

Umweltforschungsplan
des Bundesministers für Umwelt,
Naturschutz und Reaktorsicherheit

Forschungsprojekt 298 94 313/07

**Exemplarische Untersuchung der praktischen Umsetzung des
integrierten Umweltschutzes in der Keramischen Industrie
unter Beachtung der IVU-Richtlinie und der Erstellung von
BVT-Merkblättern**

o. Prof. Dr. Otto Rentz
Dipl.-Ing. Alexander Schmittinger
Dipl.-Wirtschaftsing. Rainer Jochum
Dr. Frank Schultmann

Deutsch-Französisches Institut für Umweltforschung
Universität Karlsruhe (TH)
Hertzstraße 16
76187 Karlsruhe

Institutsleiter
o. Prof. Dr. Otto Rentz

IM AUFTRAG
DES UMWELTBUNDESAMTS

August 2001

Die diesem Bericht zugrundeliegenden Arbeiten wurden durch das Umweltbundesamt aus Mitteln des Bundesministers für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt liegt allein bei den Autoren.

Vorwort

Am 24. September 1996 wurde vom Rat der Europäischen Union die „*Richtlinie über die integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung*“ (IVU-RL, 96/61/EG) erlassen [9]. Zweck der Richtlinie ist die integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung, die von industriellen Anlagen mit einem großen Potential an Emissionen in die Umweltmedien Luft, Wasser und Boden ausgehen. Vorrangiges Ziel der Richtlinie ist es somit, ein hohes Schutzniveau für die Umwelt insgesamt zu erreichen. Das wesentliche Instrument zur Erreichung dieser Zielsetzung ist die Einführung eines integrierten Genehmigungsverfahrens für den Betrieb bestimmter industrieller Produktionsanlagen mit Öffentlichkeitsbeteiligung in allen Mitgliedsstaaten der EU. Die IVU-RL weicht dabei auch vom sektoralen, auf einzelne Rechtsgüter bezogenen deutschen Recht ab.

Als zentrales Element zur materiellen Umsetzung wird in Art. 16 Abs. 2 der IVU-RL, ein Informationsaustausch auf europäischer Ebene über die „*Besten Verfügbaren Techniken (BVT)*“ (englisch: Best Available Techniques (BAT)) für alle in Anhang I der IVU-RL aufgeführten Industrieanlagen gefordert. Der Gültigkeitsbereich der IVU-RL umfasst in Anhang I zahlreiche Kategorien industrieller Tätigkeiten, darunter in Abs. 3.5 auch „*Anlagen zur Herstellung von keramischen Erzeugnissen durch Brennen und zwar insbesondere von Dachziegeln, Ziegelsteinen, feuerfesten Steinen, Fliesen, Steinzeug oder Porzellan mit einer Produktionskapazität von über 75 t pro Tag und/oder einer Ofenkapazität von über 4 m³ und einer Besatzdichte von über 300 kg/m³*“. Das Konzept der BVT ist in der europäischen Umweltschutzpolitik und im Gemeinschaftsrecht eine Neuerung und auch mit Begriffen des deutschen Umweltrechts wie etwa dem Stand der Technik nicht direkt vergleichbar. Entsprechend Art. 2(11) bezeichnen „*beste verfügbare Techniken den effizientesten und fortschrittlichsten Entwicklungsstand und entsprechende Betriebsmethoden, der spezielle Techniken als praktisch geeignet erscheinen lässt, grundsätzlich als Grundlage für die Emissionsgrenzwerte zu dienen, um Emissionen in und Auswirkungen auf die gesamte Umwelt allgemein zu vermeiden oder, wenn dies nicht möglich ist, zu vermindern.*“

Der vorliegende Bericht dokumentiert Inhalte und Ergebnisse, die im Rahmen des Projektes „*Exemplarische Untersuchung der Umsetzung des integrierten Umweltschutzes in der Keramischen Industrie unter Beachtung der IVU-Richtlinie und der Erstellung von BVT-Merkblättern*“ im Auftrag des Umweltbundesamtes erstellt wurden. Ziel des Projektes war die Erstellung eines nationalen Positionspapiers als deutscher Beitrag zur sektorspezifischen Bestimmung der besten verfügbaren Techniken in der Keramischen Industrie.

Das Positionspapier orientiert sich im Aufbau bereits an den späteren BVT-Merkblättern. Kapitel 1 enthält allgemeine Informationen über die Struktur der Keramischen Industrie in

Deutschland, die wirtschaftliche Leistungsfähigkeit der Produktionszweige sowie allgemeine Umweltaspekte. Im zweiten Kapitel werden die unterschiedlichen Prozessvarianten, die in den einzelnen Produktionsbereichen eingesetzt sind, dokumentiert und analysiert. Dabei werden die wichtigsten umweltrelevanten Ein- und Ausgangsströme identifiziert. In Kapitel 3 erfolgt eine Darstellung der wichtigsten Massen- und Energieströme in Form von Fließbildern. Kapitel 4 beschreibt verfügbare Techniken zur Vermeidung und Verminderung der Umweltbelastungen einschließlich der mit diesen Techniken erreichbaren Emissions- und Verbrauchswerte. Hierbei wird zwischen Primär- und Sekundärmaßnahmen unterschieden, die in Form von Fallstudien konkretisiert werden. Das vierte Kapitel enthält außerdem eine Liste verfügbarer Techniken zur Vermeidung und Verminderung von Umweltverschmutzungen in der Keramischen Industrie. In Kapitel 5 werden die deutschen BVT-Kandidaten in Verbindung mit den medien- und schadstoffbezogen erreichbaren Emissionswerten noch einmal kurz zusammengefasst. Abschließend wird im Anhang des Positionspapiers ein Überblick über die rechtlichen Rahmenbedingungen auf nationaler und internationaler Ebene gegeben, denen die Produktion keramischer Erzeugnisse unterliegt.

Ausdrücklich danken wir dem Umweltbundesamt für die finanzielle Förderung der Projektarbeiten und hierbei insbesondere Herrn *Dr. Norbert Haug* und Frau *Maja Bernicke*, *Umweltbundesamt Berlin* für die gute Zusammenarbeit und die Unterstützung der Forschungsarbeiten. Das Positionspapier wurde von den Mitgliedern des projektbegleitenden Arbeitskreises „BVT in der Keramischen Industrie“ unterstützt, denen der besondere Dank für die Unterstützung der Arbeiten und die konstruktive Kritik gilt. Teilnehmer des Arbeitskreises waren:

Frau Bernicke, *Umweltbundesamt*

Herr Dr. Haug, *Umweltbundesamt*

Herr Hoenen, *Verband der Keramischen Industrie e.V.*

Herr Dr. Koenemann, *Landesamt für Wasserwirtschaft Rheinland-Pfalz*

Herr Mair, *Regierung von Oberbayern*

Herr Dr. Müller, *Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie e.V.*

Herr Müller, *Verband der Deutschen Feuerfest-Industrie e.V.*

Herr Dr. Münchmeyer, *Südkeramik GmbH*

Herr Dr. Probst, *Obmann des Ausschusses VDI 2585*

Frau Stöttner, (*ehemals*) *Bayerisches Landesamt für Umweltschutz*

Nicht zuletzt danken wir den Mitarbeitern des DFIU, insbesondere B. Engels, M. Fröhling und M. Zumkeller für ihre Unterstützung bei den Projektarbeiten und der Fertigstellung des vorliegenden Endberichtes.

Berichts - Kennblatt

| | | |
|--|-----|--|
| Berichtsnummer 1. UBA-FB | 2. | 3. |
| 4. Titel des Berichts Exemplarische Untersuchung der praktischen Umsetzung des integrierten Umweltschutzes in der Keramischen Industrie unter Beachtung der IVU-Richtlinie und der Erstellung von BVT-Merkblättern | | |
| 5. Autor(en), Name(n), Vorname(n) Rentz, Otto; Schmittinger, Alex; Jochum, Rainer; Schultmann, Frank | | 8. Abschlussdatum Juli 2001 |
| 6. Durchführende Institution (Name, Anschrift) Deutsch-Französisches Institut für Umweltforschung (DFIU) Universität Karlsruhe (TH) Hertzstraße 16 76187 Karlsruhe | | 9. Veröffentlichungsdatum August 2001 |
| | | 10. UFOPLAN-Nr. 298 94 313/07 |
| | | 11. Seitenzahl 214 |
| 7. Fördernde Institution (Name, Anschrift) Umweltbundesamt Bismarckplatz 1, 14193 Berlin | | 12. Literaturangaben 125 |
| | | 13. Tabellen und Diagramme 88 |
| 15. Zusätzliche Angaben | | 14. Abbildungen 65 |
| 16. Kurzfassung <p>Im Projekt wurde der Stand der Umsetzung des integrierten Umweltschutzes in der Keramischen Industrie in Deutschland untersucht. Es wurden dabei insbesondere die Produktionsbereiche der Herstellung von Geschirrkераmik, Sanitärkeramik und keramischen Fliesen und Platten sowie der Produktion von Ziegeln, feuerfesten Erzeugnissen und von Steinzeug für die Kanalisation betrachtet. Das Forschungsprojekt beinhaltet das Ziel, ein nationales Positionspapier zu besten verfügbaren Techniken (BVT) in der Keramischen Industrie in Deutschland zu erstellen, um den im Rahmen der IVU-RL geforderten europäischen Informationsaustausch zur sektorspezifischen Bestimmung von BVT zu unterstützen. Der hier vorliegende Abschlussbericht stellt die durchgeführten Arbeitsschritte und zentralen Ergebnisse zusammenfassend vor. Das Positionspapier orientiert sich im Aufbau bereits an den späteren BVT-Merkblättern und beinhaltet allgemeine Informationen über die Struktur der Keramischen Industrie in Deutschland, die wirtschaftliche Leistungsfähigkeit der Produktionszweige sowie allgemeine Umweltaspekte. Es werden die unterschiedlichen Prozessvarianten, die in den einzelnen Produktionsbereichen eingesetzt sind, dokumentiert und analysiert. Dabei werden die wichtigsten umweltrelevanten Ein- und Ausgangsströme identifiziert. Wichtigste Massen- und Energieströme werden in Form von Fließbildern dargestellt. Verfügbare Techniken zur Vermeidung und Verminderung der Umweltbelastungen einschließlich der mit diesen Techniken erreichbaren Emissions- und Verbrauchswerte werden beschrieben, anhand von Fallstudien konkretisiert und in einer Liste zusammengefasst.</p> | | |
| 17. Schlagwörter Integrierter Umweltschutz, Beste Verfügbare Techniken (BVT), Keramikindustrie, Bewertung, IVU | | |
| 18. Preis | 19. | 20. |

| | | |
|--|-----|--------------------------------------|
| Report No. 1. UBA-FB | 2. | 3. |
| 4. Report Title Exemplary Investigation into the State of Practical Realisation of Integrated Environmental Protection within the Ceramics Industry under Observance of the IPPC-Directive and the Development of BAT Reference Documents | | |
| 5. Author(s), Family Name(s), First Name(s) Rentz, Otto; Schmittinger, Alex; Jochum, Rainer; Schulmann, Frank | | 8. Report Date July 2001 |
| 6. Performing Organisation (Name, Address) French-German Institute for Environmental Research University of Karlsruhe (TH) Hertzstraße 16 D-76187 Karlsruhe | | 9. Publication Date August 2001 |
| | | 10. UFOPLAN-Ref.No. 298 94 313/07 |
| | | 11. No. of Pages 214 |
| 7. Sponsoring Agency (Name, Address) Umweltbundesamt Bismarckplatz 1, D-14193 Berlin, Germany | | 12. No. of References 125 |
| | | 13. No. of Tables, Diagrams 88 |
| 15. Supplementary Notes | | 14. No. of Figures 65 |
| 16. Abstract Within this project the state of the implementation of integrated environmental protection in the German ceramics industry has been investigated. The sectors of the production of household ceramics, sanitary ceramics and ceramic tiles as well as the manufacture of bricks and roofing tiles, refractory products and vitrified clay pipes have been analysed particularly. The research project has the main goal to prepare a national so-called <i>position paper</i> about best available techniques (BAT) in the German ceramics industry to support the European information exchange on the sector-specific determination of BAT demanded by the IPPC-Directive. This report gives an overview of the steps carried out and the important results within the project. The structure of this position paper is adapted to the structure of the sector-specific European best available technique reference documents (BREFs), which will be referred to later on. It provides general information about the structure of the German ceramics industry, the economic standing of the production sectors as well as general environmental aspects. Different processes and techniques, operated in the single sectors, are presented and analysed. Thereby important mass and energy flows concerning the environment are identified as well as present consumption and emission levels are presented partly by the usage of flow diagrams. Available techniques for the reduction and prevention of environmental pollution including the achievable consumption and emissions levels are presented, substantiated in case studies and summarized in a list. | | |
| 17. Keywords Integrated pollution prevention and control (IPPC), Best available techniques (BAT), Ceramics Industry, Assessment | | |
| 18. Price | 19. | 20. |

Inhalt

| | |
|--|----------|
| 1 ALLGEMEINE INFORMATIONEN ZUR KERAMISCHEN INDUSTRIE..... | 1 |
| 1.1 Gliederung der Branche..... | 3 |
| 1.2 Wirtschaftliche Bedeutung der Produktionszweige..... | 4 |
| 1.3 Allgemeine Umweltaspekte..... | 7 |
| 2 ANGEWANDTE TECHNISCHE PROZESSE UND VERFAHREN ZUR HERSTELLUNG KERAMISCHER ERZEUGNISSE | 9 |
| 2.1 Darstellung grundlegender technischer Prozesse und Anlagen zur Herstellung keramischer Erzeugnisse.... | 9 |
| 2.1.1 Rohstoffgewinnung, Rohstofftransport und Rohstofflagerung | 9 |
| 2.1.2 Masseaufbereitung..... | 10 |
| 2.1.3 Formgebung..... | 11 |
| 2.1.4 Trocknungsanlagen..... | 12 |
| 2.1.5 Oberflächenveredelung..... | 13 |
| 2.1.6 Brennanlagen..... | 13 |
| 2.1.6.1 Kontinuierlich betriebene Öfen..... | 14 |
| 2.1.6.2 Periodisch betriebene Öfen..... | 16 |
| 2.1.7 Nachbehandlung..... | 17 |
| 2.1.8 Nebeneinrichtungen..... | 18 |
| 2.2 Darstellung von Verfahren zur Herstellung feinkeramischer Erzeugnisse..... | 20 |
| 2.2.1 Herstellung von Geschirrkераmik..... | 21 |
| 2.2.1.1 Rohstofflagerung | 23 |
| 2.2.1.2 Masseaufbereitung..... | 23 |
| 2.2.1.3 Formgebung..... | 25 |
| 2.2.1.4 Trocknung..... | 27 |
| 2.2.1.5 Brennvorgang, Glasieren und Dekorieren..... | 27 |
| 2.2.1.6 Nachbehandlung | 30 |
| 2.2.2 Herstellung von Sanitärkeramik | 33 |
| 2.2.2.1 Rohstofflagerung | 33 |
| 2.2.2.2 Masseaufbereitung..... | 33 |
| 2.2.2.3 Formgebung..... | 35 |
| 2.2.2.4 Trocknung und Glasieren..... | 36 |
| 2.2.2.5 Brennvorgang | 37 |
| 2.2.2.6 Nachbehandlung | 38 |
| 2.2.3 Herstellung keramischer Fliesen und Platten..... | 40 |
| 2.2.3.1 Rohstofflagerung | 40 |
| 2.2.3.2 Masseaufbereitung..... | 42 |
| 2.2.3.3 Formgebung..... | 43 |
| 2.2.3.4 Trocknung..... | 43 |
| 2.2.3.5 Brennvorgang und Glasieren | 43 |
| 2.2.3.6 Nachbehandlung | 44 |
| 2.3 Darstellung von Verfahren zur Herstellung grobkeramischer Erzeugnisse | 46 |
| 2.3.1 Herstellung von Ziegelerzeugnissen | 47 |
| 2.3.1.1 Rohstofflagerung | 47 |
| 2.3.1.2 Masseaufbereitung..... | 49 |
| 2.3.1.3 Formgebung..... | 51 |
| 2.3.1.4 Trocknung, Glasieren und Engobieren | 52 |
| 2.3.1.5 Brennvorgang | 52 |

| | |
|--|-----------|
| 2.3.1.6 Nachbehandlung | 54 |
| 2.3.2 Herstellung von Steinzeug für die Kanalisation..... | 56 |
| 2.3.2.1 Rohstofflagerung | 56 |
| 2.3.2.2 Masseaufbereitung | 58 |
| 2.3.2.3 Formgebung | 58 |
| 2.3.2.4 Trocknung und Glasieren..... | 59 |
| 2.3.2.5 Brennvorgang | 59 |
| 2.3.2.6 Nachbehandlung | 60 |
| 2.3.3 Herstellung feuerfester Erzeugnisse | 62 |
| 2.3.3.1 Rohstofflagerung | 63 |
| 2.3.3.2 Masseaufbereitung | 63 |
| 2.3.3.3 Formgebung | 65 |
| 2.3.3.4 Trocknung..... | 66 |
| 2.3.3.5 Brennvorgang | 67 |
| 2.3.3.6 Nachbehandlung | 68 |
| 2.3.3.7 Sonderverfahren..... | 68 |
| 3 VERBRAUCHS- UND EMISSIONSWERTE BEI DER HERSTELLUNG KERAMISCHER | |
| ERZEUGNISSE..... | 70 |
| 3.1 Verbrauchs- und Emissionswerte bei der Herstellung feinkeramischer Erzeugnisse | 70 |
| 3.1.1 Verbrauchs- und Emissionswerte bei der Herstellung von Geschirrkераmik..... | 70 |
| 3.1.1.1 Rohstofflagerung und Rohstofftransport..... | 70 |
| 3.1.1.2 Masseaufbereitung | 71 |
| 3.1.1.3 Formgebung | 72 |
| 3.1.1.4 Trocknung..... | 72 |
| 3.1.1.5 Brennvorgang, Glasieren und Dekorieren..... | 72 |
| 3.1.1.6 Nachbehandlung | 74 |
| 3.1.1.7 Abwasser..... | 74 |
| 3.1.1.8 Abfälle | 75 |
| 3.1.2 Verbrauchs- und Emissionswerte bei der Herstellung von Sanitärkeramik | 77 |
| 3.1.2.1 Rohstofflagerung und Rohstofftransport..... | 78 |
| 3.1.2.2 Masseaufbereitung | 78 |
| 3.1.2.3 Formgebung | 78 |
| 3.1.2.4 Trocknung und Glasieren..... | 78 |
| 3.1.2.5 Brennvorgang | 78 |
| 3.1.2.6 Nachbehandlung | 79 |
| 3.1.2.7 Abwasser..... | 79 |
| 3.1.2.8 Abfälle | 80 |
| 3.1.3 Verbrauchs- und Emissionswerte bei der Herstellung von keramischen Fliesen und Platten | 81 |
| 3.1.3.1 Rohstofflagerung und Rohstofftransport..... | 81 |
| 3.1.3.2 Masseaufbereitung | 81 |
| 3.1.3.3 Formgebung | 82 |
| 3.1.3.4 Trocknung..... | 82 |
| 3.1.3.5 Brennvorgang und Glasieren | 83 |
| 3.1.3.6 Nachbehandlung | 84 |
| 3.1.3.7 Abwasser..... | 84 |
| 3.1.3.8 Abfälle | 85 |

| | |
|---|----|
| 3.2 Verbrauchs- und Emissionswerte bei der Herstellung grobkeramischer Erzeugnisse | 86 |
| 3.2.1 Verbrauchs- und Emissionswerte bei der Herstellung von Ziegelerzeugnissen | 86 |
| 3.2.1.1 Rohstofflagerung und Rohstofftransport | 86 |
| 3.2.1.2 Masseaufbereitung | 86 |
| 3.2.1.3 Formgebung | 87 |
| 3.2.1.4 Trocknung und Glasieren | 87 |
| 3.2.1.5 Brennvorgang | 87 |
| 3.2.1.6 Nachbehandlung | 89 |
| 3.2.1.7 Abwasser | 90 |
| 3.2.1.8 Abfälle | 90 |
| 3.2.2 Verbrauchs- und Emissionswerte bei der Herstellung von Steinzeug für die Kanalisation | 91 |
| 3.2.2.1 Rohstofflagerung und Rohstofftransport | 92 |
| 3.2.2.2 Masseaufbereitung | 92 |
| 3.2.2.3 Formgebung | 92 |
| 3.2.2.4 Trocknung und Glasieren | 93 |
| 3.2.2.5 Brennvorgang | 93 |
| 3.2.2.6 Nachbehandlung | 95 |
| 3.2.2.7 Abwasser | 95 |
| 3.2.2.8 Abfälle | 95 |
| 3.2.3 Verbrauchs- und Emissionswerte bei der Herstellung feuerfester Erzeugnisse | 96 |
| 3.2.3.1 Rohstofflagerung und Rohstofftransport | 97 |
| 3.2.3.2 Masseaufbereitung | 97 |
| 3.2.3.3 Formgebung | 97 |
| 3.2.3.4 Trocknung | 97 |
| 3.2.3.5 Brennvorgang | 97 |
| 3.2.3.6 Nachbehandlung | 98 |
| 3.2.3.7 Sonderverfahren | 98 |
| 3.2.3.8 Abwasser | 98 |
| 3.2.3.9 Abfälle | 99 |

4 VERFÜGBARE TECHNIKEN ZUR VERMEIDUNG UND VERMINDERUNG VON UMWELTVERSCHMUTZUNG 100

| | |
|---|-----|
| 4.1 Überblick über gemeinsame verfügbare Techniken zur Vermeidung und Verminderung von Umweltverschmutzung in der Keramischen Industrie | 100 |
| 4.1.1 Techniken zur Minderung der Emissionen in die Luft | 100 |
| 4.1.1.1 Techniken zur Minderung partikelförmiger Emissionen | 100 |
| 4.1.1.2 Techniken zur Minderung gasförmiger anorganischer Emissionen | 103 |
| 4.1.1.3 Techniken zur Minderung gasförmiger organischer Emissionen | 116 |
| 4.1.1.4 Techniken zur Minderung von Lärmemissionen | 128 |
| 4.1.2 Techniken zur Minderung der Emissionen in das Medium Wasser | 129 |
| 4.1.2.1 Primärmaßnahmen | 130 |
| 4.1.2.2 Sekundärmaßnahmen | 130 |
| 4.1.3 Techniken zur Minderung der Emissionen in das Medium Boden | 139 |
| 4.1.3.1 Vermeidung und Verminderung von Abfällen | 139 |
| 4.1.3.2 Verwertung von Abfällen | 140 |
| 4.1.4 Techniken zur Reduzierung des Rohstoffverbrauches | 145 |
| 4.1.5 Techniken zur Reduzierung des Energieverbrauches | 147 |
| 4.1.5.1 Reduzierung des Energieverbrauches bei Masseaufbereitung und Formgebung | 148 |
| 4.1.5.2 Reduzierung des Energieverbrauches bei der Trocknung | 149 |
| 4.1.5.3 Reduzierung des Energieverbrauches beim Brennen | 156 |

| | |
|--|------------|
| 4.1.6 Übersicht über verfügbare Techniken zur Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung in der Keramischen Industrie | 160 |
| 4.2 Fallstudien ausgewählter Maßnahmen zur Vermeidung und Verminderung von Umweltverschmutzung | 165 |
| 4.2.1 Herstellung von Planziegeln bei den JUWÖ POROTON-Werken Ernst Jungk & Sohn GmbH in Wöllstein | 165 |
| 4.2.1.1 Masseaufbereitung | 166 |
| 4.2.1.2 Formgebung | 166 |
| 4.2.1.3 Trocknung | 167 |
| 4.2.1.4 Brennen | 168 |
| 4.2.1.5 Verpackung | 172 |
| 4.2.2 Herstellung von Dachziegeln und Dachziegelzubehör bei der Erlus Baustoffwerke AG in Neufahrn | 173 |
| 4.2.2.1 Masseaufbereitung | 174 |
| 4.2.2.2 Formgebung | 176 |
| 4.2.2.3 Trocknung und Engobieren | 176 |
| 4.2.2.4 Brennen | 178 |
| 4.2.3 Herstellung von Schamottestein bei der Dr. C. Otto Feuerfest GmbH in Bochum | 183 |
| 5 BESTE VERFÜGBARE TECHNIKEN ZUR VERMEIDUNG UND VERMINDERUNG VON UMWELTVERSCHMUTZUNG | 184 |
| 5.1 Allgemeine Hinweise zur Prozessführung | 184 |
| 5.2 Beste verfügbare Techniken zur Verminderung partikelförmiger Emissionen | 185 |
| 5.3 Beste verfügbare Techniken zur Verminderung gasförmiger anorganischer Emissionen | 185 |
| 5.4 Beste verfügbare Techniken zur Verminderung gasförmiger organischer Emissionen | 186 |
| 5.5 Beste verfügbare Techniken zur Verminderung der Lärmemissionen | 187 |
| 5.6 Beste verfügbare Techniken zur Verminderung der Emissionen in das Wasser | 187 |
| 6 ANHANG | 188 |
| 6.1 Informationen über rechtliche Rahmenbedingungen bei der Herstellung keramischer Erzeugnisse | 188 |
| 6.1.1 Bundeseinheitliche Gesetze | 188 |
| 6.1.2 Rechtliche Rahmenbedingungen zur Erhaltung der Luftqualität in Deutschland | 190 |
| 6.1.2.1 Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) | 190 |
| 6.1.2.2 Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft) | 191 |
| 6.1.2.3 Vierte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (4.BImSchV) | 191 |
| 6.1.2.4 Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm (TA Lärm) | 191 |
| 6.1.3 Rechtliche Rahmenbedingungen zur Erhaltung der Wasserqualität in Deutschland | 191 |
| 6.1.4 Rechtliche Rahmenbedingungen zur Vermeidung, Verwertung und Beseitigung von Abfällen in Deutschland | 193 |
| 6.1.5 Internationale Regelungen | 194 |
| 7 LITERATUR | 196 |

Abbildungen

| | |
|---|-----|
| Abbildung 1-1: Gliederung keramischer Werkstoffe nach Rohstoffen und Eigenschaften..... | 1 |
| Abbildung 1-2: Schematischer Verfahrensablauf und Systemabgrenzung | 2 |
| Abbildung 1-3: Umsatzanteile einzelner Produktionszweige im Jahr 1999 in Prozent | 5 |
| Abbildung 2-1: Bandbreiten industrieller Sintertemperaturen..... | 13 |
| Abbildung 2-2: Grundriss eines Tunnelofens | 15 |
| Abbildung 2-3: Querschnitt eines Tunnelofens | 15 |
| Abbildung 2-4: Querschnitt eines Rollenofens | 16 |
| Abbildung 2-5: Querschnitt eines Herdwagenofens | 17 |
| Abbildung 2-6: Allgemeines Verfahrensfließbild zur Herstellung keramischer Produkte..... | 19 |
| Abbildung 2-7: Übersicht über die silikatkeramischen Werkstoffe | 20 |
| Abbildung 2-8: Schematische Darstellung der Herstellung von Geschirrporzellan..... | 22 |
| Abbildung 2-9: Aufbau einer Sprühtrocknungsanlage..... | 24 |
| Abbildung 2-10: Input- und Outputströme des Gesamtprozesses bei der Herstellung von Geschirrkernik | 32 |
| Abbildung 2-11: Schematische Darstellung der Sanitärkeramikherstellung | 34 |
| Abbildung 2-12: Input- und Outputströme des Gesamtprozesses bei der Herstellung von Sanitärkeramik..... | 39 |
| Abbildung 2-13: Schematische Darstellung der Wandfliesenherstellung | 41 |
| Abbildung 2-14: Input- und Outputströme des Gesamtprozesses bei der Herstellung von keramischen Fliesen und Platten..... | 45 |
| Abbildung 2-15: Schematische Darstellung der Pressdachziegelherstellung..... | 48 |
| Abbildung 2-16: Input- und Outputströme des Gesamtprozesses bei der Herstellung von Ziegelerzeugnissen | 55 |
| Abbildung 2-17: Schematische Darstellung der Herstellung von Steinzeug für die Kanalisation | 57 |
| Abbildung 2-18: Input- und Outputströme des Gesamtprozesses bei der Herstellung von Steinzeug für die Kanalisation..... | 61 |
| Abbildung 2-19: Schematische Darstellung der Fertigung basischer Feuerfesterzeugnisse | 64 |
| Abbildung 2-20: Input- und Outputströme des Gesamtprozesses bei der Herstellung feuerfester Erzeugnisse..... | 69 |
| Abbildung 3-1: Massenfluss bei der Herstellung von Geschirrkernik (Drehware) | 71 |
| Abbildung 3-2: Massenfluss bei der Sanitärkeramikfertigung aus Vitreous China | 77 |
| Abbildung 3-3: Massenfluss bei der Herstellung von Steinzeugrohren..... | 91 |
| Abbildung 3-4: Massenfluss bei der Herstellung basischer Feuerfesterzeugnisse | 96 |
| Abbildung 4-1: Schematische Darstellung eines Schlauchfilters..... | 101 |
| Abbildung 4-2: Schematische Darstellung eines Sinterlamellenfilters | 102 |
| Abbildung 4-3: Temperaturbereiche der Freisetzung von Schadstoffen beim Ziegelbrennen im Tunnelofen..... | 104 |
| Abbildung 4-4: Wichtige chemische Vorgänge bei der Trockensorption..... | 106 |
| Abbildung 4-5: Schematische Darstellung eines Schütttschicht-Kaskaden-Absorbers..... | 107 |
| Abbildung 4-6: Schematische Darstellung der Trockensorption auf Basis wabenförmiger Module | 109 |
| Abbildung 4-7: Schematische Darstellung des Schwelgasbeseitigungsverfahrens | 117 |
| Abbildung 4-8: Schematische Darstellung des Systems PIROS | 118 |
| Abbildung 4-9: Schematische Darstellung eines Gegenlaufofens..... | 119 |
| Abbildung 4-10: Querschnitt durch einen Gegenlaufofen | 120 |
| Abbildung 4-11: Schematische Darstellung der Abluftführung einer externen thermischen Nachverbrennung.. | 121 |
| Abbildung 4-12: Schematische Darstellung der Funktionsweise eines Thermoreaktors | 122 |
| Abbildung 4-13: Draufsicht und Längsschnitt eines Längsklärbeckens..... | 132 |
| Abbildung 4-14: Schematische Darstellung eines runden Absetzbeckens..... | 132 |
| Abbildung 4-15: Schematische Darstellung eines Schrägklärers..... | 133 |
| Abbildung 4-16: Schematische Darstellung einer Wasseraufbereitungsanlage in einer Porzellanfabrik..... | 134 |
| Abbildung 4-17: Schematische Darstellung eines Hochleistungskläreindickers mit Schlammentwässerung | 135 |
| Abbildung 4-18: Schematische Darstellung des Funktionsprinzips eines Entwässerungscontainers | 136 |

| | |
|--|-----|
| Abbildung 4-19: Fließschema der Abwasserreinigungsanlage einer Porzellanfabrik..... | 137 |
| Abbildung 4-20: Schematische Darstellung eines Sinterlamellenfilters | 141 |
| Abbildung 4-21: Verfahrensfließbild eines Kaskaden-Absorbers mit Schältrömmel | 143 |
| Abbildung 4-22: Schematische Darstellung der Klärschlammwiederverwendungsanlage einer Fliesenfabrik.... | 144 |
| Abbildung 4-23: Fließbild einer Styroporaufbereitungsanlage..... | 146 |
| Abbildung 4-24: Einfluss der Lüfterlaufzeit auf die Trocknung..... | 151 |
| Abbildung 4-25: Schematische Darstellung der BHKW-Abwärmenutzung..... | 154 |
| Abbildung 4-26: Trend der Temperaturverläufe beim herkömmlichen Verfahren und beim Direktsetzverfahren..... | 155 |
| Abbildung 4-27: Energieaufnahme der Tunnelofenwagen | 157 |
| Abbildung 4-28: Schematische Darstellung eines Hochgeschwindigkeits-Brenners | 159 |
| Abbildung 4-29: Funktionsprinzip eines selbstrekuperativen Brenners | 159 |
| Abbildung 4-30: Schematische Darstellung der Planziegelherstellung | 165 |
| Abbildung 4-31: Schematische Darstellung des Kassetttrockners | 167 |
| Abbildung 4-32: Schematische Darstellung des Strömungsmusters im Scheibenbesatz..... | 169 |
| Abbildung 4-33: Brennkurve des Tunnelofens..... | 170 |
| Abbildung 4-34: Schematische Darstellung des Wärmeverbundsystems im Werk III | 172 |
| Abbildung 4-35: Netto-Produktionsmengen des Betriebsstandortes Neufahrn 1997 | 173 |
| Abbildung 4-36: Schematische Darstellung der Mahltrocknungsanlage | 175 |
| Abbildung 4-37: Schematische Darstellung des Ofens und Trockners der Linie 5 (B) | 180 |
| Abbildung 4-38: Elektrische Leistungsaufnahme verschiedener Verbraucher | 182 |

Tabellen

| | |
|---|----|
| Tabelle 1-1: Produktion von keramischen Erzeugnissen nach Produktionszweigen | 3 |
| Tabelle 1-2: Umsatz der Produktzweige der Keramischen Industrie | 4 |
| Tabelle 1-3: Anzahl der Beschäftigten in verschiedenen Zweigen der Keramischen Industrie | 5 |
| Tabelle 1-4: Anzahl der Betriebe in verschiedenen Zweigen der Keramischen Industrie | 6 |
| Tabelle 1-5: Weltmarktanteil keramischer Produkte aus Deutschland 1992 | 6 |
| Tabelle 1-6: Brennstoffanteil nach Produktionszweig in Prozent (1998) | 8 |
| Tabelle 2-1: Brennstoffe und deren Verbrennung in keramischen Öfen | 14 |
| Tabelle 2-2: Bandbreiten produktbezogener Anlagenkapazitäten in der Geschirrkemik | 21 |
| Tabelle 2-3: Technische Daten eines Düsenzerstäubungstrockners | 24 |
| Tabelle 2-4: Betriebsdaten einer Herdwagenofenanlage | 28 |
| Tabelle 2-5: Betriebsdaten von Tunnelofenanlagen | 28 |
| Tabelle 2-6: Ofentypen bei der Aufglasurdekoration | 29 |
| Tabelle 2-7: Ofentypen bei der Inglasur- und Unterglasurdekoration | 30 |
| Tabelle 2-8: Bandbreiten der Anlagenkapazitäten in der Sanitärkeramik | 33 |
| Tabelle 2-9: Betriebsdaten periodischer Trockner | 36 |
| Tabelle 2-10: Betriebsdaten von Tunnelofenanlagen | 37 |
| Tabelle 2-11: Betriebsdaten von Herdwagenofenanlagen | 37 |
| Tabelle 2-12: Bandbreiten der Anlagenkapazitäten bei der Herstellung keramischer Fliesen und Platten | 40 |
| Tabelle 2-13: Betriebsdaten von Tunnel- und Schnellbrandöfen | 44 |
| Tabelle 2-14: Bandbreiten der Anlagenkapazitäten von Ziegeleien | 47 |
| Tabelle 2-15: Mineralogische und chemische Zusammensetzung eingesetzter Tone | 49 |
| Tabelle 2-16: Betriebsdaten von Tunnelofenanlagen | 53 |
| Tabelle 2-17: Vergleich der Leistungsdaten verschiedener Ofentypen (Dachziegel) | 53 |
| Tabelle 2-18: Betriebsdaten von Schnellbrandöfen | 54 |
| Tabelle 2-19: Bandbreiten der Anlagenkapazitäten bei der Herstellung von Steinzeug für die Kanalisation | 56 |
| Tabelle 2-20: Mineralogische und chemische Zusammensetzung eingesetzter Tone | 56 |
| Tabelle 2-21: Betriebsdaten von Tunnelofenanlagen | 59 |
| Tabelle 2-22: Bandbreiten der Anlagenkapazitäten bei der Herstellung von feuerfesten Erzeugnissen | 62 |
| Tabelle 2-23: Betriebsdaten periodischer Trockner | 66 |
| Tabelle 2-24: Betriebsdaten kontinuierlich betriebener Trockner | 66 |
| Tabelle 2-25: Betriebsdaten von Tunnelofenanlagen | 67 |
| Tabelle 2-26: Betriebsdaten von periodisch betriebenen Ofenanlagen | 68 |
| Tabelle 3-1: Reingasemissionen von Sprühtrocknern | 72 |
| Tabelle 3-2: Rohgaswerte beim Brand von Porzellan durch Gasfeuerung | 73 |
| Tabelle 3-3: Keramische Pigmentsysteme für Dekorfarben | 74 |
| Tabelle 3-4: Schwermetallrohgaswerte beim Dekorbrand von Geschirrkemik | 74 |
| Tabelle 3-5: Roh- und Reingaswerte beim Brand von Sanitärkeramik | 79 |
| Tabelle 3-6: Leistungsvergleich verschiedener Ofentypen | 79 |
| Tabelle 3-7: Betriebsdaten und Rohgasemissionen beim Sprühtrocknen | 82 |
| Tabelle 3-8: Betriebsdaten und Rohgasemissionen beim Trocknen | 82 |
| Tabelle 3-9: Betriebsdaten und Rohgasemissionen beim Brennen | 83 |
| Tabelle 3-10: Heizenergieverbrauch verschiedener Ofensysteme | 84 |
| Tabelle 3-11: Chemische Zusammensetzung des unbehandelten Abwassers | 85 |
| Tabelle 3-12: Hauptbestandteile des anfallenden Schlammes | 85 |
| Tabelle 3-13: Durchschnittliche Zusammensetzung eines porosierten Hintermauerziegels | 86 |
| Tabelle 3-14: Anteile der Energieträger am End-Energie-Einsatz | 87 |

| | |
|---|-----|
| Tabelle 3-15: Betriebsdaten der Rohgaswerte bei unterschiedlichen Brennstoffen..... | 88 |
| Tabelle 3-16: Rohgaswerte bei unterschiedlichen Porosierungsstoffen..... | 88 |
| Tabelle 3-17: Durchschnittliche Reingaskonzentration (porosierte Hintermauerziegel) | 89 |
| Tabelle 3-18: Produktbezogene Emissionen (porosierte Hintermauerziegel)..... | 89 |
| Tabelle 3-19: Massen der Rohre und der Dichtungen | 92 |
| Tabelle 3-20: Spezifischer Energieverbrauch bei der Herstellung von Steinzeugrohren..... | 93 |
| Tabelle 3-21: Spezifische CO ₂ -Emission bei der Herstellung von Steinzeugrohren | 94 |
| Tabelle 3-22: Spezifische Emissionen verschiedene Steinzeugrohrgrößen | 94 |
| Tabelle 3-23: Maximale Reingaswerte beim Brand von Steinzeug für die Kanalisation..... | 94 |
| Tabelle 3-24: Rohgasemissionen beim Brand feuerfester Erzeugnisse im Tunnelofen | 98 |
| Tabelle 3-25: Rohgaswerte für Sonderverfahren | 98 |
| Tabelle 4-1: Abgasreinigungssysteme für gasförmige anorganische Schadstoffe verschiedener Anbieter (Teil 1)..... | 112 |
| Tabelle 4-2: Abgasreinigungssysteme für gasförmige anorganische Schadstoffe verschiedener Anbieter (Teil 2)..... | 113 |
| Tabelle 4-3: Abgasreinigungssysteme für gasförmige anorganische Schadstoffe verschiedener Anbieter (Teil 3)..... | 114 |
| Tabelle 4-4: Abgasreinigungssysteme für gasförmige anorganische Schadstoffe verschiedener Anbieter (Teil 4)..... | 115 |
| Tabelle 4-5: Systeme verschiedener Anbieter zur Schwelgasverminderung (Teil 1) | 124 |
| Tabelle 4-6: Systeme verschiedener Anbieter zur Schwelgasverminderung (Teil 2) | 125 |
| Tabelle 4-7: Systeme verschiedener Anbieter zur Schwelgasverminderung (Teil 3) | 126 |
| Tabelle 4-8: Systeme verschiedener Anbieter zur Schwelgasverminderung (Teil 4) | 127 |
| Tabelle 4-9: Abwasserdaten eines Geschirrkeraamikketriebes | 138 |
| Tabelle 4-10: Rückführungsraten verschiedener Bereiche der Keramischen Industrie | 138 |
| Tabelle 4-11: Maßnahmen zur effizienten Energieanwendung bei der Masseaufbereitung..... | 149 |
| Tabelle 4-12: Energiebedarf für Teilverfahren verschiedener Trocknungsverfahren..... | 152 |
| Tabelle 4-13: Verfügbare Techniken zur Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung in der Keramischen Industrie (Teil 1)..... | 161 |
| Tabelle 4-14: Verfügbare Techniken zur Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung in der Keramischen Industrie (Teil 2)..... | 162 |
| Tabelle 4-15: Verfügbare Techniken zur Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung in der Keramischen Industrie (Teil 3)..... | 163 |
| Tabelle 4-16: Verfügbare Techniken zur Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung in der Keramischen Industrie (Teil 4)..... | 164 |
| Tabelle 4-17: Betriebsdaten des Kassettentrockners | 168 |
| Tabelle 4-18: Betriebsdaten des Tunnelofens im Werk III..... | 170 |
| Tabelle 4-19: Emissionswerte des Brennaggregats..... | 171 |
| Tabelle 4-20: Betriebsdaten des Kammertrockners | 177 |
| Tabelle 4-21: Energiebilanz des Trockners | 178 |
| Tabelle 4-22: Betriebsdaten des Hydrocasing-Ofens..... | 179 |
| Tabelle 4-23: Emissionswerte des Tunnelofens..... | 181 |
| Tabelle 4-24: Energiebilanz des Ofens | 182 |
| Tabelle 4-25: Betriebsdaten des eingesetzten Fluor-Kaskaden-Absorbers..... | 183 |
| Tabelle 4-26: Emissionswerte der Schamottetunnelöfen | 183 |
| Tabelle 5-1: BVT-Emissionswerte bei Anwendung der in Abschnitt 4.1.1.3 beschriebenen Techniken..... | 186 |
| Tabelle 5-2: Rückführungsraten des Abwassers bei Anwendung der BVT | 187 |
| Tabelle 6-1: Rechtliche Rahmenbedingungen zum Schutz der Umwelt entlang des Produktionsprozesses | 189 |
| Tabelle 6-2: Zulässige Lärmpegel in Abhängigkeit des Immissionsortes | 191 |
| Tabelle 6-3: Anforderungen an das Abwasser nach Anhang 17 der AbwV..... | 192 |

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|------------------|---|
| Abs. | Absatz |
| AbwV | Abwasserverordnung |
| anorg. | anorganisch |
| AOX | Adsorbable organic halogen compounds |
| Art. | Artikel |
| BHKW | Blockheizkraftwerk |
| BImSchG | Bundes-Immissionsschutzgesetz |
| BImSchV | Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes |
| BSB ₅ | Biologischer Sauerstoffbedarf |
| CD | konventionelle Trocknung |
| ChemG | Chemikaliengesetz |
| CSB | Chemischer Sauerstoffbedarf |
| DM | Deutsche Mark |
| DN | Nennweite |
| EAK | Europäischer Abfallkatalog |
| EL | (in Verbindung mit Heizöl) leicht |
| EPS | extrudiertes Polystyrol |
| FF | Feuerfest |
| FL | Fliesen |
| g.G. | gebranntes Gut |
| GEMS | Global Environment Monitoring System |
| Gesamt-C | Gesamtkohlenstoff |
| GK | Geschirrk Keramik |
| GVVB | Gesetz zur Vermeidung, Verwertung und Beseitigung von Abfällen |
| H | (in Verbindung mit Erdgas) Qualitätsmaß für Brennwert |
| HELCOM | Helsinki-Kommission |
| HHD | Hochfeuchtigkeitstrocknung |
| IFCS | Intergovernmental Forum on Chemical Safety |
| IVU | Integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung |
| k.A. | keine Angaben |
| keram. | keramische |
| KrW-/AbfG | Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz |
| L | (in Verbindung mit Erdgas) Qualitätsmaß für Brennwert |
| LAGA | Länderarbeitsgemeinschaft Abfall |
| LKW | Lastkraftwagen |
| LRTAP-Convention | Long Range Treaty on Air Pollution Convention |
| MF | Mikrofiltration |
| min. | mindestens |
| Mio. | Million |

| | |
|--------------------|--|
| Mrd. | Milliarde |
| OECD | Organisation for Economic Cooperation and Development |
| org. | organisch |
| OSPARCOM | Oslo-Paris-Kommission |
| PAH | Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe |
| Pf | Pfennig |
| PP | Polypropylen |
| PU | Polyurethan |
| RC | Recycling |
| RL | Richtlinie |
| S | (in Verbindung mit Heizöl) schwer |
| SD | Dampftrocknung |
| SK | Sanitärkeramik |
| spez. | spezifisch |
| s-SD | Halbdampftrocknung |
| St. | Stück |
| SZ | Steinzeug |
| TA | Technische Anleitung |
| TA Abfall | Technische Anleitung zur Lagerung, chemisch/physikalischen, biologischen Behandlung, Verbrennung und Ablagerung von besonders überwachungsbedürftigen Abfällen |
| TA Lärm | Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm |
| TA Luft | Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft |
| TA Siedlungsabfall | Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen |
| TE | Toxic equivalent |
| TNV | thermische Nachverbrennung |
| TOW | Tunnelofenwagen |
| UNCED | United Nations Conference on Environment and Development |
| UNECE | United Nations Economic Commission for Europe |
| UNEP | United Nations Environmental Program |
| UVPG | Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung |
| VAwS | Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen |
| v. Chr. | vor Christus |
| VOC | luftgängige gasförmige organische Verbindungen |
| VR | Verarbeitetes Rohmaterial |
| WHG | Wasserhaushaltsgesetz |
| WHO | Weltgesundheitsorganisation |
| WT | Wärmetauscher |
| ZI | Ziegel |

Einheiten

| | | | | | |
|--------|---------------------|----------------|----------------|--------|----------------|
| a | Jahr | KJ | Kilojoule | N | Newton |
| B | Breite | kW | Kilowatt | ng | Nanogramm |
| °C | Grad Celsius | kWh | Kilowattstunde | pH | pH-Wert |
| cm | Zentimeter | l | Liter | s | Sekunde |
| d | Tag | L | Länge | t | Tonne |
| dB (A) | Dezibel (akustisch) | m | Meter | T | Temperatur |
| dH | Wasserhärte | m ² | Quadratmeter | Vol.-% | Volumenprozent |
| g | Gramm | m ³ | Kubikmeter | µg | Mikrogramm |
| Gew.-% | Gewichtsprozent | mbar | Millibar | µS | Mikrosiemens |
| h | Stunde | mg | Milligramm | | |
| H | Höhe | min | Minuten | | |
| hPa | Hektopascal | MJ | Megajoule | | |
| K | Kelvin | ml | Milliliter | | |
| kcal | Kilokalorien | mm | Millimeter | | |
| kg | Kilogramm | MPa | Megapascal | | |

Verzeichnis chemischer Symbole

| | | | | | |
|--------------------------------|-----------------|---------------------------------|-------------------------|------------------|-----------------|
| Al | Aluminium | H ₂ O | Wasser | PbO | Bleioxid |
| Al ₂ O ₃ | Aluminiumoxid | HCl | Chlorwasserstoff | Pr | Praseodym |
| B ₂ O ₃ | Boroxid | HCN | Cyanwasserstoff | Pt | Platin |
| BaO | Bariumoxid | HF | Fluorwasserstoff | Rh | Rhodium |
| Ca | Calcium | K ₂ O | Kaliumoxid | S | Schwefel |
| Ca(OH) ₂ | Calciumhydroxid | MgCO ₃ | Magnesiumcarbonat | Sb | Antimon |
| CaCl ₂ | Calciumchlorid | MgO | Magnesiumoxid | Si | Silizium |
| CaCO ₃ | Calciumcarbonat | Mn | Mangan | SiC | Siliziumcarbid |
| CaF ₂ | Calciumfluorid | Mo | Molybdän | SiO ₂ | Siliziumdioxid |
| CaO | Calciumoxid | Na ₂ CO ₃ | Natriumcarbonat | Sn | Zinn |
| CaSO ₃ | Calciumsulfit | Na ₂ O | Natriumoxid | SO ₂ | Schwefeldioxid |
| CaSO ₄ | Calciumsulfat | Na ₂ SO ₃ | Natriumsulfit | SO ₃ | Schwefeltrioxid |
| Cd | Cadmium | NaCl | Natriumchlorid | SO _x | Schwefeloxide |
| Ce | Cer | NaF | Natriumfluorid | Ti | Titan |
| Co | Kobalt | NaHCO ₃ | Natriumhydrogencarbonat | TiO ₂ | Titandioxid |
| CO | Kohlenmonoxid | NaOH | Natronlauge | Tl | Thallium |
| CO ₂ | Kohlendioxid | NH ₃ | Ammoniak | V | Vanadium |
| Cr | Chrom | Ni | Nickel | Zn | Zink |
| Cu | Kupfer | NO ₂ | Stickstoffdioxid | Zr | Zirkon |
| F | Fluor | NO _x | Stickoxide | ZrO ₂ | Zirkondioxid |
| Fe | Eisen | O ₂ | Sauerstoff | | |
| Fe ₂ O ₃ | Eisenoxid | Pb | Blei | | |

Definitionen

| | |
|---------------|--|
| Besatz | Die Masse des auf einen Tunnelofenwagen gesetzten Brenngutes. |
| Besatzdichte | in $[\text{kg}/\text{m}^3]$; Die Masse des Brenngutes (ohne gebrannte Brennhilfsmittel) im befeuerten Volumen der Brennanlage bezogen auf das befeuerte Volumen der Brennanlage. Sie ist eine Maßzahl für den Grad der Inanspruchnahme des Ofenvolumens durch emissionsrelevantes Brenngut. |
| Bilanzgrenze | Grenze der Informationserhebung für eine Stoff- und Energiebilanz. |
| BVT | Art. 2(11) IVU-RL definiert „beste verfügbare Technik“ (BVT) als „den effizientesten und fortschrittlichsten Entwicklungsstand der Tätigkeiten und entsprechenden Betriebsmethoden, der spezielle Techniken als praktisch geeignet erscheinen lässt, grundsätzlich als Grundlage für Emissionsgrenzwerte zu dienen, um Emissionen in und Auswirkungen auf die gesamte Umwelt allgemein zu vermeiden oder, wenn dies nicht möglich ist, zu vermindern.“ |
| Emissionen | Die von einer Anlage ausgehenden Luft-, Boden- und Wasserverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen, Licht, Wärme, Strahlen und ähnliche Erscheinungen |
| Input | Die einem System zugeführten Stoffe und Energien. |
| Konzentration | Auf ein Volumen bezogene Masse eines emittierten Stoffes bzw. Stoffgemisches. Im Rahmen dieses Positionspapiers gilt für alle Konzentrationen gasförmiger Stoffe bzw. Stoffgemische, die nicht explizit auf andere Stoffzustände bezogen sind, der Bezug auf trockenes Abgas bei 18 Vol.-% Sauerstoff und Normzustand. |
| Normzustand | Zustand bezogen auf eine Temperatur von 273 K und einen Druck von 1013 hPa. |
| Output | Von einem System abgehende Stoffe oder Energie. |
| Prozess | Vorgang zur Herstellung eines Produktes, Umwandlung eines Stoffes, Erzeugung von Energie etc. |
| Reingas | Bezeichnung des gereinigten Abgases nach der letzten Stufe der Abgasreinigung. |
| Rohgas | Bezeichnung des unbehandelten Abgases. Rohgas wird aus einer Anlage oder einem Anlagenteil (z.B. Trockner, Ofen, Schleifmaschine) emittiert. |
| Rohstoff | Primäres und sekundäres Material, das zur Herstellung eines Produktes verwendet wird. |
| Technik | ist in Artikel 2 (11) IVU-RL definiert: „sowohl die angewandte Technologie als auch die Art und Weise, wie die Anlage geplant, gebaut, gewartet, betrieben und stillgelegt wird“. Im Allgemeinen wird unter Technik die konkrete Anwendung von Technologien zur Lösung von Problemen in wirtschaftlich verwertbaren Produkten verstanden. |
| Technologie | ist ein Begriff für die Kenntnis von natur- bzw. ingenieurwissenschaftlichen Wirkungszusammenhängen, die als Lösungsprinzip von speziellen Problemen dienen können. Damit umfasst die Technologie sowohl Problemlösungswissen als auch generalisierende Verfahrensregeln und Anleitungen. |
| Volumenstrom | Auf die Zeit bezogenes Volumen eines emittierten Stoffes bzw. Stoffgemisches. Im Rahmen dieses Positionspapiers gilt für alle Volumenströme gasförmiger Stoffe bzw. Stoffgemische, die nicht explizit auf einen anderen Sauerstoffgehalt bezogen sind, der Bezug auf 18 Vol.-% Sauerstoff und Normzustand. |

1 Allgemeine Informationen zur Keramischen Industrie

Keramik bezeichnete früher Werkstoffe der Tonwarenindustrie, die nach der Größe der Gefügebestandteile in Grob- und Feinkeramik eingeteilt wurden. Nach neuesten Forschungsergebnissen geht die Verarbeitung von Ton bis ca. 19.000 v.Chr. zurück. Die ältesten Funde keramischer Gefäße in Südjapan sind auf 8.000 bis 9.000 v.Chr. datiert [93]. Bereits um 4.000 v.Chr. wurden in Mesopotamien gebrannte Ziegel für den Bau von Tempeltürmen, Palästen und Befestigungen verwendet. Durch die Römer wurde die Technik der Ziegelherstellung vor mehr als 2.000 Jahren in weiten Teilen Europas verbreitet [14]. In Ägypten wurden um 2.600 v.Chr. glasierte keramische Plättchen als Wandschmuck in Pyramiden verwendet [93] und in China war seit etwa 1.000 v.Chr. die Technik der Porzellanherstellung bekannt [92]. Heute zählen zur Keramik neben den Werkstoffen der Tonwarenindustrie auch eine Vielzahl von Erzeugnissen mit einem geringen Tonanteil oder auch völlig tonmineralfreie Werkstoffe. Diese oxidischen und nichtoxidischen Materialien können unter dem Begriff „Sonderkeramische Werkstoffe“ zusammengefasst werden. In diese Werkstoffgruppe fällt auch der Großteil der feuerfesten Erzeugnisse. Generell werden als Keramik anorganische Werkstoffe bezeichnet, die aus nichtmetallischen Verbindungen durch einen Sintervorgang verfestigt werden [94]. In Abbildung 1-1 ist eine Gliederung der keramischen Werkstoffe entsprechend ihrer Eigenschaften und Rohstoffe dargestellt. Zusätzlich sind typische Produktbeispiele der jeweiligen Eigenschaftsgruppen gegeben.

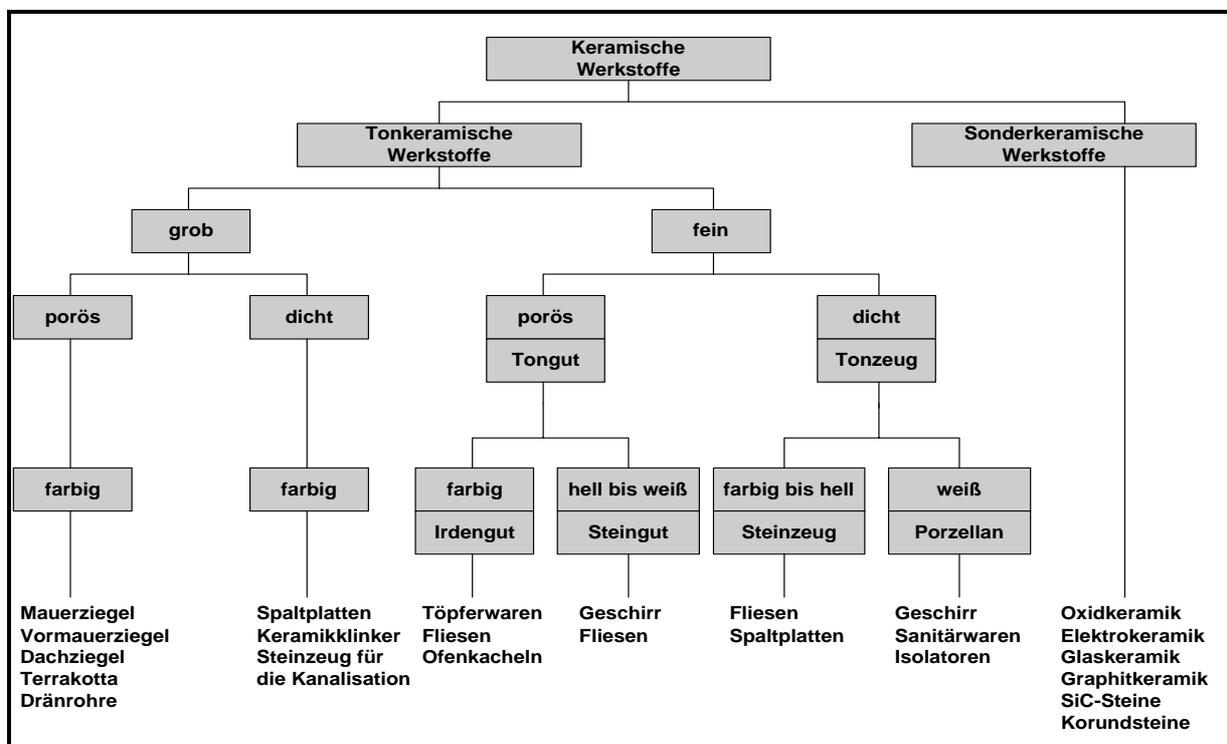


Abbildung 1-1: Gliederung keramischer Werkstoffe nach Rohstoffen und Eigenschaften

Quelle: [93]

Die grundlegenden Verfahrensschritte bei der Herstellung keramischer Erzeugnisse sind weitgehend unabhängig von den eingesetzten Werkstoffen und vom hergestellten Produkt. Abbildung 1-2 zeigt schematisch den typischen Prozessablauf und mögliche benötigte Nebeneinrichtungen zur Produktion keramischer Güter. Dabei werden die Prozessstufen Rohstoffgewinnung, Rohstofftransport und Rohstofflagerung, Masseaufbereitung, Formgebung, Trocknung, Oberflächenveredelung, Brennen und Nachbehandlung durchlaufen.

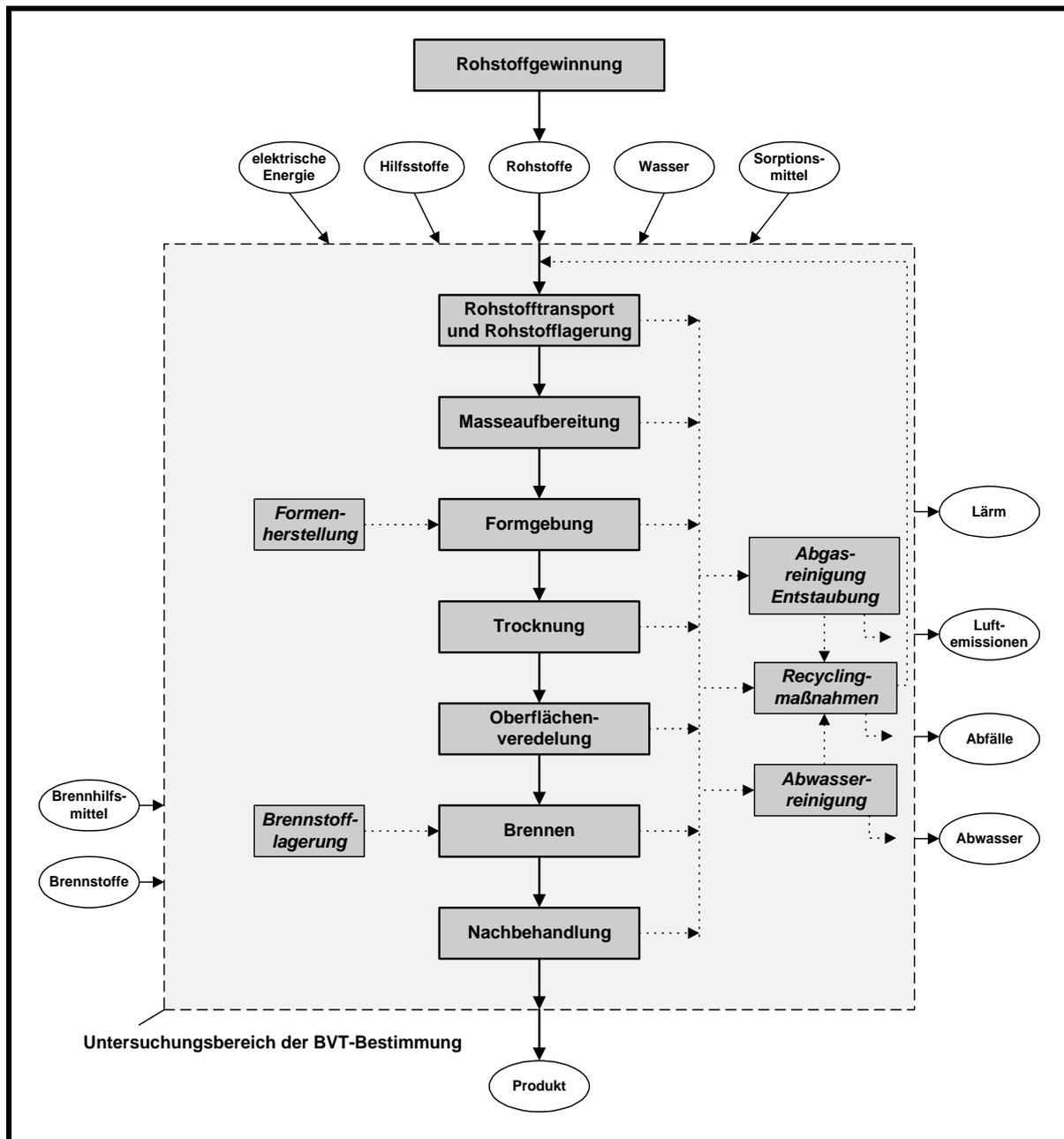


Abbildung 1-2: Schematischer Verfahrensablauf und Systemabgrenzung

Die in diesem Bericht identifizierten besten verfügbaren Techniken zum integrierten Umweltschutz in der Keramischen Industrie beziehen sich auf Prozesse und Verfahren, die innerhalb der eingezeichneten Systemgrenze angewendet werden.

In Anhang I (3.5) der IVU-Richtlinie sind die betroffenen Anlagen aufgeführt. Die IVU-Richtlinie betrifft Anlagen, die zur Herstellung von keramischen Erzeugnissen durch Brennen dienen, und zwar insbesondere von Dachziegeln, Ziegelsteinen, feuerfesten Steinen, Fliesen, Steinzeug oder Porzellan, und die eine Produktionskapazität von über 75 t pro Tag und/oder eine Ofenkapazität von über 4 m³ und eine Besatzdichte von über 300 kg/m³ haben [25].

1.1 Gliederung der Branche

Durch prinzipielle Unterschiede im Einsatz keramischer Werkstoffe entsprechend den speziellen Eigenschaftsgruppen haben sich mit der industriellen Entwicklung einzelne Produktionszweige der Keramik ausgebildet. Neben der traditionellen Unterscheidung der Keramik nach der Größe der Gefügebestandteile in Grob- und Feinkeramik wird in diesem Bericht die Branche nach Produktionszweigen strukturiert. Dem Bereich der Grobkeramik werden die Produktionsbereiche Ziegelherstellung, Herstellung von Steinzeug für die Kanalisation und Herstellung feuerfester Erzeugnisse als wirtschaftlich bedeutende Produktionszweige zugerechnet. Im Bereich der Feinkeramik ist eine Unterteilung in die Produktionsbereiche der Fliesenherstellung, Herstellung von Geschirr- und Haushaltskeramik, Sanitärkeramikherstellung, Schleifmittelherstellung und technischen Keramik sinnvoll. Die traditionelle Unterteilung nach der Größe der Gefügebestandteile in Grob- und Feinkeramik ist dabei heutzutage schwierig, da eine klare Abgrenzung aufgrund überschneidender Bereiche oft nicht mehr möglich ist. Zur klareren Strukturierung dieses Papiers wird diese Unterteilung jedoch beibehalten. Tabelle 1-1 zeigt die in den Jahren 1996 bis 1999 produzierten Mengen der Keramischen Industrie in einzelnen Produktionszweigen entsprechend den Gütergruppen des Statistischen Bundesamtes.

Tabelle 1-1: Produktion von keramischen Erzeugnissen nach Produktionszweigen

| Gütergruppe ^{*)} | Einheit | 1996 | 1997 | 1998 | 1999 |
|--|----------------------|---------|---------|---------|---------|
| Haushaltswaren und Ziergegenstände aus Keramik | t | 84.219 | 80.387 | 74.086 | 72.102 |
| Keramische Installationsgegenstände zu sanitären Zwecken | 1.000 St. | 4.135 | 3.995 | 4.095 | 3.973 |
| Elektrische Isolatoren und Isolierteile aus keram. Stoffen | t | 30.375 | 33.102 | 34.523 | 33.019 |
| Andere keramische Waren für technische Zwecke | t | 9.245 | 8.627 | 8.592 | 9.716 |
| Feuerfeste keramische Werkstoffe | t | 935.290 | 945.722 | 930.554 | 918.048 |
| Keramische Wand-, Bodenfliesen und -platten | 1.000 m ² | 60.727 | 57.322 | 63.749 | 63.033 |
| Mauerziegel | 1.000 m ³ | 13.039 | 13.253 | 13.114 | 12.762 |
| Dachziegel, Schornsteinziegel | 1.000 St. | 865.799 | 840.408 | 885.966 | 981.181 |
| Keramische Rohre, Rohrleitungen, etc. | t | 242.130 | 209.395 | 195.804 | 208.000 |
| Sonstige Bereiche (keramische Tröge, Wannen, Behältnisse) | t | 149.284 | 143.547 | 142.080 | 193.688 |

^{*)} Betriebe mit 20 und mehr Beschäftigten

Quelle: [109]

Schwerpunkte der Produktion feinkeramischer Erzeugnisse in Deutschland, insbesondere bei der Herstellung von Geschirr- und Haushaltskeramik sowie technischer Keramik, liegen in den bayrischen Regierungsbezirken Oberfranken, Oberpfalz und Mittelfranken. Im Bereich der Geschirr- und Haushaltskeramik arbeiten in Bayern beispielsweise rund 70 % der Beschäftigten der deutschen Keramischen Industrie. Weitere bedeutende Standorte feinkeramischer Fertigung befinden sich im Westerwald und im nördlichen Saarland.

Der Schwerpunkt bei der Produktion grobkeramischer Erzeugnisse liegt ebenfalls in Bayern. Etwa 40 bis 45 % aller Dach- und Mauerziegel aus Deutschland werden in Bayern hergestellt.

1.2 Wirtschaftliche Bedeutung der Produktionszweige

Die Keramische Industrie in Deutschland erzielte 1999 einen Umsatz von rund 11,6 Mrd. DM. Das entspricht einem Anteil am Umsatz des gesamten verarbeitenden Gewerbes in Höhe von 0,6 %. Tabelle 1-2 zeigt die wirtschaftliche Bedeutung der einzelnen Produktionszweige nach Umsatzzahlen entsprechend den Gütergruppen des Statistischen Bundesamtes.

Tabelle 1-2: Umsatz der Produktzweige der Keramischen Industrie

| Gütergruppe ^{*)} | Einheit | 1996 | 1997 | 1998 | 1999 |
|--|----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Haushaltswaren und Ziergegenstände aus Keramik | Mio. DM | 1.747 | 1.680 | 1.740 | 1.710 |
| Keramische Installationsgegenstände zu sanitären Zwecken | Mio. DM | 980 | 1.039 | 1.054 | 1.143 |
| Elektrische Isolatoren und Isolierteile aus keram. Stoffen | Mio. DM | 575 | 523 | 504 | 503 |
| Andere keramische Waren für technische Zwecke | Mio. DM | 517 | 577 | 635 | 647 |
| Feuerfeste keramische Werkstoffe | Mio. DM | 2.481 | 2.621 | 2.698 | 2.327 |
| Keramische Wand-, Bodenfliesen und -platten | Mio. DM | 1.348 | 1.248 | 1.152 | 1.109 |
| Ziegel u.a. Baukeramik | Mio. DM | 3.719 | 3.631 | 3.499 | 3.747 |
| Sonstige Bereiche | Mio. DM | 340 | 370 | 635 | 415 |
| gesamt | Mio. DM | 11.707 | 11.689 | 11.917 | 11.604 |

^{*)} Betriebe mit 20 und mehr Beschäftigten

Quelle: [110]

1999 entfielen rund 30 % des Umsatzes auf den Bereich der Ziegel und anderen Baukeramik, zu der hier auch die Herstellung von Steinzeug für die Kanalisation gezählt wird. 20 % des Umsatzes entfielen auf feuerfeste Erzeugnisse und 15 Prozent auf die Geschirr- und Haushaltskeramik. In Abbildung 1-3 sind die prozentualen Umsatzanteile der einzelnen Produktionszweige am Gesamtumsatz der Keramischen Industrie dargestellt.

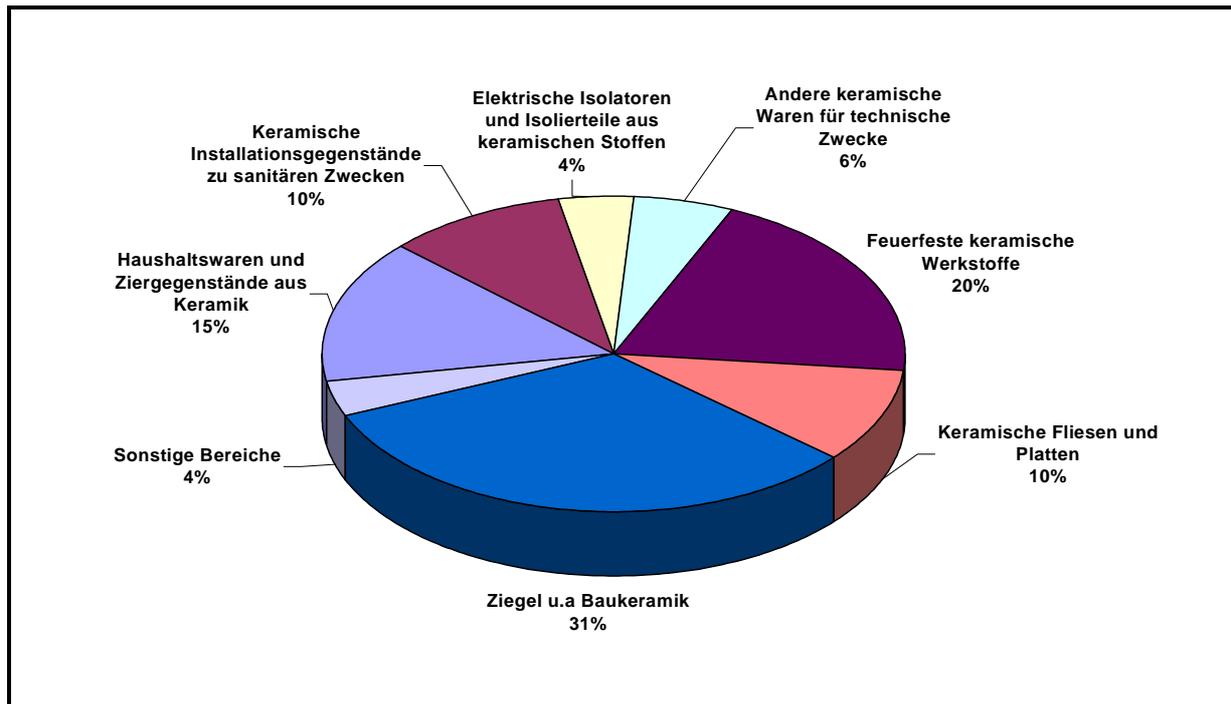


Abbildung 1-3: Umsatzanteile einzelner Produktionszweige im Jahr 1999 in Prozent

Die Exportquoten der einzelnen Produktionsbereiche unterschieden sich 1999 erheblich. Im Bereich der Haushaltskeramik betrug die Exportquote 35 %, im Bereich der Sanitärkeramik 24 %, im Bereich der technischen Keramik rund 50 %, bei den feuerfesten keramischen Werkstoffen rund 53 %, bei den keramischen Fliesen und Platten 18 % und im Bereich der Ziegel und anderen Baukeramik nur etwa 4 % [110].

In Tabelle 1-3 ist die Anzahl der in der deutschen Keramischen Industrie Beschäftigten für die Jahre 1996 bis 1999 nach Produktionszweigen entsprechend den Gütergruppen des Statistischen Bundesamtes aufgeführt.

Tabelle 1-3: Anzahl der Beschäftigten in verschiedenen Zweigen der Keramischen Industrie

| Gütergruppe ^{*)} | 1996 | 1997 | 1998 | 1999 |
|--|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Haushaltswaren und Ziergegenstände aus Keramik | 18.630 | 16.850 | 16.448 | 15.601 |
| Keramische Installationsgegenstände zu sanitären Zwecken | 4.462 | 4.426 | 4.145 | 4.023 |
| Elektrische Isolatoren und Isolierteile aus keram. Stoffen | 4.717 | 4.514 | 4.421 | 4.402 |
| Andere keramische Waren für technische Zwecke | 2.282 | 2.320 | 2.462 | 2.415 |
| Feuerfeste keramische Werkstoffe | 8.762 | 8.676 | 8.507 | 7.832 |
| Keramische Wand-, Bodenfliesen und -platten | 7.126 | 6.194 | 5.867 | 5.609 |
| Ziegel u.a. Baukeramik | 14.855 | 14.115 | 13.739 | 13.583 |
| Sonstige Bereiche | 2.434 | 2.546 | 2.627 | 2.484 |
| gesamt | 63.268 | 59.641 | 58.216 | 55.959 |

^{*)} Betriebe mit 20 und mehr Beschäftigten

Quelle: [110]

1999 waren in der Keramischen Industrie etwa 56.000 Personen in rund 470 Betrieben beschäftigt. Tabelle 1-4 zeigt die Entwicklung der Anzahl der Betriebe von 1996 bis 1999 nach Produktionszweigen.

Tabelle 1-4: Anzahl der Betriebe in verschiedenen Zweigen der Keramischen Industrie

| Gütergruppe ^{*)} | 1996 | 1997 | 1998 | 1999 |
|--|------------|------------|------------|------------|
| Haushaltswaren und Ziergegenstände aus Keramik | 102 | 94 | 90 | 82 |
| Keramische Installationsgegenstände zu sanitären Zwecken | 10 | 10 | 9 | 9 |
| Elektrische Isolatoren und Isolierteile aus keram. Stoffen | 18 | 18 | 18 | 20 |
| Andere keramische Waren für technische Zwecke | 18 | 17 | 18 | 17 |
| Feuerfeste keramische Werkstoffe | 73 | 74 | 72 | 70 |
| Keramische Wand-, Bodenfliesen und -platten | 34 | 34 | 36 | 35 |
| Ziegel u.a. Baukeramik | 221 | 214 | 205 | 200 |
| Sonstige Bereiche | 37 | 38 | 40 | 35 |
| gesamt | 513 | 499 | 488 | 468 |

^{*)} Betriebe mit 20 und mehr Beschäftigten

Quelle: [110]

Tabelle 1-1 bis Tabelle 1-4 zeigen in der deutschen Keramischen Industrie in den letzten Jahren einen allgemeinen Rückgang sowohl der Anzahl der Betriebe als auch der Beschäftigtenzahlen. Von 1996 bis 1999 sank die Gesamtzahl der Beschäftigten um 12 %, wobei der Rückgang der Beschäftigten und der Betriebe im Bereich der Haushalts- und Geschirrkераmik am größten war.

Der Weltmarktanteil der in Deutschland produzierten keramischen Produkte liegt bei rund neun Prozent, wobei insbesondere in den Bereichen der Ziegelherstellung und der Herstellung von Geschirrkераmik ein höherer Weltmarktanteil erreicht wird. Die weltweite Bedeutung der einzelnen Produktionszweige verdeutlicht die Tabelle 1-5.

Tabelle 1-5: Weltmarktanteil keramischer Produkte aus Deutschland 1992

| Produktionszweig | Umsatz weltweit [Mrd. DM] | Umsatz Deutschland [Mrd. DM] | Anteil Deutschland [%] |
|------------------------|------------------------------|---------------------------------|---------------------------|
| Geschirrkераmik | 12 | 2,2 | 18 |
| Sanitärkeramik | 8 | 0,7 | 8 |
| Technische Keramik | 32 | 1,7 | 5 |
| Feuerfeste Erzeugnisse | 21 | 1,6 | 8 |
| Fliesen und Platten | 30 | 1,7 | 6 |
| Ziegel | 25 | 3,2 | 12 |
| gesamt | 128 | 11,4 | 8,5 |

Quelle: [104]

1.3 Allgemeine Umweltaspekte

Abhängig von den spezifischen Produktionsprozessen entstehen in Anlagen zur Herstellung keramischer Produkte Emissionen in die Umweltmedien Luft, Wasser und Boden. Zusätzlich können Beeinträchtigungen der Umwelt durch Lärm und Geruchsbelästigungen auftreten. Art und Menge der auftretenden Emissionen, anfallender Abfälle und Abwässer hängen dabei von verschiedenen Parametern wie z.B. den eingesetzten Roh- und Hilfsstoffen, verwendeten Brennstoffen und angewendeten Herstellungsverfahren ab.

Luftverunreinigungen werden durch gas- und staubförmige Emissionen verursacht. Kohlenoxide, Stickoxide, Schwefeloxide, anorganische Fluor- und Chlorverbindungen und organische Verbindungen sind bei den gasförmigen Emissionen von besonderer Relevanz. Bei der Verwendung bestimmter schwermetallhaltiger Dekore oder bei Einsatz von Schweröl als Brennstoff können zusätzlich Schwermetalle emittiert werden. Partikelförmige Emissionen können in Form von Staub und Ruß auftreten [116].

Das Entstehen von halogenierten Dibenzodioxinen und -furanen beim keramischen Brennprozess ist grundsätzlich nicht auszuschließen, wobei Emissionswerte von mehr als $0,1 \text{ ngTE/m}^3$ im Allgemeinen nicht zu erwarten sind [17]. Bei Einsatz von Porosierungsmitteln in Verbindung mit stark chlorhaltigen Tonen ist im Einzelfall zu prüfen, ob der Grenzwert von $0,1 \text{ ngTE/m}^3$ überschritten wird.

Das bei der Herstellung keramischer Erzeugnisse anfallende Produktionsabwasser enthält überwiegend mineralische Inhaltsstoffe. Hinzu kommen je nach Produktionsverfahren weitere anorganische Stoffe, geringe Mengen verschiedener organischer Stoffe sowie einige Schwermetalle. In den Betrieben fallen neben Produktionsabwässern auch Niederschlagsabwässer, Sanitärabwässer und Kühlwässer an [111].

Abfälle der Keramischen Industrie bestehen aus industriellen Abfällen, häuslichen Abfällen und Schlämmen. Die industriellen Abfälle setzen sich im Wesentlichen zusammen aus:

- Schlämmen (Schlämme aus Aufbereitung und Wasserreinigung, Glasurschlämme, Gippschlämme, Schleifschlämme),
- Bruch (Grün-, Glüh-, Glatt- und Buntbruch, Ofenausbruch, Brennhilfsmittelbruch),
- Stäuben aus Filteranlagen,
- alten Gipsformen,
- verbrauchten Sorptionsmitteln (Kalksteingranulat, Kalksteinstaub),
- Abfällen aus der Verpackung (Kunststoff, Holz, Metall, Altpapier etc.) [97].

Ein Teil der anfallenden industriellen Abfälle kann anlagenintern wiederverwendet werden. Der nicht direkt anlagenintern wiederverwertbare Anteil wird einer externen Verwertung bzw. der externen Entsorgung zugeführt.

Die Produktion von keramischen Erzeugnissen ist energieintensiv. Bei der Herstellung von Porzellan liegt der Kostenanteil für Energie an den Gesamtkosten bei etwa 12 % bis 18 % [68], bei der Herstellung von Ziegelprodukten variiert der Energiekostenanteil zwischen 17 % und 25 % mit Maximalwerten bis zu 30 % [28]. Als Brennstoffe zur Befuerung der Brennaggregate werden heutzutage in erster Linie Erdgas, Flüssiggas (Propan und Butan) und Heizöl EL verwendet. Die Verwendung von Heizöl S und Kohle als Brennstoff spielt nur noch eine untergeordnete Rolle. In der Feinkeramik wird zum überwiegenden Teil Erdgas als Brennstoff eingesetzt. Die Verwendung von Heizöl S und Kohle beschränkt sich auf wenige Betriebe der Grobkeramik (überwiegend Ziegeleien). In Tabelle 1-6 ist der Anteil der Brennstoffe am Brennstoffverbrauch nach Produktionszweigen gegliedert dargestellt.

Tabelle 1-6: Brennstoffanteil nach Produktionszweig in Prozent (1998)

| Produktionszweig | Erdgas | Heizöl EL | Heizöl S | Sonstige |
|--------------------------------|--------|-----------|----------|----------|
| Geschirrkераmik | 98,0 | 1,6 | - | 0,4 |
| Sanitärkeramik | 97,7 | 2,3 | - | - |
| Technische Keramik | 96,2 | 3,6 | - | 0,2 |
| Feuerfeste Erzeugnisse | 90,2 | 7,3 | 0,1 | 2,4 |
| Fliesen | 98,1 | 1,1 | 0,8 | - |
| Ziegel | 88,6 | 5,3 | 5,3 | 0,8 |
| Steinzeug für die Kanalisation | 100 | - | - | - |

Quelle: [110]

2 Angewandte technische Prozesse und Verfahren zur Herstellung keramischer Erzeugnisse

In diesem Kapitel werden grundlegende technische Prozesse und Verfahrensschritte zur Herstellung keramischer Produkte beschrieben. Nach einer kurzen Charakterisierung gemeinsamer Prozess- und Verfahrensschritte werden Anlagen für folgende Bereiche der Keramischen Industrie näher dargestellt:

- Geschirrkernamik,
- Sanitärkeramik,
- Keramische Fliesen und Platten,
- Ziegel,
- Steinzeug für die Kanalisation,
- Feuerfeste Erzeugnisse.

Die wichtigsten Input- und Outputströme werden dabei jeweils im Rahmen einer Verfahrensbeschreibung eines typischen Herstellungsprozesses der entsprechenden Produktionsbereiche analysiert. Hauptquellen von Staub- und Lärmemissionen können aufgrund übereinstimmenden Auftretens bereits bei der allgemeinen Beschreibung des grundlegenden Verfahrensablaufs benannt werden.

2.1 Darstellung grundlegender technischer Prozesse und Anlagen zur Herstellung keramischer Erzeugnisse

Die grundlegenden technischen Prozesse und Verfahrensschritte bei der Herstellung keramischer Produkte in der Grob- und Feinkeramik unterscheiden sich kaum. Die technische Umsetzung erfolgt zum Teil, entsprechend den produktspezifischen Anforderungen und den Eigenschaften der eingesetzten Rohstoffe, sehr unterschiedlich. Im Folgenden werden die wichtigsten Anlagenteile und grundlegenden Prozessschritte und Prozessvarianten bei der Herstellung keramischer Erzeugnisse dargestellt.

2.1.1 Rohstoffgewinnung, Rohstofftransport und Rohstofflagerung

Die Gewinnung der Tone, Kaoline, tonhaltigen Materialien, Feldspate, des Quarzes und des größten Teils der sonstigen eingesetzten Rohstoffe erfolgt in meist werksnah gelegenen Gruben. Dort werden die Rohstoffe im Tagebau mittels Seil-, Eimerketten- und Schaufelradbaggern oder mit Hilfe von Lade- und Schürfkübelraupen oder Hydraulik-Baggern abgetragen. Dabei entstehen Staubemissionen. Für den Transport der Rohstoffe von der Grube zu den Betrieben werden überwiegend LKW eingesetzt [14].

Die Rohstofflagerung in den Betrieben erfolgt je nach Rohstoffeigenschaft und Aufbereitungsgrad auf Freihalden, in mit Boxen unterteilten Lagerhallen, in Großraumbeschickern, in Mauksilos, Sumpfanlagen oder Trockensilos. Die Siloanlagen sind mit Füllstandsanzeiger und Überfüllsicherung ausgestattet. Staubhaltige Verdrängungsluft aus den Silos wird über Aufsatzfilter bzw. über Gaspendelleitungen abgeleitet. Hauptemissionsquellen für Staub sind neben der Verdrängungsluft der Silos auch Fördereinrichtungen und Wiegeanlagen, in denen mit staubhaltigen Rohstoffen umgegangen wird. Die Abscheidung der Stäube aus der Förderluft erfolgt durch Gewebefilter, die als Einzelfilter oder Zentralfilter ausgeführt sind [125].

Die für den innerbetrieblichen Transport eingesetzten Förderanlagen werden entsprechend den Eigenschaften des Fördergutes, wie z.B. Körnung, Verschleißverhalten, Fließverhalten und Temperatur, Mengenstrom sowie den gegebenen Platzverhältnissen ausgewählt. Das Gut wird mit Förderanlagen, wie z.B. Becherwerken, Kettenförderern, Schnecken, pneumatischen Förderern und Rutschen, transportiert. Schlicker kann zum Teil auch über Rohrleitungen gepumpt werden [14].

Lärmemissionen entstehen bei der Anlieferung der Rohstoffe auf das Betriebsgelände durch LKW-Verkehr und durch Rohstoffförderanlagen [15].

2.1.2 Masseaufbereitung

Die Masseaufbereitung der Rohstoffe kann je nach Verwendungszweck und Weiterverarbeitung in trockenem, feuchtem oder plastischem Zustand bzw. in wässriger Suspension erfolgen. Zunächst erfolgt eine Grobzerkleinerung der Rohstoffe mit Messer- und Walzenbrechern, Schnitzern, Planscheibenmühlen, Kollergängen, Knetrasplern und Tonhobeln. Die anschließende Feinzerkleinerung wird in Walzwerken, Mahl-, Misch- oder Dispergieranlagen durchgeführt. Walzwerke werden vorwiegend in der grobkeramischen Industrie zur Feuchtaufbereitung des Aufgabegutes eingesetzt.

In Trockenmahlanlagen, wie z.B. in Rohr-, Trommel-, Schwing-, Walzen- und Strahlmühlen, wird das Mahlgut durch Heißluft oder mit Luft vermischtem Abgas der Feuerungsanlage getrocknet und gleichzeitig weiter zerkleinert. In Nassmahlanlagen werden die Hartstoffe in Trommelmühlen mit Hilfe von Wasser und Kugeln gemischt und feinzerkleinert. Die Abtrennung bestimmter Kornfraktionen erfolgt durch Sieben oder Sichten, wofür gekapselte Siebe, Windsichter und Sichterzyklone eingesetzt werden [116].

Für die verschiedenen Formgebungsverfahren werden Gieß-, Dreh-, Press-, Spritz- und Knetmassen benötigt. Die Herstellung der Gießmassen erfolgt, indem die gemahlene Rohstoffe mit einem geeigneten Dispergiermittel in Rührwerken oder Mischern dispergiert werden. Die Rohstoffe für Drehmassen werden zunächst ebenfalls in Rührwerken unter Zugabe von Wasser homogenisiert, anschließend in Filterpressen auf die gewünschte Restfeuchte entwässert und dann im feuchtplastischen Zustand den Vakuumstrangpressen zugeführt [116].

Pressmassen können nach dem Halbnass- oder Nassverfahren mit anschließender Trocknung oder nach dem Trockenverfahren hergestellt werden. Häufig werden Pressmassen in Sprühtrocknungsanlagen hergestellt, die im Allgemeinen aus einem Trockner und je einem nachgeschalteten Abscheider für Grob- und Feinstaub bestehen. Den Pressmassen werden anschließend zur besseren Verpressbarkeit Gleit- und Bindemittel zugegeben. Spritzmassen werden bis zur Plastifizierung wie Pressmassen aufbereitet. Anschließend werden in geschlossenen Aggregaten unter Wärmeeinwirkung Plastifizierungsmittel, wie z.B. Wachse, eingearbeitet. Die Herstellung von Knetmassen erfolgt unter Zugabe von Bindemitteln und Füllstoffen in Knetern oder auf Walzen [116]. Bestimmte Firmen haben sich auf die Aufbereitung der Rohstoffe spezialisiert und liefern die fertig aufbereiteten Massen an die Betriebe der Keramischen Industrie, in denen dann die Weiterverarbeitung stattfindet.

Sowohl bei der Zerkleinerung trockener Rohstoffe als auch bei der Herstellung von Drehmassen, Pressmassen und Knetmassen können emissionsrelevante Staubkonzentrationen auftreten, so dass die Abluft abgesaugt und in Entstaubungsanlagen gefiltert werden muss [116]. Mit Lärmbeeinträchtigungen ist insbesondere bei der Zerkleinerung der Hartstoffe, dem Betrieb der Trommelmühlen und, aufgrund der Brenner- und Abgasgeräusche, beim Einsatz von Sprühtrocknern zu rechnen [15].

2.1.3 Formgebung

Die Formgebung hängt von den zuvor eingestellten Eigenschaften der Massen ab. Gießmassen werden in Formen gegossen, aus denen die Formlinge nach einer entsprechenden Scherbenbildungszeit entnommen werden. Bei der weichplastischen Formgebung werden Dreh-, Spritz- und Knetmassen in der Regel in offenen oder geschlossenen Vorrichtungen unter Einwirkung von Druck und Wärme verformt. Die Verarbeitung der hartplastisch vorgetrockneten Massen erfolgt auf Abdrehmaschinen mit Hilfe von Profilwerkzeugen. Pressmassen werden mittels verschiedener Pressen zu den gewünschten Formlingen geformt. Die Formlinge können anschließend durch Verputzen, Bohren, Kratzen, Stechen, Schleifen oder Sägen im ungebrannten Zustand weiter bearbeitet werden [116].

