

Herbert Pfeifer, Bernard Nacke
Franz Beneke (Hrsg.)

Praxishandbuch Thermoprozess- technik

Band I:
Grundlagen
Prozesse
Verfahren

2. Auflage



VULKAN

inkl. Datenträger

Praxishandbuch Thermoprozesstechnik



Choose the Original
Choose Success!



Vorwärmen von keramischen Gießformen für TiAl, Ti, Pt, Ni-Basis.

Drehherdöfen 43 kW, 1100 °C. 3 Drehteller (Ø 940 mm, Abstand 350 mm). **Faserfrei.**

Gießen von Turbinenschaufeln, Turboladerrädern γ -TiAl, Ti, Ni-Basis.

Induktionsbeheizte Zentrifugalgießmaschinen für Präzisionsfeinguß
bis 2 kg Ti /TiAl, 3 kg Stahl, 1 kg Al/Mg, u.a.



Glühen, Löten, Tempern unter Schutzgas / Vakuum. Wärmebehandlung von Federn und Coils (Draht, Band), Herstellung von Metallschäumen. Schutzgas- /Vakuumkammeröfen mit Gasumwälzung bis 1200 °C, 2000 l mit hitzebeständiger gasdichter Muffel.



Halbautomatische Titan-Gießlinie

bestehend aus Drehherdöfen, Nachwärme-Schutzgas-Banddurchlauföfen und Zentrifugalgießmaschinen.

Trocknen und Kühlen beschichteter Aluminium-Motorkolben.

Taktdurchlauföfen 126 kW, 250 °C. Länge 9 m, 10 s Takt, ca. 360 Stück/h.



**Herbert Pfeifer, Bernard Nacke, Franz Beneke
(Hrsg.)**

Praxishandbuch Thermoprozesstechnik

Band I: Grundlagen - Prozesse - Verfahren

2. Auflage

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über

<http://dnb.ddb.de>

abrufbar.

ISBN 978-3-8027-2947-8 (+ CD)

ISBN 978-3-8027-2949-2 (+ DVD)

© 2010 Vulkan-Verlag GmbH

Huyssenallee 52-56, D-45128 Essen

Telefon: (02 01) 8 20 02-0, Internet: <http://www.vulkan-verlag.de>

Titelbild (Quelle): SMS Elotherm GmbH

Das Werk einschließlich aller Abbildungen ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Bearbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Das vorliegende Werk wurde sorgfältig erarbeitet. Dennoch übernehmen Herausgeber und Verlag für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Ratschlägen sowie für eventuelle Druckfehler keine Haftung.

Lektorat/Projektmanagement: Stephan Schalm

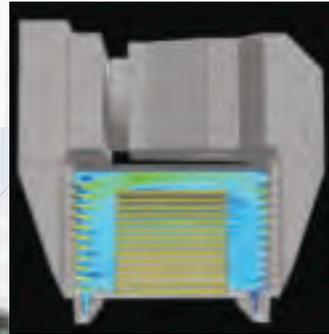
E-Mail: s.schalm@vulkan-verlag.de



Kompetenz in Strömungs-, Wärme- und Energietechnik

- **Forschung**
- **Beratung**
- **Weiterbildung**

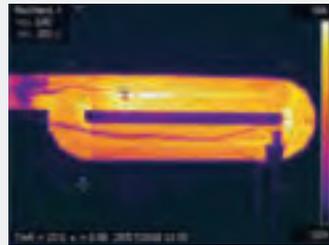
Simulation,
Labor- und
Betriebsversuche



Strömungssimulation



Betriebsversuche



Laborversuche



Lasermesstechnik PV/LIF/LDA



OTTO JUNKER

We understand Metals

Anlagenbau und Edelstahlgießerei



Innovation, Prozesskompetenz und Kundenfreundlichkeit sind kennzeichnend für das 1924 gegründete, weltweit agierende Unternehmen.

