

INHALTSVERZEICHNIS

1 EINFÜHRUNG UND ZIELSETZUNG	1
2 GRUNDLAGEN DER ZERSTÄUBUNG ÜBERHITZTER FLÜSSIGKEITEN	3
2.1 Grundlagen der Düsenströmung	4
2.1.1 Kenngrößen der Düsenströmung	4
2.1.1.1 Kenngrößen der Zylinder-Düse	4
2.1.1.2 Kenngrößen des Stoffsystems	5
2.1.1.3 Kenngrößen der Strömung	7
2.1.2 Dampfbildende Zweiphasenströmung	9
2.1.2.1 Strömungsformenkarten	11
2.1.2.2 Strömungsinstabilitäten	13
2.1.3 Strömungsmodelle	14
2.1.3.1 Homogenes Modell	14
2.1.3.2 Schlupf-Modell	16
2.1.4 Druckabfall der Zweiphasenströmung	20
2.1.4.1 Reibungsdruckabfall	21
2.1.4.2 Druckänderung aufgrund der Höhe	29
2.1.4.3 Druckänderung durch Beschleunigung	29
2.1.4.4 Zusatz-Druckabfall in Strömungskanälen	32
2.1.5 Thermo-Fluidodynamik der Entspannungsverdampfung	39
2.1.5.1 Thermodynamisches Ungleichgewicht	40
2.1.5.2 Enthalpie-Betrachtung der Flüssigkeitsüberhitzung	42
2.1.5.3 Bildung und Wachstum von Dampfblasen	45
2.1.5.4 Betriebszustände und Kenngrößen	51
2.1.6 Kritisches Ausströmen	55
2.2 Grundlagen der Zerstäubung	62
2.2.1 Zerstäuberarten	63
2.2.1.1 Zerstäubung ohne Gasanteil	63
2.2.1.2 Zerstäubung mit Gasanteil	64
2.2.1.3 Zerfallsmechanismen	66
2.2.2 Formelwerk der Zerstäubung	70
2.2.2.1 Wirkungsgrad der Zerstäubung	70
2.2.2.2 Zielgrößen der Zerstäubung	72
2.2.3 Zweiphasenzerstäubung	79
2.2.3.1 Verfahren der Zweiphasenzerstäubung	79
2.2.3.2 Zerstäubungs-Modi der Entspannungsverdampfung	83
2.2.3.3 Entrainment	86
3 VERSUCHSEINRICHTUNG	91
3.1 Spray-Bildung	91
3.2 Spray-Charakterisierung	96

4 OPTISCHE MESSSYSTEME	103
4.1 Particle Image Velocimetry	106
4.1.1 Messprinzip	106
4.1.2 Applikation der PIV	110
4.2 Laserdiffaktometrie	114
4.2.1 Messprinzip	114
4.2.2 Applikation der Laserdiffaktometrie	119
4.3 Phasen-Doppler-Anemometrie	124
4.3.1 Messprinzip	124
4.3.1.1 Tropfengeschwindigkeit (LDA-Anordnung)	124
4.3.1.2 Tropfengröße (PDA-Anordnung)	126
4.3.2 Applikation der PDA	128
4.3.2.1 Differentielle Betrachtung der Tropfengrößenverteilung	130
4.3.2.2 Vergleich der PIV gegenüber der PDA-Messung	132
4.3.3 Teilchenfolgevermögen	133
5 MEHRPHASENSTRÖMUNGEN	137
5.1 Charakterisierung der Düsenströmung	137
5.1.1 Massenstrommessungen	138
5.1.1.1 Einfluss des Integralen Druckgefälles	138
5.1.1.2 Einfluss der Überhitzung	144
5.1.1.3 Einfluss der Düsen-Parameter	147
5.1.1.4 ζ -Wert-Betrachtung	148
5.1.1.5 p^* -Wert-Betrachtung	151
5.1.2 Strömungskarte	153
5.1.3 Temperaturmessungen im Düsenkörper	157
5.1.4 Kritisches Ausströmen	161
5.1.4.1 Befund der Massenstromlimitierung	161
5.1.4.2 Erklärung der Massenstromlimitierung	162
5.1.4.3 Kritischen Ausströmen infolge Schallgeschwindigkeit	163
5.1.5 Druckprofil in der Düse	168
5.1.5.1 Vereinfachte Annahme: Linearer Druckabfall	168
5.1.5.2 Differentielle Betrachtung: Lokaler Druckabfall	171
5.1.5.3 Druckabfall in Abhängigkeit des Überhitzungsgrades	175
5.2 Charakterisierung der Zerstäubung	178
5.2.1 Begriffsdefinition	178
5.2.2 Optische Bildauswertung	180
5.2.2.1 Strahlzerfall	180
5.2.2.2 Kontur des Spraykegels	192
5.2.3 Geschwindigkeitsverteilung	198
5.2.4 Tropfengrößeverteilung	204
5.2.5 Temperaturverteilung	206
5.2.6 Tomographische Auswertung der Partikelgrößenverteilungen	212
5.2.6.1 Linienmessung und Ringmodell	213
5.2.6.2 Bewertung der Umrechnung	219
5.2.7 Luft-Entrainment in den Spraykegel	222

