

**Brenntechnologie für Geschirr unter besonderer
Berücksichtigung des Glattbrands von Porzellan Flachware
im Schnellbrandofen**

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur

(Dr.-Ing.)

von Dipl.-Ing. Friedherz Hartmut Becker

geb. am 07.04.1947 in Bielefeld

genehmigt durch die Fakultät für Verfahrens- und Systemtechnik
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Promotionskommission : J.-Prof. Dr.-Ing. Fabian Herz (Vorsitz)

Prof. Dr.-Ing. Eckehard Specht
(Gutachter und Betreuer)

Prof. i.R. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c.

Gerd Walter (Gutachter)

Dr.-Ing. Hans-Georg Bittner (Gutachter)

eingereicht am: 30. Jan. 2016

Promotionskolloquium am: 01. Juni. 2016

Schriftliche Erklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Insbesondere habe ich nicht die Hilfe einer kommerziellen Promotionsberatung in Anspruch genommen. Dritte haben von mir weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen.

Die Arbeit wurde bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form als Dissertation eingereicht und ist als Ganzes auch noch nicht veröffentlicht.

Wendelstein, 30. Januar 2016

Danksagung

Die vorliegende Arbeit begann ich als Mitarbeiter der Fa. Riedhammer GmbH, Nürnberg. Ich sehe es hiermit als meine Aufgabe an, zumindest einen Teil meiner Berufserfahrungen und die sich daraus ergebenden Anregungen zur weiteren Entwicklung auf dem Gebiete des Industrieofenbaus allen Interessenten und meinen Nachfolgern bei der Fa. Riedhammer GmbH, Nürnberg, weiterzugeben.

Für das Verständnis des für diese Arbeit notwendigen Aufwands danke ich der Geschäftsleitung der Fa. Riedhammer, im besonderen Herrn Riedhammer und meinen damaligen Mitarbeitern.

Seit dem Jahr 2012 verfolge ich als Rentner weiterhin die Absicht, die Bedingungen des Wärmeübergangs in Industrieofenanlagen für die Keramik zu erfassen. Für die konstruktiven Diskussionen zu dem umfangreichen Themenkreis danke ich meinem Betreuer, Herrn Prof. Dr.-Ing. Eckehard Specht und für aufschlussreiche Gespräche Herrn Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Pötke. Des Weiteren möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Dr.-Ing. h.c. Gerd Walter für wichtige Hinweise und für die Begutachtung dieser Arbeit danken, ebenso Herrn Dr. Bittner für die kritische Durchsicht meiner Ausführungen.

Mein besonderer Dank für den intensiven technischen Erfahrungsaustausch auf dem Gebiet des Industrieofenbaus für die Keramik während unserer gemeinsamen Berufstätigkeit bei der Fa. Riedhammer GmbH gilt meinem Prokuristenvorgänger, Herrn Helmut Baumann.

Die Messungen wurden an einer Industrieofenanlage bei der Fa. Porzellanfabriken Christian Seltmann GmbH in Erbdorf im Jahre 1994 abgeschlossen. Mein Dank gilt der Geschäftsleitung der Fa. Porzellanfabriken Christian Seltmann GmbH, Weiden, für die Erlaubnis zur Versuchsdurchführung während der

Produktionsphase und für die Bereitstellung des Messwagens und der Brennware.

Bei der Durchführung der Versuche unterstützte mich Herr Meier, mein damaliger Mitarbeiter von der Fa. Riedhammer GmbH. Ihm danke ich für seine tatkräftige Hilfe.

Meiner Familie sei Dank für ihre Geduld während dieser Zeit und den Rückhalt, den ich durch sie erfahren habe.

Zusammenfassung

Keramische Produkte bestehen zum großen Teil aus mehreren natürlichen Rohstoffen mit unterschiedlich reinen Komponenten und oftmals versetzt mit organischen Additiven, die eine günstige Formgebung ermöglichen sollen. Eine vorteilhafte thermische Behandlung dieser Produkte setzt die Kenntnis der vielfältigen Materialreaktionen, die während des Sinterprozesses ablaufen, voraus. Sie erhält man z.B. aus verschiedenen thermischen Analysen. Zur Interpretation von Materialuntersuchungen bedarf es auch des Verständnisses für die physikalisch chemisch ablaufenden Sintervorgänge, die eingehend besprochen werden. Die Ofenanlagen hierfür werden erklärt, begründet und mit konstruktiven und verfahrenstechnischen Einzelheiten aus jahrzehntelanger Berufserfahrung im Industrieofenbau verknüpft.

Porzellan ist ein Produkt, das aus einem weiten Spektrum eines Gemenges aus den natürlichen Vorkommen von Ton, Feldspat und Quarz und ggfls. weiteren Komponenten besteht. Eine besondere thermische Behandlung erfährt das Porzellan während des Glasurbrandes, vor allem im Schnellbrandverfahren. Ein Schnellbrandprozess für den Glasurbrand von Porzellan mit den notwendigen atmosphärischen Bedingungen an einer produzierenden Tunnelofenanlage wird untersucht.

Im Hinblick auf energetische Optimierungen wird eine ausführliche Bestimmung der Wärmeübergangskoeffizienten aus Temperaturmessungen von Fluid und Solid in diesem Schnellbrandofen durchgeführt. Sie werden verglichen mit Modelluntersuchungen, die auf diese Ofenanlage abgestimmt sind.

Es werden detaillierte wärmetechnische Berechnungen mit allen Parametern der Brennereinstellungen und Strömungen hergeleitet und benutzt, um bei vorgegebener Solidtemperatur eine exakte Leistungsbestimmung jedes einzelnen Brenners unter dringlicher Berücksichtigung der Atmosphärenbedingungen vornehmen zu können. Zusätzlich wird der Einfluss von Gleichstrom und

Gegenstrom auf den Energiehaushalt verdeutlicht. Es wird eine optimale Einstellung aller Brenner angegeben, mit der die atmosphärischen Bedingungen erfüllt und ein geringer Energieverbrauch erreicht wird. Mit dem aufgezeigten Vorgehen ist auch dem Anlagenbauer nun ein umfangreiches Werkzeug zur exakten Planung einer Ofenanlage mit geringem Energieverbrauch an die Hand gegeben.

Abstracts

Ceramic products consist to a big part of several natural raw materials with components of different purity and often with organic additives enabling a benefiting shaping. A favourably thermal treatment of these products presumes the knowledge about the versatile reactions of the materials during this process. The notice can be made e.g. by different thermal analysis. For the interpretation of material research it is necessary to understand the physical and chemical sintering procedures; they will be explained. The kilns for sintering ceramics will be described, justified and connected with the procedural knowledge of kiln building collected in decades.

Porcelain is such a product consisting of a wide spectrum of a mixture of natural reservoir of clay, feldspar and quartz and other components where required. The porcelain receives a special thermal treatment during glost firing and particularly in the fast firing process. The process of glost firing of porcelain in a fast firing tunnel kiln with the atmospheric condition is examined at a producing tunnel kiln.

With regard to an energetic optimizing an extensive determination of the coefficient of heat transfer is elaborated by the measurement of the temperature of fluid and solid in that kiln. The results are compared with different calculations on kiln models according to a similar design.

Detailed calculations on the thermal design with all the parameters of burner adjustment and flow rate are deduced including the determination of fluid temperature by using the temperature of the solid as the preset value. It is explained how to calculate the energy consumption of each burner in reference to each kiln atmosphere as well as the energy consumption of the whole plant. Additional the influence on the energy consumption of co-current flow and reverse flow in one kiln is indicated, numeralised and compared with the normal reverse flow in tunnel kilns. Now it is

possible to optimize the burner adjustments. With the disclosed procedure a complete tool is presented to the kiln builder in order to perform the kiln design under the aspect of lowest energy consumption.

INHALTSVERZEICHNIS

Verzeichnis der Formelzeichen und Indices

- 1. Motivation**
- 2. Einteilung keramischer Werkstoffe**
- 3. Physikalisch-chemische Reaktionen beim Brand zum keramischen Scherben**
- 4. Anlagen zur thermischen Behandlung von Keramik**
- 5. Sintern keramischer Werkstoffe**
- 6.1 Thermische Prozesse für keramisches Geschirr**
- 6.2 Brennen von Steingut**
- 6.3 Brennen von Irdenware**
- 6.4 Brennen von Feinsteinzeug**
- 6.5 Brennen von Vitreous China**
- 6.6 Brennen von Bone China**
- 6.7 Brennen von Porzellangeschirr**
- 6.7.1 Glühbrand von Porzellan**
- 6.7.2 Glattbrand von Porzellan**
- 6.7.3 Dekorbrand von Porzellan**
- 7.1 Ofenanlagen in der keramischen Industrie**
- 7.2 Stahlkonstruktion**
- 7.3 Feuerfeste Zustellung**
- 7.4 Verfahrenstechnische Merkmale**

- 8. Modelluntersuchungen von Schnellbrandöfen für den Glattbrand von Porzellan**
- 9. Untersuchungen zur Berechnung des effektiven Wärmeübergangskoeffizienten in einem Produktionsofen für den Glattbrand von Porzellan**
 - 9.1 Beschreibung der untersuchten für den Glattbrand von Porzellan**
 - 9.2 Versuchsbeschreibung**
 - 9.3 Versuchsauswertung**
 - 9.4 Fazit aus den Untersuchungen**
- 10. Berechnung von Schnellbrandöfen für den Glattbrand von Porzellan**
 - 10.1 Bilanzierung von Energie und Massenströmen zur Berechnung des Energieverbrauchs**
 - 10.1.1 Enthalpieänderung der Brennwagenisolation**
 - 10.1.2 Wandverluste**
 - 10.1.3 Enthalpieänderung von Ware und Brennhilfsmitteln**
 - 10.1.4 Enthalpie eingedüster Umgebungsluft**
 - 10.1.5 Enthalpie abgesaugter Fluide**
 - 10.1.6 Energiebedarfsberechnung der Ofensegmente**
 - 10.2 Bestimmung des effektiven Wärmeübergangskoeffizienten**
- 11. Vergleich der Berechnungen aus Messresultaten mit theoretischen Vorgaben**
- 12. Schlussfolgerung und Ausblick**
- 13. Literaturhinweise**

Anhang Messdaten

Messprotokoll 1

Messprotokoll 2

Messprotokoll 3

Messprotokoll 4

Messprotokoll 5

Vorschubeinstellung

**Brennerregelgruppen-
einstellung**

Schreibstellentemperaturen

Außenwandtemperaturen

Datenlogger-Temperaturen

Verzeichnis der Formelzeichen und Indices

Formelzeichen

A	[m ²]	Fläche
A_{Cr+S}	[m ²]	Crankunterseite mit Tellerboden
a	[m]	Seitenlänge einer Strahlfläche
a	[m ² /s]	Temperaturleitfähigkeit
b	[m]	Breite
c	[m]	Distanz strahlender Flächen
c_p	[kJ/kg K]	spezifische Wärmekapazität
\bar{c}_p	[kJ/kg K]	mittlere spez. Wärmekapazität
d	[m]	Durchmesser
ΔG	[kJ/kmol]	freie Enthalpie
\dot{H}	[kJ/h]	Enthalpie
h	[m]	Höhe
h_N	[m]	Nutzhöhe
Δh	[kJ/h]	Reaktionsenthalpie
I	[A]	Stromstärke
K		Gleichgewichtszahl der Wassergasreaktion
k		kinetische Turbulenzenergie
L_{min}		Luftbedarf bei stöchiometrischer Verbrennung
L	[m]	Länge
l_c	[m]	charakteristische Länge

Δl_{interv}	[m]	Intervalllänge
\dot{M}	[kg/h]	Massenstrom
N	[kg/h]	Anlagenkapazität
O_V	[m ³ /m ³]	stöchiometrischer O ₂ -Bedarf
P	[W]	elektrische Leistung
p_{CO_2}	[bar]	Partialdruck CO ₂
p_{H_2O}	[bar]	Partialdruck H ₂ O
\dot{Q}	[kJ/h]	Wärmestrom
\dot{Q}_{VW}	[kJ/h]	Wandverluste
\dot{q}_E	[kJ/kg _h]	spezifischer Energieverbrauch
R	[8,314 kJ/kmolK]	allgemeine Gaskonstante
s	[m]	Wandstärke
$s_{\ddot{a}q}$	[m]	äquivalente Schichtdicke
s_{Cr}	[m]	Crankabstand
T	[K]	absolute Temperatur
Δt_{interv}	[s] bzw. [min]	Zeitintervall
U	[V]	elektrische Spannung
\dot{V}	[m ³ /h]	Volumenstrom
\dot{V}_{Vf}	[m ³ /h]	feuchter Abgasvolumenstrom
V_G	[m ³]	Volumen des Gaskörpers
v	[m ³ /m ³]	spezifisches Abgasvolumen
v_C	[Mol _C /Mol _i]	Anzahl an C-Molen
v_{H_2}	[Mol _{H2} /Mol _i]	Anzahl an H ₂ -Molen
v_{N_2}	[Mol _{N2} /Mol _i]	Anzahl an N ₂ -Molen

v_{O_2}	[Mol _{O2} /Mol _i]	Anzahl an O ₂ -Molen
w	[m/s]	Geschwindigkeit
x	[m]	Abschnitt der Segmentlänge
x_i	[m ³ /m ³]	Volumenanteil der Komponenten i
$x_{H_2O,L}$	[m ³ _{H2O} /m ³ _L]	Anteil der Luftfeuchte
$x_{O_2,L}$	[m ³ _{O2} /m ³ _L]	Anteil Sauerstoff in der Luft =0,21
$x_{O_2,Üb}$	[m ³ _{O2} /m ³]	Sauerstoffüberschuss

Griechische Bezeichnungen

α	[W/m ² /K]	Wärmeübergangskoeffizient
ϵ		Dissipation
ϵ		Emissionsgrad
ϑ	[°C]	Temperatur
$\bar{\vartheta}$	[°C]	mittlere Temperatur
ϑ_∞	[°C]	im Unendlichen angleichende Temperatur von Fluid und Solid
κ		Transientenfaktor
λ	[W/m/K]	Wärmeleitkoeffizient
λ_V	[kg/kg]	Luftzahl der Verbrennung
ν	[m ² /s]	kinematische Viskosität
ρ	[kg/m ³]	Dichte
σ	[5,67*10 ⁻⁸ W/m ² /K ⁴]	Stefan-Boltzmann-Konstante
φ		Sichtfaktor
ψ	[°]	Dihedralwinkel

ψ		dimensionsloser Widerstandsbeiwert einer Strömung
Ω		Kapazitätsstromverhältnis
ω	[°]	Benetzungswinkel
ω		charakteristische Turbulenzwirbelfrequenz

Indices

1	Zustand 1 bzw. Eingang
2	Zustand 2 bzw. Ausgang
air	Luft
axi	axial
$\ddot{a}q$	äquivalent
B	Brennstoff
Bes	Besatz
Bh	Brennhilfsmittel
Br	Brenner
BW	Brennwagen
$BW,Cent$	Brennwagencenter
BW,R	Brennwagenrand
$BW,spez$	bezogen auf Brennwagenoberfläche
$BW,Stirn$	Brennwagenstirnseitenrand
Cr	Crank
eff	effektiv
exh	Absaugung

F	Fluid
F,m	Fluid, massebezogen
F,An	angenommene Eigenschaft des Fluid
G	Gaskörper
ges	gesamt
lnj	Eindüsung
k	konvektiv
K	Kanal des Ofenmodells
lam	laminar
M	Modell
mix	Gemisch
mix,n+1	Gemisch des benachbarten Segments
mix,SG	brennbares Sekundärgasgemisch
n	Normzustand
O	Original
Of	Ofen
que	Querströmung
r	Strahlung
S	Solid
SG	Sekundärgas
T	Teller
t	übertragen
turb	turbulent
U	Umgebung

$SFCr$	Austausch zwischen Solid, Fluid und Crank
v	Verbrennung
w,a,h	Ofendecke, außen
w,a,v	Außenwände

Analogiekennzahlen

Pr	Prandtlzahl	$Pr = \frac{\nu}{a}$
Re	Reynoldszahl	$Re = \frac{w * l_c}{\lambda}$
St	Stantonzahl	$St = \frac{\alpha * A}{\dot{M} * c_p}$

1. Motivation

Der Energieverbrauch von Ofenanlagen in der keramischen Industrie wird in den meisten Fällen vom Ofenbauer aus seiner langen Erfahrung abgeschätzt und/oder aus bereits produzierenden Aggregaten hochgerechnet. Dies trifft im Besonderen auf die Auslegung von Tunnelöfen für den Glattbrand von Porzellan zu. Dabei verzichtet der Hersteller auf Grund

- der Vielzahl der unterschiedlichen keramischen Produkte und der daraus resultierenden mannigfachen Besatzform,
- der sich ständig ändernden Brenngutmassenströme,
- die sich damit ergebenden wechselnden Gasströme im Ofenkanal,
- der sich überschneidenden stationären und instationären Wärmeübertragungsprozesse,
- der verschiedenen Atmosphärenbedingungen, die an bestimmte Temperaturpunkte fest gebunden sind,
- mangelndem Überblicks über die komplexen physikalischen Zusammenhänge,

auf die notwendige Ermittlung des Energiebedarfs an jedem Ort der Anlage, oft mit dem Risiko von unangenehmen Kostenkonsequenzen. Deshalb soll in dieser Arbeit mit dem einfach zu handhabenden Programm „Excel“ ein detaillierter Lösungsweg aufgezeigt werden.

Die entscheidende Bedeutung für den Energiebedarf der genannten Tunnelöfen spielen die Wärmeübertragungsverhältnisse im Ofenkanal. Um einen realen Bezug zu den Gesamtwärmeübergangskoeffizienten zu erhalten, wurden kontinuierliche Temperaturmessungen von Ware und den Gasen durchgeführt. Die erhaltenen Werte werden verglichen mit denen, die man aus entsprechend umgeformten Gleichungen

erhält. Der Tunnelofen wird dazu – wie auch von Junliang Yu [Yu] vorgeschlagen – über die gesamte Länge in gleich lange Segmente unterteilt und für jedes Segment eine vollständige Energiebilanz aufgestellt.

Die thermische Behandlung von keramischen Werkstoffen unterscheidet sich grundlegend von metallischen Materialien und hat seine Begründung in anders gearteten Strukturen. Hieraus ergibt sich eine Vielzahl von Reaktionen im keramischen Produkt, z.B.

- teilweise spontane Kristallumwandlungen mit entsprechenden Formänderungen
- Sublimation organischer Bestandteile mit Diffusionsabläufen
- Schmelzprozesse mit Festigkeitseinflüssen

Nichtberücksichtigung der spezifischen Besonderheiten der keramischen Materialien während des Brandes führt zum Ausschuss. Deshalb ist zum Verständnis der Brennverfahren ein Einblick in die besonderen Eigenarten keramischer Werkstoffe notwendig; er soll im folgenden Kapitel gewährt werden.

2. Einteilung keramischer Werkstoffe

Unter Keramik versteht man kristalline nichtmetallisch-anorganische Werkstoffe, die Glasphase - sogar zum überwiegenden Teil - enthalten können. Traditionelle keramische Werkstoffe sind gewöhnlich mehrphasig und polykristallin, seltener monokristallin.

Jeder keramische Werkstoff lässt sich sowohl werkstoffspezifischen als auch anwendungsorientierten Keramikgruppen zuordnen. Schüller und Hennicke [Schü][Hen] nehmen eine Einteilung nach werkstoffspezifischer Systematik vor, der Kriegesmann [Krie1] spezielle Verbundwerkstoffe mit keramischer Matrix dazufügt (**Tab.1**).

Tabelle 1: Einteilung der Keramik nach werkstoffspezifischen Gesichtspunkten

1.Silikatkeramische Werkstoffe			
1.1 Tonkeramische Werkstoffe			
grob		fein	
porös	dicht	porös	dicht
Ziegel	Grobsteinzeug	Irdengut	Steinzeug
Schamottestein	Klinker	Steingut	Porzellan

1.2 Sonstige Silikatkeramik			
grob		fein	
porös	dicht	porös	dicht
Silikastein, Forsteritstein	schmelzgegossene Stein	Cordierit	Cordierit Li-Al-Silikate

2. Oxidkeramische Werkstoffe	
2.1 Einfache Oxide	
grob	fein
Aluminiumoxid	Aluminiumoxid
Magnesiumoxid	Magnesiumoxid
Calciumoxid	Berylliumoxid
	Titandioxid
	Phosphate

2.2 Komplexe Oxide	
grob	fein
Chromit	Perowskite
Chrom-Magnesia	Spinelle
Dolomit	Granate
Spinelle	Titanate
	Zirconate
	Phosphate

3. Nichtoxidkeramische Werkstoffe	
3.1 Elemente	
grob	fein
Kohlenstoff	Kohlenstoff
Graphit	polykristalliner Diamant
	polykristallines Silizium

3.2 Carbide	
grob	fein
Siliziumcarbid	Siliziumcarbid Borcarbid

3.3 Nitride
fein
Siliziumnitrid
Sialon
Aluminiumnitrid
Alon
Bornitrid (hexagonal, kubisch)

3.4 Boride	
grob	fein
	Borcarbid Bornitrid (hexagonal, kubisch)

3.5 Silizide	
grob	fein
Siliziumcarbid	Siliziumcarbid Siliziumnitrid Sialon

4. Verbundwerkstoffe mit keramischer Matrix (Composites)
4.1 Faserverbundwerkstoffe
4.2 Whiskerverbundwerkstoffe
4.3 Teilchenverbundwerkstoffe
4.4 Schichtverbundwerkstoffe

Die Geschichte der Zier- und Gebrauchskeramik und der Baukeramik ist mehr als 5000 Jahre alt. Die der technischen Keramik nahm nach zögerndem Beginn erst in den siebziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts plötzlich einen rasanten Verlauf, so dass es notwendig wurde, die Vielzahl verschiedenster Anwendungen systematisch zu strukturieren. Aus **(Tab.2)** [Reh2] ist eine solche Einteilung nach anwendungsspezifischen Grundsätzen zu entnehmen.

Tabelle 2: Zuordnung keramischer Werkstoffe nach anwendungsspezifischen Prinzipien [Reh2]

Basisgruppe	Hauptgruppen	Untergruppen	Beispiel
Traditionelle Keramik	Gebrauchskeramik	Zierkeramik	Gefäße Skulpturen Blumentöpfe
		Geschirrkераmik	Geschirr
	Baukeramik	Tragende Baukeramik	Mauerziegel Klinker
		Verkleidungskераmik	Fliesen Dachziegel Ofenkacheln
		Tiefbaukeramik	Drainagerohre
		Sanitärkeramik	Waschbecken Toiletten

Basisgruppe	Hauptgruppen	Untergruppen	Beispiel
Technische Keramik	Feuerfest-keramik	Ofenbau-keramik	Steine Massen Brennhilfsmittel Brennerdüsen
		Luft-und Raumfahrt-keramik	Hitzeschilde
	Chemo-keramik	chem. beständige Keramik	Tiegel Filter
		Aktive Chemokeramik	Katalysatoren Sensoren
	Mechano-keramik	Konstruktions-keramik	Gleitlager Düsen Ventile Fadenführer Turbinenschaufeln
			Schneidkeramik
		Schleifkeramik	Schleifscheiben Mörser
		Reaktor-keramik	Spaltstoffe Absorber

Basisgruppe	Hauptgruppen	Untergruppen	Beispiel
	Elektro- keramik	Passive Elektrokeramik	Isolatoren Zündkerzen Chipträger
		Aktive Elektrokeramik	Supraleiter Piezokeramik Dielektrische Materialien Varistoren Festelektrolyte
	Magneto- keramik		Ferrite
	Opto- keramik	Passive Optokeramik	Na-Dampf Lampe Optische Fenster
		Aktive Optokeramik	Laser Wandler
	Bio- keramik	Inaktive Biokeramik	Gelenkprothesen Zahnimplantate
		Aktive Biokeramik	Ohrenknochen

3. Physikalisch-chemische Reaktionen beim Brand zum keramischen Scherben

Erst der Brand keramischer Formkörper bewirkt seine Überführung in einen keramischen Werkstoff, den man in der Keramiker-Fachsprache als Scherben bezeichnet. Während des Brennens finden im Formkörper physikalisch-chemische Reaktionen statt, bei denen es sich um Sinter-, Reaktionsbindungs- oder Infiltrationsprozesse handelt. Beim Brennprozess führen diese Vorgänge zu einer Verfestigung des keramischen Gefüges und in vielen Fällen zur Verdichtung des geformten Körpers, begleitet von geometrischen Änderungen, den Schwindungen. Bei Sinter- und Reaktionsbindungsvorgängen beobachtet man sowohl Schwindungen als auch Formkonstanz; das Infiltrieren ist in der Regel schwindungsfrei.

Jedes einzelne Produkt besitzt eine eigene optimale Brennkurve (Temperatur-Zeit-Atmosphären-Kurve), die nicht nur von den werkstofftechnischen Eigenschaften und von der Geometrie des Formkörpers abhängt, sondern auch von den Wärmebehandlungsmöglichkeiten in den Brennaggregaten. Abweichungen von der optimalen Brennkurve können zu ungewollten Veränderungen der physikalischen Eigenschaften und zu unerwünschtem ästhetischen Erscheinungsbild der Brennprodukte führen, z. B. gelbes oder graues mit Nadelstichen übersätes Porzellan.

Die optimale Brennkurve zur Erreichung der angestrebten werkstofftechnischen Eigenschaften wird durch umfangreiche Untersuchungen mit den bekannten thermischen Analysen, der Thermogravimetrie (TG), der Differentialthermogravimetrie (DTG), mit dilatometrischen Messungen und anderen Untersuchungsmethoden [DDRB] bestimmt. Aus den Analysen erkennt man die Temperatur- und Zeitpunkte, an denen Reaktionen im Werkstoff ablaufen, die eine besondere thermische Behandlung beim realen Brennprozess benötigen. In den meisten Fällen muss an diesen Punkten bis zum Abschluss der Reaktion

eine geringe Aufheiz- oder Kühlgeschwindigkeit eingehalten werden.

Viele keramische Rohprodukte und im Besonderen gepresste enthalten organische Bestandteile [Bec3], die unter Temperatureinwirkung in den gasförmigen Zustand übergehen. Diese Sublimation, die mit der Analysenmethode TG oder deutlicher mit der DTG verfolgt werden kann, verursacht einen hohen Gasdruck im „Scherben“, wenn der Diffusionsprozess im keramischen Material durch dessen zu geringe Porosität und/oder zu schnellem Temperaturanstieg behindert wird. Es kommt zum katastrophalen Bruch, wenn der Gasdruck die Zugfestigkeit des keramischen Werkstücks überschreitet.

Die Untersuchungen mit Hilfe der Dilatometrie zeigen Reaktionen an, bei denen Kristallstrukturänderungen sprunghafte Volumenänderungen im Scherben hervorrufen. Eine nicht-angepasste thermische Behandlung führt dann zu Rissen und Brüchen im Werkstück. Die Musterbeispiele hierfür sind der Quarz- und dessen Modifikationsumwandlungen (**Abb. 1**) [Hein]. Bei dieser Abbildung 1 ist die Ordinate, die das spezifische Volumen angibt, durch die Einheit [cm³/g] zu korrigieren.

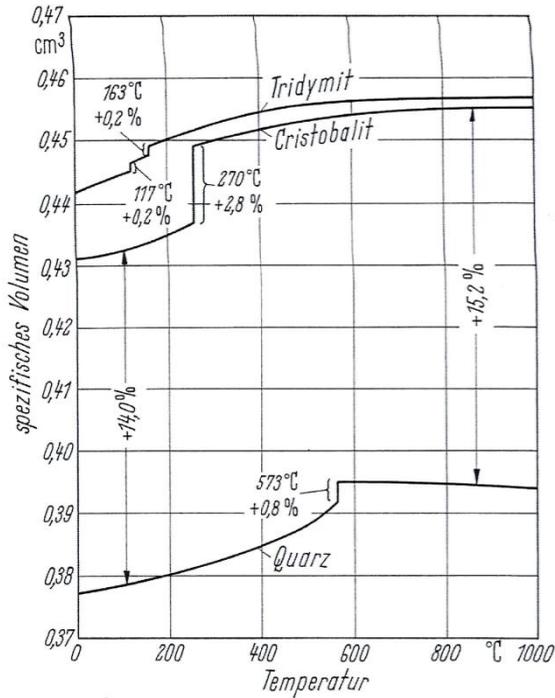


Abb.1: Temperaturabhängigkeit des spez. Volumens von Quarz, Cristobalit und Tridymit [Hein]

4. Anlagen zur thermischen Behandlung von Keramik

Die Bezeichnung „Industrieofen“ ist ein Sammelbegriff in der Metall- und in der Keramikindustrie. Er umfasst alle Einrichtungen in gewerblichen und industriellen Betrieben, in denen in einem von Wänden umschlossenen Raum dem Brenngut Wärme zugeführt wird, um am Einsatzgut verschiedene Vorgänge an der Oberfläche oder im gesamten Körper ablaufen zu lassen.

Die Wärmeerzeugung wird direkt mit dem verfahrenstechnischen Prozess gekoppelt. Fehlt der Ofenraum, dann handelt es sich um eine industrielle Erwärmungseinrichtung.

Es ist üblich, Industrieöfen nach konstruktiven und thermischen Merkmalen einzuordnen, sowie in Produktionsbereiche, und zwar nach

- der Ofenart, z.B. Standofen oder Durchlauföfen
- der Gutlagerung, z.B. Gefäße, feste Unterlagen, bewegliche Unterlagen
- der Beheizung, z.B. elektrischbeheizt, brennstoffbeheizt, kombiniert
- dem Hüllmittel, z.B. gasförmig (Schutzgas), flüssig (Öl), fest (Pulver)
- dem thermischen Verfahren, z.B. Schmelzen, Rösten, Reduzieren, Sintern etc.
- dem Produktionsbereich, z.B. Stahl, Eisen, Buntmetalle, Keramik usw.

In der keramischen Industrie wird gewöhnlich der Standofen oder Chargenofen nach seiner Betriebsweise auch als periodischer oder intermittierender Ofen bezeichnet, der elektrisch- oder brennstoffbeheizt sein kann. Weit verbreitet sind Kammeröfen, Herdwagenöfen, Haubenöfen und Elevatoröfen.

In Durchlauföfen wird das keramische Brenngut taktweise oder kontinuierlich durch den Ofen transportiert; hierzu gehören Tunnelöfen mit Wagen- oder Rollenförderung, Plattendurchschuböfen, Korböfen, Förderbandöfen, ebenso Drehrohr- und Pendelöfen. Auch Durchlauföfen können brennstoff- oder elektrisch beheizt sein.

5. Sintern keramischer Werkstoffe

Das Sintern ist ein physikalisch chemischer Vorgang, der im keramischen, porösen Formkörper stattfindet und seine Gefügeausbildung beeinflusst. Eine Temperatureinwirkung unterhalb der Schmelztemperatur führt zu Einkomponentenreaktionen, die unter Beibehaltung der Form die Verfestigung des porösen Körpers bewirken. Treibende Kraft hierfür ist die hohe Oberflächenenergie des porösen Körpers bzw. Pulvers. Während des Sinterprozesses stellt sich die Oberflächenenergie auf ein geringeres Niveau ein [Bec1].

In erster Näherung kann man die Gesetzmäßigkeiten des Sinterns aus dem Zwei-Kugel-Modell herleiten (**Abb. 2**) [Krie2].

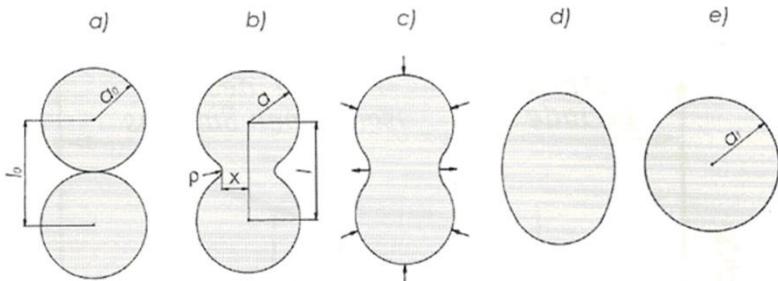


Abb. 2.: Zwei-Kugel-Sintermodell [Krie2]

Es vereinigen sich zwei gleich große kugelige Teilchen mit dem Radius a_0 über mehrere Stufen zu einer Kugel mit dem Radius $a_f = a_0 \cdot 2^{1/3}$ [Krie2] bei Verringerung ihrer Gesamtoberfläche. Mit der Oberflächenverringerung wird auch die freie Enthalpie abgebaut. Mit der Entstehung eines Sinterhalses bildet sich an dieser Stelle Zugspannung aus, die eine erhöhte Leerstellenkonzentration bewirkt, die wiederum zu einem Diffusionsprozess der Materie führt und zwar von der Korngrenze

zur konkaven Halsoberfläche. Beim Sintern verbinden sich die Pulverteilchen, sie bilden Kontaktstellen, die immer größer werden. Beim Massetransport von den Kontaktstellen zu den Sinterhälsen nähern sich die Teilchenmittelpunkte an und die Porosität verringert sich, so dass sich beim Brand die Dichte der Formkörper erhöht. Makroskopisch verkleinert sich der Körper, unter Beibehaltung seiner Form. Abhängig von der Porentextur des Formkörpers, die wiederum primär vom Formgebungsverfahren und in zweiter Linie vom Aufbau der Masse abhängt, ergeben sich isotrope (gleiche) und anisotrope (in Raumrichtung ungleiche) Schwindungen. Erstere beobachtet man bei isostatisch gepressten Formkörpern, letztere bei axial gepressten Formkörpern. Die Struktur der Poren ändert sich mit der Abnahme ihrer Porosität. Mit fortschreitendem Sinterprozess bilden sich aus den anfänglichen Kanalporen immer mehr Sackporen und schließlich geschlossene Poren. Kanal- und Sackporen fasst man zur offenen Porosität zusammen, die geschlossenen zur geschlossenen Porosität. Das „Endstadium“ des Sinterns ist erreicht, wenn keine offene Porosität mehr vorhanden ist, sondern nur noch die geschlossene. Die geschlossene Porosität ist erreicht, wenn bei der Festphasensinterung 95% der theoretischen Dichte gemessen wird, bei der Flüssigphasensinterung 92% [Krie2], wie durch die Gleichung in [SaS4] abgeschätzt werden kann. Man bestimmt die Porosität über die Wasseraufnahmefähigkeit.

Das Sinter-Endstadium ist durch geringe Enthalpie gekennzeichnet, die auf die Verkleinerung der Oberflächenenergie - bedingt durch Porenschließung und durch die Reduktion der Grenzflächenenergie - zurückzuführen ist. Die Grenzflächenenergieabnahme ist proportional zur Korngrenzfläche und damit zum Kornwachstum. Das Festphasensintern findet bei Temperaturen statt, die unterhalb des Schmelzpunktes der am niedrigsten schmelzenden Komponente liegen, auch unter Berücksichtigung sich gegebenenfalls bildender Eutektika.

Flüssigphasensintern [Krie2] beinhaltet einen gewissen Schmelzanteil mindestens einer Komponente. Die Flüssigphasensinterung kommt in der thermischen Behandlung keramischer Formkörper wesentlich öfter vor als die Feststoffsinterung. Es muss dabei mindestens eine Komponente in flüssiger Phase vorliegen. Massetransportvorgänge laufen in flüssigen Phasen wesentlich leichter, damit schneller ab und der Sinterprozess beschleunigt sich. Die Silikatkeramik, die den größten Anteil keramischer Produkte repräsentiert, beinhaltet fast ausschließlich Flüssigphasenbestandteile, mit Sinteradditiven als Flussmittel, die meistens aus Alkali- und/oder Erdalkalioxiden bestehen.

Im Bereich der Nichtoxidkeramik, die auf Grund ihrer starken kovalenten Bindung sehr reaktionsträge ist, nutzt man die Wirkung von Flüssigphasen, um die Sintertemperaturen auf ein akzeptables Niveau herunterzudrücken und im Stabilitätsbereich des Stoffsystems zu bleiben. Die vorherrschende Teilchenumordnung im Anfangsstadium des Flüssigphasensinterns von keramischen Formkörpern, deren Gefüge aus Festphasenteilchen, Schmelze und Poren besteht, wird durch das Streben nach dem Minimum aller Grenz- und Oberflächenenergien bestimmt. Dabei spielt der Gehalt an Schmelzphase und die Benetzung eine

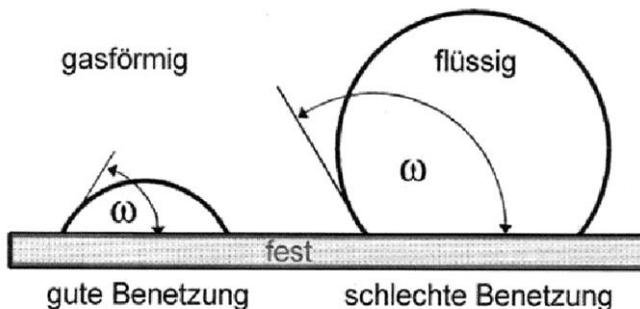


Abb. 3: Benetzung und Randwinkel [Krie2]

wichtige Rolle. Die Güte der Benetzung ist ein Maß für das Minimum der Oberflächenenergie. Sie wird charakterisiert durch den Randwinkel, der die Schmelze einschließt. Je kleiner dieser Randwinkel ist, umso besser die Benetzung (**Abb. 3**) [Krie2].

Bei keramischen Werkstoffen ist der Randwinkel meistens klein, deshalb ist die Benetzung gut. Die Schmelze bildet um die meisten Teilchen einen dünnen Film, der eine Umordnung, d.h. ein gegenseitiges Abgleiten der Teilchen ermöglicht. Die Schmelze bildet zwischen den Teilchen Hälse in Form von Schmelzbrücken, die im Falle der guten Benetzung unter verstärkte Zugspannung geraten und somit den Abstand der Teilchen verringern. Benetzende Flüssigkeiten dringen bevorzugt in kleine Porenräume ein und füllen sie und tragen damit zur Dichteerhöhung bei. All dies sind Effekte, die zu einer erheblichen Schwindung und Dichteerhöhung führen.

Der Schmelzphasenanteil sollte, obwohl er zur erheblichen Sintererleichterung führt, nicht über 20% betragen, weil sonst die Formstabilität nicht gewährleistet ist, es sei denn, dass sie durch hohe Viskosität der Schmelze gesichert wird. Dies ist z.B. beim Hartporzellan-Sinterprozess der Fall. Zur Beschreibung des Kontaktes zwischen Festkörperpartikeln und Flüssigkeiten ist der Dihedralwinkel Ψ von Bedeutung (**Abb. 4**) [Krie2]:

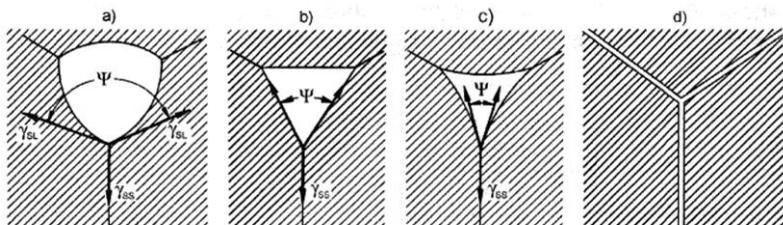


Abb. 4: verschiedene Dihedralwinkel Ψ [Krie2]

Je besser die Benetzung, desto spitzer der Dihedralwinkel Ψ . Der Dihedralwinkel Ψ tritt an den Durchstoßpunkten von Korngrenzen an den Fest-Flüssigphasengrenzen auf. Er sollte klein sein, weil dann die Benetzung intensiviert wird und die Teilchenumlagerungsvorgänge leichter ablaufen. Den umgekehrten Fall, einen großen Dihedralwinkel Ψ , findet man beim Sintern von Steingut, Feuerfestmaterialien und keramischen Schleifscheiben. Hier ist die Verdichtung durch die fehlende Kornbenetzung verringert.

Im weiteren Verlauf der Flüssigphasensinterung spielen Löslichkeitsvorgänge eine wichtige Rolle. Beim Lösen der festen in der flüssigen Phase, beobachtet man Schwindungsverhalten. Kleine Teilchen lösen sich dabei wegen ihres geringeren Krümmungsradius schneller als große. Am größeren Teilchen stellt sich eine Übersättigung ein, die zum Fällen des gelösten Materials führt und hier ein Wachstum des größeren Teilchens bewirkt. Hierzu muss ein genügender Anteil an Schmelze vorhanden sein, d.h. der Dihedralwinkel Ψ sollte sich wenig von 0 unterscheiden. Die großen Partikel wachsen so lange, bis sie sich gegenseitig behindern. Je geringer der Gehalt an flüssiger Phase, umso eher tritt eine gegenseitige Wachstumsbehinderung auf. Die Teilchen üben gegenseitig Druck aufeinander aus, die sich durch Gestaltanpassung (Kontaktabplattung) zeigt, und bei der als Konsequenz eine Mittelpunktsannäherung stattfindet. Ein Beispiel für diesen Prozess ist das Sintern der Si_3N_4 -Hochtemperaturmodifikation.

Um einen möglichst an die theoretische Dichte angenäherten Formkörper durch den Flüssigphasen-Sinterprozess zu erhalten, muss eine Vereinigung von zwei oder mehreren sich berührenden Teilchen zu möglichst einem einzigen Kristall herbeigeführt werden. Ein Vorgang, den man Koaleszenz nennt [SaS7].

Der beschriebene Mechanismus gilt für unterschiedliche Partikelgrößen und kleinem Dihedralwinkel Ψ . Die folgenden

Erläuterungen sind den umfangreichen Ausarbeitungen von Kriegesmann [Krie2] entnommen: Für unterschiedliche Partikelgrößen und großem Dihedralwinkel Ψ läuft der Sintervorgang dagegen nach den Gesetzmäßigkeiten der Festphasensinterung ab. Arbeitet man jedoch mit engfraktionierten bis gleichgroßen Partikeln und der Dihedralwinkel $\Psi = 0^\circ$, dann erhält man Lösungs-Ausscheidungsvorgänge, die durch gegenseitigen Partikeldruck entstehen. Im Endstadium werden Porosität und Kornwachstum weiter reduziert, wodurch sich der Schwindungsvorgang verlangsamt. Es sind keine offenen Poren mehr vorhanden. Die geschlossenen Poren, befinden sich aus energetischen Gründen meist an den Zwickeln der aufeinandertreffenden Kristalle. Die Poren sind mit Gas gefüllt und behindern das Schwindungsverhalten. Da es auch noch bewegliche Korngrenzen gibt, kann sich die Porenform ändern, eine Porenvereinigung und Porenwachstum auftreten. Bei konkaven Grenzoberflächen ergibt sich an einer Zwickelpore ein Dihedralwinkel $\Psi > 60^\circ$, mit der Konsequenz einer sich verkleinernden Pore; konvexe Grenzoberflächen dagegen bilden einen Dihedralwinkel $\Psi < 60^\circ$ und führen zu Porenwachstum. Ebene Grenzoberflächen mit Dihedralwinkeln $\Psi = 60^\circ$ lassen die Porengröße konstant bleiben. Es besteht weiterhin ein Einfluss auf die Porengröße durch die Partikelanzahl um die Pore: je geringer die Partikelanzahl, desto wahrscheinlicher die Ausbildung zu konkaven Grenzoberflächen und sich verkleinernden Poren. Je konkaver (kleiner Krümmungsradius) die Partikeloberfläche an den Grenzflächen zur Pore, desto höher die Zugspannung und größer die Leerstellenkonzentration. Sind die Poren - was häufig der Fall ist - über Korngrenzen miteinander verbunden, dann kommt es zum Konzentrationsausgleich mit dem Massenstrom zur kleineren Pore, die dadurch verschwindet, mit dem Ergebnis einer weiteren Schwindung. Im Endstadium des Sinterns liegen gewöhnlich kleine und eine geringe Anzahl von Poren vor. Die Beweglichkeit des Kornwachstums wird weniger behindert.

Eine schnelle Verdichtung wird erreicht, wenn bereits im Grünling eine gleichmäßige Porenverteilung realisiert wird.

Eine Steuerung der Kornwachstumsgeschwindigkeit ist über Sinterzusätze zu erreichen, die die Viskosität der flüssigen Phase verändern. So bewirkt der Sinterzusatz MgO beim Sintern von Al_2O_3 -Pulver einen Zähigkeitsanstieg der Schmelzphase, der den Diffusionsprozess verlangsamt und die Kornwachstumsgeschwindigkeit in diesem Fall verringert.

Eine Unterstützung zur Porengrößen- und Anzahlverringering erreicht man, wenn Porengase und Formkörper chemische Verwandtschaft aufweisen. Dann können Transportvorgänge der Porengase über Leerstellen stattfinden. Da in vielen Fällen die Porengase der Brennatmosphäre entsprechen, erzielt man bei Wasserstoff- oder Sauerstoffbrennatmosphären für oxidische Werkstoffe gute Verdichtungen, weil diese Gase sich in den Oxiden sehr gut lösen. Brennatmosphären spielen also beim Sinterprozess eine sehr wichtige Rolle.

Sintervorgänge sind außerordentlich komplex. Es treten eine Vielzahl von Wechselwirkungen zwischen den Partikeln, den Poren, den verschiedenen Phasen, den Korngrenzen, den Gefügeelementen und den atmosphärischen Bedingungen auf. Berücksichtigt man dazu die Fülle der einsetzbaren Rohstoffe, dann erhält man einen Eindruck von der großen Anzahl unterschiedlicher Brenntechnologien.

6.1 Thermische Prozesse für keramisches Geschirr

Keramische Massen für die Herstellung von Geschirr unterscheiden sich durch verschiedene Zusammensetzungen von Tonmineralien, Feldspäten und Quarzen. Sie lassen sich

übersichtlich, wie in **Abb. 5** [Sla] dargestellt, nach Scherbenfarbe – weiß bis farbig - und dicht bis porös einordnen.

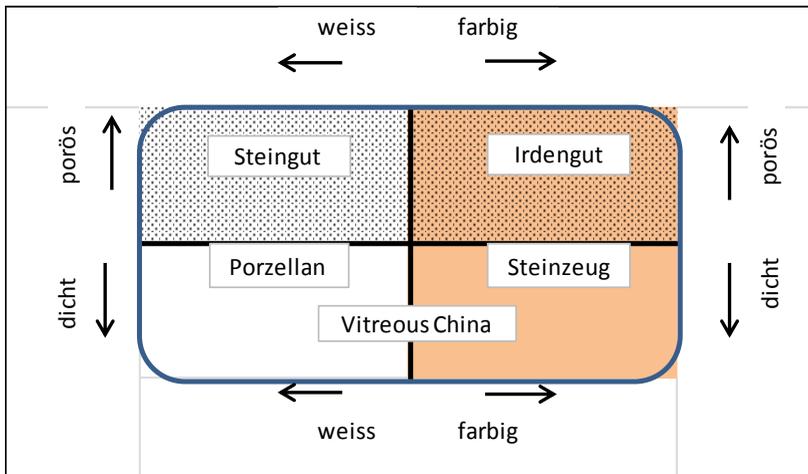


Abb. 5: Geschirrzugewandlung nach Gefügemerkmalen [Sla]

Eine Differenzierung der einzelnen Geschirrrarten auf Grund ihrer unterschiedlichen Rohstoffzusammensetzung kann man dem Dreistoffsystem Ton-Feldspat-Quarz entnehmen (**Abb. 6**) [Schü2]. Man erkennt auch, dass alle aufgeführten keramischen Geschirrrarten im Ausscheidungsgebiet des Mullit liegen.

Das Temperaturspektrum für den Garbrand erstreckt sich von ca. 960°C beim Irdengut bis ca. 1420°C beim Porzellanglattbrand. Die Porosität nimmt mit steigender Brenntemperatur und anwachsendem Flussmittelgehalt der Rohstoffmasse ab. Unabhängig von der Temperatur wird die Farbe des Scherbens durch den Fe_2O_3 -Gehalt der Rohstoffe bestimmt.

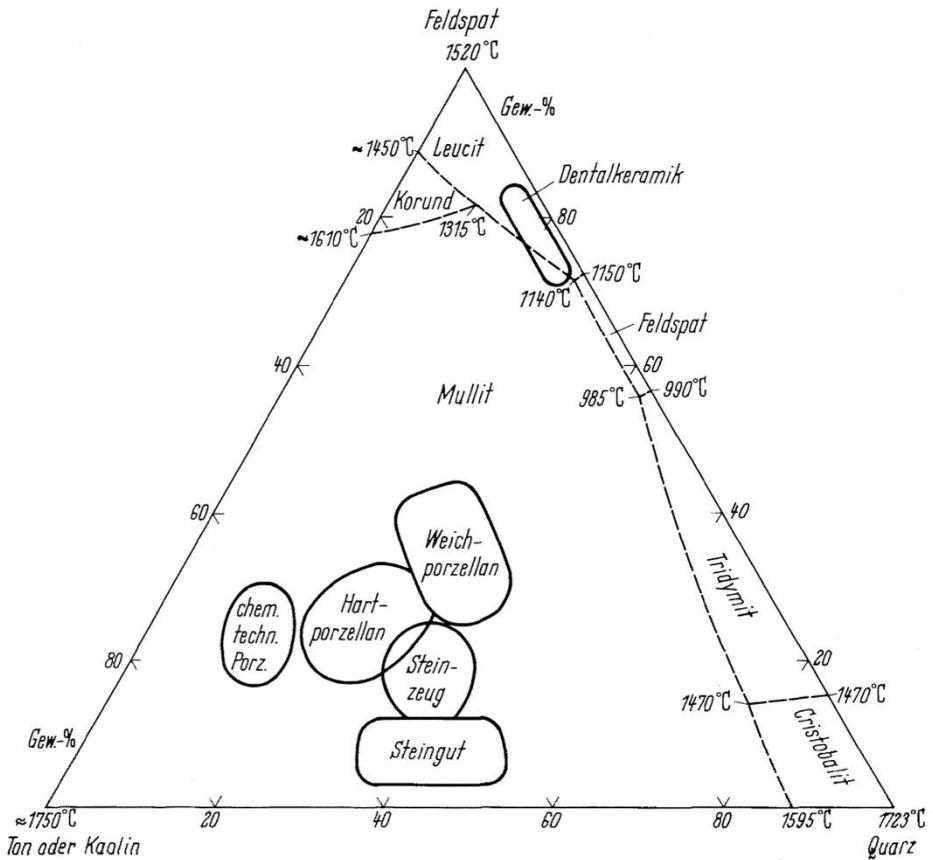


Abb. 6: Lage der Geschirrrarten im Dreistoffsystem Ton-Feldspat-Quarz [Schü2]

6.1 Brennen von Steingut

Der Scherben von Steingut ist fast weiß, aber porös. Die Massen enthalten neben eisenarmen, deswegen weißbrennenden Tonen, viel Quarz und relativ wenig Feld- oder Kalkspat-Flussmittel. Dieser geringe Anteil an Flussmitteln hat mit ca. 1100°C – 1250°C eine hohe Glühbrandtemperatur – der Keramiker sagt auch Schrühbrandtemperatur - zur Folge, ohne dass jedoch der Scherben dicht brennt. Transparente Glasuren schließen die Poren an der Oberfläche, gleichzeitig schützen diese das farbkräftige Dekor. Der 2. Brand, der oxidierende Glasurbrand wird bei 100K tieferen Temperaturen durchgeführt. Mit diesen niedrigen Glasurbrandtemperaturen kann man eine große Palette von Unterglasurfarben nutzen, die bei höheren Temperaturen verbrennen würden.

Der hohe freie Quarzanteil des Brennguts lässt Brennzeiten unter 6 h nicht zu. Die Glasur am Fuß der Ware wird nicht abgewischt, damit wird beim späteren Gebrauch verhindert, dass sich Schmutz in die offenen Poren setzt. Für den Brand bedeutet dies, dass die Flachware wie beim Vitreous China Geschirr in Gestelle auf spitze Pins gesetzt oder senkrecht in Cordierit-Kassetten gestellt wird. Man kann bei genauer Betrachtung die Abdrücke der Auflagen an der Fahne auf der Unterseite erkennen. Die hohen Besatzmassen von Ware und Brennhilfsmitteln machen den Tunnelofen mit Wagenförderung empfehlenswert [Bec2].

6.3 Brennen von Irdenware

Wie Steingut ist auch Irdenware porös, aber sie hat einen gelben bis roten Scherben. Ihr zuzuordnen sind Töpferware, ofenfestes Geschirr, Fayence und Majolika. Während Töpferware zwischen 940°C und 1020°C gebrannt wird, beträgt die Brenntemperatur von ofenfestem Geschirr zwischen 1050°C und

1100°C. Der Versatz besteht aus quarzreichen Tonen, feinem Quarzsand mit einer Körnung von 50 µm – 100 µm und Schamottezusätzen. Zutaten von Magnesit erhöhen die Temperaturwechselbeständigkeit. Der Brennprozess ist wegen des hohen Quarzgehalts von 30 % bis 40 % langsam durchzuführen. Fayencen haben eine weiß deckende Glasur, Majolica-Artikel werden mit einer farbig deckenden Glasur versehen, beide werden bei 1000°C bis 1080°C glatt gebrannt.

Irdenware wird wegen der meist geringen Kapazitäten in Kammer- oder Herdwagenöfen thermisch behandelt. Massenprodukte wie z.B. Blumentöpfe werden dagegen auf keramische Transportplatten gesetzt und vorwiegend in energetisch günstigen Rollenöfen gebrannt [Bec2].

6.4 Brennen von Feinsteinzeug

Feinsteinzeug besteht aus ca. 45 % Tonsubstanz, ca. 45 % Quarzmehl und ca. 10 % Feldspat. Der hohe freie Quarzanteil im Scherben verlangt einen besonders vorsichtigen Kühlprozess im Quarzprungbereich bei 578°C.

Zier- und Gebrauchskeramik besteht aus Feinsteinzeugmassen, die bei 1250°C – 1300°C im Einmalbrand dicht gesintert werden, d.h. Wasseraufnahme <0,5 %. Scherben und Glasur sind durch den Brand mittels einer Zwischenschicht miteinander verschmolzen. Opake Glasuren verdecken die Farbe des Scherbens. Der Brennprozess wird bis dicht an den Erweichungspunkt herangeführt, deshalb muss eine Setzweise gewählt werden, bei der eine Verformung durch die Eigenmasse der Ware vermieden wird, gleichzeitig darf aber der Fuß des Produkts nicht am Brennhilfsmittel festkleben. Deshalb wird die Flachware in offenen Mulcorit-Cranks gesetzt und der Fuß von der Glasur abgewischt. Das Massenverhältnis von Ware zu Brennhilfsmittel kann 1:0,7 erreichen. Bei Brennzeiten in

Rollenofen von 6 h – 8 h rechnet man mit einem spezifischen Energieverbrauch von 6500 kJ/kg.

Begehrte sind Zierkeramiken mit Salzglasuren. Salzglasuren erhält man durch Kochsalz, das man kurz vor der Maximaltemperatur in Kammer- oder Herdwagenöfen schmelzt. Es bilden sich aus den Natrondämpfen des bei den hohen Temperaturen sich spaltenden NaCl mit dem Quarz und der Tonerde Natrium-Tonerdesilikate, die den gewünschten, feinerligen, dünnen aber widerstandsfähigen Überzug auf der Ware hervorbringen [Bec2].

6.5. Brennen von Vitreous China

Vitreous China-Waren sind zwischen Porzellan und Steinzeug einzuordnen. Im Gegensatz zum Porzellan erfolgt der Glühbrand bei höheren Temperaturen (1230°C – 1280°C) als der Glattbrand, beide Verfahren in oxidierender Brennatmosfera. Der Scherben ist dicht, aber er erreicht nur 50% Weißgrad. Deshalb müssen deckende Glasuren eingesetzt werden. Das Scherbengefüge ist dem des Porzellans ähnlich, jedoch enthält es aufgrund der geringeren Sintertemperatur weniger Glasphase. Die Flachware wird einzeln auf Untersetzer mit trennendem Al₂O₃-Pulver gelegt, um ein Festbrennen zu vermeiden. Die Untersetzer bestehen aus Cordierit und sind an die Tellerformen angepasst. Sie werden bei einer Nutzhöhe von ca. 0,5 m mit ca. 7 Tellern zu Stapeln aufgeschichtet (**Abb. 7**) [Bec].



Abb. 7: Glühbrand von Vitreous China im Rollenofen

Zur Unterstützung der Formstabilität der Hohlware werden die Tassen gebördelt gesetzt, d.h. mit ihren Rändern aufeinander gestellt; bei Kannen, Terrinen und Ragouts platziert man die Deckel auf ihre Bestimmungposition, um die Formstabilität während des Brandes zu erhöhen. Die niedrige Sintertemperatur hat deutlich messbare freie Quarzanteile im Scherben zur Folge, die sich nicht auflösen konnten und die eine vorsichtige Temperaturführung im Bereich der Quarzumwandlung während des Kühlprozesses bzw. beim Glasurbrand erfordern. Die Durchlaufzeit in Rollen- oder Schnellbrandöfen mit Wagenförderung beträgt 5 h – 7 h. Beim zuletzt genannten ist bei einer Besatzdichte von 22 kg/m^2 und einem Massenverhältnis Ware zu Brennhilfsmittel von 1:2 mit ca. 10.000 kJ/kg spez. Energieverbrauch zu rechnen. Beim Rollenofen rechnet man mit

einer Besatzdichte von 15 kg/m² und einem spezifischen Energieverbrauch von 5.800 kJ/kg – 13.000 kJ/kg.

Der Sinterprozess des Glühbrandes verdichtet den Scherben auf eine Porosität <1 %, so dass die Glasur beim Glasieren z.B. durch Tauchen nicht mehr angesaugt wird. Das Brenngut muss deshalb gleichmäßig gewärmt und dann mit Glasur mit hohem Feststoffgehalt besprüht werden, um ein schnelles Antrocknen der Glasurschicht zu erreichen.

In den meisten Fällen wird das Dekor vor dem Glasieren auf den verglühten Scherben aufgetragen, das so von der Glasur geschützt wird und deshalb spülmaschinenfest ist. Man wischt die Glasur am Fuß der Ware nicht ab. Die Flachware wird beim Glasurbrand ähnlich wie beim Bone-China-Glasurbrand in Gestelle eingehängt oder auf Prismenleisten senkrecht stehend von einer oberen keramischen Zahnleiste gehalten. Die mit ca. 1120°C vergleichsweise niedrige Brenntemperatur des Glasurbrandes lässt eine große Palette von Farben als spülmaschinenfestes Unterglasurdekor zu. Bei Durchlaufzeiten bis ca. 8 h wird in Tunnelöfen mit Wagenförderung bei einer Besatzdichte von 55 kg/m² mit 2350 kJ/kg spezifischem Energieverbrauch zu rechnen sein.

Die in den Glasuren enthaltenen Flussmittel haben das Bestreben, während des Brennens in die Gasphase überzugehen. Im Rollenofen kann das als Reaktion mit dem Abrieb zwischen den Transportplatten und den Rollen zu Anbackungen an den Rollen führen, das den Geradeauslauf und damit die Betriebssicherheit beeinträchtigt [Bec2].

6.6 Brennen von Bone China

Knochenporzellan wird unter dem Begriff Bone China erfolgreich vermarktet. Es zeichnet sich durch dichten Scherben, durch weiße Farbe und vor allem durch Transparenz aus. Es wird mindestens zweimal gebrannt, der Glühbrand wird bei 1250°C - 1280°C durchgeführt und der Glasurbrand ca. 150 K tiefer. Die Herabsetzung der Brenntemperatur im Vergleich zum Hartporzellan erreicht man durch den bis zu 50 %-igen Zusatz des Mineralisators Knochenasche, auch Spodium genannt. Es ist ein aus Tierknochen gewonnenes Salzgemisch, das als Hauptbestandteil Calciumphosphat enthält [Spod]. Knochenasche bewirkt beim Erreichen der relativ niedrigen eutektischen Temperatur ein sehr enges Sinterintervall mit schnell steigender Bildung einer Schmelzphase. Dieser pyroplastische Effekt erfordert während des ersten Brennprozesses eine hohe Temperaturngleichmäßigkeit im Ofen und stützende Brennhilfsmittel in Form von Kapseln aus Mischungen von Cordierit und Mullit, seltener aus SiC mit aufgefülltem kalzinierten Al₂O₃-Pulver. Daraus resultieren Massenverhältnisse von Ware und Brennhilfsmittel, die zwischen 1:7 – 1:10 liegen, bei einer Besatzdichte von 75 kg/m³.

Bei großen Kapazitäten setzt man vorwiegend brennstoffbeheizte Tunnelofenanlagen mit Wagenförderung ein. Die Ofenzeiten betragen im Mittel 20 h; man muss mit einem spezifischen Energieverbrauch von ca. 32.000 kJ/kg rechnen.

Auch der Rollenofen kommt für den Glühbrand von Bone China zum Einsatz. Weil leichte „Setter“ - crankartige Brennhilfsmittel - Verwendung finden, verringert sich das Ware-Brennhilfsmittel-Massenverhältnis auf 1:2 – 1:1 und entsprechend der spezifische Energieverbrauch auf 5.800 kJ/kg – 13.000 kJ/kg, bei Ofenzeiten zwischen 5 h und 7 h und einer Besatzdichte von ca. 15 kg/m². Der Glühbrand wie auch der anschließende Glasurbrand findet in oxidierender Brennatmosphäre statt.

Der Glasurbrand von Bone China wird in angelsächsischen Ländern vorwiegend in elektrisch beheizten oder gemuffelten Öfen durchgeführt. Der Grund für diese Art der Beheizung ist die Vermeidung von Fluidströmungen im Ofen. Die stark glänzende Glasur besteht aus einem hohen Anteil an Glasphase, die einen niedrigen Transformationsbereich (ca. 600°C) hat, so dass es verstärkt zu Ausdampfungen und Glasurauszehrungen kommt, wenn zu viel Fluidbewegungen im Ofen das Konzentrationsgleichgewicht der Dämpfe über die Ware stören. Anschaulich entspricht dieser Vorgang dem bekannten Bild vom Nebel über einen Teich bei Windstille und den dort vermehrten Verdunsten bei leichter Luftströmung.

Moderne Öfen sind brennstoffbeheizt. Man vermeidet weitgehend die unerwünschten Fluidströmungen im Besatz, durch größere Querschnitte der frei durchströmten Spalten und Schaffung von groß dimensionierten Brennräumen für die Brenner. Es werden Schnellbrandöfen z.B. Rollenöfen mit Ofenzeiten von 6 h – 8 h eingesetzt. Die Flachware steht, weil der Fuß nicht wie beim Porzellan abgewischt ist, auf keramischen Pins, die in Leistengestellen eingelegt sind.

Die leichten Gestelle bestehen aus Cordierit, so dass sich ein günstiges Masseverhältnis von Ware zu Brennhilfsmittel von 1:1 – 1:2 bei einer Besatzdichte der Ware von 15 kg/m² ergibt. Der spezifische Energieverbrauch in Rollenöfen liegt zwischen 5.400 kJ/kg und 9.000 kJ/kg, in gemuffelten Tunnelöfen rechnet man mit 18.000 kJ/kg – 29.000 kJ/kg.

Moderne Öfen sind brennstoffbeheizt. Man vermeidet weitgehend die unerwünschten Fluidströmungen im Besatz, durch größere Querschnitte der frei durchströmten Spalten und Schaffung von groß dimensionierten Brennräumen für die Brenner. Es werden Schnellbrandöfen z.B. Rollenöfen mit Ofenzeiten von 6 h – 8 h eingesetzt. Die Flachware steht, weil der Fuß nicht wie beim Porzellan abgewischt ist, auf keramischen Pins, die in Leistengestellen eingelegt sind.

Die leichten Gestelle bestehen aus Cordierit, so dass sich ein günstiges Masseverhältnis von Ware zu Brennhilfsmittel von 1:1 – 1:2 bei einer Besatzdichte der Ware von 15 kg/m² ergibt. Der spezifische Energieverbrauch in Rollenöfen liegt zwischen 5.400 kJ/kg und 9.000 kJ/kg, in gemuffelten Tunnelöfen rechnet man mit 18.000 kJ/kg – 29.000 kJ/kg.

Für den Dekorbrand hat sich ebenfalls das Schnellbrandverfahren durchgesetzt. Es findet zwischen 900°C und 1050°C in brennstoffbeheizten Schnellbrandtunnelöfen mit Wagen-förderung oder in Rollenöfen oder in Förderbandöfen statt, letztere sind meistens elektrisch beheizt [Bec2].

6.7 Brennen von Porzellangeschirr

Man unterscheidet zwischen Hart- und Weichporzellan.

Der Versatz des Hartporzellans besteht gewöhnlich aus 40 - 50 Masse-% des Tonminerals Kaolin, aus 25 - 30 Masse-% Feldspat und 20 – 25 Masse-% Quarz; der des Weichporzellans aus ca. 25% Kaolin, 30% Feldspat und 45% Quarz [Schü1].

Beide Porzellanarten werden zum überwiegenden Teil im Zweimalbrandverfahren hergestellt. Dem Glühbrand bei 950°C bis 1050°C [Bec2] folgt nach dem Glasieren der Glattbrand des Hartporzellans bei 1350°C bis 1420°C [Bec2], der Glattbrand von Weichporzellan findet bei 1280°C statt. Weitere Brennfahren dienen zum Einbrennen des Dekors und zwar im Aufglasurdekorbrand bei 800°C bis 950°C [Bec2] und im Inglasurdekorbrand bei 1050°C bis 1280°C [Bec2].

Der Glühbrand ist notwendig, weil besonders bei geringer Scherbenstärke die Rohbruchfestigkeit des Stückes nicht ausreicht, um das Glasieren ohne Risse aufgrund der Quellung zu überstehen. Außerdem ist es erheblich sicherer, in einem Vorbrand einige Reaktionen des Scherbens getrennt vorweg

ablaufen zu lassen, bevor die Glasur als früh schmelzende Deckschicht Entgasungsreaktionen behindert.

Die theoretischen Betrachtungen zum Sintern von keramischen Werkstoffen beziehen sich ausschließlich auf Gleichgewichtszustände; tatsächlich werden in der praktischen Anwendung die ablaufenden Prozesse vor dem Erreichen des Gleichgewichts abgebrochen. Dies gilt besonders beim Schnellbrand, bei dem der Sintervorgang (ohne Kühlprozess) bereits nach 2 bis 5 Stunden beendet wird.

Bei modernen Produktionsmethoden wird Flachware nicht mehr gedreht, sondern aus Sprühkornmasse isostatisch gepresst; dies hat Konsequenzen für den Glühbrand, wie später gezeigt wird. Hohlware stellt man im Spritzgussverfahren her, wobei die Henkel nach der Formgebung „angarniert“ werden.

6.7.1 Glühbrand von Porzellan

Die folgende Betrachtung bezieht sich auf eine Sprühkornmasse, wie sie heute üblicherweise für Porzellanflachware eingesetzt wird. Der rohe Scherben besitzt nach dem Trocknungsprozess und bevor er in den Glühbrandofen eingefahren wird einen Restwassergehalt von ca. 6%. Der Glühbrand findet zwischen 950°C und 1050°C statt. Die bei diesem thermischen Prozess auftretenden Masseverluste (TG) mit Bezug zur linken Ordinate und Enthalpieänderungen mit Bezug zur rechten Ordinate (DTA) sind als Funktion der Temperatur auf der Abszisse beispielhaft in **Abb. 8** [Sla][Blu] dargestellt.

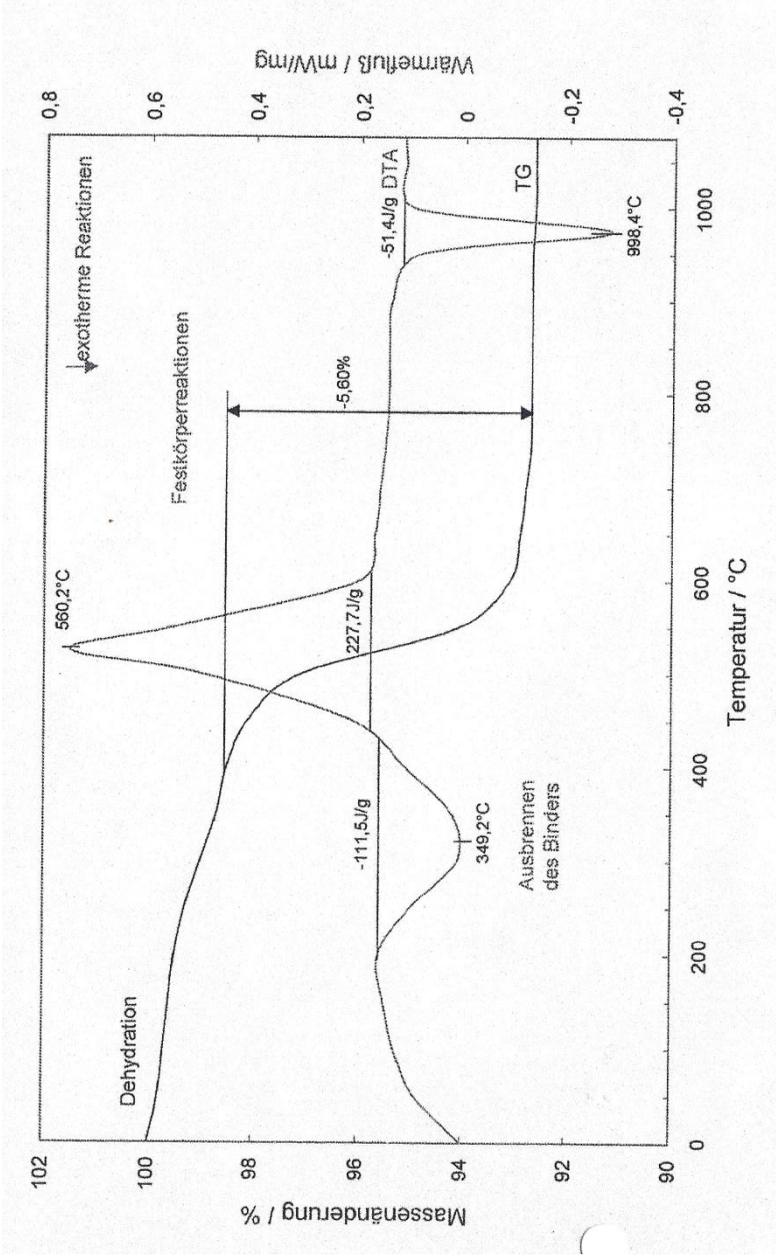


Abb. 8: TG- und DTA-Verlauf eines Porzellan-Sprühkornversatzes beim Glühbrand

Das im Rohling enthaltene Restwasser, das nicht durch den Trocknungsvorgang verdunstet ist, tritt aus dem Rohling zwischen 125°C und 200°C aus, dieser Vorgang wird Dehydratation genannt.

Von großer Bedeutung ist das zeitintensive Ausbrennen von Binder und Gleitmittel im Rohling. Beim Binder handelt es sich um organische Substanzen, um Polymere, die vor dem Sprühtrocknen der Massesuspension zugesetzt werden und als Gleitmittel beim Pressen von Nutzen sind. Binder geben dem Grünling durch das Aneinanderkleben von Partikeln an dessen Grenzflächen die benötigte Festigkeit. Für gewöhnlich werden Binder zur Anwendung gebracht, die auf Polyvinylalkoholen (PVA), Polyacrylaten oder Zellulose basieren.

Gleitmittel sind organische Hilfsmittel, deren Funktionsweise auf der Interaktion ihrer hydrophilen Gruppen basiert, also den Sauerstoffatomen der Äthergruppe -C-O-C- und den an der Oberfläche befindlichen H⁺ - Ionen der Me-OH-Gruppen. Als Resultat entstehen gleichgeladene Teilchen, die leicht aneinander vorbeigleiten können. Während des trockenen Pressens kann durch die so verbesserte Spannungsübertragung eine höhere Grün-Dichte erreicht werden. Ein typisches Gleitmittel ist Polyethylenglycol (PEG).

Der Entbinderungsprozess für die Masse des Grünlings findet zwischen 200°C und 400°C statt (s. Abb. 8). Organische Polymere müssen vollständig aus dem Grünling entfernt werden, weil Kohlenstoffrückstände sowohl einen negativen Einfluss auf den Sinterungsprozess, als auch auf die Qualität des Endprodukts haben können.

Der Entbinderungsprozess ist ein zeitintensiver Schritt, weil die Geschwindigkeit der Spaltung der Polymere die Transportgeschwindigkeit der Pyrolyseprodukte nicht überschreiten darf. Andernfalls würde eine übermäßige

Druckerhöhung der gasförmigen Pyrolyseprodukte zu Rissen und zur Zerstörung des keramischen Körpers führen. Förderlich für den Entbinderungsprozess ist eine einheitliche Körnungsgröße; allerdings wirken Agglomerate oder Bereiche hoher Dichte verlangsamer auf die Sinterung. Die Verwendung von feinem Puder beschleunigt dagegen die Sinterungsgeschwindigkeit, verringert aber die Geschwindigkeit der Entbinderung.

Die üblicherweise eingesetzten Binder und Gleitmittel PVA, PEG und PAA spalten sich bei Temperaturen zwischen 150°C und 550°C, wie in **Tabelle 3** [Bec3] angegeben wird.

Tabelle 3: thermische Spaltungsbereiche von Binder und Gleitmittel

Organische Substanz	Kurzbezeichnung	Spaltungsbereich [°]
Polyvinylalkohol	PVA	200 - 300
Polyethylenglykol	PEG	150 - 250
Polyacrylsäure	PAA	250 - 350

Die Spaltung geschieht als exotherme Reaktion, bei der - wie z.B. beim Grünling in Abb. 8 gezeigt - eine Enthalpie von 112 J/g frei wird.

Die Phasenumwandlungen, die während des Brandes von Hartporzellan im Scherben stattfinden, sind schematisch in **Abb. 9** dargestellt. Diese Darstellung basiert auf einen Porzellanversatz der Zusammensetzung 40-Masse-% Kaolinit, 30-Masse-% Feldspat und 30-Masse-% Quarz. Phasenumwandlungen ab 1000°C wurden von Brindley und Ougland [BO] untersucht und in Abbildung 9 einbezogen.

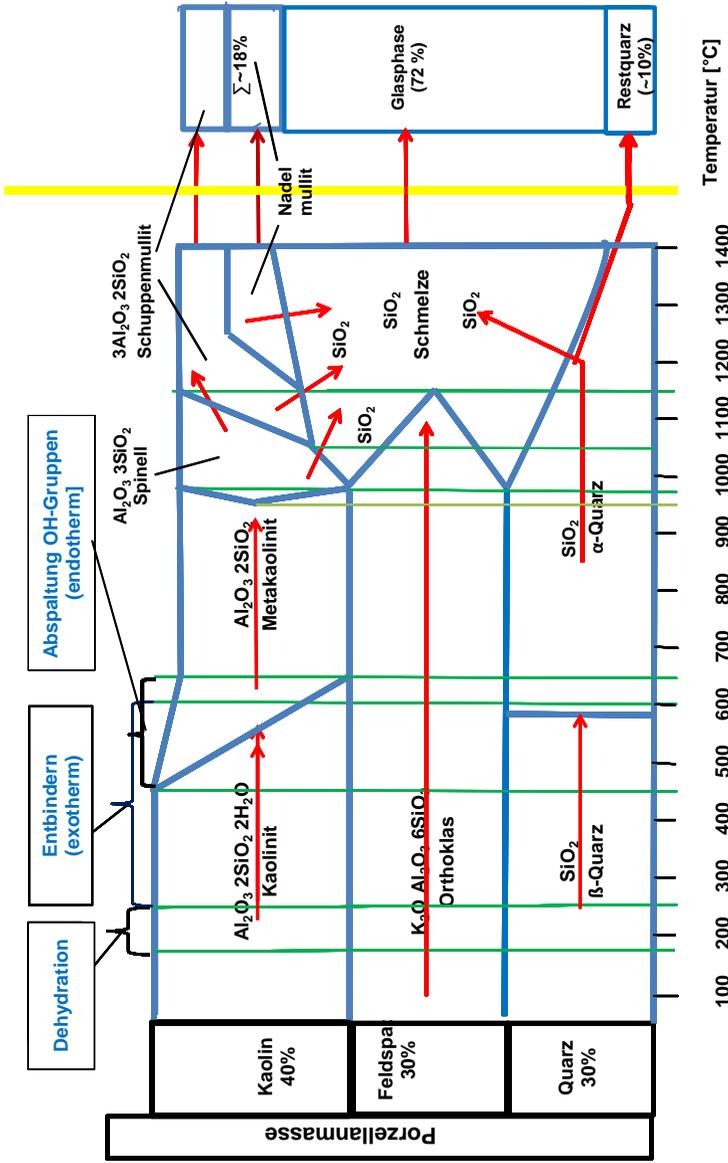


Abb. 9: schematische Darstellung der Phasenumwandlungen während des Brandes eines Hartporzellanversatzes

Ab 450°C beginnt die Dehydratisierung, d.h. die Abspaltung der OH-Gruppen des Kaolins. Dieser Abspaltungsprozess ist mit einem Maximum bei 580°C bei 650°C abgeschlossen. Da die Reaktion zum amorphen Metakaolinit ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2 \text{SiO}_2$) endotherm ist, müssen ca. 228 J/g Energie (Abb. 8) zugeführt werden. Die hierbei auftretende Masseänderung schließt sich der des Entbinderungsprozesses unmittelbar an. Sie hat einen Gesamtbetrag von 5,6 %. Die in diesem Temperaturbereich ebenfalls stattfindende β - α -Quarzumwandlung bei 573°C hat beim Glühbrand keine Bedeutung, weil im ungesinterten Scherben die Volumenexpansion durch die Quarzumwandlung von der plastischen porösen Masse kompensiert wird.

Bei weiterer Erhitzung entsteht zwischen 925°C – 950°C ein siliziumarmer Al-Si-Spinell ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3 \text{SiO}_2$). Der Porenraum im Scherben wird kleiner; es müssen jedoch genügend durchgehende Kapillarporen verbleiben, um die Saugfähigkeit für die Glasur sicher zu stellen. Deswegen wird an dieser Stelle der Glühbrand abgebrochen. Die Ware wird im Ofen abgekühlt, anschließend glasiert und dann dem Glattbrandofen zugeführt.

Beim Glühbrandprozess ist besonderes Augenmerk auf die Temperaturbereiche zu legen, in denen Diffusionsprozesse stattfinden, die im Falle von Überdruck im Scherben zu überhöhten Spannungen und damit zum Bruch des Formlings führen. Dies gilt im besonderen für Entbinderungsprozesse, zusätzlich besteht hier die Gefahr, dass Restkohlenstoffgehalte bei ungenügendem Ausbrand erst im anschließenden Glattbrand Qualitätsmängel am Produkt hervorrufen. Hohe Spannungen im keramischen Körper, die durch Volumenänderungen entstehen, die wiederum durch Kristallgitterumwandlungen hervorgerufen werden, können in ihren negativen Auswirkungen durch eine langsame Temperaturführung in den entsprechenden Temperaturbereichen vermieden werden. Zur Feststellung dieser Bereiche ist eine Dilatometeruntersuchung notwendig, die Längenänderungen des Prüflings als Funktion der Temperatur angeben.

Der Glühbrand von Porzellanflachware wird in Stapeln mit 25 bis 40 Tellern übereinander durchgeführt, mitunter auch 2 Stapel übereinander, wie in **Abb. 10** [Bec2] in einem Tunnelofen mit Wagenförderung gezeigt wird. Ein vollständiger Ausbrand solch kompakter Materialfülle wird über eine Ofendurchlaufzeit von 18 h bis 20 h erreicht.



Abb. 10: Glühbrand von Porzellanflachware im Tunnelofen [Bec8]

Alternativ wird mit nur 70 min bis 90 min Durchlaufzeit der Glühbrand von Flachware in mehretägigen Rollenöfen ohne Brennhilfsmittel (**Abb. 11**) [Bec8] ausgeführt, jedoch nur einlagig, um einen ungehinderten Bindemittelausbrand zu ermöglichen.



Abb. 11: Mehrkanal-Rollenofen zum Glühbrand von Porzellan [Bec8]

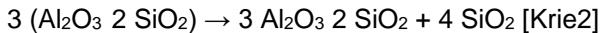
Der in der Abb. 11 gezeigte Rollenofen besteht aus drei voneinander unabhängig geregelten und thermisch getrennten Brennkanälen. Der Rollenabstand beträgt 60 mm, so dass die Flachware mit einem Fußdurchmesser >75 mm bei der Passage durch den Ofen immer auf mindestens 2 Rollen liegt. Die Rollen haben einen Durchmesser von 30 mm und bestehen aus Sillimanit. Da diese Rollen bis zu einer Länge von 5 m hergestellt werden können, lassen sich Ofennutzbreiten von ca. 3 m realisieren.

Die komplette Feuerfestauskleidung mit Hochtemperaturwolle erlaubt Aufheizgeschwindigkeiten von mehr als 500 K/h, so dass die Brennmachine an die Arbeitszeiten der Formgebungsautomaten bzw. an die der Glasierlinien angepasst werden kann. Ein großer Vorteil dieses Systems liegt neben dem geringen Energieverbrauch von ca. 3000 kJ/kg und der gleichmäßigen Qualität der gebrannten Ware in der einfachen Automatisierung der Be- und Entladung.

6.7.2 Glattbrand von Porzellan

Nach dem Glühbrand wird die Ware glasiert und dann dem Glattbrandofen zugeführt. Hartporzellan wird bei 1360°C bis 1420°C mit einem nicht unerheblichen Anteil an Flüssigphase gesintert.

Zwischen 925°C und 950°C verändert sich das Gitter des Metakaolinites unter Abscheidung von Kieselsäure zu einer Spinellstruktur, die sich dann bei Temperaturen um 1050°C gemäß folgendem Formalismus in Mullit umwandelt [Krie2] (vgl. Abbildung 9):



Diese Festkörperreaktion ist exotherm, sie ist durch den Peak in Abb. 8 mit einer Enthalpie von -51 J/g gekennzeichnet.

Auf Grund seines Habitus nennt man diesen Primärmullit auch Schuppenmullit. An den Korngrenzen dieser Mullitkristalle lagert sich SiO_2 an.

Ausgangspunkt für eine Schmelzphasenbildung, beginnend bei ca. 950°C, ist die Reaktion des Kali-Feldspats $\text{K} [\text{AlSi}_3\text{O}_8]$ bzw. Calcium-Feldspats $\text{Ca} [\text{AlSi}_3\text{O}_8]$ mit dem Quarz. Der Feldspat wirkt dabei als Sinteradditiv, weshalb der Keramiker ihn auch als Flussmittel bezeichnet. Mit steigenden Temperaturen kommt es außerdem zur Schmelzreaktion des Feldspats mit der Kieselsäure, die aus dem Zerfall des Kaolinites entstanden ist. Bei weiterer Temperatursteigerung, - bei 1130°C - ist der Feldspat komplett gelöst. Die Viskosität der Schmelze ist jedoch sehr hoch, deshalb schreitet der Lösungsvorgang des Quarzes nur langsam voran [SaS1]. Der Mullit bleibt in seiner Festkörperphase erhalten, so dass beide Kristallarten erhebliche Widerstände gegen Deformationen aufbringen können und die Formstabilität während des Brandes fortbesteht. Der hohen Brenntemperatur des Hartporzellans entsprechend müsste man den wegen seines Ausdehnungsverhaltens – 2,8% Volumenänderung bei der Hoch-

Tiefcrystalinitumwandlung - gefürchteten Hochcrystalinit im Scherben vermuten. Er tritt jedoch nicht auf, weil die Lösungsgeschwindigkeit des Hochquarzes in der Schmelze wegen des geringen Benetzungswinkels, d.h. guten Benetzung und einer vollständigen Ummantelung der Schmelze (Dihedralwinkel = 0) höher ist als die Umwandlungsgeschwindigkeit zum Hochcrystalinit.[Krie2].