Gießereianlagen: Schmelz-, Gieß- und Warmhalteöfen für alle Einsatzgebiete

Wärmebehandlungsanlagen: Anlagensysteme zum Erwärmen, Wärme- und Oberflächenbehandeln für die NE-Industrie

Edelstahlgießerei: Hochwertige einbaufertige Stahlgussteile für anspruchsvolle Anwendungen

OTTO JUNKER GmbH
Postfach 11 80
D-52147 Simmerath
Fon: +49 2473 601-0
Fax: +49 2473 601-600
info@otto-junker.de

OTTO JUNKER Group
Global and Close to the Customer

www.otto-junker-group.com

Vorwort

Das Praxishandbuch Thermoprozesstechnik Band I erscheint nun in einer 2., vollständig überarbeiteten Auflage. Damit wird die Tradition des Vulkan-Verlags, Fachbücher auf dem Gebiet des Industrieofenbaus bzw. der Thermoprozesstechnik zu publizieren, fortgesetzt.

Der vorliegende Band I beinhaltet Grundlagen, Prozesse und Verfahren. Dieser vermittelt die Grundlagen der Wärmebehandlung, des Wärme- und Impulstransports, der Verbrennung und der Elektrowärmeverfahren. Darüber hinaus ist die Vakuum- und Schutzgasteschnik für die Thermoprozesstechnik abgehandelt. Letztlich wird auch eine Übersicht über wichtige Hochtemperaturwerkstoffe des Industrieofenbaus gegeben.

Dieser erste Band zeigt eindrücklich, dass das Gebiet der Thermoprozesstechnik einen sehr großen Bereich der Technik abdeckt. Dies ist nur durch eine größere Anzahl von Autoren zu leisten.

Unser Dank gilt deshalb in ganz besonderem Maße diesen Autoren und den sie beschäftigenden Unternehmen. Dieser Dank gilt auch den Mitarbeitern des Vulkan-Verlags, hier sei stellvertretend für alle Herr Dipl.-Ing. Stephan Schalm genannt, die durch Ihren Einsatz ebenfalls am Gelingen dieses Buches maßgeblich beigetragen haben.



Prof. Dr.-Ing.
Herbert Pfeifer



Prof. Dr.-Ing.
Bernard Nacke



Dr.-Ing.
Franz Beneke

Forschung, Entwicklung, Beratung und Service

Entwicklung und Optimierung von elektro- thermischen Prozessen und Anlagen:

- ⇒ Induktive Schmelztechnik
 - Schmelzen im Kaltwand-Induktionsofen
 - Schmelztechniken für Keramiken und Gläser
 - Stoff- und Wärmetransport im Induktionsofen
- ⇒ Induktive Erwärmung von Metallen
 - Induktive Bänderwärmung
 - Hybridverfahren mit Gas, Laser, ...
 - Randschichthärtens komplexer Geometrien
 - Innovative Lösungen zur Durcherwärmung
- ⇒ Herstellung neuer Werkstoffe
- ⇒ Züchtung von Halbleiter-Einkristallen
- ⇒ Thermische Behandlung von Werkstoffen
- ⇒ Elektromagnetische Beeinflussung von Materialien

Ressourcen- und umweltschonende Energienutzung:

- ⇒ Energiemanagement von Gebäuden und industriellen Anlagen
- ⇒ Energiebedarf und CO₂-Emission von Prozesswärmeverfahren
- ⇒ Solare Energiesysteme
- ⇒ Infrarot-Thermografie
- ⇒ EMV-Messungen

Problemlösungen durch:

- ⇒ Experimentelle Untersuchungen an Versuchs- und Industrieanlagen
- ⇒ Entwicklung neuer Messsysteme
- ⇒ Numerische Modellierung und Prozesssimulation von gekoppelten elektromagnetischen, thermischen und fluid-dynamischen Effekten
- ⇒ Einsatz von automatischen Optimierungsverfahren
- ⇒ Beratung von Energieversorgern sowie Anlagenherstellern und Anwendern elektrothermischer Prozesse

Kontakt Info

Institut für Elektroprocesstechnik
Wilhelm-Busch-Str.4
D-30167 Hannover
Tel.: +49 511 762 2872
Fax: +49 511 762 3275
homepage: <http://www.etp.uni-hannover.de>

