



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorthesis



**Auslegung eines Hybrid-Laminat-Blattanschlusses
einer Windenergieanlage in Bezug auf Steifigkeit
und Festigkeit mittels FEM**

Andreas Julian Wendy

Matr.Nr.: 1902230

14. September 2011

**Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Fakultät Technik und Informatik
Department Maschinenbau und Produktion
Berliner Tor 21
20009 Hamburg**

In Zusammenarbeit mit:

**Sogclair Aerospace GmbH
Georg-Heyken-Straße 4
21147 Hamburg**

**Verfasser: Andreas Julian Wendy
Studiengang: Maschinenbau – Energie- und Anlagensysteme
Abgabedatum: 14.09.2011**

**1. Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Frank Ihlenburg
2. Prüfer: Dr.-Ing. Dipl.-Math. Patrick Mehmert**

Vorwort und Danksagung

Wir schreiben Freitag den 11. März 2011. Es ist genau 14:46:23 Uhr Ortszeit 163 Kilometer nordöstlich des Kernkraftwerks Fukushima in Japan. Trotz dieser enormen Distanz nach Deutschland, wird das stärkste Erdbeben Japans auch weitreichende Folgen für die Energieversorgung Deutschlands nach sich ziehen.

Um 14:47 Uhr fällt in Folge des Erdbebens die Stromversorgung des Kraftwerks aus und die Notstromgeneratoren nehmen Ihre Arbeit auf, die Sicherheitsmaßnahmen scheinen effektiv genug zu sein. Der Schein jedoch trügt. Genau 40 Minuten später trifft die erste von mehreren Tsunamiwellen das Kernkraftwerk Fukushima 1. Die vorhandenen Schutzmauern reichen nicht aus und die dahinter befindlichen Meerwasserpumpen fallen aus und somit auch ein Teil der dringend notwendigen Kühlung. Der Schaden nimmt erheblich größere Ausmaße an. Die Reaktorblöcke 1 bis 4 werden stark beschädigt und mehrere Meter hoch geflutet. Die Blöcke 5 und 6 werden ebenfalls überschwemmt. Das Wasser bahnt sich seinen Weg in das Turbinengebäude, in die Reaktorgebäude und bringt das zentrale Abklingbecken zum Überlaufen und trifft letztendlich auf 12 der insgesamt 13 vorhandenen Notstromgeneratoren und neun von zehn Schaltzentralen.

Zwischen 15:36 und 15:41 Uhr fallen alle Notstromgeneratoren des Kraftwerks aus und die Katastrophe setzt sich fort.

Am 12. März hebt die Atomaufsicht Japans die Stufe des Unglücks von Stufe 5 auf Stufe 7 an, welches bisher nur im Fall von Tschernobyl vor 25 Jahren geschehen war. Die kurz- und langfristigen Auswirkungen und Kosten des Unfalls von Fukushima sind noch immer nicht abzusehen.

Bereits am 15. März verhängt die Regierung ein Atom-Moratorium auf Grund einer Notsituation. Die sieben ältesten Kernkraftwerke Deutschlands, sowie das Kernkraftwerk Krümmel, welches auch als „Pannenmeiler“ angesehen wird, sollen für 3 Monate abgeschaltet werden.

Am 30. Mai wird der Atomausstieg endgültig und die Schwarz-Gelbe-Koalition einigt sich auf einen kompletten Atomausstieg bis 2022. Einig sind sich alle, dass dieser Ausstieg für den Energiemarkt eine große Herausforderung wird. Sei es der Ausbau von Stromnetzen (den Smart Grids), die Regelung oder der Ausbau der erneuerbaren Energien wie Solar- und Windenergie. Die Aufgabe ist es nun schnell, effektiv und natürlich kostengünstig für die Nutzung der regenerativen Energiequellen zu sorgen. Gerade in Norddeutschland, ist der Anteil der Windenergie sehr hoch und wird weiter zunehmen müssen, um die wegfallende Kernkraft zu kompensieren und seine Position als bedeutendste erneuerbare Energiequelle auszubauen.

Danksagungen

Zuerst möchte ich mich bei einigen Personen bedanken, welche mich bei dieser Bachelorthesis durch fachliches Wissen und mit anregender Kritik unterstützt haben.

Zuerst möchte ich mich bei einigen Personen bedanken, welche mich bei dieser Bachelorthesis unterstützt haben. Sei es durch fachliches Wissen, einen Hang zur Orthografie und Rechtschreibung oder mit anregender Kritik.

Unter anderem möchte ich Michel Stöver danken, der es geschafft hat, mich in kürzester Zeit in Abaqus einzuarbeiten und mir stets bei Fragen und ausweglosen Situationen zur Seite stand. Dann wäre dort Gebhard Schmidt, der ebenso wie Michel mir stets bei Fragen und Problemen bzgl. Abaqus half. Dann möchte ich dem IT-Team von Sogclair Hamburg, im besonderen Ufuk Yurtcan danken, die stets Abaqus wieder zum Laufen brachten, wenn der Lizenzserver in Frankreich wieder ausfiel.

Dr. Eckhard Neise möchte ich dafür danken, dass er mich stets mit aktueller Literatur und Hinweisen versorgte und dass er die Idee für diese interessante Bachelorthesis hatte.

Des Weiteren möchte ich mich bei Prof. Frank Ihlenburg und Dr. Patrick Mehmert bedanken, die mir stets bei Fragen zur Seite standen und so halfen, diese Bachelorthesis abzuschließen.

Schlussendlich möchte ich mich bei meiner Freundin Svea Ohlzen und meinen Eltern bedanken, welche mich stets während meines Studiums unterstützt und ermutigt haben.

Kurzfassung

Diese Bachelorthesis ist eine weiterführende Untersuchung einer vorangegangenen Diplomarbeit, welche die Eignung von verschiedenen Hybridlaminaten eines Rotorblatts untersucht. Als Hybridlaminat werden Verbundmaterialien bezeichnet, die über mindestens zwei verschiedene Fasertypen verfügen. Das sind z. B. Glas- und Metallfasern.

Wurde bislang eine analytische Untersuchung durchgeführt, sollen nun Untersuchungen mittels der Finiten-Elemente-Methode vorgenommen werden und der Rotorblattanschluss auf Festigkeit und Steifigkeit untersucht werden.

Wie in der Diplomarbeit von Dipl. Ing. Oliver Scheidt, mit dem Titel „Alternative Konzepte für den Blattanschluss einer Windenergieanlage auf Basis von Hybridlaminaten“, wird der Rotorblattanschluss EU90.2300-2 der Firma EUROS als Untersuchungsobjekt verwendet. Sollte ein Hybridlaminat wie von Scheidt vorgeschlagen nicht möglich sein, sollen alternative Vorschläge in Betracht gezogen und untersucht werden.

Abstract

This Bachelor thesis is a continuative analysis of the connection section from a wind-turbine-blade with the use of hybrid laminates. Hybrid laminates are composite materials which are made out of at least two different fiber materials. For example glass- and metal fibers. The diploma thesis by Dipl. Ing. Oliver Scheidt, this thesis is based on, was analyzing the possibility of hybrid laminates on a analytical basis and shall now advanced by the finite elements methods and analyzed on strength and elasticity.

Should be a hybrid laminate as proposed by Oliver Scheidt not been possible, alternative concepts should be made and analyzed.

As the diploma thesis by Scheidt, this research is based on the rotor-blade EU90.2003-2 from EUROS.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	16
2	Aufgabenstellung	17
3	Grundlagen.....	18
3.1	Windenergieanlagen	18
3.2	Von der Windmühle zur Windenergieanlage.....	18
3.2.1	Bauformen von Windenergieanlagen	20
3.2.2	Bedeutung von Windenergieanlagen.....	23
3.2.3	Der Blattanschluss	25
3.2.4	Wirkende Lasten auf ein Rotorblatt	30
3.3	Faserverbundwerkstoffe.....	34
3.3.1	Fasertypen.....	36
3.3.2	Die unidirektionale Schicht	39
3.3.3	Von der UD-Schicht zum Solidmodell.....	42
3.3.4	Festigkeit	43
3.3.5	Hybridlamine.....	44
3.4	Finite-Elemente-Methode.....	45
3.4.1	FEM als Hilfsmittel	46
3.4.2	Elementtypen.....	47
3.4.3	Kontakt.....	48
3.4.4	Aussagekraft einer FE-Analyse	50
4	Auslegung der Laminatschichten	51
4.1	Einleitung	51
4.2	Vorhandener Laminataufbau	51
4.3	Erste Auslegung mittels QMG.....	55
4.4	Einlamierte Stahlbleche.....	61
4.5	Auslegung mittels S-Glas	68
4.6	Auslegung mittels Carbonfasern	70
4.7	Festigkeit.....	71
4.8	Laminataufbau und Konzepte	73
5	Finite-Elemente-Methode	78
5.1	Geometrie.....	78
5.2	Aufbau und Vernetzung.....	80
5.3	Randbedingungen	83
5.3.1	Symmetrien und Lagerung	83

5.3.2	Belastungen.....	84
5.3.3	Kontakt.....	87
6	Auswertung.....	89
6.1.1	Laminatvariante 1.....	92
6.1.2	Laminatvariante 2.....	93
6.1.3	Laminatvariante 3.....	93
6.1.4	Laminatvariante 4.....	94
6.1.5	Laminatvariante 5.....	95
6.1.6	Laminatvariante 6.....	96
6.1.7	Laminatvariante 7.....	97
6.2	Zusammenfassung und Anmerkungen.....	98
7	Fazit und Zukunftsausblick.....	101
8	Literatur- und Quellenangaben.....	103
Anhang	105

Abkürzungen

WEA	Windenergieanlage
FKV	Faser-Kunststoff-Verbund
UD	Unidirektional
FEM	Finite-Elemente-Methode
MAG	Multiaxialgelege

Formelzeichen

<i>Zeichen</i>	<i>Bedeutung</i>	<i>Einheit</i>
A	Fläche	m ²
b	Breite	mm
d	Durchmesser	mm
e	Bruchdehnung	-
d	Durchmesser	mm
E	Elastizitätsmodul	N/mm ²
F	Kraft	N
g	Dehngrenze	-
G	Schubmodul	N/mm ²
h	Höhe des Blattanschlusses	mm
m	Masse	kg
m/A	Flächenbezogene Masse	kg/m ²
M	Drehmoment	Nm
n	Drehzahl	1/s
n	Fluss	N/mm
P	Leistung	W
r	Radius	m
S	Sicherheit	-
t	Dicke	mm
u	Umfangsgeschwindigkeit	m/s
v	Reibkoeffizient, Geschwindigkeit	- , m/s
V	Volumen	mm ³
x,y,z	Laufkoordinaten, Strecken	mm
v	Querkontraktionszahl	-
Δ	Differenz	-
ρ	Dichte	t/mm ³
ω	Winkelgeschwindigkeit	rad/s
λ	Schnelllaufzahl	-
σ	Spannung/Druck	N/mm ²

Tabelle 1: Verwendete Formelzeichen

Indizes

11	In Schuss- /Längsrichtung
22	In Kett- /Querrichtung
33	Orthogonal zu 11 und 33 / In Quer-Quer-Richtung
12	Schub
A	Betrieb
d	Druck
draht	Draht
f	Faser
G	Gravitation
kin	kinetisch
L	Lufteinschluss
Lam	Laminat
m	Matrix
U	in Umfangsrichtung
S	Schub
SP	Schwerpunkt
V	Verbund
V	Vergleich
Vor	Vorspannung
Z	Zentrifugal
zul	zulässig

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Bockwindmühle um 1500 n. Chr. [Hau, 2008].....	19
Abbildung 2. Holländer-Mühle [Hau, 2008]	19
Abbildung 3: Schematische Darstellung einer modernen WEA [Hau, 2008].....	21
Abbildung 4: Windenergieanlagen mit vertikaler Drehachse [Hau, 2008]	22
Abbildung 5. Verschiedene Bauformen [Hau, 2008]	23
Abbildung 6: Aufwindkraftwerk[Hau, 2008]	23
Abbildung 7: Enercon E-126 im Bau [Enercon - Wikipedia, 2011]	24
Abbildung 8: Schlaufenanschluss der W-34 (1958), [Hau, 2008].....	26
Abbildung 9: Stahlflansch als Rotorblattanschluss (LM Windpower) [Hau, 2008].....	27
Abbildung 10: Einlamierte Stehbolzen der MOD-0 [Hau, 2008]	27
Abbildung 11: Einlamierte Hülsen (Bauart LM) [Hau, 2008].....	28
Abbildung 12,. Einlaminiertes Leichtbauflansch (Vestas V-39) [Hau, 2008].....	28
Abbildung 13: Querbolzenblattanschluss (MBB) [Hau, 2008]	29
Abbildung 14: Querbolzenanschluss (Schnittansicht) [Hau, 2008]	29
Abbildung 15: Zweireihiger Querbolzenanschluss [ENERCON, 2011]	29
Abbildung 16: Transport eines Rotorblatts [ENERCON, 2011]	29
Abbildung 17: Koordinatensystem einer WEA [Hau, 2008].....	30
Abbildung 18: Schub- und Umfangskräfte am Rotorblatt [Liersch, 2010]	31
Abbildung 19. Kräfte am Rotorblatt [Hau, 2008].....	31
Abbildung 20: Stromröhre einer WEA [Betzches Gesetz - Wikipedia, 2011]	32
Abbildung 21: instationäres Geschwindigkeitsprofil [Gasch, 2011].....	34
Abbildung 22: Schubkraftverteilung über Blattlänge [Hau, 2008].....	34
Abbildung 23: Schlagbiegemoment über Umlaufwinkel [Hau, 2008]	34
Abbildung 24: Tangentialkraftverteilung über Blattlänge [Hau, 2008]	34
Abbildung 25: Mikroskopische Aufnahme von Bambus [Schürmann, 2007].....	35
Abbildung 26: Einfluss des Faserdurchmessers auf die Festigkeit [Schürmann, 2007].....	36
Abbildung 27: Unidirektionale Schicht [Ehrenstein, 2006].....	39

Abbildung 28: Längsbetrachtung einer UD-Schicht [Schürmann, 2007]	40
Abbildung 29: Querbetrachtung einer UD-Schicht [Schürmann, 2007]	41
Abbildung 30: Bestimmung des Schubmoduls bei UD-Schichten [Nast, 2010]	41
Abbildung 31: reales und idealisiertes Modell [Klein, 2010]	45
Abbildung 32: Ablauf einer FEM-Berechnung [Klein, 2010]	47
Abbildung 33: Verteilung der Arbeitsschritte [Klein, 2010]	47
Abbildung 34: Knoten-zu-Oberfläche-Kontakt [Rust, 2011]	49
Abbildung 35: Knoten-zu-Oberflächen-Kontakt [Rust, 2011]	49
Abbildung 36: Punkt-zu-Oberflächen-Kontakt [Rust, 2011]	49
Abbildung 37: Oberfläche-zu-Oberfläche-Kontakt [Rust, 2011]	50
Abbildung 38: Quadratmaschengewebe: (Spörl KG)	55
Abbildung 39: Zugversuch des Quadratmaschengewebes in Schussrichtung (trocken)	56
Abbildung 40: Geometrie des QMG	58
Abbildung 41: FEM-Modell des QMG	60
Abbildung 42: FEM-Modell des Epoxidharzes	60
Abbildung 43: Randbedingungen am Verbund	60
Abbildung 44: Verformungen unter Belastung	60
Abbildung 45: FEM-Modell des QMG	61
Abbildung 46: Verformungen unter Belastung	61
Abbildung 47: Einlaminiertes Stahlblech	62
Abbildung 48: Randbedingen für E_{11} und E_{22}	65
Abbildung 49: Verformung für E_{11} und E_{22}	65
Abbildung 50: Randbedingen für E_{33}	65
Abbildung 51: Verformung für E_{33}	65
Abbildung 52: Randbedingen für v_{12} und v_{13}	65
Abbildung 53: Verformung für v_{12} und v_{13}	65
Abbildung 54: Randbedingen für v_{31} und v_{32}	65
Abbildung 55: Verformung für v_{31} und v_{32}	65
Abbildung 56: Faserorientierung [Scheidt, 2010]	73

Abbildung 57: gesamter Rotorblattanschluss	78
Abbildung 58: Geometrie für die Berechnung	78
Abbildung 59: Originalgeometrie des Querbolzens	79
Abbildung 60: vereinfachte Geometrie des Querbolzens	79
Abbildung 61: Maße des Dehnbolzens [Scheidt, 2010]	79
Abbildung 62: Maße des Querbolzens [Scheidt, 2010]	79
Abbildung 63: relevanter Bereich des Rotorblattanschlusses	80
Abbildung 64: Laminataufbau	81
Abbildung 65: MAG-Definition in Patran	82
Abbildung 66: Kennwerte des MAGs	82
Abbildung 67: Orientierung in Abaqus	82
Abbildung 68: Symmetrie in der Bolzenschnittebene	83
Abbildung 69: Symmetrie zwischen den Querbolzen	83
Abbildung 70: Kreisfläche für Vorspannkraft	85
Abbildung 71: Teilkreisring für Betriebskraft	85
Abbildung 72: Weg zur Initialisierung	86
Abbildung 73: Betriebskraft	86
Abbildung 74: Vorspannkraft	86
Abbildung 75: Übersicht des Models	86
Abbildung 76: Master Surface	87
Abbildung 77: Slave Surface	87
Abbildung 78: Kontakt	87
Abbildung 79: Kontakbedingungen	88
Abbildung 80: Kontakbedingungen	88
Abbildung 81: Spannungen im Zusammenbau	91
Abbildung 82: Spannungen im Rotorblattanschluss (Ursprungsaufbau)	91
Abbildung 83: Spannungen im Rotorblattanschluss (Laminatvariante 1)	92
Abbildung 84: Spannungen im Rotorblattanschluss (Laminatvariante 2)	93
Abbildung 85: Spannungen im Rotorblattanschluss (Laminatvariante 3)	94

Abbildung 86: Spannungen im Rotorblattanschluss (Laminatvariante 4).....	95
Abbildung 87: Spannungen im Rotorblattanschluss (Laminatvariante 5).....	96
Abbildung 88: Spannungen im Rotorblattanschluss (Laminatvariante 6).....	97
Abbildung 89: Spannungen im Rotorblattanschluss (Laminatvariante 7).....	98
Abbildung 90. Spannungsüberhöhungen	99
Abbildung 91. relative Sicherheit der einzelnen Laminatvariationen	99
Abbildung 92: Relative Steifigkeit verschiedener Hybridlamine	100
Abbildung 93: relative Steifigkeiten der Laminatvarianten	100
Abbildung 94: Datenblatt des zugrunde liegenden Rotorblatts	105
Abbildung 95: Datenblatt des verwendeten Epoxidharzes	106
Abbildung 96: Prüfprotokoll Quadratmaschengewebe in Schussrichtung.....	107
Abbildung 97: Prüfprotokoll Quadratmaschengewebe in Kettrichtung	108

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Verwendete Formelzeichen.....	8
Tabelle 2: Entwicklung der weltweit installierten Nennleistung [Windenergie, 2011].....	24
Tabelle 3: Verlauf der in Deutschland installierten Leistung [Ender, 2011].....	25
Tabelle 4: Vor- und Nachteile von FKV.....	35
Tabelle 5: Vergleich verschiedener Fasertypen.....	39
Tabelle 6: Korrelationskoeffizienten C_i	43
Tabelle 7: Korrelationskoeffizienten C_i^d	44
Tabelle 8: mögliche Elementtypen in Abaqus [SIMULIA, 2009].....	47
Tabelle 9: Kennwerte für E-Glas und Epoxidharz.....	53
Tabelle 10: Kennwerte der E-Glas-Lamine.....	54
Tabelle 11: Lagenaufbau des ursprünglichen Verbundes [Scheidt, 2010].....	54
Tabelle 12: Geometriebezeichnungen am QMG.....	55
Tabelle 13: Materialkennwerte (1.4401 , CeTePoX).....	63
Tabelle 14: Kennwerte des einlaminieren Stahlblechs (analytisch).....	64
Tabelle 15: E-Moduln des einlaminieren Stahlblechs nach FEM.....	66
Tabelle 16: Querkontraktionszahlen des einlaminieren Stahlblechs nach FEM.....	66
Tabelle 17: Schubmoduln des einlaminieren Stahlblechs nach FEM.....	66
Tabelle 18: Vergleich der Kennwerte zwischen FEM und analytischer Betrachtung.....	67
Tabelle 19: Kennwerte für S-Glas und Epoxidharz.....	68
Tabelle 20: Kennwerte der S-Glas-Lamine.....	69
Tabelle 21: Kennwerte für C-Fasern und Epoxidharz.....	70
Tabelle 22: Kennwerte der C-Faser-Lamine.....	71
Tabelle 23: Festigkeitswerte von verschiedenen Stählen.....	72
Tabelle 24: Laminatvariante 1 - nur S-Glas.....	74
Tabelle 25: Laminatvariante 2 - $90^\circ/\pm 45^\circ$ mit Stahlblechen.....	74
Tabelle 26: Laminatvariante 3 – Stahlbleche in den Schichten 6-16-26-...-96.....	75
Tabelle 27: Laminatvariante 4 - $0^\circ/\pm 45^\circ$ mit S-Glas.....	76

Tabelle 28: Laminatvariante 5 - $0^\circ/\pm 30^\circ$ mit S-Glas	76
Tabelle 29: Laminatvariante 6 – $0^\circ/\pm 45^\circ$ mit C-Faser	77
Tabelle 30: Laminatvariante 7 - $0^\circ/\pm 30^\circ$ mit C-Faser	77
Tabelle 31: Auswertung des Ursprungsaufbaus (Laminatvariante 0)	111
Tabelle 32: Auswertung Laminatvariante 1	113
Tabelle 33: Auswertung Laminatvariante 2	115
Tabelle 34: Auswertung Laminatvariante 3	118
Tabelle 35: Auswertung Laminatvariante 4	120
Tabelle 36: Auswertung Laminatvariante 5	122
Tabelle 37: Auswertung Laminatvariante 6	125
Tabelle 38: Auswertung Laminatvariante 7	127

1 Einleitung

Durch das starke Anwachsen der Windenergieanlagen auf bis zu 7,5 MW Nennleistung steigen auch die Belastungen am Rotorblatt enorm an, so dass die bisherigen Werkstoffe an Ihre Grenzen gelangen. Faserverbundstoffe, die bei den Rotorblättern hauptsächlich zum Einsatz kommen, verfügen aus Kostengründen vorwiegend über Glasfasern. Carbonverstärkte Kunststoffe sind auf Grund der hohen Kosten noch die Ausnahme, müssen aber gerade bei großen Leistungen immer häufiger eingesetzt werden, um genügend Stabilität zu gewährleisten.

Um den Belastungen weiterhin standhalten zu können, ist es erforderlich, Neuerungen in der Werkstoffauswahl einzuführen. Im Gespräch sind hierbei die Hybridlamine. Durch gezieltes Verstärken durch z.B. Carbonfasern können die Belastungen besser aufgefangen und die Steifigkeit der Bauteile gewährleistet werden. Die hohen Kosten jedoch bleiben. Deswegen sollen verschiedene Hybridlamine untersucht werden, um die Kosten zu senken aber die Steifigkeit zu erhöhen.

Der Untersuchungsgegenstand dieser Bachelorthesis ist der Rotorblattanschluss, welcher mittels Quer- und Dehnbolzen verwirklicht ist. Dieser verbindet das Rotorblatt mit der Nabe der Windenergieanlage.

2 Aufgabenstellung

Im Rahmen der Arbeit soll ein Hybrid-Laminat-Blattanschluss einer Windenergieanlage bzgl. seiner Steifigkeit und Festigkeit ausgelegt und nachgewiesen werden.

Diese alternative Blattanschlussart wird zurzeit noch nicht bei realen Windenergieanlagen eingesetzt. Der Einsatz so genannter Hybrid-Lamine, z.B. bestehend aus Lagen faserverstärkten Kunststoffs und aus Metall, hat das Ziel, die Steifigkeit und Festigkeit zu erhöhen und damit eine Laminatschicht-, Bolzenanzahl- und ggf. Kostenreduktion im Anschlussbereich zu erzielen.

Erste Grundlagen bzgl. der Machbarkeit wurden bereits im Rahmen einer Diplomarbeit an der HAW in Kooperation mit SOGECLAIR geschaffen. Dazu wurden erste analytische Betrachtungen durchgeführt. Darauf aufbauend soll das mechanische Verhalten eines solchen Anschlusses nun mit Hilfe eines detaillierten Finite Elemente Modells nachgewiesen werden. Ziel ist es, den Anschluss so auszulegen, dass eine möglichst hohe Steifigkeit bei ausreichender Festigkeit erreicht wird, um allgemein kleinere bzw. höher belastbare Anschlüsse realisieren zu können. Mögliche Auslegungs-Parameter können dabei die gewählten Materialien, der Lagenaufbau und die Bolzenabmessungen sein.

Auf Basis der gewonnenen Ergebnisse soll nach Möglichkeit auch eine Aussage zur Lebensdauer des Blattanschlussbereichs abgeleitet werden.

3 Grundlagen

In diesem Kapitel werden Grundlagen vermittelt, welche für das bessere Verständnis dieser Bachelorthesis von Bedeutung sind. Nach einem kurzen Einblick in die Geschichte der Windenergieanlagen und deren Bedeutung in der heutigen Zeit, geht es weiter zu den Faserverbundwerkstoffen und den Möglichkeiten und Grenzen der analytischen Berechnung von Festigkeits- und allgemeinem Materialwerten, mittlerweile eine immer größere Bedeutung in der Materialauswahl spielen und letztendlich zu einer kurzen Einführung der Finiten Elemente Methode.

3.1 Windenergieanlagen

Bevor genauer auf den Blattanschluss einer Windenergieanlage eingegangen wird, sollte vorerst die allgemeine Entwicklung und Geschichte der Windenergieanlagen beschrieben werden, da dies ein sehr interessantes Gebiet der Technik umfasst und wichtig für das Verständnis der einzelnen Systeme einer Windenergieanlage ist.

3.2 Von der Windmühle zur Windenergieanlage

Der Weg von der Windmühle bis zur Windenergieanlage war lang. Über den genauen Ursprung der Windmühle sind sich Historiker nicht einig. Einige behaupten, die ersten Windmühlen entstanden vor rund 3000 Jahren in Ägypten, wirklich beweisen konnte dies jedoch bisher niemand. Einig ist man sich jedoch, dass bereits im Jahr 644 eine Windmühle in Seistan, dem persisch-afghanischen Grenzgebiet, existierte.

Die ersten Windmühlen in Europa werden um das Jahr 1180 erwähnt und verbreiten sich schnell von der Normandie über Ost- und Nordeuropa bis nach Russland und Finnland. Im 13. Jahrhundert sind bereits viele sogenannte Bockwindmühlen in Deutschland anzutreffen. [Hau, 2008]

Die Bockwindmühlen verfügen im Gegensatz zu den ersten Windmühlen in Seistan, über eine horizontale Drehachse, sind auf einem großen Holzpflöck drehbar gelagert und können „in den Wind gedreht“ werden.

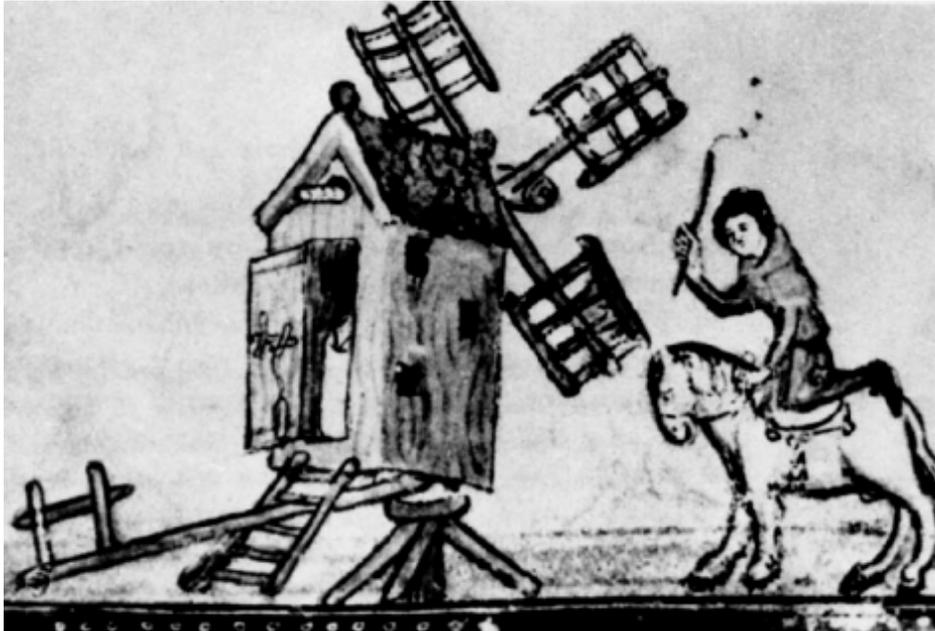


Abbildung 1: Bockwindmühle um 1500 n. Chr. [Hau, 2008]

Wenige Jahrhunderte später, im 17. Jahrhundert, gab es eine weit reichende Weiterentwicklung in Holland. Die so genannte „Holländer-Mühle“ verfügte über ein steinernes Fundament und der Kopf der Mühle konnte entsprechend des Windes ausgerichtet werden. Auf Grund der nun deutlich geringeren notwendigen Kraft, ist es auch möglich, diese Nachführung mittels eines zweiten Windrades automatisch in Gang zu setzen – die Windrichtungsnachführung war geboren.



Abbildung 2. Holländer-Mühle [Hau, 2008]

Zwischen dem Bau des ersten Kraftwerks und der Umwandlung von Wind in Strom vergingen nur sieben Jahre. 1891 baute der Däne Poul La Cour in Askov (Dänemark) die erste Versuchsanlage einer Windenergieanlage. Es folgten weitergehende Versuche und eine größere Versuchsanlage.

Die Entwicklung in den folgenden Jahren ging schnell voran. Wurden Windenergieanlagen anfangs hauptsächlich in abgelegenen Gegenden errichtet um hier z.B. Pumpen oder ähnliches anzutreiben, starteten weltweit verschiedene Versuchsanlagen, wie unter anderem der Aeromotor von Smidth in verschiedenen Variation zwischen 50 und 70 kW in den 40er Jahren. Bereits 1931 wurde Balaklava eine 100-kW-Anlage von der UdSSR installiert. 1941 kam es zu einem Sprung in der Nennleistung von Windenergieanlagen: In Vermont (USA), wurde nach jahrelanger Planung die Smith-Putnam-Anlage errichtet. Mit einem Rotordurchmesser von 53,3 m, einer Turmhöhe von 35,6 m und einer Nennleistung von 1250 kW die mit Abstand größte WEA bisher. Diese war rund vier Jahre in Betrieb. Auf Grund nicht ausreichender Geldmittel wurden nach einem Rotorblattbruch diese Versuche beendet.

Nach dem Zweiten Weltkrieg geriet die Entwicklung der WEAs etwas ins stocken, da die Kosten für Kohle und Öl wieder stark sanken. Es folgten somit vorerst kleinere Anlagen, welche mehr oder weniger erfolgreich waren.

