

WAS SIND EIGENTLICH FASER-VERBUND-KUNSTSTOFFE (FVK)?

Grundlagen. FVKs sind ein Werkstoffverbund aus einem faserförmigen Material (z. B. Kohlenstoff, Glas oder Aramid), welches in eine Kunststoffmatrix (z. B. Epoxidharz) eingebettet wird. Die Fasern übernehmen als Hauptträger der Festigkeit und Steifigkeit die wirkenden Lasten. Die Anordnung der Fasern im Verbund bestimmt daher maßgeblich die mechanischen Eigenschaften des Werkstoffverbunds. Die Matrix mit ihrem eher stützenden Charakter erfüllt eine Reihe notwendiger Aufgaben, ist dabei aber häufig der Schwachpunkt des Werkstoffs. Sie dient vorrangig als Bindemittel und damit als Stütze für die Fasern. Außerdem verteilt sie die Kräfte auf die Fasern und dient u. a. auch als Faserschutz.

WIE KÖNNEN FVK MATHEMATISCH BERECHNET WERDEN?

Analytik. Die zwei bekanntesten Konzepte zur Analyse faserverstärkter Laminat sind die Klassische Laminattheorie (CLT) und die Schubdeformationstheorie 1. Ordnung (FSDT). Mithilfe der CLT können die durch äußere Belastungen hervorgerufenen Verzerrungen und Spannungen der einzelnen Schichten berechnet werden. Aufgrund von vielen Annahmen und Einschränkungen liefert die CLT jedoch nur für dünnwandige Schichten gute Ergebnisse. Daher wurden höherwertige Laminattheorien entwickelt. Die FSDT erweitert die CLT um den Querschub. Sie ist damit auch für dickwandige Laminat einsetzbar. Außerdem hat die FSDT numerische Vorteile gegenüber der CLT und wird daher in FEM-Berechnungen eingesetzt. Das Materialgesetz bezüglich der Schnittkräfte, der Schnittmomente sowie des Querschubs eines Laminat-elements lautet:

$$\vec{N} = A\vec{\epsilon}_0 + B\vec{\kappa}_0, \quad \vec{M} = B\vec{\epsilon}_0 + D\vec{\kappa}_0, \quad \vec{Q}_s = A_s\vec{\gamma}_s$$

Ein Laminat hat einen Scheibenanteil A , einen Plattenanteil D und einen Querschubanteil A_s . Zusätzlich gibt es einen Koppelanteil B , der die Scheiben- und Plattensteifigkeiten miteinander koppelt. Die Anteile werden aus den Steifigkeitsmatrizen der Einzelschichten berechnet. Üblicherweise wird das Materialgesetz in der folgenden Hypermatrixform zusammengefasst:

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \\ Q_y \\ Q_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} & 0 & 0 \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} & 0 & 0 \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} & 0 & 0 \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} & 0 & 0 \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} & 0 & 0 \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_{44,s} & A_{45,s} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_{45,s} & A_{55,s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \\ \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{bmatrix}_0$$

Diese Zusammenhänge können in die FEM übertragen werden. Die Elementsteifigkeitsmatrix eines solchen Laminatplattenelements ergibt sich wie folgt:

$$K_E = K_{E,m} + K_{E,mb} + K_{E,b} + K_{E,s}$$

Die vier Teilmatrizen werden mithilfe der Steifigkeitsmatrizen des Materialgesetzes berechnet.

Für die CLT haben wir ein eigenes Laminatberechnungsprogramm mithilfe von Matlab entwickelt und durch den Vergleich mit anderen Programmen verifiziert.

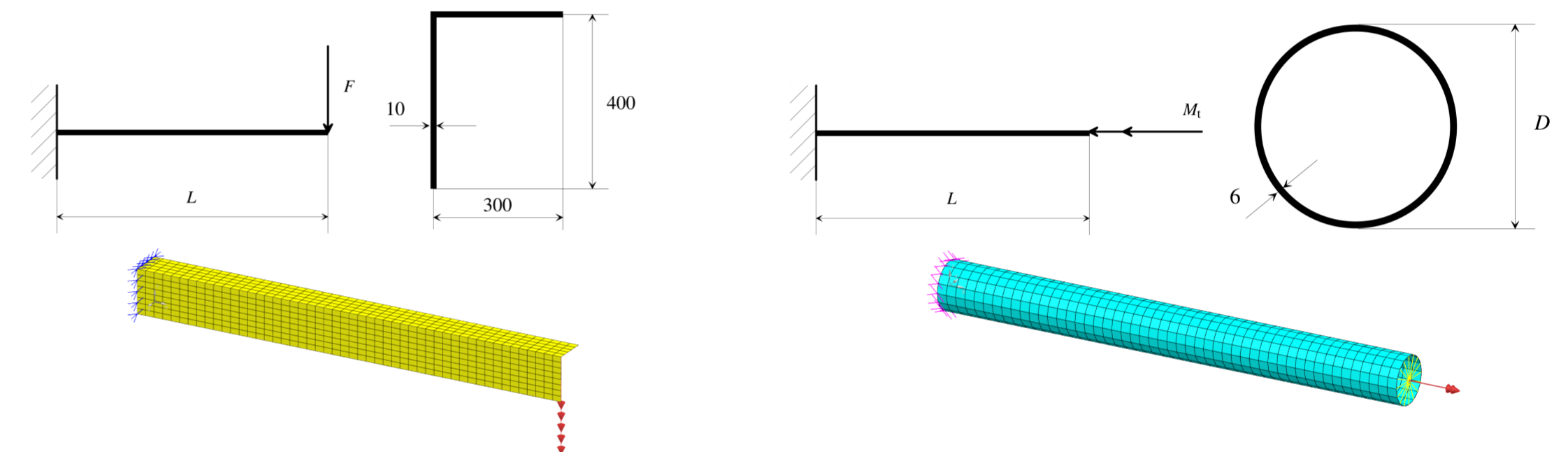
WIE KANN ES MIT DIESER THEMATIK WEITERGEHEN?