Bei der Weiterbearbeitung können, ebenso wie bei der Verarbeitung von Pressmassen, emissionsrelevante Staubkonzentrationen auftreten, die eine Behandlung der Abluft in Entstaubungsanlagen erfordern. Lärmemissionen treten verstärkt bei der Formgebung durch Pressen und bei der mechanischen Weiterbearbeitung auf. Zusätzlich kann es bei der Handhabung der Formlinge während der weiteren Prozessschritte zu Lärmbeeinträchtigungen kommen [15].

2.1.4 Trocknungsanlagen

Vor dem Brennprozess müssen die Formlinge zur Vermeidung von Dampfspannungen auf eine entsprechende Restfeuchte getrocknet werden. Der Trocknungsprozess findet in Kammer-, Durchlauf-, Trommel- oder Sprühtrocknern statt. Die Trockner werden dabei überwiegend im Wärmeverbund mit den Öfen betrieben.

Kammertrockner bestehen aus einer Mehrzahl einzelner, meist symmetrisch angeordneter Trockenräume. In diese wird das Trockengut so eingebracht, dass der periodisch ablaufende Trocknungsprozess trockengutgerecht stattfinden kann. In Durchlauftrocknern durchwandert das Trockengut auf Wagen den Trockenkanal, wobei die heiße, trockene Eingangsluft vorwiegend im Gegenstrom geführt wird. Kammer- und Durchlauftrockner werden mit der Kühlluft der Öfen oder mit geschlossenen Heizsystemen betrieben [57]. Neuerdings werden zum Trocknen grobkeramischer Produkte sogenannte Klimatrockner eingesetzt. Sie können als Kammer- oder als Durchlauftrockner ausgebildet werden. Dabei wird der Trocknungsprozess mittels Warmluft mit kontrollierter Feuchte durchgeführt. Im Regelfall wird die Warmluft von den Öfen mit überhitztem Dampf aus einem Dampferzeuger bis zu dem gewünschten Feuchtegrad gemischt und in den Trockner eingeblasen. Der Feuchtegehalt der Trockenluft wird in den verschiedenen Zonen des Trockners abgesenkt, wodurch eine geregelte Trocknung möglich ist. Zur Vortrocknung von rieselfähigen feuchten Rohstoffen werden Trommeltrockner eingesetzt. Sie werden überwiegend direkt beheizt und arbeiten nach dem Gleichstrom- oder Gegenstromprinzip. Zur Herstellung von Produktionsmassen für das Trockenpressen von Fliesen, flachen Geschirnteilen und Elektrokeramik werden hingegen Sprühtrockner eingesetzt, die in der Regel mit Erdgas beheizt und im Gegenstrom betrieben werden [116]. Eine Alternative zu den herkömmlichen Trocknern stellt der Einsatz von Infrarot- und Mikrowellentrocknern dar, die als Kammer- oder Durchlauftrockner ausgeführt sind [107].

Bei Verwendung von organischen Bindemitteln, Porosierungsmitteln, Trennmitteln oder Formöl können beim Trocknen Geruchsemissionen entstehen. Soweit benzolhaltige Bestandteile enthalten sind, treten Benzolemissionen auf [116]. Lärmbeeinträchtigungen können beim Trockenvorgang durch Brenner-, Abluft- und Umluftgeräusche auftreten.

2.1.5 Oberflächenveredelung

Zur Oberflächenveredelung können keramische Erzeugnisse glasiert, engobiert oder dekoriert werden. Beim Glasieren werden die getrockneten Rohlinge meist in einem Glühbrand verfestigt und anschließend mit einer glasig einschmelzenden, glatten, geschlossenen, transparenten oder getrübbten Schicht überzogen [57]. Die Fritte- oder Rohglasuren werden meist in Form von wässrigen Glasursuspensionen durch Tauchen, Spritzen oder Begießen aufgetragen. Das Aufbringen einer Engobe geschieht normalerweise nach dem Trocknen, bei einigen Erzeugnissen auch am frischen oder gebrannten Scherben [116]. Beim Engobieren wird auf die Sichtfläche oder die gesamte Oberfläche eine feinkörnige, nicht transparente helle oder gefärbte Schicht aus einer keramischen Masse durch Tauchen oder Begießen aufgetragen [57]. Bei der Unter-, In- und Aufglasurdekoration werden einbrennbare oder einschmelzbare Farben auf den Scherben aufgetragen und eingebrannt [125]. Wird die Glasur durch Spritzen aufgetragen, so treten im Abgas emissionsrelevante Staubkonzentrationen auf, die Inhaltsstoffe der Glasur enthalten.

2.1.6 Brennanlagen

In der Keramischen Industrie werden kontinuierlich und periodisch betriebene Öfen für den Brennprozess eingesetzt. Die unglasierten oder glasierten und getrockneten Formlinge werden je nach Werkstoff und Technologie in einem oder mehreren Bränden gesintert. Zu den Grundtypen der kontinuierlich betriebenen Öfen gehören Tunnel- und Rollenöfen, Ring-, Kammerring- und Zickzacköfen, Drehrohr- und Schachtofen. Herdwagen- und Haubenöfen hingegen werden periodisch betrieben. In Abbildung 2-1 sind die Bandbreiten industrieller Sintertemperaturen der jeweiligen Werkstoffgruppen dargestellt.

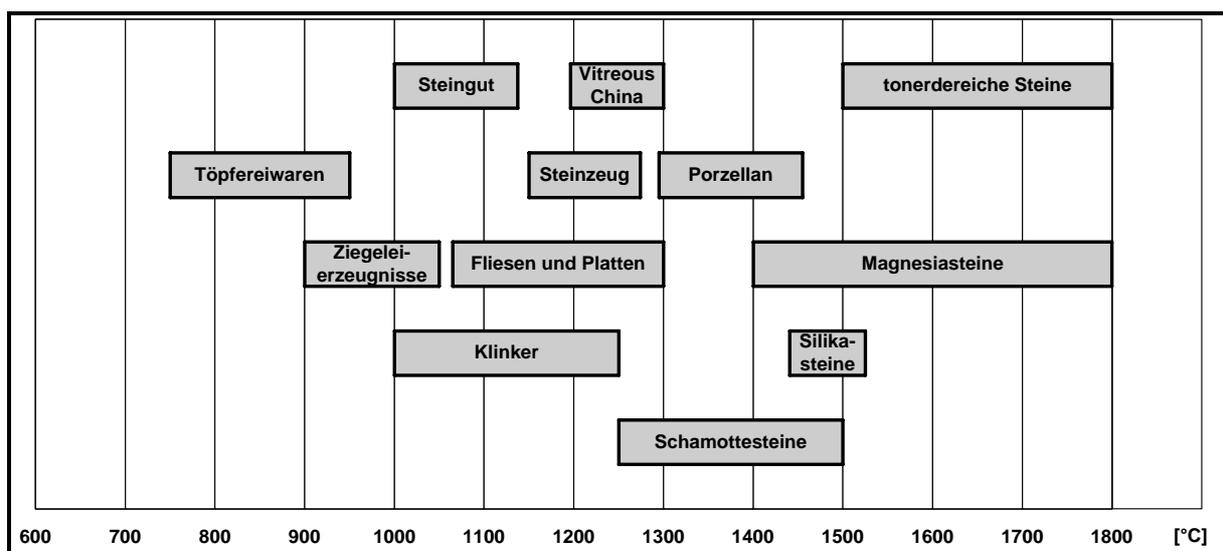


Abbildung 2-1: Bandbreiten industrieller Sintertemperaturen

Die für den Brennprozess benötigten Temperaturen werden überwiegend durch Gas- und Ölfeuerung erzeugt, in Einzelfällen werden auch feste Brennstoffe und elektrische Energie zur Wärmeerzeugung eingesetzt [116]. In Tabelle 2-1 sind die beim Brand von keramischen Erzeugnissen eingesetzten Brennstoffe und deren Verbrennungseigenschaften aufgeführt.

Tabelle 2-1: Brennstoffe und deren Verbrennung in keramischen Öfen

| Brennstoff | Heizwert | | spezifisches Abgasvolumen ^{*)} | | theoretischer Luftbedarf | | Rauchgas spez. Abgasvolumen ^{**)} | |
|-------------------|----------|-----------------------------------|--|------|--|------|---|-------|
| | MJ/kg | MJ/m ³ ^{***)} | m ³ /kg / m ³ /m ³ ^{****)} | | m ³ /kg / m ³ /m ³ ^{****)} | | m ³ /kg / m ³ /m ³ | |
| Erdgas (Gruppe L) | - | 31,9 | - | 7,7 | - | 8,6 | - | 50,4 |
| Erdgas (Gruppe H) | - | 37,5 | - | 8,1 | - | 8,9 | - | 52,3 |
| Propan | 46,4 | 92,9 | - | 21,8 | - | 23,8 | - | 142,1 |
| Butan | 45,7 | 123,6 | - | 28,4 | - | 31,0 | - | 185,2 |
| Heizöl EL | 42,7 | - | 10,2 | - | 11,2 | - | 65,9 | - |
| Heizöl S | 41,0 | - | 10,0 | - | 10,6 | - | 66,4 | - |
| Braunkohle | ca. 10,5 | - | ca. 3,1 | - | ca. 2,8 | - | 23,8 | - |
| Steinkohle | ca. 29,0 | - | ca. 8,0 | - | ca. 8,3 | - | 54,1 | - |
| Sägemehl | ca. 14,5 | - | ca. 3,8 | - | ca. 3,8 | - | 26,6 | - |

^{*)} spezifisches Abgasvolumen bei stöchiometrischer Verbrennung

^{**)} bei 18 Vol.-% Sauerstoff; Luftverhältnis $n=1+(V_{0,tr}/L_{min}) \cdot (O_2/(21-O_2))$

^{***)} Zustand des Heizgases 298 K, 1013 hPa

^{****)} Abgasvolumen im Normzustand (273 K, 1013 hPa) und nach Abzug des Feuchtegehaltes

Quelle: [116]

2.1.6.1 Kontinuierlich betriebene Öfen

Keramische Erzeugnisse werden überwiegend in Tunnelöfen bei Temperaturen von 900 bis 1.700 °C gebrannt. Die Bau- und Betriebsart der Tunnelöfen ist den geforderten Eigenschaften der unterschiedlichen keramischen Erzeugnisse angepasst. Die Tunnelöfen sind in ihrer Längsachse in Vorwärm-, Brenn- und Abkühlzone gegliedert. Beim Brennen wird das Brenngut auf Ofenwagen kontinuierlich oder diskontinuierlich durch den Ofen geschoben. Die Anlagen arbeiten bezüglich ihrer Heißgas- und Kühlmedienführung nach dem Gegenstromprinzip. Die Heißgase durchströmen den Ofenkanal von der Brennzone in Richtung Vorwärmzone. Am Ofenausgang wird Luft eingesaugt, welche die Ware bis zur Brennzone abkühlt (Kühlzone). Dabei erwärmt sich die Kühlluft und dient u.a. als Verbrennungsluft. Ein Teil der Kühlluft wird vor Erreichen der Brennzone abgesaugt und direkt oder indirekt für Trocknungszwecke eingesetzt (Warmluftabsaugung) [116]. In der Kühlzone des Tunnelofens muss aufgrund der Gefügeänderungen unter Umständen eine Brennkurvensteuerung durchgeführt werden. Diese Sturzkühlung wird mittels gesteuerter Schiebeluftklappen am Ausfahrende des Tunnelofens sowie geregelter Warmluftabsaugung aus der Kühlzone erreicht [14]. In Abbildung 2-2 ist der Grundriss eines Tunnelofens dargestellt.

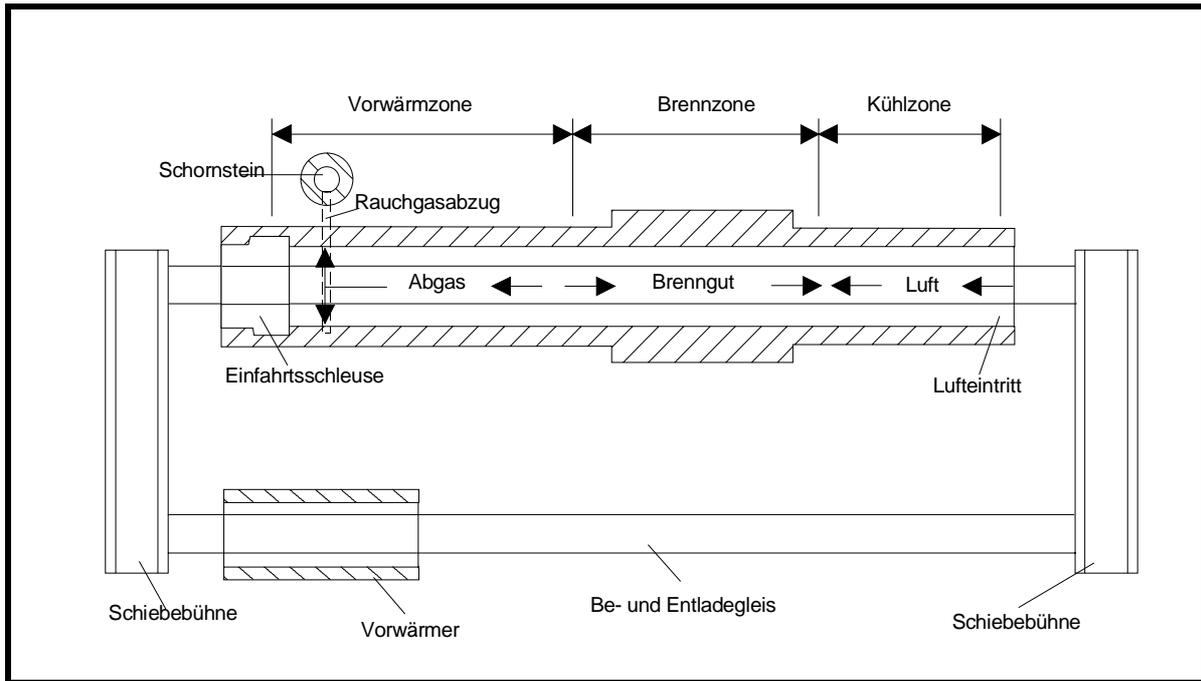


Abbildung 2-2: Grundriss eines Tunnelofens

Quelle: [116]

Die Abdichtung von Ofenwagen und Ofeninnenraum gegen Falschlucht erfolgt üblicherweise mit Hilfe einer Sanddichtung. Bei neueren Ofenkonstruktionen erfolgt die Abdichtung durch Wasser oder andere konstruktiv verbesserte, mechanische Lösungen. Ziel der Maßnahmen ist es, einen gasdichten Ofenraum zu erhalten, um Brennzeit und spezifischen Energieverbrauch zu verringern. Abbildung 2-3 zeigt den Querschnitt eines Tunnelofens mit einem Ofenwagen.

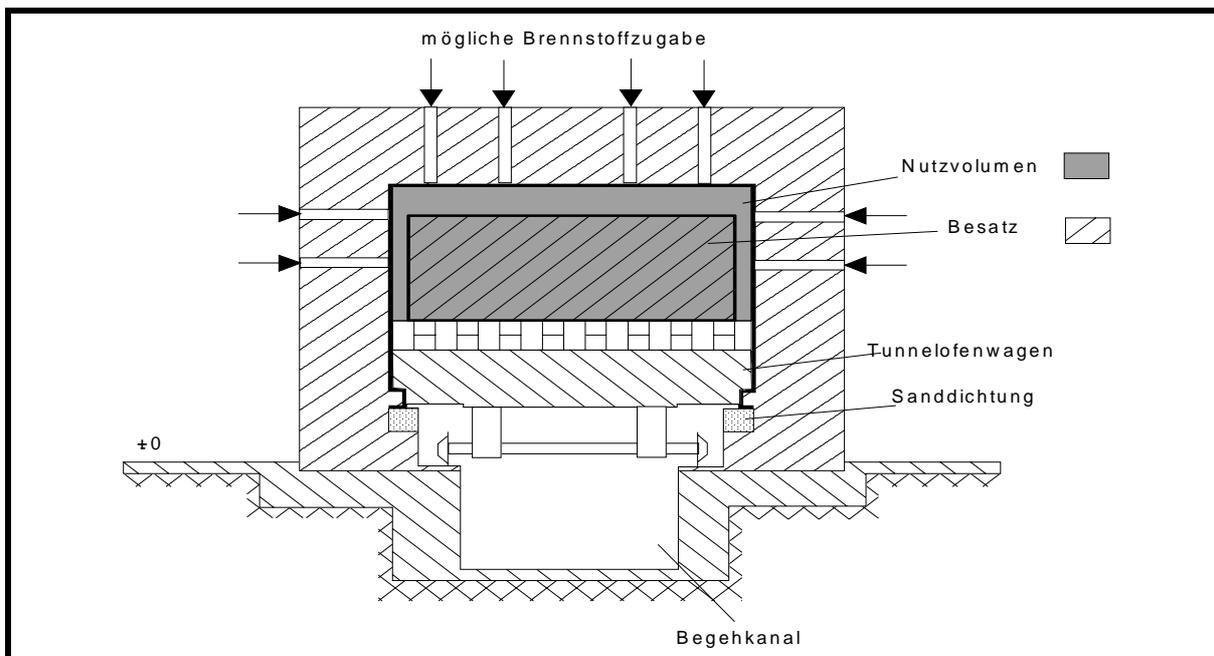


Abbildung 2-3: Querschnitt eines Tunnelofens

Quelle: [116]

Während in Tunnelöfen das Brenngut auf Brennwagen durch den Ofentunnel bewegt wird, läuft es bei Rollenöfen auf den von außen angetriebenen Rollen, zum Teil ohne Zwischenschaltung von Brennhilfsmitteln. Durch den Verzicht auf die Brennhilfsmittel ist bei Rollenöfen im Vergleich zu Tunnelöfen eine stark reduzierte Brennzeit möglich, was zur Reduzierung des Energieverbrauches führt [116]. In Abbildung 2-4 ist der Querschnitt eines Rollenofens dargestellt.

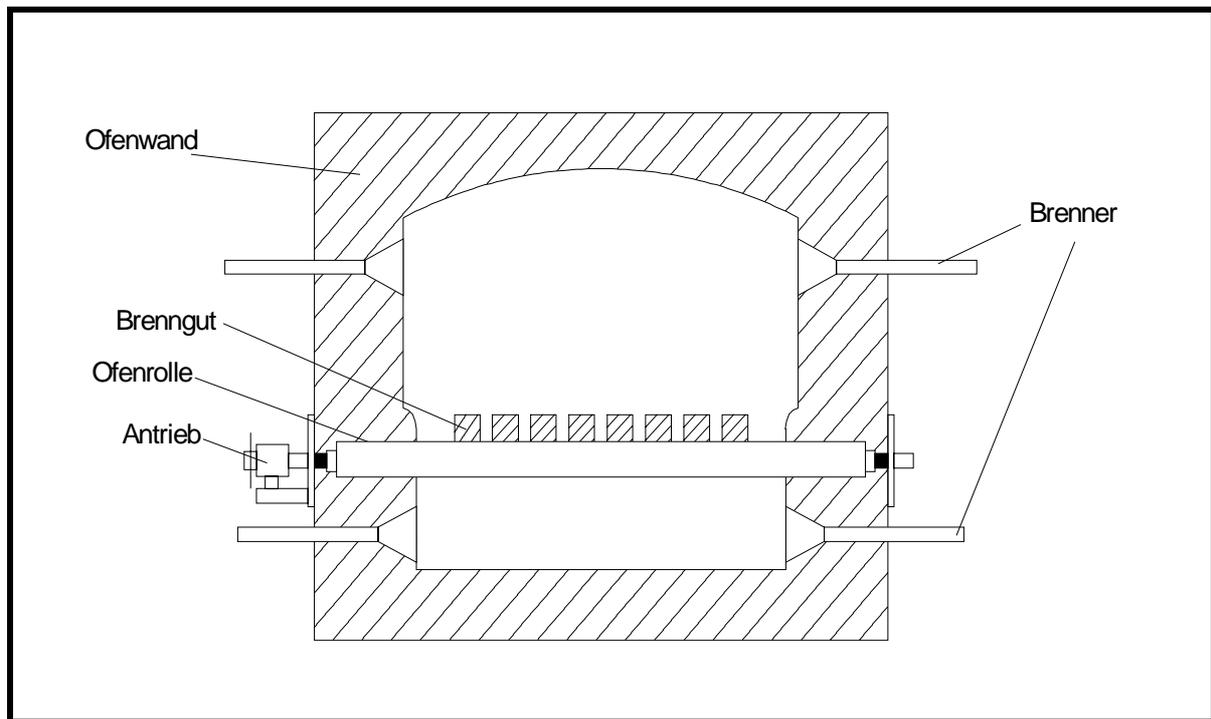


Abbildung 2-4: Querschnitt eines Rollenofens

Zur Herstellung einer Reihe von keramischen Erzeugnissen werden thermisch vorbehandelte Rohstoffe, wie z. B. Rohschamotte oder Magnesitsinter benötigt. Diese werden in Schacht- oder Drehrohröfen hergestellt.

2.1.6.2 Periodisch betriebene Öfen

Herdwagen- und Haubenöfen werden eingesetzt, wenn die Brennparameter von Brand zu Brand den unterschiedlichen Anforderungen des Brenngutes angepasst werden sollen.

Periodisch betriebene Öfen haben einen Brennraum mit vorzugsweise rechteckiger Grundfläche (Herdfläche), in dem das Gut während des Brandes ortsfest verbleibt. Beim Haubenofen wird die mit einer Heizeinrichtung versehene Haube mit Hilfe einer Hebe- und Senkvorrichtung auf das Unterteil gesetzt.

Beim Herdwagenofen wird das Brenngut auf einem Herdwagen auf die Herdfläche transportiert, die Brennkammer wird anschließend mit Türen verschlossen. Das Abgas wird in der Regel durch die Herdfläche abgesaugt. Aufheiz- und Abkühlgeschwindigkeit sowie Ofenatmosphäre werden dem Brenngut entsprechend geregelt [116]. In Abbildung 2-5 ist ein Herdwagenofen im Querschnitt dargestellt.

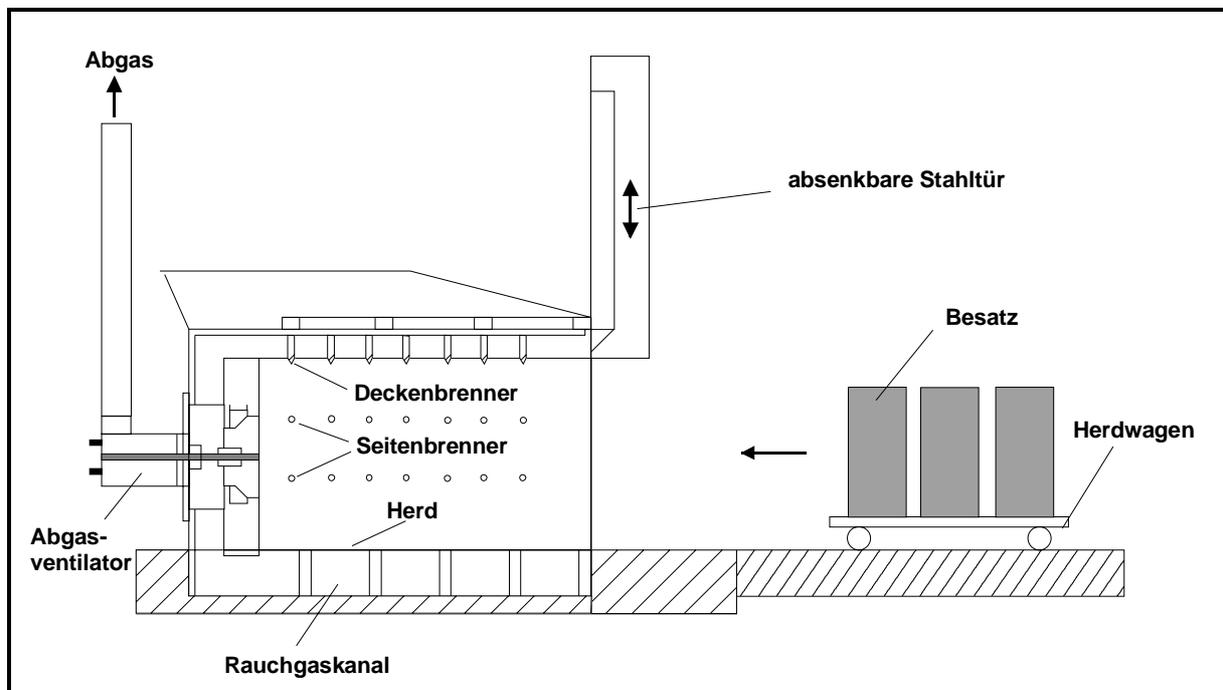


Abbildung 2-5: Querschnitt eines Herdwagenofens

Beim Brennen keramischer Erzeugnisse entstehen in Abhängigkeit von den eingesetzten Roh- und Hilfsstoffen, den eingesetzten Brennstoffen und dem Brennaggregat gasförmige und staubförmige Emissionen verschiedener Zusammensetzung und Menge. Bei den gasförmigen Emissionen handelt es sich um Kohlenoxide, Stickoxide, Schwefeloxide, anorganische Fluor- und Chlorverbindungen und organische Verbindungen. An partikelförmigen Emissionen können Staub und Ruß entstehen. Lärmemissionen treten in Form von Brennergeräuschen und Ab- und Umluftgeräuschen auf [15].

2.1.7 Nachbehandlung

In bestimmten Fällen ist es erforderlich, die getrockneten oder gebrannten keramischen Produkte durch Schleifen, Polieren, Planieren und Drehen im Nass- und Trockenverfahren nachzubearbeiten. Anschließend erfolgt die Qualitätskontrolle und eine versandgerechte Verpackung der keramischen Erzeugnisse [116]. Bei der Nachbehandlung im Trockenverfahren können emissionsrelevante Staubkonzentrationen auftreten. Lärmemissionen entstehen insbesondere beim Schleifen der keramischen Produkte und beim Einsatz von Verpackungsmaschinen [15].

2.1.8 Nebeneinrichtungen

Entstaubungsanlagen, Abgasreinigungsanlagen, Abwasserreinigungsanlagen und Anlagen zur Lagerung der Brennstoffe stellen wichtige zusätzliche Bestandteile eines Betriebes zur Herstellung keramischer Erzeugnisse dar.

Entsprechend den jeweiligen Staubemissionen können Entstaubungsanlagen zentral oder lokal als Massenkraftabscheider zur Vorabscheidung, filternde Abscheider, Elektroabscheider oder Nassabscheider ausgeführt werden. Weitere typische, in der Keramischen Industrie eingesetzte Abgasreinigungsanlagen sind je nach Emissionsart beispielsweise Abgaswaschanlagen, Sorptionsanlagen sowie thermische und katalytische Nachverbrennungsanlagen. Diese Anlagen befinden sich meist in der Nähe der Hauptemissionsquelle, des Brennaggregats.

Als Abwasserreinigungsanlagen werden aufgrund der meist mineralhaltigen Inhaltsstoffe im Abwasser Absetzbecken verwendet. In Kläranlagen kann durch den Einsatz von Flockungsmitteln die Sedimentation der anorganischen Inhaltsstoffe beschleunigt werden.

Die Brennstofflagerung erfolgt bei der Verwendung stückiger Kohle als Freilager, überdachtes Lager oder in Bunkern, bei staubförmiger Kohle in Silos. Flüssiggas wird in geeigneten Drucktanks bevorratet. Heizöle werden in Tankanlagen gelagert, wobei Heizöl S zur Erhaltung der Pumpfähigkeit warmgehalten werden muss. Erdgas hingegen wird auf dem Betriebsgelände nicht gelagert, sondern direkt aus dem Versorgungsnetz eingespeist.

Zu den weiteren Nebeneinrichtungen eines keramischen Betriebes kann in Abhängigkeit von den angewendeten Herstellungsverfahren eine Formengießerei gehören. In der Formengießerei werden die verschleißanfälligen Gipsformen hergestellt, die bei einigen Formgebungsverfahren in großen Mengen benötigt werden.

In Abbildung 2-6 sind die möglichen Verfahrenswege zur Herstellung keramischer Erzeugnisse zusammenfassend dargestellt [98].

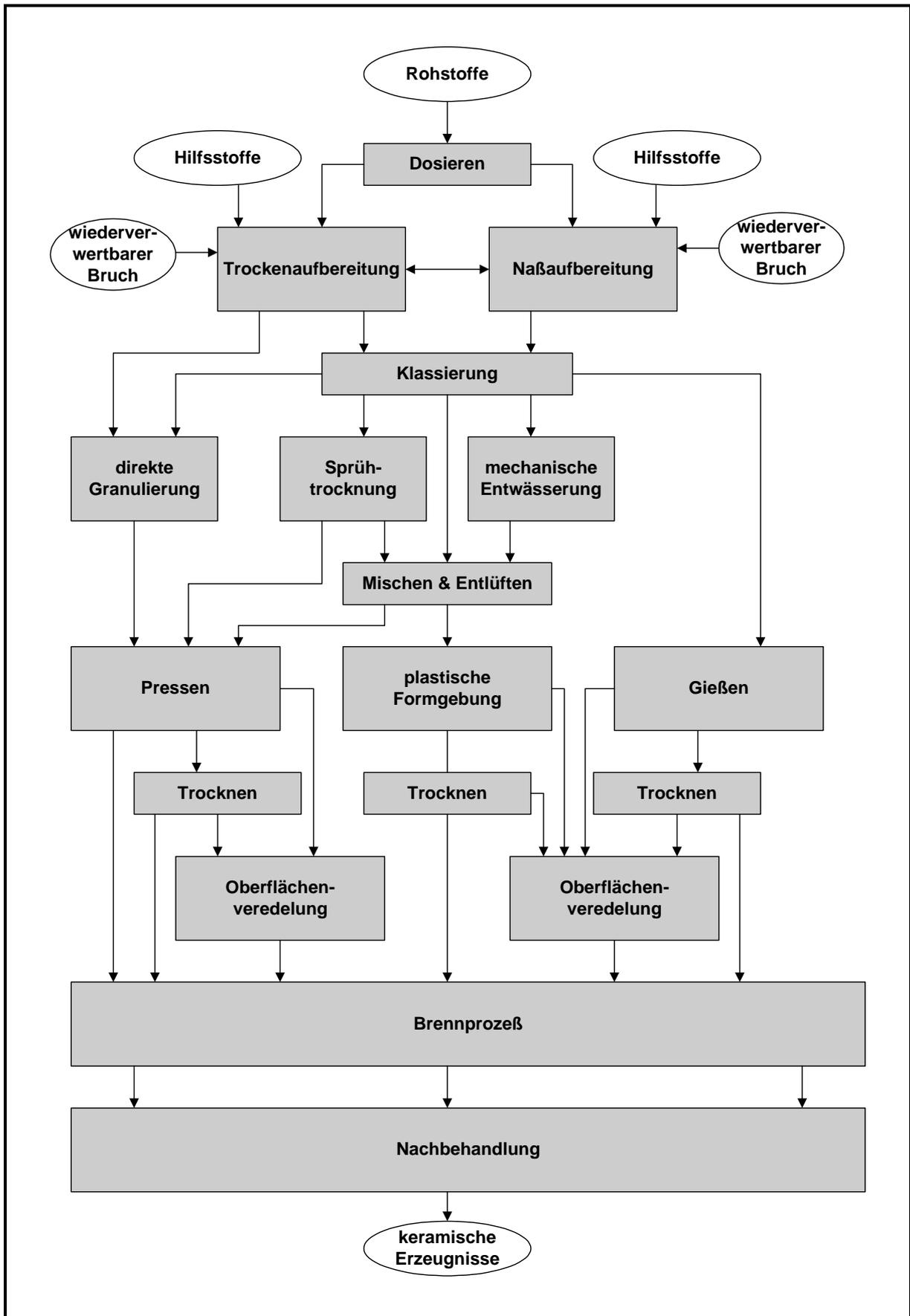


Abbildung 2-6: Allgemeines Verfahrensfliessbild zur Herstellung keramischer Produkte

Quelle: [nach 98]

2.2 Darstellung von Verfahren zur Herstellung feinkeramischer Erzeugnisse

Erzeugnisse der feinkeramischen Industrie unterscheiden sich von den Erzeugnissen der grobkeramischen Industrie durch die Größe der Gefügebestandteile, die am gebrannten Scherben sichtbar sind. Die Grenze liegt bei Korngrößen von 0,1 bis 0,2 mm. Die Gruppe der feinkeramischen Werkstoffe kann aufgrund der Dichte weiter unterteilt werden in Irdengut (Töpferwaren), Steingut, Steinzeug und Porzellan. Irdengut und Steingut sind relativ porös und können mehr als 2 % Wasser aufsaugen. Steinzeug und Porzellan haben eine sehr dichte Oberfläche und nehmen kaum Wasser auf [92]. Abbildung 2-7 zeigt eine Übersicht über die silikatkeramischen Werkstoffe der Feinkeramik.

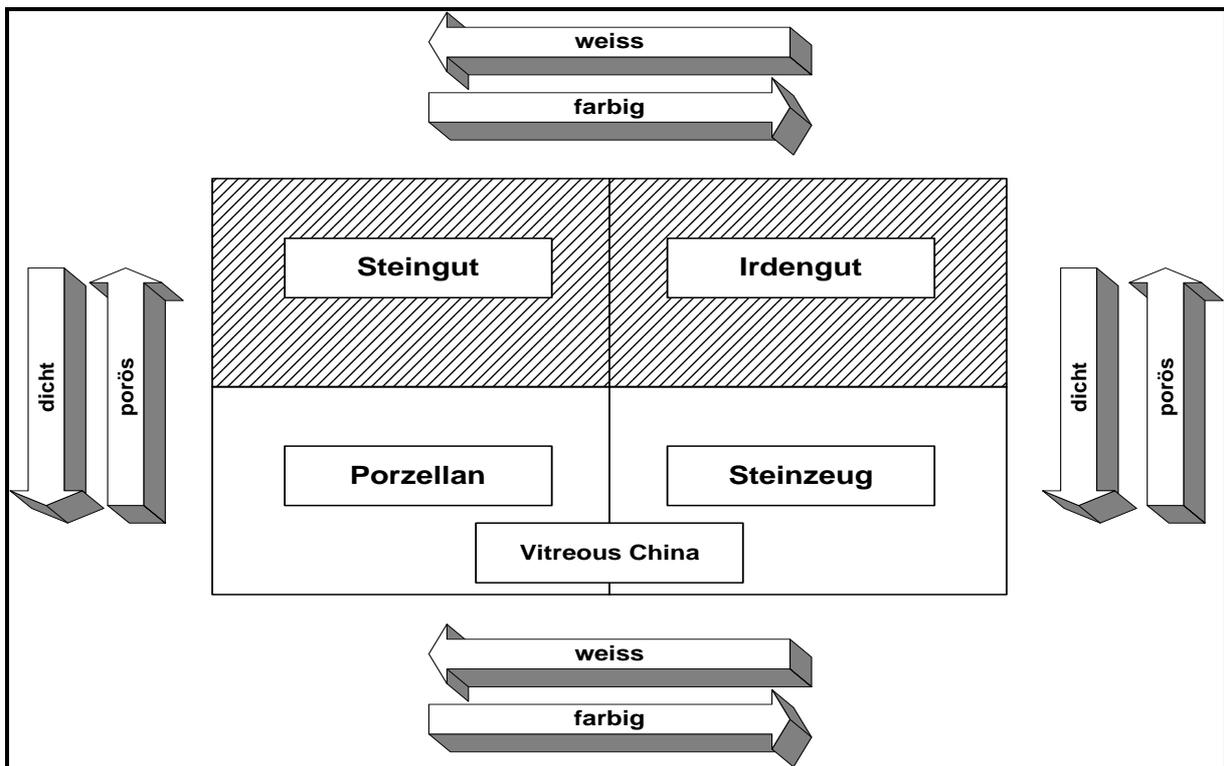


Abbildung 2-7: Übersicht über die silikatkeramischen Werkstoffe

Quelle: [108]

Zu den feinkeramischen Erzeugnissen werden gezählt [92]:

- Haushalts-, Wirtschafts- und Ziergegenstände aus Porzellan,
- Haushalts-, Wirtschafts- und Ziergegenstände aus Steingut und Feinsteinzeug,
- Ton- und Töpferwaren,
- keramische Installationsgegenstände für sanitäre und hygienische Zwecke,
- Isolatoren und Isolierteile, Erzeugnisse aus feinkeramischen Stoffen für chemische und andere technische Zwecke,
- Fliesen, Kacheln sowie
- Schleifmittel.

Die in der feinkeramischen Industrie hergestellten Produkte bestehen überwiegend aus Verbindungen von Kieselsäure und Tonerde. Als plastische Rohstoffe dienen Kaoline und Tone. Als Hartstoffe und Flussmittel werden Quarz, Feldspat, in bestimmten Fällen auch Kreide, Dolomit, Wollastonit und Steatit eingesetzt. Zusammen mit Glasurfritten und Metallverbindungen werden die gleichen Rohstoffe auch in Glasuren verwendet [125].

In Anlagen zur Herstellung feinkeramischer Produkte werden neben den oben genannten Grundstoffen auch Hilfsstoffe, Brennhilfsmittel, Brennstoffe und Sorptionsmittel verwendet. Als Hilfsstoffe bei der Formgebung können organische Gleit- und Bindemittel eingesetzt werden. Die Brennhilfsmittel bestehen aus meist wiederverwertbaren Kapseln, Platten und Stützen aus feuerfester Keramik. Bei der Abgasreinigung werden Sorptionsmittel, wie Calciumcarbonat, Calciumhydroxid oder Feinkalk eingesetzt [125].

Im Folgenden werden angewendete Prozesse und Techniken der Produktionszweige und Anlagen zur Herstellung von Geschirrkераmik, Sanitärkeramik und keramischen Fliesen und Platten dargestellt.

2.2.1 Herstellung von Geschirrkераmik

Zur Geschirrkераmik werden Haushalts-, Wirtschafts- und Ziergegenstände aus Porzellan, Steingut und Feinsteinzeug gezählt. Typische Erzeugnisse der Geschirrkераmik sind Teller, Tassen, Untertassen, Platten, Schüsseln, Kannen und Vasen [57].

In der Tabelle 2-2 sind die Bandbreiten der Produktionskapazitäten, Ofenraumvolumina und Besatzdichten von Anlagen zur Herstellung von Geschirrkераmik in Deutschland aufgeführt.

Tabelle 2-2: Bandbreiten produktbezogener Anlagenkapazitäten in der Geschirrkераmik

| Produktgruppe | Produktionskapazität [t/d] | Ofenraumvolumen [m ³] | Besatzdichte [kg/m ³] |
|-----------------|-------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Geschirrkераmik | bis zu 20 | bis zu 590 | 13 – 201 |

Quelle: [Informationen des Verbandes der Keramischen Industrie e.V.]

Abbildung 2-8 zeigt als typisches Beispiel die schematische Darstellung einer Geschirrporzellanherstellung. Bei der Herstellung werden die Prozessschritte Rohstoffgewinnung und Rohstofflagerung, Masseaufbereitung, Formgebung, Trocknung, Brennvorgang, Glasieren, Dekorieren und Nachbehandlung durchlaufen.

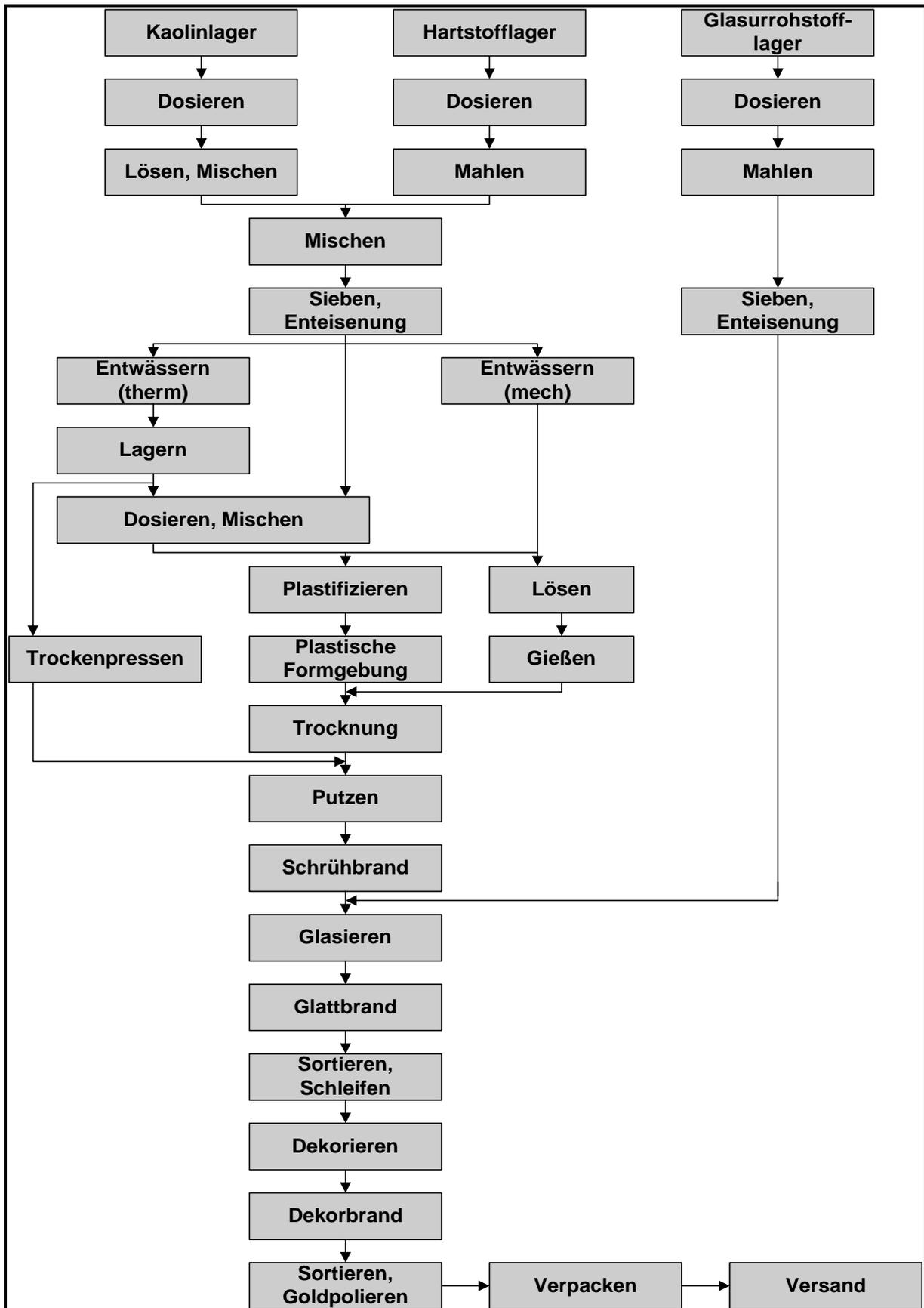


Abbildung 2-8: Schematische Darstellung der Herstellung von Geschirrporzellan

Quelle: [57]

2.2.1.1 Rohstofflagerung

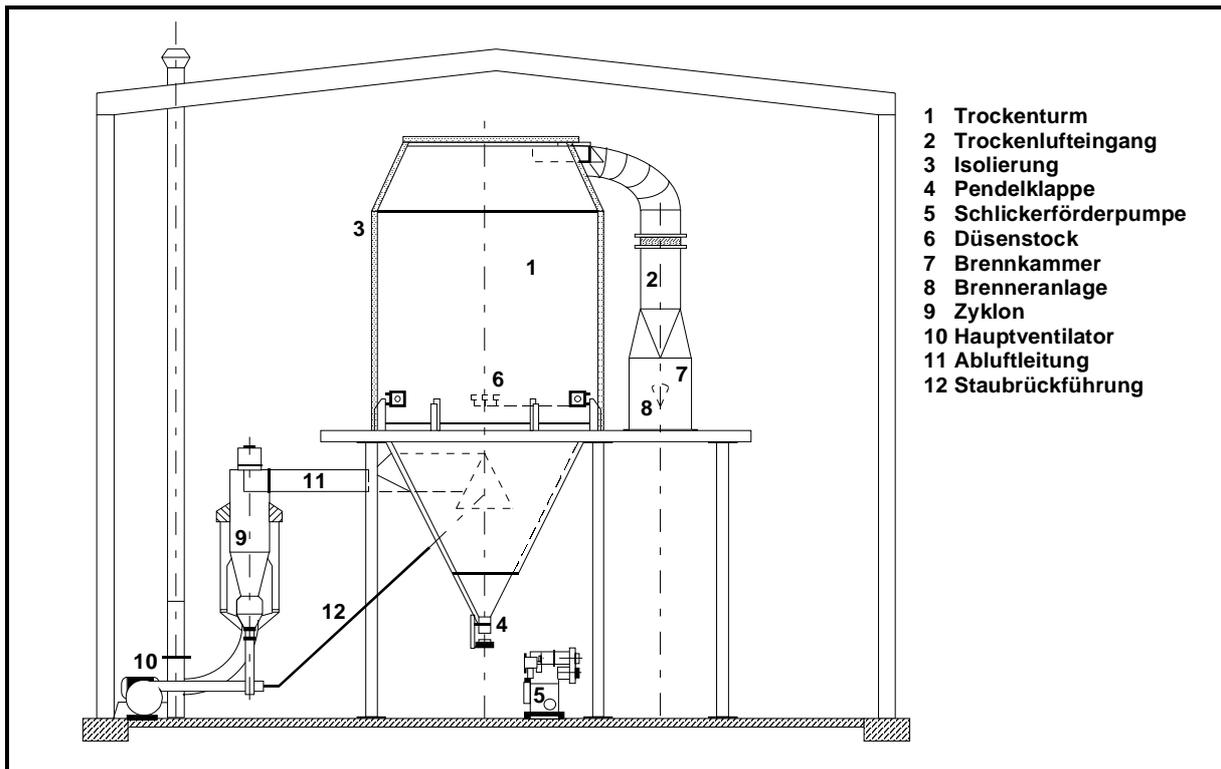
Für die Produktion von Geschirrkераmik werden im Wesentlichen die Rohstoffe Ton, Kaolin, Feldspat und Quarz eingesetzt [125]. Ein typischer Versatz für Hartporzellan (Weichporzellan) besteht aus 40 bis 60 % (30 bis 40 %) Kaolinen und Tonen, 20 bis 30 % (30 bis 40 %) Quarz, 18 bis 28 % (25 bis 40 %) Feldspat. Die einzelnen Komponenten des Masse- und Glasurversatzes werden der Produktionsanlage angeliefert und je nach Anlieferungsart, Feuchtegehalt und Korngröße in Siloanlagen, Säcken, Big-Bags oder Containern witterungsgeschützt eingelagert. Zur Erzielung guter Masseigenschaften werden mehrere bildsame Rohstoffe mit verschiedenen Kennwerten eingesetzt [57].

2.2.1.2 Masseaufbereitung

Die Masseaufbereitung bei der Geschirrkераmikerstellung kann nach dem Nassverfahren oder nach dem Trockenverfahren erfolgen. Dabei werden überwiegend Press- und Gießmassen hergestellt. Bei der Dosierung der Massekomponenten überwiegt die gravimetrische Versatzbildung. Werden Kaoline vor der Dosierung durch Nasslagerung aufgeschlämmt, so kann auch eine volumetrische Dosierung erfolgen. Glasurrohstoffe werden prinzipiell gravimetrisch dosiert.

Zur Vorbereitung auf den Mischprozess werden die bildsamen Versatzkomponenten nach der Dosierung in Wasser suspendiert, wozu Lösebottiche mit Motorquirlen dienen. Die Mahlung erfolgt im Nassverfahren in Trommel- und Rührwerksmühlen. Bei Massehartstoffen kann diese Verfahrensstufe entfallen wenn feinstgemahlene Hartstoffe voraufbereitet angeliefert werden. Das Mischen der aufgeschlämmt bildsamen Komponenten mit den Hartstoffen, die trocken und feinstgemahlen oder als Mühlenschlicker eingesetzt werden, findet in Rührbehältern statt. Die Absiebung erfolgt mit Vibrationssieben zur Entfernung von Fremdbestandteilen und Überkorn. Anschließend wird die Enteisung mit Permanent- oder Elektromagneten durchgeführt [57]. Der Masseschlicker wird mechanisch in den Filterkammern der Filterpressen oder thermisch nach dem Sprühgranulatverfahren entwässert. Zur Herstellung plastischer Massen wird der Wassergehalt des Schlickers in Filterpressen und Drehzellenfiltern von etwa 65 % auf 20 bis 25 % verringert. Der Filterkuchen wird homogenisiert und in Strangpressen zu Hubel verformt [57].

Zur Herstellung von Pressmassen wird der Masseschlicker in Sprühtrocknern auf etwa fünf bis acht Prozent Feuchtigkeit entwässert. Dazu wird der Schlicker mittels einer Schlickerförderpumpe einer Düse zugeführt und in den Sprühtrockner eingebracht. Dort erfolgt die Reduzierung des Feuchtigkeitsgehaltes in einem heißen Gasstrom. Die Feuerungsabgase der gasbeheizten Sprühtrockner werden mit dem verdampften Wasser über Dach abgeleitet. In Abbildung 2-9 ist der Aufbau einer Sprühtrocknungsanlage dargestellt.



- 1 Trockenturm
- 2 Trockenlufteingang
- 3 Isolierung
- 4 Pendelklappe
- 5 Schlickerförderpumpe
- 6 Düsenstock
- 7 Brennkammer
- 8 Brenneranlage
- 9 Zyklon
- 10 Hauptventilator
- 11 Abluftleitung
- 12 Staubrückführung

Abbildung 2-9: Aufbau einer Sprühtrocknungsanlage

Quelle: [66]

Sprühtrockner haben sich für die Granulierung der unterschiedlichsten silikatkeramischen, oxidkeramischen und nichtoxidkeramischen Massen bewährt. Tabelle 2-3 zeigt einige typische Betriebsdaten von Düsenzerstäubungstrocknern.

Tabelle 2-3: Technische Daten eines Düsenzerstäubungstrockners

| | | |
|------------------------------------|-------------------|---------------|
| Wasserverdampfungsleistung | kg/h | 2.000 - 3.000 |
| Schlickerdurchsatz | kg/h | 6.000 - 9.000 |
| Wassergehalt des Schlickers | % | 30 - 45 |
| Pressfeuchte des Granulats | % | 5 - 12 |
| Arbeitstemperatur | °C | 450 - 600 |
| Elektroenergieverbrauch | kW | 65 - 85 |
| mittlerer Erdgasverbrauch | m ³ /h | 280 - 350 |

Quelle: [66]

Dem Pressgranulat werden organische Gleit- und Bindemittel zugesetzt, um das Granulat weicher und gleitfähiger zu machen. Dabei kommen beispielsweise Carboxymethylcellulosen (CMC), Methylcellulosen (MC), Zelluloseether (CE), Polyvinylalkohole (PVA) und Polysaccharide (PS) zum Einsatz [106]. Es werden auch Olein, Mineralöle, Stearinsäure und Wachse verwendet [111]. Der Anteil der Gleit- und Bindemittel kann zwischen 0,2 und 0,4 Gew.-% betragen. Bei durch Wirbelschichtgranulierung hergestelltem Granulat ist eine Verminderung des Bindemittelanteils aufgrund der besseren Verpressbarkeit möglich [105].

Zukünftige Alternativen zur Pressgranulatherstellung durch Sprühtrockner bieten zum einen die Wirbelschichtgranulierung und zum anderen nichtthermische Granulierungsverfahren. Der spezifische Stromverbrauch bei der Wirbelschichtgranulierung liegt etwas höher als bei der Sprühgranulierung, der spezifische thermische Energieaufwand ist dagegen geringer [105].

Wird bildsame Drehmasse aus Sprühkorn hergestellt, so wird dieses zusammen mit Masserückschlicker in dem Verhältnis in einem Intensivmischer gemischt, dass die geforderte Endfeuchte der Drehmasse von 20 bis 25 % erreicht wird. Die stranggeformten zylindrischen Hubel werden meist zum Feuchtigkeits- und Spannungsausgleich zwischengelagert [57]. Zur Festigkeitserhöhung können der Drehmasse organische (analog Pressmasse) und anorganische Bindemittel, wie Magnesiumchlorid, Magnesiumsulfat, Phosphat oder Borax zugesetzt werden [111].

Zur Herstellung von Gießmasse werden Filterkuchen, Drehmassenabfälle und Gießmassenabfälle oder Sprühkorn aufgelöst. Der Wassergehalt der Gießmasse beträgt zwischen 25 und 35 % [103]. Um die Gießmasse bei einem möglichst geringen Wassergehalt gießfähig zu halten, werden Verflüssigungs- und Stabilisierungsmittel, wie Soda, Wasserglas, Natronlauge, Pottasche oder auch Humussäurepräparate, zugegeben [111].

In den Aufbereitungsanlagen fällt Produktionsabwasser aus der Masseaufbereitung, der Formgebung und der Glasuraufbereitung sowie Reinigungswasser an. Das Reinigungswasser entsteht vorwiegend beim Reinigen des Raumes in dem der Kollergang steht, beim Reinigen der Masse-Trommelmühle und der Glasur-Trommelmühle, der Aufschlammungs- und Dispergieranlage sowie der Siebe und Pumpen. Produktionsabwasser fällt hauptsächlich beim Entwässern des Schlickers in den Filterpressen und Drehzellenfiltern an [111]. Als Abfall fallen bei der Masseaufbereitung neben Massefehlchargen auch Weißschlämme an, womit aus dem Abwasser abgesetzte Feststoffanteile bezeichnet werden [124].

2.2.1.3 Formgebung

Die Formgebung bei der Geschirrkemikherstellung kann nach drei verschiedenen Verfahren erfolgen. Flachwaren, wie z.B. Teller, Untertassen und Platten, werden heutzutage überwiegend im Trockenpressverfahren hergestellt. Hohlwaren, wie z.B. Kannen, werden gegossen, während Becher und Tassen durch bildsame Formgebung hergestellt werden [23].

Beim Trockenpressverfahren wird das Pressgranulat mit einem Wassergehalt von etwa 5 % mit Zusätzen von Hilfsstoffen isostatisch verpresst. Die Pressmasse wird dem Pressenaggregat zugeführt. Das Presswerkzeug setzt sich aus einem Ober- und Unterteil zusammen. Im Unterteil befindet sich die isostatisch arbeitende Membrane als Hauptarbeitsteil der Verdichtung. Der Oberstempel selbst ist eine in der Produktionsvielfalt hochvariable Form

[23]. Horizontalpressen mit Mehrfachformen erlauben eine hohe Produktvielfalt für die Produktion von hohen Stückzahlen. So werden auf Doppelkopfpresen bis zu 1.200 Formlinge pro Stunde gepresst [8]. Das Granulat wird dabei mit etwa 30 MPa Pressdruck zu Formlingen verpresst [106]. Der große Vorteil dieses Verfahrens liegt im geringen Wassergehalt des geformten Rohlings.

Bei der bildsamen Formgebung wird die Drehmasse, die je nach Aufbereitungsart einen Wassergehalt von etwa 20 bis 25 % besitzt, auf Rollerformgebungsaggregaten ausgeformt. Die Herstellung rotationssymmetrischer Artikel erfolgt damit durch Ein- oder Überformen in oder auf Gipsformen, die in der Formengießerei hergestellt werden. Die Massezuteilung zu den Rolleraggregaten erfolgt dadurch, dass die zylindrischen Massehubel geeigneter Durchmesser in gleiche Scheiben geteilt werden, die dann meist mechanisiert auf die Gipsformen gelegt werden. Die Standzeiten von Gipsformen sind kurz und liegen nur im Bereich von 100 bis 150 Abformungen. Neuerdings werden auch auf Formen aus porösen, hochpolymeren Werkstoffen eingesetzt, die erheblich längere Standzeiten haben [68].

Das Schlickergießverfahren wird für alle nichtrotationssymmetrischen Artikel eingesetzt. Die Scherbenbildung wird durch Wasserentzug aus der Gießmasse durch Gipsformen erreicht. Man unterscheidet das Vollgussverfahren, welches hauptsächlich zur Herstellung von Flachware angewendet wird, und den Hohl-guss zur Herstellung von Hohlteilen, wie z.B. Kannen und Vasen [57]. Für Großserien überwiegt der Einsatz von Gießmaschinen, für Kleinserien hingegen der Handguss auf sogenannten Gießbänken. Die Scherbenbildungszeit beim Gießen kann durch auf die Gießmasse ausgeübten Druck verkürzt werden. Beim Druckgießen wird mit porösen Kunststoffformen bei Drücken bis zu 4 MPa gearbeitet. Im Vergleich zum herkömmlichen Schlickergießen wird somit eine erhebliche Verkürzung der Gießzyklen auf nur noch 2 bis 3 Minuten ermöglicht [106].

Ein weiteres Verfahren zur Herstellung von Formlingen ist das plastische Pressen. Dabei werden Artikel, die in zweiteiligen Formen hergestellt werden können, in Gips- oder Kunststoffformen gepresst. Im Vergleich zum Schlickergießen können somit unter Verwendung von plastischen Massen die Formgebungszyklen erheblich verkürzt werden [57].

Abwasser fällt bei der Formgebung überwiegend in Form von Reinigungswasser beim Gießen, Drehen und in den Herstellungsanlagen der Gipsformen an [111]. Als Abfälle fallen je nach eingesetztem Formgebungsverfahren Gipsbruch der Dreh- und Gießformen, Bruch der Pressverformung, verpresstes und unverpresstes Granulat und Weißschlämme an [124].

2.2.1.4 Trocknung

Artikel, die durch Gießen oder durch bildsame Formgebung hergestellt wurden, müssen in speziellen Trocknern auf eine Restfeuchte von weniger als zwei Prozent Wassergehalt getrocknet werden. Dabei kommen Kammer- und Durchlauftrockner zum Einsatz, die mit Ofenabwärme, Gas oder Heizöl EL beheizt werden [103]. In modernen Anlagen sind die kontinuierlichen Trockner mit in die Öfen einbezogen.

Eine Alternative zur herkömmlichen Trocknung bieten Infrarot- und Mikrowellen-Trocknungsanlagen, die auch zur Antrocknung der Gießmasse, zum Gipsformenrücktrocknen und zum Trocknen von neuen Gipsformen eingesetzt werden. Mikrowellentrockner werden als Kammer-, Durchlauf- und Durchlaufkammeranlagen ausgeführt [107].

Alle durch die Formgebungsverfahren entstehenden Grate und Oberflächenunebenheiten werden beim Putzvorgang beseitigt. Dieses geschieht durch Entgraten mit einem Messer und anschließender Bearbeitung mit feuchten Schwämmen. Bei Dreh- und Pressartikeln wird dies hauptsächlich maschinell, bei den übrigen Artikeln manuell durchgeführt. Bei Großserienfertigung sind Formgebungs-, Trocknungs- und Verputzvorgang in einer Taktstraße vereint [19, 20].

2.2.1.5 Brennvorgang, Glasieren und Dekorieren

Geschirrkemikerzeugnisse werden je nach Werkstoff und Technologie ein- bis viermal gebrannt [68]. Zunächst erfolgt der Schrüh- bzw. Glühbrand, der dem Halbfertigprodukt die für das Glasieren erforderliche Festigkeit und Saugfähigkeit gibt. Die Glühbrandtemperatur beträgt 900 bis 1.050 °C, die Brenndauer in klassischen Tunnelöfen etwa 18 bis 30 Stunden. Bei Einsatz der Schnellbrandtechnik sind Brennzeiten zwischen 3 und 7 Stunden möglich [108].

Nach dem Glühbrand erfolgt das Glasieren. Hohlgeschirrteile (außer Tassen) werden fast ausschließlich durch Tauchen manuell glasiert. Die Glasurmasse besteht aus einer in Wasser dispergierten Porzellanmasse mit höherem Flussmittelanteil. Becher und Flachgeschirr werden nach dem Begieß-Glasier-Verfahren maschinell glasiert, Kleinserien manuell durch Tauchen. Flachgeschirr kann auch durch Spritzen glasiert werden [57]. Als Hafthilfsmittel können den Glasuren organische Bindemittel und Kleber in Form von Polyaminen und Dextrinen zugegeben werden [111]. Zur schnelleren Trocknung können den Glasuren Elektrolyte zugesetzt werden [57].

Der anschließende Glattbrand erfolgt in oxidierender oder reduzierender Atmosphäre bei Temperaturen zwischen 1.320 °C und 1.430 °C. Zum Schrüh- und Glattbrand stehen neben Tunnelöfen mit Wagenförderung Ofenanlagen, wie z.B. (Mehretagen-)Rollenöfen, Schnellbrand-Tunnelöfen mit Brenntischförderung, Plattenschuböfen oder Förderbandöfen, zur Verfügung. Bei niedrigem Durchsatz werden periodische Öfen, wie z.B. Kammer-, Hauben- oder Herdwagenöfen, verwendet [81]. Die Ware wird während des Brandes auf die feuerfesten Brennhilfsmittel gesetzt. Die Glattbranddauer beträgt im Tunnelofenbrand 25 bis 36 Stunden und im Schnellbranddurchlauföfen ohne Brennhilfsmittelbesatz 3,5 bis 5 Stunden [108]. In Tabelle 2-4 und Tabelle 2-5 sind die typische Betriebsdaten periodischer und kontinuierlicher Brennaggregate dargestellt.

Tabelle 2-4: Betriebsdaten einer Herdwagenofenanlage

| | Einheit | Porzellan |
|-------------------|-------------------|-----------|
| Kapazität | t/Brand | 0,91 |
| Brennraumvolumen | m ³ | 7,0 |
| Besatzdichte | kg/m ³ | 12,8 |
| Brenntemperatur | °C | 1.400 |
| spez. Wärmebedarf | kJ/kg | 20.000 |
| Abgasvolumenstrom | m ³ /h | 12.500 |
| Abgastemperatur | °C | 800 |

Quelle: [116]

Tabelle 2-5: Betriebsdaten von Tunnelofenanlagen

| | Einheit | Porzellan [116] | | Porzellan [87] | Porzellan [75] |
|--|-------------------|-----------------|---------------|---------------------------|-------------------|
| | | Glühbrand | Glattbrand | Schnellglattbrand | Schnellglattbrand |
| Kapazität | t/h | 0,3 - 0,7 | 0,2 - 0,4 | 0,58 | 0,47 |
| Ofenlänge | m | 60 - 100 | 80 | 70 | 56 |
| Ofennutzquerschnitt | m ² | 0,5 - 1,0 | 0,5 - 1,0 | 0,7 | 0,94 |
| Besatzdichte | kg/m ³ | 60 - 70 | 60 - 70 | < 100 | < 100 |
| Brenntemperatur | °C | 850 - 1.260 | 1.200 - 1.400 | 1.420 | 1.420 |
| spez. Wärmebedarf für Trocknen + Brennen | kJ/kg | 25.000 | 20.000 | 12.500 (ohne Trocknen) | 19.700 |
| Abgasvolumenstrom | m ³ /h | 3.500 - 5.000 | 3.500 - 5.000 | k.A. | k.A. |
| Abgastemperatur | °C | 120 - 170 | 120 - 170 | k.A. | k.A. |

Während des Brandes schmilzt die Glasur, dringt in den noch porösen Scherben ein und macht ihn dicht und glatt. Nach dem Glattbrand werden die Artikel visuell in entsprechende Qualitätsstufen eingeordnet. Zur Erhöhung der Gebrauchswerteigenschaften werden alle unglasierten Stellen der Artikel geschliffen bzw. poliert.

Eine Besonderheit stellt das Bone-China-Porzellan (Knochenporzellan) dar, welches vorrangig für feines Tafelgeschirr, Tee- und Essservices verwendet wird. Die wichtigsten Massebestandteile des Bone-China-Porzellans sind Cornish China Clay, Cornish Stone und bis zu 50 % aufbereitete Rinderknochen. Der Glühbrand erfolgt bei diesem speziellen Porzellan bei 1.250 °C bis 1.350 °C, der Glattbrand bei 1.100 °C bis 1.150 °C. Eine mit Glasurdämpfen gesättigte Ofenatmosphäre sorgt dabei für spiegelglatte Glasuren [57].

Die anschließende Dekoration dient zur Steigerung des Wertes und einer Anpassung an bestimmte Geschmacksrichtungen. Dekoriert wird mit Auf-, Unter- und Inglasurfarben bzw. Edelmetallpräparaten oder Metalllüstern. Bei der Aufglasurdekoration werden glasierte und bereits gebrannte Teile dekoriert und das Dekor in die Glasur eingeschmolzen. Bei der Inglasurdekoration sinken die Farbpigmente in die Glasur ein. Bei der Unterglasur werden rohe oder gesprühte Teile dekoriert, anschließend glasiert und gebrannt. Als Dekorverfahren kommen Schiebbilddekoriern, Umdruck, Direktsiebdruck, Offsetdruck, Linieren, Bändern, Stempeln, Pudern, Malereidekoriern, Spritzen, Schablonieren und Ätzen zur Anwendung [57]. Neben der Handdekoration werden auch Siebdruckmaschinen und Buntdruck-Übertragungsmaschinen eingesetzt. Beim Dekorieren und Glasieren werden zahlreiche Oxide als Flussmittel und Trübungsmittel sowie zur direkten Färbung eingesetzt.

Die Glasur- und Dekorfarben bestehen aus zum Teil sehr kompliziert zusammengesetzten Pigmentsystemen. In der folgenden Aufzählung sind deshalb nur die Elemente und deren Wertigkeit (in Klammern), in der sie als Oxidkomponenten in den Pigmenten vorkommen, angegeben: Cu (1,2), Ca (2), Zn (2), Al (3), In (3), Si (4), Sn (4), Pb (2), Ti (3,4), Zr (4), Ce (4), Pr (4), V (4,5), Sb (3,4,5), Cr (3,6), Mo (4,6), Mn (2,4), Fe (2,3), Co (2), Ni (2) und Cd (2) [111]. In Abhängigkeit von der angewandten Dekortechnik werden für den Dekorbrand die in Tabelle 2-6 und Tabelle 2-7 aufgeführten Ofentypen verwendet.

Tabelle 2-6: Ofentypen bei der Aufglasurdekoration

| Ofentyp | Brand | Brenntemperatur | Brennzeit |
|--|-----------------------|------------------|-------------|
| Elektroschmelzofen mit Korbförderung | Schmelzdekorbrand | 760 - 840 °C | 2 - 4 h |
| Schnellbrand-Tunnelofen (Schlitten o. Brenntisch) | Aufglasurdekorbrand | 850 - 950 °C | 40 - 70 min |
| Rollenofen mit Brennhilfsmittel | Aufglasurdekorbrand | 850 - 950 °C | 40 - 70 min |
| Rollenofen mit Quarzglas | Aufglasurdekorbrand | 1.080 °C | 40 - 70 min |
| Doppelbahnförderbandofen | Aufglasurdekorbrand | 850 - 950 °C | 40 - 70 min |
| Doppelbahnförderbandofen mit Spezialband | Aufglasurdekorbrand | 1.050 °C | 40 - 70 min |
| Tunnelofen mit Plattenförderung (neutral bzw. reduzierend) | Scharffeuerdekorbrand | 1.300 - 1.400 °C | 7 - 16 h |
| Kammer- und Herdwagenofen (kleine Produktion) | Aufglasurdekorbrand | 850 - 950 °C | 8 - 10 h |

Quelle: [125]

Tabelle 2-7: Ofentypen bei der Inglasur- und Unterglasurdekoration

| Ofentyp | Brand | Brenntemperatur | Brennzeit |
|---|-----------------------|------------------|-------------|
| Herdwagenofen | Scharffeuerdekorbrand | 1.300 - 1.400 °C | 14 - 24 h |
| Schnellbrand-Tunnelofen mit Schlitten oder Brenntisch | Scharffeuerdekorbrand | 1.350 - 1.420 °C | 2 - 4 h |
| Schnellbrand-Tunnelofen mit Schlitten oder Brenntisch | Inglasur-Schnellbrand | 1.200 - 1.280 °C | 60 - 90 min |
| Rollenofen mit Spezialrollen | Inglasur-Schnellbrand | 1.200 °C | 60 - 90 min |
| Herdwagenofen | Unterglasurbrand | 1.370 - 1.420 °C | 18 - 30 h |
| Tunnelofen mit Wagen | Unterglasurbrand | 1.370 - 1.420 °C | 18 - 30 h |
| Tunnelofen mit Platten | Unterglasurbrand | 1.370 - 1.420 °C | 12 - 16 h |
| Schnellbrand-Tunnelofen mit Schlitten oder Brenntisch | Unterglasurbrand | 1.370 - 1.420 °C | 3 - 4 h |
| Rollenofen mit Spezialrollen | Unterglasurbrand | 1.350 °C | 2 - 4 h |

Quelle: [125]

Bei der Geschirrkemikherstellung werden in allen Ofentypen überwiegend Erdgas und Flüssiggas als Brennstoffe eingesetzt. Andere Brennstoffe, wie z.B. Heizöl, werden in Anlagen zum Brennen von Geschirrkemik dagegen selten verwendet.

Produktionsabwasser fällt in Form von Reinigungswasser an den Glasurmaschinen und in der Dekorabteilung an [111]. Der aus dem Reinigungswasser abgeschiedene Weißschlamm fällt als Abfall an. Je nachdem ob ein Betrieb zur Herstellung von Dekorbildern eine eigene Druckerei besitzt, fallen zusätzlich Abfälle in Form von Buntdruckpapier, Farbschlämmen, Fixier- und Entwicklerbädern an [124].

Beim Brennprozess entstehen außerdem Glüh-, Glatt- und Buntbruch sowie Feuerfestbruch. Als Glühbruch werden fehlerhafte Teile, die einen Brennprozess bei ca. 1.000 °C durchlaufen haben, als Glattbruch fehlerhafte Weißgeschirrteile und als Buntbruch fehlerhafte dekorierte Teile bezeichnet. Feuerfestbruch entsteht beim Ausbrechen von Ofen- und Wagenteilen und durch Abfälle, die durch verschlissene Brennhilfsmittel wie Kapseln und Wagenaufbauten entstehen [125].

2.2.1.6 Nachbehandlung

Nach dem Dekorbrand wird die Ware auf Qualität kontrolliert und sortiert. Auf Schleif- und Poliermaschinen erfolgt der Nassschliff von Tassenrändern sowie das Glätten der Standflächen von Flach- und Hohlgeschirren. Bestimmte Teile werden vor der Kartonagenverpackung maschinell vorverpackt. Danach erfolgen Zusammenstellung zu Verkaufs- und Versandeinheiten und die manuelle Kartonagenverpackung [57].

Bei einer modernen Geschirrkeraufkfertigung erfolgt die Handhabung der Halbfabrikate zwischen den Prozessstufen der Formgebung, der Trocknung, des Brennens und der Nachbehandlung vollautomatisch mit Hilfe von Robotern [19, 20].

Bei der Nachbearbeitung der gebrannten Ware durch das Schleifen, Polieren, Planieren und Drehen im Nassverfahren fällt Abwasser an [111]. Bei der Verpackung fallen Abfälle wie Kunststoffe, Altpapier und Gewerbemüll an. Zusätzlich fallen in den Abgas- und Abwasserreinigungsanlagen Stäube, Schlämme und verbrauchte Sorptionsmittel an [124].

Die wichtigsten Input- und Outputströme, die während des Gesamtprozesses bei der Herstellung von Geschirrkeraufk auftreten, sind zusammenfassend in Abbildung 2-10 dargestellt.

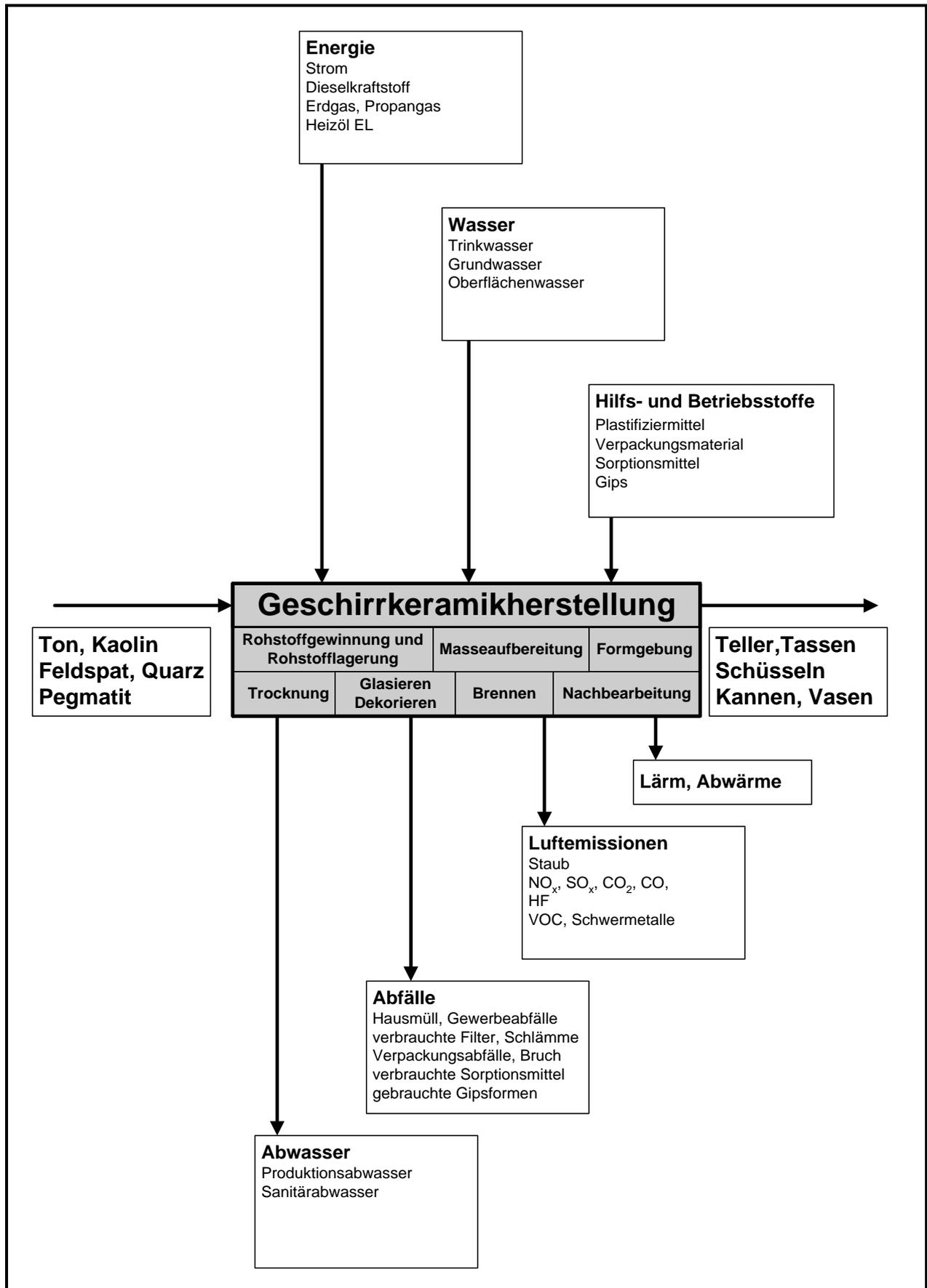


Abbildung 2-10: Input- und Outputströme des Gesamtprozesses bei der Herstellung von Geschirrkeramik

2.2.2 Herstellung von Sanitärkeramik

Für sanitäre Zwecke verwendete keramische Erzeugnisse werden unter dem Sammelbegriff Sanitärkeramik zusammengefasst. Zu den typische Produkten der Sanitärkeramik gehören Klosetts, Bidets, Spül-, Wasch- und Spuckbecken sowie Trinkbrunnen. Diese Erzeugnisse werden überwiegend aus Vitreous China, einem Halbporzellan, oder aus Steingut hergestellt [57].

In der Tabelle 2-8 sind die Bandbreiten der Anlagenkapazitäten deutscher Hersteller von Sanitärkeramik dargestellt.

Tabelle 2-8: Bandbreiten der Anlagenkapazitäten in der Sanitärkeramik

| Produktgruppe | Produktionskapazität [t/d] | Ofenraumvolumen [m ³] | Besatzdichte [kg/m ³] |
|------------------|-------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Sanitärporzellan | 22 – 52 | bis zu 600 | bis zu 150 |

Abbildung 2-11 zeigt eine schematische Darstellung der Sanitärkeramikherstellung, bei der die Verfahrensstufen Rohstoffgewinnung und Rohstofflagerung, Masseaufbereitung, Formgebung, Trocknung, Glasieren, Brennen und Nachbehandlung durchlaufen werden.

2.2.2.1 Rohstofflagerung

Als Rohstoffe werden Kaoline, Tone, Quarz, Feldspate und Calciumcarbonat eingesetzt. Ein typischer Versatz besteht aus 40 bis 50 % Kaolinen und Tonen, 20 bis 30 % Quarz, 20 bis 30 % Feldspat und zwischen 0 und 3 % Calciumcarbonat.

Die Kaoline werden vorzugsweise in stückiger Form mit einer maximalen Feuchtigkeit von 15 % eingelagert. Hartstoffe, wie Quarz oder Feldspat, werden feinstgemahlen und mit einem Feuchtigkeitsgehalt von weniger als einem Prozent eingesetzt. Die Rohstofflagerung erfolgt witterungsgeschützt in Boxen oder Silos [57].

2.2.2.2 Masseaufbereitung

Bei der Herstellung von Sanitärkeramik wird überwiegend die Nassaufbereitung angewendet. Kaoline und Tone werden in Zahnwalzenbrechern oder ähnlichen Aggregaten grob vorzerkleinert. Danach erfolgt die Feinzerkleinerung auf eine Korngröße kleiner 5 mm. Zur weiteren Masseaufbereitung werden die Tone mittels Lösern aufgeschlämmt und grobe Verunreinigungen von der pumpfähigen Suspension abgesiebt. Anschließend wird die abgesiebte und auf die jeweilige vorgeschriebene Dichte eingestellte Tonsuspension in Lagerbehältern unter langsamen Rühren homogenisiert.

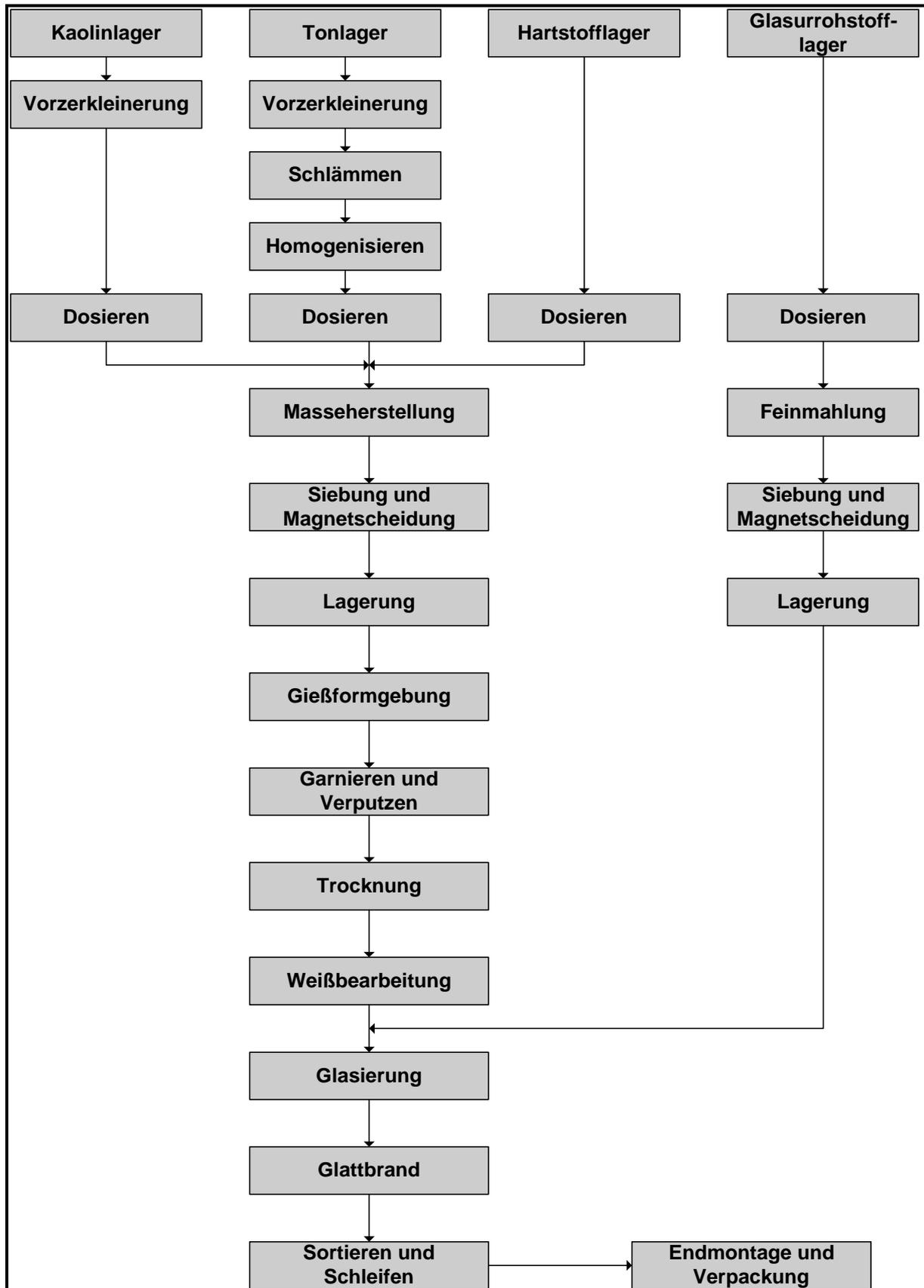


Abbildung 2-11: Schematische Darstellung der Sanitärkeramikherstellung

Quelle: [57]

Die Dosierung der Versatzkomponenten erfolgt entsprechend ihrer Beschaffenheit nach dem gravimetrischen Verfahren. Zusätzlich werden Elektrolyte zugegeben. Die Herstellung der Massesuspension erfolgt in Rührwerksbehältern mit intensiver Lösewirkung [57].

Die traditionelle Masseherstellung erfolgt durch Nassmahlung in der Trommelmühle. Durch die anschließende mehrtägige Lagerung in Behältern mit langsam laufenden Rührwerken werden die technologischen Eigenschaften der Gießmasse verbessert [57]. Um die Gießmasse bei einem möglichst geringen Wassergehalt gießfähig zu halten, werden Verflüssigungs- und Stabilisierungsmittel, wie Soda, Wasserglas, Natronlauge, Pottasche oder auch Humussäurepräparate, zugegeben [111].

Die Feinmahlung der Glasurrohstoffe erfolgt ebenfalls in Nasstrommelmühlen. Zur Verbesserung der Haft- und Griffestigkeit können der fertigen Glasur nach Beendigung der Mahlung Bindemittel wie Carboxymethylcellulose oder Polyamine zugesetzt werden. Zur Reinigung der Masse und der Glasur von magnetischen Fremdbestandteilen, die den Brand färben können, werden Permanentmagnete verwendet [103].

In den Aufbereitungsanlagen fällt Produktionsabwasser in Form von Reinigungswasser an. Das Reinigungswasser entsteht vorwiegend beim Reinigen des Raumes in dem der Kollergang steht, beim Reinigen der Masse-Trommelmühle und der Glasur-Trommelmühle, der Aufschlämmungs- und Dispergieranlagen sowie der Siebe und Pumpen [111]. Als Abfall fallen bei der Masseaufbereitung Massefehlchargen, Siebrückstände und Weißschlamm an [124].

2.2.2.3 Formgebung

Zur Ausformung der Sanitärkeramikerzeugnisse werden heutzutage größtenteils noch Gipsformen verwendet. Die Entwicklung geht jedoch hin zu einer gipsfreien Formgebung, die in porösen Kunststoffformen durchgeführt wird.

Die Gießformgebung findet durch Wasserentzug aus dem Gießschlicker an den porösen Flächen der aus Gips bestehenden Gießform statt, wobei es zur Scherbenbildung kommt. Die Scherbenbildungszeit kann durch das Ausüben von Druck verkürzt werden. Komplizierte Artikel des Sanitärbedarfs werden überwiegend durch Hohl-guss bzw. Hohl-gussgrundkörper erzeugt, die mit Vollgussgarnierteilen komplettiert und verbunden werden. Durch das Garnieren von Beiteilen, die in gesonderten Gipsformen parallel zum Guss der Hauptkörper gegossen werden, entsteht die endgültige Form der sanitärkeramischen Erzeugnisse. Nach Entnahme aus der Gipsform werden die Formennähte verputzt sowie nachträgliche Bearbeitungen durchgeführt. Sowohl das Verputzen der Formennähte als auch die Handhabung der Formlinge erfolgt größtenteils automatisch [83].

In zunehmendem Maße werden bei der Formgebung Maschinen mit mehrteiligen Kunststoffformen in Verbindung mit Druckguss eingesetzt. Je nach Erzeugnis können vier- oder fünfteilige Kunststoffformen eingesetzt werden. Zur Verkürzung der Scherbenbildungszeit wird mit Drücken von bis zu drei MPa gearbeitet womit bei der Herstellung von WCs Formgebungszyklen zwischen fünf und acht Minuten erreicht werden [8]. Das Blindscherben-Schneiden sowie das Einsetzen von Garnierteilen erfolgt während das Stück in der Form gehalten wird. Die Kunststoffformen haben gegenüber den Gipsformen den Vorteil, dass sie weniger verschleißanfällig und leichter zu reinigen sind [83].

Produktionsabwasser fällt bei der Formgebung überwiegend in Form von Reinigungswasser in der Gießerei und in den Herstellungsanlagen der Gipsformen an [111]. Durch Gipsbruch und Verschleiß der Gießformen entsteht zusätzlich Abfall [124].

2.2.2.4 Trocknung und Glasieren

Den entformten Rohlingen wird in zwei Trocknungsstufen die Feuchtigkeit entzogen. Nach Lederharttrocknung werden die Rohlinge meist so weit bearbeitet, dass keine nennenswerte Nachbearbeitung mehr notwendig ist. Nach der anschließenden Weißtrocknung beträgt der Restfeuchtegehalt weniger als ein Prozent. Der Trockenvorgang erfolgt überwiegend in Tunnel- oder Kammertrocknern [83]. Mikrowellentrockner sind ebenfalls zur Lederhart- und Weißtrocknung bei der Sanitärkeramikherstellung geeignet und werden vorzugsweise als Durchlaufanlagen eingesetzt [107]. Tabelle 2-9 zeigt typische Betriebsdaten von Trocknern.

Tabelle 2-9: Betriebsdaten periodischer Trockner

| | Einheit | |
|-------------------|-------------------|--------------------------------------|
| Trockengut | | Waschbecken oder Klosett oder im Mix |
| Kapazität | t/Zyklus | 4 – 45 |
| Trocknervolumen | m ³ | 30 – 375 |
| Besatzdichte | kg/m ³ | 30 – 200 |
| Trockentemperatur | °C | 60 – 90 |
| Trocknungsdauer | h | 8 – 20 |
| spez. Wärmebedarf | kJ/kg | 300 – 1.400 |
| Abgasvolumenstrom | m ³ /h | 2.000 – 20.000 |
| Abgastemperatur | °C | 60 – 150 |

Quelle: [Angaben des Fachverbandes]

Die weißgetrockneten Rohlinge werden auf Risse und andere Fehler geprüft und noch vorhandene Unebenheiten werden verputzt. Anschließend wird die gesamte Oberfläche der Rohlinge von anhaftenden Staub- und Masseresten befreit.

Durch Spritzen, Tauchen oder Begießen mit Glasur wird die Artikeloberfläche meist mittels eines Glasurroboters vergütet. Je nach Eigenfärbung des Scherbens und nach Trübungsmittelanteil in der Glasur muss eine Schichtdicke von 0,3 bis 0,5 mm aufgebracht werden. Durch Spritzen im elektrischen Feld kann die Auftragsqualität wesentlich verbessert werden [57]. Bei der regelmäßigen Reinigung der Glasurroboter fällt Reinigungsabwasser [111] und Weißschlamm [15] an.

2.2.2.5 Brennvorgang

Sanitärkeramikerzeugnisse werden bei Temperaturen von 1.250 bis 1.290 °C vorzugsweise in Tunnelöfen mit Wagenförderung und Rollenöfen glattgebrannt. Der Brand erfolgt in oxidierender Atmosphäre. Dabei wird ein Wasseraufnahmevermögen des Scherbens von weniger als einem Prozent erreicht. Bei der Produktion von Kleinserien hingegen werden aufgrund der notwendigen Flexibilität periodisch betriebene Öfen, wie z.B. Herdwagenöfen eingesetzt. Diese ermöglichen die Änderung der produktspezifischen Brennkurven in relativ kurzen Zyklen [83].

Typische Betriebsdaten bei der Herstellung von Sanitärkeramik verwendeter Öfen zeigen Tabelle 2-10 und Tabelle 2-11.

Tabelle 2-10: Betriebsdaten von Tunnelofenanlagen

| | Einheit | |
|---------------------|-------------------|-----------|
| Kapazität | t/h | 1,7 |
| Ofenlänge | m | 120 |
| Ofennutzquerschnitt | m ² | 1 - 2 |
| Besatzdichte | kg/m ³ | 100 - 150 |
| Brenntemperatur | °C | 1.260 |
| spez. Wärmebedarf | kJ/kg | 5.200 |
| Abgasvolumenstrom | m ³ /h | 12.000 |
| Abgastemperatur | °C | 180 |

Quelle: [116]

Tabelle 2-11: Betriebsdaten von Herdwagenofenanlagen

| | Einheit | |
|-------------------|-------------------|------------|
| Kapazität | t/Brand | 15 |
| Brennraumvolumen | m ³ | 150 |
| Besatzdichte | kg/m ³ | 100 |
| Brenntemperatur | °C | 1.250 |
| spez. Wärmebedarf | kJ/kg | 7.600 |
| Abgasvolumenstrom | m ³ /h | bis 50.000 |
| Abgastemperatur | °C | 100 – 250 |

Quelle: [116]

Zur Befeuerung der Brennanlagen werden überwiegend Erdgas und Flüssiggas eingesetzt. Heizöl EL bzw. Heizöl S wird in Anlagen zum Brennen feinkeramischer Erzeugnisse dagegen selten eingesetzt.

