ICS 59.100, 83.140.20 VDI-RICHTLINIEN September 2006

VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE

Entwicklung von Bauteilen aus Faser-Kunststoff-Verbund
Berechnungen

Development of Fibre-Reinforced Plastics components
Analysis

VDI 2014

Blatt 3 / Part 3

Ausg. deutsch/englisch
Issue German/English

Die deutsche Version dieser Richtlinie ist verbindlich.

No guarantee can be given with respect to the English translation. The German version of this guideline shall be taken as authoritative.

Inhalt Seite

Vorbemerkung 3

1 Anwendungsbereich 4

2 Abkürzungen, Begriffe, Symbole, Indizierung 5

3 Berechnungsablauf 14
3.1 Allgemeines 14
3.2 Auslegungsphilosophie 16
3.3 Berechnungsprogramme 17

4 Modellierung der Schicht 18
4.1 Allgemeines 18
4.2 Eben beanspruchte Schicht 20
4.2.1 UD-Schicht (faserparalleles KOS) 20
4.2.2 G-Schicht und M-Schicht 22
4.2.3 Drehung der UD-Schicht in das Laminat-KOS 23
4.2.4 Berücksichtigung der Schubspannungen aus Querkraft bei UD-Schichten 24
4.3 Räumlich beanspruchte Schichten 25
4.3.1 Mechanische Beanspruchung (faserparalleles KOS) 25
4.3.2 Mechanische Beanspruchung einer UD-Schicht (gedrehtes KOS) . . . 27
4.4 Einfluss von Beanspruchungsarten/-dauer 28
4.4.1 Kurzzeitbeanspruchung 28
4.4.2 Ruhende Langzeitbeanspruchung . 28
4.4.3 Schwingbeanspruchung 32
4.4.4 Stoßbeanspruchung 33
4.5 Festigkeitskriterien 33
4.5.1 Allgemeines 34
4.5.2 Bruchbedingungen für UD-Schichten 38
4.5.3 G-Schicht. 46
4.5.4 M-Schicht 47
4.5.5 Einzusetzende Festigkeitswerte . . 48

Contents Page

Preliminary note 3

1 Scope 4

2 Abbreviations, terminology, symbols, superscripts and subscripts 5

3 Analytical procedure 14
3.1 General comments 14
3.2 Design philosophy 16
3.3 Computer programs 17

4 Modelling the lamina 18
4.1 General comments 18
4.2 Two-dimensionally loaded lamina 20
4.2.1 UD lamina (parallel-to-fibre COS) . 20
4.2.2 WF lamina and M lamina. 22
4.2.3 Rotation of the UD lamina into the laminate COS 23
4.2.4 Inclusion of shear stresses from transverse forces in case of UD laminae 24
4.3 Laminae subject to three-dimensional loading 25
4.3.1 Mechanical loading (parallel-to-fibre COS) 25
4.3.2 Mechanical loading of a UD lamina (rotated COS) 27
4.4 Influence of loading type and duration . . 28
4.4.1 Short-term load 28
4.4.2 Long-term static load 28
4.4.3 Cyclic load 32
4.4.4 Impact load 33
4.5 Strength criteria 33
4.5.1 General comments 34
4.5.2 Fracture conditions for UD lamina 38
4.5.3 WF lamina 46
4.5.4 M lamina 47
4.5.5 Strength values to be used 48

VDI-Gesellschaft Kunststofftechnik

VDI-Handbuch Kunststofftechnik
VDI-Handbuch Konstruktion

Frühere Ausgabe: 04.97 Entwurf, deutsch
Former edition: 04/97 Draft; in German only

Zu beziehen durch / Available at Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin – Alle Rechte vorbehalten / All rights reserved © Verein Deutscher Ingenieure e.V., Düsseldorf 2006

Vervielfältigung – auch für innerbetriebliche Zwecke – nicht gestattet / Reproduction – even for internal use – not permitted