In den 60ern wurden in Frankreich zwei Anlagen mit 800 kW und 1000 kW Leistung errichtet. Auch in Deutschland wurden verschiedene Versuchsanlagen errichtet. So unter anderem die W34 von Hütter mit einer Nennleistung von 100 kW. Die wirkliche Neuerung war hier die Verwendung von Faserverbundwerkstoffen für die Rotorblätter. Der Anschluss an die Nabe wurde mittels des Schlaufenanschlusses realisiert. (siehe Abbildung 8)

Nach der Energiekrise in den 70iger Jahren erhielt die Windenergie wieder einen Aufschwung. Zwischen 1975 und 1987 wurden mehrere Versuchsanlagen in den USA erprobt. Die MOD-0 bis MOD-5 erreichten eine Nennleistung von 200 kW bis 3.200 kW. In Deutschland wurde 1982 GROWIAN (Große Windkraft Anlage) mit einer Nennleistung von 3000 kW errichtet. Auch in anderen Ländern wie unter anderem Dänemark, Schweden und Frankreich wurden stets neue Versuchsanlagen errichtet. In den USA wurden in den 80iger Jahren die ersten Windparks erbaut.

3.2.1 Bauformen von Windenergieanlagen

Letzten Endes haben sich überwiegend Windenergieanlagen mit horizontaler Drehachse durchgesetzt. Es gibt jedoch eine Vielzahl anderer Bauformen, die im Anschluss kurz vorgestellt werden.

Windenergieanlagen mit horizontaler Drehachse

Windenergieanlagen mit horizontaler Drehachse haben sich letztendlich durchgesetzt und sind heute Standard in der wirtschaftlichen Nutzung des Windes. Waren anfangs auch Anlagen mit einem oder zwei Rotorblättern vertreten, so hat sich schließlich der Dreiblattrotor durchgesetzt. Die Kosten sind zwar höher, aber die Belastungen auf den Triebwerksstrang sind deutlich geringer.

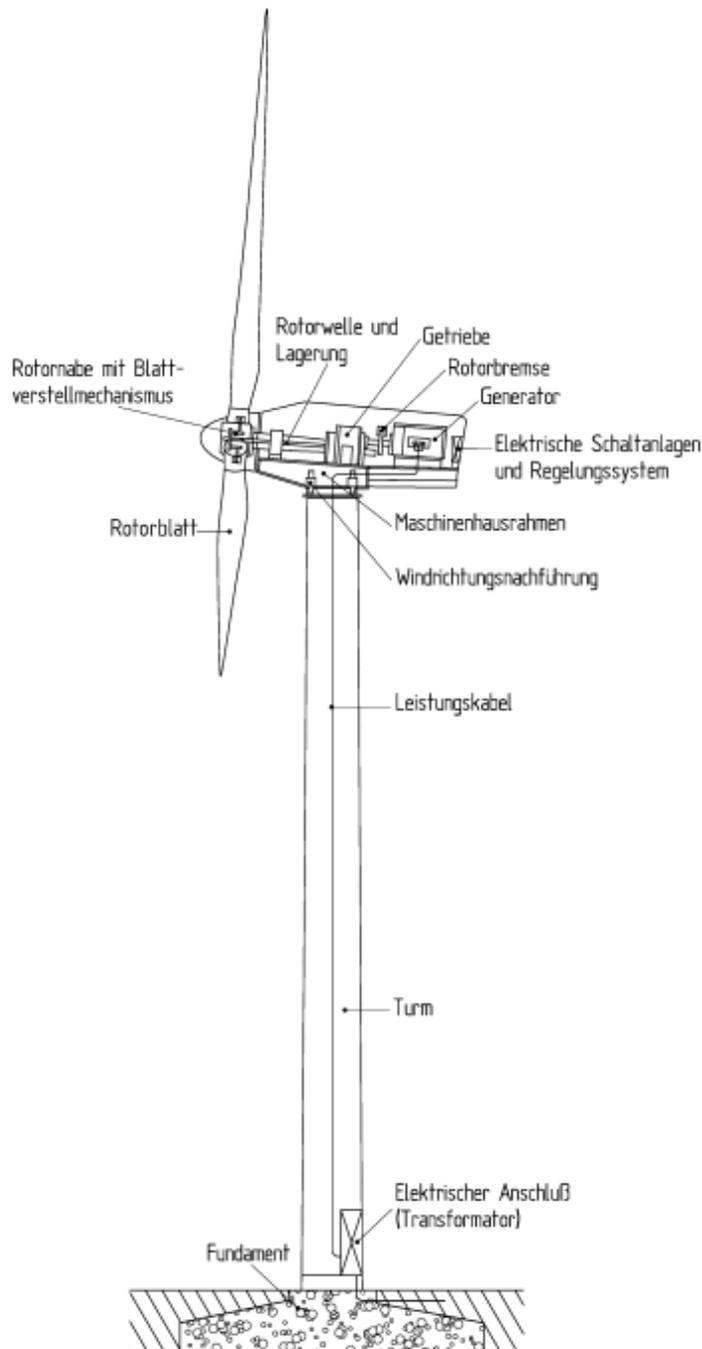


Abbildung 3: Schematische Darstellung einer modernen WEA [Hau, 2008]

Windenergieanlagen mit vertikaler Drehachse

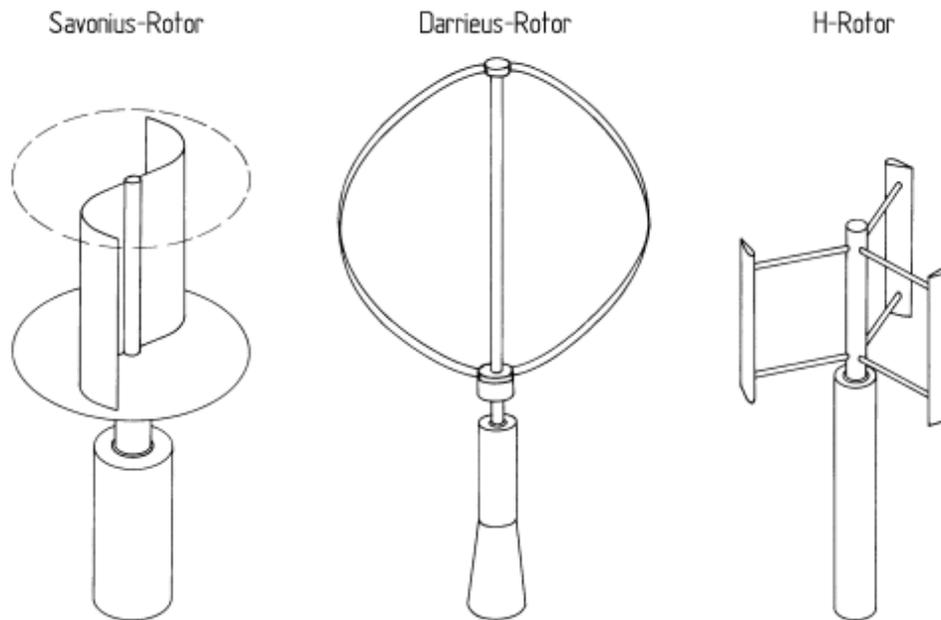


Abbildung 4: Windenergieanlagen mit vertikaler Drehachse [Hau, 2008]

Windenergieanlagen mit vertikaler Drehachse für größere Nennleistungen konnten sich nie durchsetzen. Lediglich für kleinere Anlagen, wie z.B. den Betrieb von kleinen Wasserpumpen, kommt manchmal ein Savoniusrotor zum Einsatz. Ebenso kommt dieser Typ bei Windgeschwindigkeitsmessungen zum Einsatz. Der maximale Leistungsbeiwert von etwa 0,25 macht diesen Typ jedoch für große Leistungen nicht rentabel.

Auch Abwandlungen wie der H-Rotor oder der Darrieus-Rotor kamen nicht über kleine Versuchsanlagen hinaus, so dass diese nicht für die Nutzung im größeren Leistungsbereich von Interesse sind.

Sonderformen

Neben den mehr oder weniger üblichen Varianten einer Windenergieanlage gibt es besondere Bauformen, die es meist nicht über Prototypen oder Modelle hinaus geschafft haben.

So wurde mittels einer Ummantelung versucht, welche für eine höhere Windgeschwindigkeit in der Rotorebene sorgt, den maximalen Wirkungsgrad einer WEA von 0,59 zu erhöhen. Bei einer Mantelturbine war somit ein maximaler Wirkungsgrad von 66% möglich. Eine andere Variante mit einem Diffusor statt einem Trichter wurde sogar ein Wirkungsgrad von rund 75% erreicht. Der hohe Bauaufwand und das Gewicht machen dies allerdings nicht rentabel und bis auf experimentelle Untersuchungen gab es keine weiteren Anlagen dieses Typs. [Hau, 2008]

Ein weiteres Konzept, welches auch keine nennenswerten Erfolge brachte, war die Überlagerung der Nachströmungen einer WEA mit äußeren Winden, so dass dort ein

Unterdruck durch Turbulenzen entsteht und dadurch die Luft förmlich ansaugen sollen. Experimente führten jedoch nicht zu dem gewünschten Erfolg.

In den 80er Jahren entstand ein Aufwindkraftwerk als Versuchsanlage. Durch Sonnenstrahlen wird Luft unter einem großflächigen Kollektordach erwärmt und steigt durch einen Kaminturm nach oben. In diesem Turm befindet sich eine Luftturbine. Die in Spanien errichtete deutsche Versuchsanlage hatte bei einer Kollektorfläche von 49.000 m² eine Leistung von 50 kW.

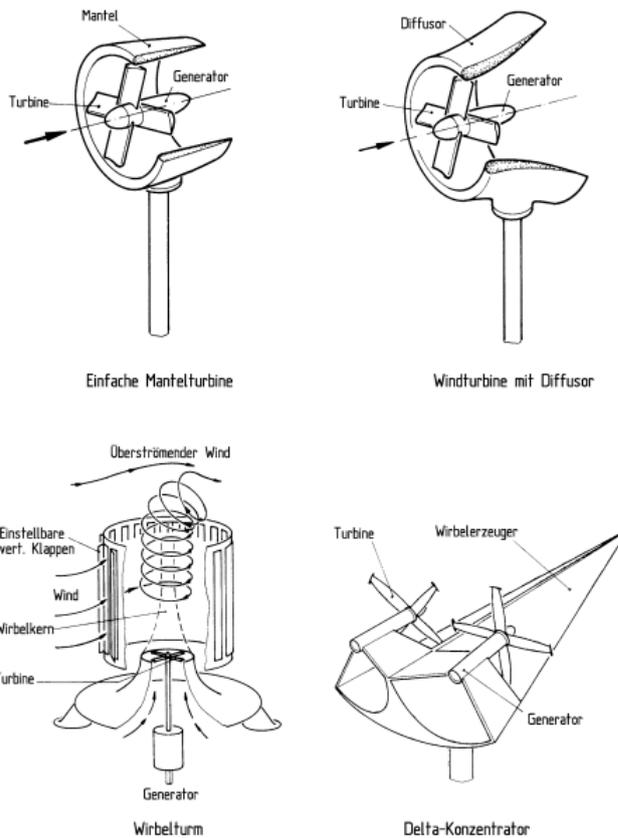


Abbildung 5. Verschiedene Bauformen [Hau, 2008]

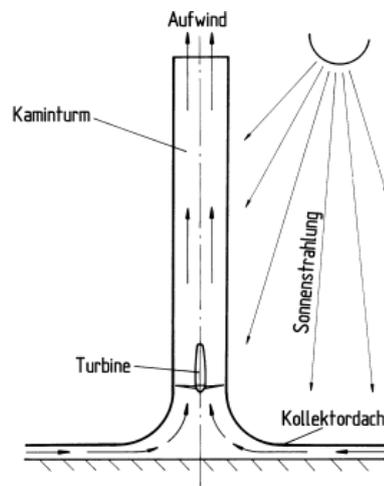


Abbildung 6: Aufwindkraftwerk [Hau, 2008]

3.2.2 Bedeutung von Windenergieanlagen

Nach dem langen Für und Wider bezüglich des Atomausstiegs, werden die Windenergieanlagen weiter in den Fokus der Energiekonzerne rücken. Bereits in den vergangenen Jahren ist der Aufbau von Windenergieanlagen in Deutschland und weltweit, besonders in der Volksrepublik China, enorm angestiegen.

Weltweit gab es einen Zuwachs von rund 179.230 MW an installierter Anlagenkapazität innerhalb von zehn Jahren, was einem Wachstum von ca. 1130 % entspricht. Im gleichen Zeitraum stieg die installierte Leistung in Deutschland von 6.097 MW auf 27.214 MW an. Dies entspricht einem Zuwachs von rund 446%. Bis 2020 soll die installierte Leistung nach

Vorgabe der Bundesregierung auf rund 45.800 MW ansteigen. In den vergangenen Wintermonaten gab es einen erneuten Anstieg bei den erneuerbaren Energien. Dieser legte im Schnitt um sieben Prozentpunkte zu. Der Anteil der Windenergie lag hier bei sechs Prozent und wird nur von Pumpspeicherwerken übertroffen. [VDI Verlag, 2011]

Die durchschnittlich installierte Leistung je Anlage stieg, wodurch zwingend auch die Abmessungen einzelner Komponenten weiter zunahmen.

Die momentan leistungsstärkste WEA ist die Enercon E-126 mit einer Gesamthöhe von 198,5m und einem Rotordurchmesser von 127 m. Das Gewicht eines einzelnen Blattes beträgt rund 65 t. Die hier resultierenden Kräfte sind also enorm. Dieser Prototyp ist bisher nur in Magdeburg-Rothensee zu finden. Die E-126 mit 6 MW Leistung wurde jedoch bereits mehrfach installiert, unter anderem in Hamburg Altenwerder und in einem Windpark in Belgien mit elf installierten Windenergieanlagen des Typs E-126. [Enercon, 2010]



Abbildung 7: Enercon E-126 im Bau [Enercon - Wikipedia, 2011]

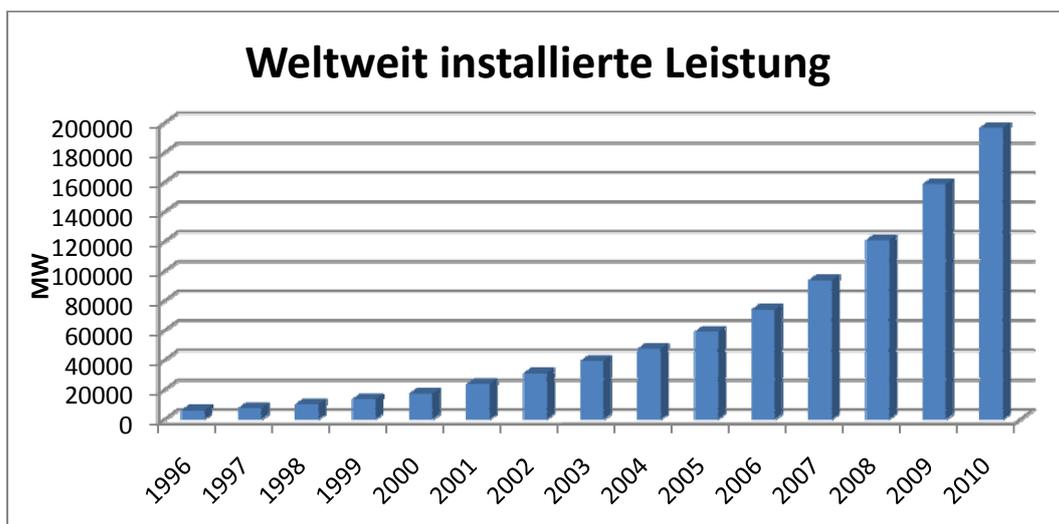


Tabelle 2: Entwicklung der weltweit installierten Nennleistung [Windenergie, 2011]

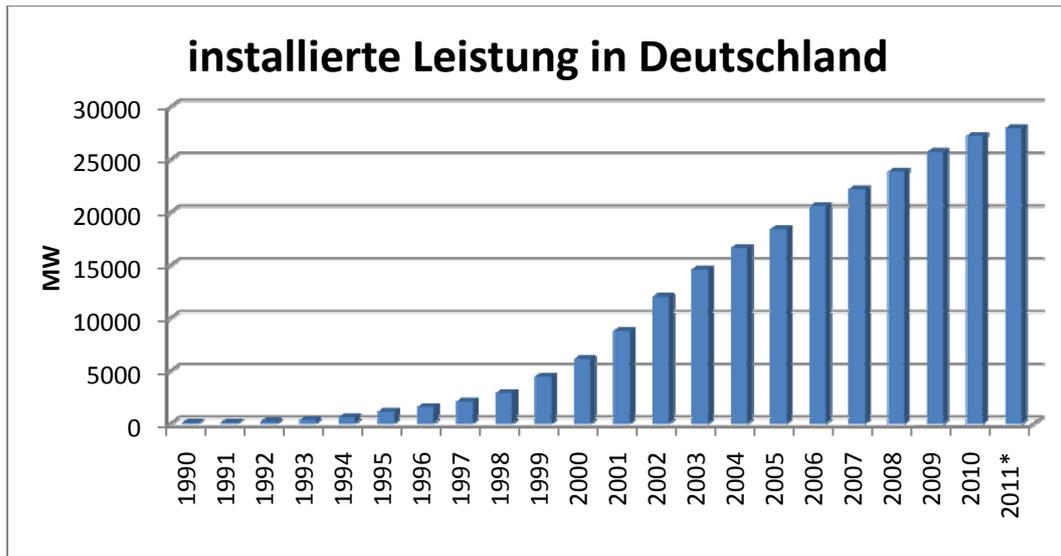


Tabelle 3: Verlauf der in Deutschland installierten Leistung [Ender, 2011]¹

3.2.3 Der Blattanschluss

Der Blattanschluss einer WEA hat mehrere Funktionen. Er verbindet die Rotorblätter mit der Nabe, muss jedoch auch eine Verstellung der Rotorblätter ermöglichen, so dass ein bestimmter Drehzahlbereich gefahren werden kann. Aufgrund der Blattverstellung werden die Profile des Rotorblatts je nach Windgeschwindigkeit verschieden angeströmt, so dass sich die Rotorblätter in Bewegung setzen. Da der Rotor direkt mit dem Antriebsstrang des Generators verbunden ist, war es in früheren Windenergieanlagen zwingend, eine konstante Drehzahl des Rotors sicherzustellen. Heutzutage ist aufgrund der sehr effektiven Transformatoren der Drehzahlbereich offen. Der Gesamtwirkungsgrad der WEA wird dadurch kaum beeinflusst. Eine bestimmte Drehzahl darf auf keinen Fall überschritten werden, da es sonst zu fatalen Schäden durch die Fliehkraft der sich zu schnell rotierenden Rotorblätter kommen kann. Aus diesem Grund werden heute aus Sicherheitsgründen neben der Blattverstellung auch eine oder mehrere Rotorbremsen installiert.

Der Blattanschluss bei Windenergieanlagen kann auf verschiedene Arten realisiert werden:

- Stahlflansch
- Schlaufenanschluss
- Einlamierte Stehbolzen
- Einlamierte Hülsen
- Einlaminierter Leichtbauflansch

¹ Stand: 30.06.2011

- Querbolzenanschluss

Bei den ersten Versuchsanlagen aus Stahl, wurden die Blattanschlüsse ebenfalls aus Stahl gefertigt, da hier das Gewicht noch keine wichtige Rolle spielte. Mit zunehmender Entwicklung der Windenergieanlagen wurden Faserverbundwerkstoffe verwendet, da das Gewicht eine wichtige Rolle spielte.

Die ersten Rotorblattanschlüsse aus Faserverbundwerkstoffen wurden mittels eines Schlaufenanschlusses realisiert. Bei einem Schlaufenanschluss werden die einzelnen Fasern schlaufenförmig um die einzelnen Anschlussbolzen des Rotorblatts gelegt und anschließend einlamiert. Die Fertigung war jedoch sehr aufwendig und teuer, deshalb konnte sich diese Variante nicht durchsetzen.

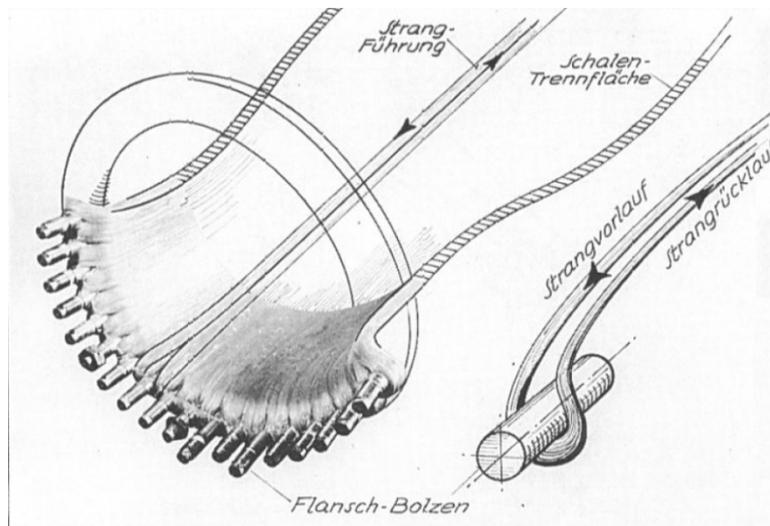


Abbildung 8: Schlaufenanschluss der W-34 (1958), [Hau, 2008]

Eine sehr einfache Variante des Rotorblattanschlusses ist ein Stahlflansch, der unter anderem bei LM Windpower verwendet wurde. Hier wird das Rotorblatt zwischen zwei Stahlflanschen mittels Bolzen fest eingespannt. Ein großer Nachteil war hier das sehr hohe Gewicht, das bis zu einem Drittel des Gesamtgewichts eines Rotorblattes beiträgt. Die Fertigungskosten lagen bei einem ähnlichen Anteil. [Hau, 2008]

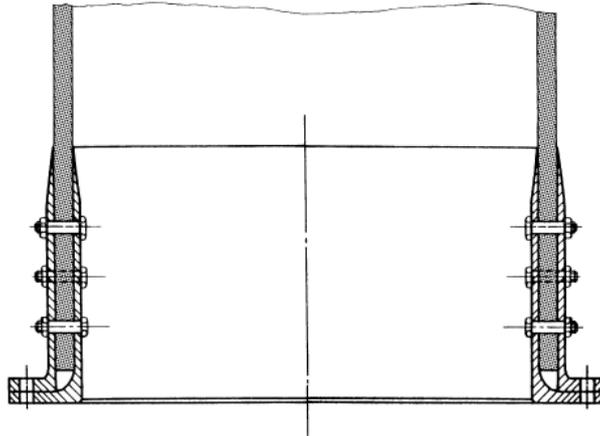


Abbildung 9: Stahlflansch als Rotorblattanschluss (LM Windpower) [Hau, 2008]

Trotz des sehr geringen Gewichts hat sich das direkte Einlaminieren von einzelnen Stehbolzen direkt im Rotorblatt nicht bewährt. Hierfür werden Bohrungen im Rotorblatt gesetzt und die einzelnen Bolzen, meist mittels Epoxidharz, direkt einlaminieren. Trotz der extremen Gewichtsersparnis, wird dieses Verfahren heutzutage zumindest bei seriengefertigten Windkraftanlagen nicht eingesetzt, da es auf jegliche metallische Kraftübertragungselemente verzichtet und als sehr riskant angesehen wird. [Hau, 2008]

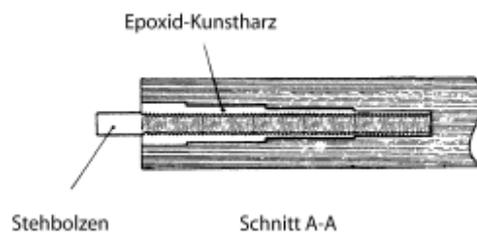


Abbildung 10: Einlamierte Stehbolzen der MOD-0 [Hau, 2008]

Eine durchaus sichere Variante ist die Verwendung von einlamierten Hülzen, welche heutzutage von LM Windpower eingesetzt wird, oder das Einlaminieren von einem Leichtbauflansch aus Aluminium, ein Verfahren das bei Vestas durchgeführt wird. Hier sind deutliche Gewichtersparnisse bei hoher Festigkeit gegeben. Letztere war bisher noch ausreichend, stößt jetzt jedoch an seine Grenzen. Zudem sind die Materialkosten bei der Aluminiumvariante gerade bei großen Anlagen relativ hoch.

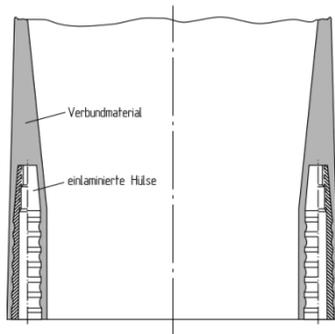


Abbildung 11: Einlamierte Hülse (Bauart LM) [Hau, 2008]

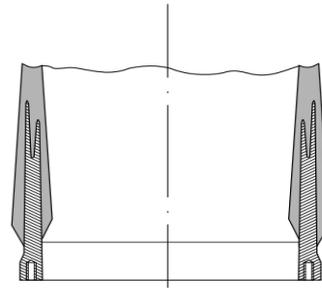


Abbildung 12: Einlaminierter Leichtbauflansch (Vestas V-39) [Hau, 2008]

Der momentan verbreitetste und im Hinblick auf Wirtschaftlichkeit zu bevorzugende Rotorblattanschluss, ist der Querbolzenanschluss, der in dieser Arbeit tiefergehend überprüft wird.

Bei dieser Anschlussart wird das Rotorblatt umlaufend mit Quer- und Längsbohrungen versehen. In den Querbohrungen werden die Querbolzen eingesetzt und durch die Längsbohrungen der Zuganker, meist ein Dehnbolzen, verschraubt. Nun kann die Nabe mittels Muttern fest verspannt werden.

Neben der einreihigen Variante, kam u. a. bei der Drei-Megawatt-Anlage E-101 von Enercon eine zweireihige Variante des Querbolzenanschlusses zum Einsatz, wie in Abbildung 15 zu erkennen ist.

Im Sprachgebrauch wird diese Anschlussart auch als IKEA-Anschluss bezeichnet.



Abbildung 13: Querbolzenblattanschluss (MBB)
[Hau, 2008]

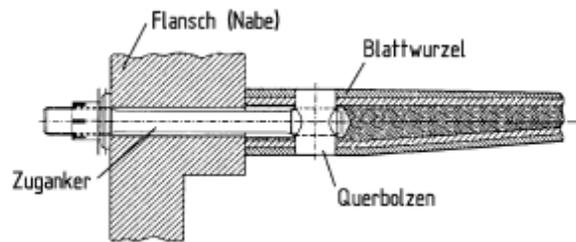


Abbildung 14: Querbolzenanschluss (Schnittansicht)
[Hau, 2008]



Abbildung 15: Zweireihiger Querbolzenanschluss
[ENERCON, 2011]



Abbildung 16: Transport eines Rotorblatts [ENERCON,
2011]

Ein sehr wichtiger Punkt, der zunehmend den Blattanschluss betrifft, ist der Transport von Windenergieanlagen. War eine Zeitlang nur die Länge der Rotorblätter der kritische Faktor beim Transport, ist dies mittlerweile die Höhe des Rotorblatts wie z. B. bei der Unterführung durch Brücken. Bei immer größer werdenden WEA ist der Blattanschluss so großen Lasten ausgesetzt, dass dadurch der Durchmesser immer weiter zunimmt. Es ist zwar möglich das gesamte Rotorblatt so zu drehen, dass die Profiltiefe des Rotorblatts nicht mit der Unterführung kollidiert, jedoch wird langsam der Punkt erreicht, bei dem der zylindrische Teil des Blattanschlusses die Unterführungen nicht mehr passieren kann. Somit ist auch eine Verringerung des Durchmessers bei gleich bleibender Festigkeit und Steifigkeit ein sehr wichtiger Punkt in der Entwicklung des Rotorblattanschlusses.

3.2.4 Wirkende Lasten auf ein Rotorblatt

Die Bestimmung der angreifenden Lasten auf eine WEA ist genauso umfangreich wie vielfältig. Auf Grund dauernder wechselnder Belastungen, herrschen hier hoch dynamische Lasten vor, welche nur schwer zu erfassen sind. Wegen der häufig wechselnden Belastungen ermüden die Werkstoffe recht schnell, was eine genaue Betrachtung der Lasten unabdingbar macht. Die realen Lasten können jedoch nie in ihrer gesamten Komplexität erfasst werden.

In der Regel werden WEA für eine Lebensdauer von 20 – 30 Jahren ausgelegt. Für Biegewechsellastmomente um die Blattschwenkachse bedeutet dies z.B. eine Zyklenanzahl zwischen 10^7 und 10^8 . [Hau, 2008]

Da es für Windenergieanlagen bisher keine Norm für die Bezeichnungen und Lage von Koordinaten in Windenergieanlagen durchgesetzt hat, wird sich hier an [Hau, 2008] orientiert. So werden drei Koordinatensysteme an einer WEA eingeführt:

- Ein Koordinatensystem im Fuß der gesamten Windenergieanlage
- Ein Koordinatensystem im Rotormittelpunkt
- Sowie ein Koordinatensystem entlang jeden Rotorblattes

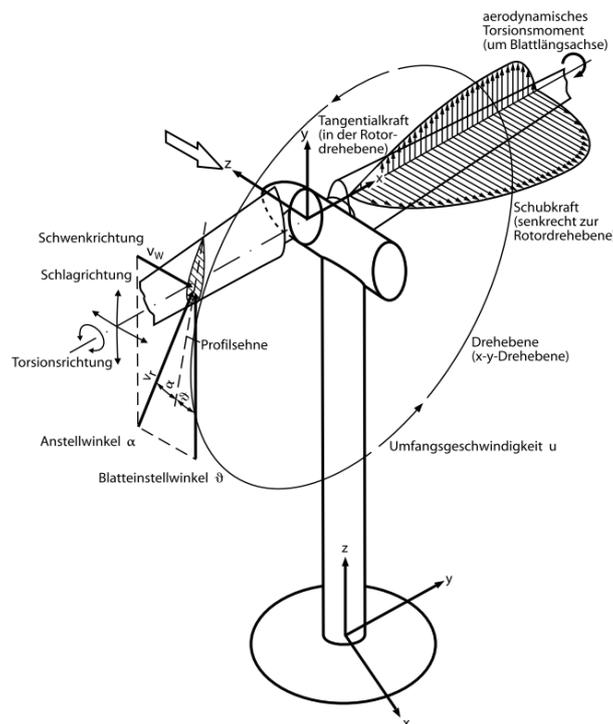


Abbildung 17: Koordinatensystem einer WEA [Hau, 2008]

Die wirkenden Belastungen auf eine WEA sind die folgenden:

- Das Eigengewicht
- Zentrifugalkräfte
- Kreiselkräfte

- Windkräfte

Die Belastungen welche durch das **Eigengewicht** resultieren sind grundsätzlich für alle Komponenten einer WEA von Bedeutung. Erhöhte Bedeutung hat diese jedoch auf die Rotorblätter, da diese während der Drehung um die Rotorachse wechselnde Biegemomente um die Schwenkachse in den Rotorblättern erzeugt. Wegen der hohen Anzahl der Zyklen über die Lebensdauer einer WEA, wird somit das Eigengewicht zu einer für die Dimensionierung entscheidenden Belastung, deshalb rückt die Reduzierung des Eigengewichts immer weiter in den Vordergrund und Faserverbunde mit Carbonfasern sind für sehr große WEA kaum noch verzichtbar.

