

Steffen Krzack
Heiner Gutte
Bernd Meyer *Hrsg.*

Stoffliche Nutzung von Braunkohle

Stoffliche Nutzung von Braunkohle

Steffen Krzack · Heiner Gutte ·
Bernd Meyer
Hrsg.

Stoffliche Nutzung von Braunkohle

Hrsg.

Steffen Krzack
Inst. für Energieverfahrenstechnik
und Chemieingenieurwesen
TU Bergakademie Freiberg
Freiberg
Deutschland

Bernd Meyer
Inst. für Energieverfahrenstechnik
und Chemieingenieurwesen
TU Bergakademie Freiberg
Freiberg
Deutschland

Heiner Gutte
Inst. für Energieverfahrenstechnik
und Chemieingenieurwesen
TU Bergakademie Freiberg
Freiberg
Deutschland

ISBN 978-3-662-46250-8

ISBN 978-3-662-46251-5 (eBook)

<https://doi.org/10.1007/978-3-662-46251-5>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2018

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung 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.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Vorwort

Braunkohle ist ein einheimischer Energierohstoff mit hohem Nutzungspotential. Der komplexe Aufbau dieses Naturprodukts ist einerseits eine große Herausforderung für dessen Verarbeitung, erlaubt andererseits aber auch eine intensive stoffliche Wertschöpfung. Es gilt, optimale Wege aufzuzeigen, mit denen dieses Wertschöpfungspotential nutzbar gemacht werden kann. Dafür ist die gesamte Wertschöpfungskette zu berücksichtigen, von der Erkundung bzw. dem Lagerstättenmanagement und der ggf. selektiven Gewinnung über die Aufbereitung und thermische bzw. chemische Konversion einschließlich Produktaufarbeitung bis hin zur Verfahrens-, Komponenten- und Produktentwicklung.

Alle genannten Gebiete der Braunkohlennutzung sind seit Jahrzehnten fester Bestandteil in Lehre und Forschung an der TU Bergakademie Freiberg. Gerade in Zeiten globaler Umbrüche in der Energie- und Rohstoffbereitstellung ist es wichtig, die Möglichkeiten für die stoffliche Wertschöpfung aus diesem Energierohstoff auszuloten. Die stoffliche Nutzung der Braunkohle kann ein wesentlicher Baustein für die regionale Strukturentwicklung in den drei großen deutschen Braunkohlerevieren sein und die hohe Importabhängigkeit Deutschlands in Bezug auf Energierohstoffe reduzieren helfen. Voraussetzung dafür ist ein grundlegender Paradigmenwechsel von der emissionsbelasteten energetischen zur emissionsarmen stofflichen Braunkohlennutzung. Ein wesentlicher Aspekt ist die Schließung von Stoffkreisläufen auch für Kohlenstoff. So können durch die Bereitstellung und Anwendung von optimierten Prozessen und innovativen Technologien der Braunkohlenumwandlung neue Wege für die rohstoffliche Verwertung von kohlenstoffhaltigen Abfällen erschlossen werden, die ohne Kohle als Basiseinsatzstoff technisch nicht möglich wären. Weitere Synergieeffekte im Sinne des in Freiberg entwickelten Nachhaltigkeitsgedankens werden durch die Integration der Biomassenutzung und anderer regenerativer Energieträger erreicht.

Diesen Gedanken folgend hat die Professur für Energieverfahrenstechnik und thermische Rückstandsbehandlung in den letzten Jahren große Verbundforschungsvorhaben initiiert und unter Mitwirkung zahlreicher Forschungseinrichtungen und Industrieunternehmen realisiert. Auf der Basis neuer Analysenmethoden, grundlegender prozess- und werkstofftechnischer Untersuchungen, neuer Ansätze für Verfahrens- und Komponentenentwicklungen sowie neu geschaffener Modellierungs- und Simulationswerkzeuge konnten das Grundlagen- und Technologiewissen auf dem Gebiet der stofflichen Braunkohlennutzung deutlich vorangebracht und neue anwendungsbereite

Lösungen entwickelt werden. Im vorliegenden Buch sind Erkenntnisse dieser Arbeiten zusammengefasst. Neben der Darstellung wesentlicher wissenschaftlicher Ergebnisse werden Grundprinzipien der angewendeten Analysen- und Untersuchungsmethoden vorgestellt. Wir möchten Wissenschaftlern und Anwendern aus Forschung und Industrie eine Wissenszusammenfassung bzw. ein Nachschlagewerk zu Grundlagen und Verfahren der stofflichen Braunkohlennutzung auch unter Einbeziehung von Biomasse als nachwachsendem Energierohstoff zur Verfügung stellen.

Die Forschungsarbeiten wurden durch umfangreiche finanzielle Förderung durch die öffentliche Hand und Industrieunternehmen ermöglicht. Unser Dank gilt dem Bundesministerium für Bildung und Forschung, dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, dem Sächsischen Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst, der Sächsischen Aufbaubank sowie den Industrieunternehmen Vattenfall, RWE, ROMONTA, MIBRAG, EnBW, Siemens, CAC und Air Liquide. Ganz besonders möchten wir den beteiligten Wissenschaftlern und Technikern und vor allem den Autoren der einzelnen Beiträge danken, ohne deren Engagement das vorliegende Buch nicht entstanden wäre.

Freiberg, den 31. August 2017

Steffen Krzack und Bernd Meyer

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
	Heiner Gutte und Bernd Meyer	
 Teil I Die Rolle der Braunkohle im zukünftigen Rohstoffmix		
2	Rohstoffstrategische Betrachtungen	11
	Heiner Gutte, Lutz Schiffer, Jörn Appelt, Florian Keller und Bernd Meyer	
	Literatur.	13
3	Verbreiterung der Rohstoffbasis für die organische Chemie	15
	Heiner Gutte, Lutz Schiffer, Jörn Appelt, Florian Keller und Bernd Meyer	
	Literatur.	16
4	Prozessketten zur stofflichen Nutzung von Kohlenstoffträgern . .	17
	Heiner Gutte, Lutz Schiffer, Jörn Appelt, Florian Keller und Bernd Meyer	
4.1	Prozessketten zur Herstellung von Methanol.	18
4.1.1	Methanol aus Erdgas	18
4.1.2	Methanol aus Braunkohle	19
4.1.3	Methanol aus nachwachsenden Rohstoffen.	21
4.1.4	Methanol aus CO ₂	22
	Literatur.	23
5	Vergleichende Betrachtung verschiedener Kohlenstoffträger zur Herstellung von Methanol	25
	Heiner Gutte, Lutz Schiffer, Jörn Appelt, Florian Keller und Bernd Meyer	
5.1	Treibhausgasemissionen	25
5.2	Energiebilanz	26
5.3	Ökonomische Betrachtung.	28
5.4	Substitutionspotenziale	29
5.5	Reserven und Reichweiten.	31
5.6	Importabhängigkeit	32
	Literatur.	33

6 Braunkohle – vom Energie- zum Chemierohstoff	35
Heiner Gutte, Lutz Schiffer, Jörn Appelt, Florian Keller und Bernd Meyer	
Literatur.	36

Teil II Charakterisierung von Energierohstoffen

7 Brennstofftechnische Charakterisierungsmethoden	39
Steffen Krzack und Denise Klinger	
7.1 Strukturaufbau und Stoffgruppenzusammensetzung von Biomassen und Kohlen	39
7.2 Methoden der klassischen Brennstoffanalytik.	42
Literatur.	46
8 Die Organische Petrologie in der Kohlen- Strukturforschung	49
Norbert Volkmann, Henny Gerschel, Kristin Vogt und Saskia Burkhardt	
8.1 Grundlagen der Kohlengeologie	49
8.1.1 Die organische Petrologie als Wissenschafts- disziplin	49
8.1.2 Mikropetrographie von Braunkohlen.	50
8.1.3 Kurzer Abriss des Inkohlungsprozesses.	55
8.2 Arbeitsmethodik der organischen Petrologie.	58
8.2.1 Makro- und Mikropetrographie	58
8.2.2 Synergien mit Bereichen der Petrophysik	59
8.2.3 Umfang der effektuierten projektbezogenen Flözbeprobung	59
8.3 Geologisch-petrographische und carbochemische Rohstoffcharakterisierung am Beispiel ausgewählter alttertiärer Flöze Mitteldeutschlands	62
8.3.1 Röblingen/Amsdorf	62
8.3.2 Egelner Südmulde	65
8.3.3 Weißelsterbecken (Südraum Leipzig)	68
8.4 Petrographie von Prozess-Rückständen.	70
Literatur.	73
9 Chemische Strukturaufklärung.	75
Mirjam Schmidt, Daniela Vogt, Thomas Vogt, Matthias Otto, Bianca Wolf, Marika Rönnefahrt und Jan Zuber	
9.1 Konventionelle Methoden	75
9.1.1 Einleitung.	75
9.1.2 IR-Spektroskopie von Energierohstoffen.	76
9.1.3 NMR-Spektroskopie an Kohlen und Koksen.	80
9.1.4 Zusammenfassung	84
9.2 Innovative Elementanalytik	86
9.2.1 Einleitung.	86
9.2.2 Forschungsschwerpunkt – innovative Elementanalytik	88
9.2.3 Entwicklung der direkten Analysenmethode ETV-ICP OES	95
9.2.4 Zusammenfassung	99