All rights reserved © Verein Deutscher Ingenieure e.V., Düsseldorf 2006

Seite

4.6 Anwendung von Berechnungsprogrammen . . . 48
4.6.1 UD-Schicht . . . 48
4.6.2 G-Schicht . . . 50

5 Modellierung des Laminates . . . 50
5.1 Ermittlung von Spannungen und Verzerrungen . . . 51
5.1.1 Netztheorie . . . 51
5.1.2 Klassische Laminattheorie (CLT) . . . 57
5.1.3 Interlaminare Spannungen (ILS) . . . 63
5.1.4 Berücksichtigung der Verzerrung aus Schubspannungen durch Querkraft . . . 70
5.1.5 Behandlung von Kerben . . . 71
5.2 Schichtenweise Bruchanalyse . . . 74
5.2.1 Grundsätzliche Betrachtungen . . . 74
5.2.2 Nichtlineare Spannungsanalyse vor dem ZFB . . . 75
5.2.3 Kontinuierliche Modulabminderung (Degradation) nach dem ZFB . . . 79
5.2.4 Auswirkung von FB . . . 83
5.2.5 Vereinfachungen und selektive Nachprüfung . . . 83
5.2.6 Maßnahmen zur zielgerichteten Verbesserung von Laminaten . . . 84
5.3 Anwendung der schichtenweisen Bruchanalyse für verschiedene Beanspruchungsarten . . . 85
5.3.1 Kurzzeitbeanspruchung . . . 85
5.3.2 Langzeitbeanspruchung . . . 85
5.4 Schwingbeanspruchte Laminate . . . 91
5.4.1 Schädigungsvorgänge . . . 91
5.4.2 Darstellung von Schwingfestigkeitsergebnissen . . . 94
5.4.3 Bauteilbelastungsgeschichte . . . 98
5.4.4 Methoden der Schwingfestigkeitsanalyse . . . 99
5.4.5 Auslegungshinweise . . . 101
5.5 Anwendung von Berechnungsprogrammen . . . 102
5.5.1 Laminat-Analyseprogramme . . . 100
5.5.2 FEM . . . 103
5.5.3 Berechnung des Streckungsfaktors f_S^L der lastbedingten Spannungen bei gleichzeitig vorhandenen Eigenspannungen . . . 104

6 Bauteilberechnung . . . 107
6.1 Allgemeines . . . 107
6.2 Stabilitätsberechnungen . . . 109
6.2.1 Knicken von Stäben . . . 111
6.2.2 Beulung ebener Platten . . . 112
6.2.3 Beulung zylindrisch gekrümmter Flächenträger . . . 115
6.2.4 Anmerkungen . . . 122
6.2.5 Berechnungen mit FEM . . . 124

Page

4.6 Application of calculation programs . . . 48
4.6.1 UD lamina . . . 48
4.6.2 WF lamina . . . 50

5 Modelling the laminate . . . 50
5.1 Determining stresses and strains . . . 51
5.1.1 Netting theory . . . 51
5.1.2 Classical laminate theory (CLT) . . . 57
5.1.3 Interlaminar stresses (ILS) . . . 63
5.1.4 Taking into account the strains arising from shear stresses due to transverse forces . . . 70
5.1.5 Treatment of notches . . . 71
5.2 Lamina-by-lamina fracture analysis . . . 74
5.2.1 Fundamental aspects . . . 74
5.2.2 Non-linear stress analysis before IFF . . . 75
5.2.3 Continuous modulus reduction (degradation) after IFF . . . 79
5.2.4 Effect of FF . . . 83
5.2.5 Simplification and selective reviews . . . 83
5.2.6 Making specific improvements of laminates . . . 84
5.3 Application of lamina-by-lamina fracture analysis for different types of loading . . . 85
5.3.1 Short term loading . . . 85
5.3.2 Long term loading . . . 85
5.4 Cyclically loaded laminates . . . 91
5.4.1 Fracture processes . . . 91
5.4.2 Presentation of fatigue strength results . . . 94
5.4.3 Component loading history . . . 98
5.4.4 Methods of fatigue strength analysis . . . 99
5.4.5 Advices for design . . . 101
5.5 Application of calculation programs . . . 102
5.5.1 Laminate analysis programs . . . 100
5.5.2 FEM . . . 103
5.5.3 Calculation of the stretch factor f_S^L of the load-determined stresses when residual stresses are also present . . . 104

6 Analysis of FRP components . . . 107
6.1 General comments . . . 107
6.2 Stability analyses . . . 109
6.2.1 Buckling of struts . . . 111
6.2.2 Buckling of flat plates . . . 112
6.2.3 Buckling of cylindrically curved plates and shells . . . 115
6.2.4 Comments . . . 122
6.2.5 Finite element analyses . . . 124