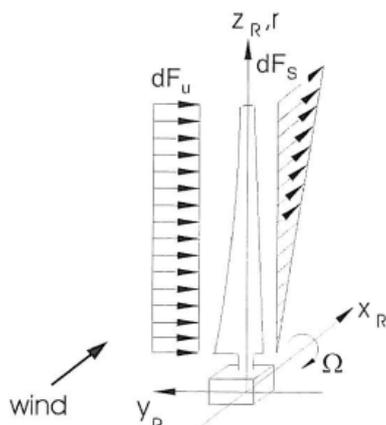


Abbildung 18: Schub- und Umfangskräfte am Rotorblatt [Liersch, 2010]

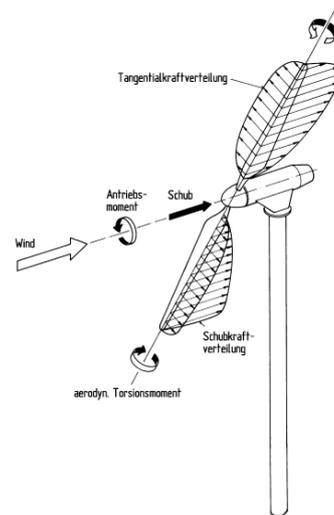


Abbildung 19. Kräfte am Rotorblatt [Hau, 2008]

Zentrifugalkräfte entstehen durch die Rotation einer Masse auf einer kreisförmigen Umlaufbahn. Die Zentrifugalkraft ist proportional zum Quadrat der Winkelgeschwindigkeit ω . Da Windenergieanlagen nur mit einer geringen Drehzahl betrieben werden, ist die Zentrifugalkraft von eher untergeordneter Bedeutung.

$$\vec{F}_Z = \omega^2 \cdot m \cdot r_{SP} \quad \text{mit} \quad \omega = 2 \cdot \pi \cdot n \quad \text{folgt} \quad \vec{F}_Z = 4 \cdot \pi^2 \cdot n^2 \cdot m \cdot r_{SP}$$

Kreiselkräfte treten dann auf, wenn der Turm der WEA bei laufendem Rotor dem Wind nachgeführt wird. Die entstehenden Biegebeanspruchungen, welche auf die Rotorblätter wirken, sind proportional abhängig von der Windnachführungsgeschwindigkeit.

Die **Windkräfte**, welche auf eine Windenergieanlage, hauptsächlich auf den Rotor, wirken, können weiter unterteilt werden.

Hierfür wird zuerst das Gesetz von Betz hergeleitet und erläutert.

Betrachtet wird hierbei eine Stromröhre, welche vor der Rotorebene S mit der Geschwindigkeit v_1 beginnt und dahinter mit der Geschwindigkeit v_2 austritt.

Nach der Kontinuitätsgleichung gilt:

$$v_1 \cdot \rho_1 \cdot A_1 = v_2 \cdot \rho_2 \cdot A_2 = v_3 \cdot \rho_3 \cdot A_3$$

Da sich der Druck nur geringfügig ändert, kann die durchströmende Luft als inkompressibel angenommen werden. Die kinetische Leistung, die in Ebene 1 vorherrscht beträgt:

$$\dot{E}_{kin,1} = \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot v_1^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_1 \cdot v_1^3 \quad \text{oder für die Ebene } i: \dot{E}_{kin,i} = \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot v_i^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_i \cdot v_i^3$$

Die Differenz von Ebene 2 und 1 stellt hierbei die dem Wind entnommene Leistung dar.

$$\dot{E}_{Wind} = \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot (v_1^2 - v_3^2)$$

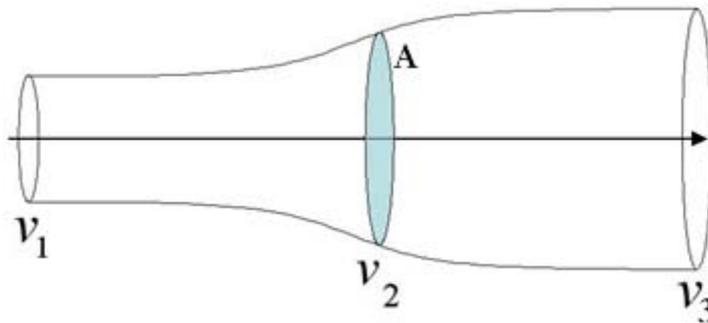


Abbildung 20: Stromröhre einer WEA [Betzches Gesetz - Wikipedia, 2011]

Die maximale Leistung kann dem Wind dann entnommen werden, wenn die Geschwindigkeit v_2 auf ein Drittel von v_1 verzögert wird. Hier liegt der Wirkungsgrad bei knapp 60%.

Dieser Faktor ist auch als Betz-Faktor bekannt.

Es gilt also für die Leistung, welche dem Wind entnommen werden kann:

$$P = \dot{E}_{Wind} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^3 \cdot c_p \quad \text{mit } c_p = \frac{16}{27} = 0,59$$

Es kann nun die Gesamtumfangskraft ermittelt werden, die am Rotor angreift.

Es gelten folgende Beziehungen: $P = M \cdot 2 \cdot \pi \cdot n$, $M = \vec{F}_U \cdot \frac{R}{2}$

$$\vec{F}_U = M \frac{2}{R} = \frac{P}{2 \cdot \pi \cdot n} \cdot \frac{2}{R} = \frac{P}{\pi \cdot n} \cdot \frac{1}{R} = \frac{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^3 \cdot c_p}{\pi \cdot n} \cdot \frac{1}{R} \quad \text{mit Einführung der Schnelllaufzahl}$$

$$\lambda = \frac{u}{v_1} \quad \text{folgt } \vec{F}_U = \frac{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^2 \cdot c_p \cdot u}{\pi \cdot n \cdot \lambda} \cdot \frac{1}{R}. \quad \text{Mit } u = \omega \cdot R = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot R \quad \text{ergibt sich die gesamte}$$

$$\text{Umfangskraft zu: } \vec{F}_U = \frac{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^2 \cdot c_p \cdot 2 \cdot \pi \cdot n \cdot R}{\pi \cdot n \cdot \lambda} \cdot \frac{1}{R} = \frac{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^2 \cdot c_p \cdot 2}{\lambda} = \frac{\rho \cdot A \cdot v_1^2 \cdot c_p}{\lambda}$$

Für eine Windenergieanlage mit drei Rotorblättern, ergibt sich die **Umfangskraft** des einzelnen Rotorblatts zu:

$$\vec{F}_U = \frac{\rho \cdot A \cdot \vec{v}_1^2 \cdot c_p}{\lambda \cdot 3} \text{ mit } c_p = \frac{16}{27} = 0,59 \text{ und } A = \pi \cdot R^2$$

Mit Hilfe des Impulssatzes kann nun auch die Gesamtschubkraft ermittelt werden.

Es gilt $\vec{F}_S = \dot{m} \cdot (v_1 - v_3) = \rho \cdot A \cdot \frac{v_1 + v_3}{2} \cdot (v_1 - v_3)$ mit $v_3 = \frac{1}{3} v_1$ folgt:

$$\vec{F}_S = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot \vec{v}_1^2 \cdot c_s \text{ mit } c_s = \frac{8}{9} = 0,89 \text{ und } A = \pi \cdot R^2$$

Für ein einzelnes Rotorblatt ergibt sich bei einer WEA mit drei Rotorblättern die **Schubkraft**

zu: $\vec{F}_S = \frac{1}{6} \rho \cdot A \cdot \vec{v}_1^2 \cdot c_s$ mit $c_s = \frac{8}{9} = 0,89$ und $A = \pi \cdot R^2$

[Liersch, 2010], [Gasch, 2011]

Die oben genannten Gleichungen gelten jedoch nur für eine homogene, instationäre Windgeschwindigkeit. Diese Gegebenheit tritt jedoch nicht auf, da die Windgeschwindigkeit zeit-, höhen- und ortsabhängig ist. Für eine überschlägige Berechnung ist dies jedoch ausreichend. Zur Verdeutlichung der Komplexität der angreifenden Lasten sei hierbei auf die Abbildung 21 bis Abbildung 24 verwiesen.

Gerade das Auftreten von Böen, die kaum vorhersagbar sind, macht die Auslegung kompliziert. Hierfür werden im Allgemeinen so genannte Böenfaktoren eingeführt, welche die Nennwindgeschwindigkeit für die Auslegung nach oben skalieren.

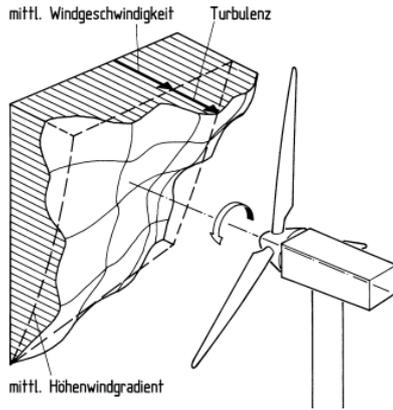


Abbildung 21: instationäres Geschwindigkeitsprofil
[Gasch, 2011]

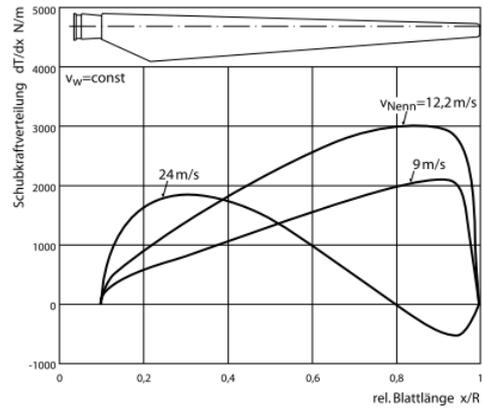


Abbildung 22: Schubkraftverteilung über Blattlänge
[Hau, 2008]

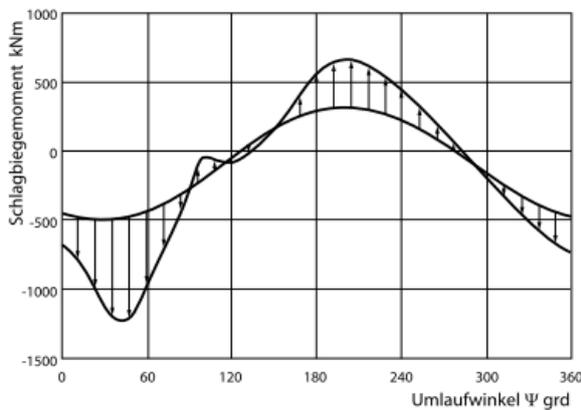


Abbildung 23: Schlagbiegemoment über Umlaufwinkel
[Hau, 2008]

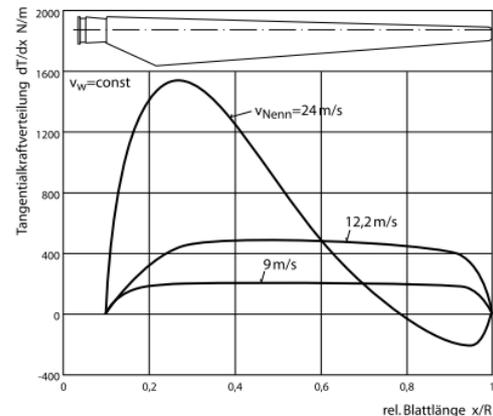


Abbildung 24: Tangentialkraftverteilung über Blattlänge [Hau, 2008]

3.3 Faserverbundwerkstoffe

„Ein Faserverbundwerkstoff ist ein aus im Allgemeinen zwei Hauptkomponenten (einer bettenden Matrix sowie verstärkenden Fasern) bestehender Mehrphasen- oder Mischwerkstoff. Durch gegenseitige Wechselwirkungen der beiden Komponenten erhält dieser Werkstoff höherwertige Eigenschaften als jede der beiden einzeln beteiligten Komponenten.“ [Faserverbundwerkstoffe, 2011]

Die Faserverbundstoffe sind keine neue, von Menschenhand geschaffene Erfindung. Die Natur nutzt diese Technik schon seit ewigen Zeiten. So ist Holz ein klassischer Faserverbund, aus dem die ersten Flugzeuge gefertigt wurden. Auch in unserem Körper finden wir Faserverbundstoffe: unter anderem zählen Knochen und die Muskeln dazu. [Schürmann, 2007]

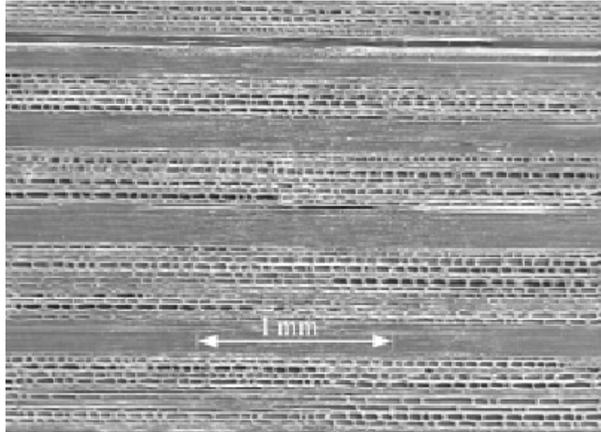


Abbildung 25: Mikroskopische Aufnahme von Bambus [Schürmann, 2007]

Neben dem wohl bekanntesten Vorteil, das geringere Gewicht bei gleicher Festigkeit, gibt es noch weitere Vorteile, welche gerade bei Klein- und Kleinstserien sehr interessant sein können.

Vorteile	Nachteile
Hohe Festig- und Steifigkeit bei geringer Dichte	Sehr hoher Materialpreis
Freie Formgestaltung	Auslegung ist sehr umfangreich
Ausgezeichnete Korrosionsbeständigkeit	Empfindlich gegenüber heißer Feuchtigkeit
Geringe Wärmeleitfähigkeit	Schwierige/keine zerstörungsfreie Prüfung
Spezifisches Energieaufnahmevermögen (Crash)	Schädigungen schwer sichtbar
Geringer Energie-Gesamtbedarf	Schwere Reparatur von Schäden
„Einfach“ per Hand zu fertigen	

Tabelle 4: Vor- und Nachteile von FKV

Nach Alan Arnold Griffith gilt: „Ein Werkstoff in Faserform hat eine vielfach höhere Festigkeit als das gleiche Material in kompakter Form, und je dünner die Faser ist, desto größer ist ihre Festigkeit.“ Hieraus resultiert unter anderem die hohe Festigkeit der Faserverbundwerkstoffe. Durch die Vielzahl an sehr feinen dünnen Fasern wird die Festigkeit des Verbundes gewährleistet.

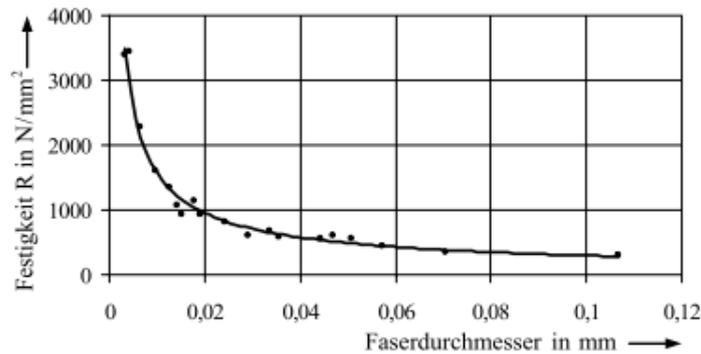


Abbildung 26: Einfluss des Faserdurchmessers auf die Festigkeit [Schürmann, 2007]

3.3.1 Fasertypen

Grundsätzlich gibt es eine große Fülle an möglichen Fasern, welche für Faserverbundstoffe von Interesse sind. So gibt es Glasfasern, Kohlenstofffasern, Stahlfasern, Aramidfasern, sowie viele natürliche Fasern wie Wolle, Seide oder auch Haare.

Ein großer Nachteil der natürlichen Fasern ist die relativ hohe Streuung der Werkstoffkennwerte, weshalb diese in bestimmten Anwendungsbereichen nicht in Frage kommen. Kohlefasern verfügen zwar über die besten Festigkeits- bzw. Steifigkeitswerte bezogen auf ihr Gewicht, jedoch ist deren Verwendung sehr teuer und findet hauptsächlich im Bereich der Luft- und Raumfahrt Verwendung, da dort der Preis von untergeordneter Bedeutung ist. Die am weitesten verbreitete Faserart ist die Glasfaser. Grund hierfür ist der relativ geringe Preis, welcher die Verwendung von Verbundstoffen sehr wirtschaftlich macht. Die Festigkeit ist jedoch deutlich geringer als bei Kohlefasern.

Die Verwendung von Stahlfasern ist noch nicht sehr stark verbreitet, wird aber immer interessanter, da damit eine höhere Festigkeit als mit Glasfasern gegeben werden könnte, bei nicht all zu hoher Gewichtszunahme.

Als Fasertypen in einem Faserverbund werden jedoch vorwiegend folgende drei Fasertypen verwendet, die sich in Preis, Festigkeit, Elastizitätsmoduln und Anwendungsbereich unterscheiden.

- Glasfasern
 - E-Glas
 - C-Glas
 - S/R/T-Glas
- Aramid-Fasern
- Carbonfasern

Glasfaser

Für die Herstellung von Glasfasern werden verschiedene Steinprodukte wie Sand, Kaolin, Kolmanit und Kalkstein vermischt und bei ca. 1600°C geschmolzen. Diese flüssige Phase wird dann durch sehr kleine Düsen, so genannte Microdüsen, gepumpt und abgekühlt. Diese Fasern haben einen sehr geringen Durchmesser von 5 – 24 µm und werden entweder stark miteinander zu Fäden oder eher locker zu so genannten Rovings verbunden. Um sie vor Abnutzung zu schützen und daran zu hindern sich wieder zu trennen, werden sie noch beschichtet. Die Beschichtung kann je nach Hersteller variieren.

Je nach Mischungsverhältnis und eventuellen Zusätzen können so verschiedene Glasfasertypen hergestellt werden.

Die am häufigsten verwendete Glasfaser ist das E-Glas. Durch einen geringen Alkalianteil verfügt das E-Glas über gute Zug- und Festigkeitswerte.

Vorwiegend im chemischen Bereich wird die C-Faser eingesetzt. Sie verfügt über eine sehr gute Resistenz gegenüber Chemikalien und wird deshalb hauptsächlich im Behälterbau eingesetzt.

Die dritte Variation der Glasfaser ist je nach Hersteller die S-, R- oder T-Glasfaser. Sie verfügen über höhere Festigkeit und Moduln als E-Glas. Durch die sehr kleinen Durchmesser haben diese ein sehr gutes Durchtränkungsverhalten beim Einlaminierten. Da diese Fasern jedoch hauptsächlich in der Luftfahrt und zur Herstellung von z.B. schussicheren Westen genutzt werden, ist die hergestellte Menge dementsprechend gering und die Preise relativ hoch. [E-Glasgewebe- und Gelege, 2007]

Aramidfaser

Aramidfasern, besser bekannt unter dem Markennamen Kevlar der Firma DuPont, sind organische Kunstfasern goldgelber Färbung. Diese haben eine gute Beständigkeit gegenüber Laugen und Säuren, eine sehr hohe Festigkeit und eine hohe Bruchdehnung.

Die Herstellung von Aramidfasern ist nur aus Lösungen möglich, da der Zersetzungspunkt meistens weit unter dem Schmelzpunkt liegt. Als Lösungsmittel wird meist konzentrierte Schwefelsäure verwendet. Anschließend wird durch das Nass-Spinnen Fäden generiert. Hierbei wird die Masse durch dünne Düsen gedrückt, welche danach aushärten. Aramidfasern werden meist als Gewebe vertrieben, so dass die Fäden danach direkt verwoben werden.

Die bekanntesten Anwendungsgebiete von Aramidfasern sind schusssichere Westen oder auch Bremsbelege und Dichtungen. Auch im Flugzeugbau finden sie ihre Anwendung, so z.B. im Airbus A380.

Carbonfaser

Carbonfasern oder auch Kohlefasern finden hauptsächlich in der Luft- und Raumfahrt sowie in hochwertigen Sportgeräten wie Fahrradkomponenten, Sportbooten, Tennisschlägern etc. Verwendung. Grund hierfür ist der sehr hohe Preis. In der Luft- und Raumfahrtindustrie hat die Gewichtsersparnis klaren Vorrang, weshalb hier die Materialkosten eine geringere Bedeutung haben. Gerade in der Raumfahrt betragen die Kosten um eine Masse von einem Kilogramm in den Orbit zu transportieren zwischen 2.200 und 33.000 US-Dollar, so dass hier der Preis für leichte Materialien keine Rolle spielt.

Die Herstellung von Carbonfasern ist im Vergleich zu Glasfasern deutlich komplizierter. Als Ausgangsstoff sind zwar prinzipiell alle organischen Verbindungen möglich, welche in einem Pyrolyseprozess während einer nichtschmelzbaren Zwischenbehandlung zu Kohlenstoff karbonisiert werden können, letztlich kommen jedoch hauptsächlich nur Zellulose, Pech und PAN zum Einsatz. Wird während diesen Zwischenschrittes eine Zugspannung auf das Zwischenprodukt gebracht, können die atomaren Strukturen beliebig verändert werden, so dass eine höhere Steifigkeit sowie Festigkeit des Endprodukts erreicht wird.

Während der Carbonisierung werden bis auf den Kohlenstoff alle Elemente gasförmig abgeschieden. Je höher die Temperatur, desto höher ist letztendlich der Massenanteil des Kohlenstoffes. Im Allgemeinen findet die Carbonisierung zwischen 1300 – 1500 °C statt, wodurch eine Reinheit von 96 – 98 % erreicht werden kann.

Die üblichen Ausgangsstoffe sind Zellulose, Polyacrylnitril und Pech. Carbonfasern aus Zellulose werden jedoch hauptsächlich als Isolierstoffe verwendet oder fanden früher Verwendung als Glühfaden in Lampen.

Polyacrylnitril, ein Kunststoff, der auch als PAN bekannt ist, ist der Hauptausgangsstoff für die Herstellung von Carbonfasern. Als Ausgangsmaterial ist Pech zwar kostengünstiger, die Nachbehandlung bzw. Reinigung ist jedoch so aufwendig, dass PAN schließlich doch vorzuziehen ist.

	E- Glas	C- Glas	S- Glas	Aramidfaser HM	Carbonfaser (HT)
E_{11} in N/mm ²	73.000	71.000	86.810	127.000	230.000
G in N/mm ²	29.920	k. A.	35.578	12.000	50.000
R_m in N/mm ²	2400	2400	4500	2900	3430
ν	0,22	0,22	0,22	0,38	0,23
Dichte in g/cm ³	2,54	2,51	2,49	1,45	1,74
Faserdurchmesser in μm	9-24	9-24	9-24	12	6
Preis in €/kg	1,6	k. A.	5	25	50

Tabelle 5: Vergleich verschiedener Fasertypen

3.3.2 Die unidirektionale Schicht

Die Berechnung von Faserverbundstoffen kann sehr kompliziert sein. Eine sehr einfache Berechnung von Faserverbunden ist jedoch bei den so genannten Unidirektionalen Schichten gegeben.

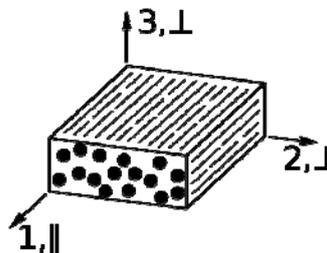


Abbildung 27: Unidirektionale Schicht [Ehrenstein, 2006]

Bei der Unidirektionalen Schicht gibt es keine Gewebe oder mehrdimensionale Ausrichtung der Fasern. Alle Fasern sind in eine Richtung ausgerichtet. Für die Bestimmung der Kennwerte des Laminats ist nun der Anteil des Faservolumenanteils im Verbund notwendig. Dieser kann wie folgt berechnet werden:

$$\varphi_f = \frac{V_f}{V_v}$$

Wird nun der Faserverbund in Längsrichtung, also mit der Faser, betrachtet, so werden die E-Moduln der Faser und der Matrix im Verhältnis ihrer Volumenanteile parallel geschaltet und der E-Modul des Verbundes in Längsrichtung ergibt sich zu:

$$E_{22} = \varphi_f \cdot E_{f,22} + (1 - \varphi_f) \cdot E_m$$

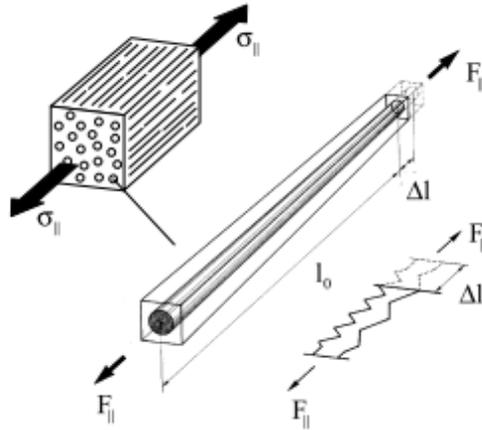


Abbildung 28: Längsbetrachtung einer UD-Schicht [Schürmann, 2007]

In Querrichtung kann das so genannte Scheibenmodell Verwendung finden. Hierbei werden die Faser und die Matrix als Reihenschaltung hintereinander geschaltet und es ergibt sich mittels der Reihenschaltung und den Volumenanteilen folgende Rechenvorschrift für unidirektionale Schichten mit Betrachtung der Querkontraktion:

$$E_{11} = \frac{E_m}{1 - \nu_m} \cdot \frac{1}{(1 - \varphi_f) + \frac{E_m}{(1 - \nu_m) \cdot E_{f,11}} \cdot \varphi_f}$$

Das sich so ergebende E-Modul in Querrichtung weicht jedoch mit den Werten aus experimentellen Untersuchungen ab und es hat sich gezeigt, dass das E-Modul nach Puck hier bessere Ergebnisse liefert. Das halbempirische E-Modul in Querrichtung nach Puck lautet:

$$E_{22} = \frac{E_m}{1 - \nu_m} \cdot \frac{1 + 0,85 \cdot \varphi_m^2}{(1 - \varphi_f)^{1,25} + \frac{E_m}{(1 - \nu_m) \cdot E_{f,22}} \cdot \varphi_f} \quad [\text{Ehrenstein, 2006, S. 252}]$$

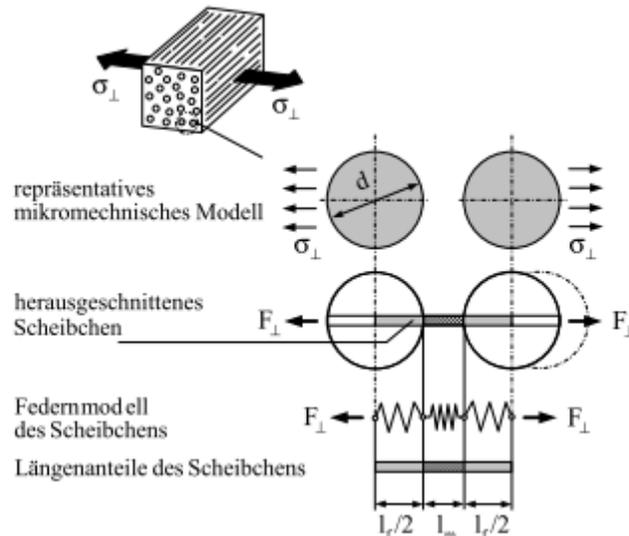


Abbildung 29: Querbetrachtung einer UD-Schicht [Schürmann, 2007]

Für das Schubmodul ergibt sich folgender halbempirischer Rechenweg nach Ehrenstein:

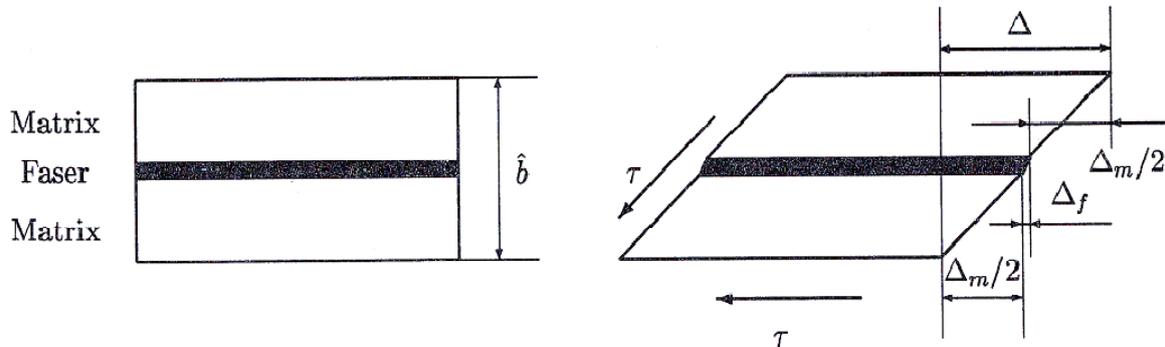


Abbildung 30: Bestimmung des Schubmoduls bei UD-Schichten [Nast, 2010]

$$G_{12} = G_{Matrix} \cdot \frac{1 + 0,6 \cdot \varphi_{Faser}^{0,5}}{(1 - \varphi_{Faser})^{1,25} + \varphi_{Faser} \cdot \frac{G_{Matrix}}{G_{Faser}}} \quad [\text{Ehrenstein, 2006, S. 252}]$$

Für die Berechnung der Querkontraktionszahlen gelten nach Ehrenstein folgende Formeln:

$$\nu_{12} = \varphi_f \cdot \nu_{f,12} + (1 - \varphi_f) \cdot \nu_m$$

Die Dichte des Laminats ergibt sich zu:

$$\rho_V = \varphi_f \cdot \rho_f + (1 - \varphi_f) \cdot \rho_m$$

Die Berechnungsvorschriften gelten nur für die unidirektionalen Schichten und können nur mit Einschränkungen auf andere Faserverbunde übertragen werden.

Für die meisten Betrachtungen reichen die ermittelten Werte bereits aus, da die Faserverbundstoffe meist nur zweidimensional betrachtet werden. In Programmen für die Berechnung mittels der Finiten-Elemente-Methode, welche in Kapitel 3.4 näher erläutert wird, werden deswegen möglichst nur zweidimensionale Elemente verwendet. Bei

komplizierteren Geometrien, welche z. B. Bohrungen oder Aussparungen in gebogenen Faserverbunden aufweisen, kann es jedoch notwendig sein, dreidimensionale Elemente zu verwenden.

3.3.3 Von der UD-Schicht zum Solidmodell

Für die Betrachtung eines dreidimensionalen Bauteils, ist es erforderlich die so genannten Ingenieurkonstanten jeder Laminatschicht zu bestimmen.

Die erforderlichen Konstanten sind: $E_{11}, E_{22}, E_{33}, G_{12}, G_{13}, G_{23}, \nu_{12}, \nu_{13}, \nu_{23}, \rho_V$

Folgende Kennwerte konnten bereits für das UD-Laminat ermittelt werden:

$$E_{11}, E_{22}, G_{12}, \nu_{12}, \rho_V$$

Das Elastizitätsmodul, senkrecht zur Laminatoberfläche, entspricht bei UD-Laminaten stets dem E-Modul der Blattquerrichtung. Dies ist darauf begründet, dass UD-Laminat transversal isotrop ist. Dies kann sehr gut an Abbildung 27 erkannt werden.

Bei den Querkontraktionszahlen ν_{13}, ν_{23} verhält es sich ähnlich. Während die Querkontraktionszahl ν_{13} auf Grund der transversalen Isotropie mit ν_{12} identisch ist, kann die Querkontraktionszahl ν_{23} auf verschiedene Weisen berechnet werden. Die genaueste Berechnung wird mit der dehnungsbehinderten effektiven Querkontraktionszahl $\nu_{m,eff}$ erreicht.

