

Inhaltsverzeichnis

Danksagung.....	III
Inhaltsverzeichnis.....	V
Formelverzeichnis	X
1 Zielsetzung	1
2 Aufbau der Arbeit.....	3
3 Grundlagen und Stand der Technik.....	5
3.1 Abschrecken im Rahmen der Wärmebehandlung von Stahlbauteilen.....	5
3.2 Einphasiger Wärmeübergang am längsangeströmten Zylinder.....	7
3.3 Wärmeübergang und Siedephasen beim Abschrecken in Flüssigkeiten.....	8
3.4 Einflussgrößen auf den Abschreckverlauf.....	11
3.4.1 Überblick	11
3.4.2 Eingrenzung im Rahmen dieser Arbeit	12
3.5 Abschreckung zylindrischer Bauteile.....	12
3.5.1 Siede- und Abkühlverlauf an vertikalen Oberflächen.....	12
3.5.2 Literaturübersicht.....	13
3.6 Dampfblasenbildung an einer heißen Oberfläche.....	22
3.7 Modellierungsansätze des Wärmeübergangs innerhalb einzelner Siedephasen ..	23
3.7.1 RPI-Wandsiedemodell (Blasensieden und Critical Heat Flux).....	23
3.7.2 Inverted Annular Film Boiling - Modelle (Filmsiedephase).....	25
3.7.3 Ein-Fluid-Modelle	26
3.7.4 Mehrfluid-Modelle (Euler-Euler-Ansatz).....	27
4 Modellbildung zur Simulation von Abschreckvorgängen mit Siedephänomenen.....	30
4.1 Berechnung des zweiphasigen Strömungsfeldes	30
4.1.1 Grundsätzliche Annahmen	30
4.1.2 Erhaltungsgleichungen.....	31
4.1.3 Austauschterm für Impuls und Energie zwischen den Phasen	32

4.1.4	Dampfblasendurchmesser	33
4.1.5	Impulsaustausch.....	36
4.1.6	Energicaustausch	38
4.2	Implementierung des siedebedingten Phasenübergangs	39
4.2.1	Modellierungsansatz basierend auf dem Stoffübergangskoeffizienten	39
4.2.2	Modellierungsansatz basierend auf dem Wärmetransport und der Liquidtemperatur	40
4.3	Wärmeübergang vom Festkörper an die zweiphasige Strömung	45
4.3.1	Wärmestromdichte.....	45
4.3.2	Wärmeübergangskoeffizient (WÜK)	46
4.3.3	Nusseltzahl	47
4.4	Energietransport im Festkörper (Fourier-Gleichung)	47
4.5	Erfassung von Phasenwechselvorgängen in Stahlbauteilen (Leblond-Ansatz) ..	47
4.6	Berechnung der Härteverteilung	48
5	Simulation und Experiment	49
5.1	Strömungssimulation	49
5.1.1	Geometrie und Randbedingungen	49
5.1.2	Erstellte Gitterstruktur	52
5.1.3	Verwendete Solvereinstellungen.....	54
5.1.4	Simulationsablauf	55
5.2	Verifikationsexperimente.....	55
5.2.1	Aufbau.....	55
5.2.2	Versuchsablauf	58
5.2.3	Verwendete Werkstoffe	59
5.2.4	Härtemessung	59
5.3	Werkstoffsimulation	60
5.3.1	Geometrie und Randbedingungen	60

5.3.2	Simulationsablauf	61
5.3.3	Werkstoffzusammensetzung	62
5.4	Auswertemethoden und -definitionen	62
5.4.1	Auswertung des zeitabhängigen Dampffilmverhaltens.....	62
5.4.2	Bestimmung der Leidenfrosttemperatur	65
6	Ergebnisse und Diskussion	67
6.1	Einphasiges Flüssigkeitsströmungsfeld im Strömungsrohr	67
6.1.1	Strömungsgeschwindigkeitsverteilung im Leerrohr	68
6.1.2	Flüssigkeitsströmungsfeld am Probenkörper.....	70
6.1.3	Mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Ringspalt.....	72
6.1.4	Entrainment	74
6.1.5	Bewertung der Strömungsstruktur.....	74
6.1.6	Einphasiger stationärer Wärmeübergang am Probenkörper.....	76
6.1.7	Fazit.....	77
6.2	Siedeverlauf aus Simulation und Experiment im Vergleich	77
6.2.1	Verifikationsbeispiel: Tauchbadkühlung (ohne Anströmung)	78
6.2.2	Zeitabhängige Positionen der Wiederbenetzungsfronten.....	80
6.2.3	Wiederbenetzungsstart an den Kanten des Bauteils.....	80
6.2.4	Siedefrontgeschwindigkeit.....	83
6.2.5	Dauer bis zum lokalen Siedefilmzusammenbruch.....	85
6.2.6	Gesamte Filmsiededauer	86
6.2.7	Position des vollständigen Filmzusammenbruchs	87
6.2.8	Lokale Leidenfrosttemperaturen aus Experiment und Simulation	88
6.2.9	Lokale Abkühlraten	94
6.3	Dampfzustand und -verteilung.....	96
6.3.1	Dampfgeschwindigkeiten.....	96
6.3.2	Dampftemperaturen	101

6.3.3	Dampfschichtdicke	103
6.4	Lokaler Wärmeübergang	105
6.4.1	Simulierter Wärmeübergang im Vergleich mit Literaturergebnissen.....	105
6.4.2	Lokale Verteilung des Wärmeübergangs an der Körperoberfläche.....	106
6.4.3	Zusammenhang zwischen der lokalen Abkühlkurve und dem lokalen Wärmeübergangskoeffizienten	107
6.4.4	Maximale lokale Wärmeübergangskoeffizienten	108
6.4.5	Lokale Oberflächentemperatur beim Erreichen des maximalen Wärmeübergangskoeffizienten	109
6.5	Mittlere Leidenfrosttemperatur, Temperatur bei maximalem Wärmeübergang	110
6.6	Flächengemittelte Wärmeübergangskoeffizienten.....	112
6.6.1	Teilflächen des Probenkörpers im Vergleich.....	112
6.6.2	Zeitabhängige Verläufe.....	114
6.6.3	Oberflächentemperaturabhängige Verläufe.....	115
6.6.4	Zeit- und flächengemittelte Wärmeübergangskoeffizienten während des gesamten Siedeverlaufs	117
6.7	Variation der Liquidtemperatur.....	123
6.8	Härteverläufe	124
6.8.1	Temperaturverläufe im Bauteil	124
6.8.2	Oberflächenhärte.....	125
6.9	Richtlinien für den Abschreckprozess zylindrischer Bauteile in Flüssigkeiten	129
7	Zusammenfassung und Ausblick	131
8	Betreute Arbeiten	133
9	Veröffentlichungen.....	134
10	Literaturverzeichnis.....	136
A	Anhang.....	147
A.1	Modellparameter und Einflussgrößen im Simulationsmodell.....	147
A.1.1	Unterrelaxation der Dampfbildungsrate ϵ	147

A.1.2	Dampfblasendurchmesser	148
A.1.3	Impulsaustausch.....	150
A.1.4	Zellgröße des numerischen Gitters.....	151
A.1.5	Druckeinflüsse	152
A.1.6	Einfluss der Wärmestrahlung	152
A.2	Stoffwerte	154