen nötig. Allein in den Jahren 2018 bis 2020 hat die deutsche Zementindustrie ungefähr 800 Mio. Euro in ihren Maschinenpark investiert, was fast einem Zehntel des in diesem Zeitraum erwirtschafteten Branchenumsatzes entspricht. Nicht zuletzt dies zeigt, dass die deutschen Zementhersteller sich den zahlreichen umweltpolitischen Herausforderungen stellen. Sie werden auch künftig weitere Anstrengungen und Investitionen tätigen, um die Zementproduktion zukunftssicher und nachhaltig zu gestalten.

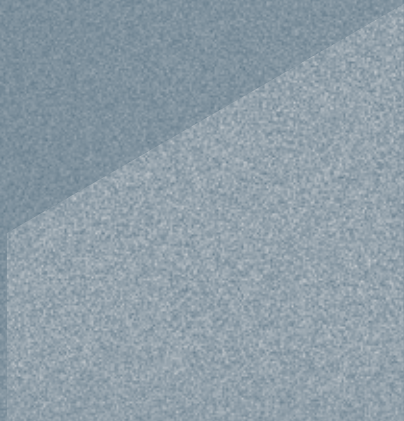
Düsseldorf, im August 2022

corresponding to around one fifth of the total amount of raw materials extracted by German trade and industry, were required for producing cement and concrete in Germany in 2020. In full awareness of this ecological footprint and under the auspices of VDZ and the European Cement Research Academy (ECRA), the cement and concrete manufacturers have long since been studying the question of how building materials can be produced using fewer natural raw materials. Alongside more resource-efficient construction methods, the key to saving primary resources in cement and concrete production is to be found in the mobilisation of concrete fractions from the dismantling of buildings and infrastructure. These can be returned to clinker, cement and concrete production in the form of crushed sand and recycled aggregate. VDZ is currently working on an analysis for the purpose of describing the potential available along the value chain and identifying the prerequisites for saving primary resources.

Enormous investments will be necessary to satisfy the various requirements of climate protection, resource conservation and air pollution control. The German cement industry invested around 800 million euros in machinery in the years 2018 to 2020 alone, corresponding to almost one tenth of the industry's turnover in this period. This in itself is a good indication of how German cement manufacturers are tackling the numerous challenges associated with environmental policy issues. And they will continue to intensify their efforts and carry on investing to ensure that cement production is both fit for the future and sustainable.

Duesseldorf, August 2022

1 Zementherstellung/ Cement manufacture



1 Zementherstellung

Zement ist ein Baustoff, der infolge chemischer Reaktionen mit Wasser selbstständig erhärtet und danach sowohl an der Luft als auch unter Wasser fest und raumbeständig bleibt.

Zement besteht aus fein gemahlenem Portlandzementklinker und Calciumsulfat (natürlicher Gips, Anhydrit oder Gips aus Rauchgasentschwefelungsanlagen). Darüber hinaus kann Zement andere Hauptbestandteile wie Hüttensand, natürliche Puzzolane (z.B. Trass), Flugasche, Ölschieferabbrand oder Kalkstein enthalten. Eine schematische Darstellung des Herstellungsprozesses zeigt Bild 1-1.

Der sogenannte Portlandzementklinker entsteht aus einem Rohstoffgemisch, das hauptsächlich Calciumoxid (CaO), Siliciumdioxid (SiO_2), Aluminiumoxid (Tonerde, Al_2O_3) und Eisenoxid (Fe_2O_3) enthält. Kalkstein, Kreide und Ton oder deren natürlich vorkommendes Gemisch, der Kalksteinmergel, liefern diese chemischen Bestandteile. Kalkstein und Kreide bestehen

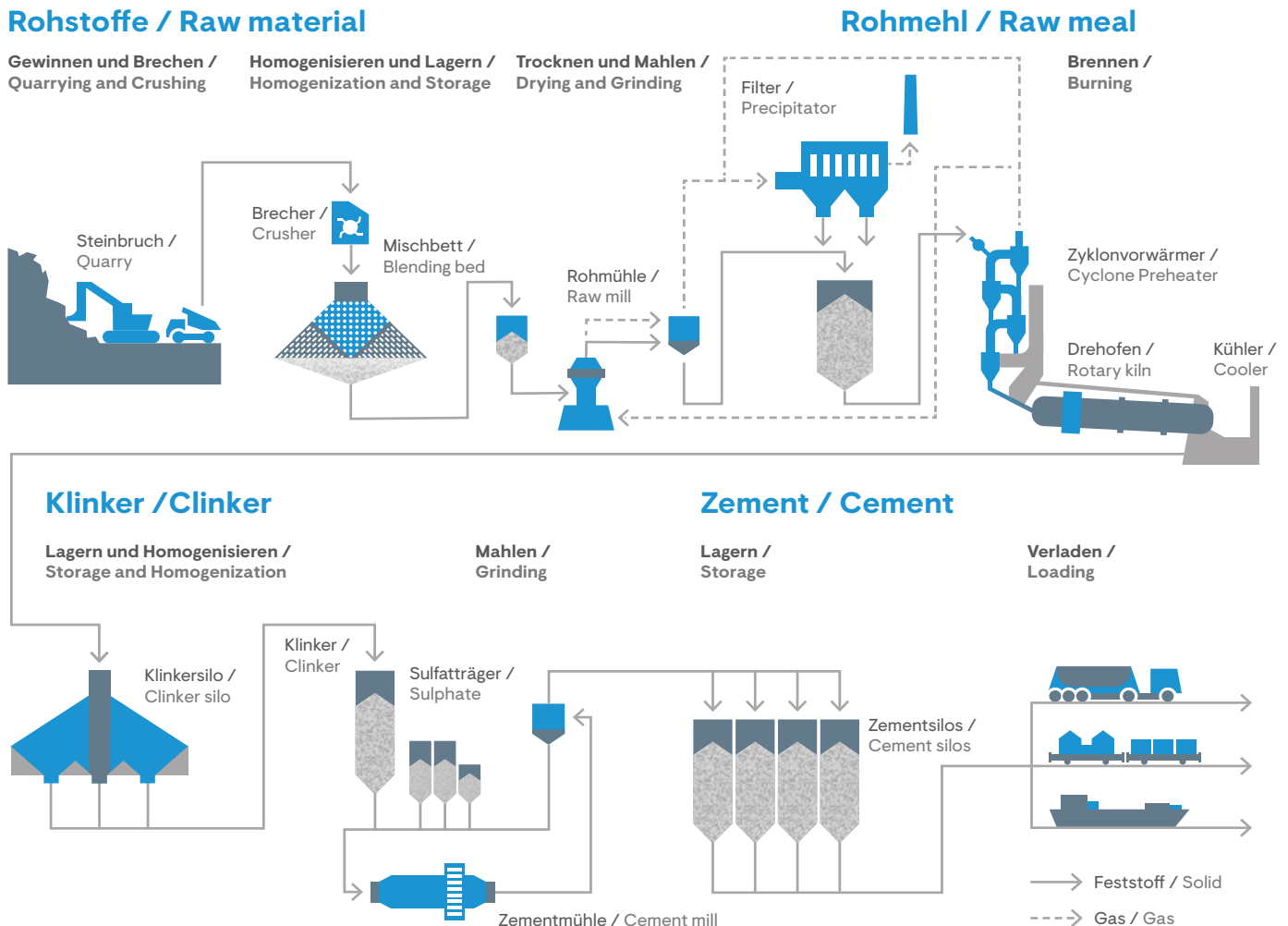
1 Cement manufacture

Cement is a construction material that sets automatically as a consequence of chemical reactions with water and subsequently retains its strength and soundness both when exposed to air and submerged in water.

Cement consists of finely ground Portland cement clinker and calcium sulphate (natural gypsum, anhydrite or gyps um from flue gas desulphurisation). In addition, cement may contain other main constituents, such as granulated blastfurnace slag, natural pozzolana (e.g. trass), fly ash, burnt oil shale or limestone. Fig. 1-1 depicts the manufacturing process schematically.

What is known as Portland cement clinker is made from a raw material mix mainly consisting of calcium oxide (CaO), silicon dioxide (SiO_2), aluminium oxide (alumina, Al_2O_3), and iron oxide (Fe_2O_3). These chemical constituents are supplied by limestone, chalk and clay or their natural blend, lime marl. Limestone and chalk are composed of calcium car-

Bild 1-1 Schematische Darstellung des Zementherstellungsprozesses vom Steinbruch bis zum Versand
Fig. 1-1 Schematic representation of the cement manufacturing process from quarry to dispatch



aus Calciumcarbonat (CaCO_3). Wesentliche Bestandteile des natürlichen Verwitterungsprodukts Ton sind feinkörnige und glimmerartige Minerale sowie in geringer Menge Quarz und Feldspat als Reste des Ausgangsmaterials. Tonminerale und Feldspat sind Verbindungen von Aluminiumoxid und Siliciumdioxid (Alumosilicate) und Alkalien wie Natrium und Kalium.

bonate (CaCO_3). The major constituents of clay, which is a natural product of weathering processes, are fine-grained mica-like minerals and smaller quantities of quartz and feldspar, which constitute residues of the starting material. Clay minerals and feldspar are compounds of aluminium oxide and silicon dioxide (aluminosilicates) with alkalis, such as so-

Bild 1-2 Zementwerke in der Bundesrepublik Deutschland im Jahr 2022
Fig. 1-2 Cement works in the Federal Republic of Germany in the year 2022



Das für die Bildung der Schmelze erforderliche Eisenoxid ist als Eisenhydroxid Bestandteil der Tonminerale oder wird als Eisenerz zugesetzt. Damit der Zement die vorgegebenen Qualitätsanforderungen erfüllt, ist eine exakt definierte Rohmaterialzusammensetzung erforderlich. Abweichungen können nur in geringem Umfang toleriert werden.

Das Rohstoffgemisch wird in einem Drehofen bei einer Temperatur von etwa 1.450 °C bis zum Sintern erhitzt. Aus den Ausgangsstoffen bilden sich dabei neue Verbindungen, die sogenannten Klinkerphasen. Das sind bestimmte Calciumsilicate und Calciumaluminat, die dem Zement seine charakteristische Eigenschaft der Erhärtung in Gegenwart von Wasser verleihen.

Der im Drehofen gebrannte Klinker wird anschließend in Zementmühlen unter Zusatz von Calciumsulfat und ggf. weiteren Hauptbestandteilen zu Zement gemahlen. Mit Hilfe des Calciumsulfats wird das Erstarrungsverhalten des Zements gesteuert, damit das Produkt bei der Betonherstellung optimal verarbeitet werden kann.

Die weiteren Hauptbestandteile neben Zementklinker sind silicatische, aluminatische oder kalkhaltige Stoffe. Sie tragen zur Erhärtung des Zements bei oder wirken sich günstig auf die physikalischen Eigenschaften des Betons aus.

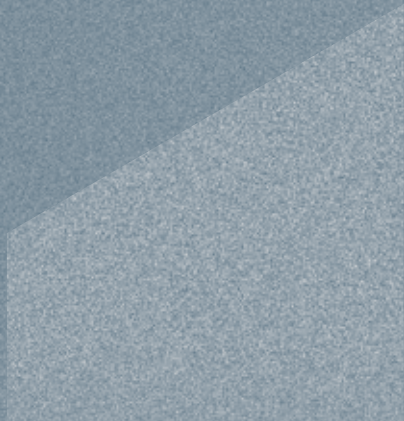
dium and potassium. The iron oxide required for melt formation is either contained in the clay minerals in the form of ferrous hydroxide or it is added in the form of iron ore. For the cement to conform to the quality requirements stipulated, a precisely defined raw material composition must be complied with. Only a small margin of deviation can be tolerated.

The raw material mix is heated up to a temperature of approximately 1,450°C in a rotary kiln until it starts sintering. This results in the starting materials forming new compounds known as clinker phases. These are certain calcium silicates and calcium aluminates which confer on the cement its characteristic feature of setting in the presence of water.

The clinker burnt in the rotary kiln is subsequently ground to cement in finish mills with calcium sulphate and, if necessary, with further main constituents being added. The calcium sulphate serves to adjust the setting behaviour of the cement in order to obtain optimum workability of the product during concrete production.

Apart from cement clinker, substances of silicate, aluminate or calcareous nature represent the further main constituents. They contribute to the setting of the cement or have favourable effects on the physical properties of the concrete.

2 Produktions- und Strukturdaten/ Production and structural data



2 Produktions- und Strukturdaten

Zement ist ein homogenes Massengut, das zu Lande per Lkw transportiert wird und deshalb transportkostenintensiv ist. Zement wird überwiegend zu lokalen Absatzmärkten geliefert. Die Produktionsstandorte sind den Rohstoffvorkommen entsprechend über das Bundesgebiet verteilt und befinden sich in unmittelbarer Nähe zu den jeweiligen Kalksteinvorkommen. Im Jahr 2021 produzierten 21 Unternehmen in 54 Werken etwa 35,0 Mio. Tonnen Zement [1] (Bild 1-2).

Die Tabellen 2-1 und 2-3 geben einen Überblick über die Klinkerproduktion in Deutschland sowie den daraus hergestellten Zement. Zu den Hauptabnehmern gehören die Transportbetonindustrie mit ca. 54% sowie die Hersteller von Betonbauteilen mit ca. 23% des inländischen Zementversandes. Etwa sieben Prozent des Zements wird als Sackzement versandt.

Zementklinker wird heute in Deutschland zum überwiegenden Teil nach dem Trockenverfahren in Drehöfen mit Zyklonvorwärmer hergestellt. Einen deutlich geringeren Anteil an der Produktion haben Öfen mit Rostvorwärmer (Tabelle 2-2).

2 Production and structural data

Cement is a homogeneous bulk commodity that, given the high cost of road transport by truck is mainly delivered to local markets. Production facilities of the German cement industry are spread over the Federal Republic of Germany according to the appropriate mineral resources and located in the immediate vicinity of the respective limestone deposits. In 2021, 21 companies with their 54 works produced about 35.0 million t of cement in Germany [1] (Fig. 1-2).

Tables 2-1 and 2-3 give an overview of the clinker output in Germany and the cement made from it. The ready-mixed concrete industry (54% of domestic cement deliveries) and the manufacturers of concrete elements (23% of domestic cement deliveries) are among the principal buyers of cement. Seven percent of the cement is dispatched as bagged cement.

In Germany most of the cement clinker is nowadays produced in rotary kilns with cyclone preheaters applying the dry process. Kilns equipped with grate preheaters account for a significantly lower share of output (Table 2-2).

Tabelle 2-1 **Produktion, Versand, Export und Import**
Table 2-1 **Output, deliveries, export and import**

| Jahr / Year | Produktion / Production | | Zementversand / Cement deliveries | | | |
|--------------------|-------------------------|--------------------|----------------------------------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------|
| | Klinker / Clinker | Zement / Cement | Zementversand Inland ¹⁾ / Domestic deliveries | Zementexporte / Cement exports | Zementversand gesamt / Total cement deliveries | Zementimport / Cement import |
| | 1.000 t | 1.000 t | 1.000 t | 1.000 t | 1.000 t | 1.000 t |
| 2010 | 22.996 | 29.661 | 23.406 | 6.609 | 30.015 | 1.285 |
| 2011 | 24.775 | 33.532 | 26.767 | 7.174 | 33.941 | 1.305 |
| 2012 | 24.581 | 31.925 | 25.492 | 6.542 | 32.034 | 1.277 |
| 2013 | 23.127 | 30.927 | 25.201 | 6.055 | 31.256 | 1.344 |
| 2014 | 23.871 | 31.717 | 25.850 | 5.748 | 31.598 | 1.325 |
| 2015 | 23.355 | 31.160 | 25.334 | 6.262 | 31.596 | 1.308 |
| 2016 | 23.423 | 32.674 | 26.185 | 6.093 | 32.278 | 1.320 |
| 2017 | 24.802 | 33.991 | 27.265 | 6.211 | 33.476 | 1.603 |
| 2018 | 24.469 | 33.655 | 27.449 | 6.324 | 33.773 | 1.680 |
| 2019 | 24.578 | 34.185 | 27.554 | 6.571 | 34.125 | 1.198 |
| 2020 | 24.709 | 35.478 | 29.013 | 6.083 | 35.096 | 1.116 |
| 2021 ²⁾ | 25.232 | 34.966 | 28.051 | 6.698 | 34.749 | 1.095 |

¹⁾ inkl. Schätzung Inlandsversand Nicht-VDZ-Mitglieder / incl. estimation of domestic deliveries for non VDZ members

²⁾ Außenhandelsdaten vorläufig / Foreign trade data preliminary

Tabelle 2-2 Anzahl und Kapazität der Öfen mit Betriebsgenehmigungen in Deutschland
Table 2-2 Number and capacity of kilns with operating permits in Germany

| | Stand: 01.01.2020 / As of 1st Jan 2020 | | | Stand: 01.01.2021 / As of 1st Jan 2021 | | | Stand: 01.01.2022 / As of 1st Jan 2022 | | |
|--------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------|------|-------------------------------------------|-------------------------|------|-------------------------------------------|-------------------------|------|
| | Anzahl / Number | Kapazität / Capacity | | Anzahl / Number | Kapazität / Capacity | | Anzahl / Number | Kapazität / Capacity | |
| | | t/d | % | | t/d | % | | t/d | % |
| Ofen mit Zyklonvorwärmer / Kilns with cyclone preheaters | 36 | 99.060 | 96,3 | 36 | 99.060 | 96,3 | 36 | 99.060 | 96,3 |
| Ofen mit Rostvorwärmer / Kilns with grate preheaters | 2 | 2.600 | 2,5 | 2 | 2.600 | 2,5 | 2 | 2.600 | 2,5 |
| Schachtofen / Shaft kilns | 8 | 1.200 | 1,2 | 8 | 1.200 | 1,2 | 8 | 1.200 | 1,2 |
| Summe / Total | 46 | 102.860 | 100 | 46 | 102.860 | 100 | 46 | 102.860 | 100 |
| mittlere Ofenkapazität in t/d / Average kiln capacity in t/d | | Drehöfen / Rotary kilns | | 2.675 | | | | 2.675 | |
| | | Schachtofen / Shaft kilns | | 150 | | | | 150 | |

Quelle / Source: VDZ

Tabelle 2-3 Inlandsversand der Verbandsmitglieder nach Zementarten
Table 2-3 Domestic deliveries of VDZ members by cement types

| Jahr/ Year | CEM | | | | | | IV + V + Sonst. ^{3)/ Others} | Gesamt/ Total |
|--------------------|---------|------------------|---------------------------|---------------------|-------|--|-------------------------------------------|------------------|
| | I | II ²⁾ | II/S + II/P ²⁾ | II/T + II/LL + II/M | III | | | |
| | 1.000 t | | | | | | | |
| 2005 ¹⁾ | 13.226 | 8.055 | 3.740 | 4.315 | 3.621 | | 193 | 25.095 |
| 2006 | 11.189 | 10.628 | 5.202 | 5.426 | 4.764 | | 263 | 26.843 |
| 2007 | 8.932 | 11.299 | 5.259 | 6.040 | 4.883 | | 286 | 25.399 |
| 2008 | 7.710 | 12.514 | 5.710 | 6.801 | 5.289 | | 251 | 25.764 |
| 2009 | 8.031 | 11.122 | 3.075 | 8.047 | 4.212 | | 223 | 23.588 |
| 2010 | 7.694 | 10.550 | 3.017 | 7.533 | 4.549 | | 179 | 22.972 |
| 2011 | 8.286 | 12.000 | 3.987 | 8.013 | 5.664 | | 268 | 26.218 |
| 2012 | 7.404 | 12.060 | 4.635 | 7.425 | 5.530 | | 275 | 25.269 |
| 2013 ¹⁾ | 7.130 | 11.851 | 4.428 | 7.423 | 5.498 | | 241 | 24.720 |
| 2014 | 7.554 | 11.826 | 4.456 | 7.370 | 5.677 | | 279 | 25.336 |
| 2015 | 7.554 | 11.350 | 4.461 | 6.889 | 5.653 | | 292 | 24.849 |
| 2016 ¹⁾ | 7.305 | 11.955 | 4.880 | 7.074 | 6.095 | | 187 | 25.542 |
| 2017 | 7.342 | 12.262 | 5.029 | 7.233 | 6.752 | | 240 | 26.596 |
| 2018 ¹⁾ | 7.344 | 12.589 | 5.012 | 7.578 | 6.214 | | 249 | 26.396 |
| 2019 | 7.251 | 12.982 | 5.103 | 7.879 | 6.008 | | 251 | 26.492 |
| 2020 ¹⁾ | 7.437 | 14.100 | 5.223 | 8.877 | 6.195 | | 313 | 28.045 |
| 2021 | 7.262 | 13.974 | 4.582 | 9.392 | 5.428 | | 515 | 27.179 |

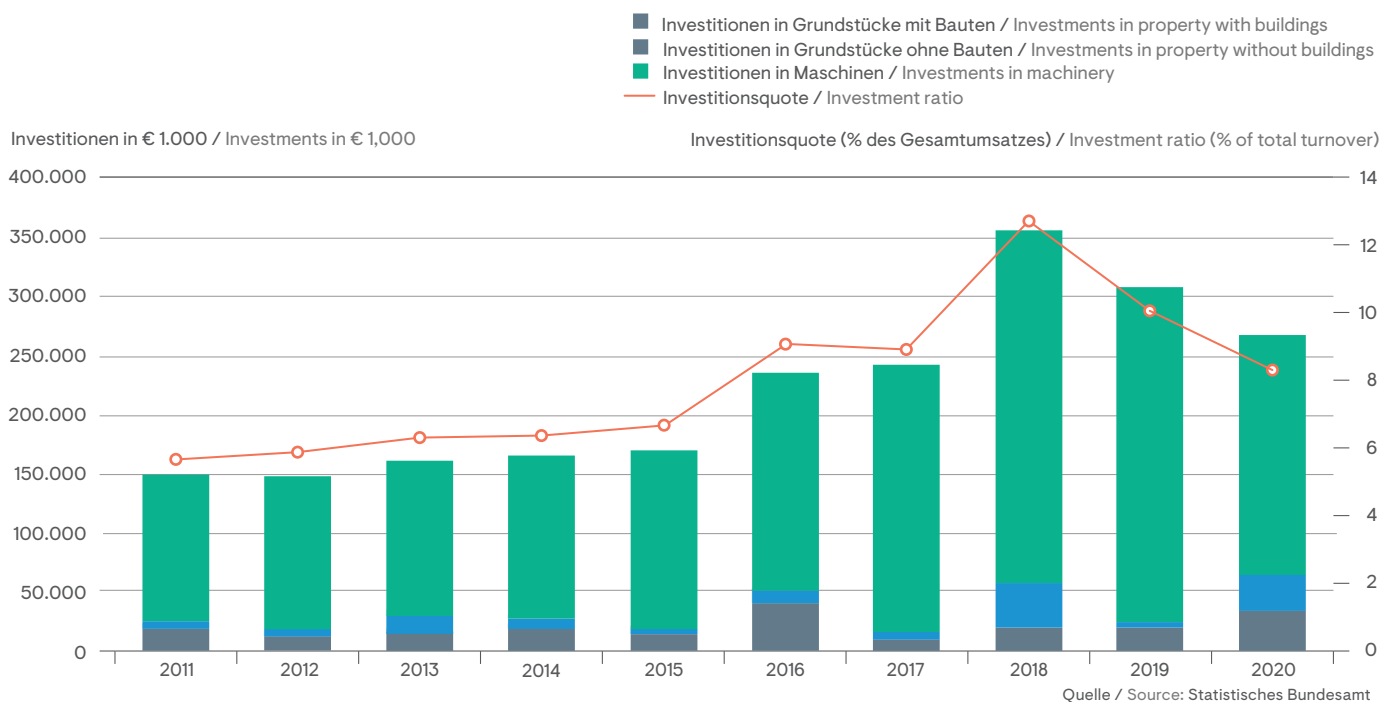
Anmerkung/Note:

CEM I = Portlandzement; CEM II/S = Portlandhüttenzement; CEM II/P = Portlandpuzzolanazement; CEM II/V = Portlandflugaschezement;
 CEM II/T = Portlandschieferzement; CEM II/LL = Portlandkalksteinzement; CEM II/M = Portlandkompositzement; CEM III = Hochofenzement;
 CEM IV = Puzzolanazement; CEM V = Kompositzement; Sonstige = sonstige bauaufsichtlich zugelassene Zemente, Boden- und Tragschichtbinder (Festigkeit $\geq 32,5 \text{ N/mm}^2$), Klinkermehl
 CEM I = Portland cement; CEM II/S = Portland-slag cement; CEM II/P = Portland pozzolana cement; CEM II/V = Portland-fly ash cement;
 CEM II/T = Portland-burnt shale cement; CEM II/LL = Portland-limestone cement; CEM II/M = Portland-composite cement; CEM III = blastfurnace cement;
 CEM IV = pozzolana cement; CEM V = composite cement; Other = other cements approved by the building supervisory authorities, road binders (strength $\geq 32.5 \text{ N/mm}^2$), clinker meal

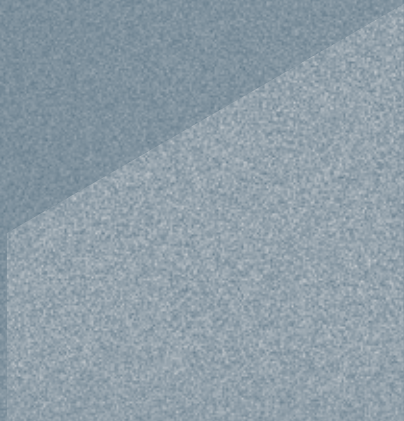
¹⁾ Änderung des Berichtskreises. / Reporting different from that of the previous year.²⁾ Bis einschließlich 2018 inkl. CEM II/V-Zemente, die aus Gründen der Geheimhaltung ab 2019 in der Spalte IV+V+Sonst. enthalten sind. / Until 2018 incl. CEM II/V cements, which are from 2019 included in column IV+V+other for reasons of secrecy.³⁾ Ab 2019 inklusive CEM II/V-Zemente. / From 2019 incl. CEM II/V cements.

