

VEREIN  
DEUTSCHER  
INGENIEURE

Abgasreinigung  
Minderung von anorganischen und  
organischen Spurenstoffen in Abgasen von  
Verbrennungsprozessen (Rauchgasen)

VDI 3927

Blatt 2 / Part 2

Waste gas cleaning  
Reduction of inorganic and organic trace  
species in combustion flue gases

Ausg. deutsch/englisch  
Issue German/English

*Der Entwurf dieser Richtlinie wurde mit Ankündigung im Bundesanzeiger einem öffentlichen Einspruchsverfahren unterworfen.  
Die deutsche Version dieser Richtlinie ist verbindlich.*

*The draft of this standard has been subject to public scrutiny after announcement in the Bundesanzeiger (Federal Gazette).  
The German version of this standard shall be taken as authoritative. No guarantee can be given with respect to the English translation.*

<b>Inhalt</b>	Seite	<b>Contents</b>	Page
Vorbemerkung . . . . .	2	Preliminary note . . . . .	2
Einleitung . . . . .	3	Introduction . . . . .	3
<b>1 Anwendungsbereich . . . . .</b>	<b>3</b>	<b>1 Scope . . . . .</b>	<b>3</b>
<b>2 Begriffe . . . . .</b>	<b>4</b>	<b>2 Terms and definitions . . . . .</b>	<b>4</b>
<b>3 Abkürzungen . . . . .</b>	<b>12</b>	<b>3 Abbreviations . . . . .</b>	<b>12</b>
<b>4 Rechtlicher Hintergrund . . . . .</b>	<b>13</b>	<b>4 Legal background . . . . .</b>	<b>13</b>
<b>5 Allgemeine Hinweise . . . . .</b>	<b>14</b>	<b>5 General notes . . . . .</b>	<b>14</b>
<b>6 Thematisch relevante VDI-Richtlinien . . . . .</b>	<b>15</b>	<b>6 Thematically relevant VDI Standards . . . . .</b>	<b>15</b>
<b>7 Grundlagen . . . . .</b>	<b>16</b>	<b>7 Fundamentals . . . . .</b>	<b>16</b>
7.1 Stoffgruppen . . . . .	16	7.1 Substance groups . . . . .	16
7.2 Stoffbeschreibungen . . . . .	17	7.2 Description of substances . . . . .	17
<b>8 Katalytische Verfahren . . . . .</b>	<b>40</b>	<b>8 Catalytic processes . . . . .</b>	<b>40</b>
8.1 Verfahrenstechnische Grundlagen . . . . .	40	8.1 Process principles . . . . .	40
8.2 Ausgeführte Anlagen . . . . .	45	8.2 Implemented systems . . . . .	45
8.3 Energie- und Betriebsmittelverbräuche . . . . .	48	8.3 Energy and utility consumption levels . . . . .	48
8.4 Sicherheitstechnische Besonderheiten . . . . .	48	8.4 Special safety aspects . . . . .	48
<b>9 Adsorptionsverfahren . . . . .</b>	<b>50</b>	<b>9 Adsorption processes . . . . .</b>	<b>50</b>
9.1 Verfahrenstechnische Grundlagen . . . . .	50	9.1 Process principles . . . . .	50
9.2 Technische Ausführungen und Leistungsdaten . . . . .	53	9.2 Commercial systems and performance data . . . . .	53
9.3 Verarbeitung/Verwertung der beladenen Adsorbentien . . . . .	60	9.3 Reuse/disposal of spent adsorbents . . . . .	60
9.4 Energie- und Betriebsmittelverbräuche . . . . .	62	9.4 Energy and utility consumption levels . . . . .	62
9.5 Sicherheitstechnische Besonderheiten . . . . .	62	9.5 Special safety aspects . . . . .	62

Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN – Normenausschuss KRdL

Fachbereich Umweltschutztechnik

	Seite		Seite
<b>10 Absorptionsverfahren</b> . . . . .	64	<b>10 Absorption processes</b> . . . . .	64
10.1 Verfahrenstechnische Grundlagen . . . . .	64	10.1 Process principles . . . . .	64
10.2 Technische Ausführungen . . . . .	66	10.2 Implemented systems . . . . .	66
10.3 Energie- und Betriebsmittelverbräuche . . . . .	66	10.3 Energy and utility consumption levels . . . . .	66
<b>11 Abwasser aus der Abgasreinigung</b> . . . . .	66	<b>11 Scrubber effluent treatment</b> . . . . .	66
11.1 Allgemeines . . . . .	66	11.1 General . . . . .	66
11.2 Verfahrenstechnische Grundlagen der Abwasserreinigung . . . . .	67	11.2 Process principles of scrubber effluent treatment. . . . .	67
11.3 Ausgeführte Anlagen . . . . .	68	11.3 Implemented systems . . . . .	68
<b>12 Verfahrenstechnische Besonderheiten der Quecksilberminderung</b> . . . . .	73	<b>12 Special process features of mercury removal</b> . . . . .	73
12.1 Allgemeines . . . . .	73	12.1 General . . . . .	73
12.2 Rohgasseitige Verfahren zur Optimierung der Quecksilberminderung in Wäschern . . . . .	74	12.2 Raw-gas side techniques to optimise mercury removal in wet scrubbers . . . . .	74
12.3 Quecksilberminderung durch Absorption in der Wäsche . . . . .	78	12.3 Mercury removal by absorption in the wet scrubber . . . . .	78
12.4 Ausgeführte Anlagen . . . . .	92	12.4 Implemented systems . . . . .	92
12.5 Energie- und Betriebsmittelverbräuche . . . . .	92	12.5 Energy and utility consumption levels . . . . .	92
12.6 Sicherheitstechnische Besonderheiten. . . . .	94	12.6 Special safety aspects . . . . .	94
<b>13 Andere Verfahren</b> . . . . .	94	<b>13 Other processes</b> . . . . .	94
13.1 Kondensationsverfahren . . . . .	95	13.1 Condensation process . . . . .	95
13.2 Katalytische Kombinationsverfahren (Filter-schichtreaktoren mit katalytisch wirkendem Filtermedium) . . . . .	97	13.2 Catalytic combination process (Filter cake reactors using a catalytically active filter medium) . . . . .	97
13.3 Adsorption an ein Polymer . . . . .	99	13.3 Adsorption on a polymer . . . . .	99
13.4 Schwefelrückführung . . . . .	99	13.4 Sulphur recirculation . . . . .	99
<b>14 Betrieb der Abscheideanlagen.</b> . . . . .	102	<b>14 Operation of flue gas cleaning systems</b> . . . . .	102
Schrifttum . . . . .	103	Bibliography . . . . .	103
Benennungsindex englisch – deutsch . . . . .	110	Term index English – German . . . . .	110

**Vorbemerkung**

Der Inhalt dieser Richtlinie ist entstanden unter Beachtung der Vorgaben und Empfehlungen der Richtlinie VDI 1000.

Alle Rechte, insbesondere die des Nachdrucks, der Fotokopie, der elektronischen Verwendung und der Übersetzung, jeweils auszugsweise oder vollständig, sind vorbehalten.

Die Nutzung dieser Richtlinie ist unter Wahrung des Urheberrechts und unter Beachtung der Lizenzbedingungen ([www.vdi.de/richtlinien](http://www.vdi.de/richtlinien)), die in den VDI-Merkblättern geregelt sind, möglich.

Allen, die ehrenamtlich an der Erarbeitung dieser Richtlinie mitgewirkt haben, sei gedankt.

Eine Liste der aktuell verfügbaren Blätter dieser Richtlinienreihe ist im Internet abrufbar unter [www.vdi.de/3927](http://www.vdi.de/3927).

**Preliminary note**

The content of this standard has been developed in strict accordance with the requirements and recommendations of the standard VDI 1000.

All rights are reserved, including those of reprinting, reproduction (photocopying, micro copying), storage in data processing systems and translation, either of the full text or of extracts.

The use of this standard without infringement of copyright is permitted subject to the licensing conditions ([www.vdi.de/richtlinien](http://www.vdi.de/richtlinien)) specified in the VDI Notices.

We wish to express our gratitude to all honorary contributors to this standard.

A catalogue of all available parts of this series of standards can be accessed on the Internet at [www.vdi.de/3927](http://www.vdi.de/3927).