Ausblick Analytik. Das Laminatberechnungsprogramm in Matlab bildet bisher nur eine Spannungsanalyse basierend auf der CLT ab. Für eine umfassende Laminatauslegung bzw. -optimierung ist das Einbinden von Bruch- bzw. Versagenskriterien für eine Festigkeitsanalyse notwendig. Das Matlabprogramm kann in dieser Hinsicht erweitert werden, sodass ein eigens modifizierbares Laminatoptimierungsprogramm entsteht.

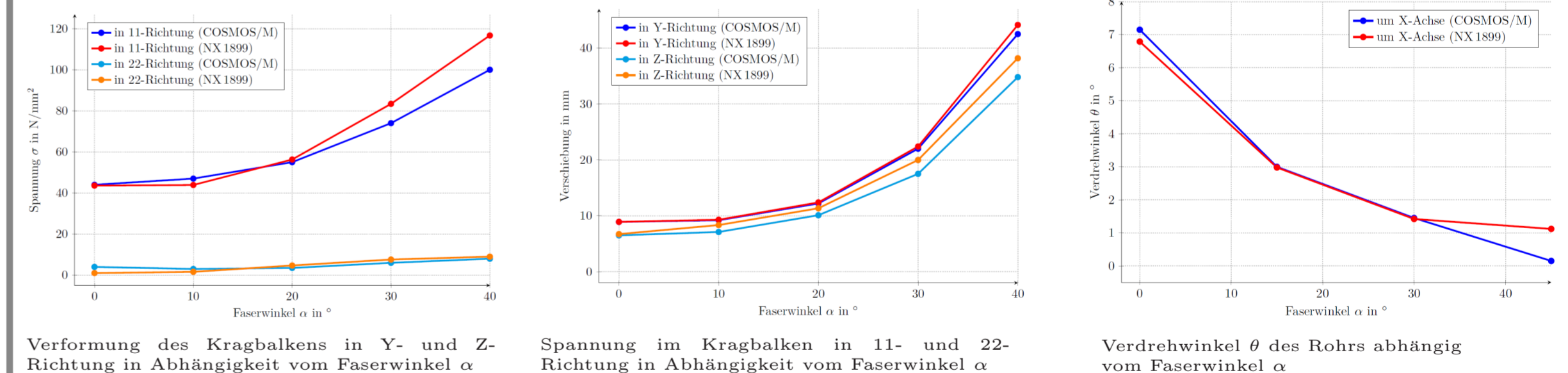
Ausblick Numerik. Für die FEM-Betrachtung ist eine weiterführende Analyse der Unterschiede in den Ergebnissen von COSMOS/M und NX sinnvoll. Dafür können die Berechnungsmodelle noch einmal in einer Drittsoftware nachgebildet werden (z. B. Abaqus). Besonders interessant wäre aber die Betrachtung in der Originalsoftware COSMOS/M, um dort die genauen Einstellungen, Parameter sowie Berechnungsgrundlagen (z. B. die Elementtheorie/-ansatzfunktion oder gewähltes Analysemodul) zu analysieren und so die Unterschiede zu den Ergebnissen in NX verstehen und erklären zu können.

UND WIE MACHT MAN DAS MIT FEM-SIMULATIONEN IN NX?

Numerik. Bisher wissen wir nicht so genau, wie in NX die Simulation von FVKs eigentlich abläuft bzw. funktioniert. Daher wollen wir zunächst untersuchen, ob NX die gleichen Ergebnisse liefert wie Beispiele aus der Literatur. In [1] wird neben der analytische Berechnung von FVKs auch die FEM ausführlich betrachtet. Als Berechnungsbeispiele finden sich hier u. a. ein Laminat-Kragbalken und ein Laminat-Rohr:



In der Literatur werden die Berechnungen mit der Software COSMOS/M durchgeführt. Die dort dargestellten Ergebnisse vergleichen wir mit den Ergebnissen in NX. Die folgenden Diagramme zeigen die Vergleiche für die Verformungen und Spannungen im Kragbalken sowie für den Verdrehwinkel im Rohr.



LITERATUR

[1] H. Altenbach, J. Altenbach und W. Kissing. „Mechanics of composite structural elements“. 2.Auflage. 2018.