Quelle / Source: VDZ

Bild 2-1 Investitionen der deutschen Zementindustrie
Fig. 2-1 Investments of the German cement industry



3 Einsatzstoffe/ Input materials



3 Einsatzstoffe

3.1 Rohstoffe

Die wichtigsten Ausgangsstoffe zur Herstellung des Portlandzementklinkers sind Kalkstein oder Kreide und Ton oder deren natürlich vorkommendes Gemisch, der Kalksteinmergel. In Abhängigkeit von der Rohstoffsituation am Standort des Zementwerks kann es erforderlich sein, der Rohstoffmischung reinen Kalkstein, Eisenerz, Sand oder andere Korrekturstoffe zuzusetzen, um fehlende chemische Bestandteile auszugleichen. Neben natürlichen Rohstoffen können auch alternative Rohstoffe, wie z.B. Kalkschlämme, Gießereialsande und Flugaschen, eingesetzt werden. Sie enthalten als Hauptbestandteile ebenfalls Siliciumdioxid, Aluminiumoxid, Eisenoxid und/oder Calciumoxid und werden mit den Rohstoffen mengenmäßig so kombiniert, dass die Anforderungen an die vorgegebene Klinkerzusammensetzung erfüllt werden. Die Voraussetzungen, die die stoffliche Zusammensetzung eines alternativen Rohstoffs erfüllen müssen, hängen in erster Linie von der vorgegebenen Rohstoffsituation eines Zementwerkes, d.h. der Zusammensetzung des Kalkstein- bzw. Mergelvorkommens ab.

In Tabelle 3-1 werden die im Jahr 2021 eingesetzten Rohstoffe aufgeführt. Ihrer chemischen Zusammensetzung entsprechend lassen sie sich in unterschiedliche Gruppen einteilen. Der Einsatz erfolgt hauptsächlich als Rohmaterialkomponente beim Klinkerbrennprozess. Hüttensand, ein geringer Teil des Kalksteins, Ölschiefer (in gebrannter Form) sowie Trass werden als Hauptbestandteile im Zement verwendet.

Die Zementindustrie bemüht sich, den Anteil anderer Bestandteile neben Klinker im Zement zu erhöhen. So können die Qualität des Produkts gezielt verändert, die Wirtschaftlichkeit der Herstellung verbessert, natürliche Ressourcen geschont sowie Stoffe aus anderen Prozessen im Sinne des deutschen Kreislaufwirtschaftsgesetzes sinnvoll verwertet werden.

Als Stoffe, die Zementklinker im Zement ersetzen können, sind in Deutschland in erster Linie Hüttensand (granulierte Hochofenschlacke) und daneben Kalkstein von technischer Bedeutung. Hüttensand ist ein Produkt der Roheisenherstellung und wird unter anderem zur Herstellung von Portlandhütten- und Hochofenzementen verwendet. Perspektivisch können auch calcinierte Tone zunehmend eine Rolle als Klinkerersatz spielen [2].

Der Bedarf an Sulfatträgern, mit denen die Verarbeitungseigenschaften der Zemente gesteuert werden, wird zu ca. 89 % durch natürlichen Gips und/oder Anhydrit gedeckt. Bei dem restlichen Anteil handelt es sich um Gips aus Rauchgasentschwefelungsanlagen.

Tabelle 3-1 Rohstoffeinsatz 2021
Table 3-1 Raw materials input in 2021

| Gruppe / Group | Rohstoff / Raw material | Einsatz / Input quantity 1.000 t/a |
|----------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|
| Ca | Kalkstein / Mergel / Kreide / Limestone / Marl / Chalk | 40.335 |
| | Sonstige, wie: / Others, such as: - Kalkschlämme aus der Trink- und Abwasserbereitung / Lime sludge from drinking water and sewage treatment - Kalkhydrat / Hydrated lime - Porenbetongranulat / Foam concrete granulates - Calciumfluorid / Calcium fluoride | 91 |
| Si | Sand / Sand | 1.206 |
| | Gießereialsand / Used foundry sand | 158 |
| Si-Al | Ton / Clay | 1.043 |
| | Bentonit / Kaolinit / Bentonite / Kaolinite | 34 |
| Fe | Eisenerz / Iron ore | 155 |
| | Sonstige Einsatzstoffe aus der Eisen- und Stahlindustrie, wie: / Other input materials from the iron and steel industries, such as: - Kiesabbrand / Roasted pyrite - verunreinigtes Erz / Contaminated ore - Eisenoxid-Flugasche-Gemisch / Iron oxide fly ash blends - Stahlwerksstäube / Dusts from steel plants - Walzzunder / Mill scale | 125 |
| Si-Al-Ca | Hüttensand / Granulated blastfurnace slag | 7.413 |
| | Flugasche / Fly ash | 280 |
| | Ölschiefer / Oil shale | 160 |
| | Trass / Trass | 47 |
| | Sonstige, wie: / Others, such as: - Papierreststoffe / Paper residuals - Aschen aus Verbrennungsprozessen / Ashes from incineration processes - Mineralische Reststoffe, z. B. ölverunreinigte Böden / Mineral residuals, e. g. soil contaminated by oil | 54 |
| S | Natürlicher Gips / Natural gypsum | 974 |
| | Natürlicher Anhydrit / Natural anhydrite | 623 |
| | Synthetischer Anhydrit / Synthetic anhydrite | 5 |
| | Gips aus der Rauchgasentschwefelung / Gypsum from flue gas desulphurisation | 200 |
| Al | Einsatzstoffe aus der Metallindustrie, wie: / Input materials from the metal industry, such as: - Aufbereitungsrückstände von Salzschlacken / Residues from reprocessing salt slag - Aluminiumhydroxid / Aluminium hydroxide | 43 |

Quellen / Sources: VDZ, Fachverband Eisenhüttenschlacken

3.2 Brennstoffe

Brennstoffenergie wird bei der Zementherstellung im Wesentlichen für das Brennen des Zementklinkers aufgewendet. In geringem Umfang wird thermische Energie auch für die Trocknung von Rohstoffen und weiteren Zementhauptbestandteilen, wie z. B. Hüttensand, eingesetzt. Die traditionellen Brennstoffe in der deutschen Zementindustrie sind seit Mitte der 70er-Jahre Steinkohle und Braunkohle, in geringem Umfang auch schweres Heizöl. Seit 1990 wird ein nennenswerter Teil der Kohle durch Petrolkoks ersetzt. Petrolkoks ist eine kohleähnliche Fraktion des Mineralöls, die bei der Rohölaufbereitung entsteht. Zum Anfahren des Ofens sowie für Trocknungsprozesse werden darüber hinaus leichtes und schweres Heizöl sowie Gas verwendet. Die Gesamtaufstellung der in der Zementindustrie eingesetzten Energieträger zeigt Tabelle 3-2 [1, 3].

Neben den fossilen Brennstoffen werden heutzutage in hohem Maße alternative Brennstoffe beim Klinkerbrennprozess eingesetzt. Ihr Anteil am gesamten Brennstoffenergieeinsatz der deutschen Zementindustrie betrug 69,3 % im Jahr 2021. Eine Aufstellung der eingesetzten alternativen Brennstoffe sowie deren durchschnittliche Heizwerte enthält Tabelle 3-3.

3 Input materials

3.1 Raw materials

Limestone or chalk and clay or their natural blend – lime marl – constitute the most important raw materials for the production of Portland cement clinker. Depending on the raw material situation at the location of a cement works, it may be necessary to add pure limestone, iron ore, sand or other corrective substances to the raw material mix in order to compensate for the lack of certain chemical constituents. Apart from natural raw materials, also alternative raw materials can be utilised, such as lime sludge, used foundry sand and fly ash. They contain silicon dioxide, aluminium oxide, iron oxide and/or calcium oxide as main constituents as well and are combined with the raw materials in quantities apt to ensure compliance with the clinker composition specified. The preconditions to be met by the material composition of an alternative raw material primarily depend on the raw material situation prevailing at a cement works, i.e. the composition of the limestone and marl deposits, respectively.

Table 3-1 lists the raw materials utilised in the year 2021. They can be classified into different groups, according to their chemical composition. Most of them are utilised as raw material components in the clinker burning process. Blastfurnace slag, a small proportion of the limestone, oil shale (burnt) and trass are used as main constituents of cement.

Tabelle 3-2 Brennstoffenergieeinsatz nach Energieträgern
Table 3-2 Fuel energy consumption classified by energy sources

| Brennstoff / Fuel | | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 |
|-----------------------------------------------------------------------|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Steinkohle / Coal | Mio. GJ/a / million GJ/a | 9,8 | 7,8 | 8,9 | 8,1 | 8,3 | 8,2 | 7,9 | 7,3 | 6,6 | 7,1 |
| | Anteil % / share % | 10,4 | 8,7 | 9,6 | 9,0 | 9,1 | 8,4 | 8,2 | 7,6 | 6,8 | 7,3 |
| Braunkohle / Lignite | Mio. GJ/a / million GJ/a | 22,3 | 19,7 | 19,5 | 18,7 | 18,9 | 20,5 | 19,2 | 18,1 | 19,0 | 18,9 |
| | Anteil % / share % | 23,7 | 21,8 | 21,1 | 20,8 | 20,8 | 21,2 | 20,0 | 18,9 | 19,8 | 19,4 |
| Petrolkoks / Petcoke | Mio. GJ/a / million GJ/a | 3,2 | 3,2 | 4,1 | 3,4 | 3,2 | 3,5 | 2,7 | 2,4 | 2,1 | 2,1 |
| | Anteil % / share % | 3,4 | 3,5 | 4,4 | 3,7 | 3,6 | 3,7 | 2,8 | 2,5 | 2,2 | 2,1 |
| Heizöl S / Heavy fuel oil | Mio. GJ/a / million GJ/a | 0,3 | 0,2 | 0,2 | 0,3 | 0,6 | 0,5 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,1 |
| | Anteil % / share % | 0,4 | 0,2 | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,5 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,1 |
| Heizöl EL / Fuel oil | Mio. GJ/a / million GJ/a | 0,7 | 1,2 | 0,7 | 0,7 | 0,6 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 |
| | Anteil % / share % | 0,7 | 1,3 | 0,8 | 0,8 | 0,6 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 |
| Erdgas und andere Gase / Natural gas and other gases | Mio. GJ/a / million GJ/a | 0,2 | 0,3 | 0,5 | 0,4 | 0,5 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,7 | 0,9 |
| | Anteil % / share % | 0,2 | 0,4 | 0,5 | 0,5 | 0,6 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,7 | 0,9 |
| Sonstige fossile Brennstoffe / Other fossil fuels | Mio. GJ/a / million GJ/a | 0,1 | 1,4 | < 0,1 | 0,3 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | 0,4 | 0,4 | 0,3 |
| | Anteil % / share % | 0,2 | 1,6 | < 0,1 | 0,3 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | 0,4 | 0,4 | 0,3 |
| Fossile Brennstoffe gesamt / Total fossil fuels | Mio. GJ/a / million GJ/a | 36,6 | 33,8 | 33,9 | 31,9 | 32,1 | 33,9 | 31,2 | 29,9 | 29,6 | 30,1 |
| | Anteil % / share % | 39,0 | 37,5 | 36,6 | 35,4 | 35,2 | 35,0 | 32,5 | 31,1 | 30,8 | 30,8 |
| Alternative Brennstoffe gesamt / Total alternative fuels | Mio. GJ/a / million GJ/a | 57,3 | 56,6 | 58,6 | 58,2 | 59,1 | 63,0 | 64,8 | 66,1 | 66,4 | 67,6 |
| | Anteil % / share % | 61,0 | 62,5 | 63,4 | 64,6 | 64,8 | 65,0 | 67,5 | 68,9 | 69,2 | 69,3 |
| Thermische Energie gesamt / Total thermal energy consumption | Mio. GJ/a / million GJ/a | 93,9 | 90,4 | 92,5 | 90,1 | 91,2 | 96,9 | 96,0 | 96,0 | 96,0 | 97,7 |
| | Anteil % / share % | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |

Tabelle 3-3 Einsatz und durchschnittliche Heizwerte alternativer Brennstoffe 2021
Table 3-3 Used quantity and average calorific value of alternative fuels in 2021

| Alternative Brennstoffe / Alternative fuel | 1.000 t | MJ/kg |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|---------|-------|
| Altreifen / Waste tyres | 166 | 28 |
| Altöl / Waste oil | 70 | 27 |
| Fraktionen aus Industrie-/Gewerbeabfällen / Fractions of industrial and commercial waste: | | |
| - Zellstoff, Papier und Pappe / Pulp, paper and cardboard | 65 | 4 |
| - Kunststoff / Plastics | 932 | 23 |
| - Verpackungen / Packaging | - | - |
| - Abfälle aus der Textilindustrie / Wastes from the textile industry | - | - |
| - Sonstige / Others | 1.044 | 20 |
| Tiermehle und -fette / Meat and bone meal and animal fat | 143 | 18 |
| Aufbereitete Fraktionen aus Siedlungsabfällen / Mixed fractions of municipal waste | | |
| Altholz / Waste wood | 1 | 13 |
| Lösungsmittel / Solvents | 133 | 25 |
| Bleicherde / Fuller's earth | - | - |
| Klärschlamm / Sewage sludge | 665 | 3 |
| Sonstige, wie: / Others, such as: | | |
| - Ölschlamm / Oil sludge | | |
| - Organische Destillationsrückstände / Organic distillation residues | 113 | 5 |

The cement industry is making efforts to increase the share in the cement of constituents other than clinker. This allows to modify the quality of the product purposefully, to improve the economic efficiency of the manufacturing process, to conserve natural resources, and to utilise materials generated by other processes in a useful manner, as stipulated by the German Recycling Act.

The materials, having industrial importance as potential substitutes for cement clinker in the cement in Germany, are chiefly (granulated) blastfurnace slag and also limestone. Blastfurnace slag is a spin-off of pig iron production and is used, among others, in the manufacture of Portland slag and blastfurnace cements. In the future, calcined clays may also play an increasingly important role as clinker substitutes [2].

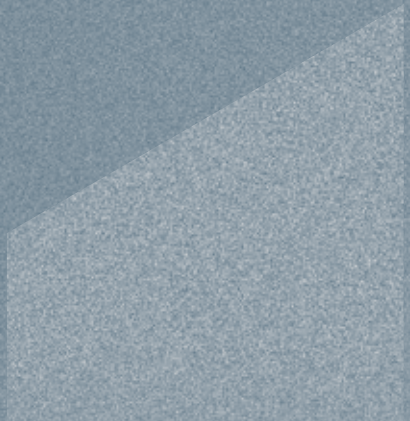
Natural gypsum and/or anhydrite cover about 89 % of the demand for sulphate agents, which serve to adjust the working properties of the cements. Gypsum from flue gas desulphurisation accounts for the remaining share.

3.2 Fuels

Cement clinker burning uses up most of the fuel energy consumed in cement manufacture. To a lesser extent thermal energy is also used for drying raw materials and other major cement constituents, such as granulated blastfurnace slag. Since the mid-1970ies, the traditional fuels of the German cement industry have been coal and lignite and, on a smaller scale, also heavy fuel oil. A significant portion of coal has been replaced by petcoke since the 1990ies. Petcoke is a coal-like fraction of mineral oil generated in crude oil processing. In addition to that, light and heavy fuel oil and gas are used for kiln start-up and drying processes. Table 3-2 lists all the energy sources exploited in the German cement industry [1, 3].

Apart from fossil fuels, the use of alternative fuels in the clinker burning process is gaining in importance nowadays. Alternative fuels accounted 69.3 % of the total fuel energy demand of the German cement industry in 2021. Table 3-3 lists the alternative fuels utilised and their average calorific values.

4 Energie/ Energy



4 Energie

Zur Herstellung einer Tonne Zement wurden in Deutschland 2021 durchschnittlich 2.798 MJ Brennstoffenergie und 112,4 kWh elektrische Energie eingesetzt (Tabellen 4-1 und 4-2). Brennstoffenergie wird im Wesentlichen für das Brennen des Klinkers benötigt; elektrische Energie wird vor allem für die Rohmaterialaufbereitung (ca. 25 %), für das Brennen und Kühlen des Klinkers (ca. 24 %) und für die Mahlung der Zementbestandteile (ca. 46 %) verwendet.

Die Entwicklung des spezifischen Energieeinsatzes in der Zementindustrie ist in Bild 4-1 dargestellt.

Nach 1990 hat u.a. die Modernisierung der Zementwerke in den neuen Bundesländern zu einer Abnahme des spezifischen Brennstoffenergieeinsatzes beigetragen. Bezogen auf die Tonne Zement liegt er seit vielen Jahren zwischen 2.700 und 3.000 MJ.

Der Anteil der alternativen Brennstoffe am Energieeinsatz konnte in den letzten 20 Jahren deutlich gesteigert werden. Dadurch nahm der Einsatz wertvoller fossiler Brennstoffe, wie vor allem Stein- und Braunkohle, stetig ab und macht heute nur noch etwa 31 % des Brennstoffenergieeinsatzes aus. Die hohe Energieeffizienz des Zementherstellungsprozesses wurde dadurch nicht beeinflusst [4, 6, 7].

Höhere Anforderungen an die Produktqualität sowie Maßnahmen zur Verbesserung des Umweltschutzes waren die wesentlichen Ursachen für den tendenziell steigenden elektrischen Energieeinsatz der letzten Jahrzehnte (Bild 4-2). Nach einigen Jahren der Stabilisierung, zu der u. a. Verbesserungen in der Mahltechnik beitrugen, stieg der spezifische elektrische Energiebedarf in den letzten Jahren wieder an. Wesentlicher Grund hierfür ist der gestiegene Bedarf an fein aufgemahlten leistungsstarken Zementen in der Baustoffindustrie.

Tabelle 4-1 **Thermischer Brennstoffenergieeinsatz**
Table 4-1 **Thermal fuel energy consumption**

| Jahr / Year | Thermischer Brennstoffenergieeinsatz Thermal fuel energy consumption | |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| | absolut in Mio. GJ/a Absolute in million GJ/a | spezifisch in MJ/t Zement Specific in MJ/t cement |
| 1997 | 99,3 | 2.975 |
| 1998 | 100,7 | 2.905 |
| 1999 | 102,3 | 2.800 |
| 2000 | 99,3 | 2.835 |
| 2001 | 89,8 | 2.790 |
| 2002 | 85,8 | 2.790 |
| 2003 | 91,3 | 2.740 |
| 2004 | 94,9 | 2.920 |
| 2005 | 88,7 | 2.785 |
| 2006 | 92,1 | 2.674 |
| 2007 | 99,5 | 2.915 |
| 2008 | 95,8 | 2.764 |
| 2009 | 88,2 | 2.848 |
| 2010 | 88,1 | 2.874 |
| 2011 | 94,4 | 2.759 |
| 2012 | 93,9 | 2.866 |
| 2013 | 90,4 | 2.857 |
| 2014 | 92,5 | 2.849 |
| 2015 | 90,1 | 2.869 |
| 2016 | 91,2 | 2.763 |
| 2017 | 96,9 | 2.824 |
| 2018 | 96,0 | 2.804 |
| 2019 | 96,0 | 2.772 |
| 2020 | 96,0 | 2.733 |
| 2021 | 97,6 | 2.798 |

Quelle / Source: VDZ

4 Energy

In Germany, the production of one tonne of cement consumed an average of 2,798 MJ fuel energy and 112,4 kWh electrical energy in 2021 (Tables 4-1 and 4-2). Fuel energy is primarily required for clinker burning, while electrical energy is chiefly used for raw material pre-treatment (about 25 %), for burning and cooling the clinker (about 24 %) and for grinding of the cement constituents (about 46 %).

The development of the specific energy consumption in the cement industry is shown in Figure 4-1.

After 1990 inter alia the modernisation of the cement works in the newly formed German States resulted in a decrease in specific fuel energy consumption. After that the cement specific fuel energy consumption was stabilized in the range of 2,700 to 3,000 MJ/t cement.

During the last 20 years the use of alternative fuels could be increased significantly. Therefore, the use of fossil fuels, especially hard coal and lignite, decreased continuously. As a result appr. 31 % of the fuel energy consumption is covered by fossil fuels today. The high energy efficiency of the cement production process was not affected by this substitution [4, 6, 7].

More demanding specifications for product quality and measures aimed at improving environmental protection were the major causes for the upward tendency in electrical power demand over the past decades (Fig. 4-2). After several years of stabilization, in particular due to improvements in grinding technologies, in the last years a noticeable increase of the specific electrical energy demand has been observed. The major reason for that is the increased demand of finely ground high performance cements within the building and construction industry.

