



Strömungsmechanische Simulation und experimentelle Validierung des kryogenen Wasserstoff-Moderators für die Europäische Spallationsneutronenquelle ESS

Yannick Beßler

Schlüsseltechnologien / Key Technologies

Band / Volume 262

ISBN 978-3-95806-660-1

Forschungszentrum Jülich GmbH
Zentralinstitut für Engineering, Elektronik und Analytik (ZEA)
Engineering und Technologie (ZEA-1)

Strömungsmechanische Simulation und experimentelle Validierung des kryogenen Wasserstoff-Moderators für die Europäische Spallationsneutronenquelle ESS

Yannick Beßler

Schriften des Forschungszentrums Jülich
Reihe Schlüsseltechnologien / Key Technologies

Band / Volume 262

ISSN 1866-1807

ISBN 978-3-95806-660-1

Inhalt

Inhalt	VII
Abbildungsverzeichnis	XII
Tabellenverzeichnis	XIX
Liste der Symbole, Indizes und Abkürzungen	XX
1 Einleitung und Problemstellung	1
1.1 Motivation	2
1.2 Ziel der Arbeit	3
1.3 Aufbau der Arbeit	4
2 Grundlagen Spallation und Moderation	5
2.1 Spallations-Reaktionsprozess	5
2.2 Moderation von Neutronen	7
2.2.1 Funktionsweise und Einordnung von Moderatoren.....	7
2.2.2 Thermischer H ₂ O-Moderator.....	9
2.2.3 Kalter LH ₂ -Moderator	10
2.2.4 Abschätzung der räumlichen Ausdehnung eines Moderators	11
2.3 Übersicht der Spallationsneutronenquellen	16
2.3.1 Europäische Spallationsneutronenquelle ESS	17
2.3.2 Weitere bedeutende Neutronenquellen.....	19
2.4 Übersicht der eingesetzten kalten Moderatoren	21
3 Grundlagen numerische Strömungssimulation	23
3.1 Erhaltungssätze.....	24
3.1.1 Massenerhaltung.....	25
3.1.2 Impulserhaltung.....	25
3.1.3 Energieerhaltung	26
3.2 Navier-Stokes Gleichungen.....	27

3.2.1	Zustandsgleichungen	27
3.2.2	Stokes Hypothese	28
3.2.3	Vollständige Navier-Stokes Gleichungen	29
3.2.4	Reynolds gemittelte Navier-Stokes Gleichungen	31
3.2.5	Turbulenzmodelle	34
3.3	Diskretisierung des Navier-Stokes Gleichungssystems	37
3.3.1	Finite-Volumen Diskretisierung	37
3.3.2	Örtliche Diskretisierung	37
3.3.3	Zeitliche Diskretisierung	38
3.4	Simulationsfehler	39
3.4.1	Modellfehler	39
3.4.2	Diskretisierungsfehler	39
3.4.3	Iterationsfehler	40
4	Strömungsmechanische Simulation	41
4.1	Strömungsdesign und Optimierung	42
4.2	Fluid und Strukturmaterial	44
4.2.1	Wasserstoff Stoffdaten	44
4.2.2	Strukturmaterialdaten	47
4.3	Strahlungswärme	48
4.3.1	Material- und Ortsabhängigkeit	49
4.3.2	Zeitliche Struktur der Strahlungswärmezufuhr	53
4.3.3	Unsicherheiten bei der Strahlungswärme	55
4.4	Randbedingungen	57
4.4.1	Eintrittstemperatur	57
4.4.2	Mittlerer Austrittsdruck	60

4.4.3	Einströmgeschwindigkeit.....	60
4.4.4	Oberflächenbeschaffenheit.....	60
4.4.5	Unsicherheiten bei den Randbedingungen.....	61
4.5	Zeitschrittsteuerung.....	63
4.6	Rechennetz.....	67
4.6.1	Wandbehandlung.....	67
4.6.2	Parameter des gewählten Rechennetzes.....	69
4.7	Simulationsergebnisse.....	71
4.7.1	Vergleich der Turbulenzmodelle und Berechnungsnetze.....	71
4.7.2	Stationäre Simulationsergebnisse.....	75
4.7.3	Vergleich der Zeitschrittsteuerung.....	78
4.7.4	Instationäre Simulationsergebnisse.....	82
4.7.5	Abschätzung des Simulationsfehlers.....	91
4.8	Zusammenfassung der Strömungssimulation.....	93
5	Strömungsmessung.....	94
5.1	Versuchsziel.....	94
5.2	Versuchsstrategie.....	95
5.2.1	Geometrische Ähnlichkeit.....	96
5.2.2	Physikalische Ähnlichkeit.....	96
5.3	Particle Image Velocimetry (PIV).....	107
5.4	Versuchsaufbau.....	108
5.5	Versuchsdurchführung.....	109
5.6	Versuchsauswertung.....	111
5.6.1	OpenPIV Software.....	111
5.6.2	Vergleich mit Simulationsergebnissen.....	113

5.6.3	Gesamtfehler der Strömungssimulation.....	119
6	Strukturmechanische Auslegung	122
6.1	Geometrie.....	123
6.2	Strukturmaterialwahl und Strahlungsbelastung.....	124
6.2.1	Werkstoffkennwerte von AW 6061-T6.....	124
6.2.2	Maximal zulässige Bestrahlung.....	125
6.2.3	Kriechen, Alterung, Schwellen und Korrosion	125
6.3	Lastfälle und weitere Randbedingungen	126
6.4	Grenzwerte und Auslegungskriterien	130
6.5	Simulationsergebnisse	132
6.5.1	Vergleichsspannungen der Lastfälle	132
6.5.2	Linearisierte Spannung	135
6.5.3	Fortschreitende Verformung	140
6.5.4	Ermüdung.....	141
6.5.5	Verformung.....	143
6.6	Zusammenfassung der strukturmechanischen Auslegung	143
7	Prototypenbau	144
7.1	Zerspanung.....	144
7.2	Strahlschweißen.....	145
7.3	Zerstörungsfreie Prüfungen.....	147
7.3.1	Helium Lecktest.....	147
7.3.2	Farbeindringprüfung	148
7.3.3	3D Röntgen der Schweißnähte	149
7.3.4	Druckprüfung.....	151
7.4	Zusammenfassung des Prototypenbaus.....	152

8 Zusammenfassung und Ausblick	153
Literaturverzeichnis	i
Anhang	vi
A-1 Neutronenflussverteilung.....	vi
A-2 Wirkungsquerschnitte von H, D, H ₂ O und D ₂ O	vii
A-3 Kompressibilität und Ausdehnung LH ₂	ix
A-4 Para-Wasserstoff Stoffdaten	x
A-5 Rautiefenmessung Al6061-T6.....	xii
A-6 Simulationsergebnisse	xiii
A-7 Vektoranalysis.....	xx
A-8 Rechenregeln Reynolds- / Favre-Zerlegung.....	xxii
A-9 Inkompressible Navier-Stokes Gleichungen	xxiii
A-10 Konstruktion des Versuchskörpers	xxiv
A-11 PIV Messergebnisse.....	xxvi

Schlüsseltechnologien / Key Technologies

Band / Volume 262

ISBN 978-3-95806-660-1