Die Querkontraktionszahlen ergeben sich somit zu:

$$\nu_{23} = \varphi_f \cdot \nu_{f,12} + (1 - \varphi_f) \cdot \nu_{m,eff} = \varphi_f \cdot \nu_{f,12} + (1 - \varphi_f) \cdot \frac{1 + \nu_m - \nu_{12} \cdot \frac{E_m}{E_{22}}}{1 - \nu_m^2 + \nu_m \cdot \nu_{12} \cdot \frac{E_m}{E_{22}}}$$

[Schürmann, 2007, S. 201]

$$\nu_{13} = \nu_{12}$$

(transversal isotrop)

Für die Ermittlung der Schubmodule G_{13}, G_{23} wird die VDI-Richtlinie 2014 Blatt 1 herangezogen. Für die Schubmodule gilt weiterhin die transversale Isotropie und es gilt nach VDI 2014 Blatt 1:

$$G_{23} = G_m + \frac{\varphi_f}{\frac{1}{G_{f,23} - G_m} + \frac{K_{m,23} + 2 \cdot G_m}{2 \cdot G_m \cdot (K_{m,23} + G_m)}} \cdot (1 - \varphi_f)$$

$$\text{Mit } K_{m,23} = K_m + \frac{G_m}{3} \text{ und } K_m = \frac{E_m}{3 \cdot (1 - 2 \cdot \nu_m)}$$

[VDI 2014 Blatt 1, 1989]

Ebenfalls von Bedeutung bei den Hybridlaminaten ist die Betrachtung des Wärmeausdehnungskoeffizienten. Diese sollten nicht zu stark voneinander abweichen, da es sonst zu großen inneren Spannungen kommen kann, welche das Bauteil beschädigen können.

Die Wärmeausdehnungskoeffizienten sind ebenfalls transversal Istrop. Und es gelten folgende Rechenvorschriften:

$$\alpha_{11} = \frac{E_m \cdot \alpha_m \cdot (1 - \varphi_f) + E_{f,11} \cdot \alpha_{f,11} \cdot \varphi_f}{E_m \cdot (1 - \varphi_f) + E_{f,11} \cdot \varphi_f} \text{ und } \alpha_{22} = (\alpha_m - \alpha_{f,11}) \cdot (A - B) \text{ mit}$$

$$A = \frac{2 \cdot (\nu_m^3 + \nu_m^2 - \nu_m - 1) \cdot 1,1 \cdot \varphi_f}{1,1 \cdot \varphi_f \cdot (2 \cdot \nu_m^2 - \nu_m - 1) - (1 + \nu_m)} \text{ und } B = \frac{\nu_m \cdot \frac{E_{f,22}}{E_m}}{\frac{E_{f,22}}{E_m} + \frac{1 - 1,1 \cdot \varphi_f}{1,1 \cdot \varphi_f}} \text{ [Ehrenstein, 2006, S. 253]}$$

3.3.4 Festigkeit

Die Berechnung der Festigkeiten ist letztendlich problematisch. Ihre Berechnung erfolgt nach [Moser, 1992] und ist vom Fasertyp abhängig. Die Abhängigkeit ist durch entsprechende Faktoren gegeben. Es ergeben sich folgende Rechenvorschriften:

Zugfestigkeit in Faserrichtung (semi-empirisch):

$$R_{11} = R_f \cdot \left(C_f \cdot \bar{\varphi} + C_m \cdot (1 - \varphi_f) \cdot \frac{E_m}{E_{f,11}} \right) \text{ mit } \bar{\varphi} = (1 - \varphi_L) \cdot \varphi_L$$

Die Korrelationskoeffizienten C_f und C_m können der folgenden Tabelle entnommen werden:

	E-Glas	S-Glas	C-Fasern
C_f	0,82	1	0,83 – 1,00
C_m	1	1	1

Tabelle 6: Korrelationskoeffizienten C_i

Druckfestigkeit in Faserrichtung (semi-empirisch):

$$R_{11}^d = R_f^d \cdot \left(C_m^d \cdot (1 - \bar{\varphi}) \cdot \frac{E_m}{E_{f,11}} + C_f^d \cdot \bar{\varphi} \right) \text{ für } e_f^d < e_m^d$$

$$R_{11}^d = R_m^d \cdot \left(C_m^d \cdot (1 - \bar{\varphi}) + \frac{E_{f,11}}{E_m} + C_f^d \cdot \bar{\varphi} \right) \text{ für } e_f^d > e_m^d$$

Die Korrelationskoeffizienten C_f^d und C_m^d können der folgenden Tabelle entnommen werden:

	E-Glas	S-Glas	C-Fasern
C_f^d	1	1	1
C_m^d	0,33	0,55	0,12 – 0,05

Tabelle 7: Korrelationskoeffizienten C_i^d

Zugfestigkeit quer zur Faserrichtung:

Die Zugfestigkeit quer zur Faserrichtung kann mittels Mischungsregeln und dem Ansatz der gleichen Dehnung berechnet werden.

$$R_{22} = \frac{1}{\frac{\varphi_f}{R_f} + \frac{1-\varphi_f}{R_m}}$$

Druckfestigkeit quer zur Faserrichtung:

$$R_{22}^d = R_m^d \cdot \frac{E_{22}}{E_m} \cdot \left(1 - \varphi_f^{\frac{1}{3}}\right)$$

Die Schubfestigkeit ergibt sich zu:

$$R_{12} = C_{12} \cdot G_{12} \cdot \frac{g_m}{C_L \cdot \phi_{12}}$$

$$\text{Mit: } \frac{1}{C_L} = 1 - 2 \cdot \sqrt{\frac{\varphi_L}{\pi(1-\varphi)}} \text{ und } C_{12} = \frac{\nu_{12}}{1 - \nu_{31} - 2\nu_{23}\nu_{12}}$$

Die Quer-Quer-Schubfestigkeit kann nach [Schürmann, 2007, S. 381] vereinfachend wie folgt bestimmt werden.

$$R_{12}^A \approx \frac{R_{22}^d}{2,5}$$

3.3.5 Hybridlaminat

Unter Hybridlaminaten versteht man die Verwendung von verschiedenen Fasertypen in einem Faserverbund. Um dies zu realisieren sind verschiedene Möglichkeiten gegeben:

- Verweben von verschiedenen Fasertypen. Z.B. Aramid- und Carbonfaser
- Verwendung verschiedener Laminatschichten
- Einlaminieren von Stahlblechen

Die beiden ersten Varianten sind meistens recht gut möglich. Hier muss lediglich auf verschiedene Wärmeausdehnungskoeffizienten geachtet werden. Das Einlaminieren von Stahlblechen ist relativ schwierig, da bei einer nicht sorgfältigen Vorbehandlung der

Oberfläche das Harz nicht an der Oberfläche haftet und sich unter Belastung ablöst. Bei sorgfältiger Vorbehandlung ist aber auch dies möglich.

3.4 Finite-Elemente-Methode

Die Finite-Elemente-Methode, kurz FEM, ist ein numerisches Lösungsverfahren von partiellen Differentialgleichungen. Die Methode der Finiten Elemente hat verschiedene Einsatzbereiche und wird in der Regel mit leistungsstarken Computern durchgeführt. Eine Verwendung für Handrechnungen ist zwar prinzipiell möglich, jedoch ist dies nur bei kleineren und einfachen Geometrien sinnvoll, da der Rechenaufwand sonst für Handrechnungen nicht mehr überschaubar ist.

Bei der Finiten-Elemente-Methode wird ein Bauteil in viele kleine, endliche (finite) Elemente zerlegt, welche miteinander verbunden sind. Je nach Problemstellung können verschiedene Elementtypen verwendet werden.

Die Rechenergebnisse, die bei einer Berechnung mittels der FEM erreicht werden, sind keine exakten Lösungen, sondern stellen lediglich eine Näherung der partiellen Differentialgleichungen dar. Des Weiteren ist es oft zwingend notwendig, Geometrien zu vereinfachen um den Rechenaufwand gering zu halten.

Die Genauigkeit der Ergebnisse können dadurch beeinflusst werden, dass das Netz der Modelgeometrie verfeinert oder vergrößert wird. Wichtig hierbei ist es, das Netz nicht zu fein oder grob zu gestalten. Es gilt also der Grundsatz: „So grob wie möglich und so fein wie nötig“, da bei einem feineren Netz auch der Rechenaufwand ansteigt.

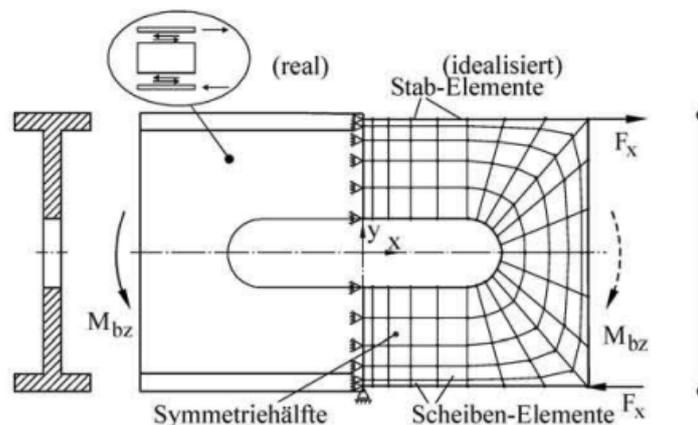


Abbildung 31: reales und idealisiertes Modell [Klein, 2010]

3.4.1 FEM als Hilfsmittel

Um ein Bauteil mittels der Finiten-Elemente-Methode näher zu untersuchen, ist es erforderlich, ein Modell von jenem entweder direkt oder mittels einer neutralen Schnittstelle, meistens ein neutrales Dateiformat wie IGES oder STEP, in den Pre-Prozessor zu laden.

Hier treten die Haupttätigkeiten des Ingenieurs auf:

- Welche Geometrien können eventuell vernachlässigt werden, ohne die Ergebnisse stark zu verfälschen?
- Können Symmetrien im Bauteil genutzt werden?
- Welche Randbedingungen herrschen vor, um die wahren Begebenheiten möglichst realitätsnah darzustellen?
- Und letztlich: Wie kann das Modell vernetzt werden, ohne dass der Rechenaufwand zu groß wird, aber die Ergebnisse trotzdem möglichst genau bleiben?

Die Arbeiten im Pre-Prozessor sind die zeitaufwändigsten einer Berechnung mittels FEM und erfordern neben fachspezifischen Wissen und Erfahrung mit den entsprechenden Programmen manchmal auch viel Geduld. Da die heutigen Computer immer leistungsfähiger werden und sich somit der Einsatz der FEM-Berechnung immer mehr lohnt, ist der Beruf des Berechnungsingenieurs immer weiter verbreitet, welcher sich fast ausschließlich mit diesen Aufgaben befasst.

Nach dem das FEM-Modell aufbereitet wurde, kann dieses im Solver gelöst werden und es folgt die Auswertung im Post-Prozessor und die Validierung der Ergebnisse. Im Post-Prozessor können die Ergebnisse meist grafisch dargestellt werden. Nachdem z.B. auftretende Spannungen, Verformungen etc. festgestellt wurden, müssen diese aber zwingend auf ihre Plausibilität überprüft werden um sicher zu stellen, dass bei der Modellierung im Pre-Prozessor keine Fehler, wie falsche Randbedingungen oder ein schlechtes Netz, vorherrschen. Falls Fehler auftreten, ist es erforderlich, das Modell zu ändern und erneut berechnen zu lassen, bis das Ergebnis die Validierung besteht.

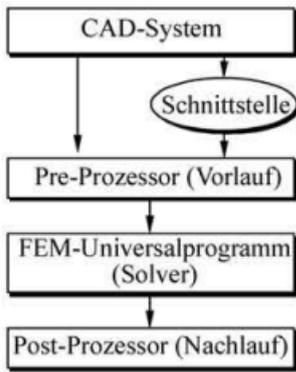


Abbildung 32: Ablauf einer FEM-Berechnung [Klein, 2010]

anfallende Bearbeitungsschritte	geschätzter Mannzeitaufwand	geschätzte Rechenzeit
• methodengerechte Aufbereitung des Problems	10 %	-
• Generierung des FE-Modells im Pre-Prozessor	50 %	20 %
• Rechenlauf	-	70 %
• Ergebnisauswertung im Post-Prozessor, Dokumentation	30 %	10 %
• Plausibilitätsprüfung	10 %	-

Abbildung 33: Verteilung der Arbeitsschritte [Klein, 2010]

3.4.2 Elementtypen

Grundsätzlich gibt es zig verschiedene Elemente, welche in der FEM Verwendung finden. Durch gezielte Anpassung der Elementtypen an das zu lösende Problem können so Berechnungen stark vereinfacht werden. In Abaqus wird in folgende Elementtypen unterschieden:

- Eindimensionale Elemente
 - Linien
- Zweidimensionale Elemente
 - Dreieckselemente
 - Viereckselemente
- Dreidimensionale Elemente
 - Tetraeder
 - Prismen
 - Hexaeder

	1-D	2-D		3-D		
Unverformt						
verformt						

Tabelle 8: mögliche Elementtypen in Abaqus [SIMULIA, 2009]

Die eindimensionalen Elemente werden hauptsächlich für Tragwerke eingesetzt.

Zweidimensionale Elemente kommen vorwiegend bei dünnen Bauteilen und Faserverbunden mit einfacher Geometrie zum Einsatz.

Dreidimensionale Elemente kommen bei komplizierten Geometrien zum Einsatz.

Es können auch verschiedene Elementtypen kombiniert werden. Eine beliebige Kombination ist jedoch nicht möglich, da es notwendig ist, dass die einzelnen Knoten der Elemente kombiniert werden können.

3.4.3 Kontakt

Um Kontaktbedingungen zu simulieren gibt es verschiedenste Möglichkeiten. Zuerst gibt es unterschiedliche geometrische Kontaktvarianten die da wären:

- Knoten-zu-Oberfläche-Kontakt
- Punkt-zu-Oberfläche-Kontakt
- Oberfläche-zu-Oberfläche-Kontakt

Knoten-zu-Oberfläche-Kontakt

Bei einem Knoten-zu-Oberflächen-Kontakt wird überprüft, ob ein Knoten der Oberfläche 2 die Oberfläche 1 durchdringt. Die flächeninformationsliefernde Oberfläche wird auch Master genannt. Die Oberfläche 2, welche die entsprechenden Punkte liefert, wird als Slave bezeichnet.

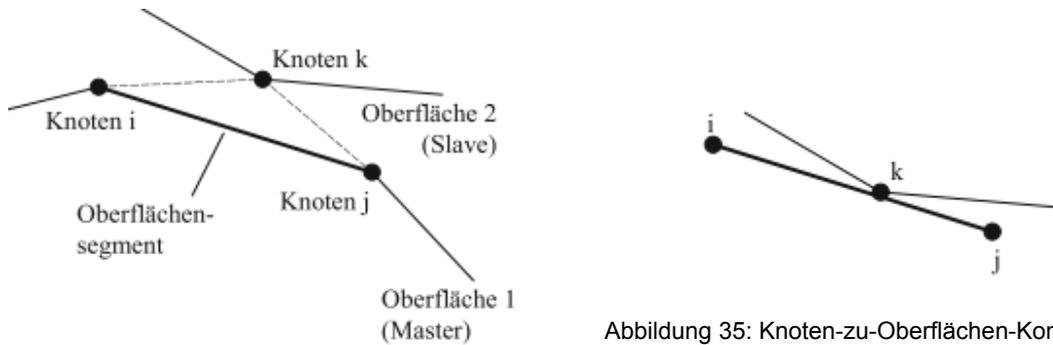


Abbildung 34: Knoten-zu-Oberfläche-Kontakt [Rust, 2011]

Abbildung 35: Knoten-zu-Oberflächen-Kontakt [Rust, 2011]

Punkt-zu-Oberflächen-Kontakt

Der Punkt-zu-Oberflächen-Kontakt verhält sich ähnlich wie der Knoten-zu-Oberflächen-Kontakt. Jedoch wird hier nicht überprüft ob ein Knoten die Oberfläche des Masters durchdringt, sondern andere Kontaktpunkte z.B. Integrationspunkte zwischen den Knoten.

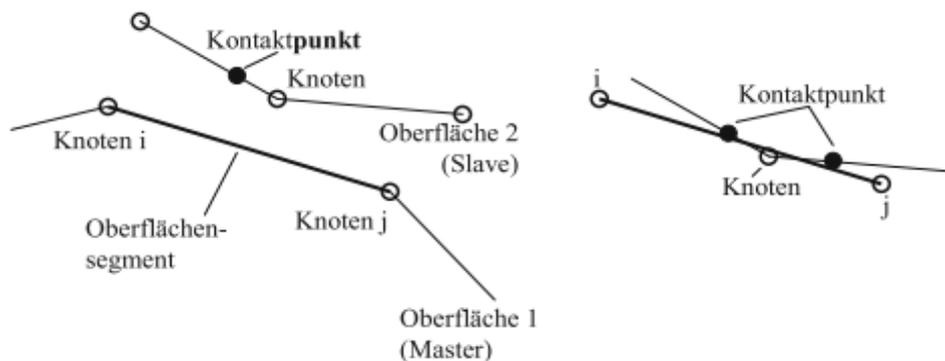


Abbildung 36: Punkt-zu-Oberflächen-Kontakt [Rust, 2011]

Oberfläche-zu-Oberfläche-Kontakt

Beim Oberflächen-zu-Oberflächen-Kontakt, wird überprüft, ob ein Teil der Slave Oberfläche die Oberfläche des Masters durchdringt. Dadurch wird sichergestellt, dass es keinerlei gegenseitige Durchdringung gibt, welche bei dem Punkt-zu-Oberfläche- und Knoten-zu-Oberfläche-Kontakt auftreten kann. Diese Variante ist zwar genauer, der Rechenaufwand aber entsprechend höher.

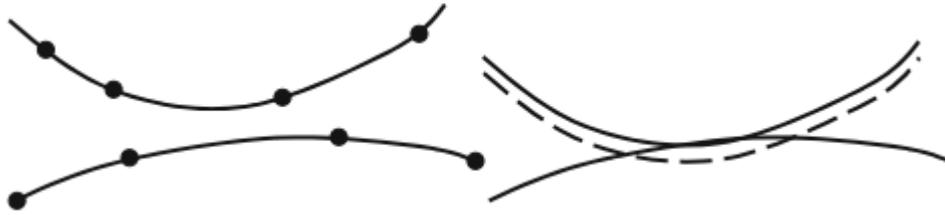


Abbildung 37: Oberfläche-zu-Oberfläche-Kontakt [Rust, 2011]

Grundsätzlich wird so eine gegenseitige Durchdringung mehr oder weniger genau verhindert. Durch die Eingabe von Reibparametern zwischen verschiedenen Kontaktflächen können nun die auftretenden Kräfte, Verschiebungen und Spannungen recht genau ermittelt werden.

3.4.4 Aussagekraft einer FE-Analyse

Der häufigste Fehler, welchen gerade unerfahrene Berechnungsingenieure begehen, ist das Nicht-Hinterfragen der Ergebnisse, welche die FE-Berechnung liefert. Da die FE-Analyse stets nur eine Approximation der Differentialgleichung darstellt, ist diese keine genaue Lösung. Des Weiteren muss beachtet werden, dass die Modellgeometrie eventuell vereinfacht wurde und entsprechende Kerbwirkungen im Post-Prozessor deshalb nicht sichtbar sind.

4 Auslegung der Laminatschichten

4.1 Einleitung

Um die Steifigkeit und die Festigkeit des Rotorblatts zu erhöhen, soll versucht werden, im vorhandenen Laminataufbau, welcher vorwiegend aus E-Glas besteht, einzelne Schichten zu ersetzen, welche höhere Festigkeiten und Elastizitätsmodi aufweisen. Anfangs findet dieser Vergleich, wenn möglich, analytisch statt, um etwaige Varianten zu streichen oder näher zu untersuchen.

Da die analytische Berechnung von Faserverbundstoffen auf Basis von Geweben nicht möglich ist, wird zuerst eine Abschätzung durchgeführt und anschließend eine Betrachtung mittels der Finiten-Elemente-Methode versucht um genauere Kennwerte zu erhalten.

In einem letzten Schritt soll der Rotorblattanschluss in verschiedenen Varianten simuliert werden und eine Auswertung und Empfehlung bezüglich des Laminataufbaus erstellt werden.

Als Hybridlaminare kommen folgende in Betracht:

- Kombination aus E-Glas und einem Quadratmaschengewebe
- Kombination von E-Glas und einlamierten Edelstahlblechen
- Kombination von E- und S-Glas
- Kombination von E-Glas und Carbonfasern

Ziel ist es eine Erhöhung der Steifigkeit in Richtung der Blattspitze zu erhalten. Dies ist vor allem dann gegeben, wenn Laminatschichten in 0°-Orientierung an Steifigkeit gewinnen. Die Schichten in 30°, 45° und 90° sind hier von unter geordneter Rolle, wenn anisotrope Materialien eingesetzt werden,

4.2 Vorhandener Laminataufbau

Für die Untersuchungen wird der Laminataufbau des Rotorblatts EU 100 der Firma EUROS verwendet. Aus der vorangegangenen Diplomarbeit von Oliver Scheidt können unter anderem der Laminataufbau sowie die Kennwerte des gesamten Verbundes entnommen werden.

Der komplette Verbund hat eine Dicke von $t=90$ mm und besteht aus 102 Laminatschichten (MAG). Somit beträgt die Dicke eines Multiaxialgeleges $t_{MAG}=0,882353$ mm.

Das vorhandene Laminat ist ein E-Glas-Laminat mit einem Epoxidharz als Matrixmaterial.

Folgende Kenndaten für den Gesamtverbund sind gegeben:

$$E_1 = 29.000MPa$$

$$E_2 = 10.000MPa$$

$$E_3 = 10.000MPa$$

$$G_{12} = 7.000MPa$$

$$G_{13} = 3.500MPa$$

$$G_{23} = 3.500MPa$$

$$\varphi_{Faser} = 0,379$$

$$t_{MAG} = 0,88235mm$$

$$\frac{m}{A} = 1240 \frac{g}{m^2}$$

Bei dem Verbund handelt es sich in erster Näherung um einen transversal isotropen Laminatverbund und die Querkontraktionszahlen lassen sich wie folgt bestimmen:

$$v_{23} = \frac{E_2}{2 \cdot G_{23}} - 1 = \frac{10.000MPa}{2 \cdot 3.500MPa} - 1 = 0,429$$

$$v_{13} = v_{12} \cdot \frac{E_1}{E_2} \cdot v_{Matrix}$$

Des Weiteren kann die Querkontraktionszahl v_{12} mit guter Näherung mittels der Mischungsregeln für UD-Laminat bestimmt werden. Für das Epoxidharz wird eine Querkontraktion von 0,37 und für die Glasfaser von 0,22 angenommen. Es gilt somit:

$$v_{12} = \varphi_{Faser} \cdot v_{Faser,12} + (1 - \varphi_{Faser}) \cdot v_{Matrix} = 0,379 \cdot 0,22 + (1 - 0,379) \cdot 0,37 = 0,313$$

$$v_{13} = v_{12} \cdot \frac{E_1}{E_2} \cdot v_{Matrix} = 0,313 \cdot \frac{29.000MPa}{10.000MPa} \cdot 0,37 = 0,336$$

Die Dichte des Laminats kann durch die Schichtdicke, sowie dem flächenbezogenen Gewicht bestimmt werden.

$$\rho_V = \frac{m}{A \cdot t} = \frac{1240 g}{m^2 \cdot 0,88235 \cdot 10^{-3} m} = 1405338 \frac{g}{m^3} \hat{=} 1,405 \frac{g}{cm^3}$$

Der Verbund besteht aus E-Glas und dem Epoxidharz CeTePoX AM 3325 A/B. Das entsprechende Datenblatt ist im Anhang zu finden.

Es sind jeweils drei Schichten zu einem Multiaxialgelege zusammengefasst, im Weiteren auch als Laminatschicht bezeichnet. Jede Schicht verfügt über einen Faservolumenanteil von 55,33%. Die Schichten des MAG sind nicht im Verhältnis 1:1:1 verteilt. Auf die Schichten in 0°- und 90°-Orientierung haben einen Volumenanteil von 51,6 % der Laminatschicht. Dies entspricht einer Dicke von $t=0,4553mm$. Die Schichten mit einer Orientierung von 30° und 45° haben jeweils einen Volumenanteil von 24,2 %, was eine Dicke von je $t=0,21153mm$ entspricht.

Werden nun einzelne Schichten oder auch Laminatschichten durch einen anderen Laminattyp ersetzt, ist es jedoch erforderlich, die einzelnen Kennwerte der Schichten zu ermitteln.

Die Laminatschichten unterscheiden sich lediglich durch Faservolumen und Ausrichtung. Für die Modellierung in FEM ist nur die Bestimmung der Kennwerte in Abhängigkeit der Faservolumenanteile notwendig, da der Aufbau des Gesamtverbundes direkt im Pre-Prozessor stattfindet.

Die Kennwerte der einzelnen Schichten können der vorangegangenen Diplomarbeit nicht vollständig entnommen werden, weshalb diese neu bestimmt werden.

Als Epoxidharz vom CeTePoX 3325 A/B zum Einsatz.

Es ergeben sich für die E-Glass Laminat folgende Kennwerte:

E-Glas	Epoxidharz
$E_f = 73.000MPa$	$E_m = 4.800MPa$
$G_f = 29.918MPa$	$G_m = 1.7522MPa$
$\nu_f = 0,22$	$\nu_m = 0,37$
$\rho_f = 2,54 \frac{g}{cm^3}$	$\rho_m = 1,18 \frac{g}{cm^3}$
$Rm_f = 2400MPa$	$Rm_m = 72MPa$
$Rm_f^d = 1080MPa$	$Rm_m^d \approx 1,5 \cdot Rm_f = 108MPa$
$\alpha_f = 5,1 \cdot 10^{-6} \frac{1}{K}$	$g_m = \frac{Rm_m}{E_m} = 0,015$
	$\alpha_f = 0,67 \cdot 10^{-6} \frac{1}{K}$

Tabelle 9: Kennwerte für E-Glas und Epoxidharz

Für das FEM-Modell werden folgende Konstanten benötigt:

E_{11} , E_{22} , E_{33} , ν_{12} , ν_{13} , ν_{23} , G_{12} , G_{13} , G_{23} . Ebenso können die verschiedenen Festigkeiten und der Wärmeausdehnungskoeffizient ermittelt werden. Die Berechnungsvorschriften können Kapitel 3.3.1 und 3.3.3 entnommen werden.

Die Ausgangsmaterialien werden zur Vereinfachung als isotrop angenommen und Lufteinschlüsse beim Laminieren ausgeschlossen

$$E_{11} = 42.535 \text{MPa}$$

$$E_{22} = 22.702 \text{MPa}$$

$$E_{33} = 22.702 \text{MPa}$$

$$G_{12} = 6.373 \text{MPa}$$

$$G_{13} = 4.675 \text{MPa}$$

$$G_{23} = 4.675 \text{MPa}$$

$$\nu_{12} = 0,287 \text{MPa}$$

$$\nu_{13} = 0,374 \text{MPa}$$

$$\nu_{23} = 0,287 \text{MPa}$$

$$\rho_V = 1,93 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

$$\alpha_{11} = 8,2 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{K}}$$

$$\alpha_{11} = 1,1 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{K}}$$

$$R_{11} = 1.449 \text{MPa}$$

$$R_{11}^d = 828 \text{MPa}$$

$$R_{22} = 155 \text{MPa}$$

$$R_{22}^d = 91 \text{MPa}$$

$$R_{12} = 12 \text{MPa}$$

$$R_{12}^A = 37 \text{MPa}$$

Tabelle 10: Kennwerte der E-Glas-Laminat

	Lagenanzahl	Anzahl Schichten	Orientierung	Material
Innen <- Außen	1	3	90° / +45°	E-Glas
	16	3	0° / +45°	E-Glas
	1	3	90° / +45°	E-Glas
	30	3	0° / +30°	E-Glas
	1	3	90° / +45°	E-Glas
	16	3	0° / +45°	E-Glas
	1	3	90° / +45°	E-Glas
	35	3	0° / +30°	E-Glas
	1	3	90° / +45°	E-Glas
	102			

Tabelle 11: Lagenaufbau des ursprünglichen Verbundes [Scheidt, 2010]

4.3 Erste Auslegung mittels QMG

Als Metallverbund kommen unter anderem Quadratmaschengewebe in Frage. Die Quadratmaschen haben den Vorteil, dass durch ihre Porosität oder besser gesagt der offenen Siebfläche, eine sehr gute Verbindung mit dem Epoxidharz als Matrix möglich ist.

In der vorausgegangenen Diplomarbeit von Oliver Scheidt wurde dieses als mögliche Variante angesehen und verwendet. Es werden nun die erforderlichen Kenngrößen ermittelt. Wichtig hierbei ist es, dass eine Steigerung der Steifigkeit vorhanden ist und somit, wie bereits erwähnt, ein Elastizitätsmodul von mehr als 30 kN/mm^2 aufweist.

Für die Untersuchung des Blattanschlusses wird das Quadratmaschengewebe mit der Artikelnummer 10373180 der Firma GKD – Gebr. Kufferath AG in Betracht gezogen. Dieses ist aus Edelstahldrähten (1.4401) gefertigt.

Die genauen Abmessungen sind:

- Maschenweite: 0,4 mm
- Drahtstärke: 0,25 mm
- Flächenbezogenes Gewicht: 1,22 kg/m^2

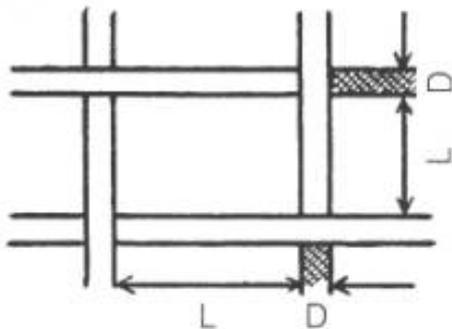


Tabelle 12: Geometriebezeichnungen am QMG

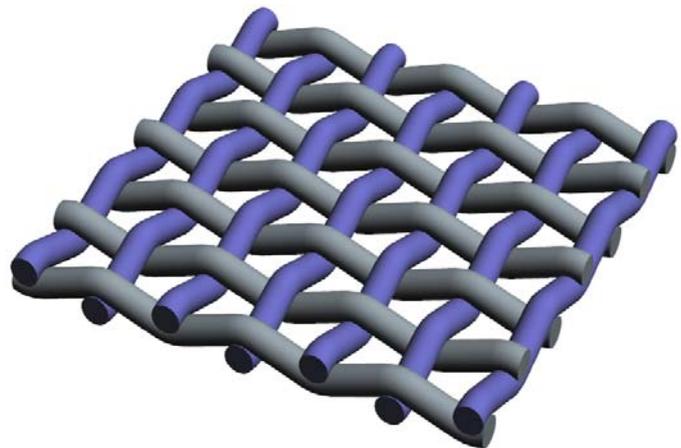


Abbildung 38: Quadratmaschengewebe: [Spörl KG, 2011]

Für dieses Quadratmaschengewebe sind ebenfalls Prüfprotokolle eines Zugversuches erhältlich. Das Elastizitätsmodul ist die Steigung der Kurve im elastischen, also linearen Verlauf. Bei dünnen flächigen Bauteilen wird jedoch nicht die Spannung aufgetragen, sondern meist der Fluss (N/mm). Dieser bezieht sich auf die Gewebebreite bei einer normierten Dicke von 1 mm . Es kann jedoch das E-Modul wie folgt ermittelt werden:

$$E = \frac{\Delta n}{\Delta \varepsilon} \cdot \frac{1}{t_{\text{real}}}$$

Die Gewebedicke t berechnet sich wie folgt:

$$t = 2 \cdot d_d$$

Es ergibt sich also für das E-Modul in Schuss- und Kettrichtung des trockenen Quadratmaschengewebes:

$$E_{QMG,1} = \frac{\Delta n}{\Delta \varepsilon} \cdot \frac{1}{t_{\text{real}}} = \frac{20 \frac{N}{mm}}{0,45\%} \cdot \frac{1}{0,5mm} = 8888,89MPa$$

$$E_{QMG,2} = \frac{\Delta n}{\Delta \varepsilon} \cdot \frac{1}{t_{\text{real}}} = \frac{20 \frac{N}{mm}}{0,58\%} \cdot \frac{1}{0,5mm} = 6896,55MPa$$

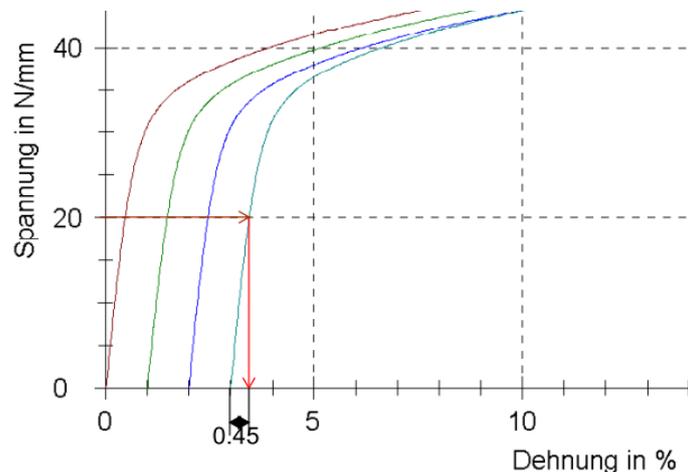


Abbildung 39: Zugversuch des Quadratmaschengewebes in Schussrichtung (trocken)

Dieser Wert bezieht sich auf das E-Modul des trockenen Quadratmaschengewebes bei Betrachtung der gesamten Querschnittsfläche.