9.3	Ultrahochauflösende Massenspektrometrie an Energie-	
	rohstoffen mittels FT-ICR-MS	100
9.3.1	Einleitung	100
9.3.2	Methoden	101
9.3.3	Massenspektrometrie und Probenvorbereitung . . .	101
9.3.4	FT-ICR-Massenspektrometrie	102
9.3.5	Ionisationsmethoden und ihre zugehörigen	
	Probenvorbereitungen	104
9.3.6	Kopplungsmöglichkeiten der	
	Massenspektrometrie	109
9.3.7	Zusammenfassung	112
	Literatur	112

Teil III Technologisches Braunkohlen-Qualitätsmanagement

10	Integriertes Lagerstättenmanagement unter Anwendung	
	geostatistischer Simulationsverfahren zur Modellierung	
	sedimentärer Lagerstätten	117
	André John und Ralf Donner	
10.1	Einleitung	117
10.2	Methoden und Modellierungsansätze	119
10.3	Ausführung des GSGS-Algorithmus nach	
	Dimitrakopoulos/Luo	124
10.4	Co-Simulation unter Nutzung der Minimum/Maximum	
	Autokorrelationsfaktoren (MAF) Transformation	125
	10.4.1 Aufbau komplexer 3D-Lagerstättenmodelle	126
10.5	Resultate	127
10.6	Zusammenfassung	129
	Literatur	129
11	Selektive Gewinnung spezifischer Kohlenqualitäten	131
	Carsten Drebenstedt und Martin Pfütze	
11.1	Einleitung	131
11.2	Mögliche Sensorverfahren für eine	
	Kohlenqualitätserkennung	132
11.3	Konzept für eine zukünftige sensorgesteuerte	
	selektive Gewinnung	137
	Literatur	139

Teil IV Mechanisch-physikalische Aufbereitungs- und Extraktionsprozesse

12	Agglomeration von Braunkohle für die stoffliche	
	Veredelung	143
	Volker Herdegen, Franz Fehse, Tom Naundorf	
	und Jens-Uwe Repke	
12.1	Stand der Technik bei der Aufbereitung für die	
	Rohmontanwachsextraktion	143
12.2	Neue Aufbereitungswege für die stoffliche	
	Braunkohlenutzung	145

12.3 Mechanisch-physikalische Prüfverfahren für die Bewertung der Agglomerate	148
12.4 Ergebnisse für die neuen Aufbereitungswege	150
12.4.1 Herstellungsvariante „Lochscheibenwälmühle“ (Variante 3)	150
12.4.2 Herstellungsvariante „Lochscheibenwälmühle und Eirich-Intensivmischer“ (Variante 4)	151
12.4.3 Herstellungsvariante „Eirich-Intensivmischer“ (Variante 5)	153
12.4.4 Herstellungsvariante „Pellets und Nachzerkleinerung“ (Variante 1 und 2)	154
12.4.5 Fazit für die vorgestellten unterschiedlichen Herstellungsvarianten	156
12.5 Ergebnisse der Trocknungsuntersuchungen der hergestellten Agglomerate.	157
Literatur.	160
13 Extraktion von Rohmontanwachs.	163
Volker Herdegen, Franz Fehse, Tom Naundorf und Jens-Uwe Repke	
13.1 Grundlagen des Stofftransportes bei der Rohmontanwachs- extraktion	164
13.2 Stoffliche Zusammensetzung und Anwendungsgebiete von Rohmontanwachs.	166
13.3 Bewertungsgrößen für das gewonnene Rohmontanwachs und den Extraktionsprozess	167
13.4 „Klassisches“ Extraktionsverfahren – Perkolation	168
13.4.1 Stand der Technik des industriellen Extraktionsverfahrens von Braunkohle	168
13.4.2 Darstellung ausgewählter Untersuchungs- ergebnisse zur Perkolationsextraktion	170
13.4.3 Einfluss der Feststoffaufbereitung auf den Extraktionsprozess.	171
13.4.4 Einfluss des verwendeten Lösungsmittels auf den Extraktionsprozess	173
13.4.5 Modellierungsansatz für die Rohmontanwachsextraktion.	174
13.5 Untersuchungen der alternativen Verfahren der Rohmontanwachsextraktion.	177
13.5.1 „Klassisches“ Extraktionsverfahren – Immersionsextraktion	177
13.5.2 „Nicht-klassisches“ Extraktionsverfahren – überkritische Fluidextraktion.	184
Literatur.	189
14 Zusammenfassung der Braunkohlenaufbereitung und der Rohmontanwachsextraktion	191
Volker Herdegen, Franz Fehse, Tom Naundorf und Jens-Uwe Repke	

Teil V Thermochemische Konversion

15 Prozesse der thermochemischen Konversion	197
Steffen Krzack	
15.1 Pyrolyse	197
15.2 Hydrierung	199
15.3 Vergasung	199
15.4 Spezielle Konversionsprozesse	201
15.5 Einzelphänomene bei der thermochemischen Konversion	201
15.6 Prozessketten	202
Literatur	203
16 Brennstofftechnische Charakterisierung der Einsatzstoffe	205
Steffen Krzack und Denise Klinger	
16.1 Herkunft und Einordnung der untersuchten Einsatzstoffe	206
16.2 Eigenschaften der untersuchten Einsatzstoffe	206
16.2.1 Immediatanalyse, Elementaranalyse und Brennwert	206
16.2.2 Aschezusammensetzung und Ascheschmelzverhalten	212
16.2.3 Reindichte, Rohdichte und Porosität	214
16.2.4 Petrographische Untersuchungen	222
Literatur	223
17 Partikelverhalten	225
Jan Friedemann, Felix Baitalow, Shan Zhong, Armin Heinze, Stephan Siegl, Denise Klinger und Steffen Krzack	
17.1 Zerfallsverhalten von Kohlepartikeln unter Hochtemperaturbedingungen	225
17.1.1 Grundlagen der Fragmentierung	226
17.1.2 Untersuchungsumfang	228
17.1.3 Untersuchungen in der elektrothermischen Verdampfung	228
17.1.4 Untersuchungen im Fallrohrreaktor	231
17.1.5 Untersuchungen im SPaltor	234
17.1.6 Vergleichende Betrachtung der Ergebnisse	238
17.1.7 Zusammenfassung der Ergebnisse	239
17.2 Modellierung von Temperatur- und Spannungsverteilungen in Kohlepartikeln bei hohen Aufheizraten	239
17.2.1 Methoden und Grundlagen	240
17.2.2 Ergebnisse	244
17.2.3 Bestimmung mechanischer Eigenschaften	252
17.2.4 Schlussfolgerung	257
17.3 Partikel- und Gasverweilzeit bei der Kohlepyrolyse in einem Hochdruckfallrohrreaktor	257
17.3.1 Einleitung	259
17.3.2 Aufbau und Funktionsweise des Hochdruckfallrohrreaktors	260