⇒ Prof. Dr.-Ing. B. Nacke
Tel.: +49 511 762 5533
nacke@etp.uni-hannover.de

⇒ Prof. Dr.-Ing. E. Baake
Tel.: +49 511 762 3248
baake@etp.uni-hannover.de

Geleitwort



Die Thermoprozesstechnikbranche, deren Kern der Industrieofenbau ist, kümmert sich sowohl um die Erzeugung von Stoffen als auch um die Einstellung von gewünschten Qualitätseigenschaften und bestimmter Gestaltungsformen der behandelten Materialien durch Wärme. Die Bandbreite reicht von

- der thermischen Gewinnung,
- dem Schmelzen,
- der Pulvermetallurgie,
- dem Wärmen und Wärmebehandeln,
- dem Trocknen und Oberflächenbehandeln bis hin zum Recyceln mit thermischen Prozessen.

Die Thermoprozesstechnik findet Anwendung in nahezu allen Branchen der Investitionsgüterindustrie, wie der Eisen- und Stahlindustrie, der Automobil- und Automobilzulieferindustrie, dem Maschinenbau, den Gießereien, der Keramik- und Glasindustrie etc.

Angesichts der Fülle der in der Praxis eingesetzten Anlagen und Verfahren einerseits sowie der Vielzahl kleinerer und mittlerer, hoch spezialisierter und innovativer Unternehmen andererseits ist die Branche äußerst vielfältig.

Die gute Zusammenarbeit von Herstellern, Forschungsstellen und Anwendern sowie die enge Verbindung von Forschung und Entwicklung, Konstruktion, Bau und Vertrieb ist ein wesentliches Kennzeichen der Branche. Dies spiegelt sich auch in den Aktivitäten des Fachverbandes Thermo- prozess- und Abfalltechnik im VDMA wider, in dem die Branchenunternehmen organisiert sind. Es verwundert deshalb nicht, dass die Autoren dieses Handbuchs insbesondere durch die industrielle Gemeinschaftsforschung mit dem Fachverband eng verbunden sind.

Der Fachverband begrüßt und unterstützt deshalb die Initiative des Vulkan-Verlags, das Hand- buch, das erstmalig 2002 erschien, neu aufzulegen und zu überarbeiten.

Wir danken dem Vulkan-Verlag, den Herausgebern und Autoren für den erheblichen Einsatz zur Realisierung dieses umfangreichen Werks und wünschen den auf diesem Gebiet tätigen Studie- renden und Ingenieuren einen regen Gebrauch dieses Praxishandbuchs.

Dr. Gutmann Habig

Geschäftsführer des Fachverbandes

Thermoprozess- und Abfalltechnik im VDMA

Autorenverzeichnis

Prof. Dr.-Ing. Egbert Baake

Leibniz Universität Hannover
Institut für Elektroprozessstechnik
Wilhelm-Busch-Straße 4
D-30167 Hannover

Dipl.-Ing. Friedherz H. Becker

Riedhammer GmbH
Klingenhofstraße 72
D-90411 Nürnberg

Dr.-Ing. Franz Beneke

VDMA
Fachverband TPT
Lyoner Straße 18
D-60528 Frankfurt am Main

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Bleck

RWTH Aachen University
Institut für Eisenhüttenkunde
Intzestraße 1
D-52072 Aachen