6 GESTALTUNG VON PROZESS UND SPRAY.....	229
6.1 Spraybildende Effekte.....	230
6.1.1 Der Zerstäubungsvorgang.....	230
6.1.2 Der Zerstäubungsdruckanteil.....	232
6.1.3 Bewertung des Zerstäubungsprozesses.....	236
6.2 Betriebs-Parameter	242
6.2.1 Einfluss des Düsenvordruckes p_0	243
6.2.2 Einfluss des Umgebungsdruckes p_∞	246
6.2.3 Einfluss des Sättigungsdampfdruckes $p_s(T_0)$	250
6.2.4 Zusammenfassung: Einfluss der Betriebs-Parameter	253
6.3 Düsen-Parameter	254
6.3.1 Einfluss des L/D-Verhältnisses des Düsenkanals	255
6.3.2 Einfluss der Zulaufgeometrie des Düsenkanals	262
6.3.3 Einfluss der Oberflächenrauhigkeit des Düsenkanals.....	264
6.3.4 Einfluss der Benetzbarkeit des Düsenmaterials.....	267
6.3.5 Vergleich von Zylinderdüse und Hohlkegeldüse	270
6.3.6 Zusammenfassung: Einfluss der Düsen-Parameter	272
6.4 Zusammenfassung: Spraybildende Effekte	273
6.5 Energetische Betrachtung und Wirkungsgrad der Zerstäubung	277
6.5.1 Spray-Parameter.....	279
6.5.2 Energiebilanz der Zerstäubung	280
6.5.3 Wirkungsgrad der Zerstäubung	283
7 SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK	285
8 SYMBOL- UND ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	295
9 LITERATURVERZEICHNIS.....	303
10 ANHANG.....	313
10.1 Düsenströmung	313
10.2 Zerstäubung	315
10.2.1 Spanne der Temperatur und Mittleren Tropfengröße im Spray.....	315
10.2.2 Übersicht der räumlichen Verteilung der Spray-Parameter.....	317
10.2.3 Steckbrief der Düsen.....	321
10.2.3.1 Funkenerosions-Zylinder-Düsen FE-0,7 mm.....	321
10.2.3.2 Glas-Zylinder-Düsen GD-0,7 mm	322
10.2.3.3 Stahl-Zylinder-Düsen SD-0,7 mm	323
10.2.3.4 Stahl-Zylinder-Düsen SD-0,9 mm	324
10.2.3.5 Teflon-Zylinder-Düsen SD-0,7 mm	325
10.2.3.6 Hohlkegel-Düse HKD-1,1 mm	326
10.2.4 Paarweiser Düsen-Vergleich	327
10.2.4.1 Einfluss des L/D-Verhältnisses des Düsenkanals	327
10.2.4.2 Einfluss der Zulaufgeometrie des Düsenkanals	329
10.2.4.3 Einfluss der Oberflächenrauhigkeit.....	331
10.2.4.4 Einfluss der Benetzbarkeit des Düsenmaterials	333
10.2.5 Adiabate Mischung des Sprays mit ungesättigter Umgebungsluft....	335
LEBENSLAUF	343