

**Untersuchung und Modellierung des
Ermüdungsverhaltens des hochfesten Stahls 100Cr6 im
metallpulverspritzgegossenen Zustand**

Vom Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik
der Technischen Universität Kaiserslautern
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte

Dissertation

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Hendrik Lindel

aus Giengen an der Brenz

Vorsitzender der Prüfungskommission:	Prof. Dr.-Ing. Tilmann Beck
1. Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. habil. Dietmar Eifler
2. Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. habil. Berthold Scholtes
Tag der mündlichen Prüfung:	15. Juni 2018

Kaiserslautern, 2018

D 386

I. Inhaltsverzeichnis

II. Formelzeichen und Abkürzungen.....	V
1 Motivation und Zielsetzung der Arbeit.....	1
2 Kenntnisstand	3
2.1 Metal Injection Molding (MIM)	3
2.1.1 Technologie des MIM-Prozesses	3
2.1.2 Anwendungsbereich der MIM-Technologie	6
2.1.3 Fehlstellen in MIM-Bauteilen	6
2.1.4 Poren in MIM-Bauteilen	7
2.1.5 Oberflächengüten von MIM-Bauteilen	8
2.2 Ermüdungsverhalten hochfester Stähle	9
2.2.1 Grundlegendes zum Ermüdungsverhalten von Stählen	9
2.2.2 Einflüsse auf die Ermüdungsfestigkeit von Stählen.....	11
2.2.3 Ermüdungsverhalten von Sinterstählen.....	19
2.3 Bruchmechanische Beschreibung des Ermüdungsbruchs	19
2.3.1 Ausbreitungsverhalten langer Risse	22
2.3.2 Entstehung und Ausbreitungsverhalten kurzer Risse.....	24
2.4 Dauerfeste Auslegung von Stahlbauteilen.....	28
2.4.1 Nennspannungskonzept.....	28
2.4.2 Lokale Konzepte	29
2.4.3 Bruchmechanische Konzepte	29
3 Versuchsprogramm.....	38
4 Versuchseinrichtung und Versuchsdurchführung	40
4.1 Form- und Geradheitsmessung	40
4.2 Charakterisierung der Probenoberfläche	40
4.3 Röntgenografische Eigenspannungsmessungen	45
4.4 Mechanische Charakterisierung.....	45
4.4.1 Quasistatische Untersuchungen.....	45
4.4.2 Schwingfestigkeitsuntersuchungen	48
4.4.3 Statistische Auswertung von Wöhlerlinien	50

4.4.4	Mikrostrukturelle Untersuchung der Ermüdungsvorgänge mittels physikalischer Messgrößen.....	52
4.5	Fraktografische Untersuchungen	53
4.6	Charakterisierung von Poren in Sinterkörpern	55
4.6.1	Dichtemessung nach dem Auftriebsprinzip	55
4.6.2	Quantitative Gefügeanalyse	55
5	Untersuchter Werkstoff und Probengeometrien.....	60
5.1	Chemische Zusammensetzung und Pulvercharakterisierung	60
5.2	Probenherstellung.....	64
5.2.1	MIM-Prozess.....	64
5.2.2	Wärmebehandlung	66
5.2.3	Oberflächenbearbeitung	67
5.3	Probengeometrien	69
5.3.1	Probenform stark gekerbt.....	70
5.3.2	Probenform mild gekerbt	71
5.3.3	Probenform geschliffene MIM-Proben.....	73
5.3.4	Proben aus schmelzmetallurgischem Werkstoff.....	74
5.3.5	Zugversuchsproben.....	75
5.3.6	Spannungsmechanische Kennwerte der Schwingfestigkeitsproben	75
5.3.7	Oberflächengüte	78
5.4	Mikrostruktur	84
5.5	Mechanische Kennwerte	86
5.5.1	Härte.....	86
5.5.2	Quasistatische Kennwerte	88
5.5.3	Eigenspannungen	91
5.6	Mikrostrukturelle Charakterisierung der Poren	91
5.7	Untersuchung des Werkstoffs auf Isotropie.....	93
5.7.1	Untersuchung der Porenformen und -verteilungen im Werkstoff.....	94
5.7.2	Untersuchung der Karbidverteilung.....	98
5.7.3	Form und Anordnung metallischer und nichtmetallischer Einschlüsse.....	98
5.7.4	Untersuchung der Kristallorientierung	100
6	Ergebnisse und Diskussion	102

6.1	Ermüdungsversuche an 100Cr6 MIM.....	102
6.2	Referenzversuch am druckgesinterten Zustand	105
6.2.1	Wöhlerlinie der Referenzproben	105
6.2.2	Diskussion der Wöhlerversuche des Referenzzustands	111
6.2.3	Temperatur- und Widerstandsänderung während der Schwingbeanspruchung.....	116
6.2.4	Diskussion der Widerstands- und Temperaturmessung beim Referenzzustand	118
6.3	Einfluss der Mittelspannung	120
6.3.1	Wöhlerlinien bei unterschiedlichen Lastverhältnissen.....	120
6.3.2	Diskussion des Mittelspannungseinflusses	123
6.4	Einfluss des relativen Spannungsgradienten.....	129
6.4.1	Wöhlerlinie der mild gekerbten Proben	129
6.4.2	Diskussion	132
6.5	Einfluss des Oberflächenzustands.....	137
6.5.1	Wöhlerlinien.....	137
6.5.2	Diskussion des Oberflächeneinflusses	146
6.6	Einfluss der Porengrößenverteilung.....	154
6.6.1	Wöhlerlinien drucklos gesintert und heißisostatisch gepresster Proben ...	154
6.6.2	Temperatur- und Widerstandsänderung während des Ermüdungsvorgangs	160
6.6.3	Diskussion der Widerstands- und Temperaturmessung beim drucklos gesinterten Zustand	162
6.6.4	Diskussion des Einflusses der Größe der Fehlstellen.....	163
6.7	Einfluss des Wärmebehandlungszustands	167
6.7.1	Wöhlerlinie.....	167
6.7.2	Diskussion des Einflusses des Wärmebehandlungszustands	170
6.8	Einfluss der Fertigungstechnik	172
6.8.1	Wöhlerlinie.....	172
6.8.2	Diskussion	176
7	Ableitung eines Bauteilauslegungskonzepts	179
8	Zusammenfassung.....	187
8.1	Mikrostruktur	188

8.2 Schwingfestigkeit.....	188
8.3 Modellierung der Dauerfestigkeit.....	190
9 Literatur	192
10 Ausgewählte Publikationen und Vorträge.....	198
11 Lebenslauf	200