Beim Brennprozess fallen Glattbruch und Feuerfestbruch an. Als Glattbruch werden fehlerhafte Teile, die den Brennprozess durchlaufen haben, bezeichnet. Der Feuerfestbruch besteht aus Ausbrüchen der Öfen und Ofenwagen und Abfällen, die aus verschlissenen Brennhilfsmitteln resultieren [125].

2.2.2.6 Nachbehandlung

Nach der Endsortierung der gebrannten Sanitärartikel werden erforderlichenfalls die Montageflächen durch Nassschleifen nachgearbeitet. In Sonderfällen werden z.B. WCs mit Spülkästen und den nötigen Armaturen komplettiert und verpackt [57].

Beim Nassschleifen fällt Produktionsabwasser in Form von Schleifwasser an [111]. Bei der Verpackung entstehen Abfälle wie Kunststoffe, Altpapier und Gewerbemüll. Zusätzlich fallen in den Abgasreinigungsanlagen Stäube, Schlämme und verbrauchte Sorptionsmittel an [124].

Abschließend sind in der Abbildung 2-12 die wichtigsten Input- und Outputströme des Gesamtprozesses bei der Sanitärkeramikherstellung dargestellt.

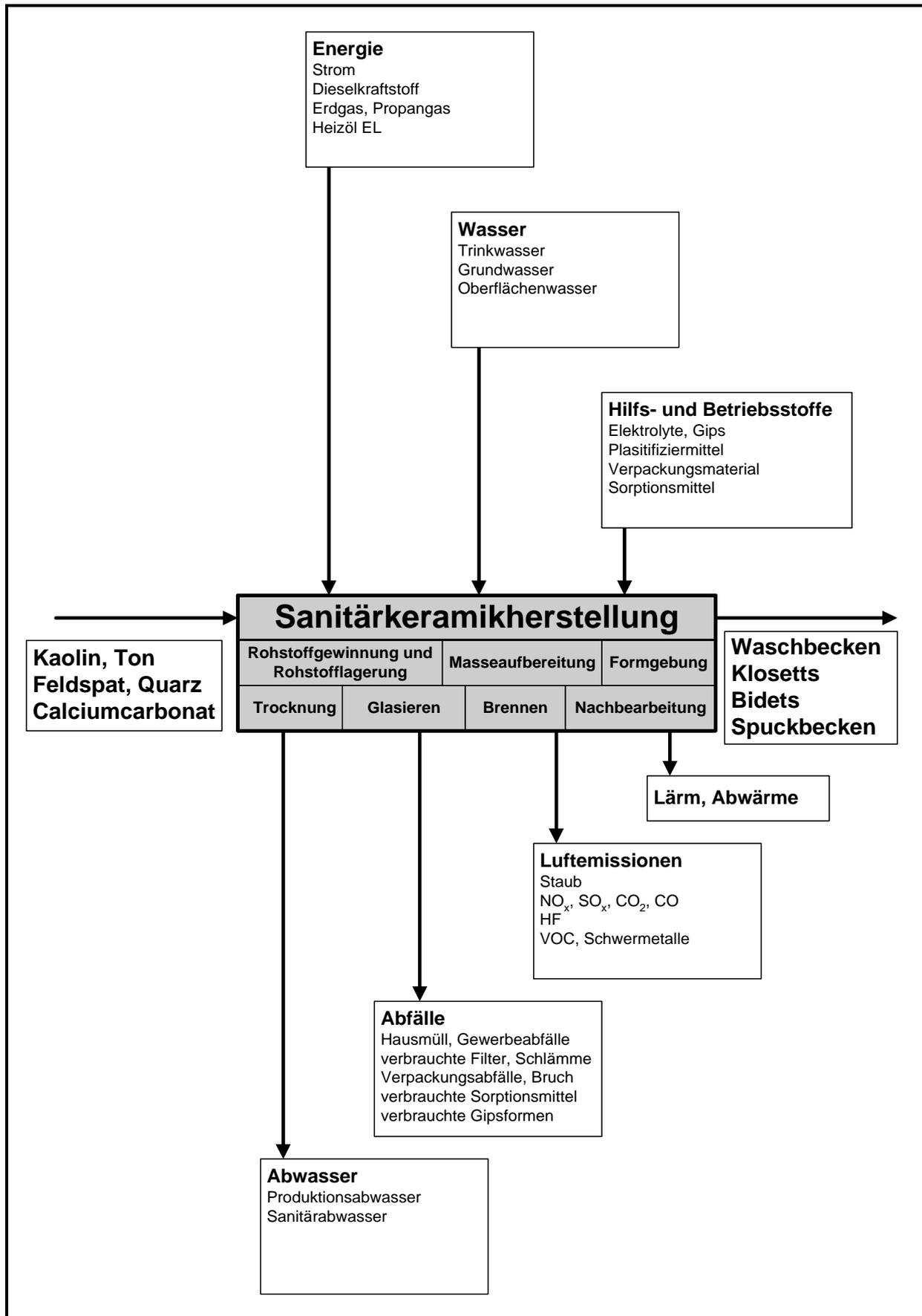


Abbildung 2-12: Input- und Outputströme des Gesamtprozesses bei der Herstellung von Sanitärkeramik

2.2.3 Herstellung keramischer Fliesen und Platten

Fliesen und Platten werden als keramische Bauteile für Boden-, Wand- und Deckenbeläge verwendet, Kacheln vorwiegend für Zimmeröfen und Herde. Bei der Herstellung von keramischen Fliesen, Kacheln und Platten wird zwischen Steinzeug und Steingut unterschieden. Beide keramischen Erzeugnisse werden glasiert und unglasiert hergestellt. Steinzeugfliesen besitzen im Gegensatz zu Steingutfliesen eine größere Härte und sind frostsicher [59].

Über die Bandbreiten der Anlagenkapazitäten deutscher Hersteller von keramischen Fliesen und Platten gibt Tabelle 2-12 Auskunft.

Tabelle 2-12: Bandbreiten der Anlagenkapazitäten bei der Herstellung keramischer Fliesen und Platten

| Produktgruppe | Produktionskapazität [t/d] | Ofenraumvolumen [m ³] | Besatzdichte [kg/m ³] |
|-------------------|-------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Großformatfliesen | 190 - 420 | > 4 | < 300 |

Die Abbildung 2-13 zeigt schematisch den Verfahrensablauf bei der Herstellung glasierter im Einbrandverfahren hergestellter Wandfliesen. Der Prozess läuft über die Verfahrensschritte Rohstoffgewinnung und Rohstofflagerung, Masseaufbereitung, Formgebung, Trocknung, Glasieren, Brennen und Nachbehandlung ab.

2.2.3.1 Rohstofflagerung

Bei der Herstellung von keramischen Fliesen, Kacheln und Platten kommen als plastische Rohstoffe hauptsächlich Kaoline und Tone, als Hartstoffe und Flussmittel Schamotte, Quarz und Feldspäte zum Einsatz. In Verbindung mit Glasurfritten, Metalloxiden, Farbpigmenten und Farberzen werden die gleichen Rohstoffe auch als Glasuren verwendet. Zur Verringerung des Energieeinsatzes beim Trocknen werden Elektrolyte, wie z.B. Natriumsilikat oder Pyrophosphat, zugegeben. Diese Elektrolyte erlauben einen reduzierten Wassereinsatz [57].

Die Versatzkomponenten werden dem Rohstofflager zum größten Teil als Schüttgut angeliefert. Die Rohstoffeinlagerung erfolgt auf Freiflächen, in Lagerhallen, Boxen oder Silos. Kleinere Mengen werden in Säcken oder Containern angeliefert und gelagert, flüssige Rohstoffe in fest verschlossenen Gebinden [125].

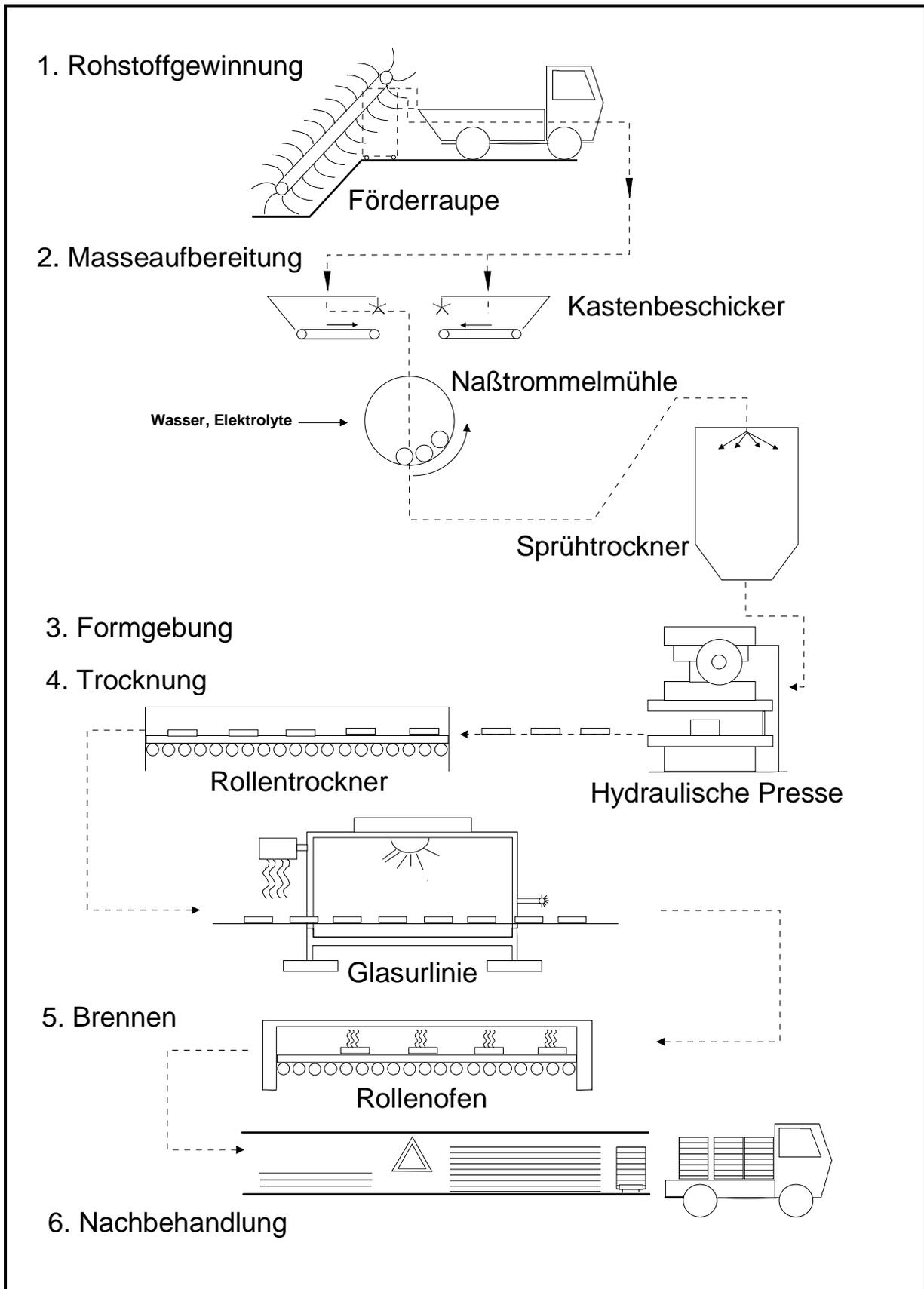


Abbildung 2-13: Schematische Darstellung der Wandfliesenherstellung

Quelle: [57]

2.2.3.2 Masseaufbereitung

Die Dosierung der Rohstoffe geschieht gravimetrisch unter Berücksichtigung der Rohstofffeuchtigkeit. Zur Einfärbung der Massen werden geringe Mengen der Pigmente, Metalloxide oder Farberze zugegeben. Grobstückige Rohstoffe werden in Walzenmühlen oder im Tonwolf vorzerkleinert. Sie gelangen nach der Wägung einschließlich des Wassers und der Elektrolyte zur Aufbereitung und Zerkleinerung in Nasstrommelmühlen [57].

Eine andere Aufbereitungsvariante besteht darin, die versatzgerecht dosierten Rohstoffe in großräumige Löser zu füllen, dort aufzuschlämmen und zu homogenisieren. Aus den Lösern wird die Suspension in Nasstrommelmühlen gepumpt. Der Wassergehalt beträgt etwa 35 %. Der Feinmahlung auf Korngrößen kleiner 0,1 mm folgt eine stufenweise Absiebung und die Zwischenlagerung des Schlickers in mit Rührern versehenen Vorratsbehältern. Der Schlicker wird anschließend entweder zu einer plastischen Masse oder zu einer Pressmasse aufgearbeitet. Die Herstellung und Verarbeitung von Gießmassen spielt bei der Fliesen- und Plattenherstellung dagegen nur eine untergeordnete Rolle [93]. Bei der Herstellung plastischer Massen wird der Schlicker mit Hilfe von Filterpressen oder Drehzellenfiltern auf etwa 20 bis 25 % Feuchtigkeit entwässert. Zur Verbesserung der Bildsamkeit der plastischen Masse können organische und anorganische Stoffe zugegeben werden. Diese sind beispielsweise Alginat, Dextrin, Lignin, Methyl- und Ethylcellulosen und Paraffine [111].

Zum überwiegenden Teil werden Fliesen aus Pressmassen bzw. Sprühgranulat hergestellt. Dazu wird der Masseschlicker aus den Vorratsbehältern mittels Membranpumpen in Sprüh- oder Zerstäubungstrockner gedrückt. Hier erfolgt bei Temperaturen zwischen 450 und 600 °C die Trocknung bis auf einen Restfeuchtegehalt von durchschnittlich fünf bis neun Prozent Wasser. Die zum Trockenprozess notwendige Hitze im Sprühtrockner wird mit Erdgas- oder Heizölfeuerungen erzeugt [125]. Den Pressmassen werden organische Gleit- und Bindemittel zugesetzt, um das Granulat weicher und gleitfähiger zu machen. Dabei kommen beispielsweise Carboxymethylcellulosen (CMC), Methylcellulosen (MC), Zelluloseether (CE), Polyvinylalkohole (PVA), Polyvinylacetate (PVAc) und Polysaccharide (PS) zu Einsatz [106]. Es werden auch Olein, Mineralöle, Stearinsäure und Wachse verwendet [111].

In den Aufbereitungsanlagen können Produktions- und Reinigungswässer anfallen. Das Reinigungswasser entsteht vorwiegend beim Reinigen des Raumes in dem der Kollergang steht, beim Reinigen der Masse-Trommelmühle und der Glasur-Trommelmühle, der Aufschlämmungs- und Dispergieranlagen sowie der Siebe und Pumpen. Produktionsabwasser fällt hauptsächlich beim Entwässern des Schlickers in den Filterpressen und Drehzellenfiltern an [111]. Als Abfälle fallen bei der Masseaufbereitung Weißschlamm, Massefehlchargen und Siebrückstände an [124].

2.2.3.3 Formgebung

Bei der Verarbeitung der plastischen Massen werden die Hubel durch das Mundstück einer Strangpresse entsprechend der gewünschten Geometrie geformt und mittels eines Abschneiders auf die gewünschte Länge geschnitten. Typische aus diesen Formlingen hergestellte Produkte sind z.B. Spaltplatten [93].

Steinzeug- und Steingutfliesen werden heutzutage überwiegend aus Pressmassen hergestellt. Die Pressmassen bzw. das Sprühgranulat wird nach einer Zwischenlagerung mit Kniehebelpressen, Friktionspressen oder hydraulischen Pressen zu Formlingen geformt. Hierbei werden spezifische Pressdrücke von etwa 35 MPa erzeugt. Es finden dabei in der Regel Mehrfachwerkzeuge für vier Fliesen Anwendung. Die gepressten Fliesenformlinge werden anschließend geputzt und dann manuell oder mit einem Setzautomaten auf den Tunnelofenwagen oder die Rollen des Trockners gesetzt [57]. Beim Pressen und Putzen der Formlinge entstehen Abfälle in Form von verpresstem und unverpresstem Granulat [124].

2.2.3.4 Trocknung

Zur Trocknung der Formlinge werden hauptsächlich Durchlauftrockner, wie z.B. Tunneltrockner mit Speicherwagen oder Rollentrockner, eingesetzt. Die Trocknerbeheizung erfolgt durch Ofenabwärme oder durch gas- bzw. ölbeheizte Brenner. Abhängig von der Restfeuchte der Formlinge beträgt die Trockendauer bei Fliesen zwischen einer und vier Stunden [83]. Nach der Trocknung sollte die Restfeuchte ein Prozent nicht überschreiten, um Risse und Glasurfehler beim Brand zu vermeiden.

2.2.3.5 Brennvorgang und Glasieren

Fliesen werden glasiert oder unglasiert im Einbrandverfahren oder glasiert im Zweibrandverfahren hergestellt. Beim Zweibrandverfahren folgt der Trocknung zunächst der Schrüh- bzw. Glühbrand. Der Glühbrand wird bei 1.050 bis 1.150 °C entweder im klassischen Tunnelofen in 20 bis 50 Stunden oder im Rollenofen in 1 bis 2 Stunden durchgeführt. Seltener werden Herdwagenöfen und Ringöfen eingesetzt. Daran schließt sich die vollmechanisierte Glühsortierung an, bevor die geglühten Formlinge über Bandanlagen zum Glasieren gelangen [59]. Die Fliesenglasur wird im Spritzverfahren oder im Wasserfallverfahren aufgetragen. Bei Kacheln erfolgt das Glasieren ebenfalls mit Spritzbändern, Spritzkabinen oder nach dem Wasserfallverfahren. Die Glasiermaschinen sind mit einer Tupfapparatur ausgerüstet, die eine Marmorierung der Fliesen ermöglicht. Zusätzlich können die Fliesen mit Siebdruckautomaten dekoriert werden. Die Glasurrohstoffe werden oft als Fritten fertig bezogen, d.h. alle Komponenten wurden bereits eingewogen, gebrannt und wieder aufgemahlen. Dieses Verfahren hat den Vorteil, dass Beimengungen, wie z.B. Blei, molekular gebunden und durch Wasserzugabe in diesem Prozessschritt nicht ausgewaschen werden können [125].

Der folgende Glattbrand wird meist in gasbeheizten Rollen- und Tunnelöfen oder in periodisch betriebenen Öfen durchgeführt. Zum Glattbrand im Tunnelofen werden die glasierten Fliesen in Brennhilfsmittel eingelegt und bei Temperaturen von 1.050 bis 1.300 °C gebrannt. Bei der Kachelherstellung erfolgt der Glattbrand in Herdwagen- oder Tunnelöfen bei Temperaturen von bis zu 1.100 °C. Beim Glattbrand im Rollenofen kann auf Brennhilfsmittel verzichtet werden [57]. In Tabelle 2-13 sind typische Betriebsdaten zum Fliesenbrand eingesetzter Öfen aufgeführt.

Tabelle 2-13: Betriebsdaten von Tunnel- und Schnellbrandöfen

| | Einheit | Fliesen mit hoher Wasseraufnahme | | | Fliesen mit niedriger Wasseraufnahme | | |
|---------------------|-------------------|----------------------------------|------------|------------|--------------------------------------|------------|------------|
| | | Glühbrand | Glattbrand | Einbrand | unglasiert | unglasiert | glasiert |
| | | Tunnelofen | Rollenofen | Rollenofen | Tunnelofen | Rollenofen | Rollenofen |
| Kapazität | t/h | 2,8 | 1,2 | 1,6 | 1,2 | 2,1 | 2,1 |
| Ofenlänge | m | 120 | 60 | 80 | 130 | 80 | 60 |
| Ofennutzquerschnitt | m ² | 1,5 – 2 | 0,8 - 1,2 | 0,5 - 1 | 1,5 - 2 | 1,2 | 0,8 - 1,2 |
| Besatzdichte | kg/m ³ | 500 – 700 | 10 - 30 | 10 - 30 | 700-1.000 | 20 - 30 | 20 - 30 |
| Brenntemperatur | °C | 1.100 | 1.250 | 1.300 | 1.200 | 1.220 | 1.230 |
| spez. Wärmebedarf | kJ/kg | 3.500 | 2.900 | 2.200 | 3.900 | 2.900 | 2.500 |
| Abgasvolumenstrom | m ³ /h | 15.000 | 10.000 | 13.000 | 15.000 | 10.000 | 13.000 |
| Abgastemperatur | °C | 180 | 160 | 200 | 220 | 160 | 160 |

Quelle: [116]

Beim Reinigen der Glasiermaschinen fallen Produktionsabwasser [111] und Weißschlamm [15], beim folgenden Brennprozess fallen Glüh-, Glatt- und Feuerfestbruch an. Als Glühbruch werden fehlerhafte Teile bezeichnet, die den Glühbrand bei ca. 1.100 °C durchlaufen haben. Der Glattbruch besteht aus fehlerhaften glasierten Teilen, die bei etwa 1.250 °C gebrannt wurden. Feuerfestbruch besteht im Wesentlichen aus Ausbrüchen der Öfen und Ofenwagen sowie aus verschlissenen Brennhilfsmitteln [124].

2.2.3.6 Nachbehandlung

Nach dem Glattbrand werden die Kacheln geschliffen und es erfolgt die manuelle oder maschinelle Sortierung. Abschließend werden die Fliesen und Platten in Kartons verpackt und palettiert. Die Paletten werden dann im Schrumpffolienofen mit einer Polyethylenfolie überzogen [125]. Im Rahmen der Nachbehandlung entsteht beim Nassschleifen Schleifabwasser. Bei der Verpackung fallen Abfälle, wie z.B. Kunststoffe, Altpapier und Gewerbemüll, an. In den Abgasreinigungsanlagen entstehen zusätzlich Abfälle durch abgeschiedene Stäube, Schlämme und verbrauchte Sorptionsmittel [124].

In der Abbildung 2-14 sind zusammenfassend die wichtigsten Input- und Outputströme des Gesamtprozesses bei der Herstellung keramischer Fliesen und Platten dargestellt.

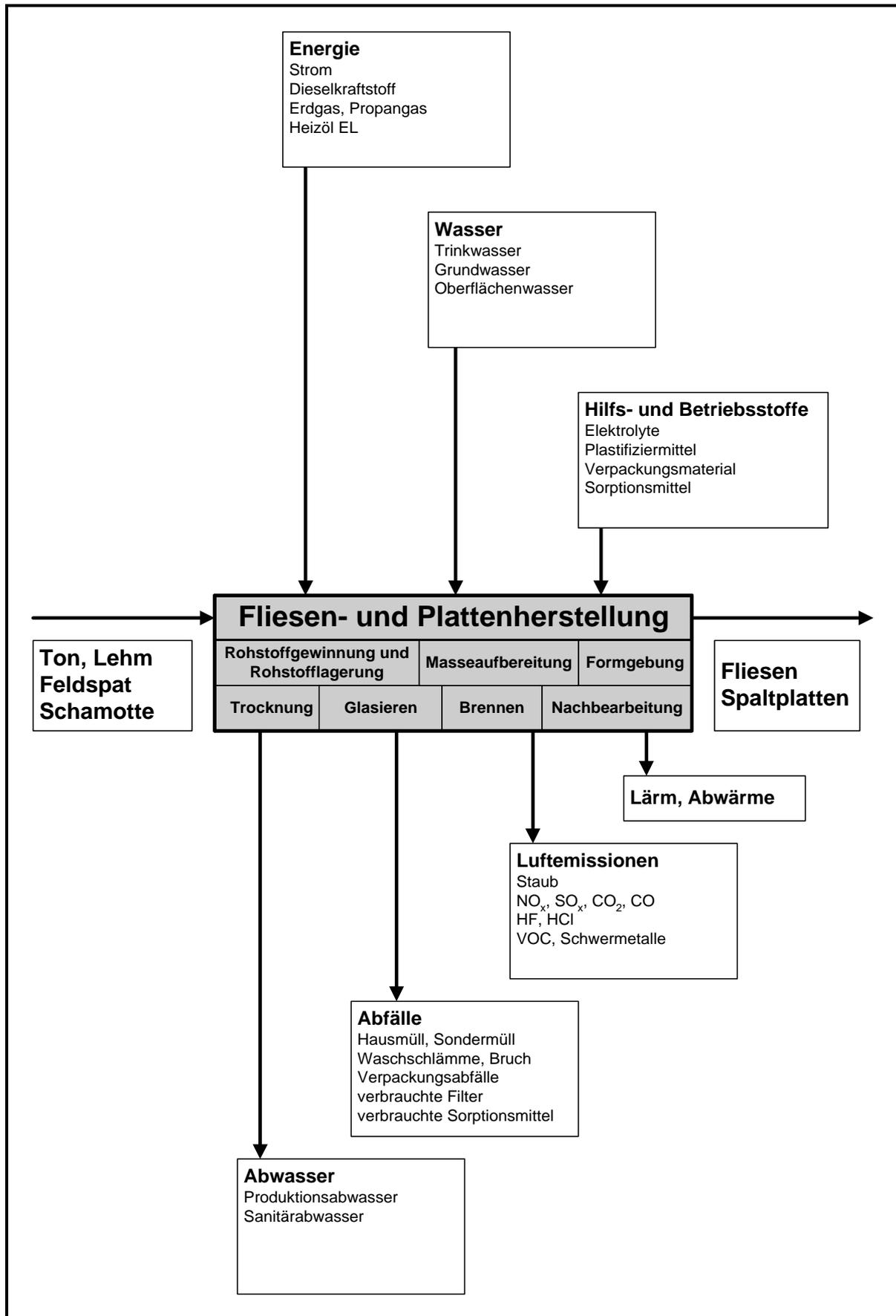


Abbildung 2-14: Input- und Outputströme des Gesamtprozesses bei der Herstellung von keramischen Fliesen und Platten

2.3 Darstellung von Verfahren zur Herstellung grobkeramischer Erzeugnisse

Die Grobkeramik umfasst werkstofflich und technologisch vor allem die keramischen Baustoffe und die Feuerfesterzeugnisse. Grobkeramische Produkte besitzen eine Inhomogenitätsgrenze von mehr als 0,2 mm [45]. Der Übergang zwischen der Feinkeramik und der Grobkeramik ist heute fließend. So haben sich zum Beispiel in der Feuerfest-Industrie bei der Herstellung hochfeuerfester Erzeugnisse feinkeramische Arbeitsprinzipien durchgesetzt [26]. Zu den grobkeramischen Erzeugnissen gehören unter anderem [92]:

- Ziegeleierzeugnisse,
- Erzeugnisse aus Grobsteinzeug,
- Feuerfeste Erzeugnisse,
- Keramische Spaltplatten und Spaltriemchen,
- Scherben und Bruch von grobkeramischen Erzeugnissen.

In der grobkeramischen Industrie werden bei der Herstellung von silikatkeramischen Erzeugnissen, wie Ziegeln, Klinkern und Steinzeugrohren, vorwiegend Tone oder tonhaltige Materialien (Schiefer-ton, Lehm, Mergel) verwendet. Zur Erzielung eines größeren Porenvolumens können organische Porosierungsmittel, wie z.B. Sägemehl, Papierfangstoff oder geschäumtes Polystyrol, und anorganische Porosierungsmittel, wie z.B. Kieselgur oder Perlit, eingesetzt werden. Zum Teil werden grobkeramische Erzeugnisse auf den Sichtflächen oder der gesamten Oberfläche engobiert oder glasiert. Das Aufbringen der Glasur oder der Engobe geschieht normalerweise nach dem Trocknen, bei einigen Erzeugnissen auch am frischen oder gebrannten Formling [116].

Feuerfeste grobkeramische Erzeugnisse bestehen neben Ton, Schamotte und natürlichen Gesteinen wie Quarzit, Dolomit, Bauxit und Magnesit zusätzlich aus synthetischen Ausgangsstoffen wie z.B. Sinterkorund, Siliciumcarbid, Schmelzmullit und Spinell. Zur Herstellung pressfähiger Massen werden auch Bindemittel und Zuschlagstoffe zugegeben [116].

Bei der Herstellung grobkeramischer Produkte werden neben den oben genannten Grund- und Hilfsstoffen auch Brennhilfsmittel, Brennstoffe und Sorptionsmittel eingesetzt. Die Brennhilfsmittel bestehen, ähnlich wie in der Feinkeramik, aus meist wiederverwertbaren Kapseln, Platten und Stützen aus feuerfester Keramik. In den Abgasreinigungsanlagen grobkeramischer Betriebe werden Sorptionsmittel, wie zum Beispiel Calciumcarbonat, Calciumhydroxid oder Feinkalk, eingesetzt [125].

2.3.1 Herstellung von Ziegelerzeugnissen

Bei Ziegelerzeugnissen handelt es sich um Massenprodukte, die als Baustoffe in den verschiedensten Bereichen des Baugeschehens Anwendung finden. Nach ihrem Verwendungszweck bzw. Herstellungsverfahren werden unterschieden [14]:

- Mauerziegel (z.B. Hintermauerziegel, Vormauerziegel, Deckenziegel, Leichthochlochziegel, Langlochziegel, Klinker, Hourdis),
- Dachziegel (z.B. Pressdachziegel, Strangdachziegel),
- Pflasterklinker,
- Schornsteinziegel (z.B. Schornsteinleitungen, Rauchleitungen).

Aufgrund der unterschiedlichen Technologien bei der Herstellung der einzelnen Ziegelerzeugnisse haben sich verschiedene auf Produktgruppen spezialisierte Werksformen, wie z.B. Mauerziegelwerke und Dachziegelwerke, entwickelt. In Deutschland wurden 1999 42 % des Umsatzes der Ziegelindustrie mit Mauerziegeln und 37 % des Umsatzes mit Dachziegeln erzielt. Der Gesamtumsatz der Ziegelerzeugnisse betrug rund 3,75 Mrd. DM [110]. In der Tabelle 2-14 sind die Bandbreiten der Anlagenkapazitäten von deutschen Ziegeleien dargestellt.

Tabelle 2-14: Bandbreiten der Anlagenkapazitäten von Ziegeleien

| Produktgruppe | Produktionskapazität [t/d] | Ofenraumvolumen [m ³] | Besatzdichte [kg/m ³] |
|---------------|-------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Dachziegel | 100 – 300 | > 4 | 100 – 400 |
| Mauerziegel | 100 – 660 | > 4 | > 300 |
| Klinker | 60 – 85 | > 4 | > 300 |

In beiden Werksformen werden bei der Herstellung der Ziegelprodukte die Prozessstufen Rohstoffgewinnung und Rohstofflagerung, Masseaufbereitung, Formgebung, Trocknung, Brennen und Nachbehandlung durchlaufen. Bei besonderen Anforderungen an die Oberfläche und Farbe der Ziegelerzeugnisse findet eine zusätzliche Oberflächenbehandlung durch Glasieren, Engobieren oder Oberflächenstrukturierung statt [14]. In Abbildung 2-15 ist beispielhaft der schematische Ablauf der Pressdachziegelherstellung dargestellt.

2.3.1.1 Rohstofflagerung

Ziegelerzeugnisse werden aus Ton, tonigen Massen und Lehm hergestellt. Stehen keine geeigneten Lehme oder sandigen Schiefertone zur Verfügung, so werden kalkfreie Sande als Magerungsmittel eingesetzt. Die in Deutschland bei der Ziegelherstellung eingesetzten Rohstoffe stammen aus unterschiedlichen geologischen Perioden (z.B. Buntsandstein, Keupertone, Juratone).

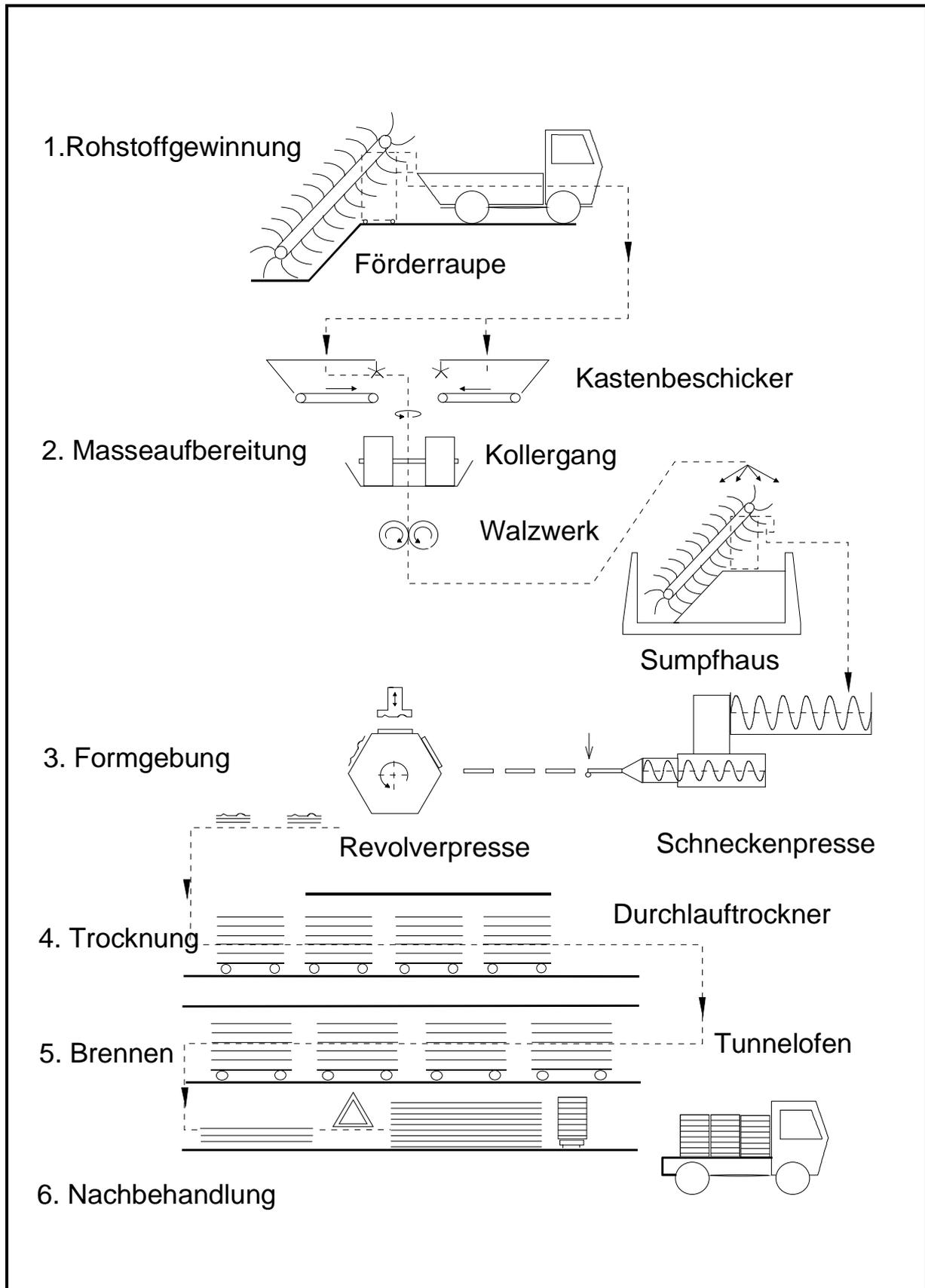


Abbildung 2-15: Schematische Darstellung der Pressdachziegelherstellung

Quelle: [28]

Tabelle 2-15 zeigt die Bandbreiten der mineralogischen und chemischen Zusammensetzung der in Deutschland zur Ziegelherstellung verwendeten Tone [28].

Tabelle 2-15: Mineralogische und chemische Zusammensetzung eingesetzter Tone

| Mineral | min [Masse-%] | max [Masse-%] |
|----------------|------------------|------------------|
| Quarz | 15 | 60 |
| Feldspat | 1 | 25 |
| Calcit | 1 | 25 |
| Pyrit | 0 | 2 |
| Kaolinit | 3 | 40 |
| Illit | 10 | 50 |
| Montmorillonit | 10 | 50 |

| Element/ Verbindung | min [Masse-%] | max [Masse-%] |
|---------------------------------------|------------------|------------------|
| S | 0,01 | 2,00 |
| F | 0,03 | 0,16 |
| SiO ₂ | 50,0 | 70,0 |
| Al ₂ O ₃ | 7,0 | 20,0 |
| Fe ₂ O ₃ (ges.) | 1,0 | 8,0 |
| MgO | 0,5 | 3,0 |
| CaO | 0,5 | 15,0 |
| Na ₂ O | 0,3 | 1,2 |
| K ₂ O | 1,0 | 4,0 |
| TiO ₂ | 0,5 | 2,0 |

Quelle: [28]

Zum Plastifizieren toniger Rohstoffe setzt man u.a. organische Verbindungen, Phosphate und Soda ein. Als Porosierungsmittel werden neben geschäumtem Polystyrol auch Papierfangstoff, Sägemehl oder anorganische Stoffe, wie z.B. Kieselgur oder Perlit, eingesetzt. Die zur Oberflächenbehandlung eingesetzten Engoben werden vielfach aus weißbrennenden Tonen, Flussmitteln und färbenden Oxiden hergestellt. Glasuren sind Mischungen aus Versatzstoffen (z.B. Al₂O₃, Quarzmehlen, Kreiden, MgCO₃), Flussmitteln, etwas Ton und färbenden Oxiden bzw. Fritten [14].

Die Rohstofflagerung erfolgt auf Freihalden oder in Lagerhallen, Großraumbeschickern, Mauksilos, Sumpfanlagen oder Trockensilos. Vielfach erfolgt auch der direkte Rohstofftransport von einer in Werksnähe gelegenen Grube zur Aufbereitungsanlage.

2.3.1.2 Masseaufbereitung

Im Laufe der Zeit haben sich unterschiedliche Verfahrensprinzipien bei der Masseaufbereitung als geeignet erwiesen. Es können das Trocken-, das Halbnass- oder das Nassverfahren für die Aufbereitung angewendet werden. Bei der Wahl des Aufbereitungssystems spielen die Art der zu verwendenden Rohstoffe, die Qualität der herzustellenden Erzeugnisse, die Art des Formgebungsverfahrens und Fragen der Wirtschaftlichkeit eine wesentliche Rolle.

Die Trockenaufbereitung wird dort eingesetzt, wo relativ trockene, wenig plastische Rohstoffe anfallen und höherwertige Erzeugnisse hergestellt werden. Ziel der Trockenaufbereitung ist das Zerkleinern in Hammer- oder Pendelmöhlen bei gleichzeitigem Trocknen des Rohstoffes

auf etwa drei bis sechs Prozent Feuchtegehalt. Die notwendigen Zusätze werden ebenfalls in diesem Verfahrensschritt zugegeben. Das Verfahren der Trockenaufbereitung nimmt bei der Klinkerproduktion in Europa eine bevorzugte Stellung ein, da Klinkerrohrstoffe, wie z.B. Schiefertone, mit geringer Grubenfeuchte anfallen, die besonders prädestiniert für die Trockenaufbereitung sind [14]. In Deutschland wird bei der Klinkerherstellung überwiegend das Nassaufbereitungsverfahren eingesetzt.

Das bei der Herstellung von Ziegelprodukten übliche Verfahren der Aufbereitung ist das Halbnassverfahren. Dabei findet die Mengenzuteilung zur Aufbereitung mittels Kastenbeschicker statt. Dort kann durch dessen abschnittsweise Beschickung auch eine Dosierung mehrerer Rohstoffe auf dem Weg der Überbeschickung erfolgen. Meist wird auch am Beschickeraustrag das zur Aufbereitung und Formgebung erforderliche Anmachwasser bis zu einer Gesamtmassefeuchte von 20 % zugegeben. Durch stufenweise Zerkleinerung wird eine maximale Korngröße der Hartstoffanteile von kleiner 1,8 mm angestrebt. Bei dünnwandigen Ziegeln, wie z.B. Dachziegeln beträgt die Korngröße 0,5 bis 0,8 mm. Je nach Rohstoffbeschaffenheit werden Tonbrecher, Schwertmesserwalzen, Nasskollergänge und Walzenmühlen als Zerkleinerungs- und Aufbereitungsmaschinen eingesetzt [14].

Kombinierte Vorgänge des Quetschens und Mischens bewirken eine Homogenisierung der Masse, woraus eine gute Verformbarkeit resultiert. Dazu dienen Tonraspler, Doppelwellenmischer, Siebknetter und Filtermischer. Bei der Herstellung hochwärmedämmender Ziegel werden dem Versatz zur Erzielung eines größeren Porenvolumens organische oder anorganische Porosierungsmittel zugegeben. In dieser Prozessstufe erhält die Masse ihre endgültige Formgebungsfeuchte von 20 bis 22 %. Die Zufuhr von Wärme durch Heißwasser oder Heißdampf bewirkt beim Mischen ein besseres Lösen und Aufschließen der kleinsten Teilchen [57].

In der Grobkeramik beschränkt sich der Einsatz des Nassverfahrens wegen der hohen Kosten auf die Herstellung von Sondermassen, Glasuren und Engoben. In modernen Dach- und Mauerziegelwerken überwiegt deshalb die Halbnassaufbereitung und nur bei entsprechenden rohstoffmäßigen Voraussetzungen werden in Mauerziegelwerken Trockenaufbereitungsanlagen eingesetzt.

Die aufbereiteten Massen werden zur weiteren Homogenisierung und Bevorratung in Großraumbeschickern, Tonsilos, Mauktürmen oder Sumpfhäusern mit entsprechender Mechanisierung zwischengelagert [14].

2.3.1.3 Formgebung

Entsprechend der Art der Masse, des Feuchtigkeitsgehalts und des herzustellenden Produktes bieten sich verschiedene Formgebungsmethoden an, so z.B. Streichen, Extrudieren, Pressen, Rollen, Trockenpressen und isostatisches Pressen [14].

In der Praxis wird das nach dem Halbnassverfahren aufbereitete Rohmaterial hauptsächlich in Pressen verformt. In Strangpressen mit und ohne Vakuumkammer erfolgt die Masseverdichtung bei 0,6 bis 1,5 MPa Pressdruck und die Ausformung des Massestranges in die gewünschte Form über ein Mundstück. Die anschließende Teilung des Stranges in einzelne Formlinge geschieht mittels drahtbespannter Abschneider. Dieses Formgebungsverfahren ist typisch für die Herstellung von Mauerziegeln und Strangdachziegeln [14].

Bei der Herstellung von Pressdachziegeln werden in einer Strangpresse zunächst sogenannte Kuchen oder Batzen vorgeformt und anschließend in einer weiteren Presse entsprechend geformt. Dabei kommen mechanische und hydraulische Revolverpressen, sowie Amboss-, Schwenkbalken- und Drehtischpressen zum Einsatz [10]. Bei den am häufigsten verwendeten Ein- und Mehrfelder-Revolverpressen befinden sich die Unterformen auf einer periodisch drehenden Trommel (5-, 6- oder 8-eckiges Prisma).

Gegen die bei Stillstand der Trommel jeweils oben stehende Form drückt der die Oberform tragende Stempel, wodurch die Auspressung des Ziegels zwischen Ober- und Unterform erfolgt. Anschließend werden die Formlinge auf Lücke gerückt und auf Formlingsträger abgesetzt. Als Pressformen werden verschiedene Ausführungen, wie z.B. Gipsformen, Graugussformen mit Beölung, Formen mit Gummifolien oder Metallformen mit einvulkanisierten Gummibelag, verwendet [14]. In Deutschland werden die meisten Dachziegel in offenen Formen hergestellt, so dass beim Verpressen und anschließenden Entgraten Pressüberschuss anfällt [11].

Auf den Sichtflächen werden Dachziegel durch Engobieren oder Glasieren teilweise veredelt. Bei Vormauerziegeln und Klinkern werden durch Profilierung, Schälen, Bürsten oder Besanden Oberflächentexturen hervorgerufen [14].

Im Bereich der Formgebung fallen bei der Herstellung der Gipsformen für die Pressdachziegelherstellung Reinigungsabwässer an [111]. Durch Gipsbruch und Verschleiß der Pressformen entstehen bei der Formgebung weitere Abfälle [124].

2.3.1.4 Trocknung, Glasieren und Engobieren

Zur Formlingstrocknung dienen, je nach Werksgröße, Mechanisierungsgrad und Trockenempfindlichkeit der Masse, verschiedene Trockner. Bei der Mauerziegelherstellung ist der Einsatz von Kammer- und Durchlauf Trocknern üblich. Bei der Dachziegelherstellung lassen sich Kammer-, Tunnel- und Schnellrockner einsetzen. In Kammertrocknern werden Dachziegel bei 90 °C zwischen 12 und 48 Stunden getrocknet [11]. Der Restfeuchtegehalt der Rohlinge für den Brand im Tunnelofen liegt in der Regel unter zwei Prozent. Die Beheizung der Trockner erfolgt überwiegend durch Ofenabwärme, teilweise auch durch Gas oder Heizöl [57].

Dachziegel und Verblendziegel werden zum Teil auf den Sichtflächen oder der gesamten Oberfläche glasiert oder engobiert, um eine bestimmte Farbgebung zu erreichen oder um die Dichtigkeit des Ziegels zu steigern. Das Aufbringen der Engobe oder Glasur geschieht nach dem Trocknen, teilweise aber auch am Formling. Bei Engoben handelt es sich im Wesentlichen um Verbindungen von Ton, Flussmitteln, Füllmitteln und Pigmenten. Das wirksamste Verfahren zum Auftragen großer Mengen von Engobe ist das Aufsprühen. Um eine gute Bindung der Engobe mit der zu behandelnden Oberfläche zu erzielen, werden der flüssigen Engobe zum Teil organische Bindemittel zugesetzt. Glasuren sind Mischungen aus Versatzstoffen, Flussmitteln, etwas Ton und färbenden Oxiden, die zu einer glasartigen Masse gesintert werden. Das Auftragen der Glasur erfolgt üblicherweise in einer Spritzkabine [45]. Beim Reinigen der Engobierlinien bzw. Glasierlinien fallen Produktionsabwässer [111] und Weißschlämme an [124].

2.3.1.5 Brennvorgang

Der Brand von Ziegelerzeugnissen erfolgt heutzutage überwiegend in oxidierender Atmosphäre in Tunnelöfen. Zur Erzielung spezieller Farbeffekte kann innerhalb der Garbrandzone jedoch eine Reduktionsperiode eingeschaltet werden, in der die Brennstoffaufnahme unter Sauerstoff- bzw. Oxidationsmangel erfolgt. Bei den in der Grobkeramik verwendeten Rohstoffen kommt es dabei zu den erwünschten Farbänderungen an den Ziegeln.

Das Brenngut wird zunächst auf Brennhilfsmittel gelegt, und durchläuft anschließend den Ofen. Mauerziegelformlinge werden direkt auf den Tunnelofenwagen gesetzt, Dachziegelformlinge werden zum Brand im klassischen Tunnelofen in geeigneten Kassetten (H-Form und U-Form) gestapelt. Der Besatz der Brennhilfsmittel erfolgt produktspezifisch, um eine optimale Umströmung des Brenngutes mit den Brenngasen und somit ein gutes Brennergebnis zu erzielen. Im Ofen wird das Brenngut bis zur Garbrandtemperatur von 900 bis 1.200 °C aufgeheizt. Nach einer für den Scherbenbildungsprozess erforderlichen Haltezeit

bei Garbrandtemperatur von 2 bis 5 Stunden erfolgt das planmäßige Abkühlen des Gutes auf etwa 50 °C. Die Brenndauer in Tunnelöfen beträgt bei Dachziegeln zwischen 10 und 40 Stunden [11], bei Klinkern zwischen 45 und 60 Stunden und bei Hintermauerziegeln zwischen 17 und 25 Stunden [22]. In Tabelle 2-16 sind typische Betriebsdaten von klassischen Tunnelöfen aufgeführt.

Tabelle 2-16: Betriebsdaten von Tunnelofenanlagen

| | Einheit | Klinker | Leichtloch- ziegel | Hochloch- ziegel | Dachziegel |
|---|-------------------|----------------|-----------------------|---------------------|-----------------|
| Kapazität | t/h | 1 – 8 | 3 – 15 | 3 - 15 | 3 - 6 |
| Ofenlänge | m | 80 - 125 | 60 – 120 | 60 - 120 | 80 - 140 |
| Ofennutzquerschnitt | m ² | 1,3 - 6 | 4 – 12 | 4 - 12 | 4 -10 |
| Besatzdichte | kg/m ³ | 650 - 1.500 | 350 – 500 | 500 - 570 | 200 - 400 |
| Brenntemperatur | °C | 1.000 – 1.250 | 900 - 1.050 | 950 - 1.050 | 1.000 - 1.060 |
| spez. Wärmebedarf für Trocknen + Brennen | kJ/kg | 1.600 – 3.000 | 1.000 - 2.200 | 1.000 - 2.000 | 1.750 - 2.800 |
| Abgasvolumenstrom | m ³ /h | 5.000 - 20.000 | 10.000 - 50.000 | 10.000 - 50.000 | 10.000 - 40.000 |
| Abgastemperatur | °C | 140 - 200 | 100 – 150 | 100 -150 | 130 - 180 |

Quelle: [116]

Eine Alternative zu den klassischen Tunnelöfen bietet die Schnellbrandtechnologie in Rollenöfen. Durch die Einführung des einlagigen Flachbrandes bei der Dachziegelherstellung wurde sowohl die Brennzeit verkürzt als auch das Masseverhältnis von Brennhilfsmittel zu Brenngut verkleinert. Dieses ermöglicht teilweise eine Energieeinsparung beim Brennen. Bei der Umsetzung von Schnellbrandkonzepten werden im Vergleich zu den großen herkömmlichen Tunnelofeneinheiten kleinere Ofeneinheiten realisiert, die eine größere Flexibilität bei der Anpassung der Ofenparameter an das jeweilige Produkt erlauben [19]. Tabelle 2-17 zeigt einige ofentypische Leistungsdaten verschiedener Schnellbrandtechnologien bei der Dachziegelherstellung.

Tabelle 2-17: Vergleich der Leistungsdaten verschiedener Ofentypen (Dachziegel)

| Ofentyp | Massenverhältnis Brennhilfsmittel zu Brenngut | Brennzeiten in Stunden |
|-------------------------|--|---------------------------|
| Klassischer Tunnelofen | 6:1 | ca. 50 |
| Präzisions-Schnellbrand | 3:1 | ca. 10 |
| Keramono-Einlagenbrand | 1:1 | ca. 2 |
| Rollenbrand | 0:1 bis 2:1 | ca. 3 bis 8 |

Quelle: [13]

Die Eignung von Ziegelerzeugnissen für den Schnellbrand hängt wesentlich von der spezifischen Oberfläche und der Möglichkeit der Durch- bzw. Umströmung des Brenngutes mit den heißen Brenngasen ab. So sind nicht nur Dachziegel, sondern auch Hintermauerziegel, wie z.B. Gitterziegel, für den Schnellbrand geeignet [64]. So verkürzt sich die Brennzeit in Rollenöfen bei Hintermauerziegeln auf 2,5 bis 3,5 Stunden, bei

Vormauerziegeln auf 4 bis 5 Stunden und bei Dachziegeln auf 3 bis 4 Stunden [29]. Die Besatzdichten bei Schnellbrandöfen liegen unter 100 kg/m^3 . In Tabelle 2-18 sind typische Bandbreiten der Betriebsdaten von Schnellbrandöfen dargestellt.

Tabelle 2-18: Betriebsdaten von Schnellbrandöfen

| | Einheit | Tunnelofen für Hintermauerziegel | Tunnelofen für Vormauerziegel | Tunnelofen für Pressdachziegel |
|--|--------------------|----------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| Kapazität | t/h | 16,6 - 18,75 | 2,1 - 5,4 | 1,9 - 5,4 |
| Ofenlänge | m | 130 | 90 - 120 | 80 - 125 |
| Ofennutzquerschnitt | m^2 | bis 17,6 | bis 3,5 | bis 3,3 |
| Besatzdichte | kg/m^3 | k.A. | k.A. | k.A. |
| Brenntemperatur | $^{\circ}\text{C}$ | 1.000 | 1.000 - 1.080 | 1.020 - 1.150 |
| Brennzeit | h | 2,5 - 3,5 | 4 - 5 | 3 - 4 |
| spez. Wärmebedarf für Trocknen + Brennen | kJ/kg | 1.250 - 1.820 | 1.590 - 2.550 | 2.930 - 4.605 |

Quelle: [13], [29]

Bei Schnellbrandöfen wird heutzutage Erdgas als Brennstoff eingesetzt. Tunnelöfen werden zum größten Teil ebenfalls mit Erdgas beheizt, wobei auch Heizöl und vereinzelt Kohle und Torf zum Einsatz kommen [14]. Zur Spitzenbedarfsdeckung wird zunehmend Flüssiggas eingesetzt.

Beim Brennprozess fallen Abfälle in Form von Brennbruch und Feuerfestbruch an. Beim Einsatz fester Brennstoffe, wie z.B. Kohle, entsteht zusätzlich Asche [125].

2.3.1.6 Nachbehandlung

Je nach Brennergebnis erfolgt die Erzeugnissortierung im Prozess der maschinellen Ofenentleerung bzw. der Tunnelofenwagenentladung oder manuell. Einige Ziegelprodukte, wie z.B. Planziegel, werden in Schleifmaschinen weiterbearbeitet.

Dachziegel werden meist zu Kleinpaketen umreift und auf Paletten zu einer Versandeinheit gestapelt. Zwischen jede Lage wird ein Papier- oder Pappebogen eingelegt. Die Versandpakete werden folienverpackt und geschrumpft. Mauerziegel werden zu transportgerechten Paketen gestapelt, in Schrumpffolien eingeschweißt und auf Paletten gesetzt. Das Verladen erfolgt durch Hubstapler, Mobilkräne oder Portalkräne [14].

Bei der Verpackung fallen Abfälle, wie z.B. Kunststoffe, Altpapier und Stahlschrott an. In den Abgasreinigungsanlagen entstehen zusätzliche Abfälle durch abgeschiedene Stäube, Schlämme und verbrauchte Sorptionsmittel.

In der Abbildung 2-16 sind die wichtigsten Input- und Outputströme des Gesamtprozesses bei der Herstellung von Ziegelerzeugnissen zusammenfassend dargestellt.

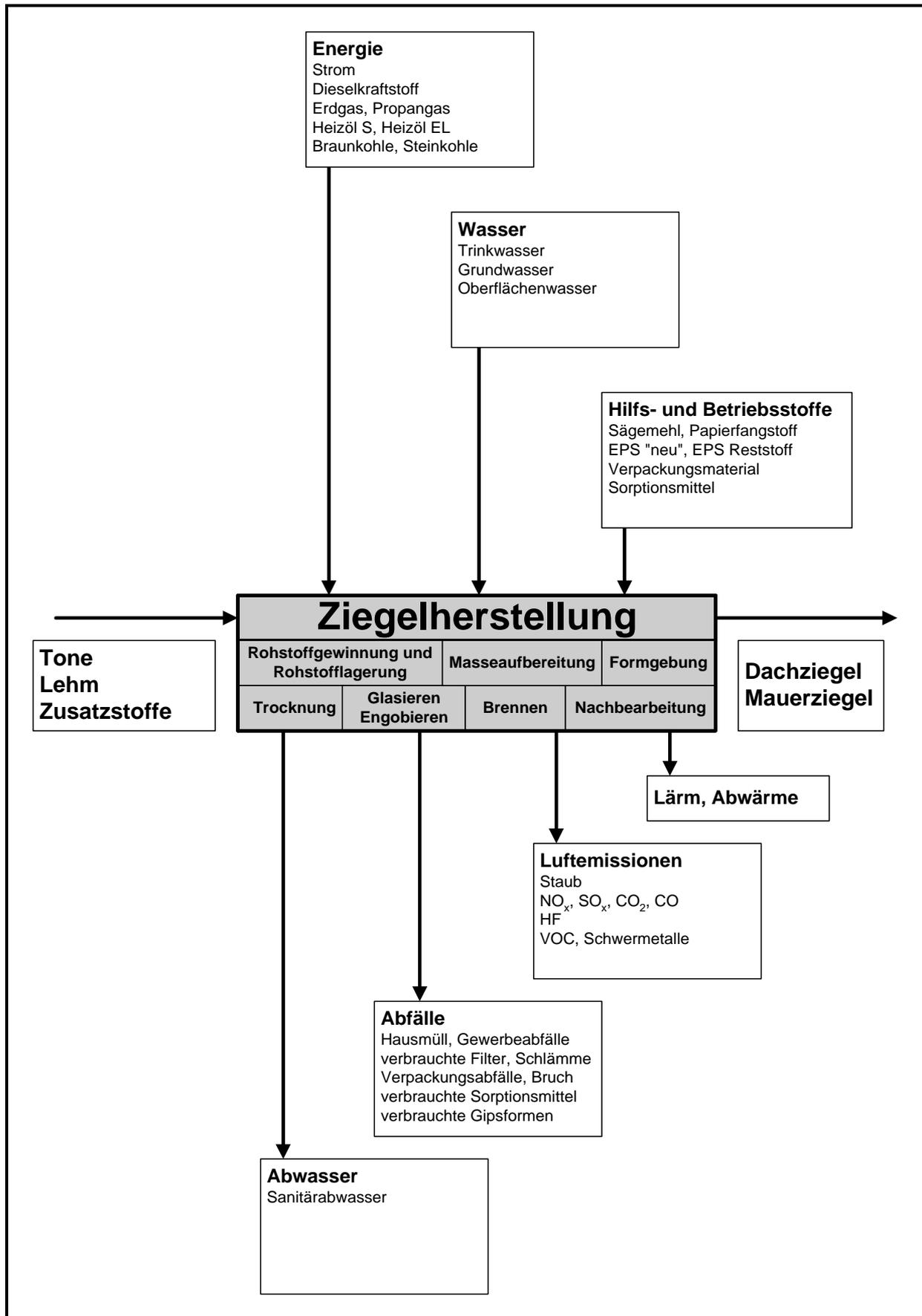


Abbildung 2-16: Input- und Outputströme des Gesamtprozesses bei der Herstellung von Ziegelerzeugnissen

2.3.2 Herstellung von Steinzeug für die Kanalisation

Typische Produkte aus Steinzeug sind im Wesentlichen keramische Rohre und Formstücke für die Abwasserableitung, aber auch Säurebehälter und Stallartikel [112]. Die Jahresproduktion 1997 betrug in Deutschland 208.000 Tonnen – innerhalb einer europäischen Produktion von 708.000 Tonnen. Tabelle 2-19 zeigt die Bandbreiten der Anlagenkapazitäten deutscher Hersteller von Steinzeug für die Kanalisation.

Tabelle 2-19: Bandbreiten der Anlagenkapazitäten bei der Herstellung von Steinzeug für die Kanalisation

| Produktgruppe | Produktionskapazität [t/d] | Ofenraumvolumen [m ³] | Besatzdichte [kg/m ³] |
|--------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Steinzeug für die Kanalisation | 24 – 144 | 480 - 1800 | 150 - 300 |

Abbildung 2-17 zeigt eine schematische Darstellung der Herstellung von Steinzeug für die Kanalisation, die über die Verfahrensschritte Rohstoffgewinnung und -lagerung, Masseaufbereitung, Formgebung, Trocknung, Glasieren, Brennen und Nachbehandlung abläuft.

2.3.2.1 Rohstofflagerung

Als Rohstoffe werden bei der Fertigung von Steinzeugrohren Tone, Schamotte und ein Glasurversatz verwendet. Der Glasurversatz besteht aus einer Mischung von Lehm, Ton, Kalk, Dolomit, Quarz und Metalloxiden. Die Rohschamotte, die größtenteils aus Recyclingmaterial der Keramikproduktion besteht, und der Glasurlehm werden überdacht gelagert. Für die Tonkomponenten erfolgt je nach Aufbereitungsverfahren vielfach die Aufhaltung im Freien oder in Boxen [57]. Tabelle 2-20 zeigt die Bandbreiten der mineralogischen und chemischen Zusammensetzung der in Deutschland zur Herstellung von Steinzeug für die Kanalisation verwendeten Tone [86].

Tabelle 2-20: Mineralogische und chemische Zusammensetzung eingesetzter Tone

| Mineral | min [Masse-%] | max [Masse-%] | Element/ Verbindung | min [Masse-%] | max [Masse-%] |
|----------------|---------------|---------------|---------------------------------------|---------------|---------------|
| Quarz | 8 | 25 | S | 0 | 0,2 |
| Feldspat | 1 | 4 | F | 0,02 | 0,06 |
| Kaolinit | 30 | 60 | SiO ₂ | 55 | 70 |
| Illit | 10 | 40 | Al ₂ O ₃ | 20 | 35 |
| Montmorillonit | 2 | 10 | Fe ₂ O ₃ (ges.) | 1 | 10 |
| | | | MgO | 0 | 1,5 |
| | | | CaO | 0 | 0,8 |
| | | | Na ₂ O | 0 | 0,4 |
| | | | K ₂ O | 1 | 4 |
| | | | TiO ₂ | 1 | 2,5 |

Quelle: [86]

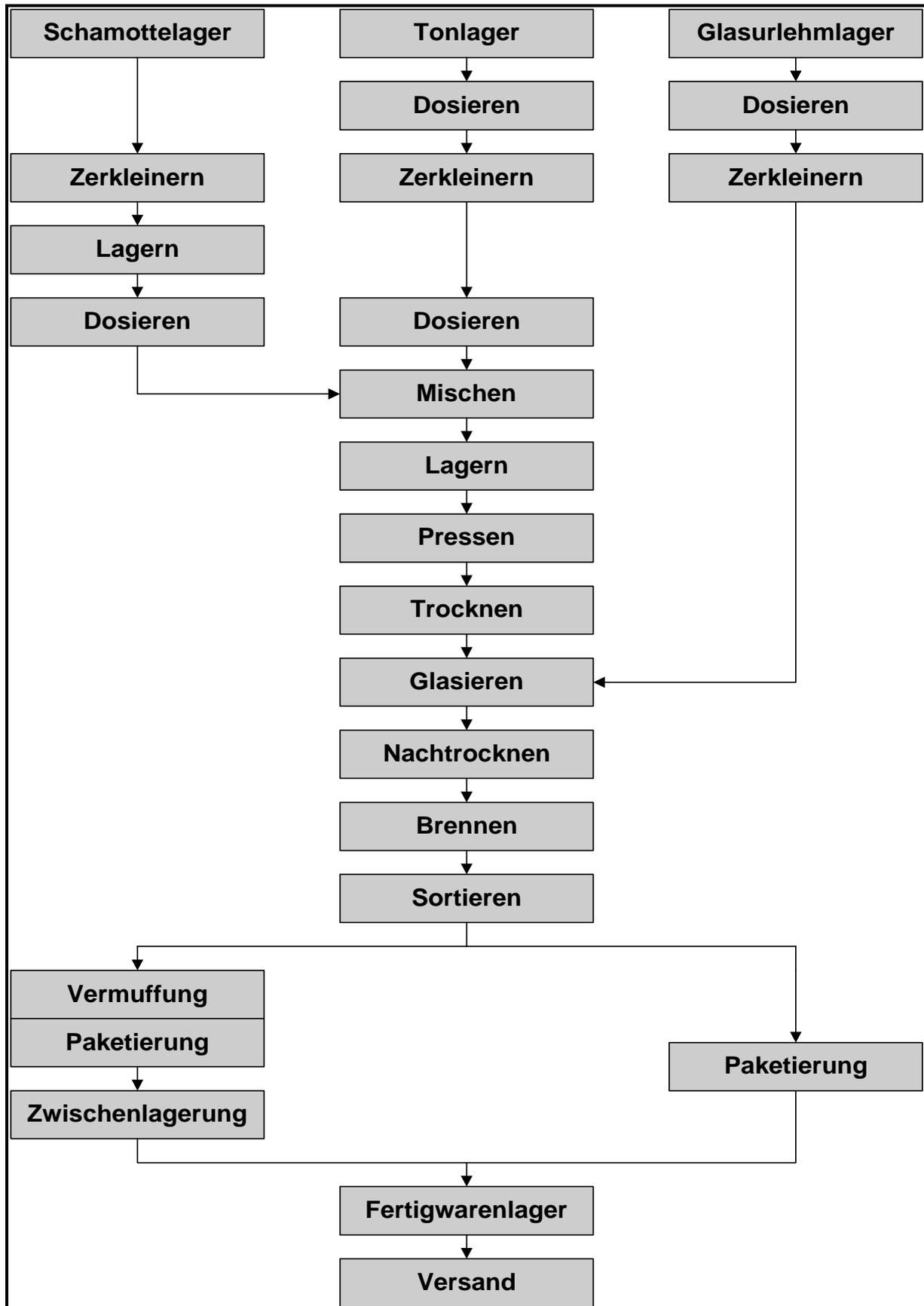


Abbildung 2-17: Schematische Darstellung der Herstellung von Steinzeug für die Kanalisation

Quelle: [57]

2.3.2.2 Masseaufbereitung

Zur Aufbereitung des Tons wird das Nassverfahren angewandt. Dabei wird die Dosierung der grubenfeuchten Tone mittels Kastenbeschickern vorgenommen. Die Zerkleinerung erfolgt über Nasskollergänge und Walzenmühlen [57].

Die Zerkleinerung der Bestandteile des Glasurlehms erfolgt in Nasstrommelmühlen bis auf eine Feinheit von 0,06 mm. Anschließend werden gröbere Bestandteile abgeseibt, die feinen Stoffe werden in Wasser suspendiert und in Rührbottichen zwischengelagert. Die Rohschamotte wird in Backenbrechern, Kegelsbrechern, Schlagmühlen oder Kugelmühlen zerkleinert. Die Körnung mit einer maximalen Korngröße von 4,0 mm wird abgeseibt und zwischengelagert. Die Schamotte dient als Magerungsmittel und verleiht der Masse beim Brand die erforderliche Standfestigkeit und Formstabilität [57].

Die Ton- und Schamottefraktionen werden gravimetrisch mit Bandwaagen und Schamotte-Behälterwaagen oder volumetrisch mit Kastenbeschickern, Bandzuteilern oder Tellerzuteilern dem Mischaggregat zugeteilt. Dort erfolgen die Mischung und die Anfeuchtung annähernd auf die gewünschte Pressfeuchte (Wassergehalt 18 bis 20 %) [57]. Bei der Reinigung der Glasur-Aufbereitungsanlagen fallen geringe Mengen an Waschwasser an [111]. Der Pressmasse wird als Plastifizierungsmittel nur Wasser zugesetzt.

Die Lagerung der aufbereiteten feuchten Masse dient der Homogenisierung und der Bevorratung. Dazu werden Großraumbeschicker, Tonsilos, Mauktürme oder Sumpfhäuser mit entsprechender Mechanisierung verwendet.

2.3.2.3 Formgebung

Die Steinzeugrohrformlinge werden in meist vertikal angeordneten Vakuumstrangpressen hergestellt. In der Vakuumkammer der Presse wird die Pressmasse verdichtet und entlüftet und anschließend über ein Mundstück zu den Rohrformlingen mit Muffe ausgeformt. Es folgt das Verputzen von Muffe und Spitzende [57].

Zur Abnahme der frischen Formlinge dienen spezielle Vorrichtungen, wie z.B. Vakuum-Haftschalen. Sie ermöglichen das Setzen der Rohre auf Trocknerwagen. Besonderheiten der Formgebung ergeben sich aus der Steifigkeit der Pressmasse, den verschiedenen Rohrdurchmessern und dem diskontinuierlichen Pressenbetrieb [112].

2.3.2.4 Trocknung und Glasieren

Die rissfreie Trocknung der Formlinge erfolgt bei Temperaturen bis etwa 100 °C in Kammer- oder Kanaltrocknern auf etwa zwei Prozent Restfeuchte. Die Trockenzeit beträgt bei Formstücken zwischen 70 und 100 Stunden und bei Rohren zwischen 30 Stunden (Kleinrohre) und 9 Tagen (Großrohre) [65]. Die Klimaführung (Temperatur, Feuchte) muss so erfolgen, dass die Rohre sich nicht durch Schwindungsdifferenzen verziehen [112].

Mit geeigneten Greif- und Haltevorrichtungen werden die getrockneten Rohlinge in Glasurbehälter getaucht und mit der Lehmglasurschicht überzogen. Die Glasur verschmilzt während des Brennens unlösbar mit dem Scherben und umschließt ihn vollständig mit einer glatten Glashaut. Wenn glasurfreie Stellen erforderlich sind, werden diese vor dem Glasieren mit Paraffin abgedeckt.

In den Tunnelöfen vorgeschalteten Tunnelrocknern werden die auf die Ofenwagen gesetzten glasierten Rohlinge anschließend auf einen Restfeuchtegehalt von weniger als einem Prozent endgetrocknet [57]. Bei der Säuberung der Glasiereinrichtung fallen Reinigungsabwasser [111] an.

2.3.2.5 Brennvorgang

Der Brand erfolgt in gasbeheizten Tunnelöfen bei meist durchgängig oxidierender Atmosphäre. Die Rohlinge werden dabei vertikal stehend auf Brennhilfsmitteln gebrannt. Übliche Sintertemperaturen liegen zwischen 1.150 °C und 1.250 °C bei einer Brenndauer von 30 bis 80 Stunden. In Tabelle 2-21 sind typische Bandbreiten der Betriebsdaten von Tunnelöfen bei der Herstellung von Steinzeug für die Kanalisation dargestellt.

Tabelle 2-21: Betriebsdaten von Tunnelofenanlagen

| | Einheit | Steinzeug |
|---|-------------------|----------------|
| Kapazität | t/h | 1 - 6 |
| Ofenlänge | m | 80 - 180 |
| Ofennutzquerschnitt | m ² | 6 - 10 |
| Besatzdichte | kg/m ³ | 150 - 300 |
| Brenntemperatur | °C | 1.100 - 1.200 |
| spez. Wärmeverbrauch für Trocknen + Brennen | kJ/kg | 3.000 - 4.000 |
| Abgasvolumenstrom | m ³ /h | 4.000 - 18.000 |
| Abgastemperatur | °C | 160 - 200 |

Quelle: [116]

Eine Alternative zur herkömmlichen Fertigung bietet die in Deutschland nicht angewendete Schnellbrandtechnologie, die zur Zeit in Pilotanlagen erprobt wird. Die Steinzeugrohre werden dabei in einem Zeitraum von etwa 10 Stunden getrocknet, anschließend spritzglasiert und durchlaufen dann während einer Zeit von 8 Stunden den Ofen. Die Steinzeugrohre werden dabei während des Brennvorgangs waagrecht rollend gebrannt [77]. Formstücke, wie Abzweige und Bögen, können ebenfalls mit Hilfe der Schnellbrandtechnologie hergestellt werden. Ähnlich der Herstellung bei Rohren durchlaufen die Formstücke den Rollofen in einer Zeit von 8 bis 11 Stunden. Der Transport der Formstücke erfolgt stehend auf Rahmengestellen, die in einem ständigen Kreislauf mit einer Kettenbahn unter dem Ofen zugeführt werden [112].

Durch Brenn- und Feuerfestbruch fallen beim Brennprozess Abfälle an.

2.3.2.6 Nachbehandlung

Nach Abschluss des Brennvorgangs werden alle Produkte kontrolliert, der Vermuffung zugeführt (Angießen von Dichtelementen aus Polymerwerkstoffen; Anbringen vorgefertigter Dichtelemente) und abschließend paketiert.

Mit dem Anbringen vorgefertigter Dichtelemente ist bei Rohren bestimmter Dimensionen (DN 250 bis DN 600) eine Nachbearbeitung durch Nassschleifen auf hohe Werkstückgenauigkeit von Muffe und Spitzende verbunden. Die Bearbeitungsanlagen sind schallgedämmt, die Bearbeitungsrückstände (Wasser, Steinzeugpartikel) werden getrennt recycelt oder deponiert.

Bei der Verpackung fallen Abfälle, wie z.B. Holz und Gewerbemüll an. In den Abgasreinigungsanlagen entstehen zusätzliche verbrauchte Sorptionsmittel.

Abschließend sind in Abbildung 2-18 die wichtigsten Input- und Outputströme des Gesamtprozesses bei der Herstellung von Steinzeug für die Kanalisation dargestellt.

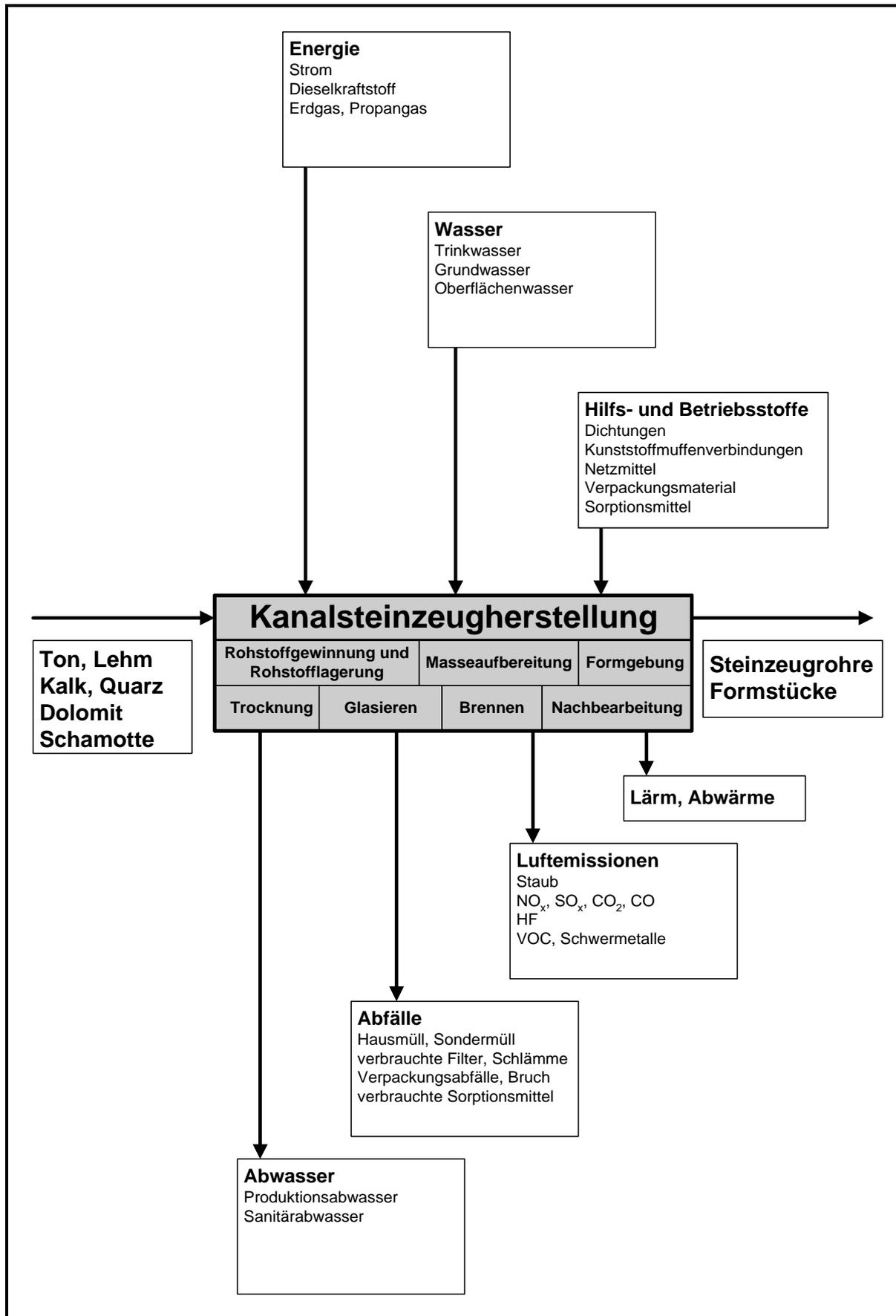


Abbildung 2-18: Input- und Outputströme des Gesamtprozesses bei der Herstellung von Steinzeug für die Kanalisation

2.3.3 Herstellung feuerfester Erzeugnisse

Feuerfeste Erzeugnisse werden bei der Durchführung thermischer Prozesse in vielen Industriezweigen benötigt. So werden feuerfeste Werkstoffe insbesondere in der Eisen- und Stahlindustrie, der Glasindustrie, der Zement- und Kalkindustrie, der Abfallentsorgungsindustrie, in Kokereien und Kraftwerken eingesetzt [26]. Die Anlagenkapazitäten einiger deutscher Hersteller von feuerfesten Erzeugnissen sind in Tabelle 2-22 in Form von Bandbreiten zusammengefasst.

Tabelle 2-22: Bandbreiten der Anlagenkapazitäten bei der Herstellung von feuerfesten Erzeugnissen

| Produktgruppe | Produktionskapazität [t/d] | Ofenraumvolumen [m ³] | Besatzdichte [kg/m ³] |
|---------------|----------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Magnesit | 80 - 300 | > 4 | 1.000 – 2.500 |
| Schamotte | 50 – 250 | > 4 | 600 – 1.000 |
| Hochtonerde | 70 - 300 | > 4 | 600 – 1.000 |

Feuerfeste Werkstoffe werden hinsichtlich ihrer Widerstandsfähigkeit gegen hohe Temperaturen so definiert, dass ihr Erweichungspunkt nicht unter 1.500 °C liegt. Es werden feuerfeste Werkstoffe mit einem Erweichungspunkt zwischen 1.500 bis 1.800 °C, und hochfeuerfeste Werkstoffe mit einem Erweichungspunkt von über 1.800 °C unterschieden. Zu den wichtigsten Gruppen feuerfester Erzeugnisse gehören [26]:

- Feuerfeste Steine auf Basis von Kieselsäure und Tonerde (Silikasteine, Schamottesteine, tonerdereiche Steine),
- Zirkonoxidhaltige Steine,
- Kohlenstoffhaltige Steine (Kohlenstoffsteine, graphithaltige Steine, siliciumcarbidhaltige Steine, „reine“ SiC-Erzeugnisse),
- Feuerfeste Steine auf Basis von Magnesia, Calciumoxid und Chromit (Magnesiasteine, chromerzhaltige basische Steine, Chromitsteine, Forsteritsteine, Dolomitsteine, Magnesiagraphitsteine),
- Elektrisch erschmolzene Erzeugnisse (Schmelzgegossene Erzeugnisse, schmelzgezogene Erzeugnisse),
- Feuerfeste wärmedämmende Materialien.

In der Feuerfest-Industrie werden verschiedene Verfahren zur Steinherstellung angewandt. Das einfachste Verfahren ist das Heraussägen von Formstücken aus natürlichen oder künstlich hergestellten Rohstoffen. Schmelzgegossene Erzeugnisse werden durch das Vergießen von Schmelzen in Formen, in denen die Schmelze zu Steinen oder Blöcken erstarrt, hergestellt. In den letzten Jahrzehnten haben sich, besonders bei der Herstellung hochfeuerfester Erzeugnisse, feinkeramische Arbeitsprinzipien durchgesetzt. Hierbei werden feuerfeste

Rohstoffe nach Feinstmahlung und Nassaufbereitung durch Schlickerguss, Strangpressen oder durch isostatisches Pressen verformt [26].

Zur Produktion von normalen Feuerfesterzeugnissen werden jedoch überwiegend grobkeramische Arbeitsprinzipien eingesetzt. Der Herstellungsprozess läuft dabei über die Prozessstufen Rohstoffgewinnung und Rohstofflagerung, Masseaufbereitung, Formgebung, Trocknung, Brennen und Nachbehandlung ab. Abbildung 2-19 zeigt exemplarisch den schematischen Verfahrensablauf bei der Herstellung basischer Feuerfesterzeugnisse.

2.3.3.1 Rohstofflagerung

Als Rohstoffe für feuerfeste Erzeugnisse dienen vorwiegend Tone, Schamotte und natürliche Gesteine wie Quarzit, Dolomit, Magnesit, Bauxit aber auch synthetische Ausgangsstoffe, z.B. Sinterkorund, Siliciumcarbid, Schmelzmullit oder Spinell. Zur Herstellung pressfähiger Massen werden den zerkleinerten Rohstoffen Bindemittel und Zuschlagstoffe hinzugefügt. Die Art der Bindemittel und Zuschlagstoffe ist sehr unterschiedlich, so werden z.B. Tonschlicker, Sulfitablauge, Teerpech, Naphthalin, Kunstharz, Kalkmilch, Wachs, Phosphorsäure, Ruß, Graphit und Schwefel eingesetzt [116].

Die Lagerung der verschiedenen Rohstoffe erfolgt in überdachten Boxen, bereits zerkleinert angelieferte Rohstoffe werden in Silos gelagert. Damit wird ein unerwünschtes Anfeuchten der Rohstoffe mit Wasser und die Reaktion mit diesem vermieden [116].

2.3.3.2 Masseaufbereitung

Meist werden Grob- und Feinzerkleinerung durchgeführt. Die Grobzerkleinerung erfolgt zweistufig in Backen-, Prall-, Walzen- und Kegelbrechern. Die Feinzerkleinerung wird zum Beispiel in Ringwalzen-, Schwing- und Kugelmühlen durchgeführt. Dabei liegt der zerkleinerungstechnische Wirkungsgrad dieser Maschinen in der Größenordnung von weniger als einem Prozent [26].

Die gemahlten Rohstoffe werden mittels Schwingsieben in verschiedene Körnungen aufgeteilt. Das Überkorn wird in die Mahlanlage zurückgeführt. Die Zwischenlagerung der Arbeitskörnungen erfolgt in Arbeitssilos, die als Materialpuffer zwischen den Teilprozessen der Aufbereitung und Steinfertigung dienen. Die anschließende Dosierung erfolgt mit Austragswaagen und Gefäßwaagen. Je nach Bedarf werden den Massen Bindemittel, Porosierungsmittel, Trennmittel oder Formöl zugegeben [26].

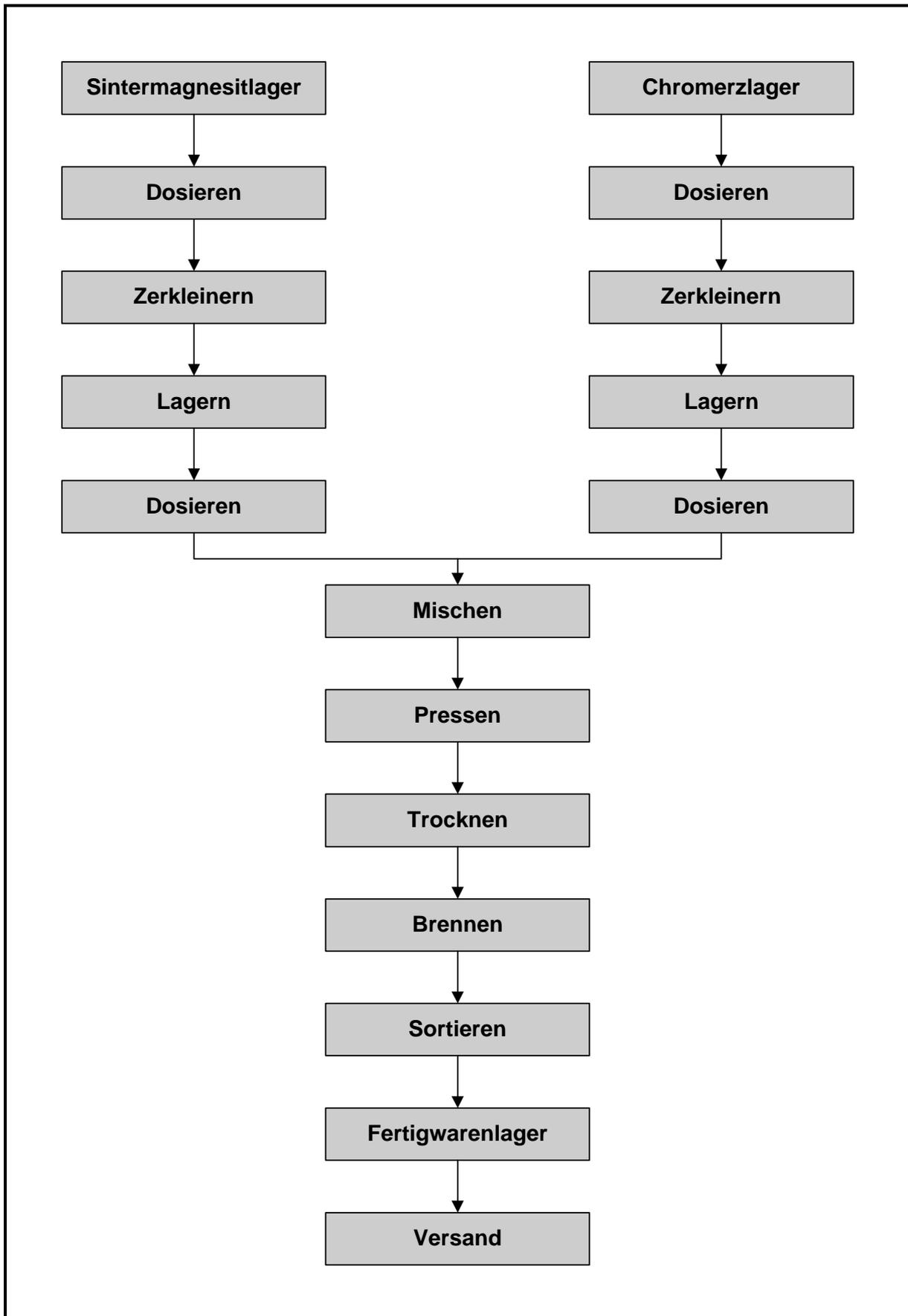


Abbildung 2-19: Schematische Darstellung der Fertigung basischer Feuerfesterzeugnisse

Quelle: [57]

Die Komponenten werden in einen Mischer gegeben und anschließend - meist in diskontinuierlichen Mischern - homogenisiert und vorverdichtet. Hierzu werden Gegenstrommischer, Mischkoller und Doppelwellenmischer eingesetzt. Für die verschiedenen Formgebungsverfahren werden in der Regel Gieß- und Pressmassen eingesetzt. Bei der Herstellung der Gießmassen werden die Rohstoffe mit dem Dispergiermittel, z.B. mit Wasser, vermischt. Die Pressmassen werden nach dem Halbnass- oder Nassverfahren mit anschließender Trocknung in Sprühtrocknern, oder nach dem Trockenverfahren hergestellt [57].

Bei der Reinigung der Aufbereitungsanlagen können geringe Mengen an Waschwasser entstehen.

2.3.3.3 Formgebung

Bei der Gießformgebung wird die Gießmasse in Formen gegossen, aus denen die Formlinge nach entsprechender Scherbenbildung entnommen werden.

Die Pressmassen wurden früher mit Hilfe von Kniehebelpressen zu den gewünschten Gegenständen verformt. Heutzutage werden hydraulisch angetriebene Pressen eingesetzt, welche die Höhen der gepressten Steine laufend kontrollieren und bei Abweichungen korrigieren. Dabei sind spezifische Pressdrücke von etwa 80 bis 200 N/mm² üblich. Durch unterschiedliche Pressprogramme können feuerfeste Steine für die unterschiedlichsten Anforderungen hergestellt werden. Für hochwertige feuerfeste Spezialerzeugnisse hat sich das isostatische Pressverfahren durchgesetzt, bei dem elastische Kunststoffformen mit feinpulvriger keramischer Masse gefüllt und in einem Autoklaven hydraulisch unter Druck gesetzt werden. Der angewendete Druck wirkt über eine Druckflüssigkeit auf den zu pressenden Körper in allen Richtungen in gleicher Stärke ein, so dass ein gleichförmiges Verdichten erfolgt. Bei Drücken bis zu 300 N/mm² werden mit diesem Verfahren großformatige Blöcke und spezielle Formteile hergestellt [26].

Verschiedene Sorten keramischer Massen lassen sich unter dem Einfluss von Schwingungen, die durch Vibratoren erzeugt werden, verdichten. Somit können bei gleichzeitigem Anwenden eines relativ niedrigen Pressdruckes Formkörper hergestellt werden [26].

Die althergebrachten Formgebungsverfahren wurden in jüngster Zeit durch ein neues Verfahren ergänzt. Die abzuformenden Massen werden dabei mit einem kälteempfindlichen Binder versetzt, in Formen gegossen und bei Temperaturen von zum Teil unter -30 °C verfestigt [26].

Abwasser fällt bei der Formgebung überwiegend in Form von Reinigungswasser beim Gießen an [111]. Als Abfälle fallen, in Abhängigkeit vom Formgebungsverfahren, Bruch der Gießformen, Bruch bei der Pressverformung, unverpresstes und verpresstes Granulat der Pressverformung an.

2.3.3.4 Trocknung

Das Trocknen erfolgt in Kammer- oder Durchlauftrocknern und kann, je nach Steingröße, von einem Tag bis zu mehreren Wochen dauern. Große Steine werden bei kontrollierter Feuchtigkeit in der Trockenluft getrocknet. Der Restfeuchtegehalt bei der Einfahrt in den Ofen sollte nach dem Trockenvorgang deutlich weniger als ein Prozent betragen [57]. In Tabelle 2-23 sind typische Betriebsdaten eingesetzter periodischer Trockner dargestellt, deren Bedeutung in der Feuerfest-Industrie jedoch abnimmt.

Tabelle 2-24 zeigt typische Betriebsdaten von zwei Kanaltrocknern sowie einem Klimatrockner.