Seite

6.3 Verbindungen und Krafteinleitungen 124
6.3.1 Klebverbindungen 125
6.3.2 Bolzenverbindungen 130
6.3.3 Schlaufenanschlüsse 131

Schrifttum 133

Anhang 136
A1 Berücksichtigung von nicht auf der Bruchebene wirkenden Spannungen in den wirkebenebezogenen Zwischenfaserbruch-Kriterien nach Abschnitt 4.5 134
A2 Berechnung des Streckungsfaktors f_S^L der lastbedingten Spannungen bei gleichzeitig vorhandenen Eigenspannungen 146
A3 Benutzen des in einem Rechenprogramm implementierten Tsai/Wu-Kriteriums zur Erlangung von ZFB- und FB-Ergebnissen nach *Puck/Knaust* 156

Page

6.3 Joints 124
6.3.1 Bonded joints 125
6.3.2 Mechanically fastened joints 130
6.3.3 Loop joints 131

Bibliography 133

Annex 136
A1 Inclusion of stresses not acting on the fracture plane in the action-plane-related inter-fibre fracture criteria described in Section 4.5 . . . 134
A2 Calculation of the stretch factor f_S^L of the load-determined stresses when residual stresses are also present . . 146
A3 Using the Tsai/Wu criterion implemented in a computer program in order to obtain IFF and FF results according to the *Puck/Knaust* criterion 156

Vorbemerkung

Die Richtlinie VDI 2014 enthält Empfehlungen für das Entwickeln von Bauteilen aus Faser-Kunststoff-Verbunden (FKV), die aus einzelnen faserverstärkten Schichten bestehen, bei denen Fasern in einer Kunststoff-Matrix eingebettet sind. Auch wenn auf Grund des vorliegenden Erfahrungsschatzes die Gruppe der betrachteten Matrixwerkstoffe dabei auf die „klassischen“ duromeren Kunststoffe wie Epoxid-, Vinylester- und Polyesterharze beschränkt ist, können die vorgestellten Berechnungsmodelle auch auf FKV mit thermoplastischer Matrix angewandt werden, solange das grundsätzliche Werkstoffverhalten vergleichbar bleibt. (Abweichungen des Werkstoffverhaltens sind vor allem beim Bruchgeschehen zu erwarten, weil insbesondere bei geringeren Faservolumenanteilen oder höheren Temperaturen kein ausgeprägtes Sprödbruchverhalten zu erwarten ist).

Die Richtlinie will durch Systematisieren und Vereinheitlichen der Bauteilauslegung und -dimensionierung auch die Zulassungsverfahren und die Qualitätssicherung erleichtern. Sie ist in drei Teile gegliedert:

Blatt 1	Grundlagen
Blatt 2	Konzeption und Gestaltung
Blatt 3	**Berechnungen**

Preliminary note

Guideline VDI 2014 includes recommendations for the design of components made of fibre-reinforced plastics (FRP) which consist of individual fibre-reinforced laminae in which fibres are embedded in a plastic matrix. Even when, due to the fund of experience available, the group of matrix materials coming here into consideration, is restricted to the “classic” thermoset plastics such as epoxy, vinylester and polyester resins, the calculation models presented can also be applied to fibre-reinforced plastics with a thermoplastic matrix provided the basic behaviour of the material remains comparable. (Differences in material behaviour are to be expected above all in fracture behavior, since it is particularly with lower fibre volume contents or higher temperatures that no marked brittle-fracture behaviour would be expected).

By systemizing and standardizing component design and dimensioning, this guideline seeks to make approval procedures and quality assurance easier as well. It is subdivided into three parts:

