

Innovative Faserverbundwerkstoffe für Wasserstoffdruckbehälter in mobilen Anwendungen

Von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik
der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

von

Eduard Kessler

aus Karaganda

Hauptberichter: o. Prof. Dr. rer. nat. Dr. h. c. mult. Rainer Gadow

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Horst E. Friedrich

Tag der mündlichen Prüfung: 17.05.2017

Institut für Fertigungstechnologie keramischer Bauteile - IFKB
der Universität Stuttgart

2017

Forschungsberichte des Instituts für
Fertigungstechnologie keramischer Bauteile (IFKB)

Eduard Kessler

**Innovative Faserverbundwerkstoffe
für Wasserstoffdruckbehälter in
mobilen Anwendungen**

D 93 (Diss. Universität Stuttgart)

Shaker Verlag
Aachen 2017

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2017

Copyright Shaker Verlag 2017

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5511-5

ISSN 1610-4803

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit bei der NuCellSys GmbH, dem Unternehmen der Daimler AG zur Entwicklung des Brennstoffzellen- und Wasserstofftanksystems, betreut durch das Institut für Fertigungstechnologie keramischer Bauteile (IFKB) an der Universität Stuttgart.

Mein besonderer Dank gilt Herrn o. Prof. Dr. rer. nat. Dr. h.c. mult. Rainer Gadow für die stetige Förderung und die wertvolle wissenschaftliche Betreuung meiner Arbeit sowie das mir entgegengebrachte Vertrauen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Horst E. Friedrich, danke ich für das wissenschaftliche Interesse und die Übernahme des Koreferats.

Herrn Dr. Martin Quintus danke ich für die sehr gute Betreuung meiner Arbeit von Unternehmensseite, das mir entgegengebrachte Vertrauen und die vielen mir gegebenen Freiheiten zur Erforschung der vorliegenden Arbeit.

Ein besonderer Dank gilt Herrn Patrick Weichand, wissenschaftlichem Mitarbeiter am IFKB, und Herrn Dr. Ulli Kunstfeld, Mitarbeiter der NuCellSys GmbH, für die vielen Fragen, die ich stellen durfte und die vielen fachlichen Diskussionen.

Weiterhin danke ich allen Kolleginnen und Kollegen der NuCellSys GmbH für die gute Zusammenarbeit und das angenehme Arbeitsklima, ebenso wie den Kolleginnen und Kollegen am Institut für Fertigungstechnologie keramischer Bauteile für die Aufnahme ans Institut und das angenehme Klima auch als Externer.

Ein Dank gilt auch allen Studenten, die ich während meiner Arbeit betreuen durfte und die zum Gelingen dieser Arbeit beitrugen sowie den Herren Florian Schimmer und Arne Mann für das zahlreiche und geduldige Korrekturlesen.

Schließlich möchte ich mich bei Frau Gesine Jancar und ganz besonders bei meinen Eltern für den Rückhalt und die Unterstützung während meiner ganzen Ausbildung von ganzem Herzen bedanken.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	I
Inhaltsverzeichnis	III
Nomenklatur	VI
Abstract	XII
1 Einleitung und Motivation	1
2 Zielsetzung und Gliederung	4
3 Stand der Wissenschaft und Technik	5
3.1 Speichersysteme für Wasserstoff	5
3.2 Faserverbundwerkstoffe mit Polymermatrix	8
3.2.1 Grundlagen der Verbundwerkstoffe	8
3.2.2 Polymere Matrixwerkstoffe	10
3.2.2.1 Epoxidharzmatrix	12
3.2.2.2 Polyurethan	13
3.2.2.3 Thermoplastische Matrix	14
3.2.3 Verstärkungsfasern	14
3.2.3.1 Kohlenstofffasern	15
3.2.3.2 Glasfasern	20
3.2.3.3 Basaltfasern	21
3.2.3.4 Faser-Matrix-Grenzfläche	24
3.2.3.5 Aramidfasern	30
3.2.3.6 Naturfasern	32
3.2.3.7 Hybridfaser-Kunststoff-Verbunde	32
3.2.4 Fertigungsverfahren für Faser-Kunststoff-Verbunde mit Endlosfaserver- stärkung	33
3.2.4.1 Wickelverfahren	34
3.2.4.2 Flechten	39
3.2.4.3 Pultrusion	41
3.2.4.4 Liquid Composite Molding (LCM)	42
3.3 Wasserstoffdruckbehälter	43
3.3.1 Grundlagen zu Druckbehältern	43
3.3.2 Anforderungen an Druckbehälter für Wasserstoff	45
3.3.3 Grundlagen der Druckbehälterauslegung	47
3.3.3.1 Kesselformel	48
3.3.3.2 Netztheorie	49
3.3.3.3 Mechanische Betrachtung des Faser-Kunststoff-Verbunds	54