## Einleitung

Anorganische und organische Spurenstoffe stehen insbesondere wegen ihrer Persistenz in der besonderen Aufmerksamkeit des Gesetzgebers und der Allgemeinheit. Es sind noch nicht für alle Stoffe Grenzwerte benannt. Doch machen zunehmend empfindliche Messtechniken eine Erfassung bis hin zu geringsten Konzentrationen möglich, sofern man die relevanten Stoffe und Stoffgruppen eines Abgases kennt. Für die in VDI 3927 Blatt 1 behandelten Schadstoffe liegen zum Teil langjährige Erfahrungen mit der Abgasreinigung vor. Für die Abgasreinigung von Spurenstoffen werden jedoch immer wieder neue Erkenntnisse mitgeteilt und neue Forschungsergebnisse veröffentlicht. Die dafür entwickelten Verfahren werden ständig verfeinert und hinsichtlich der Wirksamkeit optimiert. Die Minderung anorganischer und organischer Spurenstoffe steht in Wechselwirkung mit den in der Richtlinie VDI 3927 Blatt 1 behandelten Schadstoffen. Der Gedanke der simultanen Minderung möglichst vieler Substanzen steht im Vordergrund der Entwicklungen. Daher ist eine differenziertere Betrachtungsweise unter Hinzuziehen chemischer und physikalischer Grundlagen ungleich wichtiger als bei den in VDI 3927 Blatt 1 behandelten Schadstoffen, die auch üblicherweise in bedeutend höheren Konzentrationen vorliegen. In Kenntnis dieser Grundlagen kann auch eine Relevanzdiskussion konkreter und sachlicher geführt werden.

In dieser Richtlinie werden nur diejenigen Anteile an Spurenstoffen betrachtet, die nicht in Rostaschen oder Kesselaschen eingebunden sind. Die darin enthaltenen Spurenstoffe sind üblicherweise stabil in eine feste Matrix eingebaut und gelangen nicht ins Abgas. Im Rahmen der Entsorgung entsprechend abgeschiedener Fraktionen ist vor allem das Potenzial ihrer Elution zu betrachten. Jedoch wird das Ableiten von Abwasser als Emissionspfad im Zusammenhang mit absorptiven Verfahren betrachtet, da neue Erkenntnisse zur Relevanz einzelner Spurenstoffe wie auch deren Verbleib erweiterte Betrachtungen notwendig machen.

## 1 Anwendungsbereich

Die Richtlinie VDI 3927 Blatt 2 behandelt Verfahren der Abgasreinigung zur Minderung anorganischer und organischer Spurenstoffe.

In erster Linie gelten die folgenden Ausführungen für Abgase aus Feuerungs- oder Verbrennungsanlagen gemäß 13. BImSchV oder 17. BImSchV, die Anlagen zur Energieumwandlung oder zur energetischen Verwertung von Abfällen betreffen und deren thermische Prozesse mit Sauerstoffüberschuss betrieben werden.

## Introduction

Inorganic and organic trace species are substances of major concern to the regulator and the general public because of their persistence. To date, not all the species are regulated by limit values. However, as measuring technologies are becoming ever more sensitive, trace species can be detected down to minute concentrations, provided that the relevant substances and substance groups are known. While many years of experience are available with the control of the air pollutant emissions covered by VDI 3927 Part 1, ever new findings are reported and new research results published for the control of trace species emissions. The processes developed for this purpose are being continuously refined and optimised for efficiency. There is an interaction between the removal of inorganic and organic trace species and the pollutants covered by VDI 3927 Part 1. Current development efforts focus on a multi-pollutant removal strategy. For this reason, a differentiated approach taking into consideration the fundamental chemical and physical mechanisms involved is much more important for trace species removal than for the control of the air pollutants covered by VDI 3927 Part 1, which are usually also present in much higher concentrations. Moreover, the knowledge of the underlying chemical and physical mechanisms will provide a sounder and more objective basis for the relevance discussion.

This standard only addresses those trace species fractions that are not trapped in the bottom or boiler ash. The trace species present in these combustion residues are normally firmly bound in a solid matrix and are not released back to the flue gas. An assessment of the elution potential of these solid residues is critical to the selection of their disposal route. By contrast, the emission pathway via the waste water of the absorption processes will be addressed, as new findings on the relevance of individual trace species and their fate require an extended analysis.