Tabelle 2-23: Betriebsdaten periodischer Trockner

| | Einheit | Kammertrockner | Kammertrockner |
|-------------------|-------------------|----------------|----------------|
| Trockengut | | Schamotte | Silika |
| Kapazität | t/Trocknung | 18 | 10 |
| Trocknervolumen | m ³ | 171 | 56 |
| Besatzdichte | kg/m ³ | 105 | 180 |
| Trockentemperatur | °C | 80 | 100 |
| Trocknungsdauer | h | 44 | 24 |
| spez. Wärmebedarf | kJ/kg | 350 | 300 |
| Abgasvolumenstrom | m ³ /h | 1.600 | 15.000 |
| Abgastemperatur | °C | 60 | 60 |

Tabelle 2-24: Betriebsdaten kontinuierlich betriebener Trockner

| | Einheit | Kanaltrockner | Kanaltrockner | Klimatrockner |
|--------------------|-------------------|---------------|---------------|---------------|
| Trockengut | | Schamotte | Magnesit | Hochtonerde |
| Kapazität | t/h | 2,1 | 4 | 3,5 |
| Trocknerlänge | m | 80 | 51 | 36 |
| Trockenquerschnitt | m ² | 1,65 | 2,5 | 2,7 |
| Besatzdichte | kg/m ³ | 1.000 | 1.800 | 1.000 |
| Trockentemperatur | °C | 100 | 150 – 180 | 30 – 200 |
| Trocknungsdauer | h | 48 | 17 | 32 – 48 |
| spez. Wärmebedarf | kJ/kg | 500 | 1.500 | k.A. |
| Abgasvolumenstrom | m ³ /h | 800 | 11.000 | 5410 |
| Abgastemperatur | °C | 40 | 120 | 105 |

2.3.3.5 Brennvorgang

Der keramische Brand erfolgt, je nach Steingruppe, bei 1.250 °C bis 1.850 °C. Die Garbrandtemperaturen werden durch die Zusammensetzung der Rohstoffe bestimmt und gehen bis an die Grenze der beginnenden Deformation. Die Brenntemperaturen der wichtigsten Stoffgruppen liegen in den folgenden Größenordnungen [74]:

- Schamottesteine 1.250 - 1.500 °C
- Silikasteine 1.450 - 1.500 °C
- tonerdereiche Steine 1.500 - 1.800 °C
- Magnesiasteine 1.400 - 1.850 °C

Für den Brennprozess werden kontinuierlich betriebene Öfen (Tunnelöfen, Schuböfen etc.) und periodisch betriebene Öfen (Herdwagenöfen, Haubenöfen etc.) eingesetzt. Periodisch betriebene Öfen ermöglichen eine flexible Anpassung der Produktion an die Auftragslage. Nachteilig ist jedoch der höhere spezifische Wärmeverbrauch gegenüber kontinuierlich betriebenen Öfen [57]. In Tabelle 2-25 sind typische Betriebsdaten in der Feuerfest-Industrie eingesetzter Tunnelöfen dargestellt.

Tabelle 2-25: Betriebsdaten von Tunnelofenanlagen

| | Einheit | Magnesia- steine | Schamotte- steine | Bauxitstein | Silikastein |
|---|-------------------|---------------------|----------------------|-----------------|-------------|
| Kapazität | t/h | 2 (4 - 8) | 4 | 4 | 2,1 |
| Ofenlänge | m | 150 | 113 | 116 | 180 |
| Ofennutzquerschnitt | m ² | 1,3 (2,5 - 3) | 2,4 | 2,2 | 2,8 |
| Besatzdichte | kg/m ³ | 1.000 - 2.500 | 600 - 1.500 | 600 - 1.300 | 700 - 1.000 |
| Brenntemperatur | °C | 1.760 (1.850) | 1.260 | 1.400 | 1.450 |
| spez. Wärmebedarf für Trocknen + Brennen | kJ/kg | 9.700 (6.000) | 3.200 | 4.500 | 9.050 |
| Abgasvolumenstrom | m ³ /h | 15.000 - 25.000 | 10.000 - 15.000 | 10.000 - 15.000 | 1.200 |
| Abgastemperatur | °C | 250 - 400 | 150 - 200 | 150 - 220 | 120 |

Quelle: [74]

Das Besetzen der Brennöfen erfolgt zunehmend durch automatische Setzmaschinen, welche die von der Steinpresse kommenden Steine nach programmierten Setzmustern auf die Ofenwagen absetzen. Dabei gilt es die Setzmuster so zu optimieren, dass bei einem möglichst geringen Energieeinsatz eine optimale Umspülung der Steine von der Flamme und den Verbrennungsabgasen erreicht wird. Als Energieträger werden in modernen Brennanlagen überwiegend Heizöl und Erdgas eingesetzt. In Einzelfällen, wie z.B. bei Sonderprodukten mit geringen Stückzahlen, ist auch elektrische Beheizung üblich [26]. In Tabelle 2-26 sind Betriebsdaten in der Feuerfest-Industrie eingesetzter, periodisch betriebener Öfen dargestellt.

Tabelle 2-26: Betriebsdaten von periodisch betriebenen Ofenanlagen

| | Einheit | Silikasteine | Hochtonerde | Schamotte |
|-------------------|-------------------|---------------|---------------|---------------|
| Kapazität | t/Brand | 153 | 40 - 50 | 18 |
| Brennraumvolumen | m ³ | 180 | 20 | 25 |
| Besatzdichte | kg/m ³ | 850 - 1.100 | 2.000 - 2.500 | 650 - 1.000 |
| Brenntemperatur | °C | 1.540 | 1.340 - 1.650 | 1.430 |
| spez. Wärmebedarf | kJ/kg | 4.500 - 7.000 | 4.500 - 8.000 | 7.600 |
| Abgasvolumenstrom | m ³ /h | bis 50.000 | bis 20.000 | 3.600 - 7.000 |
| Abgastemperatur | °C | 180 - 300 | 180 - 290 | 160 - 250 |

Quelle: [74]

Beim Brennvorgang entstehen durch Brennbruch und durch den Bruch von Brennhilfsmitteln Abfälle. In der Regel kann der keramische Brennbruch zerkleinert als Rohmaterial wieder eingesetzt werden.

2.3.3.6 Nachbehandlung

In bestimmten Fällen werden die gebrannten feuerfesten Produkte durch Schleifen, Polieren, und Drehen nachbearbeitet. Anschließend werden die Feuerfesterzeugnisse palettiert oder paketiert und mit Plastikfolien überzogen, um das Eindringen von Wasser zu verhindern. Der Schutz vor Wasser muss immer, auch beim Transport, gewährleistet sein [57]. Beim Schleifen fällt Schleifabwasser an [111]. Bei der Verpackung fallen Abfälle, wie z.B. Kunststoffe, Altpapier und Gewerbemüll, an. In den Abgasreinigungsanlagen entstehen zusätzliche Abfälle durch abgeschiedene Stäube, Schlämme und verbrauchte Sorptionsmittel.

2.3.3.7 Sonderverfahren

Zur Herstellung feuerfester Erzeugnisse mit speziellen Eigenschaften werden zum Teil Sonderverfahren eingesetzt. So sind zum Beispiel das Herstellen einer Kohlenstoffbindung und das Pechtränken Verfahren, bei denen spezielle Hilfsstoffe eingesetzt werden. Feuerfeste Steine mit einer Kohlenstoffbindung werden insbesondere in der Stahlindustrie eingesetzt. Die Rohstoffe werden mit Steinkohleteer, Pech oder Harz als Bindemittel heiß aufbereitet und verpresst. Durch Tempern bzw. Härten der Presslinge wird die Bindung erheblich verstärkt. Beim Tempern wird das Bindemittel bei Temperaturen von 320 bis 550 °C unter Luftabschluss verkocht. Beim Härten werden die Presslinge üblicherweise in elektrisch beheizten Öfen auf Temperaturen zwischen 150 und 220 °C aufgeheizt. Steinkohleteerpech oder Bitumen werden beim Pechtränken verwendet, um die offenen Poren feuerfester Erzeugnisse zu verschließen [116].

In Abbildung 2-20 sind die wichtigsten Input- und Outputströme des Gesamtprozesses bei der Herstellung feuerfester Erzeugnisse dargestellt.

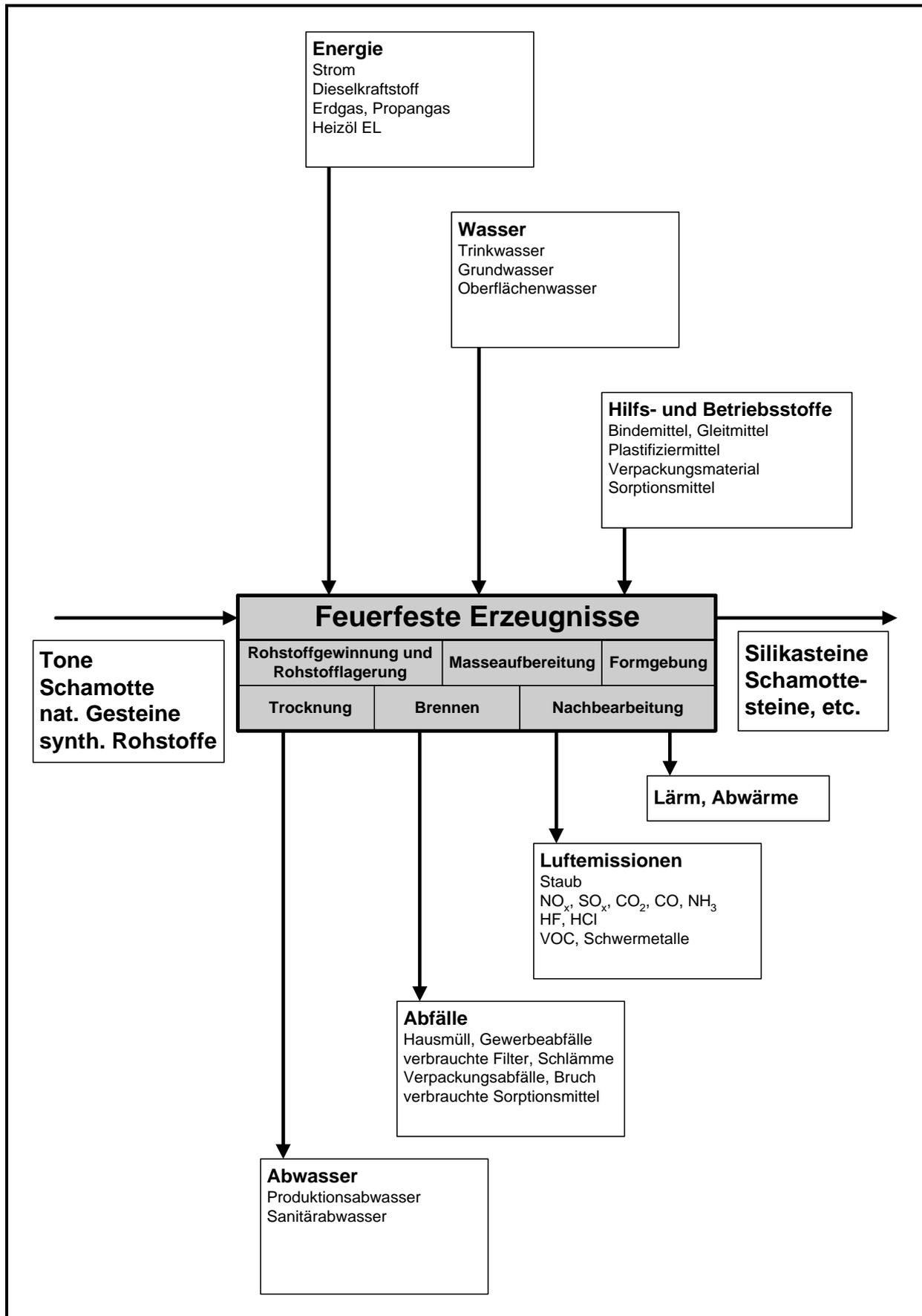


Abbildung 2-20: Input- und Outputströme des Gesamtprozesses bei der Herstellung feuerfester Erzeugnisse

3 Verbrauchs- und Emissionswerte bei der Herstellung keramischer Erzeugnisse

In diesem Kapitel werden getrennt für die feinkeramische und die grobkeramische Industrie typische Energie- und Rohstoffverbrauchswerte sowie Emissionen in Wasser, Luft und Boden angegeben. Dabei werden die wichtigsten Verbrauchsstellen bzw. Quellen der Umweltbelastung prozessstufenbezogen dargestellt.

3.1 Verbrauchs- und Emissionswerte bei der Herstellung feinkeramischer Erzeugnisse

Im Bereich der Feinkeramik werden in den folgenden Abschnitten die Verbrauchs- und Emissionswerte bei der Herstellung von Geschirr- und Sanitärkeramik sowie der Herstellung keramischer Fliesen und Platten betrachtet. Die Massenflüsse werden dabei anhand von typischen Beispielen aus dem jeweiligen Produktspektrum dargestellt und können sich aufgrund der Produktvielfalt unterscheiden.

3.1.1 Verbrauchs- und Emissionswerte bei der Herstellung von Geschirrkernik

Abbildung 3-1 zeigt die wichtigsten Massenströme der einzelnen Prozessschritte bei der Herstellung von Geschirrkernik. Beim exemplarisch dargestellten Massenfluss handelt es sich um mittels Filterpressentechnologie und Rollerformgebung hergestellte, undekorierte Drehware.

Bei der Darstellung der Verbrauchs- und Emissionswerte werden im Folgenden die relevanten partikelförmigen und gasförmigen Emissionen, die anfallenden Abwässer und der entstehende Abfall bei der Herstellung von Geschirrkernik betrachtet.

3.1.1.1 Rohstofflagerung und Rohstofftransport

Bei Rohstofflagerung und Rohstofftransport treten Emissionen in erster Linie als Staub an Fördereinrichtungen, Wiegeanlagen oder in der Silo-Verdrängungsluft auf. Die Abgasvolumenströme betragen prozessbedingt bis zu 10.000 m³/h. Die Temperatur der abgesaugten Abluft entspricht der Umgebungstemperatur. Zur Emissionsminderung werden Gewebefilter eingesetzt, die als Siloaufsatzfilter, Einzelfilter oder Zentralfilter installiert sind [125].

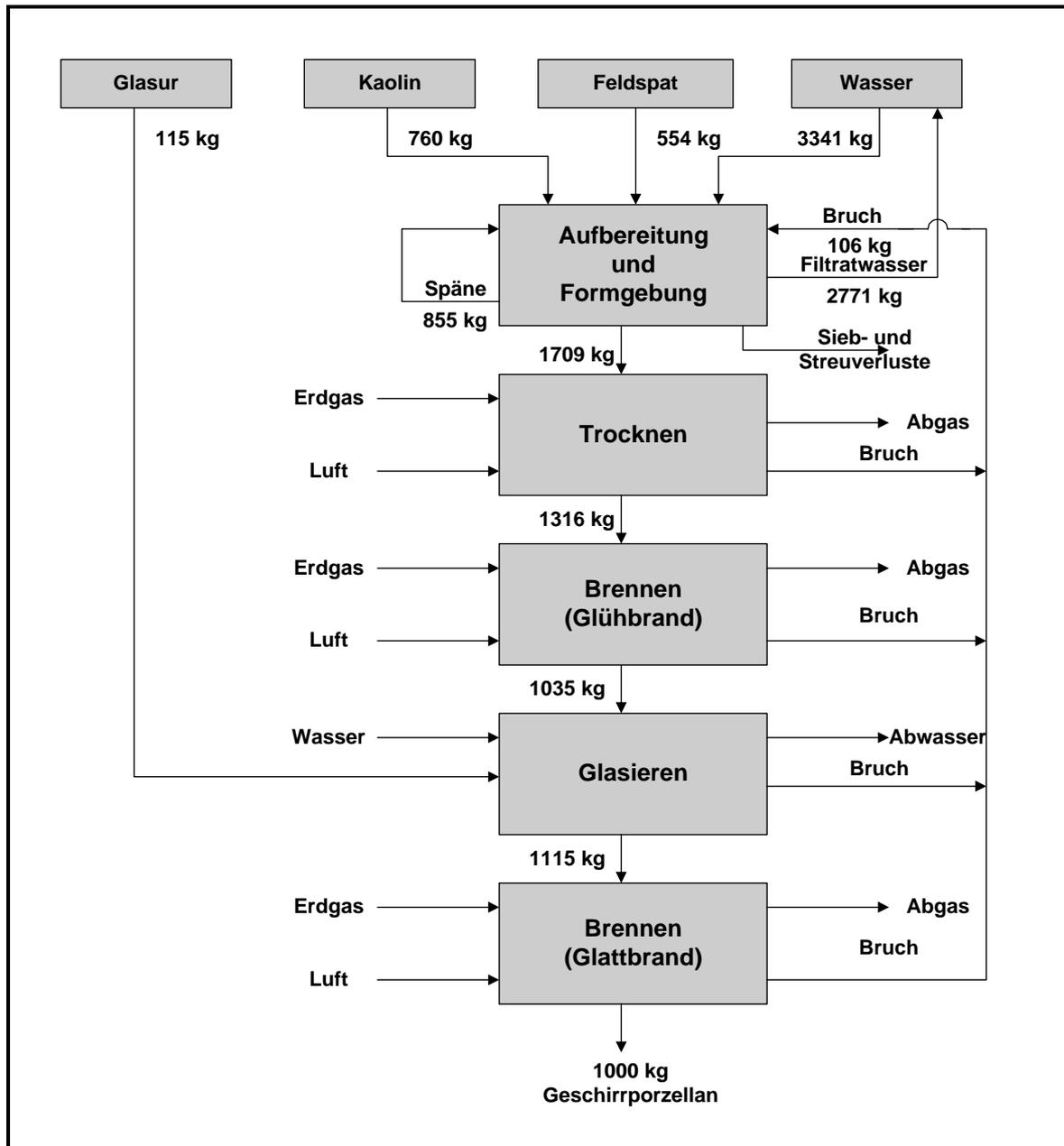


Abbildung 3-1: Massenfluss bei der Herstellung von Geschirrkernik (Drehware)

Quelle: [57]

3.1.1.2 Masseaufbereitung

Partikelförmige Emissionen, die beim Mischen, Sieben, Sichten und Fördern der Rohstoffe entstehen, werden ebenfalls in Gewebefiltern abgeschieden.

Bei der Sprühkornherzeugung wird das verdampfte Wasser mit den Feuerungsabgasen über Dach abgeleitet. Zur Abscheidung von Staub wird hier eine Kombination von Zyklon und Nassabscheider oder ein Gewebeabscheider eingesetzt. In modernen Geschirrfabriken gehören Sprühtrockner jedoch nicht mehr zur Ausrüstung, da die entsprechenden Granulate von den Rohstofflieferanten zugeliefert werden.

Tabelle 3-1 zeigt typische Betriebsdaten und Reingaswerte von Sprühtrocknern, die zur Herstellung geschirrkemischer Pressmasse eingesetzt wird. Als Abscheider wurden Gewebefilter eingesetzt.

Tabelle 3-1: Reingasemissionen von Sprühtrocknern

| Emissionsquelle: | | Sprühtrockner |
|---------------------------------------|-------------------|---------------|
| Abgasvolumenstrom [m ³ /h] | | bis 10.000 |
| Abgastemperatur [°C] | | 60 |
| Emissionskomponente | Konzentration | Bandbreite |
| Staub | mg/m ³ | 20 - 30 |

Quelle: [46]

3.1.1.3 Formgebung

Während bei der Verarbeitung feuchter Massen keine partikelförmigen Emissionen auftreten, sind bei der Verarbeitung trockener Massen Staubemissionen zu beachten. Diese Emissionen treten hauptsächlich an der Presse, der Putzmaschine und an den Granulatübergabestellen auf. Zur Emissionsminderung werden Staubfilter eingesetzt. Die Abgasvolumenströme betragen in Abhängigkeit von der Pressengröße 2.000 m³/h bis 4.000 m³/h bei einer Abgastemperatur von 20 bis 30 °C [125].

3.1.1.4 Trocknung

Die Formlinge werden in gasbeheizten Kammer- und Durchlauftrocknern getrocknet. Oft erfolgt eine Beheizung mit Ofenabwärme, bei Kleinserien werden auch elektrisch beheizte Kammern eingesetzt.

Der Abgasvolumenstrom der entstehenden Feuerungsabgase beträgt je nach Anforderung an den Trockenvorgang zwischen 2.000 m³/h und 5.000 m³/h, beim Einsatz elektrisch beheizter Trockner hingegen nur 100 m³/h bis 300 m³/h. Die Abgastemperatur kann je nach Trockentemperatur bis zu 100 °C erreichen [125].

3.1.1.5 Brennvorgang, Glasieren und Dekorieren

Wird die Glasur im Spritzverfahren auf den getrockneten oder schühgebrannten Scherben aufgetragen, so ist mit partikelförmigen Emissionen zu rechnen. In Abhängigkeit von den Glasurinhaltsstoffen sind Schwermetallemissionen zu beachten. Zur Abreinigung des Spritznebels ist ein Spritzstand im Einsatz. Die Abscheidung des Spritznebels erfolgt entweder mit einer wasserberieselten Spritzwand oder in einem Filter mit teflonbeschichteten Kunststofftüchern. Das entstehende Abwasser wird mittels Filterpresse und Schwermetallfällung gereinigt und dem Weißwasser zugeführt. Die Abgasvolumenströme der Glasurlinien betragen bei Abgastemperaturen von ca. 50 °C bis zu 7.000 m³/h [125].

Beim anschließenden Brennprozess entweichen in der Anwärmphase des Glühbrandes im Temperaturbereich bis ca. 400 °C die durch die Pressmasse eingetragenen organischen Stoffe durch Zersetzen oder Verdampfen. Dabei kann auch Benzol entstehen [125]. Tabelle 3-2 zeigt typische Rohgaswerte, die beim Brand von Porzellan im Tunnelofen entstehen.

Tabelle 3-2: Rohgaswerte beim Brand von Porzellan durch Gasfeuerung

| Emissionsquelle: | | Tunnelofen | | | |
|---------------------------------------|----------------------|---------------|----------------------|-------------|--|
| Abgasvolumenstrom [m ³ /h] | | 3.500 - 8.000 | | | |
| Abgastemperatur [°C] | | 130 - 200 | | | |
| Emissionskomponente | Glühbrand | | Glattbrand | | |
| | Konzentration | Massenstrom | Konzentration | Massenstrom | |
| | [mg/m ³] | [g/h] | [mg/m ³] | [g/h] | |
| Staub | 0,3 - 6 | 0,15 - 50 | 0,3 - 6 | 5 - 30 | |
| NO _x als NO ₂ | 13 - 110 | 15 - 710 | 20 - 150 | 15 - 720 | |
| Fluoride als HF | 1 - 35 | 0,25 - 109 | 0,3 - 23 | 0,2 - 110 | |
| org. Stoffe als Gesamt-C | bis 40 | bis 90 | 3 - 18 | 5 - 30 | |

Quelle: [116]

Die in der Tabelle 3-2 aufgeführten Fluoridemissionen entstehen, da bei einer Temperatur von 700 - 800 °C aufgrund der thermischen Belastung der Einsatzstoffe die Rohstoffbestandteile zersetzt werden. Der Fluoridemissionsverlauf ist im Tunnelofen aufgrund des kontinuierlichen Brennbetriebes konstant. Bei periodisch betriebenen Öfen, wie z.B. Herdwagenöfen, treten im relevanten Temperaturbereich zwischen 800 °C und 1.150 °C hingegen zeitweise höhere Fluoridemissionen auf. Zur Minimierung der gasförmigen anorganischen Fluorverbindungen werden nach dem Trockensorptionsverfahren arbeitende Abgasreinigungsanlagen eingesetzt. Die Abgase enthalten als weitere luftverunreinigende Stoffe Feuerungsabgase, wie z.B. NO_x, CO, CO₂. Bei Einsatz von Heizölen auch SO_x. NO_x-Emissionen können durch die Verwendung moderner Feuerungsanlagen und durch die Verteilung der Feuerung auf viele kleine Brenner minimiert werden. SO_x-Emissionen werden beim Einsatz von Erdgas ebenfalls auf ein Minimum reduziert.

Die Abgasvolumenströme eingesetzter Schnellbrand- oder Rollenöfen betragen bei Abgastemperaturen von 130 °C bis 200 °C etwa 3.500 m³/h bis 5.000 m³/h, die der Herdwagenöfen 5.000 m³/h bis 20.000 m³/h [125].

Sofern die Geschirrkeraamik noch einen Dekorbrand durchläuft, sind auch die Emissionen des Dekorbrandofens zu betrachten. Beim Dekorbrand verbrennen zunächst der Leim und die Bindemittel der Abziehbilder bzw. die Harze der Malfarben. Dabei entstehen geruchsintensive organische Stoffe. Zusätzlich kann es zu Schwermetallemissionen durch die anorganischen Farbpigmente kommen, die aus Schwermetalloxiden bestehen. In Tabelle 3-3 sind typische Pigmentsysteme aufgeführt, die als Dekorfarben eingesetzt werden.

Tabelle 3-3: Keramische Pigmentsysteme für Dekorfarben

| Farbe | 800 °C Temperaturbeständigkeit | 1.200 °C Temperaturbeständigkeit |
|---------|---|--|
| Grün | Chromoxid, Chrom-Kobalt-Spinelle | |
| Blau | Kobalt-Aluminium-Zink-Chrom-Spinelle, Kobaltschmelzen | Zirkon-Vanadium-Blau |
| Gelb | Bleiantimonat | Zinn-Vanadium-Gelb |
| Schwarz | Spinelle mit Eisen, Kobalt, Nickel, Mangan, Chrom, Kupfer, Vanadium etc. | |
| Grau | Zinn-Antimon-Grau, Zirkon-(Co, Ni)-Grau | |
| Braun | Eisen-Chrom-Zink-Mangan-Spinelle, Eisenoxid | Zirkon-Eisen Rosa |
| Rot | Cassius-Purpur, Cadmium-(S, Se)-Rot | Zinn-Chrom-(Ca, Si)-Pink, Cadmiumrot- Einschlupigment |
| Weiss | Ceroxid, Titanoxid | Zinnoxid, Zirkonsilikat |

Quelle: [125]

Die folgende Tabelle 3-4 zeigt typische Betriebsdaten und Massenkonzentrationen sowie Massenströme der Schwermetallemissionen die beim Dekorbrand von Geschirrkemik auftreten können.

Tabelle 3-4: Schwermetallrohgaswerte beim Dekorbrand von Geschirrkemik

| Emissionsquelle: | Dekorbrandofen | |
|---------------------------------------|----------------------|-------------|
| Abgasvolumenstrom [m ³ /h] | 1.000 - 3.000 | |
| Abgastemperatur [°C] | ca. 100 | |
| Schwermetallemissionskomponenten | Massenkonzentration | Massenstrom |
| | [mg/m ³] | [g/h] |
| Blei | 0,002 - 2,75 | 0,9 - 4,8 |
| Cadmium | 0,003 - 0,07 | 0,01 - 0,1 |
| Kobalt | 0,054 - 0,26 | 0,06 - 0,3 |
| Nickel | 0,06 - 0,4 | 0,1 - 0,9 |

Quelle: [116]

3.1.1.6 Nachbehandlung

Die Standflächen der Flach- und Hohlgeschirrtteile werden nach dem Brand geschliffen. Die an den Schleifanlagen anfallenden staubförmigen Emissionen werden in Gewebefiltern abgeschieden. Dabei entstehen Abgasvolumenströme von 2.000 m³/h bis 6.000 m³/h. Die Abgastemperatur beträgt etwa 30 °C [125].

3.1.1.7 Abwasser

In der feinkeramischen Geschirrinndustrie fällt Abwasser hauptsächlich als Reinigungswasser in der Aufbereitung, der Gießerei, beim Glasieren und Dekorieren und außerdem als Schleifwasser bei einer evtl. Nachbehandlung an. Dieses Produktionsabwasser enthält die gleichen Stoffe, die als Rohstoffe bei der Herstellung eingesetzt werden [42].

Bei der Abscheidung der Feststoffe aus dem Abwasser gibt es grundsätzlich zwei Möglichkeiten. Sofern große Flächen zur Verfügung stehen, können Klärteiche angelegt werden, die so ausgelegt sind, dass bei langen Durchlaufzeiten alle Feststoffe ohne Zugabe von Sedimentationsbeschleunigern abgeschieden werden können. Stehen keine großen Flächen zur Verfügung, so werden Flockungs- und Flockungshilfsmittel eingesetzt. Die Zugabe dieser Stoffe führt zu einer Vereinigung der sehr fein vorliegenden Stoffe zu größeren Aggregaten, die dann schneller sedimentieren [42].

Neben den direkt anfallenden Produktionsabwässern können beim Einsatz von Nassverfahren, wie z.B. sauren oder alkalischen HF-Wäschen, weitere Abwässer anfallen. Diese sind dann ebenfalls einer aufwendigen Abwasserbehandlung, bestehend aus Neutralisation, Kristallisation oder Fällung, zuzuführen [111].

3.1.1.8 Abfälle

Bei der Herstellung von Geschirrkernik fallen in den Produktionsstufen verschiedenartige Abfälle an.

Bei der Rohstofflagerung anfallende Stäube können zum Teil wieder direkt eingesetzt werden. Relevante Abfälle bei der Masseaufbereitung sind Weißschlämme und verunreinigte Massebestandteile. Der Weißschlamm besteht aus einem Gemenge von Kaolin, anderen feinkeramischen Rohstoffen und sehr geringen Mengen Gips. Analysen der Weißschlämme zeigen die folgenden Bestandteile: SiO_2 (66 % - 70%), Al_2O_3 (18 % - 20 %), Na_2O (0,1 % - 2 %), K_2O (3 % - 3,5 %), CaO (1 % - 3 %) [125]. Bei der Masseaufbereitung anfallende Masseabfälle und Rückschlicker können je nach Grad der Verunreinigung im Anschluss an eine Aufbereitung dem Kreislauf wieder zugeführt werden.

Abfälle aus der Formgebung bestehen im Wesentlichen aus Gipsbruch der Dreh- und Gießformen, Weißschlamm durch Säubern der Formen, Überschussmaterial, Fehlchargen, Pressbruch und in Gewebefiltern abgeschiedenem Staub der Pressmaschinen.

Beim Glasieren entsteht Weißschlamm durch das Säubern der Glasierlinien und durch Fehlchargen. Beim Dekorieren fallen, je nach angewendetem Verfahren, Abfälle in Form von Buntdruckpapieren, Farbschlämmen und Fixier- und Entwicklerbädern an. Das Buntdruckpapier ist beschichtet mit einem Film aus organischem Material, z.B. mit Wachs oder Acrylharz, in das keramische Farben eingebettet sind, die auch schwermetallhaltige Farbpigmente enthalten können. Der Film mit den Farbstoffen wird auf den Keramikkörper übertragen. Sowohl die Papiergrundlage, als auch Reste von beschichtetem Papier verbleiben hier als Abfälle. Farbschlämme sind anorganische, meist schwermetallhaltige halogenfreie Schlämme. Sie fallen in der Geschirrdekoration in der Malerei, der Spritzerei und beim

Siebdruckverfahren an. Als Hauptkomponenten sind anorganische schwermetallhaltige keramische Farben und Malhilfsmittel wie Balsam-Terpentinöl, Dammarlack, Siebdrucköl und Siebdrucklack enthalten. Fixier- und Entwicklerbäder werden für die Abteilung Siebdruck benötigt. Die verbrauchten Bäder müssen entsorgt werden, wobei die Mengen in der Regel gering sind [125].

Beim Brennprozess fallen Abfälle in Form von Feuerfest-Bruch, Glühbruch, Glattbruch und Buntbruch an. Der bei den verschiedenen Brennprozessen anfallende Bruch kann teilweise, z.B. als Glasurrohstoff oder Zusatz zur Gießmasse, wieder aufbereitet und in den Produktionsprozess eingesetzt werden.

Im Rahmen der Nachbehandlung fallen beim Sortieren und Schleifen in den Filtern Stäube an. Beim Verpacken der Ware entstehen Kunststoffabfälle, Altpapier und sonstiger Gewerbemüll.

In den Abgasreinigungsanlagen fallen neben den schon angesprochenen zum Teil wiederverwertbaren Stäuben auch verbrauchte Sorptionsmittel an. Das zur Fluorverminderung eingesetzte Sorptionsmittel (z.B. Calciumcarbonat) ist staubhaltig (Trockensorption mit Additivzugabe) oder ein körniges Produkt der Korngröße 3 bis 6 mm (Trockensorption mit Schüttstofffilter). Das Abfallprodukt besteht vorwiegend aus Calciumcarbonat (CaCO_3) und in geringen Mengen aus Calciumfluorid (CaF_2) [125].

3.1.2 Verbrauchs- und Emissionswerte bei der Herstellung von Sanitärkeramik

In der Abbildung 3-2 sind beispielhaft die relevanten Massenströme bei der Herstellung von Sanitärkeramik aus Vitreous China dargestellt. Die Formgebung erfolgt bei dieser Betrachtung durch Gießen in Gipsformen.

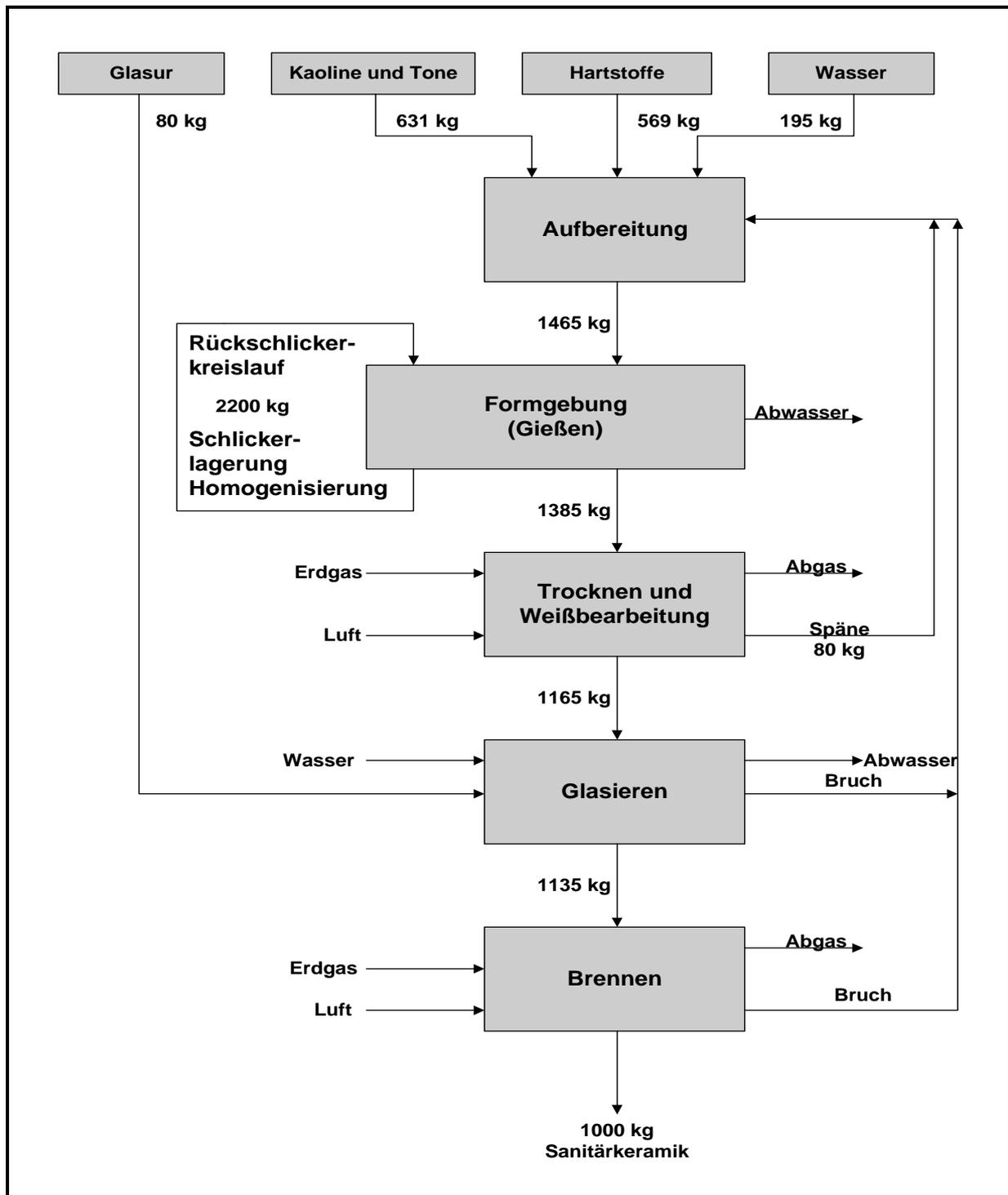


Abbildung 3-2: Massenfluss bei der Sanitärkeramikfertigung aus Vitreous China

Quelle: [57]

Folgend werden die wichtigsten in den einzelnen Prozessschritten anfallenden luftverunreinigenden Emissionen und die im gesamten Produktionsprozess entstehenden Abwässer und Abfälle dargestellt.

3.1.2.1 Rohstofflagerung und Rohstofftransport

In Fördereinrichtungen, Wiegeanlagen und durch Silo- und Verdrängungsluft treten partikelförmige Emissionen auf, die durch den Einsatz von Gewebefiltern vermindert werden können.

3.1.2.2 Masseaufbereitung

Bei der Herstellung von Sanitärkeramik werden die Tone und Kaoline überwiegend nass aufbereitet, so dass nicht mit größeren Staubemissionen gerechnet werden muss. Bei der Trockenaufbereitung der Hartstoffe und Glasurrohstoffe können hingegen relevante Staubemissionen auftreten, die mittels Gewebefilter verringert werden müssen.

3.1.2.3 Formgebung

Im Verfahrensschritt der Formgebung treten aufgrund der angewendeten Gießformgebung keine relevanten luftgängigen Emissionen auf. Beim anschließenden Putzvorgang der Formlinge treten jedoch Staubkonzentrationen auf. Die entstehenden Abgasvolumenströme von bis zu 4.000 m³/h werden Gewebefiltern zugeführt.

3.1.2.4 Trocknung und Glasieren

Daten über Rohgasemissionen beim Einsatz von Kammer- und Durchlauftrockner liegen nicht vor. Beim anschließenden Glasieren der getrockneten Formlinge, das überwiegend im Spritzverfahren stattfindet, entstehen Emissionen von Partikeln, die mittels einer wasserberieselten Spritzwand oder mittels eines Filters mit teflonbeschichteten Kunststofftüchern abgeschieden werden. Die Abgasvolumenströme betragen dabei zwischen 2.000 m³/h und 7.000 m³/h bei Abgastemperaturen von ca. 30 °C.

3.1.2.5 Brennvorgang

Der Brand der Sanitärkeramikerzeugnisse erfolgt in Tunnel- oder Rollenöfen. Bei kleineren Produktionsserien werden auch periodisch betriebene Herdwagenöfen eingesetzt.

Tabelle 3-5 zeigt die wichtigsten Roh- und Reingaswerte eines Tunnelofens von einem typischen Sanitärkeramikbetrieb. Als Sorptionsanlage wurde ein Trocken-Modul-Absorber eingesetzt.

Tabelle 3-5: Roh- und Reingaswerte beim Brand von Sanitärkeramik

| Emissionsquelle: | | Tunnelofen | |
|---------------------------------------|-------------------|------------|-----------|
| Abgasvolumenstrom [m ³ /h] | | 9.100 | |
| Abgastemperatur [°C] | | 140 - 180 | |
| Emissionskomponente | Konzentration | Rohgas | Reingas |
| Staub | mg/m ³ | 10 | 3 |
| NO _x als NO ₂ | mg/m ³ | 30 | 20 |
| CO | mg/m ³ | 200 | 200 |
| Fluoride als HF | mg/m ³ | 1,3 - 3,6 | 0,4 - 1,5 |

Quelle: [6]

Typische spezifische Energieverbräuche verschiedener zum Brand von Sanitärkeramik eingesetzter Öfen gibt Tabelle 3-6 an.

Tabelle 3-6: Leistungsvergleich verschiedener Ofentypen

| Ofentyp | Temperatur [°C] | Brennzeit/ Zyklus [h] | spez. Energie- verbrauch [kJ/kg] | Leistung [t/h] bzw. [t/Zyklus] |
|---|--------------------|-----------------------------|--|--------------------------------------|
| Klassischer Tunnelofen | 1.200 - 1.280 | 16 - 24 | 6.700 - 9.200 | 10 - 50 |
| moderner Tunnelofen mit Faser- leichtauskleidung | 1.230 - 1.260 | 10 - 18 | 4.200 - 6.700 | 10 - 50 |
| Rollenofen | 1.230 - 1.260 | 8 - 12 | 3.100 - 4.200 | 10 - 30 |
| Moderner Herdwagenofen Reparatur- bzw. Rückbrand | 1.180 - 1.220 | 12 - 23 | 7.500 - 9.200 | 1 - 10 |
| Moderner Herdwagenofen Frischbrand | 1.240 - 1.260 | 12 - 23 | 9.200 - 10.500 | 1 - 10 |

Quelle: [78]

3.1.2.6 Nachbehandlung

Die Stand- bzw. Montierflächen der Sanitärkeramiken werden zum Teil nach dem Brand geschliffen, wobei in den Schleifanlagen staubförmige Emissionen anfallen. Die entstehenden Abgasvolumenströme von 2.000 m³/h bis 6.000 m³/h werden in Gewebefiltern entstaubt.

3.1.2.7 Abwasser

Das Abwasser aus der Sanitärkeramikherstellung fällt hauptsächlich als Reinigungswasser in der Aufbereitung und in der Gießerei, als Spülwasser beim Glasieren und als Schleifwasser bei der Nachbehandlung an. Die Produktionsabwässer enthalten dabei grundsätzlich die gleichen Stoffe, die als Rohstoffe eingesetzt werden und können teilweise nach einer Aufbereitung wieder in den Produktionsprozess zurückgeführt werden.

3.1.2.8 Abfälle

In den einzelnen Prozessschritten fallen verschiedenartige Abfälle an. Bei der Rohstofflagerung und der Masseaufbereitung anfallende Stäube, die in Gewebefiltern abgeschieden wurden, können zum Teil direkt wieder eingesetzt werden. Weitere relevante Abfälle bei der Masseaufbereitung sind Weißschlämme und verunreinigte Massebestandteile. Der Weißschlamm besteht ebenso wie bei der Geschirrkemik aus einem Gemenge von Kaolin, anderen feinkeramischen Rohstoffen und Gips. Die Bandbreiten der Bestandteile betragen bei SiO_2 66 bis 70 %, bei Al_2O_3 18 bis 20 %, bei K_2O 3 bis 3,5 %, bei CaO 1 bis 3 % und bei Na_2O 0,1 bis 2 % [125]. Je nach Grad der Verunreinigung können bei der Masseaufbereitung anfallende Masseabfälle und Rückschlicker nach einer Aufbereitung wieder dem Kreislauf zugeführt werden.

Abfälle aus der Formgebung bestehen im Wesentlichen aus Gipsbruch der Gießformen, Weißschlamm vom Säubern der Formen, Überschussmaterial, Fehlchargen und in Gewebefiltern abgeschiedenem Staub der Putzmaschinen. Beim Glasurprozess entsteht Weißschlamm durch das Säubern der Glasurlinien und durch Fehlchargen. Beim Brennprozess fallen Abfälle in Form von Feuerfest-Bruch und Brennbruch an. Der anfallende Bruch wird teilweise, z.B. als Glasurrohstoff oder Zusatz zur Gießmasse, wieder aufbereitet und in den Produktionsprozess eingesetzt. Beim abschließenden Verpacken der Ware entstehen Kunststoffabfälle, Altpapier und sonstiger Gewerbemüll.

Zusätzlich fallen in den Abgasreinigungsanlagen neben den schon angesprochenen Stäuben auch verbrauchte Sorptionsmittel an. Das zur Fluorverminderung eingesetzte Sorptionsmittel (z.B. Calciumcarbonat) ist staubhaltig (Trockensorption mit Additivzugabe) oder ein körniges Produkt der Korngröße 3 bis 6 mm (Trockensorption mit Schüttschichtfilter). Das Abfallprodukt besteht vorwiegend aus Calciumcarbonat (CaCO_3) und in geringen Mengen aus Calciumfluorid (CaF_2) [125].

3.1.3 Verbrauchs- und Emissionswerte bei der Herstellung von keramischen Fliesen und Platten

Bei der Herstellung von glasierten und unglasierten keramischen Fliesen und Platten treten im Wesentlichen gas- und staubförmige Emissionen, Abwässer und Abfälle auf. Im Folgenden werden die Bandbreiten der in den einzelnen Prozessstufen entstehenden luftverunreinigenden Stoffe sowie das insgesamt anfallende Abwasser und der anfallende Abfall betrachtet.

3.1.3.1 Rohstofflagerung und Rohstofftransport

Bei der Rohstofflagerung und dem Rohstofftransport fallen in Fördereinrichtungen, Wiegeanlagen und Übergabestellen staubförmige Emissionen an. Der Abgasvolumenstrom kann prozessbedingt bis zu 10.000 m³/h betragen, die Abgastemperatur entspricht der Raum- bzw. Umgebungstemperatur [125].

3.1.3.2 Masseaufbereitung

Die auftretenden staubförmigen Emissionen beim Mahlen der Rohstoffe bestehen hauptsächlich aus Partikeln der eingesetzten Rohstoffe Ton, Quarz und Feldspat. Der Abgasvolumenstrom beim Trockenmahlen beträgt bis zu 6 m³_N Luft/kg verarbeiteten Rohmaterial (VR) und die Partikelkonzentration erreicht bis zu 50 g Staub/kg_{VR}. Beim Nassmahlen kann der Abgasvolumenstrom ähnlich wie beim Trockenmahlen bis zu 6 m³_N Luft/kg_{VR} betragen, wobei die Partikelkonzentration bis zu 15 g Staub/kg_{VR} beträgt [27].

Bei der Sprühkornherzeugung treten an luftverunreinigenden Stoffen Staub, Stickoxid, Schwefeloxid, Kohlenmonoxid und Kohlendioxid auf. Da bei der Sprühtrocknung dem Schlicker oft noch wässrige Suspensionen zugegeben werden, die aus dem Reinigungsprozess der Glasurlinie entstammen, sind auch die Elemente Bor, Chlor und Blei zu beachten. Die Wasserverdampfungsleistung der Sprühtrockner kann bis zu 20.000 m³/h betragen [125]. Durch den Einsatz von Erdgas als Energieträger können die Kohlenmonoxidemissionen erheblich vermindert werden.

In Tabelle 3-7 sind mögliche Bandbreiten des Abgasstromes und Rohgaskonzentrationen der relevanten Emissionen aufgeführt.

Tabelle 3-7: Betriebsdaten und Rohgasemissionen beim Sprühtrocknen

| Emissionsquelle: | | Sprühtrockner |
|---|-------------------|------------------|
| Abgasvolumenstrom [m ³ /h] | | 15.000 - 125.000 |
| Abgastemperatur [°C] | | 90 - 115 |
| Feuchtigkeit [m ³ _{Wasser} /m ³ _{total}] | | 0,13 - 0,20 |
| Sauerstoffgehalt [%] | | 16 - 20 |
| Emissionskomponente | Konzentration | Bandbreite |
| Staub | mg/m ³ | 150 - 1.500 |
| NO _x als NO ₂ | mg/m ³ | 3 - 15 |
| CO | mg/m ³ | 1 - 15 |
| CO ₂ | Vol.-% | 1,5 - 4 |
| Chloride als HCl | mg/m ³ | 1 - 5 |
| Bor | mg/m ³ | < 0,3 |
| Blei | mg/m ³ | < 0,15 |

Quelle: [27]

3.1.3.3 Formgebung

Bei der Verarbeitung von Pressmassen entsteht ein Abgasvolumenstrom von bis zu 5 m³_N Luft/kg_{VR} wobei die Partikelkonzentration bis zu 7 g Staub/kg_{VR} erreicht [27]. Je nach Größe der Presse entstehen beim Pressen Abgasvolumenströme zwischen 2.000 m³/h bis 4.000 m³/h bei einer Abgastemperatur von 20 bis 30 °C. Weitere staubförmige Emissionen können an der Putzmaschine nach der Presse anfallen. Beim Extrudieren werden hingegen feuchte Massen verarbeitet, so dass nicht mit Emissionen zu rechnen ist [125].

3.1.3.4 Trocknung

Tabelle 3-8 zeigt die Bandbreiten der wichtigsten Inhaltsstoffe des Abgases und die charakteristischen Abgasdaten der zum Trocknen üblicherweise eingesetzten Durchlauftrockner.

Tabelle 3-8: Betriebsdaten und Rohgasemissionen beim Trocknen

| Emissionsquelle: | | Durchlauftrockner |
|---|-------------------|-------------------|
| Abgasvolumenstrom [m ³ /h] | | 2.000 - 7.000 |
| Abgastemperatur [°C] | | 50 - 190 |
| Feuchtigkeit [m ³ _{Wasser} /m ³ _{total}] | | 0,04 - 0,11 |
| Sauerstoffgehalt [%] | | 16 - 20 |
| Emissionskomponente | Konzentration | Bandbreite |
| Staub | mg/m ³ | 5 - 25 |
| CO ₂ | Vol.-% | 1 - 3 |

Quelle: [27]

Der Staub im Trocknerabgas stammt von an den Formlingen anhaftenden und beim Bruch von Formlingen entstehenden Stäuben. Aufgrund der Trocknertemperaturen von weniger als 300°C ist die Bildung von Stickoxiden vernachlässigbar [27].

Die Heizleistung der Brenner in den Trocknern ist gering, da die Beheizung der Trockner größtenteils mit Ofenabwärme erfolgt. Teilweise kommen auch elektrisch beheizte Trockner zum Einsatz, bei denen sich der Abgasvolumenstrom auf 100 bis 300 m³/h verringert [125].

3.1.3.5 Brennvorgang und Glasieren

Die beim Glasieren anfallenden gas- und staubförmigen Emissionen sind abhängig von der Auftragstechnik und der Zusammensetzung der Glasur. Generell können beim Glasieren im Spritzverfahren bzw. bei der Herstellung der Glasur luftgängige Emissionen entstehen. Die physikalisch-chemischen Zusammensetzungen der Emissionen unterscheiden sich aufgrund der Vielfalt der eingesetzten Glasuren stark voneinander. Kationen des beim Glasieren und bei der Glasuraufbereitung anfallenden Staubes können z.B. aus den Elementen Silicium, Bor, Zirkon, Natrium, Blei, Lithium, Kalium, Barium, Calcium, Magnesium, Zink und Aluminium bestehen.

Typische Emissionsvolumenströme liegen bei 5 m³_N Luft/kg verarbeitetem Glasurmaterial wobei die Partikelkonzentration rund 0,5 g Staub/kg verarbeitetem Glasurmaterial beträgt [27]. Die Abgasvolumenströme betragen bis zu 7.000 m³/h bei einer Abgastemperatur von etwa 30 °C [125]. In der Tabelle 3-9 sind typische Bandbreiten von Abgaskennwerten und Rohgasemissionen des Brennprozesses in Rollenöfen zusammengefasst.

Tabelle 3-9: Betriebsdaten und Rohgasemissionen beim Brennen

| Emissionsquelle: | | Rollenofen |
|---|-------------------|----------------|
| Abgasvolumenstrom [m ³ /h] | | 5.000 - 15.000 |
| Abgastemperatur [°C] | | 130 - 300 |
| Feuchtigkeit [m ³ _{Wasser} /m ³ _{total}] | | 0,05 – 0,10 |
| Emissionskomponente | Konzentration | Bandbreite |
| Staub | mg/m ³ | 5 – 50 |
| NO _x als NO ₂ | mg/m ³ | 15 – 60 |
| SO _x als SO ₂ | mg/m ³ | < 10 |
| CO | mg/m ³ | 1 – 15 |
| CO ₂ | Vol.-% | 1,5 - 4 |
| Fluoride als HF | mg/m ³ | 5 - 40 |
| Chloride als HCl | mg/m ³ | 20 - 90 |
| Bor | mg/m ³ | < 0,5 |
| Blei | mg/m ³ | < 0,15 |

Quelle: [27]

Fluorkonzentrationen zwischen 500 und 800 mg/kg Ton führen zu den genannten Fluoridemissionen im Rohgas. Die Bor- und Chloremissionen stammen größtenteils von in den Formlingen enthaltenem Wasser, das aus dem Scherben verdampft und hängen somit stark vom eingesetzten Wasser ab. Die auftretenden Bleiemissionen können beim Einsatz bestimmter bleihaltiger Glasuren entstehen [27].

In der Tabelle 3-10 ist der Heizenergieverbrauch verschiedener Ofensysteme (Tunnelofen und Rollenofen) miteinander verglichen. Die Werte beziehen sich auf eine Referenztemperatur von 1.150°C, wobei die Bandbreiten der beiden Ofentypen für den Einmalbrand (1×) und den Zweimalbrand (2×) angegeben werden.

Tabelle 3-10: Heizenergieverbrauch verschiedener Ofensysteme

| Ofensystem | Einheit | Bandbreite |
|-----------------|---------|---------------|
| Tunnelofen (2×) | kJ/kg | 5.920 – 7.300 |
| Tunnelofen (1×) | kJ/kg | 5.420 – 6.300 |
| Rollenofen (2×) | kJ/kg | 3.400 – 4.620 |
| Rollenofen (1×) | kJ/kg | 2.100 – 3.100 |

Quelle: [99]

3.1.3.6 Nachbehandlung

Nach dem Brand werden die Kacheln auf Maß geschliffen wobei staubförmige Emissionen anfallen. Der Abgasvolumenstrom beträgt je nach Größe der Absaugung 2.000 m³/h bis 4.000 m³/h bei einer Abgastemperatur von 20 bis 30 °C [125].

3.1.3.7 Abwasser

In der Tabelle 3-11 sind die Hauptbestandteile des Produktionsabwassers zusammengefasst. Das Abwasser besteht zum größten Teil aus Waschwasser der Glasurlinie. Die Konzentrationen der Substanzen hängen somit wiederum von den eingesetzten Glasuren ab.

Tabelle 3-11: Chemische Zusammensetzung des unbehandelten Abwassers

| | Einheit | Bandbreite |
|-----------------------|---------|----------------|
| pH | | 7 - 9 |
| abfiltrierbare Stoffe | mg/l | 1.000 - 20.000 |
| absetzbare Stoffe | ml/l | 5 - 30 |
| CSB | mg/l | 100 - 400 |
| BSB5 | mg/l | 40 - 160 |
| Fluoride | mg/l | < 2 |
| Chloride | mg/l | 300 - 700 |
| Sulfate | mg/l | 100 - 1.000 |
| Magnesium | mg/l | 10 - 100 |

| | Einheit | Bandbreite |
|-----------|---------|------------|
| Calcium | mg/l | 5 - 500 |
| Bor | mg/l | 1 - 60 |
| Blei | mg/l | < 5 |
| Natrium | mg/l | 50 - 500 |
| Kalium | mg/l | 1 - 50 |
| Silizium | mg/l | 5 - 30 |
| Aluminium | mg/l | < 2 |
| Eisen | mg/l | < 0,5 |
| Zink | mg/l | < 2 |

Quelle: [27]

3.1.3.8 Abfälle

Die bei der Abwasserbehandlung anfallenden Schlämme haben je nach Produktionsprozess eine sehr unterschiedliche Zusammensetzung. In Tabelle 3-12 sind die Bandbreiten der Hauptbestandteile des Schlammes zusammengefasst.

Tabelle 3-12: Hauptbestandteile des anfallenden Schlammes

| Verbindung | Einheit | Bandbreite |
|--------------------------------|---------|------------|
| SiO ₂ | Masse-% | 40 - 60 |
| Al ₂ O ₃ | Masse-% | 5 - 15 |
| B ₂ O ₃ | Masse-% | 0 - 10 |
| Fe ₂ O ₃ | Masse-% | 0,1 - 5 |
| CaO | Masse-% | 5 - 15 |
| MgO | Masse-% | 0,5 - 3 |
| Na ₂ O | Masse-% | 0,5 - 3 |

| Verbindung | Einheit | Bandbreite |
|------------------|---------|------------|
| K ₂ O | Masse-% | 0,5 - 3 |
| TiO ₂ | Masse-% | 0 - 7 |
| ZnO | Masse-% | 1 - 8 |
| BaO | Masse-% | 0,1 - 3 |
| PbO | Masse-% | 0,1 - 15 |
| ZrO ₂ | Masse-% | 1 - 15 |
| | | |

Quelle: [27]

Bei der Herstellung keramischer Fliesen und Platten fallen zwischen 0,09 und 0,15 kg trockener Schlamm pro Quadratmeter gefertigtem Produkt an. Bei einer durchschnittlichen Flächendichte von 15 bis 20 kg/m² sind dies zwischen 0,4 und 1,0 % (kg trockener Schlamm/kg Produkt) [27].

3.2 Verbrauchs- und Emissionswerte bei der Herstellung grobkeramischer Erzeugnisse

Aus dem Bereich der Grobkeramik werden in den folgenden Abschnitten die Verbrauchs- und Emissionswerte bei der Herstellung von Ziegelerzeugnissen, Steinzeug für die Kanalisation und feuerfesten Erzeugnissen dargestellt.

3.2.1 Verbrauchs- und Emissionswerte bei der Herstellung von Ziegelerzeugnissen

Bei der folgenden Betrachtung der Verbrauchs- und Emissionswerte der Ziegelherstellung sind Unterschiede zwischen Dachziegeln, Hinter- und Vormauerziegeln sowie Klinkern zu beachten. Dachziegel, Vormauerziegel und Klinker werden im Gegensatz zu Hintermauerziegeln häufiger engobiert und glasiert wobei für die Grobkeramik eigentlich untypische Abwässer anfallen können.

3.2.1.1 Rohstofflagerung und Rohstofftransport

Bei der Rohstofflagerung und dem Rohstofftransport treten staubförmige Emissionen an den Übergabestellen der Fördereinrichtungen, Wiegeanlagen und in den Lagereinrichtungen auf, die den Einsatz einer Entstaubung erforderlich machen können.

3.2.1.2 Masseaufbereitung

In Tabelle 3-13 ist die durchschnittliche Zusammensetzung des Rohlings eines porosierten Hintermauerziegels aus den Grundstoffen dargestellt. Es werden durchschnittlich 1,30 kg Grundstoffe eingesetzt, um 1,00 kg Mauerziegel herzustellen [123].

Tabelle 3-13: Durchschnittliche Zusammensetzung eines porosierten Hintermauerziegels

| Grundstoffe | Einheit | Bandbreite |
|-------------------------------|---------|------------|
| Ton, Lehm, Mergel | Masse-% | 70 – 90 |
| Sand, Ziegelbruch | Masse-% | 0 – 15 |
| Kalksteinmehl, Natursteinmehl | Masse-% | 0 – 8 |
| Kohlenstaub | Masse-% | 0 – 8 |
| Sägemehl, Papierfasern | Masse-% | 0 – 6 |
| Polystyrol | Masse-% | 0 - 0,25 |

Quelle: [123]

Der durchschnittliche Wasserverbrauch zur Herstellung der Hintermauerziegel beträgt 0,187 m³/t [123]. An Betriebs- und Hilfsstoffen haben im Wesentlichen Verpackungen, wie z.B. Folien und Bänder, den mengenmäßig größten Anteil, der zwischen 0,5 g und 1 g pro kg Ziegel beträgt.

Bei der Aufbereitung der Ziegelmassen treten insbesondere in der Trockenaufbereitung relevante Staubkonzentrationen auf, so dass die Abluft entsprechenden Entstaubungsanlagen zugeführt werden muss.

3.2.1.3 Formgebung

An den Pressen treten bei der Verarbeitung von Trockenmassen partikelförmige Emissionen auf, die in Entstaubungsanlagen abgeschieden werden müssen. Die Verarbeitung von plastischen Massen in Extrudern oder Revolverpressen hingegen erfordert in der Regel keine Entstaubungseinrichtungen.

3.2.1.4 Trocknung und Glasieren

In den Trocknern werden die Formlinge überwiegend mit Abwärme aus dem Ofen (Ofenkühlluft) getrocknet. Sofern sie mit dieser erwärmten Kühlluft der Öfen oder mit geschlossenen Heizsystemen betrieben werden, entstehen keine gasförmigen anorganischen Fluoremissionen, wenn eine Vermischung der Kühlluft der Öfen mit dem Abgas aus der Brennzone ausgeschlossen ist. Werden die Ziegel anschließend glasiert oder engobiert, so können je nach angewendetem Glasier- oder Engobierverfahren partikelförmige Emissionen auftreten, die eine Entstaubung der Abluft erforderlich machen.

3.2.1.5 Brennvorgang

Der benötigte Energie-Einsatz bei der Hintermauerziegelherstellung beträgt rund 1.710 kJ/kg (Primärenergie und elektrischer Strom). Der zusätzliche Sekundärenergieeinsatz, der zu 100 % durch Recycling-Porosierungsmittel, wie z.B. Sägemehl, Polystyrol oder Papierfangstoffe, erzeugt wird, beträgt rund 520 kJ/kg [123]. Tabelle 3-14 zeigt die unterschiedlichen Anteile der Primärenergieträger.

Tabelle 3-14: Anteile der Energieträger am End-Energie-Einsatz

| Energieträger | Einheit | |
|------------------------------|--------------|--------------|
| Elektrische Energie | kJ/kg | 154 |
| Brennstoffe | kJ/kg | 1.467 |
| Treibstoffe | kJ/kg | 43 |
| Porosierungsmittel (neu) | kJ/kg | 43 |
| Recycling-Porosierungsmittel | kJ/kg | 518 |
| gesamt | kJ/kg | 2.225 |

Quelle: [123]

Der Energieverbrauch eines Dachziegelwerkes setzt sich ebenfalls im Wesentlichen aus dem Wärmebedarf zum Trocknen und Brennen und dem Elektroenergieverbrauch für die Gesamtanlage zusammen. Die Bandbreite des spezifischen Wärmebedarfs liegt zwischen 1.880 und 2.805 kJ/kg, wobei der niedrigste Wert von Öfen mit geringem Brennhilfsmittelanteil erreicht wird. Beim spezifischen Stromverbrauch bewegen sich die

Werte zwischen 60 und 110 kWh/t, wovon etwa 8 bis 10 kWh/t auf den Ofenbetrieb entfallen [12].

Die bei der Ziegelherstellung anfallenden signifikanten Emissionen sind gasförmiger Natur. Sie stammen zum überwiegenden Anteil aus dem Brennvorgang. Die Betriebsdaten der Rohgaswerte bei der Herstellung von Ziegeleiprodukten sind in Abhängigkeit von den eingesetzten Brennstoffen in Tabelle 3-15 zusammengefasst.

Tabelle 3-15: Betriebsdaten der Rohgaswerte bei unterschiedlichen Brennstoffen

| Emissionskomponenten | Einheit | gasförmige Brennstoffe | Heizöl EL | Heizöl S |
|---|-------------------|------------------------|-----------|----------|
| staubförmige Stoffe | mg/m ³ | 1 - 10 | 1 - 10 | 5 - 30 |
| NO _x als NO ₂ | mg/m ³ | 20 - 120 | 20 - 120 | 20 - 120 |
| SO _x als SO ₂ ^{*)} bei Rohstoff -S-Gehalt < 0,12% ^{**)} | mg/m ³ | 10 - 300 | 10 - 300 | 30 - 500 |
| Fluoride als HF ^{*)} | mg/m ³ | 1 - 120 | 1 - 120 | 1 - 120 |
| Chloride als HCl | mg/m ³ | 1 - 20 | 1 - 20 | 1 - 20 |

^{*)} bei sehr kalkhaltigen Rohstoffen geringere HF- und SO₂-Gehalte

^{**)} bei Rohstoff-S-Gehalt > 0,12% evtl. Werte über 1.500 mg SO₂/m³

Quelle: nach [116]

Die Rohgaswerte der organischen Bestandteile des Abgases von Ziegeleien sind von der Höhe des Porosierungsgrades und von den Brennbedingungen in der Vorwärmzone des Tunnelofens abhängig.

Tabelle 3-16 zeigt die Bandbreiten der Rohgaswerte beim Einsatz unterschiedlicher Porosierungsmittel.

Tabelle 3-16: Rohgaswerte bei unterschiedlichen Porosierungsmitteln

| Emissionskomponenten | Einheit | Polystyrol | Sägemehl und Papierfangstoffe |
|--------------------------|-------------------|------------|-------------------------------|
| org. Stoffe als Gesamt-C | mg/m ³ | 50 - 250 | 50 - 250 |
| Benzol | mg/m ³ | 1 - 65 | 1 - 5 |
| Phenol | mg/m ³ | 1 - 5 | 5 - 100 |
| Formaldehyd | mg/m ³ | 1 - 20 | 1 - 20 |
| Aldehyde (Σ C1- C4) | mg/m ³ | 1 - 20 | 25 - 180 |
| Kohlenmonoxid | mg/m ³ | < 300 | < 1.500 |

Quelle: [116]

Die in den folgenden Tabellen aufgetragenen Reingaswerte beziehen sich auf die Herstellung porosierter Hintermauerziegel und sind typische Durchschnittswerte, die im Rahmen der in [123] dargestellten Untersuchung ermittelt wurden. Über die eingesetzten Abgasreinigungsanlagen können keine näheren Angaben gemacht werden.

In Tabelle 3-17 sind zunächst die durchschnittlichen Reingaskonzentrationen im Ofenabgas aufgetragen.

Tabelle 3-17: Durchschnittliche Reingaskonzentration (porosierte Hintermauerziegel)

| Emissionsquelle: | | Tunnelofen |
|---------------------------------------|-------------------|----------------|
| Abgasvolumenstrom [m ³ /h] | | 5.000 - 50.000 |
| Abgastemperatur [°C] | | 100 – 200 |
| Emissionskomponente | Einheit | Konzentration |
| Staub | mg/m ³ | 11,6 |
| NO _x als NO ₂ | mg/m ³ | 121 |
| SO _x als SO ₂ | mg/m ³ | 26,1 |
| CO ₂ | g/m ³ | 98,2 |
| CO | mg/m ³ | 124,6 |
| Fluoride als HF | mg/m ³ | 2,7 |
| Chloride als HCl | mg/m ³ | 8,4 |
| org. Stoffe als Gesamt-C | mg/m ³ | 22,7 |

Quelle: [123]

Die Mittelwerte atmosphärischer Emissionen bezogen auf ein Kilogramm porosierter Hintermauerziegel sind in Tabelle 3-18 dargestellt.

Tabelle 3-18: Produktbezogene Emissionen (porosierte Hintermauerziegel)

| Emissionskomponente | Einheit | Konzentration |
|-------------------------------------|--------------------|---------------|
| Staub | mg/kg _Z | 17,6 |
| NO _x als NO ₂ | mg/kg _Z | 184,0 |
| SO _x als SO ₂ | mg/kg _Z | 39,6 |
| CO ₂ | g/kg _Z | 149,0 |
| CO | mg/kg _Z | 189,0 |
| Fluoride als HF | mg/kg _Z | 4,1 |
| Chloride als HCl | mg/kg _Z | 12,7 |
| org. Stoffe als Gesamt-C | mg/kg _Z | 34,5 |
| Ethanol | mg/kg _Z | 3,1 |
| Benzol | mg/kg _Z | 2,3 |
| Methanol | mg/kg _Z | 5,7 |
| Phenol | mg/kg _Z | 0,7 |

Quelle: [123]

3.2.1.6 Nachbehandlung

Einige Ziegelerzeugnisse, wie z.B. Planziegel, werden nach dem Brennen geschliffen. Der an den Schleifmaschinen abgesaugte stark partikelhaltige Abluftstrom wird in geeigneten Entstaubungsanlagen behandelt.

3.2.1.7 Abwasser

Bei der Ziegelherstellung fällt Produktionsabwasser in geringen Mengen nur bei den Produkten an, bei denen eine Oberflächenbehandlung vorgenommen wird. Überschüssige Engoben oder Glasuren werden dabei aufgefangen und in den Produktionskreislauf zurückgeführt. Lediglich bei der Säuberung der Auftragsmaschinen mit Wasser können Engoben- oder Glasurreste in das Abwasser gelangen.

3.2.1.8 Abfälle

Die bei der Ziegelherstellung anfallenden festen Abfälle, wie z.B. Trocken- und Brennbruch, werden betriebsintern wiederverwertet oder zu Produkten gemahlen (z.B. für den Einsatz in Sportanlagen). Im Rahmen der Dachziegelherstellung fallen bei der Verwendung von Gipsformen zusätzlich Gipsabfälle an, die entsorgt werden müssen. Bei der anschließenden Verpackung der Ziegeleiprodukte können Kunststoffabfälle, Altpapier und Schrott aus Stahlbändern anfallen.

In den Abgasreinigungsanlagen fallen neben den schon angesprochenen Stäuben, die zum Teil wiederverwertet werden können, auch verbrauchte Sorptionsmittel an. Zur Fluorverminderung werden Sorptionsmittel (z.B. Calciumcarbonat) sowohl im staubförmigen Zustand (Flugstromreaktor mit anschließendem Gewebefilter) als auch in körniger Form (Korngröße 3 bis 6 mm bei Trockensorption im Schüttschichtfilter) eingesetzt. Die Abfälle bestehen vorwiegend aus Calciumcarbonat (CaCO_3) und geringen Mengen Calciumfluorid (CaF_2) [125]. In Anlagen zur thermischen Nachverbrennung der Schwelgase fallen beim Wechsel der keramischen Speichermedien, die zur Vorwärmung eingesetzt werden, Abfälle in Form dieser verbrauchten Medien an.

3.2.2 Verbrauchs- und Emissionswerte bei der Herstellung von Steinzeug für die Kanalisation

In Abbildung 3-3 ist der Herstellungsprozess von Steinzeug mit einem repräsentativen Massenfluss dargestellt. Alle Mengenangaben beziehen sich auf 1.000 kg Fertigprodukt. Bilanziert werden alle Massenströme, die die Grenzen der Produktionsstätte überschreiten. Der Massenfluss des werksinternen Recyclings ist dabei implizit berücksichtigt.

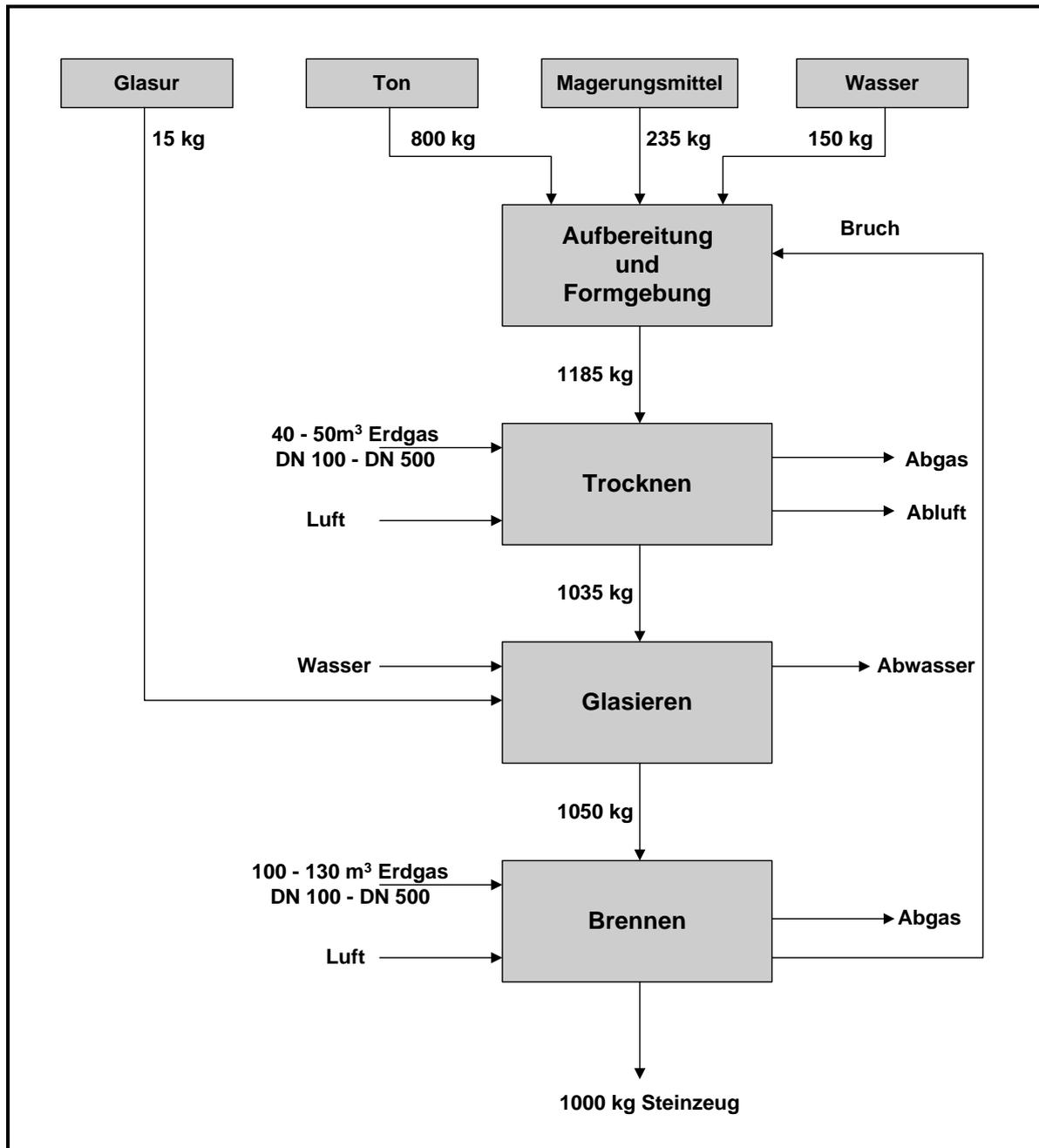


Abbildung 3-3: Massenfluss bei der Herstellung von Steinzeugrohren

Quelle: [50]

Im Gegensatz zum Massenfluss hängt der Energieverbrauch des Trocknungs- und Brennprozesses stärker von der Art der Rohre ab und steigt mit der Rohrgröße an. Im Folgenden werden Verbrauchs- und Emissionswerte von Kleinrohren (DN 100/DN 150), Mittelrohren (DN 200/DN 300) und Großrohren (DN 500 / DN 600) getrennt aufgeführt.

3.2.2.1 Rohstofflagerung und Rohstofftransport

Wenn bei der Rohstofflagerung und dem Rohstofftransport partikelförmige Emissionen an Fördereinrichtungen, Wiegeanlagen und Lagereinrichtungen auftreten, kann der Einsatz von Einzel- oder Zentralfiltern erforderlich werden.

3.2.2.2 Masseaufbereitung

In Tabelle 3-19 ist die Masse der Steinzeugrohre und die Masse verschiedener eingesetzter Dichtungen aufgeführt. Die spezifischen Energieverbräuche für die Herstellung von Dichtungsmaterialien auf Kunststoffbasis betragen bei Polyurethan 108 MJ/kg, bei Polyester 130 MJ/kg und bei Gummi 280 MJ/kg. Die Werkstoffe Polyurethan und Polyester werden mit Füllstoffen abgemagert, so z.B. PU-hart mit 68 % Kreide, PU-weich mit 42 % Kreide und Polyester mit 73 % Quarz. Der Energieinhalt der Füllstoffe wurde mit 1 MJ/kg angenommen. Der spezifische Energieverbrauch zur Herstellung der Stahlringdichtung beträgt 17 MJ/kg [48].

Tabelle 3-19: Massen der Rohre und der Dichtungen

| | Einheit | DN 100 | DN 125 | DN 150 | DN 300 | DN 500 |
|-----------------------------|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Masse der Rohre | kg/m | 15 | 19 | 24 | 62 | 143 |
| Dichte | kg/m ³ | 2.200 | 2.200 | 2.200 | 2.200 | 2.200 |
| Masse der Dichtungen | | | | | | |
| Gummi | kg/Stück | 0,104 | 0,128 | 0,131 | 0,619 | - |
| PU hart | kg/Stück | 0,110 | 0,180 | 0,260 | - | - |
| PU weich | kg/Stück | - | - | - | - | 3,858 |
| Polyester | kg/Stück | - | - | - | - | 1,024 |
| Stahl | kg/Stück | 0,021 | 0,025 | 0,048 | 0,192 | - |

Quelle: [48]

Bei der Aufbereitung der Masse treten aufgrund der Nassaufbereitung keine emissionsrelevanten Staubkonzentrationen auf.

3.2.2.3 Formgebung

Bei der Verarbeitung der plastischen Masse durch Strangpressen treten keine relevanten luftverunreinigenden Emissionen auf.

3.2.2.4 Trocknung und Glasieren

In den Kammer- und Tunneltrocknern entsteht neben den Abgasen der Heizungsanlage nur feuchte Luft, so dass eine Abgasreinigung nicht erforderlich ist.

Während beim Tauchglasieren nicht mit Staubemissionen zu rechnen ist, treten beim Spritzglasieren emissionsrelevante Staubkonzentrationen auf.

3.2.2.5 Brennvorgang

Der spezifische Energieverbrauch und die spezifische CO₂-Emission bei der Herstellung von Steinzeugrohren werden in Tabelle 3-20 und Tabelle 3-21 beschrieben. Dabei wird zwischen dem spezifischen Energieverbrauch zur Bereitstellung der mineralischen Rohstoffe und Energieträger sowie zur Herstellung der Rohre unterschieden. Es müssen als mineralische Rohstoffe Ton, Magerungsmittel und Glasur sowie als Energieträger Erdgas bereitgestellt werden. Der Stromverbrauch, bezogen auf die Primärenergie, gilt für den gesamten Herstellungsprozess einschließlich der Nebenaggregate, Beleuchtung etc. Nach Jeschar et al. [49] sind die angegebenen Daten für etwa 90 % der in Deutschland hergestellten Steinzeugrohre repräsentativ.

Tabelle 3-20: Spezifischer Energieverbrauch bei der Herstellung von Steinzeugrohren

| Rohrleitungsdurchmesser | DN 100 DN 150 [MJ/kg] | DN 200 DN 300 [MJ/kg] | DN 500 Formstücke [MJ/kg] |
|-------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| Bereitstellung | | | |
| mineralische Rohstoffe | 0,20 | 0,20 | 0,20 |
| Erdgas | 0,41 | 0,49 | 0,56 |
| Herstellung | | | |
| Verarbeitung | 0,10 | 0,10 | 0,10 |
| Trocknen | 1,22 | 1,44 | 1,66 |
| Brennen | 3,06 | 3,60 | 4,14 |
| Strom | 1,20 | 1,20 | 1,20 |
| gesamt | 6,19 | 7,03 | 7,86 |

Quelle: [49]

In Tabelle 3-21 sind die spezifischen CO₂-Emissionen bei der Herstellung von Steinzeugrohren angegeben, wiederum aufgeteilt nach Bereitstellung und Herstellung. Es wird angenommen, dass zur Gewinnung, Aufbereitung und zum Transport der mineralischen Rohstoffe und der fossilen Brennstoffe überwiegend Dieselmotoren eingesetzt werden.

Tabelle 3-21: Spezifische CO₂-Emission bei der Herstellung von Steinzeugrohren

| Rohrleitungsdurchmesser | DN 100 DN 150 [kgCO ₂ /kg] | DN 200 DN 300 [kgCO ₂ /kg] | DN 500 Formstücke [kgCO ₂ /kg] |
|-------------------------|---|---|---|
| Bereitstellung | | | |
| mineralische Rohstoffe | 0,015 | 0,015 | 0,015 |
| Erdgas | 0,030 | 0,036 | 0,041 |
| Herstellung | | | |
| Verarbeitung | 0,006 | 0,006 | 0,006 |
| Trocknen | 0,067 | 0,080 | 0,090 |
| Brennen | 0,168 | 0,200 | 0,228 |
| Strom | 0,072 | 0,072 | 0,072 |
| gesamt | 0,358 | 0,409 | 0,452 |

Quelle: [49]

Als weitere relevante luftgängige Emissionen des Gesamtherstellungsprozesses werden in der Tabelle 3-22 die spezifischen Emissionen der Komponenten NO_x, SO₂ und HF betrachtet.

Tabelle 3-22: Spezifische Emissionen verschiedene Steinzeugrohrgrößen

| Emissionskomponente | Einheit | Kleinrohr | Mittelrohr | Großrohr |
|-------------------------------------|---------|-----------|------------|----------|
| NO _x als NO ₂ | mg/kg | 300 | 352 | 405 |
| SO _x als SO ₂ | mg/kg | 179 | 211 | 243 |
| Fluoride als HF | mg/kg | 16,1 | 18,9 | 21,8 |

Quelle: [50]

In der folgenden Tabelle 3-23 sind die maximalen in den europäischen Kanalsteinzeugbetrieben (mit Ausnahme Englands) auftretenden Reingaswerte aufgeführt.

Tabelle 3-23: Maximale Reingaswerte beim Brand von Steinzeug für die Kanalisation

| Emissionsquelle: | | Tunnelofen |
|---------------------------------------|-------------------|----------------|
| Abgasvolumenstrom [m ³ /h] | | 4.000 - 18.000 |
| Abgastemperatur [°C] | | 160 - 200 |
| Emissionskomponente | Einheit | Konzentration |
| Staub | mg/m ³ | 30 |
| NO _x als NO ₂ | mg/m ³ | 200 |
| SO _x als SO ₂ | mg/m ³ | 200 |
| CO | mg/m ³ | 200 |
| Fluoride als HF | mg/m ³ | 5 |
| Chloride als HCl | mg/m ³ | 30 |

Quelle: [86]

3.2.2.6 Nachbehandlung

Beim Schleifen der Steinzeugrohre treten emissionsrelevanten Staubkonzentrationen auf, die mittels lokaler Gewebefilter minimiert werden.

3.2.2.7 Abwasser

Produktionsabwässer fallen bei der Produktion von Steinzeug für die Kanalisation nicht in nennenswertem Ausmaß an. Lediglich bei der Säuberung der Auftragsmaschinen mit Wasser können Glasreste in das Wasser gelangen. Die bei der Oberflächenbehandlung anfallenden überschüssigen Glasuren werden aufgefangen und wieder dem Kreislauf zugeführt.

3.2.2.8 Abfälle

Die aus Rohstofflagerung, Masseaufbereitung und Nachbehandlung stammenden und in den Gewebefiltern abgeschiedenen Stäube müssen zum Teil als Abfälle entsorgt werden. Anfallender Brennbruch wird hingegen aufgemahlen und als Hartstoff wieder in den Produktionsprozess zurückgeführt. Die Verpackungsmittel (Paletten, Holz, Bänder) unterliegen vollständig internen und externen Kreisläufen.

Zusätzlich fallen in den Abgasreinigungsanlagen neben den schon angesprochenen Stäuben auch verbrauchte Sorptionsmittel an. Das zur Fluorverminderung eingesetzte Sorptionsmittel (z.B. Calciumcarbonat) ist staubhaltig (Trockensorption mit Additivzugabe) oder ein körniges Produkt der Korngröße 3 bis 6 mm (Trockensorption mit Schüttschichtfilter). Das Abfallprodukt besteht vorwiegend aus Calciumcarbonat (CaCO_3) und in geringen Mengen aus Calciumfluorid (CaF_2) [125].

Die durchschnittliche Gesamtabfallmenge beträgt bei Kleinrohren 11,9 g Abfall pro kg Kanalrohr, bei Mittelrohren 14,0 $\text{g}_A/\text{kg}_{\text{KR}}$ und bei Großrohren 16,1 $\text{g}_A/\text{kg}_{\text{KR}}$.

3.2.3 Verbrauchs- und Emissionswerte bei der Herstellung feuerfester Erzeugnisse

In Abbildung 3-4 sind exemplarisch für die Fertigung basischer Feuerfesterzeugnisse die Mengenströme bei der Herstellung von Periklas-Chromitsteinen dargestellt.

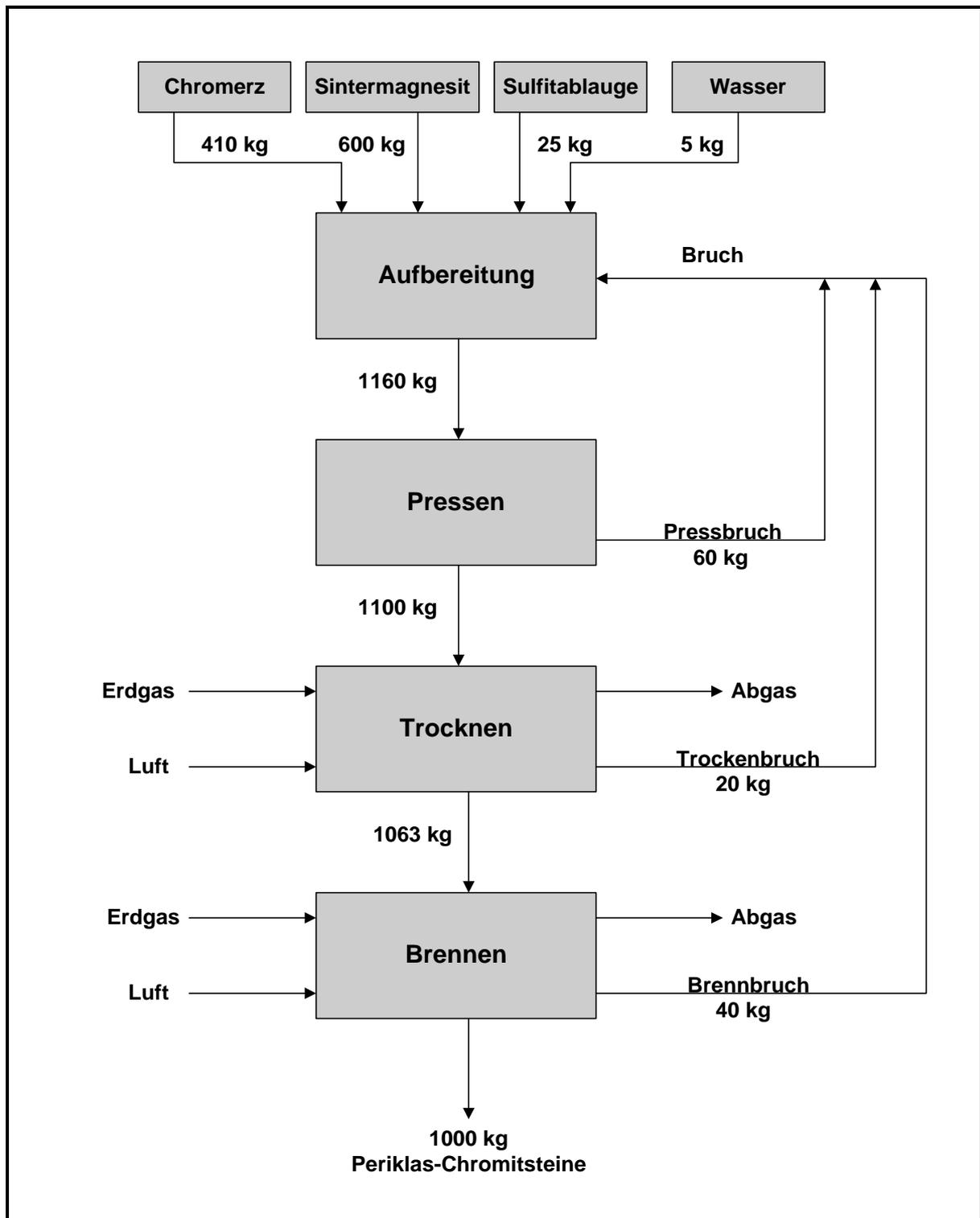


Abbildung 3-4: Massenfluss bei der Herstellung basischer Feuerfesterzeugnisse

Quelle: [57]

Aufgrund der großen Vielfalt an Feuerfesterzeugnissen sind nur sehr allgemeine Angaben über Verbrauchs- und Emissionswerte möglich.

3.2.3.1 Rohstofflagerung und Rohstofftransport

Bei der Lagerung und dem Transport der Rohstoffe treten je nach Art und Feuchtigkeit der eingesetzten Materialien in der Abluft emissionsrelevante Staubkonzentrationen auf. Die Abluft wird deshalb überwiegend mit lokal oder zentral ausgeführten Gewebefiltern gereinigt.

3.2.3.2 Masseaufbereitung

Die Aufbereitung der Massen kann je nach Verwendungszweck in trockenem oder plastischen Zustand bzw. in wässriger Suspension erfolgen. Dabei treten insbesondere bei der Aufbereitung von trockener Masse im Abgas partikelförmige Emissionen auf, so dass es einer Abscheideeinrichtung zugeführt werden muss.

3.2.3.3 Formgebung

Während beim Gießen keine relevanten Abgase entstehen, können beim Pressen luftverunreinigende Stoffe emittiert werden. So können im Abgas emissionsrelevante Mengen an Staub und Dämpfe aus Bindemitteln oder Zuschlagstoffen auftreten.

3.2.3.4 Trocknung

In Kammer- oder Durchlauf Trocknern ist nicht mit gasförmigen anorganischen Emissionen zu rechnen, solange die Trockner mit Kühlluft der Öfen betrieben werden. Werden die Ofenabgase unmittelbar zum Trocknen verwendet, so ist der Anteil an luftfremden Stoffen zu berücksichtigen.

In Abhängigkeit von der Trockentemperatur und bei Einsatz von organischen Binde- und Plastifizierungsmitteln, Porosierungsmitteln, Trennmitteln oder Formöl können bereits beim Trocknen organische Stoffe emittiert werden.

3.2.3.5 Brennvorgang

Durch den Brennprozess können gas- und staubförmige Emissionen verursacht werden, wobei die partikelförmigen Emissionen überwiegend aus Staub und Ruß bestehen. Bei den gasförmigen Emissionen handelt es sich überwiegend um Schwefeloxide, Stickoxide, Kohlenmonoxid, anorganische Fluor- und Chlorverbindungen und um organische Verbindungen. In Tabelle 3-24 sind die Bandbreiten typischer Rohgasemissionen aufgetragen, die beim Brand von verschiedenen Feuerfesterzeugnissen im Tunnelofen entstehen können.