Tabelle 4-2 Elektrischer Energieeinsatz
Table 4-2 Electrical power consumption

| Jahr / Year | Elektrischer Energieeinsatz Electrical power consumption | |
|----------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| | absolut in Mio. MWh/a Absolute in million MWh/a | spezifisch in kWh/t Zement Specific in kWh/t cement |
| 1997 | 3,47 | 103,9 |
| 1998 | 3,63 | 104,7 |
| 1999 | 3,73 | 102,0 |
| 2000 | 3,55 | 101,5 |
| 2001 | 3,21 | 99,8 |
| 2002 | 3,17 | 103,0 |
| 2003 | 3,32 | 99,5 |
| 2004 | 3,32 | 102,1 |
| 2005 | 3,24 | 101,9 |
| 2006 | 3,42 | 99,4 |
| 2007 | 3,40 | 99,7 |
| 2008 | 3,43 | 99,0 |
| 2009 | 3,15 | 101,8 |
| 2010 | 3,37 | 109,8 |
| 2011 | 3,74 | 109,4 |
| 2012 | 3,63 | 110,8 |
| 2013 | 3,49 | 110,0 |
| 2014 | 3,57 | 110,0 |
| 2015 | 3,49 | 111,2 |
| 2016 | 3,62 | 109,8 |
| 2017 | 3,77 | 110,0 |
| 2018 | 3,78 | 110,9 |
| 2019 | 3,85 | 111,9 |
| 2020 | 3,84 | 109,4 |
| 2021 | 3,92 | 112,4 |

Quelle / Source: VDZ

Bild 4-1 Entwicklung des spezifischen Energieeinsatzes
Fig. 4-1 Development of the specific fuel energy consumption

Spezifischer Energieeinsatz in kJ/kg Zement / Specific energy demand in kJ/kg cement

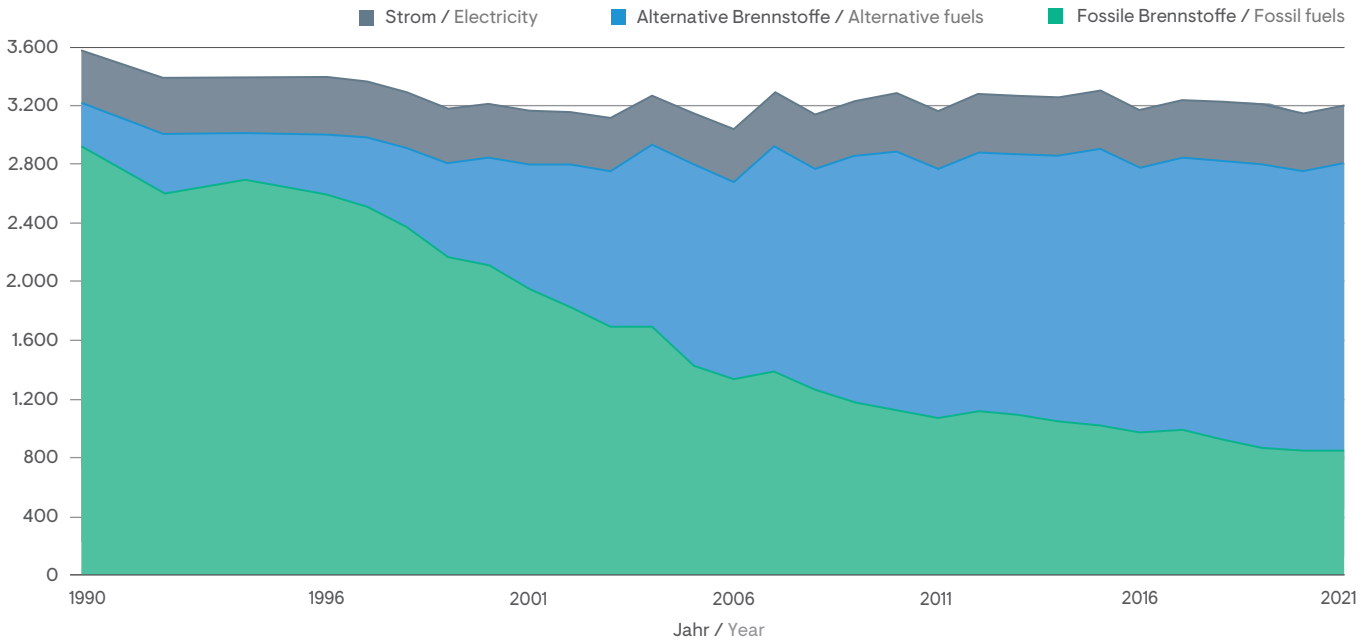
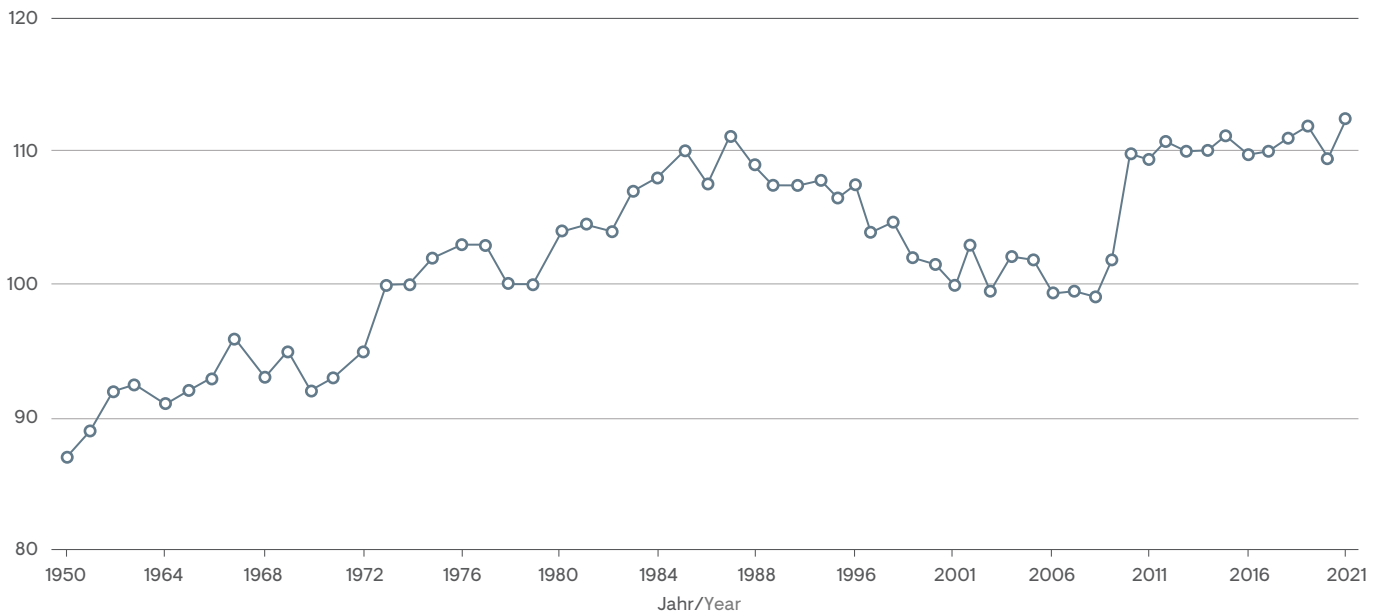


Bild 4-2 Entwicklung des spezifischen elektrischen Energieeinsatzes
Fig. 4-2 Development of the specific electrical power consumption

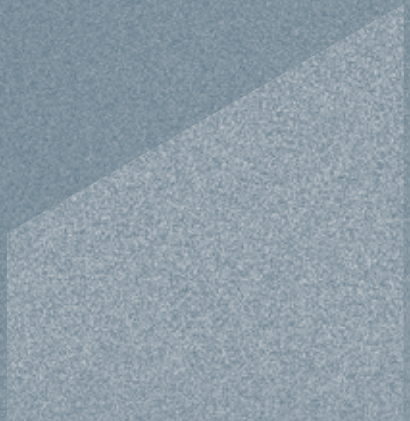
Spezifischer elektrischer Energieeinsatz in kWh/t Zement / Specific electrical power consumption in kWh/t cement



Anmerkung/Note:

Berücksichtigung der neuen Bundesländer seit 1987 / New Federal States included since 1987

5 Emissionen/ Emissions



5 Emissionen

In Deutschland unterliegen die Errichtung und der Betrieb von Zementwerken den Bestimmungen des Bundes-Immissionsschutzgesetzes. Je nach Brennstoffeinsatz werden unterschiedliche Anforderungen an die einzuhaltenden Emissionskonzentrationen gestellt. Falls ausschließlich Regelbrennstoffe eingesetzt werden, sind die Regelungen der Technischen Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft) maßgeblich. Wird ein Teil der Regelbrennstoffe durch Abfälle als alternative Brennstoffe ersetzt, so gelten zusätzlich die Bestimmungen der 17. Verordnung zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (17. BImSchV). Auf dieser gesetzlichen Basis kann die zuständige Behörde sowohl Messungen aus besonderem Anlass als auch erstmalige und wiederkehrende Messungen anordnen, die nur von zugelassenen Messstellen durchgeführt werden dürfen.

Zur Bestimmung der Emissionen von Zementwerken stehen sowohl kontinuierliche als auch diskontinuierliche Messverfahren zur Verfügung, die in entsprechenden VDI-Richtlinien und DIN-Normen beschrieben sind (Tabelle 5-1). Kontinuierlich werden hauptsächlich Staub, Stickstoffoxide (NO_x), Schwefeldioxid (SO_2), Kohlenmonoxid (CO), Quecksilber (Hg) und Ammoniak (NH_3) sowie vermehrt die Summe organischer Verbindungen gemessen; die anderen immissionsrechtlich relevanten Parameter werden in der Regel diskontinuierlich auf der Basis von Einzelmessungen bestimmt.

Die in diesem Kapitel dargestellten Messergebnisse beruhen auf den gesetzlich vorgeschriebenen Emissionsmessungen an Drehofenanlagen der deutschen Zementindustrie. Kontinuierlich gemessene Emissionen wurden dabei in Jahresmittelwerte umgerechnet. Im Fall von diskontinuierlich gemessenen Emissionen werden Werte aus den jeweiligen Einzelmessungen an-

5 Emissions

In Germany, the erection and operation of cement works are subject to the provisions of the Federal Ambient Pollution Protection Act. Depending on the type of fuel utilised, different specifications for the emission concentrations to be complied with are laid down. If standard fuels are used exclusively, the regulations of the Clean Air Act (TA Luft) are decisive. If a proportion of the standard fuels is replaced by waste used as alternative fuels, the provisions of the German regulation on waste incineration (17th BImSchV) apply additionally. Proceeding from this legal basis, the competent authorities can order both measurements for special reasons and first-time and recurrent measurements to be carried out by accredited measuring bodies only.

Emissions from cement works can be determined both by continuous and discontinuous measuring methods, which are described in corresponding VDI guidelines and DIN standards (Table 5-1). Continuous measurement is primarily used for dust, NO_x , SO_2 , CO, Hg and NH_3 as well as more and more total organic carbon (TOC), while the remaining parameters relevant to ambient pollution legislation are usually determined discontinuously by individual measurements.

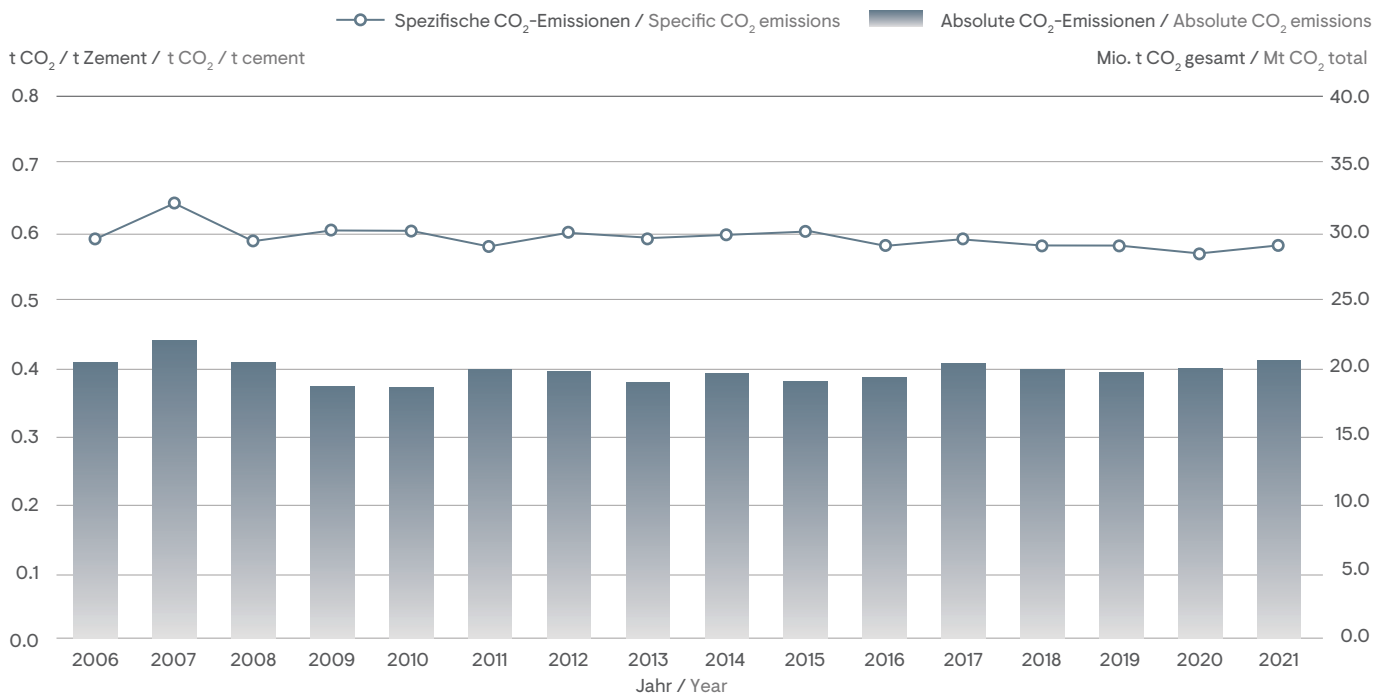
The measurement results presented in this chapter are based on the emission measurements at the rotary kiln plants of the German cement industry required by law. The emissions measured continuously were converted to annual averages. In the case of emissions measured discontinuously, the values are derived from the respective individual measurements. All measured values relate to 1 m^3 of dry gas under standard conditions with an oxygen content of 10 %.

Tabelle 5-1 Messverfahren für Emissionen

Table 5-1 Emission measuring methods

| Messobjekt / Object of measurement | Norm, Richtlinie / Standard, guideline |
|----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| Gesamtstaub / Total dust | DIN EN 13284-1 |
| Schwermetalle / Heavy metals | DIN EN 13211, 14385 |
| Schwefeloxide / Sulphur oxides | DIN EN 14791 |
| Stickstoffoxide / Nitrogen oxides | DIN EN 14792 |
| Kohlenstoffmonoxid / Carbon monoxide | DIN EN 15058 |
| Gasförmige anorganische Chlorverbindungen / Gaseous inorganic chlorine compounds | DIN EN 1911 |
| Gasförmige anorganische Fluorverbindungen / Gaseous inorganic fluorine compounds | DIN CEN/TS 17340 |
| Dioxine, Furane / Dioxins, furans | |
| - Probenahme / Sampling | DIN EN 1948, Teil 1 |
| - Analyse / Analysis | DIN EN 1948, Teile 2 - 3 |
| Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe / Polycyclic aromatic hydrocarbons | VDI 3874 |
| Polychlorierte Biphenyle / Polychlorinated biphenyls | DIN EN 1948, Teil 4 |
| Organisch gebundener Kohlenstoff / Total gaseous organic carbon | DIN EN 12619 |
| Benzol, Toluol, Ethylbenzol, Xylol / Benzene, toluene, ethylbenzene, xylene | DIN CEN/TS 13649 |

Bild 5-1 Direkte CO₂-Emissionen der Zementindustrie
Fig. 5-1 Direct CO₂ emissions by the cement industry



Quelle / Source: DEHSt

gegeben. Sämtliche Messwerte sind auf einen Kubikmeter (m³) trockenes Abgas im Normzustand mit einem Sauerstoffgehalt von 10 % bezogen.

Aufgrund von Änderungen in den normativen Anforderungen zur Darstellung der Messergebnisse diskontinuierlich bestimmter Parameter werden sogenannte Feldblindwerte als kleinste darstellbare Konzentrationen ausgewiesen. Auf die bislang erfolgte Darstellung von Bestimmungsgrenzen wird deshalb verzichtet.

5.1 Treibhausgase / Kohlenstoffdioxid (CO₂)

Beim Klinkerbrennprozess werden klimarelevante Gase emittiert. Dies ist fast ausschließlich CO₂. Andere klimarelevante Gase, wie z. B. Distickstoffmonoxid (N₂O) oder Methan (CH₄), werden nur in sehr geringem Maße emittiert. CO₂-Emissionen sind sowohl rohstoff- als auch energiebedingt. Rohstoffbedingte CO₂-Emissionen entstehen bei der Entsäuerung des Kalksteins und haben einen Anteil von etwa 60 % an den direkten CO₂-Emissionen. Energiebedingte Emissionen entstehen sowohl direkt bei der Verbrennung der Brennstoffe als auch indirekt durch den Einsatz von elektrischer Energie. In Bild 5-1 ist die Entwicklung der direkten CO₂-Emissionen dargestellt.

Am 01.01.2005 wurde in der EU ein Handelssystem für CO₂-Emissionen eingeführt. Der Emissionshandel erstreckt sich auf die direkten CO₂-Emissionen aus der Verbrennung aller Brennstoffe (ohne biogene Anteile) und der Entsäuerung des Kalksteins.

Due to regulatory changes in corresponding standards, so-called field blank values (as the smallest representative concentration for parameters that are measured discontinuously) are shown. The previous presentation of quantification limits is no longer used.

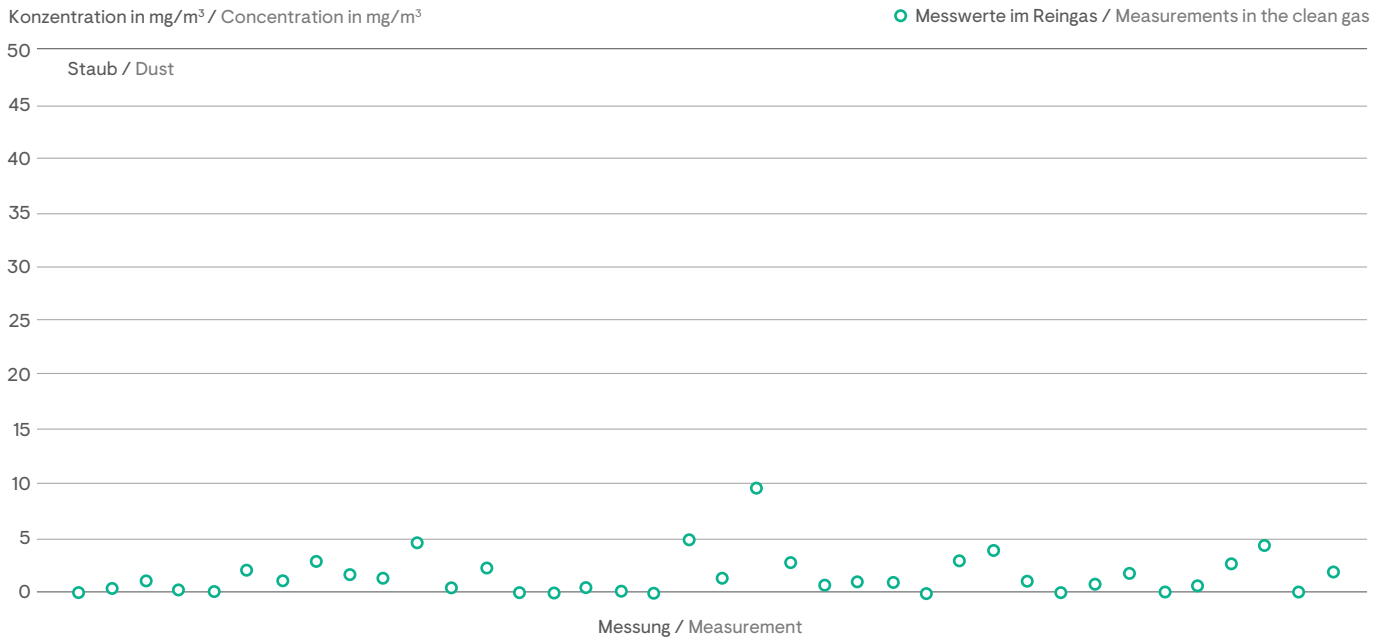
5.1 Greenhouse gases / carbon dioxide (CO₂)

During the clinker burning process greenhouse gases are emitted. This is almost entirely CO₂. Other greenhouse gases, such as dinitrogen monoxide (N₂O) or methane (CH₄), are emitted in very small quantities only.

CO₂ emissions are both raw material-related and energy-related. Raw material-related emissions are produced during limestone decarbonation (CaCO₃) and account for about 60 % of direct CO₂ emissions. Energy-related emissions are generated both directly through fuel combustion and indirectly through the use of electrical power. Figure 5-1 depicts the development of direct CO₂ emissions.

On January 1, 2005 a trading system for CO₂ emissions was introduced in the EU. Direct CO₂ emissions from the combustion of all fuels (without biogenous compounds) and decarbonation of limestone are covered by this trading system.

Bild 5-2 Staub (Jahresmittelwerte 2021)
Fig. 5-2 Dust (Annual mean values 2021)



5.2 Staub

Für die Erzeugung von 1 Tonne Portlandzement müssen während der Produktion ca. 1,5 bis 1,7 Tonnen Rohmaterialien, bis zu 0,15 Tonnen Kohle sowie 0,95 Tonnen Klinker staubfein gemahlen werden. Wesentliche Emissionsquellen für die staubförmigen Komponenten liegen dabei in den Bereichen der Aufbereitung des Rohmaterials und der Brennstoffe, des Klinkerbrennprozesses sowie der Zementmahlung. Während es in den 1950er-Jahren am Kamin von Drehofenanlagen noch zu Staubemissionen von bis zu 3.000 mg/m³ kam, sind diese heute in Deutschland auf 10 mg/m³ begrenzt. Bild 5-2 zeigt 38 Jahresmittelwerte der Konzentration von Staub aus kontinuierlicher Überwachung im Reingas von 38 Drehofenanlagen.

5.3 Stickstoffoxide (NO_x)

Der Klinkerbrennprozess ist ein Hochtemperaturprozess, bei dem Stickstoffoxide (NO_x) entstehen. Im Abgas von Drehofenanlagen liegen sie zu einem Anteil von etwa 95% in Form von Stickstoffmonoxid (NO) und zu etwa 5% als Stickstoffdioxid (NO₂) vor. Da NO in der Atmosphäre weitgehend zu NO₂ umgewandelt wird, werden die Emissionen als NO₂ pro m³ Abgas angegeben.

Die prozessbedingten NO_x-Gehalte im Abgas von Drehofenanlagen würden ohne Minderungsmaßnahmen in den meisten Fällen die heute gültige Vorgabe der europäischen Industrieemissionsrichtlinie von 0,50 g/m³ deutlich übersteigen.

Primäre Minderungsmaßnahmen betreffen eine Vergleichmäßigung und Optimierung des Anlagenbetriebs. Darüber hinaus wurden erhebliche Anstrengungen unternommen, um auf verschiedene Weise die anspruchsvollen NO_x-Grenzwerte einhal-

5.2 Dust

To manufacture 1 t of Portland cement, about 1.5 to 1.7 t raw materials, up to 0.15 t coal and 0.95 t clinker must be ground to dust fineness during production. In this process, the steps of raw material preparatory processing, fuel preparation, clinker burning and cement grinding constitute major emission sources for particulate components. While particulate emissions of up to 3,000 mg/m³ were measured at the stack of cement rotary kiln plants as recently as in the 1950ies, these are limited in Germany to 10 mg/m³ today.

Figure 5-2 shows 38 annual average values of dust concentrations from continuous monitoring in the clean gas of 38 rotary kilns.

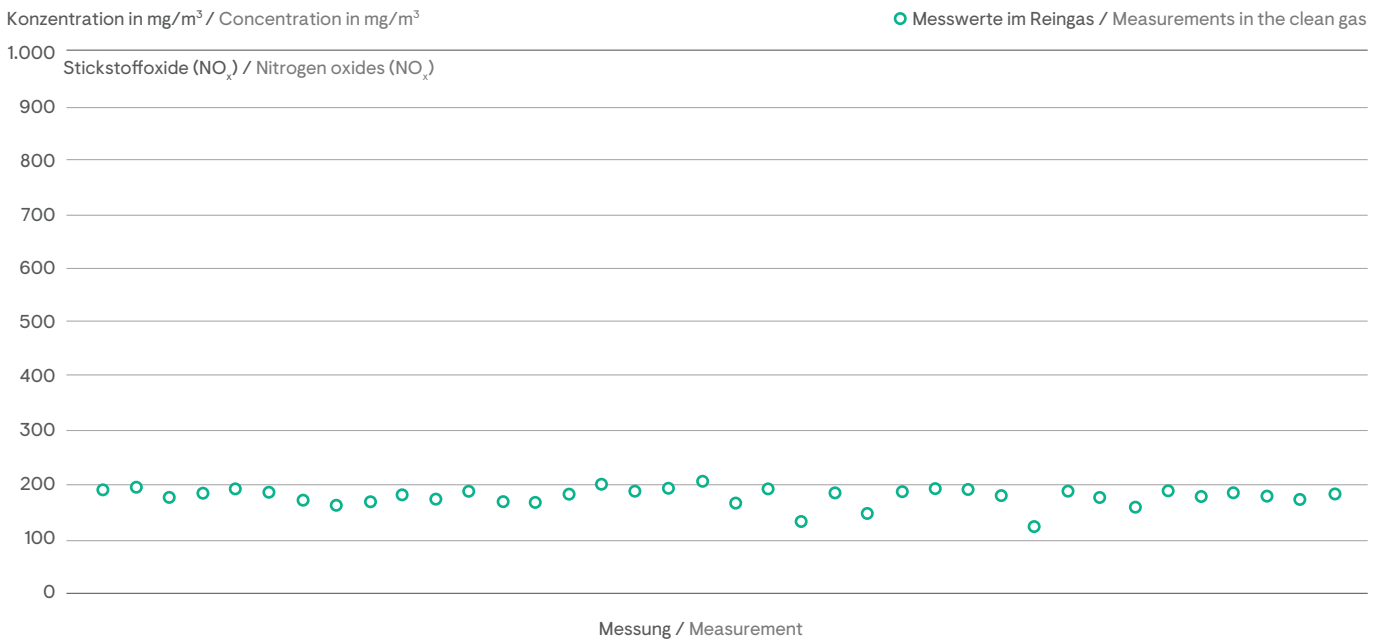
5.3 Nitrogen oxides (NO_x)

The clinker burning process is a high-temperature process resulting in the formation of nitrogen oxides (NO_x). Nitrogen monoxide (NO) accounts for about 95%, and nitrogen dioxide (NO₂) for about 5% of this compound present in the exhaust gas of rotary kiln plants. As most of the NO is converted to NO₂ in the atmosphere, emissions are given as NO₂ per m³ exhaust gas.