## 1 Scope

Standard VDI 3927 Part 2 covers flue gas cleaning processes for the removal of inorganic and organic trace species.

The process technologies presented apply primarily to combustion flue gases from utility boilers or waste incinerators as per the 13<sup>th</sup> or 17<sup>th</sup> BImSchV (German Federal Immission Control Ordinance), i.e. energy conversion or waste-to-energy plants using thermal processes that are operated with an oxygen excess.

Auf Prozessanlagen können diese Ausführungen nur bedingt übertragen werden. Dabei spielen prozessinterne Kreisläufe eine spezifische Rolle, die in den einschlägigen VDI-Richtlinien (z.B. VDI 3460, VDI 3462 Blatt 4, VDI 3462 Blatt 5, VDI 2094, VDI 2578) ausführlich beschrieben sind. Gleichwohl sind einzelne Technologien, die in dieser VDI 3927 Blatt 2 vorgestellt werden, auch für Nachreinigungsschritte hinter Prozessanlagen anwendbar, soweit sie aufgrund besonderer standortbedingter behördlicher Auflagen erforderlich werden. Dies trifft insbesondere dann zu, wenn gemäß 17. BImSchV eine Mitverbrennung in Prozessanlagen vorgenommen wird.

Nach einer ausführlichen Darstellung der physikalischen und chemischen Grundlagen der relevanten Stoffgruppen bzw. ausgewählter Einzelstoffe aus diesen Gruppen werden dem Stand der Technik entsprechende verfahrenstechnische Möglichkeiten zur Minderung dieser Stoffe in Abgasen beschrieben und anhand von Beispielen erläutert.

Diese Beispiele dienen der Veranschaulichung der theoretischen Ausführungen sowie einem besseren Verständnis der fachspezifischen Zusammenhänge und stellen bezüglich der ausgewählten Anlagenarten weder eine Wertung noch eine präjudizierende Aussage zu notwendigen Emissionsminderungsmaßnahmen dar. Die dargestellten Messwerte und Betriebsergebnisse gelten nur für den jeweiligen Anwendungsfall und dürfen nur als Beispiele angesehen werden. Eine unmittelbare Übertragbarkeit auf Anlagen mit anderen Randbedingungen oder auf andere Anlagenarten ist deshalb nicht ohne Weiteres zulässig. Daher erfolgt auch keine vergleichende technische und ökonomische Bewertung.

In dieser Richtlinie werden die Emissionen aus Verbrennungsmotoren und Vergasungsverfahren nicht behandelt.

Die Richtlinie VDI 3927 Blatt 1 behandelt Verfahren der Abgasreinigung zur Minderung folgender gas- und aerosolförmiger luftfremder Stoffe: Schwefeloxide, Stickstoffoxide und Halogenide aus Abgasen von Feuerungs- und Verbrennungsprozessen.

The technologies presented in this standard have limited applicability to process plants, since here intraprocess material loops as described in detail in the relevant VDI Standards (e.g. VDI 3460, VDI 3462 Part 4, VDI 3462 Part 5, VDI 2094, VDI 2578) play a key role. Nevertheless, some of the technologies presented in this standard VDI 3927 Part 2 can also be used as add-on air pollution control measures downstream of process plants if required due to special location-specific regulatory requirements. This applies in particular to the co-incineration of waste streams in process plants as regulated by the 17<sup>th</sup> BImSchV.

Following a detailed discussion of the physical and chemical mechanisms of these substance groups or selected individual species, state-of-the-art process options for their removal from combustion flue gases will be presented and described by practical examples.

The selected examples are intended to elucidate the theoretical descriptions and to facilitate the understanding of the specific interactions. They should not be understood as a weighting or as a prejudicial statement on necessary emission control measures. The measured data and operating results indicated relate exclusively to the specific application and should be viewed as examples only. Their direct application to systems operating under other conditions or to other plant types is therefore subject to limitations and not valid. This is also the reason why a comparative technical and economic evaluation of the individual control technologies has been dispensed with.

Not included in the scope of this standard are emissions from combustion engines and gasification processes.

Standard VDI 3927 Part 1 describes flue gas cleaning processes for the removal of the following gaseous air pollutants and aerosols: sulphur oxides, nitrogen oxides and halogenides from flue gases generated by fossil-fired utility boilers and waste incinerators