Es folgen Lösungs-Fällungsprozesse des Mullit. Man geht hier bei Temperaturen oberhalb 1200°C von einer guten Benetzung der Primärmullitteilchen aus. Es bildet sich der Sekundärmullit, der wegen seines Habitus auch Nadelmullit genannt wird. Die Nadelmullitbildung führt zur Verfilzung des Gefüges, die im besonderen Maße zur bereits erwähnten Formstabilität während des Brandes beiträgt. Der in Abbildung 9 analysierte Scherben enthält nach dem Brand ca. 72 Masse-% Glasphase, ca. 18 Masse-% Mullit und ca. 10 Masse-% Restquarz.

Der Anteil der Schmelzphase ist auf Grund des hohen Feldspatanteils im Versatz mit ca. 72 % sehr hoch, aber sehr zäh, so dass Diffusionsvorgänge während der thermischen Behandlung nur langsam und damit im geringen Maße ablaufen. Die Zusammensetzung der Schmelze verändert sich durch ständige Lösungs-Fällungsvorgänge.

Der Sintervorgang bewirkt eine Schwindung der Ware von 12% - 13%. Der sich dem Sinterprozess anschließende Kühlvorgang ist unproblematisch, weil der Porzellankörper keinen oder nur geringsten Restquarz enthält, im Gegensatz zum Steingut und Steinzeug. Diese letztgenannten Materialien haben geringere Anteile an Schmelzphasen und entsprechend höhere nicht in Lösung gegangene Crystalinitanteile.

Porzellan Tunnelöfen konventioneller Baureihen, die für den Glattbrand von Porzellan eingesetzt werden, weisen einen schmalen und hohen Querschnitt auf (**Abb. 12**). Die Nutzbreite einer typischen Tunnelofenanlage zum Glattbrand von Porzellan

beträgt ca. 0,9 m bis 1m, die Nutzhöhe ca. 1,1 m. An den Seitenwänden sind Niederdruckbrenner installiert, die mit 40 mbar Gasdruck betrieben werden und auch für den Einsatz von Schwachgasen geeignet sind.



Abb. 12: konventioneller Tunnelofen für den Glattbrand von Porzellan [Bec4]

Die Verbrennungsluft wird durch eingebaute Rekuperatoren vorgewärmt, die in die Wände der Kühlzone eingemauert sind. Man leitet die heiße Verbrennungsluft durch Kanäle in den beiden Seitenwänden zu jedem einzelnen Brenner, wobei der Luftmassenstrom über einen Drehtrommelschieber manuell eingestellt wird. Die Einsturzgefahr bei schmalen und hohen Besatzaufbauten ist groß, vor allem weil die früher eingesetzten Schamottekapseln für die Flachware, nur geringe Standfestigkeiten im Feuer hatten. Dies verbesserte sich zwar mit dem Einsatz von SiC-Kapseln, aber das Risiko eines Besatzeinsturzes ist dennoch vorhanden. Wenn es zum Einsturz kommt, muss die Wagenreihe an der Havariestelle auseinander gezogen werden. Ein durchgehender Begehkanal unterhalb des Tunnelofens ermöglicht das Abräumen des Besatzes vom

Ofenwagen und die einfache Inspektion der Sandrinnen und der Dichtung der aneinander gereihten Brennwagen.

Hochgeschwindigkeitsbrenner, für die ein Vordruck von 70 mbar notwendig ist, bewährten sich zunächst in Inglasurdekoröfen, wurden dann in Schnellbrandöfen für den Glattbrand von Porzellan eingesetzt; zunächst für den Glattbrand von gebördelten (auf den Rand gestellten) Tassen und für Kannen. Die Durchlaufzeit für diesen Brennprozess beträgt 3 Stunden. Die Brenner waren in den Seitenwänden, nur oberhalb der Ware installiert; das Brenngut stand direkt auf dem Wagenplateau. Solche Schnellbrandöfen haben eine Nutzbreite von 0,7 m bis 0,8 m und eine Nutzhöhe von 0,35m, angepasst an die maximale Kannenhöhe.

Der Grund für die geringe Nutzbreite war die manuelle Be- und Entladung der Ofenwagen an der Rücklaufbahn, die von einer Seite stattfand und wegen der Armreichweite des Bedienpersonals keine größeren Nutzbreiten erlaubte.



Abb. 13: SiC-Cranks für den Glattbrand von Porzellanflachware

Mit der Einführung von Crank-Aufbauten aus SiC für Flachware (**Abb. 13**) und die Änderung des Umlaufsystems mit der Zu- und Abführung der Ware zwischen Ofen und Rücklaufbahn konnte man Ofennutzbreiten von 1,4 m bis 1,5 m realisieren. Gleichzeitig mussten zur Verbesserung der Temperaturgleichmäßigkeit im Ofenkanalquerschnitt „Unterbrenner“ eingesetzt werden, die in den Flammenspülraum unter der Ware mündeten.

Der Flammenspülraum wird durch SiC-Stützen geschaffen, auf denen Balken und darauf Unterlegsplatten ruhen. Zudem musste das Flachgewölbe wegen der kritischen Belastung der Widerlagersteine durch Hängedeckenkonstruktionen ersetzt werden. Erst der Einsatz automatischer Be- und Entladesysteme lässt Nutzbreiten von mehr als 2 m zu, wobei die Nutzhöhe ca. 0,6 m beträgt (**Abb. 14**).

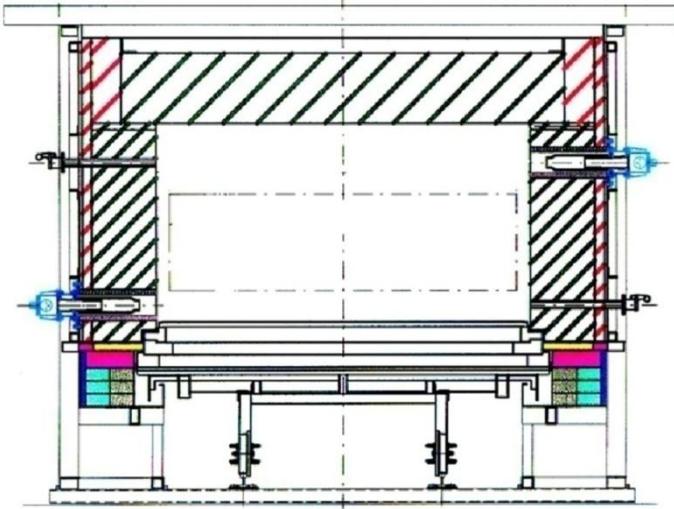


Abb. 14: Querschnitt eines Schnellbrandofens für den Glattbrand von Porzellan [BLW2].

Eine beispielhafte Ofenkurve, die für den Glattbrandprozess in einem Schnellbrandofen verwendet wird, ist in **Abb. 15** wiedergegeben.

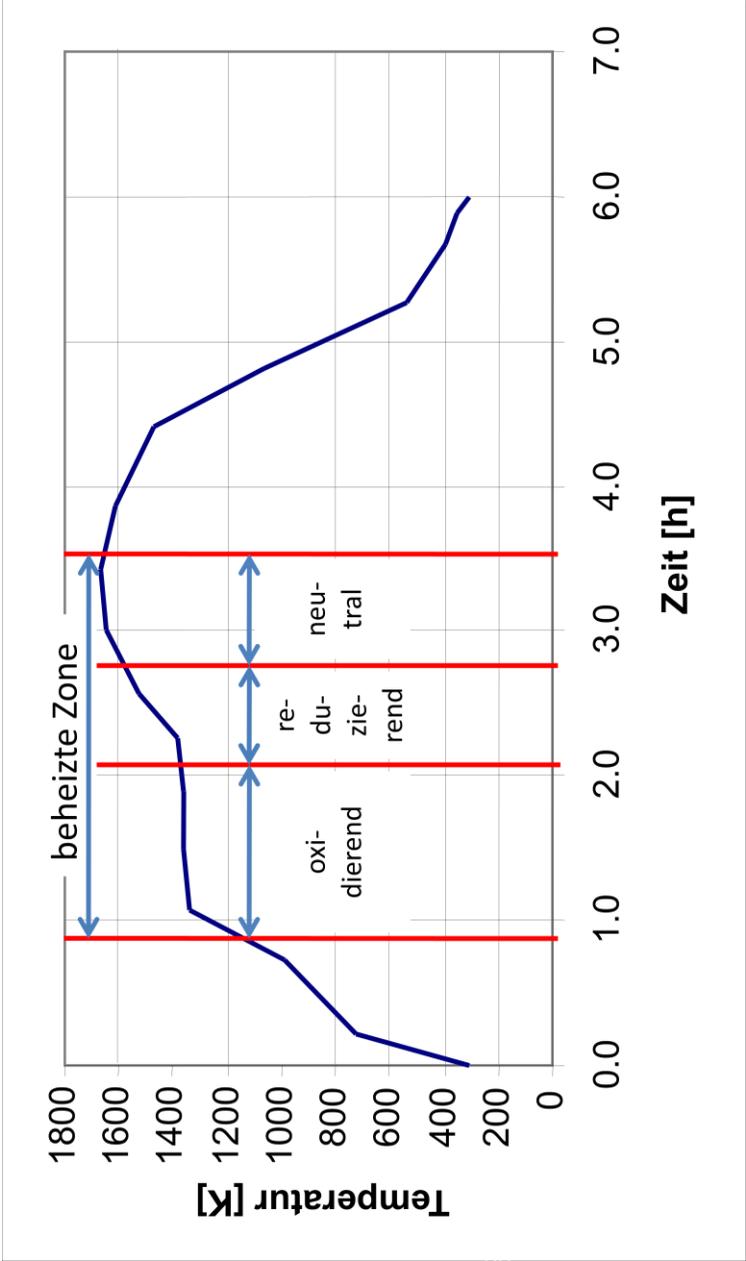


Abb. 15: Temperatur- und Atmosphäreneinstellung in einem Schnellbrandofen für den Glattbrand von Porzellan

Der Aufheizprozess bis zu Temperaturen von 950°C bis 1150°C geschieht in stark oxidierender Brennatmosfera mit ca. 8% Sauerstoffgehalt. Es wird damit sichergestellt, dass organische Bestandteile aus dem Scherben, aus der Glasur und eingelagerte Kohlenstoffpartikel ausgebrannt werden. In diesem Bereich darf die Glasur noch nicht geschlossen sein, d.h. sich keine Schmelzphase gebildet haben, damit die genannten Entgasungsprozesse ungehindert ablaufen können. Hierzu gehören auch Entsäuerungsprozesse von evtl. eingebrachten Carbonaten. Der Porzelliner nennt diesen Brennbereich Reinigungszone, die ca. 1/3 des gesamten Erwärmungsprozesses in einem Schnellbrandofen betragen kann.

Dem Reinigungsbereich schließt sich die Reduktionszone an, die sich bis knapp unterhalb der Maximaltemperatur erstreckt. In diesem Gebiet des Sauerstoffmangels mit einem durchschnittlichen CO-Gehalt von 2% und je nach verwendetem Brennstoff ein entsprechender H₂-Gehalt (ca.3%) wird der Eisengehalt (ca. 0,4% -0,8%) im Kaolin und Bindeton von Fe₂O₃ in FeO reduziert, wodurch man eine bläulich weiße Färbung des Porzellans erhält. Würde man in diesem Bereich oxidierend brennen, dann würde ein Teil des Fe₂O₃ mit der Kieselsäure unter Abscheidung von gasförmigen Sauerstoff zu Fayalit Fe₂²⁺[SiO₄] reagieren und der entstehende Sauerstoff zur Bildung von Blasen und Pocken in der Glasur führen. Das in dem Fall vorhandene Fe₂O₃ färbt den Scherben rostfarben, ein Fehler, den man als luftgelb bezeichnet. Nur eine sehr kurze Zeit wird anschließend bei der Maximaltemperatur eine neutrale bis leicht oxidierende Brennereinstellung vorgenommen, um dem Porzellan die kalt bläuliche Färbung zu nehmen und ihm einen warmen leicht elfenbeinfarbenen Anflug zu geben.

In der Volksrepublik China gibt es Porzellanrohstoffe, vor allem Kaoline, die einen Eisengehalt unter 0,2% haben und die deshalb einen durchgehenden oxidierenden Glattbrand von Porzellan ermöglichen.

Die Transparenz des Haushaltporzellans wird aufgrund des bereits erwähnten hohen Glasphasenanteils erreicht.

Damit beim Hartporzellanglattbrand die Ware auf den Cranks nicht festklebt, müssen die Tellerfüße vorher durch Abwischen von der Glasur befreit werden. Die Cranks sind zu Stapeln von bis zu 10 Etagen aufgebaut, die mit jeweils 3 Mullitdistanzstücken pro Crank auf einen Höhenabstand von ca. 60 mm unterstützt sind (**Abb. 16**) [Bec2].



Abb. 16: Besatz eines Schnellbrandofenwagens für den Glattbrand von Porzellan [Bec2].

Die Cranks besitzen eine Wandstärke von 5 mm – 6 mm. Um zum einen den Anteil der Brennhilfsmittelmasse des Besatzes zu verringern, weisen die Cranks in der Mitte eine ca. 40 mm Aussparung auf, zum anderen kann die Ofenatmosphäre ungehindert die Unterseite der Tellerböden erreichen. Den Crank-Stapel mit der Ware setzt man in modernen Brennbetrieben automatisch auf einen Rost aus rekristallisierten SiC-Balken, die auf Stützen ebenfalls aus SiC lagern. Das Masseverhältnis von Flachware zu Cranks incl. Rost und Stützen beträgt ca. 1: 3,2 bis 1:3,5.

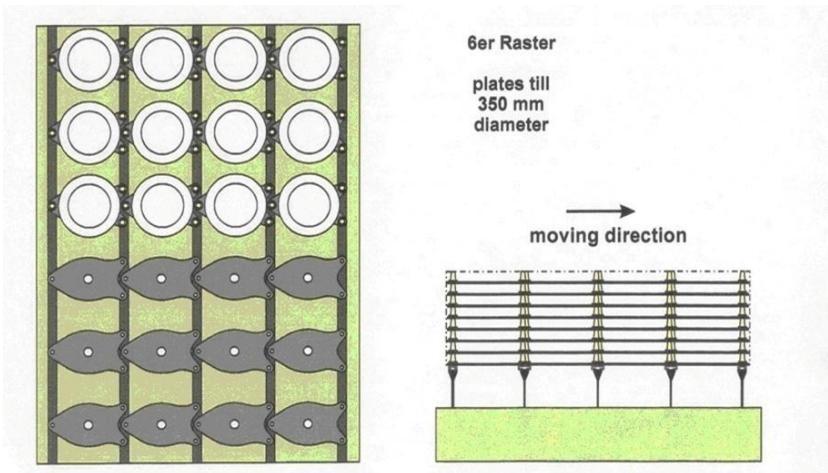


Abb. 17: Beladeschema für den Schnellbrand von Flachware im Schnellbrandverfahren

Bei dem in **Abb. 17** gezeigten Brennhilfsmittel-aufbausystem verwendet man Cranks mit gleicher Größe, unabhängig von den aufgelegten Flachwarendimensionen. Die Cranks haben eine größte Ausdehnung von ca. 400 mm, so dass je Crank Flachware mit einem Durchmesser von 350 mm oder zwei Teller mit maximalem Durchmesser von 170 mm gesetzt werden können. Das System wird z.Zt. bevorzugt, weil die Automatisierung der Beladung dadurch vereinfacht wird und man Investitionskosten verringert.

Als Variation dieser Besatzform können auf dem SiC-Rost SiC-Platten als Plateau aufgebaut werden, auf dem dann die Stapel mit unterschiedlichen Crank-Größen - angepasst an die Flachwarendimensionen - gestellt werden. Vorteilhaft ist die Möglichkeit, die Hohlware mit auf das Ofenwagenplateau zu setzen und dadurch eine höhere Besatzdichte zu erreichen; nachteilig ist die schwierige Automatisierung der Be- und Entladung.

6.7.3 Dekorbrand von Porzellan

In der Porzellanindustrie sind für den Dekorbrand verschiedene Brennverfahren üblich:

- Unterglasurdekorbrand
- Inglasurdekorbrand
- Aufglasurdekorbrand
- Kombination von Unterglasur-, Inglasur- und Aufglasurdekorbrand

Porzellan wird beim Unterglasurdekorbrand vor dem Glattbrand auf dem verglühten Scherben dekoriert, indem es bemalt, mit Abziehbildern beklebt oder in verschiedenen Verfahren bedruckt wird. Die verwendeten Farbkörper müssen den anschließenden hohen Glattbrandtemperaturen widerstehen. Dazu sind nur Metalloxide in der Lage, die eine stabile Spinell-Gitterstruktur bilden. Hierzu gehören:

- Cobaltoxid für Blaufärbung
- Chromoxid für Grünfärbung
- Manganoxid für Braunfärbung
- Zinnoxid und/oder Zinkoxid für (nicht sichtbare) Weißfärbung

Beim Glattbrand reagieren Glasur und Farbkörper miteinander zu einer festen Silikatverbindung, so dass die eigentlich giftigen Metalloxide gesundheitlich unbedenklich sind und das Dekor vor Abnutzung (spülmaschinenfest) geschützt ist.

Der Glattbrand mit dem Unterglasurdekor wird unter den im o.g. Kapitel aufgeführten Bedingungen im Tunnelofen konventioneller Bauart oder im Schnellbrandverfahren in Rollenöfen oder Tunnelöfen mit Wagenförderung durchgeführt.

Der Inglasurdekorbrand ist meistens der dritte Brand, also ein separates Brennverfahren nach dem Glattbrand. Die Dekore werden entweder mit dem Pinsel gleichmäßig auf das Porzellan aufgetragen oder mit der Farbpistole aufgespritzt oder als Siebdruckdekor im Abzieh- oder Schiebebildverfahren aufgebracht. Der anschließende Brand findet bei 1150°C - 1280°C statt. Dabei sinken die Farben in die erweichende Glasur ein, so dass sie vor mechanischer und chemischer Beanspruchung geschützt werden. Man spricht von Spülmaschinenfestigkeit. Die Palette der Einsinkfarben ist wesentlich größer als die der Unterglasurfarben. Aber sie behalten ihre Farbintensität nur, wenn eine sehr kurze Zeit bei Maximaltemperatur eingehalten wird. Deshalb findet der Inglasurdekorbrand in einer Gesamtdurchlaufzeit von nur 60 min - 120 min in Schnellbrandtunnelöfen statt.

Diese Öfen haben eine Nutzbreite von 0,84 m, angepasst an die Reichweite des Personals, das die manuelle Be- und Entladung an der Rücklaufbahn vornimmt. Bei größeren Nutzbreiten werden die Wagen zur Be- und Entladung auf der Rücklaufbahn um 90° gedreht. Die maximale Ofenlänge wird auf 48 m begrenzt, weil dann bei einer Ofenwagenlänge von 2 m nur noch 150 Sekunden für den jeweiligen Ent- und Beladevorgang des Ofenwagens zur Verfügung stehen, das ist zu kurz.

Die Flachware wird in temperaturwechselbeständige Mulcorit- oder Cordierit-Cranks eingelegt (**Abb. 18**) [Bec4]. Das Masseverhältnis von Ware und Brennhilfsmittel erreicht Werte von 1:1,5 - 1:2,5. Die Hohlware wird beim Schnellbrand-Tunnelofen mit Wagenförderung auf Cordierit-Lochplatten gesetzt, die das Wagenplateau abdecken; in Rollenöfen kommen Transportplatten z.B. der Dimension 450 mm x 600 mm zum Einsatz. Die Beladedichte liegt - bezogen auf die Oberfläche des Transportmittels - bei 15 kg/m² - 17 kg/m².



Abb. 18: Schnellbrandofen mit Wagenförderung zum Inglasur-Dekorbrand von Porzellan [Bec4].

Es werden spez. Energieverbrauchswerte beim Rollenofen von ca. 5800 kJ/kg und beim Schnellbrand-Tunnelofen mit Wagenförderung von ca. 8000 kJ/kg erreicht.

Beim Aufglasurdekor wird der Dekorauftrag auf den Glattbrandscherben auch durch Malen, Drucken oder Abziehbilder durchgeführt. Damit die Farben eine feste Verbindung mit der Glasur eingehen, muss der Schmelzpunkt der Farben unter dem der Glasur liegen. Vor Einführung des Inglasurdekorbrandes waren die in der Porzellanindustrie einzigen Dekorbrände der Unter- und der Aufglasurdekorbrand. Letzterer wird bei 800°C - 900°C durchgeführt, wobei dann für die Tunnelöfen wegen der tiefen Temperaturen metallische Körbe als Transportmittel verwendet werden konnten. Die Öfen waren elektrisch beheizt.

Ein Schutz des Dekors gegen chemische und mechanische Einwirkungen besteht beim Aufglasurdekor nicht, deshalb ist diese Art des Dekorbrandes stark zurückgegangen, kann aber bei Bedarf auch in Schnellbrandöfen des Inglasurdekorbrandes durchgeführt werden. Diese Anlagen sind meistens komplett mit Hoch-temperaturwolle ausgekleidet und deshalb sehr schnell auf die unterschiedlichen Temperaturprogramme umzustellen.

Die Ofenzeit beim Aufglasurdekorbrand beträgt ebenfalls 60 min - 120 min, der spezifische Energieverbrauch dieses Brennprozesses beträgt im Rollenofen ca. 3250 kJ/kg und im Schnellbrand-Tunnelofen mit Wagenförderung ca. 4950 kJ/kg.

Während des Brandes entweichen sehr viele organische Komponenten aus den Dekoren, die sich bei Unterschreitung der Taupunkttemperatur in den Abgaskanälen festsetzen können und sich dort u.U. entzünden können. In regelmäßigen Abständen muss deshalb bei ausschließlichem Aufglasurdekorbrand eine Reinigung der Abzüge stattfinden.

7.1 Ofenanlagen in der keramischen Industrie

Man unterscheidet zwischen elektrisch- und brennstoffbeheizten Durchlauf- und Chargenöfen. Der Tunnelofen ist die meist verwendete Art der Durchlauföfen. Die Grundform besteht aus einem geraden Kanal, der in Vorwärm-, Brenn- und Kühlzone eingeteilt ist. In der Brennzone wird die Maximaltemperatur erreicht. Er wird für große Brennkapazitäten eingesetzt, z.B. > 3 t /Tag Glattbrandporzellan. Als entscheidende Kriterien für den Einsatz von Tunnelöfen gelten:

- geeignet für hohe Produktionskapazitäten,
- geringer Energieverbrauch; im Gegensatz zu intermittierend betriebenen Ofenanlagen, bei denen die gesamte Ofenauskleidung mit jedem Brennprozess aufgeheizt werden muss, haben kontinuierliche Ofenanlagen einen konstanten Leerverbrauch, nur Aufheizen des Brenngutes ist notwendig,
- gute Temperaturgleichmäßigkeit im Ofenkanalquerschnitt,
- stabile Temperaturkurve, wodurch eine sehr große Qualitätsreproduzierbarkeit gegeben ist,
- nahezu konstante Brennstoffversorgung, so dass Extrakosten für Energiespitzen entfallen,
- annähernd konstante Abgasmassenströme, so dass im Gegensatz zu intermittierend betriebenen Ofenanlagen vergleichsweise kleinere Einheiten zur Entsorgung notwendig sind,
- kontinuierlicher Materialfluss,
- günstiges Investitions-Leistungs-Verhältnis,
- hohe Flexibilität bei leicht ausgekleideten Öfen, deshalb Abschalten zum Wochenende möglich.

Die wichtigsten Kriterien für den Einsatz diskontinuierlich betriebener Ofenanlagen sind:

- Anpassung an die Produktionskapazität; Überkapazitäten, die im Tunnelofen nicht mehr produziert werden können, übernimmt der intermittierend arbeitende Ofen,
- Flexibilität in der Einstellung der Temperatur- und Atmosphärenkurve; es können verschiedene

Brennprodukte nacheinander gebrannt werden, z.B. der Glüh- und der Glattbrand von Porzellan,

- geringer Arbeitskräfteeinsatz; automatischer Brennbetrieb, für den Arbeitskräfte nur zum Be- und Entladen zu Beginn und am Ende des Brennzyklus benötigt werden,
- preisgünstiger Einsatz von Arbeitskräften, weil der Brennzyklus so gelegt werden kann, dass keine Nacht-, Sonntag- und Feiertagsschichten gefahren werden müssen,
- geringer Platzbedarf,
- Ofeninspektionen können nach jedem Brand vorgenommen werden.

Chargenöfen haben eine wesentlich längere Historie als Durchlauföfen. Bereits in der Antike wurden Keramiken in Standöfen gebrannt, Tunnelöfen dagegen wurden erst im 19. Jahrhundert mit dem an Otto Bock am 27.4.1874 erteilten Patent bekannt [Bock] (**Abb. 19**).

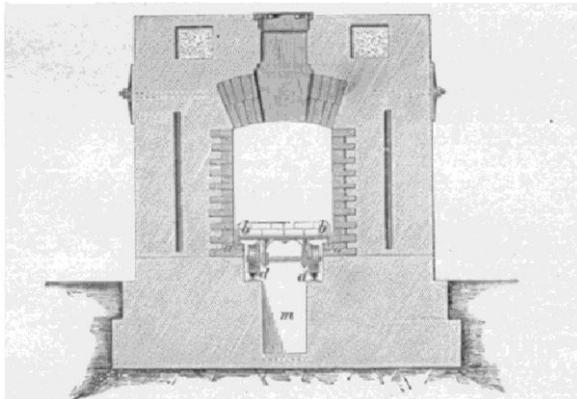


Abb.19: Tunnelofenpatent von Bock

7.2 Stahlkonstruktion

Konventionelle Ofenanlagen besitzen ein Sichtmauerwerk. Der Ofeninnenraum besteht aus Feuerfestmaterialien, die mit ihrer Anwendungsgrenze an die Betriebstemperaturen angepasst sind und je nach Brennproduktart in saure oder basische Werkstoffe angeglichen werden müssen. Der Ofenkanal wird durch ein stabiles Gewölbe aus Gewölbeformsteinen abgedeckt. Die Gewölbekräfte müssen über sichere steinerne Widerlager durch metallische Doppel-T-Träger aufgefangen werden. In ca. 2 m-Abstand bilden sie eine auf beiden Ofenseiten sichtbare Armierung, die über Spanngestänge quer über den Ofen horizontal die Kräfte aufnimmt. Beim Anheizen ist darauf zu achten, dass die jeweiligen Spanngestänge entsprechend der Dehnung des Gewölbes leicht gelöst werden, um den wachsenden Druck auf das Feuerfestmaterial nicht zu groß werden zu lassen.

In den 60er Jahren des vergangenen Jahrhunderts begann man Durchlauföfen in modularer Form vorzufertigen. Es waren dies Öfen für die Ferriteindustrie und die ersten Schnellbrandöfen für den Dekorbrand von Geschirr. Die Module wurden beim Kunden ausgemauert oder schon beim Hersteller mit Feuerleichtsteinen einschließlich der Gewölbe gemauert, vormontiert und für den Transport zum Käufer mit erheblichem Aufwand versteift.

Die Geschirrfabriken bestanden zum größten Teil aus mehrstöckigen Gebäudekomplexen, mit den Dekorabteilungen in den oberen Etagen. Die Ofensegmente wurden mit den Lastaufzügen in die entsprechende Abteilung gehievt, mussten deshalb leicht sein und in die Aufzüge passen, weshalb sie eine Modullänge von 2 m hatten. Die Formsteife der Ofengehäuse erhielt man durch Blechumformungen und Abkantungen mit Versteifungen um die Brenner und Längsprofile in Widerlagerhöhe. Eingefasst wurde die Modulkonstruktion durch ca. 100 mm breite Flansche, die aus 8 mm starken Blechen geschnitten wurden und mit denen die Ofengehäuse vor Ort zusammengeschraubt wurden.

Mit der Einführung von Laserschneidmaschinen wandelte sich die stählerne Gehäusekonstruktion von der formversteiften zur rahmensteifen Konzeption, bei der die Bleche mit allen Öffnungen für Brenner, Schaulöcher, Messsonden etc. vorgefertigt in die Rahmenkonstruktion eingeschweißt werden.

Modulabmessungen richten sich auch nach den Transportmöglichkeiten in Containern mit 8 Fuß Breite und 20 oder 40 Fuß Länge. Während bei Rollenöfen und Plattendurchschuböfen die Ofensegmente komplett als Boden- und Seitenteile in Breite oder Segmentlänge mit maximal 2,4 m versandt werden (**Abb. 20**),



Abb. 20: Modul eines Rollenofens [Bec5]

können bei Tunnelöfen mit Wagenförderung rechte und linke Seitenwände als Einzelteile mit bis zu 6 m Länge hergestellt werden (**Abb. 21**) [Bec5].



Abb. 21: Seitenmodule für einen Tunnelofen mit Wagenförderung [Bec5]

Das Rohrleitungssystem besteht aus den zu- und den abführenden Rohrleitungen. Brennstoff und Verbrennungsluft werden zugeführt, ebenso Luft für Eindüsen im unbeheizten Vorwärmbereich und Kühlluft in der Kühlzone. Zu den abführenden Leitungen gehören die Ofenabgasleitung, die Warmluftableitungen aus dem Kühlbereich und in einigen Fällen die sog. Zwischenabsaugung. Alle Leitungen sind so dimensioniert, dass bei maximalem Durchfluss und maximaler Fluidtemperatur die Geschwindigkeit von 15 m/s nicht überschritten wird. Damit ist aus Erfahrung gewährleistet, dass das Rohrleitungssystem nicht zu Schwingungen angeregt wird und keine Schäden an der Ofenanlage entstehen, sowie als Folge von Schwingungen eine Lärmentwicklung ausgeschlossen ist.

Da Brennstoffe pro Masseinheit Unterschiede bis zum 20-fachen im Heizwert besitzen, muss je nach Energiebedarf das

Brennstoff-Rohrleitungssystem für jede Ofenanlage neu bestimmt werden. Eine typische Brenneinrichtung zeigt **Abb. 22** [Bec5].



Abb. 22: Brenneinrichtung an einem Rollenofen [Bec5]

Alle eingesetzten Armaturen tragen als Abnahmezertifikat die CE-Kennzeichnung. Die gesamte Brenneinrichtung muss den Sicherheitsvorschriften der G 610, der DVGW, der DIN ISO und den jeweiligen nationalen Gesetzen entsprechen. Zusätzlich ist eine einfache Wartung bei laufendem Betrieb zu ermöglichen.

Die Verbrennungsluft und alle weiteren Luftzuführungen strömen in Edelstahlrohrleitungen, um Eisenbefall auf der empfindlichen keramischen Ware auszuschließen, der durch Korrosionspartikel aus den Leitungen auftreten kann.

Die Warmluft abführenden Leitungen bestehen wegen der hohen Temperaturen an den unmittelbaren Ofenübergangsstellen aus warmfesten Materialien. Man mischt die Abluft vor den Ventilatoren über Schieber mit sogenannter Falschluff, um sie auf

Temperaturen unter 400°C zu kühlen, damit im weiteren Rohrleitungsverlauf Normalstahlmaterial eingesetzt werden kann und damit der Einsatz von teuren Hochtemperaturventilatoren vermieden wird. Das Abgas aus der Verbrennung darf aber nicht unter 150°C Abgastemperatur sinken, weil sonst mit Bildung schwefliger Säure zu rechnen ist, die die Abgasleitung innerhalb kurzer Zeit zerstören würde. Mit Schwefelanteilen ist nicht nur aus dem Brennstoff, sondern auch als Spurenelement aus der keramischen Masse zu rechnen. Die Ventilatoren für die zuzuführende Luft sind für ein Druckgefälle von ca. 7000 Pa ausgelegt. Um Druckverluste und damit elektrischen Energieverbrauch möglichst gering zu halten, zeichnen sich energetisch optimierte Ofenanlagen durch die Verwendung von strömungs-günstigen Rohrstücken wie Bögen, Krümmer und Konen statt stumpfer Verbindungen aus.

Als Transportmittel werden Wagen sowohl in Tunnelöfen mit Wagenförderung als auch in Herdwagenöfen eingesetzt. Die Stahlkonstruktion der Wagen trägt das Brenngut und die feuerfeste Isolierschicht, die die Ofensohle darstellt. Die Gesamtmasse kann mehrere Tonnen betragen, entsprechend stabil muss der Stahlbau einschließlich der Achsen, Lager und Räder ausgelegt sein. Die Radlager sind gewöhnlich für Temperaturen bis 300°C ausgelegt und haben in der C3-Ausführung ein größeres Spiel, damit sie durch die Wärmedehnung nicht blockieren. Inzwischen ist ein regelmäßiger Schmierdienst mit Spezialfetten nicht mehr vorgeschrieben. Es sind enge Toleranzen von ± 2 mm zwischen Rad und Schiene einzuhalten, weil sonst die Labyrinthspalten zwischen Wagen und Ofenwänden mit 5 mm bis 10 mm von den harten Randsteinen der Wagen beim Durchlauf beschädigt würden.

Oftmals sind die Stützen für den Besatzaufbau aus hoch wärmeleitenden Material, z.B. aus SiC in die Wagenisolation gesetzt. Man muss durch besondere Isolation an diesen Stellen verhindern, dass ein erhöhter Wärmefluss-- eine Deformation der

sich darunter befindenden Stahlträgerkonstruktion verursacht und es dann zu einer Ofenwagenblockade kommt.

Als metallische Transportmittel direkt den Temperaturen ausgesetzt sind Förderbänder, wie sie für Anlagen zum Aufglasur-dekorbrand von Porzellan bei 850°C benutzt werden **Abb. 23** [Bec5].



Abb. 23: Förderbandofen für den Inglasur-Dekorbrand von Bone-China [Bec5]

Die metallischen Werkstoffe müssen zunderbeständig sein, um „Zunderbefall“ auf dem keramischen Brenngut zu vermeiden. Die Förderbänder gleiten durch den Ofen auf metallischen Blechen oder auf Rosten, die in Form von Fischgräten gefertigt sind. Die Zugfestigkeit des Metallbandes muss bei den genannten Temperaturen größer sein als die durch die Reibungskräfte auftretenden Spannungen. Der Verschleiß des Förderbandes erhöht sich mit steigender Massebelastung und Temperatur und mit der Ofenlänge. Die in der Praxis genutzte maximale Ofenlänge bei akzeptierter Lebensdauer des Transportbandes liegt bei 24 m. Längere Öfen sind durch den

Einsatz von nicht angetriebenen Rollen statt Blechen oder Rosten für Flachware möglich, jedoch kann größere Hohlware durch die wellenförmige Bewegung des Bandes auf und zwischen den Rollen zum Einsturz des Besatzes und zu Produktionsausfall führen. Es haben sich für den Förder-bandofen zum Aufglasurdekorbrand von Hartporzellan grob gewebte Förderbänder mit Querstäben und verschweißten Rändern aus dem Werkstoff 1.4841 bewährt. Für den Inglasurdekorbrand von Bone China, der bei 1050°C durchgeführt wird, empfiehlt es sich, den Werkstoff Haynes-214-alloy zu verwenden, der allerdings zur Bildung von Nickel-, Chrom- und Aluminiumoxidschutzschichten wärmevorbehandelt sein muss und deshalb teuer ist. Bei kurzen Förderbandofenanlagen, bzw. Förderbändern, die nur mit geringen Besatzmassen beladen sind, wird die Antriebstrommel gewöhnlich am Ofenauslauf montiert; besser entlastet wird im temperaturbelasteten Bereich das Zugtrum, wenn die Antriebstrommel am Ofeneinlauf installiert wird.

Gehäuse von Herdwagenöfen für den Brand von Standardprodukten wie Geschirr oder Sanitärkeramik werden auch in Modulbauweise gefertigt. Die Hersteller haben sich auf Standardbreiten und -höhen festgelegt, so dass kostengünstig gleich große Seitenteile und die Decke in Serie produziert werden können. Das Volumen dieser Öfen variiert mit der Anzahl der zu montierenden standardisierten Seitenteile.

Alle Rohrleitungen und die Brenner in Chargenöfen müssen – auch wenn dies nur kurzfristig auftritt – nach den höchsten Durchflussmassenströmen bemessen sein. Produktionssteigerungen durch Verkürzen des Brennzyklus erhöhen den Aufwand für Leitungen und Armaturen, wobei in den meisten Fällen das Rohrleitungssystem nach den Kühlluftmassenströmen ausgelegt wird. Die Kühlluft wird über Spezialbrenner sog. Luft-Überschussbrenner und zusätzlichen Eindüsungen temperaturgeregelt dem Ofen zugeführt.

Die Abgastemperaturen erreichen die maximalen Brenntemperaturen. Mit entsprechenden Kaltluftmassenströmen werden sie auf die für die Abgasventilatoren und für die anschließenden Abgasreinigungsanlagen verträglichen Temperaturen herunter gemischt. Auch wenn die Maximalwerte nur kurzfristig erreicht werden, muss das Gesamtsystem nach eben den Spitzenwerten dimensioniert werden.

7.3 Feuerfeste Zustellung

Den überwiegenden materiellen Wert einer Ofenanlage stellen die eingesetzten Feuerfestmaterialien dar. Nach internationaler Festlegung handelt es sich bei feuerfesten Erzeugnissen, um nichtmetallische keramische Werkstoffe, deren Erweichungspunkt (der sogenannte Segerkegelfallpunkt) nach genormten Prüfverfahren (DIN 51060) über 1.500°C liegt. Erweicht der Probekörper bei Temperaturen über 1.800°C spricht man von hochfeuerfesten Werkstoffen. Je nach Anwendungs- und Einsatzzweck halten feuerfeste Erzeugnisse Temperaturen bis zu 2.500°C stand.

Man unterscheidet zwischen sauren und basischen Materialien und bezieht sich dabei auf die chemischen Bestandteile, die sich von den zugehörigen Säuren oder Basen ableiten. Diese Unterscheidung ist wichtig, weil die chemische Beständigkeit von sauren Feuerfestmaterialien nur in sauren Ofenatmosphären gegeben ist; entsprechendes gilt für den basischen Einsatz.

Bei feuerfesten Materialien unterscheidet man zwischen geformten und ungeformten Erzeugnissen. Die nach ISO 5019 genormten Steine, die ihre Form beim Hersteller in den „Normalformaten“ NF1, NF2 und NF3 fertig gebrannt erhalten, werden als Verband-, Doppelnormal- und Langsteine, als Ganzwölber, Verbandganzwölber, Doppelganzwölber, Halbwölber, Wölber und Passsteine geliefert. Die ungeformten Erzeugnisse

kommen als Massen, Mörtel, Betone, Hochtemperaturwolle etc. zum Anwender. Die Formgebung geschieht durch Spritzen, Stampfen, Gießen, Montieren etc. bei der Verarbeitung.

Formsteine werden eingesetzt, wenn die Form des notwendigen Bauteils ein Einheitsformat nicht zulässt. Formsteine werden entweder maschinell gepresst oder als Handformstein mit entsprechender Lieferzeit gefertigt.

Vor ihrem eigentlichen Einsatz zur Wärmedämmung in Ofenanlagen muss das Feuerfestmaterial selbst auch gebrannt werden. Die **Tabelle 4** [AuDi] gibt Richtwerte für den Brand von Feuerfestmaterialien an.

Tabelle 4: Richtwerte für den Brand von Feuerfestmaterial [AuDi]

Material	Brenntemperaturen
Schamottesteine	1250°C-1500°C
Silikasteine	1450°C-1500°C
tonerdereiche Steine	1500°C-1800°C
Magnesia-Steine	1400°C-1800°C
nichtoxidkeramische Werkstoffe	1500°C-2400°C

Die Oxide von Silizium und Aluminium und ihre Verbindungen, sie werden Alumosilikate genannt, bilden die Grundlage für Silika-, Schamotte- und tonerdereiche Steine. Die Abhängigkeit der Eigenschaften von der Zusammensetzung kann aus dem Zweistoffsystem $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ abgelesen werden (**Abb. 24**).

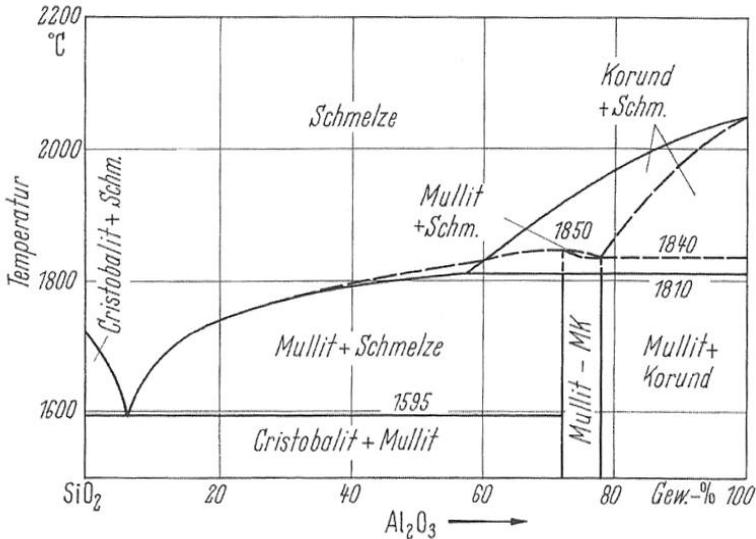


Abb. 24: Das $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ -Zweistoffsystem [SaS2]

Die Schmelzkurve weist bei ~94,5% SiO_2 -Gehalt ein Eutektikum mit der Schmelztemperatur 1595°C auf. Feuerfestmaterialien haben deshalb Zusammensetzungen rechts oder links von diesem Punkt. Von hier ausgehend steigt mit wachsendem Al_2O_3 -Gehalt auch der Schmelzpunkt der Mischung bis zur Schmelztemperatur des Korunds bei 2050°C.

Als einzige stabile Verbindung tritt in diesem System bei 78% Al_2O_3 der Mullit auf, der sich bei ~1840°C in Korund und Schmelze zersetzt und der ein Hauptbestandteil von Schamottesteinen und tonerdereichen Erzeugnissen ist.

Silikasteine

Silikasteine bestehen mindestens aus 93 % SiO_2 . Von rohstoffbedingten Verunreinigungen abgesehen, enthalten sie bis zu 3,5 % CaO , das als Bindemittel Anwendung findet. Der Brennprozess zur Herstellung von Silikasteinen ist gekennzeichnet durch einen langen Kühlvorgang, damit infolge der sprunghaft auftretenden Umwandlungen der Kieselsäuremodifikationen keine Risse auftreten [HenKer]. Der gebrannte Silikastein enthält die kristallinen SiO_2 -Modifikationen Cristobalit, Tridymit und Restquarz mit ihren entsprechenden reversiblen sprunghaften Umwandlungen des Raumgitters und den daraus resultierenden Längen-änderungen (vgl. Abb. 1). Da gut umgewandelte Silikasteine nur geringe oder keine Restquarzanteile enthalten, bestimmt das Verhältnis von Cristobalit und Tridymit ihr Verhalten unter Temperatureinfluss. Beim Aufheizen dehnen sich Silikasteine sehr stark aus und erreichen ihre größte thermische Dehnung mit ca. 12 mm/m zwischen 800°C und 1000°C [DGFS1]. Hochwertige Silikasteine dehnen sich oberhalb 1000°C nicht mehr aus und sind deshalb im höheren Temperaturbereich unempfindlich gegenüber Temperaturschwankungen. Ofenanlagen mit Silikaausmauerungen muss man unterhalb von 1000°C sehr vorsichtig aufheizen – ca. 800°C/Woche -, um Mauerwerksschäden zu vermeiden. Die erwähnten reversiblen γ - β - α -Tridymitumwandlungen bei 116°C und 163°C und die β - α -Cristobalitbildung bei 200°C bis 270°C sind die Begründungen hierfür. Hochwertige Silikasteine können bis nahe an den Schmelzpunkt eingesetzt werden, der bei >1600°C liegt. Wegen der sehr kurzen Erweichungsphase von ca. 10K, die bei der Druckfeuerbeständigkeitsprüfung festgestellt werden kann, ist Vorsicht beim Heranfahen an die Grenztemperatur geboten [DGFS2]. Zu beachten ist auch, dass aus vielen keramischen Brenngütern Dämpfe entweichen, die verstärkt mit der Silikaausmauerung reagieren können.

Schamottesteine

Schamottesteine bestehen zu 10% bis 45% aus Al_2O_3 und 50% bis 80% aus SiO_2 . Ausgangsrohstoffe sind Tonmineralien mit mehr oder weniger großem Anteil an Quarz, Feldspatresten und max. 6 % Flussmitteln aus Fe_2O_3 , CaO , MgO und Alkalien. Da Tone beim Trocknen und Brennen beträchtlich schwinden, ist es nicht möglich, große Formstücke aus reinem plastischen Ton herzustellen. Um die Schwindung herabzusetzen – als Voraussetzung für maßhaltige und formgerechte Steine –, muss der Ton mit vorgebranntem Ton, d.h. Schamotte, gemagert werden.

Nach dem Brand bestehen Schamottesteine aus Mullit, Cristobalit, Restquarz und Glas. Beim Einsatz als Ofenwerkstoff ändert sich bei längerer Temperatureinwirkung der Restquarz- und Cristobalitgehalt zu Gunsten steigenden Glasphasengehalts, so dass das Erweichungsverhalten durch ein sehr großes Erweichungsintervall gekennzeichnet ist.

Schamottesteine werden durch Trockenpressen, Halbtrockenpressen, plastisches Formen oder Schlickerguss geformt, wobei die Formgebung die Eigenschaften der Schamottesteine wesentlich prägt.

Schamottesteine werden nach ihrem Al_2O_3 -Gehalt charakterisiert. Mit steigendem Al_2O_3 -Anteilen wächst die Druckfeuerbeständigkeit ebenso wie mit der plastischen Formgebung wie aus **(Tabelle 5)** [DGFS3] zu entnehmen ist.

Das Formgebungsverfahren wird gekennzeichnet durch :

- p = plastische Formgebung
- h = halbtrockene Formgebung
- t = trockene Formgebung

Tabelle 5: Nomenklatur zu Schamottesteinen [DGFS3]:

Sorte	Al ₂ O ₃ [%]	Rohdichte [g/m ³ 10 ⁻³] mind.	Anteil offener Poren [%] max.	Druckfestigkeit (Raum- temperatur) [N/mm ²] mind.	Druckfeuer- beständig- keit t _a [°C] mind.
A40t	>40	2,15	20	30	1450
A40h		2,10	21	25	1420
A40p		1,90	26	15	1380
A35t	35-40	2,10	19	30	1400
A35h		2,05	20	25	1380
A35p		1,90	25	15	1350
A30t	30-35	2,05	19	30	1370
A30h		2,05	20	25	1350
A30p		1,90	24	15	1320
A25t	<30	2,05	18	35	1340
A25h		2,05	19	30	1320
A25p		1,90	22	20	1300

Tonerdereiche Steine

Tonerdereiche Steine liegen im System Al₂O₃ – SiO₂ bei Al₂O₃ –Werten >45 %. Erhöhte thermische und chemische Beständigkeit ist das Ziel. Für die Herstellung werden sowohl Rohstoffe natürlicher Vorkommen als auch synthetische Stoffe eingesetzt. Cyanit, Sillimanit und Andalusit gehören zu den natürlichen Rohstoffen, die die Sillimanitgruppe der tonerdereichen Steine bilden. Bei hohen Temperaturen zerfallen die Minerale dieser Gruppe zu Mullit und SiO₂. Weil ihr Volumen dabei zunimmt, wachsen Steine aus solchen Rohstoffen je nach Mineralart oder Kombination um 5% bis 15% [DiFT]. Die vollständige Umwandlung verlangt Temperaturen von ca. 1550°C. Feuerfeste Steine der

Sillimanitgruppe bestehen - ebenso wie Schamotte - aus Mullit und SiO_2 . Weil die Rohstoffe tonerdereicher sind, ist der Anteil an Mullit wesentlich höher und der Anteil an SiO_2 wesentlich geringer als bei Schamotte. Die höhere Reinheit senkt den Glasphasenanteil und damit die Neigung zum Druckfließen. Bei noch höheren Anforderungen nimmt man Bauxit als Rohstoff oder die synthetischen Rohstoffe Sintermullit, Schmelzmullit, kalzinierte Tonerde, Sinterkorund und Schmelzkorund.

Basische feuerfeste Steine

Basische Steine leiten sich von Magnesiumoxid (MgO), Calciumoxid (CaO) und Chromoxid (Cr_2O_3) sowie deren Verbindungen ab. Die Bezeichnung richtet sich nach dem Massenverhältnis dieser Komponenten. Für Erzeugnisse mit mehr als 80% MgO sind die Bezeichnungen Magnesiasteine und Magnesitsteine eingeführt.

Magnesiumoxid hat den sehr hohen Schmelzpunkt von 2800°C . Das thermische Dehnungsverhalten von Magnesiasteinen ist mit 20 mm/m bei 1400°C [DGFS4] nahezu doppelt so groß wie bei Silikasteinen. Sie haben nur eine geringe Temperaturwechselbeständigkeit, obwohl die Wärmeleitfähigkeit mit 5 W/mK bei 1000°C hoch ist. Guter Beständigkeit gegen basische Angriffe steht ein Druckfließen bei bereits 1400°C in oxidischen Atmosphären gegenüber [DGFS4].

Zum Erhöhen der Schlackenbeständigkeit werden Magnesiasteine nach dem Brand mit Pechen oder Teeren imprägniert. Im Gegensatz zur Pech-Tränkung gibt es auch die Möglichkeit, Pech der Rohmischung zuzugeben und die Steine bei 300°C - 600°C zu tempern. Der Brand wird erst am Einsatzort durchgeführt und damit wird dort die Endfestigkeit erreicht. Die Feuerfestigkeit und die Beständigkeit gegenüber basischen Schlacken werden durch Chromerzzusätze zum Magnesia-Rohsinter erhöht [DGFS5]. Eine weitere Steigerung der

Festigkeitswerte, im Besonderen der Kaltdruckfestigkeit, erzielt man mit den Chromitsteinen $[\text{Fe}, \text{Mg}(\text{Cr}, \text{Al})_2 \text{O}_4]$. Diese Steine zeichnen sich durch Beständigkeit gegenüber basischen und sauren Schlacken aus. Von Nachteil ist die geringe Temperaturwechselbeständigkeit. Aufgrund der Beständigkeit gegenüber sauren und basischen Atmosphären eignen sie sich besonders gut als Trennschicht zwischen sauren und basischen Materialien. Forsteritsteine $[\text{Mg}_2\text{SiO}_4]$ dagegen reagieren bei Temperaturen über 1450°C mit Silikasteinen [DGFS6]. Dolomitsteine $[\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2]$ werden auch teer- oder pechgebunden und ungebrannt ausgeliefert. Zur Verbesserung der Hydratationsbeständigkeit müssen sie vorher einem Temperprozess bei 300°C durchlaufen.

Nichtoxidische feuerfeste Erzeugnisse

In der keramischen Industrie setzt man nichtoxidische Werkstoffe hauptsächlich als SiC-Materialien ein. Dabei unterscheidet man zwischen

- rekristallisiertem SiC (RSiC),
- drucklos gesintertem SiC (SSiC),
- infiltriertem SiC (SiSiC).

Das rekristallisierte SiC besteht aus SiC-Körnern, die durch einen sauerstofffreien Brand bei 2300 bis 2400°C zu einem porösen Körper verbunden sind. Der typische Kornaufbau besteht aus einer bimodalen SiC-Kornverteilung [SaS5], die durch enge Kornbänder bei $100 \mu\text{m}$ und bei $10 \mu\text{m}$ charakterisiert sind. Rekristallisiertes SiC wird in der Keramikindustrie, besonders in der Porzellanindustrie, als dünnwandiges, temperaturwechselbeständiges Brennhilfsmittel eingesetzt. In oxidierenden Atmosphären bildet sich bei höheren Temperaturen eine passivierende SiO_2 - (Glas)-Schutzschicht auf den SiC-Materialien aus, die eine weitergehende Oxidation verhindern. Da jedoch diese Glasschicht in der Anwendung als Brennhilfsmittel mit dem

Brenngut reagieren d.h. verkleben würde, muss man die Brenngutunterlagen mit einer Kaolinschlemme als trennende Engobe bestreichen. Die passivierende SiO_2 -Schutzschicht wird bei höheren Temperaturen und reduzierenden Umgebungstemperaturen durch Reduktion zu SiO -Pulver langsam abgetragen, so dass dann kein Oxidationsschutz mehr vorhanden ist. Der Einsatz dieses Werkstoffes z.B. als Brennerdüse ist nur dann gegeben, wenn die Brennerkonstruktion keine rezirkulierende Strömung unverbrannter heißer Gase zulässt.

Das drucklos gesinterte SiC ist ein gasdicht gesinterter Werkstoff. Diese porenfreien Erzeugnisse erhält man durch Sinteradditive wie Bor, Aluminium und Kohlenstoff, durch Verwendung von sehr feinkörnigem SiC -Pulver $< 4\mu\text{m}$, und durch den Brennprozess bei 2000°C bis 2200°C unter Schutzgasatmosphäre [SaS6]. Aufgrund der fehlenden Porosität sind drucklos gesinterte SiC -Materialien oxidationsbeständig; sie werden deshalb in erster Linie für höchstbeanspruchte Teile, z.B. Brenner, eingesetzt. Siliziuminfiltriertes SiC wird aus Mischungen von SiC -Körnungen von $1\mu\text{m}$ bis $100\mu\text{m}$ und Kohlenstoff in Anwesenheit von flüssigem oder gasförmigem Silizium im Vakuum oberhalb des Schmelzpunktes von Silizium (1410°C) hergestellt. Bei diesem Prozess reagiert das metallische Silizium mit dem amorphen Kohlenstoff zu sekundärem $\beta\text{-SiC}$, das auf den primären SiC -Körnern aufwächst. Bei üblichem Überfluss an metallischem Silizium werden während des Brandes alle Poren im Werkstoff gefüllt, so dass je nach Prozessführung ein gasdichtes Produkt mit 6 Vol-% - 30 Vol-% freiem Silizium entsteht.

Wegen der relativ niedrigen Schmelztemperatur des Siliziums bei 1410°C werden diese Werkstoffe gerne als Brennhilfsmittel für den Sanitärbrand, aber auch als Rollen für Rollenöfen eingesetzt, in Rollenöfen für den Glattbrand von Hartporzellan jedoch nur im Temperaturbereich unterhalb von 1360°C .

Feuerleichtsteine

Als Kriterium der Feuerleichtsteine nach ISO 2245:2006 gilt eine Mindestporosität von 45% und eine Anwendungstemperatur von mindestens 800°C. Aus ASTM C 155-70 und DIN EN 1094 (**Tabelle 6**) [Prom] [DGFS7] sind die Klassifikationstemperaturen, bei der die Schwindung des Materials nicht mehr als 2% beträgt, sowie die Maximalrohdsichten zu entnehmen. Die mineralische Zusammensetzung von Feuerleichtsteinen ist weitgehend identisch mit der der dichten feuerfesten Steine.

Für den Ofenbauer ist wichtig zu wissen, dass die Klassifikationstemperatur nicht mit der Dauerbelastungstemperatur identisch ist. Der Praktiker wird den Einsatz verschiedener Qualitäten mit mehr als 100K unter der Klassifikationstemperatur planen. Als Klassifikationstemperatur wird die Temperatur angegeben, bei der nach 12 h nicht mehr als 2% Längenänderung eintritt. Generell zeichnen sich Feuerleichtsteine aufgrund ihrer hohen Porosität aus durch

- geringe Wärmeleitfähigkeit
- geringe Rohdichte
- niedrige Speicherwärme.

Tabelle 6: Klassifizierung von Feuerleichtsteinen

DIN-EN 1094 Teil 2			ASTMC 155			
Gruppe	Prüftemperatur [°C]	Rohdichte [kg/m ³]	Gruppe	Prüftemperatur [°F] [°C]		max. Rohdichte [kg/m ³]
75	750	400				
80	800	500				
85	850	550	16 = 875 °C	1550	845	540
90	900	600				
95	950	650				
100	1000	650				
105	1050	700	20 = 1100 °C	1950	1070	640
110	1100	700				
115	1150	700				
120	1200	700				
125	1250	750	23 = 1260 °C	2250	1230	770
130	1300	800				
135	1350	850				
140	1400	900	26 = 1430 °C	2550	1400	870
150	1500	950	28 = 1540 °C	2750	1510	960
160	1600	1150	30 = 1650 °C	2950	1620	1090
170	1700	1350	32 = 1760 °C	3150	1730	1520
180	1800	1600	33 = 1820 °C	3250	1790	1520

Die genannten Eigenschaften werden weitgehend von den Verfahren bestimmt, die zur Porenbildung eingesetzt wurden. Außerdem wirken sich auch die Art der Formgebung und die Art des Verdichtens auf die Ausrichtung und die Gestalt der Poren aus. So weisen stranggepresste Erzeugnisse eine in Pressrichtung gestreckte Porenbildung auf, was eine Richtungsabhängigkeit von Eigenschaften (Anisotropie), insbesondere der Wärmeleitung und der Festigkeit zur Folge hat.

Zur Porenbildung werden ausbrennende oder verdampfende oder natürliche poröse oder thermisch zersetzende oder aufschäumende Stoffe verwendet.

In der Anwendung von Feuerleichtsteinen besitzen viele Sorten eine geringe Temperaturwechselbeständigkeit. Infolge ihrer geringen Wärmeleitung ergeben sich große Temperaturdifferenzen im Körper, die zu mechanischen Spannungen und im Extremfall zum Bruch führen können. Aufgrund der hohen spezifischen Oberfläche sind Feuerleichtsteine generell empfindlich gegenüber chemischem Angriff.

Reduzierende Ofenatmosphären fordern Werkstoffe mit möglichst niedrigem Gehalt an reaktionsfähigen Eisenverbindungen. Kohlenmonoxid wird bei Temperaturen von 400°C - 500°C aufgrund der katalytischen Wirkung von Eisenoxid zersetzt und kann durch Ablagerung von Kohlenstoff zu Gefügeschäden, dem sog. Kohlenstoff-bursting, führen. Methan führt bei Temperaturen oberhalb von 900°C ebenfalls zu Kohlenstoffablagerungen.

Alkalische Dämpfe und alkalische Kondensate rufen Korrosionsschäden hervor, die allgemein als Alkali-bursting bezeichnet werden.

Wasserstoff in reduzierenden Atmosphären führt in Abhängigkeit von der Konzentration bei erhöhter Temperatur zur Zersetzung der Kieselsäure und ggf. anderen oxidischen Bestandteilen [EBE], jedoch nicht zur Zersetzung von Tonerde.

Der Praktiker wird ein besonderes Augenmerk auf die Kantenfestigkeit legen. Ungenügende Kantenfestigkeit kann zu Abplatzungen oder Rieseln von Feuerfestmaterialien im Ofenraum führen, was die gefürchteten Befallserscheinungen auf dem Brenngut hervorruft. Die Kantenfestigkeit ist kein genormtes Prüfverfahren. Es gibt hierzu aber apparative Einrichtungen wie in [ISFK] beschrieben. Ob ausreichende Kantenfestigkeit der einzusetzenden Feuerfestmaterialien vorhanden ist, wird meistens vor Ort durch die Beurteilung des erfahrenen Montageleitpersonals entschieden.

Hochtemperaturwolle [Bec2]

Nach DIN EN 1094-1 ist Hochtemperaturwolle eine aus mineralischen Rohstoffen synthetisch hergestellte Anhäufung von Fasern mit unterschiedlichen Längen und Durchmessern, die im Gegensatz zu natürlichen Fasern parallele Kanten aufweisen. Man unterscheidet die Hochtemperaturwolle in amorphe und kristalline Wolle, die man nach **(Abb. 25)** [wiki] in weitere Untergliederungen unterteilen kann.

AES- (Alcaline-Earth-Silicate-)Wolle und ASW (Aluminiumsilikatwolle) stellt man im Schmelzverfahren her, dabei werden die Rohstoffe im elektrowiderstandsbeheizten Wannen geschmolzen und der am Boden der Wanne austretende Schmelzstrahl entweder durch schnell rotierende Scheiben oder in einem Luft- oder Dampfstrom von hoher Geschwindigkeit quer oder parallel zur Strahlrichtung zu Fasern mit unterschiedlichen Längen und Durchmessern gezogen. Die so hergestellten Fasern haben durch die Schockkühlung eine Glasstruktur. AES-Wollen sind bekannt als Hochtemperaturglaswollen, die im Ofenbau gewöhnlich bis 900°C in der Hinterisolation eingesetzt werden.

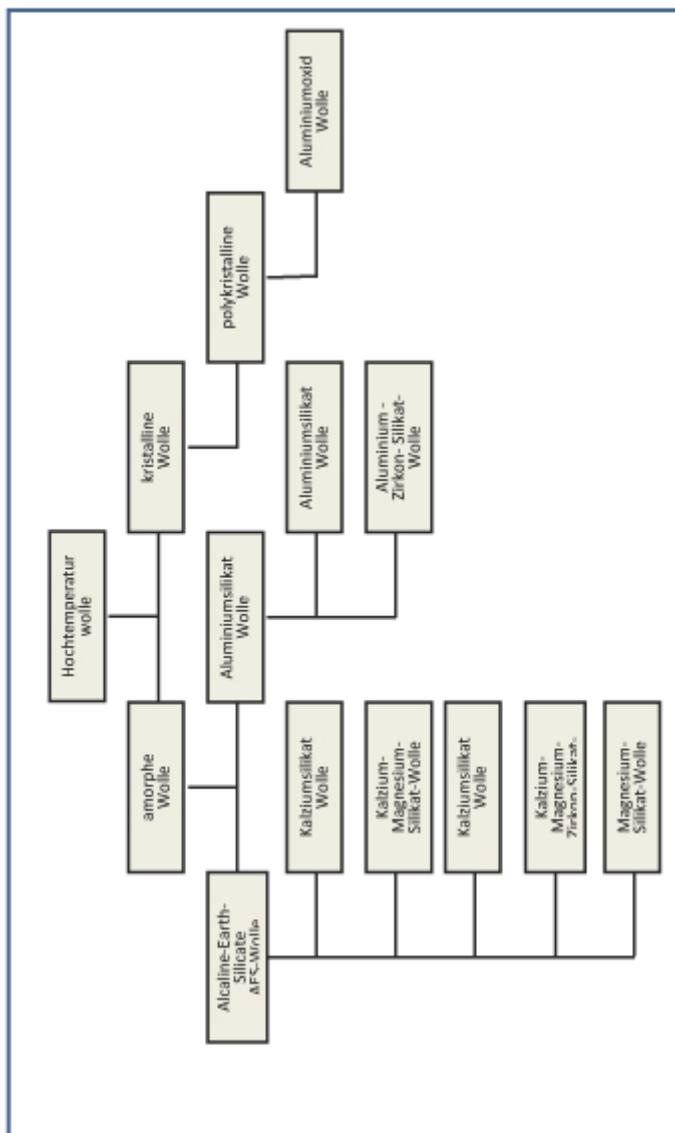


Abb. 25: Einteilung der Hochtemperaturwollen

ASW wird üblicherweise aus Al_2O_3 und SiO_2 im Masseverhältnis 1:1 hergestellt und bei Einsatztemperaturen $>900^\circ\text{C}$ verwendet.

Polykristalline Wolle (PCW) mit mehr als 70%igen Al_2O_3 -Gehalten werden im Sol-Gel-Verfahren aus wässrigen Spinnlösungen von Aluminiumsalzen, SiO_2 -Zusatz und organischem Trägermaterial gewonnen, mehrstufig thermisch behandelt und in einen polykristallinen Zustand überführt, wobei die organischen Bestandteile ausgebrannt werden. Mullit und Korund sind die typischen kristallinen Phasen. Die Klassifikations-temperatur wird mit bis zu 1800°C angegeben.

Die charakteristischen Eigenschaften der Hochtemperaturwolle lassen sich durch

- niedrige Rohdichte
- geringe Speicherwärme
- geringe Wärmeleitfähigkeit
- ausgezeichnete Temperaturwechselbeständigkeit

beschreiben. Aus diesen Eigenschaften resultieren im Vergleich zu konventionellen Ausmauerungen Energieeinsparungen und damit reduzierte Schadstoffemissionen. Mit der geringen Masse der Auskleidung wird auch eine leichte Stahlkonstruktion eingesetzt, so dass die Traglastanforderungen an die Fundamente geringer anzusetzen sind. Ofenanlagen mit Auskleidungen aus Hochtemperaturwolle lassen sich rasch montieren vor allem aber gestatten sie bei diskontinuierlich betriebenen Anlagen schnelle Aufheiz- und Kühlprozesse. Nachteilig ist die geringe Festigkeit der Hochtemperaturwolle, so dass sie nur geringen mechanischen und erosiven Beanspruchungen ausgesetzt werden können.

Durch schnelle Abkühlung bei der Herstellung können amorphe Wollen Schmelzperlen in Kugel- und Tropfenform, sog.

Shots enthalten, die sich während des Betriebes lösen und zu Befall führen. Die Hochtemperaturwolle (Bulk) verwendet man im Ofenbau zum Ausstopfen von Fugen und Hohlräumen. Durch Vernähen wird die Hochtemperaturwolle zu Matten (Blankets) mit unterschiedlichen Rohdichten und Dicken konfektioniert. Diese Matten werden mit speziellen Halterungen in Ofeninnenräumen befestigt. Module der Hochtemperaturwolle erhält man durch Schichten, Falten oder Kleben von Matten. Module werden vorverdichtet, so dass sie nach dem Einbau auf Grund ihres Rückfederungsvermögens die Arbeitsfugen schließen.

Während des Ofenbetriebes verändert sich die Mikrostruktur der Hochtemperaturwolle mit steigender Betriebsdauer und höherer Betriebstemperatur. Glasige Fasern rekristallisieren und bilden Mullit und Cristobalit, dabei nimmt die Sprödigkeit zu. Diese Vorgänge sind mit Schwindungen verbunden. Das Schwindungsverhalten ist das Kriterium für die Klassifikationstemperatur. Die Klassifikationstemperatur für Hochtemperaturwolle ist definiert als die Temperatur, bei der ein Probekörper bei einseitiger Erwärmung innerhalb von 24 h um nicht mehr als 4% linear schwindet [DGFS8]. Deshalb ist ein Einsatz bei 100°C bis 150°C unterhalb der Klassifikationstemperatur angeraten.

Matten aus amorphen Wollen haben eine Rohdichte von 90 kg/m³ - 160 kg/m³; die aus polykristallinen Wollen eine Rohdichte von 50 kg/m³ - 100 kg/m³. Die Wärmeleitfähigkeit der Hochtemperaturwollen ist abhängig von der Temperatur und der Rohdichte, sie weist Werte zwischen 0,06 W/m/K und 0,96 W/m/K auf.

Bei der Be- und Verarbeitung von Hochtemperaturwolle können Stäube entstehen. Es ist zu beachten, dass Fasern mit einer Länge >5 µm, einem Durchmesser <3 µm und einem Längen-/Durchmesser-Verhältnis >3:1 als lungengängig und damit als karzinom-erregend angesehen werden.

Die entsprechenden Vorschriften in den „Technischen Regeln für Gefahrstoffe“ (TRGS 521) und die der Hersteller sind zu beachten.

Hochtemperaturwolle wird in modernen kontinuierlichen Ofenanlagen hauptsächlich als Decken-element (**Abb. 26**) [Bec5] eingesetzt.



Abb. 26: Deckenelemente aus Hochtemperaturwolle [Bec5]

Hochtemperaturwollen, gleichgültig ob in Bulk-, Blanket- oder Modulform, besitzen eine große spezifische Oberfläche und eine durchgehende hohe Porosität. Aus keramischem Brenngut entweichen oft schädliche Dämpfe, die in die Ofenauskleidungen eindringen. Dieser Diffusionsprozess läuft umso schneller ab, je höher u.a. die Porosität ist.

Auflösungserscheinungen der Isolierung gibt es, wenn Dämpfe und Isoliermaterial bei relativ niedriger Temperatur miteinander reagieren. So haben z.B. Untersuchungen ergeben, dass das gerne als Trübungsmittel in den Glasuren eingesetzte Zinkoxid, das Ablösen ganzer Blöcke der Hochtemperaturwolle aus der Isolierung bewirkte. Abhilfe erhält man hier nur durch Eliminierung des ZnO. Bei Stoffen, die bei tieferen Temperaturen kondensieren, kann auch eine Edelstahlfolie eingesetzt werden, die als Diffusionssperre in der Ofenwand in den Bereichen dient, in denen noch nicht der Taupunkt der Dämpfe erreicht wird.

Alle kontinuierlichen Ofenanlagen, die für Temperaturen oberhalb der Temperatureinsatzgrenze von Hochtemperaturwolle eingesetzt werden, benötigen eine Hängedecke aus Feuerfeststeinen (**Abb. 27**) [Bec8] oder müssen als Gewölbe ausgebildet werden.

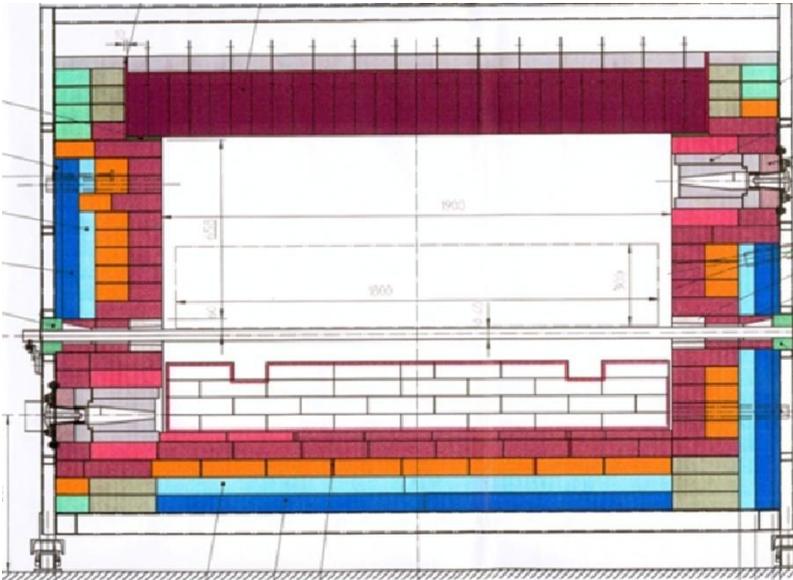


Abb. 27: Rollenofen mit Hängedecke aus Feuerfeststeinen [Bec8]

Hängedecken befestigt man mit Ankern aus Hochtemperaturstählen an die tragende Deckenstahlkonstruktion. Bei Steinen mit mehr als 300 mm Isolierstärke kann der hohe Temperaturgradient im Stein zu hohen Spannungen und zum Überschreiten der Festigkeitsgrenze und damit zum Abreißen des Steins führen. Mehr Isolierung, z.B. durch Aufbringung einer zusätzlichen Isoliermasse unter Einbeziehung der metallischen Anker lässt dagegen wegen des sich einstellenden „Wärmestaus“ die metallischen Anker erweichen.

Ein Gewölbe benötigt eine massive seitliche Stützkonstruktion. Flachgewölbe (**Abb. 28**) [Bec5] mit dem üblichen Stich, der mit 15 % der Ofenbreite zu kalkulieren ist, stellen eine äußerst hohe Belastung für das Steinmaterial schon ab einer Breite von 1,5 m bei 1400°C dar.

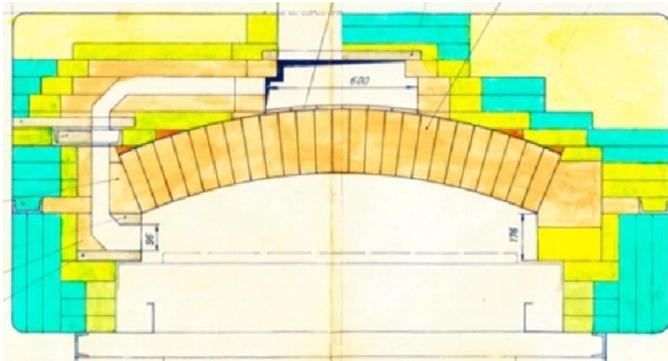


Abb. 28: Flachgewölbe eines Schnellbrandofens [Bec5]

Das Rundgewölbe und auch das Korbgewölbe (**Abb. 29**) [Bec5] bewirken einen großen Leerraum im Ofenquerschnitt, der nicht genutzt werden kann, weil andernfalls die oberen Brenner direkt auf die Ware brennen würden.

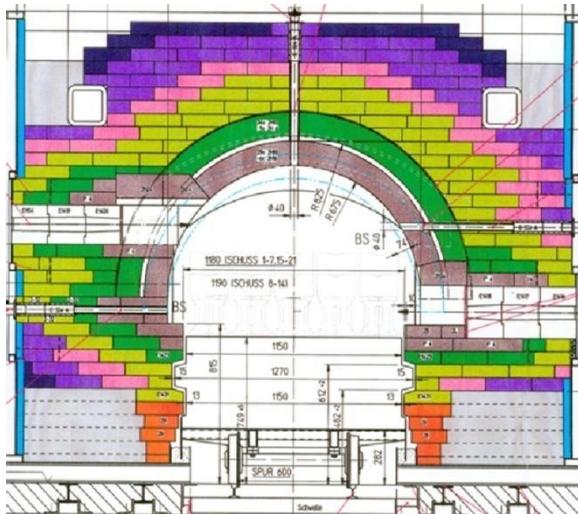


Abb. 29: Korbgewölbe in einem Hochtemperatur-Tunnelofen [Bec5]

Gewölbe und scheinrechte Bogen müssen immer aus einer ungeraden Anzahl von Steinen bestehen. Der mittlere Schlussstein ist satt einzupassen. Um Abplatzungen von den Kanten der feuerzugewandten Steinseiten zu vermeiden, empfiehlt es sich, die unteren Längskanten anzuphasen.

Bei Gewölben, die aus Formsteinen nach dem Nut- und Federprinzip (**Abb. 30**) [Bec5] aufgebaut sind, ist nur der obere Teil mit Mörtel anzugeben, um Befall zu vermeiden [Baum].



Abb. 30: Gewölbe aus Formsteinen im Nut- und Federprinzip
[Bec5]

Eine feuerfeste Wand wird erst standhaft:

- durch die Verwendung von Materialien mit ausreichend bemessener Heißdruckfestigkeit,
- durch Einbinden im Mauerwerk,
- durch Verankerungen.

Bei metallischen Verankerungen ist darauf zu achten, dass sie in Temperaturbereichen eingesetzt werden, die noch ausreichende Festigkeitswerte für die Anker gewährleisten, Richtgrenzwert ist hier ca. 850°C. Deshalb sind Bereiche metallischer Verankerungen meistens nicht wärmeisoliert, wodurch an diesen Stellen höhere Wärmeverluste entstehen.

Lager- und Stoßfugen verbinden durch Feuermörtel und Feuerkitt die einzelnen Steine. Ebenso wie bei der Steinauswahl ist auch bei dem Mörtel und dem Kitt auf Einsatztemperatur, Belastung, Ofenraumatmosphären und basische oder saure Umgebungsbedingungen zu achten. Die Fugenstärke wird in Schnellbrandofenanlagen mit 1mm bis 3 mm angesetzt, sie sollte wegen der meist höheren Wärmeleitfähigkeit des Fugenmaterials immer klein gehalten werden und deshalb auch möglichst nicht durchgehend gemauert werden. Jeder Stein muss vor dem vollständigen Bestreichen mit Feuermörtel oder Kitt staubfrei und mit Wasser benetzt sein, um eine feste Bindung zu gewährleisten. Unvollständiges Bestreichen führt zu Luft einschlüssen und dann zu einer geringeren Haftung des Steins mit dem Mörtel, bzw. zum Lösen der Verbindung unter Temperatureinfluss.

Gleit- und Trennfugen (**Abb. 31**) [Baum] erleichtern und ermöglichen das Gleiten von Bauteilen, die unterschiedliches Dehnungsverhalten unter Temperatureinfluss haben; dies ist prinzipiell in jeder mehrschichtigen Isolationswand von Ofenanlagen der Fall.

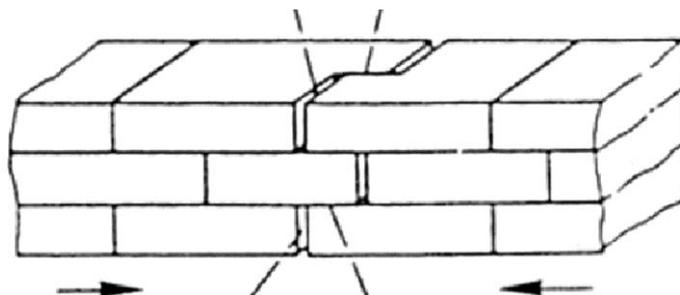


Abb. 31: Trenn- und Gleitfugen [Baum]

Dehnfugen sind in allen thermisch belasteten Mauerwerken zu berücksichtigen. Sie werden mit ca. 1m Abstand voneinander ausgeführt und häufig mit Faserstreifen ausgestopft, müssen jedoch frei von Kleber oder Mörtel sein. Ihre Aufgabe ist

es, das reversible Ausdehnungsverhalten der Feuerfest-erzeugnisse aufzunehmen. Es setzt die genaue Kenntnis des Ausdehnungskoeffizienten voraus, denn im Betriebszustand dürfen keine Undichtigkeitsstellen durch Dehnfugen auftreten.

Die geringe Rohdichte und damit die niedrige Wärmeaufnahme der Wollematerialien wird in erster Linie für die Isolierung von periodisch betriebenen Öfen genutzt und zwar bei Brennzyklen unter ca. 20 Stunden. Bei kurzen Brennzyklen und konventioneller Steinausmauerung führen steile Temperaturgradienten in den Steinen zu übermäßigen Spannungen und damit zur Zerstörung des massiven Feuerfestmaterials.

Bei intermittierend betriebenen Ofenanlagen, die mit Hochtemperaturwolle ausgekleidet sind, ist ein besonderes Augenmerk auf den Schutz der Hochtemperaturwolle vor sich bildender Schmelze zu legen. Sie können sich durch Reaktion mit Komponenten aus der Ofenatmosphäre bilden. Es werden deshalb Diffusionssperren aus Edelstahlfolien in der Isolation dort eingebaut, wo der Taupunkt der kondensierenden Ofenatmosphäre unter allen Betriebsbedingungen noch nicht erreicht wird. Dazu ist es notwendig, die Analyse der Dämpfe im Ofenraum zu kennen und den Temperaturverlauf in der Ofenwand unter instationären Wärmeleitbedingungen zu errechnen. Der Einbauort der Folie ist abhängig von der Geschwindigkeit, mit der der Schadstoff-diffusionsvorgang abläuft, d.h. im wesentlichen abhängig von der Betriebsweise. Wird so ein Ofen in einer regelmäßigen Periode betrieben, kommt es zu einer Gleichgewichtssituation der Wärmespeicherung in der Wand, die zwischen den Verhältnissen des einmaligen Aufheizens und dem stationären Fall liegt. Der Taupunkt liegt unter stationären Bedingungen am weitesten entfernt von der „hot face“-Seite; für den Fall, dass der angenommene Zyklus in großen Zeitabständen durchgeführt wird, liegt der Taupunkt der heißen Seite am nächsten.

Die Module der Hochtemperaturwolle besitzen metallische Halterungen, an denen sie mit der metallischen Ofenhaut fest verbunden werden. Die stählernen Aufhängungen müssen, selbst wenn sie aus Edelstählen bestehen, vor den korrodierenden Angriffen geschützt werden, um ein Herunterfallen des gesamten Hochtemperaturwolle-Moduls zu verhindern.

7.4 Verfahrenstechnische Merkmale

Aus wärmetechnischer Sicht handelt es sich bei Tunnelöfen um zwei hintereinander geschaltete Wärmetauscher. Das Prinzip der Temperaturverläufe bei gleichen und unterschiedlichen Kapazitätsströmen von Fluiden $\dot{M}_F \cdot c_{pF}$ und Solid $\dot{M}_S \cdot c_{pS}$ ist in **Abb. 32** [Spec2] dargestellt.

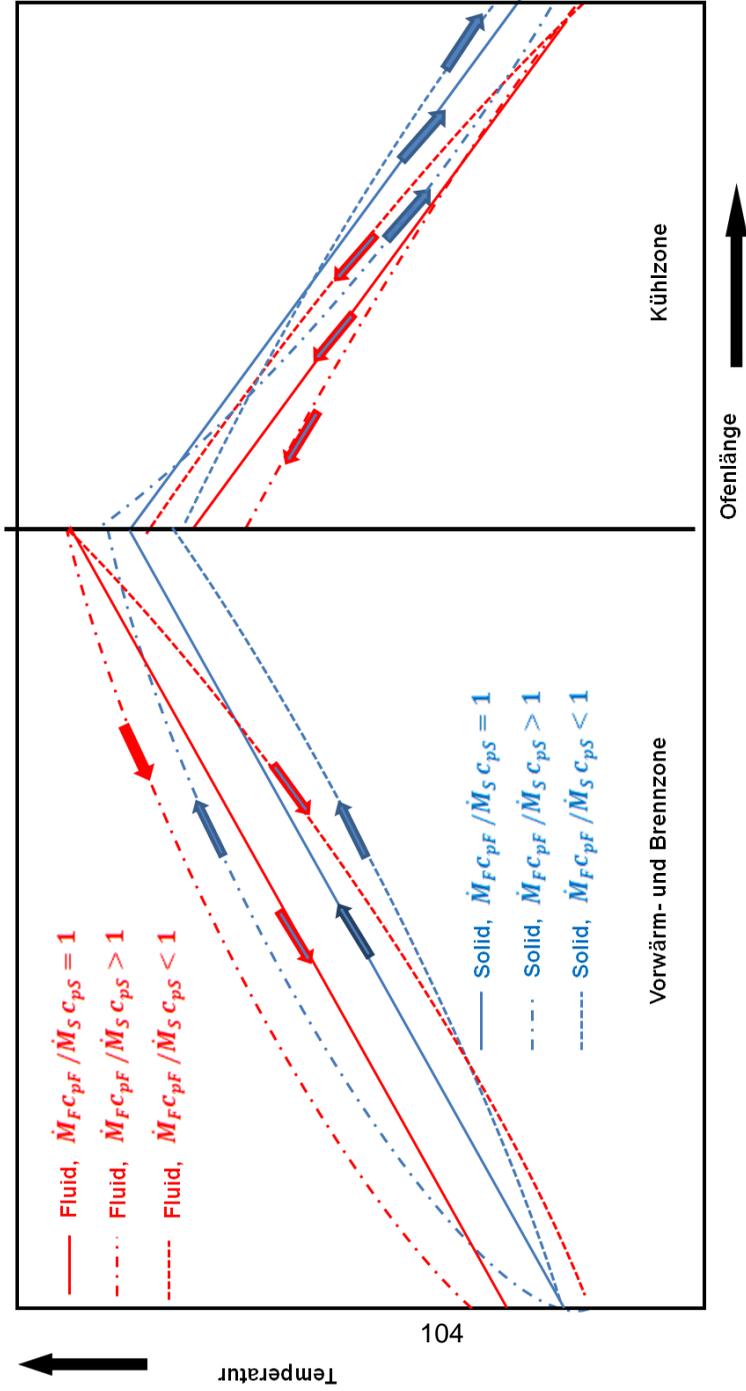


Abb. 32: Temperaturverläufe in Durchlauföfen bei unterschiedlichen Kapazitätsströmen

Im Wärmetauscher der Vorwärm- und Brennzone strömen die heißen Abgase aus den Brennern im Gegenstrom zur Ware von der Brennzone über die Vorwärmzone zum Ofeneinlauf, hierbei übertragen sie ihre Enthalpie an das Brenngut und kühlen sich dabei selbst ab. Im Wärmetauscher der Kühlzone strömt die Kühlluft, die am Ofenauslauf eingeblasen wird, ebenfalls im Gegenstrom zur Ware in Richtung Brennzone, dabei erwärmt sie sich, während das Brenngut gekühlt wird.