Without reduction measures, process-related NO_x contents in the exhaust gas of rotary kiln plants would considerably exceed the current specifications of the European Industry Emissions Directive of 0.50 g/m³.

Primary reduction measures are aimed at smoothing and optimising plant operation. Furthermore, considerable efforts were made to achieve compliance with the demanding NO_x values in different ways. In 2021, 38 kiln plants were operated in the German cement industry. At 20 of these plants the SCR

Bild 5-3 Stickstoffoxide (NO_x, Jahresmittelwerte 2021)
Fig. 5-3 Nitrogen oxides (NO_x, annual mean values 2021)



ten zu können. Im Jahr 2021 wurden in der deutschen Zementindustrie 38 Ofenanlagen betrieben. An 20 dieser Anlagen wird das SCR-Verfahren (selektive katalytische Reduktion) zur NO_x-Minderung angewendet. Darunter sind die High-Dust- und Low-Dust-Variante des SCR-Verfahrens vertreten als auch an zwei Ofenanlagen das DeCONO_x-Verfahren und in einem Fall eine Lösung mit katalytischen Filterschläuchen.

In Deutschland sind 12 Vorcalcineranlagen in Betrieb, an denen eine gestufte Zweitfeuerung zur Minderung der NO_x-Emissionen betrieben wird bzw. werden kann. An allen Vorcalcineranlagen wird zusätzlich das SNCR-Verfahren (selektive nicht-katalytische Reduktion) angewendet. Ofenanlagen mit SCR-Anlagen sind zusätzlich mit SNCR-Technologie ausgestattet, mit der bei einem Ausfall der SCR-Anlage die Minderung der NO_x-Emissionen erfolgt. An allen weiteren Ofenanlagen (Anlagen mit Zyklonvorwärmer oder mit Rostvorwärmer) wird bis auf eine Ausnahme ebenfalls das SNCR-Verfahren angewendet. Somit sind diese Minderungsverfahren an insgesamt 37 Ofenanlagen installiert.

Um das Rohstoffgemisch in Portlandzementklinker umzuwandeln, sind hohe Prozesstemperaturen erforderlich. In der Sinterzone des Drehofens betragen die Brennguttemperaturen etwa 1.450°C. Um sie zu erreichen, sind Flammentemperaturen von ca. 2.000°C erforderlich.

Aus Gründen der Klinkerqualität findet der Brennvorgang unter oxidierenden Bedingungen statt. Unter diesen Voraussetzungen überwiegt die partielle Oxidation des molekularen Stickstoffs der Verbrennungsluft zu Stickstoffmonoxid, die auch als thermische NO-Bildung bezeichnet wird.

process (selective catalytic reduction) is used for NO_x reduction. These include the high-dust and low-dust variants of the SCR process as well as the DeCONO_x process at two kiln plants and, in one case, a solution with catalytic filter bags.

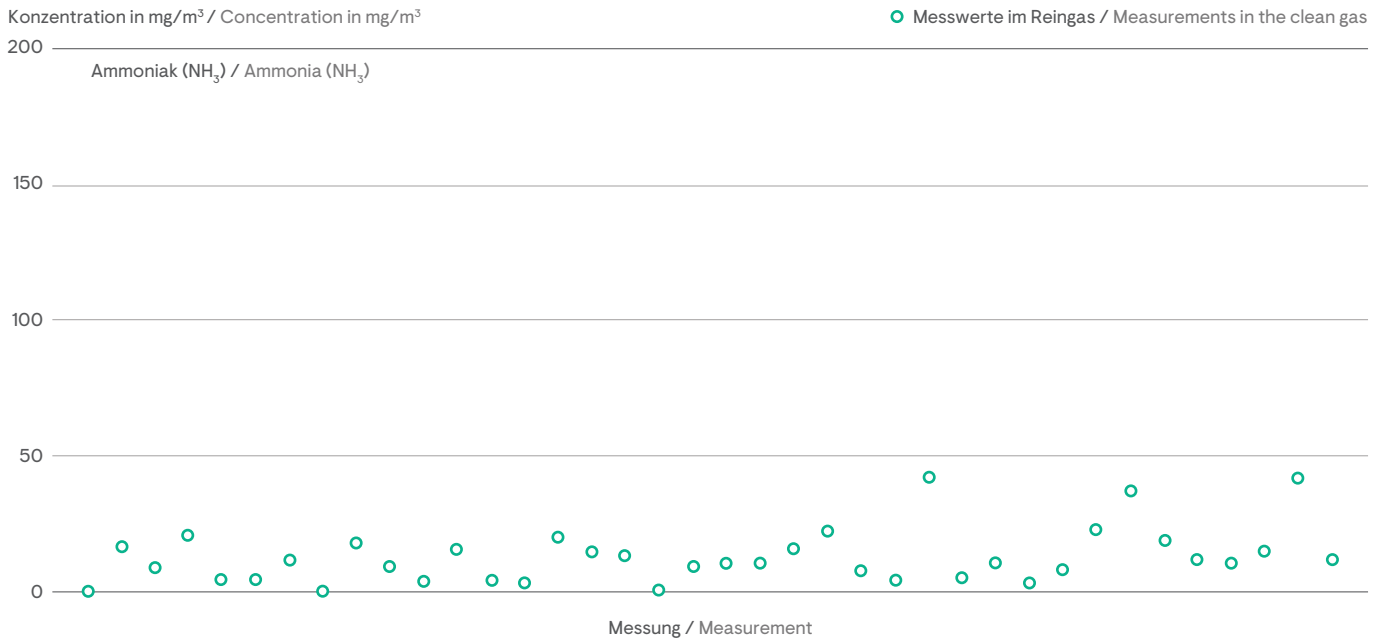
In Germany 12 precalcining plants are in operation at which a staged secondary firing system is or can be operated to reduce NO_x emissions. The SNCR process (selective non-catalytic reduction) is also used at all precalcining plants. Furnaces with SCR systems are additionally equipped with SNCR technology, which is used to reduce NO_x emissions in the event of SCR system failure. At all other kiln plants (plants with cyclone preheater or with grate preheater), with one exception, the SNCR process is also applied. Thus, these abatement processes are installed at a total of 37 kiln plants.

High process temperatures are required to convert the raw material mix to Portland cement clinker. Kiln charge temperatures in the sintering zone of rotary kilns range at around 1,450°C. To reach these flame temperatures about 2,000 °C are necessary.

For reasons of clinker quality the burning process takes place under oxidising conditions under which the partial oxidation of the molecular nitrogen in the combustion air resulting in the formation of nitrogen monoxide dominates. This reaction is also called thermal NO formation.

At the lower temperatures prevailing in a kiln inlet or calciner firing unit, however, thermal NO formation is negligible: here the nitrogen bound in the fuel can result in the formation of what is known as fuel-related NO.

Bild 5-4 Ammoniak (NH₃, Jahresmittelwerte 2021)
Fig. 5-4 Ammonia (NH₃, annual mean values 2021)



Die thermische NO-Bildung ist bei den niedrigeren Temperaturen in einer Ofeneinlauf- oder Calcinatorfeuerung hingegen kaum von Bedeutung: Hier kann der im Brennstoff gebundene Stickstoff zum sogenannten brennstoffbedingten NO führen.

Bild 5-3 zeigt 38 Jahresmittelwerte der Konzentration von Stickstoffoxiden (NO_x) aus kontinuierlicher Überwachung im Reingas von 38 Drehofenanlagen.

5.4 Ammoniak (NH₃)

Emissionen von Ammoniak können beim Klinkerbrennprozess zum einen durch Ausgasen und Verdampfen ammoniumhaltiger Verbindungen in den Rohmaterialien entstehen. Zum anderen kann der Einsatz des SNCR-Verfahrens, bei dem eine ammoniakalische Lösung im Steigschacht bzw. Calcinator der Ofenanlage eingedüst wird, zu einem gewissen NH₃-Schlupf führen, wenn die Umsetzung des Reduktionsmittels nicht vollständig ist.

Die rohstoffbedingten Ammoniakemissionen variieren zum Teil signifikant von Werk zu Werk bzw. Steinbruch zu Steinbruch sowie auch innerhalb eines Steinbruches. Bei der NO_x-Minderung mit dem SNCR-Verfahren spielen verschiedene prozesstechnische Parameter, wie die Temperatur an der Eindüsetelle, die Verweilzeit für die Reaktion mit Stickstoffmonoxid sowie die erforderliche NO_x-Minderung, eine Rolle, inwiefern NH₃ als Schlupf den Vorwärmer verlässt.

Im Abgasweg wird Ammoniak vor allem in der Rohmühle wieder eingebunden und mit dem Ofenmehl wieder zum Prozess zurückgeführt. Im Direktbetrieb der Ofenanlage (Stillstand der Rohmühle) entfällt diese Einbindung und i.d.R. treten höhere Ammoniakemissionen auf als im Verbundbetrieb. Bei Verwendung der SCR-Technologie zur NO_x-Minderung in der High-Dust-Variante

Figure 5-3 shows 38 annual average values of nitrogen oxides (NO_x) concentrations from continuous monitoring in the clean gas of 38 rotary kilns.

5.4 Ammonia (NH₃)

Ammonia (NH₃) emissions can occur from the clinker burning process on the one hand by the outgassing and vaporizing of ammonium-containing compounds in the raw materials. On the other hand, when using SNCR technology an ammonia-containing solution is injected into the riser duct or calciner of a cement kiln system. This can lead to a NH₃ slip if the conversion of the reducing agent is not complete.

Raw material-related ammonia emissions vary significantly from plant to plant, from quarry to quarry and within a quarry. If SNCR technology is applied for NO_x abatement, different process parameters like the temperature at the injection location, the residence time available for the reaction with nitrogen oxide and the required NO_x reduction have an impact on the ammonia slip from the preheater.

In the exhaust gas path, ammonia is mainly bound in the raw mill and is re-routed back to the process with the kiln feed. In direct operation of the kiln system (raw mill-off) this binding does not occur and normally higher NH₃ emissions occur compared to raw mill-on operation. When using High Dust-SCR technology (SCR catalyst installed after the preheater), ammonia leaving the preheater with the exhaust gas can be utilised as a reducing agent and the ammonia injection can be reduced.

Figure 5.4 shows 37 annual average values of ammonia (NH₃) concentration from continuous monitoring in the clean gas of 37 rotary kilns.

(Installation des Katalysators nach Vorwärmer) kann NH_3 , das den Vorwärmer mit dem Rohgas verlässt, als Reduktionsmittel genutzt und somit die Eindüsung von Ammoniaklösung reduziert werden.

Bild 5.4 zeigt 38 Jahresmittelwerte der Konzentration von Ammoniak (NH_3) aus kontinuierlicher Überwachung im Reingas von 38 Drehofenanlagen.

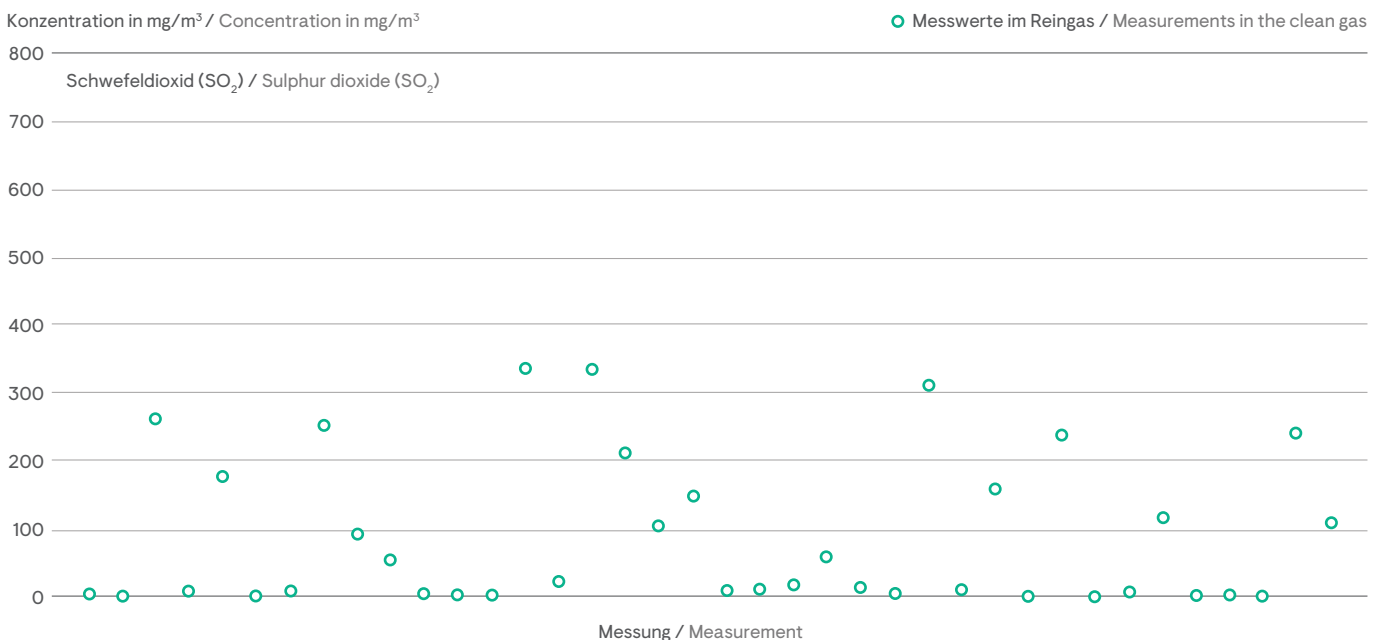
5.5 Schwefeldioxid (SO_2)

Schwefel wird dem Klinkerprozess über die Roh- und Brennstoffe zugeführt. In den Rohstoffen kann der Schwefel lagerstättenbedingt als Sulfid und als Sulfat gebunden vorliegen. Ursache für höhere SO_2 -Emissionen von den Drehofenanlagen der Zementindustrie können die im Rohmaterial enthaltenen Sulfide sein, die bei der Vorwärmung des Brennguts bei Temperaturen zwischen 370°C und ca. 420°C zu SO_2 oxidiert werden. Die Sulfide kommen überwiegend in Form von Pyrit oder Markasit in den Rohstoffen vor. Aufgrund der in den deutschen Rohstoffvorkommen auftretenden Sulfidgehalte können die SO_2 -Emissionskonzentrationen standortabhängig bis zu $1,2\text{g}/\text{m}^3$ betragen. Die Zementindustrie hat erhebliche Anstrengungen zur Reduzierung der SO_2 -Emissionen unternommen. So wird beispielsweise an 11 Ofenanlagen Kalkhydrat zur Minderung der SO_2 -Emissionen eingesetzt.

Der mit den Brennstoffen eingetragene Schwefel wird bei der Verbrennung im Drehofen vollständig zu SO_2 umgewandelt. Dieses SO_2 reagiert im Vorwärmer- und Ofenbereich zu Alkalisulfaten, die überwiegend im Klinker gebunden werden.

Bild 5-5 zeigt 38 Jahresmittelwerte von Schwefeldioxid aus kontinuierlicher Überwachung im Reingas von 38 Drehofenanlagen.

Bild 5-5 Schwefeldioxid (SO_2 , Jahresmittelwerte 2021)
Fig. 5-5 Sulphur dioxide (SO_2 , annual mean values 2021)



5.5 Sulphur dioxide (SO_2)

Sulphur is fed into the clinker burning process via raw materials and fuels. Depending on their respective deposits, the raw material so may contain sulphur bound as sulphide or sulphate. Higher SO_2 emissions by rotary kiln systems of the cement industry might be attributable to the sulphides contained in the raw material, which become oxidised to form SO_2 at temperatures between 370°C and 420°C prevailing during the kiln feed preheating process. Most of the sulphides are pyrite or marcasite contained in the raw materials. Given the sulphide concentrations found in German raw material deposits, SO_2 emission concentrations can total up to $1.2\text{g}/\text{m}^3$ depending on the site location. The cement industry has made great efforts to reduce SO_2 emissions. For example, lime hydrate is utilised at 11 kiln systems to lower SO_2 emissions.

The sulphur input with the fuels is completely converted to SO_2 during combustion in the rotary kiln. In the area of the preheater and the kiln, this SO_2 reacts to form alkali sulphates, which are predominantly bound in the clinker.

Figure 5-5 shows 38 annual average values of sulphur dioxide from continuous monitoring in the clean gas of 38 rotary kilns.

5.6 Kohlenstoffmonoxid (CO) und organischer Gesamtkohlenstoff (ΣC)

Die Abgaskonzentrationen von CO und organisch gebundenem Kohlenstoff sind bei Energieumwandlungsanlagen, wie z. B. Kraftwerken, ein Maß für den Ausbrand der eingesetzten Brennstoffe. Der Klinkerbrennprozess ist dagegen ein Stoffumwandlungsprozess, der aus Gründen der Klinkerqualität stets mit Luftüberschuss betrieben werden muss. In Verbindung mit den langen Verweilzeiten bei hohen Temperaturen führt dieses praktisch zu einem vollständigen Brennstoffausbrand. Die thermische Zersetzung organischer Bestandteile des Rohmaterials im Vorwärmer führt zu den entsprechenden rohmaterialbedingten Emissionen an Kohlenstoffmonoxid und organischem Gesamtkohlenstoff.

Ursache der Emissionen von CO und organisch gebundenem Kohlenstoff beim Klinkerbrennprozess sind vor allem die mit den natürlichen Rohstoffen in geringen Mengen zugeführten organischen Bestandteile (Überreste von Organismen und Pflanzen, die im Laufe der Erdgeschichte im Gestein eingebaut wurden). Sie werden beim Vorwärmen des Brennguts umgesetzt und weitgehend zu CO und CO₂ oxidiert. Ein sehr geringer verbleibender Anteil organischer Spurengase (organischer Gesamtkohlenstoff) wird emittiert. Der im Reingas vorliegende Gehalt an CO und organischen Spurengasen lässt beim Klinkerbrennprozess somit keinen Rückschluss auf die Verbrennungsbedingungen zu.

Bild 5-6 zeigt 38 Jahresmittelwerte der CO-Konzentration aus kontinuierlicher Überwachung im Reingas von 38 Drehofenanlagen.

5.6 Carbon monoxide (CO) and total organic carbon (TOC)

The exhaust gas concentrations of CO and organically bound carbon are a yardstick for the burn-out rate of the fuels utilised in energy conversion plants, such as power stations. By contrast, the clinker burning process is a material conversion process that must always be operated with excess air for reasons of clinker quality. In conjunction with long residence times in the high temperature range this practically leads to a complete fuel burn-out. The thermal decomposition of organic material in the preheater leads to the corresponding emissions of carbon monoxide and total carbon.

The emissions of CO and organically bound carbon during the clinker burning process are caused by the small quantities of organic constituents input via the natural raw materials (remnants of organisms and plants incorporated in the rock in the course of geological history). These are converted during kiln feed preheating and become oxidised to form CO and CO₂. In this process, small portions of organic trace gases (total organic carbon) are formed as well. In case of the clinker burning process, the content of CO and organic trace gases in the clean gas therefore does not permit any conclusions on combustion conditions.

Figure 5-6 shows 38 annual average values of carbon monoxide concentration from continuous monitoring in the clean gas of 38 rotary kilns.

Bild 5-6 Kohlenstoffmonoxid (CO, Jahresmittelwerte 2021)
Fig. 5-6 Carbon monoxide (CO, annual mean values 2021)

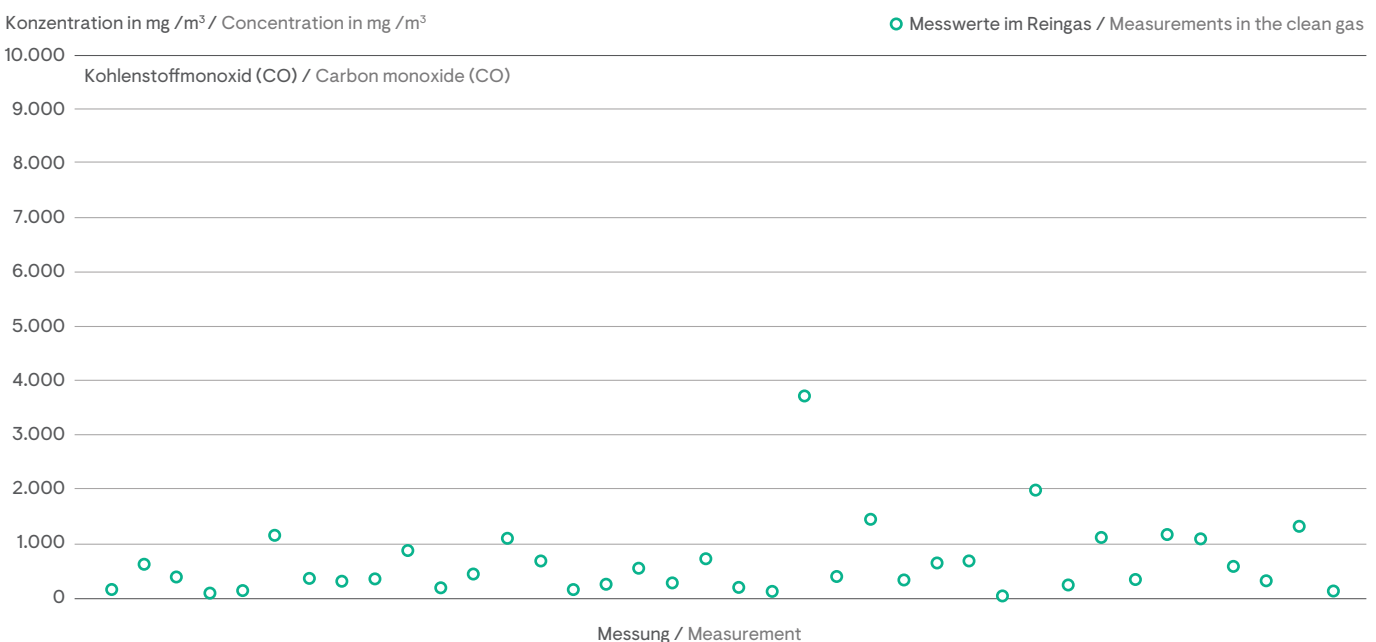


Bild 5-7 Organischer Gesamtkohlenstoff (ΣC , Jahresmittelwerte 2021)
Fig. 5-7 Total organic carbon (TOC, annual mean values 2021)

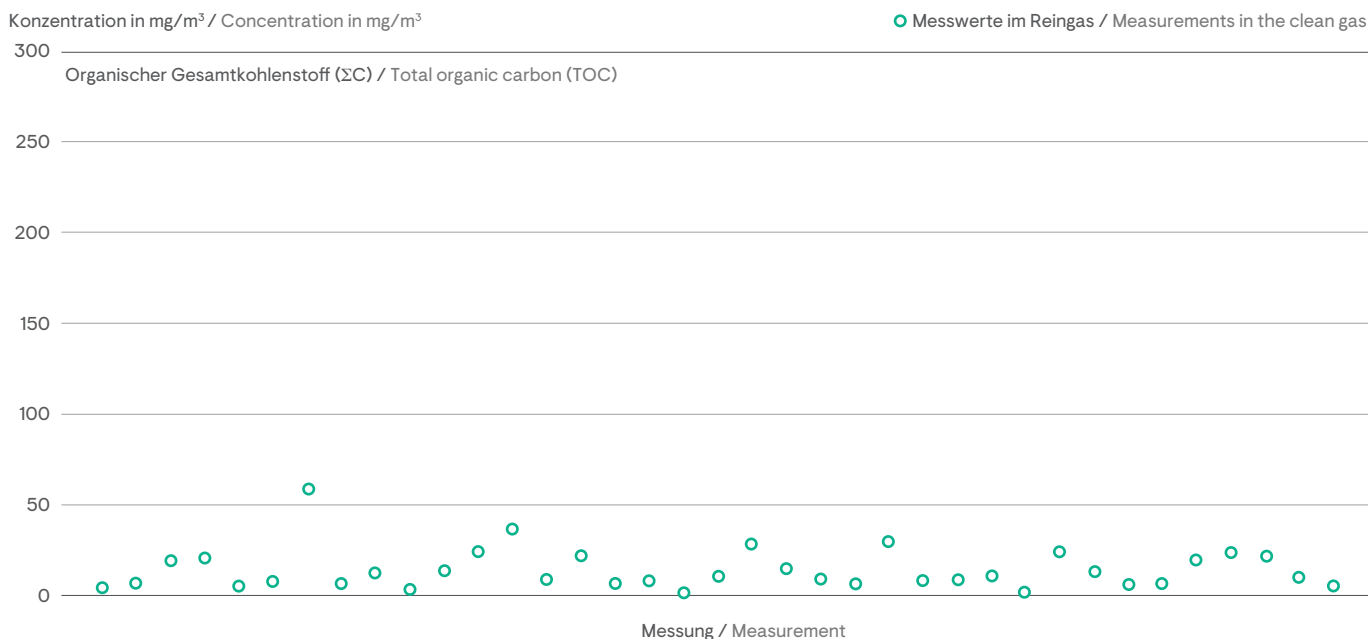


Bild 5-7 zeigt 37 Jahresmittelwerte der Gesamtkohlenstoffkonzentration aus kontinuierlicher Überwachung im Reingas von 37 Drehofenanlagen.