17.3.3 Berechnungsansätze für die Partikel- und Gasverweilzeit	261
17.3.4 Einfluss rohstofflicher und verfahrenstechnischer Faktoren auf Gas- und Partikelverweilzeit im Fallrohrreaktor	266
17.3.5 Zusammenfassung	270
Literatur	271
18 Reaktive Extraktion von Weichbraunkohlen	275
Hendrik Wollmerstädt, Thomas Kuchling und Sven Kureti	
18.1 Einführung	275
18.2 Reaktive Extraktion mit überkritischen Lösungsmitteln	277
18.3 Reaktive Extraktion mitteldeutscher Braunkohlen mit überkritischem Ethanol	279
18.3.1 Zielstellung	279
18.3.2 Experimentelles	280
18.3.3 Einfluss wichtiger Prozessparameter	281
18.3.4 Reaktionsmechanismus der reaktiven Extraktion mittels Ethanol	289
18.3.5 Verwertbarkeit der Produkte und Nebenprodukte	291
18.4 Zusammenfassung	294
Literatur	295
19 Pyrolyse	297
Denise Klinger, Steffen Krzack, Christian Berndt, Philipp Rathsack, Mathias Seitz, Wilhelm Schwieger, Thomas Hahn, Jörn Appelt, Wolfgang Heschel, Sascha Nowak, Jens Zimmermann, Timo Stam-Creutz, Thomas Nägler, Julia Welscher, Jonas Knothe, Ludwig Riedel, Klaus Hildebrandt, Michele Vascellari, Christian Hasse, Matthias Kestel, Petr A. Nikrityuk, Andreas Richter und Bernd Meyer	
19.1 Charakterisierung des Pyrolyseverhaltens von Energierohstoffen	298
19.1.1 Möglichkeiten zur Beschreibung und Charakterisierung des Pyrolyseverhaltens	299
19.1.2 Auswahl der Einsatzstoffe	302
19.1.3 Simultane Thermische Analyse zur Charakterisierung des Pyrolyseverhaltens	303
19.1.4 Charakterisierung des Pyrolyseverhaltens im Festbettreaktor	318
19.1.5 Zusammenhang zwischen Pyrolyseverhalten und Einsatzstoffeigenschaften	327
19.2 Einfluss von Primär- und Sekundärreaktionen auf die Bildung von Teerkomponenten	337
19.2.1 Einleitung	338
19.2.2 Einsatzstoffe und Methoden	339
19.2.3 Ergebnisse und Diskussion	341
19.2.4 Zusammenfassung	354
19.3 Hochleistungsanalytik von Pyrolyseölen	355
19.3.1 Komprehensiv Gaschromatographie Massenspektrometrie	356
19.3.2 Ultrahochauflösende Massenspektrometrie	363

19.4	Katalytische Spaltung von Braunkohle	368
19.4.1	Hintergrund	368
19.4.2	Vorgehen	369
19.4.3	Ergebnisse	370
19.4.4	Wirtschaftliche Aspekte	379
19.4.5	Zusammenfassung	382
19.5	Katalytische Drehrohrpyrolyse von Braunkohle	383
19.5.1	Planung, Durchführung und Auswertung von Versuchen	384
19.5.2	Methodik der Bilanzierung	390
19.6	Modellierung der Pyrolyse	393
19.6.1	Einleitung	394
19.6.2	Kinetische Modelle zur Beschreibung der Pyrolyse	394
19.6.3	Strömungsmechanische Betrachtung pyrolysierender Einzelpartikel in Flugstromreaktoren	412
	Literatur	420
20	Vergasung	427
	Sascha Rußig, Ziad Abosteif, Evgeniia Komarova, Stefan Guhl, Kevin Günther, Felix Küster, Christiane Rost, Denise Zabelt, Jörn Appelt, Klaus Hildebrandt, Michele Vascellari, Christian Hasse, Matthias Kestel, Petr A. Nikrityuk, Andreas Richter und Bernd Meyer	
20.1	Kinetik heterogener Vergasungsreaktionen	427
20.1.1	Einleitung	428
20.1.2	Grundlagen	429
20.1.3	Versuchsanlagen und Methodik	432
20.1.4	Ergebnisse	435
20.1.5	Ergebnisbewertung	439
20.1.6	Ausblick	440
20.2	Veränderung der Koksstruktur	441
20.2.1	Einleitung	441
20.2.2	Versuchsaufbau und -durchführung	443
20.2.3	Ergebnisse und Diskussion	445
20.2.4	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	456
20.3	Co-Vergasung von Braunkohle und Biomasse	457
20.3.1	Einleitung	458
20.3.2	Grundlagen	459
20.3.3	Ergebnisse	463
20.4	Vergasungsverhalten von Produkten einer stoffgeführten Veredlungskette	469
20.4.1	Einleitung und Zielsetzung	470
20.4.2	Theoretische Grundlagen	471
20.4.3	Experimentelle Untersuchungen	476
20.4.4	Ergebnisse und Diskussion	480
20.4.5	Zusammenfassung	488
20.5	Modellierung der Vergasungskinetik und Einkornmodelle	489
20.5.1	Einleitung	490

20.5.2 Kinetiken für den Koksumsatz.	490
20.5.3 Der Einfluss des konvektiven Stoff- und Wärmetransportes auf die Vergasung kohlenstoffhaltiger Partikel in Flugstromvergasern. . .	508
Literatur.	515
21 Mineralstoffverhalten.	521
Mathias Klinger, Markus Reinmöller, Ronny Schimpke, Marcus Schreiner, Daniel Schwitalla, Arne Bronsch, Stefan Guhl, Dmitry Safronov, Petr Nikrityuk, Thomas Förster und Andreas Richter	
21.1 Charakterisierung des Hochtemperaturverhaltens von Kohle- und Biomasseaschen unter oxidierenden und reduzierenden Bedingungen	521
21.1.1 Einleitung.	522
21.1.2 Grundlagen.	522
21.1.3 Ergebnisse	523
21.1.4 Zusammenfassung	537
21.2 Physikalische Eigenschaften von Schlacken	538
21.2.1 Einleitung.	539
21.2.2 Theorie.	539
21.2.3 Messmethoden	542
21.2.4 Experimentelle Untersuchung	549
21.2.5 Modellierung von Viskosität und Dichte	557
21.2.6 Zusammenfassung	566
21.3 Entwicklung eines Sub-Modells zur Formulierung von Rand- bedingungen an Reaktorwänden unter Berücksichtigung von Schlackebildung.	567
21.3.1 Einleitung.	568
21.3.2 Modellbeschreibung (Standalone- Implementierung).	569
21.3.3 Gekoppelte Implementierung.	572
21.3.4 Ergebnisse und Diskussion	572
21.3.5 Zusammenfassung	573
Literatur.	574
22 Virtualisierung von Hochtemperaturprozessen.	579
Michele Vascellari, Klaus Hildebrandt und Christian Hasse	
22.1 Einleitung.	580
22.2 Numerische Modelle zur Kohlevergasung.	582
22.3 BYU-Vergaser	583
22.3.1 Experimenteller Aufbau.	583
22.3.2 Einfluss der Pyrolysekinetiken.	584
22.3.3 Einfluss der Koksumwandlungskinetiken	587
22.3.4 Vergleich mit den Experimenten	588
22.3.5 Analyse der Flammenstruktur und der Reformierungszone	589
22.4 Siemens-5 MW-Vergaser	594

22.4.1 Experimenteller Aufbau	594
22.4.2 Numerisches Setup	597
22.4.3 Ergebnisse	597
22.5 Schlussfolgerungen und Ausblick	601
Literatur	604
23 Stoffgeführte Veredlungsketten	607
Lutz Schiffer, Jörn Appelt, Heiner Gutte, Bernd Meyer, Lars-Erik Gärtner, Martin Bertau, Carsten Pätzold, Konstantin Räuchle, Peter Seifert, René Stahlschmidt, Mario Kuschel und Joachim Engelmann	
23.1 Vergleichende Betrachtung der Gewinnung einheimischer Kohlenstoffträger	607
23.1.1 Rohstoffbasis und Nachhaltigkeit	607
23.1.2 Indikatoren zur Bewertung einheimischer Kohlenstoffträger	609
23.1.3 Diskussion der Ergebnisse	615
23.1.4 Fazit	621
23.2 Abbildung thermochemischer Veredlungsketten durch Fließbildsimulation	623
23.2.1 Einleitung	623
23.2.2 Modellierung der ibi-Prozesskette	624
23.2.3 Fazit der Prozesskettenergebnisse	638
23.3 Neue Synthesen: Das Syngas-To-Fuel-Verfahren zur Herstel- lung von hochoktanigem Benzin aus Synthesegas	640
23.3.1 Einleitung	640
23.3.2 Aufgaben der TU Bergakademie Freiberg im STF-Verbundforschungsvorhaben	641
23.3.3 Die STF-Versuchsanlage im Versuchsanlagenverbund des IEC	643
23.3.4 Versuchsdurchführung und Ergebnisse	647
23.3.5 Modellierung und Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen für alternative Prozessketten unter Einbeziehung der STF-Technologie	652
23.3.6 Ausblick	658
23.3.7 Zusammenfassung	659
Literatur	660