Zur Berechnung der E-Moduln des Verbundes gibt es in diesem speziellen Fall keine Berechnungsgrundlagen. Normalerweise ist es erforderlich, am fertigen Verbund von QMG und Epoxidharz entsprechende Versuche durchzuführen. Die Ermittlung der Werte für den Verbund, welche nun folgen, sind deshalb nur mit Einschränkungen möglich, sollten aber für eine ungefähre Abschätzung ausreichen.

Prinzipiell gibt es zwei mögliche Vorgehensweisen, die hier beide erläutert werden. Erste wurde von Oliver Scheidt verwendet, diese ist jedoch nicht zu bevorzugen.

Nach Scheidt, wird das aus dem Zugversuch ermittelte E-Modul auf den eigentlichen Draht zurückgerechnet, in dem nur der Querschnitt des Drahtes berücksichtigt wird.

Je Millimeter Gewebebreite sind 1,538 Drähte vorhanden. Der Draht mit einem Durchmesser von 0,25mm hat eine effektive Querschnittsfläche von

$$A_{\text{Draht}} = \frac{\pi}{4} \cdot d_{\text{Draht}}^2 = \frac{\pi}{4} \cdot (0,25\text{mm})^2 = 0,0490874\text{mm}^2$$

Auf einem Millimeter bedeutet diese eine Fläche von $A = 1,538 \cdot A_{\text{Draht}} = 1,538 \cdot 0,0490874\text{mm}^2 = 0,075496\text{mm}^2$.

Wird nun versucht, das E-Modul der Faser zu berechnen, ist es erforderlich, die effektive Fläche des Drahtes und des Gewebes ins Verhältnis zu setzen. Denn es gilt:

$$E_{\text{Draht}} \cdot A_{\text{Draht}} = E_{\text{QMG}} \cdot A_{\text{QMG}} \Rightarrow E_{\text{Draht}} = E_{\text{QMG}} \cdot \frac{A_{\text{QMG}}}{A_{\text{Draht}}}$$

Es kann somit das E-Modul der Drähte in Schuss- und Kettrichtung berechnet werden.

$$E_{\text{Draht},1} = E_{\text{QMG},1} \cdot \frac{A_{\text{QMG}}}{A_{\text{Draht}}} = 8.888,89\text{MPa} \cdot \frac{0,5\text{mm}^2}{0,075496\text{mm}^2} = 58.869,94\text{MPa}$$

$$E_{\text{Draht},2} = E_{\text{QMG},2} \cdot \frac{A_{\text{QMG}}}{A_{\text{Draht}}} = 6.896,55\text{MPa} \cdot \frac{0,5\text{mm}^2}{0,075496\text{mm}^2} = 46.674,95\text{MPa}$$

Dieser Wert ist etwas höher als der von Oliver Scheidt, was auf Ungenauigkeiten beim Ablesen zurückgeführt werden kann.

Nun werden die Mischungsregeln für unidirektionale Schichten angewandt. Diese gelten jedoch nur mit starken Einschränkungen und dürfen für eine endgültige Auslegung nicht verwendet werden!

Die E-Module in Schuss- und Kettrichtung lassen sich wie folgt berechnen:

$$E_1 = \varphi_{\text{Faser}} \cdot E_{\text{Faser},1} + (1 - \varphi_{\text{Faser}}) \cdot E_{\text{Matrix}} = 0,3065 \cdot 58.870\text{MPa} + (1 - 0,3065) \cdot 2.800\text{MPa} = 19.985\text{MPa}$$

$$E_2 = \varphi_{\text{Faser}} \cdot E_{\text{Faser},2} + (1 - \varphi_{\text{Faser}}) \cdot E_{\text{Matrix}} = 0,3065 \cdot 46.675\text{MPa} + (1 - 0,3065) \cdot 2.800\text{MPa} = 16.248\text{MPa}$$

Der Faservolumenanteil wurde vorher wie folgt berechnet:

$$\varphi_{\text{Faser}} = \frac{V_{\text{QMG}}}{V_{\text{Verbund}}} \approx \frac{\frac{m_{\text{QMG}}}{\rho_{1,4401}}}{l \cdot b \cdot t} = \frac{m_{\text{QMG}}}{A_{\text{Norm}} \cdot t \cdot \rho_{1,4401}} = \frac{m_{\text{QMG}}}{A_{\text{Norm}} \cdot 2 \cdot d_d \cdot \rho_{1,4401}} = \frac{1,22\text{kg}}{1\text{m}^2 \cdot 2 \cdot 0,5\text{mm} \cdot 7,96 \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3}} = 0,306$$

Es wird deutlich, dass die geforderten 30 GPa für das E-Modul in Schussrichtung nicht erreicht werden. Anscheinend kam es zu einem Tippfehler, wodurch dies nicht auffiel.

Des Weiteren wäre es besser nicht den kompletten Faservolumenanteil in diese Berechnung einzubeziehen. Bei der Mischungsregel für UD-Lamine wird eine Parallelschaltung von Harz und Fasern angenommen. Dies ist hier jedoch nicht der Fall, sondern es sind auch Fasern in Reihe geschaltet. Möchte man nun konservativ rechnen, sollte man nur die Fasern in Betracht ziehen, welche parallel laufen. Bei einem Quadratmaschengewebe ist dies genau die Hälfte, wodurch sich der Faservolumenanteil halbiert. Der reduzierte Faservolumenanteil wäre somit:

$$\varphi_{Faser, reduziert} = \frac{1}{2} \cdot \varphi_{Faser} = \frac{1}{2} \cdot 0,3065 = 0,15325$$

Die E-Moduln reduzieren sich dann weiter und liegen bei:

$$E_1 = \varphi_{Faser} \cdot E_{Faser,1} + (1 - \varphi_{Faser}) \cdot E_{Matrix} = 0,15325 \cdot 58.870MPa + (1 - 0,15325) \cdot 2.800MPa = 11.393MPa$$

$$E_2 = \varphi_{Faser} \cdot E_{Faser,2} + (1 - \varphi_{Faser}) \cdot E_{Matrix} = 0,15325 \cdot 46.675MPa + (1 - 0,15325) \cdot 2.800MPa = 9.524MPa$$

Eine bessere Variante um das E-Modul des Verbundes abzuschätzen, liegt darin, das aus dem Zugversuch gewonnene E-Modul nicht auf den Drahtquerschnitt zurückzurechnen, sondern direkt zu verwenden.

Das E-Modul aus dem Zugversuch ist streng genommen ein Verbund aus Edelstahldrähten und Luft. Im Verbund mit Harz wird die Luft von Harz verdrängt. Wird nun das E-Modul des trockenen QMG verwendet, kann auf die Verwendung des Faservolumenanteils für den ersten Term verzichtet werden. Lediglich der Term des Harzes ist mit einem Volumenanteil zu multiplizieren. Da das E-Modul nicht auf den Drahtquerschnitt zurück gerechnet wird, erhält man einen weniger verfälschten Kennwert der Faser und kann in Näherung angenommen werden, dass folgende Beziehung gilt:

$$E_{QMG1} = \varphi_{Faser} \cdot E_{Faser}$$

Dadurch kann für erste Abschätzungen die E-Moduln wie folgt berechnet werden:

$$E_1 = E_{QMG1} + (1 - \varphi_{Faser}) \cdot E_{Matrix}$$

Des Weiteren wurde der Faservolumenanteil nicht mittels der flächenspezifischen Masse und der Dichte für Edelstahl berechnet, sondern über eine Abschätzung einer Einheitszelle des Gewebes.

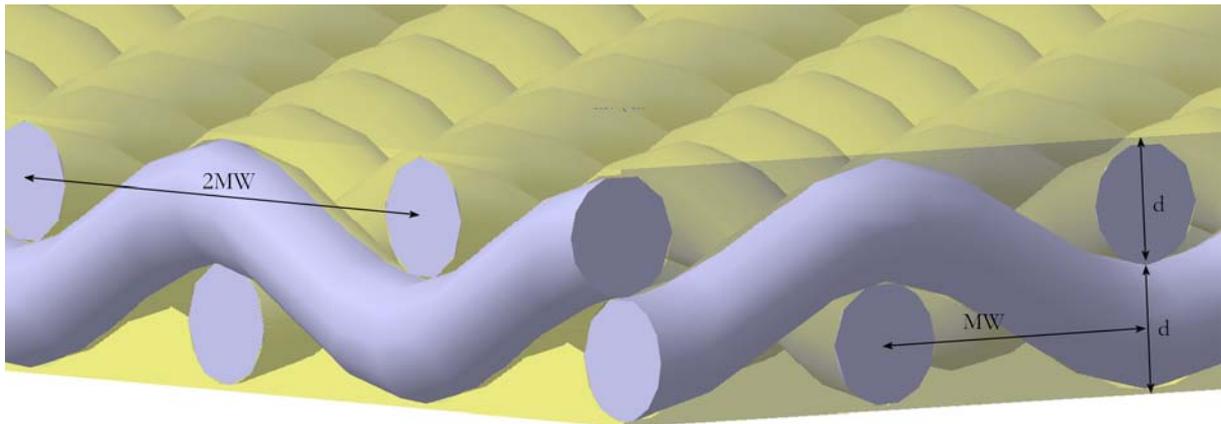


Abbildung 40: Geometrie des QMG

In guter Näherung kann der Faservolumenanteil des QMG wie folgt berechnet werden:

$$\varphi_{Faser} = \frac{V_{Faser}}{V_{Verbund}} = \frac{\frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot (MW + d) \cdot 2}{2 \cdot d \cdot (MW + d)^2} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{d}{MW + d} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{0,25mm}{0,4mm + 0,25mm} = 0,302$$

Es ergibt sich somit für die E-Moduln des Verbundes folgende Werte

$$E_1 = E_{QMG,1} + (1 - \varphi_{Faser}) \cdot E_{Matrix} = 8.889MPa + (1 - 0,302) \cdot 2.800MPa = 10.843MPa$$

$$E_1 = E_{QMG,1} + (1 - \varphi_{Faser}) \cdot E_{Matrix} = 86897MPa + (1 - 0,302) \cdot 2.800MPa = 8.851MPa$$

Diese Werte liegen leicht unter den Werten mit dem reduzierten Faservolumen, sind jedoch recht konservativ. Entscheidend ist jedoch, dass die Verwendung eines Quadratmaschengewebes nicht die erhoffte Wirkung hat und somit nicht für ein Hybridlaminat in Frage kommt. Da zur Berechnung der Elastizitätskennwerte Rechenvorschriften für unidirektionale Laminare verwendet wurden, wurde zur Verifizierung eine Berechnung mittels der Finiten-Elemente-Methode durchgeführt.

Um den Rechenaufwand möglichst gering zu halten, wurden hier keine Drähte mit Kreisquerschnitt sondern mit äquivalentem Quadratquerschnitt verwendet. Es gilt somit:

$$A_{Kreis} = \frac{\pi}{4} d^2 = A_{Quadrat} = a^2 \Rightarrow a = \sqrt{\frac{\pi}{4} d^2} = \sqrt{\frac{\pi}{4} 0,25^2 mm} \approx 0,222mm$$

Als Laminatdicke wurde 0,54 mm gewählt, damit das QMG komplett mit Epoxidharz umschlossen ist. Als weitere Vereinfachung sind die einzelnen Drähte nicht einzeln, sondern in einem Verbund modelliert. Das bedeutet, dass an den Stellen, an denen sich diese berühren, nicht nur Reibung auftritt, sondern diese fest miteinander verknüpft sind. Für die zu erwartenden Ergebnisse bedeutet dies, dass die Steifigkeit höher ist, als es in der Realität der Fall ist.

Das Harz wurde mittels Tie-Constrains mit dem trockenen Quadratmaschengewebe verknüpft, was bedeutet, dass dieses in Kontakt bleibt und keine Ablösung zwischen Harz und Gewebe auftritt. Diese Annahme kann auf Grund des großen freien Volumens angenommen werden.

Als Materialwerte wurden folgende Werte verwendet:

Edelstahlgewebe:	E	210.000	N/mm ²
	v	0,3	-
Epoxidharz:	E	4.800	N/mm ²
	v	0,37	-

Um das Elastizitätsmodul zu bestimmen, wird ein Zugversuch in Y-Richtung simuliert. Hierfür wird die untere Schnittfläche des Modells fest eingespannt und die seitlichen Schnittflächen als Symmetriefflächen definiert. An der oberen Schnittfläche wirkt eine Zugspannung von $\sigma=20$ N/mm².

Die Länge des Modells in Y-Richtung beträgt $l_0=4,55$ mm.

Nach der Berechnung kann eine gemittelte Verformung von etwa $\Delta l = 3,5 \cdot 10^{-3} mm$ (konservativ) abgelesen werden. Und für das E-Modul ergibt sich folgender Wert:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\sigma \cdot l_0}{\Delta l} = \frac{20 \frac{N}{mm^2} \cdot 4,55 mm}{3,5 \cdot 10^{-3} mm} = 26.000 \frac{N}{mm^2}$$

Zu beachten ist hierbei, dass dieser Wert über dem wirklichen liegen wird, da die einzelnen Drähte fest miteinander im Modell verknüpft sind, welches normal nicht der Fall ist.

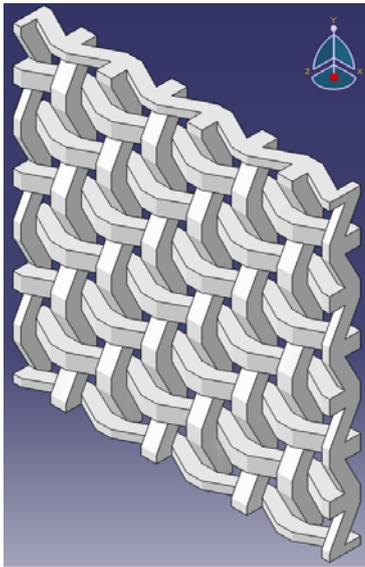


Abbildung 41: FEM-Modell des QMG

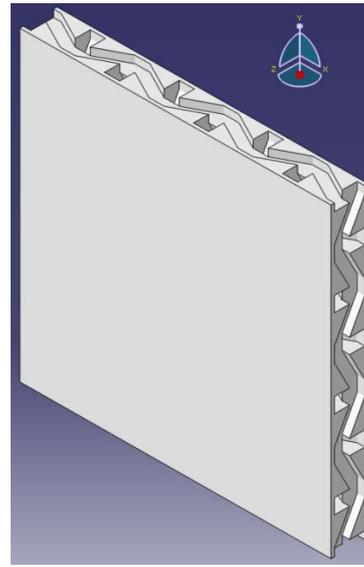


Abbildung 42: FEM-Modell des Epoxidharzes

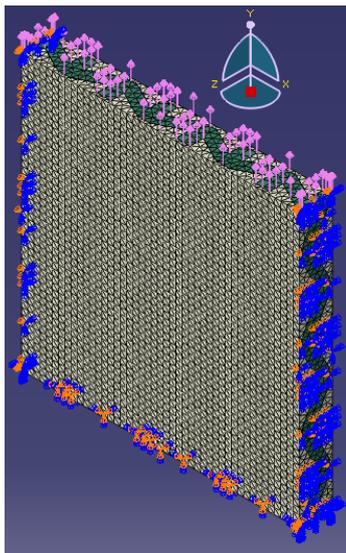


Abbildung 43: Randbedingungen am Verbund

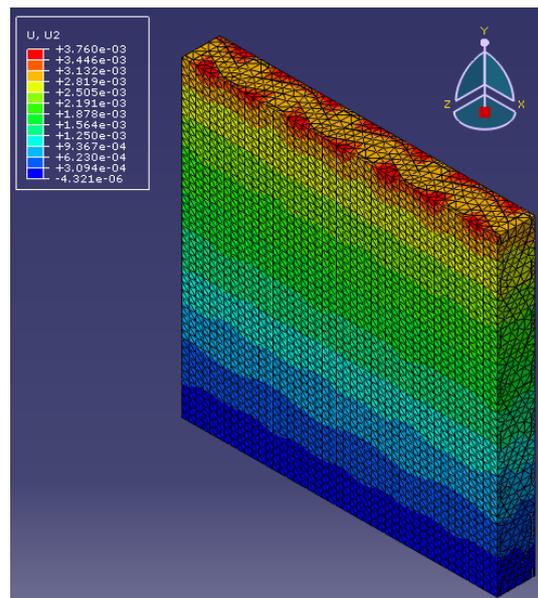


Abbildung 44: Verformungen unter Belastung

Ebenso wurde ein FEM-Modell generiert, welches aus einzelnen Drähten und dem Epoxidharz besteht. Die Verbindungen zwischen Gewebe und Epoxidharz wurden ebenfalls mittels Tie-Constrains realisiert, was eine Ablösung des Harzes vom Gewebe ausschließt. Zwischen den einzelnen Drähten des Gewebes tritt Reibung mit einem Reibungskoeffizienten von $\nu=0,3$ auf. Bei einer Belastung von $\sigma=10 \text{ N/mm}^2$ tritt letztlich eine Verformung in Zugrichtung von $\Delta l = 2,0 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$ auf. Somit ergibt sich ein E-Modul von:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\sigma \cdot l_0}{\Delta l} = \frac{10 \frac{N}{mm^2} \cdot 4,55 mm}{2,0 \cdot 10^{-3} mm} = 22.750 \frac{N}{mm^2}$$

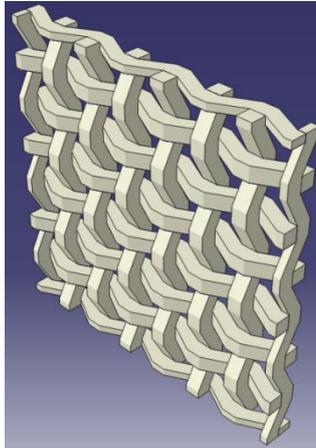


Abbildung 45: FEM-Modell des QMG

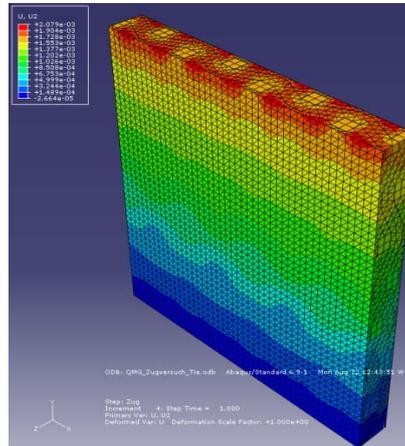


Abbildung 46: Verformungen unter Belastung

Wie zu erwarten ist das E-Modul noch geringer als beim stark vereinfachten FEM-Modell.

Es zeigt sich also, dass auch bei einer Untersuchung mittels der Finiten-Elemente-Methode, das Quadratmaschengewebe nicht den gewünschten Erfolg bringt.

Weitere Gewebe mit deutlich höheren E-Moduln, wie z.B. Köpertressengewebe, sind zwar vorhanden, jedoch ist hier die Einbettung in Harz kritisch und eine Berechnung oder gar eine Abschätzung deutlich komplizierter. Hierfür wäre es erforderlich, erst einmal Versuche an diesem Gewebetyp durchzuführen, bevor diese weiter behandelt werden können.

Deswegen wird nun ein Hybridlaminat aus E- und S-Glas in Betracht gezogen, sowie einlamierte Edelstahlbleche, welche mit ausreichender Oberflächenbehandlung ebenfalls möglich sind.

4.4 Einlamierte Stahlbleche

Das Einlaminieren von Edelstahlblechen ist bei entsprechender Vorbehandlung der Oberfläche möglich. Und können auf verschiedene Weisen betrachtet werden. Entweder es wird als reines Stahlblech zwischen zwei Laminaten betrachtet, oder als ein Stahlblech, welches zwischen zwei Schichten Harz eingebunden wird.

Im ersten Fall ist die Berechnung deutlich einfacher. Hier kann das Blech als isotrop angesehen werden. Und es ergeben sich folgende Kennwerte:

$$E = 210.000MPa$$

$$\nu_f = 0,3$$

$$\rho_f = 8,0 \frac{g}{cm^3}$$

Die Festigkeit hierbei variiert sehr stark nach genauem Werkstoff und wird vorerst nicht festgelegt. Es werden hierfür die wirkenden Spannungen ermittelt, und der entsprechende Werkstoff am Ende der Betrachtung festgelegt.

Im zweiten Fall können einlamierte Stahlbleche, ähnlich wie UD-Laminatschichten, für eine erste Abschätzung berechnet werden. Bei einlamierten Stahlblechen sind jedoch die Kennwerte in Schuss- und Kettrichtung gleich, da der Aufbau aus einer Schicht Harz, einem Stahlblech und erneut einer Schicht Harz besteht.

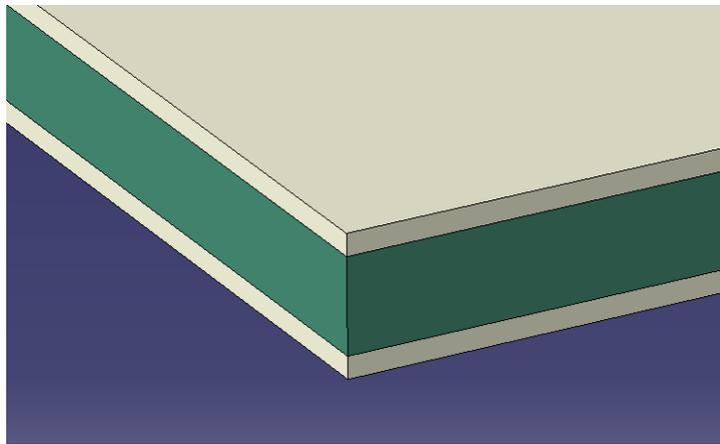


Abbildung 47: Einlamiertes Stahlblech

Neben der Bestimmung der Ingenieurkonstanten mittels analytischer Betrachtung wird jedoch auch eine Untersuchung mittels FEM durchgeführt. Mittels der Finiten-Elementen-Methode werden die Elastizitätsmoduln sowie die Querkontraktionszahlen bestimmt. Mittels dieser Werte werden dann die Schubmoduln berechnet. Die Festigkeitskennwerte können nicht mittels FEM ermittelt werden, weshalb hier auf die analytische Berechnung zurückgegriffen wird.

Der Rotorblattanschluss besteht aus 102 Schichten und verfügt über eine Wandstärke von

90 mm. Somit ergibt sich für eine Laminatschicht eine Dicke von: $t_{Lam} = \frac{90mm}{102} \approx 0,88mm$.

Für das einlamierte Stahlblech werden also folgende Abmessungen gewählt:

- Dicke des Stahlblechs: 0,6mm
- Dicke der Laminatschicht: 2x0,24mm

Als Ausgangsmaterialien kamen als Epoxidharz erneut CeTePoX 3325 A/B und als Stahlblech ein nicht rostender austenitischer Chrom-Nickel-Molybdän-Stahl mit der Materialkennnummer 1.4401 zum Einsatz.

Für den (Faser)Volumenanteil ergibt sich ein Wert von:

$$\varphi_{Faser} = \frac{V_{Faser}}{V_{Verbund}} = \frac{t_{faser} \cdot A}{(t_{faser} + 2t_{Harz}) \cdot A} = \frac{t_{faser}}{t_{faser} + 2t_{Harz}} = \frac{t_{faser}}{t_{Lam}} = \frac{0,6mm}{0,88mm} = 0,682$$

1.4401	Epoxidharz (CeTePoX)
$E_f = 210.000MPa$	$E_m = 4.800MPa$
$G_f = 80.769MPa$	$G_m = 1.7522MPa$
$\nu_f = 0,3$	$\nu_m = 0,37$
$\rho_f = 8,0 \frac{g}{cm^3}$	$\rho_m = 1,18 \frac{g}{cm^3}$
$Rm_f = 500MPa$	$Rm_m = 72MPa$
$Rm_f^d = 500MPa$	$Rm_m^d \approx 1,5 \cdot Rm_f = 108MPa$
$\alpha_f = 16 \cdot 10^{-6} \frac{1}{K}$	$g_m = \frac{Rm_m}{E_m} = 0,015$
	$\alpha_f = 0,67 \cdot 10^{-6} \frac{1}{K}$

Tabelle 13: Materialkennwerte (1.4401 , CeTePoX)

Mittels der analytischen Betrachtung ergeben sich folgende Kennwerte für das einlamierte Stahlblech:

$E_{11} = 144.705MPa$
$E_{22} = 144.705MPa$
$E_{33} = 40.305MPa$
$G_{12} = 10.323MPa$
$G_{13} = 7.330MPa$
$G_{23} = 7.330MPa$
$\nu_{12} = 0,322MPa$
$\nu_{13} = 0,389MPa$
$\nu_{23} = 0,389MPa$
$\rho_V = 5,83 \frac{g}{cm^3}$
$\alpha_{11} = 17 \cdot 10^{-6} \frac{1}{K}$
$\alpha_{11} = 17 \cdot 10^{-4} \frac{1}{K}$
$R_{11} = 346MPa$
$R_{11}^d = 307MPa$
$R_{22} = 346MPa$
$R_{22}^d = 307MPa$
$R_{12} = 12MPa$
$R_{12}^A = 123MPa$

Tabelle 14: Kennwerte des einlamierten Stahlblechs (analytisch)

Für die Betrachtung mittels FEM wurde das einlamierte Stahlblech wie folgt modelliert: Es wurde eine Platte mit dem Abmessungen 20x50x0,88 mm modelliert und diese in drei so genannte Sections eingeteilt. Diese Sections sind jeweils 0,24 mm von der Ober- bzw. Unterfläche der Platte entfernt und bilden somit das Epoxidharz. Dazwischen befindet sich das Stahlblech mit einer Dicke von 0,6 mm. Danach wurde der Verbund mittels negativer Drücke in jede Richtung auf Zug beansprucht, so dass eine Testreihe von drei Versuchen entstand. Für das E-Modul gilt:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\sigma \cdot l_0}{\Delta l}$$

Mittels der aufgebrachten Spannung, sowie der Verformung in Spannungsrichtung, kann dann das entsprechende E-Modul ermittelt werden.

Für die Ermittlung der Querkontraktionszahlen wurde ähnlich verfahren. Hier sind die Abmessungen des Modells jedoch 0,88x50x0,88 mm bzw. 0,88x0,88x0,88 mm. Mit einer Spannung in Zugrichtung wird das Modell verformt und das Verhältnis der Dehnung in Zug- und Querrichtung können die Querkontraktionszahlen ermittelt werden.