Figure 5-7 shows 37 annual average values of total organic carbon concentration from continuous monitoring in the clean gas of 37 rotary kilns.

5.7 Dioxine und Furane (PCDD/F)

Drehofenanlagen der Zementindustrie unterscheiden sich von klassischen Feuerungsanlagen in erster Linie durch die Verbrennungsbedingungen beim Klinkerbrennen. Brenngut und Drehofenabgase werden im Gegenstrom geführt und intensiv durchmischt. Temperaturverlauf und Gasverweilzeit in Drehöfen bieten daher besonders günstige Bedingungen, um organische Verbindungen, die über Brennstoffe eingetragen werden oder daraus entstehen, vollständig zu zerstören.

5.7 Dioxins and furans (PCDD/F)

Rotary kilns of the cement industry and classic combustion plants mainly differ in terms of the combustion conditions prevailing during clinker burning. Kiln feed and rotary kiln exhaust gases are conveyed in counter-flow and mixed thoroughly. Thus, temperature distribution and residence time in rotary kilns afford particularly favourable conditions for organic compounds, introduced either via fuels or derived from them, to be completely destroyed.

Polychlorierte Dibenzo-p-dioxine und Dibenzofurane (kurz: Dioxine und Furane) liegen deshalb in Abgasen von Drehöfen der Zementindustrie nur in sehr geringen Konzentrationen vor. Untersuchungen haben gezeigt, dass ihre Emissionen unabhängig von der Art der Einsatzstoffe sind und durch verfahrenstechnische Maßnahmen nicht beeinflusst werden können.

For that reason, only very low concentrations of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans (in short: dioxins and furans) can be found in the exhaust gas from cement rotary kilns. Investigations have shown that their emissions are independent of the type of input materials used and cannot be influenced by process technology measures.

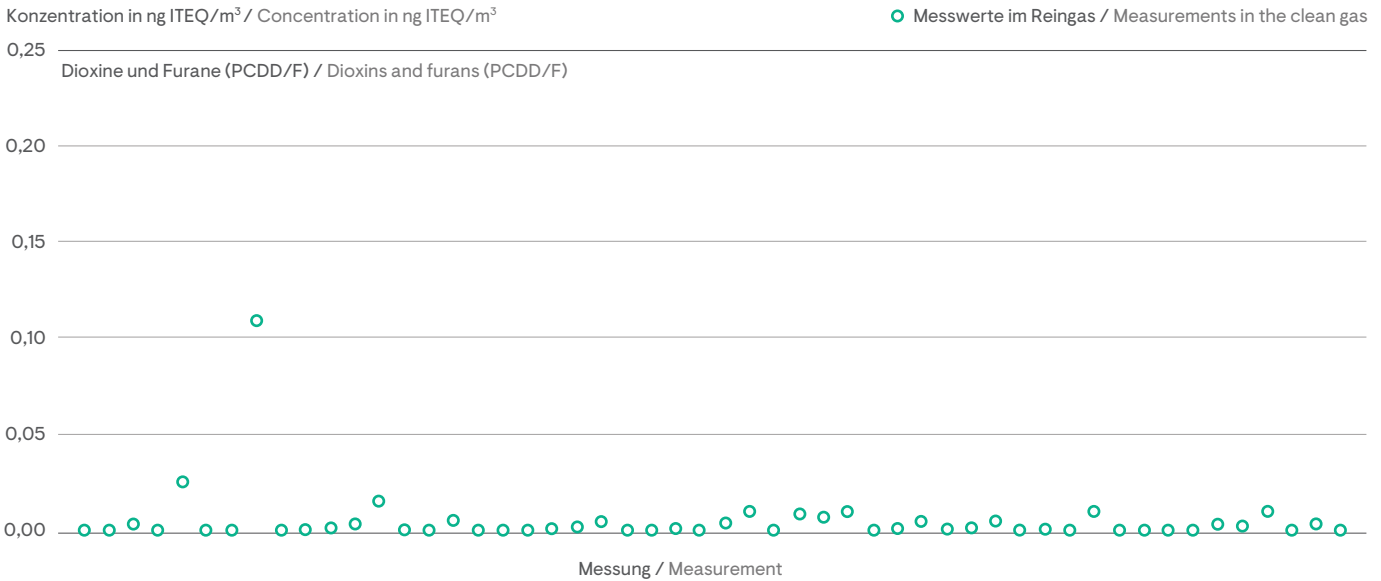
Anmerkung: Aus der Norm lässt sich keine Bestimmungsgrenze ableiten. Für die Beurteilung der Messergebnisse kann die externe Streuung des Verfahrens (Vergleich verschiedener Laboratorien) herangezogen werden. Sie beträgt gemäß DIN EN 1948 $\pm 0,05 \text{ ng ITEQ/m}^3$ (ITEQ: Internationales Toxizitätsäquivalent).

Note: No limit of quantification can be deduced from the standard. To evaluate the measurement results, interlaboratory variation of the method (comparison between different laboratories) can be referred to. Pursuant to DIN EN 1948 it amounts to $\pm 0.05 \text{ ng ITEQ/m}^3$ (ITEQ: international toxicity equivalent).

Im Bild 5-8 sind 117 Messwerte der Konzentration von Dioxinen und Furanen aus 2021 im Reingas von 37 Drehofenanlagen dargestellt. In 65 Fällen konnten keine PCDD/F nachgewiesen werden.

Figure 5-8 shows 117 dioxin and furan concentration values from measurements in the clean gas at 37 rotary kilns in 2021. In 65 cases there were no PCDD/F detected.

Bild 5-8 Dioxine und Furane (PCDD/F, Messwerte 2021)
Fig. 5-8 Dioxin and furan (PCDD/F, measurements 2021)



5.8 Polychlorierte Biphenyle (PCB)

Das Emissionsverhalten der PCB ist mit dem der Dioxine und Furane vergleichbar. PCB können mit alternativen Roh- und Brennstoffen in den Prozess gelangen. In Drehofenanlagen der Zementindustrie ist eine praktisch vollständige Zerstörung dieser Spurenkomponenten gewährleistet.

Bild 5-9 zeigt 100 Werte aus Messungen an 31 Drehofenanlagen nach WHO. Messungen nach DIN wurden im Jahr 2021 nicht gemeldet.

5.8 Polychlorinated biphenyls (PCB)

The emission behaviour of PCB is comparable to that of dioxins and furans. PCB may be introduced into the process via alternative raw materials and fuels. The rotary kiln systems of the cement industry guarantee a virtually complete destruction of these trace components.

Figure 5-9 shows 100 values from measurements at 31 rotary kilns according to WHO. There were no measurements according to DIN reported in 2021.

Bild 5-9 Polychlorierte Biphenyle (PCB nach WHO, Messwerte 2021)
Fig. 5-9 Polychlorinated biphenyls (PCB acc. to WHO, measurements 2021)

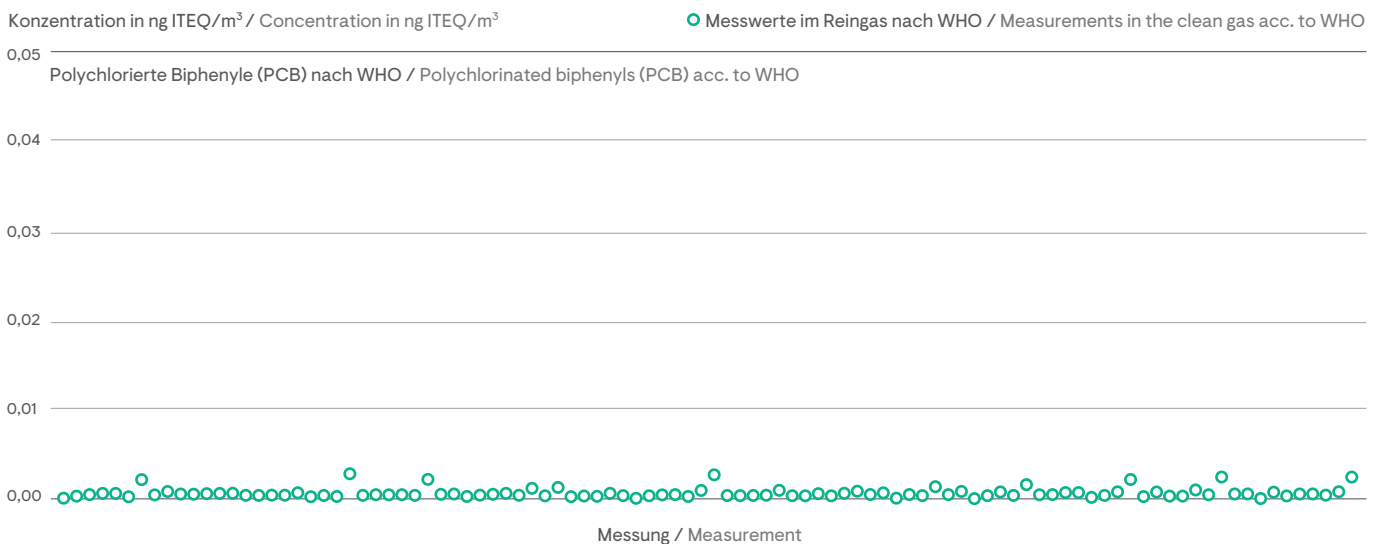
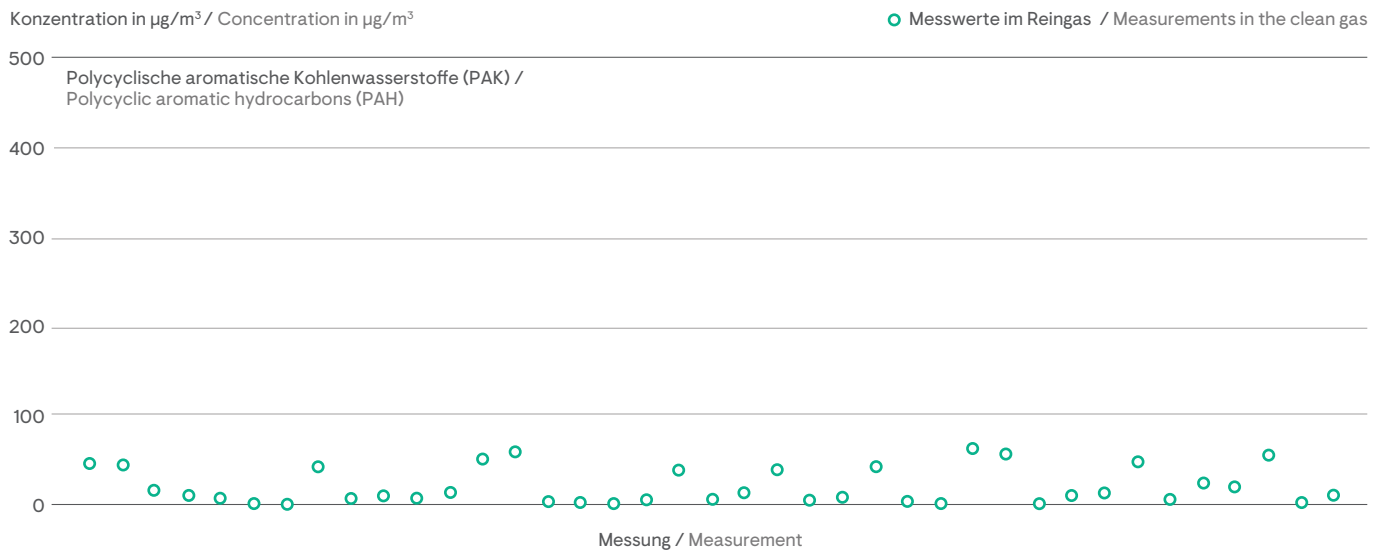


Bild 5-10 Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK nach EPA 610, Messwerte 2021)
Fig. 5-10 Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH acc. to EPA 610, measurements 2021)



5.9 Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)

Im Abgas von Drehofenanlagen der Zementindustrie liegt im Allgemeinen eine Verteilung der PAK (nach EPA 610) vor, in der Naphthalin mit einem Massenanteil von über 90% dominiert. In Drehofenanlagen der Zementindustrie ist eine praktisch vollständige Zerstörung der aus den Brennstoffen stammenden PAK gewährleistet. Emissionen entstammen den organischen Bestandteilen im Rohmaterial.

Bild 5-10 zeigt 39 Messwerte der Konzentration von PAK im Reingas von 10 Drehofenanlagen.

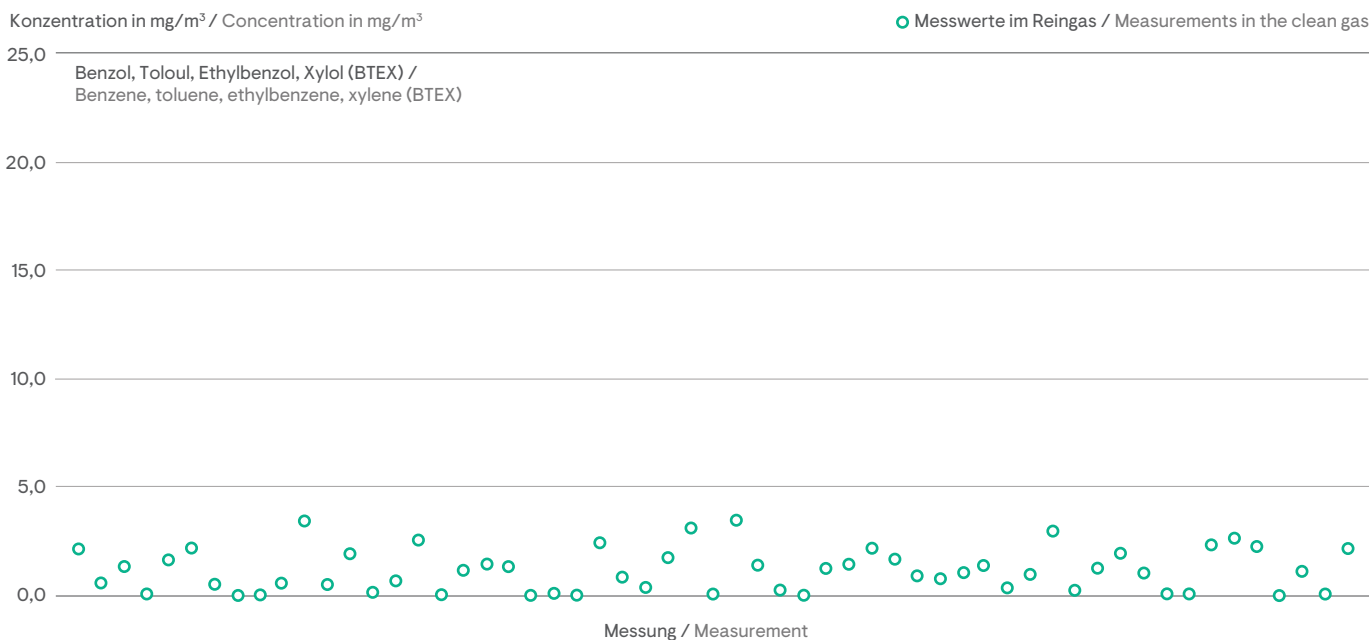
5.9 Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH)

PAHs (according to EPA 610) in the exhaust gas of rotary kilns usually appear at a distribution dominated by naphthalene, which accounts for a share of more than 90 % by mass. The rotary kiln systems of the cement industry guarantee a virtually complete destruction of the PAHs input via fuels. Emissions are caused by organic constituents in the raw material.

Figure 5-10 shows 39 PAH concentration values in the clean gas at 10 rotary kilns.

Bild 5-11 Benzol, Toluol, Ethylbenzol und Xylol BTEX (Messwerte 2021)

Fig. 5-11 Benzene, toluene, ethylbenzene, xylene BTEX (measurements 2021)



5.10 Benzol, Toluol, Ethylbenzol, Xylol (BTEX)

Im Abgas von Drehofenanlagen der Zementindustrie liegen die oben genannten Verbindungen im Allgemeinen in einer charakteristischen Verteilung vor. BTEX entstehen bei der thermischen Zersetzung organischer Bestandteile des Rohmaterials im Vorwärmer. Sie sind zu etwa 10 % an den Gesamtkohlenstoffemissionen beteiligt.

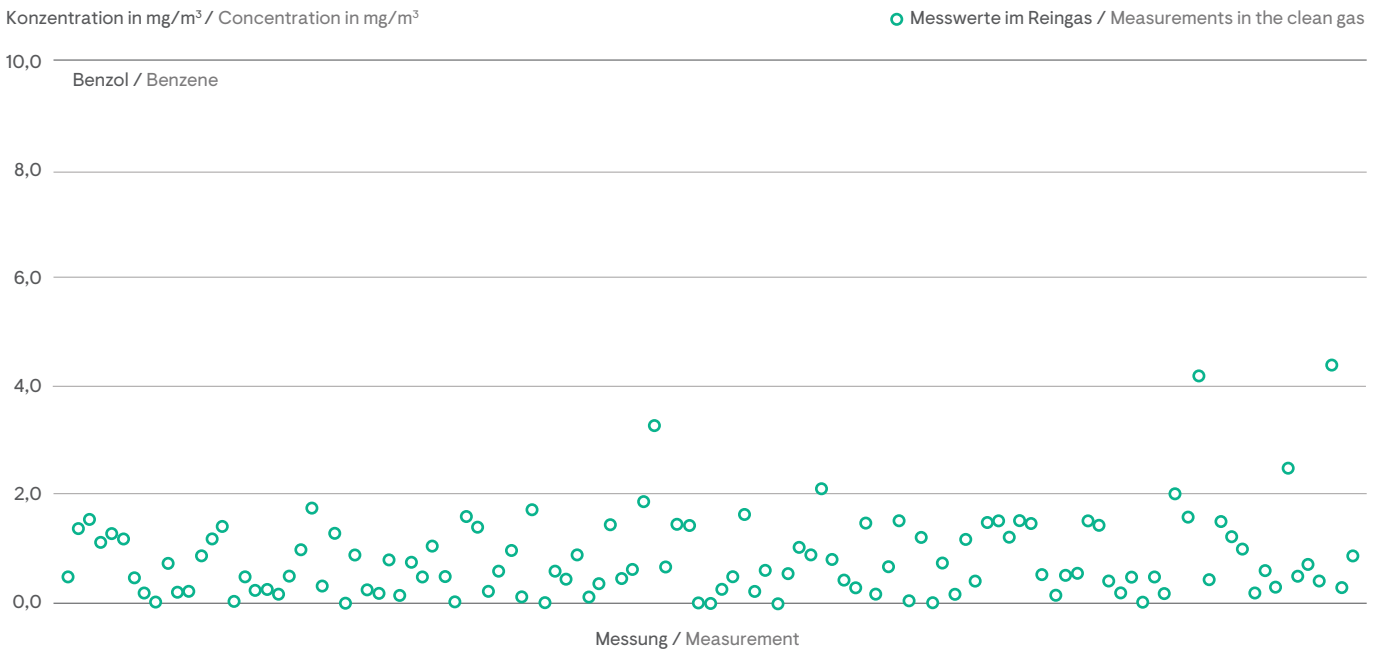
In 2021 wurden 57 Werte aus Messungen der BTEX-Konzentration im Reingas von 14 Drehofenanlagen ermittelt (Bild 5-11).

5.10 Benzene, toluene, ethylbenzene, xylene (BTEX)

As a rule the above compounds are present in the exhaust gas of rotary kilns in a characteristic ratio. BTEX is formed during the thermal decomposition of organic raw material constituents in the preheater. They account for about 10 % of total carbon emissions.

Figure 5-11 shows 57 BTEX concentration values from measurements in the clean gas at 14 rotary kilns.

Bild 5-12 Benzol (C₆H₆, Messwerte 2021)
Fig. 5-12 Benzene (C₆H₆, measurements 2021)



5.11 Benzol (C₆H₆)

Benzol entsteht bei der thermischen Zersetzung organischer Bestandteile des Rohmaterials im Vorwärmer. Es ist im Allgemeinen zu mehr als der Hälfte an den Emissionen von BTEX beteiligt.

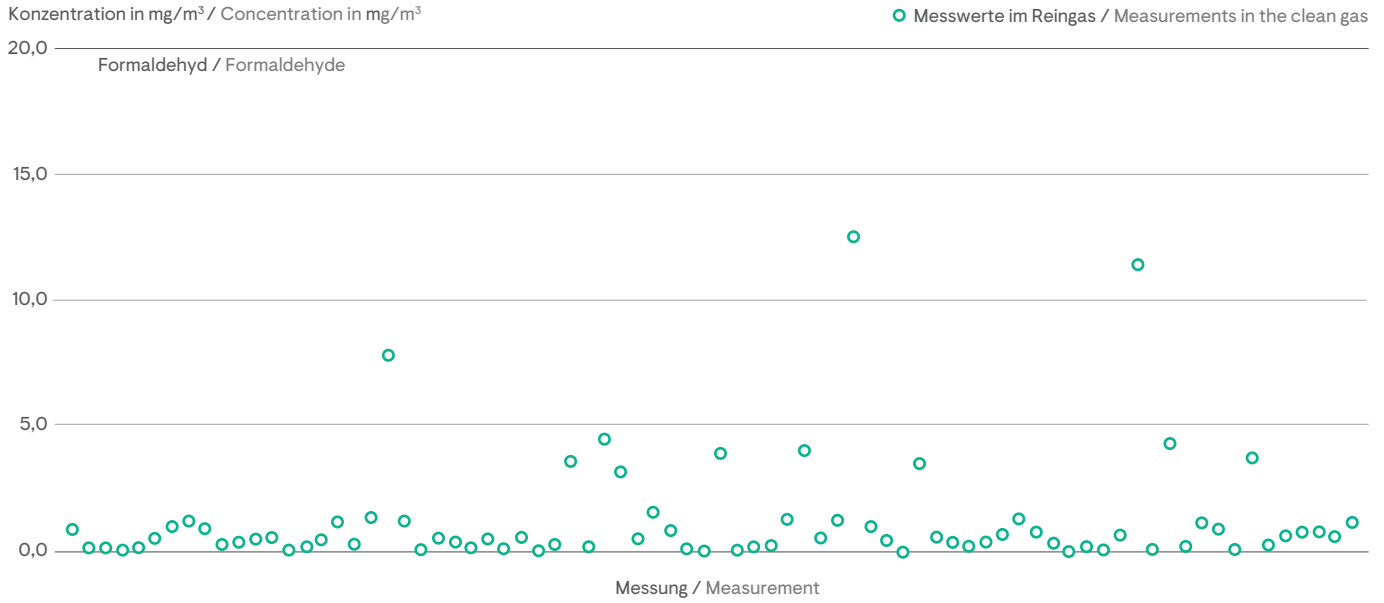
Bild 5-12 zeigt 117 Werte aus Messungen der Benzolkonzentration im Reingas von 32 Ofenanlagen.

