



## Experimentelle Bestimmung und numerische Simulation von Viskositäten in Schlackesystemen unter Vergasungsbedingungen

Thomas Nentwig

Forschungszentrum Jülich GmbH  
Institut für Energie- und Klimaforschung (IEK)  
Werkstoffstruktur und -eigenschaften (IEK-2)

# Experimentelle Bestimmung und numerische Simulation von Viskositäten in Schlackesystemen unter Vergasungsbedingungen

Thomas Nentwig

Schriften des Forschungszentrums Jülich  
Reihe Energie & Umwelt / Energy & Environment

Band / Volume 129

---

ISSN 1866-1793

ISBN 978-3-89336-756-6

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>IX</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>XIII</b>
<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2. Stand des Wissens</b>	<b>5</b>
2.1. Kohlevergasung und Schlackeentstehung . . . . .	5
2.1.1. Umsetzung von Kohle . . . . .	5
2.1.2. Eigenschaften der Schlacke . . . . .	13
2.2. Messung von Viskositäten . . . . .	21
2.2.1. Grundlagen der Rheologie . . . . .	21
2.2.2. Rotationsversuche . . . . .	24
2.3. Viskositäten von Schlacken . . . . .	29
2.3.1. Grundlagen . . . . .	29
2.3.2. Mathematische Modelle . . . . .	32
2.3.3. Viskositäten von Modellschlacken . . . . .	44
2.3.4. Viskositäten von natürlichen Schlacken . . . . .	45
2.3.5. Druckabhängigkeit der Viskosität . . . . .	46
2.3.6. Eingesetzte Viskosimeter zur Bestimmung von Schlackeviskositäten . . . . .	48
<b>3. Entwicklung und Aufbau der Messeinrichtung</b>	<b>49</b>
3.1. Anforderungen an die Messeinrichtung . . . . .	49
3.2. Mechanischer Aufbau . . . . .	49
3.2.1. Druckbehälter und Ofen . . . . .	50
3.2.2. Viskosimeter . . . . .	53
3.2.3. Magnetkupplung . . . . .	55
3.2.4. Tiegel-Spindel-Messsystem . . . . .	56
3.3. Steuer- und Messsoftware . . . . .	57
3.3.1. Benutzeroberfläche . . . . .	57
3.3.2. Funktionsweise der Software . . . . .	58
3.3.3. Auswertung der Messdateien . . . . .	60
3.4. Testmessungen und Weiterentwicklung der Anlage . . . . .	61
3.4.1. Testmessung zur Druckstabilität . . . . .	61
3.4.2. Optimierung der Magnetkupplung . . . . .	62

3.4.3.	Optimierung der Isolierung . . . . .	65
3.5.	Kalibrierung und Testmessung mit realen Gläsern . . . . .	66
3.5.1.	Kalibrierung mit Kalk-Soda-Glas G1 der PTB . . . . .	67
3.5.2.	Referenzmessung mit Standardglas I der DGG . . . . .	69
3.5.3.	Abschätzung der Messgenauigkeit . . . . .	71
3.6.	Diskussion zu weiteren Optimierungsmöglichkeiten der Messeinrichtung . . . . .	72
3.6.1.	Verbindung des Rheometers mit dem Ofengestell . . . . .	72
3.6.2.	Designänderungen am Druckbehälter . . . . .	73
3.6.3.	Designänderungen am Ofen innerhalb des Druckbehälters . . . . .	74
<b>4.</b>	<b>Präparations- und Untersuchungsmethoden</b>	<b>77</b>
4.1.	Elementanalyse der Proben . . . . .	77
4.2.	Abschreckversuche . . . . .	77
4.2.1.	Probenpräparation . . . . .	78
4.2.2.	Versuchsdurchführung . . . . .	78
4.2.3.	Probenanalyse . . . . .	79
4.3.	Viskositätsmessungen . . . . .	80
4.3.1.	Probenpräparation . . . . .	80
4.3.2.	Messung . . . . .	80
4.3.3.	Tiegelreinigung . . . . .	80
<b>5.</b>	<b>Untersuchungen realer Schlacken</b>	<b>81</b>
5.1.	Charakterisierung der Proben . . . . .	81
5.2.	Abschreckversuche . . . . .	83
5.2.1.	Schlacke K2-5 . . . . .	84
5.2.2.	Schlacke S1-1 . . . . .	84
5.2.3.	Schlacke S1-2 . . . . .	85
5.2.4.	Schlacke S1-4 . . . . .	86
5.3.	Viskositätsmessungen . . . . .	86
5.3.1.	Schlacke K2-5 bei unterschiedlichen Drücken . . . . .	86
5.3.2.	Schlacke S1-1 bei unterschiedlichen Atmosphären . . . . .	87
5.3.3.	Vergleich von Viskositätsmessungen mit Modellberechnungen . . . . .	88
5.3.4.	Bestimmung der Arrhenius- und der Weymann-Gleichungen . . . . .	90
5.3.5.	Viskosität und Basizität . . . . .	91
<b>6.</b>	<b>Entwicklung eines Modells zur Berechnung von Viskositäten</b>	<b>93</b>
6.1.	Theoretische Grundlagen und Vorgehensweise . . . . .	93
6.1.1.	Berechnungsmethoden der unterschiedlichen Modelle . . . . .	93
6.1.2.	Mathematische Beschreibung . . . . .	95
6.1.3.	Vorgehensweise bei der Modellentwicklung . . . . .	98
6.2.	Literaturrecherche und Datenselektion für die Modellentwicklung . . . . .	99
6.3.	Bestimmung der Variablen . . . . .	102
6.4.	Qualität des neuen Modells . . . . .	106
6.5.	Vergleich des neuen Modells mit bereits in der Literatur vorhandenen Modellen	123

<b>7. Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>137</b>
7.1. Entwicklung und Aufbau des Hochtemperatur-Hochdruck-Viskosimeters . . .	137
7.2. Messung realer Schlackesysteme . . . . .	138
7.3. Entwicklung des Modells für Viskositätsberechnungen . . . . .	138
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>141</b>
<b>A. Anhang</b>	<b>XV</b>