



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Erik Dahl

Zur Gestaltung von Böden und Krafteinleitungen für modulare Hochdruckbehälter aus Faser- Kunststoff-Verbunden



Schriftenreihe Leichtbau: Band 3

Konstruktiver Leichtbau und Bauweisen
Hrsg: Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Mittelstedt

Zur Gestaltung von Böden und Kraft- einleitungen für modulare Hochdruck- behälter aus Faser-Kunststoff-Verbunden

Konstruktion, Berechnung, stoff- und reibkraftschlüssige Verbindungstechniken

Erik Dahl



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Zur Gestaltung von Böden und Krafteinleitungen für modulare Hochdruckbehälter aus Faser-Kunststoff-Verbunden

Am Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt
zur
Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

D i s s e r t a t i o n

vorgelegt von

Erik Dahl, M. Sc.

aus Gießen

Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Mittelstedt
Mitberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Helmut Schürmann
Mitberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Matthias Oechsner
Tag der Einreichung:	02.02.2021
Tag der mündlichen Prüfung:	25.05.2021



Schriftenreihe Leichtbau

Band 3

Erik Dahl

**Zur Gestaltung von Böden und Krafteinleitungen
für modulare Hochdruckbehälter
aus Faser-Kunststoff-Verbunden**

Konstruktion, Berechnung, stoff- und reibkraftschlüssige
Verbindungstechniken

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Düren 2021

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.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2021

Copyright Shaker Verlag 2021

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8280-7

ISSN 2702-4075

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

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

Kurzfassung

Im Rahmen dieser Arbeit werden zwei modulare Behälterbauweisen für Faser-Kunststoff-Verbund (FKV) Hochdrucktanks und die hierzu benötigten Verbindungstechniken entwickelt.

Es wird eine reibkraftschlüssige Hybridbauweise untersucht, in der konkave Aluminiumböden mittels dreiteiliger Pressverbände (LPV) mit einem FKV-Zylinder verbunden werden. In einer numerischen Parameterstudie werden die maßgeblichen Einflussfaktoren des Konzepts analysiert und Gestaltungsempfehlungen erarbeitet. Die numerische Untersuchung wird durch die Herstellung eines Prototyps und der Durchführung eines Bersttests validiert, womit die Tauglichkeit des Konzepts experimentell nachgewiesen wurde.

Um die Montagekräfte bei der Fügung des Pressverbands zu senken und die Tragkraft der Verbindung zu steigern, werden zwei Oberflächenstrukturen mit richtungsabhängigen Reibwerten entworfen. Die Reib- und Haftungskoeffizienten der feingezahnten Oberflächen werden experimentell ermittelt und Kennwerte für die Bauteilauslegung erarbeitet. Neben der Hybridbauweise wird eine weitere Behälterbauweise entwickelt, die auf der stoffschlüssigen Verbindung eines thermoplastischen FKV-Bodens mit Zylinder basiert. Anhand numerischer Untersuchungen werden Gestaltungsempfehlungen für das zweiteilige Bodenkonzzept entwickelt. Für die Komponenten des Bodens werden Fertigungskonzepte ausgewählt, Presswerkzeuge hergestellt und erste Bauteile angefertigt.

Zur Umsetzung des stoffschlüssigen Behälterkonzepts wird ein an komplexe Fügeflächen anpassbares Heizelement zum Widerstandsschweißen faserverstärkter Kunststoffe entwickelt. Das Prozessfenster des Heizelements wird in einer experimentellen Untersuchung ermittelt und die erreichbaren Verbindungsfestigkeiten in Abhängigkeit des Feuchtegehalts der FKV-Probekörper ermittelt.

Abstract

In this thesis, two modular designs for composite pressure vessels for high-pressure applications and the required joining techniques are developed.

A frictionally engaged hybrid design is developed in which concave aluminum end caps are joined to a composite cylinder by means of a three-part interference fit. In a numerical parameter study, the decisive influencing factors of the concept are analyzed and design recommendations derived. The numerical investigation is validated by manufacturing a prototype and performing a burst test which proved the feasibility of the concept.

In order to reduce the assembly forces during the joining of the interference fit and to increase the load-bearing capacity of the joint, two surface structures with direction-dependent coefficients of friction are designed. The sliding and static friction coefficients of the fine-toothed surfaces are determined experimentally and characteristic values for the design of joints with these surface structures are provided.