Dipl.-Ing. Johann Daimer

SGL CARBON GmbH
Werner-von-Siemens-Straße 18
86405 Meitingen

Dr.-Ing. Erwin Dötsch

ABP Induction Systems GmbH
Kanalstraße 25
D-44147 Dortmund

Dipl.-Ing. Peter Haase

Wilh. Schulz GmbH – Spezialglühbetrieb
Hülser Straße 764 A
D-47803 Krefeld

Dr. rer. nat. Heike Hattendorf

ThyssenKrupp VDM GmbH
Kleffstraße 23
D-58762 Altena

Dr.-Ing. Hartmut Hegeler

Nikolaus Sorg GmbH & Co. KG
Stoltestraße 23
97816 Lohr am Main

Dr.-Ing. Volker Heuer

ALD Vacuum Technologies GmbH
Wilhelm-Rohn-Straße 35
D-63450 Hanau

Dr. Hubert Jäger

SGL CARBON GmbH
Werner-von-Siemens-Straße 18
86405 Meitingen

Dipl.-Ing. Dirk Joritz

Ipsen International GmbH
Flutstraße 78
D-47533 Kleve

Prof. Dr.-Ing. Carl Kramer

WSP GmbH
An der Glashütte 10
D-52074 Aachen

Dr.-Ing. Jutta Klöwer

ThyssenKrupp VDM GmbH
Kleffstraße 23
D-58762 Altena

Dr.-Ing. Klaus Löser

ALD Vacuum Technologies GmbH
Wilhelm-Rohn-Straße 35
D-63450 Hanau

Prof. Dr.-Ing. Bernard Nacke
 Leibniz Universität Hannover
 Institut für Elektroprozessertechnik
 Wilhelm-Busch-Straße 4
 D-30167 Hannover

Dr.-Ing. Volker Uhlig
 Technische Universität Bergakademie Freiberg
 Institut für Wärmetechnik und
 Thermodynamik
 Gustav-Zeuner-Straße 7
 D-09596 Freiberg

Prof. Dr.-Ing. Herbert Pfeifer
 RWTH Aachen University
 Institut für Industrieofenbau u. Wärmetechnik
 Kopernikusstraße 16
 D-52074 Aachen

Dipl.-Ing. Heinz Wimmer
 RATH GmbH
 Krefelderstraße 680-682
 D-41066 Mönchengladbach

Dipl.-Ing. Michael Springer
 FBB Engineering GmbH
 Puechhaimgasse 43
 A-3580 Horn

1. Praxistagung

Energieeffizienz in der Thermotechnik

02.+03.06.2009, Essen, Internat.
www.energieeffizienz-thermoprozess.de

Termin:

- Dienstag, **02.06.2009**,
 Veranstaltung (10:00 – 17:00)
 Gemeinsame Abendveranst.
- Mittwoch, **03.06.2009**,
 Veranstaltung (9:00 – 17:00 U

**Alle Vorträge
 & Impressionen
 jetzt Online**
www.energieeffizienz-thermoprozess.de

...er für Entwickler von
 industriellen Thermoprozessanlagen

Veranstalter

elektro wärme international
 GASWÄRME international
International



 Mehr Information und Online-Anmeldung unter www.energieeffizienz-thermoprozess.de

www.flox.com

Entscheiden Sie sich für leistungsstarke WS Gasbrenner der neuesten Generation. – Innovative Systemlösungen von WS, die auf der einzigartigen FLOX®-Technologie* basieren. Potenzielle NO_x Probleme werden endgültig entschärft und ein energieeffizienter und funktionssicherer Systembetrieb für eine nachhaltige Produktivität etabliert.

* »FLOX« ► »FLameless OXidation«:
Das eingetragene Warenzeichen
und die patentierte Technologie der
WS Wärmeprozess-technik GmbH.

Maximale Energie-Effizienz.

FLOX®

INNOVATIVE BRENNER TECHNOLOGIE



WS Wärmeprozess-technik GmbH · Dornierstraße 14 · D-71272 Renningen / Germany
Tel.: +49 (71 59) 16 32-0 · Fax: +49 (71 59) 27 38 · E-mail: ws@flox.com

WS Inc. · 719 Sugar Lane · Elyria, OH 44035 / USA
Tel.: +1 (440) 365 8029 · Fax: +1 (440) 365 9452 · E-mail: wsinc@flox.com