Ist das Verhältnis der beiden Kapazitätsströme

$$\frac{\dot{M}_F \cdot c_{pF}}{\dot{M}_S \cdot c_{pS}} = 1, \quad (7.1)$$

dann verlaufen die Temperaturen von Fluid und Solid parallel zueinander. Wenn das Verhältnis der beiden Kapazitätsströme

$$\frac{\dot{M}_F \cdot c_{pF}}{\dot{M}_S \cdot c_{pS}} > 1, \quad (7.2)$$

dann werden in der Aufheizzone die Temperaturunterschiede zwischen Fluid und Solid zum Ofeneinlauf immer größer, so dass die Abgasverluste steigen; in der Kühlzone hingegen erlangen sowohl das Solid am Ofenauslauf eine tiefere Temperatur als auch die Fluide vor dem Übergang in die Brennzone, so dass mehr Energie aufgewendet werden muss, um sie auf Solltemperatur zu bringen. Wenn in der Vorwärm- und Brennzone das Verhältnis der beiden Kapazitätsströme

$$\frac{\dot{M}_F \cdot c_{pF}}{\dot{M}_S \cdot c_{pS}} < 1, \quad (7.3)$$

dann verringern sich zwar die Fluidtemperaturen am Ofeneinlauf, aber am Ende der Brennzone werden die Temperaturunterschiede zwischen Fluid und Solid immer größer, so dass mehr Energie

angewendet werden muss, um die Solltemperatur des Solid zu erreichen. In der Kühlzone wird unter diesen Kapazitätsstromverhältnis am Ofenauslauf die Temperatur des Solid am höchsten sein, so dass sich große Ausfahrverluste ergeben.

Um den Energieverbrauch günstig zu gestalten, sollte die Ofeneinstellung in einem Tunnelofen möglichst dicht an das Kapazitätsstromverhältnis der Gleichung (7.1) angepasst werden.

Bei vielen Durchlaufofenanlagen wird die erwärmte Kühlluft von der sog. Entlastung oder Zwischenabsaugung, die zwischen Brennzone und Kühlzone eingebaut ist, abgesaugt und den Trocknungsprozessen oder anderen Verwertungen zugeführt. Bei Tunnelofenanlagen in der Ziegelindustrie strömt die erhitzte Kühlluft aus der Kühlzone weiter in die Brennzone und wird dort als Verbrennungsluft genutzt, indem der Brennstoff hauptsächlich von oben in den Brennkanaal eingedüst wird.

In elektrisch beheizten Tunnelöfen wird die Kühlluft am Ofenauslauf eingeblasen, durch den ganzen Ofen geführt und am Ofeneinlauf abgesaugt. Die Kapazitätsströme von Fluid und Ware können hier leicht gleichgestellt werden, so dass sich energetisch optimale Temperaturverläufe entsprechend Abb. 32 ergeben.

Auch bei neueren Tunnelöfen für den Brand von Sanitärkeramik strömt die gesamte Masse der erhitzten Kühlluft aus der Kühlzone in die Brennzone. Es wird die Enthalpie der heißen Luft aus der Kühlzone zur kontrollierten Verbrennung über Injektorbrenner genutzt [Hart]. Der Injektorbrenner ragt mit der Ansaugdüse in den Ofenkanal. Treibmedium ist der Brennstoff Gas; Saugmedium ist die heiße Umgebungsluft. Je höher die Dichte des Treibmediums im Verhältnis zum Saugmedium ist, umso stärker ist die Pumpwirkung unter Berücksichtigung des Durchmesser-verhältnisses von Treibdüse und engstem Querschnitt im Venturirohr des Injektorbrenners.

Die Armatur ist so bemessen ist, dass der notwendige heiße Luftmassenstrom zur optimalen Verbrennung angesaugt und

verbrannt wird. Da die Lufttemperatur wesentlich höher ist als sie in separaten Luftleitungen für vorgewärmte Luft eingesetzt werden kann, können Energieeinsparungen von ca. 50% erreicht werden. Um eine möglichst hohe Kühllufttemperatur beim Übergang in die Brennzzone zu erhalten, ist ein guter Wärmeübergang in der Kühlzone notwendig. Es eignet sich dieses Brennsystem für alle Tunnelöfen der fein- und grobkeramischen Industrie, mit Ausnahme der Tunnelöfen für den Glasurbrand von Porzellan, weil hier streng abgegrenzte Atmosphärenbereiche der Oxidation und Reduktion eingehalten werden müssen, d.h. keine oxidierende Atmosphäre aus der Kühlzone in die Reduktionszone eintreten darf, wie in Kapitel 3.6.2 erklärt wurde.

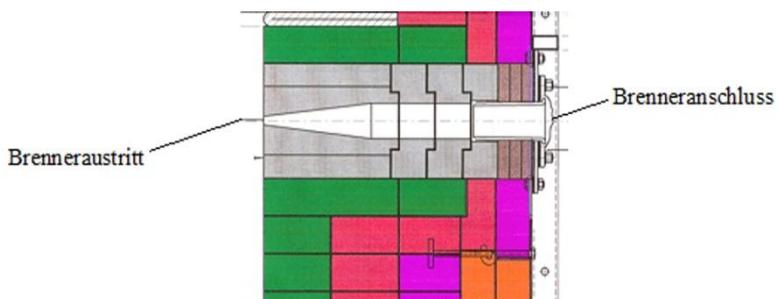


Abb. 33: Brennkammer aus feuerfesten Steinen in der Ofenwand [Bec5]

Mit Ausnahme der Tunnelöfen für die Ziegelindustrie sind bei allen anderen Durchlauföfen die Brenner an den Seitenwänden montiert. Wenn die Seitenwände aus feuerfesten Steinen bestehen, dann findet die Verbrennung in einer Brennkammer aus Mullit-Formsteinen in der Ofenwand statt (**Abb. 33**) [Bec5].

Der Austritt der Brennkammer ist als Schlitzdüse mit ca. 200 mm Schlitzbreite und einer Schlitzhöhe von 10 mm bis 15 mm ausgebildet, um einen breiten Verbrennungsabgasstrahl mit

maximal 150 m/s ausströmen zu lassen. In den Brennersteinen treten auf Grund der hohen Temperaturen steile Temperaturgradienten auf, die großvolumige Brennerblöcke zerreißen lassen würden. Deshalb besteht in Abb. 33 die Brennkammer aus mehreren nur formschlüssig verbundenen Formsteinhälften.

Bei Ofenwänden aus Hochtemperaturwolle bevorzugt man eine Anordnung, die in **Abb. 34** [Bec6] dargestellt ist.

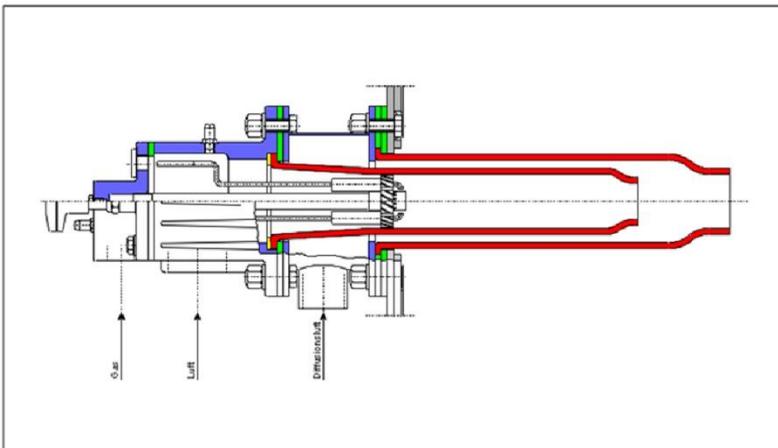


Abb. 34: Brenner mit Überschussluftzuführung [Bec6]

Abb. 34 zeigt die Variante als Luftüberschussbrenner, mit dem ein hoher Austrittsimpuls der Verbrennungsgase erreicht wird, der die Temperaturgleichmäßigkeit im Ofenkanalquerschnitt weiter verbessert.

Der Brenner ist geeignet für Bereiche in Öfen, in denen eine sehr starke oxidierende Brennatmosphäre gefordert ist. Die eigentliche Verbrennung des Gas-Luftgemisches findet innerhalb

der inneren Keramikdüse statt. Die Flamme wird über Elektroden gezündet und ionisationsüberwacht.

Ein Dralleinsatz für die peripher zugeführte Verbrennungsluft sorgt für eine gute Vermischung mit dem zentral eingedüsten Brennstoff. Mit den üblichen Gassorten kann eine maximale Luftzahl von $\lambda_V \sim 1,7$ eingestellt werden, die einen O_2 -Gehalt in der Brennatmosphäre von $O_2 \sim 8\%$ ergibt. Eine höhere Luftzahl löscht die Flamme. Für höhere O_2 -Gehalte in der Ofenatmosphäre gibt man über einen Einlass zusätzliche Luft zu, die zwischen innerer und äußerer Keramikdüse zur Vermischung mit den Verbrennungsgasen geführt wird. Die Anordnung erlaubt eine Betriebsweise mit einem Erdgas-Luft-Verhältnis von 1:100, wobei es zu einer exzellenten Vermischung von Abgas und Überschussluft bei stabiler Verbrennung kommt. Der Düsenmund wird durch die Überschussluft gekühlt und wenn die Düsen aus SiC bestehen durch die sich bildende SiO_2 -Glasschicht geschützt. Ein Tubus aus hartgeformter Hochtemperaturwolle um das äußere SiC-Rohr soll verhindern, dass die Ofenwandisolation durch die hohen Austrittsgeschwindigkeiten aus den Brennerdüsen erodiert wird. Außerdem verhindert der Tubus ein Zerbrechen der keramischen Brennerdüsen, wenn mit längerer Betriebszeit die Ofenwandisolation durch ihr Schwindungsverhalten sich verschiebt und auf die Düsen ein ungewolltes Biegemoment ausübt.

Die Brenner sind an den Seitenwänden gewöhnlich so installiert, dass ihre Austrittsstrahlen nicht gegeneinander gerichtet sind und niemals direkt auf die Ware, sondern nur darüber und darunter. Auf Grund ihres hohen Austrittsimpulses saugen sie - ähnlich einem Injektor - ein Mehrfaches des eigenen Volumenstroms an und erzeugen dadurch eine hohe Abgasumwälzung im Ofenkanal, die wiederum eine gleichmäßige Temperaturverteilung bewirkt.

Wenn Brenner in den Ofenwänden mit ihrer Austrittsrichtung direkt gegeneinander gerichtet sind, führt dies zu Überhitzungen in Ofenkanalmitte und ggf. zu unterschiedlichen

Konzentrationsfeldern der Abgaszusammensetzung im Ofenkanalquerschnitt. Diese Art der Brennerinstallation wird dennoch eingesetzt, wenn eine Befeuerung nach dem „Sweep-fire“-System abläuft. Hierbei wird der Brenner auf der einen Seite in dem Maße kontinuierlich von Minimallast auf Maximallast hochgefahren, wie der auf der anderen Seite von Maximal- auf Minimallast heruntergefahren wird und anschließend wird die Leistungsverteilung in umgekehrter Reihenfolge wiederholt. Rekuperatorbrenner werden in intermittierend arbeitenden Ofenanlagen eingesetzt. Das Grundprinzip ist der **Abb. 35** zu entnehmen.

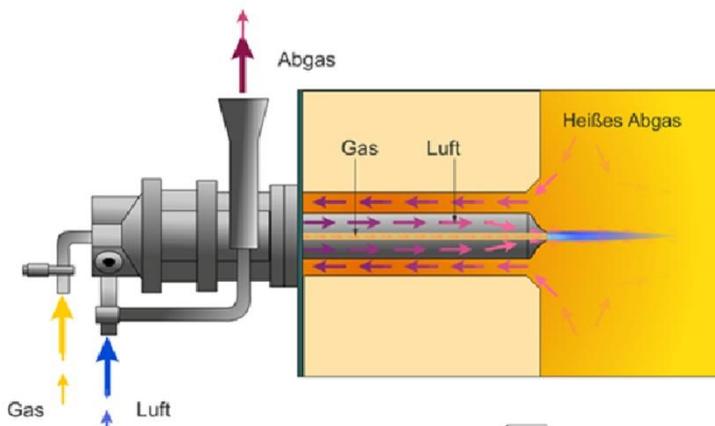


Abb. 35: Rekuperatorbrenner [WS]

Der Brenner arbeitet als Gegenstromwärmetauscher, wobei er die Energie der heißen Abgase aus dem Ofenraum zur Vorwärmung der Verbrennungsluft nutzt. Ein Teil der Verbrennungsluft saugt über einen Injektor aus dem Ofenraum heiße Abgase an. Sie übertragen einen großen Teil ihrer Enthalpie auf einen SiC-Tubus, der hoch wärmeleitend ist und durch eine Vielzahl von Nocken eine große Oberfläche besitzt. Die Wärme wird dann vom Tubus an die Verbrennungsluft abgegeben, die eine Temperatur von bis zu 750°C erreicht. Der Tubus besteht aus Silizium infiltrierte SiC (SiSiC), das -wie bereits erwähnt - nur bis ca. 1380°C einsetzbar ist.

8. Modelluntersuchungen von Schnellbrandöfen für den Glattbrand von Porzellan

Zur wärmetechnischen Berechnung von Schnellbrandöfen für den Glattbrand von Porzellan ist die Kenntnis des effektiven Wärmeübergangskoeffizienten α_{eff} notwendig. Er setzt sich additiv aus dem konvektiven Anteil α_k und dem Strahlungsanteil α_r als Gesamtwärmeübergangskoeffizient α_{ges} zusammen und bezieht den Einfluss der instationären Wärmeleitung in die Ware durch Berücksichtigung des Transientenfaktors κ ein

$$\alpha_{eff} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{ges}} + \frac{\kappa \cdot s}{2 \lambda_s}} \quad (8.1)$$

Hierin bedeutet s die Schichtdicke eines beidseitig symmetrisch zu erwärmenden oder abzukühlenden Körpers und λ_s sein Wärmeleitkoeffizient. Der Transientenfaktor κ hat die Werte:

- $\kappa = 3$ für eine beidseitig beheizte Platte
- $\kappa = 4$ für einen mantelflächenbeheizten Zylinder
- $\kappa = 5$ für eine Kugel

Der konvektive Wärmeübergangskoeffizient α_k ist abhängig von der Anströmgeschwindigkeit des Fluids w_F und den charakteristischen Längen l_C der angeströmten Körper. Der Wärmeübergangskoeffizient für Strahlung α_r setzt sich zusammen aus der Festkörperstrahlung und der Gasstrahlung. Letztere wird beeinflusst durch Temperatur, Konzentration von H_2O , CO_2 und in Reduktionszonen von CO und durch die Schichtdicke der strahlenden Gase. Der Transientenfaktor k ist für die Flachware mit dem Wert für eine beidseitig beheizte Platte einzusetzen, für die Hohlware der für den Zylinder.

Die Geschwindigkeitsverteilung der Fluide im Ofenkanalquerschnitt ist von Henkel [Hen] in einem Kaltluft-Strömungsmodell gemessen worden, das im Maßstab 1:5 einen Schnellbrandofen für den Glattbrand von Porzellan abbildet (**Abb. 36**) [Hen].

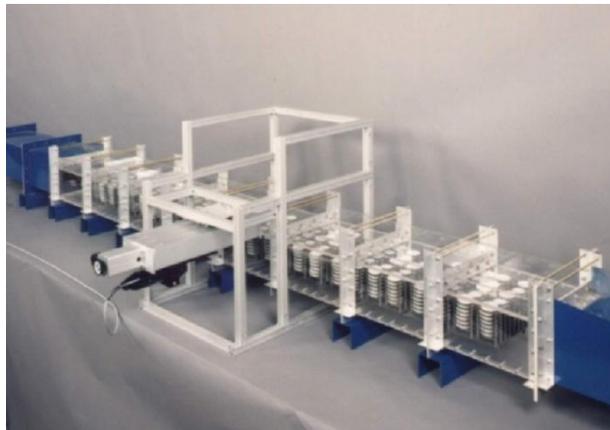


Abb. 36: Strömungsmodell eines Schnellbrandofens für den Glattbrand von Porzellan, Maßstab 1:5 [Hen]

Die Untersuchungen beinhalten Geschwindigkeitsmessungen von Fluiden, die in Ofenachsenrichtung strömen. Sie können deshalb nur für die Bereiche Verwendung finden, in denen keine Querströmungen herrschen, also in einigen Abschnitten der Vorwärm- und Kühlzone.

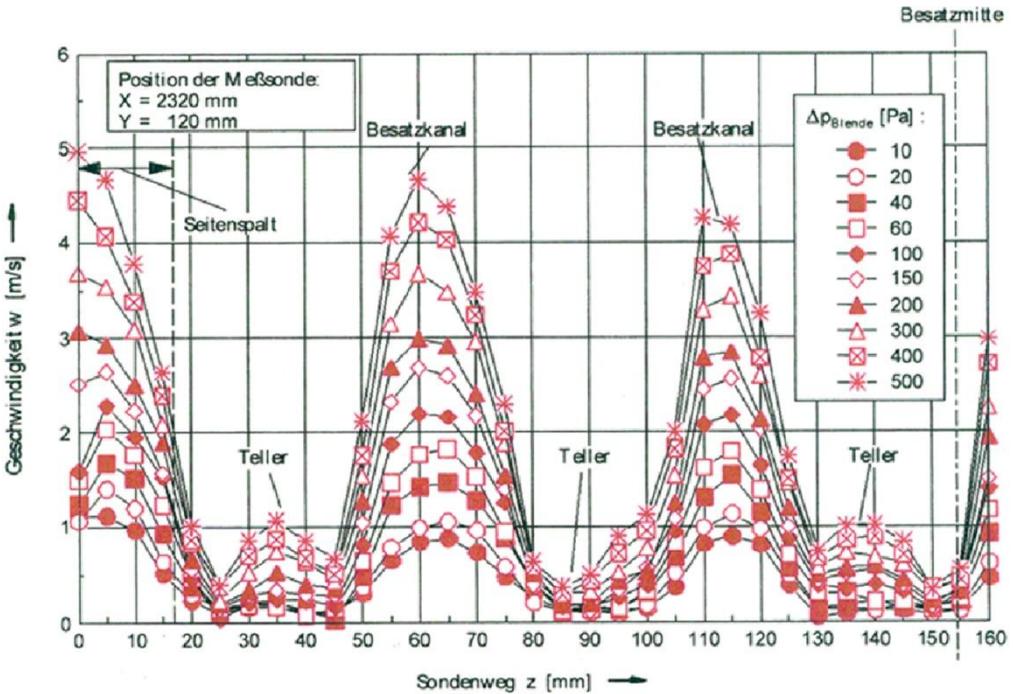


Abb. 37: Geschwindigkeitsverteilung der Längsströmung im Modell eines Schnellbrandtunnelofens für den Glattbrand von Porzellan in Modellkanalhöhe $h_K=120 \text{ mm}$ [Hen]

Die Messergebnisse sind in **Abb. 37** [Hen] zusammengefasst. Es zeigt die Geschwindigkeiten der Fluide über die halbe Kanalbreite verteilt in Modellkanalhöhe $h_K = 120$ mm quer durch den Besatz. Die Messungen nur über die halbe Kanalbreite reichen aus, weil der Kanalquerschnitt symmetrisch aufgebaut ist. Als Parameter ist der Differenzdruckbereich für die Messblende von 10 Pa bis 500 Pa angegeben, was einem Kaltluftvolumenstrom zwischen 70 m³/h und 550 m³/h entspricht. Für den leeren Modellkanalquerschnitt wurden Reynoldszahlen berechnet, denen man Reynoldszahlen im Besatz und in den einzelnen Spalten auf Grund der Geschwindigkeitsmessungen zuordnen kann.

Mit der ebenso durchgeführten Messung des Druckverlustes im Modell über die gesamte Länge des Besatzes wird der dimensionslose Widerstandsbeiwert ψ bestimmt. Der Verlauf des Widerstandsbeiwertes ψ als Funktion der Reynoldszahl im Besatz Re_{Bes} ähnelt den Kurvenverläufen von Strömungen in Rechteckkanälen, woraus man schließt, dass die Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten für Konvektion α_k über die bekannten Nu-Re-Beziehungen für Rechteckkanäle vorgenommen werden kann.

Die Messungen von Henkel beziehen sich ausschließlich auf die verwendete Modellgeometrie. Da solche Untersuchungen einen hohen finanziellen und zeitlichen Aufwand bedeuten, entschloss man sich in den Labors der Fa. Riedhammer GmbH in Nürnberg die 1997 von Henkel begonnenen Analysen durch Computersimulationen fortzusetzen. Dazu ist es aber notwendig, die Berechnungsfehler dieser Methoden zu kennen. Deshalb wurden von Rödl [Rödl] die im Besatzwagen gemessenen Geschwindigkeitsverläufe im Querschnitt des Plexiglasmodells mit Simulationsergebnissen an den entsprechenden geometrischen Stellen verglichen. Es wurde das Finite Elemente Programmsystem ADINA verwendet, weil es als

Berechnungsprogramm bei der Fa. Riedhammer zur Verfügung stand.

ADINA steht für:

Automatic **D**ynamic **I**ncremental **N**onlinear **A**nalysis.

Das Finite Elemente Programm vernetzt automatisch die Geometrie des Besatzes in tetraederförmige Elemente (**Abb. 38**).

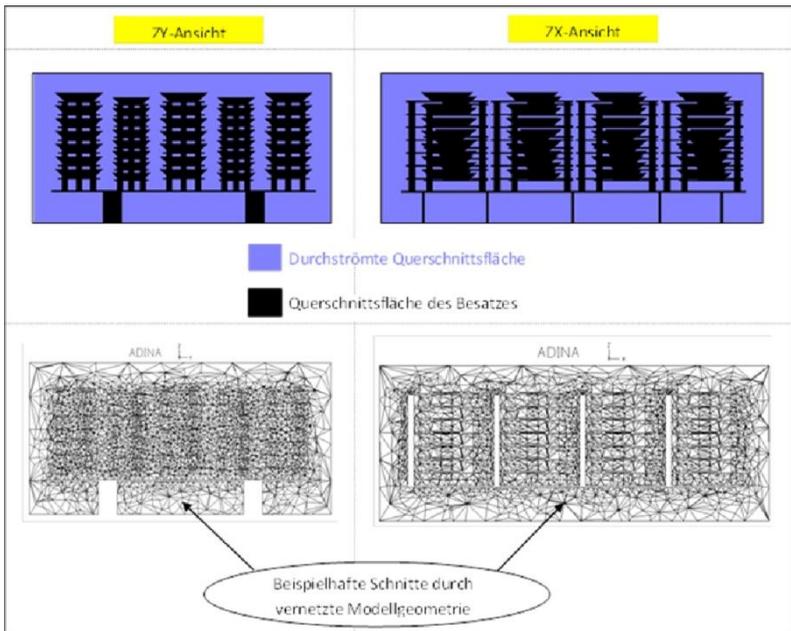


Abb. 38: Darstellung der durchströmten Querschnittsfläche und ihre Vernetzung [Rödl]

Durch die Netzerzeugung wird eine Beschreibung der Strömung in diskreter Form möglich. Die Diskretisierung geschieht sowohl räumlich als auch zeitlich. Für jeden Knoten dieser Tetraeder wird nach den Erhaltungssätzen für Masse, Impuls und

Energie die Fluidgeschwindigkeit berechnet. Verschiedene Methoden zur Gleichungslösung [ADINA], wie die auf den Gauss'schen Eliminationsverfahren basierende direkte Methode und die iterative Methode, sind in diesem Finite-Elemente-Programm integriert [Bathe]. Als Iterationstechniken stehen zur Auswahl die sukzessive Substitution und das Newton-Raphson Verfahren [Bathe]. Anströmgeschwindigkeiten bzw. Anfangsdrücke oder Anfangstemperaturen sind Rand- bzw. Anfangsbedingungen, die zu definieren sind. Die programmtechnisch mögliche Modellierung durch Betrachtung der Turbulenzeffekte beispielsweise durch das im Programm implementierte k - ϵ -Turbulenzmodell wurde nicht durchgeführt. Die Lösung der durchgeführten Simulation beruht ausschließlich auf den Navier-Stokes-Gleichungen und der Kontinuitätsgleichung.

Eine Gegenüberstellung der von Rödl [Rödl] berechneten Geschwindigkeiten mit den gemessenen Werten nach Henkel [Hen] wird in **Abb. 39** [Rödl] gezeigt. Der Vergleich wird hier gebildet für eine Anströmgeschwindigkeit im leeren Kanal von 0,9 m/s, einem Blendendifferenzdruck von 40Pa, was einem Volumenstrom im Modellkanal von 160 m³/h entspricht. Die Gegenüberstellung bezieht sich auf die Fluidgeschwindigkeiten in 100 mm Kanalhöhe mitten durch den Besatz der dritten Stapelreihe.

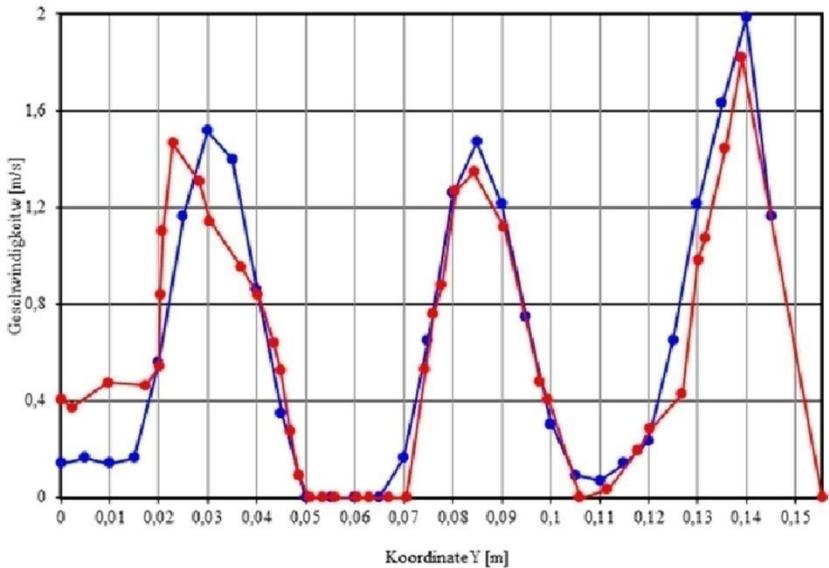


Abb. 39: Vergleich der Messung am Modell mit Simulationsrechnungen [Rödl]

Vertikal ist in Abbildung 39 die Geschwindigkeit in m/s und horizontal die Koordinate Y als Kanalbreite des Besatzmodells in m aufgetragen. Der Koordinatenursprung in dieser Darstellung liegt in der Mitte des mittleren Tellerstapels (**Abb. 40**) [Rödl]. Die in der Abb. 39 eingetragenen Messwerte von Henkel sind blau dargestellt, rot stellen die Ergebnisse der Computersimulation dar.

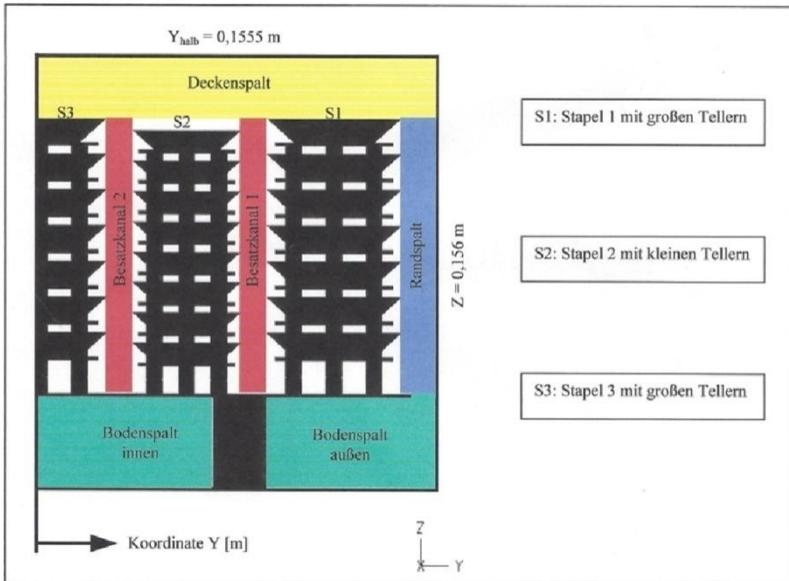


Abb. 40: ZY-Ansicht des halben Besatzkörpers im Modellkanal [Rödl]

Die berechneten und gemessenen Geschwindigkeiten in den Tellerstapeln sind sehr klein. Die Strömungsgeschwindigkeiten in den Rand- und Deckenspalt und in den Besatzkanälen sind ca. 5 bis 10 mal größer als die im Besatz. Um die Längsströmungen in den Spalten zu reduzieren, dafür die Geschwindigkeiten im Besatz zu erhöhen, werden in der Praxis in den unbeheizten Zonen und in der Kühlzone seitlich in den Wänden oberhalb des Besatzes Eindüsen installiert, um eine intensive Umwälzung der Fluide im Ofenkanal zu bewirken, die wiederum für intensivere Wärmeübertragung sorgen. Den gleichen Effekt bewirken die seitlichen Hochgeschwindigkeitsbrenner.

Alle von Rödl [Rödl] aufgezeichneten Ergebnisse weisen - wie die des Beispiels in Abbildung 39 - eine ein- bis fünfprozentige Abweichung der Berechnungen von den Messungen in den Bereichen der Stapel S1 und S2 auf, die entsprechenden Gebiete der Besatzkanäle sind mit eingeschlossen. Im Bereich des in der Mitte platzierten Tellerstapels S3 liegt ein größerer Unterschied zwischen den gemessenen und berechneten Geschwindigkeiten vor. Der Geschwindigkeitsunterschied zwischen Messung und Berechnung verringert sich mit höheren Volumenströmen im Modellkanal.

Man kann eine gute Übereinstimmung zwischen den gemessenen und berechneten Werten feststellen. Eine noch bessere würde man erreichen, wenn man bei der Simulation das in ADINA implementierte k - ϵ -Turbulenzmodell genutzt hätte, wenn eine engere Vernetzung in den Besatz- und Randspalten vorgenommen worden wäre und wenn man im Modell einen besseren Strömungsgleichrichter eingesetzt hätte. Ungeklärt ist die Beeinflussung der Messung durch eine mögliche Ablenkung des Laserstrahls durch die Plexiglaswand.

Die ausreichende Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen der Modelluntersuchungen und der Computersimulation für die Längsströmungen berechtigt zu Simulationsberechnungen der Brennzonen eines Schnellbrandofens für den Glattbrand von Porzellanflachware. Konold hat die gegenseitige Beeinflussung von Längs- und Brenneraustrittsströmung mit dem CFD-Programmsystem FLUENT untersucht [Kon]. Er hat den Besatzaufbau eines Ofenwagens mit einem strukturierten Gitter, basierend auf Rechtecks- bzw. Hexaedern, vernetzt. Es entstehen dadurch ca. 1,5 Mill. Berechnungszellen. Mit diesem Berechnungsgitter wird die Modellierung der beheizten Zone vorgenommen. Die Berechnungen beginnen mit dem letzten Segment der Hauptbrennzonen, weil nur in diesem letzten Segment die Strömung unbeeinflusst von den Strömungen aus den - in Strömungsrichtung

gesehen - davor gelegenen Segmenten ist. Nach Abschluss dieser Berechnung werden diese Austrittsdaten für die Berechnung des nächsten Ofensegments als Eintrittsprofil eingelesen. Diese Vorgehensweise wiederholt sich Segment für Segment für die gesamte mit Brennern bestückte Zone.

Die errechnete Geschwindigkeitsverteilung innerhalb des Besatzes ist in **Abb. 41** [Kon] und **Abb.42** [Kon] dargestellt. Dazu ist eine Schnittebene definiert worden, die in der Mitte des Besatzes liegt. Höhere Geschwindigkeiten stellen sich in den Randspalten auf Grund des geringen Strömungswiderstands ein.

In den folgenden Segmenten erhöhen sich die Geschwindigkeiten innerhalb des Besatzes, allerdings hauptsächlich in den Kanälen zwischen den Tellerreihen, in denen der Strömungswiderstand wesentlich geringer als im Tellerstapel ist.

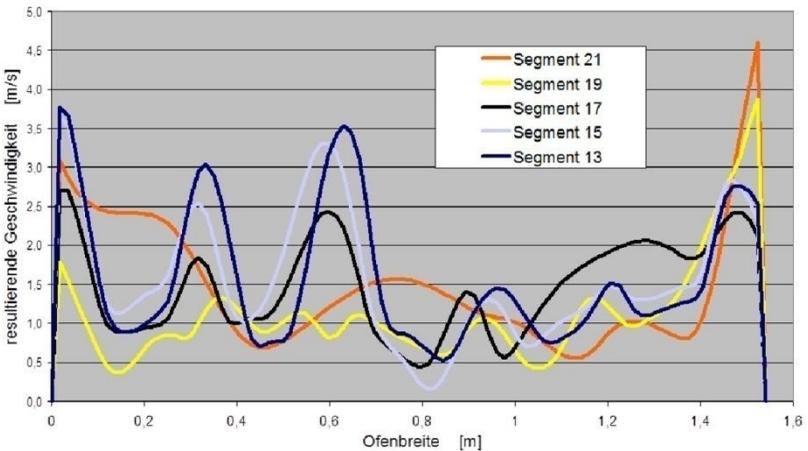


Abb. 41: Geschwindigkeit an den Austritten der Segmente 21, 19, 17, 15 und 13 [Kon]

Die Geschwindigkeitsberechnungen werden segmentweise durchgeführt, da bei detaillierter Betrachtung des Wärmeguts aufgrund der hohen Anzahl an Berechnungszellen und der nicht ausreichenden Rechnerkapazität nicht der gesamte Ofen gleichzeitig simuliert werden kann. Die Auswertung dieser Berechnungen ergibt nur Aufschluss über das Strömungsfeld im Ofenkanalquerschnitt insbesondere innerhalb des Besatzes. Aber es ist nicht möglich, die Bewegung des Wärmeguts durch den Ofen auf Grund dessen geometrischer Komplexität zu berücksichtigen. Aus diesen Gründen kann hier weder die Temperatur des Wärmeguts, noch die Energiebilanz einzelner Segmente oder des gesamten Ofens bestimmt werden. Die geringe Geschwindigkeit des Wärmeguts hat einen geringen Einfluss auf die Berechnung des Strömungsfeldes im Ofen, muss jedoch berücksichtigt werden, wenn eine reale Ofenreise des Wärmeguts simuliert werden soll.

Für die Berechnung der Energiebilanz ist es nach Konold sinnvoll, den gesamten Ofen mit einer einzigen Rechnung zu simulieren. Dazu ist es notwendig, die komplexe Geometrie des Wärmeguts mitsamt den Brennhilfsmittelaufbauten zu vereinfachen, damit der Rechner mit der Maximalkapazität von 2-2,5 Millionen vernetzten Zellen betrieben werden kann. Die Vereinfachung besteht aus dem Ersatz der Crank- und Telleraufbauten durch eine quaderförmige durch den gesamten Ofen verlaufende Geometrie des Wärmeguts, wobei die frei durchströmte Querschnittsfläche erhalten bleibt (**Abb. 43**) [Kon].

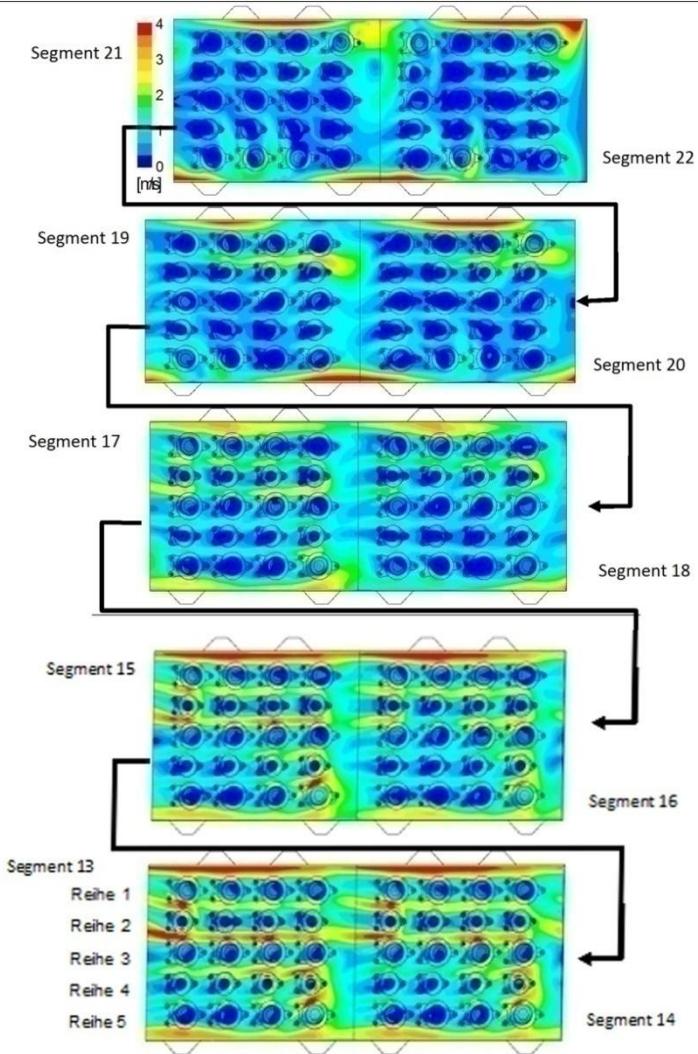


Abb. 42: Geschwindigkeitsverteilung in einer Schnittebene innerhalb des Besatzes [Kon]

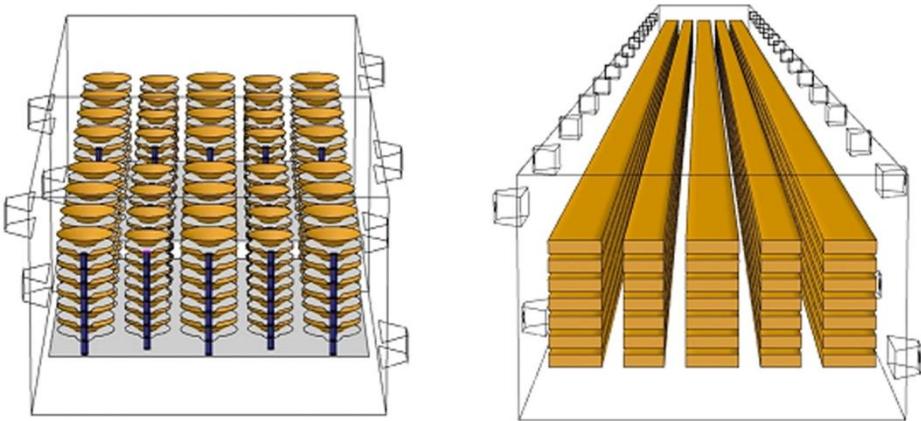


Abb. 43: Detaillierte und vereinfachte Geometrie des Besatzes [Kon]

Mit dem für diese Berechnungen eingesetzten CFD-Programm FLUENT lässt sich für die schematisierten Geometrien des Solids eine Bewegungsgeschwindigkeit relativ zum umgebenden Fluid definieren. Entsprechend seiner Bewegungsgeschwindigkeit erfährt das Wärmegut dann auch eine Temperaturerhöhung oder –Minderung in Abhängigkeit von seiner Position im Ofen.

Vor der Simulation des gesamten Ofens muss durch Vergleichsrechnungen zwischen diesen beiden voneinander abweichenden Geometrien festgestellt werden, ob sich bei den Geschwindigkeiten eine ausreichende Übereinstimmung ergibt. Der Vergleich für die mitten durch den Besatz errechneten Geschwindigkeiten für den realen und für den vereinfachten Besatz ist in **Abb. 44** [Kon] wiedergegeben. Die schwarzen Linien geben die Geschwindigkeitsprofile im realen Besatz, die gelben die des vereinfachten Besatzes wieder. Die Strömung beginnt bei

dieser Berechnung am Ende der beheizten Zone bei 28 m, der Abgasaustritt befindet sich bei 0 m, gleichbedeutend mit dem Eintritt des Wärmeguts in den Ofen. Die berechnete Geschwindigkeit im Besatz mit der realen Geometrie liegt zwar insgesamt etwas höher als die im vereinfachten Besatz, was auf den größeren Einfluss der Crankaufbauten zurückzuführen ist, aber die Trendlinien zeigen einen sehr ähnlichen Verlauf.

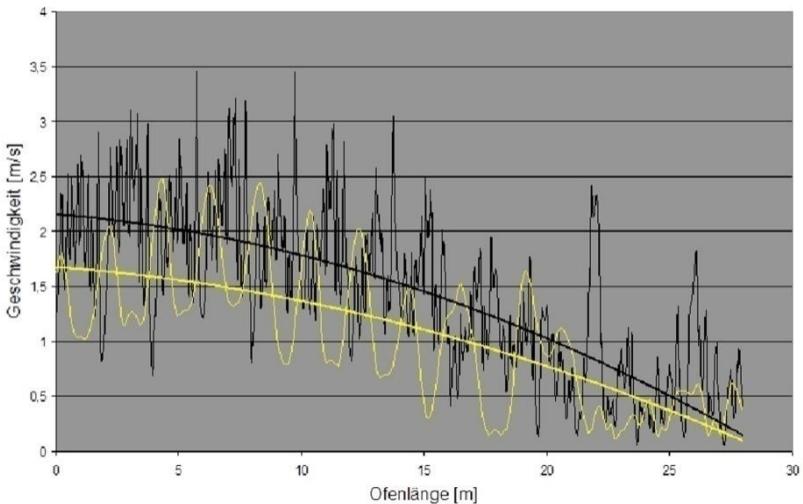


Abb. 44: Resultierende Geschwindigkeiten im Besatz [Kon]

Mit den ermittelten Geschwindigkeiten im vereinfachten Besatz lassen sich die Wärmeübergangskoeffizienten für Konvektion α_k nach den bekannten Gleichungen für den Wärmeübergang an Platten bestimmen. Mit der Addition des Wärmeübergangskoeffizienten durch Strahlung α_r , erhält man den Gesamtwärmeübergangskoeffizienten α_{ges} , dessen Verlauf in der Brennzone Konold in **Abb. 45** [Kon] wiedergegeben hat.

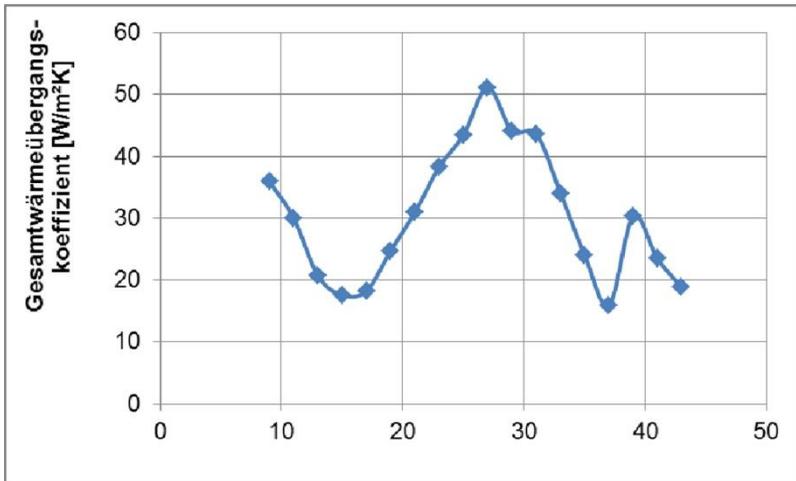


Abb. 45: Gesamtwärmeübergangskoeffizient; Bestimmung aus der Computersimulation mit vereinfachtem Besatz [Kon]

Die zur Berechnung verwendete Brennerleistung und der Verlauf der Wärmeguttemperatur stammen aus Betriebsdaten eines realen Ofens und nicht aus Berechnungen, wie sie später aufgezeigt werden. Die Brennerleistung ist in den einzelnen Brennergruppen unterschiedlich, so dass sie sich auch auf das Strömungsprofil im Ofenkanal auswirkt; dies wird deutlich in **Abb. 46** [Kon], die die Strömungsverhältnisse im Deckenspalt in Höhe der Brenner zeigt.

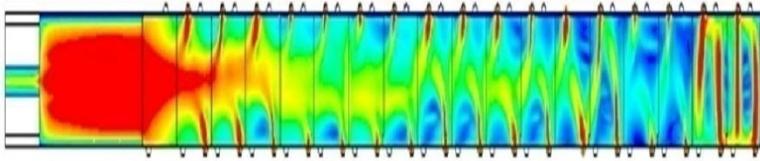


Abb. 46: Resultierende Geschwindigkeit in der oberen Brennebene [Kon]

Die Resultate der Berechnungen beziehen sich ausschließlich auf die geometrischen und wärmetechnischen Verhältnisse der für diese Betrachtung herangezogenen Ofenanlage. Für ähnliche Anlagen und Einstellungen können diese Ergebnisse deshalb nur als Größenordnungshinweis dienen.

Lorenz [Lor] hat den konvektiven Wärmeübergang beim Flachgeschirr-Glattbrand im Schnellbrandofen als Funktion der sich längs und quer überlagernden Strömungen in Modelluntersuchungen und Computersimulationsrechnungen bestimmt.

Ergänzend zu dem Aufbau des bereits vorgestellten Plexiglasmodells (Abb. 36) installierte man Quereindüsen, die die Modellfunktionen der Brenner übernehmen. Für die Dimensionierung der Anschlussparameter der Quereindüsung und der Längsströmung muss die Ähnlichkeitsbeziehung zwischen Original und Modell über die jeweiligen Reynolds-zahlen für Längs- und Querströmung übereinstimmen:

$$Re_{Of,axi} = Re_{M,axi} \quad (8.2)$$

$$Re_{Of,que} = Re_{M,que} \quad (8.3)$$

Als charakteristische Länge der Reynoldszahlen für Längs- und Querströmung wird der Durchmesser des Tellers d_T , eingesetzt, da er bei der Projektierung bekannt ist und gegenüber

dem Düsen- bzw. Kanaldurchmesser den Ort der Wärmeübertragung charakterisiert. Bei der Geschwindigkeit der Längsströmung $w_{Of,axi}$, wurde die Geschwindigkeit im leeren Kanal eingesetzt, weil diese ermittelbar ist und nicht durch aufwändige Messungen oder Berechnungen gewonnen werden muss. Die Düsenaustrittsgeschwindigkeit wurde als Geschwindigkeit der Querströmung $w_{Of,que}$ angesetzt. Sie wird über die Brennerleistung bestimmt.

Der Wärmeübergang zwischen Fluid und Solid wird im Modell über ein beheiztes Tellermodell ermittelt, das in diesem Fall die Wärmequelle darstellt. Damit wird im Kaltmodell der Wärmestrom umgekehrt, d.h. der im Original auftretende Wärmestrom vom Gas zum Teller wird im Modell in umgekehrter Richtung dirigiert.

Um eine möglichst gleichmäßige Oberflächentemperatur zu erzielen, wurde Kupfer wegen seiner hohen Wärmeleitfähigkeit ausgewählt. Die Temperaturmessung am Wärmegut passierte über eingelassene Thermoelemente; zur Bestimmung der elektrischen Leistung misst man Spannung und Stromstärke. Die Messung der Temperatur der zuströmenden Luft wurde an zwei Stellen vorgenommen. Die erste Stelle erlaubt eine Messung der Raumlufttemperatur in unmittelbarer Nähe des Ansaugtraktes des Modells. Die zweite Stelle dient der Messung der Temperatur der quer eingedüsten Luft in das Modell. Pro Messreihe wurden jeweils die Temperaturen von drei Tellern gleichzeitig gemessen.

Diese Teller haben, wie in Abb. 47 zu sehen ist, die Positionen links am Randspalt im Crank-Stapel Nr.1 und rechts am Randspalt im Crank-Stapel-Nr. 3, sowie in der Mitte des Besatzes im Crank-Stapel Nr.2. In diesen Querpositionen wurden in drei verschiedenen Höhen die Temperaturen gemessen: in der oberen, der mittleren und der unteren Tellerlage. Als weiterer Parameter wurde die Position der Messtellerreihen zu den Quereindüsungen aufgenommen.

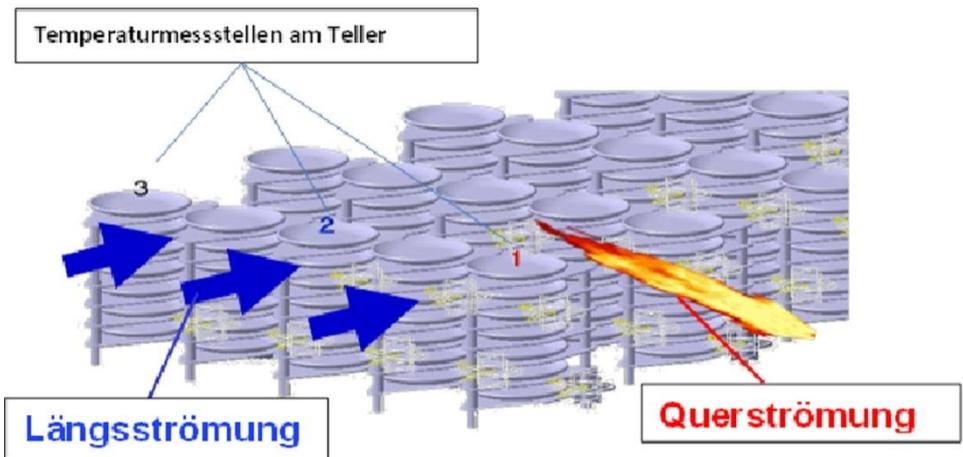


Abb. 47: Temperaturmessungen im Modellbesatz [Lor]

Der konvektive Wärmeübergangskoeffizient α_k errechnet sich aus der Gleichung:

$$\alpha_k = \frac{\dot{Q}}{A \cdot \Delta\vartheta} \quad (8.4)$$

Die Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta$ wird aus der Messung der Telleroberflächentemperatur ϑ_T und der Temperatur der

einströmenden Luft ϑ_{air} gebildet. Die Fläche A entspricht der Teller-oberfläche abzüglich der Berührungsfläche zwischen Teller und Crank. Der Wärmestrom \dot{Q} ist dabei der Anteil der eingebrachten Heizleistung P des Heizdrahtes. Die abgegebene Leistung des Heizdrahtes errechnet sich aus:

$$P = U \cdot I \quad (8.5)$$

Die Kupferteller wurden auf ca. 40°C aufgeheizt, so dass bei Umgebungstemperaturen von 20°C die Strahlungsverluste sehr gering und deshalb unberücksichtigt bleiben konnten.

Bei den Untersuchungen wurden variiert:

- die Messtellerposition in der Crankstapel-Reihe
- die Höhe der Messtellerposition im Crankstapel
- die Messtellerposition in verschiedenen Abständen zur Quereindüsung
- die Geschwindigkeit der Luft in Längsrichtung des Modellkanals
- die Austrittsgeschwindigkeit aus den Quereindünungen

Die Ergebnisse lassen sich darstellen in der Form

$$Nu = f(Re_L, Re_Q) \text{ (Abb. 48) [Lor],}$$

das entspricht in der Nomenklatur dieses Textes

$$Nu = f(Re_{axi}, Re_{que})$$

Die Nußelt-Zahl Nu wird als z-Koordinate, die Reynolds-Zahl der Querströmung Re_{que} in x-Richtung und die Reynolds-Zahl der Längsströmung Re_{axi} in y-Richtung aufgetragen. Abbildung 48 gilt für nur eine bestimmte Position des Tellers im Besatz, für jede andere Tellerposition wurden Ausgleichsfunktionen mit unterschiedlichen Koeffizienten aufgenommen, die Lorenz in einer umfangreichen Tabelle zusammengestellt hat.

3d_1.xls : (8)Teller2 un, Re quer , Re längs, Nu
 Rank 3 Eqn 310 $z=a+bx+cy+dx^2+ey^2+fx+gx^3+hy^3+ixy^2+jx^2y$
 $r^2=0.98145026$ DF Adj $r^2=0.95495063$ FitStdErr=6.9090751 Fstat=47.030322
 $a=6.743548$ $b=0.00052360574$ $c=0.017174281$ $d=1.0578251e-09$ $e=1.1687861e-06$
 $f=4.3311297e-08$ $g=1.6325993e-15$ $h=2.6697418e-11$ $i=2.0895474e-12$ $j=1.0225816e-14$

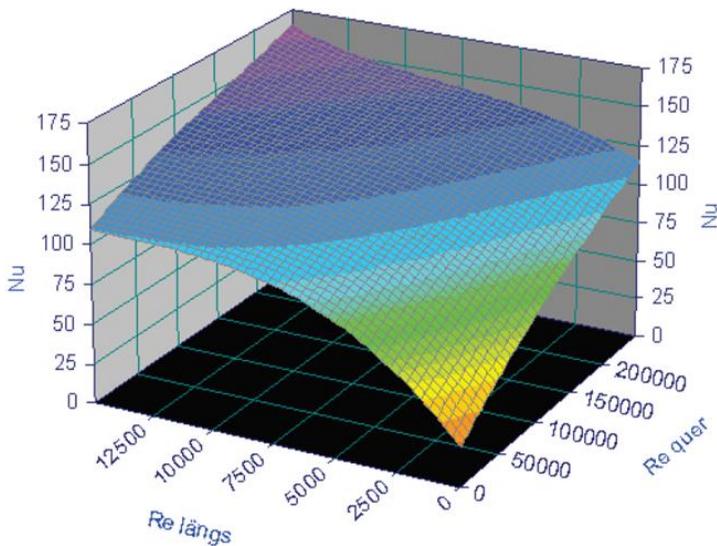


Abb. 48: 3D-Darstellung der Abhängigkeit $Nu = f(Re_L, Re_Q)$ für den mittleren Teller im Besatz [Lor]

Ein Optimum des konvektiven Wärmeübergangs ist durch Überlagerung von Längs- und Querströmung zu erlangen. Ein nennenswerter Effekt wird jedoch nur für Reynoldszahlen der Längsströmung $Re_{Of,axi} = Re_{M,axi} < 4000$ erzielt, darüber hinaus ergibt sich nur ein geringfügiger Anstieg der Nusseltzahlen [Lor].

Nicht berücksichtigt wurden in dieser Arbeit geometrische Änderungen der Rand-, Decken- und Bodenspalten und andere Crankstapel-Abstände. Deshalb können die erhaltenen Ergebnisse des Wärmeübergangskoeffizienten aus diesen Modellversuchen nicht für Ofenanlagen mit anderen Spaltengrößen und anderen Besatzaufbauten herangezogen werden.

Lorenz hat weiterhin mit den Codes Fluent und Ansys CFX Computersimulationen zur Geschwindigkeitsbestimmung der Fluide im Ofenkanal durchgeführt, wobei als Parametervariation unterschiedliche Längs- und Querströmungen vorgegeben wurden. Wie schon bei den vorher beschriebenen Computersimulationen, hat auch Lorenz mehrere Segmente nacheinander betrachtet und das errechnete Strömungsprofil am Ausgang des jeweiligen Segments als Eingangsprofil des folgenden benutzt. Als Berechnungsmodelle wurden sowohl das $k-\epsilon$ - als auch das $k-\omega$ -Modell eingesetzt. Beim $k-\epsilon$ -Modell muss eine isotrope Verteilung der Turbulenz vorausgesetzt werden, sie eignet sich deshalb nicht für Berechnungen in Wandnähe. Dort ist das $k-\omega$ -Modell anzuwenden.

Die automatische Netzgenerierung wurde für den Besatz nur eines Wagens mit engeren Prismennetzen an den Grenzschichten und eine Erhöhung auf ca. 10 Millionen Zellen erweitert.

Mit der Anströmgeschwindigkeit w zum Teller, die über eine geometrische Mittelung der lokalen Längs- und Queranströmung zu erhalten ist,

$$w = \sqrt{w_{axi}^2 + w_{que}^2} \quad (8.7)$$

wird der konvektive Wärmeübergang über empirische Gleichungen aus der Literatur für einfache Geometrien bestimmt. In diesem Fall betrachtet man die Teller als Platte [Gnie]:

$$Nu_{lam} = 0,0664 \cdot \sqrt{Re} \cdot \sqrt[3]{Pr} \quad (8.8)$$

$$Nu_{turb} = \frac{0,037 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr}{1 + 2,443 \cdot Re^{-0,1} \cdot (Pr^{2/3} - 1)} \quad (8.9)$$

$$Nu = \sqrt{Nu_{lam}^2 + Nu_{turb}^2} \quad (8.10)$$

Gültigkeitsbereich: $10^1 > Re > 10^7$; $0,6 > Pr > 2000$

Vergleicht man die Ergebnisse der gemessenen Wärmeübergangskoeffizienten mit den Ergebnissen, die man durch Einsetzen der durch Simulation gewonnenen Anströmgeschwindigkeiten w in die Nu-Gleichungen erhält, so kann - wie aus **Abb. 49** [Lor] zu entnehmen ist - eine gute Übereinstimmung festgestellt werden. Abbildung 49 zeigt als Beispiel $Nu = f(Re_{que})$ mit der Längsströmung $Re_{axi} = 4221$ als Parameter. Die durchgezogenen Linien stellen die Ergebnisse aus den Messungen dar, während die punktierten Linien die ermittelten Nu-Zahlen aus den berechneten Geschwindigkeitsprofilen wiedergeben

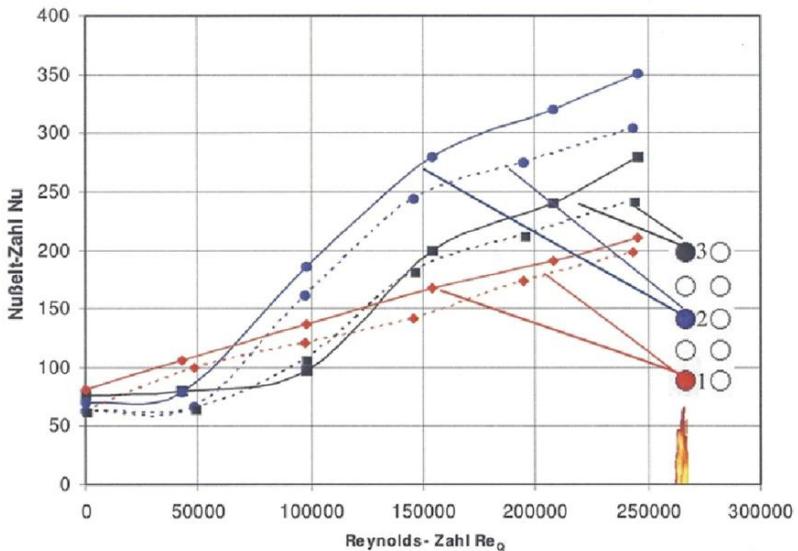


Abb. 49: Vergleich zwischen Messung und Simulationsrechnung für $Re_{axi} = 4221$ [Lor]

Lorenz hat in einem weiteren Abschnitt die Strahlungswärmeübertragung in seine Computersimulation mit dem „discrete transfer model“ aufgenommen. Mit den Emissionsgraden $\varepsilon_T = 0,6$ für Teller und der engobierten Oberseite der cranks und $\varepsilon_{Cr} = 0,8$ für die nicht engobierte Unterseite der cranks hat er die Temperaturprofile der einzelnen Teller im Besatz berechnet, unter Berücksichtigung der Randbedingungen für Wärmeströme zu den Ofenwänden, den Ofenwagen, den Tellern und den cranks und mit Bezug auf die Gastemperatur. Daten, die allesamt aus Messdaten des realen Ofens stammen.

Beim Vergleich der beiden Wärmeübertragungsmechanismen Strahlung Q_r und Konvektion Q_k wird der überragende Einfluss der Strahlung deutlich. Das Verhältnis Q_k/Q_r gibt Auskunft über die Bedeutung des jeweiligen Übertragungsmechanismus an einem speziellen Ort im Stapel bei einer bestimmten Temperatur. Die Werte sind in **Abb. 50** [Lor]

zusammengefasst. Dabei zeigt sich der zunehmende Einfluss der Strahlung mit steigender Temperatur. Außerdem ist der Einfluss von direkt strahlenden Wandflächen, siehe Teller in der oberen Ebene, deutlich zu erkennen. Dort sinkt das Verhältnis Q_k/Q_r mit steigender Temperatur stärker ab als bei abgeschatteten Tellern, wie z.B. in der Mitte des Besatzes. Die Wärmeübertragung durch Konvektion hat im Bereich 900°C nur noch einen Einfluss von 9% - 20% auf die Gesamtwärmeübertragung, im Bereich von 1200°C kann sie ganz vernachlässigt werden.

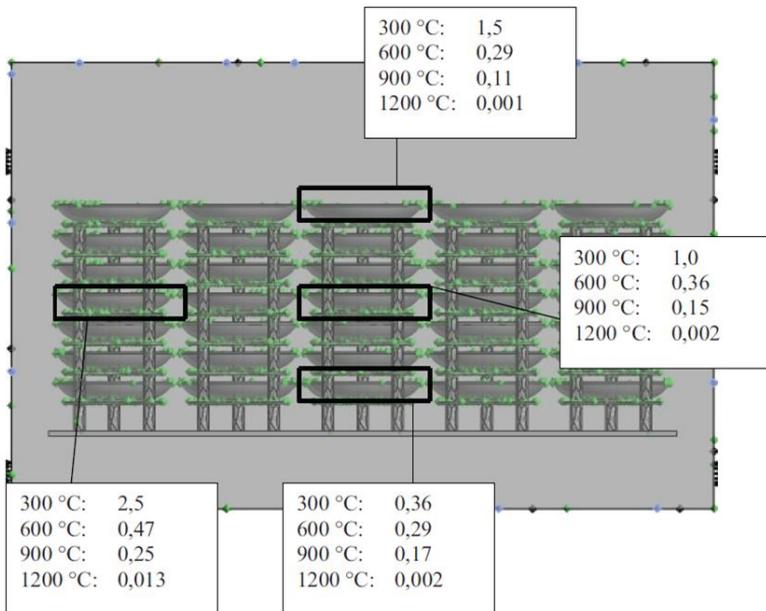


Abb. 50: Verhältnis Q_k/Q_r von konvektivem Wärmetransport und Strahlung in Abhängigkeit von der Position im Stapel und der Temperatur [Lor]

9. Untersuchungen zur Berechnung des effektiven Wärmeübergangskoeffizienten in einem Produktionsofen für den Glattbrand von Porzellan

Die prozesskinetische Betrachtung eines Tunnelofens basiert auf dem Prinzip der Hintereinanderschaltung von zwei im Gegenstrom betriebenen Rekuperatoren. Entsprechend dem 2. Hauptsatz der Wärmelehre wird in der Vorwärm- und Brennzonen eines Tunnelofens die Wärme von den heißen Fluiden auf das Brenngut übertragen, in der Kühlzone in der entgegengesetzten Richtung. Im Folgenden wird die Wärmeübertragung an einem Teller mitten im Besatz während des Aufheizens näher beleuchtet.

Die Enthalpiezunahme des Solids $\dot{H}_{S1,2}$ vom Zustand 1 zum Zustand 2 errechnet sich wie man von **(Abb. 51)** nachvollziehen kann aus:

$$\dot{H}_{S1,2} = \dot{M}_S \cdot (c_{pS2} \cdot T_{S2} - c_{pS1} \cdot T_{S1}). \quad (9.1)$$

Sie entspricht dem vom Fluid auf das Brenngut übertragenen Wärmestrom \dot{Q}_t

$$\dot{Q}_t = \alpha_{eff} \cdot A_S \cdot (\bar{T}_F - \bar{T}_S) = \dot{H}_{S1,2}, \quad (9.2)$$

mit gemittelter Temperatur des Fluids \bar{T}_F und der des Solids \bar{T}_S .

Die spezifische Wärmekapazität des Porzellans c_{pS} ist temperaturabhängig, sie bestimmt man aus der empirisch ermittelten Formel [Schu]:

$$c_{pS} = 1,0002 + 6 \cdot 10^{-5} \cdot \vartheta_S + 3 \cdot 10^{-8} \cdot \vartheta_S^2 \quad (9.3)$$

A_S bezeichnet die wärmeaufnehmende Oberfläche des Tellers einschließlich der unterseitigen Fahne. Den effektiven Wärmeübergangskoeffizienten α_{eff} errechnet man aus:

$$\alpha_{eff} = \frac{\dot{H}_S}{A_S \cdot (\bar{T}_F - \bar{\vartheta}_S)} = \frac{\dot{M}_S \cdot (c_{pS2} \cdot T_{S2} - c_{pS1} \cdot T_{S1})}{A_S \cdot (\bar{T}_F - \bar{T}_S)} \quad (9.4)$$

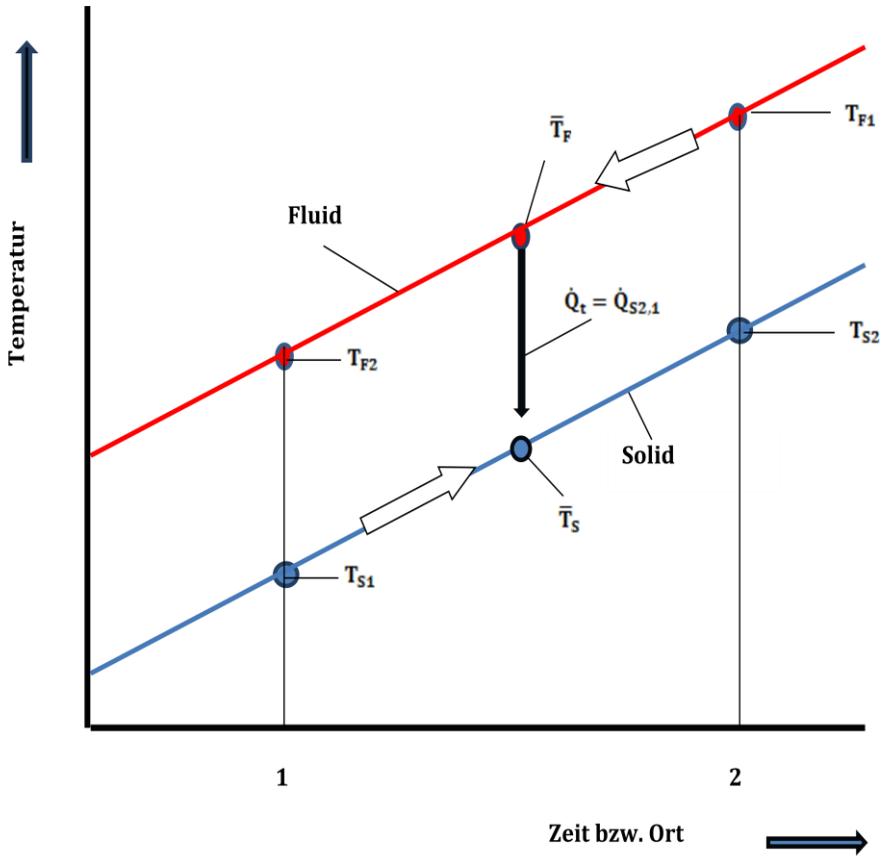


Abb. 51: Schema zum Wärmeübergang vom Fluid zum Solid

Während des Sinterprozesses verändert sich die Tellerfläche A_S . Das Längendehnungs- Schwindungsverhalten des Brennguts ändert sich während des Brennprozesses entsprechend dem Diagramm in **Abb.52**. Die Materialuntersuchung wurde vor und im Zusammenhang mit den Messungen durchgeführt. Der gepresste, rohe Teller hat einen Durchmesser von $d_T = 0,3$ m.

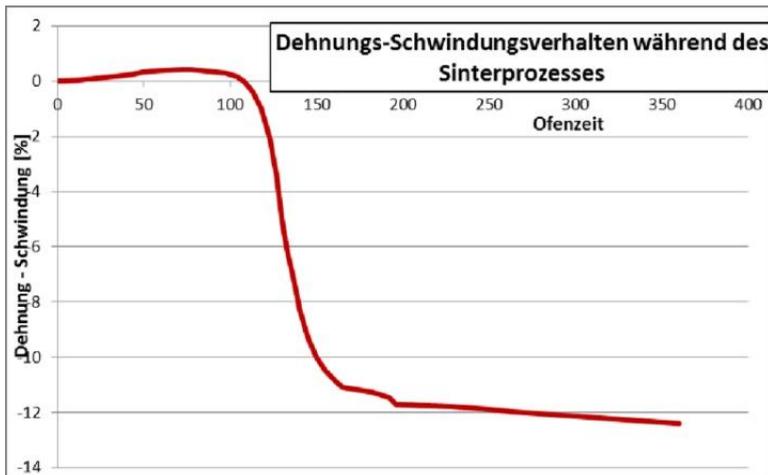


Abb. 52: Längen- Dehnungs-Schwindungs-verhalten von Porzellانتellern während des Brandes

9.1 Beschreibung der untersuchten Schnellbrandofenanlage für den Glattbrand von Porzellan

Die Untersuchungen wurden an einem Schnellbrandofen für den Glattbrand von Porzellan durchgeführt, der in Oberfranken bei einem bekannten Porzellanhersteller als Durchlaufofen mit Wagenförderung noch heute produziert.

Die Ofenanlage wurde mit den in **Tabelle 7** aufgeführten technischen Daten 1994 ausgeliefert. Das schematische Anlagenlayout mit dem Hauptleitungs- und Umlaufsystem ist in **Abb. 53** dargestellt. Das Ofenprinzipschema ist der **Abb. 54** zu entnehmen und dient als Grundlage der folgenden Beschreibung.

Tabelle 7: Daten zur ausgelieferten Ofenanlage und zum Brennprodukt

Ofenlänge	70	m
Nutzhöhe	0,5	m
Wagenlänge	1,76	m
Wagennutzlänge	1,68	m
Wagennutzbreite	1,4	m
Anzahl Wagen im Umlauf	69	
Arbeitshöhe über Flur	0,82	m
Maximaltemperatur	1420	°C
Beheizungsart	Erdgas	
Brennwert	36000	kJ/m_n^3
Benötigter Gasdruck	1	bar
Anzahl Brenner	69	
Anzahl Heizgruppen	10	
(davon automatisch geregelt)	10	
Anschlusswert Gas	2900	kW
Anschlusswert Strom	202	kVA
Stromart - Frequenz	D 380/220 - 50	V - Hz
Kühlkanal u. Vorwärmkanallänge auf der Rücklaufbahn	19,6	m

angenommene Brenntemperatur	1400	°C	
angenommene Produktion	398 kg/h	318 kg/h	265 kg/h
Ofenzeit	4 h	5h	6 h
Taktzeit/Wagen	0,1 h	0,125 h	0,15 h
erwarteter Gasverbrauch	210 m ³ _n /h	178 m ³ _n /h	157 m ³ _n /h
spez. Gasenergieverbrauch (netto)	18840 kJ/kg	19890 kJ/kg	20930 kJ/kg
Besatzdichte (netto)	17	kg/m ²	
Besatzgewicht /Wagen (Ware+Cranks, ohne Stützen)	115	kg	
Balken, Grundplatten)			
Durchmesser der ungebrannten Flachware	0,3	m	
Scherbenstärke der Flachware	0,003	m	
max. Längenschwindigkeit des Porzellans	12	%	
Durchmesser der Cranks	0,3	m	
Lochdurchmesser der Cranks	0,05	m	

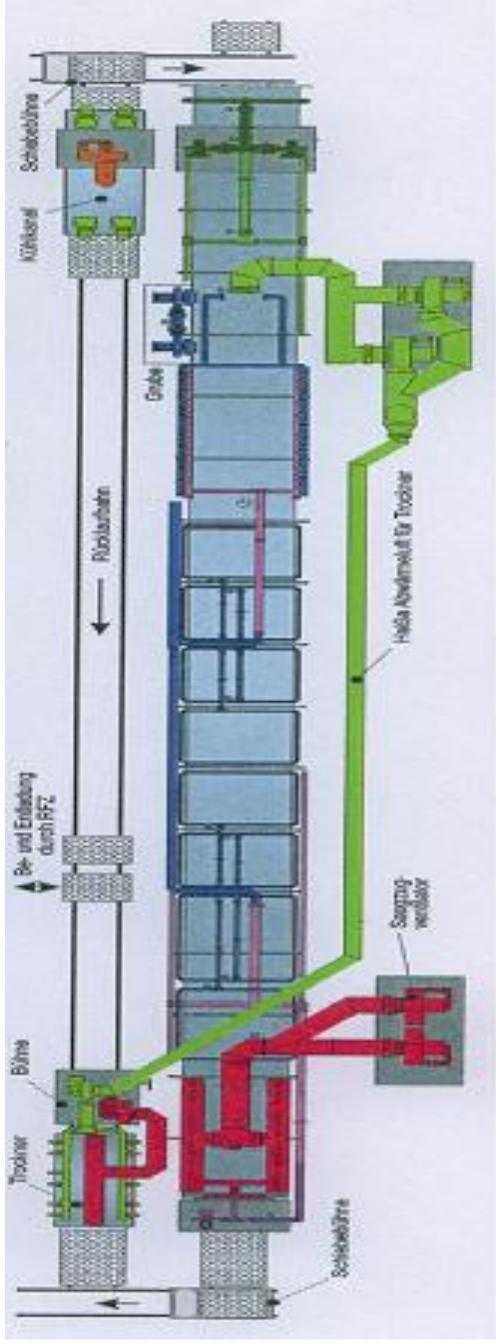


Abb. 53: Anlagen-Layout von Ofen, Wagenlauf- und Rohrleitungssystem

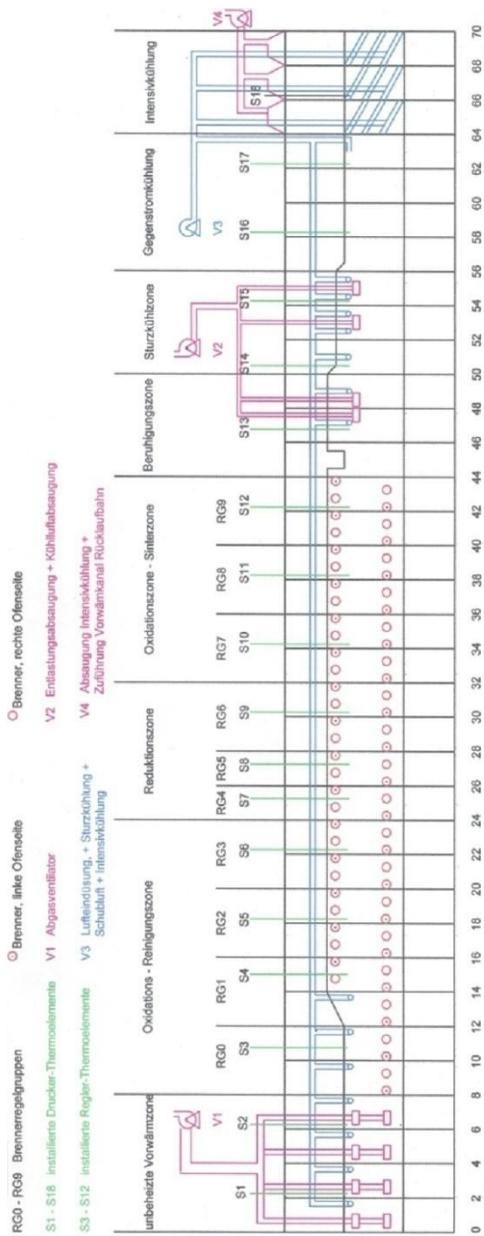


Abb. 54: Ofenprinzipschema

Die Ofenanlage besteht aus 35 je 2 m langen Modulen, die mit Feuerleichtsteinen ausgemauert sind und eine Hängedecke aus Hochtemperaturwolle besitzen. Auch die Wagen haben eine Ofenisolation aus Feuerleichtsteinen und eine Abdeckung aus Hochtemperaturwolle auf der feuerzugewandten Seite.

In den ersten vier Modulen bis Ofenmeter 8 befinden sich beidseitig in den Ofenwänden pro Modul 4 Schächte mit Öffnungen in Höhe des Feuerspülraums und oberhalb des Besatzes. Sie sind mit dem Abgasabsaugsystem verbunden. Der Massenstrom der abgesaugten Abgase wird der Temperaturanforderung entsprechend manuell über Schieber in den jeweiligen Schächten eingestellt und zentral über eine Klappe in der Hauptabgasleitung geregelt. Diese Klappenregelung ist bestimmend für den automatisch geregelten Ofendruck, wobei die Messstelle hierfür sich zwischen der Reinigungs- und Reduktionszone befindet.

Die ersten vier Module bis Ofenmeter 8 sind unbeheizt. Die Strömung im Deckenspalt soll in diesem Bereich durch mehrere seitliche oberhalb des Besatzes angeordnete Lufterdüisungen zur Durchströmung durch den Besatz umgelenkt werden. Der Impuls der Lufterdüisungen ist hoch, weil er mit 70 mbar die Luft durch kleine Düsenquerschnitte treibt. Die daraus resultierende Umwälzung der Fluide im Ofenkanal verbessert die Temperaturgleichmäßigkeit im Ofenkanalquerschnitt.

Ab Ofenmeter 8 im 5. Modul beginnt die Installation der Brenner, die bis einschließlich Ofenmeter 14 nur als Unterbrenner montiert sind. Sie feuern nicht gegeneinander sondern versetzt im Abstand von 1m in den Flammenspülraum unterhalb des Besatzes. Ab Ofenmeter 14 kommen Oberbrenner mit gleichem Brennerabstand dazu; diese Anordnung wird bis einschließlich Ofenmeter 44 beibehalten. Alle 66 Brenner sind in Regelgruppen aufgeteilt. Eine Übersicht wird in **Tabelle 8** gegeben. Die Brenner der Regelgruppen RG 0 bis RG 3 sind als Luftüberschussbrenner konzipiert, um einen hohen Sauerstoffanteil in den Verbrennungs-

abgasen in der Reinigungszone, die bis Ofenmeter 24 reicht, zu ermöglichen. Die Überschussluft wird manuell eingestellt. Die Reduktion soll durch eine stark oxidierende Brennereinstellung in Regelgruppe RG 3 abgebrannt werden.

Tabelle 8: Brennerregelgruppenaufteilung

Regelgruppenbezeichnung	Anzahl Unterbrenner	Anzahl Oberbrenner
RG 0	4	0
RG 1	4	2
RG 2	4	4
RG 3	4	4
RG 4	2	2
RG 5	2	2
RG 6	4	4
RG 7	4	4
RG 8	4	4
RG 9	4	4

In den Regelgruppen RG 4 und RG 5, die ursprünglich als Atmosphärentrennung vorgesehen waren, beginnt bereits die Reduktionszone, die sich bis zur Regelgruppe RG 6 bis Ofenmeter 32 erstreckt. Der Reduktionszone schließt sich von Ofenmeter 32 bis 44 mit den Regelgruppen RG 7 bis RG 9 die oxidierende Brennzone an, wobei die letzte Regelgruppe die höchste Solltemperatureinstellung hat.

Der Brennzone folgt von Ofenmeter 44 bis 50 die Beruhigungszone. Die beiden Zonen sind durch eine Strömungsbarriere getrennt, die als abgehängtes Deckenstück ausgebildet ist. In diesem Bereich sollen möglichst keine Fluide strömen, um ein geringes Partialdruckgefälle von Glasurausdampfungen zu

schaffen. Weiterhin soll die in dieser Zone installierte Entlastungs- oder Zwischenabsaugung dafür sorgen, dass keine Luft aus der Kühlzone in die reduzierende Atmosphäre der Brennzzone strömt. Man kann dies steuern, indem der Differenzdruck Δp zwischen Reduktionszone und dem Bereich der Zwischenabsaugung durch eine geregelte Absaugung konstant $\Delta p = 0$ gehalten wird. Die umgekehrte Strömungsrichtung ist ebenso unerwünscht, weil dies zu extremen Übertemperaturen mit Zerstörung der Absaug-einrichtung führen könnte.

In die Sturzkühlzone der Module 26 bis 28, Ofenmeter 52 bis 56, wird Kühlluft seitlich eingedüst, um die Ware schnell abzukühlen. Hier befindet sich auch die Warmluftabsaugung, die die heiße Luft aus der Gegenstrom-Kühlzone (Ofenmeter 56 bis 64) zusammen mit der quer eingedüsten Luft absaugt und dem als Trockner ausgebildeten Vorwärmkanal auf der Rücklaufbahn zuführt. Das System der Absaugung funktioniert wie bei der Abgas-absaugung am Ofeneinlauf über Schächte in den Ofenwänden, Massenstromschieber und Sammelkanäle.

Am Ende der Gegenstromkühlzone ist die Schubluftdüse installiert, mit der quer über die Kanalbreite in den Deckenspalt die Schubluft-Kühlluft eingeblasen wird.

Die letzten 6 Meter der Ofenanlage sind zu einer Intensivkühlung ausgebaut, in der große Massenströme Kühlluft von jeder Seite in den Ofenkanal durch schräg verlaufende Schlitze zugeführt wird. An der Decke wird sie wieder abgesaugt und zur Rücklaufbahn geleitet, wo sich ein fast 20 m langer Trockner und Vorwärmkanal befindet.

9.2 Versuchsbeschreibung

Alle Einstellungen des Ofens waren vorgegeben und durften nicht verändert werden. Die Anlage lief im vollautomatischen Modus. Die Vorschubmaschine war auf eine Vorlaufzeit von 490 s eingestellt, so dass sich eine Ofenzeit von 6h ergibt, (**Anhang Messprotokoll 1: Vorschubeinstellung**).