Tabelle 3-24: Rohgasemissionen beim Brand feuerfester Erzeugnisse im Tunnelofen

| Produkt: | | Magnesit | Hochtonerde | Silika |
|---------------------------------------|-------------------|-----------------|----------------|----------------|
| Abgasvolumenstrom [m ³ /h] | | 15.000 – 25.000 | 9.000 – 17.000 | 8.000 – 12.000 |
| Abgastemperatur [°C] | | 250 - 400 | 120 - 250 | 150 – 250 |
| Emissionskomponente | Konzentration | | | |
| Staub | mg/m ³ | 8 – 35 | 5 – 80 | 10 – 25 |
| NO _x als NO ₂ | mg/m ³ | 110 – 470 | 30 – 250 | 5 – 100 |
| SO _x als SO ₂ | mg/m ³ | 90 – 580 | 10 – 430 | 20 – 150 |
| CO | mg/m ³ | 12 – 180 | 30 – 150 | 10 – 50 |
| CO ₂ | Vol.-% | 1,2 – 2,8 | 1,5 – 2,8 | 1,5 – 3,5 |
| Fluoride als HF | mg/m ³ | 0,5 – 1,5 | 5 - 50 | 1 – 3 |

3.2.3.6 Nachbehandlung

Bei der Nachbearbeitung von getrockneten oder gebrannten feuerfesten Erzeugnissen im Trockenverfahren treten emissionsrelevante Staubkonzentrationen auf, die eine Abluftreinigung in Gewebefiltern erforderlich machen.

3.2.3.7 Sonderverfahren

Bei Sonderverfahren (Herstellung einer Kohlenstoffbindung, Pechtränken) entstehen durch die Verwendung von speziellen Bindemitteln (Steinkohleteer, Pech, Harz) beim Härten spezifische Zersetzungsprodukte (Ammoniak, Formaldehyd, Phenole etc.) [116]. Typische Rohgaswerte, die bei Anwendung dieser Sonderverfahren auftreten, sind in Tabelle 3-25 dargestellt.

Tabelle 3-25: Rohgaswerte für Sonderverfahren

| Emissionskomponente | Härtekammer | Temperofen | | Pechtränken |
|--------------------------|---|---|--|--|
| | Harzbindung ^{*)} [mg/m ³] | Harzbindung ^{*)} [mg/m ³] | Pechbindung ^{**)} [mg/m ³] | Pechbindung ^{**)} [mg/m ³] |
| Ammoniak | 2.500 | 20 | - | - |
| Formaldehyd | 25 | 10 | - | - |
| Phenol | 350 | 80 | - | - |
| org. Stoffe als Gesamt-C | > 3.000 | 1.000 | 2.500 | 1.500 |

^{*)} Phenol-Resol-Harz

^{**)} im Gesamt-C sind auch polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAH) enthalten

Quelle: [116]

3.2.3.8 Abwasser

Bei der Herstellung feuerfester Erzeugnisse fallen nur geringe Mengen Abwasser an. Dieses kann der Fall sein bei der Reinigung von Mischaggregaten und bei der Oberflächenbehandlung (Schleifwasser).

3.2.3.9 Abfälle

An Abfällen entstehen bei der Herstellung feuerfester Erzeugnisse Stäube, gebrannter und ungebrannter Bruch, Schlämme und Sonderabfälle. Die abgeschiedenen Stäube, der Trocken- und der Brennbruch können nur teilweise wieder in den Produktionsprozess zugeführt werden. Die anfallenden Schlämme, wie z.B. von der Engobierlinie, können ebenfalls nur bedingt wiederverwendet werden und müssen zumeist entsorgt werden. Als Sonderabfälle fallen in erster Linie ölhaltige Schleifwässer und bei Einsatz der genannten Sonderverfahren auch phenol- und teerhaltige feste und flüssige Abfälle an. Bei der Verpackung der Erzeugnisse entstehen weitere Abfälle in Form von Folien, Altpapier und sonstigen Gewerbeabfällen.

In den Abgasreinigungsanlagen fallen zusätzlich verbrauchte Sorptionsmittel an. Das zur Fluorverminderung eingesetzte Sorptionsmittel ist staubhaltig (Trockensorption mit Additivzugabe) oder ein körniges Produkt der Korngröße 3 bis 6 mm (Trockensorption mit Schüttschichtfilter). Das Abfallprodukt besteht vorwiegend aus Calciumcarbonat (CaCO_3) und geringen Mengen Calciumfluorid (CaF_2) [125]. In Anlagen zur thermischen Nachverbrennung der Schwelgase fallen beim Wechsel der keramischen Speichermedien, die zur Vorwärmung eingesetzt werden, Abfälle in Form dieser verbrauchten Medien an.

4 Verfügbare Techniken zur Vermeidung und Verminderung von Umweltverschmutzung

In diesem Kapitel werden im Abschnitt 4.1 zunächst gemeinsame verfügbare Techniken zur Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung in der Keramischen Industrie dargestellt. Im Abschnitt 4.2 wird dann der Einsatz der Maßnahmen anhand von Fallstudien aus verschiedenen Produktionsbereichen der Keramischen Industrie dargestellt.

4.1 Überblick über gemeinsame verfügbare Techniken zur Vermeidung und Verminderung von Umweltverschmutzung in der Keramischen Industrie

Zur Vermeidung und Verminderung von Emissionen in die Umweltmedien Luft, Wasser und Boden können prozesstechnische Maßnahmen (Primärmaßnahmen) und additive verfahrenstechnische Maßnahmen (Sekundärmaßnahmen) eingesetzt werden. In den folgenden Abschnitten werden medienbezogen verfügbare Techniken zur Minderung relevanter Schadstoffe der Keramischen Industrie dargestellt. Zusätzlich werden Techniken zur Reduzierung des Rohstoff- und Energieverbrauchs sowie Möglichkeiten zur Optimierung der Prozesssteuerung beschrieben.

4.1.1 Techniken zur Minderung der Emissionen in die Luft

Bei der Produktion keramischer Erzeugnisse entstehen partikel- sowie gasförmige organische und anorganische Emissionen. Daneben kommt es insbesondere bei der Masseaufbereitung zu Lärmemissionen.

4.1.1.1 Techniken zur Minderung partikelförmiger Emissionen

Partikelförmige Emissionen fallen in erster Linie als Staub bei der Rohstoffanlieferung, -lagerung und -aufbereitung sowie beim Spritzglasieren und Nachbearbeiten der keramischen Erzeugnisse an. In den Brennanlagen fallen bei Verwendung von Gas und Öl als Brennstoff nur geringe brennstoffbedingte partikelförmige Emissionen an, während es beim Einsatz von Festbrennstoffen zu partikelförmigen Emissionen in Form von Asche kommen kann [116].

Primärmaßnahmen

Zur Verminderung der Staubemissionen müssen beim Abfüllen und Umfüllen staubender Güter dichte Übergabeeinrichtungen, geeignete Luftverdrängungsräume sowie geringe Fallhöhen gegeben sein. Förderbänder für staubende Rohstoffe sollten abgedeckt sein. Beim Einsatz pneumatischer Fördersysteme ermöglicht das Umluftverfahren einen weitgehend staubfreien Rohstofftransport. Weitere Möglichkeiten zur Verminderung der Staubemissionen bei der trockenen Masseaufbereitung stehen durch die Kapselung der Mischer, Transportgefäße und weiterer Anlagen zur Verfügung.

Durch regelmäßige Wartungs- und Reparaturarbeiten ist sicherzustellen, dass undichte Abgasleitungen, Vorratssilos und Aufbereitungsanlagen bzw. defekte Kapselungen dieser Anlagenteile schnell instandgesetzt werden [125].

Sekundärmaßnahmen

Zur nachgeschalteten Verminderung partikelförmiger Emissionen stehen filternde Abscheider, Fliehkraftabscheider, Nassabscheider und elektrische Abscheider zur Verfügung, die lokal oder zentral nach einer gezielten Objektabsaugung eingesetzt werden können. Filternde Abscheider sind gut geeignet, um Partikel aus den Abgasen abzuscheiden und die in der Keramischen Industrie geforderten Emissionsgrenzwerte sicher einzuhalten. Entsprechend ihrer Wirkungsweise unterscheidet man Oberflächenfilter oder Tiefenfilter, in denen flexible und starre Filtermedien sowie Schüttschichten als Filtermedien zum Einsatz kommen [117].

In der Keramischen Industrie werden im Wesentlichen Oberflächenfilter, wie der in Abbildung 4-1 dargestellte Schlauchfilter eingesetzt.

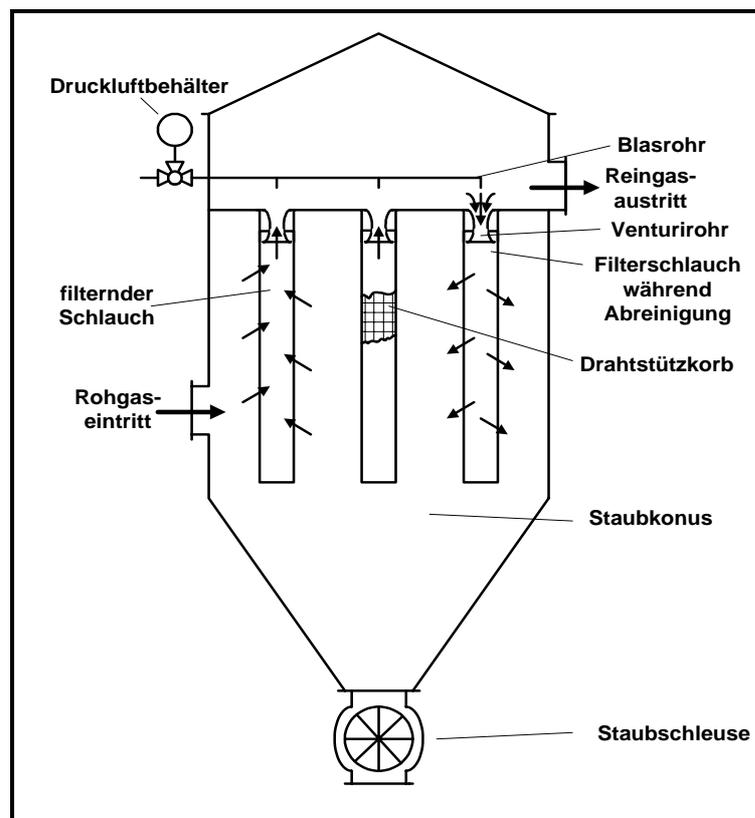


Abbildung 4-1: Schematische Darstellung eines Schlauchfilters

Quelle: [117]

Die Regenerierung der Filtermedien erfolgt beispielsweise durch die in Abbildung 4-1 dargestellte Einleitung eines Druckluftstoßes (Jet-Impuls) auf der Reingasseite des Schlauchfilters. Neben Schlauchfiltern werden auch Taschen-, Patronen-, Kerzen- und Lamellenfilter eingesetzt. In Abbildung 4-2 ist die Systemskizze eines modernen Starrkörperfilters dargestellt. Hauptelemente des Filters sind Kompaktelemente, deren Grundkörper aus PTFE-beschichtetem, gesintertem Polyethylen bestehen. Diese Filtermedien vereinen die Vorteile von Membranfiltermedien mit denen von Starrkörperfiltern. Sie garantieren bei einem geringen Druckverlust sehr hohe Abscheidegrade bei einer gleichzeitig hohen Beständigkeit gegen abrasiven Verschleiß, wie er vor allem durch groben Keramikstaub hervorgerufen wird [35]. Mit diesen Filtersystemen können nach Herstellerangaben Abscheidegrade von über 99 % bei Reststaubkonzentrationen von weniger als 1 mg/m^3 erreicht werden [34].

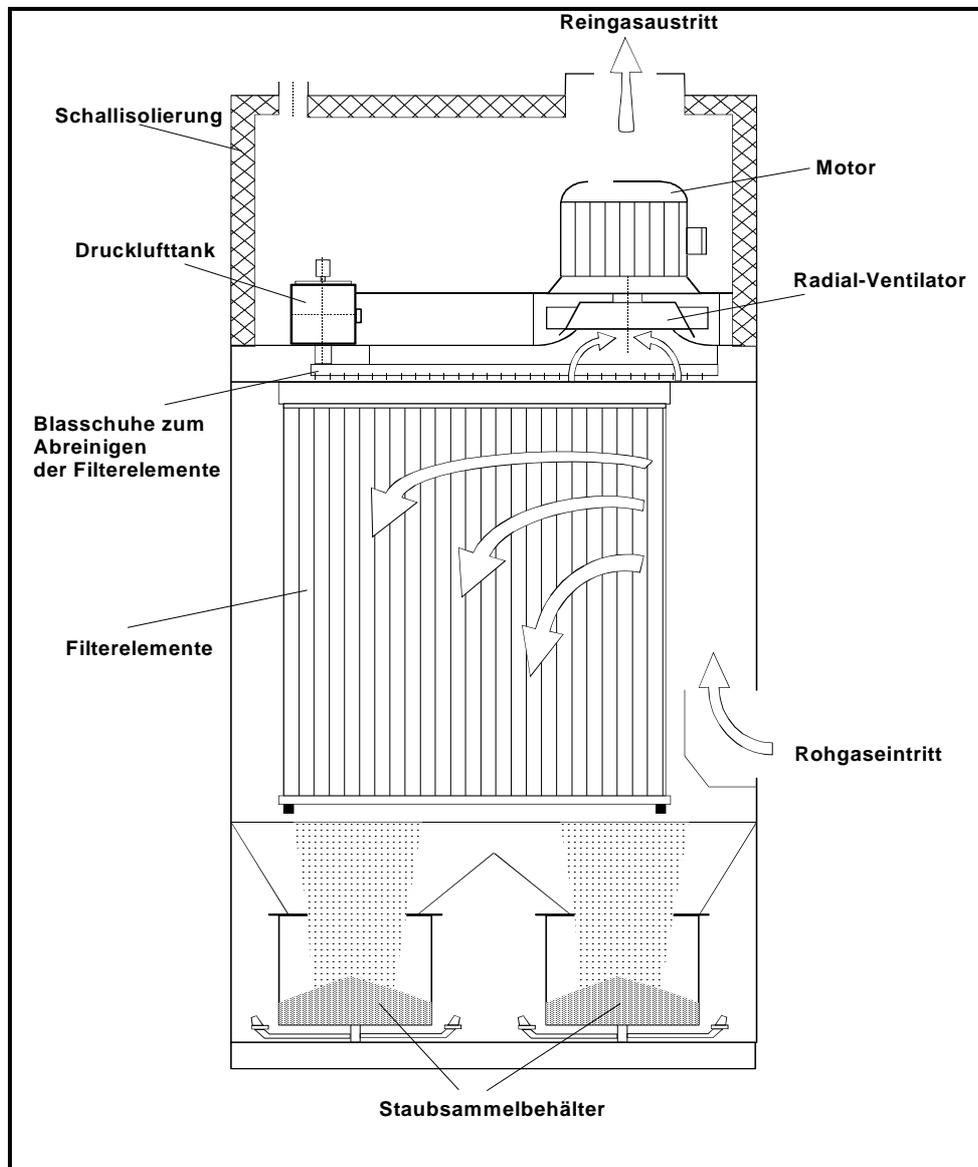


Abbildung 4-2: Schematische Darstellung eines Sinterlamellenfilters

Fliehkraftabscheider, die als Schwerkraft-Gegenstromabscheider, Schwerkraft-Querstromabscheider, Umlenkabscheider oder Zyklonabscheider ausgeführt sind, eignen sich aufgrund des im Allgemeinen noch sehr hohen Restpartikelgehaltes in der Keramischen Industrie nur als Vorabscheider [118]. Nassabscheider sind insbesondere für die Partikelabscheidung aus feuchten Abgasen geeignet. Ihre Verwendung bietet sich dann an, wenn das mit Partikeln beladene Washwasser dem Aufbereitungsprozess wieder zugeführt werden kann [119]. Elektrische Abscheider werden nur in Ausnahmefällen, so z.B. bei sehr großen Volumenströmen, eingesetzt [115]. Beim Betrieb der Filteranlagen können Störungen durch Undichtigkeiten und Verstopfungen bei der Filterbetuchung sowie Betriebsstörungen im Bereich des Austragssystems auftreten, die durch regelmäßige Wartungs- und Reparaturarbeiten gering gehalten werden können. Um längere Ausfallzeiten zu verhindern sind Verschleißteile rechtzeitig auszutauschen und zusätzlich für die Gewebefilter in ausreichendem Maße Ersatzbetuchungen vorrätig zu halten [125].

In der Praxis haben sich bei der Silolagerung staubender Güter Siloaufsatzfilter mit Füllstandsanzeiger, Überfüllsicherung und fernbedienbarer Abschütteleinrichtung bewährt. Die Filterschläuche der Siloaufsatzfilter garantieren die Abreinigung der Verdrängungsluft und werden 3 bis 5 Minuten nach erfolgter Befüllung automatisch abgereinigt [125]. In der Masseaufbereitung und Nachbehandlung werden zur Abreinigung der staubhaltigen Abluft ebenfalls überwiegend Gewebefilter eingesetzt, die Reststaubgehalte unter 20 mg/m^3 sicher gewährleisten. Beim Einsatz von Zyklon-Wäscher-Kombinationen können hingegen nur Reststaubgehalte knapp unter 50 mg/m^3 erreicht werden. Beim Einsatz von Durchlaufspritzkabinen zum Glasieren keramischer Erzeugnisse kann die Abscheidung des Spritznebels entweder mit einer wasserberieselten Spritzwand oder in einem Filter mit teflonbeschichteten Kunststofftüchern erfolgen [125].

4.1.1.2 Techniken zur Minderung gasförmiger anorganischer Emissionen

Beim Brennen von keramischen Erzeugnissen kommt es unter anderem zur Bildung gasförmiger anorganischer Emissionen. Von besonderer Bedeutung sind dabei gasförmige Fluorverbindungen, Schwefelverbindungen und in einigen Produktionsbereichen Stickoxide, die insbesondere bei Brenntemperaturen über 1.300 °C auftreten. Während die Emission anorganischer gasförmiger Fluorverbindungen produktionsbereichsübergreifende Bedeutung besitzt, treten Schwefeloxidemissionen hauptsächlich in der Ziegelindustrie auf. Verstärkte Stickoxidemissionen können aufgrund der hohen Brenntemperaturen hauptsächlich im Bereich der Feuerfestindustrie auftreten. Beim Brennen salzglasierter Produkte werden anorganische gasförmige Chlorverbindungen emittiert, die entfernt werden müssen [116].

Primärmaßnahmen

Die Primärmaßnahmen zur Reduzierung der anorganischen gasförmigen Fluoremissionen beschränken sich auf die Auswahl der Rohstoffe, des Ofentyps sowie die Betriebsweise der Öfen (Brennführung) [125].

Durch die Verwendung von Rohstoffen mit einem geringen Fluorgehalt können in Einzelfällen die Emissionen an gasförmigen anorganischen Fluorverbindungen um mehr als 50 % gemindert werden, wobei der Auswahl fluorarmer Rohstoffe oft standortbedingte Grenzen gesetzt sind.

Eine weitere prozesstechnische Maßnahme besteht darin, möglichst viel Fluor im Scherben zu binden. Dabei wird versucht, den Fluorwasserstoff in eine Verbindung zu überführen, die auch bei der Brenntemperatur beständig ist. Abbildung 4-3 zeigt exemplarisch für die Ziegelindustrie die Temperaturbereiche, in denen es bei der thermischen Behandlung der Rohlinge in einem Tunnelofen zur Freisetzung von organischen und anorganischen Schadstoffen kommen kann.

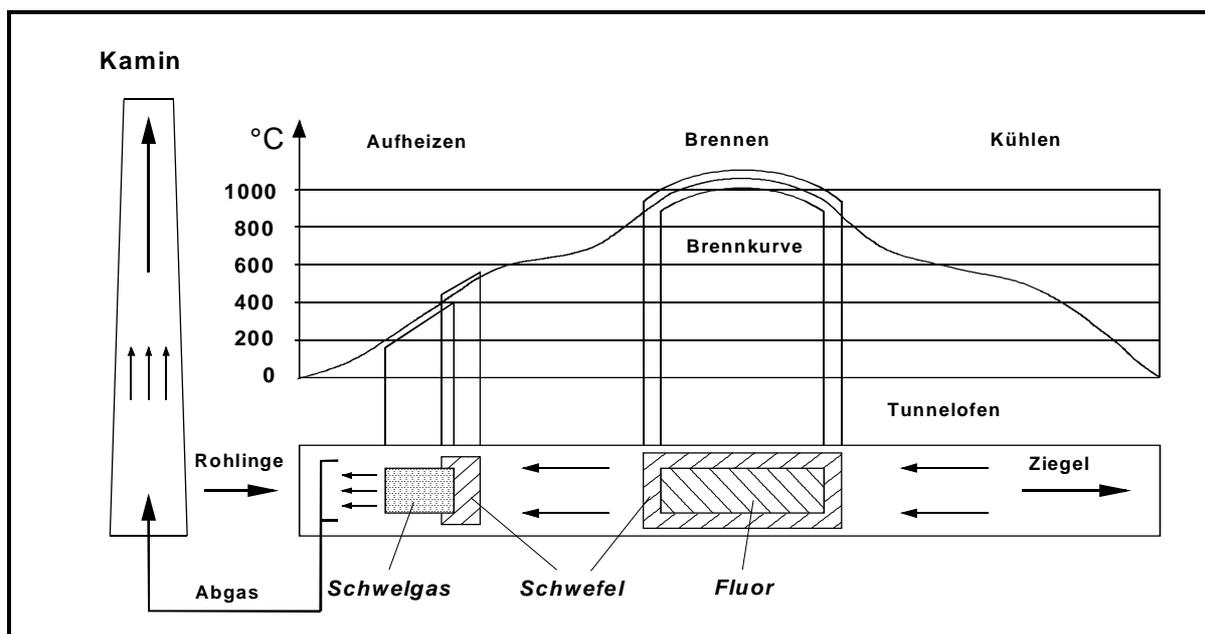


Abbildung 4-3: Temperaturbereiche der Freisetzung von Schadstoffen beim Ziegelbrennen im Tunnelofen

In der Ziegelindustrie können durch den Zusatz von Kalkstein oder kalkhaltigen Materialien zum Rohmaterial beträchtliche Verminderungen der Emissionen von gasförmigen anorganischen Fluorverbindungen erreicht werden. Die Zugabe von Kalkstein oder kalkhaltigen Materialien bewirkt die verstärkte Bindung des Fluors als Calciumfluorid im Scherben; sie ist vor allem bei der Herstellung von Hintermauerziegeln zu empfehlen.

Die Kalkzusätze können bei Temperaturen oberhalb von 700 °C je nach Rohstoff eine Minderung des Fluoraustriebs von 10 bis 75 % bewirken. Außerdem besteht bei derartigen Mischungen die Möglichkeit, die Garbrandtemperatur um 40 bis 80 K abzusenken, was eine zusätzliche Minderung des Fluoraustriebs von 10 bis 90 % bedeutet, ohne dass die Produkteigenschaften beeinträchtigt werden [43]. Bei der Herstellung von Klinkern oder Dachziegeln hingegen können diese Zusätze zu unerwünschten Beeinträchtigungen der Brennfarbe, des Ausblühverhaltens und teilweise der Frostbeständigkeit führen [55]. Die Verwendung früh sinternder Engoben oder der Einsatz von Glasuren bietet eine weitere Möglichkeit zur Reduzierung der Fluoridemissionen, da die Engoben bzw. Glasuren dazu beitragen, dass mehr Fluor im Scherben verbleibt [116].

Durch eine gezielte Einflussnahme auf die Brennführung, die jeweils durch Einzeluntersuchungen festgelegt werden muss, kann die Freisetzung von Fluorwasserstoff ebenfalls vermindert werden. Im Falle einer effektiven HF-Absorption werden im stationären Betrieb die großen Emissionen aus der Brennzone in der Aufheizzone wieder absorbiert. Das in der Brennzone ausgetriebene Fluor wird mit dem Abgas in die Anwärmszone transportiert. Dort kann die Fluorkonzentration im Abgas durch eine Wiedereinbindung des Fluors im Scherben vermindert werden. Rohstoffe, die keine anlagerungsfähigen Calcit-Anteile haben, können bereits beachtliche Mengen Fluor anlagern und davon bis zu 30 % einbinden. Durch Kalkzugabe kann die Wiedereinbindung um 40 bis 60 % verbessert werden [43].

Ein weiteres Beispiel für den Einfluss der Brennführung zeigt sich beim Einsatz der Schnellbrandtechnik in Rollen- oder Schlittenöfen, die sehr kurze Brennzeiten ermöglichen. Dieses hat zur Folge, dass nur ein Teil des im Scherben enthaltenen Fluors ausgetrieben wird. Der Einsatz der Schnellbrandtechnik mit den sehr kurzen Brennzeiten eignet sich für Fliesen, Geschirr [116] und auch für Dachziegel.

Schwefeloxidemissionen lassen durch den Einsatz schwefelarmer oder schwefelfreier Brenn- bzw. Rohstoffe vermindern, wobei der Auswahl schwefelarmer Rohstoffe oft standortbedingte Grenzen gesetzt sind. Hauptursache für die Emissionen von Schwefeloxiden ist die Oxidation bzw. Zersetzung schwefelhaltiger Verunreinigungen des eingesetzten Tones (z.B. Pyrit oder Gips). Als wirksames Agens zur Minderung der Schwefeloxidemissionen kann dem Versatz Calciumcarbonat in Form von Kalksteinmehl zugemischt werden, wodurch bei Temperaturen unter 950 °C bereits bei einer Zugabe von 0,5 Masse-% eine Halbierung der Emissionen zu erreichen ist [95].

Emissionsrelevante Stickoxidemissionen, die in periodisch betriebenen Öfen beim Einsatz stickstoffhaltiger Bindemittel entstehen, können durch ein angepasstes Brennregime reduziert

werden. Die bei Brenntemperaturen über 1.300 °C entstehenden Stickoxide können durch den Einsatz spezieller Low-NO_x-Brenner vermindert werden.

Die Emissionen gasförmiger anorganischer Chlorverbindungen können bei kontinuierlich betriebenen Brennöfen zur Herstellung von salzglasierten Produkten durch den Einbau von Salzverdampfungsanlagen bis zu 50 % reduziert werden, weil dadurch die Überdosierung der Salzzugabe vermieden werden kann [116].

Sekundärmaßnahmen

Zur nachgeschalteten Reduzierung insbesondere der Fluorid- und Schwefeloxidemissionen stehen Nass- und Trockenverfahren zur Verfügung. Bei den Trockenverfahren kommen Schüttschichtfilter, Modul-Absorber, Flugstromreaktoren mit anschließender filternder Entstaubung, Rotations-Dichtstromreaktoren und Wirbelschicht-Reaktoren zum Einsatz [69].

Bei den Trockenverfahren werden die Fluorverbindungen an Kalksplitt (Calciumcarbonat, CaCO₃) oder Kalkhydrat (Calciumhydroxid, Ca(OH)₂), das in unterschiedlicher Form vorliegen kann, in Calciumfluorid (CaF₂) überführt. Neben den Fluorverbindungen reagieren auch Schwefeltrioxid (SO₃) und mit erheblichen Einschränkungen Schwefeldioxid (SO₂) und Chlorverbindungen (z.B. HCl) mit dem Absorbens.

In Abbildung 4-4 sind die wichtigsten ablaufenden Vorgänge in Form von Reaktionsgleichungen vereinfacht dargestellt.

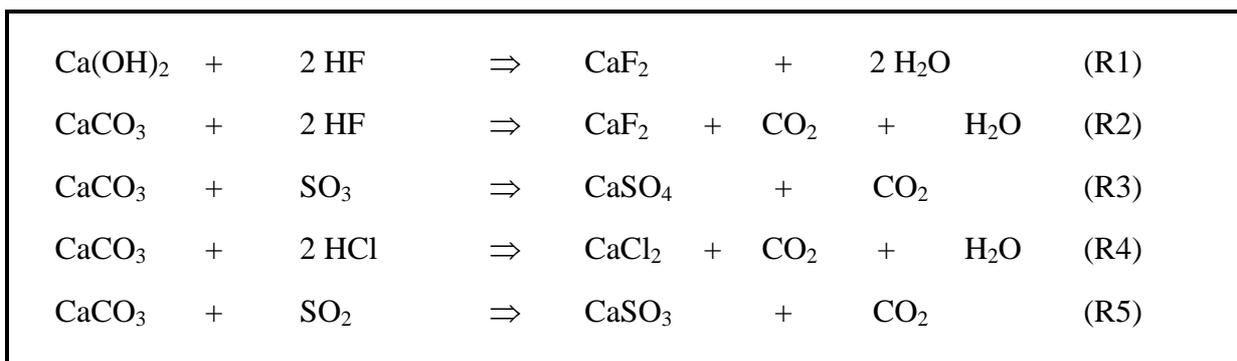


Abbildung 4-4: Wichtige chemische Vorgänge bei der Trockensorption

In der Keramischen Industrie in Deutschland haben sich zunehmend Trockensorptionsanlagen mit Calciumcarbonat durchgesetzt, das z.B. als Kalksteingranulat in *Schüttschichtfiltern* durchströmt wird. Allein in der deutschen Ziegelindustrie arbeiten mehrere hundert dieser Schüttschichtfilter.

Bei diesen Anlagen durchströmen die zu reinigenden Abgase eine Schicht von Kalksteingranulat. Dieses Granulat rieselt kontinuierlich oder diskontinuierlich von einem oben liegenden Vorratssilo zur Austragsvorrichtung am Fuß der Schüttschicht. An der Kalkoberfläche reagieren die Fluorverbindungen gemäß (R2) zu Calciumfluorid (CaF_2). Je nach Verweilzeit und Durchlaufzeit des Kalkgranulats können die Fluorverbindungen so weit abgeschieden werden, dass der Grenzwert (zur Zeit 5 mg/m^3) sicher unterschritten wird. Dabei sind bei Abscheidegraden von bis zu 99 % (Herstellerangaben) für die gasförmigen anorganischen Fluorverbindungen Restkonzentrationen von 5 mg/m^3 weit zu unterschreiten. In nachgeschalteten Schälleinrichtungen kann das Reaktionsprodukt nochmals aufbereitet werden, wobei der Einsatz von Schüttschichtfiltern mit Schälleinrichtung und Rückführung der geschälten Granalien zu erhöhten Staubemissionen führen kann [125]. In Abbildung 4-5 ist exemplarisch ein Schüttschicht-Kaskaden-Absorber mit Schältrummel der Firma Hellmich dargestellt.

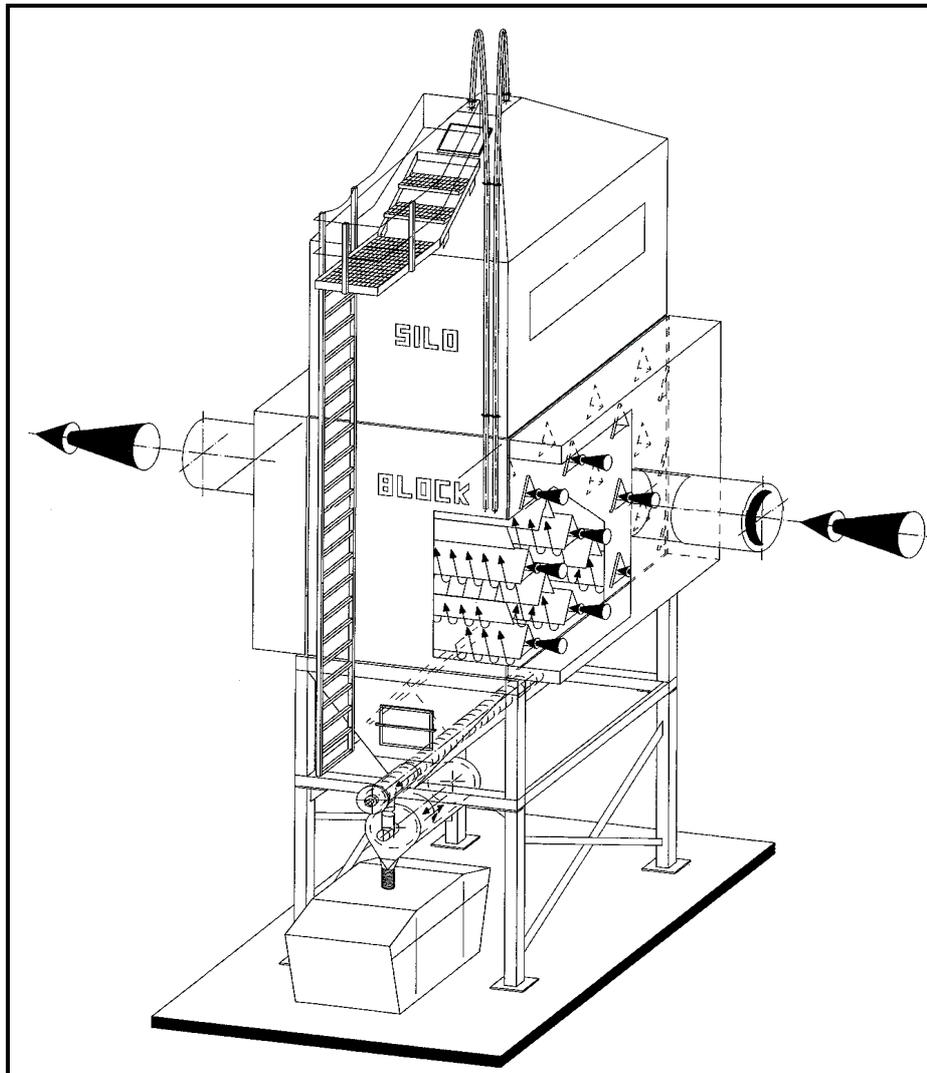


Abbildung 4-5: Schematische Darstellung eines Schüttschicht-Kaskaden-Absorbers

Quelle: [71]

Da mit den herkömmlichen Schüttstofffiltern zwar sehr gute Abscheidegrade für HF, nicht aber für Schwefeloxide (SO_2 und SO_3) und gasförmige anorganische Chlorverbindungen möglich sind, wurde diese Technik insbesondere für die Ziegelindustrie weiterentwickelt. Vier hintereinander geschaltete Absorber, die mit einem besonderen Sorptionsmittel aus CaCO_3 und Ca(OH)_2 betrieben werden, gewährleisten bei Rohgaswerten von ca. $2.500 \text{ mg SO}_2/\text{m}^3$ einen SO_2 -Reingaswert von unter $500 \text{ mg}/\text{m}^3$. Die Schwefeloxide und gasförmige anorganische Chlorverbindungen reagieren entsprechend den Reaktionsgleichungen (R3 - R5) zu CaSO_4 , CaSO_3 und CaCl_2 . In diesen weiterentwickelten Anlagen werden nach Herstellerangaben neben Abscheidegraden für HF von bis zu 99 %, Abscheidegrade von 85 % für SO_2 und SO_3 sowie von mehr als 50 % für HCl erreicht [69].

Beim Betrieb der Schüttstofffilter können Störungen durch Brückenbildung in der Granulatschüttung des Filters bei Unterschreitung des Taupunktes sowie durch Rückstau des auszutragenden Granulats auftreten. Zusätzlich kann es durch Fehlen des Sorptionsmittels und durch Störungen am Ventilator zu Ausfallzeiten kommen, die durch eine regelmäßige Wartung der Anlagen vermieden oder verringert werden können [125].

Ein weiteres Verfahren, das hauptsächlich zur Abscheidung von gasförmigen anorganischen Fluorverbindungen dient, basiert auf der Trockensorption in wabenförmigen Modulen aus Calciumhydroxid in so genannten **Modul-Absorber-Anlagen**.

Bei diesem Verfahren durchströmen die zu reinigenden Abgase einen einfach aufgebauten Stahlreaktor. Im Reaktor befinden sich mehrere Lagen Absorbermodule aus Calciumhydroxid, die beim Durchströmen der HF-haltigen Abgase den darin enthaltenen Fluorwasserstoff chemisch zu Calciumfluorid umwandeln. Die Standzeit der Module wird durch die Betriebszeit der Anlage, den Abgasvolumenstrom und die Rohgaskonzentration an Fluorwasserstoff beeinflusst. Die Module sind zur Reduzierung der Modulwechselzeiten und zur Erleichterung des Handlings in Kassetten zusammengefasst und werden nach Erschöpfung im Austausch gegen neue ersetzt. Modul-Absorber werden vor allem dann vorteilhaft eingesetzt, wenn die Abgasmengen niedrig sind ($< 18.000 \text{ m}^3/\text{h}$) und die Konzentrationen der außer HF vorkommenden anorganischen Verbindungen (SO_2 , SO_3 , HCl) möglichst gering sind. Aus den genannten Gründen finden diese Anlagen überwiegend ihren Einsatz in der Geschirr- und Sanitärkeramik sowie der Email- und Fliesenindustrie. Die Anlagen mit Absorbermodulen sind ohne bewegliche Teile aufgebaut und haben sehr geringe Druckverluste, neigen allerdings zu Verstopfungen der Kapillaren bei höheren Staubgehalten im Abgas. Abbildung 4-6 zeigt schematisch das Trockensorptionsverfahren auf Basis wabenförmiger Module aus Ca(OH)_2 der Firma HF Absorb [71].

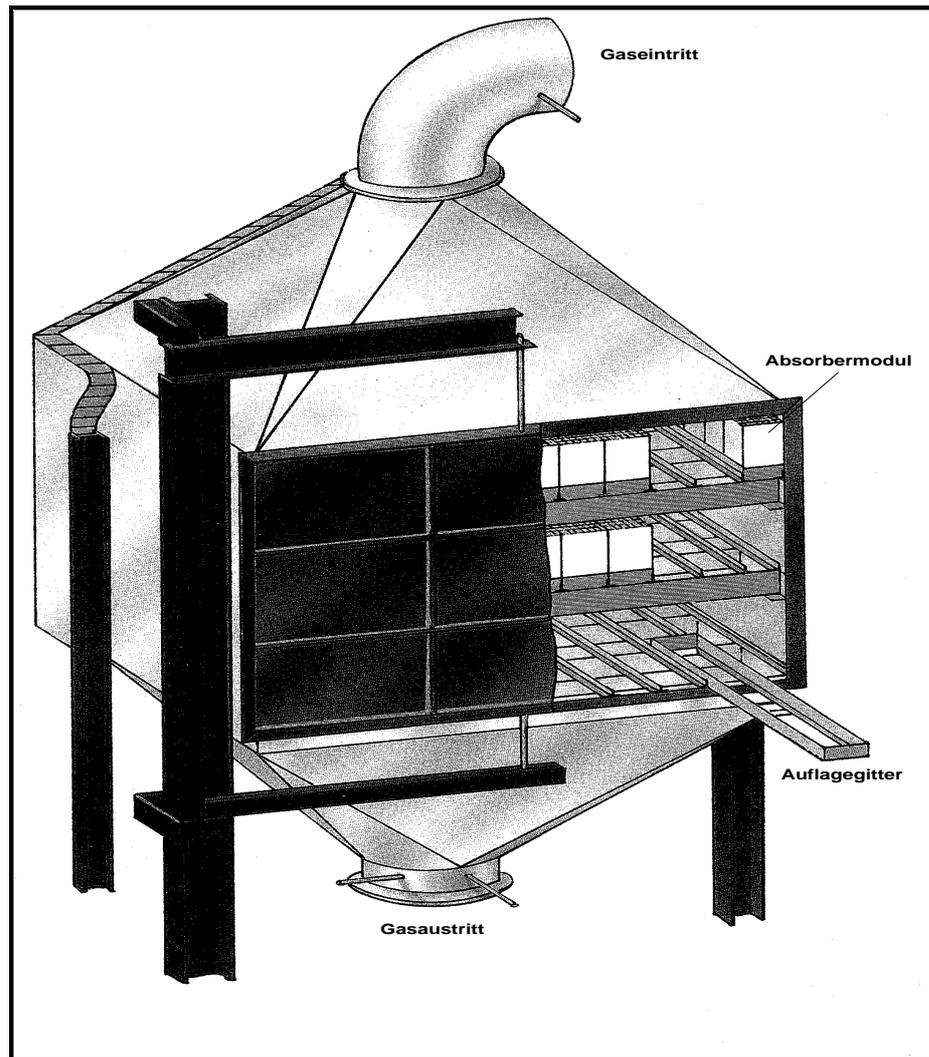


Abbildung 4-6: Schematische Darstellung der Trockensorption auf Basis wabenförmiger Module

Quelle: [33]

In *Flugstrom-Reaktoren mit Gewebefiltern* werden die aus dem Tunnelofen abgezogenen schadstoffhaltigen Abgase einem Reaktor bzw. einer Reaktionsstrecke (z.B. dem Abgaskanal) zugeführt. In diese wird feinkörniges Kalkhydrat ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), Calciumcarbonat (CaCO_3) oder ein anderes Sorptionsmittel pneumatisch eingeblasen, die wiederum die anorganischen Schadstoffe binden. Zur Einhaltung der Emissionsgrenzwerte für Staub muss zwischen dem Reaktor und dem Schornstein ein Gewebefilter geschaltet werden. An den Filterschläuchen erfolgt durch die sich bildende Staubschicht eine weitere Fluorabscheidung. Bei einer Kalkdosierung, die ca. 40 % über der stöchiometrischen Menge liegt, können Abscheidegrade für HF von ca. 98 % (Herstellerangaben) erreicht werden. Die dem Rohgas beigemischten Additiv-Partikel werden nach der Abscheidung am Gewebefilter dem Rohgas zum Teil wieder zugemischt. Vorher werden diese mittels eines walzenförmigen Rotors deagglomeriert sowie nach und nach zerkleinert, wodurch bisher ungenutzte Partikelflächen für weitere Sorptionsvorgänge verfügbar werden [125].

Bei einem Einsatz des Verfahrens bei gleichzeitig hohen Abgaskonzentrationen an HF, SO₂, SO₃ und HCl ist Natriumhydrogencarbonat (NaHCO₃) als Sorptionsmittel besonders geeignet, da es im Abgasstrom durch thermische Zersetzung zu aktiviertem Soda (Natriumcarbonat, Na₂CO₃) reagiert. Das aktivierte Soda reagiert mit den Schwefeloxiden und den anorganischen Chlorverbindungen, so dass Abscheidegrade von 95 % für HF, 98 bis 99 % für SO₂ und SO₃ sowie 89 % für HCl (Herstellerangaben) erreicht werden. Die Nachteile des Verfahrens gegenüber den Schüttstofffiltern liegen im höheren Wartungsaufwand der Anlagen und in Haltbarkeitsproblemen der Filterschläuche [95]. Störungen an diesen Anlagen treten im Wesentlichen durch undichte Förderleitungen, Undichtigkeiten und Verstopfungen des Filters und Betriebsstörungen im Bereich des Austragssystems auf, wobei die Ausfallzeiten durch eine regelmäßige Wartung der Anlagen gering gehalten werden können [125].

Als weitere Trockensorptionsverfahren stehen **Rotations-Dichtstromreaktoren** und **Wirbelschicht-Reaktoren** zur Verfügung. Im Rotations-Dichtstromreaktor werden Kalkhydrat (Ca(OH)₂) und Branntkalk (CaO) als Sorptionsmittel eingesetzt, womit für die gasförmigen anorganischen Schadstoffe Abscheidegrade von mehr als 99 % (Herstellerangaben) erreicht werden können. Ebenfalls für den Einsatz bei hohen Schwefeldioxidkonzentrationen geeignet ist der Wirbelschichtreaktor, in dem Kalkmilch als Sorptionsmittel eingesetzt wird. Dadurch sind Abscheidegrade für HF, SO₂, SO₃ und HCl von > 99 % zu erreichen.

Eine Alternative zur Minderung der gasförmigen anorganischen Schadstoffe durch Trockenverfahren, insbesondere bei hohen Schwefeldioxidkonzentrationen von mehr als 2.500 mg/m³, bieten **Nassverfahren**. Bei den Nassverfahren wird das Rohgas zunächst gekühlt und in einer Waschkolonnen gereinigt. Dabei werden überwiegend Füllkörperwäscher eingesetzt, da beim Einsatz von Venturi- oder Strahlwäschern sehr hohe Energieverbräuche auftreten [21]. Bei einer Abgaswaschanlage ist neben der Neutralisationsanlage auch eine Feststoffabtrennung für das Abwasser erforderlich [125]. Als Sorptionsmittel werden überwiegend wässrige Lösungen von Calciumverbindungen (CaCO₃, Ca(OH)₂, CaO) verwendet. Als Abfall entsteht dabei meist leicht verunreinigter Gips, der verwertet werden kann. Mit den kundenspezifisch ausgelegten Anlagen können für Abscheidegrade für HF von bis zu 99 %, für SO₂ bis zu 98 %, für SO₃ bis zu 95 % und für HCl bis zu 95 % (Herstellerangaben) erreicht werden.

Bei Einsatz von Natronlauge (NaOH) als Waschflüssigkeit in einer Füllkörperkolonne entstehen NaF, Na₂SO₃, und NaCl als Reaktionsprodukte. Die in einer Waschflüssigkeit anfallenden Abfälle können dann eingedampft und deponiert werden.

Die erreichbaren Abscheidegrade beim Einsatz von NaOH als Waschflüssigkeit betragen für HF bis zu 98 %, für SO₂ bis zu 96 %, für SO₃ bis zu 96 % und für HCl bis zu 98 %. Wegen der gegenüber Trockenreinigungsanlagen hohen investitionsabhängigen Kosten sowie Betriebskosten werden Nassverfahren nur eingesetzt, wenn mit Trockenverfahren keine ausreichenden Reingaswerte erreicht werden [69].

Beim Betrieb der Abgaswäscher ist auf eine richtige Einstellung (z.B. pH-Wert) der Neutralisationsanlage zu achten. Das Neutralisationsmittel muss ausreichend zur Verfügung stehen, damit bei Störungen sofort eine Nachdosierung erfolgen kann. Störungen beim Betrieb der Anlagen können im Wesentlichen durch zu geringe Waschflüssigkeitsstände, durch das Fehlen des Neutralisationsmittels und Störungen des Ventilators auftreten. Durch regelmäßige Wartung der Anlagen lassen sich die Ausfallzeiten der Waschanlage minimieren.

Zusammenfassend geben Tabelle 4-1 bis Tabelle 4-4 eine Übersicht über die technischen und betriebswirtschaftlichen Daten verschiedener oben beschriebener Systeme zur Verminderung von anorganischen gasförmigen Schadstoffen. Die Angaben beziehen sich auf ein Abgasvolumen von 20.000 m³/h bei einer Abgastemperatur von 140 °C bis 180 °C und Rohgasgehalten von 70 mg HF /m³, 1.500 mg SO₂ /m³, 150 mg SO₃ /m³ und 50mg HCl /m³. Bei allen vorgestellten Anlagen ist eine Wärmerückgewinnung generell möglich. Aufgrund fehlender Abnehmer für die zurückgewonnene Wärme ist deren Einsatz in den meisten Fällen jedoch unwirtschaftlich.

Tabelle 4-1: Abgasreinigungssysteme für gasförmige anorganische Schadstoffe verschiedener Anbieter (Teil 1)

| Firma | CT Umwelttechnik | FHW Brenntechnik GmbH | Hellmich GmbH & Co KG |
|--|--|--|---|
| Anlagenbezeichnung | Rauchgasentschwefelungsanlage der CT Umwelttechnik AG | FHW-Rotations-Dichtstromreaktor | Fluor-Kaskaden-Absorber Typ FKA |
| Verfahrensprinzip | Nasswäsche mittels Kalkmilch | Trockensorption | Trockensorption |
| Abgeschiedene anorg. Schadstoffe | SO ₂ , SO ₃ , HF, HCl und Staub | HF, SO ₂ , SO ₃ , HCl, Schwermetalle, Staub | HF, geringe Mengen SO _x |
| Bevorzugt abgeschiedene anorg. Schadstoffe | SO ₂ , SO ₃ | SO _x , HF, HCl, Schwermetalle, PCDD, PCDF | HF |
| Arbeitsbereich in °C | bis 300 °C | bis 300 °C | oberhalb Säuretaupunkt bis 300 °C |
| Verwendetes Sorptionsmittel | Kalkmilch - Ca(OH) ₂ , CaO, CaCO ₃ möglich | Ca(OH) ₂ Kalkhydrat CaO Branntkalk | CaCO ₃ |
| Abscheidegrade in % | > 95 % höhere Abscheidegrade bei entsprechender Auslegung möglich | HF: 99,80 SO ₂ : 99,00 SO ₃ : 99,95 HCl: 99,90 | HF: 99 SO _x : 10 |
| Abfälle – Konsistenz | Gipspulver, Abwasser mit gelösten Chloriden | trockener Staub | Staub, Körner |
| Chemische Zusammensetzung des Abfalls | CaSO ₄ · 2 H ₂ O, CaF ₂ , Staub | CaSO ₄ · 2 H ₂ O 74 – 80 % CaSO ₃ · 2 H ₂ O 1 - 2 % CaCl ₂ · 2 H ₂ O 2 - 2,5 % CaF ₂ · 2 H ₂ O 4 - 48 % | CaF ₂ , CaSO ₄ |
| Nutzungsdauer | > 10 Jahre | 15 - 20 Jahre | > 15 Jahre |
| Investition | 2,5 Millionen DM | k.A. | ohne Schältrommel (oS): 240.000 - 260.000 DM mit Schältrommel (mS): 270.000 - 290.000 DM |
| Betriebskosten in DM/a | | | (oS) 34.000 (mS) 26.800 |
| a.) Elektroenergie | 163.700 | 135.071 | 6.500 11.000 |
| b.) Sorptionsmittel | 105.000 | 46.831 | 23.500 11.800 |
| c.) Wartung/Reparatur | 55.500 | 58.240 | 4.000 4.000 |
| Druckverlust | 30 mbar | 250 mbar | 25 mm WS |
| Lüfterleistung | | 30 kW (19 kW Welle) | 2,7 kW (Welle) |
| Aufstellbedingungen (L × B × H) | 16 × 12 × 12 m | Freiluft; besser Halle 10 × 6 × 21 m | Freiluft / Halle 4,5 × 4,3 × 16,3 m |
| Einsatz seit | 1985 | 1996 | 1984 |
| Anzahl der Anlagen: | | | |
| a.) gesamt (weltweit) | 2 | 3 | 295 |
| b.) in der ZI weltweit | 2 | 0 | 250 |
| c.) in Deutschland | 1 | 0 | 207 |

Quelle: nach [69]

Tabelle 4-2: Abgasreinigungssysteme für gasförmige anorganische Schadstoffe verschiedener Anbieter (Teil 2)

| Firma | Hellmich GmbH & Co KG | HF Absorb AG | Lufttechnik Bayreuth Rüska GmbH |
|--|--|--|--|
| Anlagenbezeichnung | Schütttschicht-Gegenstrom-Absorber Typ SGA | Trocken-Modul-Absorber-Anlage | Rotasorb |
| Verfahrensprinzip | Trockensorption | Trockensorption an Modulen | Wirbelschichtreaktor |
| Abgeschiedene anorg. Schadstoffe | HF, SO ₂ , SO ₃ , HCl | HF (SO ₂ , SO ₃) bis zum Gleichgewicht | SO ₂ , SO ₃ , HF, HCl |
| Bevorzugt abgeschiedene anorg. Schadstoffe | HF, SO _x | HF | SO _x und hoher Staubgehalt |
| Arbeitsbereich in °C | oberhalb Säuretaupunkt bis 300 °C | bis max. 350 °C | 130 - 300 °C |
| Verwendetes Sorptionsmittel | Wülfragan (CaCO ₃ + Ca(OH) ₂) | Ca(OH) ₂ in Form wabenförmiger Modulsteine | Kalkmilch |
| Abscheidegrade in % | HF: 99 SO ₂ : 85 SO ₃ : 85 HCl: > 50 | HF: 80 - 85 SO ₂ : k.A. SO ₃ : k.A. HCl: k.A. | HF: > 99 SO ₂ : > 99 SO ₃ : > 99 HCl: > 99 |
| Abfälle – Konsistenz | Staub, Körner | feste Module | kugelförmiges Granulat |
| Chemische Zusammensetzung des Abfalls | CaF ₂ , CaSO ₄ · 2 H ₂ O, CaCl ₂ | überwiegend CaF ₂ | CaCO ₃ , CaF ₂ , CaSO ₄ , CaCl ₂ |
| Nutzungsdauer | > 15 Jahre | unbegrenzt | 10 - 15 Jahre |
| Investition | Typ SGA 315/500/4BL 690.000 - 710.000 DM | 90.000 - 130.000 DM | k.A. |
| Betriebskosten in DM/a | | | k.A. |
| a.) Elektroenergie | 145.650 19.000 | 91.000 keine | |
| b.) Sorptionsmittel | 122.640 | 90.000 | |
| c.) Wartung/Reparatur | 4.000 | 1.000 | |
| Druckverlust Lüfterleistung | ca. 100 da Pa ca 10,5 kW (Welle) | 4 - 20 mm WS | 40 - 50 mbar |
| Aufstellbedingungen (L × B × H) | überwiegend im Freien 7,8 × 4,3 × 22 m | Freiluft / Halle geringer Platzbedarf | Freiluft k.A. |
| Einsatz seit | 1996 | 1988 | Prototyp |
| Anzahl der Anlagen: | | | |
| a.) gesamt (weltweit) | 1 | 12 | 1 Prototyp |
| b.) in der ZI weltweit | 1 | 1 | |
| c.) in Deutschland | 1 | 1 | |

Quelle: nach [69]

Tabelle 4-3: Abgasreinigungssysteme für gasförmige anorganische Schadstoffe verschiedener Anbieter (Teil 3)

| Firma | Lufttechnik Bayreuth Rüskamp GmbH | Lurgi Umwelt GmbH | Gasreinigungssysteme A. Ohlmann GmbH |
|---|---|---|---|
| Anlagenbezeichnung | Querstrom-Schütttschicht- filter QSS | Abgas-Reinigungs-Anlage Typ Lurgi | Ohlmann-Adsorber |
| Verfahrensprinzip | Trockensorption in einer Schütttschicht | Trockensorption (Elektro- oder Gewebefilter) | Trockensorption |
| Abgeschiedene anorg. Schadstoffe | SO ₂ , SO ₃ , HF, HCl | HF, SO ₂ , SO ₃ , HCl | HF, SO ₂ , SO ₃ , HCl und Staub |
| Bevorzugt abgeschiedene anorg. Schadstoffe | HF | keine bevorzugt | HF, SO ₂ , SO ₃ und Staub |
| Arbeitsbereich in °C | 80 - 400 °C | 140 - 200 °C (450 °C möglich) | bis 350 °C |
| Verwendetes Sorptionmittel | CaCO ₃ , Wülfragan (CaCO ₃ + Ca(OH) ₂) | Ca(OH) ₂ Weißkalkhydrat, Typ O | CaCO ₃ -Granulat, CaCO ₃ + Ca(OH) ₂ - Granulat und Pulver, Na ₂ CO ₃ - Pulver |
| Abscheidegrade in % | HF: > 99 SO ₂ : > 60 SO ₃ : > 70 HCl: > 50 | HF: 30 - 60 SO ₂ : 40 - 70 SO ₃ : 60 - 90 HCl: 80 | HF: 96 - 99 SO ₂ : bis 80 SO ₃ : 98 - 99 HCl: 30 - 50 |
| Abfälle - Konsistenz | Granulat, Staub | Staub | Staub, Granulat |
| Chemische Zusammen- setzung des Abfalls | CaCO ₃ , CaF ₂ , CaSO ₄ , CaCl ₂ | Ca(OH) ₂ und Ca-Verbindungen entsprechend Schadstoff- gehalt im Abgas | CaF ₂ , CaCO ₃ , CaSO ₄ , CaCl ₂ |
| Nutzungsdauer | ca. 20 Jahre | 15 - 20 Jahre | > 15 Jahre |
| Investition | k.A. | ca. 2 bis 2,5 Mio. DM | ca. 120.000 DM |
| Betriebskosten in DM/a | k.A. | 192.000 | 9.884 + Sorptionsmittel |
| a.) Elektroenergie | | 41.000 | 7.884 |
| b.) Sorptionsmittel | | 112.000 | k.A. |
| c.) Wartung/Reparatur | | 40.000 | 2.000 |
| Druckverlust Lüfterleistung | 30-50 da Pa | ca. 40 kW | ca. 30 da Pa |
| Aufstellbedingungen (L × B × H) | Freiluft / Halle | Freiluft (B × L) 8 × 10 m | Freiluft (L × B) 3 × 4 m |
| Einsatz seit | 1988 | 1972 | 1988 |
| Anzahl der Anlagen: | | | |
| a.) gesamt (weltweit) | 32 | 70 | ca. 170 |
| b.) in der ZI weltweit | 2 | 0 | ca. 120 |
| c.) in Deutschland | 22 | 0 | ca. 100 |

Quelle: nach [69]

Tabelle 4-4: Abgasreinigungssysteme für gasförmige anorganische Schadstoffe verschiedener Anbieter (Teil 4)

| Firma | SOLVAY ALKALI GmbH | Steuler Industrierwerke GmbH |
|--|---|---|
| Anlagenbezeichnung | NEUTREC-Verfahren | Abgasreinigung mit Wertstoff Gips |
| Verfahrensprinzip | Flugstaubreaktor mit nachgeschaltetem Gewebefilter | Nasswäsche |
| Abgeschiedene anorg. Schadstoffe | HF, SO ₂ , SO ₃ , HCl | HF, SO ₂ , SO ₃ , HCl und alle wasserlöslichen Stoffe |
| Bevorzugt abgeschiedene anorg. Schadstoffe | HF, SO ₂ , SO ₃ , HCl | SO ₂ , SO ₃ |
| Arbeitsbereich in °C | bevorzugt 160 - 300 °C | bis 500 °C > 500 °C mit Vorkühlung |
| Verwendetes Sorptionsmittel | NaHCO ₃ | CaCO ₃ , Ca(OH) ₂ , CaO in wässriger Lösung |
| Abscheidegrade in % | HF: 95 SO ₂ : 98 SO ₃ : 99 HCl: 89 | HF: > 99 SO ₂ : > 95 SO ₃ : > 95 HCl: > 95 |
| Abfälle – Konsistenz | Staub | Gips als Feststoff (+ CaF ₂ + Staub) |
| Chemische Zusammensetzung des Abfalls | Na ₂ SO ₄ : 70 % NaF: 3 % NaCl: 2 % Na ₂ CO ₃ : 25 % | CaSO ₄ × 2 H ₂ O > 95 % CaSO ₃ × ½ H ₂ O > 1 % |
| Nutzungsdauer | > 12 Jahre | ca. 20 Jahre |
| Investition | ca. 650.000 DM | 1,7 Mio. DM |
| Betriebskosten in DM/a | k.A. | 75.000 |
| a.) Elektroenergie | | 45.000 |
| b.) Sorptionsmittel | (Verbrauch ca. 140 kg/h) | 15.000 |
| c.) Wartung/Reparatur | | 15.000 |
| Druckverlust | | ca. 10 mbar |
| Lüfterleistung | ca. 30 kW | |
| Aufstellbedingungen (L × B × H) | Freiluft | Freiraumwäscher: 4,5 × 4,5 × 1 m Entwässerungsanlage: 6,0 × 9,0 × 12 m |
| Einsatz seit | 1993 | 1983 |
| Anzahl der Anlagen: | | |
| a.) gesamt (weltweit) | ca. 40 | 13 |
| b.) in der ZI weltweit | 3 | 2 (Blähtonindustrie) |
| c.) in Deutschland | 0 | 2 (FF-Industrie) |

Quelle: nach [69]

4.1.1.3 Techniken zur Minderung gasförmiger organischer Emissionen

Während des keramischen Brennprozesses können durch die Zersetzung und unvollständige Verbrennung von organischen Zuschlagstoffen (z.B. Porosierungsmittel, Binde- und Presshilfsmittel) gasförmige organische Emissionen („Schwelgase“) auftreten (siehe Abbildung 4-3). In Abhängigkeit von den eingesetzten organischen Zuschlagstoffen entstehen bei Temperaturen zwischen 200 °C und 600 °C zum Beispiel Ammoniak, Aldehyde, polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAH), Benzol, Phenol und weitere Aromaten. Eine Emissionsminderung dieser organischen Schadstoffe kann durch Primärmaßnahmen oder durch Sekundärmaßnahmen erfolgen [116].

Primärmaßnahmen

Als Primärmaßnahmen zur Vermeidung und Verminderung gasförmiger organischer Emissionen stehen der Einsatz anorganischer Zuschlagstoffe, die ofeninterne Schwelgasnachverbrennung und der Einsatz von zusätzlichen Brennern im Bereich der Aufheizzone zur Verfügung [70].

Durch den Einsatz anorganischer Zuschlagstoffe an Stelle organischer ist eine erhebliche Verringerung der organischen Emissionen möglich. So können in der Ziegelindustrie die organischen Porosierungsmittel (z.B. Polystyrol, Sägemehl, Papierfangstoff) in gewissem Umfang durch anorganische Porosierungsmittel, wie z.B. Perlit, substituiert werden. Der Einsatz spezieller phenol- und formaldehydarmer Harze ermöglicht eine Verminderung der Phenol- und Formaldehydemissionen insbesondere in der Feuerfest-Industrie [116].

Die ofeninterne Schwelgasnachverbrennung kann mit Hilfe von zusätzlichen Hochgeschwindigkeitsbrennern im Bereich der Aufheizzone über die Abtrennung der Schwelgaszone und anschließender Rückführung der Schwelgase in die Brennzone, bis hin zur thermischen Abgasvorverbrennung und dem Gegenlaufofen erreicht werden [69]. Grundlage der ofeninternen Schwelgasnachverbrennung ist die Tatsache, dass die organischen Schadstoffe im Wesentlichen innerhalb der Aufheizzone des Tunnelofens in einem Temperaturbereich zwischen 200 °C und 500 °C entstehen. Diese Schwelzone kann mit Hilfe von ein oder zwei Hubtoren bzw. ohne Hubtore durch gezielte Schwelgasführung abgetrennt werden. Danach werden die separierten Schwelgase, die mengenmäßig nur ca. 1/8 der übrigen Abgase ausmachen, der Brennzone des Tunnelofens zugeführt und infolge der dort herrschenden hohen Temperaturen nachverbrannt. Im Folgenden werden exemplarisch einige Verfahren zur ofeninternen thermischen Schwelgasnachverbrennung dargestellt [70].

Abbildung 4-7 zeigt in schematischer Darstellung die Funktionsweise eines Systems zur internen thermischen Schwelgasnachverbrennung der Firma Hässler.

Der Tunnelofen wird dabei so betrieben, dass sich Brenngut und Abgas bzw. Luft im Gegenstrom zueinander bewegen. Nachdem das heiße Verbrennungsgas die Brennzone nahezu vollständig durchströmt hat, wird dieser Gasstrom ausgelenkt und innerhalb des Ofens durch Wärmetauscher geführt. Umwälzeinrichtungen sorgen dafür, dass dem schwelgasfreien Abgas die Wärme indirekt über die Wärmetauscher entzogen und auf das Brenngut übertragen wird. Das abgekühlte Abgas verlässt, nachdem es den Wärmetauscher im Vorwärmer passiert hat, mit einer Abgastemperatur von 150 °C bis 200 °C den Ofen. Im Bereich der Umwälzzone entstehende Schwelgase können entweder im Gegenstrom oder im Gleichstrom dem vorderen Bereich der Brennzone (600 bis 800 °C) zugeführt werden, der mit ausreichend Brennern bestückt ist, um eine nahezu vollständige Verbrennung der Schwelgase zu gewährleisten. Eine Restverbrennung der organischen Bestandteile erfolgt unabhängig von der gewählten Anwärm- und Brennkurve in ofeninternen Brennkammern unter vorgewählter Temperatur (ca. 800 bis 1.000 °C). Mit diesem Verfahren können bei Rohgaswerten von 250 mg Gesamt-C/m³ Reingaswerte von ca. 15 mg Gesamt-C /m³ erreicht werden [70].

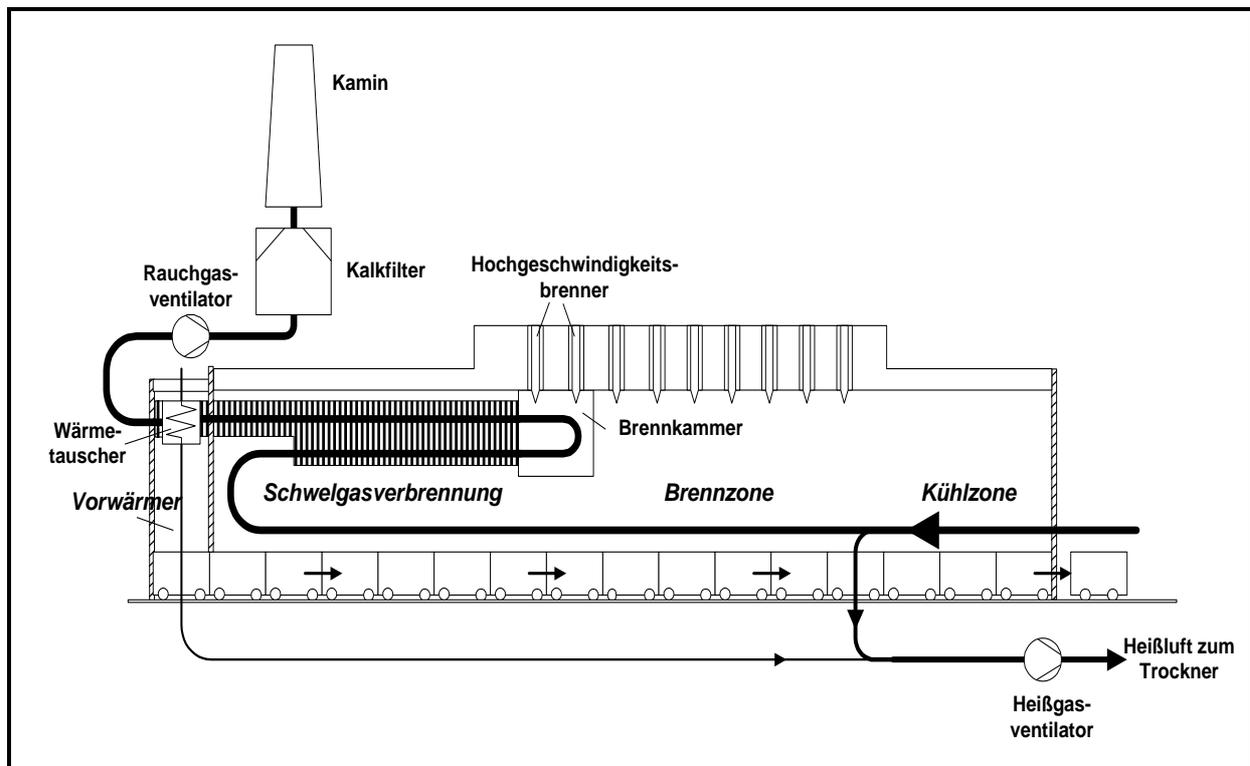


Abbildung 4-7: Schematische Darstellung des Schwelgasbeseitigungsverfahrens

Quelle: [31]

Abbildung 4-8 zeigt das **prozessinterne Reinigungssystem für organische Schadstoffe (PIROS)** der Firma Keller. Die Schwelgasabsaugung erfolgt an der ersten Rauchgasabsaugung in Schubrichtung der Ofenwagen. Die abgesaugten Schwelgase werden über einen Wärmetauscher aufgeheizt und größtenteils wieder der Schwelzone zugeführt wodurch eine Erhöhung der Schwelgaskonzentration, eine Energienutzung des heißen Rauchgases sowie die Aufwärmung des Brenngutes erreicht wird. Am Ende der Schwelzone befindet sich ein Luftvorhang in Form von Hochgeschwindigkeits-Deckenbrennern. Dieser Luftvorhang und die Schleusen sorgen dafür, dass kein Schwelgas unter die Rauchgasabsaugung strömt.

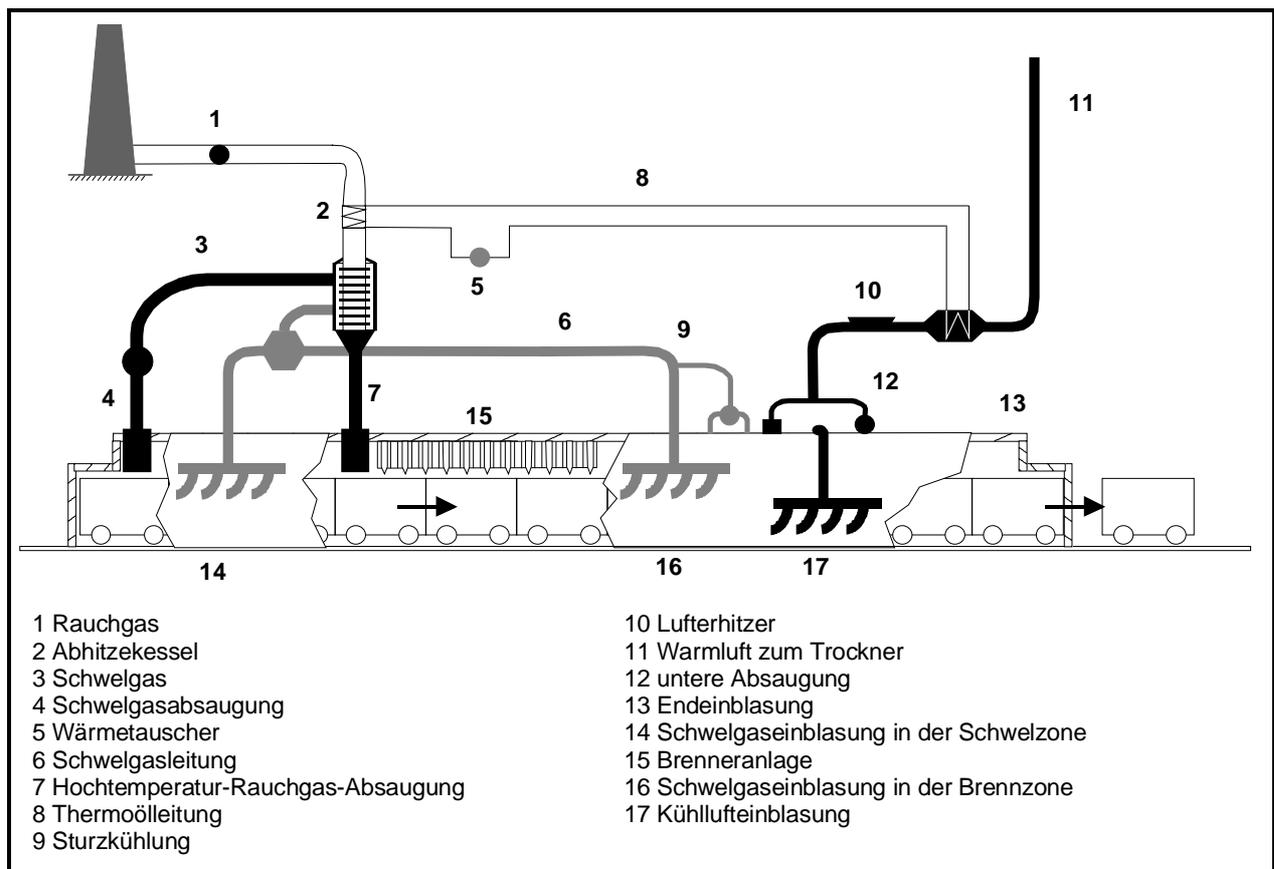


Abbildung 4-8: Schematische Darstellung des Systems PIROS

Quelle: [70]

In Abhängigkeit vom Differenzdruck zwischen den Bereichen vor und hinter der Heiß-Rauchgasabsaugung wird der Rest des Schwelgases in die Sturzkühlzone eingedüst. Die in die Kühlzone eingedüστε Schwelgasmenge wird über die Temperatur geregelt. Die in die Brennzone eingedüsten Schwelgase durchströmen aufgrund der im Tunnelofen herrschenden Druck- und Strömungsverhältnisse die gesamte Brennzone, bevor sie zur Heiß-Rauchgasabsaugung gelangen. Bei den in der Brennzone herrschenden Temperaturen verbrennen alle organischen Verbindungen vollständig, so dass keine Schwelgase mehr im Rauchgas vorhanden sind.

Ein weiteres Verfahren zur ofeninternen Nachverbrennung bietet der Einsatz eines Gegenlaufofens, bei dem die Schwelgasnachverbrennung systemintegriert durchgeführt wird. Das Funktionsprinzip eines Gegenlaufofens der Firma Riedel ist in Abbildung 4-9 dargestellt. Der Gegenlaufofen besteht aus zwei Brennkanälen, die vom Brenngut gegenläufig durchfahren werden. Während beide Kanäle die Brennzone in der Mitte haben, liegt die Aufheizzone von Kanal 1 neben der Kühlzone von Kanal 2 und umgekehrt.

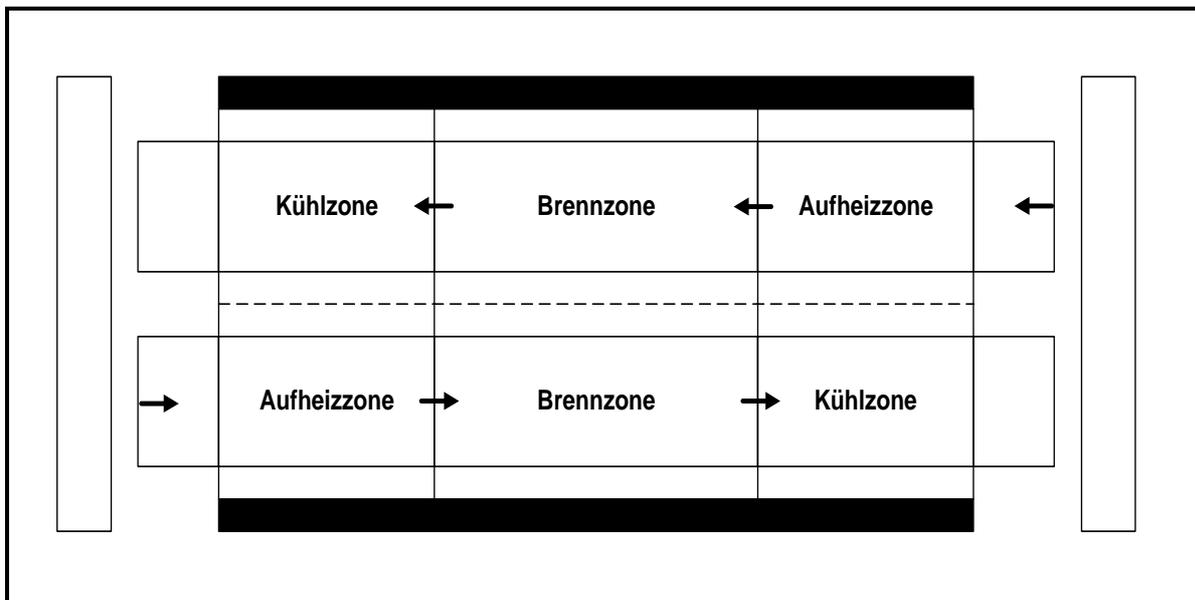


Abbildung 4-9: Schematische Darstellung eines Gegenlaufofens

Quelle: [70]

Der Wärmeaustausch zwischen Brenngut und Kühlluft bzw. Abgas erfolgt nicht wie beim normalen Tunnelofen in Längsrichtung, sondern durch eine Querkonvektion. Sobald durch gegenläufigen Vorschub des Brenngutes ein Temperaturunterschied zwischen Aufheizgut und Kühlgut entsteht, setzt sich die Querkonvektionsströmung in Bewegung, wie es schematisch in Abbildung 4-10 dargestellt ist. Die im Temperaturbereich von 200 °C bis 450 °C austretenden Schwelgase, die zu einem beträchtlichen Teil unverbrannt bleiben, werden somit im Gegensatz zum einfachen Tunnelofen nicht unter Abkühlung zum Schornstein transportiert, sondern unter Aufheizung zur Ofenmitte, wo die höchsten Temperaturen herrschen. Infolge der Querkonvektion geschieht das auf einem langen, spiralförmigen Weg. Dabei bilden die heißen Oberflächen des Brenngutes in der Brennzone eine gute Reaktionsoberfläche und die Schwelgase brennen vor dem Verlassen des Ofens nahezu vollständig aus. Die in ihnen enthaltene Wärmeenergie wird im Ofen weitestgehend ausgenutzt. Die mit dem Gegenlaufofen erreichbaren Reinigungswirkungsgrade liegen bei mehr als 95 %.

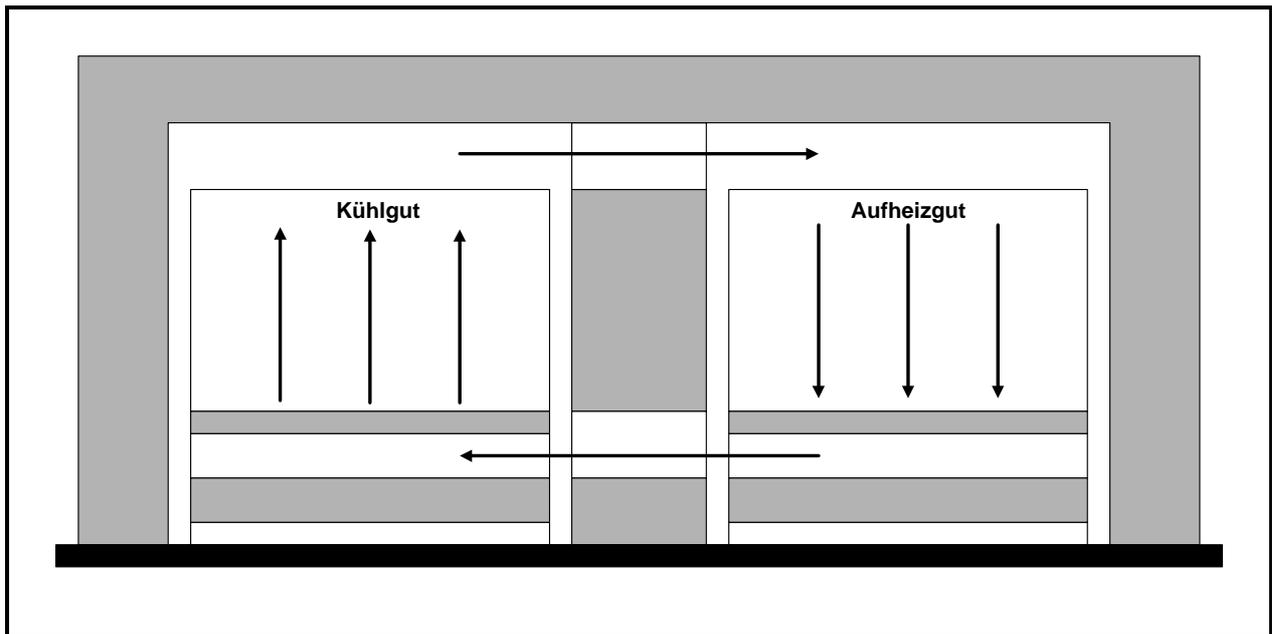


Abbildung 4-10: Querschnitt durch einen Gegenlaufofen

Quelle: [70]

Eine weitere Möglichkeit zur ofeninternen thermischen Nachverbrennung (TNV) besteht in der Kombination zwischen Abgasumwälzung und Heißgas-temperaturgeregeltem Hochgeschwindigkeitsbrenner. Bei diesem Verfahren werden die schwelgasbeladenen Ofenabgase in Herdhöhe aus dem Brennkanal abgezogen, auf 10 bis 20 mbar verdichtet und über eine Mini-TNV, die mit einem 35 kW-Hochgeschwindigkeitsbrenner beheizt wird, wieder in den Ofen eingeblasen. Die Einblastemperatur kann über das Verhältnis von Umwälzluft und Brennstoffeinsatz in die TNV gesteuert werden. An den Einblasstellen sind Temperaturen zwischen 500 und 1.200 °C möglich, wobei der Ofen über mehrere Schürlochreihen mit diesem System bestückt werden kann. Der Einsatz der Mini-TNV kann mit anderen Möglichkeiten zur Schwelgasverminderung kombiniert werden [70].

Durch den Eingriff der ofeninternen thermischen Nachverbrennung in den Betrieb des Tunnelofens als einfachem Gegenstromwärmetauscher kann es allerdings generell zu Schwierigkeiten in der Ofenfahrweise bzw. zu einem erhöhten Bedienungsaufwand kommen. Auch deswegen haben sich insbesondere bei Neuanlagen in den letzten Jahren nachgeschaltete Verfahren zur Schwelgasnachverbrennung durchgesetzt.

Bei der Herstellung bestimmter Produkte können die Emissionen an organischen Stoffen durch die Anwendung einer anderen Ofentechnologie ebenfalls effizient vermindert werden. Bei der Schamotteherstellung kann anstelle von Schachtöfen für den Hartschamottebrand und eines Sintertellers für den Leichtschamottebrand eine Doppelschichtsinteranlage eingesetzt werden, die gegenüber herkömmlichen Verfahren zu geringeren Emissionen führt [116].

Sekundärmaßnahmen

Als Sekundärmaßnahme zur Reduzierung der gasförmigen organischen Emissionen werden die Schadstoffe überwiegend mittels ofenexterner thermischer Nachverbrennung oxidiert.

In Abbildung 4-11 ist die Abluftführung bei einer externen thermischen Nachverbrennung exemplarisch dargestellt. Das gesamte Abgasvolumen wird im Bereich der Aufheizzone abgesaugt (Bereich der Schwelgasemissionen siehe Abbildung 4-3) und dann, nach einer Abwärmenutzung in einem Wärmetauscher, der externen thermischen Abgasreinigung zugeführt.

Die Anlagen zur thermischen Nachverbrennung bestehen aus einer Brennkammer und einem oder mehreren Zusatzbrennern. Der Brennkammer werden die Ofenabgase kontinuierlich (bei Durchlauföfen) oder in der Aufheizphase (bei periodisch betriebenen Öfen) zugeführt und bei Temperaturen oberhalb von 750°C nachverbrannt. Das Abgas der thermischen Nachverbrennungsanlagen besteht aus den Verbrennungsabgasen der Brenner mit den typischen Anteilen an CO₂, CO, organischen Komponenten und Stickoxiden [125].

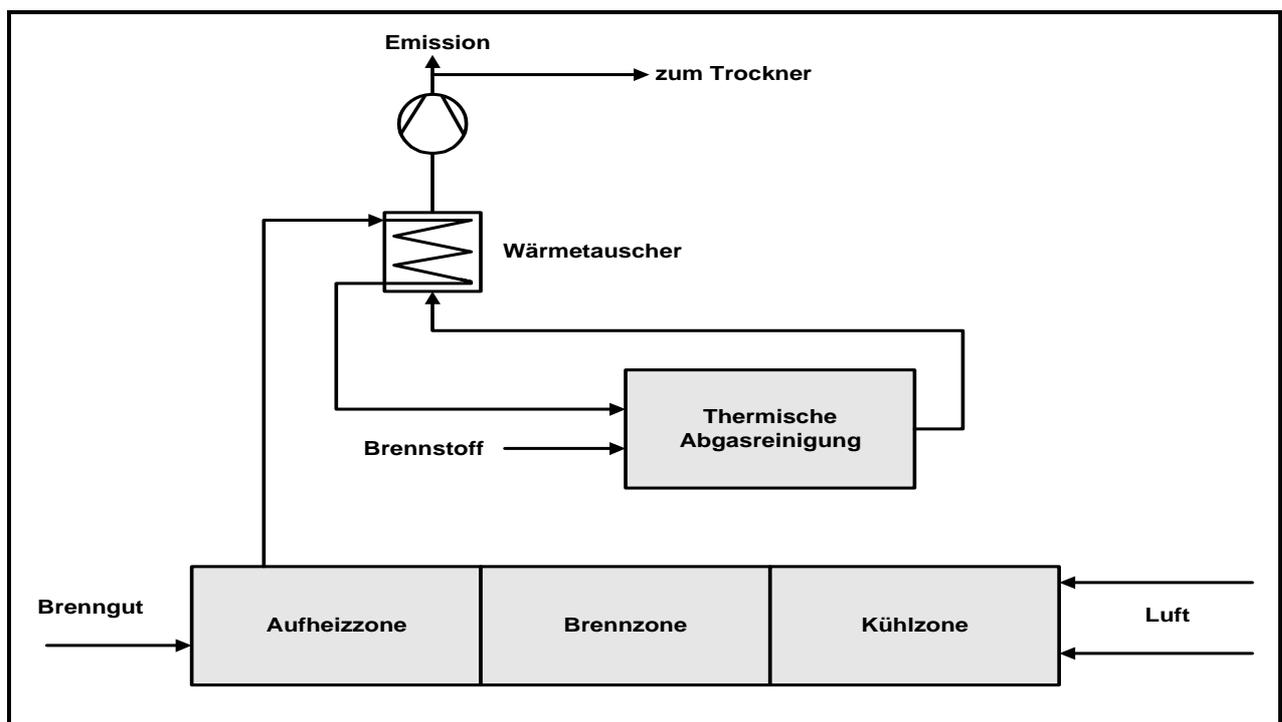


Abbildung 4-11: Schematische Darstellung der Abluftführung einer externen thermischen Nachverbrennung

Die externe thermische Nachverbrennung findet heute jedoch aufgrund der beträchtlichen Energiekosten der rekuperativen TNV überwiegend in Anlagen statt, die zum regenerativen Wärmeaustausch Speichermassen besitzen. Die Thermoreaktoren arbeiten grundsätzlich nach dem gleichen Prinzip, wie es in Abbildung 4-12 dargestellt ist.

Der gesamte schadstoffbeladene Abgasstrom des Tunnelofens wird dem Thermoreaktor zugeführt. Wesentliche Elemente des Thermoreaktors sind die Regeneratorsäulen (Wärmespeichersäulen, Wärmespeicherkammern), die mit Wärmespeicherelementen - es gelangen wabenförmige keramische Elemente oder keramische Füllkörper zum Einsatz - gefüllt sind. Das schwelgashaltige Rohgas tritt in die Kammer 1 ein und wird, indem es beim Durchströmen der heißen Speicherelemente von diesen Wärme aufnimmt, aufgeheizt. Beim Eintreten in die Brennkammer kann das Rohgas bereits nahe der eigentlichen Verbrennungstemperatur liegen, so dass schon ein Teil der Schwelgase aufoxidiert wird. In der Brennkammer wird das Rohgas mittels eines Zusatzbrenners auf die für die vollständige Nachverbrennung der Schwelgase notwendige Temperatur aufgeheizt. Die Verweilzeit in der Brennkammer ist so angelegt, dass die für die vollständige Verbrennung (Oxidation) erforderlichen chemischen Reaktionen ablaufen können [70]. Bei entsprechend hohen Konzentrationen an organischen Schadstoffen ist ein weitgehend autothermer Betrieb der TNVs möglich.

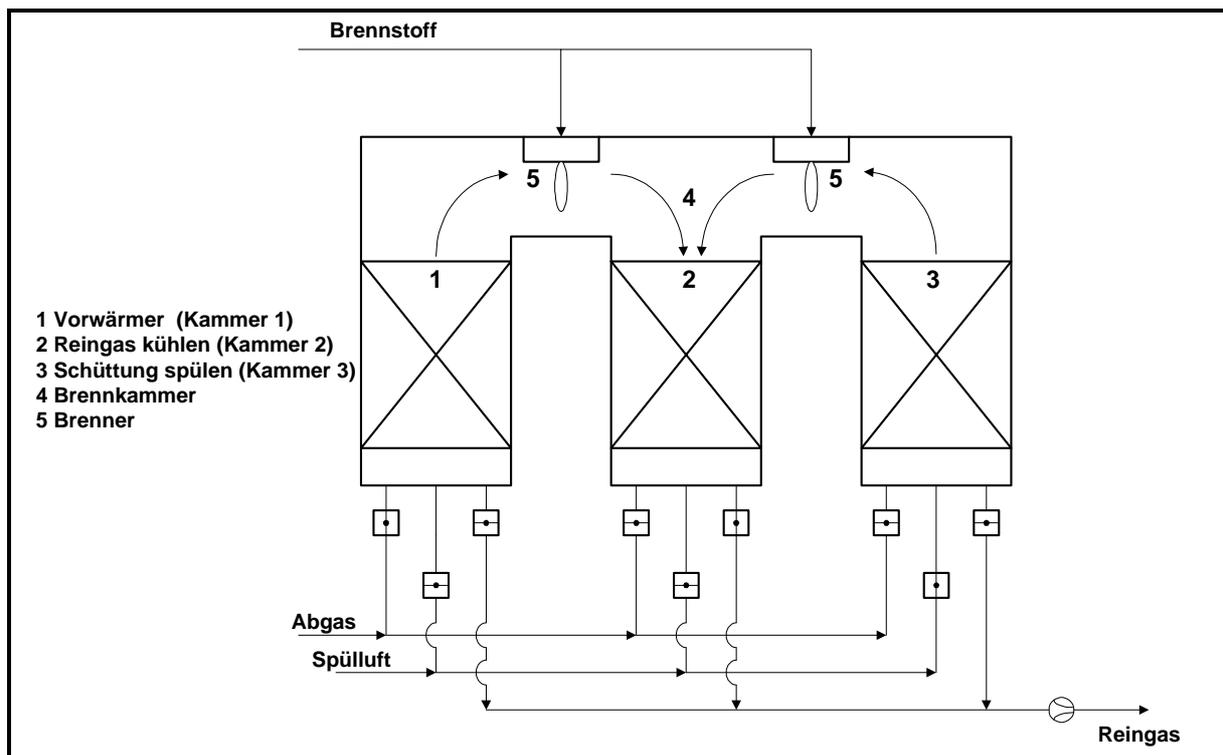


Abbildung 4-12: Schematische Darstellung der Funktionsweise eines Thermoreaktors

Quelle: [70]

Nach der Brennkammer passiert das heiße, gereinigte Abgas die Kammer 2 und gibt die in Kammer 1 aus den Speicherelementen aufgenommene und in der Brennkammer freigesetzte Wärme möglichst vollständig wieder ab. Das abgekühlte Reingas, das beim Austritt aus Kammer 2 eine nur wenig höhere Temperatur besitzt als das Rohgas bei Eintritt in die Kammer 1, wird anschließend über den Schornstein abgeleitet oder, falls erforderlich, einer

Abgasreinigungsanlage für anorganische Schadstoffe zur weiteren Reinigung zugeführt. Das Funktionsprinzip des Thermoreaktors ist weiterhin dadurch gekennzeichnet, dass die Gasströme in regelmäßigen Abständen (ca. 2 - 3 Minuten) umgeschaltet werden. Dabei übernimmt die Kammer 2 nunmehr die Funktion der Anwärmung des Rohgases, während die Speicherelemente in Kammer 1 die Wärme des heißen Rohgases aufnehmen.