3.3.3.4	Finite Elemente Methode	60
3.3.4	Optimierung von Druckbehältern	60
3.3.5	Alternative Druckbehälterkonzepte	61
4	Herstellung und Charakterisierung von Faser-Kunststoff-Verbunden	68
4.1	Beschreibung der Prüfverfahren zur Werkstoffcharakterisierung	68
4.1.1	Zugversuche an imprägnierten Fasersträngen	68
4.1.2	Zugversuche an unidirektionalen Faser-Kunststoff-Flachproben	69
4.1.3	Dreipunkt-Biegeversuch	71
4.1.4	Scheinbare interlaminare Scherfestigkeit	72
4.1.5	Schlagbiegeversuch nach CHARPY	73
4.1.6	Zugversuche an unidirektionalen Ringprobekörpern	74
4.1.7	Zyklische Zugschwellversuche an Faser-Kunststoff-Flachproben	77
4.1.8	Untersuchung thermischer Eigenschaften durch kombinierte DTA/TG-Analyse	79
4.1.9	Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von Faser-Kunststoff-Verbunden	80
4.2	Probenfertigung	80
4.2.1	Nasswickeln unidirektionaler Faser-Verbund-Probekörper	80
4.2.2	Nasswickeln von Rohprobekörpern	82
4.2.3	Herstellung von Hybridfaser-Kunststoff-Verbunden	84
4.3	Ergebnisse der Werkstoffcharakterisierung	85
4.3.1	Zugversuche an imprägnierten Rovingprüfkörpern	86
4.3.2	Zugversuche an unidirektionalen Faser-Kunststoff-Flachproben	89
4.3.3	Dreipunkt-Biegeversuch	92
4.3.4	Scheinbare interlaminare Scherfestigkeit	97
4.3.5	Schlagbiegeversuch nach CHARPY	100
4.3.6	Zugversuche an unidirektionalen Ringprobekörpern	102
4.3.6.1	Zugversuche an Hybridfaser-Kunststoff-Ringproben	105
4.3.7	Zyklische Zugschwellversuche an Faser-Kunststoff-Flachproben	107
4.3.8	Untersuchung der Basaltfaseroberfläche	112
4.3.9	Untersuchung thermischer Eigenschaften	118
4.3.9.1	DTA/TG-Analyse	119
4.3.9.2	Auslagerung von Verstärkungsfasern bei hohen Temperaturen	120
4.3.9.3	Thermische und mechanische Belastung von Faser-Kunststoff-Verbunden	124
4.3.9.4	Simulation der Wärmebelastung auf Faser-Kunststoff-Verbunde	130
4.4	Charakterisierung einer Polyurethanmatrix	133
4.5	Fazit aus Charakterisierung faserverstärkter Kunststoff-Verbunde	137

5 Auslegung und Untersuchung von Druckbehältern	138
5.1 Rechnerische Auslegung von Wasserstoffdruckbehältern	139
5.1.1 Auslegung mittels Netztheorie	139
5.1.2 Auslegung mittels kombinierter Netz- und klassischer Laminattheorie	140
5.1.3 Auslegung mittels Finiten Elemente Methode	142
5.2 Wickeln und Berstversuche erster Druckbehälter	145
5.3 Wasserstoffdruckbehälter mit Basalt- oder Glasfaserverstärkung	147
5.4 Druckbehälter mit Hybridfaserverstärkung	148
5.5 Druckbehälter mit Hybridfaserverstärkung zur Wasserstoffspeicherung	151
5.6 Bonfire-Versuche von hybridgewickelten Druckbehältern	158
5.6.1 Versuchsaufbau	159
5.6.2 Versuchsdurchführung und -ergebnisse	161
5.6.3 Interpretation der Ergebnisse	168
5.7 Druckbehälter mit Polyurethanmatrix	168
6 Druckbehälteroptimierung in der Simulation	173
6.1 Druckbehälter mit C/C-Hybridfaserverstärkung	174
6.2 Verhältnis aus Behälterlänge zu -durchmesser	175
6.3 Polöffnungsdurchmesser	178
6.4 Schichtaufbau	179
6.5 Hybride Faserverstärkung bei großen Druckbehältern	181
6.6 Textile Strukturen zur gezielten Verstärkung im Dombereich	182
7 Zusammenfassung und Diskussion	184
8 Ausblick	189
Literatur	190