Die automatische Temperaturregelung der 10 Brennergruppen hatte der Betreiber festgelegt, sie ist im **Anhang Messprotokoll 2: Brennerregelgruppeneinstellung** festgehalten.

In dieser Tabelle sind auch die Gas-Luftverhältnisse der einzelnen Regelgruppen angegeben, die über den gesamten Regelbereich der Regelgruppen über eine elektronische Verhältnisregelung konstant gehalten werden. Die Gasvolumenströme, die in dieser Tabelle mit aufgeführt ist, werden durch die Temperaturregelung gesteuert und von Messblenden über elektronische Transmitter gemessen. Den Messwert verarbeitet der elektronische Verhältnisregler, der im Vergleich mit der Sollvorgabe des Gas-Luftverhältnisses ein entsprechendes Ausgangssignal an das Durchflussregelventil der Verbrennungsluft gibt. Das Schema der elektronischen Regelung für eine Brennergruppe ist in **Abb. 55** [Bec6] dargestellt.

Die Thermoelemente haben zwei Messperlen, die von einem gemeinsamen keramischen Schutzrohr umgeben sind. Ein Thermopaar dient als Regelelement, das zweite überträgt die Thermospannung auf einen Drucker, dazu kommen weitere Thermoelemente als Druckererelemente, die am Ofen installiert sind und mit S1 bis S18 bezeichnet sind. Alle Positionen und die gemessenen Werte dieser Thermoelemente sind im **Anhang Messprotokoll 3: Schreibstellentemperaturen** dokumentiert.

Bestandteil einer Energiebilanz einer Ofenanlage ist die Bestimmung der Außenwandverluste. Die Messdaten hierfür sind im **Anhang Messprotokoll 4: Außenwandtemperaturen** angegeben.

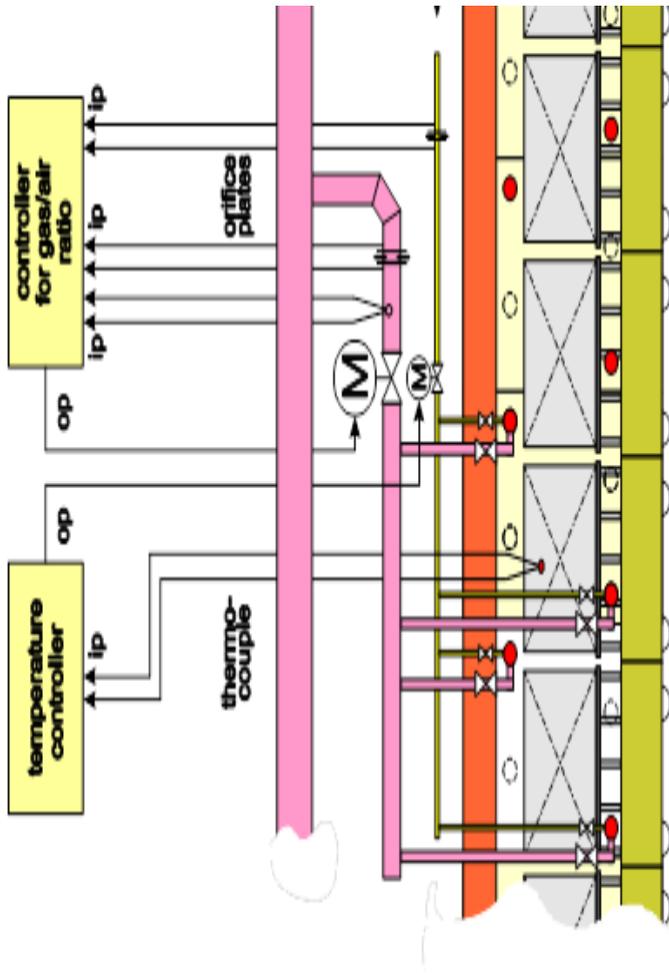


Abb. 55: Regelschema einer Brennerregelgruppe

Für Temperaturmessungen stand ein Messwagen zur Verfügung, dessen Besatzform vorgegeben war und in den **Abb. 56** und **Abb. 57** erfasst ist. Die Besatzform und die Beladedichte der übrigen Ofenwagen waren unterschiedlich, ihr Einfluss auf die Temperaturführung wurde durch die automatische Temperaturregelung ausgeglichen, daraus resultieren ständig ändernde Brennerbelastungen in den Regelgruppen.



Abb. 56: Besatz des Messwagens

Der Messwagen für die Messreihen wurde auf einem Abstellgleis in der Nähe des Ofens vorbereitet. **Abb. 58** zeigt ein Pt10Rh-Pt-Thermoelementpaar mit offener Messperle für die Gasstrommessung; direkt darunter ist die Messperle in einer engen Bohrung im Tellerboden eingelassen und mit Feuerfestkit zugeklebt. Nachdem der Tellerboden nur 3 mm stark ist, die Messperle ca. 1mm Durchmesser aufweist und durch den Feuerfestkleber abgedeckt ist, repräsentiert diese Messung die Teller-Kerntemperatur.

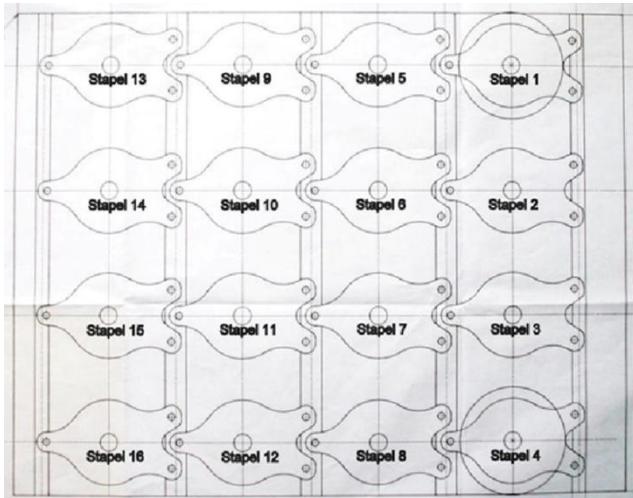


Abb.57: Besatzstapelschema



Abb. 58: offene Thermoelement-Messperle zur Messung der Fluidtemperatur im Besatz

Insgesamt wurden nach diesem Schema 6 Thermoelementpaare in die Besatzstapel des Messwagens eingebaut. Dabei sind die beiden Schenkel durch Keramikperlen isoliert. Die jeweilige Position im Besatzstapel ist durch X in **Tabelle 9** angegeben, wobei die Etage Nr.1 die unterste Crank-Ebene bezeichnet und Etage Nr. 8 die oberste.

Messstelle	1	2	3	4	5	6
Stapel-Nr.	7	7	6	6	5	5
Etagen-Nr.	8	8	4	4	3	3
Tellerkerntemperatur		X		X		X
Fluidtemperatur	X		X		X	

Tabelle 9: Messpositionen der Thermoelementpaare im Besatz

Die Thermoelementpaare werden durch die Isolation des Messwagens geführt und an der Unterseite der Stahlkonstruktion über Ausgleichleitungen mit einem Temperatur-Datenlogger der Fa. Bartec verbunden. Der Datenlogger speichert gleichzeitig alle 10 Sekunden Temperatur- und Zeitwerte aller 6 Thermoelementpaare.

Die Messung beginnt mit Erreichen der Grundstellung des hydraulischen Vorschubsystems, dabei befinden sich die Temperaturmessstellen in der 2. Besatzreihe in den Stapeln 5 bis 8 (vgl. Abb. 57) auf dem Wagen im Abstand von 1,1 m vom Ofeneinlauf. Der hydraulische Zylinder mit der Mitnahmeklinke hat diesen Brennwagen in die vorderste Position an die geschlossene Brennwagenreihe im Ofen geschoben. Das Auslesen der Messdaten findet nach der Messung über ein Interface mit passender Software am PC statt. Im **Anhang Messprotokoll 5: Datenlogger-Temperaturen** sind die ausgedruckten Messdaten zu finden. Parallel zur Angabe der Zeit ist auch die des Ortes festgehalten. Damit können Eigenarten im Temperaturverlauf, die auf äußere Einflüsse z.B. Temperaturschwankungen durch Brenner zurückzuführen sind, sofort zugeordnet werden.

9.3 Versuchsauswertung

Mit den umfangreichen Temperaturmessungen werden die Wärmeübertragungsverhältnisse im Ofen beurteilt. In der **Abb. 59** werden auf der Y-Achse sowohl die Temperaturen der fest installierten Thermoelemente als -Fixpunkte gezeigt, als auch die Temperaturen der 6 Thermoelementpaare, die aus dem Datenlogger ausgelesen wurden.

Die X-Achse ist als Ofenlängenkoordinate angegeben. Die Ofenlänge ist unterteilt in die einzelnen Bereiche:

- unbeheizte Vorwärmzone
- Oxidations- und Reinigungszone
- Reduktionszone
- Oxidations- und Sinterzone
- Glasurberuhigungszone
- Sturzkühlzone
- Gegenstromkühlung
- Intensivkühlzone

Augenfällig ist in der Oxidations- und Reinigungszone, im Bereich der Brennerregelgruppen RG 0 bis RG 3 von Ofenmeter 8 bis 24, die große Differenz der Temperaturverläufe zwischen den fest installierten Thermoelementen, - das sind die vorgegebenen Solltemperaturen - und den Schlepplementen im Besitz, die vom Datenlogger gespeichert wurden. Je steiler der Anstieg in der Solltemperaturführung ist, umso größer wird die Temperaturdifferenz zu den Schlepplementen. Der maximale Unterschied tritt im Bereich der ersten Unterbrenner zwischen Ofenmeter 8 und 12 auf, in der der Anstieg der Solltemperatur ca. 94 K/m beträgt.

Die Unterschiede sind den instationären Wärmeübertragungsverhältnissen geschuldet.

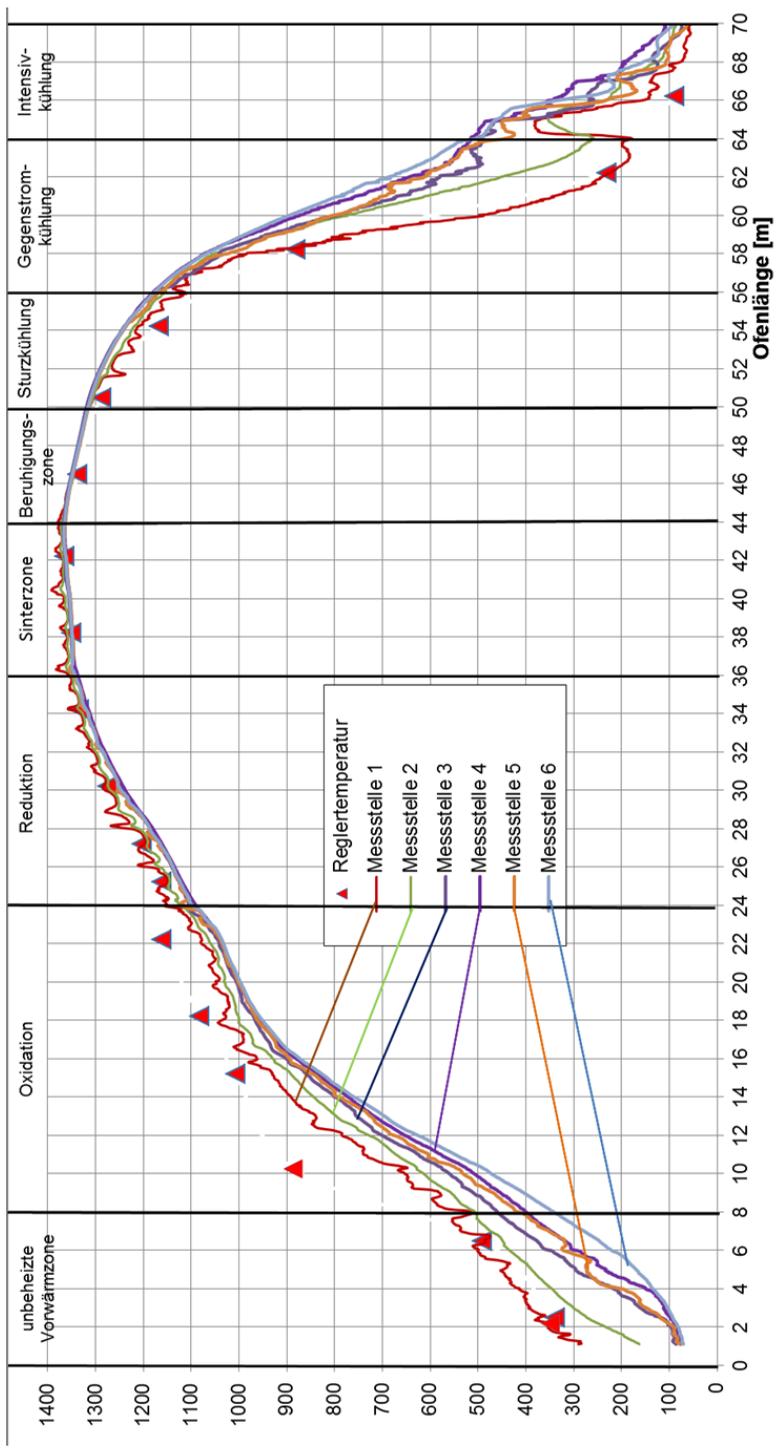


Abb. 59: Messkurven, Temperatureinstellung und Zoneneinteilung

Es soll der Reinigungsbereich bei ca. 1160°C Solltemperatur so schnell wie möglich erreicht werden, um mit Hilfe der eingestellten Haltezeit bei 1170°C Solltemperatur genügend Zeit für diesen Diffusionsprozess im Brenngut zu gewinnen. Der Reinigungsbereich erstreckt sich von Ofenmeter 22 bis 24, das ist die Zone, in der die Brenner der Regelgruppe RG 3 mit nahezu maximaler Luftzahl $\lambda_v = 1,59$ (siehe Messprotokoll 2) in den Ofenkanal brennen und in der die Reduktion, die von den Brennern der Regelgruppen RG 4 bis RG 6 stammt, abgebrannt werden soll. In der Reduktionszone von Ofenmeter 24 bis 32 verringert sich die Steigung der Solltemperatur auf ca. 21 K/m, so dass sich Soll- und Schleppkurven annähern können. Deutlich sind die Temperaturzacken der Messtemperatur 1 im Deckenspalt zu erkennen, wenn sie den Strahlbereich der Brenner anzeigen und dabei sogar über die Solltemperaturen hinauschießen.

In der folgenden Oxidationszone von Ofenmeter 32 bis 44 mit den Brennerregelgruppen RG 7 bis RG 9 wird die Maximaltemperatur erreicht. Die Steigung der Solltemperaturen S10 bis S12 von 1332°C bis zum Maximalwert 1362°C beträgt nur 3 K/m, so dass daraus eine weitere Angleichung von Soll- und Schleppkurven resultiert. Es sind wieder Temperaturzacken der Messtemperatur 1 im Deckenspalt festzustellen, die den Strahlbereich von Brennern anzeigen. In abgeschwächter Form sind diese Temperaturzacken auch im Besatz bei der Schleppelementtemperatur 3 festzustellen.

Der Brennzone schließt sich die unbeheizte „Beruhigungszone“ von Ofenmeter 44 bis 50 an. Energie wird nun von der Ware abgegeben, so dass die Schlepptemperaturen zwar langsam abfallen, aber die fixen Thermoelemente an der Wand im Strahlungswärmeaustausch mit der Ware eine geringere Temperatur anzeigen. Dies gilt auch für die gesamte Kühlzone. In der Beruhigungszone entweichen die letzten größeren Gasbläschen aus der Glasur und verhindern damit deren „Orangenschaligkeit“. Es sollte in dieser Zone möglichst keine

Fluidströmung sondern eine gesättigte Glasurdampfatmosfera herrschen, damit ein „Auszehren“ des Glasurspiegels verhindert wird und sich makelloser Glanz auf den Tellern zeigt.

In der Sturzkühlzone von Ofenmeter 50 bis 56 wird von den Seiten Kühlluft eingeblasen. Diese Effekte sind an den Temperaturzacken der Messkurve 1 zu erkennen. Diese Luft und die Kühlluft, die man als Schubluft bei Ofenmeter 64 quer über den Ofenkanal unter der Decke einbläst, werden von der Entlastungsabsaugung in der Sturzkühlzone aus dem Ofen gezogen.

Die Gegenstromkühlung von Ofenmeter 56 bis 64 hat einen hohen Kühleffekt, weil der Schubluftmassenstrom mit ca. 2700 kg/h mehr als doppelt so groß ist wie der Massenstrom von Ware und Brennhilfsmitteln. Deshalb ist in diesem Bereich der Temperaturabfall sehr steil und es treten die höchsten Temperaturdifferenzen zwischen den fest installierten Thermoelementen und den Schlepplementtemperaturen auf.

Zwischen Ofenmeter 64 und 70 befindet sich die Intensivkühlung. Mit ca. 9000 kg/h Kühlluft, die seitlich eingeblasen und von der Decke wieder abgesaugt wird, erzielt man den sehr ausgeprägten gezahnten Temperaturverlauf.

Der Energiebedarf der gesamten Ofenanlage wird durch die Mechanismen der Wärmeübertragung in der Vorwärm- und Brennzone bestimmt, deshalb ist eine nähere Betrachtung und Begründung des Temperaturverlaufs dieser Zonen sinnvoll.

Im Messprotokoll 5 gibt die Messtemperatur 1 den Temperaturverlauf in Zeitintervallen von 10 s über dem Stapel 7 (vgl. Abb. 57) im Deckenspalt wieder. Da die Luft aus den Düsen und die verbrannten Gase der Brenner sowohl unterhalb als auch oberhalb des Besatzes einströmen, werden deren Einflüsse auf die Temperaturen im Deckenspalt von der Messtemperatur 1 unmittelbar erfasst. Die nach unten gerichteten Zacken im Temperaturverlauf zwischen den Ofenmetern 5 bis 8 sind durch

unterschiedliche Massenströme eingedüster Umgebungsluft begründet.

Die ersten Unterbrenner ab Ofenmeter 8 haben auf den Temperaturverlauf im Deckenspalt keinen Einfluss. Der Temperaturpeak bei Ofenmeter 12 kann dem Fluidstau zugeschrieben werden, der durch die Deckeneinschnürung an dieser Stelle entsteht (s. Abbildung 54: Ofenprinzipschema). Ab Ofenmeter 13 sind Oberbrenner installiert, die mehr oder minder starke Temperaturpeaks in der gesamten Brennzone bewirken. Die unterschiedlich großen Peaks sind auf ungleiche Brennerbelastungen zurückzuführen, die sich auf Grund der automatischen Temperaturregelung ergeben.

Die Messperle der Messtemperatur 2 ist 0,03 m unterhalb der Messtemperatur 1 auf die Oberfläche des obersten Tellers des Stapels 7 fixiert. Die Abschirmung der Fluidströmung durch die leicht erhöhte Teller-„Fahne“ und der Einfluss der instationären Temperaturleitung auf die Oberflächentemperatur sorgt für eine Dämpfung der Temperaturpeaks. Bis Ofenmeter 48, in ca. 4 m Entfernung vom letzten Brenner, ist die Fluidtemperatur höher als die Solidtemperatur. Erst von diesem Punkt, mitten in der Beruhigungszone, fällt die Fluidtemperatur unter die Solidtemperatur, wobei in der gesamten Beruhigungszone die Temperaturunterschiede der beiden Messreihen äußerst gering sind.

Die Messperlen 3 und 4 befinden sich im Stapel 6 in der 4. Etage mitten im Besatz. Sie können deshalb als repräsentativ für die Temperatursituation im größten Teil des Brennwagenaufbaus angesehen werden.

Thermoelement 3 misst die Fluidtemperatur 0,03 m oberhalb des Thermoelements 4. Thermoelement 4 gibt die Kerntemperatur der Flachware an dieser Stelle an. Beide Temperaturen bleiben bis zum Beginn der „Beruhigungszone“ unterhalb des Niveaus der Schleppelementtemperaturen 1 und 2. In der Mitte des Besatzes herrscht in der Vorwärm- und Brennzone eine

geringere Strömung und zusätzlich fungieren Cranks und Flachware als Strahlungsschirme, so dass hier eine geringere Wärmeübertragung als in der obersten Besatzetage stattfindet.

Nach Erreichen der Maximaltemperatur in der Beruhigungszone und anschließend in der Kühlzone kehren sich die Temperaturverläufe um. Die Temperaturwerte der Elemente 3 und 4 liegen oberhalb derer von 1 und 2, wobei die Fluidtemperatur 3 erst nach der Beruhigungszone durch den Einfluss der Kühlluft unter die Werte der Solidtemperatur 4 sinkt.

Mit den Daten der Solidtemperatur 4 und der Fluidtemperatur 3, die in Zeitschritten von 10 s im Messprotokoll 5 wiedergegeben werden, errechnet man nach Gleichung (9.1) die Enthalpieänderung des Solids. Unter Verwendung der Gleichung (9.3) zur Bestimmung der temperaturabhängigen spezifischen Wärmekapazität der Teller c_{pS} ermittelt man aus Gleichung (9.4) den effektiven Wärmeübergangskoeffizienten α_{eff} . Er wird durch die Wärmeübertragungsfläche des Solids mit umgekehrter Proportionalität beeinflusst. Nachdem die Fahnenunterseite des Tellers nicht abgedeckt ist und durch die 0,05 m-Bohrung im Crank die Wärmeübertragung auch auf die ganze Unterseite des Tellers stattfindet, wird als Wärmeübertragungsfläche dessen Ober- und Unterseite einbezogen.

Der Verlauf des effektiven Wärmeübergangskoeffizienten α_{eff} ist in der Vorwärm- und Brennzone bis zum Zeitpunkt $x = 192,5$ min - das entspricht Ofenmeter 42,3 - in **Abb. 60** dargestellt. Die Streuung der Werte der Wärmeübergangskoeffizienten ergeben sich aus dem unruhigen Verlauf der gemessenen Solid- und Fluidtemperaturen. Es besteht direkte Proportionalität von Enthalpie des Solids und dem Wärmeübergangskoeffizienten α_{eff} . Mit Annäherung an die Maximaltemperatur nimmt α_{eff} nach Gleichung (9.4) ab, weil sich die Enthalpie des Solid stark verringert.

Unterschiedliche Beladedichten und damit ungleiche Brenngutmassendurchsätze beeinflussen die automatische Temperaturregelung. Die wiederum veranlasst eine ständige Änderung der Brennerbelastung der einzelnen Regelgruppen, so dass es zu Fluid- und Solidtemperaturspitzen kommt, die kurzfristige Enthalpieänderungen der Ware bewirken. Großer Einfluss auf die Temperaturschwankungen geht mit Sicherheit von den Strömungsturbulenzen im Ofenkanalquerschnitt aus. So dass die Werte der Wärmeübergangskoeffizienten α_{eff} streuen. Es ist auch nicht ausgeschlossen, dass die Messperle der Solidtemperaturmessung sich von der Fixierung löste und von der Gastemperatur beeinflusst wurde.

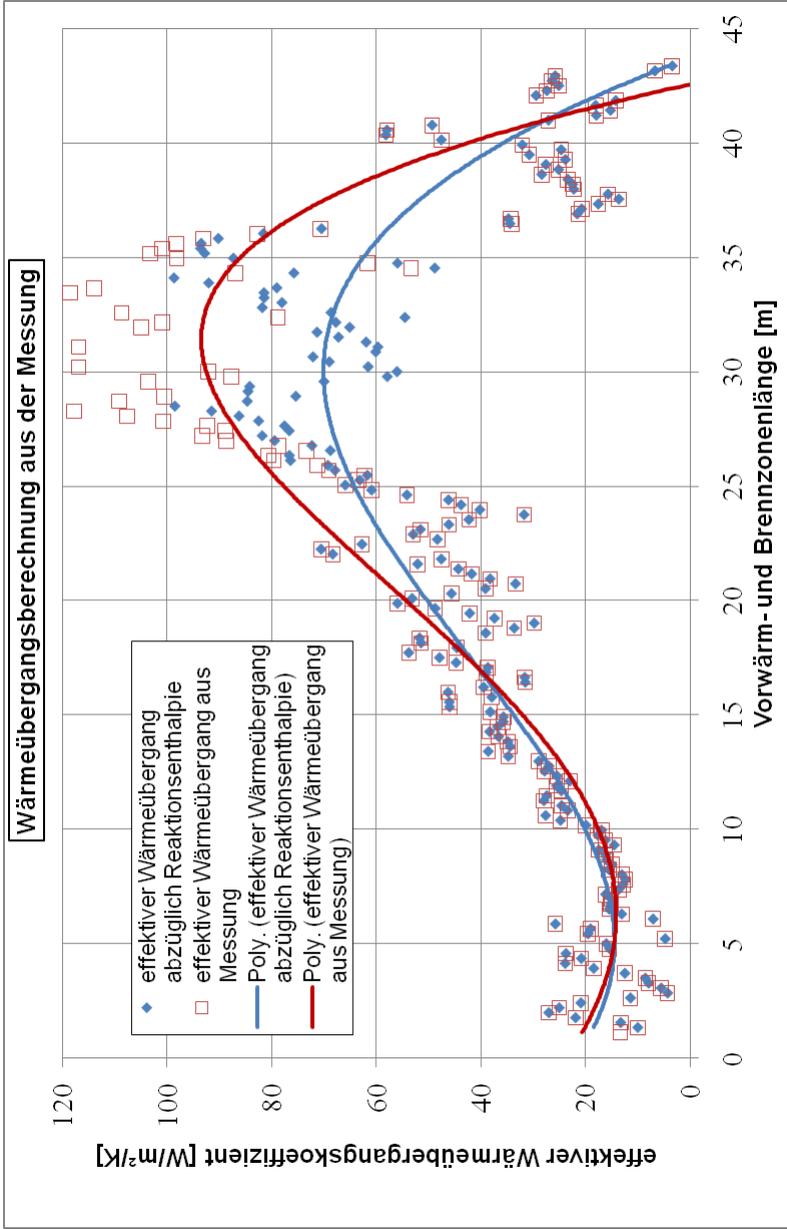


Abb. 60: aus Temperaturmessungen berechneter effektiver Wärmeübergangskoeffizient mit Ausgleichskurven

Mit Ofenmeter 25 beginnt die Reduktionszone; hier ist das Porzellan noch porös, so dass die darin eingeschlossene Luft mit der reduzierenden Ofenatmosphäre reagieren kann und nach Gleichung (9.4) zu einer Erhöhung des effektiven Wärmeübergangskoeffizienten α_{eff} führt, wie es in Abb. 60 im Ofenlängenbereich 25 bis 35 gezeigt wird.

In Abb. 8 ist die exotherme Reaktion der Spinellbildung angegeben, die bei der Untersuchungsmethode von Blumm [Blu] bei 998°C ein Maximum von 51,4 J/g aufweist. Dieser Wert wird beeinflusst von der quantitativen Zusammensetzung des Porzellanversatzes, von der Korngrößenverteilung, von der Aufheizgeschwindigkeit etc. Leider wurden hierüber keine Angaben gemacht; auch werden DTA-Untersuchungen wie die von Blumm [Blu] gewöhnlich mit größerem Zeitaufwand durchgeführt als er für den Schnellbrandprozess vorgesehen ist. Bei schnelleren Aufheizgeschwindigkeiten verschieben sich die Reaktionen zu höheren Temperaturen bei einem erweiterten Temperaturspektrum.

Wenn während des Glühbrandprozesses die exotherme Reaktion der Spinellbildung nicht abgeschlossen wurde, dann wird hierdurch und zusammen mit der Atmosphärenreaktion aus den Poren der effektive Wärmeübergangskoeffizienten α_{eff} beim Glattbrand im Ofensegmentbereich 25 bis 35 nach Gleichung (9.4) verfälscht. Als Korrektur ist deshalb in Abb. 60 zusätzlich in diesem Bereich der effektive Wärmeübergangskoeffizienten α_{eff} durch eine abgeschwächte exotherme Bildungsreaktion des Spinells mit 5 J/g berücksichtigt. Um Trends besser erkennen zu können, sind in Abbildung 60 stetige Ausgleichskurven eingezeichnet. Man kann die Streuungen der Wärmeübergangskoeffizienten dämpfen, indem man für die Temperaturen von Fluid und Solid Trendkurven bestimmt und dann erst die Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten α_{eff} durchführt (s. **Abb. 61**). Sie zeigt die Trendlinien für die Temperatur des Fluid und für die Brenngutkerntemperatur.

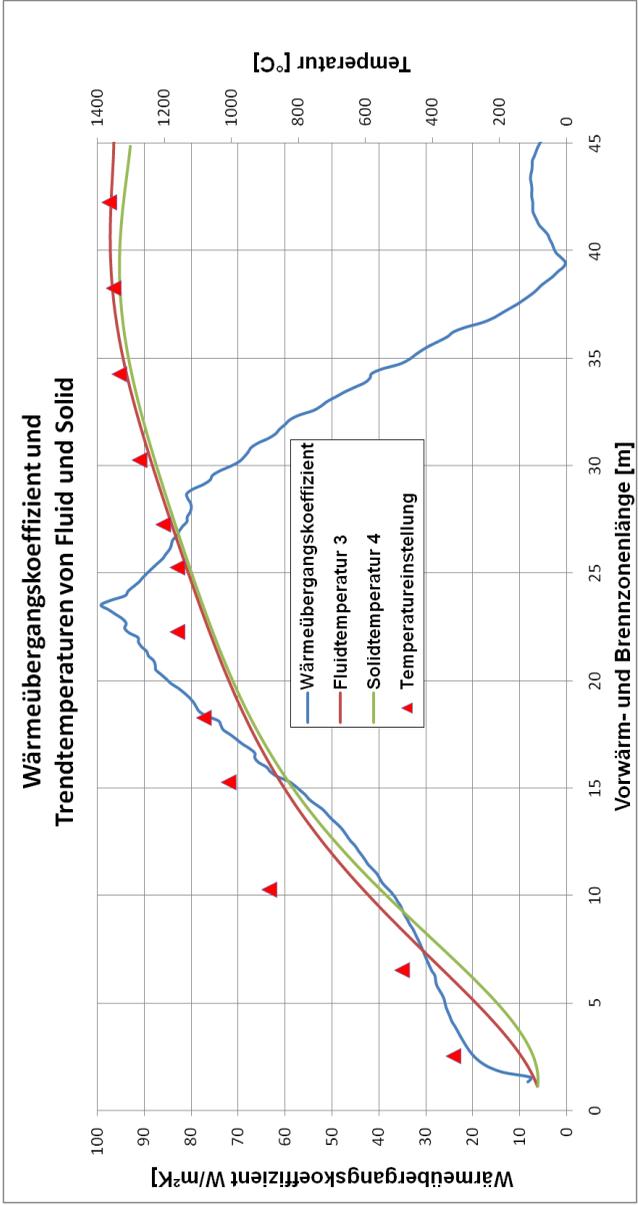


Abb. 61: Wärmeübergangskoeffizient und Trendtemperaturen von Fluid und Solid in der Vorwärm- und Brennzone

Die minimalste Abweichung der Trendlinien von den Temperaturmesskurven 3 und 4 erhält man durch die Bestimmung von Funktionen 6. Grades. Die Trendlinienfunktion für die Fluidmesskurve 3 erhält man aus der folgenden Gleichung (9.5):

$$\vartheta_3 = 72,83578 + 0,41258x + 11,85387x^2 - 0,95961x^3 + 0,03416x^4 - 5,75498 * 10^{-4}x^5 + 3,7112 * 10^{-6}x^6 \quad (9.5)$$

Die maximale Abweichung zwischen Temperaturmesskurve 3 und Trendlinie 3 beträgt ca. 15% und zwar ca. 2 m vom Ofeneinlauf entfernt, wo durch Falschlufansaugung, beeinflusst durch die wechselnde Besatzgeometrie, sehr schwankende Temperaturverhältnisse herrschen. Die durchschnittliche Abweichung in der Vorwärm- und Brennzone beträgt dagegen nur ca. 1%.

Die Trendlinienfunktion 4 für die Temperaturmesskurve 4 lautet:

$$\vartheta_4 = 113,34568 - 42,84216x + 18,00143x^2 - 1,33047x^3 + 0,04541x^4 - 7,449597 * 10^{-4}x^5 + 4,71567 * 10^{-6}x^6 \quad (9.6)$$

Hier beträgt die maximale Abweichung ca.13%, die durchschnittliche ca. 2%.

Aus den Trendkurven für Fluid und Solid sind nach den Gleichungen (9.1) bis (9.4) die effektiven Wärmeübergangskoeffizienten α_{eff} für die Vorwärm- und Brennzone neu berechnet worden. Der Verlauf wird in Abbildung 61 gezeigt.. Die Bestimmung resultiert aus einem zeitlichen Abstand

von 1 Minute, was einer Ofenlänge von 0,216 m entspricht; die Messung beginnt im Abstand von 1,1 m vom Ofeneingang. Der Teller hat eine Masse $M=530$ g. Der Massenstrom \dot{M}_T beträgt $\dot{M}_T = \frac{530}{60} = 8,833 \frac{g}{s}$.

Zwischen den fixen Thermoelementen S2 und S3, zwischen Ofenmeter 6,5 und 10,75, - das ist der Übergangsbereich von unbeheizter Vorwärmzone zu den ersten Unterbrennern -, weist die Einstellungskurve der Ofentemperatur mit ca. 93 K/m den stärksten Anstieg auf. Hier ergeben sich mit bis zu ca.65 K die größten Unterschiede zwischen den Trendtemperaturen der Fluide und des Solids. Da aber gleichzeitig der Anstieg der Brenngutenthalpie nicht sehr groß ist, beschränkt sich nach Gleichung (9.4) der effektive Wärmeübergangskoeffizient α_{eff} auf Werte zwischen ca. 36 W/m²/K und ca. 50 W/m²/K.

Mit schwächer werdendem Anstieg der Ofeneinstellungstemperatur verringert sich auch der Trendtemperaturunterschied zwischen Fluid und Solid, so dass die Werte des effektiven Wärmeübergangskoeffizienten α_{eff} steigen. Sein Maximum wird mit ca. 124W/m²/K bei Ofenmeter 23,5 erreicht, bei dem ein minimaler Trendtemperaturunterschied besteht, aber immer noch eine Enthalpiezunahme des Brennguts zu verzeichnen ist. Dies geschieht in der Reinigungszone, in der das Annähern der beiden Trendtemperaturen durch die Einstellung einer Haltezeit von ca. 14 Minuten bei ca. 1170°C beabsichtigt ist.

Es soll in diesem Bereich über den gesamten Ofenkanalquerschnitt ein Temperatenausgleich stattfinden, so dass ein gleichmäßiger Reinigungsstatus für alle Teller erreicht wird. Man hat außerdem zu Beginn der folgenden Reduktionszone eine einheitliche Ausgangsposition in der Temperaturverteilung geschaffen.

In der Reduktionszone, das sind die Regelgruppen RG 4, RG 5 und RG 6 – Ofenmeter 24 bis 32 – ist immer noch eine Enthalpiezunahme des Brennguts aber mit geringerem Anstieg vorhanden, so dass mit leicht steigender Temperaturdifferenz der beiden Trendkurven der errechnete Wärmeübergangskoeffizient abfällt. Beide Trendkurven haben sich mit Beginn der Reduktion auf Grund der Haltezeiteinstellung und des immer schwächer werdenden Temperaturanstiegs an die rote Kurve der fixen Temperatureinstellung S7, S8 und S9 angenähert.

Mit der Regelgruppe RG 7 ab Ofenmeter 32 wird wieder eine oxidierende Brenneinstellung vorgenommen, die bis zum Brennzonenende – Ofenmeter 44 – beibehalten wird. Mit dieser Einstellung wird der Glasur ein leicht elfenbeinfarbiges Aussehen verliehen. In der vorletzten Gruppe RG 8 erreicht das Brenngut mit der Trendtemperatur 4 die Maximaltemperatur. Weil an diesem Punkt der Temperaturanstieg der Solidtrendtemperatur 4 zum Stillstand gekommen ist, und es damit auch keine Änderung der Brenngutenthalpie gibt, muss der Wärmeübergangskoeffizient zu minimalsten Werten absinken.

In der letzten Brenner-Regelgruppe RG 9 wurde die Regeltemperatureinstellung S12 auf den Maximalwert gesetzt, während die Trendtemperaturen bereits abfallen. Die Brenner dieser Gruppe wurden hier auf maximale Oxidation im Gas-Luftverhältnis 1:16,2 gestellt, wodurch sie, trotz maximaler Leistung nicht die Solltemperatur erreichten. Der effektive Wärmeübergangskoeffizient α_{eff} bleibt wegen der geringen Enthalpieänderung des Solids mit Werten bis ca. 8 W/m²/K sehr niedrig. Der Wärmeaustausch in der Kühlzone findet nach den gleichen Prinzipien wie in der Vorwärme- und Brennzona statt, nur dass hier in umgekehrter Richtung die Wärme vom Solid auf das Fluid übertragen wird. Da im vorliegenden Fall die Kühlzone keinen Einfluss auf die Energiezuführung der Ofenanlage hat, kann auf eine detaillierte Betrachtung der Wärmeübertragung in der Kühlzone verzichtet werden.

9.4

Fazit aus den Untersuchungen

Priorität für den Betreiber einer Schnellbrandofenanlage für den Glattbrand von Porzellan hat die aus dem Ofen kommende Produktqualität. Sie ist nicht nur abhängig von der passenden Rohstoffauswahl und den vielen vorgeschalteten Produktionsprozessen, sondern in erster Linie von einer optimalen Einstellung des Glattbrandofens. Eine optimale Ofeneinstellung setzt die Kenntnis der physikalischen und chemischen Veränderungen im Werkstoff voraus, die während der thermischen Behandlung ablaufen. Es sind hier mögliche Spannungsfelder im Werkstoff zu beachten, die Auf- und Abkühlgeschwindigkeiten keramischer Materialien stark limitieren, ebenso stoffspezifische Volumenänderungen, z.B. lineares Schwindungsverhalten der Ware von 12% bis 15%, wobei der Modifikationswechsel des Quarzes keine entscheidende Rolle spielt, sowie die große Vielfalt der Brenngutformen im Porzellansortiment. Mit steigender Scherbenstärke wächst auch die Gefahr der Rissbildung durch die sich erhöhende Wärmespannung, verursacht durch den sich vergrößernden Temperaturgradienten im Brenngut. Die möglichst leichten Brennhilfsmittel müssen auch während des Brennprozesses plan bleiben, weil das Porzellan wegen der Flüssigphasensinterung im Hochtemperaturbereich leicht plastisch wird und sich der Standfläche der Auflage anpasst.

Es dürfen keine Reaktionen zwischen Brenngut und Brennhilfsmittel auftreten, deshalb werden Brennhilfsmittel mit einer trennenden und schützenden Aluminiumoxidengobe bestrichen.

Man muss wissen, zu welchen Zeitpunkten und bei welchen Temperaturen Entgasungsprozesse von organischen und decarbonisierten Bestandteilen tolerierbar abgeschlossen sind, bevor die Glasur sich schließen darf, um Blasen, Nadelstiche, Krater usw. in der Glasur zu vermeiden. Der richtige Zeitpunkt, das Temperaturintervall und die Dauer der Reduktionsphase müssen bekannt sein, damit eine möglichst vollständige Fe^{2+} -Bildung in der

Glasur einen ausreichenden Weißgehalt bewirkt, ohne dass es zu Einschlüssen in der Glasur von Reduktionsrelikten oder Gelbfärbung kommt.

Gerade die Zuordnung des korrekten Zeit- und Temperaturpunktes der Atmosphärenwechsel setzt eine hohe Gleichmäßigkeit von Temperatur und Brennatmosphäre im Ofenkanalquerschnitt voraus. Dazu muss – wie mit den Messergebnissen gezeigt wurde – der Unterschied der Solltemperatureinstellung zur tatsächlichen Brennguttemperatur berücksichtigt werden.

Ein geeignetes Verfahren, um Temperaturgleichmäßigkeit im Querschnitt zu erzielen, ist das Temperatursollprofil durch verlangsamten Anstieg bis hin zu einer „Haltezeit“ einzustellen. Dabei gleichen sich Fluid- und Solidtemperatur an und die Werte des Wärmeübergangskoeffizienten α_{eff} steigen. Diese Maßnahme verringert zwar den Energieverbrauch der Ofenanlage, verlängert jedoch die Ofenzeit, reduziert damit die Produktionskapazität und lässt die entscheidende Größe, den spezifischen Energieverbrauch wachsen.

Eine strikte Atmosphärentrennung zwischen Oxidations- und Reduktionszone muss anlagentechnisch gewährleistet sein. Hierzu ist es sinnvoll, die Reduktionsgase, die aus den Reduktionsbereichen des Ofens strömen, durch Brenner mit hohem Luftüberschuss abzubrennen, bevor sie sich bei der Gegen-stromeinstellung in die Oxidations-Reinigungszone ausbreiten.

Eine weitere Atmosphärentrennung ist im Maximaltemperaturbereich zwischen der Reduktionszone und der oxidierenden Hochtemperaturzone zu beachten. In Fahrtrichtung der Ware gesehen muss beim Gegenstrom die letzte Brennerregelgruppe der Reduktion so stark reduzierend eingestellt sein, dass der Sauerstoff aus der Oxidationszone nicht nur vollständig zur Verbrennungsreaktion aufgebraucht wird, sondern

dass CO- und H₂-Gase an dieser Stelle in ausreichender Konzentration vorhanden sind. Die umgekehrte Strömungsrichtung, dass Reduktionsgase in den Oxidationsbereich der letzten Brennergruppen einströmen, ist nur dann möglich, wenn diese Brenner mit überstöchiometrischer Einstellung betrieben werden und alle Reduktionsgase nachverbrannt werden.

Da es hier aber durch die erheblichen Brennerbelastungen zu hohen Überdrücken im Ofenraum kommen kann und daraus resultierend zu unbeabsichtigten Strömungen vor allem in die Reduktionszone, sind Abzüge über eine sog. Entlastung vorzusehen, die man in dem der Hochtemperaturzone sich anschließenden Bereich einbaut.

Der Energieverbrauch ist untrennbar mit den Wärmeübertragungsverhältnissen im Ofen verbunden. Ein hoher Wert des Gesamtwärmeübergangskoeffizienten α_{ges} ist immer anzustreben. Eine Erhöhung des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten α_k , der nach Lorenz [Lor] bei 900°C einen Anteil von maximal 20% an der Gesamtwärmeübertragung hat, ist demnach nur durch eine Vergrößerung der Anströmgeschwindigkeit der Fluide im Temperaturbereich <900°C sinnvoll. Das ist bei Verringerung der Seiten- und Deckenspaltenabmessungen theoretisch realisierbar, aber wegen der verringerten Betriebssicherheit nicht ratsam.

Wenn es dennoch durch Verringerung der Spalten gelingt, höhere Fluidgeschwindigkeiten im Besatz zu erzielen, erhöht man auch die konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten α_k . Aber da der Strömungswiderstand anschwillt, stellt sich ein größeres Druckgefälle im Ofenkanal ein, d.h. auch ein höherer Überdruck im Hochtemperaturbereich. Als Folge dessen führt dies u.a. zu wachsenden Wandverlusten. Außerdem muss wegen des gestiegenen Unterdrucks am Ofeneinlauf der Abgasventilator mehr Falschluff absaugen, was mehr elektrische Energie erfordert.

Oberhalb von 1200°C kann der Wärmeübergang durch Konvektion vernachlässigt werden [Lor], so dass allein der durch Strahlung von Bedeutung ist.

Die Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten aus den Temperaturmessungen stellt eine Ist-Aufnahme dar, die den Strahlungsanteil beinhaltet. Der Strahlungsanteil kann errechnet werden und Hinweise zur Optimierung geben.

Die Größe, mit der die Strahlungswärmeübertragung beeinflusst werden kann, ist der Emissionsgrad der Fluide ε_F . Er setzt sich zusammen aus den Emissionsgraden der strahlenden Gase CO₂ und H₂O, ε_{CO_2} und ε_{H_2O} [Walt2]

$$\varepsilon_F = \varepsilon_{CO_2} + \varepsilon_{H_2O} - \varepsilon_{CO_2} * \varepsilon_{H_2O} \quad (9.7)$$

und in den Reduktionszonen zusätzlich aus dem Emissionsgrad des CO ε_{CO} .

Die Emissionsgrade ε_{CO_2} , ε_{H_2O} und ε_{CO} sind von der Gastemperatur, den jeweiligen Partialdrücken und der äquivalenten Schichtdicke $s_{\ddot{a}q}$ abhängig. Die äquivalente Schichtdicke $s_{\ddot{a}q}$ errechnet man aus:

$$s_{\ddot{a}q} = 4 * \frac{0,9 * V_G}{A_{G,W}} \quad (9.8)$$

Mit V_G wird das Volumen des Gaskörpers um einen Teller und mit $A_{G,W}$ die Fläche zwischen dem Gaskörper und den mit ihm im Strahlungsaustausch stehenden Wänden bezeichnet. Das Gaskörpervolumen bestimmt man durch die Berechnung des Nutzvolumens eines Wagens, bringt das darauf befindliche Feststoffvolumen des Besatzes in Abzug und dividiert diesen Wert durch die Anzahl der Teller auf dem Wagen. Die strahlungsaustauschenden Flächen um einen Teller addieren sich aus der Telleroberfläche mit seiner Fahnenunterseite, der

Crankoberfläche, die nicht vom Teller abgedeckt ist und der Fläche, die die Abdeckung oberhalb des Tellers darstellt.

Die Temperaturen sind durch die Prozessparameter vorgegeben, die Partialdrücke beeinflusst man mit der Verbrennungseinstellung, die sich nach den geforderten Atmosphärenbedingungen richtet. Die äquivalente Schichtdicke $s_{\ddot{a}q}$ ist in der Praxis abgeleitet aus der „Zweifingerregel“, mit der der Abstand zwischen Teller und Crankunterseite bezeichnet wird. Der Abstand beträgt im Stapel $s_{Cr} = 59$ mm.

Vergrößert man den Abstand s_{Cr} und damit die äquivalente Schichtdicke $s_{\ddot{a}q}$, dann kann bei bestimmten Temperaturen und Partialdrücken von CO_2 und H_2O der Emissionsgrad des Fluids ε_F und der Strahlungsaustauschgrad ε_{FSCr} steigen, wie **Abbildung 62** zeigt. **Abbildung 62** wurde für Fluidtemperaturen von $\vartheta_F = 1300^\circ\text{C}$, für eine CO_2 -Konzentration $\text{CO}_2 = 9\%$ und für eine H_2O -Konzentration $\text{H}_2\text{O} = 19\%$ bei prozentualer Erhöhung des Crankabstands s_{Cr} errechnet.

Allerdings ist der Anstieg des Strahlungsaustauschgrades ε_{FSCr} gering: so wird z.B. durch eine Verdoppelung des Crankabstands s_{Cr} der Strahlungswärmeübergang nur um 37% erhöht. Die Produktionsleistung der Ofenanlage halbiert sich jedoch, so dass der spezifische Energieverbrauch trotz verbessertem Wärmeübergang stark wachsen wird.

Ein geringerer Crank-Abstand s_{Cr} kann zwar wegen der gesteigerten Beladedichte zu einem geringeren spezifischen Energiebedarf führen, aber es wachsen die Strömungswiderstände im Ofenkanal, woraus sich die bereits o.g. Nachteile ergeben.

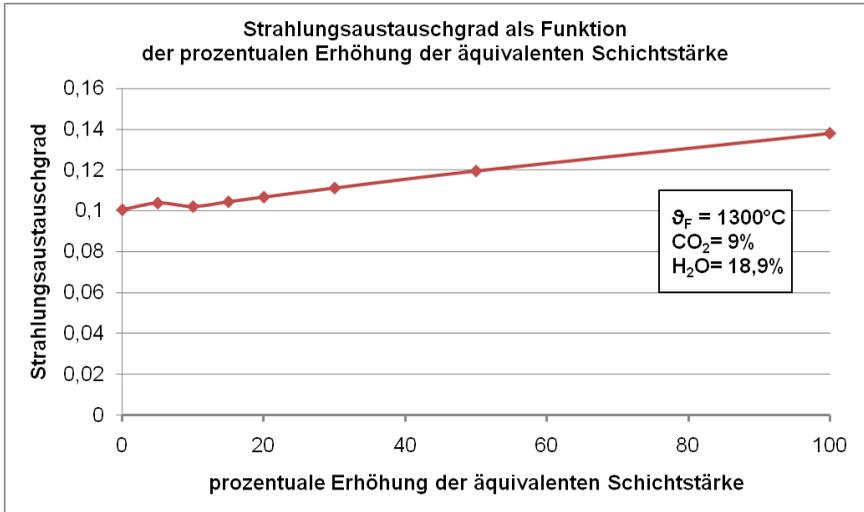


Abb. 62: Strahlungsaustauschgrad als Funktion der äquivalenten Schichtstärke

Eine Verringerung des spezifischen Energieverbrauchs ist durch die bisher diskutierten Maßnahmen möglich, erfolgversprechender sind Schritte, die zu einer Verringerung der Ballastmassen, z.B. Brennhilfs – und Transportmittel führen oder die Nutzung der Wärme aus der Kühlzone zur Verbrennungsluftvorwärmung ermöglichen.

Bei konventionellen Tunnelöfen für den Glattbrand von Porzellan, in denen noch mit SiC-Kapseln mit einem Ware- zu Brennhilfsmittelverhältnis von 1:8 gebrannt wurde, lagen die spezifischen Energieverbrauchswerte bei 34000 kJ/kg. Beim Schnellbrandprozess verwendet man Crankaufbauten, die im Vergleich zu den Kapseln nur ca. die halbe spezifische Ballastmasse aufweisen, so dass sich hauptsächlich dadurch der spezifische Energieverbrauchswert auf durchschnittlich 16000 kJ/kg verringert. Anzustreben sind noch leichtere Brennhilfsmittel.

Wenn man auf die Ballastmasse der Ofenwagen verzichtet, dann ist die Alternative der Rollenofen, und es reduziert sich dann noch einmal der spezifische Energieverbrauch auf ca. 10500 kJ/kg. Die Kostenersparnis bei diesem Anlagenkonzept wird jedoch eingeschränkt durch die hohen Preise und die beschränkte Lebensdauer der Rollen.

Das Energieeinsparpotential durch die Verwendung von vorgewärmter Luft aus der Kühlzone ist bekannt und wird seit mehr als zwanzig Jahren in Schnellbrandofenanlagen für den Glattbrand von Porzellan eingesetzt. Dabei wird die Verbrennungsluft durch quer zur Fahrtrichtung verlegte SiC-Rohre geführt, die in der Decke der Kühlzone installiert sind. Die intensive Festkörperstrahlung in diesem Bereich wird an die Rohre übertragen und von der Verbrennungsluft aufgenommen. Allerdings darf die Temperatur der Luft wegen der eingebauten Regelgeräte ca. 500°C nicht überschreiten.

Keine Temperaturbegrenzungen bei der Verbrennungsluft hat man mit einem Konzept, das in der Patentanmeldung WO 2009/089599 A1 [Hart] beschrieben ist. Hier wird mit einer Vielzahl von Injektorbrennern die heiße Luft direkt aus der Kühlzone angesaugt und zur Verbrennung verwendet. Die Dimensionierung des Injektors ist so gestaltet, dass das Gas-Luftverhältnis ohne regeltechnischen Eingriff eine optimale Verbrennung gestattet. Die Temperaturanpassung entsteht durch eine sich zyklisch ändernde Ein- und Ausschaltung der Gaszufuhr der Brenner.

Dieses Prinzip ist neu, aber bereits in Tunnelöfen zum Brennen von Sanitärkeramik eingesetzt und hat dort durch die direkte Verwendung der über 1000°C heißen Kühlluft als Verbrennungsluft Energieersparnisse von ca. 50 % bewirkt. Bevor dieses System jedoch für den Glattbrand von Porzellan gestartet werden kann, müssen Methoden zu sicheren Atmosphärenführung bei kontrollierter Verbrennung gefunden werden.

10. Berechnung von Schnellbrandöfen für den Glattbrand von Porzellan

Neben der guten Qualität der gebrannten Ware ist für den Betreiber aus Kostengründen ein möglichst niedriger spezifischer Energieverbrauch der Ofenanlage von großer Bedeutung, und der Anlagenhersteller muss hierzu Garantiewerte abgeben. Deshalb sind bereits in der Angebotsphase gründliche und exakte wärmetechnische Berechnungen der Ofenanlage notwendig.

In den folgenden Ausführungen wird der bisher vorgestellte Schnellbrandofen für den Glattbrand von Porzellan in seinen wichtigsten Funktionen genauer besehen, oberflächlich betrachtete Widersprüche geklärt und Alternativen zur Optimierung durch Berechnungen belegt. Es werden die in Tabelle 7 angegebenen Daten beibehalten und als Grundlage die Trendkurve 4 der Solidtemperatur für alle Berechnungen benutzt. Als wichtige Einstellungsalternativen werden am Ende gegenübergestellt:

{1} Anwendung der eingestellten Luftzahl der Brenner unter der Annahme eines Gegenstromwärmetauschers

{2} Anwendung der eingestellten Luftzahl der Brenner unter der Annahme eines Gegenstromwärmetauschers von der Reinigungszone bis zum Einlauf und eines Gleichstromwärmetauschers von der Reduktionszone bis zum Ende der Brennzone

3) Anwendung theoretischer Luftzahlen der Brenner unter der Annahme eines Gegenstromwärmetauschers

Die Berechnung des Energieverbrauchs der Ofenanlage basiert auf die Optimierung der Verbrennungsprozesse des eingesetzten Brennstoffes in Abhängigkeit von der für das Brenngut notwendigen Brenntemperatur und Atmosphäre im Ofenraum. Verbrennung ist die Reaktion der oxidierbaren Bestandteile des Brenngases mit dem Sauerstoff – in diesem Fall - aus der Luft. Als Luftzahl der Verbrennung λ_v bezeichnet man das

Verhältnis von zugeführtem und stöchiometrisch notwendigem Luftmassenstrom:

$$\lambda_V = \frac{\text{zugeführter Luftmassenstrom}}{\text{stöchiometrischer Luftmassenstrom}} \quad (10.1)$$

Der stöchiometrische Luftmassenstrom ist die Luftmenge, die zur theoretisch vollständigen Reaktion des Sauerstoffs mit dem Brennstoff notwendig ist.

Im Schnellbrandtunnelofen für den Glattbrand von Porzellan strömen in der Vorwärm- und Brennzone die Abgase nach geläufiger Vorstellung vom Ende der Brennzone im Gegenstrom zur Ware bis zur Absaugung am Ofeneinlauf. Sie durchqueren dabei Segmente mit oxidierenden und reduzierenden Brennereinstellungen. Der Abgasgemischstrom aus dem benachbarten Segment $\dot{V}_{mix,n+1}$ vermischt sich beim Eintritt in das zu berechnende Segment mit den Verbrennungsgasen der Brenner \dot{V}_{fV} und ggfls. mit den Eindüsungen \dot{V}_{inj} zu einem Gemisch $\dot{V}_{mix,}$, mit dem - bei vorhandenem Sauerstoff - eine „Sekundärverbrennung“ dann stattfindet, wenn gleichzeitig reduzierende Komponenten vorhanden sind. Die Komponenten werden am Segmentausgang mit den Indizes $_{mix2}$ versehen. Die unterschiedlichen Atmosphärensituationen, wie sie nacheinander vom Ende der Brennzone bis zum Ofeneinlauf auftreten, sind in **Tabelle 10** angegeben.

Der 1. Atmosphärenberechnungsabschnitt beginnt mit der Bestimmung der Mengen und Zusammensetzungen der Verbrennungsgase aus der Primärgasverbrennung der Brenner.

Es wird bei neutraler oder oxidierender Brennereinstellung $\lambda_V \geq 1$ berechnet:

- die Anzahl der C-Mole v_C , bestehend aus den im Brenngas enthaltenen Kohlenwasserstoffen, dem Kohlendioxid und dem Kohlenmonoxid

$$v_C = x_{CH_4,B} + \sum n * x_{(C_nH_m),B} + x_{CO_2,B} + x_{CO,B} \quad (10.2)$$

- die zugeführte Anzahl der H₂-Mole v_{H_2} , bestehend aus den im Brenngas enthaltenen Kohlenwasserstoffen, dem Wasserstoff und dem Wasserstoff in der Feuchte der Verbrennungsluft $x_{H_2O,L}$

$$v_{H_2} = 2x_{CH_4,B} + x_{H_2,B} + \sum \frac{m}{2} * x_{(C_nH_m),B} + x_{H_2O,L} * \lambda_V * L_{min} \quad (10.3)$$

- die zugeführte Anzahl der O₂- Mole:

$$v_{O_2} = x_{CO_2,B} + 0,5 * x_{CO,B} + (x_{O_2,L} + 0,5x_{H_2O,L}) * \lambda_V * L_{min} \quad (10.4)$$

- die zugeführte Anzahl der N₂- Mole:

$$v_{N_2} = x_{N_2,B} + x_{N_2,L} * \lambda_V * L_{min} \quad (10.5)$$

- der Sauerstoffüberschuss $v_{O_2,\ddot{u}b}$ aus:

$$v_{O_2,\ddot{u}b} = (\lambda_V - 1) * L_{min} * x_{O_2,L} \quad (10.6)$$

mit dem Sauerstoffgehalt der Luft $x_{O_2,L}$, der 0,21 beträgt

- der gesamten spezifischen Abgasanzahl v aus:

$$v = v_C + v_{H_2} + v_{N_2} + v_{O_2,\ddot{u}b} \quad (10.7)$$

Daraus erhält man die Abgaszusammensetzung der Primärgasverbrennung:

$$x_{CO_2} = \frac{v_C}{v} \quad (10.8)$$

$$x_{H_2O} = \frac{v_{H_2}}{v} \quad (10.9)$$

$$x_{O_2} = \frac{v_{O_2,\ddot{u}b}}{v} \quad (10.10)$$

$$x_{N_2} = \frac{v_{N_2}}{v} \quad (10.11)$$

Der Fluidstrom im Segment \dot{V}_{mix} setzt sich zusammen aus dem Volumenstrom aus dem – bei Gegenstrom in Strömungsrichtung gesehenen – davor gelegenen Segment $\dot{V}_{mix,n+1}$, dem Verbrennungsgas aus den Brennern \dot{V}_{fV} und dem Volumenstrom der Lufteindüsung \dot{V}_{Inj} .

$$\dot{V}_{mix} = \dot{V}_{mix,n+1} + \dot{V}_{fV} + \dot{V}_{Inj} \quad (10.12)$$

Hierin ist \dot{V}_{fV} der feuchte Verbrennungsgasvolumenstrom, der durch die Beziehung

$$\dot{V}_{fV} = v * \dot{V}_B \quad [\text{m}^3/\text{h}] \quad (10.13)$$

mit dem zugeführten Volumenstrom des Brennstoffes \dot{V}_B verknüpft ist. Die Berechnung der Zusammensetzung des Gemisches ist in Tabelle 10 angegeben.

Im 2. Atmosphärenberechnungsabschnitt wird mit unterstöchiomerischer Brennereinstellung $\lambda_V < 1$ gerechnet. Die Hauptströmung $\dot{V}_{mix,n+1}$ aus dem benachbarten Segment bringt mehr O_2 mit als zur Verbrennung der reduzierenden Anteile im Gemisch notwendig wäre, es ergibt sich im Gemisch ein Sauerstoffüberschuss $x_{\text{O}_2, \text{mix}, \text{Üb}}$.

Die Anzahl der im Primärgas zugeführten C-Mole v_C , H_2 -Mole v_{H_2} , N_2 -Mole v_{N_2} und O_2 -Mole v_{O_2} errechnet sich aus den Gleichungen (10.2) bis (10.5). Die gesamte spezifische Primärabgasanzahl v ergibt sich aus:

$$v = v_C + v_{\text{H}_2} + v_{\text{N}_2} \quad (10.14)$$

Die mit dem Brennstoff und der Verbrennungsluft zugeführten Mole von C, H_2 , O_2 und N_2 müssen der Molanzahl im abgeführten Verbrennungsgas entsprechen.

Mit dem Abgas werden die Mole der Komponenten

$$v_C = v * (x_{\text{CO}_2} + x_{\text{CO}}) \quad (10.15)$$

$$v_{H_2} = v * (x_{H_2O} + x_{H_2} + \frac{1}{2}x_{OH} + \frac{1}{2}x_{H_2O}) \quad (10.16)$$

$$v_{O_2} = v * (x_{O_2} + x_{CO_2} + \frac{1}{2}x_{CO} + \frac{1}{2}x_{H_2O} + \frac{1}{2}x_O + \frac{1}{2}x_{OH}) \quad (10.17)$$

$$v_{N_2} = v * x_{N_2} \quad (10.18)$$

abgeführt.

Durch Umformung der Gleichungen (10.15) – (10.18) erhält man die folgenden Abgaskonzentrationen:

$$x_{CO} = \frac{v_C - v * x_{CO_2}}{v} \quad (10.19)$$

$$x_{H_2O} = \frac{2 * v_{O_2} - v * x_{CO_2} - v_C}{v} \quad (10.20)$$

$$x_{H_2} = \frac{v * x_{CO_2} + v_C - 2 * v_{O_2} + v_{H_2}}{v} \quad (10.21)$$

$$x_{N_2} = \frac{v_{N_2}}{v} \quad (10.22)$$

Bei unterstöchiometrischer Verbrennung besteht das Verbrennungsabgas aus den Komponenten CO₂, CO, H₂O, H₂ und N₂, zu deren vollständiger Berechnung im Gleichungssystem (10.19) bis (10.22) noch die CO₂-Bestimmung fehlt. Da eine Verbrennungsreaktion nur bis zum Erreichen des Gleichgewichts abläuft, kann man die CO₂-Konzentration x_{CO_2} aus der Gleichgewichtsbeziehung der Wassergasreaktion herleiten. Sie wird durch das Massenwirkungsgesetz mit der temperaturabhängigen Gleichgewichtszahl K beschrieben:

$$K(T) = \exp\left(\frac{\Delta G}{R * T_{An}}\right) \quad (10.23)$$

Hierin sind ΔG die molare freie Enthalpie und R die allgemeine Gaskonstante. Die Temperaturabhängigkeit der freien Enthalpie ΔG kann durch die Beziehung

$$\frac{\Delta G}{\Delta G_0} = 1 + m \left[1 - \left(\frac{T_{An}}{T_0} \right)^n \right] \quad (10.24)$$

mit einem Fehler von $\pm 1\%$ angenähert werden.

Der Index $_0$ kennzeichnet den Wert bei der Standardtemperatur $T_0 = 298\text{ K}$. Dabei ist die Temperaturabhängigkeit der Gleichgewichtszahl K mit der zunächst angenommenen Gastemperatur T_{An} zu berücksichtigen. Sie wird für jedes Segment durch Iterationsrechnungen am Ende bestätigt.

Für die homogene Wassergasreaktion



sind $\Delta G_0 = -28600\text{ kJ/kmol}$, $m = 0,6564$ und $n = 0,7133$ durch Literaturwerte festgelegt, die allgemeine Gaskonstante R hat den Wert $R = 8,314\text{ kJ/kmol/K}$.

Die CO_2 -Konzentration lässt sich nun errechnen aus:

$$x_{CO_2} = -\frac{A}{2} + \left(\frac{A^2}{4} - B \right)^{1/2} \quad (10.26)$$

mit

$$A = \frac{v_C + v_{H_2} - 2 \cdot v_{O_2} \cdot (1-K)}{v \cdot (1-K)} \quad (10.27)$$

$$B = \frac{K \cdot v_C \cdot (v_C - 2v_{O_2})}{v^2 \cdot (1-K)} \quad (10.28)$$

Wenn reduzierende Brennerabgase sich mit einem oxidierenden Fluidstrom im Ofenraum mischen, dann werden die Reduktionskomponenten CO und H_2 sofort oxidiert. Der Sauerstoffbedarf des Gemisches $O_{V,mix,SG}$ errechnet sich aus:

$$O_{V,mix,SG} = (0,5 * x_{CO,mix,SG} + 0,5 * x_{H_2,mix,SG}) \quad (10.29)$$

Unter Berücksichtigung des im Gemisch vorhandenen Sauerstoffs $x_{O_2,mix,SG}$, der durch die Fluide aus dem benachbarten Segment zugeführt wurde, erhält man den Sauerstoffüberschuss $x_{O_2,mixSG,\ddot{u}b}$ aus:

$$x_{O_2,mixSG,\ddot{u}b} = x_{O_2,mixSG} - O_{V,mixSG} \quad (10.30)$$

Es findet eine vollständige Verbrennung der Komponenten CO und H₂ dieses Sekundärgasgemisches $\dot{V}_{mix,SG}$ unter der Bedingung statt:

$$x_{O_2,mixSG,\ddot{u}b} > O_{V,mix,SG} \quad (10.31)$$

Im 3. Atmosphärenberechnungsabschnitt wird wieder mit unterstöchiomerischer Brennereinstellung $\lambda_V < 1$ gerechnet. Die Hauptströmung $\dot{V}_{mix,n+1}$ aus dem benachbarten Segment bringt weniger O₂ mit als zur Verbrennung der reduzierenden Anteile im Gemisch notwendig ist:

$$x_{O_2,mixSG} * \dot{V}_{mix,SG} \leq O_{V,mix,SG} * \dot{V}_{mix,SG}$$

Es findet eine unterstöchiometrische Nachverbrennung des Gemisches statt.

Für die Berechnung der Komponenten des nachverbrannten Gemisches ist die Anzahl der zugeführten O₂-Mole $v_{O_2,mix}$ zu bestimmen aus:

$$v_{O_2,mix,SG} = x_{CO_2,mix,SG} + 0,5 * x_{CO,mix,SG} + x_{O_2,mix,SG} + 0,5 * x_{H_2O,mix,SG} \quad (10.32)$$

Die Gleichgewichtszahl K für das unterstöchiometrisch nachzuverbrennende Gemisch erhält man mit den Faktoren

$$A = \frac{v_{C,mix,SG} + v_{H_2,mix,SG} - 2*v_{O_2,mix,SG}*(1-K)}{v_{mix,SG}*(1-K)} \quad (10.33)$$

und

$$B = \frac{K*v_{C,mix,SG}*(v_{C,mix,SG} - 2*v_{O_2,mix,SG})}{v_{mix,SG}^2*(1-K)} \quad (10.34)$$

Im 4. Atmosphärenberechnungsabschnitt findet keine Sekundärverbrennung statt, weil die Primärgasverbrennung unter reduzierenden Bedingungen abläuft und kein O₂ aus dem benachbarten Segment einströmt.

Charakterisierende Bedingung:

$$\lambda_V < 1 \text{ und } x_{O_2,mix} = 0$$

Im 5. Atmosphärenberechnungsabschnitt sind die Brenner oxidierend eingestellt, aber es kommt zu einer reduzierenden Sekundärverbrennung, weil der Anteil der reduzierenden Komponenten aus dem benachbarten Segment so groß ist, dass der Sauerstoffbedarf $O_{V,mix,SG}$ zur vollständigen Verbrennung nicht ausreicht. Die Ofenatmosphäre bleibt reduzierend. Es gelten die Bedingungen:

$$\lambda_V > 1 \text{ und } O_{V,mix,SG} * \dot{V}_{mix,SG} > x_{O_2,mix,SG} * \dot{V}_{mix,SG}$$

Der Sauerstoffbedarf $O_{V,mix,SG}$ zur Verbrennung dieses Gemisches errechnet sich aus Gleichung (10.29), das Sauerstoffangebot $x_{O_2,mix,SG}$ entspricht dem Wert der Berechnung aus Gleichung (10.35).

$$x_{O_2,mix,SG} = \frac{x_{O_2,mix,n+1} * \dot{V}_{mix,n+1} + x_{O_2} * \dot{V}_{fV} + x_{O_2,Inj} * \dot{V}_{Inj}}{(\dot{V}_{mix,n+1} + \dot{V}_f + \dot{V}_{Inj} + x_{H_2O,L} * \dot{V}_{Inj})} \quad (10.35)$$

Auch im 6. Atmosphärenberechnungsabschnitt sind die Brenner oxidierend eingestellt. Die reduzierenden Verbrennungsgase $\dot{V}_{mix,n+1}$ aus dem benachbarten Segment

vermischen sich mit dem Brennerabgas \dot{V}_{fV} und ggfls. mit eingedüster Luft \dot{V}_{Inj} . Der Sauerstoffbedarf $O_{V,mix,SG} * \dot{V}_{mix,SG}$ zur Verbrennung der reduzierenden Komponenten ist kleiner als der O₂-Anteil des unverbrannten Gemisches $x_{O_2,mix,SG} * \dot{V}_{mix,SG}$. Die Ofenatmosphäre wird oxidierend.

Charakterisierende Bedingung:

$$\lambda_V \geq 1; \text{ und } x_{O_2,mix,SG} * \dot{V}_{mix,SG} \geq O_{V,mix,SG} * \dot{V}_{mix,SG}$$

Der Sauerstoffüberschuss errechnet sich aus der Differenz des Sauerstoffgehalts im Gemisch $x_{O_2,mix,SG}$ und des Sauerstoffbedarfs $O_{V,mix,SG}$ zur Verbrennung ihrer Reduktion, er entspricht der Überschussanzahl der O₂-Mole Gemisch:

$$x_{O_2,mix,SG,\ddot{u}b} = x_{O_2,mix,SG} - O_{V,mix,SG} = v_{O_2,mix,SG,\ddot{u}b} \quad (10.36)$$

Tabelle 10: Bestimmung der Ofenatmosphären

Ofenatmosphärensituation 1	
Prozessablauf	einströmende Oxidationsgase, oxidierende Primärverbrennung Vermischung ohne Nachverbrennung
Ofenatmosphäre	oxidierend
Bedingungen	$\lambda_V \geq 1$ Vermischung von $V_{IV}, V_{mix,n+1}, V_{inj}$; Sauerstoffüberschuss $x_{O_2,mix} > 0$ $x_{O_2,mix,üb} > 0, V_{mix}$
Primärgasverbrennung	v_C aus (10.2) v_{H_2} aus (10.3) v_{O_2} aus (10.4) v_{N_2} aus (10.5) $v_{O_2,üb}$ aus (10.6) v aus (10.7)
Abgaskonzentration des Primärgases	x_{CO_2} aus (10.8) x_{H_2O} aus (10.9) x_{O_2} aus (10.10) x_{N_2} aus (10.11)
Komponenten des Gemisches	$x_{CO_2, \text{gemisch}} = \frac{x_{CO_2, \text{mitgas}n+1} \cdot \dot{V}_{\text{mitgas}n+1} + x_{CO_2} \cdot \dot{V}_{fV}}{(\dot{V}_{\text{mitgas}n+1} + \dot{V}_{fV} + x_{H_2O, L} \cdot \dot{V}_{inj})}$ $x_{H_2O, \text{gemisch}} = \frac{x_{H_2O, \text{mitgas}n+1} \cdot \dot{V}_{\text{mitgas}n+1} + x_{H_2O} \cdot \dot{V}_{fV} + x_{H_2O, L} \cdot \dot{V}_{inj}}{(\dot{V}_{\text{mitgas}n+1} + \dot{V}_{fV} + x_{H_2O, L} \cdot \dot{V}_{inj})}$ $x_{O_2, \text{gemisch}} = \frac{x_{O_2, \text{mitgas}n+1} \cdot \dot{V}_{\text{mitgas}n+1} + x_{O_2} \cdot \dot{V}_{fV} + x_{O_2, inj} \cdot \dot{V}_{inj}}{(\dot{V}_{\text{mitgas}n+1} + \dot{V}_{fV} + x_{H_2O, L} \cdot \dot{V}_{inj})}$ $x_{N_2, \text{gemisch}} = \frac{x_{N_2, \text{mitgas}n+1} \cdot \dot{V}_{\text{mitgas}n+1} + x_{N_2} \cdot \dot{V}_{fV} + x_{N_2, inj} \cdot \dot{V}_{inj}}{(\dot{V}_{\text{mitgas}n+1} + \dot{V}_{fV} + x_{H_2O, L} \cdot \dot{V}_{inj})}$

Ofenatmosphärensituation 2	
Prozessablauf	einströmende Oxidationsgase, reduzierende Primärverbrennung, Vermischung und oxidierende Nachverbrennung
Ofenatmosphäre	oxidierend
Bedingungen	$\lambda_V < 1$ Sauerstoffüberschuss $x_{O_2, \text{mix}, \text{üb}} > 0$ $(10.30) > (10.29)$ $x_{O_2, \text{mix}, \text{üb}} > O_{V, \text{mix}}$ Vermischung von V_{IV} , $V_{\text{mix}, n+1}$
Primärgasverbrennung	v_C aus (10.2) v_{H_2} aus (10.3) v_{N_2} aus (10.5) v aus (10.14) ΔG aus (10.24) K aus (10.23) A aus (10.27) B aus (10.28)
Abgaskonzentration des Primärgases	x_{CO_2} aus (10.26) x_{CO} aus (10.19) x_{H_2O} aus (10.20) x_{H_2} aus (10.21) x_{N_2} aus (10.22)
Komponenten des Gemisches	$x_{CO_2, \text{mix}, SG} = \frac{x_{CO_2, \text{mix}, n+1} * \dot{V}_{\text{mix}, n+1} + x_{CO_2} * \dot{V}_{fV}}{(\dot{V}_{\text{mix}, n+1} + \dot{V}_{fV})}$ $x_{CO, \text{mix}, SG} = \frac{x_{CO, \text{mix}, n+1} * \dot{V}_{G, \text{mix}, n+1} + x_{CO} * \dot{V}_{fV}}{(\dot{V}_{\text{mix}, n+1} + \dot{V}_{fV})}$ $x_{H_2O, \text{mix}, SG} = \frac{x_{H_2O, \text{mix}, n+1} * \dot{V}_{\text{mix}, n+1} + x_{H_2O} * \dot{V}_{fV}}{(\dot{V}_{\text{mix}, n+1} + \dot{V}_{fV})}$ $x_{H_2, \text{mix}, SG} = \frac{x_{H_2, \text{mix}, n+1} * \dot{V}_{\text{mix}, n+1} + x_{H_2} * \dot{V}_{fV}}{(\dot{V}_{\text{mix}, n+1} + \dot{V}_{fV})}$ $x_{O_2, \text{mix}, SG} = \frac{x_{O_2, \text{mix}, n+1} * \dot{V}_{\text{mix}, n+1} + x_{O_2} * \dot{V}_{fV}}{(\dot{V}_{\text{mix}, n+1} + \dot{V}_{fV})}$ $x_{N_2, \text{mix}, SG} = \frac{x_{N_2, \text{mix}, n+1} * \dot{V}_{\text{mix}, n+1} + x_{N_2} * \dot{V}_{fV}}{(\dot{V}_{\text{mix}, n+1} + \dot{V}_{fV})}$

Ofenatmosphärensituation 2	
Molmengen des Gemisches	$v_{C,mix,SG} = x_{CO_2,mix,SG} + x_{CO,mix,SG}$ $v_{H_2,mix,SG} = x_{H_2,mix,SG} + x_{H_2O,mix,SG}$ $v_{N_2,mix,SG} = x_{N_2,mix,SG}$ $v_{O_2,mix,SG,Üb} = x_{O_2,mix,SG,Üb}$ $v_{mix,SG} = v_{C,mix,SG} + v_{H_2,mix,SG} + v_{O_2,mix,SG,Üb} + v_{N_2,mix,SG}$
Zusammensetzung des nachverbrannten Gemisches	$x_{CO_2,mix2} = \frac{v_{C,mix,SG}}{v_{mix,SG}}$ $x_{H_2O,mix2} = \frac{v_{H_2,mix,SG}}{v_{mix,SG}}$ $x_{N_2,mix2} = \frac{v_{N_2,mix,SG}}{v_{mix,SG}}$ $x_{O_2,mix2} = \frac{v_{O_2,mix,SG,Üb}}{v_{mix,SG}}$

Ofenatmosphärensituation 3	
Prozessablauf	einströmende Oxidationsgase, reduzierende Primärverbrennung, Vermischung mit unterstöchiometrischer Nachverbrennung
Ofenatmosphäre	reduzierend
Bedingungen	$\lambda_V < 1$ Vermischung von V_{IV} , $V_{mix,n+1}$ geringe O_2 -Konz. aus benachbartem Segment $O_{V,mixSG} > x_{O_2,mixSG}$ unterstöchiometrische Sekundärverbrennung
Primärgasverbrennung	v_C aus (10.2) v_{H_2} aus (10.3) v_{N_2} aus (10.5) v aus (10.14) ΔG aus (10.24) K aus (10.23) A aus (10.27) B aus (10.28)

Ofenatmosphärensituation 3	
Abgaskonzentration des Primärgases	x_{CO_2} aus (10.26) x_{CO} aus (10.19) x_{H_2O} aus (10.20) x_{H_2} aus (10.21) x_{N_2} aus (10.22)
Komponenten des Gemisches	$x_{CO_2,mix,SG} = \frac{x_{CO_2,mix,n+1} * \dot{V}_{mix,n+1} + x_{CO_2} * \dot{V}_{fV}}{(\dot{V}_{mix,n+1} + \dot{V}_{fV})}$ $x_{CO,mix,SG} = \frac{x_{CO,mix,n+1} * \dot{V}_{Gmix,n+1} + x_{CO} * \dot{V}_{fV}}{(\dot{V}_{mix,n+1} + \dot{V}_{fV})}$ $x_{H_2O,mix,SG} = \frac{x_{H_2O,mix,n+1} * \dot{V}_{mix,n+1} + x_{H_2O} * \dot{V}_{fV}}{(\dot{V}_{mix,n+1} + \dot{V}_{fV})}$ $x_{H_2,mix,SG} = \frac{x_{H_2,mix,n+1} * \dot{V}_{mix,n+1} + x_{H_2} * \dot{V}_{fV}}{(\dot{V}_{mix,n+1} + \dot{V}_{fV})}$ $x_{O_2,mix,SG} = \frac{x_{O_2,mix,n+1} * \dot{V}_{mix,n+1} + x_{O_2} * \dot{V}_{fV}}{(\dot{V}_{mix,n+1} + \dot{V}_{fV})}$ $x_{N_2,mix,SG} = \frac{x_{N_2,mix,n+1} * \dot{V}_{mix,n+1} + x_{N_2} * \dot{V}_{fV}}{(\dot{V}_{mix,n+1} + \dot{V}_{fV})}$
Molmengen des Gemisches	$v_{C,mix,SG} = x_{CO_2,mix,SG} + x_{CO,mix,SG}$ $v_{H_2,mix,SG} = x_{H_2,mix,SG} + x_{H_2O,mix,SG}$ $v_{N_2,mix,SG} = x_{N_2,mix,SG}$ $v_{O_2,mix,SG} \quad \text{aus (10.32)}$ $v_{mix,SG} = v_{C,mix,SG} + v_{H_2,mix,SG} + v_{O_2,mix,SG,Üb} + v_{N_2,mix,SG}$
Nachverbrennung bei Sauerstoffmangel	ΔG aus (10.24) K aus (10.23) A aus (10.33) B aus (10.34)
Zusammensetzung des nachverbrannten Gemisches	$x_{CO_2} \text{ aus (10.26)}$ $x_{CO,SG} = \frac{v_{C,mix,SG} - v_{mix,SG} * x_{CO_2,mix,SG}}{v_{mix,SG}}$ $x_{H_2O,SG} = \frac{2 * v_{O_2,mix,SG} - v_{mix,SG} * x_{CO_2,mix,SG} - v_{C,mix,SG}}{v_{mix,SG}}$ $x_{H_2,SG} = \frac{v_{mix,SG} * x_{CO_2,mix,SG} + v_{C,mix,SG} - 2 * v_{O_2,mix,SG} + v_{H_2,mix,SG}}{v_{mix,SG}}$ $x_{N_2,SG} = \frac{v_{N_2,mix,SG}}{v_{mix,SG}}$

Ofenatmosphärensituation 4	
Prozessablauf	einströmende Reduktionsgase, reduzierende Primärverbrennung, Vermischung ohne Nachverbrennung
Ofenatmosphäre	reduzierend
Bedingungen	$\lambda_M < 1$ $x_{O_2, \text{mix}} = 0$ $x_{O_2, \text{mix}, n+1} = 0$
Primärgasverbrennung	v_C aus (10.2) v_{H_2} aus (10.3) v_{N_2} aus (10.5) v aus (10.14) ΔG aus (10.24) K aus (10.23) A aus (10.27) B aus (10.28)
Abgaskonzentration des Primärgases	x_{CO_2} aus (10.26) x_{CO} aus (10.19) x_{H_2O} aus (10.20) x_{H_2} aus (10.21) x_{N_2} aus (10.22)
Komponenten des Gemisches	$x_{CO_2, \text{mix}, SG} = \frac{x_{CO_2, \text{mix}, n+1} * \dot{V}_{\text{mix}, n+1} + x_{CO_2} * \dot{V}_{fV}}{(\dot{V}_{\text{mix}, n+1} + \dot{V}_{fV})}$ $x_{CO, \text{mix}, SG} = \frac{x_{CO, \text{mix}, n+1} * \dot{V}_{G, \text{mix}, n+1} + x_{CO} * \dot{V}_{fV}}{(\dot{V}_{\text{mix}, n+1} + \dot{V}_{fV})}$ $x_{H_2O, \text{mix}, SG} = \frac{x_{H_2O, \text{mix}, n+1} * \dot{V}_{\text{mix}, n+1} + x_{H_2O} * \dot{V}_{fV}}{(\dot{V}_{\text{mix}, n+1} + \dot{V}_{fV})}$ $x_{H_2, \text{mix}, SG} = \frac{x_{H_2, \text{mix}, n+1} * \dot{V}_{\text{mix}, n+1} + x_{H_2} * \dot{V}_{fV}}{(\dot{V}_{\text{mix}, n+1} + \dot{V}_{fV})}$ $x_{N_2, \text{mix}, SG} = \frac{x_{N_2, \text{mix}, n+1} * \dot{V}_{\text{mix}, n+1} + x_{N_2} * \dot{V}_{fV}}{(\dot{V}_{\text{mix}, n+1} + \dot{V}_{fV})}$

Ofenatmosphärensituation 5	
Prozessablauf	einstömrende Reduktionsgase, oxidierende Primärverbrennung, Vermischung mit unterstöchiometrischer Nachverbrennung
Ofenatmosphäre	reduzierend
Bedingungen	$\lambda_V \geq 1$ $O_{V,mix,SG} * \dot{V}_{mix,SG} > x_{O_2,mix,SG} * \dot{V}_{mix,SG}$
Primärgasverbrennung	v_C aus (10.2) v_{H_2} aus (10.3) v_{O_2} aus 10.4 v_{N_2} aus (10.5) $v_{O_2,üb}$ aus 10.4 v aus (10.7)
Abgaskonzentration des Primärgases	x_{CO_2} aus (10.8) x_{H_2O} aus (10.9) x_{CO} aus (10.10) x_{N_2} aus (10.11)
Komponenten des Gemisches	$x_{CO_2,mix,SG} = \frac{x_{CO_2,mix,n+1} * \dot{V}_{mix,n+1} + x_{CO_2} * \dot{V}_{fV}}{(\dot{V}_{mix,n+1} + \dot{V}_{fV} + \dot{V}_{Inj} + x_{H_2O,L} * \dot{V}_{Inj})}$ $x_{CO,mix,SG} = \frac{x_{CO,mix,n+1} * \dot{V}_{mix,n+1} + x_{CO} * \dot{V}_{fV}}{(\dot{V}_{mix,n+1} + \dot{V}_{fV} + \dot{V}_{Inj} + x_{H_2O,L} * \dot{V}_{Inj})}$ $x_{H_2O,mix,SG} = \frac{x_{H_2O,mix,n+1} * \dot{V}_{mix,n+1} + x_{H_2O} * \dot{V}_{fV} + x_{H_2O,L} * \dot{V}_{Inj}}{(\dot{V}_{mix,n+1} + \dot{V}_{fV} + \dot{V}_{Inj} + x_{H_2O,L} * \dot{V}_{Inj})}$ $x_{H_2,mix,SG} = \frac{x_{H_2,mix,n+1} * \dot{V}_{mix,n+1} + x_{H_2} * \dot{V}_{fV}}{(\dot{V}_{mix,n+1} + \dot{V}_{Inj} + \dot{V}_f + x_{H_2O,L} * \dot{V}_{Inj})}$ $x_{O_2,mix,SG} = \frac{x_{O_2,mix,n+1} * \dot{V}_{mix,n+1} + x_{O_2} * \dot{V}_{fV} + x_{O_2,Inj} * \dot{V}_{Inj}}{(\dot{V}_{mix,n+1} + \dot{V}_f + \dot{V}_{Inj} + x_{H_2O,L} * \dot{V}_{Inj})}$ $x_{N_2,mix,SG} = \frac{x_{N_2,mix,n+1} * \dot{V}_{mix,n+1} + x_{N_2} * \dot{V}_{fV} + x_{N_2,Inj} * \dot{V}_{Inj}}{(\dot{V}_{mix,n+1} + \dot{V}_f + \dot{V}_{Inj} + x_{H_2O,L} * \dot{V}_{Inj})}$

Ofenatmosphärensituation 5	
Molmengen des Gemisches	$v_{C,mix,SG} = x_{CO_2,mix,SG} + x_{CO,mix,SG}$ $v_{H_2,mix,SG} = x_{H_2,mix,SG} + x_{H_2O,mix,SG}$ $v_{N_2,mix,SG} = x_{N_2,mix,SG}$ <p style="text-align: center;">aus 10.36</p> $v_{mix,SG} = v_{C,mix,SG} + v_{H_2,mix,SG} + v_{O_2,mix,SG,üb} + v_{N_2,mix,SG}$
Nachverbrennung bei Sauerstoffmangel	ΔG aus (10.24) K aus (10.23) A aus (10.33) B aus (10.34)
Zusammensetzung des nachverbrannten Gemisches	$x_{CO_2} \text{ aus (10.26)}$ $x_{CO,SG} = \frac{v_{C,mix,SG} - v_{mix,SG} * x_{CO_2,mix,SG}}{v_{mix,SG}}$ $x_{H_2O,SG} = \frac{2 * v_{O_2,mix,SG} - v_{mix,SG} * x_{CO_2,mix,SG} - v_{C,mix,SG}}{v_{mix,SG}}$ $x_{H_2,SG} = \frac{v_{mix,SG} * x_{CO_2,mix,SG} + v_{C,mix,SG} - 2 * v_{O_2,mix,SG} + v_{H_2,mix,SG}}{v_{mix,SG}}$ $x_{N_2,SG} = \frac{v_{N_2,mix,SG}}{v_{mix,SG}}$

Ofenatmosphärensituation 6	
Prozessablauf	einströmende Reduktionsgase,
Ofenatmosphäre	oxidierend
Bedingungen	$\lambda_V \geq 1$ $x_{O_2,mix,SG} * \dot{V}_{mix,SG} \geq O_{V,mix,SG} * \dot{V}_{mix,SG}$
Primärgasverbrennung	v_C aus (10.2) v_{H_2} aus (10.3) v_{O_2} aus 10.4 v_{N_2} aus (10.5) $v_{O_2,üb}$ aus 10.4 v aus (10.7)
Abgaskonzentration des Primärgases	x_{CO_2} aus (10.8) x_{H_2O} aus (10.9) x_{O_2} aus (10.10) x_{N_2} aus (10.11)
Komponenten des Gemisches	$x_{CO_2,mix,SG} = \frac{x_{CO_2,mix,n+1} * \dot{V}_{mix,n+1} + x_{CO_2} * \dot{V}_{fV}}{(\dot{V}_{mix,n+1} + \dot{V}_{fV} + \dot{V}_{Inj} + x_{H_2O,L} * \dot{V}_{Inj})}$ $x_{CO,mix,SG} = \frac{x_{CO,mix,n+1} * \dot{V}_{mix,n+1} + x_{CO} * \dot{V}_{fV}}{(\dot{V}_{mix,n+1} + \dot{V}_{fV} + \dot{V}_{Inj} + x_{H_2O,L} * \dot{V}_{Inj})}$ $x_{H_2O,mix,SG} = \frac{x_{H_2O,mix,n+1} * \dot{V}_{mix,n+1} + x_{H_2O} * \dot{V}_{fV} + x_{H_2O,L} * \dot{V}_{Inj}}{(\dot{V}_{mix,n+1} + \dot{V}_{fV} + \dot{V}_{Inj} + x_{H_2O,L} * \dot{V}_{Inj})}$ $x_{H_2,mix,SG} = \frac{x_{H_2,mix,n+1} * \dot{V}_{mix,n+1} + x_{H_2} * \dot{V}_{fV}}{(\dot{V}_{mix,n+1} + \dot{V}_{Inj} + \dot{V}_f + x_{H_2O,L} * \dot{V}_{Inj})}$ $x_{O_2,mix,SG} = \frac{x_{O_2,mix,n+1} * \dot{V}_{mix,n+1} + x_{O_2} * \dot{V}_{fV} + x_{O_2,Inj} * \dot{V}_{Inj}}{(\dot{V}_{mix,n+1} + \dot{V}_f + \dot{V}_{Inj} + x_{H_2O,L} * \dot{V}_{Inj})}$ $x_{N_2,mix,SG} = \frac{x_{N_2,mix,n+1} * \dot{V}_{mix,n+1} + x_{N_2} * \dot{V}_{fV} + x_{N_2,Inj} * \dot{V}_{Inj}}{(\dot{V}_{mix,n+1} + \dot{V}_f + \dot{V}_{Inj} + x_{H_2O,L} * \dot{V}_{Inj})}$

Ofenatmosphärensituation 6

<p>Molmengen des Gemisches</p>	$v_{C,mix,SG} = x_{CO_2,mix,SG} + x_{CO,mix,SG}$ $v_{H_2,mix,SG} = x_{H_2,mix,SG} + x_{H_2O,mix,SG}$ $v_{N_2,mix,SG} = x_{N_2,mix,SG}$ <p style="text-align: center;">$x_{O_2,mix,SG}$ aus (10.36)</p> $v_{mix,SG} = v_{C,mix,SG} + v_{H_2,mix,SG} + v_{O_2,mix,SG,Üb} + v_{N_2,mix,SG}$
<p>Zusammensetzung des nachverbrannten Gemisches</p>	$x_{CO_2,mix2} = \frac{v_{C,mix,SG}}{v_{mix,SG}}$ $x_{H_2O,mix2} = \frac{v_{H_2,mix,SG}}{v_{mix,SG}}$ $x_{N_2,mix2} = \frac{v_{N_2,mix,SG}}{v_{mix,SG}}$ $x_{O_2,mix2} = \frac{v_{O_2,mix,SG,Üb}}{v_{mix,SG}}$

Ofenatmosphärensituation 7 (wie 1)	
Prozessablauf	einströmende Oxidationsgase, oxidierende Primärverbrennung, Vermischung ohne Nachverbrennung
Ofenatmosphäre	oxidierend
Bedingungen	$\lambda_V \geq 1$ Vermischung von V_{fV} , $V_{mix,n+1}$, V_{inj} Sauerstoffüberschuss $x_{O_2,mix,üb} > 0$ $x_{O_2,mix,üb} > O_{V,mix}$
Primärgasverbrennung	v_C aus (10.2) v_{H_2} aus (10.3) v_{O_2} aus (10.4) v_{N_2} aus (10.5) $v_{O_2,üb}$ aus (10.6) v aus (10.7)
Abgaskonzentration des Primärgases	x_{CO_2} aus (10.8) x_{H_2O} aus (10.9) x_{O_2} aus (10.10) x_{N_2} aus (10.11)
Komponenten des Gemisches	$x_{CO_2,mix} = \frac{x_{CO_2,mix,n+1} * \dot{V}_{mix,n+1} + x_{CO_2} * \dot{V}_{fV}}{(\dot{V}_{mix,n+1} + \dot{V}_{fV} + x_{H_2O,L} * \dot{V}_{inj})}$ $x_{H_2O,mix} = \frac{x_{H_2O,mix,n+1} * \dot{V}_{mix,n+1} + x_{H_2O} * \dot{V}_{fV} + x_{H_2O,L} * \dot{V}_{inj}}{(\dot{V}_{mix,n+1} + \dot{V}_{fV} + x_{H_2O,L} * \dot{V}_{inj})}$ $x_{O_2,mix} = \frac{x_{O_2,mix,n+1} * \dot{V}_{mix,n+1} + x_{O_2} * \dot{V}_{fV} + x_{O_2,inj} * \dot{V}_{inj}}{(\dot{V}_{mix,n+1} + \dot{V}_{fV} + x_{H_2O,L} * \dot{V}_{inj})}$ $x_{N_2,mix} = \frac{x_{N_2,mix,n+1} * \dot{V}_{mix,n+1} + x_{N_2} * \dot{V}_{fV} + x_{N_2,inj} * \dot{V}_{inj}}{(\dot{V}_{mix,n+1} + \dot{V}_{fV} + x_{H_2O,L} * \dot{V}_{inj})}$

Ofenatmosphärensituation 8	
Prozessablauf	einströmende Oxidationsgase, keine Verbrennung, Vermischung mit Lufteindüsen
Ofenatmosphäre	oxidierend
Bedingungen	Vermischung von $V_{mix,n+1}$, V_{inj} Sauerstoffüberschuss $x_{O_2,mix,ab} > 0$
Komponenten des Gemisches	$x_{CO_2,mix2} = \frac{x_{CO_2,mix,n+1} * \dot{V}_{mix,n+1}}{(\dot{V}_{mix,n+1} + \dot{V}_{inj} + x_{H_2O,L} * \dot{V}_{inj})}$ $x_{H_2O,mix2} = \frac{x_{H_2O,mix,n+1} * \dot{V}_{mix,n+1} + x_{H_2O,L} * \dot{V}_{inj}}{(\dot{V}_{mix,n+1} + \dot{V}_{inj} + x_{H_2O,L} * \dot{V}_{inj})}$ $x_{N_2,mix2} = \frac{x_{N_2,mix,n+1} * \dot{V}_{mix,n+1} + x_{N_2,inj} * \dot{V}_{inj}}{(\dot{V}_{mix,n+1} + \dot{V}_{inj} + x_{H_2O,L} * \dot{V}_{inj})}$ $x_{O_2,mix2} = \frac{x_{O_2,mix,n+1} * \dot{V}_{mix,n+1} + x_{O_2,inj} * \dot{V}_{inj}}{(\dot{V}_{mix,n+1} + \dot{V}_{inj} + x_{H_2O,L} * \dot{V}_{inj})}$

10.1 Bilanzierung von Energie und Massenströmen zur Berechnung des Energieverbrauchs

Als Ergebnis dieser Berechnungen wird erwartet:

- Angaben über die effektiven Wärmeübergangskoeffizienten,
- Daten über den Verlauf der Fluidtemperatur $\bar{\vartheta}_F$,
- Aussagen über den Brennstoffbedarf jedes einzelnen Brenners \dot{M}_B ,
- Der Energiebedarf der Ofenanlage \dot{Q}_B .