Für die Querkontraktionszahl gilt:

$$\nu_{ij} = -\frac{\varepsilon_j}{\varepsilon_i} = \frac{\Delta l_j / l_j}{\Delta l_i / l_i}$$

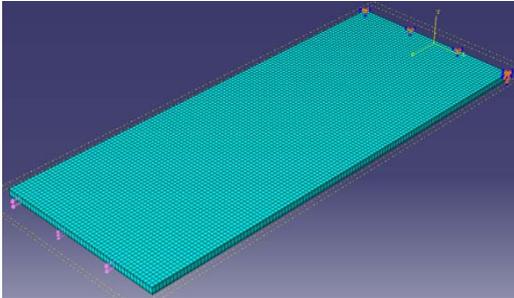


Abbildung 48: Randbedingungen für E_{11} und E_{22}



Abbildung 50: Randbedingungen für E_{33}

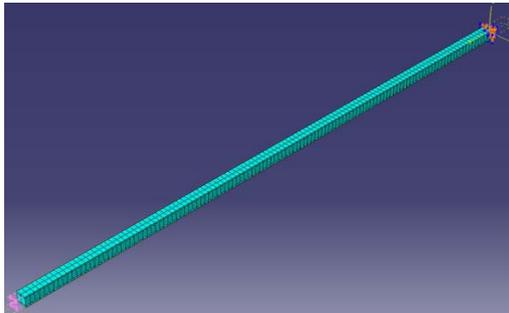


Abbildung 52: Randbedingungen für ν_{12} und ν_{13}

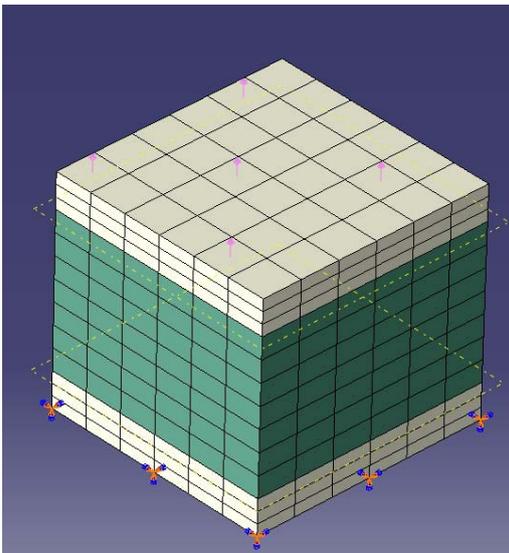


Abbildung 54: Randbedingungen für ν_{31} und ν_{32}

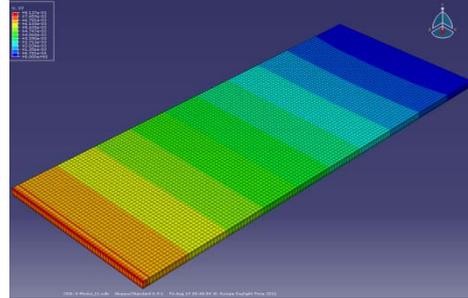


Abbildung 49: Verformung für E_{11} und E_{22}



Abbildung 51: Verformung für E_{33}

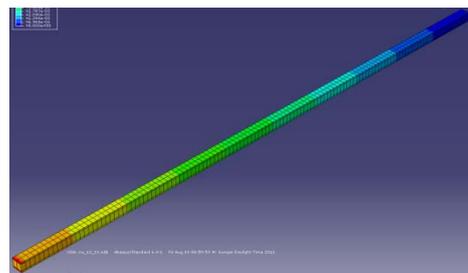


Abbildung 53: Verformung für ν_{12} und ν_{13}

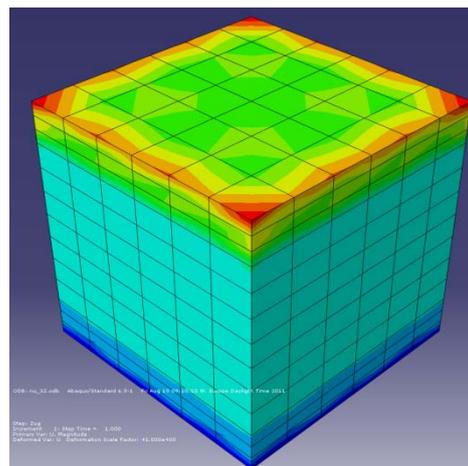


Abbildung 55: Verformung für ν_{31} und ν_{32}

$E_{11,22}$			E_{33}		
σ	20	N/mm ²	σ	20	N/mm ²
L_0	50	mm	L_0	0,88	mm
ΔL	6,87E-03	mm	ΔL	7,09E-04	mm
ε	1,37E-04	-	ε	8,06E-04	-
$E_{11,22}$	145.497	N/mm ²	E_{33}	24.813	N/mm ²

Tabelle 15: E-Moduln des einlaminieren Stahlblechs nach FEM

ν_{12}			$\nu_{13,23}$			$\nu_{32,31}$		
L_0	50	mm	L_0	50	mm	L_0	0,88	mm
ΔL	6,92E-03	mm	ΔL	6,92E-03	mm	ΔL	7,26E-04	mm
d_0	0,88	mm	d_0	0,88	mm	d_0	0,88	mm
Δd	-5,3E-05	mm	Δd	-4,70E-05	mm	Δd	-2,40E-05	mm
ν_{12}	0,43	-	ν_{13}	0,39	-	$\nu_{32,31}$	0,03	-

Tabelle 16: Querkontraktionszahlen des einlaminieren Stahlblechs nach FEM

Für das Schubmodul gilt:

$$G_{ij} = \frac{E}{2 + 2 \cdot \nu_{ij}}$$

Und es folgt somit für die Schubmoduln:

G_{12}	50.825	N/mm ²
G_{13}	52.487	N/mm ²
G_{23}	52.487	N/mm ²

Tabelle 17: Schubmoduln des einlaminieren Stahlblechs nach FEM

Analytische Betrachtung	Finite-Elemente-Methode
$E_{11} = 144.705MPa$	$E_{11} = 145.497MPa$
$E_{22} = 144.705MPa$	$E_{22} = 145.497MPa$
$E_{33} = 40.305MPa$	$E_{33} = 24.813MPa$
$G_{12} = 10.323MPa$	$G_{12} = 50.825MPa$
$G_{13} = 7.330MPa$	$G_{13} = 52.487MPa$
$G_{23} = 7.330MPa$	$G_{23} = 52.487MPa$
$\nu_{12} = 0,322MPa$	$\nu_{12} = 0,43MPa$
$\nu_{13} = 0,389MPa$	$\nu_{13} = 0,39MPa$
$\nu_{23} = 0,389MPa$	$\nu_{23} = 0,39MPa$
$\rho_V = 5,83 \frac{g}{cm^3}$	
$\alpha_{11} = 17 \cdot 10^{-6} \frac{1}{K}$	
$\alpha_{11} = 17 \cdot 10^{-4} \frac{1}{K}$	
$R_{11} = 346MPa$	
$R_{11}^d = 283MPa$	
$R_{22} = 346MPa$	
$R_{22}^d = 283MPa$	
$R_{12} = 12MPa$	
$R_{12}^A = 113MPa$	

Tabelle 18: Vergleich der Kennwerte zwischen FEM und analytischer Betrachtung

Es ist erkennbar, dass die Moduln, welche mittels der FEM ermittelt werden, für die Elastizitäten zwar sehr ähnlich sind, die Schubmoduln sich jedoch stark unterscheiden.

Da diese Werte stark variieren, sowie ein direkte Einbettung möglich ist, wird ein Stahlblech mit einer Blechdicke von 0,9 mm verwendet. Dieses ist geringfügig dicker als eine Schicht MAG (0,88 mm). Dies wird unter den Fertigungstoleranzen jedoch kaum auffallen. Im FEM-Modell wird weiterhin mit einer Dicke des Stahlblechs von 0,88 mm gerechnet werden. Es werden somit die folgenden Werkstoffkennwerte für ein isotropes Material gewählt:

$$E = 210.000MPa$$

$$\nu = 0,3$$

$$\rho = 8,0 \frac{g}{cm^3}$$

Eine weitere Besonderheit der Stahlbleche ist die hohe Dichte. Wird eine Schicht des ursprünglichen Multiaxialgelege durch ein Stahlblech ersetzt, so ist die Masse dieser Schicht

deutlich höher. Eine überschlägige Rechnung soll dies berücksichtigen. Hierbei wird ein Stahlblech betrachtet, welches sich auf dem Lochkreis des Dehnbolzens, also in der Mitte des Rotorblattanschlusses befindet betrachtet. Die zusätzliche Masse des Stahlblechs, bei einer Höhe von 300mm und einer Dicke von 0,88mm, ergibt sich so zu:

$$m_{\text{Blech}} = \pi \cdot d \cdot h \cdot t_{\text{Lam}} \cdot (\rho_{\text{Blech}} - \rho_{\text{Lam,E-Glas}}) = \pi \cdot 2300\text{mm} \cdot 300\text{mm} \cdot 0,88\text{mm} \cdot (8,00 - 1,93)\text{g} / \text{cm}^3$$

$$m_{\text{Blech}} = 11,58\text{kg}$$

Wird dies mit den Betriebskräften aus Kapitel 5.3.2 verglichen, so stellen wir fest, dass auf 1/64 Teil des Rotorblattanschlusses eine Betriebskraft von 285 kN, sowie eine Vorspannkraft von 305 kN wirkt.

Die zusätzliche Gewichtskraft auf den gleichen Teil des Rotorblattanschlusses beträgt hier

$$\text{nur } F_G = m_{\text{Blech}} \cdot g \cdot \frac{1}{64} = 11,58\text{kg} \cdot 9,81 \frac{\text{N}}{\text{kg}} \cdot \frac{1}{64} = 1,775\text{N} \text{ und kann deshalb auch bei mehreren}$$

Schichten Stahlblech vernachlässigt werden.

4.5 Auslegung mittels S-Glas

Für die Auslegung des Laminates mit S-Glas werden die gleichen Faservolumenanteile wie beim E-Glas verwendet. Als Epoxidharz kommt ebenfalls CeTePoX 3325 A/B in Frage. Als Kennwerte werden Anhaltswerte aus [Schürmann, 2007] verwendet.

Folgende Werte werden verwendet:

S-Glas	Epoxidharz (CeTePoX)
$E_f = 86.810\text{MPa}$	$E_m = 4.800\text{MPa}$
$G_f = 35.578\text{MPa}$	$G_m = 1.7522\text{MPa}$
$\nu_f = 0,22$	$\nu_m = 0,37$
$\rho_f = 2,49 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$	$\rho_m = 1,18 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$
$Rm_f = 4500\text{MPa}$	$Rm_m = 72\text{MPa}$
$Rm_f^d = 1600\text{MPa}$	$Rm_m^d \approx 1,5 \cdot Rm_f = 108\text{MPa}$
$\alpha_f = 5,6 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{K}}$	$g_m = \frac{Rm_m}{E_m} = 0,015$
	$\alpha_f = 0,67 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{K}}$

Tabelle 19: Kennwerte für S-Glas und Epoxidharz

Für das FEM-Modell werden folgende Kennwerte benötigt:

E_{11} , E_{22} , E_{33} , ν_{12} , ν_{13} , ν_{23} , G_{12} , G_{13} , G_{23} .

Diese können nach verschiedenen Berechnungsvorschriften ermittelt werden.

Beide Materialien werden als isotrop angenommen.

$$E_{11} = 50.176MPa$$

$$E_{22} = 23.206MPa$$

$$E_{33} = 23.206MPa$$

$$G_{12} = 6.456MPa$$

$$G_{13} = 4.769MPa$$

$$G_{23} = 4.769MPa$$

$$\nu_{12} = 0,287MPa$$

$$\nu_{13} = 0,376MPa$$

$$\nu_{23} = 0,3287Pa$$

$$\rho_V = 1,90 \frac{g}{cm^3}$$

$$\alpha_{11} = 8,2 \cdot 10^{-6} \frac{1}{K}$$

$$\alpha_{11} = 1,1 \cdot 10^{-4} \frac{1}{K}$$

$$R_{11} = 2.601MPa$$

$$R_{11}^d = 1.367MPa$$

$$R_{22} = 158MPa$$

$$R_{22}^d = 93MPa$$

$$R_{12} = 11MPa$$

$$R_{12}^A = 37MPa$$

Tabelle 20: Kennwerte der S-Glas-Laminat

4.6 Auslegung mittels Carbonfasern

Für die Auslegung des Laminates mit Carbonfasern werden die gleichen Faservolumenanteile wie beim E-Glas verwendet. Als Epoxidharz kommt ebenfalls CeTePoX 3325 A/B in Frage. Als Kennwerte werden Anhaltswerte aus [Schürmann, 2007] verwendet. Carbonfasern sind nicht wie Glasfasern isotrop, sondern hochgradig anisotrop. In diesem

Fall beträgt das Verhältnis der Elastizitätsmoduln: $\frac{E_{11}}{E_{22}} = 8,2$

Folgende Werte werden verwendet:

C-Faser	Epoxidharz (CeTePoX)
$E_{f,11} = 230.000MPa$	$E_m = 4.800MPa$
$E_{f,22} = 28.000MPa$	$G_m = 1.7522MPa$
$G_f = 50.000MPa$	$\nu_m = 0,37$
$\nu_f = 0,23$	$\rho_m = 1,18 \frac{g}{cm^3}$
$\rho_f = 1,74 \frac{g}{cm^3}$	$Rm_m = 72MPa$
$Rm_f = 3430MPa$	$Rm_m^d \approx 1,5 \cdot Rm_f = 108MPa$
$Rm_f^d = 3430MPa$	$g_m = \frac{Rm_m}{E_m} = 0,015$
$\alpha_f = -0,1 \cdot 10^{-6} \frac{1}{K}$	$\alpha_f = 0,67 \cdot 10^{-6} \frac{1}{K}$

Tabelle 21: Kennwerte für C-Fasern und Epoxidharz

Für das FEM-Modell werden folgende Kennwerte benötigt:

$E_{11}, E_{22}, E_{33}, \nu_{12}, \nu_{13}, \nu_{23}, G_{12}, G_{13}, G_{23}$.

Diese können nach verschiedenen Berechnungsvorschriften ermittelt werden.

$$E_{11} = 129.403 \text{ MPa}$$

$$E_{22} = 18.617 \text{ MPa}$$

$$E_{33} = 18.617 \text{ MPa}$$

$$G_{12} = 6.588 \text{ MPa}$$

$$G_{13} = 4.922 \text{ MPa}$$

$$G_{23} = 4.922 \text{ MPa}$$

$$\nu_{12} = 0,293 \text{ MPa}$$

$$\nu_{13} = 0,386 \text{ MPa}$$

$$\nu_{23} = 0,293 \text{ MPa}$$

$$\rho_V = 1,49 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

$$\alpha_{11} = 1,2 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{K}}$$

$$\alpha_{11} = 1,2 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{K}}$$

$$R_{11} = 1.955 \text{ MPa}$$

$$R_{11}^d = 2.123 \text{ MPa}$$

$$R_{22} = 157 \text{ MPa}$$

$$R_{22}^d = 75 \text{ MPa}$$

$$R_{12} = 11 \text{ MPa}$$

$$R_{12}^A = 30 \text{ MPa}$$

Tabelle 22: Kennwerte der C-Faser-Laminat

4.7 Festigkeit

Die Berechnung der einzelnen Laminat hat ergeben, dass bei der Verwendung von S-Glasfasern die Festigkeit bei Zug- und Druckbeanspruchung deutlich steigt. So steigt die Zugfestigkeit um 79,5% von 1449 MPa auf 2601 MPa.

Die Druckfestigkeit nimmt ebenfalls deutlich zu. Sie erhöht sich um 65%.

Dem gegenüber stehen allerdings die deutlich höheren Kosten für die Verwendung von S-Glas. Siehe hierfür Tabelle 5.

Die Festigkeit von Carbonfasern siedeln sich zwischen dem E- und S-Glas ein. Gegenüber dem E-Glas ist eine Erhöhung der Druckfestigkeit von 156 % festzustellen. Diese ist somit höher als beim S-Glas. Die Zugfestigkeiten sind jedoch niedriger und haben eine Steigerung gegenüber dem E-Glas von 35 %.

Die Verwendung von Stahlblechen hat eine sehr hohe Steigerung des Elastizitätsmoduls zur Folge. Die Festigkeit von Edelstahlblechen variiert jedoch sehr stark. Deshalb wird der

endgültige Werkstoff, welcher in Frage kommt, erst in der Auswertung bestimmt. In Tabelle 23 ist eine Übersicht der 0,2% Dehngrenzen von verschiedenen Werkstoffen gegeben.

Werkstoff-Nr.	R_{P02}
-	MPa
1.4313	800
1.4324	960
1.4530	1100
1.4532	1380
1.4534	1150
1.4548	1100
1.4568	1310
1.4594	860

Tabelle 23: Festigkeitswerte von verschiedenen Stählen.

4.8 Laminataufbau und Konzepte

Der Rotorblattanschluss besteht aus 102 Lagen Multiaxialgelege. Es treten drei Multiaxialgelege mit verschiedenen Orientierungen auf. Diese wären:

- $0^\circ/\pm 30^\circ$
- $0^\circ/\pm 45^\circ$
- $90^\circ/\pm 45^\circ$

Die Faserorientierung in Bezug auf das Rotorblatt kann hierbei Abbildung 56 entnommen werden.

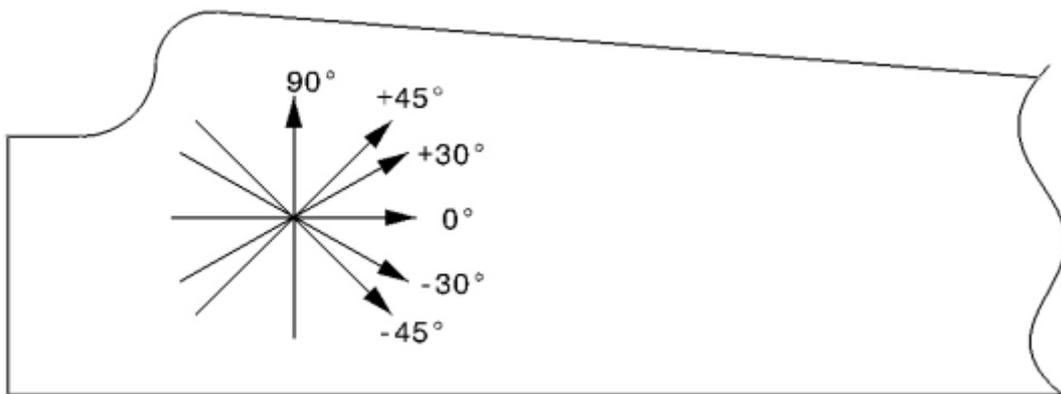


Abbildung 56: Faserorientierung [Scheidt, 2010]

Um die Steifigkeit in Richtung der 0° -Fasern zu erhöhen, ist das Ersetzen des $90^\circ/\pm 45^\circ$ MAG durch S-Glas oder C-Faser nicht effizient, da die Materialien nicht isotrop sind und eine Erhöhung der Steifigkeit hauptsächlich tangential zum Rotorblattanschluss zur Folge hätte.

Effektiver ist hier ein Ersetzen der $0^\circ/\pm 30^\circ$ - bzw. $0^\circ/\pm 45^\circ$ -MAGs. Wobei die MAGs mit $0^\circ/\pm 30^\circ$ -Orientierung entlang der Rotationsachse eine höhere Steifigkeit besitzen.

Werden Stahlbleche verwendet, kann es ebenfalls sinnvoll sein, die MAGs mit $90^\circ/\pm 45^\circ$ -Orientierung zu ersetzen. Während der Faserverbund mit Glasfasern und vor allem Carbonfasern stark anisotrop ist, können die Stahlbleche als isotrop angesehen werden, so dass die Steifigkeit tangential zur Oberfläche, sowie auch in Richtung der Blattspitze zunehmen sollte.

So entstehen neben dem ursprünglichen Laminataufbau sieben verschiedene Laminatvarianten, welche mittels der FEM modelliert und untersucht werden sollen.

	Lagenanzahl	Anzahl Schichten	Orientierung	Material
Innen <- Außen	1	3	90° / +-45°	S-Glas
	16	3	0° / +-45°	S-Glas
	1	3	90° / +-45°	S-Glas
	30	3	0° / +-30°	S-Glas
	1	3	90° / +-45°	S-Glas
	16	3	0° / +-45°	S-Glas
	1	3	90° / +-45°	S-Glas
	35	3	0° / +-30°	S-Glas
	1	3	90° / +-45°	S-Glas
	102			

Tabelle 24: Laminatvariante 1 - nur S-Glas

	Lagenanzahl	Anzahl Schichten	Orientierung	Material
Innen <- Außen	1	3	90° / +-45°	Stahlblech
	16	3	0° / +-45°	E-Glas
	1	3	90° / +-45°	Stahlblech
	30	3	0° / +-30°	E-Glas
	1	3	90° / +-45°	Stahlblech
	16	3	0° / +-45°	E-Glas
	1	3	90° / +-45°	Stahlblech
	35	3	0° / +-30°	E-Glas
	1	3	90° / +-45°	Stahlblech
	102			

Tabelle 25: Laminatvariante 2 - 90°/±45° mit Stahlblechen

	Lagenanzahl	Anzahl Schichten	Orientierung	Material	
Außen ← Innen	1	3	90° / +-45°	E-Glas	
	4	3	0° / +-45°	E-Glas	
	1	1	0° / +-45°	Stahlblech	
	9	3	0° / +-45°	E-Glas	
	1	1	0° / +-45°	Stahlblech	
	1	3	0° / +-45°	E-Glas	
	1	3	90° / +-45°	E-Glas	
	7	3	0°/+30°	E-Glas	
	1	1	0°/+30°	Stahlblech	
	9	3	0°/+30°	E-Glas	
	1	1	0°/+30°	Stahlblech	
	9	3	0°/+30°	E-Glas	
	1	1	0°/+30°	Stahlblech	
	2	1	0°/+30°	E-Glas	
	1	3	90° / +-45°	E-Glas	
	7	3	0° / +-45°	E-Glas	
	1	1	0° / +-45°	Stahlblech	
	8	3	0° / +-45°	E-Glas	
	1	3	90° / +-45°	E-Glas	
	1	1	0° / +-35°	Stahlblech	
	8	3	0°/+30°	E-Glas	
	1	1	0°/+30°	Stahlblech	
	9	3	0°/+30°	E-Glas	
	1	1	0°/+30°	Stahlblech	
	9	3	0°/+30°	E-Glas	
	1	1	0°/+30°	Stahlblech	
	5	3	0°/+30°	E-Glas	
	1	3	90° / +-45°	E-Glas	
	102				

Tabelle 26: Laminatvariante 3 – Stahlbleche in den Schichten 6-16-26-...-96

	Lagenanzahl	Anzahl Schichten	Orientierung	Material
Innen <- Außen	1	3	90°/ +45°	E-Glas
	16	3	0° / +45°	S-Glas
	1	3	90°/ +45°	E-Glas
	30	3	0°/+30°	E-Glas
	1	3	90°/ +45°	E-Glas
	16	3	0° / +45°	S-Glas
	1	3	90°/ +45°	E-Glas
	35	3	0°/+30°	E-Glas
	1	3	90°/ +45°	E-Glas
	102			

Tabelle 27: Laminatvariante 4 - 0°/±45° mit S-Glas

	Lagenanzahl	Anzahl Schichten	Orientierung	Material
Innen <- Außen	1	3	90°/ +45°	E-Glas
	16	3	0° / +45°	E-Glas
	1	3	90°/ +45°	E-Glas
	30	3	0°/+30°	S-Glas
	1	3	90°/ +45°	E-Glas
	16	3	0° / +45°	E-Glas
	1	3	90°/ +45°	E-Glas
	35	3	0°/+30°	S-Glas
	1	3	90°/ +45°	E-Glas
	102			

Tabelle 28: Laminatvariante 5 - 0°/±30° mit S-Glas

	Lagenanzahl	Anzahl Schichten	Orientierung	Material
Innen <- Außen	1	3	90°/ +45°	E-Glas
	16	3	0° / +45°	C-Faser
	1	3	90°/ +45°	E-Glas
	30	3	0°/+30°	E-Glas
	1	3	90°/ +45°	E-Glas
	16	3	0° / +45°	C-Faser
	1	3	90°/ +45°	E-Glas
	35	3	0°/+30°	E-Glas
	1	3	90°/ +45°	E-Glas
	102			

Tabelle 29: Laminatvariante 6 – 0°/±45° mit C-Faser

	Lagenanzahl	Anzahl Schichten	Orientierung	Material
Innen <- Außen	1	3	90°/ +45°	E-Glas
	16	3	0° / +45°	E-Glas
	1	3	90°/ +45°	E-Glas
	30	3	0°/+30°	C-Faser
	1	3	90°/ +45°	E-Glas
	16	3	0° / +45°	E-Glas
	1	3	90°/ +45°	E-Glas
	35	3	0°/+30°	C-Faser
	1	3	90°/ +45°	E-Glas
	102			

Tabelle 30: Laminatvariante 7 - 0°/±30° mit C-Faser

5 Finite-Elemente-Methode

In diesem Abschnitt wird der Aufbau des FEM-Modells sowie die gesetzten Randbedingungen und Vereinfachungen näher erläutert. Bei dieser Bachelorthesis kam das FEM-Programm ABAQUS in der Version 6.9.1 der Firma Simulia zur Anwendung.

Ein Großteil der Modelle wurde jedoch vorher in CATIA V5R17 modelliert und mittels des neutralen CAD-Formats STEP in ABAQUS eingeladen.

5.1 Geometrie

Um den Rechenaufwand möglichst gering zu halten, wird lediglich ein Ausschnitt des gesamten Rotorblattanschlusses modelliert und mit Hilfe von Symmetrien gearbeitet.

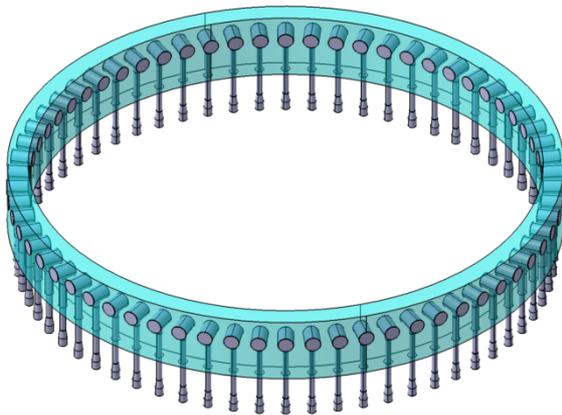


Abbildung 57: gesamter Rotorblattanschluss

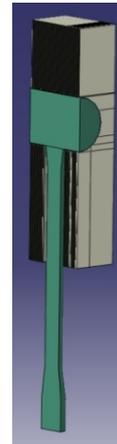


Abbildung 58: Geometrie für die Berechnung

Da es sich bei dem Rotorblattanschluss um ein rotationssymmetrisches Bauteil handelt, ist es ausreichend nur den halben Dehnbolzen und den entsprechenden Teil des Blattanschlusses zu modellieren. (siehe Abbildung 58) Dies bedeutet bei 64 Dehnbolzen, von denen jeweils nur ein halber Bolzen betrachtet wird, den 128igsten Teil des Rotorblattanschlusses.

Durch diese Reduzierung wird eine deutliche Abnahme des Rechenaufwandes bewirkt.

Eine weitere Reduzierung kann auch an der Geometrie des Bolzens getroffen werden, da davon auszugehen ist, dass dieser nicht das kritische Bauteil des Rotorblattanschlusses darstellt.

So wurden sämtliche Fasen ignoriert und der Quer- und Dehnbolzen als ein Teil erstellt. Der freie Raum im direkten Verbindungsbereich von Dehn- und Querbolzen wurde ebenfalls nicht beachtet.

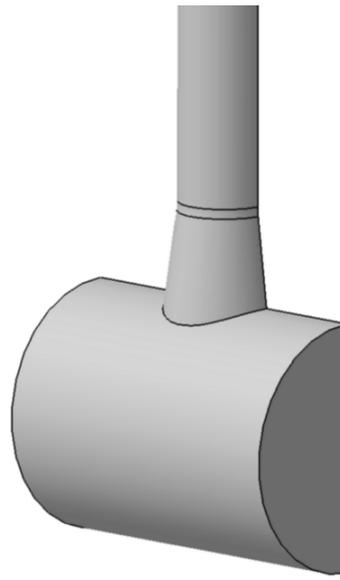
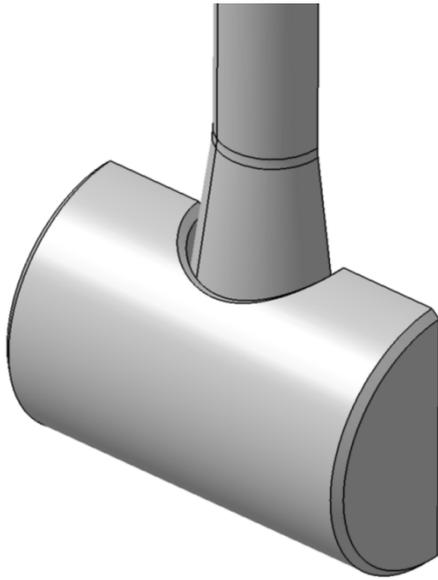


Abbildung 59: Originalgeometrie des Querbolzens Abbildung 60: vereinfachte Geometrie des Querbolzens

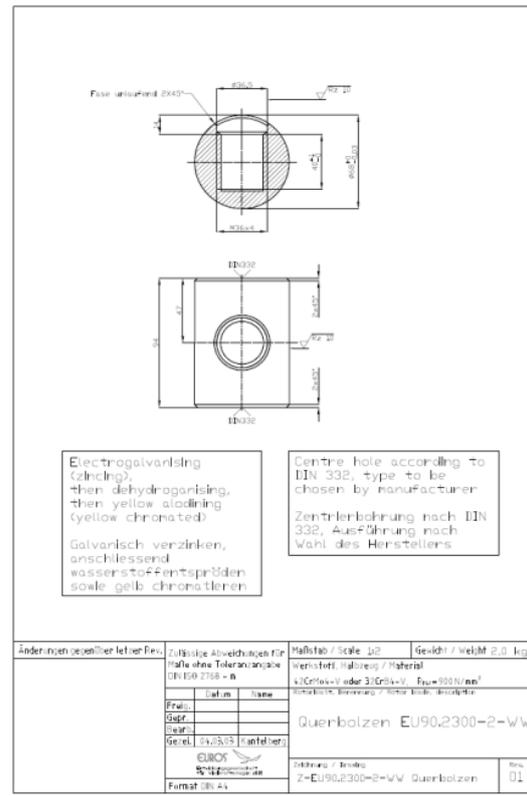
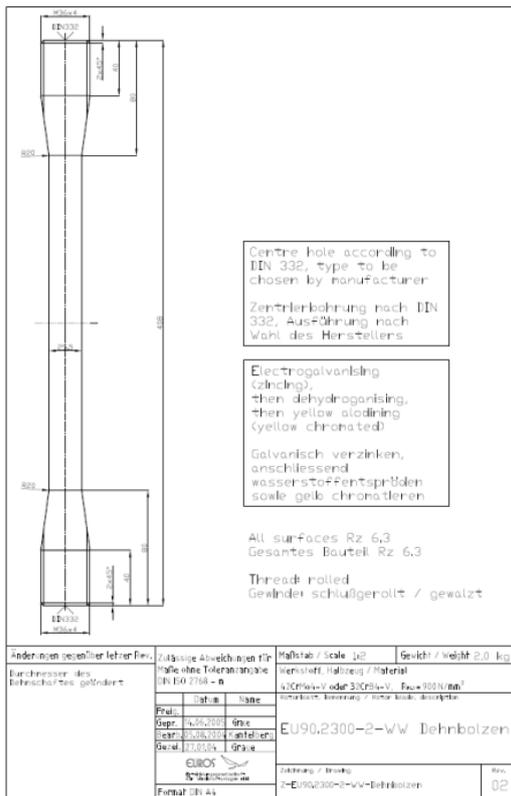


Abbildung 61: Maße des Dehnbolzens [Scheidt, 2010] Abbildung 62: Maße des Querbolzens [Scheidt, 2010]

Die Geometrie für den Rotorblattanschluss wurde jedoch nicht verändert. Dies war auf Grund der relativ einfachen Geometrie nicht notwendig. Es wurde jedoch nicht die gesamte Länge

des Rotorblattanschlusses, sondern nur der direkte Anschlussbereich betrachtet, wie er in Abbildung 63 markiert ist, aus dem auch die Geometrie entnommen werden kann.

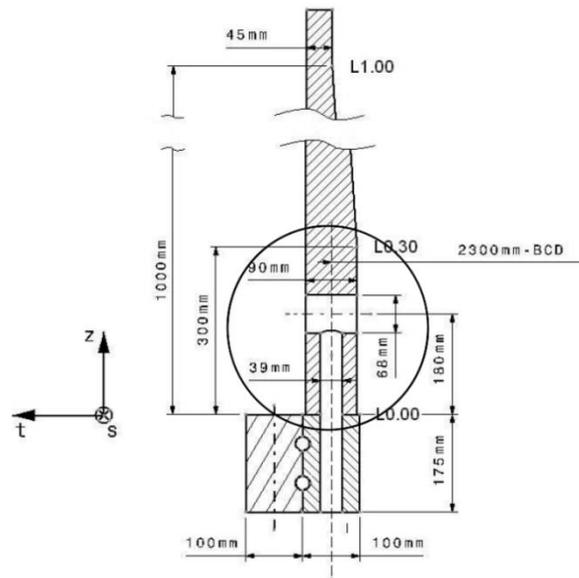


Abbildung 63: relevanter Bereich des Rotorblattanschlusses

5.2 Aufbau und Vernetzung

Der Rotorblattanschluss besteht aus 102 Lagen Multiaxialgelege, welche wiederum aus drei einzelnen Schichten bestehen. Da es sich um Solidmodell handelt, ist es erforderlich, das gesamte Bauteil in die entsprechende Anzahl Zellen zu zerlegen. Um die Schichten auf das Modell aufbringen zu können, dürfen diese nur aus Hexaedern bestehen, wodurch es notwendig ist, das Modell weiter zu zerlegen, bis eine Erstellung des Hexaedernetzes möglich ist.

Dadurch besteht das Modell des Rotorblattanschlusses aus insgesamt 365.368 Elementen. Durch die komplexe Vernetzung, gerade im Bereich des Querbolzens, weisen einige Elemente Verzerrungen auf. Nach den Standardeinstellungen von Abaqus liegen diese Elemente nicht im optimalen Bereich.