Teil VI Neue Systemkomponenten für Vergasungsprozesse

24 Kontinuierliches schleusenloses Feststoffeintragssystem für druckaufgeladene Vergasungsreaktoren	667
Alexander Rosin, Dietmar Trommer, Hans-Werner Schröder und Jens-Uwe Repke	
24.1 Einleitung	668
24.2 Grundlagenuntersuchungen im Labormaßstab zum Einsatz der Formkanalstempelpresse als Eintragssystem für Druck- vergaser	670

24.3	Entwicklung und Erprobung einer Presskanalgeometrie für den Direkteintrag von Briketts in einen Hochdruckbehälter . .	675
24.4	Erprobung des schleusenlosen Feststoffeintrages in einen Druckbehälter.	678
24.5	Zusammenfassung	688
	Literatur.	689
25	Rohstoffvorwärmung und -vorbehandlung mit elektromagnetischen Wellen	691
	Mark Zink, Guido Link, Benjamin Lepers und Thomas Seitz	
25.1	Einleitung	692
25.2	Zuordnung von elektromagnetischen Wellen.	692
25.2.1	Elektromagnetische Grundlagen	692
25.3	Ermittlung der Dielektrizitätskonstante von Braunkohlebriketts in Abhängigkeit der Frequenz	693
25.3.1	Dielektrische Eigenschaften	693
25.3.2	Thermische Eigenschaften	694
25.3.3	Mechanische Eigenschaften.	694
25.4	Simulation des Erwärmungsprozesses.	696
25.4.1	Geometrie des Applikators.	696
25.4.2	Notwendige Mikrowellenleistung für das Design mit 2,45 bzw. 0,927 GHz	696
25.4.3	Elektrisches Feld und Leistungsdichte im einfachen Applikator ($P_{in} = 10 \text{ kW}$)	698
25.4.4	Thermisches Modell und Temperaturverteilung im einfachen Applikator	700
25.5	Entwicklung eines drucktragenden Mikrowellen-Eintrag-Moduls nach Druckgeräterichtlinie (DGRL) und AD-2000 . .	702
25.6	Praktische Versuchsdurchführungen und deren Ergebnisse	703
25.7	Zusammenfassung	705
	Literatur.	706
26	Keramischer Wärmerohr- Wärmeübertrager	707
	Nina Hack, Dorith Böhning, Simon Unz und Michael Beckmann	
26.1	Einleitung	707
26.2	Einordnung des Hochtemperatur-Wärmeübertragers	708
26.3	Werkstoffauswahl.	710
26.4	Entwicklung eines Hochtemperatur-Wärmeübertragers mit keramischen Wärmerohren	711
26.4.1	Funktionsweise eines Wärmerohrs (Thermosiphon)	711
26.4.2	Modell zur Berechnung eines Hochtemperatur-Wärmeübertragers mit Wärmerohren.	712
26.4.3	Experimentelle Untersuchungen	714
26.5	Anwendungsmöglichkeiten	715
26.5.1	Abwärmenutzungskonzept mit indirekt beheiztem Gasturbinenprozess	715
26.5.2	Abwärmenutzungskonzept mit Perowskit zur Vergasungsmittelbereitstellung	719

26.6 Zusammenfassung	724
Literatur	725
27 Lasergestützte Herstellung keramischer Wärmerohre zur Energierückgewinnung aus Vergasungsprozessen	727
Floriana-Dana Börner, Wolfgang Lippmann und Antonio Hurtado	
27.1 Stand der Technik	728
27.2 Ziele	730
27.3 Lasertechnologie zur Herstellung keramischer Wärmerohre	731
27.3.1 Technologische Vorgehensweise und eingesetzte Methodik	731
27.3.2 Ergebnisse und Diskussion	736
27.3.3 Nutzung/Anbindung	742
27.4 Zusammenfassung	743
27.5 Ausblick	744
Literatur	744
 Teil VII Neue Werkstoffe für reduzierende Prozessbedingungen	
28 Korrosions- und thermoschockbeständige oxidische Feuerfest- werkstoffe zur Auskleidung von Vergasungsanlagen	749
Christos G. Aneziris und Patrick Gehre	
28.1 Stand der Technik	750
28.1.1 Al_2O_3 -Spinell-Feuerfestwerkstoffe	750
28.1.2 Materialien aus dem Al_2O_3 - ZrO_2 - TiO_2 - Dreistoffsystem	751
28.2 Forschungsziele	752
28.3 Methodik	753
28.4 Ergebnisse und Diskussion	755
28.4.1 Entwicklung von Al_2O_3 -Spinell-Feuerfest- werkstoffen für Vergasungsanlagen	755
28.4.2 Entwicklung von Al_2O_3 -Feuerfestwerkstoffen mit ZrO_2 - und TiO_2 -Zusätzen	758
28.5 Zusammenfassung	763
28.6 Ausblick	764
Literatur	765
29 Nichtoxidische Werkstoffe für Vergasungsreaktoren	767
Mathias Herrmann, Gisela Standke, Gert Himpel, Sören Höhn, Heike Heymer und Steffen Kunze	
29.1 Einleitung	767
29.2 Methodik der Korrosionsuntersuchungen	770
29.3 Ergebnisse	771
29.3.1 Aluminiumnitridkeramik	771
29.3.2 SiC-Werkstoffe	772
29.4 Zusammenfassung und Ausblick	776
Literatur	777

30 Korrosionsverhalten keramischer Werkstoffe für die Wirbelschicht-Vergasung alkalireicher Brennstoffe	779
Sarah Schaafhausen, Elise Hugon, Elena Yazhenskikh und Michael Müller	
30.1 Einleitung	779
30.2 Experimentelles	781
30.2.1 Materialien	781
30.2.2 Korrosionsversuche	781
30.3 Ergebnisse	783
30.3.1 Holzchipasche (Güssing)	783
30.3.2 Strohasche	784
30.3.3 DDGS-Asche	786
30.3.4 Braunkohleasche	787
30.3.5 Einfluss von HCl	787
30.4 Diskussion	788
30.4.1 Bildung von Erdalkalisilikaten	788
30.4.2 Bildung einer festen Lösung von Magnesiumoxid in Zirkoniumoxid	789
30.4.3 Bildung von Alkalialumosilikaten	790
30.4.4 Bildung von Zirkoniumsilikat und Calciumzirkonat	791
30.4.5 Bildung von Mg-Cr-Spinell	792
30.5 Zusammenfassung	792
Literatur	793
31 Korrosionsverhalten keramischer Filterkerzen	795
Sarah Schaafhausen, Elena Yazhenskikh, Astrid Walch, Steffen Heidenreich und Michael Müller	
31.1 Einleitung	795
31.2 Experimentelles	796
31.2.1 Filterkerzenmaterialien	796
31.2.2 Korrosionsversuche	796
31.2.3 Bruchtests	797
31.3 Ergebnisse	798
31.3.1 Korrosionsversuche	798
31.3.2 Bruchtests	801
31.4 Diskussion	805
31.4.1 Phasenneubildungen	805
31.4.2 Angriff auf die Binderphase	807
31.4.3 Schlackeeinfiltration	807
31.4.4 Mechanische Stabilität	808
31.5 Zusammenfassung	810
Literatur	810
32 Korrosionsverhalten metallischer Werkstoffe in schwefelhaltigen Gasen mit niedrigem Sauerstoffpartialdruck im Temperaturbereich 500–700 °C	813
Joanna Zurek, Elham Hejrani, Michael Müller und Willem J. Quadakkers	
32.1 Einleitung	813
32.2 Korrosion in oxidierend/sulfidierenden Gasen	814