Je nach Erfordernis des Reinigungswirkungsgrades werden Thermoreaktoren als 2- oder 3-Kammeranlagen errichtet. Die 3. Kammer ermöglicht, dass beim Umschalten kein unverbranntes Schwelgas in Höhe einer Säulenfüllung in den Schornstein gelangt. Dieses geschieht, indem man die Kammer nach dem Umschalten mit Luft spült. Damit werden auch kurzzeitige erhöhte Emissionen verhindert. Somit werden bei 2-Kammeranlagen Reinigungsgrade von 94 - 97 % erreicht, während beim Einsatz von 3-Kammeranlagen Reinigungsgrade von mehr als 99 % problemlos möglich sind [70].

Die Systeme unterschiedlicher Hersteller unterscheiden sich im Wesentlichen in der Art der eingesetzten Speichermassen in den Regeneratorsäulen. Zum Einsatz kommen keramische Wabenkörper, keramische Füllkörper, wie z.B. Sattelkörper, oder Quarzkies. Der Einsatz von keramischen Wabenkörpern ermöglicht im Vergleich zu keramischen Füllkörpern sehr große Austauschflächen (Waben $850 \text{ m}^2/\text{m}^3$; Berl-Sattel $260 \text{ m}^2/\text{m}^3$) wodurch ein hoher thermischer Wirkungsgrad bei gleichzeitig geringem Druckverlust erreicht wird [113]. Im Gegensatz zu Schüttgut-Regeneratoren können in Wabenkörpern auch staubbeladene Abgase sicher und wartungsarm ohne Verlegung der Wabenkörper behandelt werden [114]. Der Vorteil der keramischen Füllkörper liegt in den niedrigeren Anschaffungskosten.

Beim Betrieb der thermischen Nachverbrennungsanlagen können mit den Abgasen aus dem Brennofen organische Stoffe nach der Kondensation auch aerosolförmig an die Anströmseite des Wärmetauschers gelangen und sich dort abscheiden. An solchen Kondensaten können Stäube anhaften. Eine turnusmäßige Reinigung des Wärmetauschers ist deshalb erforderlich. Die Stützbrenner müssen ebenfalls regelmäßig gewartet werden.

Tabelle 4-5 bis Tabelle 4-8 zeigen eine Übersicht über die technischen und betriebswirtschaftlichen Daten verschiedener oben beschriebener Systeme zur Verminderung von organischen gasförmigen Schadstoffen. Für die Anlagenauslegung wurde ein Abgasvolumen von $20.000 \text{ m}^3/\text{h}$, bei einer Abgastemperatur von 140 bis $180 \text{ }^\circ\text{C}$ und einem Schadstoffgehalt (Gesamt-C) im Rohgas von $250 \text{ mg}/\text{m}^3$ angenommen.

Tabelle 4-5: Systeme verschiedener Anbieter zur Schwelgasverminderung (Teil 1)

| Firma | Anlagenbau Riedel GmbH | C.T.P.- Chemisch Thermische Prozesstechnik GmbH | E.I. Tec. GmbH |
|--|--|--|---|
| Anlagenbezeichnung | Gegenlaufofen System Riedel | CTP Autotherm | ETR |
| Verfahrensprinzip | ofeninterne thermische Nachverbrennung | externe thermische Nachverbrennung mit regenerativem Wärmetauscher | externe thermische Nachverbrennung mit regenerativem Wärmetauscher |
| Wärmespeichermasse / Funktionsweise | gegenläufiger Ofenbetrieb in 2 Kanälen mit Abgasabzug in der Ofenmitte | keramische Wabenkörper | keramisches Wärmetauschermaterial |
| Mögliche Rohgasbelastung | Unbegrenzt | bis 5.000 mg/m ³ bei 3-Bett-Anlagen | bis 12.000 mg/m ³ (abhängig von Anlagenausführung) |
| Arbeitsbereich | 900 bis 1.200 °C | 800 - 850 °C | 720 - 850 °C |
| Reinigungswirkungsgrad in % | > 99 | 2-Bett > 98 3-Bett org. C < 20 mg/m ³ CO < 50 mg/m ³ NO _x < 50 mg/m ³ | abhängig von der Anlagenausführung bis 99,9 |
| Autothermer Betrieb bei Gesamt-C in mg/m ³ | wenn Brennwert in Ziegel > 280 kcal/kg | 1.100 mg/m ³ | > 600 mg/m ³ |
| Druckverlust Lüfterleistung | kein zusätzlicher Aufwand | 28 mbar (37 kW) 45 kW (install. Leistung) | > 1.600 Pa ca. 22 kW |
| Zusätzlicher Energieverbrauch a.) Elektroenergie b.) Brennstoff-Energie | der Heizwert der Schwelgase vermindert den Brennstoffbedarf des Ofens | k.A. k.A. | abhängig von der Betriebsweise des Ofens |
| Aufstellbedingungen (L × B × H) | Halle | Freiluft / Halle (L × B) 6 × 3,5 m | Anpassung an örtliche Verhältnisse |
| Nutzungsdauer | ca. 50 Jahre | k.A. | > 10 Jahre |
| Investition | kein Mehraufwand beim Bau des Ofens | 640.000 DM | 350.000 - 500.000 DM (je nach Ausführung) |
| Verbrauch und Kosten pro a a.) Stromverbrauch b.) Brennstoffverbrauch - Gas c.) Wartung/Reparatur - Personalkosten - Materialkosten | systembedingt keine zusätzlichen Betriebskosten | a.) 330.000 kWh b.) 1.660.000 kWh c.) k.A. k.A. | a.) 192.000 kWh b.) 97.000 m ³ (Erdgas) c.) 3.500 DM 1.000 DM |
| Wärmerückgewinnung | möglich; 2/3 des Bruttowärmeverbr. im Ofen | k.A. | möglich / ca. 3.200 MW/a |
| Einsatz der Anlage seit | 1979 | 1985 | 1996 |
| Anzahl der Anlagen: a.) gesamt (weltweit) b.) in der ZI weltweit c.) in Deutschland | 7 5 3 | 100 9 5 | k.A. 2 2 |

Quelle: nach [69]

Tabelle 4-6: Systeme verschiedener Anbieter zur Schwelgasverminderung (Teil 2)

| Firma | ENVIROTEC Ges. für Umwelt- und Verfahrenstechnik mbH | A. Hässler Anlagenbau | Kanzler Verfahrenstechnik GmbH |
|---|---|---|--|
| Anlagenbezeichnung | ENVIROTHERM | integrierte thermische Abgasvorverbrennung | Autotherm |
| Verfahrensprinzip | externe thermische Nachverbrennung mit regenerativem Wärmetauscher | ofeninterne thermische Abgasverbrennung | externe thermische Nachverbrennung mit regenerativem Wärmetauscher |
| Wärmespeichermasse / Funktionsweise | Sattel-Körper | Lehre nach EP 0 355 369 | keramische Wabenkörper |
| Mögliche Rohgasbeladung | bis 8.000 mg/m ³ , darüber andere Verfahren von ENVIROTEC | bislang vorkommende Werte ca. 2.500 mg/m ³ | 10.000 mg/m ³ |
| Arbeitsbereich | 780 - 850 °C | 700 - 1.100 °C | 800 °C |
| Reinigungswirkungsgrad in % | 96 | 97 bis 99 | 99 |
| Autothermer Betrieb bei Gesamt-C in mg/m ³ | 1.800 mg/m ³ | immer im System begründet | 1.000 mg/m ³ |
| Druckverlust Lüfterleistung | 20 mbar 28 kW | zusätzlich 2 mbar im Abgaszug | 30 mbar 37 kW |
| Zusätzlicher Energieverbrauch a.) Elektroenergie b.) Brennstoff-Energie | k.A. k.A. | 1 - 2 W/kg Brenngut kein Mehrverbrauch | 37 kW 122 kW |
| Aufstellbedingungen (L × B × H) | Freiluft 13 × 9 × 5 | Anwärmzone in Halle | Freiluft 15 × 3 × 8 |
| Nutzungsdauer | > 10 Jahre | annähernd wie Ofenlebensdauer | > 10 Jahre |
| Investition | 855.000 DM | 600.000 DM bei 12 t/h | 700.000 DM |
| Verbrauch und Kosten pro a a.) Stromverbrauch b.) Brennstoffverbrauch - Öl - Gas c.) Wartung/Reparatur - Personalkosten - Materialkosten | a.) ca. 245.280 kWh b.) ca. 201.480 kWh ca. 240.520 m ³ c.) 1.000 DM - | a.) 150.000 kWh b.) - c.) 5.000 DM 10.000 DM | a.) 324.120 kWh b.) 75.000 kg 106.000 m ³ c.) 6.000 DM 3.000 DM |
| Wärmerückgewinnung / Kosteneinsparung | möglich /52.000 DM (bei 22 Pf/m ³ Erdgas) | verfahrensgemäß nicht erforderlich | k.A. |
| Einsatz der Anlage seit | 1980 | k.A. | 1988 |
| Anzahl der Anlagen: a.) gesamt (weltweit) b.) in der ZI weltweit c.) in Deutschland | 600 11 11 | 10 10 10 | k.A. 7 5 |

Quelle: nach [69]

Tabelle 4-7: Systeme verschiedener Anbieter zur Schwelgasverminderung (Teil 3)

| Firma | KWS Strohenger GmbH | Lufttechnik Bayreuth Rüskamp GmbH | Recco-Stroem A/S |
|---|--|--|---|
| Anlagenbezeichnung | ofeninterne Kohlenwasserstoffnachverbrennung System RWS | ROXITHERM - RTK ROXITHERM - RTZ | RE-THERM VF B (2-K.) RE-THERM VF C (3-K.) RE-THERM RL |
| Verfahrensprinzip | ofeninterne thermische Nachverbrennung | externe thermische Nachverbrennung mit regenerativem Wärmetauscher | externe thermische Nachverbrennung mit regenerativem Wärmetauscher |
| Wärmespeichermasse / Funktionsweise | Schwelgasrückführung | RTK - Wabenkörper RTZ – Quarzkies | RE-T VF Satteltkörper RE-T RL Wabenkörper |
| Mögliche Rohgasbeladung | unbegrenzt | bei RTK und RTZ abhängig von Auslegung | RE-T VF B 1.000 mg/m ³ RE-T VF C 2.500 mg/m ³ RE-T RL 5.000 mg/m ³ |
| Arbeitsbereich in °C | Rauchgasabzugstemperatur bis mindestens 600 °C | 800 °C | 800 °C (normal) bis 1000 °C (VF-Serie) bis 900 °C (RL-Serie) |
| Reinigungswirkungsgrad in % | 98 | 99 | RE-T VF B 95 - 96 % RE-T VF C 98 - 99 % RE-T RL 99 % |
| Autothermer Betrieb bei Gesamt-C in mg/m ³ | immer, da im System begründet | abhängig vom Wärmerückgewinnungsgrad 90 % 2.100 mg/m ³ 95 % 1.000 mg/m ³ 97 % 600 mg/m ³ | < 2.000 mg/m ³ |
| Druckverlust Lüfterleistung | 500 Pa in zwei Wärmetauschern | 20 - 30 mbar | - 28 kW |
| Zusätzlicher Energieverbrauch a.) Elektroenergie b.) Brennstoff-Energie | 18,5 kW Lüfterleistung 1,7 W/kg Brenngut | abhängig von Produktionsmenge und bisherigem Energiebedarf | 3,9 kJ/kg 2,8 kJ/kg (autoth. Betrieb) 14 kJ/kg (angeg. Bed.) |
| Aufstellbedingungen (L × B × H) | ca. 2,5 m freier Raum über der Aufheizzone des Ofens | Freiluft / Halle | RE-T VF B 9,0×6,1×5,3 RE-T VF C 12,5×6,1×5,3 RE-T RL 7,9×4,2×5,1 |
| Nutzungsdauer | > 10 Jahre | 10 - 20 Jahre | > 20 Jahre |
| Investition | 370.000 - 460.000 DM ohne/mit Sturzkühlung und Umwälzkreis | 500.000 - 700.000 DM | RE-T VF B 635.000 DM RE-T VF C 835.000 DM RE-T RL 635.000 DM |
| Verbrauch und Kosten pro a) a.) Stromverbrauch b.) Brennstoffverbrauch - Gas c.) Wartung/Reparatur - Personalkosten - Materialkosten | a.) 162.060 kWh b.) - c.) 600 DM | k.A. | a.) 245.000 kWh b.) 87.600 m ³ c.) 2.000 DM 2.000 - 4.000 DM |
| Wärmerückgewinnung / Kosteneinsparung | möglich / | möglich / abhängig von Verwendung der Wärme | möglich / abhängig von den Einzelbedingungen |
| Einsatz der Anlage seit | k.A. | 1991 | 1974 |
| Anzahl der Anlagen: a.) gesamt (weltweit) b.) in der ZI weltweit c.) in Deutschland | 8 8 8 | 24 5 5 | 300 13 11 |

Quelle: nach [69]

Tabelle 4-8: Systeme verschiedener Anbieter zur Schwelgasverminderung (Teil 4)

| Firma | Paul Schneider GmbH Wärmetechnik | Paul Schneider GmbH Wärmetechnik | Paul Schneider GmbH Wärmetechnik |
|--|--|--|---|
| Anlagenbezeichnung | Thermoreaktor | Jetfire | Thermische Nachverbrennung |
| Verfahrensprinzip | externe thermische Nachverbrennung mit regenerativem Wärmetauscher | Abgasumwälzung in Kombination mit HG-Brennern als ofenint. Oxidationsverfahren | externes thermisches Oxidationsverfahren mit integrierter ,regenerativer Wärmerückgewinnung |
| Wärmespeichermasse / Funktionsweise | keramische Füllkörper | Spezialbrennerkonstruktion über mehrere Schürlochreihen | die Abwärme wird genutzt |
| Mögliche Rohgasbeladung | bis 2.500 mg/m ³ (bei Standardausführung) | 2 - 3 mg/m ³ (im Reingas erreichbar) | 20.000 mg/m ³ |
| Arbeitsbereich in °C | bis 1.000 °C | von Einfahrttemperatur in den Ofen bis 450 °C | 750 - 900 °C |
| Reinigungswirkungsgrad in % | bis 99,5 | bis 95 | bis 99,5 % |
| Autothermer Betrieb bei Gesamt-C in mg/m ³ | von 1.000 mg/m ³ bis 2.500 mg/m ³ | funktionsbedingt nicht möglich | k.A. |
| Druckverlust Lüfterleistung | 20 - 25 mbar ca. 43 kW | 5 - 10 mbar ca. 20 kW | 3 mbar ohne WT 15 mbar mit WT |
| Zusätzlicher Energieverbrauch a.) Elektroenergie b.) Brennstoff-Energie | 47 kWh 750 kWh | 10 - 20 kcal/kg g.G. | 38 kWh 3.500 kWh |
| Aufstellbedingungen (L × B × H) | Freiluft - Einzelbehälter 3,5 m Durchmesser | Einbau am Ofen in vorhandene/angebrachte Schürlöcher | Freiluft / Halle - Flächenbedarf abhängig von Möglichkeit im Betrieb |
| Nutzungsdauer | ca. 10 Jahre | ca. 10 Jahre | 10 Jahre |
| Investition | 750.000-1.200.000 DM (je nach Ausstattung und Aufstellungsort) | ab 85.000 DM/Ofen | 500.000 - 750.000 DM |
| Verbrauch und Kosten pro a a.) Stromverbrauch b.) Brennstoffverbrauch c.) Wartung/Reparatur - Personalkosten - Materialkosten | a.) k.A. b.) k.A. c.) 30 - 50 h k.A. | a.) k.A. möglich b.) k.A. möglich c.) 20 h | a.) k.A. möglich b.) k.A. möglich c.) 30 - 50 h |
| Wärmerückgewinnung | möglich | eingesetzte Energie wird bereits zur Aufheizung des Brenngutes genutzt | verschiedene Möglichkeiten bis hin zur Rohlingstrocknung |
| Kosteneinsparung durch Wärmerückgewinnung | abhängig von Einzelbedingungen | k.A. | ca. 1.800 kW (bei Abkühlung der Abgase auf 130 °C) |
| Einsatz der Anlage seit | k.A. | k.A. | k.A. |
| Anzahl der Anlagen: a.) gesamt (weltweit) b.) in der ZI weltweit c.) in Deutschland | 3 1 in Planung k.A. | seit April 1997 eine Anlage in der Grobkeramik in Betrieb | 22 davon 21 in der Keramischen Industrie |

Quelle: nach [69]

Weitere Möglichkeiten zur Verminderung organischer Emissionen sind die katalytische Nachverbrennung sowie der Einsatz von Aktivkohlefiltern. Diese Maßnahmen werden allerdings nur in Einzelfällen eingesetzt.

Die katalytische Nachverbrennung wird nur bei sehr geringen Volumenströmen mit einer sehr hohen Gesamt-C-Beladung, wie beispielsweise beim Brennen spezieller technischer Keramik in kleinen Öfen oder beim Trocknen, eingesetzt. Die Katalysatoren setzen dabei die Temperatur für die Oxidation der organischen Schadstoffe auf 200 bis 300 °C herunter. Zum Einsatz kommen dabei mit Metalloxiden und Edelmetallen (z.B. Pt und Rh) dotierte Katalysatoren, die allerdings den Nachteil aufweisen, dass sie durch Katalysatorgifte wie beispielsweise Schwefelverbindungen deaktiviert werden [47].

Aktivkohlefilter werden bisher nur für die Reinigung geringer Abgasvolumenströme eingesetzt, wobei insbesondere bei Phenol und Formaldehyd gute Abscheidegrade erzielt werden [116].

4.1.1.4 Techniken zur Minderung von Lärmemissionen

Eine Minderung der Lärmemissionen lässt sich oftmals direkt an der Lärmquelle erreichen, indem man die Schallquelle isoliert, so z.B. den Kompressor, den Antrieb einer Aufbereitungsanlage oder eines Flurförderzeuges. Die Effizienz der Schallschutzmaßnahme wird dabei durch deren Masse je Flächeneinheit bestimmt. Eine zusätzliche Schalldämmung kann dabei durch Doppelwände oder Ummantelungen in doppelschaliger Ausführung, d.h. mit einem Luftpolster zwischen erster und zweiter Schutzschicht, erfolgen [15].

An Pressen und Mischanlagen, an denen nur sehr begrenzt eine wirksame Minderung durchgeführt werden kann, muss in jedem Fall eine Übertragung der Schallschwingungen auf abstrahlende Gebäudeteile verhindert werden. Dieses kann u.a. durch eine schwingungsisolierte Aufstellung der Maschinen geschehen, wie z.B. durch Metallfedern, Gummi-Metall-Verbindungen, sowie Unterlagen aus Filz, Gummi oder Kork. Weiterhin kann eine Schwingungsisolierung des gesamten Fundamentes gegenüber dem Gebäude durch eine allseitige Trennschicht aus Bitumenmasse erfolgen. Weitere Maßnahmen zur Schallminderung direkt an der Lärmquelle sind auch das Anbringen von Schalldämpfern und der Ersatz hoctouriger Ventilatoren durch größere, langsam laufende Ventilatoren [15].

Bestehen die oben genannten Möglichkeiten zur direkten Lärminderung an den Aggregaten nicht und ist eine Verlagerung der lärmintensiven Produktionsteile innerhalb des Betriebes nicht möglich, so müssen sekundäre Schallschutzmaßnahmen, oft an den Gebäuden selbst, vorgenommen werden. An den Gebäuden kann dieses durch dickere Mauern, die

Schallisolierung der Fenster durch Mehrfachglasscheiben oder das Verlegen der Fensterflächen zu einer der Wohnbebauung abgewandten Seite erfolgen [15].

Das Verhalten der Arbeitnehmer kann ebenfalls zur Lärminderung beitragen. Die regelmäßige Wartung der Betriebsanlagen durch Schmierer der Schmierstellen sowie rechtzeitiges Austauschen von Schallschirmen und Schalldämpfern führen zur Verminderung der Lärmemissionen. Tore können, soweit nicht ein ständiger Durchgangsverkehr notwendig ist, stets geschlossen gehalten werden und durch behutsames Rangieren und Fahren mit LKWs und Gabelstaplern auf dem Betriebsgelände kann die Lärmsituation zusätzlich verbessert werden. Weiterhin sind lärmintensive Arbeiten, wie z.B. das Abkippen des Bruches im Freien und der Staplerverkehr in den Abend- oder Nachtstunden, zu vermeiden [15].

4.1.2 Techniken zur Minderung der Emissionen in das Medium Wasser

Das bei der Produktion keramischer Erzeugnisse anfallende Produktionsabwasser enthält überwiegend mineralische Inhaltsstoffe in der Form verlorener keramischer Rohstoffe. Hinzu kommen je nach Produktionsverfahren weitere anorganische Stoffe, geringe Mengen zahlreicher organischer Stoffe sowie einige Schwermetalle.

Im Produktionsabwasser der Keramischen Industrie liegen die anorganischen Inhaltsstoffe überwiegend ungelöst vor, sofern der pH-Wert im neutralen Bereich gehalten werden kann. Dies trifft auch für die Schwermetalle aus verlorenen Glasuren zu. Die Glasuren und gelegentlich auch die Produktionsmassen der Keramischen Industrie können mehr oder weniger große Mengen an organischen, wasserlöslichen Zusätzen enthalten, auf deren Elimination die Kläranlagen nicht ausgelegt sind. Bei einer nur einmaligen Benutzung des Wassers führt dies zu keiner nennenswerten Belastung, so dass das Abwasser problemlos nach Abtrennung der Feststoffe eingeleitet werden kann. Nur bei einer erhöhten Wiederverwendungsrate kann es zu erhöhten Belastungen (CSB, AOX, Bakterien) im Brauch- oder Abwasser kommen. Keramische Rohstoffe enthalten häufig geringe Mengen wasserlöslicher Salze, die ebenfalls nur bei einer erhöhten Wiederverwendungsrate zu einer Belastung führen können. Die Wiederverwendung wird allerdings in diesen Fällen nicht negativ beeinflusst. Die Endkonzentration der organischen Zusätze und der Salze im Brauchwasser bei unendlich häufigem Durchlaufen der Produktion ist abhängig von den Spritz- und sonstigen Wasserverlusten, die nach der Reinigung und vor der Wiederverwendung durch Frischwasser ersetzt werden müssen. Bei steigendem Frischwasseranteil fällt dabei die Endkonzentration.

Neben dem Produktionsabwasser fallen in den Betrieben auch noch Niederschlagswässer, Sanitärwässer und Kühlwässer an.

4.1.2.1 Primärmaßnahmen

Eine wichtige Maßnahme zur Reduzierung der behandlungsbedürftigen Abwasserteilströme ist deren getrennte Sammlung und Ableitung in einer Trennkanalisation. Die großen Mengen des auf den weitläufigen Betriebsflächen anfallenden Niederschlagswassers sollten getrennt vom Produktionsabwasser abgeleitet werden, um eine Verunreinigung des Niederschlagswassers mit bei der Produktion verwendeten Stoffen zu vermeiden. Sanitärwässer sind direkt einer biologischen Behandlung (im Regelfall in der kommunalen Kläranlage) zuzuführen, um eine Kreislaufführung des Produktionswassers nicht zusätzlich zu erschweren. Fallen im Rahmen der keramischen Produktion zusätzlich Kühlwässer an, so können diese als Anmachwasser wiederverwendet werden, so dass sie in solchen Fällen überhaupt nicht abgeleitet werden.

An weiteren innerbetrieblichen Maßnahmen zur Verringerung der Menge und der Verunreinigungen des Abwassers kommen je nach Lage des Einzelfalls die Rückführung des Produktionsabwassers mit und ohne (also einschließlich der Inhaltsstoffe) Vorbehandlung, der Ersatz von Filterpressen durch Sprühtrocknung, wo technisch möglich, die Umstellung von Nass- auf Trockenverfahren sowie die Verringerung von Glasurverlusten in Betracht.

Bei der Kreislaufführung des Produktionsabwassers wird dieses häufig einschließlich der mineralischen Inhaltsstoffe bei der Herstellung neuer Produktionsmassen eingesetzt. Dies ist aber nur möglich, wenn das Volumen des Abwassers, das in der Regel aus der Anlagenreinigung stammt, durch innerbetriebliche Maßnahmen so weit reduziert werden kann, dass die für die Produktion erforderliche Wassermenge ganz oder teilweise aus diesem Wasser besteht.

4.1.2.2 Sekundärmaßnahmen

Bei der nachgeschalteten Reinigung der Produktionsabwässer werden die im Produktionsprozess verlorenen keramischen Rohstoffe mit Hilfe chemisch-physikalischer und/oder physikalischer Verfahren von der flüssigen Phase getrennt.

Um zu vermeiden, dass sich Schwermetalle aus verlorenen Glasuren im Abwasser lösen, hat es sich als vorteilhaft erwiesen, die verwendete Reinigungsmethode so zu wählen, dass der pH-Wert des Abwassers während der Reinigung nur unwesentlich verändert wird und somit im neutralen Bereich verbleibt. Es hat sich gezeigt, dass einmal in Lösung gegangene Schwermetalle mit den in der Keramischen Industrie üblichen Reinigungsverfahren nur noch schwer wieder abgeschieden werden können. In jedem Fall ist dazu ein erhöhter Aufwand erforderlich.

Bei den chemisch-physikalischen Verfahren werden die feindispersen Inhaltsstoffe, in der Regel verlorene keramische Rohstoffe und Produktionsmassen, mit Hilfe von Flockungsmitteln und Flockungshilfsmitteln oder Kombinationen daraus zu größeren Aggregaten vereinigt und sedimentiert. Diese Sedimentation kann im Längsklärbecken, in runden Becken, Schrägklärern oder Kläreindickern durchgeführt werden. Das so gereinigte Abwasser kann als Brauchwasser in der Produktion vollständig oder zum Teil wieder verwendet werden.

Darüber hinaus hat es sich bewährt, die unvermeidliche Restverschmutzung mit Hilfe von Kiesfiltern zu vermindern, insbesondere dann, wenn eine weitergehende Abwasserreinigung mit Hilfe physikalischer Verfahren vorgesehen ist.

Bei den physikalischen Verfahren wird das vorgereinigte Wasser (siehe voriger Abschnitt) mit Hilfe von Membranverfahren (Umkehrosmose) so weit gereinigt, dass es höchsten Reinheitsanforderungen genügt. Es wird derzeit geprüft, ob auch die Abtrennung der mineralischen Inhaltsstoffe ohne Flockung und Sedimentation mit Hilfe von MF-Membranen (Mikrofiltration) technisch möglich ist.

Im Folgenden werden die oben genannten physikalischen bzw. chemisch-physikalischen Verfahren (Längsklärbecken, Rundklärbecken, Schrägklärer, Kläreindicker, Kiesfilter und Membranverfahren) bzw. die mit diesen Verfahren erzielbaren Ergebnisse näher dargestellt.

Abhängig von den Anforderungen an die Reinigung, die Abwassermenge, dem zur Verfügung stehenden Platz, der Art der Schlammabeseitigung, dem verwendeten Material, dem angestrebten Wartungsaufwand und den Kosten werden Klärbecken sehr unterschiedlich ausgelegt. Sie werden dabei häufig als innerbetriebliche Vorreinigung gebaut, bieten aber in Abhängigkeit ihrer Größe, insbesondere im Hinblick auf einen Wiedereinsatz der gereinigten Abwässer in den Produktionsprozess, oft nur bedingt ausreichende Reinigungsleistung. Längsabsetzbecken sollten möglichst ohne Zwischenwände mit Überfall angelegt werden, weil sonst der Absetzvorgang bei diesem immer wieder unterbrochen wird. Im Hinblick auf die Schlammräumung sind bei rechteckigen Absetzbecken zwei Becken zweckmäßig, damit immer eines betrieben werden kann. Die gleichmäßige Verteilung des Abwassers auf beide Becken ist durch eine sorgfältige Konstruktion des Einlaufbauwerkes zu gewährleisten. Abbildung 4-13 zeigt exemplarisch die Draufsicht und den Längsschnitt eines Längsabsetzbeckens zur Vorreinigung des Kaolinabwassers einer Porzellanfabrik [111].

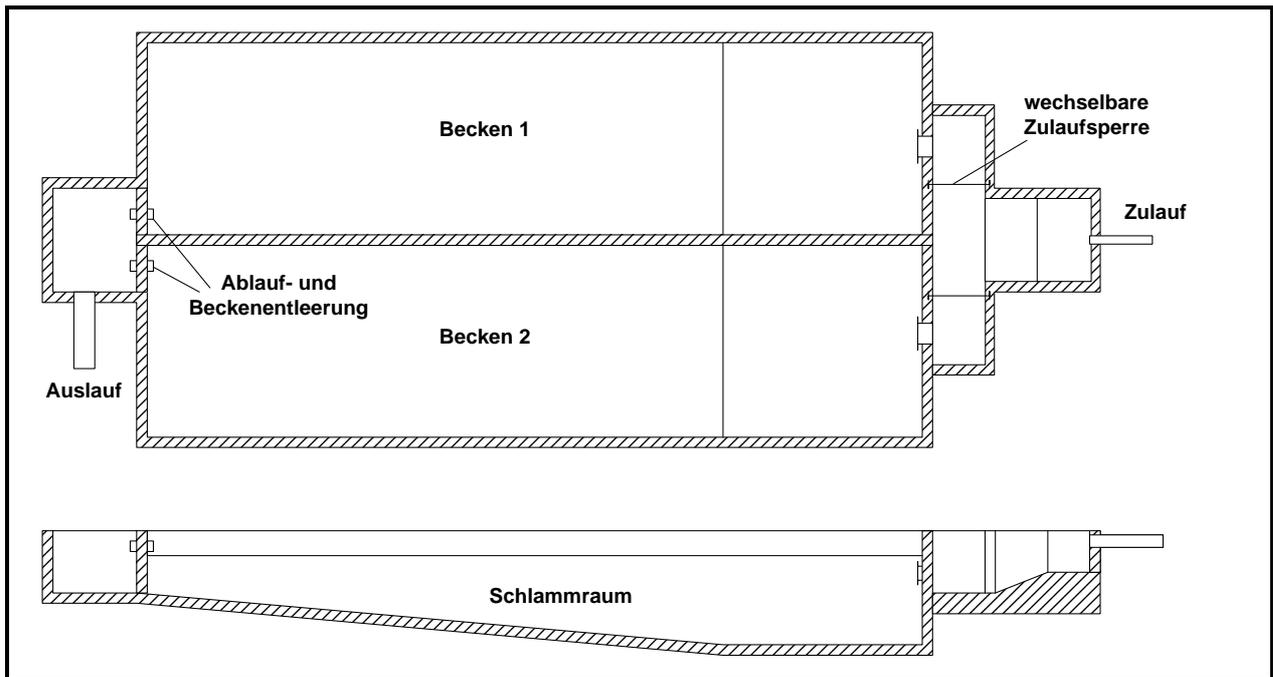


Abbildung 4-13: Draufsicht und Längsschnitt eines Längsklärbeckens

Quelle: [111]

Bei runden, trichterförmigen, nach Art der Dortmundbrunnen gebauten Absetzbecken ist wegen des Zulaufs an einer einzigen Stelle immer eine gleichmäßige Verteilung des Abwassers auf den ganzen Absetzraum gewährleistet. Aus dem tiefen Schlammtrichter kann der Schlamm auch leichter kontinuierlich abgezogen werden. Abbildung 4-14 zeigt das Schema einer nach diesem Prinzip arbeitenden Anlage.

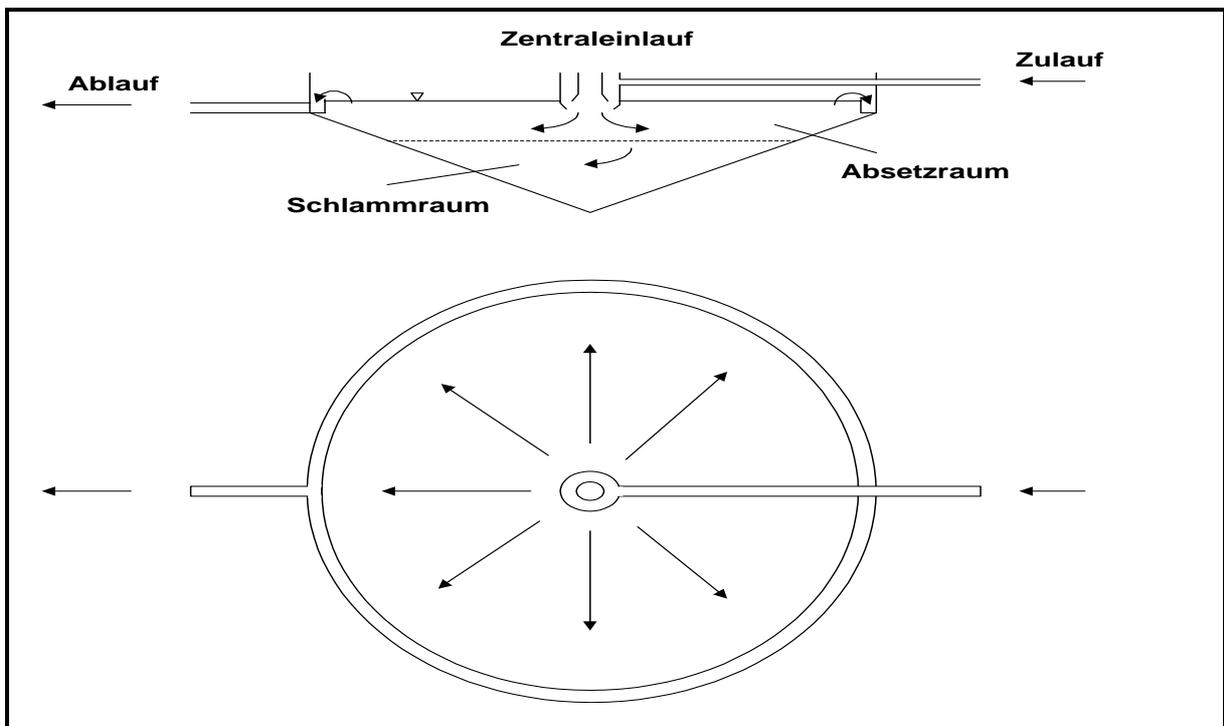


Abbildung 4-14: Schematische Darstellung eines runden Absetzbeckens

Quelle: [111]

Flockungs- und Flockungshilfsmittel werden verwendet, wenn auf dem Betriebsgelände keine ausreichenden Flächen zur Verfügung stehen, um großflächige Absetzbecken anzulegen. Sie führen zu einer Vereinigung der sehr fein vorliegenden Stoffe zu größeren Aggregaten, die dann schneller sedimentieren, so dass auch bei einer kleinen Bauart der Sedimentationsbecken oder bei Einsatz von Schrägklärern eine ausreichende Abscheidung der Feststoffe erreicht wird. Der Vorteil beim Einsatz von Schrägklärern liegt im geringen Platzbedarf, der gegenüber von Absetzbecken aufgrund der schräg gestellten Absetzflächen nur etwa 10 % der Fläche eines Absetzbeckens beträgt. Der Nachteil liegt in der Empfindlichkeit gegenüber erhöhter hydraulischer Belastung. Schrägklärer können in Kombination mit Flockungsmitteln und Flockungshilfsmitteln oder auch ohne Zugabe von Sedimentationsbeschleunigern eingesetzt werden. Das Abwasser strömt in den mittleren Bereich vom Schrägklärer ein und wird nach unten abgelenkt. Im unteren Bereich des Schrägklärers findet eine weitere Umlenkung des Wassers statt. Nun wird das Wasser über das Lamellenpaket nach oben geführt, auf diesem Weg sinken die Schwebstoffe auf die ca. 60° geneigten Lamellen (Sedimentation) und rutschen dann in den Schlammtrichter. Wenn das Wasser den oberen Bereich erreicht, sind die Feststoffe entfernt. Das gereinigte Wasser kann nun im Prozess wieder eingesetzt werden. Mit Hilfe von geringen Mengen an Flockungsmitteln ist es möglich, auch sehr kleine Teilchen aus dem Wasser zu entfernen (Trübstoffe). Darüber hinaus kann durch die schnellere Sedimentation eine kleinere Bauweise des Schrägklärers erzielt werden [73]. Abbildung 4-15 zeigt das Funktionsprinzip des Schrägklärers schematisch.

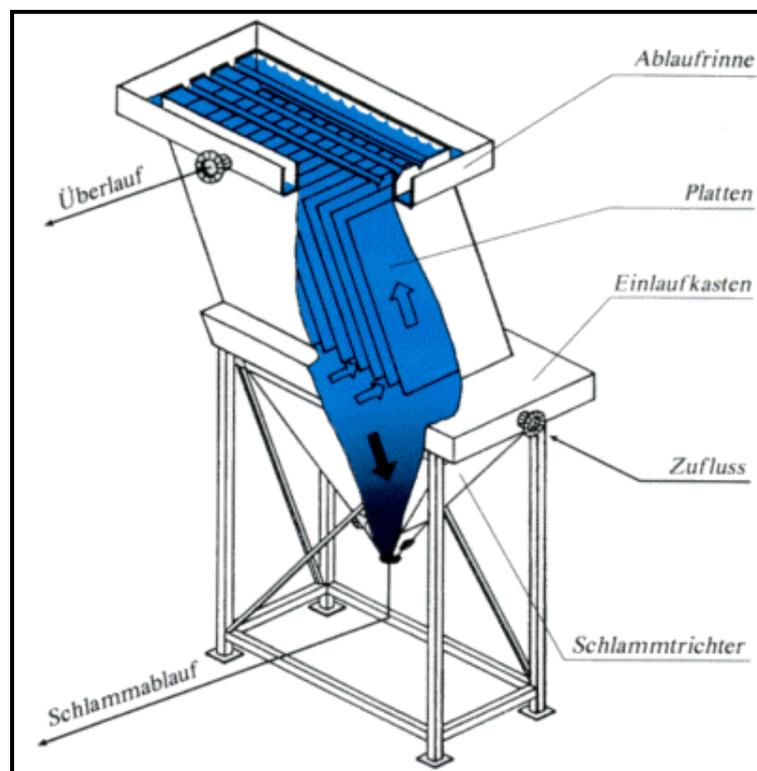


Abbildung 4-15: Schematische Darstellung eines Schrägklärers

Quelle: [73]

In Abbildung 4-16 ist eine Wasseraufbereitungsanlage mit Schrägklärer einer Porzellanfabrik dargestellt. Die Anlage ist für einen Durchsatz von $20 \text{ m}^3/\text{h}$ Abwasser ausgelegt. Die in dem Werk anfallenden porzellanhaltigen Abwässer werden zunächst in einer Grube (40 m^3) gesammelt. Mittels einer Druckluftmembranpumpe wird das Abwasser mit einer fest eingestellten Menge der Flockungsstufe zugeführt. Parallel wird das zur Behandlung des Abwassers notwendige Flockungshilfsmittel zudosiert, so dass es zur Bildung einer großvolumigen, gut absetzbaren Flocke kommt.

Die mit Feststoffen beladene Flüssigkeit fließt kontinuierlich dem Schrägklärer zu, verteilt sich im Einlaufbereich über die gesamte Behälterbreite, so dass es zum bereits oben beschriebenen Absetzvorgang kommt. Das im Schrägklärer gereinigte Wasser fließt zurück zu einer Sammelstelle und steht zum Wiedereinsatz zur Verfügung. Der im Schlammtichter gesammelte Dünnschlamm wird mittels einer Druckluftmembranpumpe zur weiteren Eindickung in den Pufferbehälter gefördert. Von dort wird der Schlamm der Kammerfilterpresse zugeführt und entwässert. Der Schlammkuchen aus der Filterpresse wird in einem Schlammbehälter gesammelt, das Filtrat wird in die Sammelgrube zurückgeführt [91].

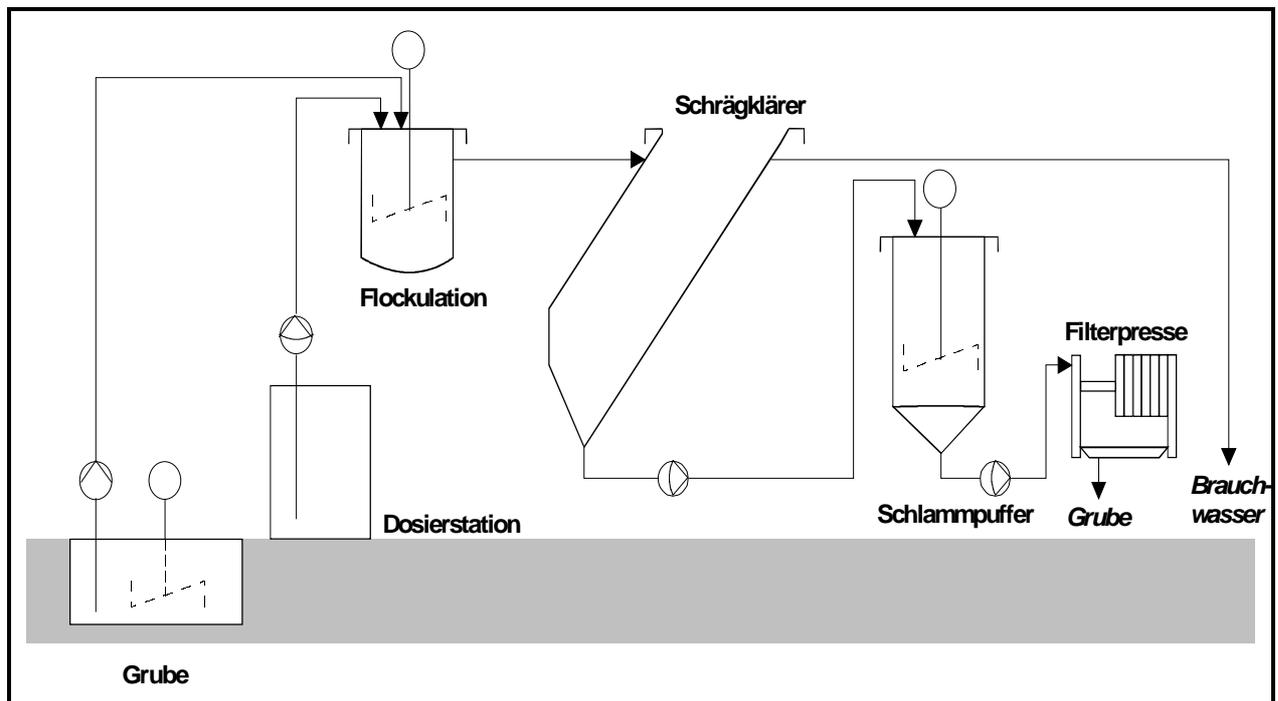


Abbildung 4-16: Schematische Darstellung einer Wasseraufbereitungsanlage in einer Porzellanfabrik

Quelle: [91]

Ein weiteres Verfahren zur Abscheidung von Feststoffen aus dem Abwasser stellt der Feststoffabscheider *System Dr. Kronenberger* dar. Der Abscheideeffekt beruht auf der Tatsache, dass das Abwasser bereits beim Eintritt in den Abscheider wegen der großen Verteilung über den gesamten Umfang sehr langsam fließt und kurz unter der Wasseroberfläche eine Geschwindigkeit von nur wenigen Millimetern in der Sekunde angenommen hat. Auf dem gesamten Weg, der vom Schmutzwasser durchflossen werden muss, herrschen bezüglich der Fließgeschwindigkeit immer gleiche Verhältnisse. Das im Abscheider eingebaute langsamlaufende Krailwerk sorgt dafür, dass sich an den Konuswänden kein Schlamm festsetzt, so dass der einwandfreie Schlammabzug - entweder durch den hydrostatischen Druck oder mittels einer Schlammpumpe - immer gewährleistet ist.

Ist eine Neutralisation der Abwässer gefordert, kann eine pH-Wert-Regelung mittels Dosierpumpe installiert werden. Das bei konventioneller Bauweise (Klärbecken) notwendige Rührwerk wird dabei eingespart. Dasselbe gilt, wenn der Absetzvorgang der Feststoffteilchen sehr langwierig ist und aus diesem Grunde mit Flockungshilfsmitteln gearbeitet werden muss. Auch die Flockungshilfsmittelzugabe erfolgt in die Schmutzwasserzuführungsleitung. Der aus dem Feststoffabscheider abgesaugte Schlamm wird in einem Koagulator mit Flockungsmittel konditioniert und zur Entwässerung befördert. Die Entwässerung kann entweder in einem Entwässerungscontainer oder in einer Filterpresse erfolgen. Abbildung 4-17 zeigt eine Abwasserreinigungsanlage mit nachgeschalteter Schlammmentwässerung.

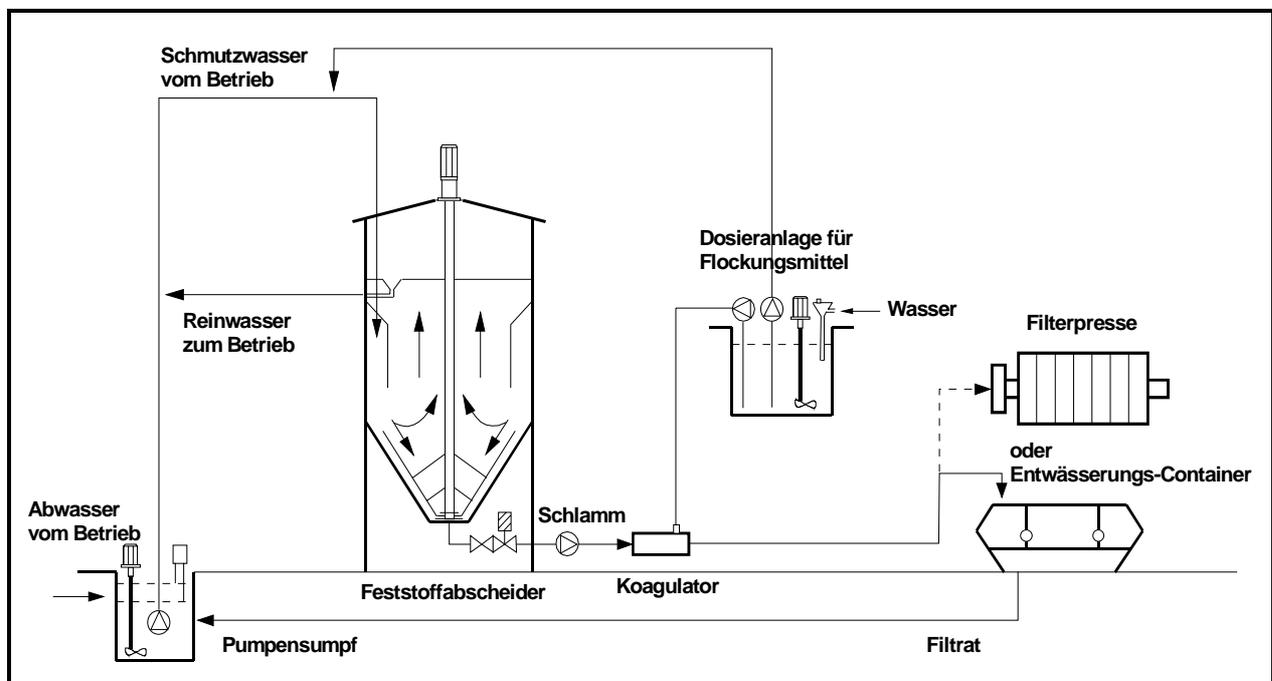


Abbildung 4-17: Schematische Darstellung eines Hochleistungskläreindickers mit Schlammmentwässerung

Der in Abbildung 4-18 dargestellte Entwässerungscontainer entwässert Dünnschlamm über ein Filtrervlies aus Geo-Textil. Die Entwässerung erfolgt selbsttätig ohne weitere mechanische Hilfsmittel. Das Filtrervlies hat durch seine Dicke von 8 mm eine effektive Tiefenfiltration bei gleichzeitig hoher Durchsatzleistung. Eine Befüllung des Containers kann kontinuierlich oder chargenweise erfolgen. Je nach Anwendung kann das Filtrat in den Kreislauf zurückgeführt oder in das Abwasser entsorgt werden.

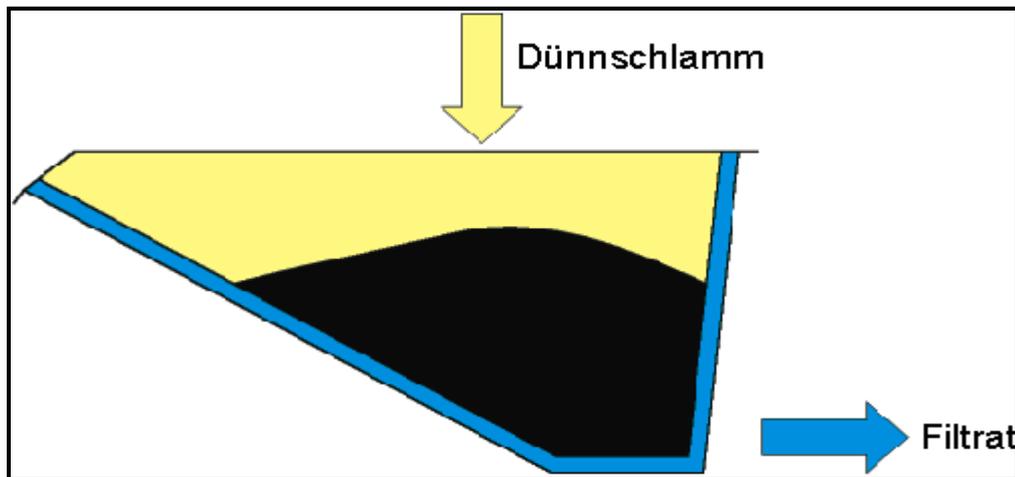


Abbildung 4-18: Schematische Darstellung des Funktionsprinzips eines Entwässerungscontainers

Quelle: [76]

Als abschließendes Fallbeispiel für eine Abwasserreinigungsanlage in einem feinkeramischen Betrieb wird im Folgenden die Anlage eines Geschirrporzellanbetriebes beschrieben, in dem ein jährliches Abwasservolumen von 20.000 m^3 gereinigt wurde. Die beschriebene Anlage wurde als Versuchsanlage betrieben und ist aufgrund der Stilllegung des Geschirrkera­mikkbetriebes nicht mehr in Betrieb. In Abbildung 4-19 ist das Fließschema der Anlage dargestellt. Diese Anlage reinigt das Abwasser nach dem Durchströmen zweier Längsklär­becken mittels Ausflockung der Feststoffe durch Sedimentation, Nachfiltration über einen Kiesfilter und einer anschließenden Umkehrosmose. Das Abwasser aus den verschiedenen Bereichen der Porzellanproduktion wird zunächst in mehreren Pufferbehältern gesammelt und homogenisiert. Von den Pufferbehältern (70 m^3) gelangt das Abwasser dann in einen 25 m^3 großen Reaktionsbehälter in dem das saure Flockungsmittel zugegeben wird. Der pH-Wert wird kontinuierlich gemessen, um gegebenenfalls durch Zugabe von Soda ein zu starkes Absinken korrigieren zu können. Das so vorbehandelte Abwasser wird dann einem Sedimentationsbecken zugeführt, um die Makroflocken vom Hauptwasserstrom zu trennen. Während die als Schlamm im unteren Teil des Sedimentationsbeckens abgeschiedenen Feststoffe abgepumpt werden, gelangt das überlaufende Klarwasser in ein weiteres Pufferbecken mit einem Nutzvolumen von 135 m^3 .

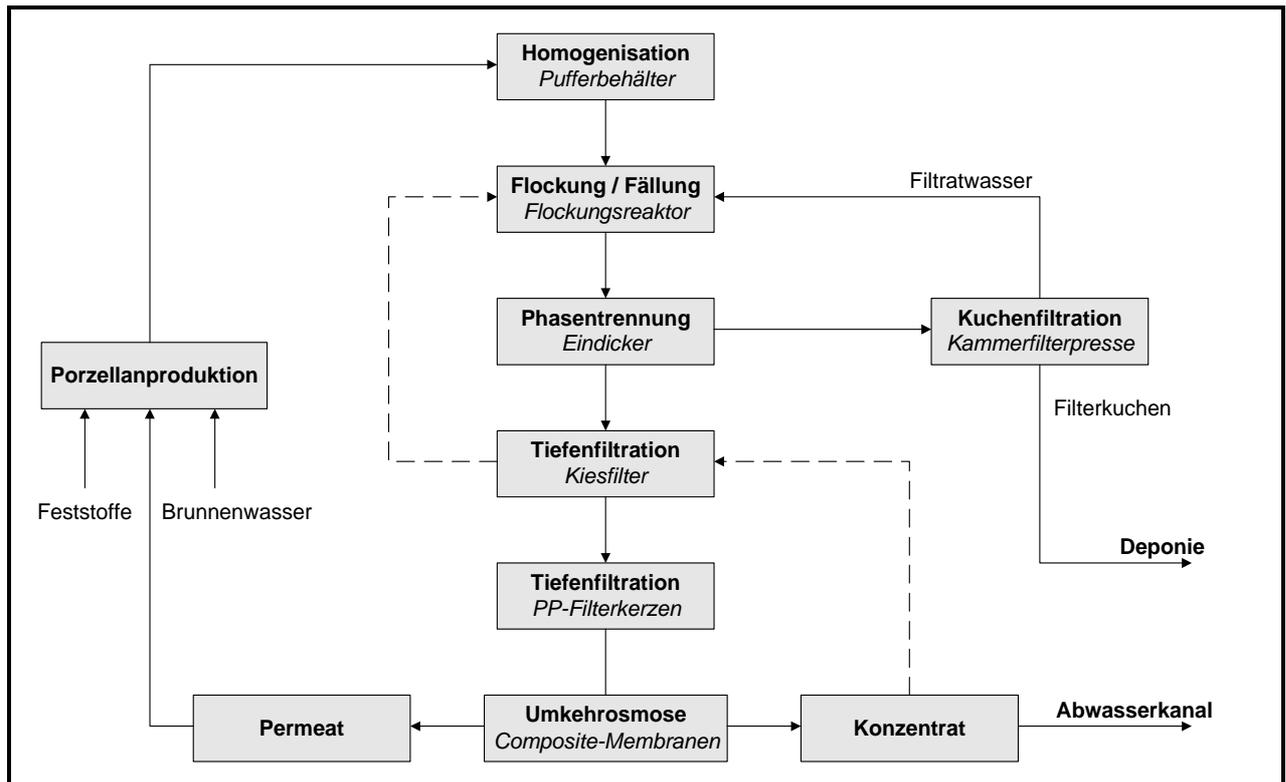


Abbildung 4-19: Fließschema der Abwasserreinigungsanlage einer Porzellanfabrik

Quelle: [30]

Der abgepumpte Schlamm wird mittels einer Filterpresse entwässert. Das Überlaufwasser der Sedimentationsstufe wird dem mit Basalt und Hydroanthrazit gefüllten Kiesfilter zugeführt, das feinste Schwebeteilchen weitgehend zurückhält. Die Reinigung des Filters erfolgt mit einem Teil des Konzentrats und Druckluft. Abschließend wird das so vorgereinigte Abwasser mit Hilfe der Membrantechnik nach dem Prinzip der Umkehrosmose gereinigt, wobei nochmals eine vorgeschaltete Feinstfiltration mit Hilfe von PP-Filterkerzen notwendig ist. Bei nicht ausreichender Vorreinigung des Abwassers kann es bei Dauerbetrieb zur Blockierung der Membran kommen. Die Umkehrosmoseanlage reinigt 70 % des Wassers soweit, dass das Permeat als Brauchwasser in allen Stufen der Produktion (Formengießerei, Masseaufbereitung) wieder eingesetzt werden kann. 30 % des Wassers fallen als Konzentrat an, das zu 50 % zum Rückspülen des Kiesfilters eingesetzt wird. Es werden somit nur 15 % der ursprünglichen Rohwassermenge als Konzentrat an die Kanalisation abgegeben und 85 % wiederverwendet [30]. Bei einem Wasserbedarf von 100 m^3 pro Tag können somit 85 m^3 Frischwasser pro Tag eingespart werden.

Die Verschmutzung des Abwassers konnte bei den abfiltrierbaren Stoffen von 200 mg pro Liter auf $< 0,1 \text{ mg/l}$, bei den absetzbaren Stoffen von $0,3 \text{ ml/l}$ auf $< 0,1 \text{ ml/l}$, beim Blei von $2,0 \text{ mg/l}$ auf $0,01 \text{ mg/l}$, beim Cadmium von $0,1 \text{ mg/l}$ auf $0,001 \text{ mg/l}$ und beim chemischen Sauerstoffbedarf von $30 \text{ mg O}_2/\text{l}$ auf $20 \text{ mg O}_2/\text{l}$ gesenkt werden [30]. Tabelle 4-9 zeigt die Ergebnisse der Abwasseranalysedaten nach den einzelnen Prozessstufen.

Tabelle 4-9: Abwasserdaten eines Geschirrkераmikbetriebes

| | Einheit | Betriebs- abwasser | nach Eindicker | nach Kiesfilter | Konzentrat nach Umkehrosiose | Permeat nach Umkehrosiose |
|------------------------------------|---------|-----------------------|-------------------|--------------------|------------------------------------|---------------------------------|
| pH-Wert | | 7,5 | 7,5 | 7,5 | 8,0 | 6,5 |
| Leitfähigkeit | µS/cm | 750 | 700 | 680 | 950 | 8 |
| Gesamthärte | dH | 12 | 11,5 | 12 | 15 | < 0,5 |
| Abdampfrückstand _{135 °C} | mg/l | 1.500 | 550 | 500 | 820 | 60 |
| Chlorid | mg/l | 150 | 150 | 130 | 245 | < 5 |
| Sulfat | mg/l | 100 | 100 | 110 | 280 | < 10 |
| Phosphat ges. | mg/l | 80 | 2 | 1 | 1,5 | 0,4 |
| Kieselsäure | mg/l | 200 | 15 | 10 | 25 | < 0,1 |
| Calcium | mg/l | 70 | 70 | 65 | 245 | 0,3 |
| Magnesium | mg/l | 9 | 7 | 7 | 23 | < 0,1 |
| Bor | mg/l | 2 | 1 | 1 | 3,1 | < 0,1 |
| Zink | µg/l | 4.500 | < 100 | < 100 | < 100 | < 100 |
| Blei | µg/l | 250.000 | 200 | 60 | 110 | < 10 |
| Cadmium | µg/l | 60 | 2 | 2 | 3 | < 1 |
| Cr, Cu, Ni, Co | µg/l | < 0,05 | < 0,05 | < 0,05 | < 0,05 | < 0,05 |
| AOX | mg/l | 0,001 | - | - | 0,007 | < 0,001 |
| CSB | mg/l | 30 | - | - | 45 | < 15 |

Quelle: [30]

Abschließend zeigt Tabelle 4-10 die Rückführungsraten (RC-Raten) verschiedener Produktionszweige der Keramischen Industrie. Dabei sind die in Anhang 17 der Abwasserverordnung für Alt- und Neuanlagen geforderten Rückführungsraten, die durchschnittlichen Rückführungsraten des Produktionszweiges in Deutschland sowie die höchsten erreichbaren Rückführungsraten der besten Anlage aufgeführt.

Tabelle 4-10: Rückführungsraten verschiedener Bereiche der Keramischen Industrie

| Produktionszweig | Anhang 17 | | Durchschnitt | Beste Anlage |
|----------------------------|-----------|-----------|--------------|--------------|
| | Altanlage | Neuanlage | | |
| Keram. Fliesen und Platten | min. 50 % | 100 % | 70 - 80 % | 100 % |
| Geschirrkераmik | 0 % | min. 50 % | k.A. | 50 % |
| Piezo-Kераmik | min. 30 % | min. 50 % | k.A. | k.A. |
| Sanitärkeramik | 0 % | min. 30 % | 30 - 50 % | 50 % |

Quelle: [46]

4.1.3 Techniken zur Minderung der Emissionen in das Medium Boden

In der Keramischen Industrie fallen neben den Industrieabfällen auch häusliche Abfälle und Fäkalien­schlämme an, die aber nicht Gegenstand dieser Betrachtung sind. Die industriellen Abfälle setzen sich im Wesentlichen aus Masseschlamm­en aus der Aufbereitung, Glasurschlamm­en, Schlamm­en aus der Wasserreinigung, Bruch (Grün-, Trocken- und Brennbruch), Ofenausbruch (Feuerfestmaterial), Gipsschlamm­en, Rückständen aus der Abgasreinigung (beladener Kalksplitt, Filterstaub etc.) sowie aus Gewerbeabfällen von Verpackungen zusammen. Die Vermeidung und Verwertung von Abfällen kann durch technologische oder konstruktive Maßnahmen erreicht werden und setzt bereits bei der Auswahl der Produktionsverfahren an. Des Weiteren kann eine optimierte Prozessführung das Abfallaufkommen verringern.

Die folgenden Erläuterungen zur Vermeidung und Verminderung von Abfällen beziehen sich auf die direkte Vermeidung und Verminderung von Abfällen in den jeweiligen Prozessstufen. Verfahren, die den Wiedereinsatz von Abfällen außerhalb und auch innerhalb des keramischen Betriebes ermöglichen, und damit auch zur Abfallvermeidung beitragen, werden im Abschnitt *Verwertung von Abfällen* beschrieben.

4.1.3.1 Vermeidung und Verminderung von Abfällen

Bei der Rohstofflagerung können durch den Einsatz einer dezentralen Abgasreinigung mittels Siloaufsatzfiltern die jeweils anfallenden Filterstäube direkt sortenrein in den Produktionsprozess zurückgeführt werden. Dieses ist bei zentralen Entstaubungsanlagen nicht ohne weiteres möglich, da es zu einer Vermischung verschiedener Rohstoffe kommt [125].

Im Bereich der Formgebung besteht durch den Einsatz moderner Technologien ein erhebliches Potential zur Abfallvermeidung. So können Verfahren, wie z.B. das Gießen in Gipsformen, durch den Einsatz von Druckgussanlagen mit Kunststoffformen ersetzt werden, wodurch zum einen der Anfall von Weißschlamm reduziert wird und zum anderen der Einsatz von Gipsformen vermieden wird. Hinzu kommt noch, dass durch das Pressverfahren eine Materialersparnis von ca. 20 % zu erwarten ist. Beim Einsatz von isostatischen Pressen wird ebenfalls auf Gipsformen verzichtet, wobei aber der Anteil an gebrauchten Kunststoffformen durch diese Technologien steigen wird [125]. Durch den Einsatz geschlossener Metallformen anstatt von offenen Gipsformen bei der Verpressung von z.B. Dachziegeln wird ebenfalls eine abfallfreie Verpressung bei einem Wegfall der Gipsformen ermöglicht [67]. Der Anfall an verbrauchten Gipsformen kann durch eine Erhöhung der Standzeit der Gipsformen ebenfalls vermindert werden. Durch den Einsatz von vollautomatisierten Gipsmischern und Vakuummischern können härtere Gipsformen hergestellt werden, die eine 2 bis 3-fach längere Lebensdauer der Formen ermöglichen [68].

Beim Brennprozess bestehen ebenfalls Möglichkeiten einer direkten Vermeidung von Abfällen durch den Einsatz moderner Technologien. So kann durch Umstellung von Kapsel- bzw. Regal-Tunnelofen-Brand auf Schnellbrand bzw. Monobrand und auf Rollenofensysteme der Einsatz an Brennhilfsmitteln minimiert werden, wodurch der Anfall von Feuerfestbruch verringert wird. Der Anteil des Brennbruches wird durch die Möglichkeit der exakten Steuerung des Brennregimes beim Einzelbrand ebenfalls reduziert. Auch bei herkömmlichen Ofensystemen kann Brennbruch durch die Optimierung des Wagenbesatzes vermindert werden [125].

4.1.3.2 Verwertung von Abfällen

Die Verwertung von unvermeidbaren Abfällen aus der Produktion durch einen Wiedereinsatz in den Prozess ist aus ökonomischen und ökologischen Gründen der effizienteste Weg. Je sortenreiner die Abfälle sind, desto leichter ist eine direkte Rückführung in den Prozess möglich.

Bei der Masseaufbereitung entstehen insbesondere beim Einsatz von Nassverfahren durch Reinigungsvorgänge, Fehlchargen etc. größere Mengen an Weißschlamm bzw. an mit keramischen Massen und Glasuren belastetem Reinigungswasser. Durch eine Sammlung des in der Aufbereitung anfallenden Weißschlammes und Reinigungswassers an einer zentralen Stelle können die Feststoffe und das Wasser oft direkt bei neuen Versätzen verwendet werden [97]. Genügen die Weißschlämme aufgrund ihrer Zusammensetzung aus verschiedenen Keramikrohstoffen nicht mehr den Anforderungen an den Versatz, so können sie in der Zementindustrie oder als Dichtmaterial in Deponien eingesetzt werden. Ebenso ist bei Massefehlchargen oder anderen Rückständen, wie z.B. Filterstäuben, die nicht mehr sortenrein vorliegen, im Einzelfall zu überprüfen, ob ein direkter Wiedereinsatz in den Produktionsprozess möglich ist. Oft besteht die Möglichkeit Abfälle, die z.B. in der Feinkeramik nicht mehr den Anforderungen an den Versatz genügen, in der Grobkeramik einzusetzen [125].

Im Bereich der Formgebung fallen Abfälle im Wesentlichen in Form von Schnittabfall, Stäuben und Gipsformen an. Der bei der Pressformung entstehende Schnittabfall kann oft direkt an der Presse abgeschoben, unter dem Pressentisch gesammelt und dem Pressenvorratsbehälter wieder zugegeben werden [97]. Weiterhin können der entstehende Schnittabfall und die anfallenden Stäube als Versatzkomponenten in Gießmassen oder in Steinzeugmassen wiedereingesetzt werden. Verbrauchte Gipsformen können außerbetrieblich in der Zementindustrie und nach Zerkleinerung teilweise auch in der Düngemittelindustrie verwertet werden [125].

Eine Rückführung von Glasurverlusten aus dem Waschwasser von Glasurlinien lohnt sich insbesondere dann, wenn es sich um Glasurlinien handelt, bei denen nur eine Glasur in größerer Menge langfristig verarbeitet wird. Das Reinigungswasser der Glasurlinie wird dann lokal gesammelt und die Feststoffe werden möglichst schonend ausgeflockt. Neben der Ausflockung besteht weiterhin die Möglichkeit, durch den Einsatz spezieller Filtermembranen die Glasurbestandteile vom Reinigungswasser zu trennen [85]. Das gereinigte Wasser geht zurück an die Glasurlinie und die abgeschiedene Glasur zurück in den jeweiligen Glasurvorratsbehälter. Entstehen in Absetzbecken Glasurschlämme verschiedener Glasurversätze, so ist nach einer entsprechenden Homogenisierung ein Einsatz als Flussmittlersatz in der Masseaufbereitung möglich [97].

Spezielle Filtersysteme erlauben eine direkte Rückführung der aus der Abluft der Sprühkabinen abgeschiedenen Glasurpartikel. In Abbildung 4-20 ist die Systemskizze eines Starrkörperfilters dargestellt, der nach dem Jet-Impuls-Selbstreinigungsverfahren arbeitet. Der Einsatz dieses Sinterlamellenfilters ermöglicht auch die Abscheidung von feuchten Stäuben, wie sie z.B. beim Spritzglasieren anfallen. Durch das Vorschalten einer Beruhigungszone fällt der Staub im Filtersystem schon relativ trocken an, so dass im Idealfall die abgeschiedenen Glasurpartikel in der Filteranlage wieder als rieselfähiges Pulver anfallen.

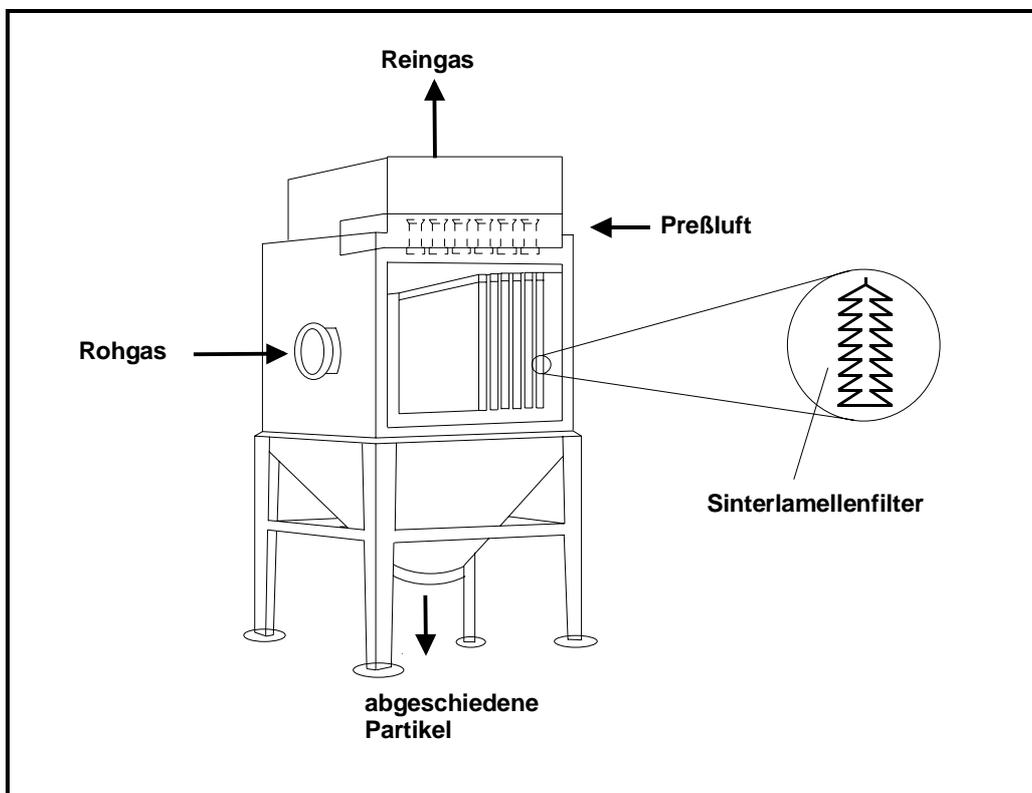


Abbildung 4-20: Schematische Darstellung eines Sinterlamellenfilters

Quelle: [4]

Hauptelement des Filters sind die Sinterlamellen, die als Kompaktelemente in die Filteranlage eingebaut werden. Der Grundkörper des Filterelements besteht aus mit PTFE-beschichtetem gesintertem Polyethylen, das dem Element die formstabilen, biegesteifen und wasserbeständigen Eigenschaften gibt. Mit diesem Filtersystem kann ein Abscheidegrad von 99,99 % bei Reststaubkonzentrationen von $< 1 \text{ mg/m}^3$ erreicht werden, so dass die Reinluft direkt an den Arbeitsplatz zurückgeführt werden kann [4].

Die Verwertung von aus dem Brennprozess resultierendem Glüh- und Glattbruch sowie Ofenausbruch ist, ebenso wie die Verwendung von Trockenbruch, größtenteils unproblematisch. Der Glüh- und Glattbruch wird zunächst einer Grob- und Feinzerkleinerung zugeführt und geht dann zurück in die Masseaufbereitung. Ofenausbruch aus sortenreinem Feuerfestmaterial kann in die Feuerfestindustrie zurückgeführt und nach entsprechender Aufbereitung ebenfalls wieder eingesetzt werden [125].

Der bei Verpackung, Lagerung und Versand der keramischen Erzeugnisse anfallende Gewerbeabfall besteht überwiegend aus Papier, Pappe, Kartonagen, Holz, Schrumpffolien, Kunststoffen und Metallen. Diese Abfälle können bei einer getrennten Sammlung den entsprechenden außerbetrieblichen Verwertungswegen zugeführt werden. Durch den Einsatz von Mehrwegverpackungen können die Mengen der Gewerbeabfälle zudem reduziert werden.

Eine separate Erfassung unterschiedlich zusammengesetzter Abgasströme erleichtert die optimale Nutzung der im Produktionsprozess anfallenden staubförmigen Abfälle. Die abgeschiedenen Stäube können dann nach einer entsprechenden Homogenisierung wieder als Flussmittel in der Masseaufbereitung eingesetzt werden.

Im Bereich der Abgasreinigung fallen beim Einsatz von Trockensorptionsanlagen überwiegend Reaktionsprodukte in Form von Calciumfluorid (CaF_2), Calciumsulfat (CaSO_4), Calciumsulfit (CaSO_3) und Calciumcarbonat (CaCO_3) an. In den Schüttschichtfiltern werden dabei überwiegend Granulat oder Splitt (körniger Kalk) eingesetzt, wobei die chemische Reaktion dabei im Wesentlichen an der Oberfläche des Granulats abläuft. Das Sorptionsmittel kann dabei besser ausgenutzt werden, wenn die auf den äußeren Schichten des Granulats entstandenen Reaktionsprodukte entfernt werden. Durch den Einsatz einer Schältrammel kann die Oberfläche des Granulats reaktiviert werden, indem die gesättigte Oberfläche abgeschält wird. Diese Maßnahme dient gleichzeitig der Einsparung von Sorptionsmitteln. Beim Schälprozess können allerdings mitunter höhere Staubemissionen entstehen.

Durch den in Abbildung 4-21 dargestellten Verbund aus Fluor-Kaskaden-Absorber und Schältrammel mit automatischer Rückförderung kann die Abfallmenge um bis zu 50 Prozent vermindert werden.

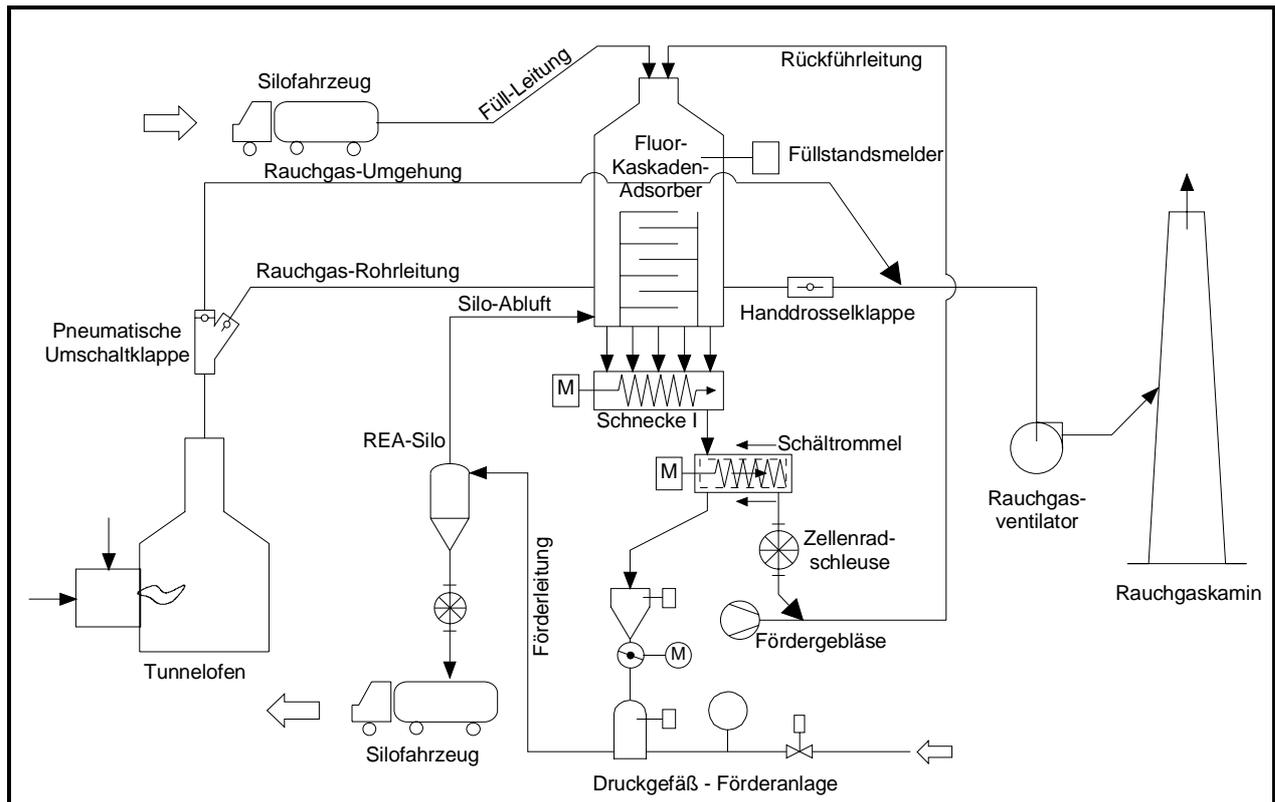


Abbildung 4-21: Verfahrensfließbild eines Kaskaden-Absorbers mit Schältrummel

Quelle: [32]

Das mit Schadstoffen beladene Kalkgranulat wird von der Austragsschnecke in die Schältrummel gefördert. Durch Reibung wird die äußere Schicht, mit der die Schadstoffe reagiert haben, abgetragen und mit den Körnern $< 2,5$ mm unterhalb des Einlaufs ausgetragen. Dieses mit Schadstoffen gesättigte Material kann entsorgt werden. Das übrige Kalkgranulat mit $> 2,5$ mm hat nach dem Schälvorgang wieder eine reaktionsfähige Oberfläche und wird in der Schältrummel auf die gegenüberliegende Seite gefördert, wo es mittels Zellenradschleuse, Ringverdichter und Rohrleitung zurück in den Absorber gelangt. Fluor-Kaskaden-Absorber, Schältrummel und Rückführung bilden ein geschlossenes System. Dieser Schälvorgang mit Rückführung läuft unter Berücksichtigung der Einstellzeiten automatisch und kontinuierlich ab [32].

Eine weitere Möglichkeit besteht im Einsatz der oben genannten Abfälle in der Grobkeramik. So ist ein Zusatz der Abfälle in kleineren Mengen bei der Hintermauerziegelherstellung möglich, wobei es zu Anflügen am Stein durch das Calciumsulfat kommen kann [116]. Eine Verwertung des beladenen Kalksplitts in der Zement-, Beton- und Asphaltindustrie ist ebenfalls möglich [71].

Im Rahmen der Abwasserreinigung fallen in Abhängigkeit von der Betriebsgröße größere Mengen an Abfällen in Form von Klärschlämmen an, die nach einer geeigneten Nachbehandlung in den Produktionskreislauf zurückgeführt werden können. Damit die Klärschlamm in ihrer Qualität einem Rohstoff so nahe wie möglich kommen, müssen sie homogenisiert werden. Stammen die Klärschlamm aus einer weitgehend uniformen Fertigung, so kann mit der in Abbildung 4-22 dargestellten Klärschlammwiederverwendungsanlage eine Aufbereitung des Abfalls Klärschlamm erfolgen und somit eine Deponierung vermieden werden.

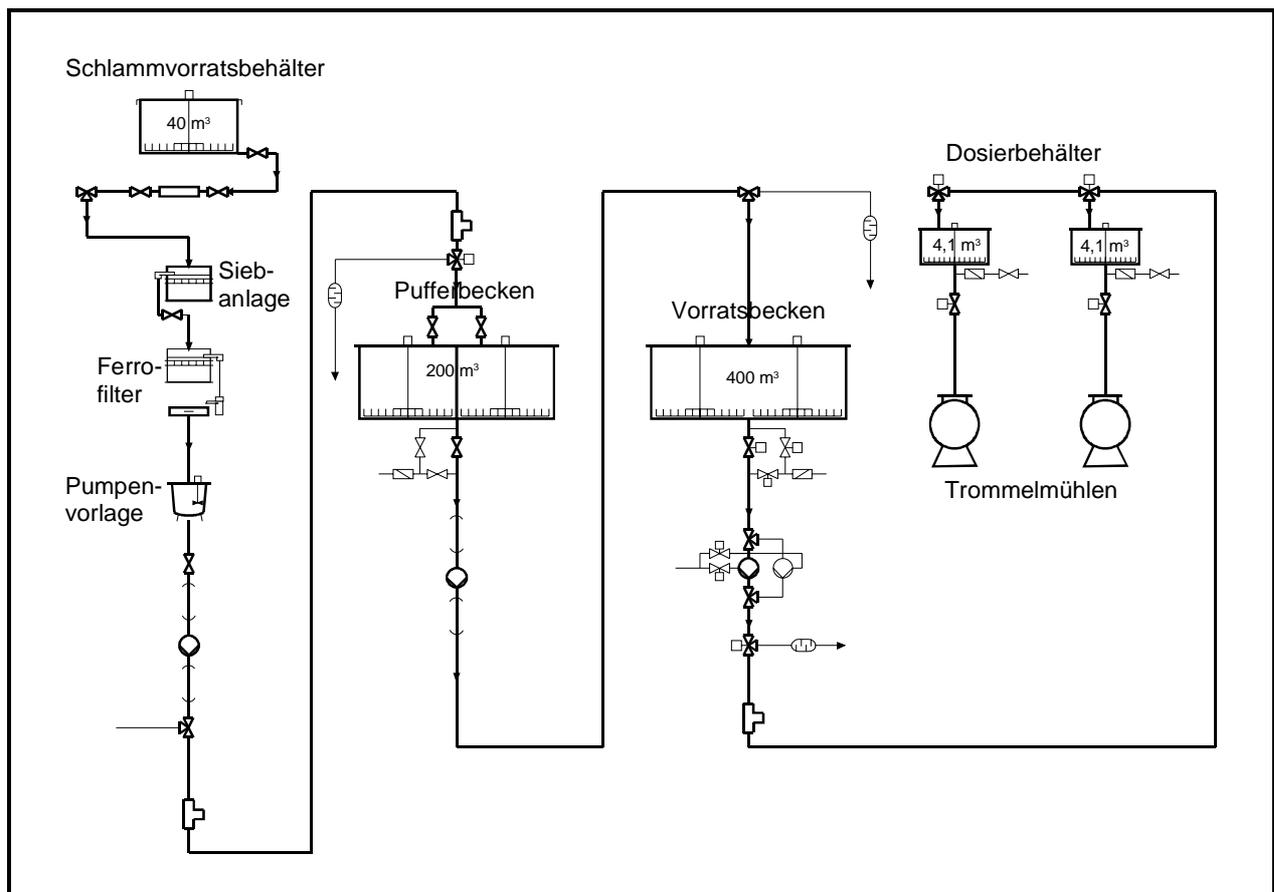


Abbildung 4-22: Schematische Darstellung der Klärschlammwiederverwendungsanlage einer Fliesenfabrik

Quelle:[41]

Der Klärschlamm wird aus den Klärbecken abgepumpt, einer 2-stufigen Siebanlage zugeführt und passiert anschließend einen Ferrofilter, um dann in eine Pumpenvorlage mit 3 m^3 Inhalt eingeleitet zu werden. Von dort wird der Klärschlamm in zwei je 200 m^3 fassende Pufferbecken gepumpt, die wechselseitig gefüllt werden. Nach einer Überprüfung der Schlammigenschaften und einem positiven Analyseergebnis wird der Schlamm dem Hauptklärschlammvorratsbehälter mit einem Fassungsvermögen von 400 m^3 zugeführt. Von diesem Vorratsbecken gelangt der keramische Schlamm dann halbautomatisch in

Dosierbehälter für den Steinzeug- bzw. Steingutversatz oberhalb der Trommelmühlen. In dem dargestellten Beispiel werden im Steingutversatz 1,5 % und im Steinzeugversatz 5 % Klärschlamm wiederverwendet.

4.1.4 Techniken zur Reduzierung des Rohstoffverbrauches

In der Keramischen Industrie eingesetzte Techniken zur Reduzierung des Rohstoffverbrauchs umfassen neben den in diesem Abschnitt beschriebenen Techniken auch die Technologien, die bereits teilweise in den Kapiteln *Techniken zur Minderung der Emissionen in das Medium Wasser* und *Techniken zur Minderung der Emissionen in das Medium Boden* beschrieben wurden. Die dort beschriebenen Techniken der Kreislaufführung von Abwasser und des Wiedereinsatzes von bei der Produktion anfallenden Abfällen im Prozess stellen grundlegende Techniken zur Verringerung des Rohstoffverbrauchs dar. Darüber hinaus bestehen weitere Möglichkeiten den Rohstoffverbrauch zu reduzieren. Techniken zur Verminderung des Brennstoffverbrauches werden im Folgenden Kapitel *Techniken zur Reduzierung des Energieverbrauches* beschrieben.

Eine Alternative zum Einsatz von Rohstoffen bei der Herstellung keramischer Erzeugnisse bietet insbesondere in der Grobkeramik der Einsatz von Sekundärrohstoffen. Diese sind Abfallstoffe, die in anderen Prozessen anfallen und unter Berücksichtigung ihrer Gefährdungspotentiale für die Umwelt einer Wiederverwertung zugeführt werden können. Die Bandbreite der Sekundärrohstoffe reicht dabei von Sinterhilfsmitteln über energiehaltige Porosierungsstoffe bis zu Magerungsmitteln [100].

Als Magerungsmittel können Gießereialtsande, Schlackenhüttensande, Glasmehl und seine Weiterverarbeitungen, Trinkwassersedimente und Natursteinmehle eingesetzt werden. Porosierungsstoffe organischen Ursprunges, die als Sekundärrohstoffe verwendet werden können, sind beispielsweise Sägemehl, Polystyrol (Styropor), Papierfangstoffe, Textilabfälle, Biertreber, Kohletone, Kohleabrieb, Steinkohlewaschberge, Klärschlamm und Flugasche. Als anorganisches Sekundärporosierungsmittel kann Kalkmehl verwendet werden [18]. Der Einsatz dieser Sekundärrohstoffe kann aufgrund der günstigen Kornverteilung bzw. ihrer chemischen Zusammensetzung zu verbessertem Sinterverhalten und gesteigerten Endproduktqualitäten führen [58].

Der Einsatz von Recycling-Polystyrol erfordert eine Aufbereitung der in der Verpackungsindustrie verwendeten Styropor-Formteile. In Abbildung 4-23 ist das Fließbild der Styroporaufbereitungsanlage einer Ziegelei dargestellt.

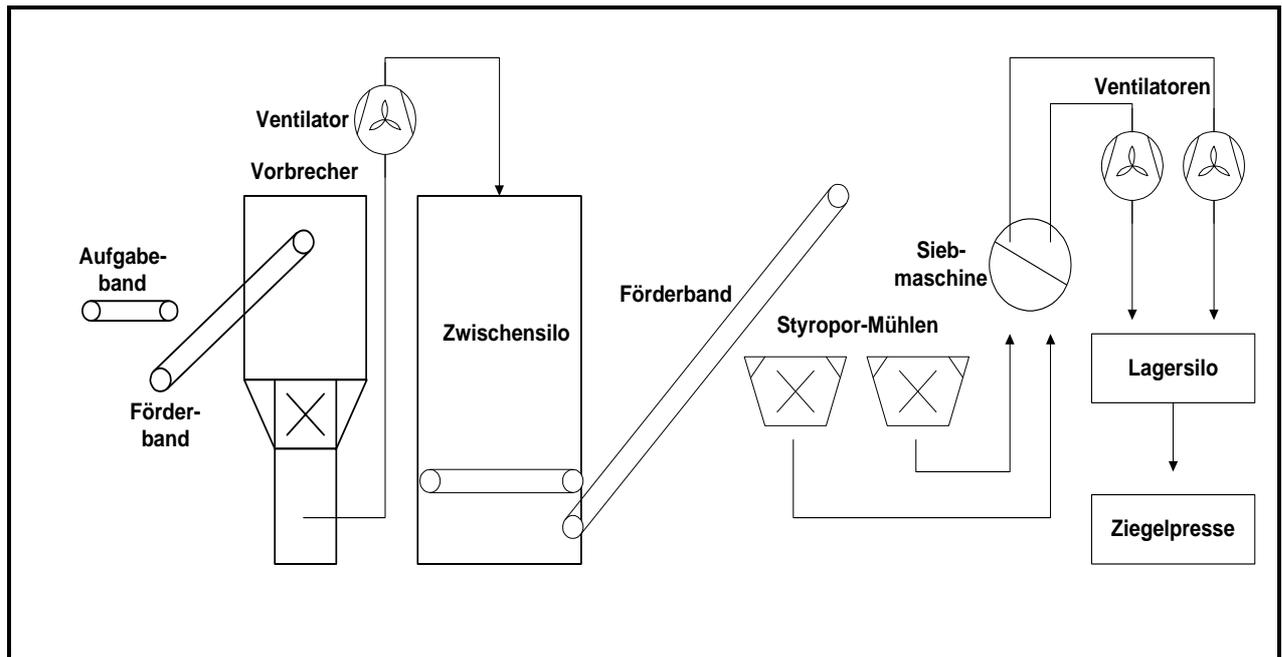


Abbildung 4-23: Fließbild einer Styroporaufbereitungsanlage

Quelle: [54]

Die mit Verpackungsstyropor gefüllten Säcke werden auf das Aufgabeband entleert. Über ein ansteigendes Förderband werden die Formteile dem Vorbrecher zugeführt. In diesem wird das Styropor auf etwa Faustgröße vorzerkleinert und anschließend mittels Ventilator in das Zwischensilo eingetragen. Das vorzerkleinerte Styropor wird über Förderband den eigentlichen Styropor-Mühlen zugeführt. In diesen erfolgt eine weitere Zerkleinerung des Styropors mittels schnelldrehender Schlagmesser auf eine Korngröße von maximal 5 mm. Die Mahlleistung je Mühle beträgt 15 m³/h gemahlene Styropor. Die Entleerung der Mühlen erfolgt über eine Siebmaschine und Ventilatoren. Diese fördern das Mahlgut in die Lagersilos. Das gemahlene Verpackungsstyropor wird anschließend pneumatisch zu den Arbeitssilos an den Ziegelpressen transportiert. Die Dosierung des Styropors zu der Tonmischung erfolgt mittels Zellenradschleuse direkt in den Doppelwellenmischer der Ziegelpresse. Dort wird das Sekundärporosierungsmittel homogen in den Ton eingemischt [54].

