

<b>Vorwort</b>	i
<b>Nomenklatur</b>	v
<b>1 Einleitung</b>	1
1.1 Stand der Technik . . . . .	1
1.1.1 Fahrwerksfeder aus Stahl in heutigen Personenkraftwagen (PKW) . . . . .	1
1.1.2 Literatur- und Patentrecherche . . . . .	2
1.2 Anforderungen an Fahrwerksfedern für heutige PKW . . . . .	6
1.3 Zielsetzung . . . . .	7
<b>2 Methoden zur Entwicklung von Federn aus Faser-Kunststoff-Verbund (FKV)</b>	9
2.1 Numerische Optimierungsverfahren für FKV-Federn . . . . .	9
2.1.1 Optimierung mit Hilfe von Gradientenverfahren . . . . .	10
2.1.2 Optimierung mit Hilfe von evolutionären Verfahren . . . . .	15
2.2 Stabilitätsverhalten von Druckfedern . . . . .	17
2.3 Kinematische Eigenschaften von Federn im PKW . . . . .	18
2.4 Zeitraffungsprinzipien zur Beschreibung des Langzeitverhaltens von Kunststoffen und FKV . . . . .	22
<b>3 Federkonzepte für FKV-Federn in PKW-Anwendungen</b>	25
3.1 Grundlegende Berechnungen für das Schraubenfederkonzept . . . . .	26
3.1.1 Analytische und numerische Berechnung eines Torsionsstabs . . . . .	28
3.1.2 Bestimmung des optimalen Laminataufbaus für die Torsionsfeder . . . . .	32
3.2 Grundlegende Berechnungen für das Polygonfederkonzept . . . . .	36
3.2.1 Berechnung mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode . . . . .	37
3.2.2 Eigenschaften der Feder im Parameterraum . . . . .	38
3.3 Grundlegende Berechnungen für das Mäanderfederkonzept . . . . .	40
3.3.1 Analytische Gleichungen zur Bestimmung von spezifischer Formänderungsenergie und Federsteifigkeit . . . . .	40
3.3.2 Aufbau eines Finite-Elemente (FE)-Modells für ein Mäanderfedersegment . . . . .	43
3.3.3 Optimierung eines Segments der Mäanderfeder . . . . .	44
3.4 Zusammenfassung und Beurteilung der Federkonzepte . . . . .	47
<b>4 Werkstoffgerechte Ausarbeitung des Mäanderfederkonzepts</b>	49
4.1 Detaillierung der analytischen und numerischen Modellierung des Mäanderfederkonzepts . . . . .	49
4.1.1 Ausarbeitung des FE-Modells zur Mäanderfeder . . . . .	54
4.2 Steifigkeitsbetrachtung in den Querrichtungen der Feder . . . . .	56
4.2.1 Steifigkeitsbetrachtung in der Breitenrichtung der Feder . . . . .	57

---

4.2.2 Steifigkeitsbetrachtung in der Krümmungsrichtung der Feder . . . . .	62
4.2.3 Steifigkeitsermittlung mit Hilfe der Finite-Elemente Methode (FEM) . . . . .	65
4.3 Betrachtung der Stabilitätseigenschaften der Mäanderfeder . . . . .	66
4.3.1 Die Krafteinleitungsgebiete als Ursache für ein Spannungsproblem . . . . .	68
4.3.2 Modellierung der Stabilität der Mäanderfeder . . . . .	74
4.3.3 Dynamisches Stabilitätskriterium für Faserverbund-Federn . . . . .	80
4.4 Betrachtung der kritischen Querspannungen . . . . .	86
4.4.1 Modifikation der Querschnittsgeometrie zur Reduktion der Querzugspannungen . . . . .	89
4.4.2 Laminatdegradation durch Querzugsspannungen . . . . .	92
4.5 Empfehlungen zur werkstoffgerechten Auslegung der Mäanderfeder . . . . .	96
<b>5 Experimentelle Untersuchung des Mäanderfederkonzepts</b>	<b>99</b>
5.1 Herstellung von Musterfedern . . . . .	99
5.2 Bestimmung der Faserverteilung im Federquerschnitt . . . . .	100
5.3 Validierung der FE-Berechnung . . . . .	102
5.4 Schädigungen unter statischer Belastung und Ermüdungsverhalten . . . . .	106
5.5 Setzverhalten des eingesetzten FKV unter Berücksichtigung von Zeit- und Temperaturinflüssen . . . . .	109
5.5.1 Untersuchung des Setzverhaltens von GFK-Biegeproben . . . . .	110
5.5.2 Setzverhalten der Mäanderfedern bei Umgebungstemperatur . . . . .	116
5.5.3 Setzverhalten bei erhöhter Temperatur . . . . .	119
5.6 Stabilitätsverhalten repräsentativer Federgeometrien . . . . .	121
<b>6 Die Mäanderfeder in einer Hinterachsanwendung</b>	<b>125</b>
6.1 Ausrichtung der Feder in der räumlichen Einfederung . . . . .	125
6.2 Auslegung der Hinterachs feder nach Steifigkeits- und Festigkeitsanforderungen . . . . .	127
6.3 Empfehlungen zur Auslegung von Federn für Hinterachsanwendungen . . . . .	129
<b>7 Die Mäanderfeder in einer Vorderachsanwendung</b>	<b>131</b>
7.1 Maßnahmen zur Erhöhung der Stabilität für geteilte Federstränge . . . . .	132
7.2 Auslegung der Feder nach Festigkeits- und Stabilitätsanforderungen . . . . .	133
7.3 Herstellung und Untersuchung der ausgelegten Federgeometrie . . . . .	135
7.4 Integration der Feder in ein Hybrid-Leichtbau-Federbein . . . . .	138
7.5 Empfehlungen zur Gestaltung von Mäanderfedern für Vorderachs anwendungen . . . . .	139
<b>8 Zusammenfassung</b>	<b>141</b>
8.1 Ausblick . . . . .	143
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>145</b>