32.3 Werkstoffauswahl und Versuchsbedingungen	816
32.4 Sulfidierungsbeständigkeit verschiedener Werkstoffe	817
32.5 Temperaturabhängigkeit der Korrosionsraten	818
32.6 Einfluss ausgewählter Legierungselemente auf die Sulfidierung von Nickelbasislegierungen	822
32.7 Zusammenfassung	829
Literatur	830
Stichwortverzeichnis	833

Autorenverzeichnis

Ziad Abosteif Institut für Energieverfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, Professur Energieverfahrenstechnik und thermische Rückstandsbehandlung, TU Bergakademie Freiberg, Fuchsmühlenweg 9, 09599 Freiberg, Deutschland

Christos G. Aneziris Institut für Keramik, Glas- und Baustofftechnik, TU Bergakademie Freiberg, Agricolastraße 17, 09599 Freiberg, Deutschland

Jörn Appelt Institut für Energieverfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, Professur Energieverfahrenstechnik und thermische Rückstandsbehandlung, TU Bergakademie Freiberg, Fuchsmühlenweg 9, 09599 Freiberg, Deutschland

Felix Baitalow Institut für Energieverfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, Professur Energieverfahrenstechnik und thermische Rückstandsbehandlung, TU Bergakademie Freiberg, Fuchsmühlenweg 9, 09599 Freiberg, Deutschland

Michael Beckmann Institut für Verfahrenstechnik und Umwelttechnik, Professur für Energieverfahrenstechnik, TU Dresden, 01062 Dresden, Deutschland

Christian Berndt Institut für Energieverfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, Professur Energieverfahrenstechnik und thermische Rückstandsbehandlung, TU Bergakademie Freiberg, Fuchsmühlenweg 9, 09599 Freiberg, Deutschland

Martin Bertau Institut für Technische Chemie, TU Bergakademie Freiberg, Leipziger Straße 29, 09599 Freiberg, Deutschland

Dorith Böhning Institut für Verfahrenstechnik und Umwelttechnik, Professur für Energieverfahrenstechnik, TU Dresden, 01062 Dresden, Deutschland

Floriana-Dana Börner Institut für Energietechnik, Professur Wasserstoff- und Kernenergietechnik, TU Dresden, 01062 Dresden, Deutschland

Arne Bronsch Institut für Energieverfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, Professur Energieverfahrenstechnik und thermische Rückstandsbehandlung, TU Bergakademie Freiberg, Fuchsmühlenweg 9, 09599 Freiberg, Deutschland

Saskia Burkhardt Institut für Geologie, Arbeitsgruppe
Brennstoffgeologie, TU Bergakademie Freiberg, Gustav-Zeuner-Str. 12,
09599 Freiberg, Deutschland

Ralf Donner Institut für Markscheidewesen und Geodäsie, TU
Bergakademie Freiberg, Fuchsmühlenweg 9, 09599 Freiberg,
Deutschland

Carsten Drebenstedt Institut für Bergbau und Spezialtiefbau, TU
Bergakademie Freiberg, Gustav-Zeuner-Str. 1a, 09599 Freiberg,
Deutschland

Joachim Engelmann Chemieanlagenbau Chemnitz GmbH,
Augustusburger Str. 34, 09111 Chemnitz, Deutschland

Franz Fehse Institut für Thermische Verfahrenstechnik, Umwelt- und
Naturstoffverfahrenstechnik, TU Bergakademie Freiberg, Leipziger Str.
28, 09599 Freiberg, Deutschland

Thomas Förster Institut für Energieverfahrenstechnik und
Chemieingenieurwesen, Professur Energieverfahrenstechnik und
thermische Rückstandsbehandlung, TU Bergakademie Freiberg,
Fuchsmühlenweg 9, 09599 Freiberg, Deutschland

Jan Friedemann Institut für Energieverfahrenstechnik und
Chemieingenieurwesen, Professur Energieverfahrenstechnik und
thermische Rückstandsbehandlung, TU Bergakademie Freiberg,
Fuchsmühlenweg 9, 09599 Freiberg, Deutschland

Lars-Erik Gärtner Institut für Energieverfahrenstechnik und
Chemieingenieurwesen, Professur Energieverfahrenstechnik und
thermische Rückstandsbehandlung, TU Bergakademie Freiberg,
Fuchsmühlenweg 9, 09599 Freiberg, Deutschland

Patrick Gehre Institut für Keramik, Glas- und Baustofftechnik,
TU Bergakademie Freiberg, Agricolastraße 17, 09599 Freiberg,
Deutschland

Henny Gerschel Institut für Geologie, Arbeitsgruppe
Brennstoffgeologie, TU Bergakademie Freiberg, Gustav-Zeuner-Str. 12,
09599 Freiberg, Deutschland

Stefan Guhl Institut für Energieverfahrenstechnik und
Chemieingenieurwesen, Professur Energieverfahrenstechnik und
thermische Rückstandsbehandlung, TU Bergakademie Freiberg,
Fuchsmühlenweg 9, 09599 Freiberg, Deutschland

Kevin Günther Institut für Energieverfahrenstechnik und
Chemieingenieurwesen, Professur Energieverfahrenstechnik und
thermische Rückstandsbehandlung, TU Bergakademie Freiberg,
Fuchsmühlenweg 9, 09599 Freiberg, Deutschland

Heiner Gutte Institut für Energieverfahrenstechnik und
Chemieingenieurwesen, Professur Energieverfahrenstechnik und
thermische Rückstandsbehandlung, TU Bergakademie Freiberg,
Fuchsmühlenweg 9, 09599 Freiberg, Deutschland

Nina Hack Institut für Verfahrenstechnik und Umwelttechnik,
Professur für Energieverfahrenstechnik, TU Dresden, 01062 Dresden,
Deutschland

Thomas Hahn Institut für Chemie – Technische Chemie, Martin-
Luther-Universität Halle-Wittenberg, Von-Danckelmann-Platz 4, 06120
Halle (Saale), Deutschland

Christian Hasse Institut für Energieverfahrenstechnik und
Chemieingenieurwesen, Professur Numerische Thermofluidodynamik,
TU Bergakademie Freiberg, Fuchsmühlenweg 9, 09599 Freiberg,
Deutschland

Steffen Heidenreich Werk Schumacher, Pall Filtersysteme GmbH,
74564 Crailsheim, Deutschland

Armin Heinze Institut für Energieverfahrenstechnik und
Chemieingenieurwesen, Professur Energieverfahrenstechnik und
thermische Rückstandsbehandlung, TU Bergakademie Freiberg,
Fuchsmühlenweg 9, 09599 Freiberg, Deutschland

Elham Hejrani Forschungszentrum Jülich GmbH, IEK-2, 52428
Jülich, Deutschland

Volker Herdegen Institut für Thermische Verfahrenstechnik, Umwelt-
und Naturstoffverfahrenstechnik, TU Bergakademie Freiberg, Leipziger
Str. 28, 09599 Freiberg, Deutschland

Mathias Herrmann Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien
und Systeme IKTS, Winterbergstraße 28, 01277 Dresden, Deutschland

Wolfgang Heschel Institut für Energieverfahrenstechnik und
Chemieingenieurwesen, Professur Energieverfahrenstechnik und
thermische Rückstandsbehandlung, TU Bergakademie Freiberg,
Fuchsmühlenweg 9, 09599 Freiberg, Deutschland

Heike Heymer Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und
Systeme IKTS, Winterbergstraße 28, 01277 Dresden, Deutschland

Klaus Hildebrandt Institut für Energieverfahrenstechnik und
Chemieingenieurwesen, Professur Numerische Thermofluidodynamik,
TU Bergakademie Freiberg, Fuchsmühlenweg 9, 09599 Freiberg,
Deutschland

Gert Himpel Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und
Systeme IKTS, Winterbergstraße 28, 01277 Dresden, Deutschland

Sören Höhn Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und
Systeme IKTS, Winterbergstraße 28, 01277 Dresden, Deutschland

Elise Hugon Institut für Energie- und Klimaforschung,
Forschungszentrum Jülich GmbH, IEK-2, 52425 Jülich, Deutschland