The second pressure vessel design is based on a substance to substance joint of thermoplastic composite end caps with the cylinder. Numerical investigations are used to develop design recommendations for the vessel head. Manufacturing concepts are selected for the components of the end caps, press tools are manufactured and the first components are produced.

To assemble the thermoplastic pressure vessel design, an adaptable heating element for resistance welding of fiber-reinforced plastics (FRP) is developed. The heating element enables joining of complex shaped surfaces. The process window of the heating element is determined in an experimental study and the achievable joint strengths are determined in dependence on the moisture content of the FRP specimens.

Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet *Konstruktiver Leichtbau und Bauweisen* der *Technischen Universität Darmstadt* zunächst unter Leitung von Herrn Prof. Dr.-Ing. Helmut Schürmann und anschließend unter Leitung von Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Mittelstedt.

Zunächst möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Helmut Schürmann danken, dass er es mir ermöglichte, meine Promotion am Fachgebiet *Konstruktiver Leichtbau und Bauweisen* zu beginnen, dass er die Arbeit auch während seines Ruhestandes weiter mitbetreute und für seine stetige Bereitschaft für fachliche Diskussionen.

Weiterhin möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Mittelstedt dafür bedanken, dass er nach der Übernahme der Leitung des Fachgebiets die Betreuung meiner Arbeit übernommen hat, mir ermöglichte die Arbeit fortzuführen und mir ebenfalls stets eine offene Tür bot.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Matthias Oechsner, Leiter der *Staatlichen Materialprüfanstalt Darmstadt* sowie des *Fachgebiets und Instituts für Werkstoffkunde (MPA/IfW)*, möchte ich sehr für die Übernahme des Korreferats danken.

Ohne die tatkräftige Unterstützung von Herrn Thomas Kötting, dem Leiter der Metallwerkstatt des Fachgebiets, Herrn Hasan Dadak, dem Leiter des FKV-Technikums, sowie den Mitarbeitern Herrn Volker Rosmann und Herrn Kevin Göttmann hätte die Arbeit nicht in dieser Form umgesetzt werden können. Für die Mitarbeit und die vielen lehrreichen Gespräche möchte ich mich herzlich bedanken.

Ich möchte mich bei allen aktuellen und ehemaligen Kolleginnen und Kollegen des Fachgebiets für das angenehme Arbeitsumfeld, die vielen fachlichen Diskussionen, und die gemeinsame Zeit bedanken.

Den Studierenden, die mit ihren Abschluss- und Projektarbeiten sowie im Rahmen ihrer hilfswissenschaftlichen Tätigkeiten zu dieser Arbeit beigetragen haben, möchte ich an dieser Stelle ebenso meinen Dank aussprechen.

Ganz besonderer Dank gilt meiner Familie, die mir während dieser Arbeit stets zu Seite stand.

Darmstadt, im Februar 2021

Erik Dahl



Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	xi
1 Einleitung	1
1.1 Stand der Technik: Drucktank-Bauweisen	1
1.2 Zielsetzung	8
2 Modulare Drucktanks in der Darmstädter Bauweise	11
2.1 Technischer Stand der Darmstädter Bauweise	11
2.2 Weiterentwicklung der Darmstädter Bauweise	12
2.2.1 Reibkraftschlüssiges Konzept mit metallischen Böden.....	13
2.2.2 Stoffschlüssiges Konzept mit Böden aus Faser-Thermoplast-Verbunden.	14
3 Zur Gestaltung von Zylinderrohren aus Faser-Kunststoff-Verbunden für modulare Drucktanks	17
3.1 Vorgehen zur analytischen Vorauslegung	17
3.2 Fertigung von thermoplastischen Faser-Kunststoff-Verbund Zylindern	20
4 Zur Gestaltung eines Bodens aus Aluminium	23
4.1 Numerische Analyse des Bodenkonzepts.....	23
4.1.1 Parameterreduktion durch analytische Vorauslegung	24
4.1.2 Modellaufbau.....	29
4.1.3 Einfluss maßgeblicher Gestaltungsparameter.....	30
4.2 Stabilitätsnachweis beulgefährdeter Teilstrukturen	35
4.2.1 Durchschlagen der Kugelschale.....	35
4.2.2 Zylinderbeulen im Pressverband	38
4.3 Zur Gestaltung dreiteiliger Pressverbände	39
4.3.1 Über-/Untermaßverteilung im dreiteiligen Pressverband	41
4.3.2 Analyse der Störspannungen infolge Steifigkeitssprünge	42
4.4 Detailauslegung des Aluminiumbodens	50
4.4.1 Formoptimierung.....	50
4.4.2 Stabilitätsnachweis	52
4.4.3 Bewertung der Leichtbaugüte	53
4.5 Gestaltungsempfehlungen für Böden aus Aluminium	54
4.6 Konzeptvalidierung anhand eines Prototyps	55
4.6.1 Montageprozess	55
4.6.2 Bersttest.....	58
5 Montage- und belastungsgerechte Oberflächenstrukturierungen für reibkraftschlüssige Verbindungen	61
5.1 Stand der Technik: Oberflächenstrukturen zur Tragkraftsteigerung bei Metall-FKV Verbindungen.....	61