So gibt es folgende Warnungen für Elemente im Rotorblattanschluss:

```

Min angle < 10: 104 (0.0284645%)
Average min angle: 78.88, Worst min angle: 8.74
Max angle > 160: 3482 (0.953012%)
Average max angle: 101.09, Worst max angle: 171.90
  
```

Da die Abweichung vom maximalen bzw. minimalen Winkel relativ gering ist und nur ein sehr kleiner Anteil der Gesamtelemente betroffen ist, können diese Warnungen ignoriert werden.



Abbildung 64: Laminataufbau

Die Vernetzung des Quer- und Dehnbolzens ist weniger aufwendig. Hier ist es nicht notwendig einen bestimmten Elementtypen zu verwenden. Somit werden für den Dehnbolzen Wedge-Elemente verwendet. Der Querbolzen wird komplett mit Tetraeder-Elementen vernetzt.

Um den Rechenaufwand möglichst gering zu halten, werden lediglich die MAG-Schichten betrachtet und nicht die einzelnen Schichten von diesem. Hierfür werden die Materialkennwerte des MAG berechnet. Für die Berechnung wird das FEM-Programm Patran verwendet.

Dabei wird wie folgt vorgegangen.

1. Die oben berechnete Kennwerte der verschiedenen Lamine werden in Patran übertragen.
2. Es werden für jedes Material die drei entsprechenden MAGs modelliert
3. Die Kennwerte der MAGs können nun abgelesen werden

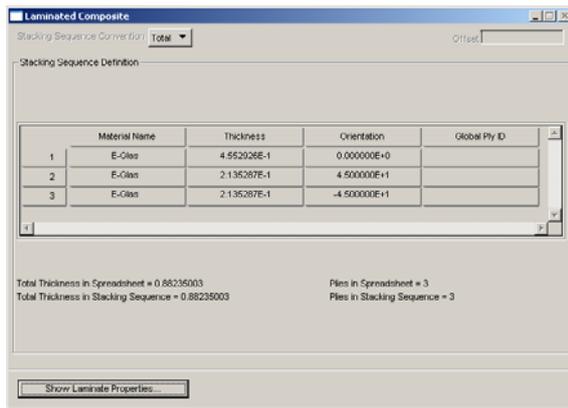


Abbildung 65: MAG-Definition in Patran

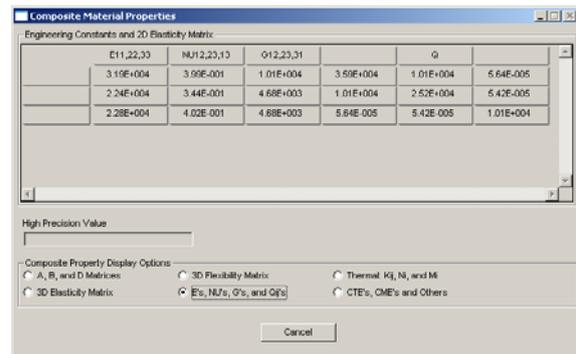


Abbildung 66: Kennwerte des MAGs

Durch die Berechnung der Kennwerte mittels Patran, brauchen die einzelnen MAGs in ABAQUS nicht weiter in der Orientierung angepasst werden und haben somit die gleiche Ausrichtung:

- „1“ zeigt entlang der Rotationsachse in Richtung Blattspitze
- „2“ verläuft tangential zur Oberfläche
- „3“ zeigt radial nach innen.

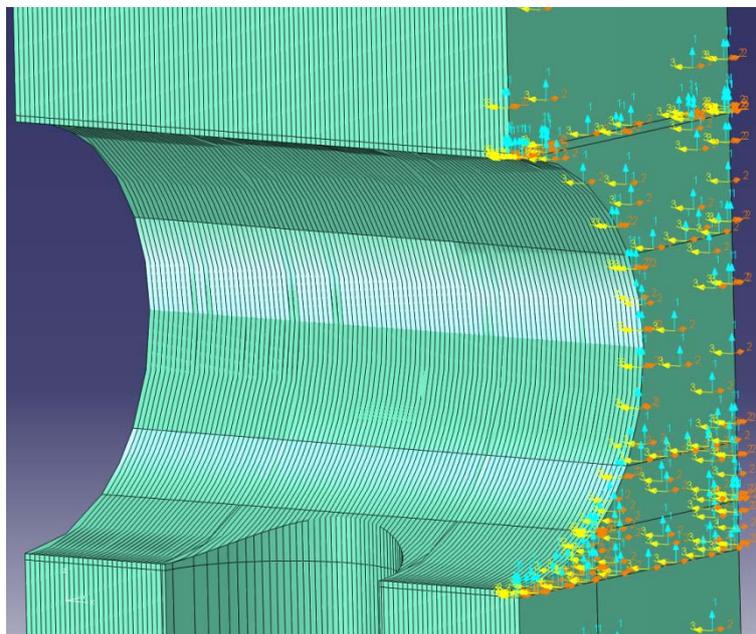


Abbildung 67: Orientierung in Abaqus

Zu beachten ist, dass dies nicht bei den Edelstahlblechen notwendig ist, da diese als isotrop betrachtet werden können.

5.3 Randbedingungen

5.3.1 Symmetrien und Lagerung

Um den Rechenaufwand möglichst gering zu halten, wird nur ein Ausschnitt des Rotorblattanschlusses berechnet und Symmetrien genutzt.

Um die einzelnen Randbedingungen auf ein einziges Koordinatensystem zu beziehen, wurde ein zylindrisches Koordinatensystem eingeführt. Dieses befindet sich mittig im gesamten Rotorblattanschluss. (siehe Abbildung 75)

- Die Komponente U1 entspricht hier der Radialkomponente des Koordinatensystems
- Die Komponente U2 entspricht der Tangentialkomponente des Koordinatensystems
- Die Komponente U3 entspricht der Rotationsachse des Koordinatensystems

Die Flächen für die Symmetriebedingungen bestehen, wie in Abbildung 68 ersichtlich aus den Schnittflächen des Rotorblattanschlusses und des Quer- und Dehnbolzen, und wie in Abbildung 69 nur aus der Schnittfläche des Rotorblattanschlusses. Die entsprechenden Flächen wurden in Tangentialrichtung des zylindrischen Koordinatensystems gesperrt. Es gilt also: $U1=0$.

Da es sich bei den verwendeten Elementen um Hexaeder handelt, ist eine Sperrung der Rotationen nicht notwendig.

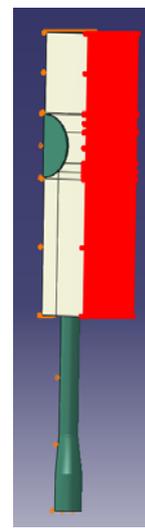
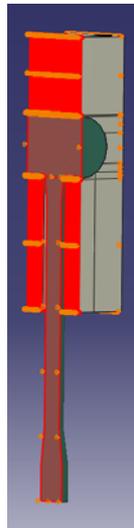


Abbildung 68: Symmetrie in der Bolzenschnittebene Abbildung 69: Symmetrie zwischen den Querbolzen

Neben der Symmetrie ist eine Lagerung der unteren Fläche des Rotorblattanschlusses notwendig, damit die Verschiebung in Z-Richtung, also in Richtung der Rotationsachse,

gesperrt bzw. definiert ist. Ohne diese Lagerung könnte sich das Modell sonst entlang der Rotationsachse undefiniert translatorisch bewegen.

In der Realität ist unterhalb des Rotorblattanschlusses ein Lagerungsring montiert, der die Bewegung nach „unten“ sperrt. Dies wird mittels einer Sperrung der Komponente U3 realisiert.

5.3.2 Belastungen

Da die Bestimmung der auftretenden Lasten nicht den Hauptteil dieser Bachelorthesis ausmachen soll, wird auf [Scheidt, 2010] zurückgegriffen.

Hier sind folgende vereinfachte statische Lasten gegeben, welche sich auf den modellierten Rotorblattanschluss des Typs EU90 der Firma EUROS beziehen:

Die Vorspannkraft eines Dehnbolzens beträgt:

$$F_{\text{Vor}}=305 \text{ kN}$$

Die maximale Betriebskraft, die auf den 64 igsten Teil des Rotorblattanschluss, in Richtung der Blattspitze wirkt, beträgt:

$$F_A=285 \text{ kN}$$

Um die Kräfte auf das Modell aufzubringen, eignet es sich am besten, diese in negative Drücke umzurechnen, damit keine Spannungsspitzen beim Aufbringen der Kräfte entstehen, sondern diese gleichmäßig auf eine Fläche wirken. Andere FEM-Programme bzw. Pre-Prozessoren wie z.B. Patran verfügen deshalb über eine Total-Load-Funktion, bei welcher diese Umrechnung automatisch geschieht. Bei Abaqus ist dies jedoch nicht der Fall, und die Spannung muss umgerechnet werden.

Vorspannkraft

Die Fläche auf dem diese Kraft aufgebracht wird, ist ein Kreis mit dem Durchmesser $d=36$ mm. Es ergibt sich somit eine Fläche von $A_{\text{Bolzen}} = \frac{\pi}{4} \cdot (36\text{mm})^2 = 1017,876\text{mm}^2$ und der Druck

$$\text{somit } \sigma_{\text{Vor}} = \frac{-F_{\text{Vor}}}{A_{\text{Bolzen}}} = \frac{-305\text{kN}}{1017,876\text{mm}^2} \approx -300 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \text{ (aufgerundet)}$$

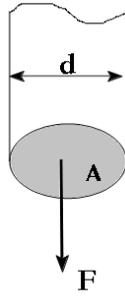


Abbildung 70: Kreisfläche für Vorspannkraft

Betriebskraft

Die Betriebskraft, welche maximal auf einen Bolzen wirkt, hat ihre Wirkrichtung entlang der Rotationsachse des Rotorblattanschlusses. Sie zeigt also in Richtung der Blattspitze. Da der Rotorblattanschluss über 64 Bolzen verfügt, wirkt die Kraft auf ein $1/64$ Teil eines Kreisringes.

Die Fläche ergibt sich also durch:

$$A_{\text{Kreisring}} = \frac{\pi}{4} \cdot (d_a - d_i)^2 \cdot \frac{1}{64} = \frac{\pi}{4} \cdot ((2390\text{mm})^2 - (2210\text{mm})^2) \cdot \frac{1}{64} = 10.161\text{mm}^2$$

Der Druck, der aufgebracht wird, ergibt sich somit zu: $\sigma_A = \frac{-F_A}{A_{\text{Kreisring}}} = \frac{-285\text{kN}}{10.161} \approx -28 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

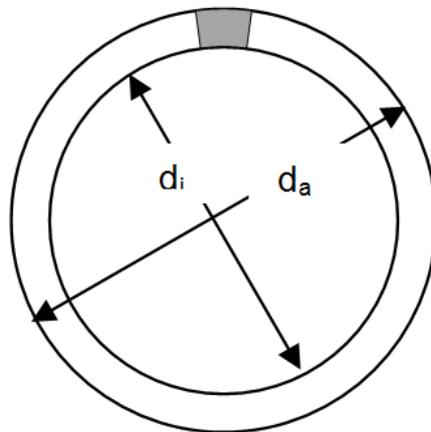


Abbildung 71: Teilkreisring für Betriebskraft

Da die Betriebskraft geringer als die Vorspannkraft des Bolzens ist, wird der Rotorblattanschluss nach „unten“ gezogen. Dies ist zwingend erforderlich, da das Rotorblatt sonst abheben würde.



Abbildung 72: Weg zur
Initialisierung

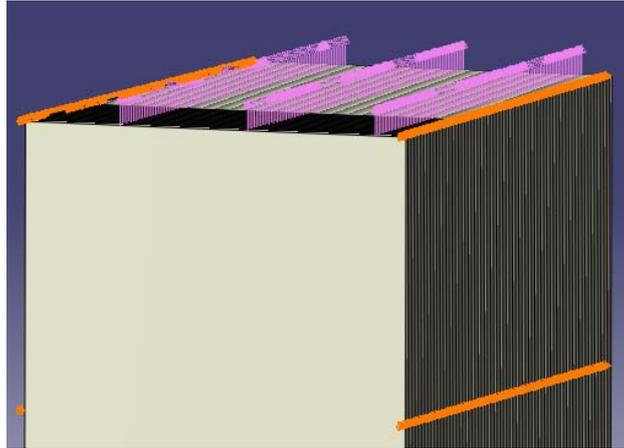


Abbildung 73: Betriebskraft

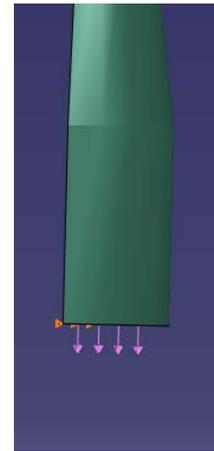


Abbildung 74:
Vorspannkraft

Zur Initialisierung der Rechnung mittels Abaqus, wird bevor die beiden Drücke aufgebracht werden, zuerst der Zugbolzen nach unten gezogen. Das direkte Aufbringen von Drücken oder Kräften kann sonst zu Problemen führen.

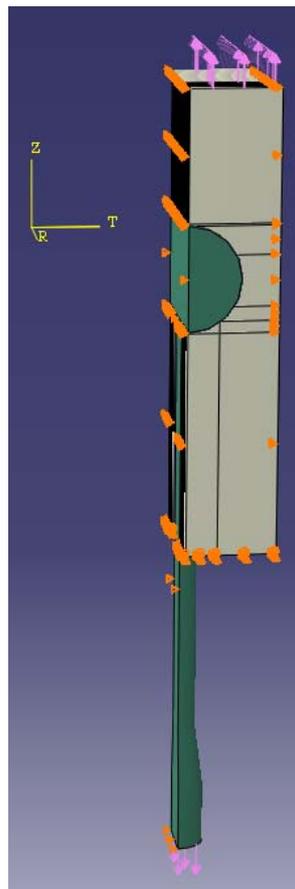


Abbildung 75: Übersicht des Modells

5.3.3 Kontakt

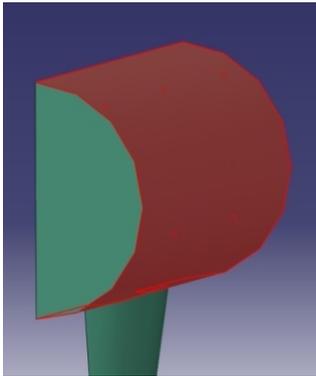


Abbildung 76: Master Surface

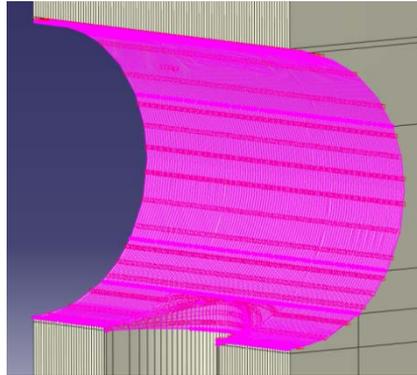


Abbildung 77: Slave Surface

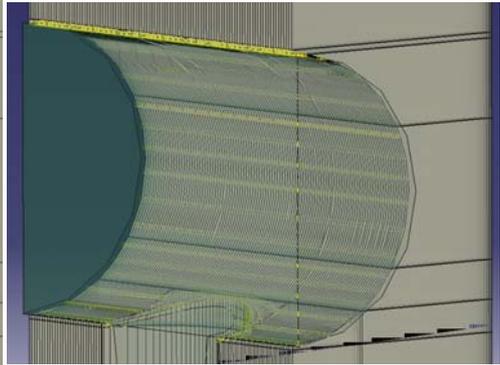


Abbildung 78: Kontakt

Für die Kontaktbedingungen zwischen den Querbolzen und dem Rotorblattanschluss ist die Fläche des Querbolzens als Master Surface definiert. Die entsprechende Fläche am Rotorblattanschluss wurde zuzüglich einer kleinen Erweiterung entlang der Bohrung des Dehnbolzens als Slave Surface gewählt. Diese Erweiterung erfolgte, da sichergestellt sein muss, dass der Querbolzen das Rotorblatt an keiner Stelle durchdringt.

Für die Kontakteigenschaften zwischen Bolzen und Rotorblatt wird die Kontaktmethode Penalty gewählt. Wobei in Normalenrichtung eine Trennung der Kontaktflächen möglich ist. In Tangentialrichtung wird mit einem Reibkoeffizienten von 0,4 gerechnet.

Als Diskretisierungsmethode wird surface-to-surface gewählt, um ein Durchdringen an jeder Stelle zu verhindern. Um eine möglichst hohe Genauigkeit zu erreichen, wird von finite sliding auf small sliding geschaltet. Somit sind zwar eventuell mehrere Zwischenschritte notwendig, die Genauigkeit der Berechnung steigt jedoch.

Die Geometrie, besser gesagt die Elemente, der slave surface werden nach jeden Rechenschritt so angepasst, dass es zu keiner Durchdringung der master und slave surface kommt. Hierfür wird die Option „Adjust only to remove overclosure“ eingeschaltet.

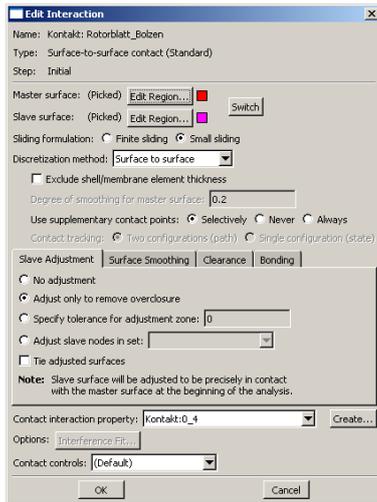


Abbildung 79: Kontakbedingungen

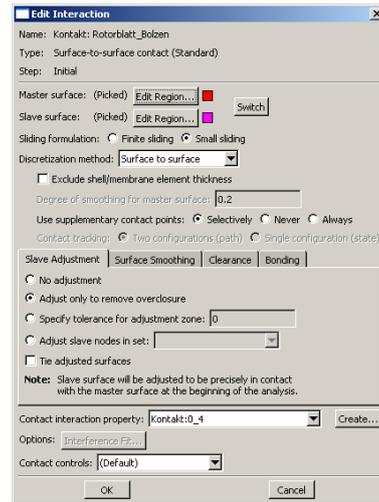


Abbildung 80: Kontakbedingungen

6 Auswertung

Die Auswertung findet auf zwei Arten statt. So war es gefordert, die Steifigkeit des Bauteils zu steigern sowie die Festigkeit einzuhalten.

Es ist somit notwendig, die Verformung der einzelnen Schichten zu untersuchen und auf deren Spannungen zu überprüfen. Um ein Laminat auf seine Festigkeit zu überprüfen, gibt es verschiedene, zum Teil sehr komplexe, Versagenskriterien. Genannt werden können hier z.B. die Festigkeitskriterien von Tsai-Wu, Tsai-Hill, Hashin und Puck. Diese Festigkeitskriterien sind jedoch für Laminare gedacht, welche nicht als Solid- sondern als Shellelement gestaltet sind. Für eine Betrachtung eines Solidmodells wäre das quadratische Kriterium notwendig. Hierbei handelt es sich um ein Tensorpolynom zweiter Ordnung, ähnlich dem von-Mises-Kriterium. Um hier jedoch zuverlässige Ergebnisse zu erlangen, müssen drei Druck- bzw. Zugspannungen und drei Schubspannungen für jede Laminatschicht ermittelt werden. Des Weiteren werden 27 Materialkonstanten benötigt, welche erst durch praktische Versuche am Laminat ermittelt werden müssen. [Nast, 2010]

Da davon ausgegangen werden kann, dass der Rotorblattanschluss mit einem hohen Sicherheitsfaktor ausgelegt wurde, wird vereinfachend das von-Mises-Kriterium als Festigkeitskriterium herangezogen. Der Vorteil hierbei liegt darin, dass diese Spannung direkt von Abaqus ausgegeben wird. Liegen die zulässige und die auftretende von-Mises-Spannung jedoch nahe beieinander, ist es erforderlich, die einzelnen Spannungen an dieser Stelle genau zu untersuchen.

Hierzu werden die analytisch ermittelten Festigkeiten umgerechnet, um eine zulässige von-Mises-Spannung zu erhalten. Ist die Differenz zwischen zulässiger und auftretender Spannung hoch, so kann davon ausgegangen werden, dass es zu keiner Versagensart kommt. Ist die Differenz sehr gering, so müssen die einzelnen Spannungskomponenten überprüft werden.

Für die von-Mises-Vergleichsspannung gilt:

$$\sigma_V = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - \sigma_x \sigma_y - \sigma_x \sigma_z - \sigma_y \sigma_z + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2)}$$

Da UD-Laminare transversal isotrop sind, gelten die folgenden Beziehungen:

$$\sigma_y = \sigma_z \text{ und } \tau_{xy} = \tau_{xz}$$

Die Vergleichsspannung nach von-Mises vereinfacht sich zu:

$$\sigma_V = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - 2\sigma_x \sigma_y + 3(2\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2)}$$

Es ist hierbei zu beachten, dass die Festigkeiten bei Zug- und Druckbeanspruchung unterschiedlich sind. Es werden somit zwei verschiedene von-Mises-Spannungen berechnet und mit den herrschenden Spannungen im Bauteil verglichen.

Für die einlamierten Stahlbleche wird die 0,2%-Dehngrenze als Festigkeitskriterium definiert.

Als Faktor, ob das Bauteil bzw. die Schicht die Spannungen aushält, ist der Sicherheitsfaktor maßgebend. Er berechnet sich wie folgt:

$$S = \frac{\sigma_{zul}}{\sigma_v}$$

Bei einem Sicherheitsfaktor $S > 1$ hält die Schicht den Beanspruchungen stand. Bei $S < 1$ kommt es zum Versagen der Schicht.

Ebenso wie die Spannungen, wird jede Schicht auf ihre Steifigkeit, also der Verformung, untersucht. Letztlich ist die Laminatvariante am effektivsten, bei der die Verformung bei Einhaltung der Festigkeit am geringsten ist.

Für die Überprüfung der Steifigkeit wird die Gesamtverformung der einzelnen Laminatschichten auf die Verformung des Ursprungsaufbaus normiert.

Es gilt: $\Delta z_{i,norm} = \frac{\Delta z_i}{\Delta z_0}$

- „ Δz “ bezeichnet hier die Verformung in Z-Richtung
- „ i “ ist der Index der Laminatvariante
- „ 0 “ ist der Ursprungsaufbau

Der reziproke Wert ist die relative Steifigkeit λ

$$\lambda_i = \frac{1}{\Delta z_{i,norm}} = \frac{\Delta z_0}{\Delta z_i}$$

Für $\lambda > 1$ gilt: Das Bauteil bzw. die betrachtete Schicht ist steifer als im Ursprung.

Für $\lambda < 1$ gilt: Das Bauteil bzw. die betrachtete Schicht ist weniger steif als im Ursprung.

Ähnlich wird bei den Festigkeiten vorgegangen. Als Indiz hierfür sind die Sicherheiten gegeben. Die zulässige von-Mises-Spannung wird hierbei für Zug und Druck berechnet und die auftretende Sicherheit jeweils berechnet. So entstehen je Schicht Sicherheiten für Zug und Druck.

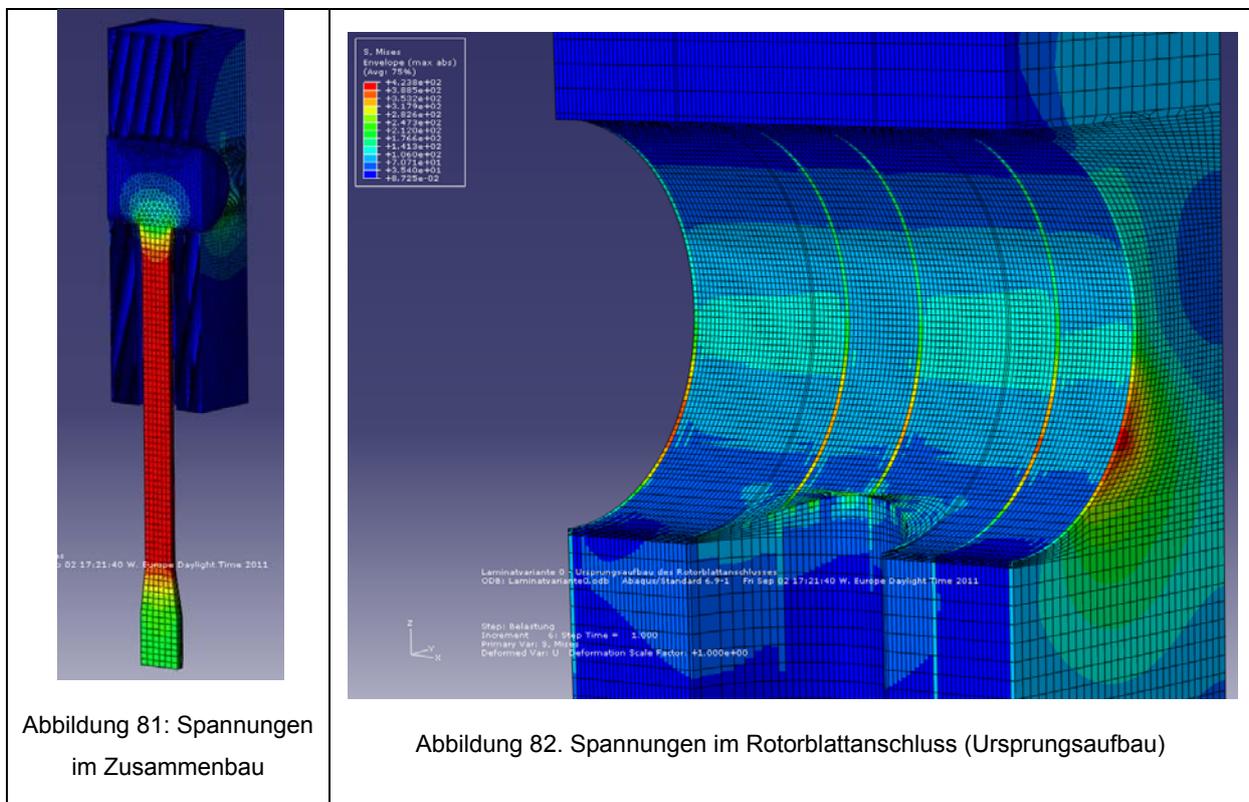
Die Sicherheiten werden auf den ursprünglichen Laminataufbau normiert. (Laminatvariante 0).

$S_{i,norm}^{+,-} = \frac{S_i^{+,-}}{S_0^{+,-}}$ Ist die normierte Sicherheit größer 1, so ist eine höhere Festigkeit gegeben als

im Ursprungsaufbau. Bei einem Wert kleiner 1, ist die Sicherheit geringer und bietet keine Verbesserung.

Nachfolgend sind die Ergebnisse des Ursprungsaufbaus zu finden. In Abbildung 81 ist das gesamte FEM-Modell mit den auftretenden von-Mises-Spannungen dargestellt. In Abbildung 82 können die Spannungen der einzelnen MAG-Schichten betrachtet werden. An den auftretenden Spannungen können hierbei die MAGs mit unterschiedlichen Orientierungen erkannt werden.

Die hier auftretenden Spannungen dienen zur Normierung der weiteren Berechnungen, welche im Anhang als Tabellen beigefügt sind.



6.1.1 Laminatvariante 1

Das Konzept des Laminataufbaus der Variante 1 ist die vollständige Ersetzung der E-Glas-Fasern durch das etwas steifere, sowie zug- und druckfestere S-Laminat.

Wie nicht anders zu erwarten, weist die Steifigkeit des Gesamtverbundes, sowie die gegebene Sicherheit der einzelnen Schichten bessere Werte als der Ursprungsaufbau auf.

Betrachtet man nun die auf den ursprünglichen Laminataufbau normierte Verformung und die gemittelte Sicherheit für Zug und Druck, kann festgestellt werden, dass die Steifigkeit des S-Glas-Verbundes ca. 5 % höher ist. Der minimale normierte Sicherheitsbeiwert liegt bei 1,52 (Schicht 67) und ist somit um 52% höher als im Ursprungsaufbau. Die genauen Spannungen und Verformungen können Tabelle 32 aus dem Anhang entnommen werden.

Es ist ersichtlich, dass die Spannungen in den einzelnen Schichten gleichmäßiger verteilt sind. Die fünf MAGs mit einer $90^\circ/\pm 45^\circ$ -Orientierung treten weniger deutlich hervor als im Ursprungsaufbau.

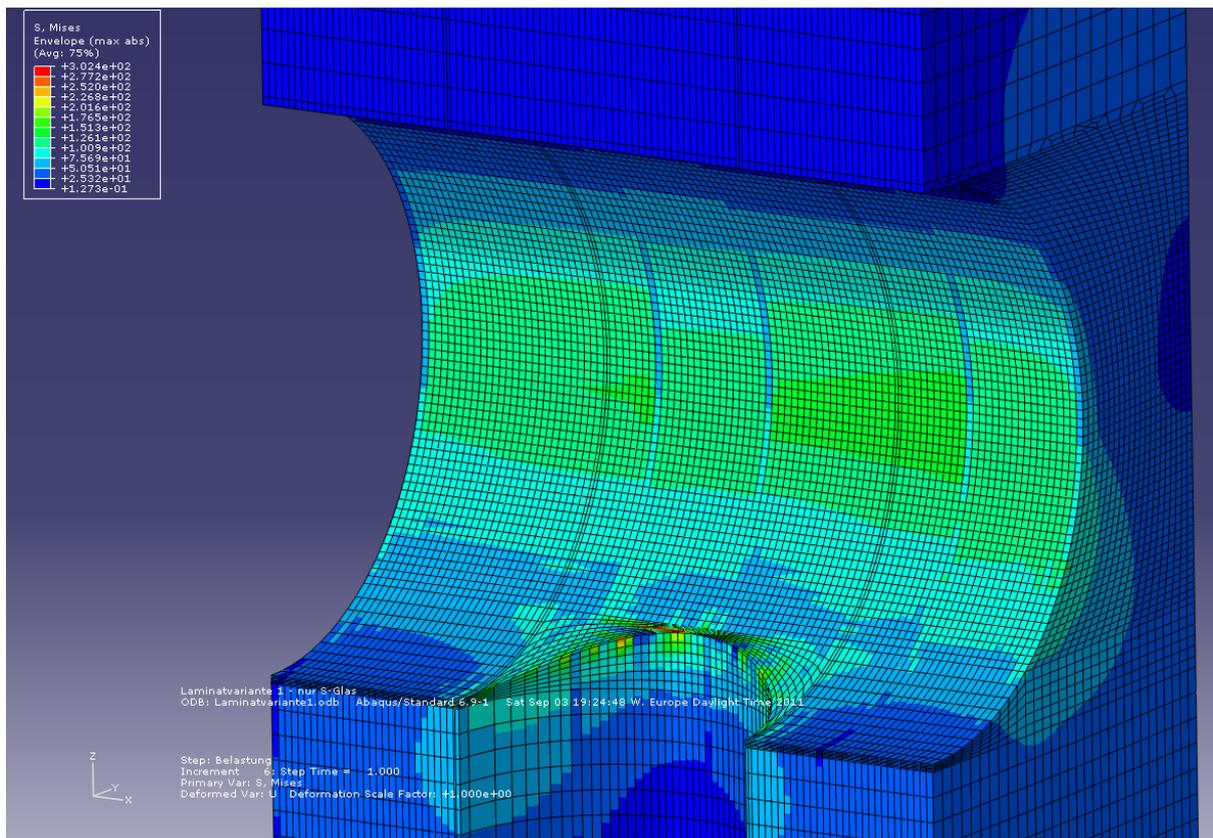


Abbildung 83: Spannungen im Rotorblattanschluss (Laminatvariante 1)

6.1.2 Laminatvariante 2

In der Laminatvariante 2 wurden die Multiaxiallege mit $90^\circ/\pm 45^\circ$ -Orientierung durch Stahlbleche ersetzt. Da das Elastizitätsmodul des Stahlblechs im Vergleich zu den anderen MAGs aus E-Glas sehr hoch ist, entstehen hohe Spannungen in diesen Schichten. Dies ist bereits in Abbildung 84 zu erkennen. Die Spannungen in den übrigen Schichten sind im Vergleich zu den Spannungen in den Stahlblechen sehr gering.