Gewöhnlich sind aus den Vorgaben berechnet und bekannt:

- die Außenabmessungen der Ofenanlage, d.h. Ofenlänge l_{Of} , Gehäusebreite b_{Of} , Gehäusehöhe h_{Of} ,
- die Nutzbreite b_N ,
- die Nutzhöhe h_N ,
- die Ofenkapazität N_{Of} ,
- die Ofendurchlaufzeit Dl_z ,
- die Beladedichte und Brennhilfsmittelanteil,
- die Emissionsgrade von Brenngut ε_S und Brennhilfsmittel ε_{Cr} .
- die Brennstoffdaten:
 - Normdichte $\rho_{B,n}$,
 - Heizwert h_u ,
 - Mindestluftbedarf L_{\min} ,
 - Luftzahl der Verbrennung λ_v ,
 - spez. Wärmekapazität des Brennstoffs c_{pB} ,
 - spez. Wärmekapazität der Verbrennungsluft $c_{p,air}$.

Im Allgemeinen kann der Temperaturverlauf des Solids ϑ_s aus Materialuntersuchungen und/oder durch Angaben des Betreibers als bekannt vorausgesetzt werden. Bei den folgenden Berechnungen wird die gemessene Solidtemperaturkurve 4 in Abb. 59 übernommen.

Zur Berechnung trennt man die Kühlzone von der Brenn- und Vorwärmzone, unterteilt die letzteren in kurze Segmente, z.B. 1 m, und stellt dann für jedes Segment Energiebilanzen nach dem Schema in **Abb. 63** auf.

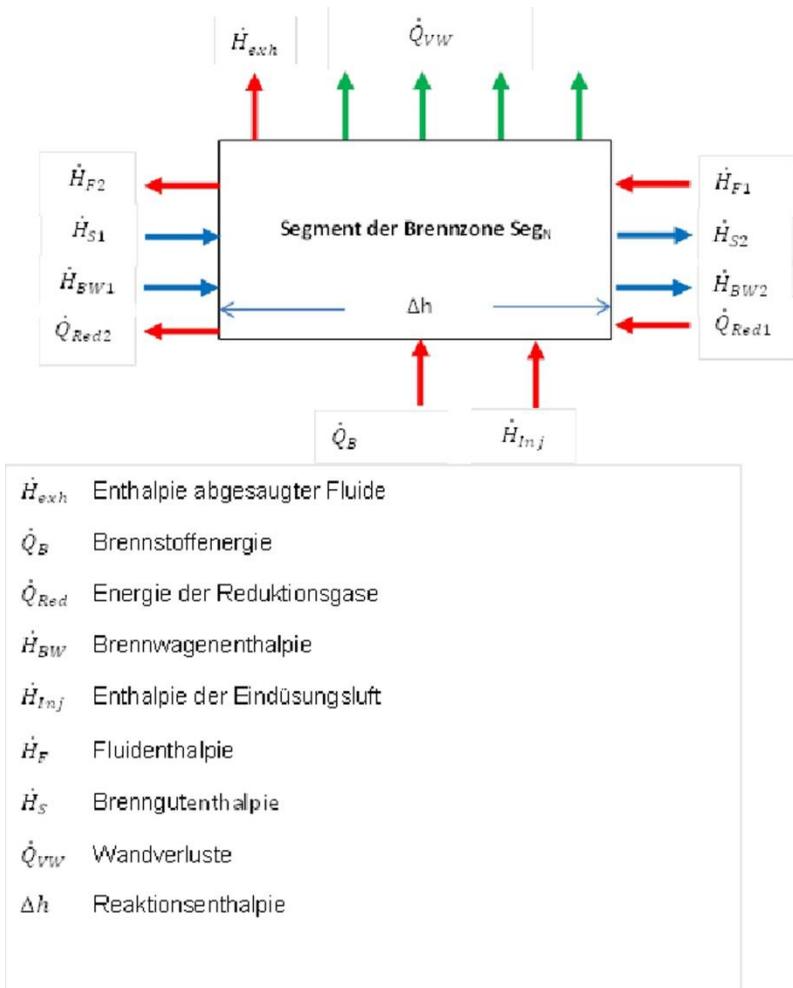


Abb. 63: Energiebilanzschema eines Brennzonensegments

Man beginnt mit dem letzten Segment der Brennzone, weil beim Porzellanlattbrand an dieser Systemgrenze keine Fluide weder aus der Kühlzone noch in sie strömen sollten, so dass die Unbekannte $\dot{H}_{F,1} = 0$ nicht berücksichtigt werden muss. Die

weiteren Segmentberechnungen werden mit der Fluidströmung in Richtung Ofeneinfahrt durchgeführt. Die Bedingungen am Ende eines Segments sind gleichzeitig die Startbedingungen für das folgende Berechnungssegment.

Um die temperaturabhängigen Stoffwerte zu bestimmen, wird zunächst eine mittlere Fluidtemperatur T_{An} angenommen.

Die Bilanzgleichung für ein Tunnelofensegment lautet:

$$\begin{aligned} & \dot{Q}_B + \dot{Q}_{Red1} + \dot{H}_{S1+Bh,1} + \dot{H}_{BW,1} + \dot{H}_{F,1} + \dot{H}_{Inj} \\ = & \dot{Q}_{Red2} + \dot{H}_{S2+Bh,2} + \dot{H}_{BW,2} + \dot{H}_{F,2} + \Delta h_R + \dot{H}_{exh} + \dot{Q}_{VW} \end{aligned} \quad (10.38)$$

Mit dem Index 1 bzw. 2 wird in dieser Bilanzgleichung die Eingangs- bzw. Ausgangssituation beschrieben. Die zuzuführende Energie \dot{Q}_B steht im Bilanzgleichgewicht mit der Enthalpie abgesaugter Gase \dot{H}_{Abs} , den Wandverlusten \dot{Q}_{VW} , den Enthalpieänderungen von Brenngut und Brennhilfsmittel $\Delta\dot{H}_{S+Bh}$, den Enthalpieänderungen der Brennwagen $\Delta\dot{H}_{BW}$, der Differenz der Energie unverbrannter Verbrennungsgase $\Delta\dot{Q}_{Red}$ und der Reaktionsenthalpie des Brennguts Δh_R .

Der Glühbrand der Ware wurde bei 1050°C durchgeführt; so dass die Mullitbildung im Scherben, die einen spezifischen Energiebedarf von 51J/g bei 1050°C erfordert, bereits im Glühbrandprozess abgeschlossen sein sollte und deshalb nur durch den Schnellbrand bedingte Zeitpunktsverschiebungen die Reaktionsenthalpien Δh_R während des Glattbrandes zu beachten sind [SchZ]. Wegen der im Vergleich zu konventionellen Tunnelofenanlagen kurzen Brennzeit müssen die Enthalpieänderungen der Brennwagen $\Delta\dot{H}_{BW}$ unter den Bedingungen der instationären Wärmeleitung mit dem Sonderprogramm SIMU-THERM 7.1 getrennt bestimmt werden.

10.1.1 Enthalpieänderung der Brennwagenisolation

Die Isolation der Brennwagen besteht aus mehreren Schichten verschiedener Feuerfestmaterialien. Die Struktur im zentralen Bereich unterscheidet sich von den Feuerfestqualitäten der Brennwagenränder, wobei die Seitenränder nochmals wegen ihres verschiedenen Aufbaus getrennt von den stirnseitigen Rändern betrachtet werden müssen.

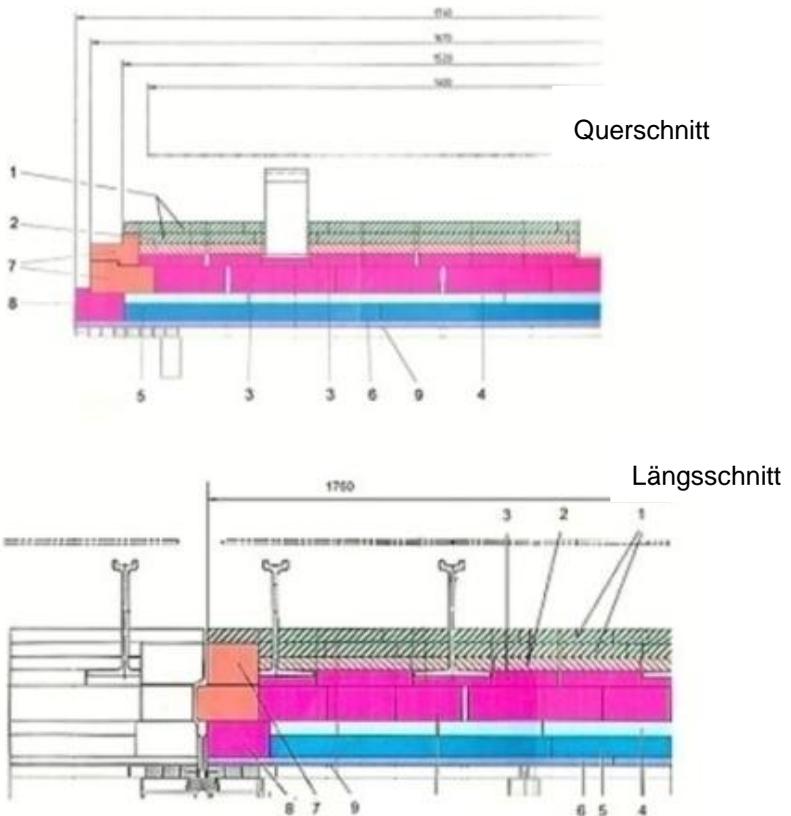


Abb.64: Brennwagenisolation im Quer- und Längsschnitt [Bec7]

Abb. 64 [Bec7] zeigt im Quer- und Längsschnitt die Brennwagenisolation. Die unterschiedlichen Qualitäten sind farbig herausgestellt. Die jeweilige Qualitätsbezeichnung der Isolationsschichten wird aus Gründen des Herstellerschutzes nicht genannt, stattdessen sind die Feuerfestmaterialien mit geometrischen und physikalischen Daten in **Tabelle 11** nummeriert.

Die Brennwagenoberflächentemperatur im Ofeninnenraum wurde nicht gemessen. Da Deckenspalt und Flammenspülraum (Bereich zwischen Wagenoberfläche und Brenndecke) ca. gleiche geometrische Abmessungen haben, die Ofendecke und die Wagenoberfläche aus Hochtemperaturwolle mit identischen Emissionszahlen bestehen und sowohl im Deckenspalt als auch im Flammenspülraum die Brenner mit jeweils gleicher Leistung feuern, kann der Temperaturverlauf im Flammenspülraum auch von den gemessenen Temperaturwerten des Thermoelements der Mess-stelle 1 im Deckenspalt übernommen werden (vgl. Messstelle 1 in Abb. 59).

Der transiente Temperaturverlauf im Wagencenter, in beiden Seitenrändern und in den stirnseitigen Rändern ist zur besseren Übersicht nicht bei jedem Ofenmeter, sondern während des Brennwagenumlaufs zu Zeitpunkten berechnet worden, zwischen denen ein annähernd linearer Temperaturverlauf der Temperaturwerte der Messstelle 1 festgelegt werden kann.

Tabelle 11: Isolation der Ofenwagen

Ort und Fläche	Isolationsschicht	Art des Feuerfestmaterials	Dichte [kg/m ³]	Anwendungsgrenztemperatur [°C]	Schichtstärke [mm]	Wärmeleitfähigkeit als Funktion der abs. Temperatur [W/m ² /K]
Brennwagenkern, Fläche 2,20 m ²	1	Hochtemperaturwolle	160	1430	50	$\lambda_1 = -0,01481 + 5,675 \cdot 10^{-5} \cdot T + 1,25 \cdot 10^{-7} \cdot T^2$
	2	Hochtemperaturwolle	128	1430	25	$\lambda_2 = 0,00005 \cdot T - 0,2707$
	3	Feuerleichtstein	780	1430	94	$\lambda_3 = 0,20269 + 0,0001 \cdot T$
	4	Kalziumsilikat-Isolierplatte	260	1100	25	$\lambda_4 = 6 \cdot 10^{-8} \cdot T^2 + 2 \cdot 10^{-5} \cdot T + 0,0983$
	5	Kalziumsilikat-Isolierplatte	225	1000	40	$\lambda_5 = 1 \cdot 10^{-4} \cdot T + 0,0327$
	6	Wärmedämmplatte	275	1000	15	$\lambda_6 = 6 \cdot 10^{-8} \cdot T^2 + 0,000125 \cdot T + 0,0425$
	9	Isolierkarton	290	1000	3	$\lambda_9 = 0,07938 - 1,4616 \cdot 10^{-4} \cdot T + 1,98485 \cdot 10^{-7} \cdot T^2$
	1	Hochtemperaturwolle	160	1430	25	$\lambda_1 = -0,01481 + 5,675 \cdot 10^{-5} \cdot T + 1,25 \cdot 10^{-7} \cdot T^2$
	7	Feuerleichtstein	880	1540	145	$\lambda_7 = 0,32048 - 3,16438E-5 \cdot T + 6,25E-8 \cdot T^2$
stirnseitiger Rand, Fläche 0,347 m ²	8	Feuerleichtstein	780	1430	64	$\lambda_8 = 0,20269 + 0,0001 \cdot T$
	6	Wärmedämmplatte	275	1000	15	$\lambda_6 = 6 \cdot 10^{-8} \cdot T^2 + 0,000125 \cdot T + 0,0425$
	9	Isolierkarton	290	1000	3	$\lambda_9 = 0,07938 - 1,4616 \cdot 10^{-4} \cdot T + 1,98485 \cdot 10^{-7} \cdot T^2$

Wagenseitenrand 1, Fläche 0,137 m²		1	Hochtemperaturwolle	160	1430	25	$\lambda_1 = -0,01481+5,675 \cdot 10^{-5} \cdot T + 1,25 \cdot 10^{-7} \cdot T^2$
		7	Feuerleichtstein	880	1540	144	$\lambda_7 = 0,32048-3,16438E-5 \cdot T + 6,25E-8 \cdot T^2$
		4	Kalziumsilikat-Isolierplatte	260	1100	25	$\lambda_4 = 6 \cdot 10^{-8} \cdot T^2 + 2 \cdot 10^{-5} \cdot T + 0,0983$
		5	Kalziumsilikat-Isolierplatte	225	1000	40	$\lambda_5 = 1 \cdot 10^{-4} \cdot T + 0,0327$
		6	Wärmedämmplatte	275	1000	15	$\lambda_6 = 6 \cdot 10^{-8} \cdot T^2 + 0,000125 \cdot T + 0,0425$
		9	Isolierkarton	290	1000	3	$\lambda_9 = 0,07938-1,4616 \cdot 10^{-4} \cdot T + 1,98485 \cdot 10^{-7} \cdot T^2$
		7	Feuerleichtstein	880	1540	119	$\lambda_7 = 0,32048-3,16438E-5 \cdot T + 6,25E-8 \cdot T^2$
		8	Feuerleichtstein	780	1430	64	$\lambda_8 = 0,20269+0,0001 \cdot T$
		6	Wärmedämmplatte	275	1000	15	$\lambda_6 = 6 \cdot 10^{-8} \cdot T^2 + 0,000125 \cdot T + 0,0425$
Wagenseitenrand 2, Fläche 0,263 m²		9	Isolierkarton	290	1000	3	$\lambda_9 = 0,07938-1,4616 \cdot 10^{-4} \cdot T + 1,98485 \cdot 10^{-7} \cdot T^2$

Die Umlaufzeit eines Brennwegens durch den Ofen, durch den Kühlkanal auf der Rücklaufbahn, durch die Ent- und Beladestation und durch den Vorwärmkanal auf der Rücklaufbahn bis zum Erreichen der Ausgangsposition beträgt 9,16 Stunden. Die Aufteilung in Abschnitte, die zugehörigen Weglängen, der entsprechende Zeitpunkt und die gemessene Temperatur der Messstelle 1 können aus der **Tabelle 12** entnommen werden.

Tabelle 12: Ort-, Zeit- und Ofenraumtemperaturen zur Berechnung der instationären Wärmeleitung im Brennweg

Abschnitt	Weglänge [m]	Zeitpkt [h]	Temperatur [°C]
Start	1,10	0,00	310
1	7,20	0,47	532
2	15,95	1,15	982
3	22,42	1,65	1088
4	35,96	2,70	1362
5	43,65	3,29	1377
6	50,41	3,81	1312
7	56,78	4,31	1118
8	61,36	4,66	303
9	70,03	5,33	62
10	72,00	5,48	40
11	91,36	6,98	35
12	98,40	7,53	30
Ende = Start	119,52	9,16	310

Die angegebenen Werte für Zeit und Temperatur werden im Programm SIMU-THERM 7.1 [Simu] zusammen mit den in Tabelle 11 angegebenen thermischen Daten der Feuerfestmaterialien verwendet, um den Temperaturverlauf im Brennwagen zu den festgelegten Zeitpunkten zu berechnen. **Abb. 65** zeigt beispielhaft für die Brennwagencenterisolation die Temperaturverläufe durch diese Isolationsschichten für alle Zeitpunkte vom Start bis zum Zeitpunkt 13, der den Beginn eines erneuten Wagenumlaufs darstellt.

Die Temperaturverläufe in den Seitenrändern und im stirnseitigen Rand zeigen prinzipiell ein ähnliches Bild und werden deshalb nicht dargestellt. Die Seitenränder wurden wegen ihrer unterschiedlichen Isolation unterteilt in Seitenrand 1, der den Ofenraumtemperaturen vollständig ausgesetzt ist und in Seitenrand 2, der durch das Ofenlabyrinth abgedeckt ist.

Aus der Schichtdicke, der Dichte, der spezifischen Wärmekapazität und der Temperatur der einzelnen Feuerfestmaterialien errechnet das Programm die Enthalpie $H_{BW, spez}$, bezogen auf die Brennwagenfläche je m^2 , **Tabelle 13**.

Die für die Ofenabschnitte ermittelten Brennwagenenthalpien sind in **Abb. 66** wiedergegeben.

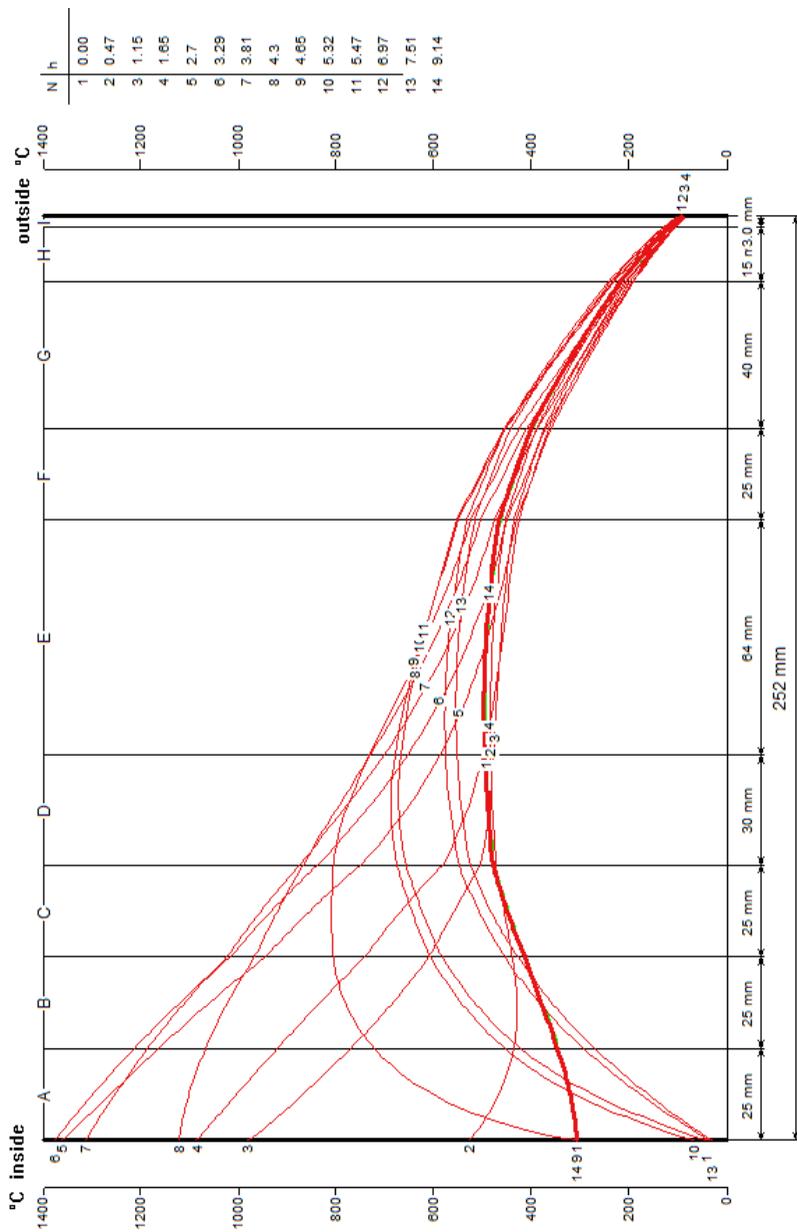


Abb. 65: transiente Temperaturverläufe im Brennwendcenter während des Wagenumlaufs

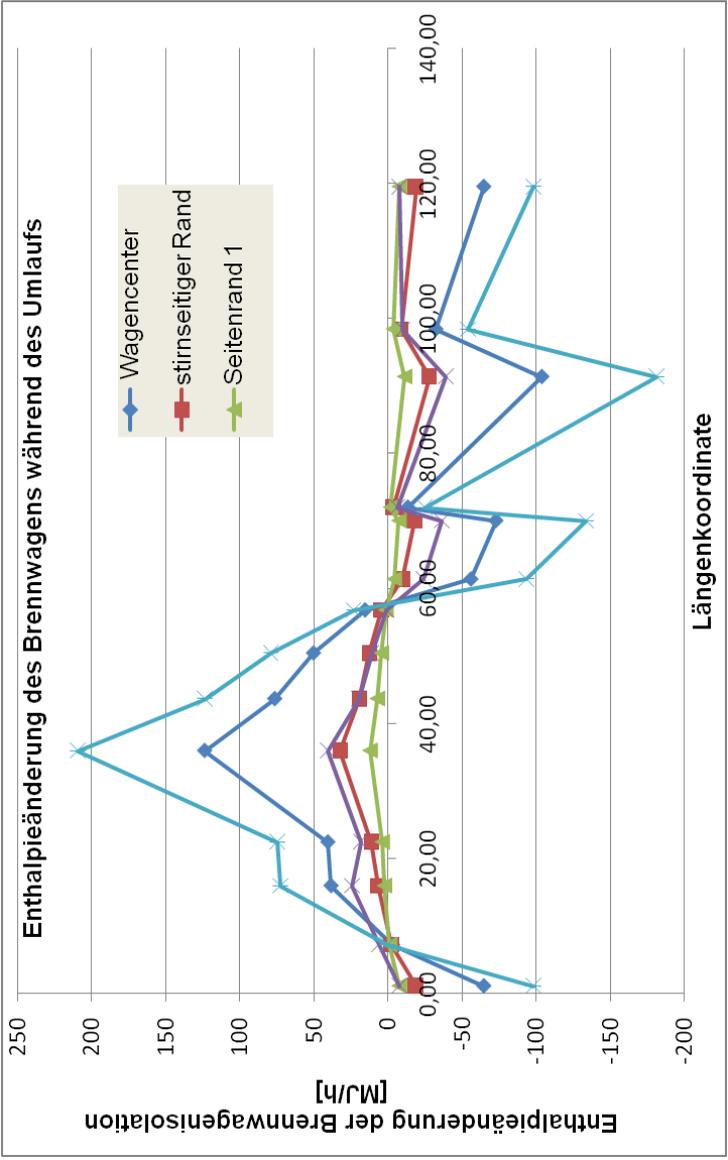


Abb. 66: Enthalpieänderung des Brennwagens während des Umlaufs

Tabelle 13: Enthalpieänderung der Brennwagenisolation

Ofenmeter	Zeitpkt [h]	Enthalpie H Wagencenter [MJ/m ²]	Enthalpie H stirnseitiger Rand [MJ/m ²]	Enthalpie H Seitenrand 1 [MJ/m ²]	Enthalpie H Seitenrand 2 [MJ/m ²]
1,10	0,00	38,7	64,4	62,6	35,2
7,20	0,47	38,5	63,6	61,8	38,5
15,95	1,15	40,9	66,3	64,6	51,1
22,42	1,65	43,4	70,7	69,0	60,7
35,96	2,70	51,1	83,4	81,5	81,8
43,65	3,29	55,8	91,1	89,1	92,2
50,41	3,81	58,9	96,1	94,0	97,9
56,78	4,31	59,9	97,9	95,9	98,6
61,36	4,66	56,4	94,1	92,1	86,3
70,03	5,33	51,9	87,2	85,1	67,6
72,00	5,48	51,1	85,9	83,8	64,3
91,36	6,98	44,7	75,1	73,1	44,2
98,40	7,53	42,7	71,7	69,7	39,1
119,52	9,16	38,7	64,4	62,6	35,2

10.1.2 Wandverluste

Zur Bestimmung der Außenwandverluste der Schnellbrandofenanlage wurden die Außenwandtemperaturen mit dem Messgerät Thermophil 4443-2 von der Firma Ultrakust-Gerätebau gemessen. Jeweils drei Messpunkte waren gleichmäßig über die Seitenwandhöhe verteilt und wurden im Abstand von 2 m über die gesamte Ofenlänge aufgenommen. Die über die Seitenwandhöhe gemittelten Messwerte sind in Messprotokoll 4: Außenwandtemperaturen festgehalten. Die Ofendecke besteht aus Hochtemperaturwolle und kann nicht betreten werden; deshalb wurden statt Messwerten die Außentemperaturen mit Hilfe stationärer Wärmedurchgangsberechnungen bestimmt.

Für die Berechnung der Wandverluste \dot{Q}_{vW} gilt nach Brunklaus [Brun]

$$\dot{Q}_{vW} = \left(\begin{array}{l} (8,6 + 0,04 * \vartheta_{W,a,v}) * A_{W,a,v} * (\vartheta_{W,a,v} - \vartheta_U) + \\ (6,28 + 0,04) * A_{W,a,h} * (\vartheta_{W,a,h} - \vartheta_U) \end{array} \right) * 3,6 \quad [\text{kJ/h}] \quad (10.39)$$

wobei

$\vartheta_{W,a,v}$	Außenwandtemperatur der vertikalen Wand	[°C]
$\vartheta_{W,a,h}$	äußere Deckentemperatur	[°C]
$A_{W,a,v}$	beide senkrechten Außenwandflächen	[m ²]
$A_{W,a,h}$	Oberfläche der äußeren Ofendecke	[m ²]

In **Abb. 67** sind die zusammengefassten Energieverluste von Seitenwänden und Ofendecke über die Ofenlänge angegeben. Der unruhige Verlauf ist auf unterschiedliche Strömungsverhältnisse in der Ofenhalle mit Beeinflussung auf die Seitenwandtemperaturen zurückzuführen und auf die sich über die Ofenlänge ändernden

Isolationsstärken und Qualitäten sowohl der Wände als auch die der Hochtemperaturwolle in der Ofendecke.

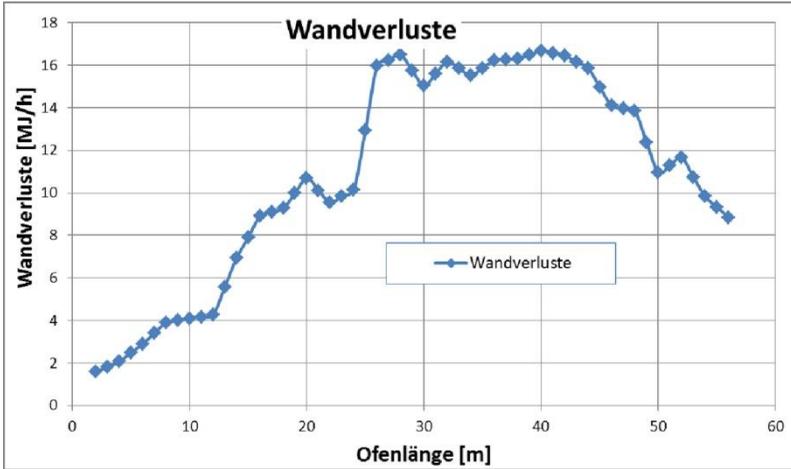


Abb. 67: zusammengefasste Energieverluste von Seitenwänden und Ofendecke

10.1.3 Enthalpieänderung von Ware und Brennhilfsmitteln

Es wird davon ausgegangen, dass Teller und Brennhilfsmittel die gleiche Temperatur ϑ_S haben so dass sich beim Aufheizprozess die Enthalpieänderung $\Delta \dot{H}_S$ beider Produkte zwischen Segmentaus- und eintritt aus der Gleichung (10.40) ergibt:

$$\Delta \dot{H}_S = \dot{H}_{S2} - \dot{H}_{S1} = (\dot{M}_T * c_{p,T} + \dot{M}_{Bh} * c_{p,Bh}) * (\vartheta_{S2} - \vartheta_{S1}) \quad (10.40)$$

Die Teller haben eine Masse von jeweils 530 g; der Brennwagen, der in 6 h durch den 70 m langen Ofen gefahren wird, ist mit 128 Tellern beladen. Daraus erhält man den Tellermassenstrom

$$\dot{M}_T = 450 \text{ kg/h.}$$

Das Massenverhältnis von Brennhilfsmitteln und Tellern ist 3,2; Der Massenstrom der Brennhilfsmittel \dot{M}_{Bh} beträgt dann

$$\dot{M}_{Bh} = 1440 \text{ kg/h.}$$

Die spezifische Wärmekapazität des Porzellans c_{pT} $\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}\right)$ ist temperaturabhängig, sie bestimmt man aus der empirisch ermittelten Formel (9.3) [Schu].

Die spezifische Wärmekapazität des SiC-Brennhilfsmittels c_{pBh} wird nach den Angaben der Fa. Saint Gobain [Cry] mit der Gleichung

$$c_{pBh} = 3 * 10^{-7} * \vartheta_S^2 + 9 * 10^{-4} * \vartheta_S + 0,6492 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}\right] \quad (10.41)$$

ermittelt. Die Enthalpieänderung der Teller $\Delta\dot{H}_T$, der Brennhilfsmittel $\Delta\dot{H}_{Bh}$ und als Summe die des Solid $\Delta\dot{H}_S$ in der Vorwärm- und Brennzone ist in **Abbildung 68** dargestellt. Die Enthalpie des Solid verringert sich auf den ersten Metern im Ofen, weil das Brenngut bereits im Vorwärmkanal auf der Rücklaufbahn auf ein höheres Energieniveau gebracht wurde, als auf den ersten Metern im Ofen angeboten wird. Am Einlauf des Ofens wird „Falschluff“ durch die Abgasabzugseinrichtung gesaugt und das Solid zunächst gekühlt. Erst dann beobachtet man eine steile Enthalpiezunahme mit einem Maximum im Bereich der ersten Brenner der Regelgruppe 0. In der Reinigungs- und auch in der Reduktionszone verringert sich die Enthalpieänderung aufgrund der Solidtemperaturführung.

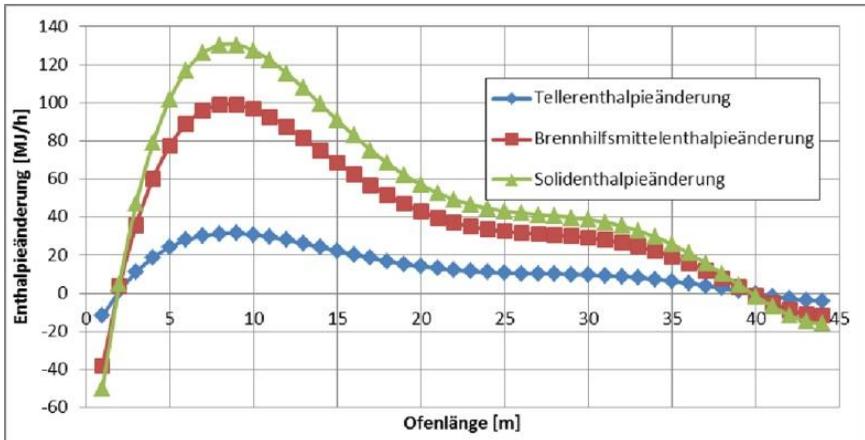


Abb. 68: Enthalpieänderung des Solid in der Vorwärm- und Brennzone

10.1.4 Enthalpie eingedüster Umgebungsluft

Hauptsächlich in der unbeheizten Vorwärmzone sind Eindüsterungen installiert, durch die Luft mit den spezifischen Daten der Verbrennungsluft in den Deckenspalt eingeleitet wird, um eine Atmosphärenumwälzung zu erzeugen und um damit eine gute Temperaturgleichmäßigkeit im Ofenkanal zu erhalten.

Die Enthalpie der eingedüsteren Luft \dot{H}_{Inj} bestimmt man aus:

$$\dot{H}_{Inj} = \dot{M}_{Inj} \cdot c_{pInj} \cdot (\vartheta_{Inj} - \vartheta_U) \quad (10.42)$$

wobei \dot{M}_{Inj} der Massenstrom der eingedüsteren Luft und c_{pInj} deren spezifische Wärmekapazität ist. **Tabelle 14** zeigt den Ort, den Massenstrom und die Enthalpie der Lufterdüsterungen in den Ofen. Die Massenströme zu den jeweiligen Lufterdüsterungen sind abgeschätzte Erfahrungswerte, eine exakte Messung war nicht möglich.

Tabelle 14: Enthalpie der Lufteindüsen

Segment Nr.	Lufteindüsung [kg/h]	Temperatur [°C]	Enthalpie [kJ/h]
1	20	30	101
2	20	30	101
3	20	30	101
4	20	30	101
5	20	30	101
6	20	30	101
7	15	30	76
8	10	30	51

10.1.5 Enthalpie abgesaugter Massenströme

In **Tabelle 15** sind die Segmente der Vorwärm- und Brennzona zusammengestellt, aus denen der angegebene Massenstrom der Fluide abgesaugt wird. Die Enthalpie dieser entnommenen Fluide \dot{H}_{exh} berechnet man aus:

$$\dot{H}_{exh} = \dot{M}_{exh} \cdot c_{p,exh} \cdot (\vartheta_{exh} - \vartheta_U) \quad (10.43)$$

\dot{M}_{exh} ist der Massenstrom der abgesaugten Fluide und $c_{p,exh}$ deren spezifische Wärmekapazität. Die Verteilung der einzelnen abgesaugten Massenströme in der Vorwärmzone ist aus Erfahrung festgelegt und nicht gemessen worden. Die Fluidtemperatur ϑ_{F2} ist die angenommene und dann durch Iteration bestätigte Temperatur. Umfangreiche Berechnungen sind zur Bestimmung dieser Fluidtemperatur am Segmentaustritt ϑ_{F2} notwendig. Sie hängt von den Wärmeübertragungsverhältnissen im Ofenraum ab.

Tabelle 15: Enthalpie der Absaugungen

Segment-Nr.	abgesaugter Fluidmassenstrom [kg/h]	Temperatur der Fluide [°C]	Enthalpie der abgesaugten Fluide [kJ/h]
1	0	107	0
2	2.658	106	238.017
3	622	233	149.101
4	311	322	108.715
5	62	394	27.501
6	0	456	0
.	0		0
.	0		0
.	0		0
44	0	1.316	0

10.1.6 Energiebedarfsberechnung der Ofensegmente

Die zugeführte Brennstoffenergie \dot{Q}_B errechnet sich aus:

$$\dot{Q}_B = \dot{M}_B * \left[h_u + c_{pB} * (\vartheta_B - \vartheta_U) + \lambda_V * L_{min} * c_{p,air} * (\vartheta_{air} - \vartheta_U) \right] \quad (10.44)$$

\dot{M}_B	Massenstrom des Brennstoffs	[kg/h]
c_{pB}	spez. Wärmekapazität des Brennstoffs	[kJ/kg/K]
$c_{p,air}$	spez. Wärmekapazität der Verbrennungsluft	[kJ/kg/K]
ϑ_B	Temperatur des Brennstoffs	[°C]
ϑ_{air}	Temperatur der Verbrennungsluft	[°C]
ϑ_U	Temperatur der Umgebung	[°C]
λ_V	Luftzahl	
L_{min}	Luftbedarf bei stöchiometrischer Verbrennung	[kg/kg]

Für die folgenden Berechnungen geht man in den jeweiligen Segmenten Seg_n von einer Rührkesselströmung aus, bei der sich durch Vermischung der Verbrennungsgase von den Brennern mit den Fluiden aus dem benachbarten Segment Seg_{n+1} und der eingedüsten Luft die Fluid-Gemischtemperatur $\bar{\vartheta}_F = \vartheta_{F2}$ einstellt.

Die Partialdrücke p_{CO_2} , p_{H_2O} und p_{CO} der Ofenatmosphäre errechnet man aus den Konzentrationen x_{CO_2} , x_{H_2O} und x_{CO} des Gemisches nach den Angaben im Kapitel 10.1. Es ist zu beachten, dass die Fluidkonzentrationen volumenbezogen sind, aber für die anschließenden Berechnungen eine massebezogene Wichtung der mittleren spezifischen Wärmekapazität des Fluidgemisches \bar{c}_{pFm} notwendig ist. Man erhält die massebezogene Wichtung der spezifischen Wärmekapazität der einzelnen Komponenten gemäß folgender Gleichung [Dub1]:

$$\bar{c}_{pFm} = \sum x_{iFm} \cdot c_{pi} = \frac{1}{\rho_{Fm}} \cdot \sum \tilde{x}_{iFm} \cdot \rho_i \cdot c_{pi} \quad (10.45)$$

mit

$$c_p(T) = c_{p(T_0)} \cdot \left[\frac{T}{T_0} \right]^n \quad (10.46)$$

In **Tabelle 16** [Dub1] sind die spezifischen Wärmekapazitäten mit den dazugehörigen Exponenten n und die Dichten ρ_i der wichtigsten Gaskomponenten aufgeführt.

Tabelle 16: Spezifische Wärmekapazität und Dichte wichtiger Gaskomponenten [Dub1]

Gas	c_p	n	ρ	Mol
	kJ/(kgK) bei 273K	-	kg/m ³	kg/kmol
N ₂	1	0,11	1,234	28
O ₂	0,9	0,15	1,41	32
CO ₂	0,84	0,3	1,939	44
H ₂ O	1,75	0,2	0,793	18
CO	1	0,12	1,234	28
H ₂	14,2	0,05	0,088	2

Aus der Bilanzgleichung (10.38) erhält man durch Einsetzen und Umformen die Bestimmungsgleichung (10.47) des gesuchten Brennstoffmassenstroms \dot{M}_B , mit Verwendung der angenommenen Fluidmischtemperatur $\bar{\vartheta}_{F,An}$, die nach den Iterationen der Misch- bzw. Austrittstemperatur $\bar{\vartheta}_F = \vartheta_{F2}$ entsprechen soll.

$$\begin{aligned}
\dot{M}_B &= \frac{\Delta \dot{H}_S + \Delta h + \Delta \dot{Q}_{Red} + \dot{Q}_{VW} + \dot{H}_{exh} - \dot{H}_{Inj} - \dot{H}_{F,1} + \bar{c}_{pF2} * (\bar{\theta}_{F,An} - \theta_U) * (\dot{M}_{F1} + \dot{M}_{Inj} - \dot{M}_{exh})}{h_u + c_{pB} * (\theta_B - \theta_U) + \lambda_V * L_{min} * c_{pair} * (\theta_{air} - \theta_U) - \bar{c}_{pF2} * (\bar{\theta}_{F,An} - \theta_U) * (1 + \lambda_V * L_{min})}
\end{aligned}
\tag{10.47}$$

Bestimmt werden können nun die Partialdrücke der Ofenatmosphäre und alle temperatur- und partialdruckabhängigen Stoffgrößen für die Wärmeübertragung.

Die Solidtemperaturen am Segmenteintritt ϑ_{S1} und am Segmenteaustritt ϑ_{S2} sind aus dem Messprotokoll 5 als Randbedingungen bekannt. Zur Berechnung des Temperaturverlaufs der Fluide im Segment ϑ_F wird von Specht [Spec2] die Gleichung in dimensionsloser Form angegeben:

$$\frac{\vartheta_F - \vartheta_\infty}{\vartheta_{S2} - \vartheta_\infty} = -\Omega_{S/F} * e^{-(1 + \Omega_{F/S}) * St_F} \quad (10.48)$$

Daraus ergibt sich für die laufende Fluidtemperatur ϑ_F :

$$\vartheta_F = \left(-\Omega_{S/F} * e^{-(1 + \Omega_{F/S}) * St_F} \right) * (\vartheta_{S2} - \vartheta_\infty) + \vartheta_\infty . \quad (10.49)$$

Mit $\Omega_{S/F}$ wird das Kapazitätsstromverhältnis von Solid und Fluid bezeichnet:

$$\Omega_{S/F} = \frac{\dot{M}_S * c_{pS}}{\dot{M}_F * c_{pF}} \quad (10.50)$$

während für das Kapazitätsstromverhältnis von Fluid und Solid $\Omega_{F/S}$ gilt:

$$\Omega_{F/S} = \frac{\dot{M}_F * c_{pF}}{\dot{M}_S * c_{pS}} . \quad (10.51)$$

Für die sich im Unendlichen angleichende Temperatur von Fluid und Solid ϑ_∞ gilt [Spec2]:

$$\vartheta_\infty = \frac{\vartheta_{S1} - \vartheta_{S2} \cdot e^{St \cdot \left(1 + \frac{\dot{m}_F \cdot c_{pF}}{\dot{m}_S \cdot c_{pS}}\right)}}{1 - e^{St \cdot \left(1 + \frac{\dot{m}_F \cdot c_{pF}}{\dot{m}_S \cdot c_{pS}}\right)}} \quad (10.52)$$

Die Fahrtrichtung des Solids durch den Ofen wird als positive x-Richtung festgelegt, so dass der Kapazitätsstrom des Fluids $\dot{M}_F * c_{pF}$ nur bei Gleichstrom mit einem positiven Vorzeichen versehen wird, im Gegenstrom dagegen mit einem negativen Vorzeichen gerechnet werden muss.

Die Stantonzahl St ist definiert:

$$St_F = \frac{\alpha_{eff} * A_s}{\dot{M}_F * c_{pF}} \quad (10.53)$$

Zur Bestätigung der vorgegebenen Temperatur ϑ_F aus Gleichung (10.49) ist noch die Kenntnis des effektiven Wärmeübergangskoeffizienten α_{eff} notwendig.

10.2 Bestimmung des effektiven Wärmeübergangskoeffizienten

Den effektiven Wärmeübergangskoeffizient α_{eff} bestimmt man aus Gleichung (8.1), mit einem für den Teller angepassten Transientenfaktor $\kappa=3$ [Jesch], wobei der Gesamtwärmeübergangskoeffizient α_{ges} sich aus dem konvektiven α_k und dem Strahlungsanteil α_r zusammensetzt:

$$\alpha_{ges} = \alpha_k + \alpha_r \quad (10.54)$$

Der Wärmeübergangskoeffizient für Konvektion α_k wird über die Beziehung

$$\alpha_k = Nu * \lambda_F / d_T \quad (10.55)$$

berechnet, mit

λ_F = Wärmeleitfähigkeit des Fluids

d_T = Durchmesser des Tellers als charakteristische Länge

Wegen der Ähnlichkeit zu den Untersuchungen von Lorenz kann man die Nusseltzahl Nu aus der von ihm bestimmten Gleichung (10.56) berechnen [Lor]:

$$Nu = 5,5748 + 4,174 * 10^{-4} Re_{que} + 1,192 * 10^{-2} Re_{ax} - 4,914 * 10^{-10} Re_{que}^2 - 4,6 * 10^{-7} Re_{ax}^2 - 1,43 * 10^{-8} Re_{que} Re_{ax} \quad (10.56)$$

mit der Reynoldszahl der Strömung in Ofenachsenrichtung Re_{ax}

$$Re_{ax} = \frac{w_{lK,ax} * d_T}{\nu_F}, \quad (10.57)$$

worin $w_{lK,ax}$ die Fluidgeschwindigkeit im leeren Ofenkanal in axialer Richtung darstellt, d_T den Tellerdurchmesser bedeutet und ν_F die kinematische Viskosität des Fluids bezeichnet. Mit Re_{que} wird die Reynoldszahl der Querströmung aus den Brennern ausgedrückt:

$$Re_{que} = \frac{w_{Br} * d_T}{\nu_F} \quad (10.58)$$

mit der Austrittsgeschwindigkeit aus den Brennern w_{Br} .

Den Wärmeübergangskoeffizienten für Strahlung α_r bestimmt man nach Gleichung:

$$\alpha_r = \varepsilon_{FSCr} * \sigma * \bar{T}_F^3 \left\{ 1 + \frac{\bar{T}_S}{\bar{T}_F} + \left(\frac{\bar{T}_S}{\bar{T}_F} \right)^2 + \left(\frac{\bar{T}_S}{\bar{T}_F} \right)^3 \right\} \quad (10.59)$$

Die charakteristischen Größen des Strahlungswärmeübergangs im Besitz sind die Emissionsgrade der Verbrennungsgase ε_F , der Emissionsgrad des Porzellantellers ε_S , der von Bauer [BBM] mit $\varepsilon_S = 0,6$ bestimmt wurde und der Emissionsgrad der

Unterseite ε_{Cr} der SiC-Cranks, der von Bauer [BBM] mit $\varepsilon_{Cr} = 0,85$ angegeben wurde.

Der Strahlungsaustauschgrad ε_{FSCr} zwischen Fluid ε_F , Solid ε_S und dem Sekundärstrahler Crank ε_{Cr} errechnet sich nach Schupe [Schup1] aus:

$$\varepsilon_{FSCr} = \varepsilon_{FS} + \varphi_{CrS} * \frac{\varepsilon_{FCr} * \varepsilon_{CrS}}{\varepsilon_{FCr} + \left(\varphi_{CrS} * \frac{\frac{A_S}{A_{Cr+S}}}{q_V} \right) * \varepsilon_{CrS}} \quad (10.60)$$

Mit φ_{CrS} bezeichnet man den Sichtfaktor, der bei diesem Besatzaufbau von Teller und SiC-Crank als „zwischen zwei parallelen auf einer Achse liegenden Kreisscheiben“ betrachtet werden kann und der nach Specht [Spec5] bestimmt wird aus:

$$\varphi_{CrS} = \varphi_{SCr} = \frac{1}{2 * R^2} * (1 + 2 * R^2 - \sqrt{(1 + 4 * R^2)}) \quad (10.61)$$

darin ist

$$R = \frac{d_T/2}{s_{Cr}} \quad (10.62)$$

Der Sichtfaktor φ_{CrS} wird durch den Besatzaufbau vorgegeben und kann nur durch große und kostenintensive Maßnahmen geändert werden.

q_V nennt Schupe [Schup1] den Verlustbeiwert, der sich errechnen lässt nach

$$q_V = 1 - \frac{\dot{Q}_V}{\sigma * A_{Cr+S} * (\varepsilon_{FCr} * T_F^4 - \varepsilon_{CrF} * T_{Cr}^4) + \alpha_k * A_{Cr+S} * (\vartheta_F - \vartheta_{Cr})}, \quad (10.63)$$

worin \dot{Q}_V die Enthalpieänderung der Cranks pro m² und in diesem Anwendungsfall die halbe Wandstärke betrifft. Die Cranks

sind nur 7 mm stark, die Wärmeleitfähigkeit des SiC-Materials λ_{SiC} errechnet sich als Funktion der absoluten Temperatur T aus den Angaben der Fa. Saint-Gobain Industriekeramik Rödental GmbH [Cry2] nach:

$$\lambda_{SiC} = 6 * 10^{-11}T^4 - 3 * 10^{-7}T^3 + 0,0008T^2 - 0,8022T + 352,54 \quad (10.64)$$

Die Wärmeleitfähigkeit des Porzellans λ_T lässt sich aus den Angaben von Zapp [Zapp] als Funktion der absoluten Temperatur T mit der Gleichung

$$\lambda_T = -7 * 10^{-7}T^2 + 0,0026T + 0,3389 \quad (10.65)$$

bestimmen.

Bei den vorhandenen Wärmeübergangskoeffizienten wird die Biot-Zahl $Bi < 0,1$, so dass die Cranks als thermisch dünne Körper zu betrachten sind. In thermisch dünnen Körpern können Temperaturunterschiede vernachlässigt werden [Spec3], so dass gilt:

$$\dot{Q}_V \rightarrow 0, \text{ woraus sich ergibt:}$$

$$q_V = 1.$$

Den Austauschgrad zwischen Fluid und Crank ϵ_{FCr} erhält man aus [Schup]:

$$\epsilon_{FCr} = \frac{\epsilon_F * \epsilon_{Cr} * \left[1 + \varphi_{CrS} * \frac{A_S}{A_{Cr+S}} * (1 - \epsilon_F) * (1 - \epsilon_S) \right]}{(1 - U)}, \quad (10.66)$$

zwischen Fluid und Solid ϵ_{FS}

$$\epsilon_{FS} = \frac{\epsilon_F * \epsilon_S * \left[1 + \varphi_{CrS} * \frac{A_S}{A_{Cr+S}} * (1 - \epsilon_F) * (1 - \epsilon_{Cr}) \right]}{(1 - U)} \quad (10.67)$$

zwischen Crank und Solid ϵ_{CrS}

$$\epsilon_{CrS} = \frac{\epsilon_{Cr} * \epsilon_S * (1 - \epsilon_F)}{(1 - U)} \quad (10.68)$$

mit

$$U = (1 - \epsilon_F)(1 - \epsilon_{Cr}) \left[\varphi_{CrS} \frac{A_S}{A_{Cr+S}} (1 - \epsilon_F)(1 - \epsilon_S) + \left(1 - \varphi_{CrS} \frac{A_S}{A_{Cr+S}} \right) \right]. \quad (10.69)$$

Mit A_S wird die Oberfläche des Tellers mit seiner Fahnenunterseite und der nicht vom Teller abgedeckten Crank-Oberseite berücksichtigt, die auf Grund der weißen Engobe den gleichen Emissionsgrad hat wie der Teller. A_{Cr+S} bezeichnet die Fläche, die die Unterseite des Cranks oberhalb des Tellers darstellt und die im Strahlungsaustausch mit dem Teller steht. Dabei setzt sich der Emissionsgrad dieser Fläche A_{Cr+S} zusammen aus den Emissionsgraden des SiC-Materials $\epsilon_{Cr} = 0,85$ und dem Emissionsgrad des Tellers $\epsilon_S = 0,6$ – gewichtet nach ihren Flächenanteilen -, wobei die Tellerbodenfläche durch die Bohrung im Crank zur Wirkung kommt.

Der Emissionsgrad der Verbrennungsgase ϵ_F ergibt sich – wie bereits in Kapitel 9.4 erwähnt - aus den Emissionsgraden der strahlenden Gase CO_2 und H_2O , ϵ_{CO_2} und ϵ_{H_2O} und in Reduktionsbereichen zusätzlich aus dem Emissionsgrad des CO-Gases ϵ_{CO} :

$$\epsilon_F = \epsilon_{CO_2} + \epsilon_{H_2O} + \epsilon_{CO} - \epsilon_{CO_2} * \epsilon_{H_2O} * \epsilon_{CO} \quad (9.7)$$

Diese Gleichung gilt nur für $\epsilon_{CO} > 0$, sonst ohne ϵ_{CO} – Berücksichtigung.

Die Emissionsgrade ϵ_{CO_2} , ϵ_{H_2O} und ϵ_{CO} sind wiederum abhängig von der Temperatur, den jeweiligen Partialdrücken und der äquivalenten Schichtdicke $s_{\text{äq}}$. Die beiden Emissionsgrade ϵ_{CO_2} und ϵ_{H_2O} erhält man über die Gleichung

$$\epsilon = A * e^{(-B*T)}. \quad (10.70)$$

Die Koeffizienten A und B sind der **Tabelle 17** zu entnehmen.

Tabelle 17: Koeffizienten zur Berechnung der Emissionsgrade von CO₂ und H₂O [Spec6]

Gasart	A	B	p*s [bar*m]	T [K]
CO ₂	$0,51 \cdot (p \cdot s)^{0,26}$	$6,7 \cdot 10^{-4} \cdot (p \cdot s)^{-0,085}$	>0,01	>1200
CO ₂	$2,0 \cdot (p \cdot s)^{0,54}$	$6,7 \cdot 10^{-4} \cdot (p \cdot s)^{-0,085}$	<0,01	>1200
H ₂ O	$0,6 \cdot (p \cdot s)^{0,25}$	$5,3 \cdot 10^{-4} \cdot (p \cdot s)^{-0,2}$	>0,1	>1000
H ₂ O	$0,87 \cdot (p \cdot s)^{0,47}$	$5,3 \cdot 10^{-4} \cdot (p \cdot s)^{-0,2}$	<0,1	>1000

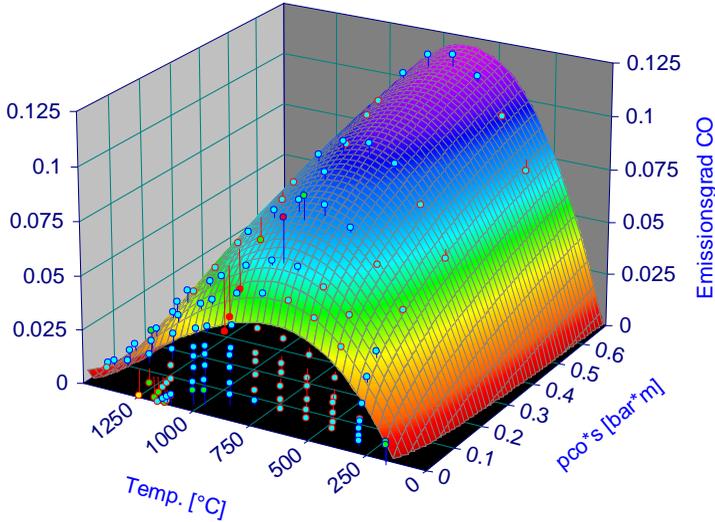
Der Geltungsbereich ist abhängig von der absoluten Gastemperatur T und dem Produkt aus Partialdruck p und äquivalenter Schichtdicke $s_{\text{äq}}$, letztere errechnet man allgemein aus Gleichung (9.8). Im Anwendungsfall beträgt der Crankabstand $c_{Cr} = 0,059$ m.

Die Untersuchungen von Hottel [Hot] zum Emissionsgrad von CO beginnen mit einem Mindestwert des Produktes $p_{CO} \cdot s_{\text{äq}} = 0,001235 \text{ bar} \cdot \text{m}$. Um die Bandbreite der Messwerte von Hottel zu erweitern, wurden diese Angaben zu dem dreidimensionalen Diagramm **Abb. 69** übertragen [Syst]. Der Emissionsgrad ε_{CO} ist auf der z-Achse abzulesen. Er ist wiedergegeben als Funktion der Temperatur t [°C] auf der y-Achse und des Produktes $p_{CO} \cdot s_{\text{äq}}$ auf der x-Achse.

Die in Gleichung (10.47) angenommene Temperatur $\vartheta_{Fz,An}$ wird iterativ geändert, bis sie dem Ergebnis von (10.49) in tolerierbaren Grenzen entspricht.

Emissionsgrad von CO

Rank 2 Eqn 311 $z=a+b\ln x+cy+d(\ln x)^2+ey^2+fy\ln x+g(\ln x)^3+hy^3+iy^2\ln x+jy(\ln x)^2$
 $r^2=0.96385843$ DF Adj $r^2=0.96084663$ FitStdErr=0.0059630208 Fstat=358.54944
 $a=-0.00036153963$ $b=0.023170287$ $c=0.00045052928$ $d=0.0043497108$ $e=-4.3759185e-07$
 $f=3.059738e-05$ $g=0.00022733585$ $h=8.5035722e-11$ $i=-3.1787143e-08$ $j=-1.6500686e-06$



Damit ist die exakte und vollständige Vorausbestimmung der Wärmebilanz eines brennstoffbeheizten Tunnelofens für den Glattbrand von Porzellangeschirr in der Vorwärm- und Brennzone mit den energetischen Anschlusswerten für die jeweiligen Segmente möglich, so dass die optimale Auslegung der Brennereinrichtung sichergestellt ist.

Abb. 69: Emissionsgrad ε_{CO} als Funktion der Temperatur t und dem Produkt aus Partialdruck und äquivalenter Schichtdicke $p_{CO} * s_{\ddot{a}q}$

Die Funktion lautet:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{CO} = & a + b * \ln(p_{CO} * s_{\ddot{a}q}) + c * t + d * (\ln(p_{CO} * s_{\ddot{a}q}))^2 + e * \\ & t^2 + f * t * \ln(p_{CO} * s_{\ddot{a}q}) + g * (\ln(p_{CO} * s_{\ddot{a}q}))^3 + h * t^3 + i * t^2 * \\ & \ln(p_{CO} * s_{\ddot{a}q}) + j * t * (\ln(p_{CO} * s_{\ddot{a}q}))^2 \end{aligned} \quad (10.71)$$

Die Koeffizienten haben die Werte:

$a=-0,00036153963$	$b=0,023170287$	$c=0,00045052928$
$d=0,0043497108$	$e=-4,3759185E-7$	$f=3,059738E-$
$5g=0,00022733585$	$h=8,5035722E-11$	$i=-3,1787143E-8$
$j=-1,6500686E-8$		

11. Vergleich der Berechnungen aus Messresultaten mit theoretischen Vorgaben

Für die Auslegung einer Ofenanlage für den Glattbrand von Porzellan ist die Temperaturkurve des Solid notwendig. Sie wird üblicherweise durch Vorversuche oder durch Angaben des Betreibers festgelegt.

Die Solid-Temperaturkurve ist im vorliegenden Fall durch umfangreiche Schleppementmessungen mit offener Messperle im 10 Sekunden-Intervall über einen Datenlogger ermittelt worden (**Messprotokoll 5**). Mit der hochempfindlichen Messanordnung erhält man einen Verlauf der Temperaturen mit starker Streuung, die man durch Mittelwertbildung für ein Zeitintervall von 1 Minute in eine Trend-Temperaturkurve 6. Grades nach Gleichung (9.6), die nur für diese Messung gilt, in eine gleichmäßige Funktion überführt, woraus man verwertbare glaubwürdige Temperaturwerte am jeweiligen Segment Ein- und Ausgang erhält. Die Regelgruppen-einstellung für die Brenner der realen Ofenanlage ist im **Messprotokoll 2: Brennerregelgruppeneinstellung** festgehalten. Die Werte der Luftzahlen λ_v der beiden Brenner in den jeweiligen Segmenten der beheizten Zonen sind in tabellarischer Form in **Tabelle 18** angegeben.

Tabelle 18: Berechnungsergebnisse zur Fluidaustrittstemperatur, bei realer Luftzahleinstellung, Gegenstrom

Segment-	Regel-	Bremer-	Solideintrittstemp.	Solidaustrittstemp.	Fluidaustrittstemp.	Luftzahl
	gruppe	anzahl	ϑ_{S1} [°C]	ϑ_{S2} [°C]	ϑ_{F2} [°C]	λ
1		0	113	87	107	
2		0	87	90	106	0,00
3		0	90	114	233	0,00
4		0	114	156	322	0,00
5		0	156	209	394	0,00
6		0	209	270	456	0,00
7		0	270	336	525	0,00
8		0	336	404	594	0,00
9		2	404	472	670	1,46
10		2	472	539	711	1,46
11	0	2	539	603	751	1,46
12		2	603	663	789	1,46
13		2	663	719	826	1,46
14		2	719	770	861	1,46
15	1	2	770	818	899	1,46
16		2	818	861	929	1,46
17		2	861	900	958	1,46
18	2	2	900	935	984	1,46
19		2	935	967	1.009	1,46

20			967	997	1,033	1,46
21			997	1,024	1,055	1,59
22	3		1,024	1,050	1,076	1,59
23			1,050	1,074	1,097	1,59
24			1,074	1,097	1,117	1,59
25	4		1,097	1,119	1,139	0,97
26			1,119	1,141	1,117	0,97
27			1,141	1,162	1,179	0,94
28	5		1,162	1,183	1,199	0,94
29			1,183	1,204	1,218	0,92
30			1,204	1,224	1,237	0,92
31	6		1,224	1,243	1,255	0,92
32			1,243	1,262	1,272	0,92
33			1,262	1,279	1,287	1,09
34	7		1,279	1,294	1,301	1,09
35			1,294	1,307	1,313	1,09
36			1,307	1,318	1,322	1,09
37			1,318	1,326	1,328	1,31
38	8		1,326	1,331	1,332	0,00
39			1,331	1,334	1,334	1,31
40			1,334	1,333	1,333	1,31
41	9		1,333	1,329	1,331	1,40
42			1,329	1,324	1,328	1,40
43			1,324	1,316	1,323	1,40
44			1,316	1,308	1,316	1,40

In der Tabelle 18 sind auch die Berechnungsergebnisse für die Fluidtemperatur am Segmentaustritt aus Gleichung (10.49) aufgeführt. Vorausgesetzt wird hier, dass in der Vorwärm- und Brennzonen die Prinzipien des Gegenstromwärmetauschers herrschen, sich deshalb die Fluide aus einem Segment mit denen (in Strömungsrichtung gesehen) folgenden vermischen und es zu verschiedenen Atmosphärensituationen, u.a. auch zu Nachverbrennungen kommt, wie in Kapitel 10.1 beschrieben.

Obwohl - wie aus der Tabelle 18 zu entnehmen ist – die Brenner in den Regelgruppen RG 4, RG 5 und RG 6 reduzierend - $\lambda_v < 1$ - eingestellt sind, weisen die Ergebnisse der Atmosphärenberechnungen im **Tabelle 19** keine (CO + H₂)-Komponenten aus, sondern O₂-Partialdrücke, die im Bereich der gesamten Reduktionszone von Segment 25 bis Segment 32 zwischen O₂ = 0,024 bar und O₂ = 0,037 bar liegen.

Dies ist bei Gegenstrom dann möglich, wenn Fluide mit einem hohen Sauerstoffangebot aus dem benachbarten Segment Seg_{N+1} in die Reduktionszone einströmen und diese Sauerstoffmenge größer ist als der stöchiometrische Sauerstoffbedarf, der zur völligen Verbrennung der reduzierenden Komponenten aus den Verbrennungsgasen der Brenner notwendig wäre. Diese Konstellation der vollständigen Nachverbrennung im Ofenkanal entspricht den Ausführungen in Kapitel 10.1. über die Ofenatmosphärensituation 2.

Unter diesen ermittelten Atmosphärenbedingungen kann jedoch wie vorstehend beschrieben kein verkaufsfähiges Porzellan hergestellt werden, es wäre u.a. unansehnlich schmutzig „luftgelb“. Da die Qualität des Hartporzellans aber den Vorstellungen des Betreibers entspricht, können nur andersartige Strömungsverhältnisse die Ofenatmosphäre mit der notwendigen Reduktion im Ofenkanal beeinflusst haben.

Tabelle 19: Berechnungsergebnisse zur Ofenatmosphäre bei realer LuftzahlEinstellung und Gegenstrom

Segment-Nr.	Regel- gruppe	Ofenatmosphäre					
		CO2 [Partialdruck]	H2O [Partialdruck]	CO+H2 [Partialdruck]	O2 [Partialdruck]	N2 [Partialdruck]	
1	unbeheizte Vorwärmszone	0,00	0,03	0,00	0,20	0,77	
2		0,07	0,16	0,00	0,05	0,72	
3		0,07	0,16	0,00	0,05	0,72	
4		0,07	0,16	0,00	0,05	0,72	
5		0,07	0,16	0,00	0,05	0,72	
6		0,07	0,16	0,00	0,05	0,72	
7		0,07	0,16	0,00	0,05	0,72	
8		0,07	0,16	0,00	0,05	0,72	
9		0,07	0,16	0,00	0,05	0,72	
10		0	0,07	0,17	0,00	0,05	0,72
11		0	0,07	0,17	0,00	0,05	0,72
12		0	0,07	0,17	0,00	0,05	0,72
13		0	0,07	0,17	0,00	0,05	0,72
14		1	0,07	0,17	0,00	0,05	0,72
15			0,07	0,17	0,00	0,04	0,71
16		2	0,07	0,17	0,00	0,04	0,71
17			0,07	0,17	0,00	0,04	0,71
18			0,07	0,17	0,00	0,04	0,71
19		0,07	0,17	0,00	0,04	0,71	

Es ist nicht ungewöhnlich, wenn man bei schwankendem Besatz eine Verbesserung der Atmosphärenstabilität im Bereich der Trennung zwischen Oxidation und Reduktion zu erzielen versucht, indem man den maximalen Ofendruck auf den Beginn der Reduktionszone verlegt. Das kann durch entsprechenden Abgleich der Absaugung am Ofeneinlauf mit der Zwischenabsaugung erreicht werden. Man erhält dann ab der Atmosphärentrennung z.B. ab Ofensegment 25 ein Gleichstromverhalten der Fluide zur Ware bis zur Zwischenabsaugung, während im Vorwärm- und Reinigungsbereich die übliche Gegenstromeinstellung beibehalten wird. Bei der vorliegenden Anlage scheint diese Ofeneinstellung vorgenommen worden zu sein. Als Beweis dieser Vermutung folgt nun nach der in Kapitel 10.1 beschriebenen Methode eine rechnerische Betrachtung der Ofenanlage im Gleichstrom-Gegenstromprinzip. Dabei werden die Randbedingungen

- Brenner-Gas-Luft-Verhältniseinstellung,
- Solidtemperaturverlauf,
- Enthalpiedifferenz der Ofenwagen,
- Wand- und Deckenverluste,
- Lufteindüsungsmassenströme,
- Absaugmassenströme,

aufrechterhalten; allerdings wird die Absaugung im Ofensegment 2 so angepasst, dass der Restmassenstrom der Abgase nahezu vollständig abgezogen wird, und sich nur ein geringer Falschlufmassenstrom am Ofeneintritt dazu mischt.

Die Trennung zwischen Gegenstrom und Gleichstrom befindet sich zwischen den Regelgruppen RG 3 und RG 4, zwischen den Ofensegmenten 24 und 25. Mit der reduzierenden Brennereinstellung der Regelgruppe RG 4 im Ofensegment 25 beginnt der Gleichstrombereich. Die Reduktionseinstellung endet mit der Regelgruppe RG 6 im Ofensegment 32.

Tabelle 20: Berechnungsergebnisse zur Ofenatmosphäre bei realer LuftzahlEinstellung für Gegen- und Gleichstrom

Segment-Nr.	Regel- gruppe	Ofenatmosphäre				
		CO2 [Partialdruck]	H2O [Partialdruck]	CO+H2 [Partialdruck]	O2 [Partialdruck]	N2 [Partialdruck]
1	unbeheizte Vorwärmlzone	0,002	0,029	0,000	0,199	0,769
2		0,060	0,142	0,000	0,073	0,725
3		0,061	0,144	0,000	0,071	0,724
4		0,062	0,145	0,000	0,070	0,724
5		0,062	0,146	0,000	0,068	0,723
6		0,063	0,147	0,000	0,067	0,723
7		0,063	0,149	0,000	0,066	0,722
8		0,064	0,150	0,000	0,065	0,722
9		0,064	0,150	0,000	0,064	0,722
10	0	0,064	0,150	0,000	0,064	0,722
11		0,064	0,150	0,000	0,064	0,722
12		0,064	0,150	0,000	0,065	0,722
13	1	0,064	0,149	0,000	0,065	0,722
14		0,064	0,149	0,000	0,065	0,722
15		0,063	0,148	0,000	0,066	0,722
16		0,063	0,148	0,000	0,066	0,722
17		0,063	0,148	0,000	0,067	0,723
18	2	0,063	0,147	0,000	0,068	0,723
19		0,062	0,146	0,000	0,069	0,723

20		0,062	0,145	0,000	0,070	0,724
21		0,061	0,143	0,000	0,072	0,724
22	3	0,061	0,143	0,000	0,072	0,724
23		0,061	0,143	0,000	0,072	0,724
24		0,061	0,143	0,000	0,072	0,724
25	4	0,090	0,205	0,012	0,000	0,693
26		0,090	0,205	0,012	0,000	0,693
27		0,089	0,205	0,015	0,000	0,692
28	5	0,088	0,205	0,017	0,000	0,691
29		0,087	0,204	0,020	0,000	0,689
30		0,086	0,204	0,022	0,000	0,688
31	6	0,085	0,204	0,024	0,000	0,687
32		0,085	0,204	0,025	0,000	0,686
33		0,088	0,205	0,015	0,000	0,691
34	7	0,090	0,206	0,009	0,000	0,695
35		0,092	0,207	0,005	0,000	0,697
36		0,093	0,207	0,001	0,000	0,699
37		0,091	0,202	0,000	0,006	0,701
38	8	0,089	0,198	0,000	0,010	0,703
39		0,087	0,195	0,000	0,013	0,704
40		0,086	0,193	0,000	0,016	0,705
41		0,085	0,191	0,000	0,019	0,706
42	9	0,084	0,189	0,000	0,020	0,707
43		0,083	0,188	0,000	0,022	0,707
44		0,083	0,187	0,000	0,023	0,707

Die Ergebnisse der **Tabelle 20** beweisen, dass bei den eingehaltenen Randbedingungen die Atmosphärenvoraussetzungen für einen Qualitätsbrand des Porzellans durch geschickte Kombination von Gegenstrom und Gleichstrom geschaffen werden können.

Wenn man zum Gegenstromprinzip aus energetischen Gründen zurückkehren will, dann ist zur Erfüllung des Atmosphärenverlaufs im Ofenkanal eine geänderte Luftzahl-einstellung λ_V der Brenner notwendig. Für die folgende Berechnung ist sie so gewählt worden, dass eine möglichst nahstöchiometrische Einstellung vorgenommen wird, aber man dennoch die atmosphärischen Bedingungen nicht verletzt. Diese Einstellung hat, wie in **Tabelle 21** festgehalten wird, Auswirkungen auf den Temperaturverlauf des Fluid, auf den Partialdruck in den Segmenten und – wie später gezeigt wird - auf den Energiebedarf.

Ein direkter Vergleich der drei verschiedenen Ofeneinstellungen:

- {1} Gegenstromprinzip bei tatsächlicher Luftzahleinstellung λ_V ,
- {2} Gegenstromprinzip in der Vorwärm- und Reinigungszone,
Gleichstromprinzip in der Reduktions- und Hoch-
temperaturzone mit der realen Luftzahleinstellung λ_V ,
- {3} durchgehendes Gegenstromprinzip bei theoretischer
Luftzahleinstellung λ_V

soll die Unterschiede verdeutlichen.