Antonio Hurtado Institut für Energietechnik, Professur Wasserstoff-
und Kernenergietechnik, TU Dresden, 01062 Dresden, Deutschland

André John Institut für Markscheidewesen und Geodäsie, TU Bergakademie Freiberg, Fuchsmühlenweg 9, 09599 Freiberg, Deutschland

Florian Keller Institut für Energieverfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, Professur Energieverfahrenstechnik und thermische Rückstandsbehandlung, TU Bergakademie Freiberg, Fuchsmühlenweg 9, 09599 Freiberg, Deutschland

Matthias Kestel Institut für Energieverfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, Professur Energieverfahrenstechnik und thermische Rückstandsbehandlung, TU Bergakademie Freiberg, Fuchsmühlenweg 9, 09599 Freiberg, Deutschland

Denise Klinger Institut für Energieverfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, Professur Energieverfahrenstechnik und thermische Rückstandsbehandlung, TU Bergakademie Freiberg, Fuchsmühlenweg 9, 09599 Freiberg, Deutschland

Mathias Klinger Institut für Energieverfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, Professur Energieverfahrenstechnik und thermische Rückstandsbehandlung, TU Bergakademie Freiberg, Fuchsmühlenweg 9, 09599 Freiberg, Deutschland

Jonas Knothe Institut für Chemie – Technische Chemie, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Von-Danckelmann-Platz 4, 06120 Halle (Saale), Deutschland

Evgeniia Komarova Institut für Energieverfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, Professur Energieverfahrenstechnik und thermische Rückstandsbehandlung, TU Bergakademie Freiberg, Fuchsmühlenweg 9, 09599 Freiberg, Deutschland

Steffen Krzack Institut für Energieverfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, Professur Energieverfahrenstechnik und thermische Rückstandsbehandlung, TU Bergakademie Freiberg, Fuchsmühlenweg 9, 09599 Freiberg, Deutschland

Thomas Kuchling Institut für Energieverfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, Professur Reaktionstechnik, TU Bergakademie Freiberg, Fuchsmühlenweg 9, 09599 Freiberg, Deutschland

Steffen Kunze Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme IKTS, Winterbergstraße 28, 01277 Dresden, Deutschland

Sven Kureti Institut für Energieverfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, Professur Reaktionstechnik, TU Bergakademie Freiberg, Fuchsmühlenweg 9, 09599 Freiberg, Deutschland

Mario Kuschel Chemieanlagenbau Chemnitz GmbH, Augustusburger Str. 34, 09111 Chemnitz, Deutschland

Felix Küster Institut für Energieverfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, Professur Energieverfahrenstechnik und thermische Rückstandsbehandlung, TU Bergakademie Freiberg, Fuchsmühlenweg 9, 09599 Freiberg, Deutschland

Benjamin Lepers Institut für Hochleistungsimpuls- und Mikrowellentechnik, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen, Deutschland

Wolfgang Lippmann Institut für Energietechnik, Professur Wasserstoff- und Kernenergietechnik, TU Dresden, 01062 Dresden, Deutschland

Guido Link Institut für Hochleistungsimpuls- und Mikrowellentechnik, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen, Deutschland

Bernd Meyer Institut für Energieverfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, Professur Energieverfahrenstechnik und thermische Rückstandsbehandlung, TU Bergakademie Freiberg, Fuchsmühlenweg 9, 09599 Freiberg, Deutschland

Michael Müller Institut für Energie- und Klimaforschung, Forschungszentrum Jülich GmbH, IEK-2, 52425 Jülich, Deutschland

Thomas Nägler Fachbereich Ingenieur- und Naturwissenschaften, Hochschule Merseburg, Eberhard-Leibnitz-Str. 2, 06217 Merseburg, Deutschland

Tom Naundorf ROMONTA Unternehmensverband, Chausseestraße 1, 06317 Seegebiet Mansfelder Land, Deutschland

Petr Nikrityuk Department of Chemical and Materials Engineering, University of Alberta, Edmonton, Kanada

Sascha Nowak Fachbereich Ingenieur- und Naturwissenschaften, Hochschule Merseburg, Eberhard-Leibnitz-Str. 2, 06217 Merseburg, Deutschland

Matthias Otto TU Bergakademie Freiberg, Institut für Analytische Chemie, Leipziger Str. 29, 09599 Freiberg, Deutschland

Carsten Pätzold Institut für Technische Chemie, TU Bergakademie Freiberg, Leipziger Straße 29, 09599 Freiberg, Deutschland

Martin Pfütze Institut für Bergbau und Spezialtiefbau, TU Bergakademie Freiberg, Gustav-Zeuner-Str. 1a, 09599 Freiberg, Deutschland

Willem J. Quadakkers, Forschungszentrum Jülich GmbH, IEK-2, 52428 Jülich, Deutschland

Philipp Rath sack Institut für Analytische Chemie, TU Bergakademie Freiberg, 09599 Freiberg, Deutschland

Konstantin Räuchle Institut für Technische Chemie, TU Bergakademie Freiberg, Leipziger Straße 29, 09599 Freiberg, Deutschland

Markus Reinmöller Institut für Energieverfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, Professur Energieverfahrenstechnik und thermische Rückstandsbehandlung, TU Bergakademie Freiberg, Fuchsmühlenweg 9, 09599 Freiberg, Deutschland

Jens-Uwe Repke Institut für Thermische Verfahrenstechnik, Umwelt- und Naturstoffverfahrenstechnik, TU Bergakademie Freiberg, Leipziger Straße 28, 09599 Freiberg, Deutschland

Andreas Richter Institut für Energieverfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, Professur Energieverfahrenstechnik und thermische Rückstandsbehandlung, TU Bergakademie Freiberg, Fuchsmühlenweg 9, 09599 Freiberg, Deutschland

Ludwig Riedel Institut für Chemie – Technische Chemie, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Von-Danckelmann-Platz 4, 06120 Halle (Saale), Deutschland

Marika Rönnefahrt TU Bergakademie Freiberg, Institut für Analytische Chemie, Leipziger Str. 29, 09599 Freiberg, Deutschland

Alexander Rosin Institut für Thermische Verfahrenstechnik, Umwelt- und Naturstoffverfahrenstechnik, TU Bergakademie Freiberg, Leipziger Straße 28, 09599 Freiberg, Deutschland

Christiane Rost Institut für Energieverfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, Professur Energieverfahrenstechnik und thermische Rückstandsbehandlung, TU Bergakademie Freiberg, Fuchsmühlenweg 9, 09599 Freiberg, Deutschland

Sascha Rußig Institut für Energieverfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, Professur Energieverfahrenstechnik und thermische Rückstandsbehandlung, TU Bergakademie Freiberg, Fuchsmühlenweg 9, 09599 Freiberg, Deutschland

Dmitry Safronov Institut für Energieverfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, Professur Energieverfahrenstechnik und thermische Rückstandsbehandlung, TU Bergakademie Freiberg, Fuchsmühlenweg 9, 09599 Freiberg, Deutschland

Sarah Schaafhausen Institut für Energie- und Klimaforschung, Forschungszentrum Jülich GmbH, IEK-2, 52425 Jülich, Deutschland

Lutz Schiffer Arbeitsstelle Technikfolgenabschätzung, Sächsische Akademie der Wissenschaften zu Leipzig, Karl-Tauchnitz-Str. 1, 04107 Leipzig, Deutschland

Ronny Schimpke Institut für Energieverfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, Professur Energieverfahrenstechnik und thermische Rückstandsbehandlung, TU Bergakademie Freiberg, Fuchsmühlenweg 9, 09599 Freiberg, Deutschland

Mirjam Schmidt TU Bergakademie Freiberg, Institut für Analytische Chemie, Leipziger Str. 29, 09599 Freiberg, Deutschland

Marcus Schreiner Institut für Energieverfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, Professur Energieverfahrenstechnik und thermische Rückstandsbehandlung, TU Bergakademie Freiberg, Fuchsmühlenweg 9, 09599 Freiberg, Deutschland

Hans-Werner Schröder Institut für Thermische Verfahrenstechnik, Umwelt- und Naturstoffverfahrenstechnik, TU Bergakademie Freiberg, Leipziger Straße 28, 09599 Freiberg, Deutschland

