

# **Fortschritte in Konstruktion und Produktion**

herausgegeben von  
Prof. Dr.-Ing. Frank Rieg und  
Prof. Dr.-Ing. Rolf Steinhilper

Band 42

**Markus Kafara**

## **Additive Fertigung auslösbarer Innenkerne für die CFK-Bauteilproduktion**

Shaker Verlag  
Aachen 2019

---

# Inhalt

<b>1. Ausgangssituation</b> .....	<b>1</b>
1.1 Hintergrund und Problemstellung.....	1
1.2 Zielsetzung.....	4
1.3 Vorgehensweise.....	4
<b>2. Stand der Erkenntnisse</b> .....	<b>7</b>
2.1 Entwicklung und grundlegende Zusammenhänge.....	7
2.2 Grundlagen der CFK-Bauteilproduktion.....	10
2.2.1 Begriffsbestimmungen.....	10
2.2.2 Chemische, thermische und mechanische Eigenschaften von CFK.....	13
2.2.3 Verfahren zur CFK-Bauteilproduktion.....	16
2.2.4 Formwerkzeuge und Innenkerne für die CFK-Bauteilproduktion.....	24
2.3 Additive Fertigung.....	29
2.3.1 Begriffsbestimmungen.....	30
2.3.2 Grundprinzip der additiven Fertigung.....	31
2.3.3 Additive Fertigungsverfahren.....	34
2.3.4 Formwerkzeugbau mittels additiver Fertigungsverfahren.....	39
2.4 Zusammenfassung des Stands der Erkenntnisse.....	46
<b>3. Materialvorauswahl und Entwicklung eines Referenz-Innenkerns</b> .....	<b>49</b>
3.1 Materialvorauswahl.....	49
3.2 Entwicklung eines Referenz-Innenkerns.....	64
3.2.1 Kritische Würdigung von Referenz-Innenkernen und Referenzbauteilen aus Industrie und Wissenschaft.....	65
3.2.2 Systematisches Vorgehen zur Entwicklung des Referenz-Innenkerns.....	67
3.2.3 Ableitung des Referenz-Innenkerns.....	69
<b>4. Experimentelle Untersuchungen zur Entwicklung von Innenkernen</b> .....	<b>73</b>
4.1 Entwicklung eines Pulversystems.....	73
4.1.1 Grundlagen und Ziele der Entwicklung eines Pulversystems.....	73
4.1.2 Versuchsaufbau und Screening.....	80
4.1.3 Ergebnisse des Screenings.....	86
4.1.4 Statistische Versuchsplanung zur Bestimmung der optimalen Pulverzusammensetzung.....	91
4.1.5 Ergebnisse der Versuche zur Pulverzusammensetzung.....	94
4.2 Nachbearbeitung der Innenkerne.....	101
4.2.1 Komponenten des Infiltrats.....	102

4.2.2 Versuchsplanung.....	103
4.2.3 Versuchsdurchführung.....	105
4.2.4 Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen.....	106
4.2.5 Zielgrößenoptimierung.....	110
4.3 Untersuchung von Trennmaterialien und Auslöseverfahren.....	112
4.3.1 Systematische Erprobung von Trennmaterialien.....	112
4.3.2 Auslöseverfahren.....	122
<b>5. Erprobung und Bewertung der additiven Fertigung von Innenkernen.....</b>	<b>127</b>
5.1 Erprobung additiv gefertigter Innenkerne im industriellen Umfeld.....	127
5.1.1 Versuchsplanung und Bewertungskriterien.....	127
5.1.2 3D-Druck von Innenkernen und Erprobung im Autoklavverfahren.....	132
5.1.3 Versuchsauswertung.....	135
5.1.4 CFK-Bauteilproduktion mit dem Referenz-Innenkern.....	140
5.2 Ökologischer Prozesskettenvergleich.....	145
5.2.1 Aufbau einer Ökobilanz.....	145
5.2.2 Ziel und Untersuchungsrahmen der Ökobilanz.....	147
5.2.3 Sachbilanz und Wirkungsabschätzung.....	149
5.2.4 Vergleichende Auswertung der Ökobilanz.....	154
5.3 Ökonomischer Prozesskettenvergleich.....	157
5.3.1 Vorstellung der Bewertungsmethode.....	157
5.3.2 Durchführung des ökonomischen Prozesskettenvergleichs.....	161
5.3.3 Ergebnisdarstellung.....	167
<b>6. Zusammenfassung.....</b>	<b>171</b>
<b>7. Summary.....</b>	<b>175</b>
<b>8. Abkürzungen und Formelzeichen.....</b>	<b>179</b>
<b>9. Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>183</b>
<b>10. Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>193</b>
<b>11. Literaturverzeichnis.....</b>	<b>197</b>
<b>12. Anhang.....</b>	<b>217</b>
<b>Lebenslauf.....</b>	<b>237</b>