Tabelle 21: Berechnungsergebnisse zur Ofenatmosphäre bei theoretischer Luftzahlstellung und Gegenstrom

Segment Nr.	Regelgruppe	Ofenatmosphäre					Fluidaustritts-temperatur ϑ_{F_2} [°C]
		CO ₂ [Partialdruck]	H ₂ O [Partialdruck]	CO+H ₂ [Partialdruck]	O ₂ [Partialdruck]	N ₂ [Partialdruck]	
1	unbeheizte Vorwärmlzone	0,002	0,029	0,000	0,199	0,769	110
2		0,073	0,168	0,000	0,044	0,715	250
3		0,075	0,172	0,000	0,040	0,713	340
4		0,076	0,174	0,000	0,038	0,712	411
5		0,077	0,176	0,000	0,035	0,712	472
6		0,078	0,177	0,000	0,033	0,711	541
7		0,079	0,179	0,000	0,031	0,710	609
8		0,080	0,181	0,000	0,030	0,710	700
9	0	0,080	0,182	0,000	0,029	0,709	734
10		0,081	0,183	0,000	0,028	0,709	767
11		0,081	0,184	0,000	0,026	0,709	800
12		0,082	0,185	0,000	0,025	0,708	832
13	1	0,083	0,186	0,000	0,024	0,708	864
14		0,083	0,187	0,000	0,022	0,707	897
15		0,084	0,188	0,000	0,021	0,707	926
16		0,085	0,190	0,000	0,019	0,706	952
17	2	0,086	0,192	0,000	0,017	0,705	978
18		0,087	0,194	0,000	0,015	0,705	1.002
19		0,088	0,196	0,000	0,012	0,704	1.025
20		0,089	0,199	0,000	0,009	0,703	

21		0,091	0,202	0,000	0,006	0,701	1,048
22	3	0,092	0,204	0,000	0,003	0,701	1,069
23		0,093	0,206	0,000	0,001	0,700	1,090
24		0,093	0,207	0,001	0,000	0,699	1,110
25	4	0,090	0,206	0,011	0,000	0,694	1,131
26		0,090	0,206	0,011	0,000	0,694	1,150
27		0,090	0,206	0,011	0,000	0,694	1,170
28	5	0,090	0,206	0,011	0,000	0,694	1,189
29		0,090	0,206	0,011	0,000	0,694	1,208
30	6	0,090	0,206	0,010	0,000	0,694	1,226
31		0,090	0,206	0,009	0,000	0,695	1,244
32		0,090	0,206	0,008	0,000	0,695	1,260
33		0,091	0,206	0,007	0,000	0,696	1,275
34	7	0,092	0,207	0,004	0,000	0,697	1,289
35		0,093	0,207	0,000	0,000	0,699	1,301
36		0,092	0,205	0,000	0,002	0,700	1,312
37		0,091	0,202	0,000	0,005	0,701	1,321
38	8	0,091	0,202	0,000	0,006	0,702	1,327
39		0,090	0,201	0,000	0,006	0,702	1,332
40		0,090	0,200	0,000	0,007	0,702	1,334
41		0,089	0,199	0,000	0,008	0,703	1,333
42	9	0,089	0,199	0,000	0,008	0,703	1,329
43		0,089	0,199	0,000	0,008	0,703	1,324
44		0,089	0,199	0,000	0,009	0,703	1,316

Abb. 70 zeigt die berechneten Temperaturverläufe der Fluide bei den vorgegebenen Solidtemperaturen. Die Unterschiede zwischen den drei Ofeneinstellungen sind gering, weil sich - wie später gezeigt wird - auch die Wärmeübergangskoeffizienten nur geringfügig unterscheiden. Doch hat nach Ofeneinstellung {2}. - bei der Gegenstrom-Gleichstromberechnung - der Fluidtemperatur-verlauf im Bereich der Segmente 22 bis 24 einen ausgeprägten, nicht unerwünschten Sattel. Damit erreicht man vor der Reduktion eine Haltezeit im Solidtemperaturverlauf, der den „Reinigungsprozess“ der Ware mit hohem O₂-Gehalt und angepasster Temperatur unterstützt. Falls die Qualitätsansprüche an das Porzellan so einen Sattel im Fluidtemperaturverlauf der Fluide erfordern, dann lässt sich dieser natürlich auch für das Gegenstromprinzip und der theoretischen Luftzahleinstellung realisieren, indem die Brenner luftiger eingestellt werden. Allerdings erhöht sich damit auch der Energieverbrauch.

Abb. 71 gibt den Verlauf der für den Porzellanglattbrand wichtigen Komponenten O₂ und CO+H₂ in der Ofenatmosphäre für die drei verschiedenen Ofeneinstellungen wieder.

Für die im Vergleich zuerst genannte Einstellung - Gegenstromprinzip bei tatsächlicher Luftzahleinstellung (Ofeneinstellung {1}) - zeigen die Kurven in der eigentlich disponierten Reduktionszone den für eine oxidierende Verbrennung üblichen Atmosphärenverlauf mit O₂-Partialdrücken, die zwischen 0,024 bar und 0,046 bar liegen (s. Tabelle 19, Ofensegment 25 bis 36). Es fehlen hier die Reduktionskomponenten, weil der hohe Sauerstoffgehalt der Strömung aus der Hochtemperaturzone zu einer vollständigen Nachverbrennung trotz reduzierender Brennereinstellung führt.

Wie bereits erwähnt, ist bei diesen Prozessparametern kein Qualitätsporzellan zu erhalten. Nur in Ostasien, wo Rohstoffe mit geringsten Eisenoxidgehalten eingesetzt werden können, ist der Glattbrand von Porzellan unter rein oxidierenden Brennbedingungen möglich.

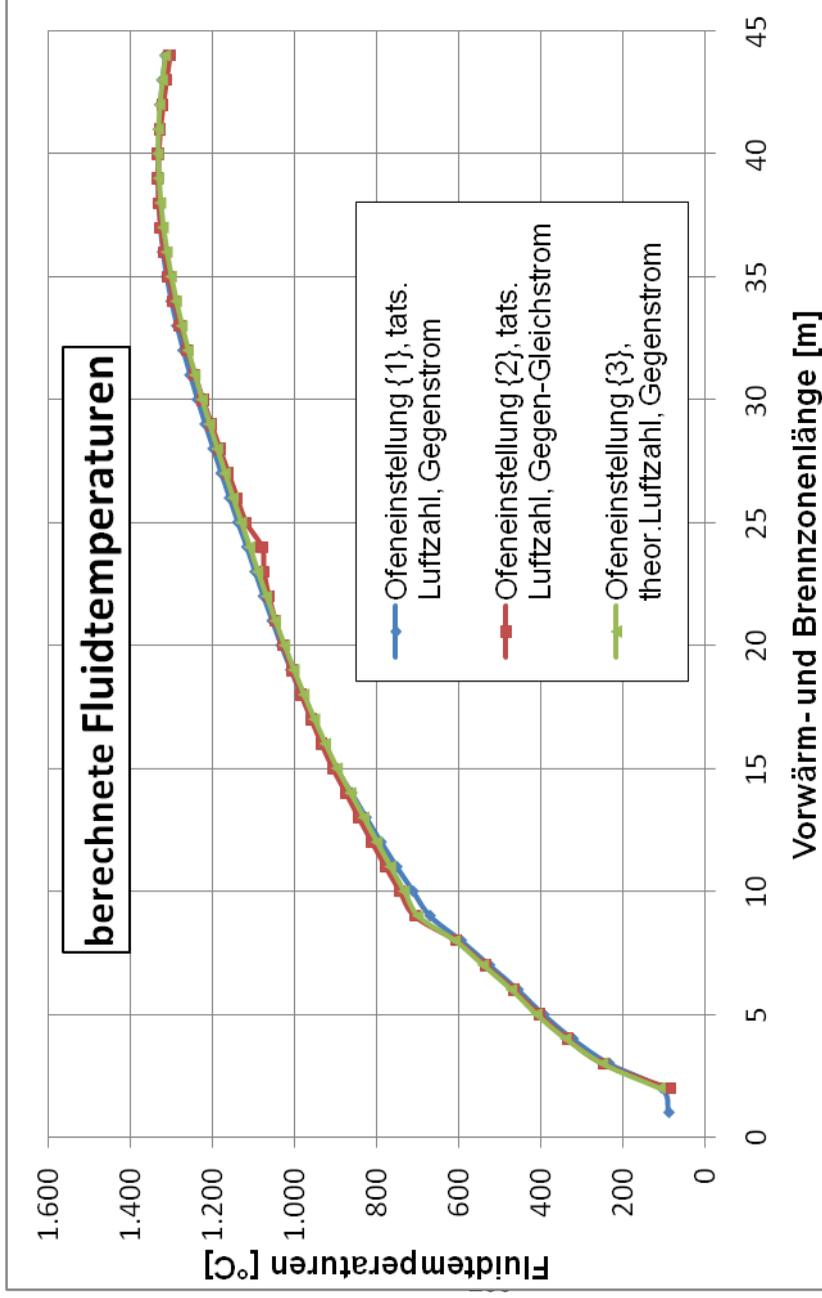


Abb. 70: berechnete Fluidtemperaturen

berechnete Partialdrücke

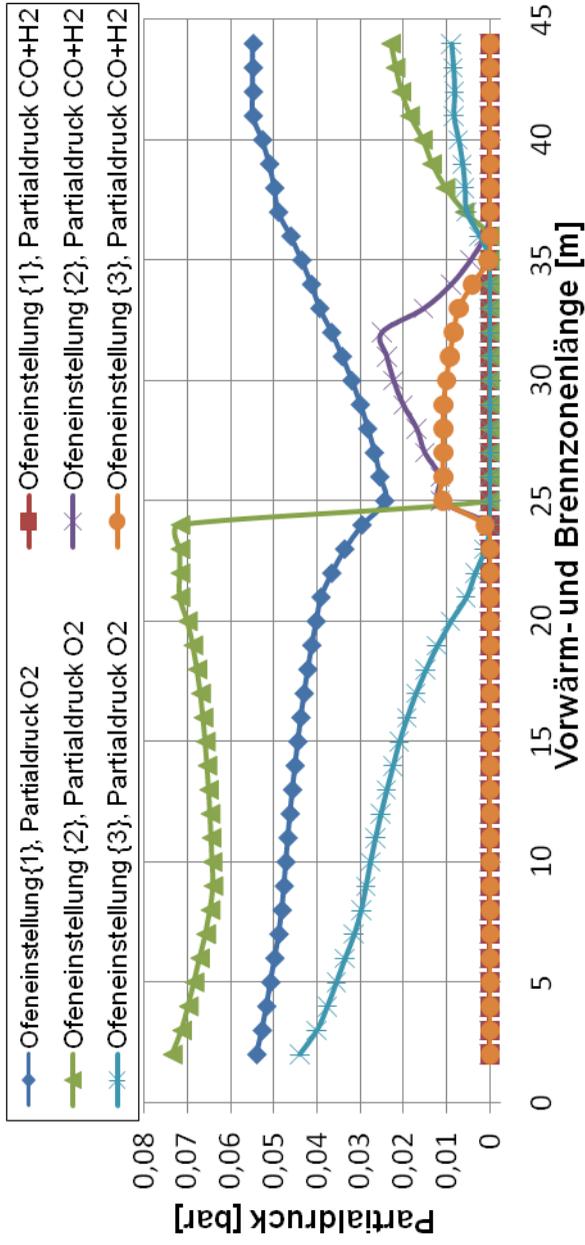


Abb. 71: berechnete Partialdrücke

Die Beeinflussungen der Fluidströmungen im Ofen gemäß der Ofeneinstellung {2} mit dem Gegenstromprinzip in der Vorwärm- und Reinigungszone - der Bereich bis einschließlich Ofensegment 24 - und mit dem anschließenden Gleichstromsystem ermöglichen eine strikte Trennung der Oxidation von der Reduktion, ohne dass es zu fließenden Übergängen kommt, wie die ent-sprechenden Kurven in Abb. 71 zeigen. Die reduzierende (CO+H₂) -Ofenatmosphäre beginnt im Ofensegment 25 und bleibt im weiteren Verlauf der Hochtemperaturzone bis einschließlich Ofen-segment 36 erhalten, obwohl bereits ab Ofensegment 33 eine oxidierende Luftzahleinstellung der Brenner der Regelgruppe RG 7 ($\lambda_V = 1,09$) angegeben ist. Der Sauerstoffgehalt aus der Primär-verbrennung in der Regelgruppe RG 7 reicht an dieser Stelle nicht aus, um eine vollständige Nachverbrennung der reduzierenden Komponenten im Ofenkanal zu bewirken. Erst in den letzten beiden Regelgruppen RG 8 und RG 9 sind alle reduzierenden Bestandteile abgebrannt und es können die erwünschten O₂-Komponenten festgestellt werden (vgl. Tabelle 20).

Die Ofeneinstellung {3} ist durch ein durchgehendes Gegenstromprinzip charakterisiert, aber mit einer Luftzahleinstellung der Brenner, die möglichst dicht an stöchiometrische Verhältnisse angepasst ist und die gleichzeitig die notwendigen Atmosphärenbedingungen in den Oxidations- und Reduktionszonen erfüllt. Wie Abb. 71 zeigt, unterscheidet sich die Ofeneinstellung {3} im Vergleich zu den Atmosphärenverläufen der beiden vorgenannten Betrachtungen durch geringe Werte der O₂- und (CO+H₂)-Komponenten.

In der praktischen Anwendung müssen weitere Berechnungen in der gezeigten Art die möglichen unterschiedlichen Solidmassenströme \dot{M}_S als zusätzlichen Parameter berücksichtigen, um dafür die Grenzbereiche der Luftzahleinstellungen unter Beibehaltung der Atmosphärenbedingungen festzulegen. Es ist zwar möglich, durch

den Einsatz von Atmosphärenmess- und Regelgeräten die Luftzahl der Brenneinstellung entsprechend zu verändern und/oder den Massenstrom in den Luftendüsungen zu steuern, aber der Einfluss auf die Investitionskosten ist nicht unerheblich.

Abb. 72 zeigt die Verläufe der Wärmeübergangskoeffizienten für Konvektion α_k und Strahlung α_r für alle drei Ofeneinstellungen. Bei allen betrachteten Ausführungen ist der konvektive Wärmeübergang nur in der unbeheizten Vorwärmzone von Bedeutung, weil hier Luft entsprechend den Angaben der Tabelle 14 eingedüst wird. Die eingedüsten Luftmassenströme sind abgeschätzt, weil für sie keine Messeinrichtungen zur Verfügung standen. Sie sind zwar gering, aber die Austrittsgeschwindigkeit ist wegen des kleinen Düsendurchmessers von 0,02m beträchtlich, so dass sich große Reynoldszahlen zwischen 115.000 und 230.000 ergeben. Eingesetzt in die von Lorenz [Lor] aufgestellte Gleichung (10.56) erhält man Nusselt-Zahlen und daraus nach Gleichung (10.55) die in Abb. 72 dargestellten Kurvenverläufe. Der Wärmeübergangskoeffizient durch Strahlung α_r zeigt bei allen drei Ofeneinstellungen ähnliche Verläufe. Die höchsten Werte liegen an Stellen der maximalen Fluidtemperaturen. Der starke Anstieg der Wärmeübergangskoeffizienten für Strahlung α_r ist hier entsprechend Gleichung (10.59) auf die Verknüpfung mit der absoluten Fluidtemperatur T_F durch die Funktion $\alpha_r \sim f(T_F^3)$ zurückzuführen.

Nur bei der Ofeneinstellung {2} wird in der Reduktionszone in den Ofensegmenten 28 – 33 der Wärmeübergangskoeffizienten für Strahlung α_r durch den CO-Anteil geringfügig beeinflusst. Die geringen Beträge des Produktes aus CO-Partialdruck und äquivalenter Schichtdicke $p_{CO} * s_{äq}$ von 0,0001 bis 0,002 ergeben nach Gleichung (10.71) Emissionsgrade ε_{CO} zwischen 0,0009 und 0,006, so dass man maximale Gesamtemissionsgrade der Fluide von $\varepsilon_F = 0,077$ und Wärmeübergangskoeffizienten für Strahlung nach Gleichung (10.59) mit $\alpha_r \approx 79$ (W/m²/K) erhält.

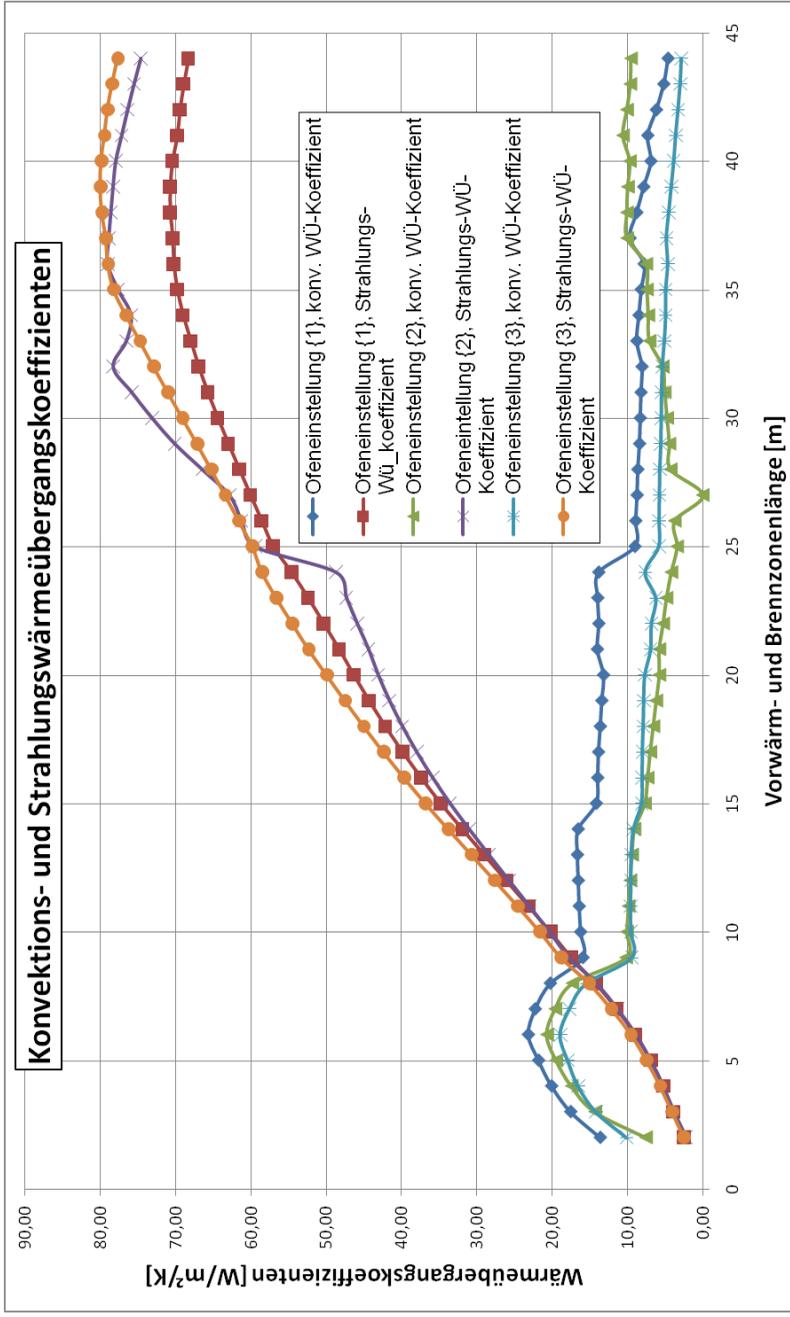


Abb. 72: Konvektions- und Strahlungswärmeübergangskoeffizienten

Bei der Ofeneinstellung {1} ist wie bereits ausgeführt überhaupt kein CO in der Ofenatmosphäre enthalten und bei der Ofeneinstellung {3} ist durch die nahstöchiometrische Brennerjustierung der CO-Partialdruck in der Reduktionszone so gering, dass nach den Angaben von Hottel [Hot] kein Emissionsgrad für CO angegeben werden kann.

Bei der theoretischen Ofeneinstellung {3} werden die höchsten Werte der Wärmeübergangskoeffizienten für Strahlung α_r erreicht, obwohl sich die Fluidtemperaturen bei den drei Einstellungen nur geringfügig unterscheiden. Der Grund hierfür ist der Einfluss der höheren CO₂ und H₂O-Partialdrücke, die man mit Luftzahlen bei nahstöchiometrischer Verbrennung erreicht.

Deutlich wird dies auch im Bereich der Atmosphärentrennung bei der Gegenstrom-Gleichstrom-Ofeneinstellung {2} zwischen den Ofensegmenten 24 und 25. Hier ist beim Übergang der Oxidation mit der Luftzahl $\lambda_V = 1,59$

und den Partialdrücken von CO₂ = 0,061 und H₂O = 0,143 zur Reduktion mit der Luftzahl

$$\lambda_V = 0,97$$

und den Partialdrücken von CO₂ = 0,09 und H₂O = 0,205 (vgl. Tabelle 20) ein Sprung des Strahlungswärmeübergangskoeffizienten von

$$\alpha_r = 49 \text{ W/m}^2/\text{K} \text{ zu } \alpha_r = 59 \text{ W/m}^2/\text{K}$$

festzustellen.

Den effektiven Wärmeübergangskoeffizienten α_{eff} bestimmt man aus Gleichung (8.1) mit dem Transientenfaktor $\kappa = 3$ [Jesch], weil der flache Teller als Platte angesehen werden kann. Der Gesamtwärmeübergangskoeffizient α_{ges} in Gleichung (8.1) setzt sich nach Gleichung (10.54) aus der Summe der Wärmeübergangskoeffizienten für Konvektion α_K und Strahlung α_r zusammen.

In **Abb. 73** sind alle effektiven Wärmeübergangskoeffizienten, deren Berechnungsmethode vorstehend beschrieben wurde, in der unbeheizten Vorwärmzone und in der Brennzone bis zum Beginn der Kühlzone, von Ofensegment 1 bis Ofensegment 44 aufgezeichnet. Die Werte des effektiven, aus den Messungen berechneten Wärmeübergangskoeffizienten sind wieder als Messpunkte aufgetragen und berücksichtigen die in Abb. 8 und im Kapitel 9.3 besprochene Reaktionsenthalpie der Spinellbildung.

Alle Kurvenverläufe zeigen die gleiche Tendenz mit anschwellenden Werten des Wärmeübergangskoeffizienten mit der Ofenlänge, d.h. mit steigenden Temperaturen.

Ausgehend von den Temperaturmessungen mit dem Datenlogger für Fluid und Solid erhält man nach Gleichung (9.4) effektive Wärmeübergangskoeffizienten α_{eff} , die stark streuen. Dies ist einerseits auf die empfindliche Messung mit der offenen Messperle zurückzuführen, andererseits wird bei der Auswertung nach Gleichung (9.4) deutlich, dass ein Fehler in der Fluidtemperaturmessung von 1 % eine Änderung des Wertes beim Wärmeübergangskoeffizienten von mehr als 4 % zur Folge hat. Entsprechend der Abb. 61 gleichen sich Fluid- und Solidtemperaturen zunächst an, so dass sich hier nach Gleichung 9.4 wegen der sich verringernden Temperaturdifferenz im Nenner der effektive Wärmeübergangskoeffizient α_{eff} vergrößern muss. Im weiteren Verlauf der Ofenlänge gehen - wie Abb. 61 zeigt - die Trendtemperaturverläufe wieder auseinander und der aus der Messung bestimmte effektive Wärmeübergangskoeffizient wird nach den Verknüpfungen mit Gleichung 9.4 kleiner.

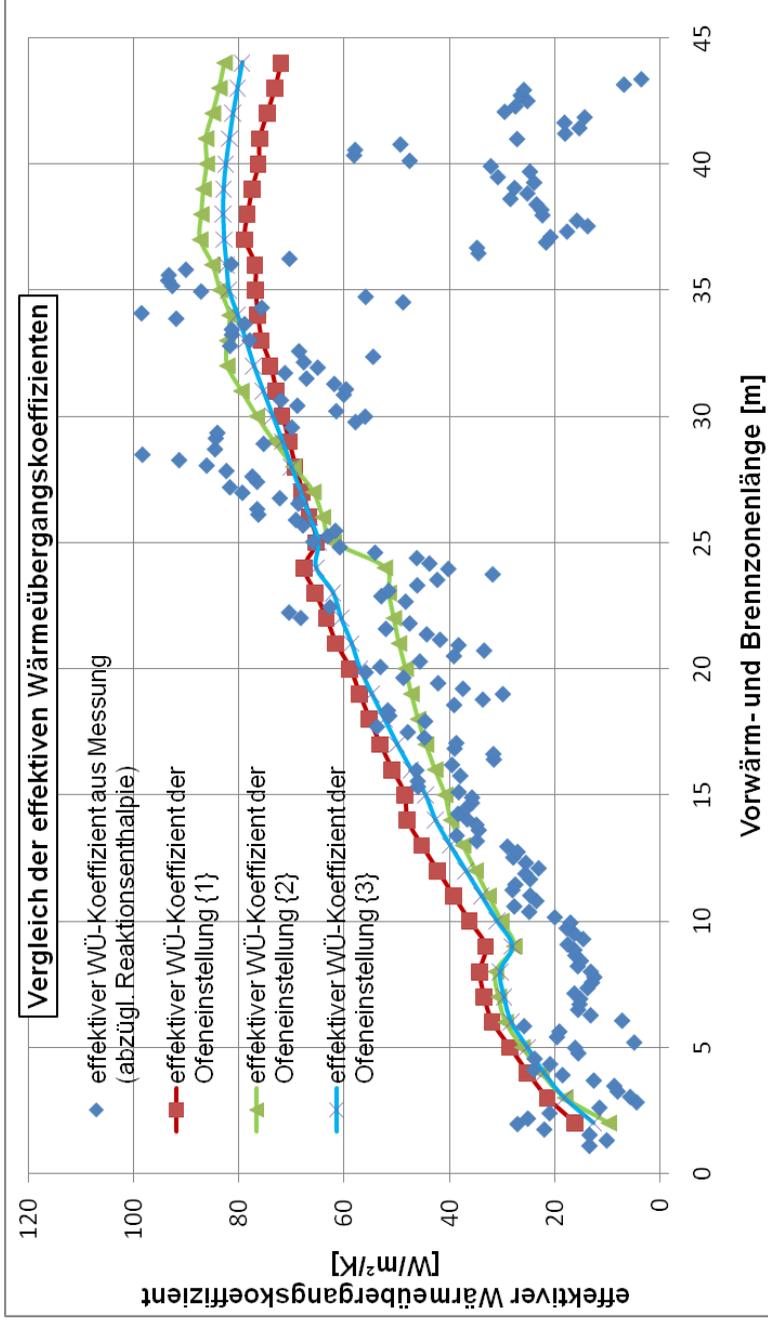


Abb. 73: effektive Wärmeübergangskoeffizienten

Die Ergebnisse der Messungen zeigen bis Mitte der Hochtemperaturzone eine vertretbare Übereinstimmung mit den Kurven der effektiven Wärmeübergangskoeffizienten, die aus den Ofeneinstellungen {1} bis {3} errechnet wurden. Die effektiven Wärmeübergangskoeffizienten der Ofeneinstellung {2}, die die dem realen Zustand des Ofens entspricht, weist deshalb auch den besten Einklang zu den errechneten Werten der Messung auf. Nur bei dieser Ofeneinstellung {2} beeinflusst der CO-Partialdruck den effektiven Wärmeübergangskoeffizienten α_{eff} , wenngleich auch nur im relativ geringen Maße. Nachdem die Bestimmungsgleichungen für die Emissionsgrade von H₂O und von CO₂ – Gleichung (10.70) und Tabelle 17 - erst ab Temperaturen von 727°C bzw. 927°C Gültigkeit besitzen, gelten unterhalb dieser Fluidtemperaturen die Werte für die effektiven Wärmeübergangskoeffizienten der Ofeneinstellungen {1} bis {3} nur mit Einschränkungen

Die Berechnungen der effektiven Wärmeübergangskoeffizienten für die Ofeneinstellungen {1} bis {3} berücksichtigen die atmosphärischen und temperaturabhängigen Bedingungen im Ofenkanal; sie geben deshalb die Wärmeübertragungsverhältnisse im Ofenraum korrekt wieder.

Obwohl Strömungsturbulenzen die Messungen mit der offenen Messperle beeinflussten, wahrscheinlich auch deren Fixierung sich löste und deshalb eine erhebliche Streuung der Messdaten zu beobachten ist, kann die Bestimmung der Wärmeübergangskoeffizienten aus den Messkurven für Solid und Fluid als Bestätigung der umfangreichen Berechnungen des effektiven Wärmeübergangskoeffizienten gelten. Theoretische Berechnungen zum Wärmeübergang in Ofenanlagen für den Glattbrand von Porzellan besitzen damit eine auf praktische Ergebnisse beruhende Basis.

Von größter Wichtigkeit ist der Energieverbrauch. In **Abb. 74** ist der Energieverbrauch in jedem beheizten

Ofensegment für die drei eingehend betrachteten Ofeneinstellungen

{1} Gegenstrom, reale Luftzahleinstellung

{2} Gegen- und Gleichstrom, reale Luftzahleinstellung

und

{3} Gegenstrom, mit theoretischer Luftzahleinstellung

als Säulendiagramm wiedergegeben.

Der Energieverbrauch bei den Ofeneinstellungen {1}. und {2}. ist in allen Ofensegmenten höher als bei der theoretischen Ofeneinstellung {3}. Die Ursache hierfür ist eine Luftzahleinstellung in {1} und {2}, bei der die Verbrennung entfernter von der Stöchiometrie abläuft als bei der theoretischen Ofeneinstellung unter {3}.

Der Einfluss der Luftzahl auf den Energieverbrauch ist bekannt und wird in der Analyse von Refaey [Ref] bestätigt, ebenso wie die Abnahme des Energieverbrauchs mit zunehmender Stanton-Zahl; denn bei der Ofeneinstellung {3} hat man geringere Fluidmassenströme, damit höhere Stanton-Zahlen und erreicht deshalb den geringeren Verbrauch im Vergleich zu {1} und {2}. Selbst im Bereich der Reduktion in den Ofensegmenten 25 bis 32 wird der Einfluss der Luftzahl auf den Energieverbrauch auch für die Ofeneinstellungen {1} und {2} deutlich. Hier unterscheidet sich die Luftzahl λ_V nur um 0,035 bis 0,085 von $\lambda_V = 1$ und deshalb ist der Energieverbrauch für diese beiden Ofeneinstellungen an dieser Stelle am geringsten. Auch im Vorwärmbereich wird weniger Wärme übertragen, weil nur noch ein kleiner Kapazitätsstrom des Fluid im Gegenstrom zur Ware in Richtung Ofeneinlauf fließt.

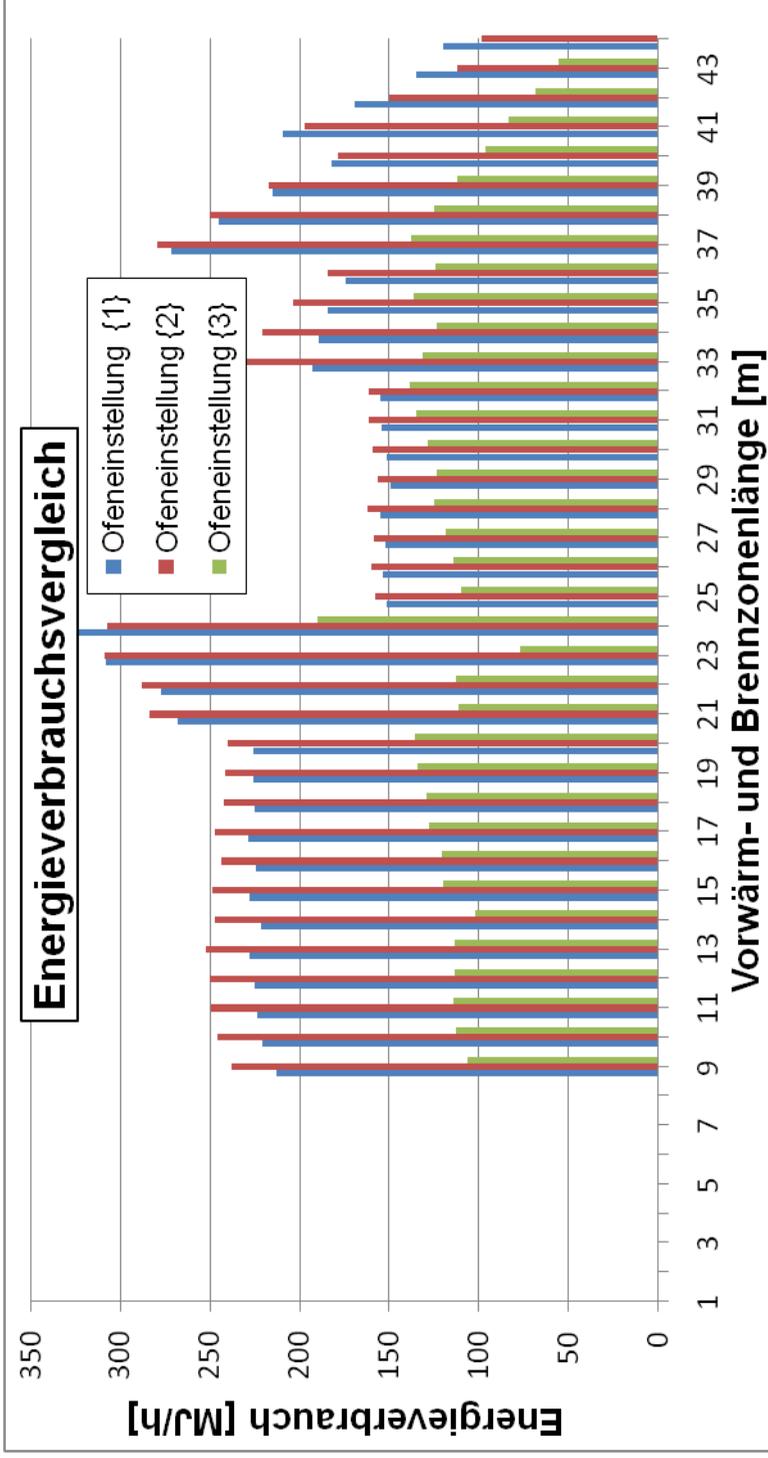


Abb. 74: Energieverbrauch in den Ofensegmenten

Die Ofeneinstellung unter {3} dagegen nutzt das effektive Gegenstrom-Wärmetauscherprinzip in der gesamten Vorwärm- und Brennzone, gleichzeitig ist im Hochtemperaturbereich die Luftzahl mit $\lambda_V = 1,05$ sehr dicht zur stöchiometrischen Verbrennung eingestellt, deshalb werden mit diesem Verfahren die günstigsten Verbrauchswerte erzielt.

Die Daten des spezifischen Energieverbrauchs sind das Kriterium, nach denen die energetische Güte einer brennstoffbeheizten Ofenanlage beurteilt wird. Diese Daten und die des Gesamtenergiebedarfs sind für die drei Ofeneinstellungen in **Tabelle 22** angegeben.

Tabelle 22: Vergleich des Energiebedarfs und des spezifischen Energieverbrauchs bei verschiedenen Brennverfahren und Einstellungen

Ofeneinstellung	Energieverbrauch [MJ/h]	spez. Energieverbrauch [kJ/kg]
Ofeneinstellung {1}, tats. Luftzahl, Gegenstrom	7.365	16.379
Ofeneinstellung {2}, tats. Luftzahl, Gegen+Gleichstrom	7.734	17.199
Ofeneinstellung {3}, theoretische Luftzahl, Gegenstrom	4.144	9.216

Den spezifischen Energieverbrauch gibt man nur mit der Masse der Teller ohne Einschluss der Brennhilfsmittelmasse oder

sonstiger Ballastmaterialien an. Im praktischen Produktionsbetrieb verändern sich von Brennwagen zu Brennwagen die Brenngutmassen, weil trotz gleichem Brennhilfsmittelaufbau die Tellergröße und damit der Massenstrom stark variiert. Eine Energieverbrauchsgarantie kann sich deshalb nur auf ein bestimmtes Brennhilfsmittel-Ware-Verhältnis und eine vorgegebene Produkt-Brennkurve beziehen.

12. Schlussfolgerung und Ausblick

Porzellan ist ein keramisches Produkt, das aus natürlichen Rohstoffen aufbereitet, geformt und gebrannt wird. Natürliche Rohstoffe bedeuten eine Vielzahl von unterschiedlich reinen, mineralischen Komponenten. Zusammen mit Additiven, die eine vorteilhafte Formgebung ermöglichen, beeinflussen sie während der thermischen Behandlung Materialreaktionen, die vorherige Untersuchungen zum Erkennen der kritischen Bereiche sinnvoll machen. Dies ist beim Glühbrand anzuraten, aber auch für einen erfolgreichen Glattbrand sind vorab verschiedene Kenntnisse notwendig, z.B. bei welchen Temperaturen die Glasur „schließt“, so dass mit hohem Sauerstoffgehalt in der Ofenatmosphäre und in genügend langer Zeit organische Bestandteile aus dem Scherben diffundieren können, bevor die Reduktionszone beginnt oder welche Zeit bei welcher Maximaltemperatur gefordert ist, bevor auf Grund zu hohem Schmelzphasenanteil Deformationen im Porzellan auftreten.

Wegen der besonderen Besatzform, der sich überlappenden stationären und instationären Wärmeübertragungsprozesse, der unterschiedlichen Fluidmischungen im Ofenraum, die im Tunnelofen an bestimmten Temperaturfixpunkten von oxidierenden zu reduzierenden Atmosphären wechseln müssen und ggfs. im Bereich der Maximaltemperatur zurück zur Oxidation verändert werden sollen, und weiterer im Text

erwähnter Einflüsse, ist der Glattbrand von Porzellan im Schnellbrandprozess ein sehr komplexes Brennverfahren.

Unter der Voraussetzung der verwendeten Ofenraumgeometrie und der daraus resultierenden Strömungsverhältnisse im Ofenkanal wird die vollständige Berechnung der verschiedenen Brennprozesse des Porzellanglattbrandes für jedes Ofensegment aufgezeigt. Damit wird es möglich, eine optimale Anpassung an Leistung und Luftzahleinstellung jedes Brenners am Ofen vorzunehmen.

Besondere Beachtung gilt der Bestimmung der Wärmeübergangskoeffizienten, die mit Hilfe von umfangreichen Schlepptemperaturmessungen an einer realen Tunnelofenanlage errechnet wurden. Die auf diese Weise ermittelten Werte werden in ihrer Größenordnung durch Berechnungen aus den Massenströmen der Fluide und der Fluidkonzentrationen, mit den vorgegebenen Solidtemperaturen und den Geometrien bestätigt.

Es wird bewiesen, dass die vermessene Schnellbrandofenanlage bis zum Beginn der Reduktionszone im Gegenstrom und im weiteren Verlauf der Brennzone im Gleichstrom zum Brenngut betrieben wird. Bei Unterstellung eines durchgehenden Gegenstroms in der gesamten Vorwärm- und Brennzone und bei der vor Ort vorgefundenen Luftzahleinstellung würde überhaupt keine Reduktionsatmosphäre im Ofenkanal auftreten, weil der Sauerstoffgehalt der Strömung aus benachbarten Ofensegmenten für eine vollständige Nachverbrennung sorgt. Qualitätsporzellan kann auf diese Weise nicht hergestellt werden.

Die Beibehaltung der Luftzahleinstellung ermöglicht einen gewünschten Atmosphärenwechsel im Ofenkanal, wenn im Bereich der Trennung zwischen Reduktion und Oxidation auch eine Aufteilung in Gegen- und Gleichstrom realisiert wird. Dies wird erreicht, wenn für den Trennungsbereich der höchste Ofendruck eingestellt wird, indem die Absaugung am Ofeneinlauf mit der Zwischenabsaugung vor der Kühlzone abgestimmt wird.

Energetisch ist diese Ofeneinstellung ungünstiger, wie Abb. 74 und Tabelle 22 gezeigt haben, weil beim Gleichstromprinzip die Abgasverluste der Zwischenabsaugung durch die hohen Fluidtemperaturen groß sind.

Es wird eine umfassende Beispielrechnung aufgezeigt, die auf eine Ofeneinstellung hinweist, mit der Qualitätsporzellan mit geringem Energieaufwand im Schnellbrandofen hergestellt werden kann. Dabei wird das zu bevorzugende Gegenstromprinzip genutzt und eine nahstöchiometrische Brennereinstellung gewählt.

Es ist möglich, fehlerfreie Ware zu produzieren und den Energieverbrauch unter Beibehaltung des Gegenstromprinzips und mit Berücksichtigung der Atmosphärenbedingungen zu verringern, wenn

- die Masse der Brennhilfsmittel weiter reduziert wird,
- ein gleichmäßiger Besatz und ein konstanter Solidmassenstrom verwendet wird,
- alle Brenner mit nahstöchiometrischer Luftzahleinstellung betrieben werden,
- im Hochtemperaturbereich mit nahstöchiometrischer oxidierender Verbrennung geringe Fluidmassenströme auftreten,
- - in Strömungsrichtung gesehen - der Sauerstoffgehalt der Strömung aus dem Hochtemperaturbereich gering ist, so dass im Reduktionsbereich die unvollständige Verbrennung mit schwacher Reduktionseinstellung der Brenner ablaufen kann,
- - in Strömungsrichtung gesehen - beim Übergang von reduzierender zu oxidierender Ofenatmosphäre der Sauerstoffgehalt der Verbrennungsabgase aus den Brennern groß genug ist, um die Reduktionskomponenten vollständig zu verbrennen,

- in der Reinigungszone ausreichend Sauerstoff in der Atmosphäre vorhanden ist, damit die Diffusionsprozesse im zu säubernden Scherben vollständig ablaufen können,
- die Verbrennungsluft hoch vorgewärmt wird,
- Injektorbrenner nach der Patentanmeldung WO 2009/089599 A1 eingesetzt werden könnten, die im Hochtemperaturbereich heiße Luft aus der Kühlzone als Verbrennungsluft selbsttätig ansaugen,
- Ballastmassen reduziert werden durch ändern des Transportprinzips von Ofenwagen zu Rollen.

Es ist aber auch ratsam, zusätzlich geeignete Wege zu finden, um die weiterhin anfallenden Enthalpien der heißen Abgase aus dem Ofen zu nutzen. Specht et al. [SSS] machen interessante Vorschläge, um aus der Abwärme Strom und/oder Kälte in Absorptionskältemaschinen oder Kompressionskältemaschinen zu erzeugen.

Fossile Brennstoffe werden auf absehbare Zeit knapper und damit teurer. Als mögliche Alternative kann Wasserstoff herhalten, den man bei der Redoxreaktion mit Strom aus regenerativen Energiequellen produziert, um damit Ofenanlagen zu beheizen

Direkte Elektrobeheizung in Tunnelöfen für die keramische Industrie ist seit langem bekannt. Für große Kapazitäten kämen Tunnelöfen mit Wagenförderung in Betracht, die mit Heizelementen an den Innenseiten der Ofenwände ausgerüstet sind. Da die Besatzaufbauten wie Strahlungsschirme die Wärmeübertragung und dadurch die Temperaturgleichmäßigkeit im Ofenkanalquerschnitt hemmen, beträgt die Nutzbreite solcher Tunnelöfen nur ca. 0,7 m, so dass die gewünschten Kapazitäten über größere Nutzhöhen von >1 m erreicht werden müssen. Das geht jedoch auf Kosten der Betriebssicherheit und der Temperaturgleichmäßigkeit.

Der Rollenofen für den Glattbrand von Porzellan hat z.Zt. wegen der maximalen Länge der Rollen aus SiC eine Nutzbreite von ca. 1,4 m. Wenn es gelingt, durch in den Wänden liegende Heißlager [WEB] die Energieverluste durch die Wanddurchbrüche zu verringern, evtl. Verunreinigungen dieser Lager durch Glasurdämpfe zu vermeiden und die Produktivität der dann größeren nutzbaren Rollenlänge zu steigern, ist ein weiterer Schritt zur Energieeinsparung getan.

Beim Rollenofen ist die Elektroheizung über die gesamte Nutzbreite oberhalb und unterhalb der Ware und Rollenebene installiert. Bei der üblichen Nutzhöhe von 0,4 m bis 0,5 m kann so die Wärmeübertragung optimal genutzt und die geforderte Temperaturgleichmäßigkeit problemlos erfüllt werden. Die Atmosphärenbedingungen lassen sich bei elektrobeheizten Tunnelöfen durch Eindüsungen von Inert- und Reduktionsgasen in den bestimmten Temperaturbereichen erfüllen.

Die Berechnungen zeigen, dass die Anwendung der dargelegten physikalischen Zusammenhänge in einem „Excel“-Programm machbar ist. Das gibt dem Lieferanten Gewissheit bei der Auslegung und dem Betreiber Sicherheit für den Betrieb der Ofenanlage.

Zur weiteren Optimierung der Wärmeübertragung und Temperaturgleichmäßigkeit im Ofenkanalquerschnitt eignen sich umfangreiche Computersimulationen. Ein interessanter Vorschlag wird im Forschungsbericht 89/6100 [FOGI] gemacht, in dem die Simulation des Ofenraums von Vorwärm- und Brennzonen eines Tunnelofens für den Dachpfannenbrand beschrieben wird. Als Ansatz dient das k - ω -Turbulenzmodell in der Anwendung für poröse Medien.

13. Literaturverzeichnis

- [ADINA] ADINA R & D, Inc.:ADINA User Interface, User Guide, USA: ADINA R & D, Inc., Juni 2001
- [AuDi] Autorenteam des Redaktionsausschusses im Didier-Forschungsinstitut, DKG-Technische Keramische Werkstoffe, Dt. Wirtschaftsdienst, Köln, Mai 1995, Kapitel 8.1.2.0, S.13
- [Bathe] Bathe, K.-J.: Finite-Elemente-Methoden, Springer Berlin, 2002
- [BBM] Bauer, W.; Becker, F.; Moldenhauer, A.: "Spectral Emissivities of SiC Kiln Furniture and Porcelain". L'industrie ceramic et verrière, 985 (2003) 50
- [Baum] Baumann, H.; Becker, F.: interner Erfahrungsaustausch bei Fa. Riedhammer Handschriftl. Notiz vom 16.06.1996
- [Bec1] Pfeifer, F.; Nacke, B.; Beneke, F.: Praxishandbuch Thermoprozesstechnik, Band I; 2. Auflage, Vulkan Verlag Essen, 2010. Kap.2.3 Becker,F.: „Grundlagen der technischen Wärmebehandlung von nichtmetallisch-anorganischen Werkstoffen“.
- [Bec2] Pfeifer, F.; Nacke, B.; Beneke, F.: Praxishandbuch Thermoprozesstechnik, Band II; Anlagen Komponenten Sicherheit 2. Auflage, Vulkan Verlag Essen, 2011. Kap.3.4 Becker, F.: „Ofenanlagen und Brennprozesse für die Keramik“.

- [Bec3] Becker, F.: Debinding Processes: "Physical and Chemical Conclusions and their Practical Realisations", cfi/Ber.DKG 83 (2006) No. 5, S.E88-E99
- [Bec4] Becker, F.: „Anlagen zur thermischen Behandlung keramischer Produkte“, Vortrag bei der DKG-Jahrestagung, Höhr-Grenzhausen, Mai 2008
- [Bec5] Becker, F.: „Brenntechnologie – wichtiges Glied in der keramischen Produktionskette.“ Seminarvortrag zur DKG-Jahrestagung, München, Oktober 2000.
- [Bec6] Becker, F.: „Energierückgewinnung aus Kühlluft und Abgasen von Tunnelöfen“. Vortrag zum Table Ware Day bei Fa. Riedhammer GmbH, 4.Juli 2008.
- [Bec7] Becker, F.: „Computersimulation zur Lösung wärmetechnischer Aufgaben im keramischen Ofenbau“, Vortrag zum DKG-Symposium: Energiesparende und umweltschonende Verfahren in der keramischen Fertigung, Bayreuth, 6. Dez. 2000
- [Bec8] von Starck, A.; Mühlbauer, A.; Kramer, C.: Handbook of Thermoprocessing Technologies; Fundamentals, Processes, Components, Safety; Part II, Becker, F.: Kapitel 3.4.2: Plants for ceramics; Vulkan-Verlag GmbH, 2005.
- [Blu] Blumm, J.: „Thermische Analyse in der Keramik“. Das Keramiker-Jahrbuch 1997, S.59-S.69

- [BLW] Becker, F.; Lorenz,L; Walter,G: „Numerische Simulation der Wärmeübertragung an gestapelte Güter am Beispiel des Porzellanbrandes“. GASWÄRME-International **56** (2007) [4], S.300-303.
- [BLW2] Becker, F.; Lorenz, L; Walter, G: „Heat exchange in a fast firing kiln for glost firing of porcelain.“cfi/Ber.DKG,83, (2006), No. 9,S.E1-E5.
- [BO] Brindley, G.W; Ougland, R.M.: "Quantitative Studies of High Temperature Reactions of Quartz-Kaolinite-Feldspar Mixtures", Trans.Brit.Ceram.Soc. **61** (1962) S.599-614.
- [Bock] Bock, Otto: Deutsches Reichspatent (DRP 522 und DRP 1340) vom 27.4.1874
- [Brun] Brunklaus, J.Henri: Industrieofenbau, Die Grundlagen der Öfen für Industrie und Gewerbe. Vulkan-Verlag Dr. W. Classen, Essen 1969
- [Cry] technische Angaben der Fa. Saint Gobain, Rödental, zum Werkstoff Crystar 2000
- [Cry2] Feuer, H.: „Laser flash thermal conductivity results“, Email-Antwort zur Anfrage von Becker, F. zu Crystar 2000, 15. Dez. 2006
- [DDRB] Dannert, C., Durschang, B., Raether, F., Becker, F.: "Optimisation of sintering processes for porcelain using in-situ measuring methods". Beitrag zur Materials Week, München 2000, www.proceedings.materialsweek.org/proceed/mw2000_532.pdf

- [DGFS1] Deutsche Gesellschaft Feuerfest- und Schornsteinbau e.V.: Feuerfestbau, Stoffe-Konstruktion-Ausführung, 2.Auflage, Vulkan-Verlag, Essen 1994, S.8
- [DGFS2] Deutsche Gesellschaft Feuerfest- und Schornsteinbau e.V.: Feuerfestbau, Stoffe-Konstruktion-Ausführung, 2.Auflage, Vulkan-Verlag, Essen 1994,S.9
- [DGFS3] Deutsche Gesellschaft Feuerfest- und Schornsteinbau e.V.: Feuerfestbau, Stoffe-Konstruktion-Ausführung, 2.Auflage, Vulkan-Verlag, Essen 1994, S.11
- [DGFS4] Deutsche Gesellschaft Feuerfest- und Schornsteinbau e.V.: Feuerfestbau, Stoffe-Konstruktion-Ausführung, 2.Auflage, Vulkan-Verlag, Essen 1994,S.14
- [DGFS5] Deutsche Gesellschaft Feuerfest- und Schornsteinbau e.V.: Feuerfestbau, Stoffe-Konstruktion-Ausführung, 2.Auflage, Vulkan-Verlag, Essen 1994,S.15
- [DGFS6] Deutsche Gesellschaft Feuerfest- und Schornsteinbau e.V.: Feuerfestbau, Stoffe-Konstruktion-Ausführung, 2.Auflage, Vulkan-Verlag, Essen 1994,S.17
- [DGFS7] Deutsche Gesellschaft Feuerfest- und Schornsteinbau e.V.: Feuerfestbau, Stoffe-Konstruktion-Ausführung, 2.Auflage, Vulkan-Verlag, Essen 1994,S.28

- [DGFS8] Deutsche Gesellschaft Feuerfest- und Schornsteinbau e.V.: Feuerfestbau, Stoffe-Konstruktion-Ausführung, 2.Auflage, Vulkan-Verlag, Essen 1994,S.45
- [DIFT]. Didier Feuerfesttechnik, Feuerfeste Baustoffe und ihre Eigenschaften, 8. Auflage 1974, S.36
- [Dub1] Dubbel-Taschenbuch für den Maschinenbau, 23. Auflage, herausgegeben von K.-H. Grote und J. Feldhusen, ISBN 978-3-17305-9, e-ISBN 978-3-642-17306-6, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, K Thermischer Apparatebau und Industrieöfen, F.Becker, H. Gelbe, L. Mörl, E. Specht.:K4, 1.3
- [EBE] EBEST: „Erhöhung der Beständigkeit von Hochtemperaturwärmedämmmaterialien in Industrieöfen mit wasserstoffhaltigen Schutzgasatmosphären“, Vorhaben 14230 BR, Abschlussbericht, gefördert durch das BMWA, Bonn über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen e.V. (AiFNr. 14230 BR)
- [FOGI] Forschungsbericht 89/6100: „Experimentelle und rechnerische Bestimmung von örtlichen Temperaturen bei der Wärmebehandlung von gestapelten Gütern in Industrieöfen, 2014
- [Gnie] Gnielinski, V.: „Wärmeübertragung bei Strömung längs einer ebenen Wand“. VDI-Wärmeatlas (2006), Gd1
- [Hart] Hartschuh, E.:“Improved burner system“. Patent WO 2009/089599 A1, 23.7.2009.

- [Hein] Heinrich, J.: „Physikalische und chemische Grundlagen der Keramik, Teil 1, struktureller Aufbau keramischer Werkstoffe“, Vorlesung an der TU-Clausthal, Vorlesungsmanuscript 2. Auflage 2009, S. 101.
- [Hen] Henkel, L.:“Experimentelle Bestimmung des Druckverlustes und der Strömungsgeschwindigkeiten in einem Modell eines Schnellbrand-Tunnelofens für den Glattbrand von Porzellan“, Diplomarbeit an der TU-Clausthal, Dez. 1997.
- [HenKer] Henniecke, H.W.; Kersting,R.: „Über die Temperaturwechselbeständigkeit keramischer Werkstoffe“; Handbuch der Keramik, Verlag Schmid GmbH, Freiburg, 1970, Gruppe IV B 2 i
- [Hot] Hottel, H.C.; A.F. Sarofim: Radiative Transfer; McGraw-Hill Book Company, New York 1967, S. 236
- [ISFK] Institut für Struktur- und Funktionskeramik, „Kantenfestigkeit“, www.isfk.at/de/1603
- [Jesch] Jeschar, R., Alt, R., Specht, E.: „Grundlagen der Wärmeübertragung“, Viola-Jeschar-Verlag Goslar, 1990, S.140
- [Kin] W.D. Kingery: „Densification during sintering in the presence of a liquid phase“, J. appl. Phys. **30** (1959) 301-306
- [Kon] Konold, U.: nicht veröffentlichter Bericht: “ETA research project“; Gas-Wärme-Institut, Essen, 2004, S. 97-136

- [Krie1] Kriegesmann, J.: DKG-Technische Keramische Werkstoffe, Dt. Wirtschaftsdienst, Köln, 1989, Kapitel 2.1, S. 1
- [Krie2] Kriegesmann, J.: DKG-Technische Keramische Werkstoffe, Dt. Wirtschaftsdienst, Köln, 1989, Kapitel 3.6.1.0
- [Lor] Lorenz, L.: "Wärmeübertragung durch überlagerte Strömungen an gestapelte Güter am Beispiel des Flachgeschirr-Brandes in Durchlauföfen". Dissertation an der Fakultät für Maschinenbau, Verfahrens- und Energietechnik der Technischen Universität Bergakademie Freiberg, 4.Okt. 2007.
- [Prom] Promat Internetauftritt: „Theoretische Grundlagen der technischen Wärmedämmung“, www.promat.de/twd/default.aspx?pagename=Gru ndlagen
- [Ref] Refaey, H.A.M.H.: "Mathematical Model to Analyze the Heat Transfer in Tunnel kilns for Burning Ceramics". Dissertation an der Fakultät für Verfahrens- und Systemtechnik der Otto-von-Guericke-Universität, Magdeburg, 2013, Kapitel 6.
- [Reh1] Reh, H.: „Zur Klassifizierung der Keramik“, Keram.Z. 38 (1986), S. 128-129
- [Reh2] Reh, H.: „Die Hochleistungskeramik, I. Definition und wirtschaftliche Bedeutung“, Keram. Z. **38** (1986) S. 130-133
- [Rödl] Rödl, R.: "FEM-Simulation der Geschwindigkeitsverteilung in einem Schnellbrand-Durchlaufofen für den Glattbrand von Porzellan-Flachware". Diplomarbeit an der Simon-Ohm-Fachhochschule Nürnberg, 2002

- [SaS1] Salmang Scholze; Keramik,7. Vollständig neubearbeitete und erweiterte Auflage, Herausgegeben von Rainer Telle, ISBN-10 3-540-63273-5 Springer Berlin Heidelberg New York, ISBN-13 978-3-540-63273-3 5 Springer Berlin Heidelberg New York, S.646
- [SaS2] Salmang Scholze; Keramik,7. Vollständig neubearbeitete und erweiterte Auflage, Herausgegeben von Rainer Telle, ISBN-10 3-540-63273-5 Springer Berlin Heidelberg New York, ISBN-13 978-3-540-63273-3 5 Springer Berlin Heidelberg New York, S.244
- [SaS3] Salmang Scholze; Keramik,7. Vollständig neubearbeitete und erweiterte Auflage, Herausgegeben von Rainer Telle, ISBN-10 3-540-63273-5 Springer Berlin Heidelberg New York, ISBN-13 978-3-540-63273-3 5 Springer Berlin Heidelberg New York, S.334
- [SaS4] Salmang Scholze; Keramik,7. Vollständig neubearbeitete und erweiterte Auflage, Herausgegeben von Rainer Telle, ISBN-10 3-540-63273-5 Springer Berlin Heidelberg New York, ISBN-13 978-3-540-63273-3 5 Springer Berlin Heidelberg New York,S.367
- [SaS5] Salmang Scholze; Keramik,7. Vollständig neubearbeitete und erweiterte Auflage, Herausgegeben von Rainer Telle, ISBN-10 3-540-63273-5 Springer Berlin Heidelberg New York, ISBN-13 978-3-540-63273-3 5 Springer Berlin Heidelberg New York, S.912

- [SaS6] Salmang Scholze; Keramik,7. Vollständig neubearbeitete und erweiterte Auflage, Herausgegeben von Rainer Telle, ISBN-10 3-540-63273-5 Springer Berlin Heidelberg New York, ISBN-13 978-3-540-63273-3 5 Springer Berlin Heidelberg New York, S. 907
- [SaS7] Salmang Scholze; Keramik,7. Vollständig neubearbeitete und erweiterte Auflage, Herausgegeben von Rainer Telle, ISBN-10 3-540-63273-5 Springer Berlin Heidelberg New York, ISBN-13 978-3-540-63273-3 5 Springer Berlin Heidelberg New York, S. 368
- Scha] Schatt, W.: Einführung in die Werkstoffwissenschaft, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1983, S.422
- [Schu] Schulz, K.: „Modell zur Berechnung der thermomechanischen Spannungen beim Glühbrand von isostatisch gepressten Erzeugnissen auf Grundlage der Finite-Element-Methode“. Dissertation, TU Bergakademie Freiberg, 1996
- [Schü] [Hen] Schüller, K. H.; Hennicke, H. W.: „Zur Systematik der keramischen Werkstoffe“, cfi/Ber. DKG **62** (1985) S. 259-263
- [Schü1] Schüller, K.H.:“Porzellan“, Handbuch der Keramik, Verlag Schmid GmbH, Freiburg i.Brg. Gruppe II A, S.1j
- [Schü2] Salamang H., Scholze, H.: Keramik, 7. Auflage, Herausgeber R. Telle, ISBN-10 3-540-63273-5 Springer Berlin Heidelberg New York; Schüller, K.-H.: 8 Silicatkeramik, S. 693

- [Schup] Schupe, W.: „Vereinfachte Berechnung des Strahlungswärmeübergangs in Industrieöfen und Vergleich mit Messungen in einer Versuchskammer“, Dissertation, genehmigt von der Fakultät für Bergbau, Hüttenwesen und Maschinenwesen der Technischen Universität Clausthal, 1974, S. 82-93
- [SchZ] Schwiete, H.E., Ziegler, G.: „Berechnung der Nutzwärme von keramischen Scherben“, Berichte der Deutschen Keramischen Gesellschaft, 33, (1956), S.184-194.
- [Simu] Simu-Therm Heat Flow Simulation, Hilger & Daniel Software GmbH, Brühl, Simu-Therm 7.1, Okt. 2013
- [Sla] Sladeck, R.: „Moderne Brenntechnik für Haushalts- und Hotelgeschirr sowie Zierkeramik – Identifizierung und Bewertung der silikatkeramischen Komponenten mittels thermischer Analysen“. Keram. Zeitschrift (37),Nr.10, 1985, S.544-550
- [Spec1] Specht; E.: Wärme- und Stoffübertragung in der Thermoprozesstechnik, Grundlagen, Berechnungen, Prozesse, Vulkan- Verlag GmbH, Essen, 2014, S. 309; ISBN 978-3-8027-2973-7
- [Spec 2] Specht, E; Alt, R; Jeschar, R.: “Grundlagen der Wärmeübertragung“ Institut für Energieverfahrenstechnik, TU Clausthal, 3. Auflage, Viola Jeschar Verlag, Goslar , 1990, S.45-46
- [Spec3] Specht; E.: Wärme- und Stoffübertragung in der Thermoprozesstechnik, Grundlagen, Berechnungen, Prozesse, Vulkan- Verlag GmbH,

- Essen, 2014, S. 284; ISBN 978-3-8027-2973-7
[S.340, 353]
- [Spec4] Specht; E.: Wärme- und Stoffübertragung in der Thermoprozesstechnik, Grundlagen, Berechnungen, Prozesse, Vulkan- Verlag GmbH, Essen, 2014, S. 269; ISBN 978-3-8027-2973-7
- [Spec5] Specht; E.: Wärme- und Stoffübertragung in der Thermoprozesstechnik, Grundlagen, Berechnungen, Prozesse, Vulkan- Verlag GmbH, Essen, 2014, S. 286; ISBN 978-3-8027-2973-7
- [Spec6] Specht; E.: Wärme- und Stoffübertragung in der Thermoprozesstechnik, Grundlagen, Berechnungen, Prozesse, Vulkan- Verlag GmbH, Essen, 2014, S. 274; ISBN 978-3-8027-2973-7
- [SSS] Specht, E.; Sauerhering, J.; Schmidt, J.: „Abwärmenutzung von Industrieöfen zur Strom- und Kälteerzeugung“ gaswärme international, 4 (2015), S.49-55
- [Spod] <http://de.wikipedia.org/wiki/spodium>; Juni 2010
- [Syst] Systat Software Inc.: „tableCurve 3D“ Ver. 4, 40699 Erkrath
- [VDFFI] Verband der deutschen Feuerfest-Industrie e.V., www.vdfffi.de/feuerfest
- [Walt1] Walter, G.: „Arbeitsblätter zur wärmetechnischen Berechnung von Hochtemperaturanlagen“, TU Bergakademie Freiberg, Professur HTA, IOW 364.3
- [Walt2] Walter, G.: „Arbeitsblätter zur wärmetechnischen Berechnung von Hochtemperaturanlagen“, TU Bergakademie Freiberg, Professur HTA, IOW 410.2

- [wiki] <http://de.wikipedia.org/wiki/Hochtemperaturwolle>
- [WEB] Walter, G., Eler, F. Becker, F.: „Entwicklung von hochtemperaturbeständigen Lagern bei Transportrollen in Öfen der Ziegelindustrie“; Gaswärme International (52),Nr.7,(2003), S.434-439
- [WS] WS Wärmeprozessestechnik GmbH, Werbeprospekt, 2015
- [Yu] Yu, Junliang: „Modelling the Burning of Porcelain Plates in Tunnel Kilns“, Master Thesis an der Fakultät für Verfahrens- und Systemtechnik, Institut für Strömungstechnik und Thermodynamik, Otto-von-Guericke-Universität, Magdeburg, November 2013, S. 38 ff.
- [Zapp] Zapp, F. „Kleine Wärmelehre für Keramiker“, Verlag Deutsche Keramische Gesellschaft e.V., 1959

Anhang Messdaten

Messprotokoll 1:
Vorschubeinstellung

Startpunkt	m	1,1
(Entfernung vom Ofeneingang)		
Ofenlänge	m	70
Ofenwagenlänge	m	1,76
Taktzeit	s	490
	min	8,17
Anzahl Ofenwagen im Ofen		39,77
Durchlaufzeitzeit	h	5,41
Geschwindigkeit der Ofenwagen	m/s	0,0036
	m/min	0,216
	m/h	12,93
Zeit/Weg	s/m	278,4
	min/m	4,6

Messprotokoll 2:

Brennerregelgruppeneinstellung

Regelgruppen- Nr./ Schreib- element	Regel- element- position am Ofen [m]	Tem- peratur- einstellung [°C]	Gas- verbrauch [Nm ³ /h]	Gas - Luft- verhältnis 1:X	Luft- zahl λ_v
RG 0/S3	10,25	900	7,1	14,02	1,46
RG 1/S4	15,25	1009	10,2	14,02	1,46
RG 2/S5	18,25	1083	19,4	14,02	1,46
RG 3/S6	22,25	1170	14,4	15,26	1,59
RG 4/S7	25,25	1170	9	9,29	0,97
RG 5/S8	27,25	1212	8	9,03	0,94
RG 6/S9	30,25	1275	28,1	8,77	0,92
RG 7/S10	34,25	1332	21,1	10,42	1,09
RG 8/S11	38,25	1351	27,3	12,52	1,31
RG 9/S12	42,25	1362	15,6	16,17	1,69

Messprotokoll 3

Schreibstellentemperaturen

Schreibstellen-Nr.	Schreiberelement-position [m]	Temperatur [°C]
S1	2,5	338
S2	6,5	491
S3	10,75	887
S4	15	1008
S5	18,25	1082
S6	22,25	1161
S7	25	1161
S8	27	1203
S9	30,25	1274
S10	34,25	1334
S11	38,25	1351
S12	42,25	1364
S13	46,75	1338
S14	50,5	1288
S15	54,25	1167
S16	58,25	882
S17	62,25	231
S18	66,25	90
S19	Entlastungsabsaugung	240
S20	Warmluft	321
S21	Intensivkühlg.-Absaug.	110

Messprotokoll 4:

Außenwandtemperaturen

Modul-Nr.	Temperatur [°C]	Temperatur [°C]	Temperatur [°C]	Umgebungstemperatur in [°C]
1	38	31	29	28
2	38	34	30	28
3	50	34	31	28
4	58	39	32	28
5	34	40	48	28
6	34	41	39	28
7	38	48	68	28
8	45	65	67	28
9	46	65	67	28
10	50	74	74	28
11	49	57	67	28
12	50	59	64	33
13	67	98	101	33
14	74	103	88	33
15	62	89	83	33
16	63	92	90	33
17	56	83	88	33
18	60	86	88	33
19	61	88	86	33
20	61	88	92	33
21	61	85	90	33
22	60	88	77	33
23	52	74	73	29
24	49	78	72	29
25	43	66	61	29
26	44	66	65	29
27	40	59	54	29
28	41	53	53	29
29	83	60	57	29
30	76	56	57	29
31	40	48	51	29
32	35	38	41	29

Messprotokoll 5: Datenlogger Temperaturen

Messpunkt [m]	Zeit [s]	Zeit [min]	Meßstelle 1	Meßstelle 2	Meßstelle 3	Meßstelle 4	Meßstelle 5	Meßstelle 6
1,100	0	0,00	290,4	163,2	85,9	76,8	78,1	70,9
1,136	10	0,17	284	164,5	87,7	77,7	79,9	71,2
1,172	20	0,33	289,3	168,7	89,6	79,7	80,9	71,9
1,208	30	0,50	289,9	171,2	91,3	80,2	84,9	73
1,244	40	0,67	285,5	173,5	92,9	81,4	85,8	73,3
1,280	50	0,83	297,3	176,2	92,6	80,2	84,9	73,4
1,316	60	1,00	309,8	180,4	92,6	80,2	84	73,4
1,351	70	1,17	315,6	181,8	91,1	78,4	82,7	73,1
1,387	80	1,33	320,8	187,2	89,9	78,4	82,8	73,4
1,423	90	1,50	325,5	187,4	89,3	78,1	83,1	73,7
1,459	100	1,67	332,1	191	89,3	79,7	84,1	74,7
1,495	110	1,83	328,9	194,5	89,9	79,9	84,6	74,6
1,531	120	2,00	324,6	195,2	91,4	80,9	87,2	75,3
1,567	130	2,17	311,5	195,4	92,4	81,2	88,7	75,9
1,603	140	2,33	307,5	197,8	93,2	82,1	91,1	77,5
1,639	150	2,50	307,7	200,2	94	82,5	92,4	78,2
1,675	160	2,67	327	206,5	94	82,8	92,2	77,5
1,711	170	2,83	337,5	208,6	93,2	82,8	90,9	77,9
1,747	180	3,00	341,6	210,8	93	82,2	90	78,2
1,782	190	3,17	345,5	215,2	93,5	83,2	90,3	78,8
1,818	200	3,33	346,8	219,5	93,8	83,5	90,7	79,1
1,854	210	3,50	350,1	221,3	93,7	83,7	90	79,4
1,890	220	3,67	350	223,2	94,5	84,8	89,7	80,1
1,926	230	3,83	352,1	227,4	94,8	84,4	89,4	80,1

Messpunkt [m]	Zeit [s]	Zeit [min]	Meßstelle 1	Meßstelle 2	Meßstelle 3	Meßstelle 4	Meßstelle 5	Meßstelle 6
1,962	240	4,00	354,5	230,5	95,3	84,8	89,1	80,7
1,998	250	4,17	351,3	232,8	96,4	86,3	91,2	81,9
2,034	260	4,33	351,5	236,7	98,7	88,2	92,5	82,6
2,070	270	4,50	353,6	238	100,5	89,1	94	82,9
2,106	280	4,67	351,1	242,7	102,6	89,7	96,4	83,8
2,142	290	4,83	350,9	245,6	103,4	90,1	99	84,8
2,178	300	5,00	349	248,3	103,9	91	101,1	85,2
2,213	310	5,17	357,5	252,1	103,6	90,4	103,9	86,7
2,249	320	5,33	359,2	255	104,2	91,3	106	87,6
2,285	330	5,50	369,1	257,4	105,5	92	108,3	88,3
2,321	340	5,67	373,5	261,2	106,5	93,1	110,9	89,8
2,357	350	5,83	381,4	264,1	107,2	93,5	111,9	90,4
2,393	360	6,00	377,9	266,2	109,9	95,9	114,3	91,6
2,429	370	6,17	372,8	268,1	112,2	96,7	117,6	92,3
2,465	380	6,33	375,8	271,7	115,1	97,5	119	92,9
2,501	390	6,50	372,3	273,3	118,4	98,3	118,7	93,4
2,537	400	6,67	367,7	274,4	123,1	99,6	119,8	93,7
2,573	410	6,83	361,9	276,4	130,4	101,2	121,3	94,9
2,609	420	7,00	360	278,2	131,7	101,9	122,1	95,2
2,644	430	7,17	368,4	281,2	133,4	103,1	123,6	95,9
2,680	440	7,33	373,3	282,6	140	104,8	125,7	97
2,716	450	7,50	375,3	285,2	143,4	105,6	127,3	97,8
2,752	460	7,67	378,7	286,9	147,2	107,4	130,6	98,6
2,788	470	7,83	381,9	288,7	149,3	107,1	134,3	99,1
2,824	480	8,00	384,4	289,4	151,4	106,9	138,2	99,9
2,860	490	8,17	387,3	292,9	153,1	109,2	139,4	100,6
2,896	500	8,33	388,5	295,8	154,9	110,7	141,8	101,4
2,932	510	8,50	390,2	297,4	157,3	110,8	143,9	102,2
2,968	520	8,67	394,4	299,4	158,6	112,6	145,9	103
3,004	530	8,83	394,4	301,3	161,5	112,1	148,8	104,1

Messpunkt [m]	Zeit [s]	Zeit [min]	Meßstelle 1	Meßstelle 2	Meßstelle 3	Meßstelle 4	Meßstelle 5	Meßstelle 6
3,040	540	9,00	391,5	302,6	163,5	111	152,9	105,1
3,076	550	9,17	394,2	303,9	164,3	110,6	155,5	105,6
3,111	560	9,33	395,4	305,8	166,8	111,5	156,3	106,1
3,147	570	9,50	394,8	307,1	168	111,8	158,9	107,1
3,183	580	9,67	398,2	310,1	170,6	113,6	160,5	107,9
3,219	590	9,83	397,9	312,2	172,2	115,2	160,2	109
3,255	600	10,00	400,1	313,9	172,5	114,7	161,5	109,3
3,291	610	10,17	398,7	315,5	173,2	116,3	163,9	110,8
3,327	620	10,33	400,9	318,5	173,2	116,8	163,4	111,1
3,363	630	10,50	400,5	318,9	174,4	118,6	162,3	112,6
3,399	640	10,67	401,7	321,1	177,2	120,6	160,7	113,4
3,435	650	10,83	398,8	322,1	179,1	120,6	161,8	115,3
3,471	660	11,00	399,5	324,3	181,7	120,7	162,8	116,8
3,507	670	11,17	403,2	326,2	185,2	122,3	164,7	117,1
3,542	680	11,33	403,1	328,2	189	124,3	166	118,4
3,578	690	11,50	405,1	329,7	192,2	126,4	168,1	119,9
3,614	700	11,67	401,7	331,1	198,3	128,9	169,5	121,2
3,650	710	11,83	402,6	333,3	200,5	129	171,4	122,8
3,686	720	12,00	401,6	334,1	201,6	129	172,1	123,6
3,722	730	12,17	400,5	335,4	202,8	130,3	174,9	125,3
3,758	740	12,33	396,8	335,9	204,2	131,6	176,8	125,6
3,794	750	12,50	399,9	338,2	207	134,4	180,8	127,7
3,830	760	12,67	403,5	339,6	206,8	134,5	185,2	128,8
3,866	770	12,83	408,3	340,4	206,6	137	189,3	129,3
3,902	780	13,00	410,6	341,9	208,3	140,1	191,6	130,6
3,938	790	13,17	412,5	343	212	146,1	193,7	132,1
3,973	800	13,33	415,2	345,3	215,3	148,2	195,8	133,9
4,009	810	13,50	413,3	346,4	218,3	151	204	135
4,045	820	13,67	420,6	348,5	220	150,7	211,5	137,8
4,081	830	13,83	422,6	350,5	221,9	154,9	217,2	138,1

Messpunkt [m]	Zeit [s]	Zeit [min]	Messstelle 1	Messstelle 2	Messstelle 3	Messstelle 4	Messstelle 5	Messstelle 6
4,117	840	14,00	424,5	352	225	156,5	228	138,3
4,153	850	14,17	426,1	354,3	226,6	162,4	233,6	139,6
4,189	860	14,33	429,4	355,9	231,6	165,8	236,6	140,2
4,225	870	14,50	430,7	357	237,1	171,2	243,3	141,2
4,261	880	14,67	432,1	359,3	238,4	172,2	245,3	141,8
4,297	890	14,83	433,8	360,8	243,5	180,2	246	143,3
4,333	900	15,00	430,3	362,5	247,1	183,2	249,8	145,4
4,369	910	15,17	432,1	363,3	249,5	185,3	251,1	145,7
4,404	920	15,33	432,4	364,8	251,8	184,9	251,8	146,5
4,440	930	15,50	433,7	366,2	253,1	187,4	254,8	147,7
4,476	940	15,67	436	367,7	255,5	190,7	254	148,7
4,512	950	15,83	432,5	369,6	257,1	192,4	254,2	150,8
4,548	960	16,00	438	371,7	260,2	196,8	257,3	151,9
4,584	970	16,17	438,9	373	265	204,4	260,3	154
4,620	980	16,33	441,5	374,8	270,6	209,3	263,1	154,9
4,656	990	16,50	443,1	375,4	274	210,7	263,8	156,7
4,692	1000	16,67	442,5	377,1	279,3	214	266	158,6
4,728	1010	16,83	444,8	378,8	281,1	218,2	266	160,1
4,764	1020	17,00	444,8	380,3	282,9	221,1	266,9	161,7
4,800	1030	17,17	445,4	380,8	286,7	221	270	164
4,836	1040	17,33	446,8	381,7	290,5	227,9	272,5	164,3
4,871	1050	17,50	448,7	384,3	291	227,2	270,5	164,6
4,907	1060	17,67	451,2	385,3	293,8	231,8	272,9	166,1
4,943	1070	17,83	453,6	386,1	295	234	272,7	167,6
4,979	1080	18,00	449,9	388,2	296,3	234	273,1	168,9
5,015	1090	18,17	445,9	389,1	295,9	232,8	271,4	170,8
5,051	1100	18,33	444,4	390,5	296,8	236,7	272,1	172
5,087	1110	18,50	440,7	391,3	298,3	240	274,3	173,2
5,123	1120	18,67	440,1	393	300,5	243,2	275,4	174,8
5,159	1130	18,83	438,5	394,5	302,8	245,4	273,6	176,3

Messpunkt [m]	Zeit [s]	Zeit [min]	Messstelle 1	Messstelle 2	Messstelle 3	Messstelle 4	Messstelle 5	Messstelle 6
5,195	1140	19,00	438,4	395,4	305,7	247,2	273,5	177,9
5,231	1150	19,17	439,5	397,2	307,8	251,8	275,2	180
5,267	1160	19,33	438,7	398,8	309	250,3	272,5	180,5
5,302	1170	19,50	433,1	398	310,5	250,5	271,8	183,5
5,338	1180	19,67	434,9	401,6	312,1	251	270,8	183,6
5,374	1190	19,83	441,8	403	314	250,5	266,1	184,8
5,410	1200	20,00	445,6	405,5	314	250,9	266,1	186,1
5,446	1210	20,17	452,2	407,6	316,1	251,1	265	187,3
5,482	1220	20,33	459,6	409,9	318,5	253,4	264,5	189,2
5,518	1230	20,50	471,6	412,2	319,1	255,6	268,3	190,4
5,554	1240	20,67	483,4	413	318,7	256,7	272,7	192
5,590	1250	20,83	485,9	413,7	320,3	260,1	277	193
5,626	1260	21,00	485,1	416	322,2	268,6	276,8	194,6
5,662	1270	21,17	485,9	417,9	326,7	272,8	279,7	195,8
5,698	1280	21,33	490,7	419,5	330,1	274,8	285,7	198,4
5,733	1290	21,50	494,5	421,6	331,4	276,4	290,8	200,3
5,769	1300	21,67	496,2	423,5	333,7	277,6	296,5	202,8
5,805	1310	21,83	495,4	424,9	336,5	280,8	300,5	204,7
5,841	1320	22,00	495,3	426,3	339,1	282,4	304,4	206,6
5,877	1330	22,17	498,8	428,9	341,4	284,1	307,4	209,6
5,913	1340	22,33	499	430,6	342,5	285,2	312,9	213,6
5,949	1350	22,50	501,2	431,8	344,4	288,1	316,8	217,8
5,985	1360	22,67	501,5	434,1	347,7	293,3	321,5	220,4
6,021	1370	22,83	499	435,9	354,9	300,7	323,9	222,1
6,057	1380	23,00	500,4	437,1	360,3	304,8	324,1	224,7
6,093	1390	23,17	502,3	438,8	363,5	306,1	324,8	227,7
6,129	1400	23,33	508,3	440,2	364,5	306,1	323,9	229,1
6,164	1410	23,50	507,9	441,7	365,8	306,8	321,6	230,8
6,200	1420	23,67	511,1	443,5	368	306,5	319	232,7
6,236	1430	23,83	511,1	445,9	368,3	306,8	316,6	233,8

Messpunkt [m]	Zeit [s]	Zeit [min]	Meßstelle 1	Meßstelle 2	Meßstelle 3	Meßstelle 4	Meßstelle 5	Meßstelle 6
6,272	1440	24,00	504,7	446,1	369,1	307,2	316,6	236,3
6,308	1450	24,17	493,7	445,3	369,7	308,2	317,5	238,3
6,344	1460	24,33	489,6	445,3	371,4	310,6	317,5	240,1
6,380	1470	24,50	487,3	446	372,7	312,8	317,3	241,9
6,416	1480	24,67	484,8	446,7	374,1	314,2	319,4	243,7
6,452	1490	24,83	486,5	447,9	375,6	316,7	319,3	245,3
6,488	1500	25,00	486,3	448,6	376,8	317,7	320,3	247
6,524	1510	25,17	486,7	449,9	378,7	320,1	319,7	248,1
6,560	1520	25,33	486,3	450,5	380,8	321,8	320,1	250,4
6,596	1530	25,50	481,2	451,4	383,7	326	322,6	252,8
6,631	1540	25,67	476,8	452,5	385,4	326,9	325,4	255
6,667	1550	25,83	476,6	453,3	388,7	331	329,5	257,7
6,703	1560	26,00	475,2	454,4	390,6	330,8	332,1	260
6,739	1570	26,17	475,1	456,8	393,7	332,3	334,4	261,9
6,775	1580	26,33	477,2	458	395,8	334	336,4	264,4
6,811	1590	26,50	489,1	459,8	398,1	336,8	340,9	267,3
6,847	1600	26,67	513,1	463,7	399,4	339,1	343,2	268,8
6,883	1610	26,83	519,8	466,2	401,5	341,1	345,8	271,8
6,919	1620	27,00	525,3	468,6	403,1	343	346,9	273,1
6,955	1630	27,17	531,6	471,1	405,2	345,6	349,9	276,2
6,991	1640	27,33	536,1	474	407,5	347,9	352,2	278,4
7,027	1650	27,50	536,2	476,2	410,4	349,7	352,7	280
7,062	1660	27,67	538,6	477,7	411,7	352,1	356,1	283,1
7,098	1670	27,83	536,8	479,1	414,4	352,9	360,5	286,1
7,134	1680	28,00	535,7	480,7	417,3	356,3	364,3	289,1
7,170	1690	28,17	536,3	482,5	419,4	358,4	367,1	290,7
7,206	1700	28,33	537,1	483,2	420,7	359,6	370,3	293,6
7,242	1710	28,50	538,1	485,1	422,7	361,4	373,9	295,8
7,278	1720	28,67	540,4	486,6	423,6	364,8	375,9	298,3
7,314	1730	28,83	546,5	488,8	425,2	366,3	375,1	300

Messpunkt [m]	Zeit [s]	Zeit [min]	Meßstelle 1	Meßstelle 2	Meßstelle 3	Meßstelle 4	Meßstelle 5	Meßstelle 6
7,350	1740	29,00	547,7	490,8	426,4	368,4	375,5	301,8
7,386	1750	29,17	550,5	492,4	428,3	369,6	375,3	302,4
7,422	1760	29,33	552,2	494,1	431,3	373,3	377,7	305,1
7,458	1770	29,50	552	495,6	434,6	376,7	379,8	307,5
7,493	1780	29,67	554,5	496,8	436,5	376,7	382,4	311
7,529	1790	29,83	554,4	498,6	438,3	377,5	385,9	312,4
7,565	1800	30,00	553,4	499,2	439,1	379,5	389,7	315
7,601	1810	30,17	552,9	500,2	441	382	389,9	317,2
7,637	1820	30,33	554,3	502,4	443,2	383,8	391,1	319,3
7,673	1830	30,50	550,1	503,4	444,6	385,1	392,1	321,5
7,709	1840	30,67	541,8	502,6	446,2	386,5	394,6	324
7,745	1850	30,83	533,8	502,2	448,5	387,6	396,3	326
7,781	1860	31,00	530	502,2	450,3	390,5	397,8	327,9
7,817	1870	31,17	525,5	502,6	452,4	392,2	399,9	329,8
7,853	1880	31,33	520,7	503,1	453,9	394,5	400,9	332
7,889	1890	31,50	515,5	503,1	455,7	395,5	404,3	335,4
7,924	1900	31,67	512,4	503	457,5	398	407,2	336,9
7,960	1910	31,83	511,8	504,5	459,4	398,2	410,7	339,5
7,996	1920	32,00	514,9	506,1	459,6	400,1	416,2	341,7
8,032	1930	32,17	519	508	460,4	401,3	420,5	344,2
8,068	1940	32,33	525,5	509,7	462,7	404,5	423,6	347,2
8,104	1950	32,50	547,2	513,7	463,3	404,5	424,1	349,6
8,140	1960	32,67	561,2	516,5	466	405,6	425,1	350,9
8,176	1970	32,83	568,6	519,4	467,8	409,2	425,5	353,7
8,212	1980	33,00	572,7	521,4	469,3	412,3	427,4	355,7
8,248	1990	33,17	575,1	522,8	470,9	412,5	427,8	358,2
8,284	2000	33,33	580,2	525,8	472,3	414	430,9	360,4
8,320	2010	33,50	582,4	528,6	472,3	415	432,7	362,5
8,356	2020	33,67	585,8	531,4	474	417,7	435,4	365,2
8,391	2030	33,83	585,3	534,1	475,2	418,9	436,8	367,2

