

1.	Einführung und Zielsetzung	1
1.1	Thermoschock, Beispiele und Nutzung in der Prozesstechnik	1
1.2	Lebensdauer in der Produktentwicklung	2
1.3	Experimente zum Thermoschock	6
1.4	Materialsimulation und Lebensdauervorhersage	8
1.5	Ziele dieser Arbeit	10
2.	Grundlagen und Stand der Forschung	13
2.1	Thermoschock	13
2.1.1	Übersicht Thermoschockuntersuchungen	13
2.1.2	Auswirkungen der Thermoschockbeanspruchung	17
2.1.3	Thermische Ermüdung und Thermoschock	20
2.1.4	Metallische Werkstoffe unter Thermoschockbelastung	21
2.1.5	Keramische Werkstoffe unter Thermoschockbelastung	24
2.1.6	Thermische Spannungen	25
2.2	Hochtemperaturwerkstoffe und Schädigungsmodelle	25
2.2.1	Hochtemperaturwerkstoffe, Eigenschaften und Anwendungen	28
2.2.2	Ermittlung der Werkstoffeigenschaften	29
2.2.3	Schädigungsuntersuchungen und -vorhersagen	31
2.3	Wärmeübertragung	33
2.3.1	Wärmeleitung in festen Körpern	34
2.3.2	Wärmeübertragung zwischen Fluiden und Festkörpern	34
2.3.3	Wärmeübertragung durch Strahlung	39
2.4	Messtechnik in Thermoschockexperimenten	40
2.4.1	Temperaturmesstechnik	41
2.4.2	Experimentelle Schädigungsanalyse	45
2.4.3	Deformationsmessung	56
2.4.3.1	Koordinatenmessmaschinen	56
2.4.3.2	Optische 3D-Messtechnik	59
2.4.3.3	Optische Dehnungsmessung	65
2.5	Materialsimulation mit der Finite Element Methode	66
2.5.1	Materialmodellierung	66
2.5.2	Finite Element Methode, Entwicklung und Anwendung	69
2.5.3	Lösung des Temperaturfeldproblems mit der FEM	71
2.5.4	Nichtlineare Finite Element Methode	77
2.5.5	Werkstoffmodellierung	78
2.5.6	Parameteridentifikation und Optimierung	84
2.6	Interdisziplinäres Arbeiten	88
2.6.1	Kooperation der Fachdisziplinen	88
2.6.2	Selbstoptimierende Teilsysteme	89
2.6.3	Prozessführung und Datenmanagement	90
2.6.4	Wissensmanagement	91

3. Experimente zur Verifikation und Validierung	94
3.1 Spannungs-Dehnungsversuche, Werkstoffkenndaten	94
3.1.1 Zugversuche bei Raumtemperatur.....	95
3.1.2 Zyklische isotherme Zug-Druckversuche.....	97
3.1.3 Quantitative Ermittlung der Materialkenngrößen.....	102
3.1.4 Ergebnisse der Spannungs-Dehnungsversuche.....	107
3.2 Thermoschockversuche	109
3.2.1 Temperaturfeldanalyse unter Thermoschockbedingungen.....	109
3.2.2 Temperaturmesstechnik.....	110
3.2.3 Temperaturfeld in der Probenumgebung.....	112
3.2.4 Abschätzung der Flammentemperatur.....	114
3.2.5 Temperaturverlauf im Probekörper.....	127
3.2.6 Wärmeübergangszahlen aus Temperaturfeldmessungen.....	132
3.2.7 Wärmeübergangszahlen aus Modellrechnung.....	137
3.2.8 Ergebnisse der Temperaturfeldmessungen.....	145
3.2.9 Verformungsmessung.....	146
3.2.10 Vermessung der Deformationen.....	147
3.2.11 Kenngrößen und Darstellungsformen.....	152
3.2.12 Automatisierung der Formvermessung.....	155
3.2.13 Ergebnisse der Formvermessung.....	156
3.2.14 Schädigungsanalyse.....	157
3.2.15 Wirbelstromprüfung.....	157
3.2.16 Kenngrößen zur Thermoschockrissschädigung.....	162
3.2.17 Bezug zur Geometrie.....	165
3.2.18 Kerben und Vorschädigungen.....	167
3.2.19 Ergebnisse der Schädigungsanalyse.....	168
4. Materialmodelle und Simulationen	169
4.1 Parameteridentifikation und Verifikation.....	169
4.2 Simulation Thermoschockversuche.....	174
4.2.1 Temperaturfeldberechnung.....	175
4.2.2 Deformationsberechnung.....	179
4.3 Ergebnisse der Thermoschocksimulationen.....	182
5. Projektierung Thermoschockprüfstand und Arbeitsplattform	184
5.1 Methodik.....	184
5.2 Brainstorming Thermoschockprüfstand.....	187
5.3 Kreativitätsphase Thermoschockprüfstand.....	192
5.3.1 Technologieträger Thermoschock.....	192
5.3.2 Anforderungen und Thermoschockvorversuche.....	194
5.3.3 Einbezug Lieferanten.....	204
5.3.4 Parameterstudie.....	217
5.3.5 Konzeption als Ergebnis der Kreativitätsphase.....	219
5.4 Systementwurf Thermoschockprüfstand.....	220
5.4.1 Morphologischer Kasten.....	220
5.4.2 Gerätetechnische Konzeption.....	224
5.4.3 Roboterbahndaten bei der Wirbelstromprüfung.....	226
5.4.4 Bedien-, Steuerungs- und Sicherheitskonzept.....	230
5.4.5 Softwarestruktur des Thermoschockprüfstandes.....	232

5.4.6	Programmstruktur der Automatisierten Messtechnik.....	235
5.4.7	Temperiereinrichtung und Prüfmaschine.....	239
5.4.8	Messtechnik und Handhabung im Verbund.....	240
5.4.9	Datenablagestruktur des Thermoschockprüfstandes.....	241
5.5	Detailausarbeitung Thermoschockprüfstand.....	242
5.5.1	Lieferaufteilung Thermoschockprüfstand.....	242
5.5.2	Bestelldaten und Detailauslegung.....	243
5.5.3	Anforderungsprofil bauseitiger Leistungen.....	248
5.5.4	Montage- und Inbetriebnahmekonzept.....	250
5.6	Realisierung Thermoschockprüfstand.....	252
5.6.1	Werkverträge und Ausführungsunterlagen.....	252
5.6.2	Schulung und Dokumentation.....	255
5.6.3	Systemeinführung und Nutzungsübergabe.....	256
5.7	Arbeitsplattform als vernetztes mechatronisches System.....	260
5.7.1	Anforderungen an die Arbeitsplattform.....	261
5.7.2	Entwicklungsumgebung Arbeitsplattform.....	265
5.8	Ergebnisse der Projektierung.....	266
6.	Zusammenfassung und Ausblick.....	268
	Literaturverzeichnis.....	273