

Vorwort	i
Nomenklatur	v
1 Einleitung	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
2 Methoden zur Entwicklung von Federn aus Faser-Kunststoff-Verbund (FKV)	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
3 Federkonzepte für FKV-Federn in PKW-Anwendungen	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
4 Werkstoffgerechte Ausarbeitung des Mäanderfederkonzepts	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 Krafteinleitungsbereiche 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 Querkzugspannungen	89
4.4.2	Laminatdegradation durch Querkzugspannungen	92
4.5	Empfehlungen zur werkstoffgerechten Auslegung der Mäanderfeder	96
5	Experimentelle Untersuchung des Mäanderfederkonzepts	99
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 Temperatureinflüssen	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
6	Die Mäanderfeder in einer Hinterachs-anwendung	125
6.1	Ausrichtung der Feder in der räumlichen Einfederung	125
6.2	Auslegung der Hinterachsfeder nach Steifigkeits- und Festigkeitsanforderungen	127
6.3	Empfehlungen zur Auslegung von Federn für Hinterachs-anwendungen	129
7	Die Mäanderfeder in einer Vorderachs-anwendung	131
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
8	Zusammenfassung	141
8.1	Ausblick	143
	Literaturverzeichnis	145