5.2	Entwurf von Zahnungsgeometrien und Festlegung des Untersuchungsrahmens	64
5.2.1	Identifikation und Auswahl der Untersuchungsparameter	65
5.2.2	Zahnungsgeometrien und Versuchspläne	69
5.3	Methodik zur Ermittlung der Reibungskoeffizienten	71
5.3.1	Aufbau der experimentellen Untersuchungen	72
5.3.2	Versuchsaufbau und -durchführung	73
5.3.3	Versuchsauswertung	76
5.4	Ergebnisse der experimentellen Untersuchung an Flachprobekörpern	78
5.4.1	Einfluss der Zahnungsgeometrie	81
5.4.2	Beeinflussung durch den Montageprozess, das Laminat und den Feuchtegehalt	87
5.5	Validierung des vereinfachten Versuchsaufbaus an Ringprobekörpern	92
5.6	Eindringverhalten von Feinzahnungen in Lamine	95
5.7	Gestaltungsempfehlungen für feingezahnte Oberflächenstrukturen	99
6	Zur Gestaltung eines Faser-Thermoplast-Bodens	103
6.1	Numerische Analyse des Bodenkonzpts	104
6.1.1	Finite-Element Modellierung	105
6.1.2	Zur Gestaltung des Innenkonus	106
6.1.3	Zur Gestaltung der Bodenschale	112
6.2	Fertigungskonzepte	119
6.2.1	Herstellung der Bodenschale	119
6.2.2	Herstellung des Innenkonus	120
6.2.3	Herausforderung der Verschweißung der Komponenten	122
6.3	Gestaltungsempfehlungen für Böden aus Faser-Thermoplast-Verbunden	125
7	Zum Widerstandsschweißen mit einem Heizelement für komplexe Fügeflächen	129
7.1	Stand der Technik: Heizelemente für das Widerstandsschweißen	129
7.2	Konzeptentwicklung eines Einzeldraht-Heizelements	131
7.3	Methodik zur experimentellen Untersuchung des Heizelements	132
7.3.1	Gestalt und Fertigung der Heizelemente	132
7.3.2	Gestalt und Fertigung der Zugscher-Probekörper	134
7.3.3	Prozesssteuerung und -überwachung	137
7.3.4	Vorgehen zur beschleunigten Probekörperkonditionierung	139
7.3.5	Versuchsplanung und -durchführung	141
7.4	Ergebnisse der experimentellen Untersuchung des Heizelements	142
7.4.1	Elektrische Isolierung	142
7.4.2	Erfassung und Analyse der Schweißtemperaturen	143
7.4.3	Einfluss des Fügedrucks	145
7.4.4	Einfluss der elektrischen Schweißparameter	146
7.4.5	Einfluss des Feuchtegehalts	149
7.4.6	Einfluss des Prüfverfahrens und der Fügeteildicke	150
7.5	Zusammenfassung und Prozessempfehlungen	151

8 Zusammenfassung und Ausblick	155
8.1 Zusammenfassung	155
8.2 Ausblick	159
Literaturverzeichnis	163
A Werkstoffkennwerte	173
B Behältergleichung orthotroper Zylinderschalen	174
C Berechnungsablauf der Parameterstudie des Aluminium-Bodens	180
D Datengrundlage und Annahmeproofungen der Varianzanalyse der Zahnungsversuche	181
E Parameter der Ausgleichskurven zur Beschreibung der Eindringtiefe in Abhängigkeit der Flächenpressung	190