Messpunkt [m]	Zeit [s]	Zeit [min]	Meßstelle 1	Meßstelle 2	Meßstelle 3	Meßstelle 4	Meßstelle 5	Meßstelle 6
8,427	2040	34,00	586,7	535,9	477	421,6	439,6	369,5
8,463	2050	34,17	588,3	538	479,9	424,7	440,3	371,2
8,499	2060	34,33	590	538,9	482,1	427,7	444,1	373,7
8,535	2070	34,50	591,2	539,3	484,7	429,2	446,5	376,6
8,571	2080	34,67	593,9	540,8	486,5	431,1	449,3	379
8,607	2090	34,83	594,3	542,4	488,3	432	450	381
8,643	2100	35,00	595,9	543,6	490,2	433,4	451,1	382,3
8,679	2110	35,17	596,8	544,3	490,7	435,1	452,5	385
8,715	2120	35,33	593,9	545,3	491	435,6	454,4	387,1
8,751	2130	35,50	588	547,6	494,1	439,4	456,7	389,3
8,787	2140	35,67	583,6	548,7	494,4	439,9	458,5	391,5
8,822	2150	35,83	579,5	549,1	496,2	441,3	460,1	393,6
8,858	2160	36,00	577,1	550,7	502,2	446,8	462,2	396,1
8,894	2170	36,17	578,1	552	505,1	448,2	462,9	398,1
8,930	2180	36,33	578,9	554,2	506,8	450,1	464,6	400
8,966	2190	36,50	579	555,3	508,3	451,9	466,4	402,9
9,002	2200	36,67	581,8	557	511	453,4	468,5	404,8
9,038	2210	36,83	583,6	558,5	511,8	455,2	472	407,1
9,074	2220	37,00	583,6	560,3	513,8	457,9	476	410
9,110	2230	37,17	592,5	563,5	516,6	459,7	476	411,3
9,146	2240	37,33	597,8	565,2	517,8	460,9	480,7	414,2
9,182	2250	37,50	613,5	568,2	521	464	483,3	416,7
9,218	2260	37,67	634,3	572,1	524,4	465,6	486,4	419,6
9,253	2270	37,83	637,4	574,1	526,2	468,9	489,4	421,9
9,289	2280	38,00	639,4	576,3	530,4	472,6	490,2	424
9,325	2290	38,17	636,8	578,2	533,5	474,3	492,7	426,7
9,361	2300	38,33	636,6	580,4	533,2	474,4	496,4	429,1
9,397	2310	38,50	636,8	583,8	533,2	475,6	500,8	432,1
9,433	2320	38,67	636,6	585,6	533	477,1	505,6	434,2
9,469	2330	38,83	637,5	587,6	535	481	506,4	436,7

Messpunkt [m]	Zeit [s]	Zeit [min]	Meßstelle 1	Meßstelle 2	Meßstelle 3	Meßstelle 4	Meßstelle 5	Meßstelle 6
9,505	2340	39,00	638,6	589,1	535,2	481,9	507,8	439,7
9,541	2350	39,17	640,9	592,1	536	484	507,2	443,2
9,577	2360	39,33	644,5	594,4	538,3	484,8	509,5	445,5
9,613	2370	39,50	647,6	596,8	540,1	487,3	510,1	447,2
9,649	2380	39,67	648,3	598,6	541,8	488,8	512	449,3
9,684	2390	39,83	647,7	600,5	543,9	491,8	513,2	452,1
9,720	2400	40,00	648,8	601,8	544,6	493,3	513,9	453,9
9,756	2410	40,17	648,8	603,9	546,4	494,6	515,3	456,1
9,792	2420	40,33	646	605	549,6	496,4	518,1	459,8
9,828	2430	40,50	646,4	606	552,5	499,5	521,7	462,2
9,864	2440	40,67	648,1	608,1	554,6	501,4	523,8	464
9,900	2450	40,83	649,2	609,3	556,3	503,5	526,5	466,8
9,936	2460	41,00	648,4	611,1	557,3	504,7	528,8	469,1
9,972	2470	41,17	651,9	612,8	558,9	507,3	530,1	471,5
10,008	2480	41,33	654,5	614,6	561	509,3	532,9	473,5
10,044	2490	41,50	654,8	616,6	562,4	511,4	533,2	475,1
10,080	2500	41,67	658,5	619	564,8	513,3	533,9	477,2
10,116	2510	41,83	662,9	621,3	566,3	514,7	536,1	479
10,151	2520	42,00	667,2	624	568,9	516	535,9	480,8
10,187	2530	42,17	667,3	626,9	572,6	518,6	537,8	482,8
10,223	2540	42,33	664,4	628,5	574,5	521,7	540,1	485,3
10,259	2550	42,50	654,5	628,5	575,8	523,5	543,7	488,5
10,295	2560	42,67	647,8	627,9	576,3	525,3	546,5	490,7
10,331	2570	42,83	650,3	628,8	577,4	527,1	548,7	493
10,367	2580	43,00	660	630,8	581,2	530,3	550	495,5
10,403	2590	43,17	665,9	632,5	584,5	533,1	554,5	499,3
10,439	2600	43,33	675,6	633,7	585,9	535,1	557,3	501,1
10,475	2610	43,50	686,7	636,5	588,7	538,2	560,3	504,7
10,511	2620	43,67	694,8	639,9	590,3	539,8	566,4	507,9
10,547	2630	43,83	699,8	642,6	593,3	543,1	571	511,4

Messpunkt [m]	Zeit [s]	Zeit [min]	Meßstelle 1	Meßstelle 2	Meßstelle 3	Meßstelle 4	Meßstelle 5	Meßstelle 6
10,582	2640	44,00	703,1	645,7	597,7	547	579,2	517,3
10,618	2650	44,17	707,9	648,4	600,3	549	583,4	519
10,654	2660	44,33	710,7	650,6	604	553,8	585,6	521,4
10,690	2670	44,50	714,4	653,4	606,5	555,5	587,7	524,1
10,726	2680	44,67	717	655,7	610,1	559,5	589,5	526,8
10,762	2690	44,83	720,2	658,6	613,4	561,7	591,3	529,5
10,798	2700	45,00	725,1	660,3	615	564,4	598,1	534
10,834	2710	45,17	729,7	663,5	616,7	567,4	603,4	536,6
10,870	2720	45,33	731,5	664,7	619,5	570,3	604,8	538,7
10,906	2730	45,50	731,4	666,4	622,2	574	604	541,8
10,942	2740	45,67	732,9	668,6	623,3	574,9	602,8	544,1
10,978	2750	45,83	738,2	670,8	623,8	576,8	603,3	546,8
11,013	2760	46,00	740,5	673,1	626,1	579	604,7	549,9
11,049	2770	46,17	740,9	674,9	629,1	583	606,3	552,4
11,085	2780	46,33	740,4	676,3	629,9	584,6	609,5	555
11,121	2790	46,50	740,6	678,7	632,3	587,4	612,9	557,4
11,157	2800	46,67	741	680,5	634	589,6	615,6	560
11,193	2810	46,83	741,9	682,2	637,3	592	619,9	563,7
11,229	2820	47,00	739,1	683,5	639,4	594,7	623,2	566,5
11,265	2830	47,17	738,9	685,4	642,9	597,7	626,6	569,8
11,301	2840	47,33	738,2	686,7	644,6	598,4	628,2	571,8
11,337	2850	47,50	740,8	688,6	648,1	601,5	631,9	575
11,373	2860	47,67	739,5	689,8	652,7	605,2	632,1	577,6
11,409	2870	47,83	743,3	690,8	657,2	607,2	634,3	579,8
11,444	2880	48,00	749,3	693,5	660,2	611,3	637,4	582,8
11,480	2890	48,17	750,7	695,6	664,1	615,4	640	585,8
11,516	2900	48,33	753,3	697,2	666,8	618	643,8	588,2
11,552	2910	48,50	755,4	698,4	668,6	619,4	646,4	590,8
11,588	2920	48,67	755,2	700,7	671,4	622,5	648,2	594
11,624	2930	48,83	757,3	702,8	674,7	625,6	649,4	596,6

Messpunkt [m]	Zeit [s]	Zeit [min]	Meßstelle 1	Meßstelle 2	Meßstelle 3	Meßstelle 4	Meßstelle 5	Meßstelle 6
11,660	2940	49,00	760,5	703,9	677	629,1	650,5	598,9
11,696	2950	49,17	762,5	706,2	679	631,8	652,2	602
11,732	2960	49,33	763,3	707,8	682,2	633,6	653,3	604
11,768	2970	49,50	764,4	709,6	684,9	637,2	656,1	607
11,804	2980	49,67	767,3	712	686,8	639,1	657,4	609,3
11,840	2990	49,83	771,7	715	690,6	641,8	660,2	612,6
11,876	3000	50,00	772,6	716,7	693,1	643,8	664,6	615,5
11,911	3010	50,17	778,6	720,9	695,5	646,6	665,9	618,2
11,947	3020	50,33	782,2	724,5	696,5	648	669,9	621,9
11,983	3030	50,50	784,9	727,3	700,3	652,6	674,5	625,2
12,019	3040	50,67	784,9	730,1	702,8	655,3	679,3	628,5
12,055	3050	50,83	785,6	734	705,2	657,2	683,4	631,6
12,091	3060	51,00	784,2	736,1	708,5	660,1	685,9	634,3
12,127	3070	51,17	787	739,1	710,2	662,8	686,3	637,4
12,163	3080	51,33	789,6	742,3	713,5	664,5	686,5	640,2
12,199	3090	51,50	795,7	745,7	716,6	667,2	688,6	644
12,235	3100	51,67	799,8	748,3	719,1	669,1	690,2	648
12,271	3110	51,83	806,2	751,3	719,6	671,8	692,5	651,3
12,307	3120	52,00	817,1	752,4	721,2	674	694,1	653,3
12,342	3130	52,17	827,7	752,6	721,7	676,4	696,3	656,4
12,378	3140	52,33	836,2	753,9	721,9	678,3	698,6	658,4
12,414	3150	52,50	838,4	755,1	722,9	680,8	699,6	661,3
12,450	3160	52,67	841,8	757,6	725,5	682,3	701,9	663,7
12,486	3170	52,83	841,8	760,2	726,6	685,4	704	666,2
12,522	3180	53,00	844,4	762,6	729,1	688,1	706,5	668,9
12,558	3190	53,17	846,6	765,2	731	690,8	708,1	671
12,594	3200	53,33	848,1	768,9	733	693,2	711	673,7
12,630	3210	53,50	844,2	772,1	734,6	695,2	712,6	675,3
12,666	3220	53,67	842,8	775,9	737,4	698,4	714,1	678,3
12,702	3230	53,83	843,4	779,6	738,7	700,3	716,1	680,4

Messpunkt [m]	Zeit [s]	Zeit [min]	Meßstelle 1	Meßstelle 2	Meßstelle 3	Meßstelle 4	Meßstelle 5	Meßstelle 6
12,738	3240	54,00	845,7	783,6	740,5	702,5	715,9	682,6
12,773	3250	54,17	841,9	786,2	742,5	703,9	717,4	683,9
12,809	3260	54,33	840,2	787,9	743,9	705,9	717,1	686,1
12,845	3270	54,50	839,4	789,9	746,1	708,1	718,7	687,2
12,881	3280	54,67	838,2	791,6	748	710,3	719,8	689,7
12,917	3290	54,83	837,8	793,5	750	712,5	721,8	691,1
12,953	3300	55,00	838,9	795,6	751,4	714,9	723,1	693,4
12,989	3310	55,17	839,9	796,6	753,5	717,2	725,4	695,5
13,025	3320	55,33	840,3	797,9	756,1	719,4	727,8	697,8
13,061	3330	55,50	840,8	799,9	756,5	721,8	728,7	699,5
13,097	3340	55,67	844,1	801,6	757,1	724,1	730	701,8
13,133	3350	55,83	844,6	803	758,1	725,1	732	704,2
13,169	3360	56,00	849,7	805,5	757,9	727,3	733,3	705,8
13,204	3370	56,17	853,9	807,3	757,7	729	732,7	707,9
13,240	3380	56,33	853	808	757,7	730,3	735,5	710,2
13,276	3390	56,50	856	810,1	759,5	733,3	738,1	712
13,312	3400	56,67	859,5	811,6	761,4	735,7	741,1	714,4
13,348	3410	56,83	863,8	813,4	763,4	738,1	745	716,9
13,384	3420	57,00	868,3	815,3	765,3	738,5	746,1	719,3
13,420	3430	57,17	869,3	816,9	766,4	741,1	748,8	721,7
13,456	3440	57,33	869,4	818,5	768,2	743,7	751,2	723,8
13,492	3450	57,50	874,4	820	770,6	744,9	754,2	726
13,528	3460	57,67	871,4	821,2	772,8	747,5	755,7	728,3
13,564	3470	57,83	874,9	822,8	775,2	749,6	759,1	730,8
13,600	3480	58,00	879,6	825,2	777,2	751,2	762,4	733,1
13,636	3490	58,17	879,9	826,8	778,6	754,3	765,2	735,6
13,671	3500	58,33	880	828,9	780,6	756,3	766,8	737,6
13,707	3510	58,50	881,6	831,4	781,3	756,8	767,5	739,5
13,743	3520	58,67	883,2	833,2	783	758,9	771,2	742,3
13,779	3530	58,83	884,1	834,4	784,4	761,8	774,9	744,5

Messpunkt [m]	Zeit [s]	Zeit [min]	Meßstelle 1	Meßstelle 2	Meßstelle 3	Meßstelle 4	Meßstelle 5	Meßstelle 6
13,815	3540	59,00	885	836,3	787,4	762,8	778,8	747,3
13,851	3550	59,17	887,1	837,7	789,1	763,7	780,1	749,4
13,887	3560	59,33	887,8	838,9	791,2	765,6	781,3	751,3
13,923	3570	59,50	889,2	840,4	793	767,3	784,7	754,5
13,959	3580	59,67	890,8	842,2	795,4	769,2	786,8	756,6
13,995	3590	59,83	890,6	843,8	799,3	772,3	789	759,6
14,031	3600	60,00	892,5	845,4	802,2	774,3	795,4	762,1
14,067	3610	60,17	893,4	847,4	802	774,8	798,9	764,7
14,102	3620	60,33	895,4	849,2	803,3	777,6	801,4	767,1
14,138	3630	60,50	897,8	850,7	805	779,1	800,4	768,8
14,174	3640	60,67	899,1	852,2	807,6	782,1	801	770,9
14,210	3650	60,83	899,7	854	809	783,4	798,9	772,6
14,246	3660	61,00	900,5	855,3	811,4	785,3	798,5	774,3
14,282	3670	61,17	902,7	857,1	813,2	787,1	799,6	776,5
14,318	3680	61,33	902	858,6	814,9	789,7	800,5	778,2
14,354	3690	61,50	904,5	859,9	817,4	791,6	803,3	780,4
14,390	3700	61,67	906,7	861,1	819,8	794	804,4	782,6
14,426	3710	61,83	908,7	862,5	822,4	796	806,3	785,4
14,462	3720	62,00	909,1	864	824,6	798,3	807,9	787,7
14,498	3730	62,17	909,5	864,9	826,3	799,8	810,1	789,4
14,533	3740	62,33	911,5	866,6	827,8	801,9	812,2	791,3
14,569	3750	62,50	914,5	868,3	829,8	803,6	814,1	792,8
14,605	3760	62,67	913,2	869,6	831,1	805,7	816,1	795
14,641	3770	62,83	914,1	871,1	833,8	808	817,7	797,6
14,677	3780	63,00	914,6	872,5	835,8	809,9	819,7	799,9
14,713	3790	63,17	915,7	873,2	837,6	812,1	821,4	802
14,749	3800	63,33	916,8	874,9	840,2	813,7	825,7	804,4
14,785	3810	63,50	917,6	875,6	842,5	815,8	828,2	806,6
14,821	3820	63,67	917,2	876,8	843,8	817,9	828,7	808
14,857	3830	63,83	919,3	878,3	845,7	819,9	829,3	809,3

Messpunkt [m]	Zeit [s]	Zeit [min]	Messstelle 1	Messstelle 2	Messstelle 3	Messstelle 4	Messstelle 5	Messstelle 6
14,893	3840	64,00	922,1	879,9	847	821	831,1	811
14,929	3850	64,17	924,5	881,9	848,7	822,8	831,7	812,7
14,964	3860	64,33	926	883,3	849,2	824,7	833,3	814,3
15,000	3870	64,50	926,9	884,8	850,7	827	835,3	816,2
15,036	3880	64,67	926,5	885,8	851,4	828,3	836,9	817,6
15,072	3890	64,83	926,5	887,1	853,2	830,4	837,8	819,4
15,108	3900	65,00	927,9	888,5	855,7	832,1	840,2	821,6
15,144	3910	65,17	930	890,2	856,9	833,6	841,9	823,7
15,180	3920	65,33	930,5	891,3	859,1	835,8	845,4	825,9
15,216	3930	65,50	929,8	892,2	859,3	837,1	847,9	827,7
15,252	3940	65,67	931,8	893,8	861,7	838,9	849,9	829,7
15,288	3950	65,83	931,5	894,5	863,4	840,6	852,4	831,6
15,324	3960	66,00	932,8	895,9	864,5	842,5	855,5	834
15,360	3970	66,17	934,8	897,6	864,8	844,2	858,5	836,1
15,396	3980	66,33	934,9	898,8	866,9	846,1	860,7	838,2
15,431	3990	66,50	938,4	901,1	868,5	848,1	862,6	840
15,467	4000	66,67	943,8	903,6	870,1	849,9	864,5	841,8
15,503	4010	66,83	950,8	906,3	872,1	851,9	866,2	844
15,539	4020	67,00	955,3	908,9	874,9	854	869	845,9
15,575	4030	67,17	954,6	910,2	878,6	856,7	872	848,6
15,611	4040	67,33	954,3	911,8	882,4	859,5	875,3	850,5
15,647	4050	67,50	959,7	913,9	886,7	862	878,6	852,9
15,683	4060	67,67	963	916,2	890,2	864,7	879,7	854,6
15,719	4070	67,83	969,1	919	892,6	866,6	883,9	857,4
15,755	4080	68,00	974,1	921,8	894,2	868,2	888,3	860,4
15,791	4090	68,17	980	924,6	895,6	870	891,2	862,2
15,827	4100	68,33	979,9	926	895,9	871,2	890,8	864
15,862	4110	68,50	972,9	925,1	896,7	873	891,9	865,9
15,898	4120	68,67	967,2	925,5	897,1	874,1	892,3	867,7
15,934	4130	68,83	963,5	926,7	898,7	876,9	892,6	869,3

Messpunkt [m]	Zeit [s]	Zeit [min]	Meßstelle 1	Meßstelle 2	Meßstelle 3	Meßstelle 4	Meßstelle 5	Meßstelle 6
15,970	4140	69,00	961,8	928,6	900,5	879,4	893,3	871,5
16,006	4150	69,17	963,3	929,9	901,9	880,7	894,6	873,4
16,042	4160	69,33	963,1	930,9	903,9	883	896,4	875
16,078	4170	69,50	964,2	932	905,3	884,6	898	877
16,114	4180	69,67	964,6	933,1	907,8	887	898,6	878,8
16,150	4190	69,83	966,7	933,8	911	889,5	900,3	880,6
16,186	4200	70,00	972,1	935,9	913,7	891,1	900,9	882,4
16,222	4210	70,17	979,3	937,6	916,1	893,2	901,4	884,1
16,258	4220	70,33	980,9	939,1	919	895,3	902,8	885,7
16,293	4230	70,50	985,7	940,4	921,7	897,3	904,4	888
16,329	4240	70,67	989,1	941,5	923,9	899,2	906,6	891
16,365	4250	70,83	993	942,7	926,6	901,2	909,6	892,6
16,401	4260	71,00	996,1	944,3	928,2	902,8	911,9	894,8
16,437	4270	71,17	1001	946,1	929,8	904,7	913,8	896,8
16,473	4280	71,33	1005	949,3	930,7	906,1	915,2	898,3
16,509	4290	71,50	1004,2	951,4	931,4	907,8	917,4	900,1
16,545	4300	71,67	1007,4	955,4	932,1	909,1	919	901,5
16,581	4310	71,83	1010,2	959,6	933	910,3	920,6	903,1
16,617	4320	72,00	1011,5	963,9	933,5	912,1	921,9	904,6
16,653	4330	72,17	1006,7	966,4	933,8	913,2	922,2	905,9
16,689	4340	72,33	1004,5	967,8	934,2	914,1	922,1	907,2
16,724	4350	72,50	998,9	969,2	934,5	915,7	922,1	908,6
16,760	4360	72,67	996,9	970,1	935,6	916,6	923,3	910
16,796	4370	72,83	994,8	971,7	935,6	917,7	923,7	911,3
16,832	4380	73,00	992,5	971,3	936,7	919,1	923,7	912,7
16,868	4390	73,17	990,5	970,8	937,4	920,2	924,2	913,8
16,904	4400	73,33	991,9	970,8	938,8	922,1	924,9	914,7
16,940	4410	73,50	990,9	971	940	923,2	926	915,8
16,976	4420	73,67	991	971,2	941,1	924,4	927,1	917
17,012	4430	73,83	990,3	971,8	942,6	926,2	927,9	918,6

Messpunkt [m]	Zeit [s]	Zeit [min]	Meßstelle 1	Meßstelle 2	Meßstelle 3	Meßstelle 4	Meßstelle 5	Meßstelle 6
17,048	4440	74,00	991,2	972,4	943,7	927,3	929	919,5
17,084	4450	74,17	991,8	972,9	944,8	928,5	930,2	920,8
17,120	4460	74,33	991,8	973,5	945,7	929,4	931,3	922
17,156	4470	74,50	992,4	974,1	946,3	930,9	931,4	923,2
17,191	4480	74,67	992,4	974,5	947,4	932	932,7	924,4
17,227	4490	74,83	993,2	975,4	948,2	933,3	933,6	925,4
17,263	4500	75,00	990,5	975,5	949,1	934,4	933,9	926,9
17,299	4510	75,17	990,9	976,7	949,2	935,3	935,8	927,6
17,335	4520	75,33	993,4	977,3	950,6	937	937,7	929,1
17,371	4530	75,50	997,1	979,3	951,9	937,7	938,1	930
17,407	4540	75,67	1000,3	980,7	953,3	939,8	939,6	931,4
17,443	4550	75,83	1001,9	981,9	954,9	940,7	941,6	932,7
17,479	4560	76,00	1004,7	983,3	955,6	941,8	943,2	933,7
17,515	4570	76,17	1008,3	985	956,3	943,1	944,6	934,9
17,551	4580	76,33	1012,8	987,3	956,3	943,9	946	936,2
17,587	4590	76,50	1019,7	988,8	957,2	945,1	947,2	937,6
17,622	4600	76,67	1021,9	990	957,7	946,3	949	938,4
17,658	4610	76,83	1025,3	992	959	947,3	950,1	939,8
17,694	4620	77,00	1028,4	994,2	959,3	948,3	950,7	940,9
17,730	4630	77,17	1034,2	996,8	960,4	950,4	952,1	942,3
17,766	4640	77,33	1037,9	997,4	961,7	951,3	954,1	943,6
17,802	4650	77,50	1040,8	999,1	962,2	952,2	955,2	944,9
17,838	4660	77,67	1040,6	999,6	963,2	953,4	956,4	946,1
17,874	4670	77,83	1044,4	1001,2	964,1	954,3	957,5	947,1
17,910	4680	78,00	1040,9	999,8	964,6	955,5	958,8	948,3
17,946	4690	78,17	1040,2	1000,4	965,5	956,2	959,3	949,4
17,982	4700	78,33	1038,9	1000,6	966,4	957,1	960,6	950,8
18,018	4710	78,50	1034,4	1000,3	966,5	958,1	961,5	951,8
18,053	4720	78,67	1032,8	1000,6	967,2	958,5	962,8	952,9
18,089	4730	78,83	1029,2	1000,3	967,8	959,4	963,8	954,1

Messpunkt [m]	Zeit [s]	Zeit [min]	Meßstelle 1	Meßstelle 2	Meßstelle 3	Meßstelle 4	Meßstelle 5	Meßstelle 6
18,125	4740	79,00	1027,4	1000,4	968,2	959,8	964,4	955,1
18,161	4750	79,17	1027,8	1000,8	969,2	960,8	965,5	956,4
18,197	4760	79,33	1027,3	1001,1	969,9	961,8	966	957,3
18,233	4770	79,50	1027,7	1001,9	970,3	962,5	966,5	958,2
18,269	4780	79,67	1028,2	1002,7	971,3	963,4	967,5	959,2
18,305	4790	79,83	1032	1003,8	971,7	964,3	968,3	960,5
18,341	4800	80,00	1031,8	1004,7	973,6	965	969,4	961,4
18,377	4810	80,17	1033,2	1005,4	975,3	966,1	970,3	962,6
18,413	4820	80,33	1029,9	1005,7	977,2	967,3	971,2	963,5
18,449	4830	80,50	1027,4	1005,7	978,6	968,4	971,7	964,5
18,484	4840	80,67	1027,3	1006,7	980,2	969,7	972,5	965,5
18,520	4850	80,83	1025,8	1007	981,1	970,4	972,8	966,2
18,556	4860	81,00	1027,4	1007,3	982,2	971,2	973,3	967,4
18,592	4870	81,17	1023,7	1007,5	983,3	972,1	974	967,9
18,628	4880	81,33	1023	1006,6	984,3	973,5	974	968,6
18,664	4890	81,50	1020,6	1007,1	984,8	974,1	974,5	969,3
18,700	4900	81,67	1020	1006,9	986,5	974,9	975,4	970,6
18,736	4910	81,83	1020,7	1007,6	987,2	975,8	976	971,5
18,772	4920	82,00	1020,2	1007,6	988,2	976,6	976,8	972,2
18,808	4930	82,17	1020,2	1007,9	988,6	977,4	977,5	973
18,844	4940	82,33	1022,2	1008,8	989,6	978,4	978,4	974,1
18,880	4950	82,50	1022,8	1009	991	979,1	980,1	975,1
18,916	4960	82,67	1020,9	1009,1	992,6	979,9	981,9	976,3
18,951	4970	82,83	1021,9	1009,7	993,3	980,8	982,7	977,2
18,987	4980	83,00	1023,9	1010,1	993,9	981,3	983,9	978
19,023	4990	83,17	1024,4	1010,4	994,2	982,3	984,5	978,6
19,059	5000	83,33	1023,5	1010,8	994,2	982,8	984,2	979,4
19,095	5010	83,50	1023,2	1011,3	994	983,3	983,8	980,2
19,131	5020	83,67	1024,4	1011,7	994,1	983,9	983,7	980,8
19,167	5030	83,83	1024,3	1012,1	994,8	984,7	983,9	981,9

Messpunkt [m]	Zeit [s]	Zeit [min]	Meßstelle 1	Meßstelle 2	Meßstelle 3	Meßstelle 4	Meßstelle 5	Meßstelle 6
19,203	5040	84,00	1024,1	1012,2	995,1	985,3	984,2	982,2
19,239	5050	84,17	1023,6	1012,5	995,3	985,8	984,2	982,9
19,275	5060	84,33	1024,5	1013,5	995,2	986,4	984,8	983,6
19,311	5070	84,50	1027,6	1014,4	995,4	987,1	985,4	984,1
19,347	5080	84,67	1028,4	1014,7	995,7	987,6	986,6	984,8
19,382	5090	84,83	1033,8	1016,1	996,3	988,5	987,5	985,6
19,418	5100	85,00	1036,6	1016,7	997,7	989,2	988,5	986,3
19,454	5110	85,17	1038	1017,7	998,7	989,9	989	987
19,490	5120	85,33	1040,6	1019,3	998,9	990,6	990,2	987,6
19,526	5130	85,50	1041,5	1019,7	998,9	991	991	988,2
19,562	5140	85,67	1042,1	1020,6	999,8	991,8	991,8	988,9
19,598	5150	85,83	1043,7	1021,4	1000	992,2	992,4	989,4
19,634	5160	86,00	1044,7	1022,6	1000,3	992,9	993,7	990,3
19,670	5170	86,17	1049,4	1023,8	1000,7	993,6	994,7	991
19,706	5180	86,33	1052,5	1025,8	1000,8	994,2	995,3	991,3
19,742	5190	86,50	1053,8	1026,9	1001,2	995,2	996,2	992,4
19,778	5200	86,67	1054,8	1027,7	1001,8	995,5	997,1	993,1
19,813	5210	86,83	1054,8	1028,4	1002,4	996,2	998,1	993,8
19,849	5220	87,00	1053,7	1028,7	1002,7	996,8	999,1	994,6
19,885	5230	87,17	1048,8	1028,5	1003,2	997,3	999,8	995,3
19,921	5240	87,33	1046,8	1029,1	1004,1	998,1	1000,5	996
19,957	5250	87,50	1046,9	1029,3	1004,9	998,9	1001,3	996,7
19,993	5260	87,67	1047,5	1030,6	1005,6	999,7	1001,9	997,4
20,029	5270	87,83	1049,1	1032,1	1006	1000,3	1002,4	998,2
20,065	5280	88,00	1043,5	1031,1	1006,5	1001	1003,1	998,7
20,101	5290	88,17	1041,4	1030,3	1007,3	1001,6	1003,5	999,5
20,137	5300	88,33	1041,1	1030,1	1007,9	1001,7	1003,9	1000,1
20,173	5310	88,50	1040,8	1029,7	1008,4	1002,2	1004,5	1000,7
20,209	5320	88,67	1041,6	1029,7	1009,8	1003,4	1005,3	1001,5
20,244	5330	88,83	1042,7	1029,8	1010,9	1004,2	1005,9	1002,1

Messpunkt [m]	Zeit [s]	Zeit [min]	Meßstelle 1	Meßstelle 2	Meßstelle 3	Meßstelle 4	Meßstelle 5	Meßstelle 6
20,280	5340	89,00	1043,9	1029,8	1011,8	1004,8	1006,1	1002,6
20,316	5350	89,17	1044,9	1030,1	1013,2	1005,7	1007,1	1003,5
20,352	5360	89,33	1047,6	1030,7	1014,8	1006,5	1007,4	1004,3
20,388	5370	89,50	1049,1	1030,7	1015,7	1007	1007,5	1004,8
20,424	5380	89,67	1051,1	1031,7	1016,1	1007,8	1008,3	1005
20,460	5390	89,83	1052,6	1032,3	1016,8	1008,5	1008,7	1005,7
20,496	5400	90,00	1053,7	1032,9	1017,2	1009,1	1008,7	1006,5
20,532	5410	90,17	1054,6	1033,5	1017,9	1009,8	1009,8	1007,1
20,568	5420	90,33	1055,1	1034,2	1018,6	1010,5	1010	1007,6
20,604	5430	90,50	1055,5	1034,7	1019,5	1011,2	1010,5	1008,5
20,640	5440	90,67	1055,8	1035,7	1019,7	1011,7	1010,9	1008,8
20,676	5450	90,83	1056	1036,4	1020,5	1012,4	1011,7	1009,5
20,711	5460	91,00	1057	1037,4	1021,2	1013,1	1012,1	1010,2
20,747	5470	91,17	1059,1	1038,9	1022	1013,7	1013,4	1011
20,783	5480	91,33	1061,2	1040,3	1022,9	1014,1	1014,5	1011,6
20,819	5490	91,50	1061,4	1041,6	1023,4	1014,8	1017,2	1012,7
20,855	5500	91,67	1063,5	1042,7	1023,8	1015	1019,7	1013,5
20,891	5510	91,83	1062,8	1043,4	1024,5	1015,5	1021,7	1014,3
20,927	5520	92,00	1059,4	1043,7	1024,7	1016,4	1022,6	1015,2
20,963	5530	92,17	1057,1	1043,8	1025,4	1017	1023,6	1016,2
20,999	5540	92,33	1055,4	1044,2	1026	1017,7	1023,2	1016,5
21,035	5550	92,50	1053,9	1043,6	1026,4	1018,1	1024,7	1017,4
21,071	5560	92,67	1051,6	1043,4	1026,7	1018,8	1025,2	1018,3
21,107	5570	92,83	1050,5	1043	1027,4	1019,5	1025,5	1018,8
21,142	5580	93,00	1049,9	1042,9	1027,6	1019,9	1025,3	1019,4
21,178	5590	93,17	1049,7	1042,5	1028,1	1020,4	1025,3	1019,9
21,214	5600	93,33	1048,8	1042,5	1028,6	1021,2	1025,5	1020,7
21,250	5610	93,50	1051,2	1042,8	1028,7	1021,7	1026,6	1021,5
21,286	5620	93,67	1052,8	1043,4	1029,4	1022,3	1026,7	1021,8
21,322	5630	93,83	1053,3	1043,7	1030,1	1023	1027,9	1022,6

Messpunkt [m]	Zeit [s]	Zeit [min]	Meßstelle 1	Meßstelle 2	Meßstelle 3	Meßstelle 4	Meßstelle 5	Meßstelle 6
21,358	5640	94,00	1054,3	1044,4	1030,8	1023,7	1028,1	1023,3
21,394	5650	94,17	1055,3	1044,9	1031,1	1024,3	1029	1024,3
21,430	5660	94,33	1055,5	1045,3	1031,1	1024,5	1028,6	1024,5
21,466	5670	94,50	1055,8	1045,7	1031,8	1025,1	1029	1025,3
21,502	5680	94,67	1055,4	1045,9	1032,1	1025,8	1028,7	1025,8
21,538	5690	94,83	1055,1	1046,8	1033	1026,5	1029,2	1026,3
21,573	5700	95,00	1055,1	1047,3	1033,5	1027	1029,7	1026,8
21,609	5710	95,17	1056,1	1048,1	1034,7	1027,7	1028,7	1027
21,645	5720	95,33	1060,2	1049,5	1035,5	1028,4	1029,1	1027,4
21,681	5730	95,50	1062,3	1050,2	1036,2	1028,9	1029,2	1027,7
21,717	5740	95,67	1063,5	1051,2	1037,1	1029,6	1030,2	1028
21,753	5750	95,83	1067	1053,1	1038,8	1030,8	1031,8	1028,7
21,789	5760	96,00	1068,6	1054,3	1039,3	1031,5	1032,1	1029,2
21,825	5770	96,17	1069,3	1054,5	1039,3	1032	1032,7	1029,8
21,861	5780	96,33	1071	1055,6	1040,7	1033,2	1033,3	1030,4
21,897	5790	96,50	1072,2	1056,4	1041,1	1033,6	1033,9	1031
21,933	5800	96,67	1075,5	1057,5	1040,7	1034	1034,2	1031,5
21,969	5810	96,83	1077,6	1058,8	1041,2	1034,8	1034,8	1032
22,004	5820	97,00	1079,1	1059,8	1040,9	1035,1	1035,6	1032,5
22,040	5830	97,17	1079,5	1060,5	1041,4	1035,8	1036,5	1033,1
22,076	5840	97,33	1080,3	1061,9	1042,1	1036,6	1037,2	1033,8
22,112	5850	97,50	1079,8	1062,4	1042,4	1037	1037,7	1034,3
22,148	5860	97,67	1078,1	1063,1	1043	1038,4	1038,4	1035
22,184	5870	97,83	1078	1063,7	1044	1038,5	1039,2	1035,6
22,220	5880	98,00	1078,1	1063,6	1045,2	1039,4	1039,8	1036,4
22,256	5890	98,17	1078,5	1064,3	1046	1040,8	1040,6	1037
22,292	5900	98,33	1079,4	1065,4	1047,5	1041,5	1041,4	1037,9
22,328	5910	98,50	1080,2	1066,3	1048,8	1042,3	1042,1	1038,4
22,364	5920	98,67	1080,5	1066,8	1049,6	1043	1043,1	1039,2
22,400	5930	98,83	1081,6	1067,6	1049,9	1043,9	1043,8	1039,9

Messpunkt [m]	Zeit [s]	Zeit [min]	Meßstelle 1	Meßstelle 2	Meßstelle 3	Meßstelle 4	Meßstelle 5	Meßstelle 6
22,436	5940	99,00	1081,1	1068,6	1050,2	1044,8	1044,8	1040,5
22,471	5950	99,17	1082	1069,3	1050,8	1045,1	1045,8	1041,5
22,507	5960	99,33	1082,8	1070,2	1051,8	1045,8	1047,4	1042,3
22,543	5970	99,50	1086	1071,5	1053,3	1047	1048,9	1043,1
22,579	5980	99,67	1087,8	1073	1054,7	1047,9	1049,9	1043,9
22,615	5990	99,83	1092,1	1074,3	1056,1	1048,6	1050,6	1044,7
22,651	6000	100,00	1098,3	1076,6	1058,6	1049,9	1051,4	1045,7
22,687	6010	100,17	1100	1078,1	1060,5	1050,9	1051,9	1046,3
22,723	6020	100,33	1104,3	1080,3	1061,3	1051,8	1052,5	1047,4
22,759	6030	100,50	1105,8	1081,4	1061,8	1052,5	1053,5	1048,2
22,795	6040	100,67	1106,2	1082,8	1063,2	1053,3	1054,2	1049,1
22,831	6050	100,83	1106,7	1084,3	1063,7	1054	1054,5	1050,1
22,867	6060	101,00	1105,7	1085	1064,2	1054,9	1058,8	1052
22,902	6070	101,17	1103,3	1086	1065,6	1055,5	1062,2	1053,3
22,938	6080	101,33	1102,2	1086,5	1065,9	1056,6	1065,9	1055
22,974	6090	101,50	1101	1087	1066,4	1057,8	1071,1	1057,1
23,010	6100	101,67	1099,8	1087,2	1067,8	1058,6	1075,4	1059
23,046	6110	101,83	1099,7	1088	1069,7	1059,8	1076,4	1060,3
23,082	6120	102,00	1099,1	1088,5	1071	1060,8	1076,7	1061,7
23,118	6130	102,17	1101,2	1089,7	1072,6	1061,9	1078,1	1063
23,154	6140	102,33	1101,8	1089,8	1073,7	1063,1	1080,1	1064,8
23,190	6150	102,50	1103,1	1090,6	1075,8	1064,5	1078,9	1065
23,226	6160	102,67	1104,8	1091,7	1076,5	1065,2	1080,2	1066,4
23,262	6170	102,83	1103,6	1092,1	1078,1	1066,5	1082,5	1069
23,298	6180	103,00	1105,2	1093	1079,6	1067,4	1082,9	1070,5
23,333	6190	103,17	1105,2	1093,9	1081,1	1068,8	1080,1	1071,2
23,369	6200	103,33	1107,3	1095,2	1081,9	1069,8	1078,7	1071,7
23,405	6210	103,50	1108,9	1096,2	1083,3	1071	1077	1071,8
23,441	6220	103,67	1110	1096,9	1084,8	1071,8	1076,7	1072,5
23,477	6230	103,83	1110,5	1098,6	1087,5	1073,3	1076,7	1073,7

Messpunkt [m]	Zeit [s]	Zeit [min]	Meßstelle 1	Meßstelle 2	Meßstelle 3	Meßstelle 4	Meßstelle 5	Meßstelle 6
23,513	6240	104,00	1114,1	1099,6	1090,7	1074,9	1077,4	1074,2
23,549	6250	104,17	1116,3	1101,3	1092,7	1076,2	1077,7	1075,4
23,585	6260	104,33	1118,6	1102,8	1094,9	1077,9	1078,4	1076
23,621	6270	104,50	1116,5	1103,6	1097	1079	1080,5	1077,3
23,657	6280	104,67	1118,5	1104,9	1099,5	1080,7	1081,9	1078,5
23,693	6290	104,83	1125,1	1107,6	1100,4	1082	1082	1079,2
23,729	6300	105,00	1126,6	1108,6	1101,7	1083,2	1084,9	1080,7
23,764	6310	105,17	1124,8	1109,5	1101,8	1084,6	1092,9	1082,9
23,800	6320	105,33	1121	1110	1102,3	1085,1	1101,8	1085,5
23,836	6330	105,50	1127,1	1113,3	1102,1	1086,4	1104,3	1088,1
23,872	6340	105,67	1135,5	1116,7	1100,8	1086,8	1103,1	1090
23,908	6350	105,83	1145,4	1120	1101,5	1087,8	1111,7	1093
23,944	6360	106,00	1154,3	1122,6	1102,5	1088,9	1115,3	1095,5
23,980	6370	106,17	1155	1123,9	1103,9	1090	1117,2	1097,4
24,016	6380	106,33	1151,9	1124,6	1104,5	1091	1116,2	1098,1
24,052	6390	106,50	1151	1125,1	1104,3	1091,7	1117,4	1100,6
24,088	6400	106,67	1152,9	1126,5	1105	1092,7	1119,5	1101,8
24,124	6410	106,83	1154,2	1127,1	1105,8	1093,9	1121,4	1102,9
24,160	6420	107,00	1153,3	1128,7	1106,4	1094,6	1118,8	1103,4
24,196	6430	107,17	1153,5	1129,4	1107,3	1095,6	1115,8	1103,7
24,231	6440	107,33	1158,9	1133,3	1107,7	1096,6	1111	1103
24,267	6450	107,50	1149,2	1128,8	1108,3	1097,6	1110,5	1105
24,303	6460	107,67	1154,2	1132,9	1108,8	1098,3	1107,1	1103,7
24,339	6470	107,83	1147,1	1127,8	1109,2	1099,1	1106,2	1104,1
24,375	6480	108,00	1150,1	1127,6	1110	1100,1	1107	1105,2
24,411	6490	108,17	1149,3	1127,9	1111	1101,2	1107,3	1105,9
24,447	6500	108,33	1153,4	1128,8	1111,9	1102	1107,9	1106,3
24,483	6510	108,50	1155,5	1129,6	1112,3	1102,7	1109,3	1107,3
24,519	6520	108,67	1156,6	1130	1112,9	1103,3	1109,9	1108
24,555	6530	108,83	1158,8	1131,1	1113,2	1104,2	1110,6	1108,6

Messpunkt [m]	Zeit [s]	Zeit [min]	Meßstelle 1	Meßstelle 2	Meßstelle 3	Meßstelle 4	Meßstelle 5	Meßstelle 6
24,591	6540	109,00	1162,1	1132,9	1113,9	1105,2	1112,6	1109,9
24,627	6550	109,17	1166	1134,9	1113,9	1105,8	1113,1	1110,4
24,662	6560	109,33	1168	1137,9	1115,1	1106,9	1116,6	1111,9
24,698	6570	109,50	1169,7	1139,9	1115,5	1107,4	1118,5	1112,5
24,734	6580	109,67	1172,4	1142	1116,7	1108,5	1118,9	1113,4
24,770	6590	109,83	1168,9	1144	1117,2	1109,1	1121,1	1114,4
24,806	6600	110,00	1166,7	1144,8	1117,8	1110,1	1122,2	1115,1
24,842	6610	110,17	1169,8	1146,3	1118,5	1110,9	1123	1116
24,878	6620	110,33	1169,1	1147,2	1119,1	1111,7	1123,9	1116,9
24,914	6630	110,50	1168,6	1147,4	1119,6	1112,6	1124,1	1117,6
24,950	6640	110,67	1166,2	1148,3	1120,2	1113,3	1123,3	1118,3
24,986	6650	110,83	1162,3	1148,6	1120,8	1114,3	1122,5	1118,7
25,022	6660	111,00	1158,3	1147,8	1121,4	1115	1121,9	1119,2
25,058	6670	111,17	1154,9	1147,6	1122,2	1115,9	1122,3	1120
25,093	6680	111,33	1153	1146,8	1122,9	1116,5	1122,4	1120,7
25,129	6690	111,50	1150,1	1146,5	1123,9	1117,3	1123,5	1121,5
25,165	6700	111,67	1149	1145,6	1125,1	1118,4	1124,9	1122,5
25,201	6710	111,83	1149	1145,3	1125,1	1118,9	1124,7	1123,1
25,237	6720	112,00	1148,7	1144,9	1125,2	1119,6	1124	1123,3
25,273	6730	112,17	1148,6	1144,7	1126	1120,3	1124,3	1124
25,309	6740	112,33	1149,5	1145	1127,4	1121,3	1125,3	1124,9
25,345	6750	112,50	1150	1145,5	1128,6	1122,1	1126,8	1125,8
25,381	6760	112,67	1149,9	1145,5	1128,9	1122,6	1127,6	1126,4
25,417	6770	112,83	1149,8	1146	1129,9	1123,5	1129,2	1127,5
25,453	6780	113,00	1150,1	1146,1	1130,6	1124,2	1130,4	1128,2
25,489	6790	113,17	1151	1146,8	1130,9	1124,9	1131,6	1129,1
25,524	6800	113,33	1152,6	1147,4	1131,6	1125,5	1133,1	1130
25,560	6810	113,50	1155,7	1148,6	1132,6	1126,4	1133,4	1130,9
25,596	6820	113,67	1155,4	1149,5	1133,6	1127	1133,8	1131,6
25,632	6830	113,83	1157,7	1150,7	1134,4	1127,9	1133,8	1132,3

Messpunkt [m]	Zeit [s]	Zeit [min]	Meßstelle 1	Meßstelle 2	Meßstelle 3	Meßstelle 4	Meßstelle 5	Meßstelle 6
25,668	6840	114,00	1163,2	1152	1135	1128,5	1133,5	1132,5
25,704	6850	114,17	1165,4	1154,2	1134,9	1129,1	1133,8	1133,3
25,740	6860	114,33	1167,6	1155,7	1135,3	1129,8	1134,3	1133,8
25,776	6870	114,50	1169,2	1157	1136,1	1130,6	1134,8	1134,5
25,812	6880	114,67	1167,2	1157,2	1136,8	1131,3	1135,5	1134,8
25,848	6890	114,83	1168	1157,6	1137,3	1132,2	1136,2	1135,5
25,884	6900	115,00	1168,9	1158,9	1138,1	1132,8	1136,8	1136,1
25,920	6910	115,17	1173,1	1160,6	1139,2	1133,8	1137,3	1136,8
25,956	6920	115,33	1178,6	1163	1139,9	1134,5	1137,9	1137,4
25,991	6930	115,50	1189,1	1165,7	1140,3	1134,8	1138,7	1138
26,027	6940	115,67	1204,7	1169,4	1140,7	1135,3	1139	1138,5
26,063	6950	115,83	1210,4	1171,3	1141,4	1136,2	1139,6	1139,2
26,099	6960	116,00	1211,5	1173,4	1142,2	1137,2	1140,3	1140,2
26,135	6970	116,17	1208,3	1175,4	1142,5	1137,7	1141	1140,7
26,171	6980	116,33	1198	1176,5	1143,6	1138,6	1141,9	1141,4
26,207	6990	116,50	1194,5	1175,6	1144,4	1139,3	1142,6	1142,1
26,243	7000	116,67	1181,8	1170,6	1144,8	1139,8	1143,2	1142,5
26,279	7010	116,83	1179	1167,9	1145,7	1140,7	1143,7	1143,4
26,315	7020	117,00	1178,9	1167,1	1146,4	1141,5	1144,5	1143,9
26,351	7030	117,17	1178,5	1166,4	1147,2	1142,2	1145,3	1144,7
26,387	7040	117,33	1180,6	1166,5	1148,3	1143,1	1146,5	1145,5
26,422	7050	117,50	1182,5	1166,4	1149,6	1144	1146,9	1146,1
26,458	7060	117,67	1184,5	1167	1150,6	1144,5	1147,6	1146,7
26,494	7070	117,83	1186,3	1168,1	1151,2	1145,5	1148,2	1147,7
26,530	7080	118,00	1188,4	1169,1	1152	1146,3	1149,2	1148,3
26,566	7090	118,17	1191,5	1171	1153	1147,3	1149,8	1149,1
26,602	7100	118,33	1192,9	1172,5	1154	1148	1150,4	1150
26,638	7110	118,50	1194,9	1173,6	1155	1149	1150,8	1150,5
26,674	7120	118,67	1197	1175,4	1155,5	1149,5	1152,2	1151,3
26,710	7130	118,83	1202	1178,5	1156,4	1150,4	1153,7	1152,5

Messpunkt [m]	Zeit [s]	Zeit [min]	Meßstelle 1	Meßstelle 2	Meßstelle 3	Meßstelle 4	Meßstelle 5	Meßstelle 6
26,746	7140	119,00	1205,1	1181,2	1157,1	1151,1	1155,3	1153,3
26,782	7150	119,17	1207,9	1183,7	1157,8	1151,9	1158,1	1154,6
26,818	7160	119,33	1209,8	1185,1	1158,5	1152,7	1159,5	1155,2
26,853	7170	119,50	1208,9	1186,7	1158,8	1153,3	1161,7	1156,1
26,889	7180	119,67	1211,1	1188,3	1159,2	1154,1	1163,7	1157,2
26,925	7190	119,83	1210,3	1189,1	1160,2	1155	1164,5	1158,5
26,961	7200	120,00	1210,4	1190,7	1161,2	1155,8	1165,5	1159,5
26,997	7210	120,17	1209,3	1191,7	1162,2	1156,7	1166	1160,3
27,033	7220	120,33	1206,5	1192,6	1162,9	1157,5	1167,4	1161,5
27,069	7230	120,50	1204,1	1192,2	1163,7	1158,5	1167,9	1162,7
27,105	7240	120,67	1204,3	1192,9	1164,5	1159,3	1170	1163,7
27,141	7250	120,83	1200,9	1191,9	1165,4	1159,9	1168,6	1164,1
27,177	7260	121,00	1198,8	1191,9	1165,9	1160,9	1167,7	1164,5
27,213	7270	121,17	1197,6	1191,6	1166,4	1161,6	1166,9	1165,3
27,249	7280	121,33	1196,5	1191	1166,7	1162,2	1167,6	1165,9
27,284	7290	121,50	1195,5	1190,7	1167,2	1163	1168,4	1167,1
27,320	7300	121,67	1195,1	1190,6	1168,6	1163,9	1169,7	1167,9
27,356	7310	121,83	1195,2	1190,6	1169,9	1164,9	1171,2	1169,1
27,392	7320	122,00	1195,9	1190,9	1170,9	1165,7	1173,5	1170,1
27,428	7330	122,17	1196,7	1191,6	1172,5	1166,9	1177	1171,4
27,464	7340	122,33	1196,9	1192,1	1173,4	1167,6	1179,5	1172,9
27,500	7350	122,50	1197,4	1193	1174,1	1168,5	1182	1174,4
27,536	7360	122,67	1198,7	1193,4	1174,6	1169,1	1183,5	1175,2
27,572	7370	122,83	1199,7	1194,3	1175,7	1170,3	1184,5	1176,2
27,608	7380	123,00	1199,9	1194,9	1176,3	1170,7	1186,3	1177,2
27,644	7390	123,17	1201,1	1195,8	1177,4	1171,9	1187,6	1178,9
27,680	7400	123,33	1200,9	1196,3	1178,1	1172,6	1188,8	1179,6
27,716	7410	123,50	1202,6	1197,3	1178,8	1173,5	1188,3	1180,2
27,751	7420	123,67	1203,9	1198,4	1179,6	1174,3	1190,3	1181,6
27,787	7430	123,83	1204,9	1199,6	1180,6	1175,3	1191	1182,4

Messpunkt [m]	Zeit [s]	Zeit [min]	Meßstelle 1	Meßstelle 2	Meßstelle 3	Meßstelle 4	Meßstelle 5	Meßstelle 6
27,823	7440	124,00	1206,7	1201,1	1181,5	1176,2	1192,1	1183,8
27,859	7450	124,17	1210,5	1202,5	1181,5	1176,7	1189	1184,1
27,895	7460	124,33	1212,5	1204,4	1182,4	1177,7	1188,8	1185
27,931	7470	124,50	1216,3	1206,2	1183,7	1178,7	1187,7	1185,5
27,967	7480	124,67	1220,8	1208	1185,5	1179,9	1187,3	1186
28,003	7490	124,83	1233	1211,3	1186,7	1180,6	1187,9	1187,3
28,039	7500	125,00	1246,7	1215	1187,2	1181,4	1188	1187,7
28,075	7510	125,17	1250,9	1217,1	1187,7	1182,4	1188,5	1188,2
28,111	7520	125,33	1263,8	1221,7	1188	1183,2	1189	1189
28,147	7530	125,50	1268,6	1225,4	1189	1184,4	1189,7	1189,8
28,182	7540	125,67	1261,2	1225,7	1190,3	1185,3	1190,4	1190,4
28,218	7550	125,83	1249,1	1223,9	1191,4	1186,4	1191,4	1191,4
28,254	7560	126,00	1232	1218,8	1192,7	1187,4	1192,3	1192,2
28,290	7570	126,17	1229,7	1217,5	1193,8	1188,5	1193,5	1193
28,326	7580	126,33	1229,2	1217	1194,8	1189,4	1194,5	1193,8
28,362	7590	126,50	1229,9	1216,7	1195,7	1190,3	1195,5	1194,8
28,398	7600	126,67	1231,2	1217,2	1196,8	1191,4	1196,5	1195,7
28,434	7610	126,83	1231,9	1217,7	1197,7	1192,4	1197,5	1196,7
28,470	7620	127,00	1234,7	1218,7	1198,5	1193,5	1199	1197,7
28,506	7630	127,17	1235,3	1219	1199,7	1194,7	1200,3	1198,7
28,542	7640	127,33	1236,7	1220,2	1200,7	1195,7	1201,8	1199,8
28,578	7650	127,50	1240,8	1221,8	1201,8	1196,9	1203,1	1200,8
28,613	7660	127,67	1242,4	1223,6	1203,1	1198,1	1204,1	1201,8
28,649	7670	127,83	1244,4	1226,3	1204,8	1199,3	1205,6	1202,7
28,685	7680	128,00	1248	1229,6	1206,8	1200,8	1206,6	1203,9
28,721	7690	128,17	1253,3	1233,4	1209,1	1202,2	1207,9	1204,8
28,757	7700	128,33	1258,9	1237	1209,5	1203	1209	1206
28,793	7710	128,50	1267,4	1240,7	1210,3	1204,2	1210	1207
28,829	7720	128,67	1273,4	1243,9	1212,6	1205,7	1210,9	1208,1
28,865	7730	128,83	1280	1246,7	1213,9	1206,6	1211,6	1209,1

Messpunkt [m]	Zeit [s]	Zeit [min]	Meßstelle 1	Meßstelle 2	Meßstelle 3	Meßstelle 4	Meßstelle 5	Meßstelle 6
28,901	7740	129,00	1278,7	1248,1	1215,4	1207,8	1212,4	1210,3
28,937	7750	129,17	1278,4	1250,5	1216,4	1209	1214,4	1211,8
28,973	7760	129,33	1276	1251,7	1217	1210,1	1217,2	1213,2
29,009	7770	129,50	1272,1	1252	1217,9	1211,3	1220,9	1214,6
29,044	7780	129,67	1270,1	1253	1218,2	1212,1	1225,6	1216,9
29,080	7790	129,83	1265,5	1252,3	1218,9	1213,3	1228,4	1218,5
29,116	7800	130,00	1263,9	1252,7	1220,5	1214,6	1228,3	1219,5
29,152	7810	130,17	1260,4	1251,5	1221,4	1215,3	1229,5	1220,7
29,188	7820	130,33	1258,6	1251,4	1222,2	1216,4	1232,4	1222,7
29,224	7830	130,50	1258,1	1251,2	1221,9	1217,1	1234,1	1224,5
29,260	7840	130,67	1256,8	1251,2	1223,2	1218,4	1235,5	1226
29,296	7850	130,83	1256,5	1250,9	1223,5	1219,4	1235,1	1227,3
29,332	7860	131,00	1256	1251,1	1223,9	1220,2	1235,9	1228,5
29,368	7870	131,17	1256,7	1251,9	1225	1221,1	1235,6	1229,3
29,404	7880	131,33	1257	1252	1225,7	1222,2	1236,9	1230,8
29,440	7890	131,50	1257,5	1252,4	1226,3	1223	1235,7	1231,1
29,476	7900	131,67	1257,7	1252,9	1227,5	1223,9	1233,5	1231,5
29,511	7910	131,83	1257,7	1252,7	1229,8	1225,2	1232,1	1231,5
29,547	7920	132,00	1257,9	1253,2	1232,6	1226,4	1232	1232,3
29,583	7930	132,17	1258,1	1253,3	1233,4	1227,3	1232,6	1233,1
29,619	7940	132,33	1259,2	1253,9	1234,6	1228,2	1233,1	1233,6
29,655	7950	132,50	1259,3	1254,5	1236	1229,3	1233,7	1234,4
29,691	7960	132,67	1260,8	1255,5	1236,9	1230,3	1235,6	1235,8
29,727	7970	132,83	1261,7	1256,7	1237,9	1231,3	1240,1	1237,1
29,763	7980	133,00	1263,8	1257,9	1238,9	1232,3	1242,2	1238,2
29,799	7990	133,17	1265,4	1259,1	1239,5	1233,3	1243,7	1238,9
29,835	8000	133,33	1267,4	1260,5	1240,4	1234,1	1245,7	1240,2
29,871	8010	133,50	1268,4	1262	1241,4	1235,1	1250	1242
29,907	8020	133,67	1271,5	1263,5	1241,9	1235,9	1253,4	1244,2
29,942	8030	133,83	1274,8	1265,5	1243,2	1236,8	1255,6	1245,7

Messpunkt [m]	Zeit [s]	Zeit [min]	Meßstelle 1	Meßstelle 2	Meßstelle 3	Meßstelle 4	Meßstelle 5	Meßstelle 6
29,978	8040	134,00	1279,1	1267,6	1244,5	1237,8	1255,2	1246,8
30,014	8050	134,17	1280,4	1269,8	1245	1238,6	1252,8	1247,2
30,050	8060	134,33	1283,4	1270,7	1244,4	1238,9	1251,8	1248
30,086	8070	134,50	1283,5	1272	1245,2	1239,9	1252,4	1249,3
30,122	8080	134,67	1283,9	1272,4	1245,5	1240,6	1252,4	1249,5
30,158	8090	134,83	1283,2	1273	1246,5	1241,6	1252,6	1250,5
30,194	8100	135,00	1286	1274,3	1247,4	1242,4	1253,3	1251,5
30,230	8110	135,17	1284,1	1274,2	1248	1243,2	1254,1	1252,3
30,266	8120	135,33	1283,7	1274,9	1248,7	1243,9	1254,1	1252,8
30,302	8130	135,50	1281	1274,4	1249,7	1244,9	1253,6	1253,3
30,338	8140	135,67	1279,6	1274,2	1250,5	1245,7	1252,8	1253,3
30,373	8150	135,83	1279,3	1273,9	1250,5	1246,2	1252,6	1253,4
30,409	8160	136,00	1278,7	1273,9	1250,5	1247,1	1252,7	1253,8
30,445	8170	136,17	1278,5	1273,7	1250,7	1247,7	1253,1	1254,1
30,481	8180	136,33	1279,3	1273,9	1251,3	1248,4	1253,6	1254,8
30,517	8190	136,50	1279,2	1273,9	1251,8	1249,2	1254,3	1255,3
30,553	8200	136,67	1278,7	1273,9	1252,6	1250	1255,1	1255,9
30,589	8210	136,83	1279,2	1273,9	1253,5	1250,7	1255,8	1256,3
30,625	8220	137,00	1280,3	1274,6	1254,6	1251,7	1256,8	1257,1
30,661	8230	137,17	1281,2	1275,1	1255,3	1252,4	1257,8	1257,8
30,697	8240	137,33	1283,3	1275,9	1256,3	1253,2	1258,8	1258,5
30,733	8250	137,50	1284,6	1277	1257,1	1254,2	1259,8	1259,1
30,769	8260	137,67	1287,1	1277,9	1258,1	1255,2	1260,3	1259,9
30,804	8270	137,83	1290,2	1279	1259,2	1255,9	1260,9	1260,5
30,840	8280	138,00	1293,3	1280,5	1260,3	1256,6	1260,9	1260,9
30,876	8290	138,17	1296	1281,8	1261,6	1257,6	1261,7	1261,7
30,912	8300	138,33	1299,6	1283,8	1262,3	1258,3	1262,3	1262,4
30,948	8310	138,50	1302,4	1285,1	1263,4	1259,1	1262,9	1263,1
30,984	8320	138,67	1303,2	1286,1	1264,9	1260,1	1263,7	1263,9
31,020	8330	138,83	1299,4	1286,9	1265,6	1261,1	1265,1	1264,9

Messpunkt [m]	Zeit [s]	Zeit [min]	Meßstelle 1	Meßstelle 2	Meßstelle 3	Meßstelle 4	Meßstelle 5	Meßstelle 6
31,056	8340	139,00	1302,3	1288,6	1265,9	1261,6	1267	1265,7
31,092	8350	139,17	1304,3	1289,5	1266,3	1262,2	1267,8	1266,3
31,128	8360	139,33	1304	1289,9	1266,7	1262,9	1269,5	1267,3
31,164	8370	139,50	1305,9	1290,5	1267,2	1263,6	1269,7	1267,9
31,200	8380	139,67	1306,4	1291,7	1268,5	1264,4	1271	1268,7
31,236	8390	139,83	1309,2	1292,7	1269,2	1265,2	1272,5	1269,7
31,271	8400	140,00	1309	1293,4	1269,8	1266,1	1273,8	1270,2
31,307	8410	140,17	1305,8	1293	1271,1	1266,7	1275,4	1271,1
31,343	8420	140,33	1299,7	1292,4	1271,9	1267,6	1275,8	1271,9
31,379	8430	140,50	1297,4	1291,6	1272,7	1268,3	1276,3	1272,4
31,415	8440	140,67	1296,1	1291,3	1273,3	1268,9	1278,5	1273,8
31,451	8450	140,83	1295,4	1291,3	1273,2	1269,6	1279,1	1274,8
31,487	8460	141,00	1295,2	1291,1	1273,2	1270,1	1278,1	1275,7
31,523	8470	141,17	1294,8	1291,4	1273,8	1270,8	1277,4	1275,9
31,559	8480	141,33	1295,4	1291,4	1274,8	1271,5	1277,6	1276,6
31,595	8490	141,50	1296,6	1292,1	1275,8	1272,4	1277,6	1277,3
31,631	8500	141,67	1297,1	1292,3	1276,2	1272,9	1277,8	1277,6
31,667	8510	141,83	1297,2	1292,6	1276,7	1273,5	1279	1278,6
31,702	8520	142,00	1297,5	1293,1	1277,5	1274,3	1279,8	1279,6
31,738	8530	142,17	1297,5	1293,4	1278,5	1275	1279,8	1279,8
31,774	8540	142,33	1298,9	1294,4	1279,3	1275,9	1279,8	1280,3
31,810	8550	142,50	1299,2	1295,1	1279,8	1276,3	1280,1	1280,8
31,846	8560	142,67	1299,5	1295,8	1281,1	1277,2	1280,9	1281,4
31,882	8570	142,83	1300,8	1296,7	1282,4	1278,3	1281,7	1282,4
31,918	8580	143,00	1301	1296,9	1283,3	1278,7	1282,4	1282,8
31,954	8590	143,17	1302,2	1297,9	1284,1	1279,5	1283,8	1283,8
31,990	8600	143,33	1304,8	1299	1284,7	1280,1	1284,5	1284,5
32,026	8610	143,50	1306,1	1300	1285,5	1280,9	1286,2	1285,5
32,062	8620	143,67	1307,7	1301,2	1286,2	1281,6	1286,9	1286,2
32,098	8630	143,83	1308,6	1302	1286,6	1282,1	1288	1286,7

Messpunkt [m]	Zeit [s]	Zeit [min]	Meßstelle 1	Meßstelle 2	Meßstelle 3	Meßstelle 4	Meßstelle 5	Meßstelle 6
32,133	8640	144,00	1310,9	1303,5	1287,4	1283	1290,2	1287,9
32,169	8650	144,17	1313,9	1305	1288,4	1283,6	1294	1289,4
32,205	8660	144,33	1314,9	1306,3	1289,5	1284,6	1296,3	1290,9
32,241	8670	144,50	1318,3	1307,6	1290,2	1285,4	1297,6	1291,5
32,277	8680	144,67	1315,7	1307,8	1291,5	1286,1	1298,2	1292
32,313	8690	144,83	1313,7	1307,5	1292,2	1286,9	1298,8	1293,3
32,349	8700	145,00	1313,7	1307,6	1293,3	1287,7	1299,7	1294,4
32,385	8710	145,17	1313,4	1307,6	1294,6	1288,5	1300,7	1295,6
32,421	8720	145,33	1315,7	1308,3	1295,5	1289,4	1300,4	1296
32,457	8730	145,50	1314,4	1308	1295,3	1289,7	1297,6	1295,6
32,493	8740	145,67	1313,3	1308	1294,5	1289,9	1296,7	1296,3
32,529	8750	145,83	1312,7	1308	1295,1	1290,7	1296,8	1296,6
32,564	8760	146,00	1313,3	1308,2	1296	1291,4	1297,2	1297,2
32,600	8770	146,17	1313,6	1308,9	1296,1	1291,8	1297,8	1297,6
32,636	8780	146,33	1314,9	1310,3	1296,7	1292,6	1297,8	1298,1
32,672	8790	146,50	1315,8	1311,2	1296,3	1292,8	1297,4	1298,1
32,708	8800	146,67	1316,5	1312,6	1296,6	1293,5	1297,8	1298,4
32,744	8810	146,83	1317,9	1313,6	1297	1294	1297,8	1299
32,780	8820	147,00	1319	1314,3	1297,2	1294,5	1298	1299,2
32,816	8830	147,17	1320,8	1315,1	1298	1295,4	1298,3	1299,6
32,852	8840	147,33	1320,7	1315,6	1298,8	1295,9	1298,6	1300
32,888	8850	147,50	1322,1	1316,4	1299,5	1296,5	1299	1300,3
32,924	8860	147,67	1323,3	1317,2	1300,1	1297,2	1300	1301
32,960	8870	147,83	1323,6	1317,4	1300,8	1297,9	1300,2	1301,3
32,996	8880	148,00	1323,5	1318,1	1301,1	1298	1300,8	1301,6
33,031	8890	148,17	1327,2	1318,8	1301,9	1298,8	1301,1	1302,4
33,067	8900	148,33	1329,5	1320	1302,4	1299,3	1302,1	1303,1
33,103	8910	148,50	1333,5	1321,3	1302,8	1299,7	1302,5	1303,5
33,139	8920	148,67	1336,2	1322,1	1303,3	1300,5	1304,1	1304,1
33,175	8930	148,83	1336,9	1323,2	1303,5	1300,8	1304,1	1304,3

Messpunkt [m]	Zeit [s]	Zeit [min]	Meßstelle 1	Meßstelle 2	Meßstelle 3	Meßstelle 4	Meßstelle 5	Meßstelle 6
33,211	8940	149,00	1340,7	1324,5	1304	1301,3	1305,6	1305,3
33,247	8950	149,17	1334,8	1324,5	1304,7	1301,9	1305	1305,3
33,283	8960	149,33	1337,3	1324,8	1304,8	1302,2	1305	1305,6
33,319	8970	149,50	1336,7	1324,8	1305,6	1303	1307,4	1306,7
33,355	8980	149,67	1331	1323,6	1306,6	1303,5	1309	1307,4
33,391	8990	149,83	1327,9	1323,2	1307,2	1304,1	1310,7	1308,2
33,427	9000	150,00	1326,8	1322,8	1307,4	1304,5	1311,2	1308,9
33,462	9010	150,17	1326,2	1322,6	1307,9	1304,9	1310,9	1309,2
33,498	9020	150,33	1325,3	1322,5	1308,3	1305,5	1311,6	1309,8
33,534	9030	150,50	1325,2	1322,4	1308,6	1305,8	1311,6	1310,4
33,570	9040	150,67	1325	1322,2	1308,9	1306,3	1312,1	1310,9
33,606	9050	150,83	1325,8	1322,5	1309,8	1307	1312,7	1311,7
33,642	9060	151,00	1326,8	1322,8	1310,7	1307,6	1313,5	1312,3
33,678	9070	151,17	1326,7	1323,1	1311,3	1308,1	1314,2	1312,9
33,714	9080	151,33	1326,5	1323,1	1311,4	1308,5	1314,6	1313,3
33,750	9090	151,50	1327,2	1323,7	1311,8	1309	1314,1	1313,4
33,786	9100	151,67	1327,1	1323,9	1311,7	1309,1	1313,9	1313,7
33,822	9110	151,83	1328,3	1324,6	1312	1309,7	1313,6	1314,1
33,858	9120	152,00	1328,8	1325,2	1312,4	1310,3	1313,4	1314,5
33,893	9130	152,17	1329,4	1325,6	1312,7	1310,4	1313,7	1314,8
33,929	9140	152,33	1329,3	1326,2	1313,4	1311,1	1314,2	1315,4
33,965	9150	152,50	1329,6	1326,4	1313,9	1311,5	1314,1	1315,4
34,001	9160	152,67	1330,9	1327,3	1314,6	1312	1314,6	1315,9
34,037	9170	152,83	1332,6	1328,2	1314,9	1312,3	1315,1	1316,4
34,073	9180	153,00	1334,4	1329,3	1315,4	1312,9	1315,7	1317
34,109	9190	153,17	1340,5	1331,1	1315,9	1313,3	1317,2	1317,6
34,145	9200	153,33	1341,6	1332,3	1316,7	1313,9	1319,7	1318,4
34,181	9210	153,50	1350,9	1334,5	1318,1	1314,8	1321,5	1319,1
34,217	9220	153,67	1357,2	1336,2	1318,7	1315,4	1323,4	1320
34,253	9230	153,83	1358	1336,9	1319,3	1315,9	1324,3	1320,8

Messpunkt [m]	Zeit [s]	Zeit [min]	Meßstelle 1	Meßstelle 2	Meßstelle 3	Meßstelle 4	Meßstelle 5	Meßstelle 6
34,289	9240	154,00	1356,4	1337,9	1319,7	1316,2	1325,1	1321,5
34,324	9250	154,17	1353,8	1338	1320,8	1317,1	1326,7	1322,6
34,360	9260	154,33	1345,4	1337,7	1322,1	1317,7	1327,9	1323,3
34,396	9270	154,50	1340,3	1335,9	1323,6	1318,5	1329,2	1324,4
34,432	9280	154,67	1337,8	1335,2	1325,8	1319,5	1329,8	1325,2
34,468	9290	154,83	1336,1	1334,3	1325,8	1319,7	1327,9	1325,1
34,504	9300	155,00	1335,6	1333,8	1325,9	1320,2	1328,6	1325,9
34,540	9310	155,17	1335,1	1333,3	1325,6	1320,4	1328,9	1326,3
34,576	9320	155,33	1334,7	1333,2	1326,5	1321,1	1328,6	1326,8
34,612	9330	155,50	1334,8	1333,1	1326,8	1321,5	1328,4	1327,1
34,648	9340	155,67	1334,9	1333,3	1327,4	1321,8	1328,7	1327,4
34,684	9350	155,83	1335,3	1333,8	1327,9	1322,3	1329,1	1327,9
34,720	9360	156,00	1335,3	1333,9	1328,3	1322,9	1328,9	1328,1
34,756	9370	156,17	1335,8	1334,3	1327,9	1323,1	1327,6	1327,9
34,791	9380	156,33	1336	1334,4	1327,4	1323,3	1326,9	1328
34,827	9390	156,50	1336,2	1334,8	1326,9	1323,5	1326,9	1328,2
34,863	9400	156,67	1336,6	1335,1	1327,1	1324	1327	1328,4
34,899	9410	156,83	1337,1	1335,5	1328,1	1324,5	1328	1329,4
34,935	9420	157,00	1337,5	1335,9	1328,8	1324,9	1328,5	1329,7
34,971	9430	157,17	1338	1336,5	1328,5	1325,1	1328,3	1329,6
35,007	9440	157,33	1338,7	1337,1	1328,5	1325,4	1328,5	1330
35,043	9450	157,50	1340,9	1337,9	1328,9	1326	1328,9	1330,2
35,079	9460	157,67	1341,4	1338,5	1329	1326,4	1328,8	1330,5
35,115	9470	157,83	1342,4	1339,3	1330,1	1327	1329,8	1330,9
35,151	9480	158,00	1344,9	1340,3	1330,8	1327,3	1329,9	1331,1
35,187	9490	158,17	1347,1	1341,2	1330,9	1327,8	1330,6	1331,6
35,222	9500	158,33	1353,3	1342,9	1331,4	1328,5	1330,8	1331,7
35,258	9510	158,50	1351,6	1343,5	1331,6	1328,9	1331,1	1332,2
35,294	9520	158,67	1354,5	1344,6	1331,8	1329,1	1331,4	1332,5
35,330	9530	158,83	1353,2	1344,9	1332,1	1329,5	1331,8	1332,9

Messpunkt [m]	Zeit [s]	Zeit [min]	Meßstelle 1	Meßstelle 2	Meßstelle 3	Meßstelle 4	Meßstelle 5	Meßstelle 6
35,366	9540	159,00	1353,2	1345,2	1332,2	1329,8	1333	1333,4
35,402	9550	159,17	1354	1345,8	1332,7	1330,3	1333,7	1333,9
35,438	9560	159,33	1354,5	1346	1333,4	1330,8	1334,2	1334,1
35,474	9570	159,50	1354,5	1346,3	1333,7	1331,1	1334,7	1334,5
35,510	9580	159,67	1353,1	1346,4	1335,1	1331,5	1336,4	1335,4
35,546	9590	159,83	1351,3	1346,7	1335,5	1331,9	1338	1335,8
35,582	9600	160,00	1351,8	1346,7	1336,2	1332,6	1338,8	1336,7
35,618	9610	160,17	1350,6	1346,5	1336,2	1332,8	1339,6	1337,2
35,653	9620	160,33	1349,8	1346,7	1336,5	1333,2	1339,4	1337,8
35,689	9630	160,50	1350,3	1346,8	1336,5	1333,9	1339,1	1338,1
35,725	9640	160,67	1349,6	1346,7	1336,9	1333,9	1339,7	1338,7
35,761	9650	160,83	1350,1	1347	1337,5	1334,7	1340,8	1339,3
35,797	9660	161,00	1349,8	1347,2	1338	1335,2	1341,4	1339,8
35,833	9670	161,17	1350,2	1347,4	1338,5	1335,6	1341,7	1340,2
35,869	9680	161,33	1351,9	1348,1	1339,1	1336	1342,6	1340,4
35,905	9690	161,50	1352,1	1348,5	1340,6	1336,7	1346,2	1341,6
35,941	9700	161,67	1352,8	1349,3	1341,3	1337,2	1345,9	1341,8
35,977	9710	161,83	1353,2	1349,6	1341,1	1337,5	1344,9	1342,1
36,013	9720	162,00	1354,2	1350,5	1341,3	1337,7	1344,7	1342,6
36,049	9730	162,17	1354,7	1351	1341,4	1338,2	1347	1343,2
36,084	9740	162,33	1359,7	1352,5	1341,7	1338,3	1349,4	1344,7
36,120	9750	162,50	1360,4	1353,5	1341,7	1338,8	1349,7	1344,7
36,156	9760	162,67	1364,1	1354,7	1342,4	1339,3	1351,1	1345,9
36,192	9770	162,83	1367,7	1355,9	1343	1339,7	1350	1345,3
36,228	9780	163,00	1374,8	1357,9	1343,3	1340,2	1350,2	1346,4
36,264	9790	163,17	1378,8	1359,1	1345	1340,9	1352,5	1347,9
36,300	9800	163,33	1383	1360,7	1345,8	1341,4	1352,6	1348,6
36,336	9810	163,50	1379,4	1360,5	1346,9	1341,7	1353,4	1349,2
36,372	9820	163,67	1376,1	1360,5	1348,5	1342,5	1352,6	1349,2
36,408	9830	163,83	1376,2	1361,3	1348,5	1342,8	1353,9	1350

Messpunkt [m]	Zeit [s]	Zeit [min]	Meßstelle 1	Meßstelle 2	Meßstelle 3	Meßstelle 4	Meßstelle 5	Meßstelle 6
36,444	9840	164,00	1377,8	1362	1348,9	1343,3	1353	1350,5
36,480	9850	164,17	1378,9	1362,3	1349	1343,6	1352,3	1349,7
36,516	9860	164,33	1374,9	1361,9	1350,4	1344,3	1350,9	1349,7
36,551	9870	164,50	1368,6	1360,2	1348,7	1343,8	1348,6	1348,7
36,587	9880	164,67	1366,4	1359,5	1347,7	1344,1	1347,5	1348,7
36,623	9890	164,83	1364,3	1358,7	1347,5	1344,3	1347,2	1348,5
36,659	9900	165,00	1361,9	1357,8	1347,8	1344,7	1347,8	1349,1
36,695	9910	165,17	1360,2	1357,1	1348,8	1344,8	1348	1348,8
36,731	9920	165,33	1360,7	1356,7	1348,7	1345,1	1347,9	1348,6
36,767	9930	165,50	1360,6	1356,5	1348,5	1345,2	1347,5	1348,6
36,803	9940	165,67	1359,4	1356,2	1348,5	1345,3	1347,7	1348,6
36,839	9950	165,83	1358,3	1355,7	1348,5	1345,5	1347,5	1348,5
36,875	9960	166,00	1357,6	1355,2	1348,6	1345,5	1347,3	1348,6
36,911	9970	166,17	1357	1355	1348,6	1345,7	1347,1	1348,5
36,947	9980	166,33	1356,5	1355	1348,6	1345,8	1347	1348,5
36,982	9990	166,50	1356	1354,9	1348,6	1346	1346,8	1348,3
37,018	10000	166,67	1356,4	1355,1	1348,7	1346	1347	1348,4
37,054	10010	166,83	1356,8	1355,3	1349	1346,2	1347	1348,5
37,090	10020	167,00	1357,5	1355,6	1348,8	1346	1346,6	1348,3
37,126	10030	167,17	1358	1356,2	1348,8	1346,2	1346,7	1348,3
37,162	10040	167,33	1358,2	1356,3	1349	1346,2	1346,5	1348,2
37,198	10050	167,50	1358,5	1356,8	1349,1	1346,3	1346,7	1348,3
37,234	10060	167,67	1358,5	1356,8	1349	1346,3	1346,5	1348,3
37,270	10070	167,83	1358,8	1357,2	1349,3	1346,7	1346,7	1348,3
37,306	10080	168,00	1360,9	1357,6	1349,4	1346,7	1346,7	1348,3
37,342	10090	168,17	1360,8	1357,5	1349,3	1346,7	1346,5	1348,2
37,378	10100	168,33	1361,9	1358,2	1349,6	1346,6	1346,6	1348,3
37,413	10110	168,50	1362,7	1358,6	1349,6	1346,8	1346,5	1348,3
37,449	10120	168,67	1365,3	1358,9	1349,8	1346,8	1346,7	1348,3
37,485	10130	168,83	1366,2	1359,4	1349,8	1347	1346,7	1348,1

Messpunkt [m]	Zeit [s]	Zeit [min]	Meßstelle 1	Meßstelle 2	Meßstelle 3	Meßstelle 4	Meßstelle 5	Meßstelle 6
37,521	10140	169,00	1365,8	1359,1	1349,8	1347	1346,5	1348,1
37,557	10150	169,17	1366,4	1359,3	1350	1347,2	1346,5	1348,2
37,593	10160	169,33	1367,8	1359,3	1350,1	1347,2	1346,7	1348,1
37,629	10170	169,50	1364,5	1358,6	1349,9	1347,1	1346,6	1348,1
37,665	10180	169,67	1363,7	1358,6	1349,9	1347,2	1346,5	1348,1
37,701	10190	169,83	1364,3	1358,7	1350	1347,2	1346,6	1348,2
37,737	10200	170,00	1364,1	1358,3	1350	1347,4	1346,9	1348,2
37,773	10210	170,17	1363	1358,2	1350	1347,4	1346,9	1348,2
37,809	10220	170,33	1361,8	1357,9	1350	1347,5	1346,9	1348,2
37,844	10230	170,50	1360,5	1357,7	1350	1347,5	1347,2	1348,3
37,880	10240	170,67	1360,1	1357,5	1350,1	1347,6	1347,6	1348,4
37,916	10250	170,83	1359,3	1357,3	1350,3	1347,7	1347,9	1348,3
37,952	10260	171,00	1359,2	1357,3	1350,3	1347,7	1347,7	1348,5
37,988	10270	171,17	1359,3	1357,5	1350,4	1347,8	1347,8	1348,8
38,024	10280	171,33	1359,3	1357,6	1350,4	1347,7	1348	1348,6
38,060	10290	171,50	1359,9	1358	1350,6	1347,8	1348,5	1348,8
38,096	10300	171,67	1361,1	1358,5	1351	1348	1348,8	1349,2
38,132	10310	171,83	1361,8	1358,9	1351	1348	1349,3	1349,2
38,168	10320	172,00	1361,7	1359,1	1351,1	1348,1	1349,1	1349,3
38,204	10330	172,17	1361,6	1359,3	1351,3	1348,4	1349,5	1349,5
38,240	10340	172,33	1362,4	1359,5	1351,4	1348,3	1349,6	1349,6
38,276	10350	172,50	1362,6	1359,5	1351,8	1348,7	1349,7	1349,8
38,311	10360	172,67	1364,1	1360,3	1351,9	1348,8	1350,3	1350,1
38,347	10370	172,83	1365,2	1360,6	1351,8	1348,7	1349,8	1350
38,383	10380	173,00	1371	1361,1	1351,6	1348,6	1349,3	1349,8
38,419	10390	173,17	1371,5	1361,3	1351,8	1348,8	1349	1350
38,455	10400	173,33	1373,3	1362,8	1351,8	1349,2	1349,2	1350,3
38,491	10410	173,50	1374,2	1363	1351,6	1348,8	1348,8	1349,9
38,527	10420	173,67	1372,6	1363,9	1351,8	1349	1349	1350,1
38,563	10430	173,83	1367,5	1362,6	1351,9	1349,1	1349	1350,3