5.11 Benzene (C₆H₆)

Benzene is produced during the thermal decomposition of organic raw material constituents in the preheater. As a rule, it accounts for more than half of the BTEX emissions.

Figure 5-12 shows 117 benzene concentration values from measurements in the clean gas at 32 rotary kilns.

Bild 5-13 Formaldehyd (CH₂O, Messwerte 2021)
Fig. 5-13 Formaldehyde (CH₂O, measurements 2021)



5.12 Formaldehyd (CH₂O)

In 2021 wurden 78 Werte aus Messungen im Reingas von 24 Drehofenanlagen ermittelt (Bild 5-13).

5.12 Formaldehyde (CH₂O)

Figure 5-13 shows 78 values from clean gas measurements at 24 rotary kilns.

5.13 Benzo(a)pyren (C₂₀H₁₂)

In 2021 wurden 104 Werte aus Messungen an 32 Ofenanlagen ermittelt (Bild 5-14).

5.13 Benzo(a)pyren (C₂₀H₁₂)

Figure 5-14 shows 104 values from clean gas measurements at 32 rotary kilns.

Bild 5-14 Benzo(a)pyren (C₂₀H₁₂, Messwerte 2021)
Fig. 5-14 Benzo(a)pyren (C₂₀H₁₂, measurements 2021)

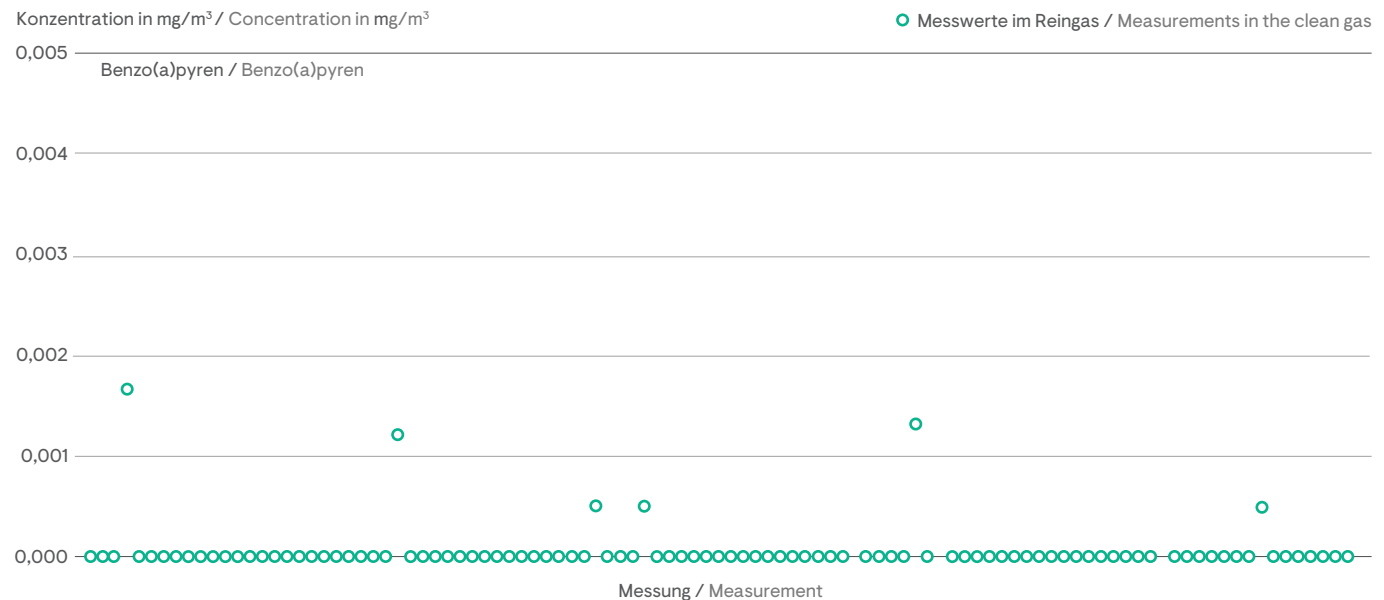
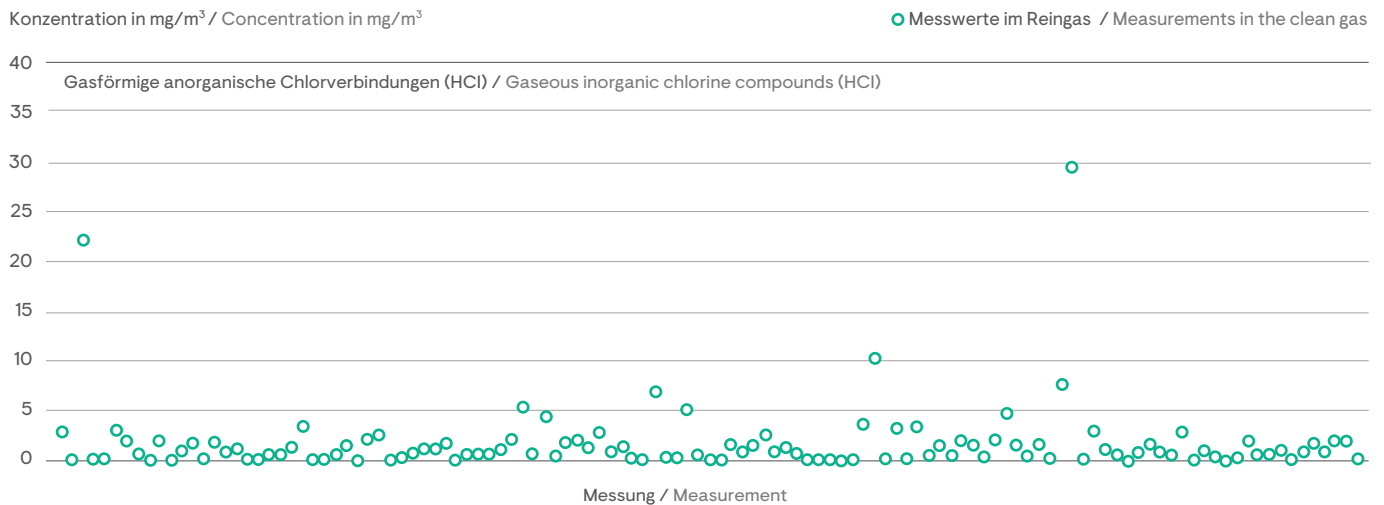


Bild 5-15 Gasförmige anorganische Chlorverbindungen (HCl, Messwerte 2021)
Fig. 5-15 Gaseous inorganic chlorine compounds (HCl, measurements 2021)



5.14 Gasförmige anorganische Chlorverbindungen (HCl)

Rohmaterialien und Brennstoffe des Klinkerbrennprozesses enthalten als Nebenbestandteile Chloride. Sie werden beim Verfeuern der Brennstoffe oder Erhitzen des Brennguts freigesetzt und reagieren überwiegend mit den Alkalien aus dem Brenngut unter Bildung von Alkalichloriden. Diese zunächst dampfförmig vorliegenden Verbindungen kondensieren bei Temperaturen zwischen 700 °C und 900 °C am Brenngut bzw. am Ofengasstaub, gelangen anschließend erneut in den Drehofen und verdampfen erneut. Dieser Kreislauf im Bereich zwischen Drehofen und Vorwärmer kann zur Bildung von Ansätzen führen. Über einen Gasabzug am Ofeneinlauf können Alkalichloridkreisläufe wirkungsvoll reduziert und damit Betriebsstörungen vermindert werden. Gasförmige anorganische Chlorverbindungen werden beim Klinkerbrennprozess nicht oder nur in sehr geringen Mengen emittiert. Das Auftreten von Chlorwasserstoff (HCl) im Abgas kann aufgrund der basischen Ofengasatmosphäre weitgehend ausgeschlossen werden. Werden gasförmige anorganische Chloride im Abgas von Drehofenanlagen nachgewiesen, so ist dies im Allgemeinen auf feinste Kornfraktionen von Alkalichloriden im Reingasstaub zurückzuführen. Sie können Messgasfilter passieren und das Vorliegen der gasförmigen Verbindungen vortäuschen.

Bild 5-15 zeigt 119 Werte aus Messungen der HCl-Konzentration im Reingas von 37 Drehofenanlagen.

5.15 Gasförmige anorganische Fluorverbindungen (HF)

Fluor liegt in Drehöfen der Zementindustrie zu 90 bis 95 % im Klinker und der Rest in Form des unter den Bedingungen des Brennbetriebs stabilen Calciumfluorids an Staub gebunden vor. Die Emission gasförmiger Fluorverbindungen, insbesondere auch von Fluorwasserstoff, ist wegen des hohen Calciumüber-

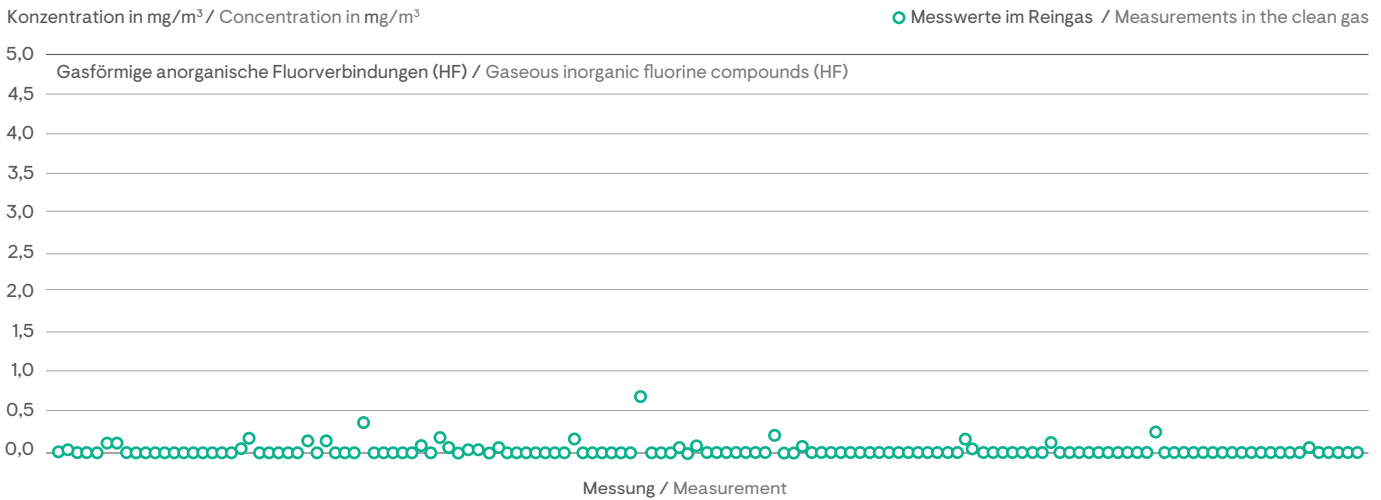
5.14 Gaseous inorganic chlorine compounds (HCl)

Chlorides are minor additional constituents contained in the raw materials and fuels of the clinker burning process. They are released when the fuels are burnt or the kiln feed is heated and primarily react with the alkalis from the kiln feed to form alkali chlorides. These compounds, which are initially vaporous, condense on the kiln feed or the kiln dust, respectively, at temperatures between 700 °C and 900 °C, subsequently re-enter the rotary kiln system and evaporate again. This cycle in the area between the rotary kiln and the preheater can result in coating formation. A bypass at the kiln inlet allows to effectively reduce alkali chloride cycles and to thus diminish operational malfunctions. During the clinker burning process gaseous inorganic chlorine compounds are either not emitted at all or only in very small quantities. Owing to the alkaline kiln gas atmosphere, the formation of hydrogen chloride (HCl) in the exhaust gas can be largely ruled out. Gaseous inorganic chlorides detected in the exhaust gas of rotary kiln systems are generally attributable to ultra-fine grain size fractions of alkali chlorides in the clean gas dust. They can pass through measuring gas filters, thus feigning the presence of the gaseous compounds.

Figure 5-15 shows 119 HCl concentration values from measurements in the clean gas at 37 rotary kilns.

5.15 Gaseous inorganic fluorine compounds (HF)

Of the fluorine present in rotary kilns, 90 to 95 % is bound in the clinker and the remainder is bound with dust in the form of calcium fluoride stable under the conditions of the burning process. Owing to the great calcium excess, the emission of gaseous fluorine compounds and of hydrogen fluoride in particular, is virtually excluded.

Bild 5-16 Gasförmige anorganische Fluorverbindungen (HF, Messwerte 2021)**Fig. 5-16 Gaseous inorganic fluorine compounds (HF, measurements 2021)**

schusses praktisch ausgeschlossen. Feinste Staubfraktionen, die das Messgasfilter passieren, können bei Drehofenanlagen der Zementindustrie geringe Gehalte an gasförmigen Fluorverbindungen vortäuschen.

Bild 5-16 zeigt 137 Werte aus Messungen der HF-Konzentration im Reingas von 37 Drehofenanlagen.

5.16 Spurenelemente

Für das Emissionsverhalten der einzelnen Elemente im Klinkerbrennprozess sind die Eintragssituation, das Verhalten in der Anlage sowie der Abscheidegrad der Entstaubungseinrichtung von Bedeutung. Die mit den Roh- und Brennstoffen dem Brennprozess zugeführten Spurenelemente können in Abhängigkeit von ihrer Flüchtigkeit ganz oder teilweise in den heißen Zonen des Vorwärmers und/oder Drehofens verdampfen, mit den in der Gasphase vorliegenden Bestandteilen reagieren und in den kälteren Bereichen des Ofensystems auf dem Brenngut kondensieren. Je nach Flüchtigkeit und Betriebsbedingungen können sich Kreisläufe ausbilden, die entweder auf Ofen und Vorwärmer beschränkt bleiben oder auch die Mahltrocknungsanlage mit einschließen.

Spurenelemente aus den Brennstoffen gelangen zunächst in die Verbrennungsgase, werden jedoch aufgrund des Rückhaltevermögens von Ofen und Vorwärmer nur in äußerst geringem Maße emittiert. Tabelle 5-2 enthält repräsentative Emissionsfaktoren für Drehofenanlagen mit Zyklonvorwärmer. Mit ihnen lässt sich abschätzen, welcher Anteil der Spurenelemente aus den Roh- und Brennstoffen durchschnittlich mit dem Reingas emittiert wird.

ed. Ultra-fine dust fractions that pass through the measuring gas filter may simulate low contents of gaseous fluorine compounds in rotary kiln systems of the cement industry.

Figure 5-16 shows 137 HF concentration values from measurements in the clean gas at 37 rotary kilns.

5.16 Trace elements

The emission behaviour of the individual elements in the clinker burning process is determined by the input scenario, the behaviour in the process and the precipitation efficiency of the dust collection device. The trace elements introduced into the burning process via the raw materials and fuels may evaporate completely or partially in the hot zones of the preheater and/or rotary kiln depending on their volatility, react with the constituents present in the gas phase and condense on the kiln feed in the cooler sections of the kiln system. Depending on the volatility and the operating conditions, this may result in the formation of cycles that are either restricted to the kiln and the preheater or include the combined drying and grinding plant as well.

Trace elements from the fuels initially enter the combustion gases, but are emitted to an extremely small extent only owing to the retention capacity of the kiln and the preheater. Table 5-2 gives representative emission factors for rotary kiln systems equipped with cyclone preheaters. These coefficients serve to calculate the average proportion of trace elements from raw materials and fuels emitted with the clean gas.

Tabelle 5-2 Emissionsfaktoren (EF, emittierter Anteil des Gesamteintrags) für Drehofenanlagen mit Zyklonvorwärmer
Table 5-2 Emission factors (EF, emitted portion of the total input) for rotary kiln systems with cyclone pre-heater

| Komponente / Component | EF in % / EF in % |
|------------------------|-------------------|
| Cadmium / Cadmium | 0,17 |
| Thallium / Thallium | 1,3 |
| Quecksilber / Mercury | 40,0 |
| Antimon / Antimony | 0,03 |
| Arsen / Arsenic | 0,023 |
| Blei / Lead | 0,05 |
| Chrom / Chromium | 0,012 |
| Cobalt / Cobalt | 0,019 |
| Kupfer / Copper | 0,0093 |
| Mangan / Manganese | 0,018 |
| Nickel / Nickel | 0,03 |
| Vanadium / Vanadium | 0,052 |
| Zinn / Tin | 0,074 |

Quelle / Source: Leitfaden zur energetischen Verwertung von Abfällen in Zement-, Kalk- und Kraftwerken in Nordrhein-Westfalen

Unter den Bedingungen des Klinkerbrennprozesses werden die nichtflüchtigen Elemente (z. B. Arsen, Vanadium, Nickel) vollständig in den Klinker eingebunden. Elemente wie Blei und Cadmium reagieren im Bereich zwischen Drehofen und Vorwärmer bevorzugt mit den im Überschuss zur Verfügung stehenden Chloriden und Sulfaten zu schwerflüchtigen Verbindungen. Aufgrund des hohen Oberflächenangebots kondensieren diese Verbindungen bei Temperaturen zwischen 700 °C und 900 °C an den Brenngutpartikeln. Die im Ofen-Vorwärmer-System gespeicherten schwerflüchtigen Elemente werden so im Zyklonvorwärmer wieder abgeschieden und verbleiben praktisch vollständig im Klinker.

Thallium und seine Verbindungen kondensieren im oberen Bereich des Zyklonvorwärmers bei Temperaturen zwischen 450 °C und 500 °C, sodass sich zwischen Vorwärmer, Rohmaterialtrocknung und Abgasreinigungsanlage ein Kreislauf ausbilden kann.

Quecksilber und seine Verbindungen werden in Ofen und Vorwärmer nicht abgeschieden. Auf dem Abgasweg kondensieren sie infolge der Abkühlung des Gases und werden von den Rohmaterialpartikeln teilweise adsorbiert. Dieser Anteil wird im Ofenabgasfilter abgeschieden.

Aufgrund des Verhaltens der Spurenelemente beim Klinkerbrennprozess sowie der hohen Abscheideleistung der Entstaubungseinrichtungen liegen die Emissionskonzentrationen der Spurenelemente insgesamt auf einem niedrigen Niveau.

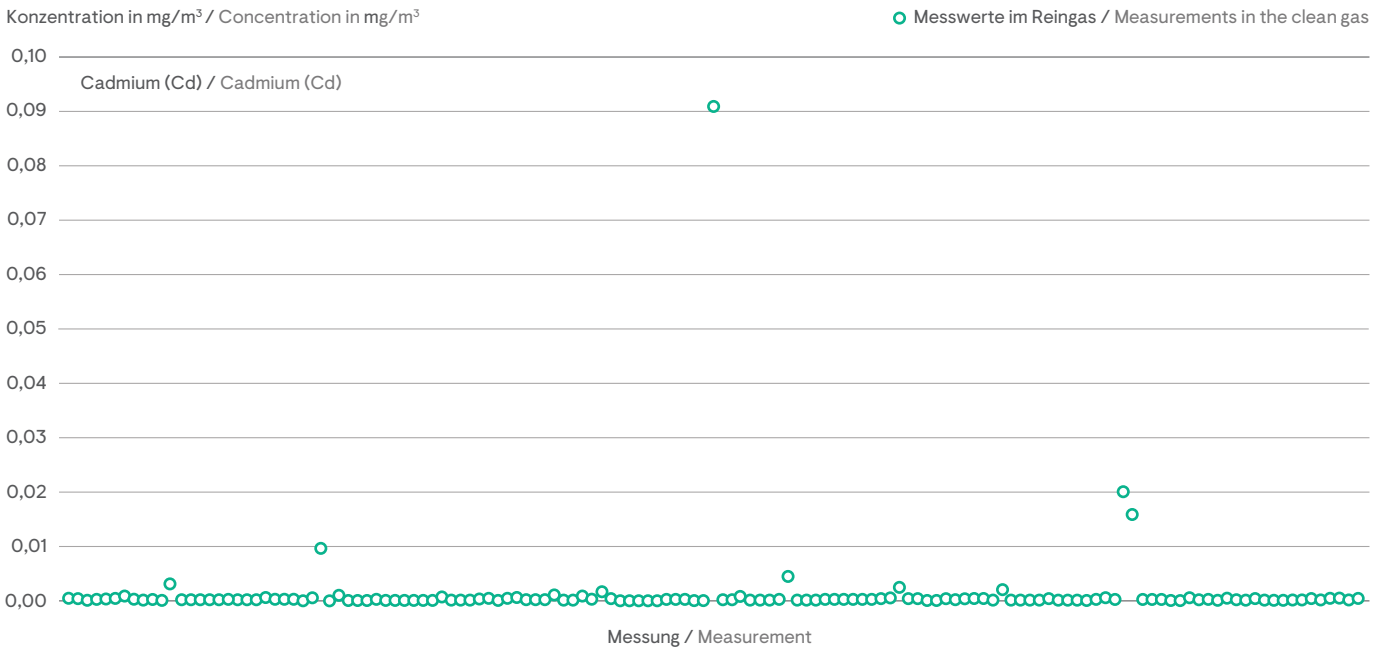
Under the conditions prevailing in the clinker burning process, non-volatile elements (e.g. arsenic, vanadium, nickel) are completely bound in the clinker. Elements such as lead and cadmium preferably react with the excess chlorides and sulphates in the section between the rotary kiln and the preheater, forming low-volatile compounds. Owing to the large surface area available, these compounds condense on the kiln feed particles at temperatures of between 700 °C and 900 °C. In this way, the low-volatile elements accumulated in the kiln-preheater-system are precipitated again in the cyclone preheater, remaining almost completely in the clinker.

Thallium and its compounds condense in the upper zone of the cyclone preheater at temperatures of between 450 °C and 500 °C. As a consequence, a cycle can be formed between preheater, raw material drying and exhaust gas purification.

Mercury and its compounds are not precipitated in the kiln and the preheater. They condense on the exhaust gas route due to the cooling of the gas and are partially adsorbed by the raw material particles. This portion is precipitated in the kiln exhaust gas filter.

Owing to trace element behaviour during the clinker burning process and the high precipitation efficiency of the dust collection devices, trace element emission concentrations are on a low overall level.

Bild 5-17 Cadmium (Cd, Messwerte 2021)
Fig. 5-17 Cadmium (Cd, measurements 2021)



5.16.1 Cadmium (Cd)

In 2021 wurden 139 Werte aus Messungen im Reingas von 37 Drehofenanlagen ermittelt (Bild 5-17).

5.16.1 Cadmium (Cd)

Figure 5-17 shows 139 values from measurements in the clean gas at 37 rotary kilns.

5.16.2 Thallium (Tl)

In 2021 wurden 139 Werte aus Messungen im Reingas von 37 Drehofenanlagen ermittelt (Bild 5-18).

5.16.2 Thallium (Tl)

Figure 5-18 shows 139 values from measurements in the clean gas at 37 rotary kilns.