Der Einsatz von Wasser kann durch die Verwendung von gesammeltem Niederschlagswasser zur Masseaufbereitung und zur Reinigung der Anlagen vermindert werden. Eine zusätzliche Verringerung des Einsatzes von Wasser in der Aufbereitung kann durch den Zusatz von bestimmten Additiven erreicht werden. Die aus Huminen und anorganischen Komplexbildnern bestehenden Zusätze senken die Grenzflächenspannung und immobilisieren störende freie Kationen. Sie verringern damit den Anmachwasserbedarf in der Aufbereitung bei gleichbleibender oder verbesserter Plastizität, woraus zusätzlich ein verringerter Energiebedarf beim Trockenprozess resultiert [20].

4.1.5 Techniken zur Reduzierung des Energieverbrauches

Zur Senkung des Energieverbrauches in der Keramischen Industrie kann unterschieden werden zwischen organisatorischen und technischen Maßnahmen. Im Folgenden werden zunächst allgemeine organisatorische Maßnahmen genannt, während mögliche technische Maßnahmen anschließend prozessstufenbezogen beschrieben werden.

Organisatorische Maßnahmen zur Energieeinsparung sind beispielsweise das Einsetzen von Energieerfassungs- und Energiemanagementsystemen, die computergestützte Prozessregelung zur optimalen Anlagenführung und Anlagenauslastung, die Einführung von flexibleren Arbeitszeiten, der Einsatz von Energiebeauftragten und die Durchführung von Energiebilanzen an den Anlagen [72].

Durch Energieerfassungs- und Energiemanagementsysteme in Verbindung mit einem Produktionsplanungssystem kann eine leistungs- und energieoptimierte Produktion erreicht werden. So werden mittels dieser Systeme die Trocken- und Brennkurven den jeweiligen Produkten angepasst, um eine optimale Energienutzung des Ofen-Trockner-Wärmeverbundes zu gewährleisten [63]. Dieses geschieht indem die Produktionsleistungen von Ofen und Trockner und die gefahrenen Trocken- und Brennkurven aufeinander abgestimmt werden. Dabei werden den Produkten zunächst Prioritäten zugeordnet. Bei der leistungsoptimalen Berechnung wird zunächst die Durchführbarkeit des gewünschten Produktionsplanes bei bloßer Aufeinanderfolge der Produkte nach ihrer Priorität aufgrund der im System vorhandenen Trocknungs-, Be- und Entladungs-, Transport- und Brennzeiten überprüft. Das System legt dann die frühestmöglichen Fertigstellungstermine für alle Produkte fest. Wird im Werk nicht die volle Produktionsleistung benötigt, kann der Wärmeverbund leistungs- und energieoptimal betrieben werden. Somit werden, beispielsweise bei einem Wärmeverbund von Kammertrockner und Tunnelofen, bei der Kammerbelegung zwischen die Kammerstarts zusätzlich variable Pausen gelegt und die Produktionsabfolge unter Wahrung der Termintreue variiert, um eventuelle Spitzen im Energieverbrauch von Trockner und Ofen abzubauen. Zugleich wird der Energiebedarf des Trockners auf das Wärmeangebot des Ofens abgestimmt, so dass es zu möglichst geringen Abblasungen und Energieengpässen kommt [122].

Eine weitere Maßnahme zur optimalen Nutzung der Energie des Ofens zur Trocknerbeheizung besteht in einer möglichst genauen Abstimmung des gesamten Betriebsablaufes auf den Ofenbetrieb. Der durchgängigen Betriebsweise steht die heute gängige 5-Tage oder 6-Tage-Woche in den Betrieben entgegen, die oftmals keine durchgängige Nutzung der Verbundenergie des Ofens erlaubt. Das führt zu einem sonntäglichen Abblasen der Verbundenergie, da die Kammertrockner an diesen Tagen nicht neu belegt werden. In der Woche hingegen müssen die Trockner mit erdgasbetriebenen

Brennern zusätzlich beheizt werden. Durch eine 7-Tage-Woche wird ein durchgängiger Betriebsablauf und somit eine optimale Nutzung der Verbundenergie des Ofens ermöglicht [51].

Zur Abschätzung der Energieeinsparpotentiale, die durch technische Maßnahmen erreicht werden können, ist es sinnvoll, vorher Energiebilanzen insbesondere für die Öfen und die Trockner zu erstellen. Dadurch wird eine Identifizierung der effizientesten Energiesparmaßnahmen sowie eine wirtschaftliche Bewertung ermöglicht. Die Ernennung eines Energiebeauftragten, der die Identifizierung und Einführung der organisatorischen und technischen Maßnahmen überwacht und koordiniert, erleichtert dabei die Umsetzung der Maßnahmen. In modernen Anlagen sind eine Reihe der im Folgenden prozessschrittbezogenen aufgeführten technischen Maßnahmen schon bei der Planung der Anlagen umgesetzt worden, so dass weitere Energieeinsparpotentiale nur noch begrenzt bestehen.

4.1.5.1 Reduzierung des Energieverbrauches bei Masseaufbereitung und Formgebung

Die bei der Masseaufbereitung eingesetzten Anlagenteile sind mit möglichst hohen Auslastungen zu betreiben, um einen energieoptimierten Betrieb zu gewährleisten. Leerlaufzeiten der Produktionsmittel sollten durch organisatorische Maßnahmen möglichst vermieden werden. Der Einsatz wirkungsgradverbesserter Elektromotoren in den Aufbereitungsaggregaten garantiert weiterhin eine effizientere Energienutzung.

Eine Alternative zur energieintensiven Sprühgranulierung bieten Verfahren wie beispielsweise die Wirbelschichtgranulierung, die Walzengranulierung, die Mischgranulierung bzw. eine mechanische Vorgranulierung mit nachgeschaltetem Fließbett-Trockner. Der spezifische Stromverbrauch liegt bei diesen Verfahren etwas höher, der spezifische thermische Energieaufwand liegt dagegen im Durchschnitt niedriger als bei der Sprühgranulierung [7].

Bei der Aufbereitung von Engoben kann durch den Einsatz von Rührwerksmühlen an Stelle von Trommelmühlen zur Nassfeinstmahlung der Energieverbrauch aufgrund einer geringeren Leistungsaufnahme der Rührwerksmühlen vermindert werden. Bei Untersuchungen zur effizienten Energieanwendung hat sich gezeigt, dass auch beim Einsatz von Trommelmühlen durch eine Erhöhung des Füllungsgrades auf 50 %, durch ein Mahlen bei 60 % der kritischen Drehzahl sowie durch ein optimales Verhältnis von Mahlkugeln : Mahlgut : Flüssigkeit von 1:1:1 weitere Möglichkeiten zur Energieeinsparung bestehen. Weiterhin erwies sich ein im Vergleich zum Trommeldurchmesser nicht zu groß gewählter Mahlkugeldurchmesser als vorteilhaft. Eine Verkürzung der Mahlzeit durch die Verwendung von stufenlosen Mühlen zur Anpassung des Mahlprozesses an die jeweiligen Anforderungen sowie die Verwendung von abriebfesten Mahlkugeln aus Al_2O_3 konnte dabei ebenfalls erreicht werden [67].

In Tabelle 4-11 sind die spezifischen Einsparpotentiale der oben beschriebenen Einzelmaßnahmen abgeschätzt. Da sich einzelne Maßnahmen gegenseitig beeinflussen, können bei gleichzeitiger Realisierung zum Teil nur geringere prozentuale Einsparungen erreicht werden.

Tabelle 4-11: Maßnahmen zur effizienten Energieanwendung bei der Masseaufbereitung

| Maßnahmen | spez. Einsparpotential der Einzelmaßnahme |
|---|---|
| Einsatz von Rührwerksmühlen (im Vergleich zu Trommelmühlen geringerer Energieverbrauch) | 15 % |
| Füllungsgrad von Trommelmühlen auf 50 % erhöhen | 10 % |
| Mahlen in Trommelmühlen bei 60 % der kritischen Drehzahl | 10 % |
| Optimales Massenverhältnis Mahlkugeln : Mahlgut : Flüssigkeit (1 : 1 : 1) | 10 % |
| Verkürzen der Mahlzeit durch Verwendung abriebfester Mahlkugeln | 5 % |
| Mahlkugeldurchmesser im Verhältnis zum Trommeldurchmesser nicht zu groß wählen | 5 % |

Quelle: [67]

Bei der Formgebung besteht - analog zur Masseaufbereitung - die Möglichkeit, den Energieverbrauch durch eine optimierte Anlagenauslastung, die Vermeidung von Leerlaufzeiten der Aggregate und den Einsatz wirkungsgradverbesserter Elektromotoren zu vermindern. Der Einsatz von plastifizierenden Additiven zur Anmachwasserreduzierung, wie sie bereits in Abschnitt 4.1.4 beschrieben wurden, führt aufgrund verbesserter Fließeigenschaften der Masse ebenfalls zu einer Verringerung der Stromaufnahme an den Pressaggregaten [20].

4.1.5.2 Reduzierung des Energieverbrauches bei der Trocknung

Die Prozessschritte Trocknen und Brennen stellen die wesentlichen Energiesenken bei der Herstellung von keramischen Produkten dar, so dass bei einer Analyse dieser Verfahrensstufen erhebliche Energieeinsparpotentiale identifiziert werden können. Dabei erlaubt insbesondere ein optimaler Wärmeverbund zwischen Ofen und Trockner eine Verringerung des Energieverbrauches (siehe 4.1.5.3). Zunächst sollten jedoch alle Möglichkeiten zur energetischen Optimierung der Einzelaggregate genutzt werden. Im Folgenden wird zunächst auf Möglichkeiten zur effizienten Energienutzung im Bereich des Trockners eingegangen.

Beim Trockner stellen die Beseitigung der Undichtigkeiten am Trockner, eine verbesserte Trocknerisolierung, eine verbesserte Trocknerluftführung und Trocknerregelung, die Wahl der geeigneten Wärmeversorgung des Trockners sowie eine Wärmerückgewinnung aus der Trocknerabluft Energieeinsparpotentiale dar [72].

Durch den Einsatz gesteuerter Lüfter in Kammertrocknern in Kombination mit einem optimierten Besatz können die Rohlinge optimal angeströmt und getrocknet werden. Die heute üblicherweise eingesetzten Drehlüfter arbeiten gewöhnlich mit konstanter Drehgeschwindigkeit wodurch die neben dem Lüfter liegenden Formlinge stärker belastet werden als die schräg liegenden Formlinge. Außerdem findet ein Teil der Konvektion im Lüftergang ohne nennenswerten Effekt statt. Eine elektronische Steuerung erlaubt eine Anpassung der Drehgeschwindigkeit an den jeweiligen Trockenschritt, erfordert jedoch entsprechende Investitionen und Wartungskosten. Durch den Einsatz eines mechanischen Getriebes kann ebenfalls die Anpassung der Drehgeschwindigkeit - langsam bei schräger Anblasung, schnell im Gang und bei den Formlingen dicht am Lüfter - bei geringem Aufwand wartungsfrei bewerkstelligt und auch bei bestehenden Drehlüftern problemlos nachgerüstet werden [61].

Die gleichmäßigere Trocknung wirkt sich in einer kürzeren Trocknungszeit und damit in kürzerer Laufzeit der Lüfter, also energetisch schließlich in einem geringeren spezifischen Elektroenergieverbrauch aus. Bei älteren Trocknern, in denen kein Lüftergang vorhanden ist und auch nicht ohne größere Baumaßnahmen geschaffen werden kann, können Dreh-Schwenklüfter eingesetzt werden. Diese kommen ohne Lüftergang aus und schaffen ähnliche Strömungsverhältnisse wie bei modernen Trocknern mit Drehlüftern [61].

Neben der verfahrenstechnischen Optimierung der Trockner kann durch die steuerungstechnische Konvektionsoptimierung Energie eingespart werden. So sollten Lüfter nicht von Beginn bis Ende der Trocknung laufen, da Versuche ergeben haben, dass sich bei gleichen Luftzustandswerten die Trockenzeit nur unwesentlich verlängert, wenn die Konvektionsleistungen im ersten und vierten Trockenabschnitt wesentlich abgesenkt werden [61].

Abbildung 4-24 zeigt exemplarisch die Ergebnisse dieser Untersuchung, in der die Lüfterleistung um bis zu 45 % abgesenkt wurde [61].

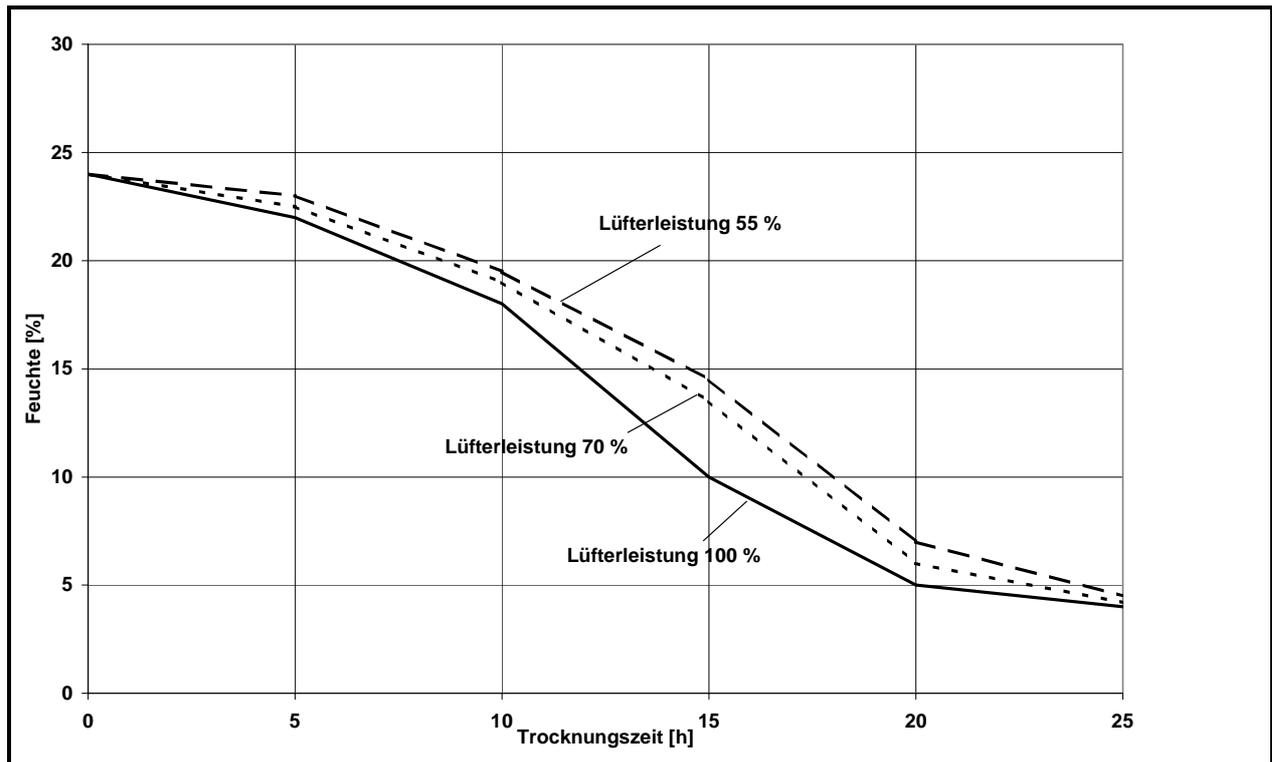


Abbildung 4-24: Einfluss der Lüfterlaufzeit auf die Trocknung

Quelle: [61]

Zum Betrieb der Kammertrockner stehen verschiedene Trockenverfahren zur Verfügung. Zur Auswahl der optimalen Trockenmethode müssen das Trockenprogramm und der Bedarf an Trockenluft mit der Versorgung von Ofenabluft in Einklang gebracht werden. Generell gilt, dass die Trockenluftmenge, die zum Abtransport der Feuchtigkeit aus dem Trockner benutzt wird, soweit wie möglich reduziert werden sollte. Eine Trocknung, die mit der geringstmöglichen Luftmenge und mit der höchstmöglichen Temperatur durchgeführt wird, bietet folgende Vorteile:

- Der Energieverbrauch ist gering.
- Die Trocknerabluft hat einen hohen Feuchtigkeitsgehalt und bietet Möglichkeiten zur Rückgewinnung eines hohen Prozentsatzes der Wärme in Form von fühlbarer und, in großen Mengen, latenter Wärme.
- Die Trocknerabluft hat eine hohe Temperatur bzw. Taupunkttemperatur, so dass die zurückgewonnene Wärme bei hoher Temperatur zur Verfügung steht.
- Die Massenströmung der Trocknerabluft ist niedrig, so dass ein kleiner (und kostengünstiger) Wärmetauscher zur Rückgewinnung der Wärme ausreicht.
- Die höhere Produkttemperatur während der Trocknung lässt eine hohe Trockengeschwindigkeit zu, so dass kürzere Trockenzeiten erreichbar sind, was wiederum zu Einsparungen beim Elektroenergieverbrauch führt.

In Tabelle 4-12 ist der Energiebedarf einzelner Teilprozesse für die verschiedenen Trockenverfahren der

- konventionellen Trocknung (CD) unter Anwendung von Trockenluft bei einer Temperatur von 100 °C,
 - Hochfeuchtigkeitstrocknung (HHD) unter Anwendung von Trockenluft mit einer Temperatur von 800 °C,
 - Halbdampftrocknung (s-SD), bei der die Rauchgase durch eine Umluftströmung in den Trockner eingespeist werden,
 - Dampftrocknung (SD), die die indirekte Aufheizung mittels Gasbrenner durch einen Wärmetauscher mit 100 % Wirkungsgrad nutzt,
- berechnet worden.

Tabelle 4-12: Energiebedarf für Teilverfahren verschiedener Trocknungsverfahren

| Energieverbrauch für verschiedene Teilprozesse bezogen auf verdunstetes Wasser^{*)} | CD [kJ/kg] | HHD [kJ/kg] | s-SD [kJ/kg] | SD [kJ/kg] |
|--|-----------------------------|-----------------------|------------------------|----------------------|
| Verdampfung von Wasser bei 20 °C | 2.453 | 2.453 | 2.453 | 2.453 |
| Aufheizung des entstehenden Dampfes | 63 | 122 | 158 | 182 |
| Aufheizung des trockenen Materials | 134 | 211 | 245 | 294 |
| Aufheizung des Restwassers | 33 | 53 | 61 | 73 |
| Aufheizung der Trockenluft | 2.572 | 299 | 126 | 0 |
| Aufheizung des ursprünglichen Dampfes in der Trocknungsluft | 28 | 3 | 1 | 0 |
| Zwischensumme bei 100 % Wirkungsgrad des Wärmetauschers | 5.283 | 3.141 | 3.044 | 3.002 |
| Verluste aufgrund von 90 % Wirkungsgrad des Wärmetauschers | | | | 334 |
| Gesamte Energieanforderung | 5.283^{**)} | 3.141 | 3.044 | 3.336 |

^{*)} Referenz: Luft 10 °C und 6 g_w/kg_{da}, Anfangstemperatur des Produktes 20 °C bei 0,3 kg_w/kg_{tm}

^{**)} Konventionell betriebene Trockner der neuesten Bauart haben einen Energiebedarf von 3.500 kJ/kg

Quelle:[24]

Die in Tabelle 4-12 dargestellten Ergebnisse zeigen, dass die Halbdampftrocknung (s-SD) das Verfahren darstellt, das die niedrigste Menge Energie zur Verdampfung von einem Kilogramm Wasser benötigt. Für die Hochfeuchtigkeitstrocknung (HHD) und die reine Dampftrocknung (SD) bleiben die Werte des spezifischen Energieverbrauchs im Vergleich zur konventionellen Trocknung (CD) ebenfalls relativ niedrig. Ein weiterer Vorteil der Trockenverfahren HHD, s-SD und SD besteht in der hochwertigen Restströmung, die sie mit sich bringen. Diese Restströmung hat einen hohen absoluten Feuchtigkeitsgehalt, eine hohe Temperatur und eine verhältnismäßig niedrige Massenströmung. Durch die Anwendung eines Wärmetauschers ermöglicht dies die Rückgewinnung eines hohen Prozentsatzes latenter Wärme durch die Kondensation von Feuchtigkeit, zusätzlich zu einer großen Menge fühlbarer Wärme.

In welchem Maße die s-SD in der Industrie angewendet werden sollte, hängt von der Versorgung mit Ofenabluft ab. Ist die Versorgung gering, kann ein Teil der Produktion mit der verfügbaren Ofenluft getrocknet werden, während der Rest mittels Halbdampftrocknung (s-SD) getrocknet wird. Eine weitere Option bei geringer Ofenluftversorgung besteht darin, die Ofenluft unter den Trockenkammern zu verteilen und zu versuchen in jeder Kammer den Prozess der Hochfeuchtigkeitstrocknung (HHD) zu erreichen [24].

Eine energieeffiziente Möglichkeit, die zusätzlich benötigte Wärme in Abhängigkeit vom Energieangebot der Ofenabluft der Trockenkammer zuzuführen, besteht in einer zuschaltbaren Innenheizung. Die Wärme wird dabei ohne zusätzlichen Umwälzkreislauf in den inneren Umwälzstrom des Trockners eingespeist. Dabei wird von dem ohnehin vorhandenen Umwälzsystem saugseitig ein Teilstrom abgezweigt, dem dann direkt die Heizgase der Brenner zugemischt werden [61].

Der Einsatz einer kombinierten Strom- und Wärmeerzeugung durch Kraft-Wärme-Kopplung oder durch den Einsatz von Blockheizkraftwerken (BHKW) bietet sich in der Keramischen Industrie aufgrund des Bedarfes an Strom und Wärme ebenfalls an. Insbesondere in der Fliesen- und Geschirrinindustrie kann beim Einsatz von Sprühtrocknern die erzeugte Wärme gut verwendet werden. Der wirtschaftliche Einsatz dieser Anlagen hängt dabei stark von den vorhandenen Rahmenbedingungen ab. Das Herzstück einer BHKW-Anlage ist der Antriebsmotor. Neben der Möglichkeit des Einsatzes von Gas-Otto-Motoren und Dieselmotoren als Antriebsmaschinen eignen sich auch Gasturbinen mit Abwärmenutzung.

In Abbildung 4-25 ist die Nutzung der BHKW-Abwärme zur Heißluftherzeugung am Trockner einer Ziegelei dargestellt. Zusätzlich zur Ofenabluft ist ein Teil Frischluft für den Trockner notwendig. Dieser wird im Regelfall aus der Trocknerhalle angesaugt, um die hohen Strahlungswärmeanteile von Ofen und Trockner mit einbeziehen zu können. Vor dem Trockenzuluftventilator wird diese Frischluft mit der Abwärme aus dem Ofen vermischt. Nun besteht die Möglichkeit in den Ansaugkanal für die Frischluft einen Luftherhitzer einzubauen, um eine Vorwärmung der Frischluft zu erhalten. Dieser Wärmetauscher wird mit den Motorkühlwasserkreisläufen der Antriebsmotoren beaufschlagt. Die Abgase mit Temperaturen zwischen 450 °C und 550 °C (abhängig vom eingesetzten Motorentyp) werden in die Mischkammer zugeführt und im Trockner direkt genutzt. Das noch bestehende Wärmedefizit wird - wie üblich - über nachgeschaltete Gasgebläsebrenner gedeckt. Besteht am Trockner kein Wärmebedarf, werden die ungekühlten Abgase direkt über eine Kaminanlage abgeleitet. Eine kostengünstige Alternative zur beschriebenen Abwärmenutzung stellt die direkte Einleitung der Wärme in den Trockner dar [96].

Durch die Optimierung des Übergangs der getrockneten, heißen Formlinge vom Trockner in den Ofen kann der Energieverbrauch zusätzlich vermindert werden. Die Ausfahrverluste, die durch Transportmittel, Beisatz und Besatz verursacht werden, sollten möglichst gering gehalten werden. Dieses kann durch möglichst kurze Wege zwischen Trockner und Ofen, durch die Zwischenschaltung eines Warmhalteraumes oder durch die Anwendung des Direktsetzverfahrens erreicht werden [63].

Beim Direktsetzverfahren werden die Formlinge nach Durchlaufen eines Tunnelrockners unmittelbar in den Tunnelofen gefahren. Die auf 100 °C erwärmten Formlinge gelangen somit ohne Abkühlphase und Energieverlust sofort in den Tunnelofen. Der im herkömmlichen Verfahren erforderliche Energieaufwand zur Vorwärmung der getrockneten Rohlinge entfällt, womit sich der spezifische Energieverbrauch gegenüber der konventionellen Methode um bis zu 30 % verringern lässt. Grund hierfür ist neben der Energieeinsparung durch das Direktsetzverfahren auch der kontinuierliche Parallelbetrieb von Tunnelofen und Tunnelrockner, der eine Nutzung der Ofenabluft zu 100 % erlaubt. Beispielsweise muss in einem herkömmlichen Ziegelwerk mit Kammertrocknung die permanent anfallende Ofenabluft über das Wochenende in der Regel ungenutzt in die Atmosphäre abgeleitet werden. In Abbildung 4-26 ist der Trend der Temperaturverläufe beim herkömmlichen Verfahren und beim Direktsetzverfahren eines Betriebes exemplarisch dargestellt [101].

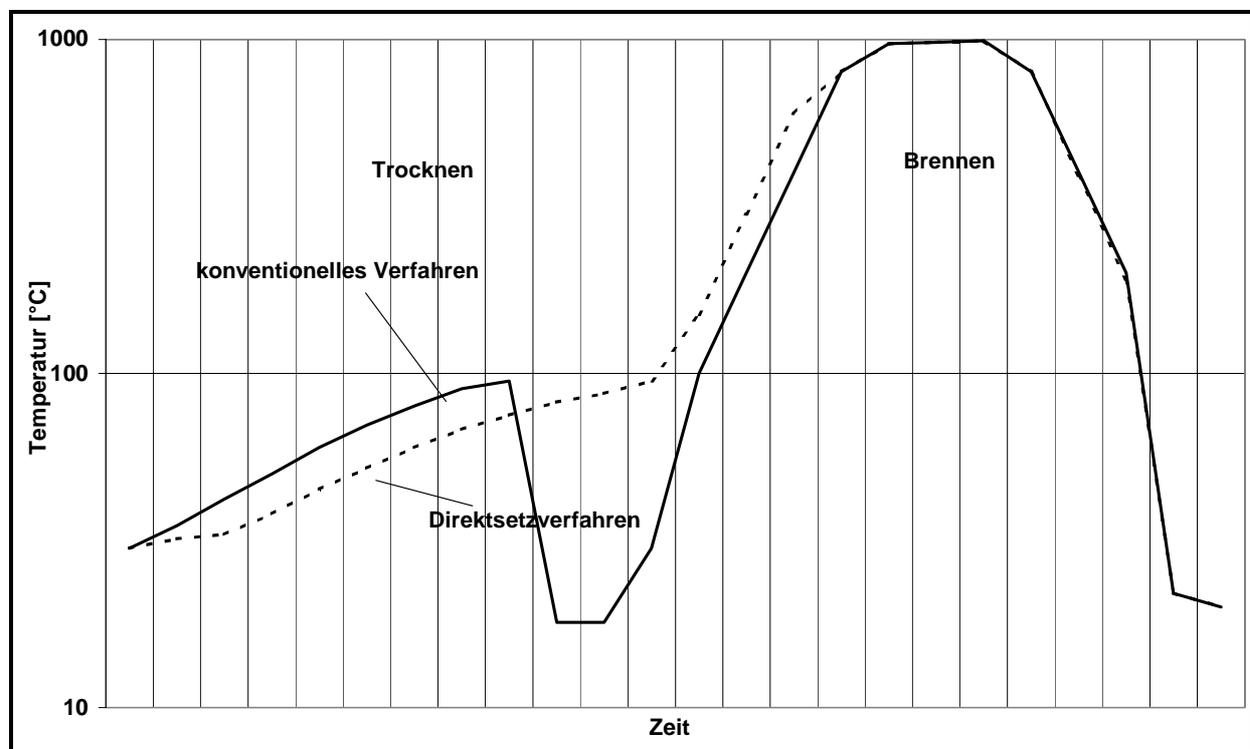


Abbildung 4-26: Trend der Temperaturverläufe beim herkömmlichen Verfahren und beim Direktsetzverfahren

4.1.5.3 Reduzierung des Energieverbrauches beim Brennen

Die größten Energieverbraucher in keramischen Betrieben sind die Öfen. Viele Maßnahmen zur Energieeinsparung, die im Zusammenhang mit dem Trockner sinnvoll sind, erlauben auch bei den Öfen die Senkung des Energieverbrauches. Bei den Öfen stellen die Beseitigung von Undichtigkeiten, eine verbesserte Ofenisolierung, der Einsatz leichterer Ofenwagen, der Einsatz von Sinterhilfsmitteln und energiehaltigen Ausbrennstoffen, luft- und brenntechnische Maßnahmen sowie die Wärmerückgewinnung aus Rauchgasen und der Kühlluft Energieeinsparpotentiale dar. Zur Erzielung eines niedrigen spezifischen Energieverbrauches sind die Öfen bei möglichst hohen Kapazitätsauslastungen zu betreiben.

Die Verminderung der Wärmeabstrahlung des Ofen sollte durch eine geeignete Isolierung, beispielsweise durch den Einsatz einer Faserverkleidung oder mit Feuerleichtsteinen, erreicht werden, da andere Maßnahmen (z.B. Mantelkühlung) nicht zu einer Energieeinsparung führen. Falschlufteinbrüche sind durch die Beseitigung von Undichtigkeiten und durch eine möglichst effiziente Abdichtung von Ofenwagen und Ofeninnenraum zu vermeiden. Neben der bewährten Sanddichtung stehen konstruktiv verbesserte mechanische Lösungen, wie z.B. Labyrinthdichtungen oder Wasserdichtungen, zur Verfügung.

Die Ausfahrverluste von Tunnelöfen können durch den Einsatz von leichteren Tunnelofenwagen erheblich reduziert werden. Im Rahmen einer Untersuchung wurde die Energieaufnahme zweier Tunnelofenwagen untersucht. Dabei wurde ein konventioneller Tunnelofenwagen mit einem relativ schweren Wagenaufbau (Gewicht ca. 11,5 t) mit einem modernen, bedingt durch die niedrigen Rohdichten der verwendeten Materialien, leichten Wagenaufbau (Gewicht ca. 8 t) verglichen. Abbildung 4-27 zeigt die unterschiedliche Energieaufnahme der Tunnelofenwagen im Verlauf des Brennprozesses. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Energieaufnahme des schweren Tunnelofenwagens erheblich höher ist als die des leichteren Tunnelofenwagens. Die Energieaufnahme des leichten Aufbaus liegt um ca. 50 % unterhalb des Vergleichswertes des schweren Aufbaus. Die Ausfahrverluste des Wagenplateaus liegen beim leichten Aufbau bei 576 kWh/TOW und beim schweren Aufbau bei 1086 kWh/TOW. Die Untersuchungen zeigen die energetischen Vorteile des leichten Ofenwagens. Einerseits beeinflusst der leichte Tunnelofenwagen durch sein geringeres Speichervermögen weniger den Brennprozess, da er bis zum Ende der Brennzone nur etwa 50 % der Energie aufnimmt, die der schwere Ofenwagen aufnimmt. Diese Energie kommt der Aufheizung zugute, so dass eine gleichmäßigere Besatzaufheizung stattfinden kann. Andererseits können durch die geringere eingespeicherte Wärme die Ausfahrverluste von Tunnelofenwagen nahezu halbiert werden [101].

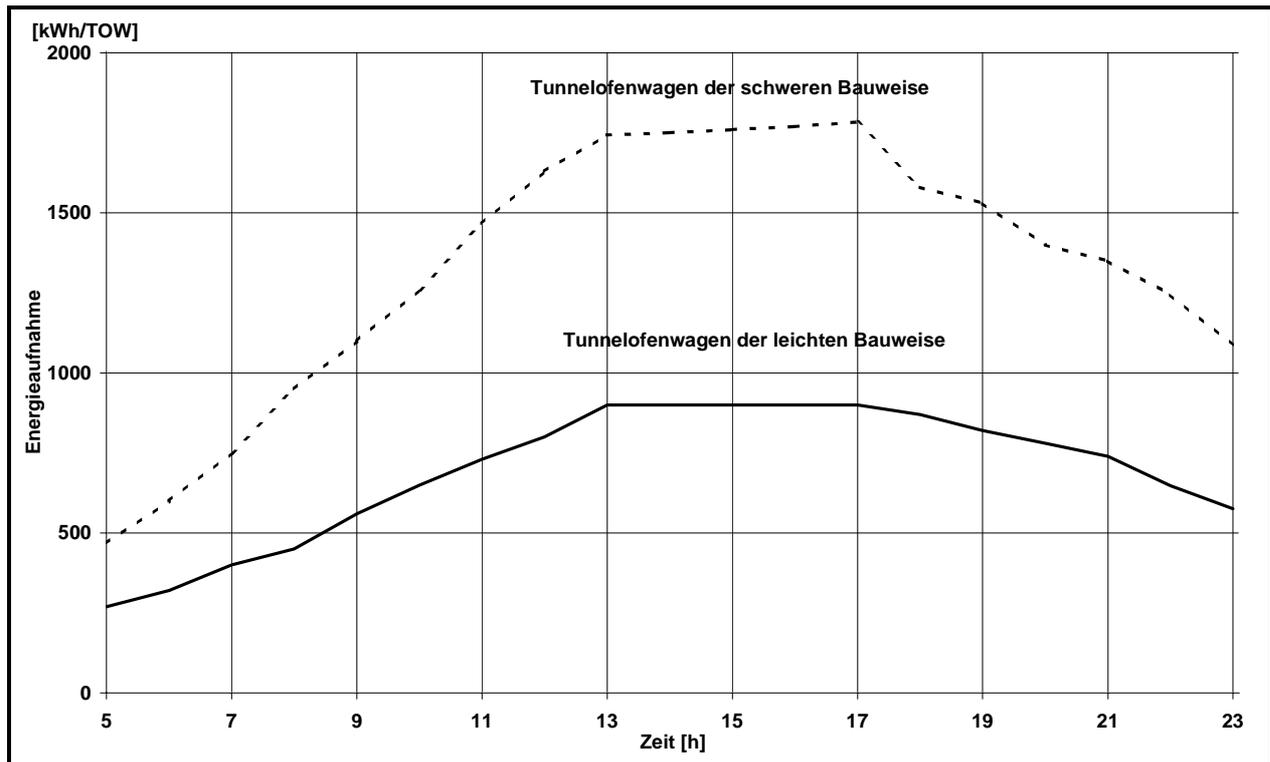


Abbildung 4-27: Energieaufnahme der Tunnelofenwagen

Quelle: [101]

Die Reduzierung der Speicherwärme und der Transmissionsenergie der Tunnelofenwagen wird durch Gewichtsreduzierung und Isolierung erreicht. In modernen Tunnelofenwagen werden bis zu 15 verschiedene Materialarten eingesetzt, um die jeweiligen spezifischen Anforderungen erfüllen zu können. Dabei werden neben verschiedenen speziellen temperaturwechselbeständigen keramischen Materialien, Feuerbetone und Feuermörtel, aber auch diverse Fasermaterialien und Hochleistungskeramiken auf Mullit- und SiC-Basis eingesetzt. Für die richtige Auswahl und damit Lebensdauer des Tunnelofenwagen-Systems ist es wichtig, dass die relevanten Betriebsparameter des Werkes, wie z.B. Brenntemperatur, Durchlaufzeit, Ofenatmosphäre und andere Betriebsbedingungen, bekannt sind, da nur dann die geeigneten Werkstoffe für den Wagenrand, den Wagenkern sowie den Stützaufbau für den Besatz bzw. die Brennhilfsmittel ausgewählt werden können [44].

Verfahren, die das Brennen mit reduziertem Brennhilfsmiteleininsatz oder sogar völlig brennhilfsmittelfrei ermöglichen, tragen aufgrund geringerer Speicherwärme und Transmissionsenergie ebenfalls zur Energieeinsparung bei. Im Bereich der Feinkeramik haben sich dabei Ofensysteme (Rollenöfen, Förderbandöfen, Tunnelöfen mit Brenntischförderung etc.) durchgesetzt, die einen (nahezu) brennhilfsmittelfreien Brand erlauben [79]. Auch in der Grobkeramik geht die Entwicklung immer mehr zum Brand mit reduziertem Brennhilfsmiteleininsatz. Im Bereich der flachen Dachziegel ist durch das Strangziehen einer Doppelplatte (Spaltplattensystem) bereits der brennhilfsmittelfreie Brand möglich.

Im Bereich der Pfannendachziegel geht die Entwicklung derzeit vom Paketsetzen mit Stahldraht-Umreifung über U- und H-Kapseln, den Rollenofen mit Kapseln im Einlagesystem zum Monkerofen, der Gestelle aus SiC/Superlegierungen durch Rollenstummel antreibt [84].

Eine weitere Möglichkeit Einfluss auf den Energieverbrauch zu nehmen, besteht in der Auswahl der eingesetzten Rohstoffe. So können insbesondere im Bereich der Ziegelherstellung durch den Einsatz von Sinterhilfsmitteln und energiereichen Ausbrennstoffen erhebliche Einsparungen erreicht werden. Wie bereits in Abschnitt 4.1.4 beschrieben, erlaubt die Hintermauerziegelherstellung den Einsatz energiereicher Sekundärrohstoffe, wie beispielsweise Sägemehl, Polystyrol (Styropor) oder Papierfangstoffe. Durch den Einsatz dieser porenbildenden Ausbrennstoffe können bei der Hintermauerziegelherstellung bis zu 25 % der Gesamtenergie als Sekundärenergie zugeführt werden [123]. Die Zugabe extrem wirksamer Sinterhilfsmittel wie erdalkali- und alkalireicher Zusätze sowie von Glasbildnern erlaubt eine deutliche Herabsetzung der Brenntemperatur und eine Verkürzung der Haltezeit. Im Rahmen von Untersuchungen wurden bei verschiedenen Ziegeln Garbrandtemperaturabsenkungen von bis zu 50 K erreicht, wobei dem Einsatz immer praxisorientierte Voruntersuchungen vorausgehen müssen, um Betriebsstörungen und Qualitätseinbußen ausschließen zu können [90].

Durch luft- und brenntechnische Maßnahmen können die Öfen ebenfalls energieeffizienter betrieben werden. Bei Einsatz moderner Brenntechnik kommt es zu einer Verbesserung des konvektiven Wärmeübergangs in der Anlage sowie zu einer Reduzierung der Strahlungsverluste und somit zu einer Energieeinsparung. Diese Energieeinsparung kann durch kürzere Brennzzyklen bzw. durch eine reduzierte Leistung des Brenners realisiert werden. Der Ersatz von alten Gaslanzen durch moderne selbstzündende Hochgeschwindigkeitsbrenner ermöglicht schon im Temperaturbereich unter 700 °C eine intensive Durchmischung der Brenngase und damit eine Vergleichmäßigung der Ofenatmosphäre. Hohe Strömungsgeschwindigkeiten von bis zu 200 m/s am Brennermund bewirken diese hohe Konvektion und damit auch im unteren Bereich des Ofens eine gute Temperaturverteilung. Die Flamme moderner Brenner liegt nicht am Schürloch an (siehe Abbildung 4-28), so dass damit eine geringere thermische Belastung der Ofendecke erreicht wird. Hochgeschwindigkeitsbrenner können als Decken- und Seitenbefeuerung eingesetzt werden, wobei eine Umrüstung auch bei bestehenden Anlagen schnell und kostengünstig durchzuführen ist [62].

Die Abgasverluste eines Ofens können bis zur Hälfte des gesamten Netto-Wärmebedarfs des Ofens ausmachen [63]. Eine effektive Abwärmennutzung durch Wärmerückgewinnung aus Rauchgasen und Kühlluft ist derzeit jedoch in erster Linie bei kontinuierlichen Brennanlagen wirtschaftlich möglich. Die Abwärme kann direkt oder indirekt über Wärmeübertrager zur Trocknung, Mahltrocknung oder Verbrennungsluftvorwärmung bzw. zu sonstigen Heizzwecken inner- und außerbetrieblich verwendet werden. Ebenso ist eine Nutzung der Abwärme zur Dampferzeugung in Abhitzekesteln möglich.

Die Energieeinsparpotentiale dieser Maßnahmen hängen dabei stark von den vorhandenen Trocken- und Brennaggregaten ab. In Kapitel 4.2.1 ist in Abbildung 4-34 exemplarisch ein Wärmeverbundsystem zwischen einem Tunnelofen und einem Kassetttrockner einer Ziegelei dargestellt. Wie das Beispiel zeigt, sind die größten Energieeinsparpotentiale zu erreichen, wenn bereits bei der Planung der Anlage eine optimale Abstimmung des Wärmeangebotes mit dem Wärmebedarf des Systems stattfindet. Daraus resultiert, dass bei modernen Anlagen die Möglichkeiten zur Senkung des spezifischen Energieverbrauchs meist schon in hohem Maße ausgeschöpft sind.

4.1.6 Übersicht über verfügbare Techniken zur Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung in der Keramischen Industrie

Tabelle 4-13, Tabelle 4-14, Tabelle 4-15 und Tabelle 4-16 fassen die in Kapitel 4.1 beschriebenen verfügbaren Maßnahmen und Techniken zur Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung abschließend zusammen. Dabei werden neben qualitativen Aussagen über die Auswirkungen der Maßnahmen und Techniken auf Luft, Wasser und Boden, den Verbrauch von Energie und Rohstoffen sowie die Lärmbelastung auch die Einsatzmöglichkeit in der verschiedenen Produktionsbereichen der Keramischen Industrie betrachtet. Ein Pfeil nach unten (↓) symbolisiert eine Verringerung der Auswirkungen auf das jeweilige Medium Luft (**L**), Wasser (**W**) oder Boden (**B**) sowie eine Verringerung des Verbrauches von Energie (**E**) und Rohstoffen (**R**) oder des Lärms. Ein Pfeil nach oben (↑) symbolisiert eine Erhöhung der Auswirkungen auf das jeweilige Medium sowie des Verbrauches an Energie und Rohstoffen oder eine Lärmerhöhung. Das Symbol (⊗) zeigt an, dass die jeweilige Maßnahme oder Technik in einem der Industriezweige Geschirrkераmik (**GK**), Sanitärkeramik (**SK**), Fliesenherstellung (**FL**), Ziegelherstellung (**ZI**), Herstellung von Steinzeug für die Kanalisation (**SZ**) oder Herstellung feuerfester Erzeugnisse (**FF**) prinzipiell einsetzbar ist. Die Tabellen geben nur einen Überblick über die verfügbaren Techniken. Dem Einsatz der Technik in einer Anlage in der Keramischen Industrie muss jeweils eine Einzelfallprüfung vorangehen.

Tabelle 4-13: Verfügbare Techniken zur Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung in der Keramischen Industrie (Teil 1)

| | Auswirkungen der Emissionen in | | | Verbrauch von | | Lärm | Industriezweig | | | | | |
|---|--------------------------------|---|---|---------------|---|------|----------------|----|----|----|----|----|
| | B | W | L | E | R | | GK | SK | FL | ZI | SZ | FF |
| Techniken zur Minderung partikelförmiger Emissionen (Kapitel 4.1.1.1) | | | | | | | | | | | | |
| <i>Primärmaßnahmen</i> | | | | | | | | | | | | |
| Abdichtung von Übergabeeinrichtungen | | | ↓ | | | ↓ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ |
| Einplanung von Luftverdrängungsräumen | | | ↓ | | | | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ |
| Vermeidung hoher Fallhöhen | | | ↓ | | | ↓ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ |
| Kapselung der Anlagen | | | ↓ | | | ↓ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ |
| Pneumatische Förderung (Umluftverfahren) | | | ↓ | ↑ | | ↑ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ |
| Abdeckung der Förderbänder | | | ↓ | | | ↓ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ |
| <i>Sekundärmaßnahmen</i> | | | | | | | | | | | | |
| Filternde Abscheider | | | ↓ | ↑ | | | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ |
| Fliehkraftabscheider | | | ↓ | ↑ | | | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ |
| Nassabscheider | | ↑ | ↓ | ↑ | ↑ | | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | |
| Elektrische Abscheider | | | ↓ | ↑ | | | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | |
| Techniken zur Minderung gasförmiger anorganischer Emissionen (Kapitel 4.1.1.2) | | | | | | | | | | | | |
| <i>Primärmaßnahmen</i> | | | | | | | | | | | | |
| Einsatz fluorarmer Rohstoffe | | | ↓ | | | | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ |
| Optimierung der Brennführung | | | ↓ | | | | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ |
| Zusatz von kalkhaltigen Materialien | | | ↓ | ↑ | | | | | | ⊗ | ⊗ | |
| Zusatz von Calciumcarbonat | | | ↓ | ↑ | | | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | |
| Einsatz frühsinternder Engoben | | | ↓ | | | | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | |
| Einsatz schwefelarmer Rohstoffe | | | ↓ | | | | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ |
| Einsatz schwefelarmer Brennstoffe | | | ↓ | | | | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ |
| Low NOx-Brenner | | | ↓ | | | | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ |
| <i>Sekundärmaßnahmen</i> | | | | | | | | | | | | |
| Schütttschichtfilter mit CaCO ₃ | ↑ | | ↓ | ↑ | ↑ | | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ |
| Modul-Absorber-Anlagen | ↑ | | ↓ | ↑ | ↑ | | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ |
| Flugstaubreaktor mit Gewebefilter | ↑ | | ↓ | ↑ | ↑ | | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ |
| Rotations-Dichtstromreaktoren | ↑ | | ↓ | ↑ | ↑ | | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ |
| Wirbelschicht-Reaktoren | | ↑ | ↓ | ↑ | ↑ | | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ |
| Füllkörperwäscher | ↑ | ↑ | ↓ | ↑ | ↑ | | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ |

B = Boden (Abfallanfall zur Verwertung oder Beseitigung); W = Wasser; L = Luft; E = Energie; R = Rohstoff; GK = Geschirrkemik; SK = Sanitärkeramik; FL = Fliesen; ZI = Ziegel; SZ = Steinzeug; FF = Feuerfest

Tabelle 4-14: Verfügbare Techniken zur Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung in der Keramischen Industrie (Teil 2)

| | Auswirkungen der Emissionen in | | | Verbrauch von | | Lärm | Industriezweig | | | | | |
|---|--------------------------------|---|---|---------------|---|------|----------------|----|----|----|----|----|
| | B | W | L | E | R | | GK | SK | FL | ZI | SZ | FF |
| Techniken zur Minderung gasförmiger organischer Emissionen (Kapitel 4.1.1.3) | | | | | | | | | | | | |
| <i>Primärmaßnahmen</i> | | | | | | | | | | | | |
| Einsatz anorganischer Zuschlagstoffe | | | ↓ | | | | | | | ⊗ | | |
| Einsatz phenol- und formaldehydarmer Harze | | | ↓ | | | | | | | | | ⊗ |
| Ofeninterne Schwelgasnachverbrennung | | | ↓ | ↑ | | | | | | ⊗ | | |
| Gegenlaufofen | | | ↓ | | | | | | | ⊗ | | |
| Einsatz von Hochgeschwindigkeitsbrennern | | | ↓ | ↑ | | | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ |
| <i>Sekundärmaßnahmen</i> | | | | | | | | | | | | |
| Ofenexterne thermische Nachverbrennung | | | ↓ | ↑ | ↑ | | | | | | | ⊗ |
| Ofenexterne thermische Nachverbrennung mit regenerativem Wärmetauscher | | | ↓ | | ↑ | | | | | ⊗ | | ⊗ |
| Katalytische Nachverbrennung | | | ↓ | | | | | | | | | ⊗ |
| Aktivkohlefilter | ↑ | | ↓ | ↑ | ↑ | | | | | | | ⊗ |
| Techniken zur Minderung von Lärmemissionen (Kapitel 4.1.1.4) | | | | | | | | | | | | |
| Isolierung der Schallquelle | | | | | | ↓ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ |
| Schwingungsisolierte Maschinenaufstellung | | | | | | ↓ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ |
| Nachschtaltung von Schalldämpfern | | | | | | ↓ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ |
| Schallisolierung der Fenster | | | | | | ↓ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ |
| Verlegung der Fensterflächen | | | | | | ↓ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ |
| Regelmäßige Maschinenwartung | | | | | | ↓ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ |
| Ausführung lärmintensiver Arbeiten tagsüber | | | | | | ↓ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ |
| Techniken zur Minderung der Emissionen in das Medium Wasser (Kapitel 4.1.2) | | | | | | | | | | | | |
| <i>Primärmaßnahmen (Kapitel 4.1.2.1)</i> | | | | | | | | | | | | |
| Trennkanalisation | | ↓ | | | | | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ |
| Ersatz von Nass- durch Trockenverfahren | | ↓ | | | ↓ | | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ |
| Getrennte Sammlung von Sonderabwässern | | ↓ | | | | | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ |
| Kreislaufführung des aufbereiteten Abwassers | | ↓ | | | ↓ | | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ |
| <i>Sekundärmaßnahmen (Kapitel 4.1.2.2)</i> | | | | | | | | | | | | |
| Klärteiche und Klärbecken | ↑ | ↓ | | | | | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ |
| Schräglklärer | ↑ | ↓ | | | | | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ |
| Kläreindicker | ↑ | ↓ | | | | | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ |
| Entwässerungscontainer | ↑ | ↓ | | | | | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ |
| Flockungs- und Flockungshilfsmitteln | ↑ | ↓ | | | ↑ | | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ |
| Kiesfilter | ↑ | ↓ | | | | | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ |
| Tiefenfilter | ↑ | ↓ | | | | | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ |
| Umkehrosmoseanlage | ↑ | ↓ | | | | | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ |
| Mikrofiltration | ↑ | ↓ | | | | | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ |

B = Boden (Abfallanfall zur Verwertung oder Beseitigung); W = Wasser; L = Luft; E = Energie; R = Rohstoff ; GK = Geschirrk Keramik; SK = Sanitärkeramik; FL = Fliesen; ZI = Ziegel; SZ = Steinzeug; FF = Feuerfest

Tabelle 4-15: Verfügbare Techniken zur Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung in der Keramischen Industrie (Teil 3)

| | Auswirkungen der Emissionen in | | | Verbrauch von | | Lärm | Industriezweig | | | | | |
|--|--------------------------------|---|---|---------------|---|------|----------------|----|----|----|----|----|
| | B | W | L | E | R | | GK | SK | FL | ZI | SZ | FF |
| Techniken zur Minderung der Emissionen in das Medium Boden (Kapitel 4.1.3) | | | | | | | | | | | | |
| <i>Vermeidung und Verminderung von Abfällen (Kapitel 4.1.3.1)</i> | | | | | | | | | | | | |
| Direkte Rückführung der Filterstäube | ↓ | | | | ↓ | | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ |
| Ersatz von Gipsformen durch Kunststoffformen | ↓ | | | ↓ | ↓ | | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | | ⊗ |
| Einsatz des isostatischen Pressverfahrens | ↓ | | | | ↓ | | | | ⊗ | | | ⊗ |
| Einsatz geschlossener Metallformen | ↓ | | | | ↓ | | ⊗ | | ⊗ | ⊗ | | ⊗ |
| Einsatz von Vakuulgipsmischern | ↓ | | | ↑ | ↓ | | ⊗ | ⊗ | | ⊗ | | ⊗ |
| Exakte Steuerung des Brennregimes | ↓ | | | ↓ | ↓ | | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ |
| Rollenofensystem | ↓ | | | | ↓ | | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | |
| Optimierung des Wagenbesatzes | ↓ | | | ↓ | ↓ | | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ |
| <i>Verwertung von Abfällen (Kapitel 4.1.3.2)</i> | | | | | | | | | | | | |
| Sortenreine Sammlung von Abfällen und sofortiger Wiedereinsatz im Prozess | ↓ | | | | ↓ | | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ |
| Getrennte Sammlung von Gewerbemüll | ↓ | | | | ↓ | | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ |
| Einsatz einer Schältrömmel zur Sorptionsmittelwiederaufarbeitung | ↓ | | | ↑ | ↓ | | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ |
| Einsatz einer Klärschlammwiederverwendungsanlage | ↓ | | | ↑ | ↓ | | ⊗ | ⊗ | ⊗ | | ⊗ | ⊗ |
| Techniken zur Reduzierung des Rohstoffverbrauches (Kapitel 4.1.4) | | | | | | | | | | | | |
| Einsatz von Sekundärrohstoffen | ↓ | | | | ↓ | | | | | ⊗ | ⊗ | ⊗ |
| Einsatz von Niederschlagswasser | | ↓ | | | ↓ | | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ |
| Zusatz von Additiven zur Wassereinsparung | | ↓ | ↓ | ↓ | ↓ | | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ |
| Einsatz einer Styroporaufbereitungsanlage | | | | | ↓ | | | | | ⊗ | | |
| Techniken zur Reduzierung des Energieverbrauches (Kapitel 4.1.5) | | | | | | | | | | | | |
| <i>Organisatorische Maßnahmen (Kapitel 4.1.5)</i> | | | | | | | | | | | | |
| Einsatz von Energieerfassungs- und Energiemanagementsysteme | | | | ↓ | ↓ | | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ |
| Einsatz computergestützter Prozessregelungen | | | | ↓ | ↓ | | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ |
| Einführung flexiblerer Arbeitszeiten | | | | ↓ | | | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ |
| Einsetzung eines Energiebeauftragten | | | | ↓ | | | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ |
| Hohe Anlagenauslastung | | | | ↓ | | | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ |
| <i>Reduzierung des Energieverbrauches bei Masseaufbereitung und Formgebung (Kapitel 4.1.5.1)</i> | | | | | | | | | | | | |
| Einsatz wirkungsgradverbesserter E-Motoren | | | | ↓ | | | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ |
| Einsatz alternativer Granulierungsverfahren | | | | ↓ | | | ⊗ | ⊗ | ⊗ | | ⊗ | ⊗ |
| Optimierung des Mahlvorganges | | | | ↓ | | | ⊗ | ⊗ | ⊗ | | ⊗ | ⊗ |
| Einsatz plastifizierender Additive | | | | ↓ | ↑ | | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ |

B = Boden (Abfallanfall zur Verwertung oder Beseitigung); W = Wasser; L = Luft; E = Energie; R = Rohstoff; GK = Geschirrk Keramik; SK = Sanitärkeramik; FL = Fliesen; ZI = Ziegel; SZ = Steinzeug; FF = Feuerfest

Tabelle 4-16: Verfügbare Techniken zur Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung in der Keramischen Industrie (Teil 4)

| | Auswirkungen der Emissionen in | | | Verbrauch von | | Lärm | Industriezweig | | | | | |
|--|--------------------------------|---|---|---------------|---|------|----------------|----|----|----|----|----|
| | B | W | L | E | R | | GK | SK | FL | ZI | SZ | FF |
| <i>Reduzierung des Energieverbrauches bei der Trocknung (Kapitel 4.1.5.2)</i> | | | | | | | | | | | | |
| Beseitigung der Undichtigkeiten am Trockner | | | | ↓ | | | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ |
| Verbesserte Trocknerisolierung | | | | ↓ | | | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ |
| Einsatz prozessgesteuerter Lüfter | | | | ↓ | | | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ |
| Einsatz drehzahlgesteuerter Ventilatoren | | | | ↓ | | | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ |
| Verbesserung der Trocknerluftführung | | | | ↓ | | | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ |
| Wahl der optimalen Wärmeversorgung durch einen Wärmeverbund mit dem Ofen | | | | ↓ | | | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ |
| Wärmerückgewinnung aus der Trocknerabluft | | | | ↓ | | | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ |
| Einsatz von BHKW zur Heißlufterzeugung | | | ↑ | ↓ | ↑ | | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | |
| Einsatz wassereinsparender Additive | | ↓ | | ↓ | ↓ | | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ |
| Verringerung des Anmachwassergehaltes | | | | ↓ | ↓ | | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | |
| <i>Reduzierung des Energieverbrauches beim Brennen (Kapitel 4.1.5.3)</i> | | | | | | | | | | | | |
| Einsatz des Direktsetzverfahrens | | | | ↓ | | | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ |
| Zwischenschaltung von Warmhalteräumen und kurze Wege zwischen Ofen und Trockner | | | | ↓ | | | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ |
| Beseitigung der Undichtigkeiten am Ofen | | | | ↓ | | | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ |
| Verbesserte Ofenisolierung | | | | ↓ | | | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ |
| Einsatz leichterer Tunnelofenwagen | | | | ↓ | | | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ |
| Absenkung der notwendigen Brenntemperatur durch den Einsatz von Sinterhilfsmitteln | | | | ↓ | | | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | |
| Einsatz energiehaltiger Porosierungsmittel | | | | ↓ | | | | | | ⊗ | | |
| Einsatz moderner HG-Brenner | | | | ↓ | | | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ |
| Einsatz selbstrekuperativer Brenner | | | | ↓ | | | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ |
| Wärmerückgewinnung aus Rauchgasen | | | | ↓ | | | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ |
| Wärmerückgewinnung aus der Kühlluft | | | | ↓ | | | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ |

B = Boden (Abfallanfall zur Verwertung oder Beseitigung); W = Wasser; L = Luft; E = Energie; R = Rohstoff; GK = Geschirrkemik; SK = Sanitärkeramik; FL = Fliesen; ZI = Ziegel; SZ = Steinzeug; FF = Feuerfest

4.2 Fallstudien ausgewählter Maßnahmen zur Vermeidung und Verminderung von Umweltverschmutzung

In den folgenden Abschnitten werden Fallstudien ausgewählter Maßnahmen zur Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung aus den Bereichen der Planziegelherstellung, der Herstellung von Schornsteinrohren, von Dachziegeln und der von Schamottesteinen dargestellt.

4.2.1 Herstellung von Planziegeln bei den JUWÖ POROTON-Werken Ernst Jungk & Sohn GmbH in Wöllstein

Am Standort Wöllstein werden in drei Werken monatlich ca. 15 Mio. Planziegel, POROTON- und Hochlochziegel produziert, wozu rund 30.000 Tonnen Ton pro Monat verarbeitet werden. Das Unternehmen zählt damit zu den bedeutendsten grobkeramischen Betrieben in Deutschland [80].

Im Sommer 1997 wurde das Werk III in Betrieb genommen, in dem vorwiegend Planziegel mit besonders niedriger Wärmeleitfähigkeit hergestellt werden. In Abbildung 4-30 ist der Grundriss des Planziegelwerkes schematisch dargestellt.

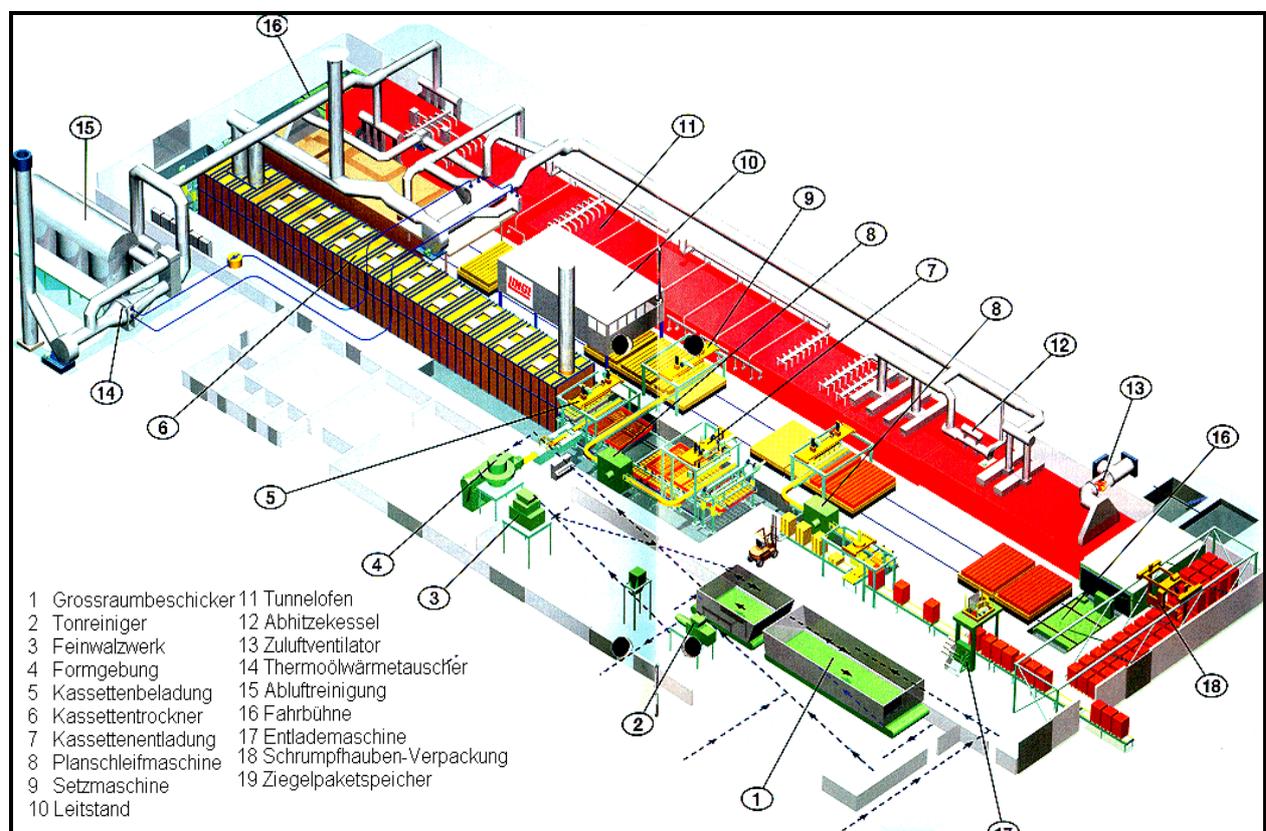


Abbildung 4-30: Schematische Darstellung der Planziegelherstellung

Quelle: [80]

Die Tagesleistung an Planziegeln des Werkes III beträgt rund 220 Tonnen (Rohdichte 0,8). Zur Gewährleistung eines optimalen Energieverbundes sowie geringer Wartungs- und Verschleißkosten, läuft die Fabrik in sehr ruhigen Arbeitstakten, dafür aber 24 Stunden an 7 Tagen in der Woche. Jede der drei Schichten ist mit jeweils zwei Arbeitern besetzt [53].

Bei der Herstellung der Planziegel werden die folgenden Prozessschritte durchlaufen, die in den weiteren Abschnitten näher dargestellt werden:

- Masseaufbereitung,
- Formgebung,
- Trocknen,
- Brennen,
- Verpackung.

4.2.1.1 Masseaufbereitung

Die in der werksnahen Tongrube abgebauten Materialien werden über Kastenbeschicker unterschiedlicher Größe und Bandgeschwindigkeiten dem Kollergang zudosiert. Im Kollergang (Gesamtgewicht 160 t) zermahlen die beiden inneren Läufer den Ton, der dann nach außen auf eine Siebbahn geleitet wird, wo zwei weitere Läufer den Ton durch einen Rost drücken. In einem Vorwalzwerk erfolgt eine Grobzerkleinerung des Tons auf ca. 3 mm.

Anschließend werden in einem Tonreiniger Fremdkörper aus dem Ton herausgefiltert. Die weitere Feinaufbereitung findet in einem Feinwalzwerk statt, in dem der aufbereitete Ton auf 0,8 mm gewalzt wird. Die beschriebene Aufbereitung und Reinigung des Tons erlaubt es die Stegdicken der Ziegel auf 3 mm zu verringern, wodurch bei der gleichen Festigkeit der Ziegel eine höhere Wärmedämmung erreicht wird [53].

4.2.1.2 Formgebung

Bei der Formgebung eingesetzte Aggregate sind ein Siebrundbeschicker, eine Dosiermaschine, in der zur Plastifizierung Dampf zugegeben wird, ein Doppelwellenmischer und eine Strangpresse. Mittels einer Vakuumpumpe wird dem Ton die Luft entzogen, wodurch höchste Plastizität erreicht wird [53].

In der Strangpresse werden bei bis zu 15 bar Pressdruck mit Hilfe eines Mundstücks, welches die Form der Ziegel bestimmt, Ton und das Porosierungsmittel Polystyrol zu einem endlosen Strang verpresst. Dieser wird mit einem Abschneider durch einen 0,8 mm dicken Stahldraht auf die gewünschte Steinhöhe gebracht. Die geschnittenen Formlinge werden für einen optimalen Trocknungsverlauf gekippt und gedreht, gruppiert und schließlich mit einem Umsetzgreifer in die Kassetten des einlagigen Trockners übergeben [80].

Das als Porosierungsmittel eingesetzte Polystyrol wird in der werkseigenen Styropor-Recyclinganlage aus gebrauchten Styropor-Formteilen hergestellt. Dafür werden jährlich rund 120.000 m³ Formteile in einer Spezialmühle zu einem Granulat (< 4 mm) aufgemahlen [52].

4.2.1.3 Trocknung

Der Kassettentrockner am Standort ist eine Neuentwicklung und erlaubt eine Schnell-trocknung der Ziegel. In Abbildung 4-31 ist das Funktionsprinzip des von der Firma Hans Lingl gebauten Kassettentrockners dargestellt. In den Kassetten (3) durchlaufen die frischen Formlinge den aus vorgefertigten Modulen (7) erstellten Trockner und werden abwechselnd von oben und unten, gleichmäßig von bis zu 140 °C heißer Luft aus dem Wärmeverbundsystem durchströmt. Die großen Flächen der Formlinge ermöglichen es, ohne Umwälzung und jeweils nur mit einer Teilmenge der Gesamttrockenluft zu trocknen. Die Luft wird schleifenförmig, jeweils vom Hauptluftstrom abzweigend, durch den Trockner gefördert. Das führt dazu, dass aufgrund der summierenden Wirkung der in Serie geschalteten Ventilatoren (1) der Kraftbedarf für des Trocknen mit 7 kWh/t gebrannten Material äußerst niedrig ist. Durch die Aufteilung des Trockners in kurze Zonen kann der rechnergesteuerte Trocknungsprozess sehr exakt geführt werden. Nach weniger als zwei Stunden Durchlaufzeit verlassen die getrockneten Formlinge den Kassettentrockner. Unter dem Trockner rollen die Kassetten zurück (4), werden in die Entladeposition angehoben und reihenweise entladen [80].

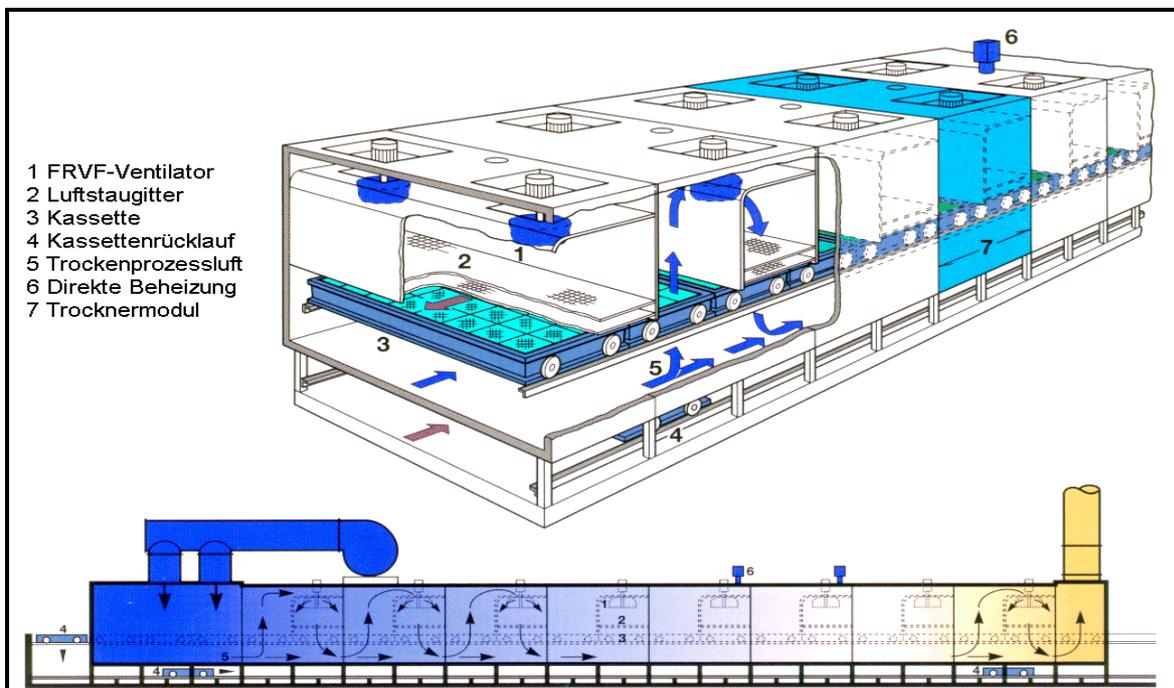


Abbildung 4-31: Schematische Darstellung des Kassettentrockners

Quelle: [80]

Die getrockneten Ziegel werden, umgekehrt zur Nassseite, mit einem Hubbalken reihenweise aus den Kassetten ausgehoben. Mit einem Schwenkgreifer werden die Formlinge aufgenommen, um 90 Grad gekippt und bearbeitungsgerecht mit den Schnittflächen nach außen auf die Transportbahn zur Planschleifmaschine abgelegt. Diese Maschine schleift die getrockneten Formlinge planparallel ab. Der abgesaugte Schleifstaub wird zur Masseaufbereitung zurückgeführt [80]. In der Tabelle 4-17 sind die technischen Daten des Kassettentrockners aufgeführt.

Tabelle 4-17: Betriebsdaten des Kassettentrockners

| | Einheit | |
|----------------------------|-------------------|-------------------------------------|
| Trockengut | | Planziegel |
| Kapazität | t/h | 12,8 (trocken); 15 (nass) |
| Trocknerlänge | m | 44 (22 Kassetten) |
| Trockenquerschnitt | m ² | 1,47 (4,9 m · 0,3 m) |
| Besatzdichte | kg/m ³ | 300 |
| Trockentemperatur | °C | 45 (Eintritt); 165 - 185 (Austritt) |
| Trocknungsdauer | h | < 2 |
| elektrischer Energiebedarf | kWh/t | 7 |
| Abgasvolumenstrom | m ³ /h | 40.000 |
| Abgastemperatur | °C | 45 |

4.2.1.4 Brennen

Die geschliffenen Ziegel werden mittels einer exakten Gruppierung Zahn auf Zahn als Türmchen auf die Tunnelofenwagen geladen, damit sie allseitig und gleichmäßig von den Brenngasen umspült werden können.

Der Turmbesatz ist 1 m hoch, die Löcher sind in Zugrichtung ausgerichtet. Es werden zwei Querreihen zwischen den Brennschlitzen gesetzt, so dass die Einwirkungstiefe sehr kurz ist. Die Ziegel werden dadurch gleichmäßiger um- und durchströmt, womit ein im Vergleich zum Paketbesatz besserer Temperatureausgleich und damit auch eine bessere Brennqualität erreicht wird. Auf einem Tunnelofenwagen befinden sich 384 Ziegel, die in jeweils vier mal zwei Scheiben gesetzt werden [53]. In Abbildung 4-32 ist das Strömungsmuster dieses Scheibenbesatzes dargestellt.

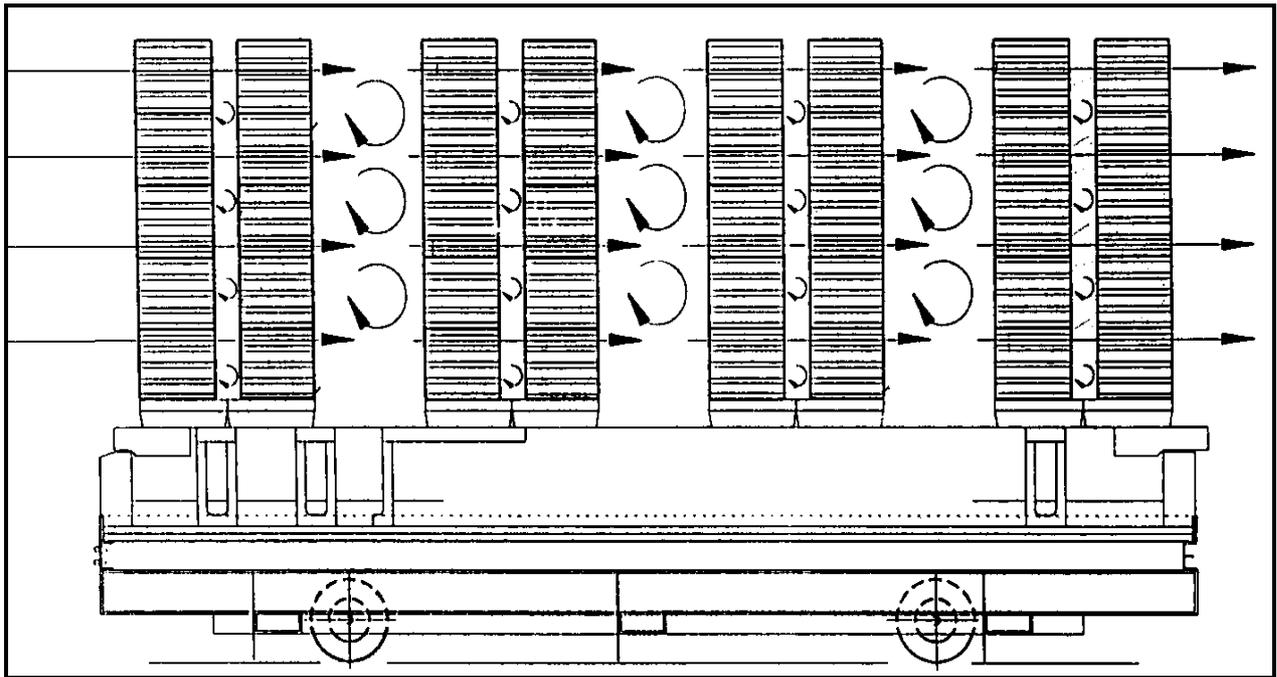


Abbildung 4-32: Schematische Darstellung des Strömungsmusters im Scheibenbesatz

Quelle: [64]

Die eingesetzten Ofenwagen mit Burton-Wagenplateaus haben eine wesentlich geringere Masse als Ofenwagen bekannter Art, trotzdem besitzt ihre Schale die notwendige Härte. Der Kern der Wagen besteht aus keramischem Fasermaterial anstatt aus Schamotte. So kann durch die Reduzierung der Ofenwagenmasse eine Brennstoffeinsparung von etwa 7 % gegenüber herkömmlicher Technik erreicht werden [53].

Dem Tunnelofen ist ein 20 m langer Vorwärmer mit etwa vier Stunden Vorwärmzeit vorgeschaltet. Dieser Vorwärmer wird wie der Trockner mit Heißluft aus dem Verbund beheizt. Die Vorwärmerabluft wird dem Verbundsystem zurückgeführt. Ungefähr alle 40 Minuten wird ein Ofenwagen hydraulisch in den Tunnelofen eingeschoben. Die Durchlaufzeit des ebenfalls von der Firma Hans Lingl gebauten Tunnelofens beträgt 15 Stunden. Der rundum mit Teflon gedichtete Ofenkörper wird von der Decke und von der Seite mit Erdgas befeuert. Durch die gute Isolierung des Ofenkörpers und das im Folgenden beschriebene Wärmeverbundsystem konnte der spezifische Wärmebedarf im Vergleich zu den Werken I und II um 420 kJ/kg gebrannter Ware, entsprechend etwa 24 %, gesenkt werden. Der elektrische Kraftbedarf des Werkes III beträgt ab der Formgebung etwa 27 kWh/t [53].

Die Brenntemperatur liegt bei rund 900 °C und wird in den 12 Temperaturbereichen automatisch überwacht. Der 86 m lange Ofen ist 24 Stunden sieben Tage die Woche in Betrieb. In Abbildung 4-33 ist die Ofen-Brennkurve dargestellt.

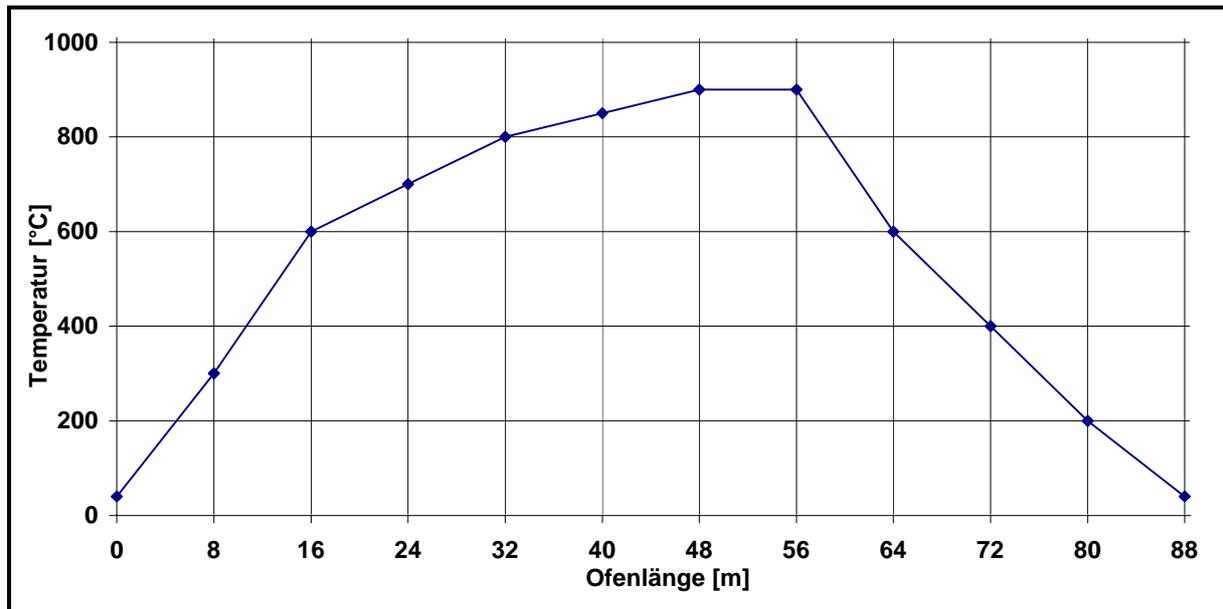


Abbildung 4-33: Brennkurve des Tunnelofens

Quelle: [53]

Im Vorwärmer befinden sich 5 Tunnelofenwagen, im Ofen 22 Tunnelofenwagen und in der Ausfahrtsschleuse 1 Tunnelofenwagen. Auf dem Tunnelofen ist in der oberen Direktabsaugung ein Abhitzekegel eingebaut, in dem der für die Formgebung in der Strangpresse benötigte Dampf erzeugt wird. In Tabelle 4-18 sind technischen Daten des Lingl-Tunnelofens aufgeführt.

Tabelle 4-18: Betriebsdaten des Tunnelofens im Werk III

| | Einheit | |
|--|-------------------|-------------------|
| Brenngut | | Planziegel |
| Kapazität | t/h | 12,8 |
| Ofenlänge | m | 86 (22 Wagen) |
| Ofennutzquerschnitt | m ² | 6 (5,4 m · 1,1 m) |
| Besatzdichte | kg/m ³ | 265 |
| Brenntemperatur | °C | 860 – 900 |
| Brennzeit | h | 15 |
| spez. Wärmebedarf für Trocknen + Brennen | kJ/kg | 840 - 1.050 |
| Abgasvolumenstrom | m ³ /h | 15.000 |
| Abgastemperatur | °C | 130 – 150 |

Das Rauchgas des Ofens wird über Thermoreaktoren mit einem sehr hohen Wirkungsgrad geführt und anschließend mit einem Thermoöl-Wärmetauscher auf eine möglichst niedrige Temperatur heruntergekühlt. Der 1997 erbaute Thermoreaktor Envitherm 25/3 der Firma Envirotec besteht aus drei mit keramischen Speicherkörpern gefüllten Behältern, durch die wechselseitig das schadstoffbeladene 100 - 130 °C warme Abgas durchgesaugt wird. Die

Schaltintervalle betragen 88 Sekunden. Im oberen Bereich der Kammern werden die aus dem Porosierungsmittel stammenden organischen Schadstoffe bei 800 °C mittels einer erdgasbetriebenen Stützfeuerung vollständig verbrannt. Beim Ausströmen gibt das Abgas seine Wärme wieder an die keramischen Speichermassen ab, die für die Wiederaufheizung des schadstoffbeladenen Gases benutzt wird. In einem weiteren nachgeschalteten Wärmetauscher wird das gereinigte Abgas von 170 °C auf etwa 120 °C abgekühlt und verlässt die Anlage über den 45 m hohen Kamin. Ein Fluorabscheider wird aufgrund der eingesetzten Rohstoffe nicht benötigt. In der Tabelle 4-19 sind die Reingaswerte des Brennaggregats aufgeführt [52].

Tabelle 4-19: Emissionswerte des Brennaggregats

| Emissionskomponente | Reingas ^{*)} | Reingas ^{**)} | Einheit | BZR ^{***)} | Massenstrom ^{****)} | Einheit |
|--------------------------------------|-----------------------|------------------------|-------------------|---------------------|------------------------------|---------|
| Staub | < 1 | (< 1) | mg/m ³ | A | < 14 | g/h |
| NO _x als NO ₂ | 52,7 | (23,3) | mg/m ³ | A | 760 | g/h |
| SO _x als SO ₂ | 12,0 | (5,3) | mg/m ³ | A | 173 | g/h |
| Fluoride als HF | 0,35 | (0,16) | mg/m ³ | A | 5 | g/h |
| Chloride als HCl | 23,5 | (10,4) | mg/m ³ | A | 339 | g/h |
| Cyanide als HCN | < 0,1 | (<0,1) | mg/m ³ | A | < 1 | g/h |
| org. Stoffe als Gesamt-C | 17,4 | (7,7) | mg/m ³ | A | 254 | g/h |
| Benzol | 1,4 | (1,24) | mg/m ³ | A | 20 | g/h |
| CO ₂ | 8,5 | | Vol.-% | A | | |
| tatsächlicher O ₂ -Gehalt | 14,2 | | Vol.-% | A | | |
| Metalle | | | | | | |
| Σ Cd, Hg, Tl (Klasse I) | < 0,003 | (< 0,003) | mg/m ³ | A | < 0,05 | g/h |
| Σ As, Co, Ni (Klasse II) | < 0,006 | (< 0,006) | mg/m ³ | A | < 0,1 | g/h |
| Σ Pb, Cr, Cu (Klasse III) | < 0,007 | (< 0,007) | mg/m ³ | A | < 0,1 | g/h |
| Cadmium | < 0,001 | | mg/m ³ | A | | |
| Quecksilber | < 0,001 | | mg/m ³ | A | | |
| Thallium | < 0,001 | | mg/m ³ | A | | |
| Arsen | < 0,001 | | mg/m ³ | A | | |
| Kobalt | < 0,003 | | mg/m ³ | A | | |
| Nickel | < 0,002 | | mg/m ³ | A | | |
| Blei | < 0,005 | | mg/m ³ | A | | |
| Chrom | < 0,001 | | mg/m ³ | A | | |
| Kupfer | < 0,001 | | mg/m ³ | A | | |

^{*)} Massenkonzentrationen bezogen auf den tatsächlichen Sauerstoffgehalt (14,2 Vol.-%)

^{**)} Massenkonzentrationen bezogen auf 18 Vol.-% Sauerstoff, Normzustand, trocken; Benzol (15 Vol.-% O₂)

^{***)} Bezugszeitraum (BZR): A = Halbstundenmittelwert, B = Stundenmittelwert, C = Tagesmittelwert

^{****)} Massenstrom bezogen auf die Reingaskonzentrationen

Die beschriebenen Aggregate Kassetttrockner, Vorwärmer, Tunnelofen, Thermoreaktor und Abhitzeessel sind zu dem in Abbildung 4-34 dargestellten Wärmeverbundsystem zusammengeschaltet.

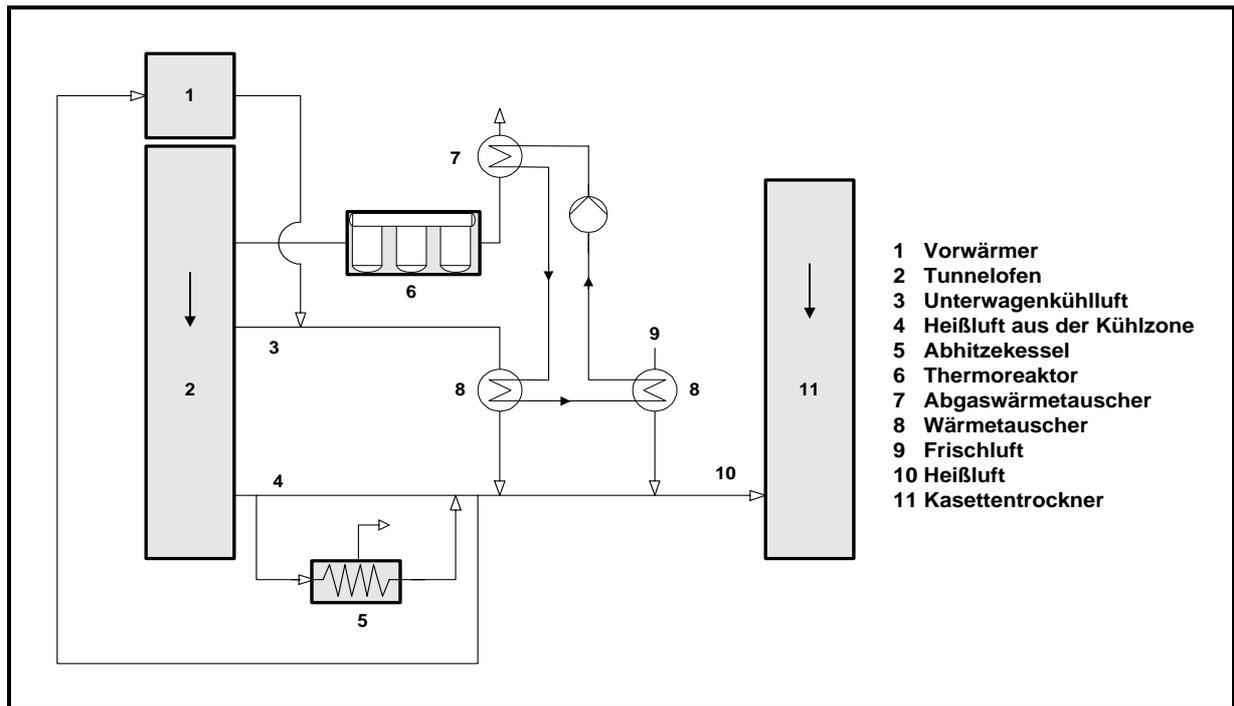


Abbildung 4-34: Schematische Darstellung des Wärmeverbundsystems im Werk III

Die Funktionsweise des Wärmeverbundsystems wird im Folgenden dargestellt. Neben der Abwärmenutzung (4) zur Dampferzeugung im Abhitzekeessel (5) und zur Beheizung des Vorwärmers (1) wird in einem Abgaswärmetauscher (7) die beim Abkühlen der gereinigten Abgase anfallende Wärme mittels Thermoöl zu weiteren Wärmetauschern (8) transportiert, in denen wiederum Frischluft (9) für den Trockenprozess erwärmt wird. Die erwärmte Frischluft wird mit Heißluft aus der Kühlzone (4) des Tunnelofens (2) vermischt und dem Kassettentrockner (11) zugeführt. Durch die effektive Nutzung der Energie im Wärmeverbundsystem beträgt der spezifische Wärmebedarf für das Trocknen und Brennen nur noch zwischen 840 und 1.050 kJ/kg gebrannten Ware [52].

4.2.1.5 Verpackung

Die Ofenwagen mit gebrannter Ware werden am Ende des Tunnelofens in einer Schleuse von der Fahrbühne genommen und auf das Entladegleis geschoben. In der Ofenwagen-Entladeanlage werden die einzelnen Ziegel mittels eines Greifers auf die Transportbahn zur Paketieranlage übergeben. Sie durchlaufen dabei die Planschleifmaschine, in der sie planparallel auf die exakte Steinhöhe geschliffen werden. In der Paketieranlage werden die Ziegel zu transportgerechten Paketen auf Paletten zusammengesetzt und mit einer Plastikfolie überzogen. In einem Schrumpfofen wird diese Folie ca. 45 Sekunden erhitzt, wobei sie stark einschrumpft und damit eine sichere Transportverpackung ergibt. Während der Nachtproduktion übernimmt ein vollautomatischer Palettenspeicher die Zwischenlagerung der Ziegelpaletten. Diese Anlage dient dem Lärmschutz, da ein nächtlicher Staplerverkehr entfällt. Während der Tagschicht werden die Pakete wieder rückgestapelt und mit einem Stapler zum Fertigwarenlager transportiert [53].