Messpunkt [m]	Zeit [s]	Zeit [min]	Meßstelle 1	Meßstelle 2	Meßstelle 3	Meßstelle 4	Meßstelle 5	Meßstelle 6
38,599	10440	174,00	1366,4	1361,8	1352	1349,5	1349,4	1350,5
38,635	10450	174,17	1363,1	1361,2	1351,8	1349,3	1349,2	1350,3
38,671	10460	174,33	1362,4	1360,3	1352,1	1349,6	1349,3	1350,3
38,707	10470	174,50	1361,6	1359,8	1352,3	1349,7	1349,5	1350,7
38,742	10480	174,67	1360,5	1359,3	1352,3	1349,8	1349,5	1350,5
38,778	10490	174,83	1360,1	1358,9	1352,6	1350	1349,8	1350,8
38,814	10500	175,00	1359,4	1358,6	1352,3	1349,9	1349,5	1350,7
38,850	10510	175,17	1358,5	1358,3	1352,6	1350	1349,8	1351
38,886	10520	175,33	1358,2	1358,1	1352,6	1350	1349,9	1351
38,922	10530	175,50	1358,2	1357,9	1352,6	1350,2	1350	1351,2
38,958	10540	175,67	1358,3	1358	1352,9	1350,3	1350,3	1351,3
38,994	10550	175,83	1358,2	1358	1353,1	1350,5	1350,5	1351,6
39,030	10560	176,00	1358,3	1358	1353,1	1350,6	1350,5	1351,8
39,066	10570	176,17	1358,3	1358,2	1353,3	1350,6	1350,6	1351,8
39,102	10580	176,33	1358,3	1358,2	1353,4	1350,6	1350,8	1352,1
39,138	10590	176,50	1358,3	1358	1353,3	1350,6	1350,8	1351,9
39,173	10600	176,67	1358,9	1358,5	1353,6	1351	1351	1352
39,209	10610	176,83	1359,1	1358,5	1353,4	1350,8	1350,8	1351,9
39,245	10620	177,00	1359,7	1359	1353,8	1351,2	1351	1352,3
39,281	10630	177,17	1359,7	1359,2	1353,9	1351,3	1351,2	1352,3
39,317	10640	177,33	1360,3	1359,1	1353,9	1351,1	1351	1352,3
39,353	10650	177,50	1360,8	1359,6	1354,1	1351,5	1351,1	1352,4
39,389	10660	177,67	1361,3	1360	1354,1	1351,5	1351,2	1352,3
39,425	10670	177,83	1363,1	1360,5	1354,3	1351,5	1351,2	1352,6
39,461	10680	178,00	1366,2	1361,4	1354,2	1351,6	1351,3	1352,7
39,497	10690	178,17	1368,1	1362,2	1354,3	1351,7	1351,3	1352,6
39,533	10700	178,33	1366,6	1362,2	1354,5	1351,8	1351,3	1352,8
39,569	10710	178,50	1373,3	1363,5	1354,6	1352	1351,3	1352,8
39,604	10720	178,67	1376,1	1363,8	1354,8	1352,2	1351,5	1353
39,640	10730	178,83	1375,8	1364	1355,1	1352,3	1351,5	1353

Messpunkt [m]	Zeit [s]	Zeit [min]	Meßstelle 1	Meßstelle 2	Meßstelle 3	Meßstelle 4	Meßstelle 5	Meßstelle 6
39,676	10740	179,00	1373,3	1363,6	1355,3	1352,5	1351,6	1352,9
39,712	10750	179,17	1370,5	1363,1	1355,1	1352,5	1352	1353,3
39,748	10760	179,33	1369,9	1363	1355,1	1352,3	1352,3	1353,3
39,784	10770	179,50	1367,8	1362,7	1355,3	1352,5	1352,2	1353,3
39,820	10780	179,67	1367,8	1362,7	1355,1	1352,7	1352,3	1353,5
39,856	10790	179,83	1366,1	1362,7	1355,1	1352,8	1352,3	1353,5
39,892	10800	180,00	1366,8	1362,8	1355,3	1353	1352,7	1353,8
39,928	10810	180,17	1366,4	1363	1355,4	1353,1	1352,8	1354
39,964	10820	180,33	1367,1	1363	1355,4	1352,9	1352,6	1353,8
40,000	10830	180,50	1366,3	1363	1355,5	1353	1352,7	1353,8
40,036	10840	180,67	1366,1	1363	1355,6	1353,3	1352,8	1354,2
40,071	10850	180,83	1366,3	1363,3	1355,8	1353,2	1352,8	1354,2
40,107	10860	181,00	1366,6	1363,7	1355,9	1353,5	1353,2	1354,3
40,143	10870	181,17	1367,7	1364,4	1356,5	1353,7	1354,3	1354,9
40,179	10880	181,33	1368,7	1365	1356,4	1353,8	1354,3	1355,1
40,215	10890	181,50	1378	1366	1356,5	1354	1354,2	1355
40,251	10900	181,67	1381,7	1367,8	1356,8	1354,3	1354,3	1355,2
40,287	10910	181,83	1380,8	1367,8	1356,6	1354,2	1354,5	1355,3
40,323	10920	182,00	1382,1	1368,8	1356,8	1354,5	1355	1355,6
40,359	10930	182,17	1386,2	1370,1	1357,2	1354,7	1355,7	1356
40,395	10940	182,33	1389	1371,2	1357,3	1354,8	1355,6	1356,3
40,431	10950	182,50	1392,4	1372,1	1357,5	1355	1355,5	1356,1
40,467	10960	182,67	1391,6	1372,9	1357,6	1355,2	1355,6	1356,5
40,502	10970	182,83	1390,9	1373,4	1358,3	1355,5	1355,8	1356,6
40,538	10980	183,00	1388,8	1373,4	1358,6	1355,7	1355,5	1356,5
40,574	10990	183,17	1386,4	1373,1	1358,9	1356,2	1355,7	1356,8
40,610	11000	183,33	1382,6	1371,5	1358,8	1356	1355,7	1357
40,646	11010	183,50	1379,1	1370,6	1359,2	1356,5	1356,1	1357,1
40,682	11020	183,67	1377,5	1369,6	1359,6	1356,8	1356,8	1357,5
40,718	11030	183,83	1377,7	1369,5	1359,6	1356,8	1357	1357,5

Messpunkt [m]	Zeit [s]	Zeit [min]	Meßstelle 1	Meßstelle 2	Meßstelle 3	Meßstelle 4	Meßstelle 5	Meßstelle 6
40,754	11040	184,00	1376,9	1369,3	1360,1	1357	1357,5	1357,8
40,790	11050	184,17	1377	1369,3	1360,3	1357,3	1357,5	1358
40,826	11060	184,33	1375,1	1368,7	1360,6	1357,7	1357,2	1358,2
40,862	11070	184,50	1374,2	1368,4	1360,9	1357,8	1357,1	1358,3
40,898	11080	184,67	1371,8	1367,4	1361	1358	1357,2	1358,3
40,933	11090	184,83	1370,5	1367	1361,4	1358,1	1357,5	1358,5
40,969	11100	185,00	1369,8	1367	1362,2	1358,6	1357,5	1358,8
41,005	11110	185,17	1369	1366,9	1363	1358,9	1357,7	1358,9
41,041	11120	185,33	1368,3	1366,5	1362,9	1358,9	1357,8	1358,9
41,077	11130	185,50	1367,8	1366,5	1362,9	1359,1	1358,1	1359,3
41,113	11140	185,67	1367,9	1366,7	1362,6	1359	1358,4	1359,5
41,149	11150	185,83	1368,9	1366,9	1362,5	1359,2	1358,5	1359,5
41,185	11160	186,00	1369	1366,8	1362,6	1359,3	1358,5	1359,6
41,221	11170	186,17	1371,7	1367,6	1363	1359,5	1358,7	1360
41,257	11180	186,33	1372	1367,7	1363	1359,7	1358,9	1360,2
41,293	11190	186,50	1370,2	1367,6	1363	1359,7	1358,9	1360,3
41,329	11200	186,67	1369,9	1367,9	1363	1359,7	1358,9	1360,2
41,364	11210	186,83	1371,5	1367,6	1362,8	1359,7	1358,9	1360,3
41,400	11220	187,00	1373,1	1368,3	1362,9	1359,9	1359,1	1360,4
41,436	11230	187,17	1373,6	1368,2	1362,8	1359,9	1359	1360,5
41,472	11240	187,33	1372,6	1368,1	1363,1	1360,2	1359,3	1360,7
41,508	11250	187,50	1371,7	1367,6	1362,8	1359,9	1359	1360,5
41,544	11260	187,67	1371,8	1367,6	1363	1360	1359,2	1360,7
41,580	11270	187,83	1369,9	1367,1	1362,8	1360,2	1359,2	1360,7
41,616	11280	188,00	1368,7	1366,9	1363,1	1360,4	1359,4	1360,9
41,652	11290	188,17	1368,1	1366,8	1362,8	1360,2	1359,4	1360,7
41,688	11300	188,33	1368,5	1366,9	1362,9	1360,3	1359,5	1360,9
41,724	11310	188,50	1368,2	1366,9	1363,1	1360,4	1359,7	1361
41,760	11320	188,67	1368,2	1366,9	1363,1	1360,5	1359,7	1361,1
41,796	11330	188,83	1368,4	1366,9	1363,3	1360,6	1359,8	1361,1

Messpunkt [m]	Zeit [s]	Zeit [min]	Meßstelle 1	Meßstelle 2	Meßstelle 3	Meßstelle 4	Meßstelle 5	Meßstelle 6
41,831	11340	189,00	1367,6	1366,8	1363,3	1360,7	1360,1	1361,4
41,867	11350	189,17	1367,4	1366,6	1363,2	1360,6	1359,7	1361,2
41,903	11360	189,33	1367,8	1366,8	1363,2	1360,9	1360,2	1361,4
41,939	11370	189,50	1367,5	1366,8	1363,2	1360,6	1360,1	1361,3
41,975	11380	189,67	1367,5	1367	1363,2	1360,9	1360,6	1361,6
42,011	11390	189,83	1367,7	1367,2	1363,2	1360,9	1360,8	1361,6
42,047	11400	190,00	1368	1367,3	1363,4	1360,9	1360,7	1361,7
42,083	11410	190,17	1368,1	1367,7	1363,6	1361,1	1360,6	1361,7
42,119	11420	190,33	1368,9	1368,1	1363,5	1361	1360,7	1361,9
42,155	11430	190,50	1369,3	1368,4	1363,5	1360,9	1360,7	1361,7
42,191	11440	190,67	1371,7	1369,2	1364	1361,2	1361,9	1362,2
42,227	11450	190,83	1372,1	1369,4	1364,7	1361,6	1362,4	1362,6
42,262	11460	191,00	1371,4	1369,9	1364,8	1361,7	1363	1362,7
42,298	11470	191,17	1372,4	1370,2	1364,7	1361,5	1363,5	1363
42,334	11480	191,33	1373,5	1370,6	1364,7	1361,7	1364,7	1363,4
42,370	11490	191,50	1376,4	1371,3	1365,4	1362,1	1364,6	1363,7
42,406	11500	191,67	1379,6	1371,9	1365,3	1361,9	1364	1363,9
42,442	11510	191,83	1381,7	1372,8	1365,4	1362,3	1364,1	1363,9
42,478	11520	192,00	1384,1	1373,2	1365,2	1362,3	1363,9	1364,1
42,514	11530	192,17	1382,7	1372,9	1365,5	1362,5	1364,2	1364,3
42,550	11540	192,33	1383,3	1373,1	1365,7	1362,4	1364,3	1364,3
42,586	11550	192,50	1383,8	1373,8	1366	1362,7	1364,2	1364,6
42,622	11560	192,67	1383,6	1373,9	1365,7	1362,6	1364,1	1364,6
42,658	11570	192,83	1381,3	1373,6	1365,6	1362,8	1364,1	1364,6
42,693	11580	193,00	1378,8	1373,1	1365,7	1362,9	1364,6	1365
42,729	11590	193,17	1377,5	1372,6	1365,7	1362,9	1365,3	1365,5
42,765	11600	193,33	1376,1	1372	1366,2	1363,3	1365,7	1365,7
42,801	11610	193,50	1374,5	1371,6	1366,2	1363,4	1365,5	1365,5
42,837	11620	193,67	1373,5	1371,3	1366,2	1363,4	1365,1	1365,4
42,873	11630	193,83	1373,4	1371,3	1366,4	1363,6	1364,5	1365,3

Messpunkt [m]	Zeit [s]	Zeit [min]	Meßstelle 1	Meßstelle 2	Meßstelle 3	Meßstelle 4	Meßstelle 5	Meßstelle 6
42,909	11640	194,00	1372,2	1371	1366,4	1363,6	1364,8	1365,6
42,945	11650	194,17	1370,7	1370,2	1366,3	1363,5	1364,6	1365,4
42,981	11660	194,33	1369,9	1369,9	1366,6	1363,6	1365,1	1365,8
43,017	11670	194,50	1369,8	1369,8	1367,1	1364	1365,4	1366,1
43,053	11680	194,67	1369,8	1369,8	1367,2	1364,1	1365,9	1366,2
43,089	11690	194,83	1369,7	1369,7	1367,4	1364,1	1365,7	1366,2
43,124	11700	195,00	1369,7	1369,7	1367,1	1364,3	1365,4	1366,2
43,160	11710	195,17	1370,1	1369,9	1367,1	1364,3	1365,1	1366,3
43,196	11720	195,33	1370	1369,8	1367,1	1364,3	1364,9	1366,1
43,232	11730	195,50	1370,4	1370	1367,6	1364,4	1364,9	1366,2
43,268	11740	195,67	1370,5	1370,2	1367,4	1364,5	1365	1366,1
43,304	11750	195,83	1371,5	1370,6	1367,3	1364,5	1365	1366,3
43,340	11760	196,00	1373,1	1371,1	1367,3	1364,5	1365	1366,3
43,376	11770	196,17	1374,6	1371,5	1367,3	1364,3	1365	1366,3
43,412	11780	196,33	1375,6	1371,8	1367,4	1364,4	1364,9	1366,2
43,448	11790	196,50	1376,2	1372,1	1367,3	1364,3	1364,8	1366,1
43,484	11800	196,67	1375,3	1372	1367,4	1364,6	1365	1366,3
43,520	11810	196,83	1375,8	1372	1367,1	1364,3	1364,8	1366,1
43,556	11820	197,00	1376,2	1372,8	1367,5	1364,4	1364,9	1366,2
43,591	11830	197,17	1376	1372,2	1367,5	1364,5	1364,7	1366,1
43,627	11840	197,33	1377,1	1372,5	1367,3	1364,5	1364,7	1366,1
43,663	11850	197,50	1378,7	1373,1	1367,4	1364,7	1364,7	1366
43,699	11860	197,67	1378,3	1372,9	1367,4	1364,6	1364,6	1366
43,735	11870	197,83	1378,2	1372,4	1367,4	1364,4	1364,4	1365,9
43,771	11880	198,00	1377,5	1371,9	1367	1364,3	1364,2	1365,5
43,807	11890	198,17	1377	1371,9	1367,3	1364,3	1364,2	1365,7
43,843	11900	198,33	1376,6	1371,7	1367,1	1364,3	1364,2	1365,5
43,879	11910	198,50	1377,2	1371,6	1367,2	1364,3	1363,9	1365,4
43,915	11920	198,67	1379,5	1371,6	1366,8	1364	1363,7	1365,2
43,951	11930	198,83	1378,7	1371,3	1366,9	1364,1	1363,6	1364,9

Messpunkt [m]	Zeit [s]	Zeit [min]	Meistelle 1	Meistelle 2	Meistelle 3	Meistelle 4	Meistelle 5	Meistelle 6
43,987	11940	199,00	1379,2	1371,3	1366,9	1364,2	1363,6	1365
44,022	11950	199,17	1378,6	1370,4	1366,7	1363,7	1363,2	1364,7
44,058	11960	199,33	1376,2	1369,9	1366,3	1363,7	1363	1364,3
44,094	11970	199,50	1377,1	1369,7	1366,4	1363,6	1362,9	1364,3
44,130	11980	199,67	1376,6	1369,2	1366,4	1363,6	1362,8	1364,1
44,166	11990	199,83	1373,7	1368,6	1366,1	1363,3	1362,5	1364
44,202	12000	200,00	1373,9	1368,4	1365,9	1363,4	1362,4	1363,9
44,238	12010	200,17	1373,9	1368	1365,7	1363,3	1362,3	1363,6
44,274	12020	200,33	1373,5	1367,7	1365,6	1363,1	1362,1	1363,6
44,310	12030	200,50	1373,2	1367,7	1365,4	1363	1362	1363,5
44,346	12040	200,67	1373,2	1367,3	1365,1	1362,6	1361,7	1363
44,382	12050	200,83	1372,4	1367	1365	1362,7	1361,6	1362,9
44,418	12060	201,00	1371,7	1366,6	1364,8	1362,3	1361,4	1362,7
44,453	12070	201,17	1370,9	1366,4	1364,8	1362,3	1361,2	1362,5
44,489	12080	201,33	1370,2	1366,1	1364,6	1362,2	1361	1362,5
44,525	12090	201,50	1370,1	1365,9	1364,3	1362	1361	1362,3
44,561	12100	201,67	1369,8	1365,8	1364,4	1361,9	1360,9	1362,4
44,597	12110	201,83	1369,1	1365,6	1364	1361,7	1360,9	1362
44,633	12120	202,00	1367,7	1365,2	1363,9	1361,6	1360,9	1361,9
44,669	12130	202,17	1366,7	1364,9	1363,7	1361,3	1360,6	1361,8
44,705	12140	202,33	1365,8	1364,5	1363,5	1361	1360,4	1361,5
44,741	12150	202,50	1365,3	1364,2	1363,2	1360,9	1360,4	1361,6
44,777	12160	202,67	1365	1363,9	1363	1360,8	1360,1	1361,1
44,813	12170	202,83	1364,9	1363,7	1362,9	1360,4	1359,9	1361,1
44,849	12180	203,00	1364	1363,2	1362,7	1360,2	1359,6	1360,6
44,884	12190	203,17	1363,9	1363,3	1362,4	1360,1	1359,3	1360,6
44,920	12200	203,33	1363,5	1362,9	1362,4	1359,7	1359,1	1360,2
44,956	12210	203,50	1363,4	1362,9	1362,2	1359,8	1359,1	1360,1
44,992	12220	203,67	1363,4	1362,6	1362,2	1359,6	1358,8	1360,1
45,028	12230	203,83	1363,2	1362,2	1361,7	1359,1	1358,4	1359,6

Messpunkt [m]	Zeit [s]	Zeit [min]	Meßstelle 1	Meßstelle 2	Meßstelle 3	Meßstelle 4	Meßstelle 5	Meßstelle 6
45,064	12240	204,00	1363,2	1362,2	1361,6	1359,1	1358,3	1359,4
45,100	12250	204,17	1362,9	1362,1	1361,4	1358,8	1358,1	1359,4
45,136	12260	204,33	1363	1362	1361,2	1358,6	1357,8	1359,1
45,172	12270	204,50	1363,1	1362,1	1361	1358,5	1357,7	1359
45,208	12280	204,67	1363,1	1361,8	1360,8	1358,2	1357,3	1358,6
45,244	12290	204,83	1362,7	1361,7	1360,4	1357,9	1357,1	1358,3
45,280	12300	205,00	1362,6	1361,6	1360,2	1357,7	1357	1358,2
45,316	12310	205,17	1362,4	1361,4	1360,1	1357,5	1356,8	1358
45,351	12320	205,33	1362,1	1361,1	1359,8	1357,4	1356,7	1357,7
45,387	12330	205,50	1361,6	1360,7	1359,7	1357,1	1356,4	1357,6
45,423	12340	205,67	1361,6	1360,3	1359,5	1356,9	1356,1	1357,4
45,459	12350	205,83	1361,4	1360,1	1359,3	1356,7	1356	1357,2
45,495	12360	206,00	1360,9	1359,4	1359	1356,2	1355,8	1356,8
45,531	12370	206,17	1360,3	1358,7	1358,7	1356,1	1355,4	1356,4
45,567	12380	206,33	1359,9	1358,1	1358,4	1355,9	1355,1	1356,1
45,603	12390	206,50	1359,2	1357,6	1358,2	1355,6	1354,8	1355,9
45,639	12400	206,67	1359,1	1357	1358	1355,4	1354,6	1355,7
45,675	12410	206,83	1358,2	1356,2	1357,7	1354,9	1354,3	1355,4
45,711	12420	207,00	1357,4	1355,8	1357,4	1354,8	1354	1355,1
45,747	12430	207,17	1356,9	1355,1	1357,2	1354,6	1353,9	1354,9
45,782	12440	207,33	1356,4	1354,4	1356,9	1354,3	1353,6	1354,6
45,818	12450	207,50	1355,5	1354	1356,8	1354	1353,3	1354,3
45,854	12460	207,67	1354,1	1353,2	1356,2	1353,6	1352,9	1354,1
45,890	12470	207,83	1353,7	1352,7	1356	1353,6	1352,9	1353,7
45,926	12480	208,00	1352,7	1351,8	1355,5	1352,9	1352,3	1353,4
45,962	12490	208,17	1352,5	1351,4	1355,3	1352,7	1352	1353,2
45,998	12500	208,33	1351,9	1350,8	1354,9	1352,4	1351,9	1352,7
46,034	12510	208,50	1351,6	1350,6	1354,7	1352,3	1351,4	1352,6
46,070	12520	208,67	1350,8	1350,1	1354,3	1351,6	1351	1352,1
46,106	12530	208,83	1350	1349,6	1354,1	1351,4	1350,8	1351,9

Messpunkt [m]	Zeit [s]	Zeit [min]	Meßstelle 1	Meßstelle 2	Meßstelle 3	Meßstelle 4	Meßstelle 5	Meßstelle 6
46,142	12540	209,00	1349,6	1349,3	1353,9	1351,3	1350,8	1351,7
46,178	12550	209,17	1348,7	1348,7	1353,4	1351	1350,3	1351,5
46,213	12560	209,33	1348,2	1348,2	1353,1	1350,6	1350	1351
46,249	12570	209,50	1348	1347,8	1352,7	1350,1	1349,6	1350,6
46,285	12580	209,67	1347,4	1347,6	1352,3	1349,8	1349,3	1350,3
46,321	12590	209,83	1347	1347,2	1352,1	1349,5	1349	1350
46,357	12600	210,00	1346,6	1346,7	1351,8	1349,2	1348,5	1349,7
46,393	12610	210,17	1346,5	1346,4	1351,3	1348,7	1348,3	1349,3
46,429	12620	210,33	1346,5	1346,4	1351,1	1348,7	1348	1349,2
46,465	12630	210,50	1346	1346	1350,8	1348,3	1347,8	1348,8
46,501	12640	210,67	1346	1346	1350,5	1347,8	1347,3	1348,5
46,537	12650	210,83	1346,1	1345,7	1350,2	1347,6	1347,1	1348
46,573	12660	211,00	1346,6	1345,6	1349,8	1347,4	1346,9	1347,9
46,609	12670	211,17	1346,4	1345,4	1349,5	1347	1346,4	1347,4
46,644	12680	211,33	1346,3	1345,3	1349,2	1346,8	1346,1	1347,1
46,680	12690	211,50	1345,9	1344,9	1348,9	1346,4	1345,7	1346,7
46,716	12700	211,67	1346	1344,8	1348,6	1346,1	1345,5	1346,5
46,752	12710	211,83	1345,8	1344,5	1348,2	1345,8	1345,1	1346,1
46,788	12720	212,00	1345,1	1344,1	1347,9	1345,3	1344,8	1345,8
46,824	12730	212,17	1344,7	1344	1347,7	1345,2	1344,4	1345,3
46,860	12740	212,33	1344,4	1343,6	1347,4	1344,8	1344,3	1345,3
46,896	12750	212,50	1344,2	1343,2	1346,8	1344,3	1343,7	1344,7
46,932	12760	212,67	1343,5	1343	1346,7	1344	1343,5	1344,4
46,968	12770	212,83	1343,6	1342,8	1346,4	1343,7	1343,1	1344,1
47,004	12780	213,00	1342,9	1342,4	1345,8	1343,4	1342,9	1343,9
47,040	12790	213,17	1343,2	1342,2	1345,7	1343,2	1342,7	1343,5
47,076	12800	213,33	1342,7	1342	1345,3	1342,8	1342,2	1343,3
47,111	12810	213,50	1342,3	1341,6	1345	1342,6	1341,9	1342,9
47,147	12820	213,67	1341,9	1341,4	1344,7	1342,2	1341,4	1342,5
47,183	12830	213,83	1341,9	1341,1	1344,4	1341,9	1341,1	1342,3

Messpunkt [m]	Zeit [s]	Zeit [min]	Meßstelle 1	Meßstelle 2	Meßstelle 3	Meßstelle 4	Meßstelle 5	Meßstelle 6
47,219	12840	214,00	1341,5	1340,7	1344	1341,4	1340,7	1341,7
47,255	12850	214,17	1341,2	1340,5	1343,8	1341,2	1340,5	1341,7
47,291	12860	214,33	1340,7	1340,3	1343,3	1341	1340,2	1341,3
47,327	12870	214,50	1340,4	1340	1343	1340,5	1339,9	1340,9
47,363	12880	214,67	1340,1	1339,7	1342,6	1340,3	1339,3	1340,7
47,399	12890	214,83	1339,5	1339,4	1342,3	1340	1339	1340,2
47,435	12900	215,00	1339,3	1339	1342	1339,8	1338,7	1339,8
47,471	12910	215,17	1338,9	1338,6	1341,7	1339,2	1338,4	1339,6
47,507	12920	215,33	1339	1338,5	1341,3	1339	1338,1	1339,3
47,542	12930	215,50	1338,6	1338,1	1341,1	1338,8	1337,8	1338,8
47,578	12940	215,67	1338,4	1337,9	1340,8	1338,5	1337,5	1338,5
47,614	12950	215,83	1337,6	1337,5	1340,4	1338	1337,1	1338,1
47,650	12960	216,00	1337,5	1337,3	1340,3	1337,8	1336,8	1338
47,686	12970	216,17	1337,3	1337	1339,8	1337,5	1336,5	1337,7
47,722	12980	216,33	1336,9	1336,5	1339,3	1337	1336,1	1337
47,758	12990	216,50	1336,5	1336,3	1339,3	1336,7	1335,7	1337
47,794	13000	216,67	1336	1335,8	1338,6	1336,3	1335,1	1336,3
47,830	13010	216,83	1335,9	1335,9	1338,7	1336,2	1335,2	1336,4
47,866	13020	217,00	1335,6	1335,4	1338,2	1335,9	1334,9	1335,9
47,902	13030	217,17	1335,2	1335,1	1338	1335,4	1334,4	1335,7
47,938	13040	217,33	1335,1	1334,8	1337,6	1335,1	1334,1	1335,3
47,973	13050	217,50	1334,6	1334,6	1337,2	1334,9	1333,8	1334,9
48,009	13060	217,67	1334,3	1334,1	1336,9	1334,5	1333,5	1334,5
48,045	13070	217,83	1333,9	1333,9	1336,7	1334,3	1333,1	1334,3
48,081	13080	218,00	1333,4	1333,4	1336,1	1333,8	1332,6	1333,9
48,117	13090	218,17	1332,8	1333	1335,9	1333,5	1332,3	1333,5
48,153	13100	218,33	1332,5	1332,7	1335,6	1333,2	1332	1333,2
48,189	13110	218,50	1332,1	1332,5	1335,4	1333	1331,7	1333
48,225	13120	218,67	1331,5	1332	1335	1332,5	1331,2	1332,5
48,261	13130	218,83	1331,4	1331,8	1334,8	1332,2	1331,2	1332,3

Messpunkt [m]	Zeit [s]	Zeit [min]	Meßstelle 1	Meßstelle 2	Meßstelle 3	Meßstelle 4	Meßstelle 5	Meßstelle 6
48,297	13140	219,00	1330,9	1331,2	1334,3	1331,9	1330,5	1331,9
48,333	13150	219,17	1330,8	1331,2	1334,1	1331,5	1330,3	1331,7
48,369	13160	219,33	1330,7	1330,7	1333,8	1331,4	1329,9	1331,2
48,404	13170	219,50	1330,4	1330,4	1333,3	1331	1329,7	1330,8
48,440	13180	219,67	1330,1	1330,2	1333	1330,4	1329,1	1330,4
48,476	13190	219,83	1329,9	1329,9	1332,7	1330,2	1328,9	1330,2
48,512	13200	220,00	1329,7	1329,7	1332,4	1329,9	1328,6	1329,9
48,548	13210	220,17	1329,4	1329,3	1332,1	1329,4	1328,1	1329,3
48,584	13220	220,33	1329,1	1329,1	1331,7	1329,2	1327,9	1329,2
48,620	13230	220,50	1328,8	1328,8	1331,4	1328,9	1327,4	1328,8
48,656	13240	220,67	1328,8	1328,5	1331,1	1328,7	1327,2	1328,5
48,692	13250	220,83	1328,8	1328,5	1330,9	1328,5	1327	1328,3
48,728	13260	221,00	1328,5	1328	1330,5	1328	1326,6	1327,7
48,764	13270	221,17	1328,5	1328	1330,3	1327,8	1326,4	1327,7
48,800	13280	221,33	1328	1327,7	1329,8	1327,3	1325,9	1327
48,836	13290	221,50	1327,8	1327,5	1329,5	1326,9	1325,6	1326,7
48,871	13300	221,67	1327,7	1327,2	1329,2	1326,8	1325,3	1326,4
48,907	13310	221,83	1327,3	1327,1	1328,9	1326,5	1325	1326,3
48,943	13320	222,00	1327,1	1326,8	1328,6	1326,1	1324,6	1325,8
48,979	13330	222,17	1327,1	1326,8	1328,4	1325,9	1324,5	1325,8
49,015	13340	222,33	1326,8	1326,5	1327,9	1325,5	1324	1325,2
49,051	13350	222,50	1326,6	1326,4	1327,7	1325,1	1323,6	1324,9
49,087	13360	222,67	1326,4	1326,1	1327,4	1324,9	1323,3	1324,6
49,123	13370	222,83	1326,3	1326,3	1327,3	1324,8	1323,2	1324,3
49,159	13380	223,00	1326,1	1326	1326,8	1324,2	1322,9	1324
49,195	13390	223,17	1326	1325,7	1326,5	1324,1	1322,4	1323,7
49,231	13400	223,33	1325,7	1325,3	1326,2	1323,7	1322,1	1323,4
49,267	13410	223,50	1325,5	1325,2	1326	1323,5	1322,1	1323,1
49,302	13420	223,67	1325,1	1324,9	1325,6	1323,2	1321,7	1322,7
49,338	13430	223,83	1324,9	1324,2	1325,4	1322,8	1321,3	1322,3

Messpunkt [m]	Zeit [s]	Zeit [min]	Meßstelle 1	Meßstelle 2	Meßstelle 3	Meßstelle 4	Meßstelle 5	Meßstelle 6
49,374	13440	224,00	1324,3	1324	1324,9	1322,5	1321	1321,8
49,410	13450	224,17	1323,9	1323,4	1324,5	1322,1	1320,4	1321,6
49,446	13460	224,33	1323,6	1322,9	1324,5	1321,9	1320,1	1321,3
49,482	13470	224,50	1322,9	1322,5	1324	1321,5	1319,8	1320,9
49,518	13480	224,67	1322,6	1322,1	1323,8	1321,1	1319,5	1320,8
49,554	13490	224,83	1322,2	1321,5	1323,2	1320,9	1319,1	1320,2
49,590	13500	225,00	1321,9	1321,1	1322,9	1320,4	1319	1319,9
49,626	13510	225,17	1321,5	1320,7	1322,8	1320,2	1318,5	1319,7
49,662	13520	225,33	1320,7	1320,2	1322,5	1319,9	1318	1319,2
49,698	13530	225,50	1320	1319,7	1322,2	1319,5	1317,9	1319
49,733	13540	225,67	1319,2	1319	1321,8	1319,2	1317,4	1318,5
49,769	13550	225,83	1318,7	1318,3	1321,3	1318,7	1317	1318,2
49,805	13560	226,00	1318,2	1317,9	1321	1318,4	1316,8	1317,7
49,841	13570	226,17	1317,6	1317,3	1320,7	1317,9	1316,5	1317,3
49,877	13580	226,33	1317,1	1316,6	1320,3	1317,7	1316,1	1317,1
49,913	13590	226,50	1316,3	1315,9	1320	1317,2	1315,9	1316,8
49,949	13600	226,67	1315,5	1315,2	1319,6	1317	1315,5	1316,3
49,985	13610	226,83	1314,3	1314,5	1319,2	1316,6	1315,3	1315,9
50,021	13620	227,00	1312,9	1313,6	1318,8	1316,1	1314,7	1315,4
50,057	13630	227,17	1312,2	1312,7	1318,6	1315,8	1314,5	1315,1
50,093	13640	227,33	1311,1	1311,6	1317,9	1315,2	1313,9	1314,6
50,129	13650	227,50	1310,4	1310,7	1317,6	1315	1313,7	1314,3
50,164	13660	227,67	1309,4	1309,9	1317,3	1314,5	1313,2	1313,9
50,200	13670	227,83	1308,7	1309,1	1316,9	1314,3	1312,9	1313,6
50,236	13680	228,00	1307,7	1308,6	1316,5	1313,7	1312,6	1313,1
50,272	13690	228,17	1306,9	1308	1316,1	1313,3	1312,1	1312,6
50,308	13700	228,33	1306,5	1307,5	1315,7	1312,9	1311,6	1312,2
50,344	13710	228,50	1306,2	1307,2	1315,3	1312,5	1311,3	1311,8
50,380	13720	228,67	1305,9	1306,7	1314,7	1312,1	1310,8	1311,3
50,416	13730	228,83	1305,6	1306,6	1314,5	1311,5	1310,4	1310,9

Messpunkt [m]	Zeit [s]	Zeit [min]	Meßstelle 1	Meßstelle 2	Meßstelle 3	Meßstelle 4	Meßstelle 5	Meßstelle 6
50,452	13740	229,00	1305,2	1306,2	1314,1	1311,3	1310,1	1310,6
50,488	13750	229,17	1305,2	1305,7	1313,6	1310,7	1309,7	1310,2
50,524	13760	229,33	1304,8	1305,3	1313,2	1310,4	1309,2	1309,7
50,560	13770	229,50	1304,3	1304,8	1312,5	1309,9	1308,7	1309,2
50,596	13780	229,67	1303,9	1304,6	1312,1	1309,3	1308,4	1308,8
50,631	13790	229,83	1303,8	1304,3	1311,9	1309,1	1307,9	1308,4
50,667	13800	230,00	1303,6	1303,6	1311,4	1308,7	1307,4	1308,1
50,703	13810	230,17	1303,3	1303	1310,7	1307,9	1307	1307,4
50,739	13820	230,33	1302,7	1302,5	1310,4	1307,4	1306,4	1307
50,775	13830	230,50	1302,2	1301,8	1310,1	1307,1	1306,1	1306,6
50,811	13840	230,67	1301,5	1301,4	1309,4	1306,6	1305,5	1306,1
50,847	13850	230,83	1300,9	1300,5	1309,1	1306,3	1305	1305,6
50,883	13860	231,00	1299,7	1299,7	1308,4	1305,6	1304,5	1305,3
50,919	13870	231,17	1298,5	1299,1	1308	1305,2	1304,1	1304,7
50,955	13880	231,33	1296,8	1298,3	1307,5	1304,7	1303,6	1304,2
50,991	13890	231,50	1295,3	1297,4	1307	1304,2	1302,8	1303,6
51,027	13900	231,67	1294,3	1296,9	1306,7	1304	1302,5	1303,4
51,062	13910	231,83	1293,4	1296	1305,9	1303,2	1301,8	1302,8
51,098	13920	232,00	1293	1295,6	1305,5	1302,7	1301,4	1302,2
51,134	13930	232,17	1292,4	1294,8	1304,9	1302,2	1300,8	1301,9
51,170	13940	232,33	1291,8	1294,2	1304,1	1301,6	1300,1	1301,1
51,206	13950	232,50	1291,2	1293,7	1303,7	1301,1	1299,8	1300,8
51,242	13960	232,67	1290,9	1292,9	1303,3	1300,6	1299	1300,3
51,278	13970	232,83	1289,6	1292,4	1302,4	1300,1	1298,3	1299,8
51,314	13980	233,00	1289,1	1291,8	1302,1	1299,5	1297,9	1299,3
51,350	13990	233,17	1288,8	1291,1	1301,5	1299	1297,5	1298,7
51,386	14000	233,33	1288	1290,4	1300,8	1298,3	1296,8	1298,2
51,422	14010	233,50	1287,1	1289,8	1300,1	1297,9	1296,4	1297,5
51,458	14020	233,67	1286,6	1289,3	1299,8	1297,3	1295,8	1297,2
51,493	14030	233,83	1285,3	1288,3	1299,2	1296,8	1295,4	1296,7

Messpunkt [m]	Zeit [s]	Zeit [min]	Meßstelle 1	Meßstelle 2	Meßstelle 3	Meßstelle 4	Meßstelle 5	Meßstelle 6
51,529	14040	234,00	1283,9	1287,4	1298,6	1296,1	1294,7	1296
51,565	14050	234,17	1279,9	1285,9	1297,9	1295,6	1293,9	1295,2
51,601	14060	234,33	1269,4	1284,2	1297,2	1294,9	1293,3	1294,6
51,637	14070	234,50	1248,3	1281,6	1296,8	1294,4	1292,8	1294,3
51,673	14080	234,67	1239,8	1278,7	1296,1	1293,8	1292,2	1293,7
51,709	14090	234,83	1237,7	1277,3	1295,4	1293,1	1291,4	1292,9
51,745	14100	235,00	1243,1	1276,1	1294,8	1292,7	1290,9	1292,3
51,781	14110	235,17	1249,5	1274,6	1294,3	1292	1290,2	1291,7
51,817	14120	235,33	1253,5	1274,6	1293,7	1291,3	1289,5	1291
51,853	14130	235,50	1258,2	1274,5	1292,8	1290,5	1288,7	1290,2
51,889	14140	235,67	1261,2	1274,9	1292,3	1290	1288,2	1289,7
51,924	14150	235,83	1263,2	1274,4	1291,5	1289,2	1287,4	1288,9
51,960	14160	236,00	1264,5	1274,2	1291	1288,7	1286,7	1288,4
51,996	14170	236,17	1265	1273,9	1290,4	1288,1	1286,1	1287,6
52,032	14180	236,33	1264,9	1273,2	1289,8	1287,5	1285,5	1287,1
52,068	14190	236,50	1265,5	1272,7	1288,9	1286,7	1284,8	1286,3
52,104	14200	236,67	1265,9	1272	1288,1	1286	1283,8	1285,6
52,140	14210	236,83	1265,7	1271,3	1287,6	1285,4	1283,3	1285,1
52,176	14220	237,00	1265,4	1270,5	1287	1284,7	1282,7	1284,4
52,212	14230	237,17	1265,2	1269,9	1286,2	1284	1282,2	1283,5
52,248	14240	237,33	1264,6	1269,2	1285,6	1283,5	1281,5	1283,2
52,284	14250	237,50	1263,8	1268,4	1284,7	1282,6	1280,7	1282,4
52,320	14260	237,67	1263,1	1267,8	1284,1	1281,9	1280,1	1281,6
52,356	14270	237,83	1262,5	1267,1	1283,4	1281,2	1279,4	1281,1
52,391	14280	238,00	1262,2	1266,3	1282,8	1280,4	1278,6	1280,3
52,427	14290	238,17	1261,6	1265,8	1282,2	1279,9	1278,3	1279,7
52,463	14300	238,33	1260,7	1264,8	1281,1	1279	1277,3	1278,8
52,499	14310	238,50	1259,9	1263,8	1280,5	1278,3	1276,7	1278,2
52,535	14320	238,67	1258,9	1263,2	1280	1277,9	1276	1277,5
52,571	14330	238,83	1257,9	1262,3	1279,1	1276,8	1275,2	1276,7

Messpunkt [m]	Zeit [s]	Zeit [min]	Meßstelle 1	Meßstelle 2	Meßstelle 3	Meßstelle 4	Meßstelle 5	Meßstelle 6
52,607	14340	239,00	1257	1261,5	1278,5	1276,1	1274,5	1276
52,643	14350	239,17	1255,6	1260,5	1277,8	1275,5	1273,9	1275,4
52,679	14360	239,33	1253,9	1259,2	1277,2	1274,7	1273	1274,7
52,715	14370	239,50	1248,6	1258	1276,3	1274	1272,2	1273,7
52,751	14380	239,67	1246,2	1256,6	1275,7	1273,4	1271,6	1273,2
52,787	14390	239,83	1241,6	1255,6	1274,9	1272,8	1271	1272,6
52,822	14400	240,00	1232,7	1254,2	1274	1272	1270,2	1271,6
52,858	14410	240,17	1225,9	1252,2	1273,3	1271	1269,3	1270,8
52,894	14420	240,33	1219,9	1250,6	1272,3	1270,2	1268,6	1270
52,930	14430	240,50	1221,5	1249,4	1271,8	1269,5	1267,8	1269,3
52,966	14440	240,67	1220,5	1247,9	1271	1268,7	1267	1268,5
53,002	14450	240,83	1223	1246,9	1270	1267,9	1266,4	1267,7
53,038	14460	241,00	1225	1246,4	1269,2	1266,9	1265,2	1266,9
53,074	14470	241,17	1224	1245,9	1268,4	1266,2	1264,8	1266,2
53,110	14480	241,33	1224	1245,1	1267,6	1265,2	1263,8	1265,2
53,146	14490	241,50	1225,7	1244,4	1266,8	1264,6	1263,2	1264,5
53,182	14500	241,67	1227,8	1244,3	1266,1	1263,8	1262,4	1263,9
53,218	14510	241,83	1229,8	1243,7	1265,1	1262,8	1261,5	1262,8
53,253	14520	242,00	1230,6	1243,5	1264,4	1262,1	1260,8	1262,3
53,289	14530	242,17	1230,9	1242,9	1263,6	1261,4	1260,1	1261,4
53,325	14540	242,33	1230,9	1242,1	1262,8	1260,5	1259,1	1260,6
53,361	14550	242,50	1231,9	1241,3	1262,1	1259,8	1258,4	1259,8
53,397	14560	242,67	1231,8	1240,4	1261	1258,9	1257,4	1258,9
53,433	14570	242,83	1229,6	1239,3	1260,3	1258	1256,6	1258,1
53,469	14580	243,00	1229,3	1238,6	1259,4	1257,2	1255,9	1257,4
53,505	14590	243,17	1225,2	1237,4	1258,2	1256,2	1254,8	1256,4
53,541	14600	243,33	1223,1	1236,2	1257,1	1255,3	1254	1255,4
53,577	14610	243,50	1218,2	1234,4	1256,2	1254,4	1253,2	1254,7
53,613	14620	243,67	1208,5	1232,7	1255,3	1253,5	1252,2	1253,7
53,649	14630	243,83	1207,9	1230,9	1254,1	1252,5	1251,3	1252,8

Messpunkt [m]	Zeit [s]	Zeit [min]	Meßstelle 1	Meßstelle 2	Meßstelle 3	Meßstelle 4	Meßstelle 5	Meßstelle 6
53,684	14640	244,00	1205,6	1229	1253,1	1251,6	1250,5	1252,1
53,720	14650	244,17	1207,3	1228,3	1252,2	1250,8	1249,6	1251,1
53,756	14660	244,33	1210,6	1228	1251,1	1249,6	1248,6	1250,1
53,792	14670	244,50	1212,5	1228,1	1250,2	1248,8	1247,5	1249,2
53,828	14680	244,67	1215,3	1227,9	1249,3	1247,8	1246,5	1248,3
53,864	14690	244,83	1217	1227,7	1248,5	1247	1245,5	1247,4
53,900	14700	245,00	1216,5	1226,9	1247,7	1246	1244,6	1246,4
53,936	14710	245,17	1216,5	1226,1	1246,9	1245,1	1243,6	1245,4
53,972	14720	245,33	1216,7	1225,3	1245,9	1244,2	1242,4	1244,4
54,008	14730	245,50	1216,2	1224,6	1244,9	1243,3	1241,5	1243,5
54,044	14740	245,67	1214,6	1223,6	1244,1	1242,3	1240,6	1242,6
54,080	14750	245,83	1213,9	1222,8	1243,5	1241,6	1239,6	1241,6
54,116	14760	246,00	1213,9	1222	1242,3	1240,6	1238,7	1240,8
54,151	14770	246,17	1212,7	1221,1	1241,6	1239,8	1237,8	1239,9
54,187	14780	246,33	1211,5	1220,1	1240,6	1238,8	1236,9	1238,9
54,223	14790	246,50	1209,1	1218,5	1239,1	1237,6	1236	1238
54,259	14800	246,67	1206,2	1216,7	1238	1236,6	1235	1237
54,295	14810	246,83	1201,9	1214,7	1236,6	1235,6	1234	1236
54,331	14820	247,00	1200,6	1212,5	1235,7	1234,5	1232,9	1235
54,367	14830	247,17	1202,6	1212	1234,5	1233,5	1231,7	1234
54,403	14840	247,33	1201,4	1210,5	1233,6	1232,6	1230	1232,9
54,439	14850	247,50	1201,6	1210,8	1232,7	1231,6	1227,6	1231,7
54,475	14860	247,67	1198,1	1209,4	1231,7	1230,4	1223,6	1230,2
54,511	14870	247,83	1197,8	1208,6	1230,7	1229,5	1223,3	1229,4
54,547	14880	248,00	1191,7	1207,1	1229,6	1228,6	1221,3	1228,1
54,582	14890	248,17	1191,7	1206,5	1228,8	1227,5	1219,5	1226,8
54,618	14900	248,33	1188,1	1205	1227,5	1226,2	1218,1	1225,7
54,654	14910	248,50	1187,7	1204,5	1225,8	1225	1216,7	1224,6
54,690	14920	248,67	1190,4	1204	1224,7	1223,9	1214,1	1223,5
54,726	14930	248,83	1188,2	1202,7	1223,1	1222,8	1211,5	1221,9

Messpunkt [m]	Zeit [s]	Zeit [min]	Meßstelle 1	Meßstelle 2	Meßstelle 3	Meßstelle 4	Meßstelle 5	Meßstelle 6
54,762	14940	249,00	1189,6	1202,2	1221,3	1221,4	1209	1220,8
54,798	14950	249,17	1186,9	1201,2	1220,9	1220,6	1209,6	1219,7
54,834	14960	249,33	1184,7	1200,1	1219,6	1219,5	1206,4	1218,3
54,870	14970	249,50	1185,4	1199,4	1218,1	1218,2	1205,5	1217,1
54,906	14980	249,67	1184	1198,2	1217,4	1217,4	1204,2	1215,8
54,942	14990	249,83	1177,4	1197,4	1216,6	1216,3	1203,9	1215
54,978	15000	250,00	1173,9	1195,9	1215,8	1215	1202,5	1213,5
55,013	15010	250,17	1168,1	1193,8	1215	1214	1199,4	1211,9
55,049	15020	250,33	1162,6	1191,8	1214,4	1213,2	1198,8	1210,9
55,085	15030	250,50	1158,2	1188,6	1213,1	1212	1196,2	1209,5
55,121	15040	250,67	1160,3	1187,2	1212,2	1210,9	1194,8	1208,4
55,157	15050	250,83	1160,8	1186,5	1210,9	1209,6	1194,3	1207,1
55,193	15060	251,00	1160,5	1185,6	1209,1	1208,3	1192,5	1205,6
55,229	15070	251,17	1162,6	1185,1	1208,4	1207,3	1191,5	1204,6
55,265	15080	251,33	1162,2	1185	1207,5	1206,2	1190,2	1203,4
55,301	15090	251,50	1162,2	1183,7	1205,4	1204,7	1190	1202,3
55,337	15100	251,67	1161,5	1182,7	1204,4	1203,8	1189	1201
55,373	15110	251,83	1162,3	1182,1	1203,1	1202,4	1189	1200
55,409	15120	252,00	1162,9	1181	1201,9	1201,4	1189	1198,8
55,444	15130	252,17	1164,7	1180,1	1200,5	1200	1188,6	1197,7
55,480	15140	252,33	1164,6	1178,9	1200	1198,8	1188,7	1196,5
55,516	15150	252,50	1161,8	1177,6	1196	1197	1185	1194,8
55,552	15160	252,67	1160,8	1176,3	1195,3	1196	1185,4	1193,7
55,588	15170	252,83	1156,4	1174,7	1193,4	1194,9	1183,2	1192,1
55,624	15180	253,00	1149	1172,3	1190,8	1193,3	1183	1191
55,660	15190	253,17	1141,9	1170	1189	1192	1181,4	1189,5
55,696	15200	253,33	1132,2	1167,5	1188,5	1190,7	1179,4	1188
55,732	15210	253,50	1123,2	1165,3	1186,6	1189,4	1175,3	1186,4
55,768	15220	253,67	1122,7	1163,7	1185,1	1188,1	1174,8	1185,3
55,804	15230	253,83	1117,3	1162,5	1183	1186,6	1172,9	1184

Messpunkt [m]	Zeit [s]	Zeit [min]	Meßstelle 1	Meßstelle 2	Meßstelle 3	Meßstelle 4	Meßstelle 5	Meßstelle 6
55,840	15240	254,00	1121,8	1161,7	1180,8	1185,1	1172,7	1182,6
55,876	15250	254,17	1124	1161,9	1180	1183,6	1171,9	1181,3
55,911	15260	254,33	1110,3	1156,9	1178,2	1182,5	1171	1180,2
55,947	15270	254,50	1115,3	1158	1174,9	1181,2	1169,9	1178,9
55,983	15280	254,67	1113,2	1155,3	1171,8	1179,3	1167	1177
56,019	15290	254,83	1117,5	1152,7	1170,4	1178,2	1164,5	1175,7
56,055	15300	255,00	1122,4	1153,4	1169,7	1176,9	1161,7	1174,2
56,091	15310	255,17	1131,2	1154,3	1168	1175,1	1158,1	1172,5
56,127	15320	255,33	1134,1	1154,7	1165,9	1173,6	1156	1171,1
56,163	15330	255,50	1138,7	1154,4	1162	1172	1154,8	1169,5
56,199	15340	255,67	1135,4	1153,7	1154,2	1169,7	1153,5	1168,2
56,235	15350	255,83	1131,8	1152,4	1149,7	1168,3	1151,4	1166,4
56,271	15360	256,00	1132,4	1151,7	1144,7	1166,7	1150,7	1165,1
56,307	15370	256,17	1120,9	1149,5	1138,5	1164,7	1150,4	1163,2
56,342	15380	256,33	1117,4	1148	1136	1163,3	1148	1161,9
56,378	15390	256,50	1104,7	1143,9	1138,1	1162	1146,2	1160,3
56,414	15400	256,67	1112	1145,5	1135	1160,1	1144,8	1158,6
56,450	15410	256,83	1107,4	1142,9	1132,9	1158,5	1143,4	1156,8
56,486	15420	257,00	1110,8	1143	1130,4	1156,9	1142,2	1155,4
56,522	15430	257,17	1107,3	1140,6	1129,6	1155,5	1139,1	1153,7
56,558	15440	257,33	1110,7	1140,4	1128	1153,8	1138,7	1152,3
56,594	15450	257,50	1109,3	1138,7	1127,1	1152,1	1136,7	1150,2
56,630	15460	257,67	1112,5	1138	1124,6	1149,9	1135,2	1148,7
56,666	15470	257,83	1111,9	1137	1125,6	1149,1	1133,7	1147,1
56,702	15480	258,00	1112,9	1135,4	1120,8	1146,7	1132,8	1145,4
56,738	15490	258,17	1108,7	1133,2	1118,4	1145,1	1131,3	1143,4
56,773	15500	258,33	1114,6	1132,4	1115,3	1143,6	1130	1141,9
56,809	15510	258,50	1117,4	1131,2	1113	1141,8	1128,4	1139,8
56,845	15520	258,67	1114,5	1129,2	1109,1	1139,8	1127	1137,8
56,881	15530	258,83	1113,8	1126,5	1107,2	1138,6	1125,9	1136,1

Messpunkt [m]	Zeit [s]	Zeit [min]	Meßstelle 1	Meßstelle 2	Meßstelle 3	Meßstelle 4	Meßstelle 5	Meßstelle 6
57,995	15840	264,00	984,5	1052,4	1041,5	1072,8	1023,4	1068,1
58,031	15850	264,17	982,2	1048,9	1041	1069,9	1019,2	1065,9
58,067	15860	264,33	946,2	1041,6	1039,7	1065,3	1016,8	1062,9
58,102	15870	264,50	939,6	1040,1	1037,7	1062,2	1010,9	1059,5
58,138	15880	264,67	942,7	1036,8	1037	1060,3	1004,7	1056,2
58,174	15890	264,83	906,9	1029,7	1033,6	1055,8	1000,7	1053,7
58,210	15900	265,00	921,8	1028,7	1029,2	1053,8	994,9	1050,5
58,246	15910	265,17	918	1024,7	1024,5	1050,1	991,3	1047,7
58,282	15920	265,33	879,5	1016,2	1019,6	1046,3	986,1	1044
58,318	15930	265,50	869,8	1012,3	1013,5	1044,9	982,9	1041,4
58,354	15940	265,67	868,6	1010,3	1010,6	1041,6	981,2	1038,9
58,390	15950	265,83	862,1	1005,5	1007,2	1037,9	980,7	1036,5
58,426	15960	266,00	839,3	1000,6	1002,5	1035,5	977,6	1033,3
58,462	15970	266,17	868,8	1001,6	997,3	1031,6	975	1030,9
58,498	15980	266,33	846,8	996,9	994,5	1028,8	974,2	1028,8
58,533	15990	266,50	844,6	994,2	989,6	1025	970,2	1025,6
58,569	16000	266,67	820,5	987,8	984,2	1019,7	969,3	1023,8
58,605	16010	266,83	825,7	985,2	980	1016,1	965,7	1020,1
58,641	16020	267,00	819	978,9	976,2	1012	961,5	1017,2
58,677	16030	267,17	807,2	974,9	971,2	1009,5	956,5	1014,7
58,713	16040	267,33	816,2	971,6	966,7	1005,5	951,8	1011,9
58,749	16050	267,50	782,7	962,5	963	1000,7	948,5	1008,1
58,785	16060	267,67	767,4	954,1	955	996,9	944,1	1005,2
58,821	16070	267,83	799,3	956,7	954,9	996	944,4	1003,4
58,857	16080	268,00	806,5	954,5	955,3	993,6	947,3	1000,4
58,893	16090	268,17	783,7	945,7	951,1	989,1	938,7	997,2
58,929	16100	268,33	790,2	937,8	944,3	983,4	932,9	992,8
58,964	16110	268,50	785,4	934,8	945,7	983,4	926,6	990,9
59,000	16120	268,67	780,4	929,6	938,9	977,3	922	987,2
59,036	16130	268,83	748,4	917,3	931,9	971	913,7	984,2

Messpunkt [m]	Zeit [s]	Zeit [min]	Meßstelle 1	Meßstelle 2	Meßstelle 3	Meßstelle 4	Meßstelle 5	Meßstelle 6
59,072	16140	269,00	748,7	911,9	929	968,6	904,7	980,4
59,108	16150	269,17	736,7	902,4	922,2	964,3	906,5	977,8
59,144	16160	269,33	734,6	894,9	919,7	963	899,2	974,6
59,180	16170	269,50	741,9	893,6	911,4	954,9	888,8	971
59,216	16180	269,67	718,7	885,2	903,7	951,2	884,8	967,7
59,252	16190	269,83	711,5	878,7	901,9	949,9	884	965,2
59,288	16200	270,00	679,8	870,2	894,5	943,9	876,5	960,7
59,324	16210	270,17	669,2	864,9	892,6	940,1	871,4	957,5
59,360	16220	270,33	683,5	864,4	890,8	937,8	868,5	955,4
59,396	16230	270,50	675,1	860,9	884,4	935,7	863,8	951,3
59,431	16240	270,67	659,5	856,8	882,1	931,7	860	947,8
59,467	16250	270,83	652,7	854,8	880,5	925,5	855,7	945,5
59,503	16260	271,00	638,9	849,7	873,8	924,1	854,6	941,4
59,539	16270	271,17	626,4	846,7	865,1	919,9	849	939,4
59,575	16280	271,33	614,6	841,1	860,8	918	855,7	936,1
59,611	16290	271,50	621,9	844,5	855,1	913,1	843,7	932,5
59,647	16300	271,67	606,4	834	849,3	910,3	840,7	929,4
59,683	16310	271,83	579,7	827,6	845,9	909,4	840,8	926,2
59,719	16320	272,00	570,5	823,5	839,1	903,7	835,8	922,4
59,755	16330	272,17	556,7	817,8	834,5	900,4	838,8	919,5
59,791	16340	272,33	548,3	809,7	831,1	897,6	830,1	915,5
59,827	16350	272,50	549,6	806,8	830,6	892,9	824,9	912
59,862	16360	272,67	526,8	797,6	819,7	887,1	823,7	907,9
59,898	16370	272,83	508,8	789,9	810,9	882,8	813,6	903,5
59,934	16380	273,00	497,8	784	805,3	881,3	811,2	900,5
59,970	16390	273,17	488,5	772,9	797,2	874,3	807,1	897,6
60,006	16400	273,33	498,4	777	793,8	872,6	800,4	893,3
60,042	16410	273,50	481	768	786,4	864,9	793,1	889,6
60,078	16420	273,67	477,5	759,2	784,3	863,5	785,7	885,3
60,114	16430	273,83	463,2	753	778,5	861,6	780	882,7

Messpunkt [m]	Zeit [s]	Zeit [min]	Meßstelle 1	Meßstelle 2	Meßstelle 3	Meßstelle 4	Meßstelle 5	Meßstelle 6
60,150	16440	274,00	463	749,8	774,8	855,1	778,4	877,4
60,186	16450	274,17	456,7	743	772,5	850,8	767,4	875,9
60,222	16460	274,33	460,1	739,5	769,3	850	768,2	871,3
60,258	16470	274,50	444,8	731,4	766,8	846,5	764,4	868,2
60,293	16480	274,67	436,4	724,7	760,9	839,6	762	864,2
60,329	16490	274,83	433,4	717	751,7	832,6	760,2	860,8
60,365	16500	275,00	431,1	716,6	752,7	835,3	752,7	856,2
60,401	16510	275,17	433,2	711,8	751,2	829,5	749,5	853,9
60,437	16520	275,33	413,4	704,2	738,5	821,7	748,7	849,2
60,473	16530	275,50	413,8	695,6	733,5	819,2	746	846,5
60,509	16540	275,67	405,4	689,6	726	816,1	738,5	842,3
60,545	16550	275,83	398,8	684	722,3	809,9	733	837,5
60,581	16560	276,00	394,9	675,5	715,5	806,1	732,1	835,2
60,617	16570	276,17	388,2	668,7	715,2	803,1	724,7	829,9
60,653	16580	276,33	390,3	666,1	705,2	790,6	728,1	827,7
60,689	16590	276,50	375,9	656	703,8	791,9	725,1	823,6
60,724	16600	276,67	378,6	654,1	703	791,6	719,5	819,8
60,760	16610	276,83	363,6	644,7	694,1	783,3	714,7	815,5
60,796	16620	277,00	370,5	643,4	686,7	777,9	718,7	814,5
60,832	16630	277,17	363,1	634	679,3	770,8	712,5	809,4
60,868	16640	277,33	350,3	625,9	674,7	763,4	708,3	806,1
60,904	16650	277,50	349,1	620	677	764,6	706,3	802,8
60,940	16660	277,67	341,8	614,4	671,6	759,8	706,7	799
60,976	16670	277,83	345,9	613,8	672,2	758,5	704,1	791
61,012	16680	278,00	339,2	606,2	665,5	752,9	693,6	780,6
61,048	16690	278,17	333,3	600,5	655,4	745,2	691,3	786,2
61,084	16700	278,33	328,3	593	642,8	736,6	689,2	783,2
61,120	16710	278,50	321	586,7	644,8	737,7	688,3	776
61,156	16720	278,67	317,6	581,9	645	732,7	684,3	775,8
61,191	16730	278,83	321,5	580,6	640,4	731,7	676,2	771,7

Messpunkt [m]	Zeit [s]	Zeit [min]	Messstelle 1	Messstelle 2	Messstelle 3	Messstelle 4	Messstelle 5	Messstelle 6
61,227	16740	279,00	313,3	572,9	640,5	729,8	675,2	769,3
61,263	16750	279,17	310,8	567,5	641,9	725,1	674,8	761,1
61,299	16760	279,33	297,9	555,1	630,7	717,1	683,6	764,1
61,335	16770	279,50	296,1	553,8	626,1	714,4	680,8	760,9
61,371	16780	279,67	283,6	538,7	616,8	704,8	688,8	760,3
61,407	16790	279,83	281,2	541,1	613,3	702,4	685,5	756,1
61,443	16800	280,00	279,9	536,1	611,8	702,8	684	752,8
61,479	16810	280,17	283,4	534,7	607,3	697,9	682,1	749,8
61,515	16820	280,33	270,7	520,5	600,8	692,1	680,3	745,9
61,551	16830	280,50	266,7	514,7	599,8	690,7	688,1	744,8
61,587	16840	280,67	263,6	510,8	595,9	686,5	680,4	740,3
61,622	16850	280,83	259,8	505,1	588,3	678,8	684,7	738,2
61,658	16860	281,00	253,6	498,7	594,4	675,8	682,8	734,8
61,694	16870	281,17	261	494,5	607,4	681,8	657,5	722,8
61,730	16880	281,33	258	489	600,6	679,9	641,8	707,6
61,766	16890	281,50	256,5	484,7	590,8	660,7	645,4	712,6
61,802	16900	281,67	254,3	477,1	597,3	667,5	642,8	709,4
61,838	16910	281,83	253,2	474,9	598,6	661,6	642,2	707,1
61,874	16920	282,00	247,8	464,8	586,2	652,9	636,8	705,6
61,910	16930	282,17	244,5	460,2	587,1	656,8	623,5	684,3
61,946	16940	282,33	245,6	456,1	582,7	648,4	615,3	692,7
61,982	16950	282,50	241,9	454,5	580,4	645,4	614,4	688
62,018	16960	282,67	239,7	449	580,4	641,6	609,8	684,2
62,053	16970	282,83	237,9	443,7	580	637,5	608,1	677,7
62,089	16980	283,00	232,9	438,5	567,8	631,1	605	673,2
62,125	16990	283,17	231	431	548,4	617,6	607,3	673,7
62,161	17000	283,33	230,5	426,4	541	609,4	608,6	671
62,197	17010	283,50	224,4	420	535	610,3	600,4	663
62,233	17020	283,67	221,5	413,1	546,7	616,5	604,7	663
62,269	17030	283,83	222,1	410,7	546	611,8	600,3	659,9

Messpunkt [m]	Zeit [s]	Zeit [min]	Meßstelle 1	Meßstelle 2	Meßstelle 3	Meßstelle 4	Meßstelle 5	Meßstelle 6
62,305	17040	284,00	218,1	403,6	539,3	608,1	599,6	654,7
62,341	17050	284,17	217,4	400,3	527,1	595,9	595,1	649,9
62,377	17060	284,33	212,9	394,4	522,6	587,4	586,4	645,8
62,413	17070	284,50	210,8	390,7	526,5	592,1	583,6	643,9
62,449	17080	284,67	210,4	383,6	515,9	580,7	582,7	638,9
62,484	17090	284,83	208	378,4	505,6	578,9	580,4	637,5
62,520	17100	285,00	205,7	374,8	502	577,1	577,1	634
62,556	17110	285,17	202,6	367,7	497,6	571,7	570,8	629,2
62,592	17120	285,33	200,3	361,9	496,2	572,8	572,8	629,4
62,628	17130	285,50	198,4	358,9	499,6	569,4	567,2	623,6
62,664	17140	285,67	198,5	352,5	491,1	559,8	563,4	619,6
62,700	17150	285,83	194,5	349,7	497,1	563,1	562,7	618,8
62,736	17160	286,00	193,5	344,4	501,3	569,7	558,4	612,5
62,772	17170	286,17	190,5	341,4	495,5	556,2	560,4	612,1
62,808	17180	286,33	187,9	338	496,3	554,2	559,2	609,7
62,844	17190	286,50	186,5	333,4	499,5	557	556,2	605,8
62,880	17200	286,67	187,2	331,7	502,7	557,4	556	602,5
62,916	17210	286,83	186	327,5	502,9	553,7	549,7	598,7
62,951	17220	287,00	184,4	325,9	502,9	552,9	547,9	596,2
62,987	17230	287,17	184,1	321,8	493,9	545,1	544,9	593,2
63,023	17240	287,33	183	317,4	501,5	550,5	542	591,1
63,059	17250	287,50	182,7	314,1	504,7	549,1	543,2	588,6
63,095	17260	287,67	185,1	312,7	509,4	549,5	540,6	586,1
63,131	17270	287,83	184,4	311,2	508,4	548,8	539,3	584,2
63,167	17280	288,00	182,5	306,5	505,4	543,6	539,5	583
63,203	17290	288,17	185,1	306,2	511,4	546,8	539,7	581
63,239	17300	288,33	185,6	302,2	512,6	545	537,5	578,6
63,275	17310	288,50	185,4	299,6	514,6	545	537	577,2
63,311	17320	288,67	187	297	512,6	541,3	537	573,9
63,347	17330	288,83	189,4	295,8	514,2	542,1	534,3	571,5

Messpunkt [m]	Zeit [s]	Zeit [min]	Meßstelle 1	Meßstelle 2	Meßstelle 3	Meßstelle 4	Meßstelle 5	Meßstelle 6
63,382	17340	289,00	188,7	290,7	514,6	541,7	535,5	569,6
63,418	17350	289,17	186,8	287,6	516,4	541,4	532,8	567,1
63,454	17360	289,33	189,7	288,8	512,7	536,5	530,7	565,4
63,490	17370	289,50	191,8	285,9	504,3	529,8	523	561,5
63,526	17380	289,67	194,6	286,3	504,2	530,7	522	559,5
63,562	17390	289,83	195,3	284,1	505	532,3	519,1	558,1
63,598	17400	290,00	199,3	284,3	502,2	528,5	515,5	554,5
63,634	17410	290,17	199,1	280,7	495,8	524,9	509,5	552,2
63,670	17420	290,33	199,1	279,6	494,4	522,7	502,3	548,9
63,706	17430	290,50	198,4	276,1	496,6	524,1	506,3	548,9
63,742	17440	290,67	197,7	275	496,9	522,6	499,5	545,5
63,778	17450	290,83	199,6	274,1	492,2	521,1	499,3	544,7
63,813	17460	291,00	196,8	268,1	492,7	519,5	494,9	541,4
63,849	17470	291,17	195,3	266,9	490,8	517,3	487	533,3
63,885	17480	291,33	192,3	263,4	491,3	518,2	479	533
63,921	17490	291,50	186,6	264,7	489,4	515,8	465,4	519,1
63,957	17500	291,67	181,8	261,9	488,9	514,3	451	512,9
63,993	17510	291,83	178	258,3	492,5	515,9	444,4	505,3
64,029	17520	292,00	182,7	259,6	494,1	513,1	438,1	498,1
64,065	17530	292,17	195,7	263,5	497,9	514,8	432	491,3
64,101	17540	292,33	213	264,5	493,9	510,3	429,4	490,8
64,137	17550	292,50	230,7	267,7	490,3	507,5	427,2	491,3
64,173	17560	292,67	246,1	270	486,1	506,6	424,4	487,7
64,209	17570	292,83	297,6	283,3	481,3	504,2	425,8	488,7
64,244	17580	293,00	341,4	298	476,9	502,5	424,6	486,7
64,280	17590	293,17	356,6	304,9	471,3	499,9	425,8	485,1
64,316	17600	293,33	367,6	307,9	469,2	498,3	429,9	483,7
64,352	17610	293,50	373	310,3	466,3	497,1	437,1	484,1
64,388	17620	293,67	375,4	315	464,1	497,3	442	483,9
64,424	17630	293,83	372,3	315,5	469,7	499,2	443,2	482,3

Messpunkt [m]	Zeit [s]	Zeit [min]	Meßstelle 1	Meßstelle 2	Meßstelle 3	Meßstelle 4	Meßstelle 5	Meßstelle 6
64,460	17640	294,00	375,2	319,6	475,8	499,6	443,4	479,7
64,496	17650	294,17	377,9	322,5	478,4	498,7	443,2	479
64,532	17660	294,33	379,6	326,9	477,6	497,1	446,1	478,7
64,568	17670	294,50	380,8	330,7	476,8	495	448,1	478,2
64,604	17680	294,67	380,2	332,9	476,2	493,5	449,2	476,8
64,640	17690	294,83	380,4	336,1	474,7	493,3	447,3	475,6
64,676	17700	295,00	382,2	338,6	471,4	490,7	445,2	473,1
64,711	17710	295,17	382	341,2	469,8	489,5	447,1	472,9
64,747	17720	295,33	380,8	342,7	469,9	488,3	450,8	473,1
64,783	17730	295,50	379,7	344,6	467,8	487,5	450,3	472
64,819	17740	295,67	380,4	347	468,2	487,3	451	470,9
64,855	17750	295,83	381,6	350,4	468,6	486,7	449,1	469,4
64,891	17760	296,00	381,7	351,8	468,8	485,1	449,2	468,4
64,927	17770	296,17	378	352,8	457,3	475,3	448,9	466,7
64,963	17780	296,33	374,3	353,5	441,4	468,2	444,4	464,9
64,999	17790	296,50	369,5	352,7	418,5	454,2	430,5	461,2
65,035	17800	296,67	366,8	353,8	397,3	437,5	419,4	457,9
65,071	17810	296,83	358,4	352,4	373,9	425,4	408,8	454,7
65,107	17820	297,00	350,4	352,3	363,8	424,9	404,9	452,3
65,142	17830	297,17	336	349,5	357,9	429,9	396,4	449,9
65,178	17840	297,33	325,5	348,2	348,6	423,5	393,3	448,7
65,214	17850	297,50	343,1	351,4	344,1	421,2	396,6	448,9
65,250	17860	297,67	338,9	351,6	350,3	424,5	404,3	448,6
65,286	17870	297,83	338,1	349,7	355	424,7	407,4	446,5
65,322	17880	298,00	322	345,1	345,4	416,2	403,2	443,9
65,358	17890	298,17	306,3	340,6	335,7	402,8	404,4	442,7
65,394	17900	298,33	284,7	334	326,2	399,6	403,2	440,8
65,430	17910	298,50	284,5	333,6	322,4	397,8	399,3	438,4
65,466	17920	298,67	277,8	331,2	321,1	398,2	396,3	436,3
65,502	17930	298,83	261,7	325,7	312,2	385,8	395,6	434,8

Messpunkt [m]	Zeit [s]	Zeit [min]	Messstelle 1	Messstelle 2	Messstelle 3	Messstelle 4	Messstelle 5	Messstelle 6
65,538	17940	299,00	256,2	322,6	307,8	382,3	389,4	432,6
65,573	17950	299,17	250,4	318,3	295,4	373,7	387,5	429,3
65,609	17960	299,33	253	315,5	281,3	358,2	379,4	423
65,645	17970	299,50	242,6	309,5	273,8	360,4	369,6	414,9
65,681	17980	299,67	234,8	305,6	267,1	356,7	348,1	405,9
65,717	17990	299,83	219	302,2	260,4	344,9	323,9	395,2
65,753	18000	300,00	217,5	297,1	259,7	350	303	388,3
65,789	18010	300,17	214,1	290,5	259,7	351,1	285,1	380,8
65,825	18020	300,33	209,6	281,1	263	356,2	270,8	370,4
65,861	18030	300,50	203,1	272,8	263,2	354,4	257,1	363,6
65,897	18040	300,67	188,4	263,7	264,4	353,6	246,7	354,7
65,933	18050	300,83	173,8	251,7	266,8	353,9	240,3	346,6
65,969	18060	301,00	162,4	240,8	267,7	355,2	234,8	339,5
66,004	18070	301,17	153,6	232,6	263,5	343,6	231,9	330,1
66,040	18080	301,33	149,2	230	258,5	338	227	319,1
66,076	18090	301,50	145	225,7	264,1	341,4	223,6	311,5
66,112	18100	301,67	141,7	225,1	265,7	337,4	219	302,3
66,148	18110	301,83	143,5	225,5	270,1	332,8	214	292,2
66,184	18120	302,00	143,2	220,8	269,7	329,4	204,6	277,5
66,220	18130	302,17	141,9	221,9	271,4	322,5	196,5	268,3
66,256	18140	302,33	141,4	221,3	271,7	324,6	190,9	260,8
66,292	18150	302,50	139,3	221,5	271,2	318,3	184,1	252,7
66,328	18160	302,67	141,8	221,5	270,3	318,2	179,8	246,9
66,364	18170	302,83	142,3	219,8	269,6	314,7	176,3	242
66,400	18180	303,00	143,3	217,7	267,8	314,7	173	237,1
66,436	18190	303,17	141,5	214,8	266	312,7	170,6	233,1
66,471	18200	303,33	138,1	212	264,2	310,6	168	227,3
66,507	18210	303,50	138,3	211,5	262,6	314,4	168,4	225,8
66,543	18220	303,67	133,1	210,7	262,8	314,8	169,8	224,4
66,579	18230	303,83	126,9	207	258,8	309,2	174,3	221,5

Messpunkt [m]	Zeit [s]	Zeit [min]	Meßstelle 1	Meßstelle 2	Meßstelle 3	Meßstelle 4	Meßstelle 5	Meßstelle 6
66,615	18240	304,00	125,1	205,5	255,9	302,3	178,3	219,4
66,651	18250	304,17	127,9	205,3	253,9	301,3	177,8	217,3
66,687	18260	304,33	122,5	203,2	253,2	303,8	175,4	215,2
66,723	18270	304,50	123,8	202,5	250,5	303,4	176,8	216,6
66,759	18280	304,67	124,2	203,3	250,9	304,4	180,5	217
66,795	18290	304,83	126	203,8	249,8	301,2	181,3	217,2
66,831	18300	305,00	128,1	203,1	250,6	302,5	179,3	215,6
66,867	18310	305,17	132,5	202,9	249,3	300,3	179,8	216,5
66,902	18320	305,33	133,3	202,6	244,6	297	186,6	219,1
66,938	18330	305,50	141,3	201,5	241,5	293,9	191,8	220,7
66,974	18340	305,67	138,2	197,2	241,9	295	197,7	223,5
67,010	18350	305,83	139,7	194,6	231	278,9	203,5	225,6
67,046	18360	306,00	137,6	191,5	210,1	260,8	205,6	226,3
67,082	18370	306,17	136,1	190,6	195	250,1	208,2	225,8
67,118	18380	306,33	137,3	187	177,1	239,2	210,3	226
67,154	18390	306,50	135	186,8	179	252,1	209,6	227,2
67,190	18400	306,67	134,7	183,9	175	247	209,8	227,2
67,226	18410	306,83	133,6	181,8	169,5	240,9	208,6	227,2
67,262	18420	307,00	133,4	181,6	169,1	243,6	206,3	227,2
67,298	18430	307,17	131,5	178,7	163,6	230,4	208,1	227,8
67,333	18440	307,33	129,5	179,9	155,6	222	204,3	221,5
67,369	18450	307,50	124,5	178	148,1	213	194,2	216,5
67,405	18460	307,67	116,5	174,7	142,4	209	185,3	213,5
67,441	18470	307,83	107,3	170,8	137,4	204	176	208,9
67,477	18480	308,00	101,4	168,1	134,6	203,6	172,1	207,8
67,513	18490	308,17	97,2	165,1	132,7	202,3	168,7	207,5
67,549	18500	308,33	93	160,9	130,9	201,2	159,6	204,4
67,585	18510	308,50	92,5	157	127,5	196,9	147,5	196,7
67,621	18520	308,67	91,8	154,7	128,3	203,5	139,2	195
67,657	18530	308,83	91,9	151,3	128	202,7	130,8	190,5

Messpunkt [m]	Zeit [s]	Zeit [min]	Meßstelle 1	Meßstelle 2	Meßstelle 3	Meßstelle 4	Meßstelle 5	Meßstelle 6
67,693	18540	309,00	87,9	147,4	127,2	200,4	124,1	184,9
67,729	18550	309,17	90,7	146,9	125,4	197,6	119,2	182,1
67,764	18560	309,33	93,7	144,5	124,6	197,5	115,8	179,2
67,800	18570	309,50	99	143,3	125,1	199,5	112,7	175
67,836	18580	309,67	101	141,4	125,1	198,5	109,6	168,8
67,872	18590	309,83	99,4	137,8	124,5	196,6	107,7	165,2
67,908	18600	310,00	90,3	134,3	124	192,3	107,7	161
67,944	18610	310,17	83,7	127,1	125,6	198,7	108	159
67,980	18620	310,33	78,6	125	127,3	197,4	107,6	155,8
68,016	18630	310,50	75	122,5	129,2	195,2	107,4	152,8
68,052	18640	310,67	72	121,6	132,5	187,5	106,5	148,5
68,088	18650	310,83	72,8	119,6	135,1	187,8	106,1	144,4
68,124	18660	311,00	71,7	118,2	136,1	184,9	104,5	140,7
68,160	18670	311,17	70,5	115,6	137,1	184,5	103,7	137,7
68,196	18680	311,33	70,1	115,9	136,1	180,5	102,9	134,8
68,231	18690	311,50	68,9	113,6	135,8	179,8	101,9	131,2
68,267	18700	311,67	67,9	112,7	134,5	177,6	101,3	129,3
68,303	18710	311,83	69,1	112,4	135,2	175,2	102,1	127,2
68,339	18720	312,00	68,1	112,4	133,9	170,5	101,7	125,1
68,375	18730	312,17	68,7	112,4	132,6	171,4	102,5	124,5
68,411	18740	312,33	67,1	111,8	131,5	172,5	103	122,7
68,447	18750	312,50	66,9	110,8	131,6	172,6	103,8	122,5
68,483	18760	312,67	65,2	110,8	128,7	169	105,1	122,2
68,519	18770	312,83	64,9	109,2	126,3	168,5	106,1	122,9
68,555	18780	313,00	64,3	108,4	124,7	164,6	106,8	122,9
68,591	18790	313,17	63,9	108,1	121,9	161,5	107,9	123,9
68,627	18800	313,33	64,2	107,3	120,8	158,1	109,1	123,6
68,662	18810	313,50	66,3	106,5	118,2	154,9	108,3	123,3
68,698	18820	313,67	67,9	105,7	116,8	155,5	106,5	124,4
68,734	18830	313,83	69,4	105,4	114,8	154,4	105,4	124,1

Messpunkt [m]	Zeit [s]	Zeit [min]	Meßstelle 1	Meßstelle 2	Meßstelle 3	Meßstelle 4	Meßstelle 5	Meßstelle 6
68,770	18840	314,00	70	105,2	114,2	156,7	103,4	124,8
68,806	18850	314,17	70	104,6	112,6	156,2	101,5	124,3
68,842	18860	314,33	69,9	103,8	110,5	152,5	100,7	124,5
68,878	18870	314,50	69,9	102,7	108,4	147,8	100,4	125,8
68,914	18880	314,67	68,3	101,7	105,8	144,9	99,9	125,5
68,950	18890	314,83	68,3	100,9	104,3	142,1	99,1	125,5
68,986	18900	315,00	66,8	99,6	101,9	140,3	98	126
69,022	18910	315,17	66,4	99,3	101,1	140,2	97,4	125,7
69,058	18920	315,33	65,7	98,5	99,5	138,4	97,2	125,9
69,093	18930	315,50	65,1	97,9	98,2	137,8	97,4	125,6
69,129	18940	315,67	64,7	97,6	96,6	135,4	97,6	125,1
69,165	18950	315,83	63,9	96,9	95,4	134,7	97,2	125,2
69,201	18960	316,00	64,4	96,1	94,6	133,7	97,7	125,4
69,237	18970	316,17	64,3	96,3	92,2	129,2	96	123,3
69,273	18980	316,33	63,4	96	89,9	126,9	95	122,4
69,309	18990	316,50	62,7	95,5	88	126	92,9	120,6
69,345	19000	316,67	60,2	93,9	85,2	121,9	91,3	119,8
69,381	19010	316,83	58	93,4	82,4	118	89	117,7
69,417	19020	317,00	56,7	92,5	80,7	117,1	85,4	115,8
69,453	19030	317,17	57	93	79,5	115,8	83,3	114,6
69,489	19040	317,33	55,5	91,8	78,6	114,6	80,5	113
69,524	19050	317,50	56	91,7	77,9	113,7	78,5	110,9
69,560	19060	317,67	57,9	92	77,3	113,2	76,3	108,6
69,596	19070	317,83	57,8	91,2	76,6	112,1	74,1	107,7
69,632	19080	318,00	58,2	91,5	76,9	112,2	72,6	106,2
69,668	19090	318,17	60,7	90,9	76,3	110,1	71,3	104,4
69,704	19100	318,33	58,1	90,9	75,3	111,4	69,7	101,5
69,740	19110	318,50	59,7	90,3	74,4	110,3	68,2	100,5
69,776	19120	318,67	60,9	89,7	73,7	109,3	66,6	98,9
69,812	19130	318,83	59,3	87,7	73,3	107,9	65,2	96,7

Messpunkt [m]	Zeit [s]	Zeit [min]	Meßstelle 1	Meßstelle 2	Meßstelle 3	Meßstelle 4	Meßstelle 5	Meßstelle 6
69,848	19140	319,00	58,7	87,7	74,6	109,2	64,9	95,2
69,884	19150	319,17	57,7	86,8	74,6	110,2	63,3	93,4
69,920	19160	319,33	57,7	86,1	74,9	109,5	63,3	92,3
69,956	19170	319,50	57,1	85,8	75,2	107,1	62,1	90,2
69,991	19180	319,67	56,7	84,8	75,1	107,4	61,7	89,2
70,027	19190	319,83	57,3	85,5	74,8	105,3	61,4	86,7

Lebenslauf

Name	Friedherz Hartmut Becker
Geburtstag, Geburtsort	07.04.1947, Bielefeld
Familienstand	verheiratet seit 1971, 2 Kinder

Ausbildung

1953 – 1958	Volksschule in Bielefeld
1958 – 1966	Max-Planck-Gymnasium Bielefeld
Okt. 1966	Abitur
WS 66/67 – WS 73/74	Studium Maschinenbau und Studium der Fachrichtung Hüttenwesen, Studienrichtung Steine und Erden an der Technischen Universität Clausthal
01.04.1974	Diplom-Hauptprüfung

berufliche Laufbahn

1974 – 2011	Angestellter der Fa. Riedhammer GmbH, Industrieofenbau, Nürnberg
1986 – 1987	Aufbaustudium zum Energieberater an der TU-Berlin
1987 – 1995	Lehrbeauftragter der TH- Nürnberg
1991 – 1998	Prokurist der Fa. Riedhammer GmbH, Industrieofenbau, Nürnberg

1998 – 2011	Leiter des Application Center der Fa. Riedhammer GmbH
1999 – 2007	2. Vorsitzender des Fachausschusses Wärmetechnik der DKG
2003 – 2009	Vorsitzender der Forschungs- gemeinschaft Industrieofenbau (FOGI)