Bild 5-18 Thallium (Tl, Messwerte 2021)
Fig. 5-18 Thallium (Tl, measurements 2021)

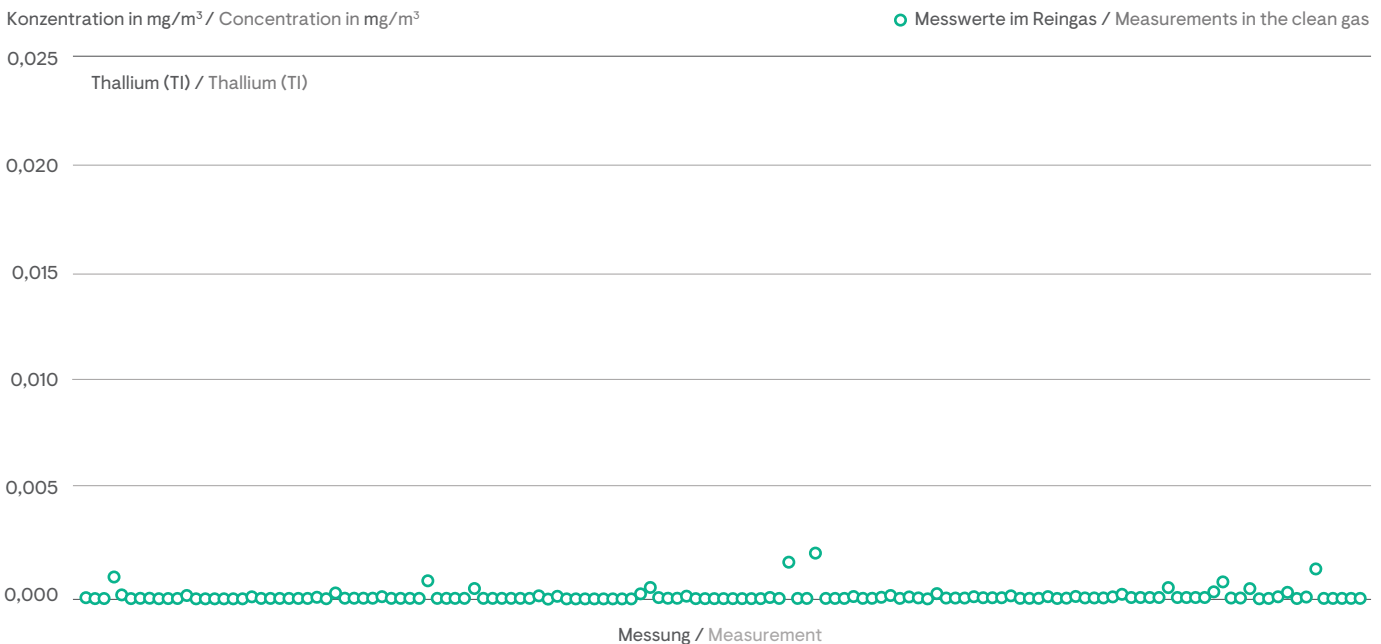
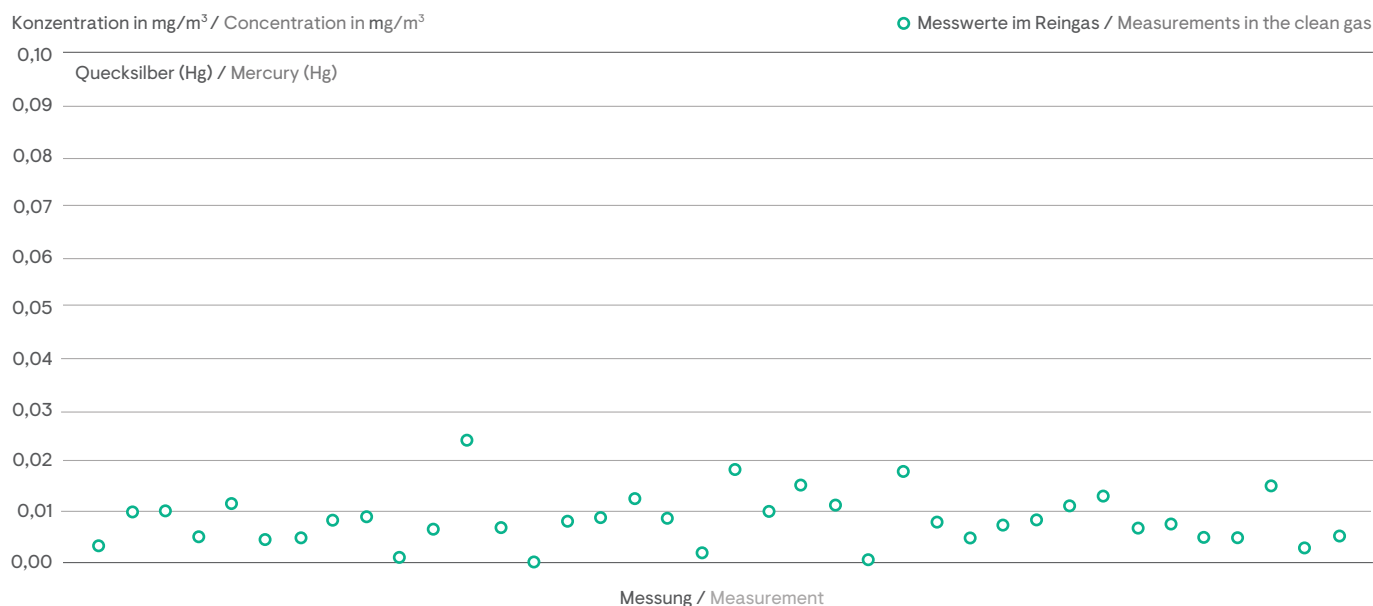


Bild 5-19 Quecksilber (Hg, Jahresmittelwerte 2021)
Fig. 5-19 Mercury (Hg, Annual mean values 2021)



5.16.3 Quecksilber (Hg)

In 2021 wurden 38 Jahresmittelwerte der Hg-Konzentration aus kontinuierlicher Überwachung von 38 Drehofenanlagen ermittelt (Bild 5-19).

5.16.3 Mercury (Hg)

Figure 5-19 shows 38 annual average Hg concentration values from continuous monitoring at 38 rotary kilns.

5.16.4 Antimon (Sb)

In 2021 wurden 138 Werte aus Messungen im Reingas von 36 Drehofenanlagen ermittelt (Bild 5-20).

5.16.4 Antimony (Sb)

Figure 5-20 shows 138 values from measurements in the clean gas at 36 rotary kilns.

Bild 5-20 Antimon (Sb, Messwerte 2021)
Fig. 5-20 Antimony (Sb, measurements 2021)

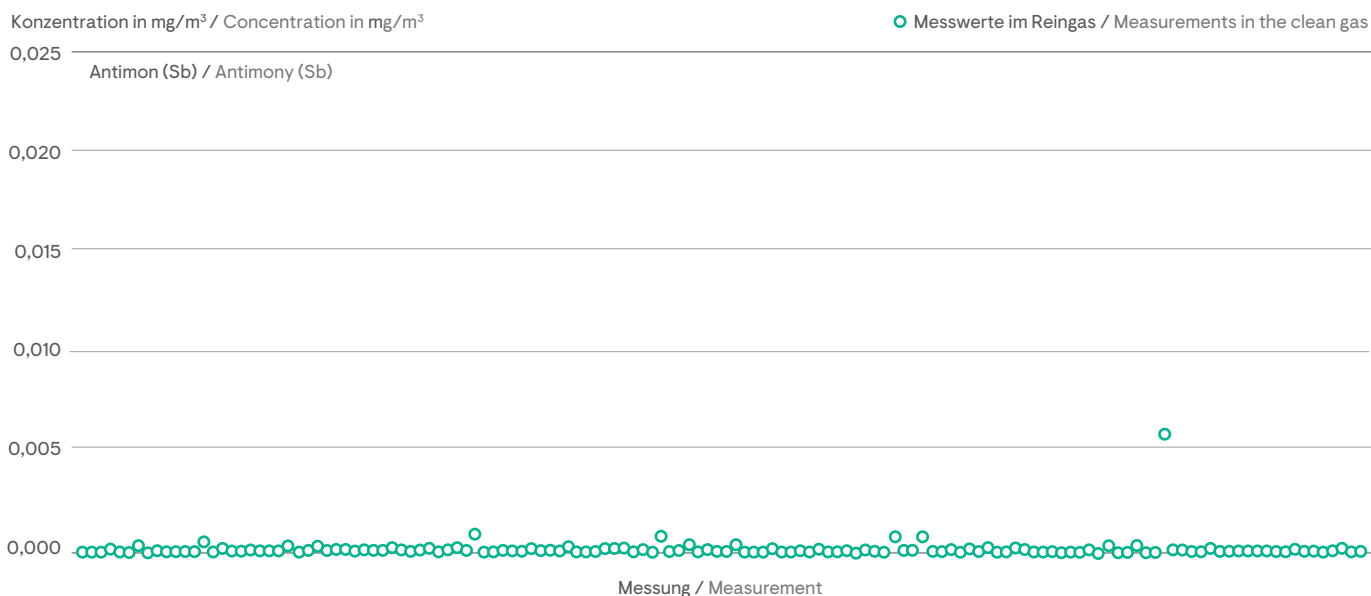
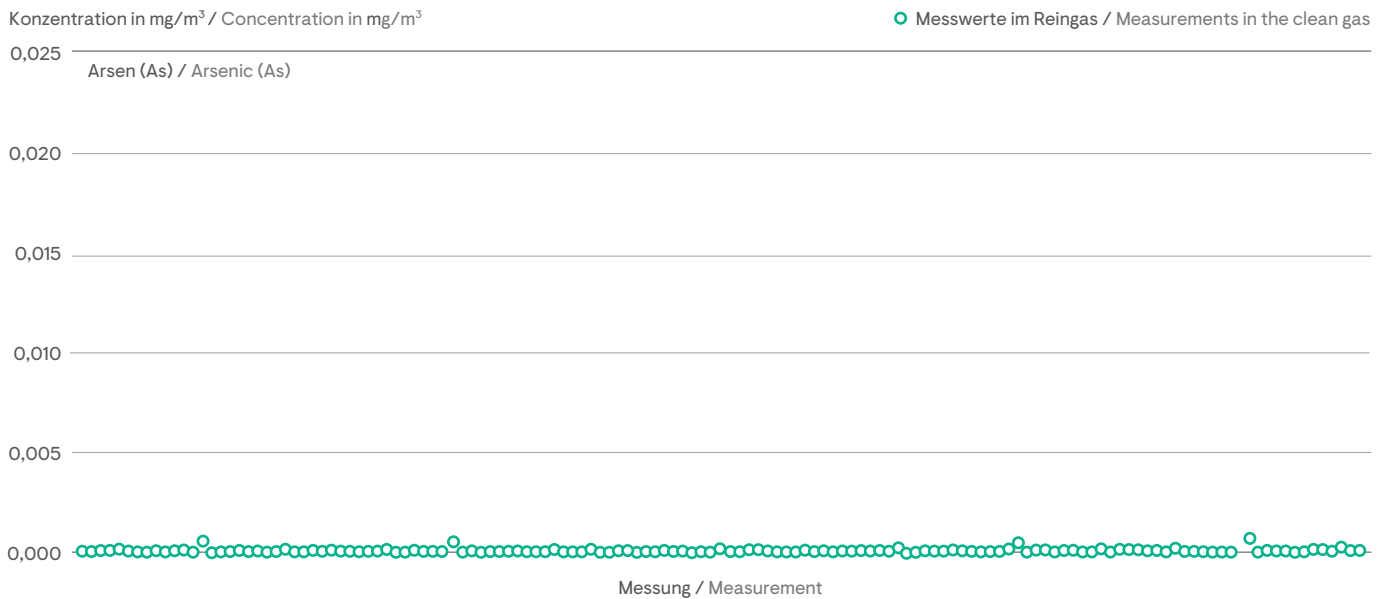


Bild 5-21 Arsen (As, Messwerte 2021)
Fig. 5-21 Arsenic (As, measurements 2021)



5.16.5 Arsen (As)

In 2021 wurden 139 Werte aus Messungen im Reingas von 37 Drehofenanlagen ermittelt (Bild 5-21).

5.16.5 Arsenic (As)

Figure 5-21 shows 139 values from measurements in the clean gas at 37 rotary kilns.

5.16.6 Blei (Pb)

In 2021 wurden 139 Werte aus Messungen im Reingas von 37 Drehofenanlagen ermittelt (Bild 5-22).

5.16.6 Lead (Pb)

Figure 5-22 shows 139 values from measurements in the clean gas at 37 rotary kilns.

Bild 5-22 Blei (Pb, Messwerte 2021)
Fig. 5-22 Lead (Pb, measurements 2021)

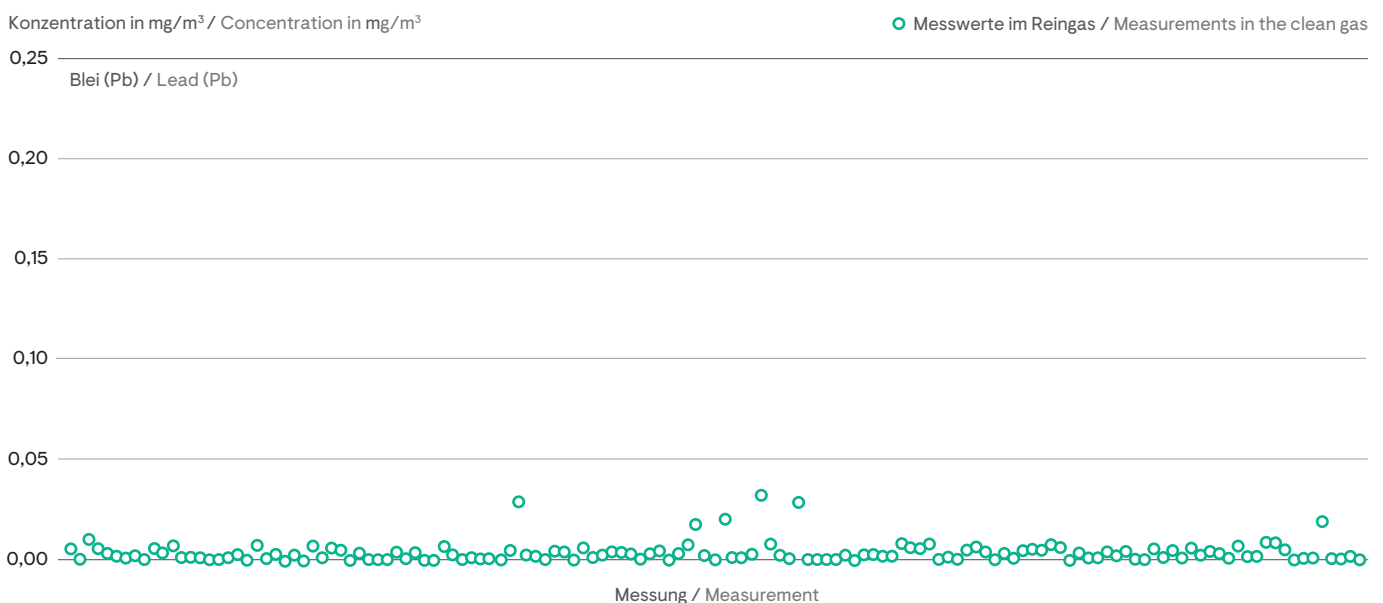
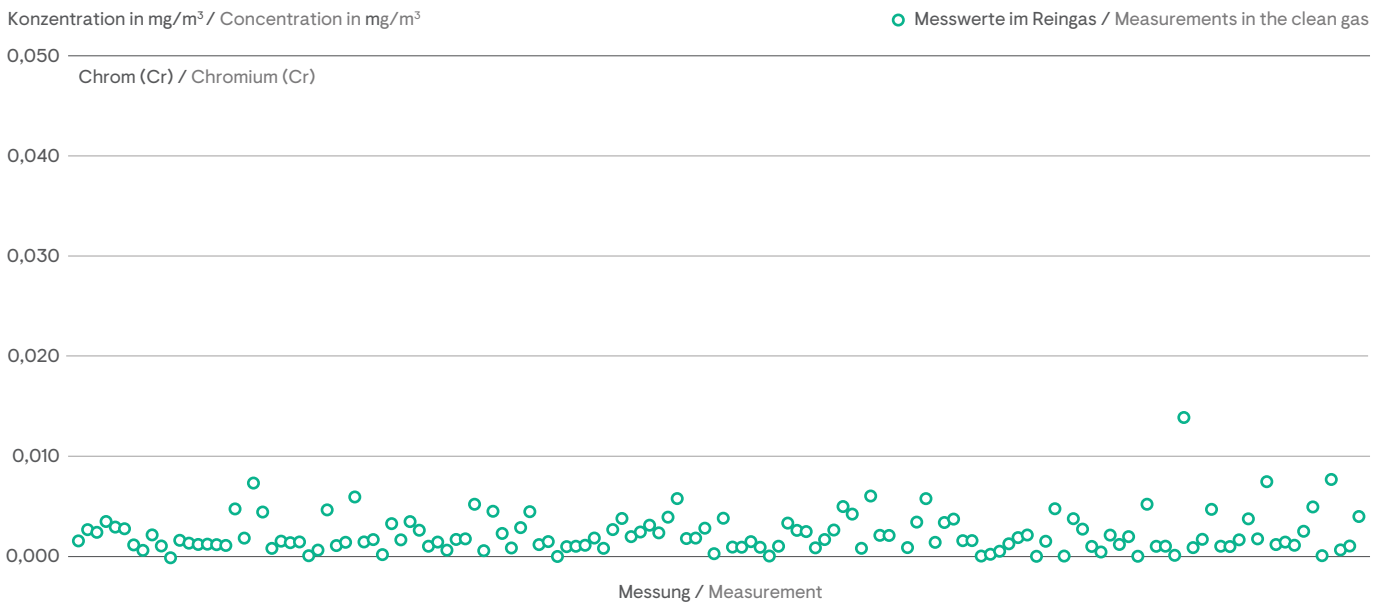


Bild 5-23 Chrom (Cr, Messwerte 2021)
Fig. 5-23 Chromium (Cr, measurements 2021)



5.16.7 Chrom (Cr)

In 2021 wurden 139 Werte aus Messungen im Reingas von 37 Drehofenanlagen ermittelt (Bild 5-23).

5.16.7 Chromium (Cr)

Figure 5-23 shows 139 values from measurements in the clean gas at 37 rotary kilns.

5.16.8 Cobalt (Co)

In 2021 wurden 139 Werte aus Messungen im Reingas von 37 Drehofenanlagen ermittelt (Bild 5-24).

5.16.8 Cobalt (Co)

Figure 5-24 shows 139 values from measurements in the clean gas at 37 rotary kilns.

Bild 5-24 Cobalt (Co, Messwerte 2021)
Fig. 5-24 Cobalt (Co, measurements 2021)

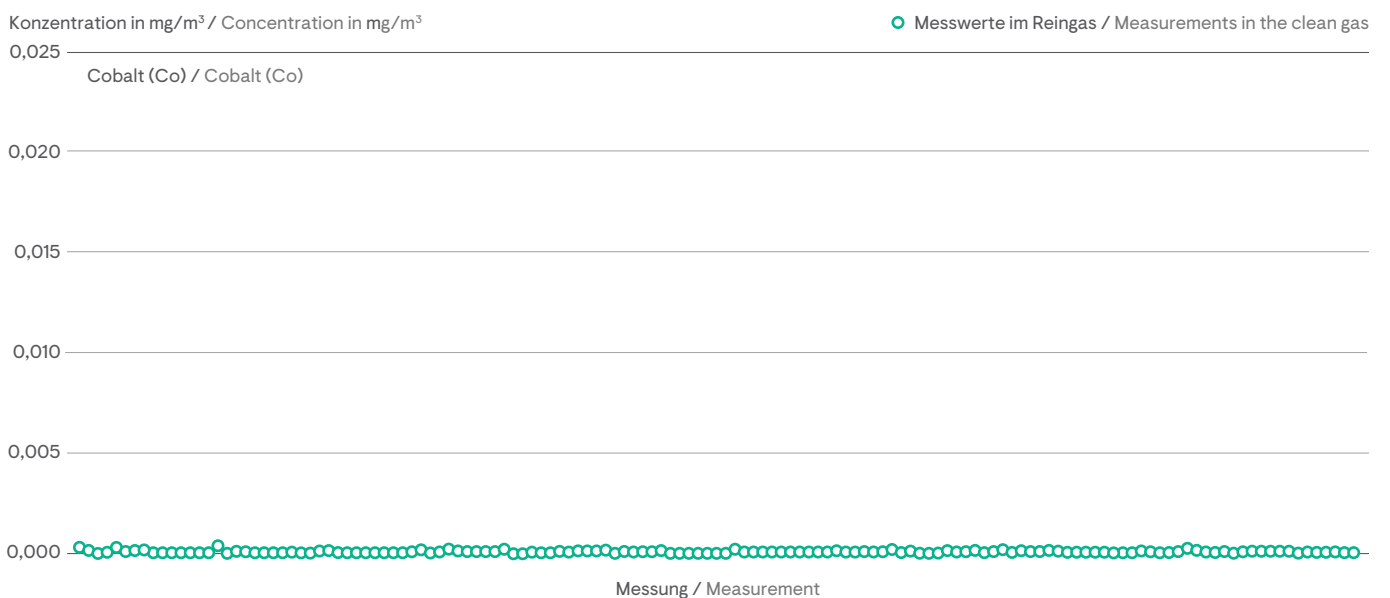
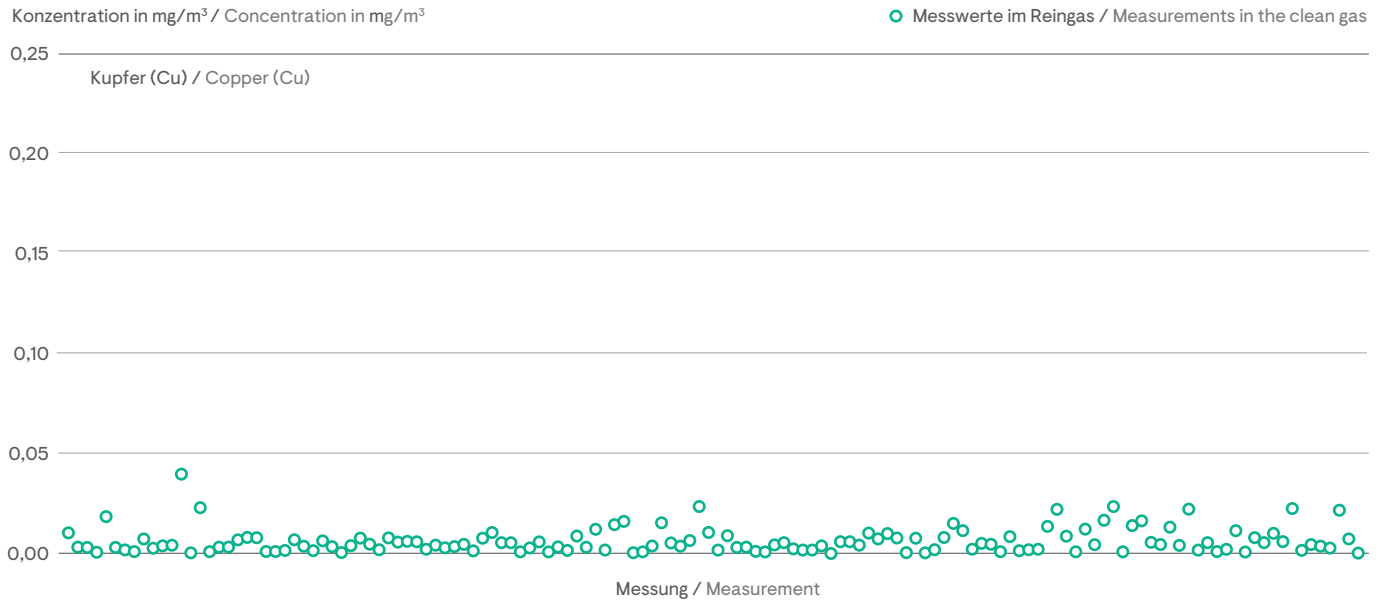


Bild 5-25 Kupfer (Cu, Messwerte 2021)**Fig. 5-25 Copper (Cu, measurements 2021)****5.16.9 Kupfer (Cu)**

In 2021 wurden 138 Werte aus Messungen im Reingas von 37 Drehofenanlagen ermittelt (Bild 5-25).

5.16.9 Copper (Cu)

Figure 5-25 shows 138 values from measurements in the clean gas at 37 rotary kilns.

5.16.10 Mangan (Mn)

In 2021 wurden 139 Werte aus Messungen im Reingas von 37 Drehofenanlagen ermittelt (Bild 5-26).

5.16.10 Manganese (Mn)

Figure 5-26 shows 139 values from measurements in the clean gas at 37 rotary kilns.