Symbolverzeichnis

Abkürzungen

3D-CLT	erweiterte klassische Laminattheorie
AWV	ausgeglichener Winkelverbund
C	Kohlenstoff
CF	Kohlenstofffaser
CFK	Kohlenstofffaser-Kunststoff-Verbund
CNG	<i>compressed natural gas</i> (unter Druck gespeichertes Erdgas)
EP	Epoxidharz
Fb	Faserbruch
FEA	Finite-Elemente-Analyse
FEM	Finite-Elemente-Methode
FKV	Faser-Kunststoff-Verbund
GF	Glasfaser
GFK	Glasfaser-Kunststoff-Verbund
<i>KLuB</i>	<i>Konstruktiver Leichtbau und Bauweisen</i>
KLt	klassische Laminattheorie
LG	Leichtbaugüte
LPV	Längspressverband
PA6	Polyamid 6
PAN	Polyacrylnitril
PUR	Polyurethan
QI	quasiisotrop
UD	Unidirektional
Zfb	Zwischenfaserbruch

Griechische Formelzeichen

		Einheit
α	thermischer Längenausdehnungskoeffizient	—
α	Faserwinkel	°
α	Neigungswinkel Zahnung (Belastungsrichtung)	°
α	Signifikanzniveau	
β	Faserwinkel	°
β	Neigungswinkel Zahnung (Montagerichtung)	°
γ	Schiebung	—
γ	Flankenwinkel Zahnung	°

ε	Dehnung	–
η	Schalenparameter	–
κ	Krümmung	–
ν	Querkontraktionszahl	–
μ	Reibwert (Haftungs- /Reibungskoeffizient)	–
ρ	Dichte	kg/m ³
σ	Normalspannungen	N/mm ²
τ	Schubspannung	N/mm ²
φ	relativer Faservolumenanteil	–
ψ	relativer Fasermassenanteil	–
ω	AWV-Winkel	°

Lateinische Formelzeichen		Einheit
a	Abstand	mm
A_{ij}	Scheibensteifigkeit	Nmm
b	Breite	mm
d	Durchmesser	mm
C	Korrekturfaktor	–
D_{ij}	Plattensteifigkeit	Nmm
E	Elastizitätsmodul	N/mm ²
f	Frequenz	Hz
F	Kraft	N
F	Teststatistik F-Test	–
f_E	Anstrengung	–
G	Schubmodul	N/mm ²
h	Höhe	mm ²
I	Stromstärke	A
l	Länge	mm
LG	Leichtbaugüte	kg/l
M	Moment	Nm
M	Feuchtegehalt	%
m	Masse	kg
\hat{n}	Schnittkraftflüsse	N/mm
n	Schichtkraftflüsse	N/mm
n	Drehzahl	1/min
n	Anzahl	–
p	Druck	N/mm ²
p	Signifikanzwert	–
R	Festigkeit	N/mm ²
R	Radius	mm
r	Radius	mm
R	Widerstand	Ω

s	normierter Auswertepfad	–
S	Sicherheitsfaktor	–
t	Dicke	mm
t	Zeit	s
T	Teststatistik t -Test	–
T	Temperatur	°C
u, v, w	Verschiebung, Auslenkung	mm
U	Übermaß	mm
U	Spannung	V
W	Teststatistik Shapiro Wilk-Test	–

Indizes

–	Druck
+	Zug
\perp	senkrecht zur Faser
\parallel	Parallel zu Faser
φ	Meridianrichtung
ϑ	Umfangsrichtung
a	außen
A	Außenteil
A	axial
B	Bandage
berst	Berstdruck
betrieb	Betriebsdruck
Fb	Faserbruch
F	Fuge
ges	gesamt
i	innen
I, II	Hauptspannungen I bzw. II
I	Innenteil
max	maximal
min	minimal
N	normal
p0.2	Streckgrenze
t	tangential
v	Vergleichsspannung
Zfb	Zwischenfaserbruch
Zyl	Zylinder
z	ZOELLY