Part 1	Basics
Part 2	Concept and design
Part 3	**Analysis**

 All rights reserved © Verein Deutscher Ingenieure e.V., Düsseldorf 2006

1 Anwendungsbereich

VDI 2014 Blatt 3 zeigt den Stand der Technik der Berechnungsmethoden zur Entwicklung von FKV-Bauteilen auf. Das Grundprinzip dabei ist, dass das Verhalten des Laminates (Abschnitt 5) auf die Eigenschaften seiner Schichten (Abschnitt 4) zurückgeführt wird. Die Auslegung und das Dimensionieren eines Laminates umfasst die beanspruchungsgerechte Konstruktion des Laminates (Faserrichtungen, Schichtanzahl, Schichtfolge) und die Bestimmung der notwendigen Laminatdicke, zusammengesetzt aus den Dicken der einzelnen Schichten. Die Richtlinie basiert weitgehend auf bereits in der Praxis erprobten und anerkannten Methoden. Dies gilt für VDI 2014 Blatt 3 hinsichtlich der Methoden der Verformungs- und Spannungsberechnung (Abschnitt 4.1 bis Abschnitt 4.3 und Abschnitt 5.1). Für die Festigkeitsberechnung (Abschnitt 4.5 und Abschnitt 5.2) musste dieses Prinzip verlassen werden, da das übliche Vorgehen zumindest in einigen Industriezweigen zu groben Fehleinschätzungen führen kann. Es sind hierzu zum Teil neue Methoden aufgenommen worden, die aber die Erkenntnisse langjähriger Entwicklungspraxis widerspiegeln.

Die in VDI 2014 Blatt 1 und Blatt 2 eingeführten Schichttypen P-ES, G- ES und W-ES werden beibehalten. Deren Bezeichnung musste aber auf Grund der englischen Übersetzung von Blatt 3 in UD-Schicht, G-Schicht und M-Schicht geändert werden. Dabei hat die UD-Schicht für die Entwicklung hochleistungsfähiger Bauteile auf Grund ihrer gestreckten Faseranordnung herausragende Bedeutung. Daher steht die UD-Schicht im Vordergrund der Berechnungsmethoden.

Bei der rechnerischen Dimensionierung von Laminaten und FKV-Bauteilen verbleiben noch Unsicherheiten, z.B. bezüglich der Schwingfestigkeit (Abschnitt 5.4). Hier kann nicht der richtige, sondern nur der zurzeit bestmögliche Weg aufgezeigt werden.

Die hier vorliegende Richtlinie VDI 2014 Blatt 3 befasst sich vorrangig mit der Darstellung der Berechnungsmethoden, erläutert aber an vielen Stellen auch den Zusammenhang zu werkstofflichen Phänomenen.

Das Entwickeln einer für den jeweiligen Industriezweig geeigneten Sicherheits- oder Nachweisphilosophie zum Umgang mit den verbleibenden rechnerischen (und experimentellen!) Unsicherheiten muss in der Verantwortung des Bauteilentwicklers verbleiben.

1 Scope

VDI 2014 Part 3 records the state of the art regarding calculation methods for the development of FRP components. Here the basic principle is that the behaviour of the laminate (Section 5) be traced back to the properties of its individual laminae (Section 4). Designing and dimensioning a laminate includes stacking the laminate in such a way as to enable it to cope with the stresses it encounters (fibre orientations, number of laminae, sequence of laminae); it also includes determining the laminate thickness required, which will be the sum of the thickness of the individual laminae. To a very great extent the guideline is based on approved methods which have already been tried and tested in practice and does not therefore necessarily reflect the very latest research findings. In the case of VDI 2014 Part 3 this affects methods used for strain and stress calculation (Sections 4.1 to Section 4.3, and Section 5.1). In the case of strength calculation (Section 4.5 and Section 5.2) this principle had to be abandoned since the usual procedure could result in seriously incorrect estimates, at least in some branches of industry. Here some new methods have been included which do nevertheless reflect what has been learnt during the course of years of design and development work.

The lamina types introduced in VDI 2014 Part 1 and Part 2 – namely, P-ES, G-ES and W-ES – are retained. However, for reasons associated with the translation of Part 3 into English, the terms UD lamina, WF lamina and M lamina are now used instead. Here, due to the straight, non-crimped unidirectional orientation of its fibres, the UD lamina is of outstanding importance in the design of heavy-duty or high-performance components. For this reason the UD lamina occupies a prominent position in the various analytical methods.

Some uncertainties remain, however, in the theoretical dimensioning of laminates and FRP components – one example of this is fatigue strength (Section 5.4). It is therefore not possible to provide a description here of the correct method, but only of the best method available at the present time.

This present VDI 2014 Part 3 concerns itself principally with presenting calculation methods but does nevertheless frequently explain connections with material-related phenomena.

It must remain the responsibility of the component designer to develop a safety- or verification-related strategy for dealing with the remaining calculation (and experimental!) uncertainties and which will suit the requirements of his own branch of industry.