Wilhelm Schwieger Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Chemische Reaktionstechnik, Egerlandstr. 3, 91058 Erlangen, Deutschland

Daniel Schwitalla Institut für Energieverfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, Professur Energieverfahrenstechnik und thermische Rückstandsbehandlung, TU Bergakademie Freiberg, Fuchsmühlenweg 9, 09599 Freiberg, Deutschland

Peter Seifert Institut für Energieverfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, Professur Energieverfahrenstechnik und thermische Rückstandsbehandlung, TU Bergakademie Freiberg, Fuchsmühlenweg 9, 09599 Freiberg, Deutschland

Mathias Seitz Fachbereich Ingenieur- und Naturwissenschaften, Hochschule Merseburg, Eberhard-Leibnitz-Str. 2, 06217 Merseburg, Deutschland

Thomas Seitz Institut für Hochleistungsimpuls- und Mikrowellentechnik, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen, Deutschland

Stephan Siegl Institut für Energieverfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, Professur Energieverfahrenstechnik und thermische Rückstandsbehandlung, TU Bergakademie Freiberg, Fuchsmühlenweg 9, 09599 Freiberg, Deutschland

René Stahl Schmidt Chemieanlagenbau Chemnitz GmbH, Augustusburger Str. 34, 09111 Chemnitz, Deutschland

Timo Stam-Creutz Fachbereich Ingenieur- und Naturwissenschaften, Hochschule Merseburg, Eberhard-Leibnitz-Str. 2, 06217 Merseburg, Deutschland

Gisela Standke Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme IKTS, Winterbergstraße 28, 01277 Dresden, Deutschland

Dietmar Trommer Institut für Thermische Verfahrenstechnik, Umwelt- und Naturstoffverfahrenstechnik, TU Bergakademie Freiberg, Leipziger Straße 28, 09599 Freiberg, Deutschland

Simon Unz Institut für Verfahrenstechnik und Umwelttechnik, Professur für Energieverfahrenstechnik, TU Dresden, 01062 Dresden, Deutschland

Michele Vascellari Institut für Energieverfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, Professur Numerische Thermofluidodynamik, TU Bergakademie Freiberg, Fuchsmühlenweg 9, 09599 Freiberg, Deutschland

Daniela Vogt TU Bergakademie Freiberg, Institut für Analytische Chemie, Leipziger Str. 29, 09599 Freiberg, Deutschland

Kristin Vogt Institut für Geologie, Arbeitsgruppe Brennstoffgeologie,
TU Bergakademie Freiberg, Gustav-Zeuner-Str. 12, 09599 Freiberg,
Deutschland

Thomas Vogt TU Bergakademie Freiberg, Institut für Analytische
Chemie, Leipziger Str. 29, 09599 Freiberg, Deutschland

Norbert Volkmann Institut für Geologie, Arbeitsgruppe
Brennstoffgeologie, TU Bergakademie Freiberg, Gustav-Zeuner-Str. 12,
09599 Freiberg, Deutschland

Astrid Walch Werk Schumacher, Pall Filtersysteme GmbH, 74564
Crailsheim, Deutschland

Julia Welscher Lehrstuhl für Chemische Reaktionstechnik, Friedrich-
Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Stiftungsstraße 7, 91056
Erlangen, Deutschland

Bianca Wolf TU Bergakademie Freiberg, Institut für Analytische
Chemie, Leipziger Str. 29, 09599 Freiberg, Deutschland

Hendrik Wollmerstädt Institut für Energieverfahrenstechnik und
Chemieingenieurwesen, Professur Reaktionstechnik, TU Bergakademie
Freiberg, Fuchsmühlenweg 9, 09599 Freiberg, Deutschland

Elena Yazhenskikh Institut für Energie- und Klimaforschung,
Forschungszentrum Jülich GmbH, IEK-2, 52425 Jülich, Deutschland

Denise Zabelt Institut für Energieverfahrenstechnik und
Chemieingenieurwesen, Professur Energieverfahrenstechnik und
thermische Rückstandsbehandlung, TU Bergakademie Freiberg,
Fuchsmühlenweg 9, 09599 Freiberg, Deutschland

Shan Zhong Institut für Energieverfahrenstechnik und
Chemieingenieurwesen, Professur Energieverfahrenstechnik und
thermische Rückstandsbehandlung, TU Bergakademie Freiberg,
Fuchsmühlenweg 9, 09599 Freiberg, Deutschland

Jens Zimmermann Fachbereich Ingenieur- und Naturwissenschaften,
Hochschule Merseburg, Eberhard-Leibnitz-Str. 2, 06217 Merseburg,
Deutschland

Mark Zink Institut für Energieverfahrenstechnik und
Chemieingenieurwesen, Professur Energieverfahrenstechnik und
thermische Rückstandsbehandlung, TU Bergakademie Freiberg,
Fuchsmühlenweg 9, 09599 Freiberg, Deutschland

Jan Zuber TU Bergakademie Freiberg, Institut für Analytische
Chemie, Leipziger Str. 29, 09599 Freiberg, Deutschland

Joanna Zurek Forschungszentrum Jülich GmbH, IEK-2, 52428 Jülich,
Deutschland

Heiner Gutte und Bernd Meyer

Historisch gesehen ist Kohle seit der Industrialisierung Ende des 18. Jahrhunderts bis zum „Erdölzeitalter“ im 20. Jahrhundert der dominierende Kohlenstoffträger. Die Bedeutung von Kohle als Rohstoff für Industriegesellschaften war und ist in Abhängigkeit von den jeweiligen gesellschaftlichen Bedürfnissen und Rahmenbedingungen sowie dem Stand von Wissenschaft und Technik einem permanenten Wandel unterworfen. Das Bestreben, Kohle auch stofflich zu nutzen, ist nicht neu. Eine Vielzahl von wissenschaftlich-technischen Basisinnovationen im Deutschland der 20er und 30er Jahre des 20. Jahrhunderts beruht auf Verfahren zur thermochemischen Konversion von Kohle. Einen historischen Überblick zeigt Abb. 1.1. Bis Mitte der 1940er Jahre war Kohle in Deutschland der dominierende Rohstoff zur Gewinnung von Chemierohstoffen. Infolge kostengünstiger Verfügbarkeit, einfacherer Logistik sowie vielseitiger Verwendbarkeit von Erdöl und Erdgas wurde Kohle als Chemierohstoff seit den 1950iger Jahren weitestgehend abgelöst. Die Rohstoffbasis der organischen Chemie wurde auf Erdöl und Erdgas ausgerichtet

und Kohle weitestgehend substituiert. Dies hatte zur Folge, dass die Forschung zur industriellen Kohleveredlung in Deutschland bis auf vereinzelte Aktivitäten zur Kohlevergasung weitgehend eingestellt wurde und die Technologieführerschaft vielfach verloren ging.

Heute ist die chemische Industrie mit vielfältigen Wertschöpfungsprozessen in nahezu allen Bereichen der verarbeitenden Industrie verbunden und zugleich ein rohstoff- und energieintensiver Industriezweig. Die Sicherung der dafür erforderlichen Rohstoffbasis zu wettbewerbsfähigen Preisen ist von essenzieller Bedeutung. Das betrifft insbesondere die Versorgung mit Kohlenstoffträgern. Es wird davon ausgegangen, dass Erdöl auch mittelfristig die bedeutsamste Kohlenstoffquelle für die chemische Industrie bleiben wird. Gleichzeitig wird erwartet, dass Erdöl der einzige fossile Kohlenstoffträger ist, bei dem die wachsende Nachfrage perspektivisch an Grenzen stößt. Die Rohstoffbasis muss daher mittel- und langfristig um alternative Kohlenstoffträger erweitert werden. Neben nachwachsenden Rohstoffen, Carbonaten und Kohlendi-oxid steht vor allem Braunkohle als einheimische und langfristig verfügbare Kohlenstoffquelle zur Verfügung. Vor dem Hintergrund deutlich kürzerer Reichweiten von Erdöl und Erdgas, der begrenzten Verfügbarkeit von nachwachsenden Rohstoffen, steigender Rohstoffpreise und Importabhängigkeiten hat die stoffliche Nutzung der Braunkohle das Potenzial, eine tragende