4.2.2 Herstellung von Dachziegeln und Dachziegelzubehör bei der Erlus Baustoffwerke AG in Neufahrn

Am Betriebsstandort in Neufahrn werden in drei Werken auf 7 Produktionslinien Flächen-Dachziegel und Dachziegelzubehör hergestellt. Der Rohstoffverbrauch für den gesamten Standort beträgt pro Tag ca. 1.000 bis 1.500 Tonnen Tone und Lehme, die einen saisonal schwankenden Wassergehalt von durchschnittlich 20 % aufweisen. Für die Engobenzubereitung werden zusätzlich ca. 10 bis 15 Tonnen Engobe-Ton pro Woche verarbeitet. Abbildung 4-35 zeigt den saisonalen Verlauf der Netto-Produktionsmenge der Produktionslinien im Jahre 1997, wobei die durchschnittliche monatliche Netto-Produktionsmenge 1997 17.669 Tonnen Dachziegel betrug.

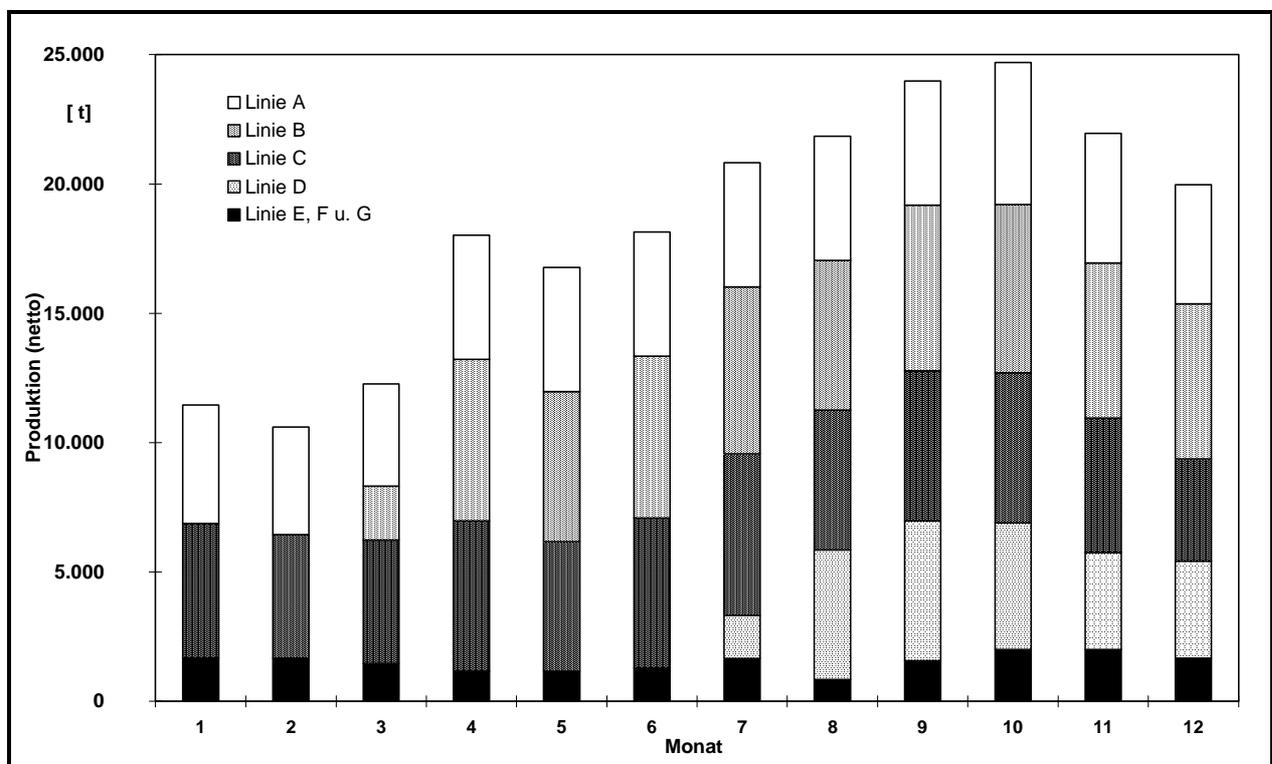


Abbildung 4-35: Netto-Produktionsmengen des Betriebsstandortes Neufahrn 1997

Quelle: [67]

Der für die Dachziegelfertigung mit LKWs angelieferte Lehm und Ton durchläuft eine zentrale Aufbereitung und wird nach einer Zwischenlagerung über Kastenbeschicker und Förderbänder den einzelnen Produktionslinien zugeteilt. Die Dachziegelherstellung läuft dabei über die folgenden Produktionsstufen ab:

- Masseaufbereitung,
- Formgebung,
- Trocknen und Engobieren,
- Brennen,
- Verpacken.

Im Folgenden werden die zentrale Aufbereitung sowie die weiteren Prozessschritte der Linie 5 (B) des Werkes III, auf der Flächendachziegel hergestellt werden, detailliert dargestellt.

4.2.2.1 Masseaufbereitung

Der mittels Lastkraftwagen angelieferte Ton wird aus den Tonboxen von einem Bagger-Greifer entnommen und über einen Kastenbeschicker dem Walzenbrecher zugeführt. Über weitere Kastenbeschicker und einen Aufgabetrichter durchläuft der gebrochene Tonmassenstrom zur weiteren Mahlung eine bzw. zwei Mühlen. Nach der Zwischenlagerung im Tonumpf wird der Tonmassenstrom über einen Siebrundbeschicker und eine Bandwaage den Doppelwellenmischern zugeführt [67].

Der ebenfalls mit LKWs angelieferte Lehm wird über Kastenbeschicker und Förderbänder zur Zwischenlagerung in eine Quersumpfanlage transportiert. Aus der Quersumpfanlage entnommener Lehm erfährt in einem Kollergang den ersten mechanischen Aufbereitungsschritt. Es folgen zwei parallele Grobwalzwerke und zwei parallele Feinwalzwerke mit jeweils einer dazwischen liegenden Bandwaage, bevor der Lehmmassenstrom in Doppelwellenmischern mit dem Tonmassenstrom vermischt wird.

Den oben beschriebenen Lehm- und Tonmassenströmen wird in den Doppelwellenmischern ein weiterer Tonmassenstrom hinzugefügt. Er besteht aus speziellem Ton, der die Mahltrocknungsanlage durchlaufen hat. Die gesamte Aufbereitung wird im 3-Schichtbetrieb mit 120 Betriebsstunden pro Woche betrieben.

Die Mahltrocknungsanlage wird überwiegend zur Aufbereitung des Zusatztons verwendet. Dieser spezielle Ton wird bei Bedarf der Rohmasse für die Dachziegelfertigung zudosiert, um das Sinterverhalten beim Brennprozess zu verbessern. Pro Woche werden zwei bis drei Chargen produziert. Der Ton durchläuft bei der Mahltrocknung zuerst eine Trockentrommel, anschließend wird er in einer Walzenmühle auf die gewünschte Korngröße gemahlen und nach dem Austrag aus der Mühle in einem Silo gelagert. Beim Anfahren der Mahltrocknungsanlage für die Aufbereitung einer Charge werden zuerst der Trommeltrockner und der vorgelagerte Brecher mit Transportbändern in Betrieb genommen. Die Beschickung des Brechers erfolgt mit einem Radlader. Der gebrochene Ton wird über ein Transportband einem Kastenbeschicker zugeführt und von dort in den Aufgabetrichter des Trommeltrockners gefördert. Der rohe Ton weist eine Feuchte von ca. 20 bis 25 Masse-% auf. Im Trommeltrockner wird dem Ton bei ca. 100 °C der überwiegende Anteil der Feuchte entzogen. Ein gasbefeuerter Heißluftherzeuger versorgt dazu die Trockentrommel mit heißer Trocknungsluft [67]. Abbildung 4-36 zeigt die schematische Darstellung der Mahltrocknungsanlage zur Aufbereitung von Zusatzton.

Die Werte für den monatlichen Stromverbrauch in der gesamten Aufbereitung liegen zwischen 150.000 und 300.000 kWh wobei die Hauptverbraucher für elektrische Energie der Kollergang, die Mühlen und die Walzwerke sind. Der Erdgasverbrauch für die Trockenmahanlage in der Rohstoffaufbereitung weist im Jahresverlauf starke Schwankungen auf, da diese Anlagen nur nach Bedarf für die Aufbereitung eines Teilstromes des Tons eingesetzt wird. Die mittlere thermische Leistung des Heißluftherzeugers für den Trommeltrockner beträgt im stationären Zustand 3.500 kW, die gesamte elektrische Leistungsaufnahme der Mahltrocknungsanlage erreicht im stationären Zustand 412 kW [67].

Das bei der Reinigung der Aufbereitungsanlagen anfallende Abwasser wird gesammelt und als Anmachwasser wieder in den Prozess der Masseaufbereitung eingesetzt.

4.2.2.2 Formgebung

Die von der zentralen Aufbereitung über Transportbänder zur Produktionslinie herangeführte Rohmasse wird in einem Siebrundbeschicker und Doppelwellenmischer homogenisiert. Im Doppelwellenmischer wird die Rohmasse durch Dampfzugabe auf ca. 35 °C erwärmt und einer Kuchenpresse zugeführt. Ein Batzenabschneider und ein Harfenschneider zerteilen den kontinuierlich aus der Kuchenpresse austretenden Rohmassestrang zu einzelnen Batzen, die der Dachziegelpresse über einen Umsetzer zugeführt werden.

Die eigentliche Formgebung erfolgt in der Mehrfeld-Revolver-Dachziegelpresse. Hier werden 5 Dachziegel während eines Pressvorganges gleichzeitig ausgeformt. Die Pressformen aus der werkseigenen Gipserei bestehen aus Gips und müssen nach ca. 1.500 Presszyklen ersetzt werden. Verbrauchte Gipsformen werden derzeit vom Gipslieferanten entsorgt und in Zugabemengen von 2 bis 3 % bei der Zementherstellung wiederverwendet. Überschüssiges Material, das beim Pressvorgang anfällt, wird dem Produktionsprozess wieder zugeführt. Die Dachziegel werden nach der Formgebung der Presse entnommen, auf Trockenrahmen abgesetzt und in die Trockenkammern transportiert [67].

4.2.2.3 Trocknung und Engobieren

Die Trockenanlage ist als Kammertrockner mit 14 Doppelkammern ausgeführt. Die Beheizung erfolgt in der Grundlast mit Abwärme aus dem Wärmeverbund des Tunnelofens. Der Abluft aus dem Wärmeverbund wird in einer Mischkammer Frischluft zugemischt. An jeder Doppelkammer erwärmen flüssiggasbefeuerte Einzelbrenner die Trockenluft auf 190 °C, bevor sie in die Trockenkammer eingeleitet wird.

In der Trockenkammer, die automatisch beschickt und entladen wird, werden die Formlinge von 19 % Pressfeuchte auf 2,5 % Restfeuchte getrocknet. Die Zufuhr der Trockenluft erfolgt über Drehlüfter, die die Warmluft gleichmäßig über die zu trocknenden Ziegel verteilen. Die feuchte Trocknerabluft aus allen Trockenkammern strömt in einen gemeinsamen Abluftkanal. Von dort wird die Abluft über drei Abluftkamine mit Axialventilatoren über Dach abgeleitet [67]. In Tabelle 4-20 sind die Betriebsdaten des Kammertrockners aufgeführt.

Tabelle 4-20: Betriebsdaten des Kammertrockners

| | Einheit | |
|---------------------------------|-------------------|-------------------------|
| Trockengut | | Flächendachziegel |
| Kapazität | t/Kammer | 67,7 t |
| Trocknervolumen (Kammervolumen) | m ³ | 1.070 m ³ |
| Besatzdichte | kg/m ³ | 63,2 |
| Trockentemperatur | °C | 68 |
| Trocknungsdauer | h | 44 (bei 6 % Schwindung) |
| spez. Brennstoffverbrauch | kWh/kg | 0,12 |
| spez. Stromverbrauch | kWh/kg | 0,027 |
| Abgasvolumenstrom | m ³ /h | 71.808 |
| Abgastemperatur | °C | 39 |

Nach dem Trockenvorgang durchlaufen die Dachziegel eine Engobieranlage, wo bei Bedarf engobiert wird. Beim Engobieren wird der getrocknete Ziegelrohling auf der Oberseite mit einer Ton-Wasser-Emulsion besprüht oder begossen, die beim Brennen sintert und damit die Farbe und Oberfläche der Dachziegel auf der Oberseite bestimmt. Das beim Reinigen der Engobieranlage anfallende Abwasser wird ebenfalls wieder in der Masseaufbereitung eingesetzt. Nach dem Trocknen und Engobieren erfolgt eine Qualitätskontrolle, um fehlerhafte Rohlinge auszusondern. Der dabei anfallende Trockenbruch wird aufgemahlen und in die Masseaufbereitung zurückgeführt. In Tabelle 4-21 ist die Energiebilanz des Kammertrockners (Bezugstemperatur: 25 °C) dargestellt. Bis auf drei Kammern, die beladen bzw. entladen wurden, waren alle übrigen Kammern in Trockenbetrieb [67].

Tabelle 4-21: Energiebilanz des Trockners

| Energieinput | [kWh] | [%] | Energieoutput | [kWh] | [%] |
|-------------------------|----------------|------|--------------------------------|-----------------------------|------|
| Flüssiggas (Butan) | 1.266,5 | 44,0 | Abluft 1 (trocken) | 104,0 | 4,0 |
| Verbrennungsluft gesamt | 13,5 | 0,5 | Abluft 2 (trocken) | 149,6 | 5,8 |
| Zuluft vom Wärmeverbund | 1.226,7 | 42,7 | Abluft 3 (trocken) | 113,4 | 4,4 |
| Zuluft Frischluft | 102,3 | 3,6 | Wasser- verdampfung | 1.718,4 | 66,6 |
| Elektrische Energie | 267,0 | 9,3 | Oberflächen- verluste | 264,1 | 10,2 |
| | | | Wärme im getrockneten Gut | 143,0 | 5,5 |
| | | | Wärmeverluste Trocknergestelle | 89,5 | 3,5 |
| | | | Bilanzrest | 294,0 | 10,2 |
| Input | 2.876,0 | | Output | 2.582,0 + Bilanzrest | |

Quelle: [67]

4.2.2.4 Brennen

Der Brand der Dachziegel erfolgt auf Monokassetten in einem butanbeheizten Hydrocasing-Ofen (Wassermantelofen) der Firma Ceric. Die mit Monokassetten erreichbare Besatzdichte liegt deutlich unter der Besatzdichte bei der Verwendung von U-Kassetten. Der Einsatz von Monokassetten bietet allerdings Vorteile hinsichtlich der Qualität der darauf gebrannten Dachziegel. Die Qualität des Brandes ist bezüglich Brennschärfe, Flügeligkeit und Farbgenauigkeit bei Verwendung von Monokassetten sehr hoch, da die Ziegel flach liegen und einzeln voll unterstützt sind. Durch die gleichmäßigen Abstände zwischen Ziegeln und Ofenwänden wird eine gute Luftverteilung im Ofen erreicht. Damit sind bei der Verwendung von Monokassetten entsprechend schnelle Brennzeiten möglich. Bei einem Hydrocasing-Ofen erfolgt der gasdichte Abschluss des Ofenraums an den Tunnelofenwagen nach unten durch ein Wasserbecken. Die Ofenwagen weisen im unteren Bereich eine umlaufende Schürze aus Stahlblech auf, die in das Wasserbecken verlegt sind. Durch diese Bauweise wird ein sehr dichter Abschluss des Ofenraums und eine gute Kühlung der Unterseite der Ofenwagen erreicht. Gasdichte Öfen können über der gesamten Länge mit Druck betrieben werden. Dadurch werden Störeinflüsse quer zur Strömungsrichtung in der Ofenatmosphäre vermieden und eine homogene Temperaturverteilung ermöglicht. Der Inhalt des Wasserbeckens wird im Kreislauf über eine Rückgewinnung geführt und auf einer Temperatur von 30 bis 32 °C gehalten. In Tabelle 4-22 sind weitere Betriebsdaten des Hydrocasing-Ofens dargestellt [67].

Tabelle 4-22: Betriebsdaten des Hydrocasing-Ofens

| | Einheit | |
|---|-------------------|------------------|
| Kapazität | t/h | 19,5 |
| Ofenlänge | m | 126 (44 Wagen) |
| Ofennutzquerschnitt | m ² | 9 (6 m · 1,5 m) |
| Besatzdichte | kg/m ³ | 154 |
| Brenntemperatur | °C | 1.070 |
| Brennzeit | h | 21 |
| spez. Brennstoffverbrauch | kWh/kg | 0,59 |
| spez. Stromverbrauch | kWh/kg | 0,016 |
| Abgasvolumenstrom zur Rauchgasreinigung | m ³ /h | 24.409 |
| Kühlzonenabluft zum Wärmeverbund | m ³ /h | 32.401 |
| Abgastemperatur (Rauchgase) | °C | 228 |

Der Ofen verfügt zum dichten Abschluss an den Enden über einen Ein- und einen Ausgangsschleusenbereich mit je einem Tor zum Ofeninnenraum und zur Umgebung. Nach der Eingangsschleuse folgt die sogenannte Vorwärmzone mit zusätzlichem Schleusentor zur Brennzone. Ein Teil der Abwärme aus der Kühlzone wird hier auf das Brenngut übertragen. Die Abluftmengen aus der Sturzkühlung, der Kühlzone und der Vorwärmzone werden in einer Wärmeverbundleitung gefasst und mit einer Mischtemperatur von 127 °C zu dem Kammertrockner geleitet. Über diesen Wärmeverbund wird die Grundlast des Energiebedarfs für den Trockenvorgang bereitgestellt. In Abbildung 4-37 ist der Wärmeverbund Ofen und Trockner schematisch dargestellt. Alle Abgasvolumenströme sind auf den Normzustand bezogen.

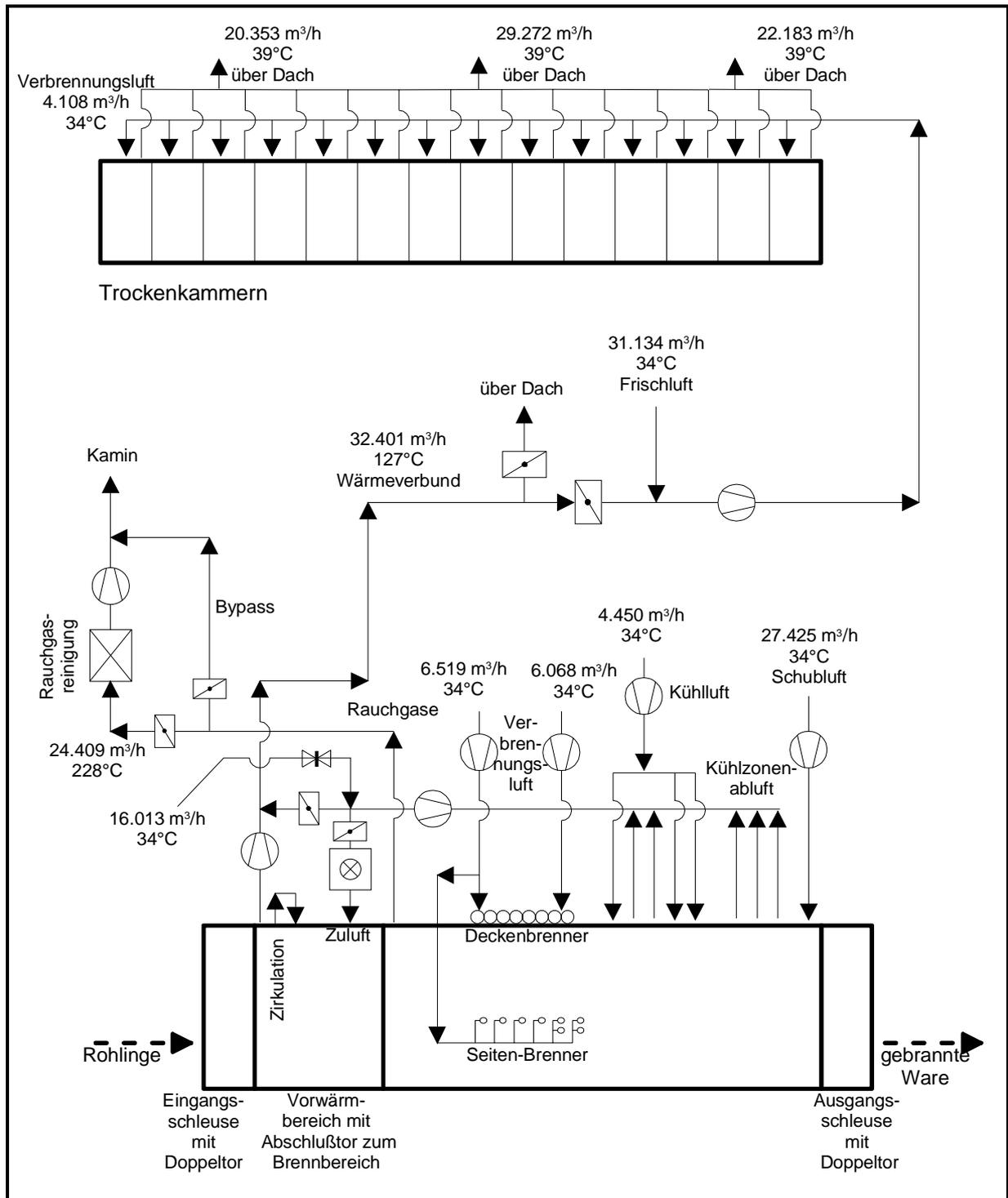


Abbildung 4-37: Schematische Darstellung des Ofens und Trockners der Linie 5 (B)

Die beim Brennen entstehenden Rauchgase aus der Brennzone werden mit einer Temperatur von 228°C über einen Fluorfilter geleitet und verlassen die Rauchgasreinigungsanlage über einen Kamin mit etwa 200°C . Der Fluorfilter ist als Kalkschütttschichtfilter ausgeführt. Der im Randbereich der Körner mit Fluor beladene Kalksplitt wird geschält und wieder zur Abgasreinigung eingesetzt.

Die 1991 von der Firma Hellmich gebaute Abgasreinigungsanlage ist für einen Abgasvolumenstrom von 50.000 m_B³/h (Betriebskubikmeter) ausgelegt und ist baugleich mit dem in Kapitel 4 vorgestellten Fluor-Kaskaden-Absorber mit Schältrömmel und Rückführung. Der nicht mehr einsetzbare Kalksplitt wird in Silofahrzeugen abgeholt und in Zugabemengen von 2 bis 3 % bei der Zementherstellung wiederverwendet. Die Investition für die Abgasreinigungsanlage belief sich auf etwa 500.000 DM. Die Betriebskosten betragen pro Monat ca. 925 DM für Kalksplitt, dazu kommt ein Stromverbrauch von ca. 9.000 kWh. In Tabelle 4-23 sind die Reingaswerte des Ofens aufgeführt.

Tabelle 4-23: Emissionswerte des Tunnelofens

| Emissionskomponente | Reingas ^{*)} | Reingas ^{**)} | Einheit | BZR ^{***)} | Massenstrom ^{****)} | Einheit |
|--------------------------------------|-----------------------|------------------------|-------------------|---------------------|------------------------------|---------|
| Staub | 7,4 | 6,3 | mg/m ³ | A | 212 | g/h |
| NO _x als NO ₂ | 26 | 22,3 | mg/m ³ | A | 743 | g/h |
| Fluoride als HF | 2,3 | 2,3 | mg/m ³ | A | 65 | g/h |
| CO | 0,002 | k.A. | Vol.-% | A | k.A. | g/h |
| CO ₂ | 1,66 | k.A. | Vol.-% | A | k.A. | g/h |
| tatsächlicher O ₂ -Gehalt | 17,5 | | Vol.-% | A | k.A. | g/h |
| Metalle | | | | | | |
| Σ Cd, Hg, Tl (Klasse I) | k.A. | k.A. | mg/m ³ | | k.A. | g/h |
| Σ As, Co, Ni (Klasse II) | k.A. | k.A. | mg/m ³ | | k.A. | g/h |
| Σ Pb, Cr, Cu (Klasse III) | k.A. | k.A. | mg/m ³ | | k.A. | g/h |

^{*)} Massenkonzentrationen bezogen auf den tatsächlichen Sauerstoffgehalt (17,5 Vol.-%), Normzustand, trocken

^{**)} Massenkonzentrationen bezogen auf 18 Vol.-% Sauerstoff, Normzustand, trocken

^{***)} Bezugszeitraum (BZR): A = Halbstundenmittelwert, B = Stundenmittelwert, C = Tagesmittelwert

^{****)} Massenstrom bezogen auf die Reingaskonzentrationen

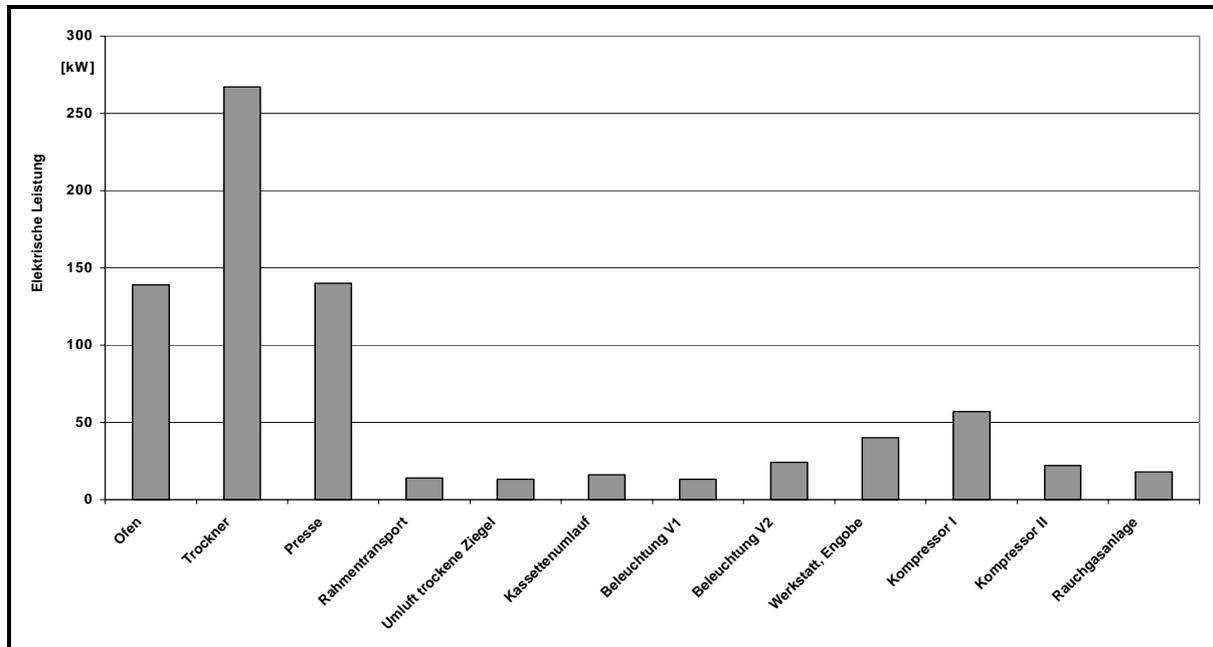
Quelle: [Angaben der Firma ERLUS Baustoffwerke AG]

In der Tabelle 4-24 ist die Energiebilanz (Bezugstemperatur: 25 °C) des Ofens dargestellt. Durch die Festlegung der Bezugstemperatur auf 25°C sind die Energieinhalte der aus der Halle in den Ofen eintretenden Luftmengen gleich oder nahe dem Wert Null. Über den Rauchgasstrom wurden am Ofen 41,2 % der insgesamt abgeführten Energie entnommen, über die Abluft zum Wärmeverbund 26,4 %. Dieser Anteil wird für den Trockenvorgang zurückgewonnen. Die Oberflächenverluste betragen 15,0 %.

Tabelle 4-24: Energiebilanz des Ofens

| Energieinput | [kWh] | [%] | Energieoutput | [kWh] | [%] |
|---------------------------|----------------|------|-------------------------------|----------------|---------------------|
| Flüssiggas (Butan) | 4.584,8 | 93,2 | Rauchgase | 1.915,8 | 41,2 |
| Verbrennungsluft 1 | 21,4 | 0,4 | Abluft Wärmeverbund | 1.226,7 | 26,4 |
| Verbrennungsluft 2 | 19,9 | 0,4 | Oberflächenverluste | 695,7 | 15,0 |
| Zuluft Kühlzone | 14,6 | 0,3 | Wasserentzug | 517,2 | 11,1 |
| Schubluf | 90,1 | 1,8 | Wärmeverlust Gut | 63,9 | 1,4 |
| Falschluf für Vorwärmzone | 52,6 | 1,1 | Wärmeverlust Brennhilfsmittel | 112,6 | 2,4 |
| Elektrische Energie | 136,0 | 2,8 | Wärmeverluste TOW | 112,8 | 2,4 |
| | | | Bilanzrest | 274,8 | 5,6 |
| <i>Input</i> | <i>4.919,5</i> | | <i>Output</i> | <i>4.644,7</i> | <i>+ Bilanzrest</i> |

Abbildung 4-38 zeigt abschließend die Stundenmittelwerte der elektrischen Leistungsaufnahme für verschiedene Anlagen der Produktionslinie, die in einem Säulendiagramm aufgetragen sind.

**Abbildung 4-38: Elektrische Leistungsaufnahme verschiedener Verbraucher**

Die Verbraucher mit der höchsten elektrischen Leistungsaufnahme waren der Trockner mit 267 kW, gefolgt von der Presse mit 140 kW und dem Ofen mit 139 kW. Bei den übrigen elektrischen Verbrauchergruppen lag die Leistungsaufnahme im Stundenmittel zwischen 0 und 57 kW.

4.2.3 Herstellung von Schamottestein bei der Dr. C. Otto Feuerfest GmbH in Bochum

Bei der Dr. C. Otto Feuerfest GmbH in Bochum werden Schamotte- und Silikasteine hergestellt. Im Schamottewerk (Produktion 36.000 t/a), in dem einfache Formsteine produziert werden, ist ein Fluor-Kaskaden-Absorber der Firma Hellmich im Einsatz. Der Fertigungsprozess der Schamottesteine umfasst zunächst die Aufbereitung, in der die Grob- und Feinzerkleinerung der angelieferten Rohstoffe stattfindet. Anschließend erfolgt die Formgebung mittels Kniehebelpressen sowie das Trocknen der Steine in zwei Tunneltrocknern. Der Brand der Formlinge erfolgt in Tunnelöfen deren Abgase mittels des nachgeschalteten Fluor-Kaskaden-Absorbers gereinigt werden. Die 1976 und 1980 erbauten Tunnelöfen werden mit Erdgas H betrieben. Der Brennstoffverbrauch beträgt im Durchschnitt 125 m³ Erdgas pro Tonne Produkt, der Elektroenergieverbrauch 20 kW/h pro Tonne Produkt. In Tabelle 4-25 sind die wichtigsten Betriebsdaten des Absorbers dargestellt. Der Absorber ist für einen Abgasvolumenstrom von 20.000 m³/h ausgelegt, die vorliegenden Messdaten sind hingegen auf einen Abgasvolumenstrom von 11.700 m³/h bezogen. Tabelle 4-26 zeigt die wichtigsten Roh- und Reingaswerte (Firmenangaben) sowie den jeweiligen Massenstrom.

Tabelle 4-25: Betriebsdaten des eingesetzten Fluor-Kaskaden-Absorbers

| | | |
|--|------------------|---------|
| Hersteller der Anlage | Hellmich | |
| Baujahr | 1989 | |
| Sorptionsmittel | Kalkgranulat | |
| Sorptionsmittelverbrauch | 2,2 | kg/h |
| Körnung | 2 - 4 | mm |
| Einsatz einer Schältrömmel | nein | |
| Abgastemperatur Eintritt | 207 | °C |
| Abgastemperatur Austritt | 199 | °C |
| Abscheideleistung | 98 | % |
| Betriebskosten | 35.000,- | DM/Jahr |
| Investition | 470.000,- | DM |
| Aufstellbedingungen (L × B × H) | 5,2 × 3,8 × 13,0 | m |

Tabelle 4-26: Emissionswerte der Schamottetunnelöfen

| Emissionskomponente | Rohgas | Reingas | Einheit | BZR ^{*)} | Massenstrom ^{**)} | Einheit |
|--|---------------|----------------|-------------------|--------------------------|-----------------------------------|----------------|
| Staub | 22,5 | 1,6 | mg/m ³ | A | 19 | g/h |
| NO _x als NO ₂ | 267 | 267 | mg/m ³ | A | 3,12 | kg/h |
| SO _x als SO ₂ | 142 | 107 | mg/m ³ | A | 1,25 | kg/h |
| gasförmige anorganische Fluorverbindungen als HF | 34,7 | 0,4 | mg/m ³ | A | 4,7 | g/h |

^{*)} Bezugszeitraum (BZR): A = Halbstundenmittelwert, B = Stundenmittelwert, C = Tagesmittelwert

^{**)} Massenstrom bezogen auf die Reingaskonzentrationen

5 Beste verfügbare Techniken zur Vermeidung und Verminderung von Umweltverschmutzung

In diesem Kapitel werden auf Grundlage der in Kapitel 4 dargestellten Maßnahmen und Techniken und insbesondere mit diesen erreichbare Input/Outputströme identifiziert, die im Kontext der IVU-Richtlinie als BVT angesehen werden können. Zunächst werden als Voraussetzung zur energie- und ressourceneffizienten Produktion allgemeine Hinweise zur energie- und rohstoffsparenden Prozessführung gegeben. Anschließend werden die mit den in Kapitel 4 beschriebenen fortschrittlichen Techniken und Maßnahmen erreichbaren Emissionswerte bezüglich partikelförmiger, gasförmiger anorganischer und organischer Emissionen sowie von Lärmemissionen und Abwasser dargestellt.

Die mit dem Einsatz der besten verfügbaren Techniken erreichbaren Emissionswerte werden in diesem Kapitel als BVT-Emissionswerte bezeichnet und beziehen sich auf Tagesmittelwerte und einen Sauerstoffbezuggehalt von 17 Vol.-%. Die Sauerstoffgehalte im Ofenabgas unterscheiden sich in Abhängigkeit der hergestellten Produkte. Im Mittelwert liegen die Sauerstoffgehalte der keramischen Industrie unter 17 Vol.-%.

Bei der Bestimmung der besten verfügbaren Techniken ist gemäß Art. 2 (11) der IVU-Richtlinie die wirtschaftliche Vertretbarkeit der einzusetzenden Techniken zu berücksichtigen. Weiter wird darauf hingewiesen, dass es sich bei den BVT-Emissionswerten in diesem Kapitel nicht um Vorschläge für Emissionsgrenzwerte handelt. Bei der Festlegung der jeweiligen Genehmigungsaufgaben sind lokale standortspezifische Faktoren, wie die technische Beschaffenheit der betreffenden Anlage, ihr geographischer Standort und die örtlichen Umweltbedingungen zu berücksichtigen. Ferner ist auch bei bestehenden Anlagen die wirtschaftliche und technische Vertretbarkeit möglicher Modernisierungen zu beachten.

5.1 Allgemeine Hinweise zur Prozessführung

Grundlage einer effizienten Nutzung der eingesetzten Rohstoffe und Energien bei gleichzeitiger maximal möglicher Vermeidung und Verminderung von Schadstoffemissionen in Wasser, Luft und Boden ist eine geeignete Prozessführung.

Die effiziente Nutzung sowohl der Brennstoffenergie als auch der elektrischen Energie wird durch Energieerfassungs- und Energiemanagementsysteme, eine computergesteuerte Prozessregelung bei möglichst hoher Anlagenauslastung, die Einsetzung eines Energiebeauftragten sowie flexible Arbeitszeiten unterstützt. Für eine effiziente Nutzung der bei der Verbrennung anfallenden Abwärme ist, neben der Verbesserung der Einzelaggregate (z.B. durch Isolierung, Einsatz moderner Brenner, etc.), eine Verknüpfung der verschiedenen

Prozessstufen über ein Wärmeverbundsystem (insbesondere zwischen Ofen und Trockner) notwendig. Die Verwendung von Erdgas als Brennstoff ist aufgrund der sauberen Verbrennung anderen Brennstoffen vorzuziehen. Eine effiziente Nutzung der Elektroenergie wird durch den Einsatz wirkungsgradverbesserter Elektromotoren und prozessgesteuerter Aggregate ermöglicht. Weitere Maßnahmen und Techniken zur Reduzierung des Verbrauchs an Brenneenergie und elektrischer Energie sind in Abschnitt 4.1.5 aufgeführt.

Zur effizienten Nutzung der Rohstoffe und zur Vermeidung und Verwertung von Abfällen sollten anfallender Staub, Pressabfall, Trocken- und Brennbruch möglichst sortenrein gesammelt und direkt wieder in den Prozess zurückgeführt werden. Daneben bestehen weitere im Abschnitt 4.1.4 beschriebene Möglichkeiten zur Reduzierung des Rohstoffverbrauchs, wie beispielsweise der Einsatz von Abfällen – soweit dieses ohne Belastung von Umwelt und Produkt möglich ist - und Niederschlagswasser oder der Zusatz wassersparender Additive. Techniken zur Vermeidung, Verminderung und Verwertung von Abfällen sind in Abschnitt 4.1.3 beschrieben und umfassen beispielsweise den Ersatz von Gipsformen durch Kunststoffformen, den Einsatz einer Schältrömmel zur Sorptionsmittelwiederaufarbeitung bei einer nachgeschalteten Abgasreinigung oder Anlagen zur Wiederverwendung von Klärschlamm.

5.2 Beste verfügbare Techniken zur Verminderung partikelförmiger Emissionen

Durch die Umsetzung der in Abschnitt 4.1.1.1 beschriebenen Primärmaßnahmen (z.B. Kapselung der Anlagen, Luftverdrängungsräume, Abdichtung der Übergabeeinrichtungen, Vermeidung hoher Fallhöhen, Umluftfördersysteme) sowie durch den Einsatz von nachgeschalteten Abscheidern können partikelförmige Emissionen vermieden oder vermindert werden.

Die besten verfügbaren Techniken zur Verminderung der Staubemissionen sind die Kombination der oben beschriebenen Primärmaßnahmen mit Sekundärmaßnahmen. Der BVT-Emissionswert für Staub im Reingas liegt bei Einsatz dieser Techniken unter 10 mg/m^3 als Tagesmittelwert.

5.3 Beste verfügbare Techniken zur Verminderung gasförmiger anorganischer Emissionen

Bei der Auswahl der Roh- und Brennstoffe sollte bereits auf deren chemische Zusammensetzung geachtet werden, da aus niedrigeren Gehalten an Schwefel-, Fluor- und Chlorverbindungen in vielen Fällen niedrigere Emissionen an gasförmigen anorganischen Verbindungen resultieren. Dieses gilt auch für die Emissionen an Stickstoffoxiden bei einem verringerten Einsatz von stickstoffhaltigen Bindemitteln. Daneben stehen Maßnahmen wie

beispielsweise die Optimierung der Brennführung oder der Zusatz kalkhaltiger Materialien und weitere in Abschnitt 4.1.1.2 beschriebene Primärmaßnahmen zur Verfügung.

Die besten verfügbaren Techniken zur Verminderung der gasförmigen anorganischen Emissionen sind eine Kombination der oben beschriebenen Primärmaßnahmen mit den ebenfalls in Abschnitt 4.1.1.2 beschriebenen Sekundärmaßnahmen.

Der BVT-Emissionswert für Fluor und seine dampf- oder gasförmigen Verbindungen im Reingas liegt bei Einsatz dieser Techniken unter 3 mg/m^3 (angegeben als Fluorwasserstoff) als Tagesmittelwert (bezogen auf einen Sauerstoffgehalt 17 Vol.-%).

Der BVT-Emissionswert für Schwefeloxide im Reingas liegt bei Einsatz dieser Techniken - insbesondere bei der Verwendung von mehrstufigen Schüttschichtfiltern - unter 350 mg/m^3 (angegeben als SO_2) als Tagesmittelwert (bezogen auf einen Sauerstoffgehalt 17 Vol.-%).

Insbesondere bei der Verwendung von Low- NO_x -Brennern kann bei Brenntemperaturen $< 1.400 \text{ }^\circ\text{C}$ ein BVT-Emissionswert für Stickoxide im Reingas von 350 mg/m^3 (angegeben als NO_2) als Tagesmittelwert (bezogen auf einen Sauerstoffgehalt 17 Vol.-%) erreicht werden.

5.4 Beste verfügbare Techniken zur Verminderung gasförmiger organischer Emissionen

Gasförmige organische Emissionen können durch die in Abschnitt 4.1.1.3 beschriebenen Primärmaßnahmen, wie beispielsweise die ofeninterne thermische Nachverbrennung von Schwelgasen, vermindert werden. Auch hier muss bereits bei der Roh- und Hilfsstoffauswahl darauf geachtet werden, den Anteil organischer Bestandteile so gering wie möglich zu halten.

Die besten verfügbaren Techniken zur Verminderung gasförmiger organischer Emissionen bestehen in der Auswahl von Roh- und Hilfsstoffen mit einem möglichst geringen Anteil organischer Bestandteile in Verbindung mit Sekundärmaßnahmen, wie der externen thermischen Nachverbrennung. Bei Anwendung dieser Techniken werden die in Tabelle 5-1 aufgeführten BVT-Emissionswerte für die organischen Schadstoffe bzw. Schadstoffgruppen unterschritten. Die aufgeführten BVT-Emissionswerte beziehen sich auf Tagesmittelwerte und einen Sauerstoffgehalt von 17 Vol.-%.

Tabelle 5-1: BVT-Emissionswerte bei Anwendung der in Abschnitt 4.1.1.3 beschriebenen Techniken

| Emissionskomponente | Einheit | Reingaskonzentration |
|------------------------------------|-----------------|----------------------|
| Summe der org. Stoffe als Gesamt-C | mg/m^3 | 20 |
| Benzol | mg/m^3 | 1,5 |

5.5 Beste verfügbare Techniken zur Verminderung der Lärmemissionen

Lärmemissionen können durch die in Abschnitt 4.1.1.4 beschriebenen Maßnahmen und Techniken, wie beispielsweise direkte und indirekte Lärminderung an den Aggregaten oder sekundäre Schallschutzmaßnahmen, vermindert werden. Dabei ist insbesondere eine Vermeidung lärmintensiver Arbeiten in den Abend- und Nachtstunden zu vermeiden.

5.6 Beste verfügbare Techniken zur Verminderung der Emissionen in das Wasser

Das bei der Herstellung keramischer Erzeugnisse anfallende Abwasser kann durch die in Abschnitt 4.1.2 beschriebenen Primär- und Sekundärmaßnahmen sowohl in Bezug auf die Abwassermenge als auch bezüglich schädlicher Abwasserinhaltsstoffe vermindert werden. Wichtige Primärmaßnahmen sind die getrennte Sammlung in einer Trennkanalisation oder der Ersatz von Nass- durch Trockenverfahren. Die besten verfügbaren Techniken zur Verminderung der Emissionen in das Wasser sind eine Kombination der oben beschriebenen Primärmaßnahmen mit den folgenden Sekundärmaßnahmen:

- Klärbecken,
- Schrägklärer,
- Kläreindicker,
- Entwässerungs-Container,
- Kiesfilter,
- Membranfilter,
- Zusatz von Flockungs- und Flockungshilfsmitteln.

Das aufbereitete Abwasser kann in vielen Produktionszweigen als Brauchwasser in den Produktionskreislauf zurückgeführt werden. Tabelle 5-2 zeigt die bei Anwendung der besten verfügbaren Techniken erreichbaren Rückführungsraten in Abhängigkeit verschiedener Produktionszweige.

Tabelle 5-2: Rückführungsraten des Abwassers bei Anwendung der BVT

| Produktionszweig | Rückführungsrate |
|--------------------------------|------------------|
| Keramische Fliesen und Platten | 100 % |
| Geschirrkераmik | 50 % |
| Sanitärkeramik | 50 % |
| Piezokeramik | 32 % |

6 Anhang

Die folgenden Abschnitte geben einen kurzen Überblick über die wesentlichen rechtlichen Rahmenbedingungen denen die Produktion keramischer Erzeugnisse in Deutschland unterliegt. Die Übersicht umfasst im Wesentlichen die deutsche Gesetzgebung sowie einige internationale Abkommen. Die Gesetzgebung auf europäischer Ebene wird in diesem Zusammenhang nicht betrachtet.

6.1 Informationen über rechtliche Rahmenbedingungen bei der Herstellung keramischer Erzeugnisse

An den Betrieb von Anlagen der Keramischen Industrie in Deutschland werden zahlreiche umweltrechtliche Anforderungen gestellt. Die Produktion keramischer Erzeugnisse ist sehr energieintensiv und zusätzlich eine potentielle Quelle für partikelförmige und gasförmige Emissionen sowie Abwasser und Abfall. Folglich bestehen eine Vielzahl gesetzlicher Regelungen, die Anforderungen stellen an:

- den Rohstoffverbrauch,
- den Energieverbrauch und die Abwärmenutzung,
- die Erhaltung und Verbesserung der Luftqualität,
- die Erhaltung und Verbesserung der Wasserqualität,
- die Vermeidung, Verwertung und Beseitigung von Abfällen,
- die Vermeidung von Lärm, Erschütterungen und Geruchsbelästigungen.

6.1.1 Bundeseinheitliche Gesetze

Bedeutende rechtliche Rahmenbedingungen für die Produktion keramischer Erzeugnisse befinden sich im Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) [37], im Wasserhaushaltsgesetz (WHG) [39] und im Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW-/AbfG) [38].

In Deutschland wird ein sektorales, auf einzelne Rechtsgüter bzw. Umweltmedien bezogenes Umweltrecht angewandt, wobei die endgültige Genehmigung zum Anlagenbetrieb unter Berücksichtigung der Umweltauswirkungen auf alle Medien von den zuständigen örtlichen Genehmigungsbehörden getroffen wird. Das gesetzlich festgelegte Vorsorge-Prinzip spielt bei der Festlegung von Grenzwerten im deutschen Umweltrecht eine wichtige Rolle.

Aufgrund der föderalen Struktur in Deutschland obliegt die Implementierung umweltrechtlicher Rahmenbedingungen der Verantwortung der Bundesländer, die unter Berücksichtigung der örtlichen Rahmenbedingungen die Genehmigungsverfahren unterschiedlich gestalten können. Bei der Errichtung von Neuanlagen und bei wesentlichen Änderungen an bestehenden Anlagen erfolgt das Genehmigungsverfahren entsprechend den gesetzlichen Anforderungen gegebenenfalls unter Öffentlichkeitsbeteiligung. Im Rahmen dieses Genehmigungsverfahrens kann die Durchführung einer Umweltverträglichkeitsprüfung im Rahmen des Gesetzes über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG) [36] erforderlich sein.

Tabelle 6-1 gibt einen Überblick über die rechtlichen Rahmenbedingungen zum Schutz der Umwelt entlang des Produktionsprozesses. In der Tabelle ist eine Auswahl der wesentlichen Gesetze, Verordnungen und weiterer untergesetzlichen Regelungen dargestellt.

Tabelle 6-1: Rechtliche Rahmenbedingungen zum Schutz der Umwelt entlang des Produktionsprozesses

| Bereich | Rechtsgebiet/ Gesetzliche Grundlage | Untergesetzliches Regelwerk |
|---|--|--|
| Genehmigung | Genehmigungsrecht | <ul style="list-style-type: none"> • Bundes-Immissionsschutzverordnungen |
| Transport | Verkehrsrecht | <ul style="list-style-type: none"> • Gefahrgutverordnung Straße • Gefahrgutverordnung Schiene • Gefahrgutverordnung Binnenschifffahrt |
| Gesundheits- und Arbeitsschutz | Chemikaliengesetz (ChemG) | <ul style="list-style-type: none"> • Chemikalienverbotsordnung • Gefahrstoffverordnung |
| | Gewerbeordnung | <ul style="list-style-type: none"> • TA Lärm • Arbeitsschutzgesetz • Arbeitsstättenverordnung und –richtlinien |
| Emissionen | Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) | <ul style="list-style-type: none"> • Bundes-Immissionsschutzverordnungen • Bundes-Immissionsschutzverwaltungs-vorschriften (TA Luft, TA Lärm) |
| | Wasserhaushaltsgesetz (WHG) | <ul style="list-style-type: none"> • Abwasserverordnung (AbwV){ Anhang 17} • Indirekteinleiterverordnungen oder Abwassergesetze der Länder • Anlagenverordnungen der Länder • Katalog wassergefährdender Stoffe • Lagerung und Transport wassergefährdender Stoffe (VAwS) |
| Vermeidung, Verwertung und Beseitigung von Abfällen | Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW-/AbfG) | <ul style="list-style-type: none"> • TA Abfall • TA Siedlungsabfall |
| Umweltmanagement | | <ul style="list-style-type: none"> • Öko-Audit • ISO 14000 |

6.1.2 Rechtliche Rahmenbedingungen zur Erhaltung der Luftqualität in Deutschland

Das Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) [37] stellt die grundlegende gesetzliche Basis für weitere untergesetzliche Regelungen zur Kontrolle der Luftverschmutzung dar. Es zielt in erster Linie auf den Schutz des Mediums Luft ab, betrifft aber auch die Medien Wasser und Boden, sofern die Umweltbelastung durch das Medium Luft transferiert wird. Das BImSchG ist in weiteren Verordnungen und Verwaltungsvorschriften, wie z.B. der Technischen Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft) [1] näher geregelt. Insbesondere die TA Luft als Behördenvorschrift führt detaillierte Anforderungen auf, die Gegenstand der Anlagengenehmigung sind.

6.1.2.1 Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG)

Das BImSchG ist das gesetzliche Instrument zur Überwachung der Luftverschmutzung. Immissionen sind dabei per Gesetz definiert, sowohl als Luftverunreinigungen als auch als Geräusche, Erschütterungen, Licht, Wärme, Strahlen sowie ähnlichen Umwelteinwirkungen und den damit verbundenen Auswirkungen auf Menschen, Tiere, Pflanzen oder Kultur- und Sachgüter. Dieses Konzept implementiert bereits bis zu einem gewissen Grad den medienübergreifenden Ansatz. Das BImSchG verlangt von den Länderbehörden: 1.) Mitarbeiter zur Überwachung von Anlagen, die Gegenstand der Genehmigung sind, zu entsenden; 2.) Anforderungen an die Genehmigung der Anlagen zu stellen; und 3.) gegebenenfalls Emissionsgrenzwerte und Maßnahmen zur Emissionsüberwachung für Anlagen aufzuerlegen. Besonders Art. 5 (1) 3 BImSchG zielt auf die Vermeidung und Verminderung von Abfällen und Rückständen. Dieser Paragraph unterstreicht die medienübergreifenden Einflüsse der industriellen Produktion. Das Konzept des „Standes der Technik“ ist im BImSchG ähnlich definiert wie das der BVT:

Stand der Technik im Sinne dieses Gesetzes ist der Entwicklungsstand fortschrittlicher Verfahren, Einrichtungen oder Betriebsweisen, der die praktische Eignung einer Maßnahme zur Begrenzung von Emissionen gesichert erscheinen lässt. Bei der Bestimmung des Standes der Technik sind insbesondere vergleichbare Verfahren, Einrichtungen oder Betriebsweisen heranzuziehen, die mit Erfolg im Betrieb erprobt worden sind. (Art. 3 (6) BImSchG)

Der Stand der Technik findet seinen Ausdruck durch die Emissionsgrenzwerte, die von den Genehmigungsbehörden auferlegt werden. Die Wahl der Technik zur Einhaltung des Grenzwertes kann von der Industrie getroffen werden. Notwendige Vorsichtsmaßnahmen gegen schädliche Einwirkungen auf die Umwelt werden durch Kontrollmaßnahmen entsprechend des Standes der Technik individuell getroffen. In Abhängigkeit vom Massenstrom müssen einige Substanzen kontinuierlich gemessen werden (z.B. SO_x, NO_x und partikelförmige Emissionen).

6.1.2.2 Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft)

Die Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft) [1] wurde als generelle administrative Anweisung in Verbindung mit Paragraph 48 BImSchG festgelegt. Die TA Luft regelt weiterhin die Anforderungen an genehmigungspflichtige Anlagen, die nicht in anderen Regelungen spezifiziert sind. Deshalb werden Grenzwerte für eigentlich alle Luftschadstoffe sowie strukturelle und operationale Anforderungen zur Minimierung diffuser Emissionen geregelt. Es werden dabei einerseits Standards gesetzt und andererseits Verfahren zur Einschätzung von Immissionen und Emissionen beschrieben.

Die TA Luft von 1986 wird derzeit novelliert. Die Emissionsgrenzwerte werden dem Stand der Technik angepasst.

6.1.2.3 Vierte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (4.BImSchV)

Zusätzlich zu den in der TA Luft aufgeführten Emissionsgrenzwerten regelt die 4. Verordnung zur Durchführung des BImSchG (4. BImSchV) [121] unter den Punkten 2.4 und 2.10 die Genehmigungspflicht von Anlagen zur Herstellung keramischer Erzeugnisse.

6.1.2.4 Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm (TA Lärm)

Die Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm (TA Lärm) [5] gibt die Immissionsrichtwerte für Beurteilungspegel verschiedener Immissionsorte außerhalb von Gebäuden vor. Tabelle 6-2 zeigt die zulässigen Lärmpegel in Abhängigkeit von den Immissionsorten.

Tabelle 6-2: Zulässige Lärmpegel in Abhängigkeit des Immissionsortes

| Immissionsort | tags | nachts |
|--|-----------|-----------|
| Industriegebiete | 70 dB (A) | 70 dB (A) |
| Gewerbegebiete | 65 dB (A) | 50 dB (A) |
| Kerngebiete, Dorfgebiete und Mischgebiete | 60 dB (A) | 45 dB (A) |
| Allgemeine Wohngebiete und Kleinsiedlungsgebiete | 55 dB (A) | 40 dB (A) |
| Reine Wohngebiete | 50 dB (A) | 35 dB (A) |
| Kurgebiete, Krankenhäuser und Pflegeanstalten | 45 dB (A) | 35 dB (A) |

Quelle: [5]

6.1.3 Rechtliche Rahmenbedingungen zur Erhaltung der Wasserqualität in Deutschland

Das Wasserhaushaltsgesetz (WHG) [39] ist, analog zum BImSchG in Bezug auf die Luftreinhaltung, die gesetzliche Basis für weitere, das Medium Wasser betreffende, rechtliche Rahmenbedingungen.

Es behandelt Abwässer aus verschiedensten industriellen Prozessen, darunter auch das bei der Herstellung keramischer Erzeugnisse anfallende Abwasser. In Übereinstimmung mit dem WHG bedarf die Benutzung oberirdischer Gewässer, der Küstengewässer und des Grundwassers ebenfalls der Überprüfung durch die entsprechenden Behörden. Die Wassergesetzgebung ist durch die Abwasserverordnung (AbwV) [120] näher geregelt. Neben sehr allgemein gehaltenen Anforderungen an die Abwasserzusammensetzung sind sowohl Anforderungen an Analyse- und Messverfahren als auch Grenzwerte für spezifische Substanzen in den Anhängen der AbwV für verschiedene Industriebereiche festgelegt. Die Herstellung keramischer Erzeugnisse wird in Anhang 17 dieser Verordnung näher behandelt. In Abhängigkeit von den lokalen Begebenheiten können die zuständigen Ordnungsbehörden strengere Anforderungen an das Abwasser stellen.

Tabelle 6-3 zeigt die in Anhang 17 (AbwV) festgelegten Anforderungen an das Abwasser der Keramischen Industrie.

Tabelle 6-3: Anforderungen an das Abwasser nach Anhang 17 der AbwV

| Abwasserbestandteile | Einheit | Konzentration ^{1.)} |
|---|---------|------------------------------|
| Abfiltrierbare Stoffe ^{2.)} | mg/l | 50 |
| Chemischer Sauerstoffbedarf (CSB) ^{2.)} | mg/l | 80 |
| Phosphor (gesamt) ^{2.)} | mg/l | 1,5 |
| Adsorbierbare organisch gebundene Halogene (AOX) ^{3.)} | mg/l | 0,1 |
| Blei ^{3.)} | mg/l | 0,3 |
| Cadmium ^{3.)} | mg/l | 0,07 |
| Chrom (gesamt) ^{3.)} | mg/l | 0,1 |
| Kobalt ^{3.)} | mg/l | 0,1 |
| Kupfer ^{3.)} | mg/l | 0,1 |
| Nickel ^{3.)} | mg/l | 0,1 |
| Zink ^{3.)} | mg/l | 2 |

^{1.)} Qualifizierte Stichprobe oder 2-Stunden-Mischprobe

^{2.)} Abwasserkonzentration bei Einleitung

^{3.)} Abwasserkonzentration vor Vermischung

Neben den speziellen Anforderungen an das Abwasser werden in Anhang 17 allgemeine Anforderungen an die Einleitung gestellt. So dürfen Abwässer aus den Bereichen der Feuerfestherstellung, Schleifwerkzeug-, Spaltplatten-, Fliesen- und Ziegelherstellung mit Ausnahme des bei der Reinigung und Wartung der Anlagen anfallenden Abwassers nicht eingeleitet werden. Das Einleiten von Abwasser ist nur zulässig, wenn es aus der Herstellung von Piezo-Keramik zu 50 Prozent, aus der Herstellung von Geschirrkemik mindestens zu 50 Prozent sowie aus der Sanitärkeramik zu mindestens 30 Prozent wiederverwendet worden ist.

6.1.4 Rechtliche Rahmenbedingungen zur Vermeidung, Verwertung und Beseitigung von Abfällen in Deutschland

Das deutsche Abfallrecht basiert auf dem Gesetz zur Vermeidung, Verwertung und Beseitigung von Abfällen (GVVB) [40]. Es regelt den Umgang und die Lagerung von Abfällen, z.B. von Stoffen, die vom Hersteller beseitigt werden müssen, oder von Stoffen deren weitere Behandlung zum Schutz der Umwelt notwendig ist. Weitere Anforderungen beziehen sich auf den Abfall einzelner Anlagen.

Weitere rechtliche Rahmenbedingungen, die im Wesentlichen auf die Vermeidung, Verwertung und Beseitigung von Abfällen abzielen, sind im Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen (KrW-/AbfG) [118] festgelegt, das im Oktober 1996 in Kraft trat und den wichtigsten Teil des neuen GVVB darstellt. Es dehnt sich auf das gesamte nationale Abfallkonzept aus und setzt neue Prioritäten bzgl. der Berücksichtigung der Abfallvermeidung und der Pflicht zur Abfallverwertung. Das KrW-/AbfG legt außerdem die Produktverantwortung des Herstellers fest.

Für Genehmigungsverfahren legen untergesetzliche Regelungen wie die zweite allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz (Teil 1: Technische Anleitung zur Lagerung, chemisch/physikalischen, biologischen Behandlung, Verbrennung und Ablagerung von besonders überwachungsbedürftigen Abfällen – TA Abfall) [2] oder die dritte allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz (Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen – TA Siedlungsabfall) [3] weitere Anforderungen fest. Die TA Abfall regelt Planung, Genehmigung, Bau und Betrieb von Anlagen zur Abfallbehandlung und Abfallbeseitigung. Anlagen zur Abfallbehandlung müssen unter anderem die Anforderungen der auf Art. 5 (BImSchG) basierenden Erlasse erfüllen.

Die Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) hat eine 589 Abfalltypen umfassende kategorische Unterteilung der Abfälle vorgenommen, von denen 333 Gegenstand besonderer Kontrolle sind (LAGA-Abfallartenkatalog). Dieser Katalog wurde 1999 vom europäischen Abfallkatalog (EAK) abgelöst. Zum Übergang auf den EAK wurde von der LAGA ein LAGA-Umsteigekatalog ausgearbeitet. Unter dem Abschnitt „Abfälle aus der Herstellung von Keramikerzeugnissen, Ziegeln, Fliesen und Baustoffen“ (EAK-Code 1012) werden als typische Abfälle Gemenge vor der thermischen Verarbeitung (EAK-Code 1012 01), Feinstaub (EAK-Code 1012 02), andere Teilchen und Staub (EAK-Code 1012 03), feste Abfälle aus der Gasreinigung (EAK-Code 1012 04), Schlämme aus der Gasreinigung (EAK-Code 1012 05), verworfene Formen (EAK-Code 1012 06), verbrauchte Auskleidungen und feuerfeste Materialien (EAK-Code 1012 07) und sonstige Abfälle (EAK-Code 1012 99) genannt [60].

6.1.5 Internationale Regelungen

In diesem Abschnitt wird ein kurzer Überblick wichtiger Regelung auf internationaler Ebene gegeben. Internationale Regelungen und Vereinbarungen werden auf verschiedenen Ebenen ausgearbeitet. Neben der europäischen Ebene, die nicht Gegenstand dieser Betrachtung ist, müssen in diesem Zusammenhang verschiedene internationale Ausschüsse und Programme der vereinten Nationen, wie das UNEP, UNCED, UNECE, WHO und die IFCS genannt werden. Zusätzlich befasst sich die OECD mit dem Umweltschutz. Wichtige internationale Regelungen, Abkommen und Projekte, zur Vermeidung der Verschmutzungen in die verschiedenen Umweltmedien sind beispielweise das Übereinkommen über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigungen (engl. LRTAP-Convention), das Baseler Abkommen [9], die Entscheidung der OECD über grenzüberschreitende Verbringung gefährlicher Abfälle, Abkommen über den Schutz der Gewässer und das globale Umwelt-Monitoring-System (engl. GEMS).

Internationale Anstrengungen zur Verminderung der schädlichen, grenzüberschreitenden Einflüsse von saurem Regen auf Wälder, Gewässer und die Gesundheit der Menschen durch die international koordinierte Verminderung der Emissionen wurden 1979 durch das Übereinkommen über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigungen (engl. Long Range Transboundary Air Pollution - LRTAP-Convention) unternommen. Nach Inkrafttreten im Jahre 1983 wurde die LRTAP-Konvention 1984 durch das Protokoll über die Langzeitfinanzierung, 1985 durch das Helsinki-Protokoll über die Reduzierung der Schwefelemissionen und der Senkung der grenzüberschreitende Ströme um mindestens 30 %, 1988 durch das Sofia-Protokoll über das Einfrieren der Stickoxidemissionen, 1991 durch das Genfer Protokoll über die Kontrolle der VOC-Emissionen und 1994 durch das Oslo-Protokoll über die weitere Verminderung die Schwefeldioxidemissionen erweitert.

Im Baseler Abkommen [9] wird die Verantwortung der OECD-Staaten für die grenzüberschreitende Verbringung gefährlicher Abfälle und deren Lagerung geregelt. Das Abkommen wurde im März 1989 angenommen und trat im Mai 1992 in Kraft. 1996 traten bereits 100 Staaten und die Europäische Union dem Abkommen bei. Das Abkommen umfasst unter anderem technische Richtlinien zum Abfallmanagement. In diesen Richtlinien werden Stoffe in verschiedene Stoffklassen mit einem Exportverbot (Liste A) und in weitere Stoffklassen, die noch in Nicht-OECD-Staaten exportiert werden dürfen, eingeteilt.

Als Reaktion auf das Baseler Abkommen der Vereinten Nationen ratifizierte die OECD die Entscheidung C 88(90). Es wurde vorgeschlagen, ein drei-stufiges System zur Kontrolle zu entwerfen und zur Überwachung der grenzüberschreitenden Abfallbewegungen einzusetzen. Abfälle der grünen Liste, die zur Wiederverwendung bestimmt sind, werden zwischen den

OECD-Mitgliedsstaaten zur Wiederverwendung hin und her bewegt und sind Gegenstand der normalen bestehenden Kontrollen des Güterverkehrs. Für Abfälle der gelben Liste, die zur Wiederverwendung bestimmt sind, wird ein Benachrichtigungsverfahren eingeführt, und Abfälle der roten Liste unterliegen schärferen Kontrollen.

Zum Schutz der Gewässer wurden zahlreiche internationale Abkommen geschlossen. Zu den wichtigsten Abkommen gehört die Konvention der Oslo-Paris-Kommission (OSPARCOM) zum Schutz der Nordsee und des Nordost-Atlantiks und die Konvention der Helsinki-Kommission (HELCOM) zum Schutz der Ostsee. Zusätzlich bestehen weitere Verträge zur Vermeidung und Verminderung der Verschmutzung von europäischen Gewässern (z.B. Nordseeschutzkonferenz), der Seen (z.B. Bodensee) und der Flüsse (z.B. Rhein, Elbe, Donau).

Die UNEP und die WHO betreiben zusammen das globale Umwelt-Monitoring-System GEMS (Global Environment Monitoring System) zur Überwachung der Luftqualität in Städten (AIR), der Nahrung und des Wassers.

7 Literatur

- [1] 1. *Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundesimmissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft) vom 27. Februar 1986*, in: GMBI, S. 95 (1986)
- [2] 2. *Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz (TA Abfall, Teil 1: Technische Anleitung zur Lagerung, chemisch/physikalischen und biologischen Behandlung und Verbrennung von besonders überwachungsbedürftigen Abfällen) vom 12. März 1990*, in: GMBI, S. 169 (1990)
- [3] 3. *Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz (TA Siedlungsabfall, Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen) Bekanntmachung des Bundesumweltministeriums vom 14. Mai 1993*, in: BAnz Nr. 99a vom 29. Mai 1993 (1993)
- [4] Adlhoch, H.-J.; Dürlich, W.: *Trockenabscheidung von Glasurspritznebel mit dem Sinterlamellenfilter*, in: Ceramic Forum International, Nr. 11 - 12, S. 698 - 702, Bauverlag, Wiesbaden und Berlin (1994)
- [5] *Allgemeine Verwaltungsvorschrift über genehmigungsbedürftige Anlagen nach § 16 der Gewerbeordnung (TA Lärm: Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm, Beilage)*, in: BAnz Nr. 137 (1994)
- [6] Angaben eines Sanitärkeramikbetriebes; Betrieb ist den Autoren bekannt
- [7] Bartusch, R. : *Granulieren keramischer Massen*, in: Das Keramiker Jahrbuch 1998, S. 23 - 41, Bauverlag, Wiesbaden und Berlin (1997)
- [8] Bartusch, R.: *Status and tendencies in the Shaping of Whitewares*, in: Ceramic Forum International, Nr. 7 - 8, S. 361 - 367, Bauverlag, Wiesbaden und Berlin (1997)
- [9] *Basel Convention on the Control of Transboundary Movements of Hazardous Waste and their Disposal*, in: Official Journal of the European Community, 16. Februar 1993 (1993)
- [10] Bender, W.: *Dachziegelpressen für Flächenziegel und Zubehörziegel*, in: Ziegelindustrie International, Nr. 5, S. 243 - 265, Bauverlag, Wiesbaden und Berlin (1998)
- [11] Bender, W.: *Entwicklungen und Tendenzen beim Bau von Dachziegelwerken - Teil 2*, in: Ziegelindustrie International, Nr. 9, S. 562 - 571, Bauverlag, Wiesbaden und Berlin (1997)
- [12] Bender, W.: *Entwicklungen und Tendenzen beim Bau von Dachziegelwerken Teil 1*, in: Ziegelindustrie International, Nr. 8, S. 485 - 496, Bauverlag, Wiesbaden und Berlin (1998)
- [13] Bender, W.: *Moderner Schnellbrand - Ultima ratio der Brenntechnik*, in: Ziegelindustrie International, Nr. 9, S. 553 - 569, Bauverlag, Wiesbaden und Berlin (1998)
- [14] Bender, W.; Händle, F.: *Handbuch für die Ziegelindustrie*, Bauverlag, Wiesbaden und Berlin (1982)
- [15] Bennerscheidt, I.: *Die Umweltschutzprobleme feinkeramischer Produktionsbetriebe*, VDI-Verlag, Düsseldorf (1981)
- [16] Berentelg, R.; Lindemann, H.: *Energieeinsparung bei der Herstellung von Pflasterklinkern*, in: Ziegelindustrie International, Nr. 9, S. 603 - 606, Bauverlag, Wiesbaden und Berlin (1996)
- [17] Bericht der Arbeitsgemeinschaft des Unterausschusses Luft/Technik des Länderausschusses für Immissionsschutz: *Erarbeitung von Anforderungen zur Emissionsbegrenzung von Dioxinen und Furanen - Band 9*, Erich Schmidt Verlag, Berlin (1994)
- [18] Bettzieche, H.: *Verwertung von Zuschlagstoffen in der Produktion keramischer Baustoffe*, in: Ziegel Zeitschrift, Nr. 2, S. 112 - 116, Verlag Schmid GmbH, Freiburg (1997)
- [19] Bittner, H.-G.; Petersohn, B.: *Umsetzung von Schnellbrandkonzepten in Forschung und Entwicklung*, in: GASWÄRME International, Nr. 5, S. 221 - 225, Vulkan-Verlag, Essen (1995)
- [20] Bohlmann, C.; Quirnbach, P.: *Anmachwasserreduzierung mit Additiven - ein Beitrag zur Energiekosteneinsparung*, in: Ziegelindustrie International, Nr.1-2, S. 35 - 44, Bauverlag, Wiesbaden und Berlin (1998)

- [21] Brenner, J.: *Wirtschaftliche Fluorabscheidung in der Ziegel- und Dachsteinindustrie*, in: WLB Wasser, Luft und Boden, Nr. 6, S. 70 - 72, Mainz (1997)
- [22] Clauss, U.: *Möglichkeiten und Grenzen im Hinblick auf den Schnellbrand von Produkten der Baukeramik*, in: Ziegelindustrie International, Nr. 5, S. 246 - 253, Bauverlag, Wiesbaden und Berlin (1997)
- [23] Cubbon, R.: *Neue Formgebungsverfahren in der Geschirrkemik*, in: Keramische Zeitschrift, Nr. 7, S. 459 - 463, Freiburg (1994)
- [24] Denissen, J; Velthuis, J.: *Energiewirksames Trocknen - Teil 2: Dampftrocknung*, in: Ziegelindustrie International, Nr.9, S. 587 - 597, Bauverlag, Wiesbaden und Berlin (1998)
- [25] Der Rat der Europäischen Union: *Richtlinie 96/61/EG*, Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften vom 10.10.1996 (1996)
- [26] Didier Werke AG: *Feuerfeste Werkstoffe und ihre Merkmale*, Didier Werke AG, Wiesbaden (1997)
- [27] Enrique, N.: *Prevention et reduction integree de la pollution: L'exemple de l'industrie des carreaux ceramiques*, in: L'Industrie ceramique & verriere, Nr.8, S. 452 - 464, Paris (1998)
- [28] European Clay Brick and Roof Tile Industry: *Draft Reference Document on best available techniques in the Clay Brick and Roof Tile Industry*, Brüssel (1998)
- [29] Ferber, C.: *Möglichkeiten und Grenzen beim Schnellbrand keramischer Massen*, in: Ceramic Forum International, Nr. 9, S. 489 - 491, Bauverlag, Wiesbaden und Berlin (1996)
- [30] Filz, D.; Gerhart, P.; Probst, R.: *Demonstrationsanlage zur Rückführung des Betriebsabwassers als Brauchwasser in die Geschirrinindustrie*, Programm des Bundesministers für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Vorhaben Nr. 20441 - 2/8, Bonn (1993)
- [31] Firmeninformation der Andreas Hässler Anlagenbau GmbH, Jahnstraße 45, 89155 Erbach
- [32] Firmeninformation der Hellmich GmbH & Co. KG, Postfach 1208, 32269 Kirchlegern
- [33] Firmeninformation der HF Absorb AG, P.O. Box 163, CH-4332 Stein
- [34] Firmeninformationen der Herding Filtertechnik GmbH, August-Borsig-Str. 3, 92224 Amberg
- [35] Firmeninformationen der Keller Lufttechnik GmbH + Co KG, Postfach 1341, 73221 Kirchheim
- [36] *Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG)*, in: BGBl I, S. 205 (1990), zuletzt geändert durch Gesetz vom 9.10.1996, BGBl I, S. 1498, Bonn (1996)
- [37] *Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz – BImSchG)*, in: BGBl I, S. 880 (1990), zuletzt geändert durch Gesetz vom 9.10.1996, BGBl I, S. 1498, Bonn (1996)
- [38] *Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen (Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz – KrW-/AbfG) vom 27. September 1994*, in: BGBl I, S. 2705, Bonn (1994)
- [39] *Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz – WHG) vom 27. Juli 1957, in der Neufassung vom 12. November 1996*, in: BGBl I, S.1696, Bonn (1996)
- [40] *Gesetz zur Vermeidung, Verwertung und Beseitigung von Abfällen vom 27.9.1994*, in: BGBl I, S. 2705, Bonn (1994)
- [41] Gleser, K.; Probst, P.; Wender, F.-R.: *Verwertung von Produktionsschlämmen aus der keramischen Produktion*, Altanlagenprogramm des Bundesministers für Umwelt und Reaktorsicherheit, Vorhaben Nr. 30441 - 7/2, Bonn (1989)
- [42] Gleser, K.; Probst, R.; Ender, F.: *Nachklärung von gereinigtem Abwasser durch Filtration und dessen partieller Wiedereinsatz in der feinkeramischen Produktion*, Altanlagenprogramm des Bundesministers für Umwelt und Reaktorsicherheit, Vorhaben Nr. 20441-7/1, Bonn (1989)

- [43] Hauck, D.; Ruppik, M.; Hilker, E.: *Minderung der Fluor-Emission durch Wiedereinbindung in der Anwärmszone – abschließende Beurteilung* -, in: ZI Jahrbuch 1992 S. 47 - 73, Bauverlag, Wiesbaden und Berlin (1992)
- [44] Hesse, V.: *Energiesparende Tunnelofenwagen-Systeme für die grobkeramische Industrie*, in: Ziegelindustrie International, Nr. 10, S. 713 - 720, Bauverlag, Wiesbaden und Berlin (1996)
- [45] Heuschkel, H.; Muche, K.: *ABC Keramik*, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig (1974)
- [46] Informationen des Ingenieurbüros für Umweltfragen Dr. Probst, Hollandstr. 14, 66663 Merzig
- [47] Irretier, O., Koch, C.: *Katalysatoren in der Ofentechnik*, in: Ceramic Forum International, Nr. 10, S. 587 - 591, Bauverlag, Wiesbaden und Berlin (1997)
- [48] Jeschar, R.; Specht, E.; Steinbrück, A.: *Energieverbrauch und CO₂-Emission bei der Herstellung und Entsorgung von Abwasserrohren aus verschiedenen Werkstoffen*, in: Korrespondenz Abwasser, Nr. 4, S. 537 - 549, Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik, Bonn (1995)
- [49] Jeschar, R.; Specht, E.; Steinbrück, A.: *Kumulative Energieverbräuche von Abwasserrohren*, in: Ziegelindustrie International, Nr. 4, S. 245 - 254, Bauverlag, Wiesbaden und Berlin (1995)
- [50] Jeschar, R.; Specht, E.; Steinbrück, A.: *Ökobilanzen für die Herstellung von Abwasserrohren*, in: Ziegelindustrie International, Nr. 4, S. 224 - 230, Bauverlag, Wiesbaden und Berlin (1996)
- [51] Junge, K.: *Auswirkungen des Sonntagsarbeitsverbots auf den Energiebedarf von Ziegeleien*, in: Ziegelindustrie International, Nr.6, S. 327 - 336, Bauverlag, Wiesbaden und Berlin (1998)
- [52] Jungk, E.: *JUWÖ Journal*, Informationen für Freunde und Partner der JUWÖ POROTON-Werke, Wöllstein (1997)
- [53] Jungk, E.: *Wir stellen uns vor: Rundgang durch das Planziegel-Werk III*, Firmenbroschüre der JUWÖ POROTON-Werke Ernst Jungk & Sohn GmbH, Wöllstein (1997)
- [54] Jungk, E.; Halseband, H.; Ebert, K.; Krcmar, W.: *Porosierungsmittel für die Leichtziegel-Herstellung*, in: Ziegel ZEITSCHRIFT, Nr. 2, S. 124 - 129, Verlag Schmid GmbH, Freiburg (1997)
- [55] Kolkmeier, H.: *Emissionsschutz in der Ziegelindustrie*, in: Ziegelindustrie International, Nr. 10, S. 516 - 530, Bauverlag, Wiesbaden und Berlin (1986)
- [56] Krause, E.; Berger, I.; Nehlert, F.; Wiegmann, J.: *Technologie der Keramik Band 1 - Verfahren Rohstoffe Erzeugnisse*, VEB Verlag für Bauwesen, Berlin (1985)
- [57] Krause, E.; Berger, I.; Nehlert, F.; Wiegmann, J.: *Technologie der Keramik Band 2 - Mechanische Prozesse* -, VEB Verlag für Bauwesen, Berlin (1985)
- [58] Krebs, S.; Mörtel, H.: *The Use of Secondary Pore-Forming Agents in Brick Production*, in: Tile & Brick Int., Nr. 1, S. 12 - 18, Verlag Schmid GmbH (1999)
- [59] Kruse, O.: *Fachkunde für Fliesenleger*, B.G. Teubner, Stuttgart (1995)
- [60] Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (Hrsg.): *Zuordnung LAGA-Abfallschlüssel zum Europäischen Abfallkatalog und zu den OECD-Codes*, Erich Schmidt Verlag, Berlin (1996)
- [61] Leisenberg, W.: *Wege zur effizienten Nutzung von Energie*, in: Ziegelindustrie International, Nr. 7, S. 434 - 440, Bauverlag, Wiesbaden und Berlin (1998)
- [62] Liere-Netheler, W.: *Schürlochbrenner - ein weiterer Schritt zur Automatisierung in der Keramikindustrie*, in: GASWÄRME International, Nr. 6, S. 264 - 270, Vulkan-Verlag, Essen (1996)
- [63] Lingl, H.: *Technische Trends zur Energieeinsparung bei der Ziegelherstellung*, in: Ziegelindustrie International, Nr.12, S. 885 - 892, Bauverlag, Wiesbaden und Berlin (1997)
- [64] Lingl, H.: *Zukunftsweisendes für die Brenntechnik bei der Herstellung von Hintermauerziegeln*, in: Keramische Zeitschrift, Nr. 10, S. 845 - 850, Freiburg (1998)
- [65] Lips, W.: *Drehscheibe Ost für Steinzeugrohre und Formstücke*, in: Ziegelindustrie International, Nr. 4, S. 236 - 242, Bauverlag, Wiesbaden und Berlin (1995)

- [66] Lorenz, A.: *Mischen und Homogenisieren von Tonen und tonigen Rohstoffen*, in: Das Keramiker Jahrbuch 1998, S. 13 - 41, Bauverlag, Wiesbaden und Berlin (1997)
- [67] MKL Ingenieurgesellschaft mbH: *Anlagenbezogene CO₂-Minderungspotentiale bei der Dachziegelherstellung*, Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, München (1998)
- [68] MKL Ingenieurgesellschaft mbH: *Leitfaden zur Ermittlung anlagenbezogener CO₂-Minderungspotentiale und zur Einführung eines Energiemanagementsystems nach Öko-Audit-Verordnung in Porzellanfabriken*, Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, München (1997)
- [69] Müller, W.: *Abgasreinigung in der Ziegelindustrie - eine Marktübersicht*, in: ZI-Jahrbuch 1998, S. 130 - 148, Bauverlag, Wiesbaden und Berlin (1997)
- [70] Müller, W.: *Abgasreinigung in der Ziegelindustrie - Teil 2: Gasförmige organische Stoffe*, in: Ziegelindustrie International, Nr. 2, S. 107 - 131, Bauverlag, Wiesbaden und Berlin (1995)
- [71] Müller, W.: *Abgasreinigungsanlagen in der Ziegelindustrie - Teil 1: Gasförmige anorganische Stoffe*, in: Ziegelindustrie International, Nr. 7-8, S. 487 - 490, Bauverlag, Wiesbaden und Berlin (1994)
- [72] Müller, W.: *Erklärung der deutschen Ziegelindustrie zur Energieeinsparung und Klimavorsorge*, in: Ziegelindustrie International, Nr.9, S. 592 - 602, Bauverlag, Wiesbaden und Berlin (1996)
- [73] N.N.: *Abwasseraufbereitung am Beispiel eines Porzellanwerkes*, in: Keramische Zeitschrift, Nr. 5, S. 382, Freiburg (1995)
- [74] N.N.: *Die Herstellung feuerfester Werkstoffe*, Verband der Deutschen Feuerfest-Industrie e.V. (1998)
- [75] N.N.: *Ein „brand-neues“ Automatisierungskonzept für die Flachgeschirrfertigung*, in: Keramische Zeitschrift, Nr. 1, S. 30 - 32, Freiburg (1995)
- [76] N.N.: *Entwässerungscontainer*, Firmeninformation der Leiblein GmbH, Hardheim
- [77] N.N.: *Frischer Wind auf dem Markt für Steinzeugrohre*, in: Wasser, Luft und Boden, Nr. 10, S. 44 - 45, Mainz (1994)
- [78] N.N.: *Industrieofen-Anlagen für Keramik - Baukeramik -*, Firmeninformation der Riedhammer GmbH und Co. KG, Nürnberg (1998)
- [79] N.N.: *Industrieofen-Anlagen für Keramik - Geschirrkemik -*, Firmeninformation der Riedhammer GmbH und Co. KG, Nürnberg (1998)
- [80] N.N.: *Innovative Technik bei der Produktion von Hochlochziegeln*, in: Ziegelindustrie International, Nr. 4, S. 177 - 187, Bauverlag, Wiesbaden und Berlin (1998)
- [81] N.N.: *Kahla - Eine der modernsten Geschirrkemik-Fabriken*, in: Ceramic Forum International, Nr. 1-2, S. D 13 , Bauverlag, Wiesbaden und Berlin (1999)
- [82] N.N.: *Klär- und Eindickanlage - Feststoffabscheider System Dr. Kronenberger*, Firmenbroschüre der Ingenieurbüro Dr.-Ing. G. Kronenberger GmbH, Bottrop
- [83] N.N.: *Maßgeschneiderte Automatisierungskonzepte für die Sanitär- und Geschirrfertigung*, in: Keramische Zeitschrift , Nr. 12, S. 976 - 979, Freiburg (1994)
- [84] N.N.: *Pressdachziegel ohne H-Kassetten*, in: Ceramic Forum International, Nr. 4, S. 67 - 68, Bauverlag, Wiesbaden und Berlin (1998)
- [85] N.N.: *Recovery of glaze in sanitaryware manufacture*, in: Filtration and Separation, Nr. 2, S. 123 - 126, Croydon (1996)
- [86] N.N.: *Reference Document on the best available techniques in the Vitrified Clay Pipe Industry – Version May 5, 2000*, European Vitrified Clay Pipe Industry (2000)
- [87] N.N.: *Schnellglattbrandtechnik für die Jahrtausendwende*, in: Keramische Zeitschrift, Nr. 4, S. 303 - 304, Freiburg (1995)
- [88] N.N.: *Self-recuperative Burner Offers 25 % Energy Saving*, in: Tile & Brick International, Nr. 2, S. 130, Schmid-Verlag, Freiburg (1996)

- [89] N.N.: *Senkung des Anmachwasserbedarfs und der Trocknungsenergie durch Zusatzstoffe und optimierte Heißverformung*, in: Ziegelindustrie International, Nr. 8, S. 528 - 529, Bauverlag, Wiesbaden und Berlin (1998)
- [90] N.N.: *Sinterhilfsmittel zur Absenkung der Garbrandtemperatur und Energieeinsparung*, in: Ziegelindustrie International, Nr. 10, S. 686 - 687, Bauverlag, Wiesbaden und Berlin (1998)
- [91] N.N.: *Wasseraufbereitungsanlage SO 476*, Firmeninformation der Leiblein GmbH, Hardheim (1995)
- [92] Neckermann, G.; Wessels, H.: *Die feinkeramische Industrie - ein Branchenbild*, Verlag Duncker & Humblot, Berlin (1992)
- [93] Niemer, E.U.: *Praxis-Handbuch Fliesen*, Verlagsgesellschaft Rudolf Müller, Bau-Fachinformationen, Köln (1996)
- [94] Onken, U.: *Chemische Prozesskunde*, Georg Thieme Verlag, Stuttgart (1996)
- [95] Pauls, N.: *Minderung der Schwefeloxidemission beim Tunnelofenbrand durch Zusätze zum Rohmaterial*, in: Ziegelindustrie International, Nr. 1-2, S. 53 - 55, Bauverlag, Wiesbaden und Berlin (1997)
- [96] Peetz, H.: *Einsatz von Blockheizkraftwerken in der Ziegelindustrie*, in: Ziegelindustrie International, Nr. 4, S. 169 - 178, Bauverlag, Wiesbaden und Berlin (1997)
- [97] Probst, R.: *Reststoffverwertung in der feinkeramischen Industrie*, in: Keramische Zeitschrift, Nr. 8, S. 555 - 558, Freiburg (1990)
- [98] Reed, J.: *Principles of Ceramics Processing*, Wiley-Interscience, New York (1995)
- [99] Reh, H.: *Weltproduktion Fliesen: Technologie, Märkte und Aussichten*, in: Ceramic Forum International, Nr. 4, S. 239 - 243, Bauverlag, Wiesbaden und Berlin (1996)
- [100] Rickli, M.; Eggenberger, U.; Peters, T.: *Feinstanteil von Tunnelausbruch als sekundärer Rohstoff in grobkeramischen Produkten*, in: Ziegelindustrie International, Nr. 12, S. 818 - 827, Bauverlag, Wiesbaden und Berlin (1998)
- [101] Rimpel, E.; Richter, F.: *Einfluss der Tunnelofenwagenkonstruktion auf den Energiebedarf von Tunnelöfen* in: Ziegelindustrie International, Nr. 3, S. 118 - 119, Bauverlag, Wiesbaden und Berlin (1998)
- [102] Rubin, R.: *Innovative Gas-Brenntechnik bei der Schornsteinproduktion*, in: GASWÄRME international, Nr. 12, S. 694 - 697, Vulkan-Verlag, Essen (1998)
- [103] Salmang, H.; Scholze, H.: *Keramik, Teil 2: Keramische Werkstoffe*, Springer-Verlag, Berlin (1983)
- [104] Schmidt, G.; Fiebiger, W.; Reh, H.: *The Classical Ceramics Industry in Germany*, in: Ceramics: Charting the Future, Proceeding of the World Ceramics Congress, Florenz (1994)
- [105] Schöps, W.; Beer, H.: *Granulierung von Keramik in der Wirbelschicht*, in: Keramische Zeitschrift, Nr. 6, S. 402 - 404, Freiburg (1994)
- [106] Schulte, W.: *Erkenntnisse und Probleme bei der Herstellung von Geschirrporzellan durch isostatisches Pressen und Schnellbrand*, in: Keramische Zeitschrift, Nr. 6, S. 439 - 445, Freiburg (1995)
- [107] Segerer, H.: *Durchbruch bei der Mikrowellentrocknung*, in: Ceramic Forum International, Nr. 11-12, S. 623 - 626, Bauverlag, Wiesbaden und Berlin (1996)
- [108] Sladek, R.: *Fließbandtechnologie - Zukunft der Geschirrinindustrie ?*, in: Keramische Zeitschrift, Nr. 7, S. 527 - 533, Freiburg (1995)
- [109] Statistisches Bundesamt: *Fachserie 4, Reihe 3.1 Produktion im Produzierenden Gewerbe*, Wiesbaden (1999)
- [110] Statistisches Bundesamt: *Fachserie 4, Reihe 4.1.1.*, Wiesbaden (1999)
- [111] Steidle, L.: *Keramische Industrie*, in: Lehr- und Handbuch der Abwassertechnik Band VII, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften, Berlin (1985)

-
- [112] Steinzeug GmbH: *Steinzeug Handbuch*, Steinzeug GmbH, Köln (1998)
- [113] Tagali, D.A.: *Verschiedene Konstruktionstypen thermischer Abgasreinigungsanlagen für die Keramikindustrie*, in: *Keramische Zeitschrift*, Nr. 10, S. 848 - 853, Freiburg (1997)
- [114] Thalhammer, H.: *Regenerative Nachverbrennung in der Ziegelindustrie*, in: *Keramische Zeitschrift*, Nr. 4, S. 124 - 127, Freiburg (1996)
- [115] Verein Deutscher Ingenieure: *Elektrofilter*, VDI-Richtlinie 3678, VDI-Verlag, Düsseldorf (1998)
- [116] Verein Deutscher Ingenieure: *Emissionsminderung Keramische Industrie*, VDI-Richtlinie 2585, VDI-Verlag, Düsseldorf (1993)
- [117] Verein Deutscher Ingenieure: *Filternde Abscheider*, VDI-Richtlinie 3677, VDI-Verlag, Düsseldorf (1997)
- [118] Verein Deutscher Ingenieure: *Massenkraftabscheider*, VDI-Richtlinie 3676, VDI-Verlag, Düsseldorf (1998)
- [119] Verein Deutscher Ingenieure: *Nassabscheider für partikelförmige Stoffe*, VDI-Richtlinie 3679, VDI-Verlag, Düsseldorf (1998)
- [120] *Verordnung über Anforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer (Abwasserverordnung) vom 21. März 1997*, in der Fassung der Dritten Änderungsverordnung vom 29.05.2000
- [121] *Vierte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen – 4. BImSchV)*, in: *BGBI. I*, S. 1586, zuletzt geändert durch Verordnung vom 16.12.1996, *BGBI I*, S. 1959, Bonn (1996)
- [122] Vogt, S.; Heinke, F.; Vogt, R.: *Wege zur effizienten Nutzung von Energie*, in: *Ziegelindustrie International*, Nr.8, S. 496 - 501, Bauverlag, Wiesbaden und Berlin (1998)
- [123] Wagner, S.; Harr, B.; Meyer, U.: *Ökologisches Bauen mit Ziegeln*, Arbeitsgemeinschaft Mauerziegel e.V., Bonn (1998)
- [124] Wildermann; Schubert: *Schlussbericht über eine Erhebung der Reststoffe in der feinkeramischen Industrie*, Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen, München (1992)
- [125] Wildermann, R.; Hager, H.; Mair, K.; Stöttner, A.: *Feinkeramische Industrie - Mustergutachten zum Immissionsschutz*, Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, München (1998)