Inhalt

Vorwort	VII
Geleitwort	IX
Autorenverzeichnis	X
1. Einleitung	1
1.1 Definition des Begriffs Thermoprozesstechnik	2
1.2 Systematik und Klassifikation der Thermoprozessanlagen	3
1.2.2 Ofenart	4
1.2.3 Gutlagerung	9
1.2.4 Erwärmungsprinzip	14
1.2.5 Hüllmittel	25
1.2.6 Produktionsbereich	26
2. Werkstofftechnische Grundlagen	31
2.1 Schmelzen	32
2.1.1 Eisenwerkstoffe	32
2.1.1.1 Stahlherstellung	35
2.1.1.2 Sekundärmetallurgie der Stahlherstellung	37
2.1.1.3 Schmelzen von Eisenguss	37
2.1.2 Aluminium	41
2.1.2.1 Primär- und Sekundäraluminium	41
2.1.2.2 Guss- und Knetlegierungen	42
2.1.2.3 Qualität der Aluminiumschmelze	42
2.1.2.4 Schmelzebehandlung	44
2.1.3 Kupferwerkstoffe	45
2.1.3.1 Kupfergewinnung	45
2.1.3.2 Kupfersorten und -legierungen	45
2.1.3.3 Oxidierendes und reduzierendes Schmelzen	46
2.1.4 Glas	48
2.1.4.1 Glasarten und -rohstoffe	48
2.1.4.2 Herstellung von Glas	50
2.1.4.3 Glasschmelzanlagen	52
2.2 Grundlagen der technischen Wärmebehandlung metallischer Werkstoffe ..	57
2.2.1 Härten	60
2.2.1.1 Begriffsbestimmung	60
2.2.1.2 Vergüten (Härten und Anlassen)	61
2.2.1.3 Prüfung der Härbarkeit	72
2.2.1.4 Berechnung der Härbarkeit	75
2.2.1.5 Einsatzhärten	76
2.2.1.6 Eigenschaften gehärteter Werkstücke	77
2.2.2 Glühbehandlungen	81
2.2.2.1 Diffusionsglühen	81

2.2.2.2	Grobkornglügen	84
2.2.2.3	Normalglügen	86
2.2.2.4	Weichglügen	88
2.2.2.5	Rekristallisationsglügen	92
2.2.2.6	Spannungsarmglügen	98
2.2.2.7	Kombinierte Glühverfahren	99
2.2.2.8	Patentieren von Drähten	99
2.2.3	Beschreibung der Austenitumwandlung für technische Anwendungen	100
2.2.3.1	Ermittlung der Ungleichgewichtsschaubilder	100
2.3	Grundlagen der technischen Wärmebehandlung von nichtmetallisch-anorganischen Werkstoffen	103
2.3.1	Einteilung von nichtmetallisch-anorganischen Werkstoffen	103
2.3.2	Natursteine	104
2.3.2.1	Magmatite	104
2.3.2.2	Sedimente	104
2.3.2.3	Metamorphite	105
2.3.3	Glas	105
2.3.3.1	Rohstoffe und Herstellung	105
2.3.3.2	Wärmebehandlung von Glas	106
2.3.3.3	Formgebung von Glas	106
2.3.3.4	Eigenschaften von Glas und ihre Beeinflussung	107
2.3.4	Keramik	109
2.3.4.1	Einteilung keramischer Werkstoffe	110
2.3.4.2	Sintern keramischer Werkstoffe	113
2.3.4.2.1	Anfangsstadium	115
2.3.4.2.2	Zwischenstadium	116
2.3.4.2.3	Endstadium	118
2.3.4.2.4	Sintern von Hartporzellan	119
2.3.5	Nichtmetallisch-anorganische Bindemittel	120
2.3.5.1	Zement	120
2.3.5.1.1	Zementarten	121
2.3.5.1.2	Sintern zum Zementklinker	122
2.3.5.2	Kalk	123
2.3.5.2.1	Entstehung von Calciumcarbonat	123
2.3.5.2.2	Kalzinieren von Calciumcarbonat	123
2.3.5.3	Gips	124
2.3.5.3.1	System $\text{CaSO}_4 - \text{H}_2\text{O}$	125
2.3.5.3.2	Dehydratisierung des Gipses	125
3.	Wärmeübertragung	129
3.1	Grundgleichungen der Wärmeübertragung	130
3.2	Wärmeleitung	131
3.2.1	Fouriersches Gesetz	131
3.2.2	Fouriersche Wärmeleitungsgleichung	131
3.2.3	Eindimensionale, stationäre Wärmeleitung	133
3.2.4	Wärmeübertragung an Rippen	137
3.2.4.1	Wärmeübertragung an Rippen mit konstanten Querschnitten	138