H. Gutte (✉) · B. Meyer
Institut für Energieverfahrenstechnik
und Chemieingenieurwesen, Professur
Energieverfahrenstechnik und thermische
Rückstandsbehandlung, TU Bergakademie Freiberg,
Fuchsmühlenweg 9, 09599 Freiberg, Deutschland
e-mail: heiner.gutte@iest.tu-freiberg.de

Entwicklungsleistungen aus Deutschland

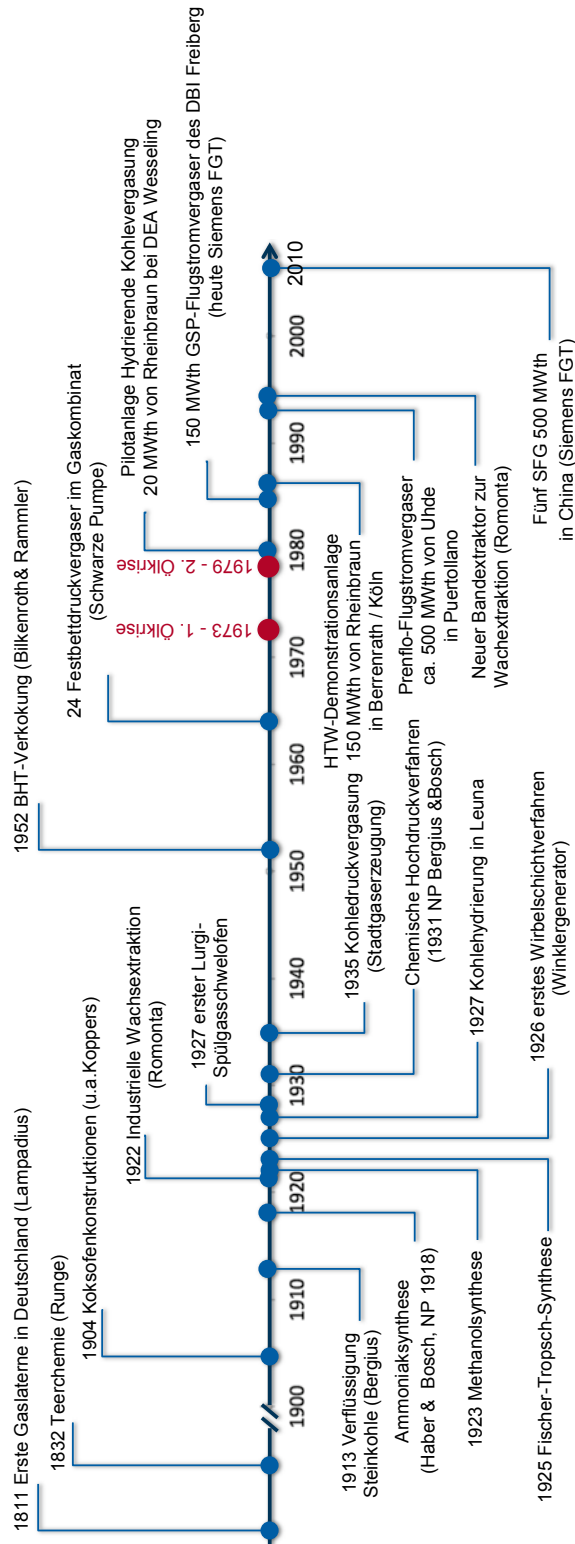


Abb. 1.1 Innovationen in Deutschland im Bereich der stofflichen Nutzung von Kohle

Säule im Rohstoffmix zu werden. Die chemische Industrie benötigt auch in Zukunft fossilen Kohlenstoff, der durch biogenen Kohlenstoff ergänzt werden kann. Braunkohle eröffnet hier Chancen, die Abhängigkeit von Öl- und Gasimporten zu verringern. Darüber hinaus liegen die Vorteile der stofflichen Nutzung von Braunkohle in einer signifikanten Absenkung der CO₂-Emissionen gegenüber der energetischen Nutzung bei gleichzeitig verbesserter Wertschöpfung, da der Kohlenstoff in werthaltigen Produkten chemisch gebunden wird.

Vor diesem Hintergrund wurden von der Professur für Energieverfahrenstechnik und thermische Abfallbehandlung der Technischen Universität Bergakademie Freiberg nacheinander folgende drei BMBF-Projekte initiiert bzw. mitinitiiert:

- Zentrum für Innovationskompetenz Virtuhcon Phase I (www.virtuhcon.de)
- Deutsches EnergieRohstoff-Zentrum Freiberg DER (www.energierohstoffzentrum.de)
- Regionaler Wachstumskern ibi (<http://ibi-wachstumskern.de>)

Im Rahmen dieser Großforschungsprojekte wurden die Erfahrungen langfristig angelegter Partnerschaften zwischen Forschungseinrichtungen, Universitäten, KMU und Großunternehmen genutzt, um innovative Technologien zur stofflichen Nutzung von Braunkohle zu entwickeln. Das inhaltliche Zusammenwirken der Projekte zeigt Abb. 1.2. Im Rahmen dieses Buches werden ausgewählte Ergebnisse dieser Forschungsprojekte entlang einer Wertschöpfungskette vom Rohstoff zum Chemieprodukt strukturiert dargestellt.

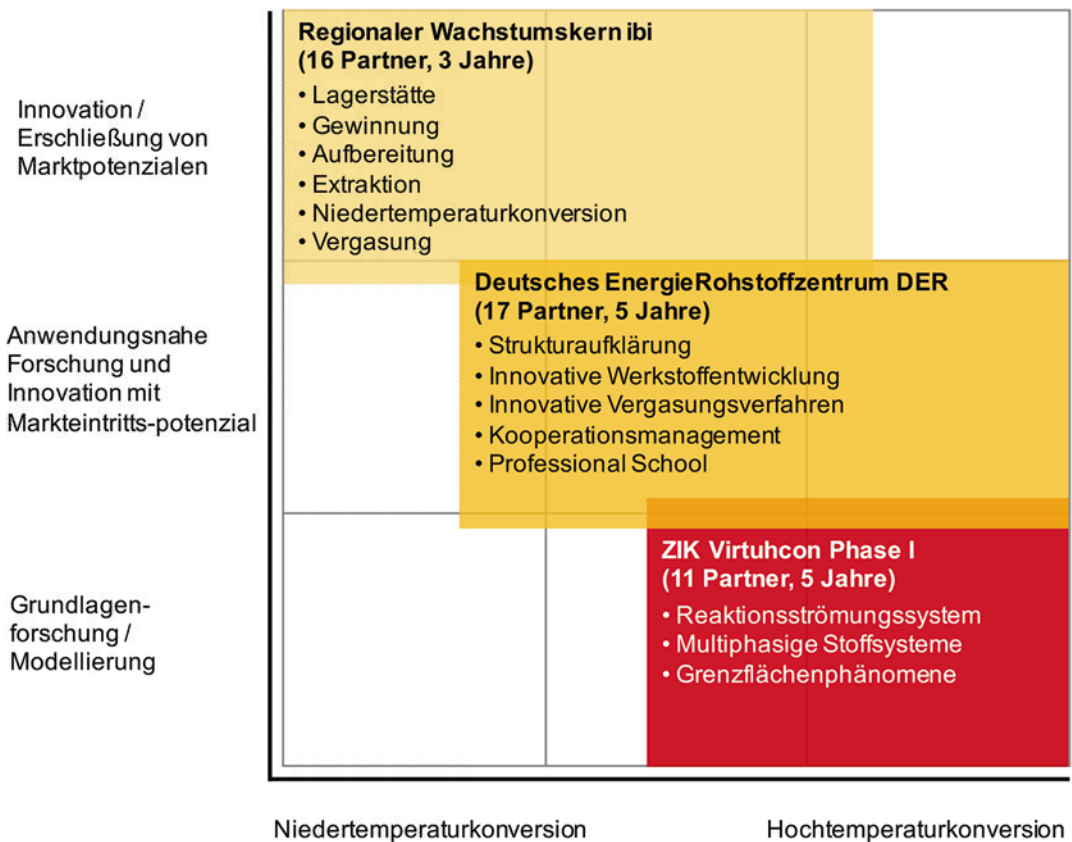


Abb. 1.2 Zusammenwirken der Forschungsprojekte im Themenfeld der stofflichen Nutzung von Braunkohle