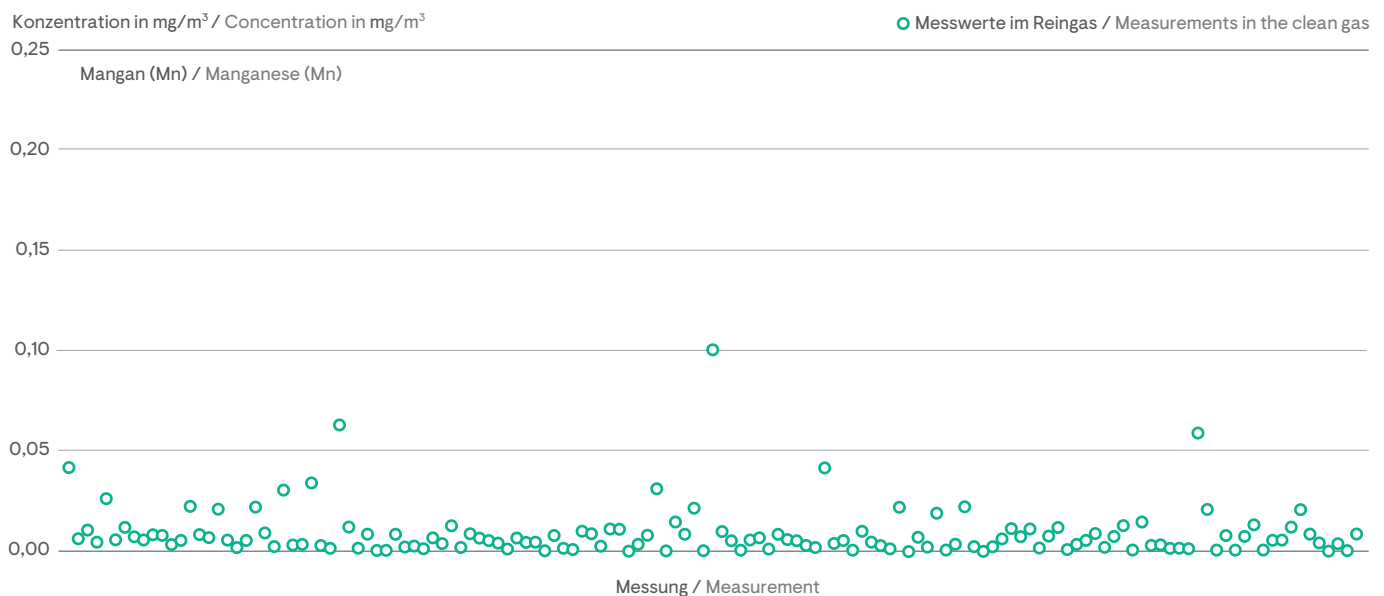
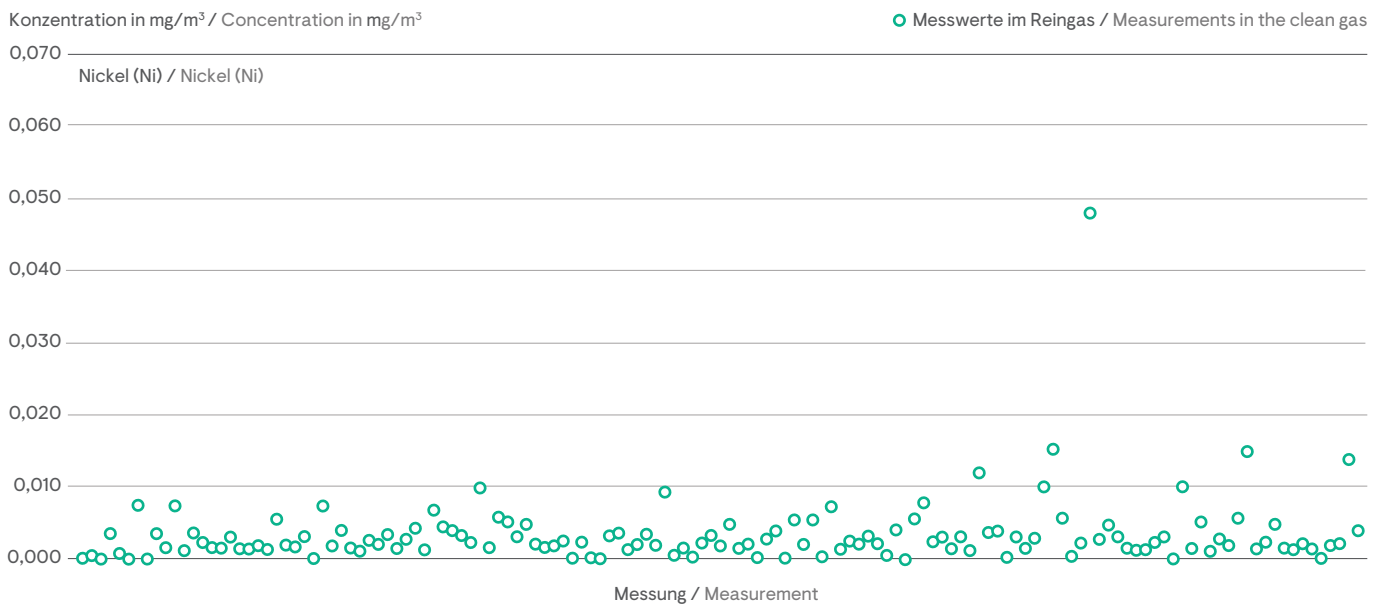
Bild 5-26 Mangan (Mn, Messwerte 2021)**Fig. 5-26 Manganese (Mn, measurements 2021)**

Bild 5-27 Nickel (Ni, Messwerte 2021)
Fig. 5-27 Nickel (Ni, measurements 2021)



5.16.11 Nickel (Ni)

In 2021 wurden 139 Werte aus Messungen im Reingas von 37 Drehofenanlagen ermittelt (Bild 5-27).

5.16.11 Nickel (Ni)

Figure 5-27 shows 139 values from measurements in the clean gas at 37 rotary kilns.

5.16.12 Vanadium (V)

In 2021 wurden 139 Werte aus Messungen im Reingas von 37 Drehofenanlagen ermittelt (Bild 5-28).

5.16.12 Vanadium (V)

Figure 5-28 shows 139 values from measurements in the clean gas at 37 rotary kilns.

Bild 5-28 Vanadium (V, Messwerte 2021)
Fig. 5-28 Vanadium (V, measurements 2021)

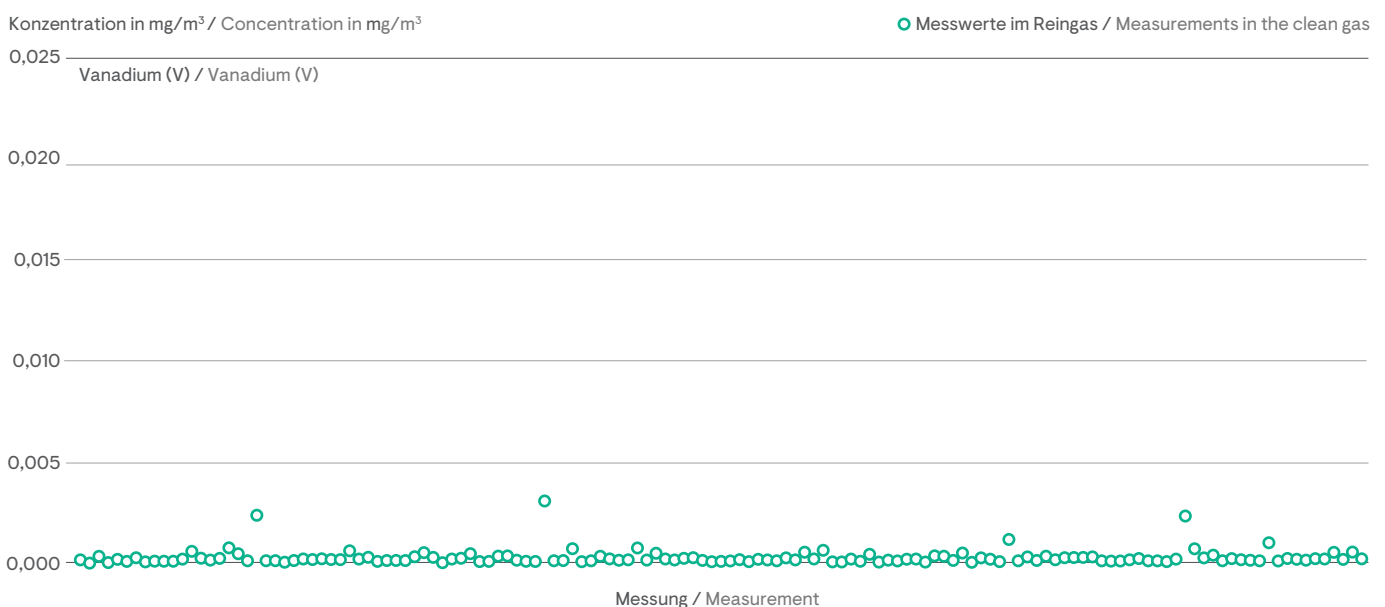
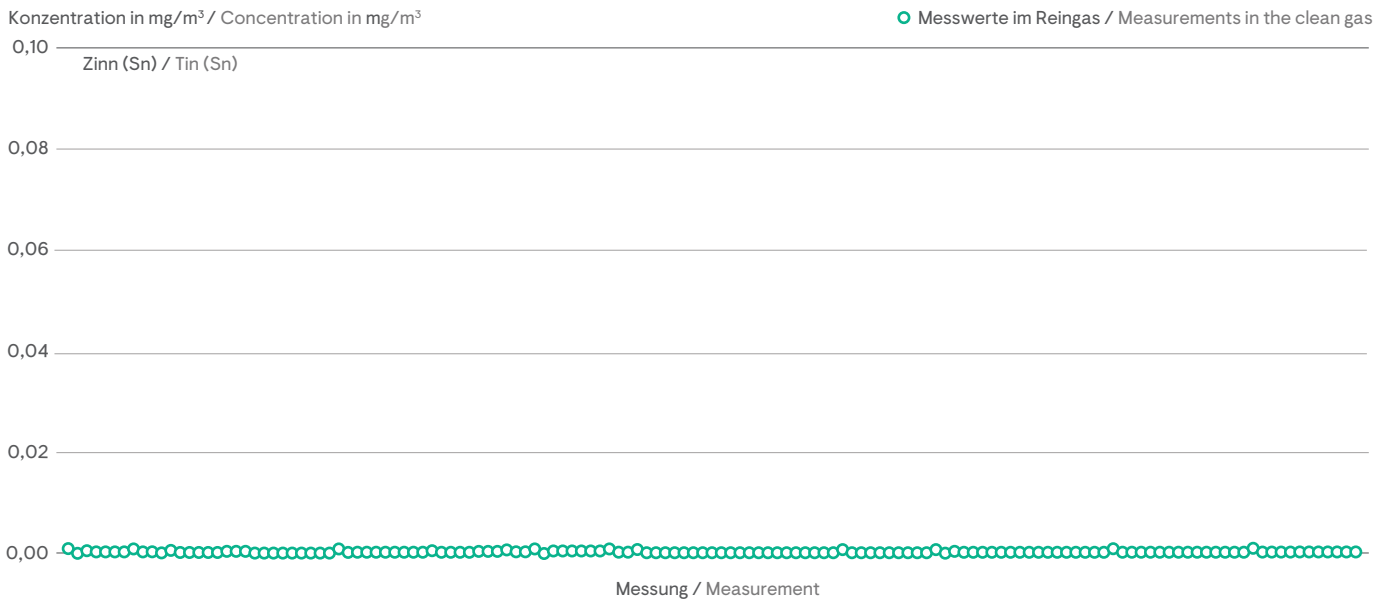


Bild 5-29 Zinn (Sn, Messwerte 2021)
Fig. 5-29 Tin (Sn, measurements 2021)



5.16.13 Zinn (Sn)

In 2021 wurden 139 Werte aus Messungen im Reingas von 37 Drehofenanlagen ermittelt (Bild 5-29).

5.16.13 Tin (Sn)

Figure 5-29 shows 139 values from measurements in the clean gas at 37 rotary kilns.

5.16.14 Beryllium (Be)

In 2021 wurden sieben Werte aus Messungen im Reingas von drei Drehofenanlagen ermittelt (Bild 5-30).

5.16.14 Beryllium (Be)

Figure 5-30 shows seven values from measurements in the clean gas at three rotary kilns.

Bild 5-30 Beryllium (Be, Messwerte 2021)
Fig. 5-30 Beryllium (Be, measurements 2021)

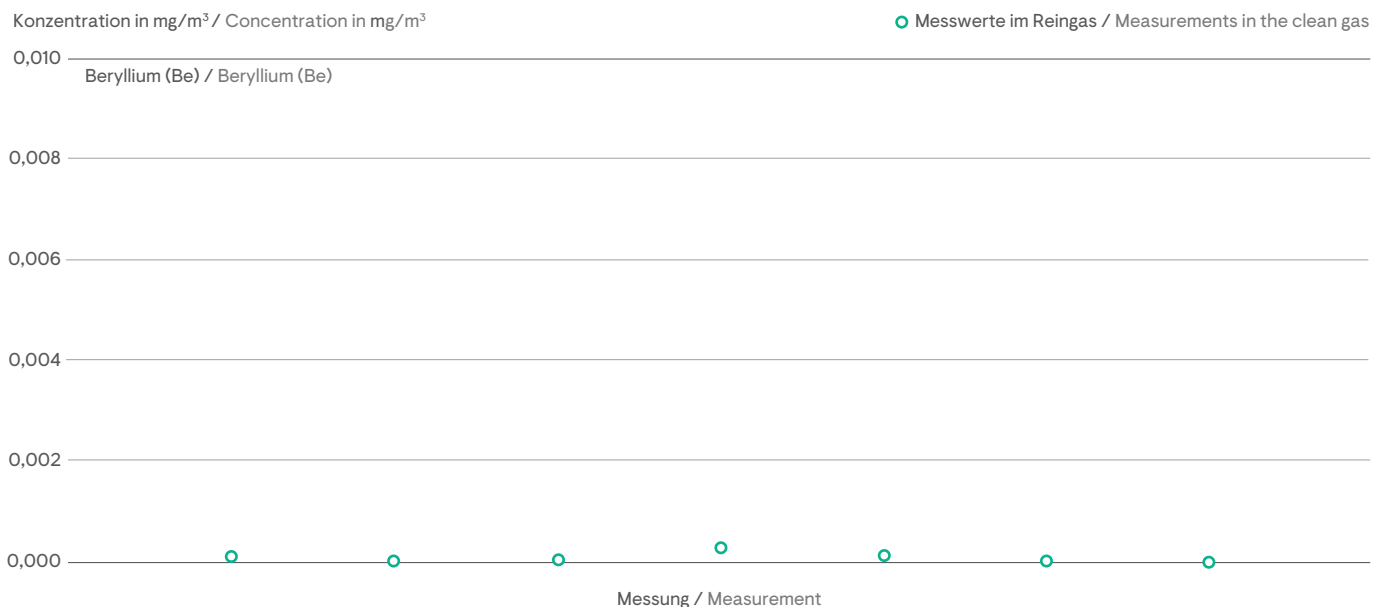
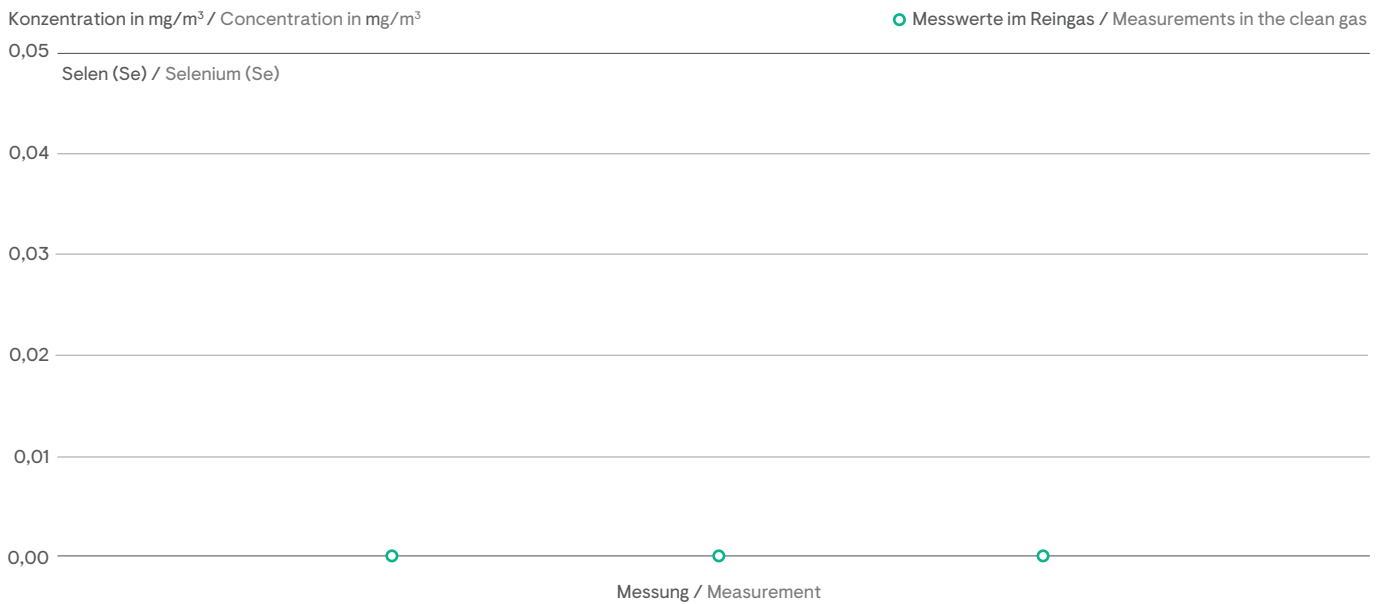


Bild 5-31 Selen (Se, Messwerte 2021)
Fig. 5-31 Selenium (Se, measurements 2021)



5.16.15 Selen (Se)

In 2021 wurden drei Werte aus Messungen im Reingas von einer Drehofenanlage ermittelt (Bild 5-31).

5.16.16 Tellur (Te)

In 2021 wurden drei Werte aus Messungen im Reingas von einer Drehofenanlage ermittelt (Bild 5-32).

5.16.15 Selenium (Se)

Figure 5-31 shows three values from measurements in the clean gas at one rotary kiln.

5.16.16 Tellurium (Te)

Figure 5-32 shows three values from measurements in the clean gas at one rotary kiln.

Bild 5-32 Tellur (Te, Messwerte 2021)
Fig. 5-32 Tellurium (Te, measurements 2021)



Bild 5-33 Zink (Zn, Messwerte 2021)
Fig. 5-33 Zinc (Zn, measurements 2021)



5.16.17 Zink (Zn)

In 2021 wurden sechs Werte aus Messungen im Reingas von einer Drehofenanlage ermittelt (Bild 5-33).

5.16.17 Zinc (Zn)

Figure 5-33 shows six values from clean gas measurements at one rotary kiln.

Literatur

- [1] Zahlen und Daten – Zementindustrie in Deutschland 2022, Verein Deutscher Zementwerke e. V., Düsseldorf
- [2] Verein Deutscher Zementwerke, VDZ, Hrsg. Dekarbonisierung von Zement und Beton - Minderungspfade und Handlungsstrategien, 2020
- [3] Verminderung der CO₂-Emission, Umfrage zum Monitoring-Bericht 2012, Verein Deutscher Zementwerke e. V., Düsseldorf
- [4] Klein, H.; Hoenig, V.: Modellrechnungen zum Brennstoffenergiebedarf des Klinkerbrennprozesses, Cement International 3/2006 Vol. 4
- [5] Verordnung (EG) 166/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Januar 2006 über die Schaffung eines Europäischen Schadstofffreisetzungs- und -verbringungsregisters und zur Änderung der Richtlinien 91/689/EWG und 96/61/EG
- [6] Hoenig, V. et al.: Energieeffizienz bei der Zementherstellung, Teil 1; Cement International 3/2013
- [7] Hoenig, V. et al.: Energieeffizienz bei der Zementherstellung, Teil 2, Cement International 4/2013

Ergänzende Literatur

- Umweltdaten der deutschen Zementindustrie (1998 - 2020), Verein Deutscher Zementwerke e. V., Düsseldorf
- Zement-Taschenbuch 2008, Verein Deutscher Zementwerke e. V., Düsseldorf
- Rohstoffversorgung und Ressourcenproduktivität in der deutschen Zementindustrie - Analyse des Status quo und Perspektiven, Initiative für Nachhaltigkeit in der deutschen Zementindustrie, Berlin; Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH, Wuppertal.
- Richtlinie VDI 2094:2019-07 (Entwurf). Zementwerke: Emissionsminderung
- Norm DIN 1164-10:2013-03. Zement mit besonderen Eigenschaften
- Norm DIN EN 197-1:2011-11. Zement: Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement
- R. Harraß, S. Schäfer, V. Hoenig: Quecksilber in der deutschen Zementindustrie – eine Bilanz; Cement International 6/2018

Literature

- [1] Zahlen und Daten – Zementindustrie in Deutschland 2022, Verein Deutscher Zementwerke e. V., Duesseldorf
- [2] Verein Deutscher Zementwerke, VDZ, ed., Decarbonising Cement and Concrete: A CO₂ Roadmap for the German cement industry, Dusseldorf, 2020
- [3] Verminderung der CO₂ Emission, Umfrage zum Monitoring-Bericht 2012, Verein Deutscher Zementwerke e. V., Dues-seldorf
- [4] Klein, H.; Hoenig, V.: Model calculations of the fuel energy requirement for the clinker burning process, Cement International 3/2006 Vol. 4
- [5] Regulation (EC) No 166/2006 of the European Parliament and the Council of 18 January 2006 concerning the establishment of a European Pollutant Release and Transfer Register and amending Council Directives 91/689/EEC and 96/61/EC
- [6] Hoenig, V. et al.: Energy efficiency in cement production, part 1; Cement International 3/2013
- [7] Hoenig, V. et al.: Energy efficiency in cement production, part 2; Cement International 4/2013

Additional Literature

- Environmental Data of the German Cement Industry (1998 - 2020), Verein Deutscher Zementwerke e. V., Duesseldorf
- Zement-Taschenbuch 2008, Verein Deutscher Zementwerke e. V., Duesseldorf
- Rohstoffversorgung und Ressourcenproduktivität in der deutschen Zementindustrie - Analyse des Status quo und Perspektiven, Initiative for Sustainability in the German Cement Industry, Berlin; Wuppertal Institute for Climate, Environment, Energy, Wuppertal.
- VDI-Guideline 2094:2019-07 (draft). Cement plants: Emission control
- Standard DIN 1164-10:2013-03. Special cement – Part 10
- Standard DIN EN 197-1:2011-11. Cement – Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements
- R. Harraß, S. Schäfer, V. Hoenig: Mercury in the German cement industry – a balance; Cement International 6/2018

Impressum / Imprint

Copyright/Herausgeber:

Verein Deutscher Zementwerke e.V.
Postfach 30 10 63, 40410 Düsseldorf
Toulouser Allee 71, 40476 Düsseldorf
T +49(0)2 11 45 78 0
F +49(0)2 11 45 78 296
vdz@vdz-online.de
www.vdz-online.de

Alle Rechte vorbehalten

Veröffentlichung und
Gesamtproduktion:
Verein Deutscher Zementwerke e. V.

Redaktionsschluss: August 2022

Zitierung:
Verein Deutscher Zementwerke e. V., Hrsg.
Umweltdaten der deutschen
Zementindustrie 2021;
Düsseldorf, 2022

Copyright/Publisher:

Verein Deutscher Zementwerke e.V.
P.O. Box 30 10 63, 40410 Duesseldorf
Toulouser Allee 71, 40476 Duesseldorf
T +49(0)2 11 45 78 0
F +49(0)2 11 45 78 296
vdz@vdz-online.de
www.vdz-online.de

All rights reserved

Overall production:
Verein Deutscher Zementwerke e. V.

Press deadline : August 2022

Quotation:
Verein Deutscher Zementwerke e.V. (Ed.)
Environmental data of the
German cement industry 2021;
Duesseldorf, 2022

VDZ Technology gGmbH

Toulouser Allee 71
40476 Düsseldorf

www.vdz-online.de