Die Stahlbleche sind hier einer Spannung von knapp 700 MPa ausgesetzt. Die Sicherheit der MAGs mit $90^\circ/\pm 45^\circ$ -Orientierung betrug im Ursprungsaufbau 2,4 – 2,8. Dementsprechend ist eine Festigkeit von 1680 MPa bis 1960 MPa erforderlich. In Frage kommen würden hier lediglich Hochleistungswerkstoffe aus der Luft- und Raumfahrt, wie z.B. 1.6354 mit einer 0,2%-Dehngrenze von 1910 MPa. Aus Kostengründen ist dies jedoch keine Option.

Die Steifigkeit dieses Aufbaus ist jedoch hoch. Im Vergleich zum Rotorblattanschluss mittels E-Glas steigt diese um 18 %.

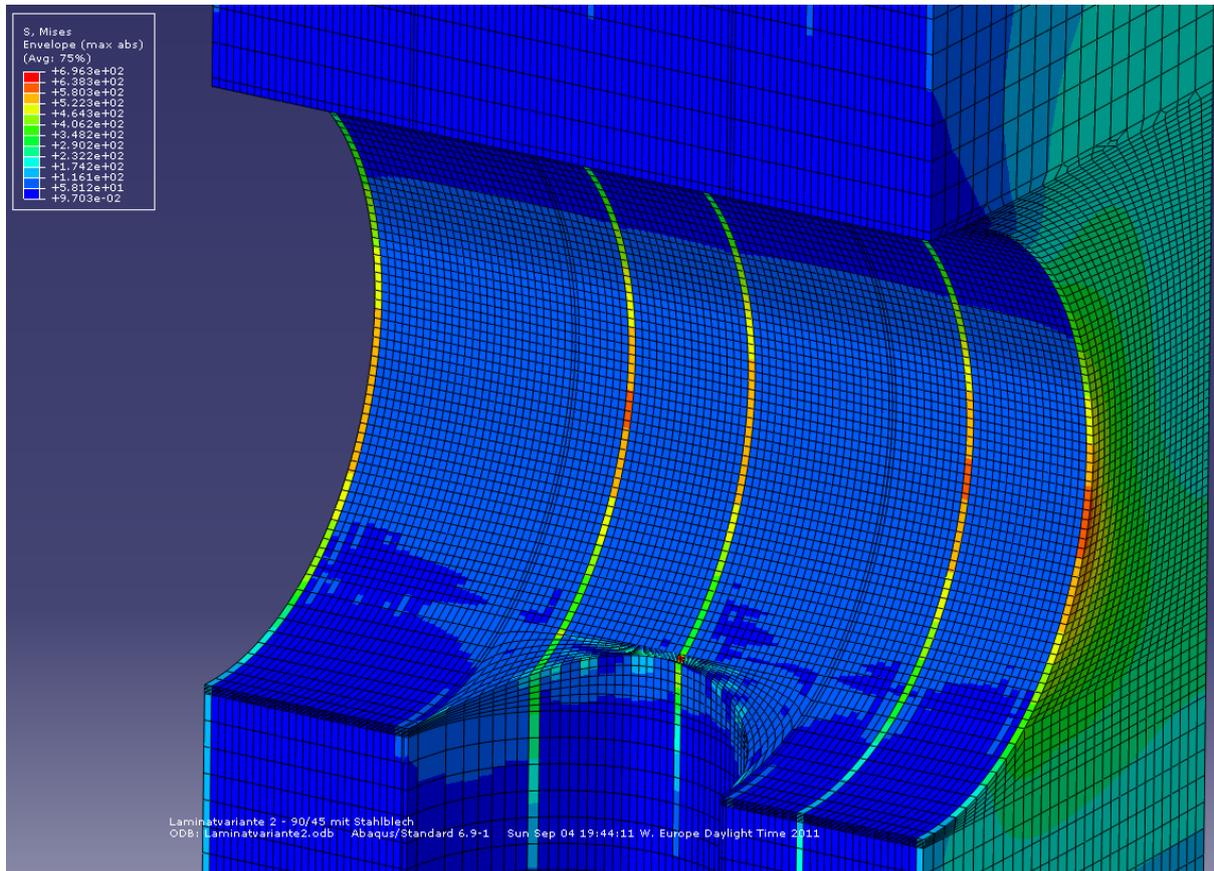


Abbildung 84: Spannungen im Rotorblattanschluss (Laminatvariante 2)

6.1.3 Laminatvariante 3

Die Berechnung mit fünf Stahlblechen hat gezeigt, dass diese auf Grund ihres hohen E-Moduls sehr hohen Spannungen ausgesetzt sind. Um diese Spannungen besser zu

verteilen, werden insgesamt zehn Stahlbleche verwendet, wobei jedoch nicht die MAGs mit $90^\circ/\pm 45^\circ$ -Orientierung ersetzt werden. So wurden die folgenden Schichten ersetzt:

- 6, 16, 26, 36, 46, 56, 67, 76, 86, 96

In Abbildung 85 sind die von-Mises-Spannungen aller Schichten sichtbar. Die sehr hohe Spannung von 723 MPa tritt hierbei jedoch an einem Randelement auf. Wird dieses ausgeblendet, ist eine Abnahme der Spannungen in den Stahlblechen festzustellen.

Die Spannungen in den Stahlblechen betragen etwa 500 MPa. Im Vergleich zu Laminatvariante 2 ist dies eine Abnahme um etwa 29 %.

Die ursprünglichen Sicherheiten der Stahlbleche liegen zwischen 4 und 9. Somit ergibt sich eine geforderte 0,2%-Dehngrenze der Bleche von 2000 MPa bis 4500 MPa.

Diesen Belastungen ist kein metallischer Werkstoff gewachsen.

Die Steifigkeit des Rotorblattanschlusses nimmt im Vergleich zum Bauteil aus E-Glas um rund 48 % zu. Dies ist ein hervorragender Wert.

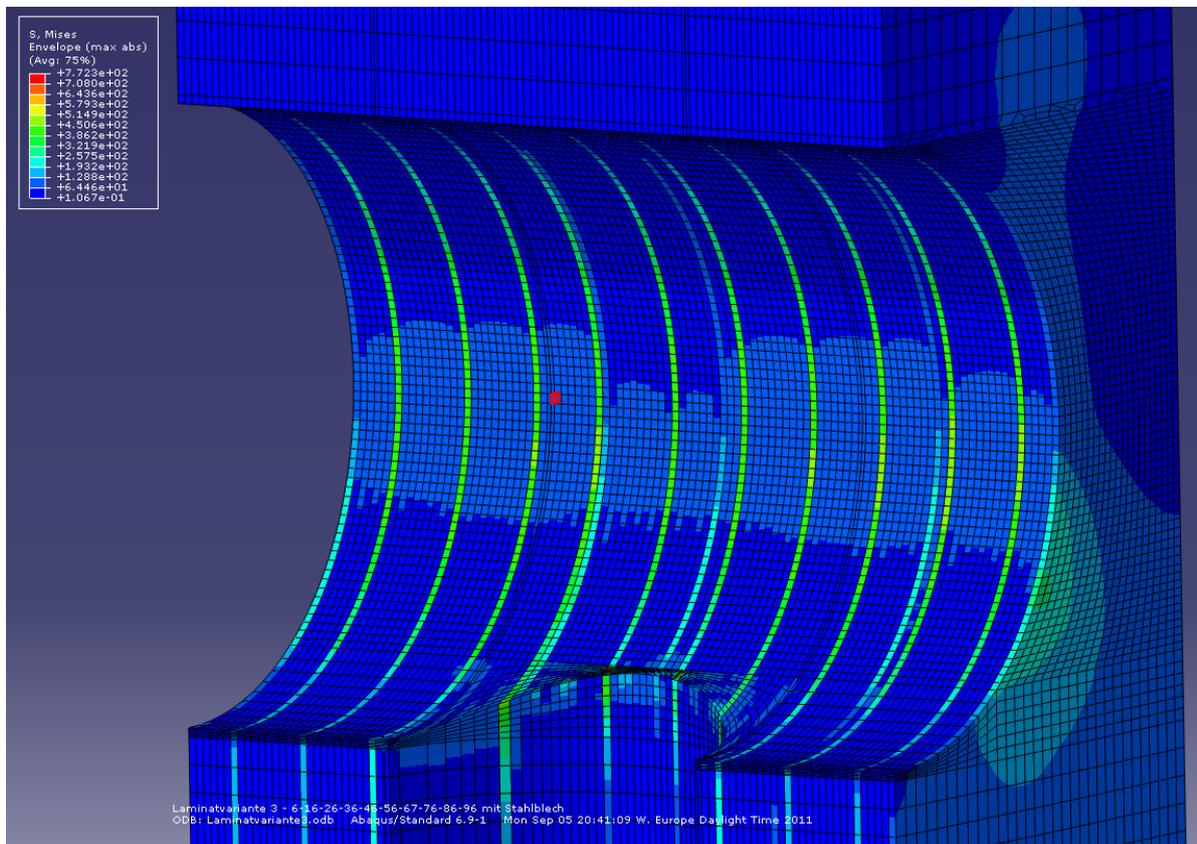


Abbildung 85: Spannungen im Rotorblattanschluss (Laminatvariante 3)

6.1.4 Laminatvariante 4

Die Laminatvariante 4 stellt ein Hybridlaminat aus E- und S-Glas dar. Die $0^\circ/\pm 45^\circ$ -Schichten wurden durch Laminat auf Basis von S-Glasfasern ersetzt. Insgesamt konnte hier eine Zunahme der Steifigkeit von etwa 4 % festgestellt werden. Diese Werte liegen deutlich unter

den Varianten mit Stahlblechen. Die Sicherheiten der einzelnen Schichten liegen beim E-Glas ähnlich wie im Ursprungsaufbau und variieren zwischen 0,99 und 1,05. Durch die höhere Festigkeit des S-Glases, variiert hier die Sicherheit zwischen 1,6 und 1,7.

Prinzipiell würde sich dieses Hybridlaminat zwar eignen, die Erhöhung der Steifigkeit ist jedoch relativ gering.

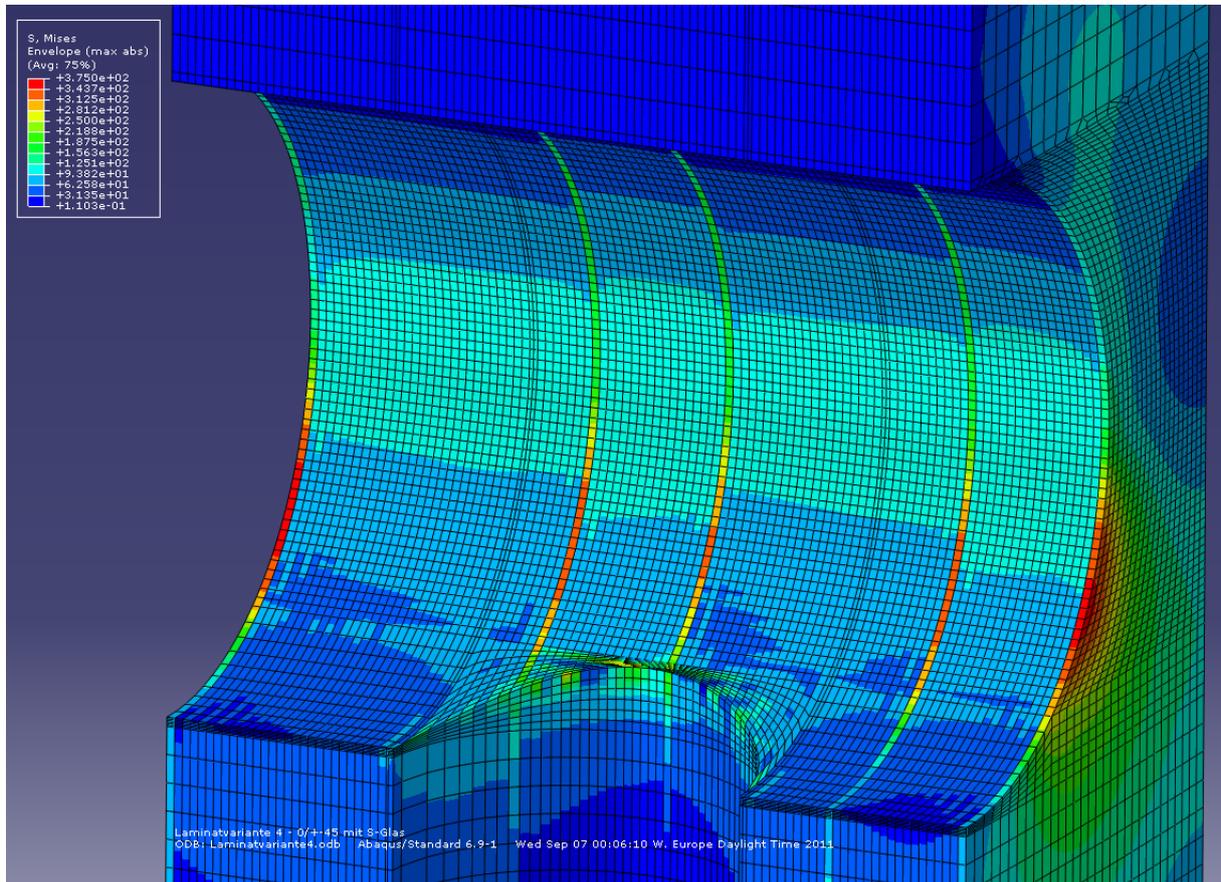


Abbildung 86: Spannungen im Rotorblattanschluss (Laminatvariante 4)

6.1.5 Laminatvariante 5

Die Laminatvariante 5 ist ein weiteres Hybridlaminat aus E- und S-Glas. Hier wurden die $0^\circ/\pm 30^\circ$ -Schichten durch Laminat auf Basis von S-Glasfasern ersetzt. Insgesamt konnte hier eine Zunahme der Steifigkeit von etwa 6 % festgestellt werden. Diese Werte liegen deutlich unter den Varianten mit Stahlblechen. Die Sicherheiten der einzelnen Schichten liegen beim E-Glas ähnlich wie im Ursprungsaufbau und variieren zwischen 1,01 und 1,07. Durch die höhere Festigkeit des S-Glases, variiert hier die Sicherheit zwischen 1,59 und 1,8.

Die Steifigkeit liegt höher als bei der Laminatvariante 4. Dies kann auf folgende Gründe zurück geführt werden:

$0^\circ/\pm 30^\circ$ -Laminat haben eine höhere Steifigkeit in 0° -Richtung als Laminat mit $0^\circ/\pm 45^\circ$ -Orientierung

Die Anzahl der Schichten welche, durch S-Glas ersetzt wurden, ist mehr als doppelt so hoch.
(65 statt 32)

Trotzdem ist der Steifigkeitszuwachs relativ gering.

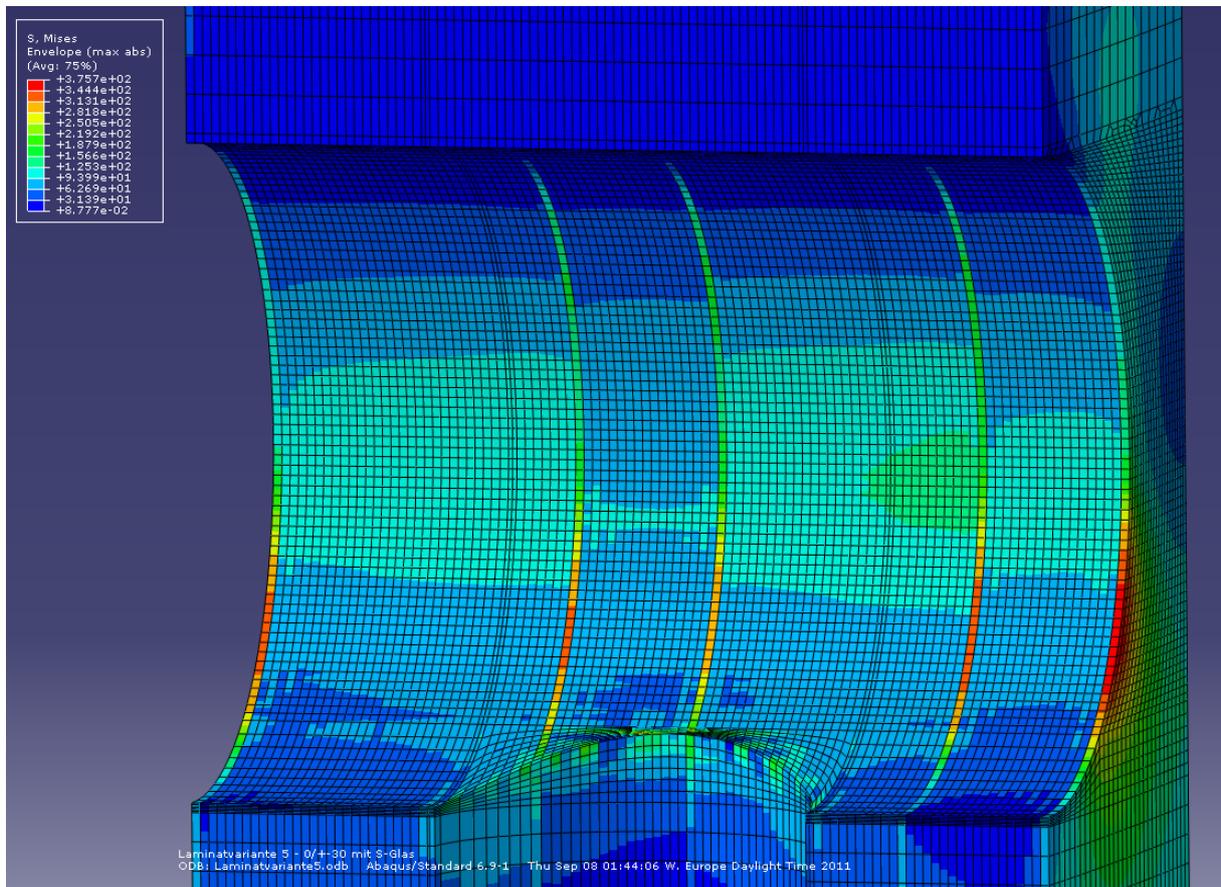


Abbildung 87: Spannungen im Rotorblattanschluss (Laminatvariante 5)

6.1.6 Laminatvariante 6

Laminatvariante 6 wurde in den MAG-Schichten mit $0^\circ/\pm 45^\circ$ -Orientierung durch Carbonfasern verstärkt. Durch das deutlich höhere E-Modul im Vergleich zum E-Glas, wurde eine deutlich Steigerung der Steifigkeit festgestellt. Diese beträgt im Mittel 70 %.

In Abbildung 88 ist deutlich zu erkennen, dass in den Carbonfasern die höchsten Spannungen auftreten. Durch die hohe Steifigkeit der Carbonfasern werden E-Glas-MAGs stark entlastet, so dass die normierten Sicherheiten des E-Glas zwischen 1,08 und 2,39 liegen.

Die Sicherheiten der Carbonfaser-MAGs liegen zwischen 1,01 und 2,07. Die Dauerfestigkeit von Carbonfasern ist jedoch deutlich höher als die von Glasfasern, so dass hier geringere Sicherheiten möglich wären. [Schürmann, 2007]

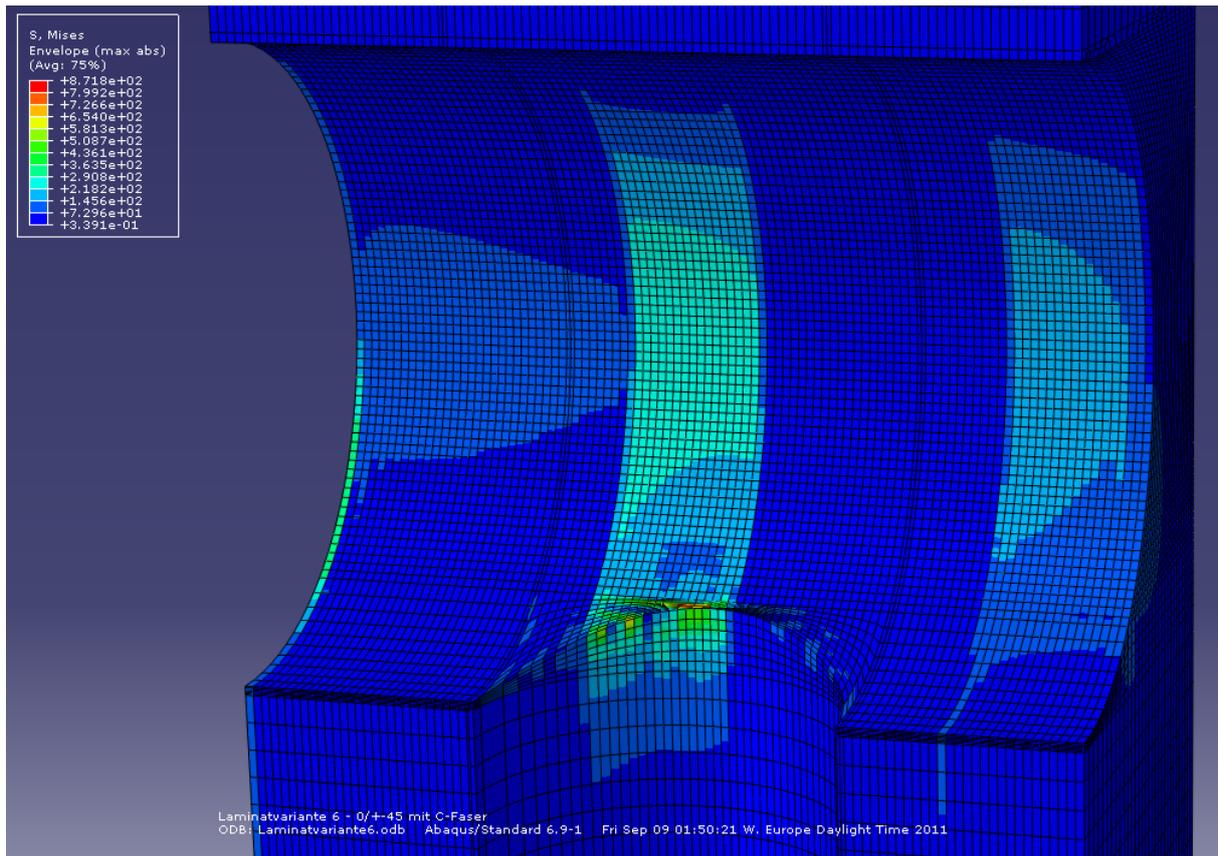


Abbildung 88: Spannungen im Rotorblattanschluss (Laminatvariante 6)

6.1.7 Laminatvariante 7

Die Laminatvariante 7 ist ein weiteres Hybridlaminat aus E-Glas und Carbonfasern. Die $0^\circ/\pm 30^\circ$ -Schichten wurden durch Laminat auf Basis von Carbonfasern ersetzt. Wie bereits im Vergleich zwischen Laminatvariante 4 und 5, ist auch hier die Steifigkeit deutlich höher als bei einer Ersetzung der $0^\circ/\pm 45^\circ$ -Schichten. Es gibt einen mittleren Steifigkeitszuwachs von 120 % statt 70 %. Die Gründe hierfür sind die deutlich höhere Anzahl der Carbonfaser-Schichten sowie die höhere Steifigkeit in 0° -Richtung der $0^\circ/\pm 30^\circ$ -Schichten.

Die Sicherheiten haben sich ebenfalls verbessert. Die normierten Sicherheiten des E-Glases liegen zwischen 1,35 und 3,74 und wurden deutlich durch die Carbonfasern entlastet. Die Carbonfasern haben eine Sicherheit von 1,08 bis 2,54. Durch die bessere Ermüdungsfestigkeit sind die geforderten Sicherheiten jedoch geringer.

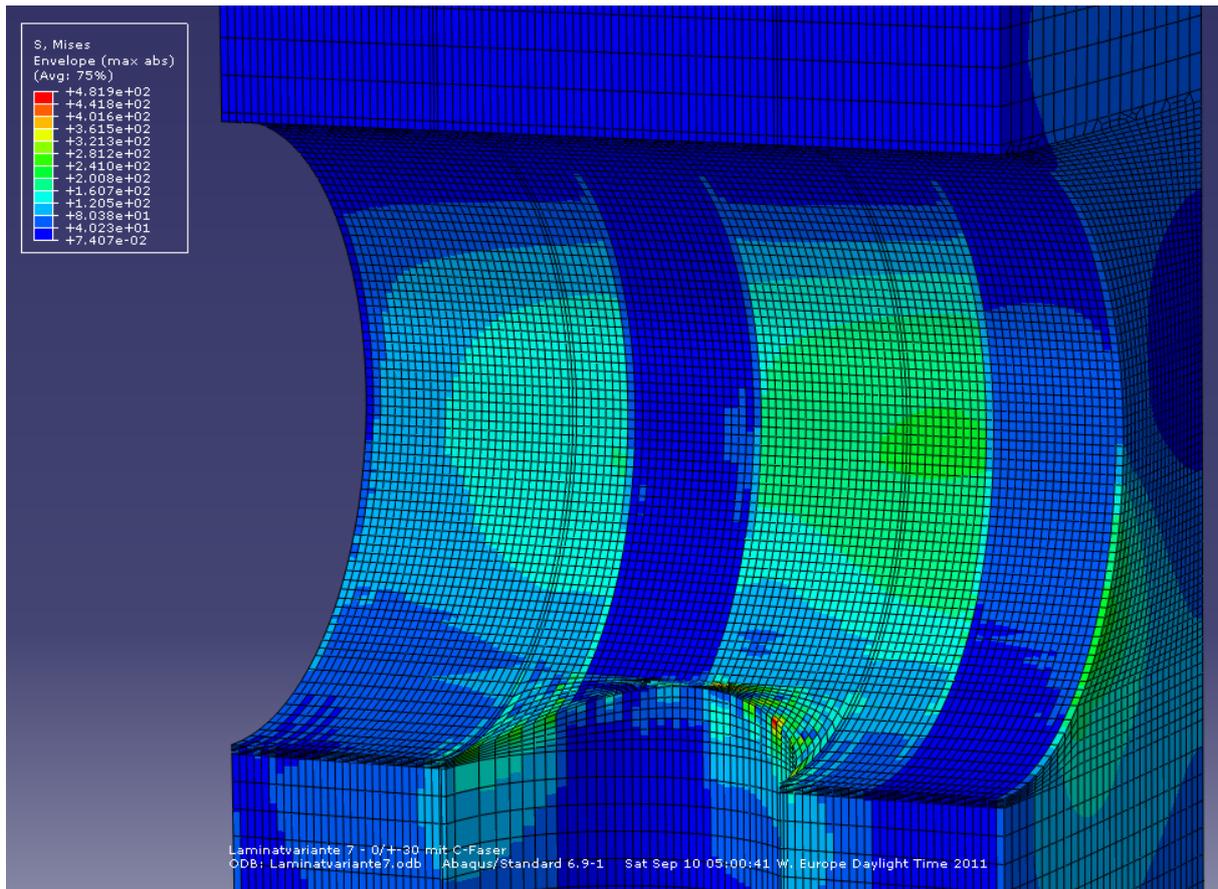


Abbildung 89: Spannungen im Rotorblattanschluss (Laminatvariante 7)

6.2 Zusammenfassung und Anmerkungen

In Abbildung 91 und Abbildung 92 werden die normierte Sicherheit bzw. die relative Steifigkeit den verschiedenen Laminatvarianten gegenüber gestellt. Diese sind für jede Schicht aufgetragen. Wird die normierte Sicherheit zwischen den Schichten 30 und 75 betrachtet, ist der unruhige Verlauf der Kurve sichtbar. Hier kommt es zu kleineren Sprüngen. Dies ist damit zu begründen, dass es im Bereich des Dehnbolzens in vereinzelt Elementen zu Spannungserhöhungen kommt, welche die tatsächlichen Spannungen im Bauteil verfälschen. Da diese Sprünge sehr gering sind, wurden diese Elemente nicht für die Auswertung herausgefiltert. Bei der Auswertung wurden relative Sicherheiten, die sehr nahe bei 1 liegen, gerundet. Da diese Spannungsüberhöhungen in jeder Berechnung auftreten, relativiert sich diese Ungenauigkeit. Erkennbar ist dies daran, dass es keine nennenswerten Ausschläge nach unten gibt. Eine Ausnahme sind hierbei die Stahlbleche. Das hat jedoch nichts mit den Spannungsüberhöhungen zu tun, sondern mit der hohen Steifigkeit.

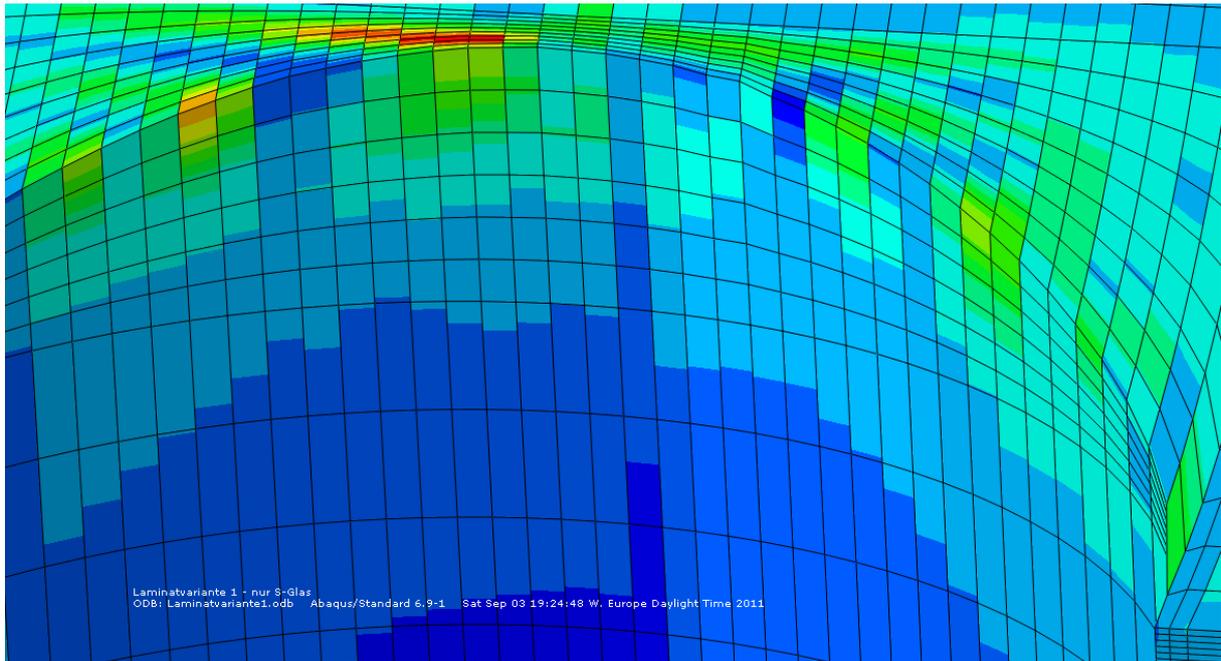


Abbildung 90. Spannungserhöhungen

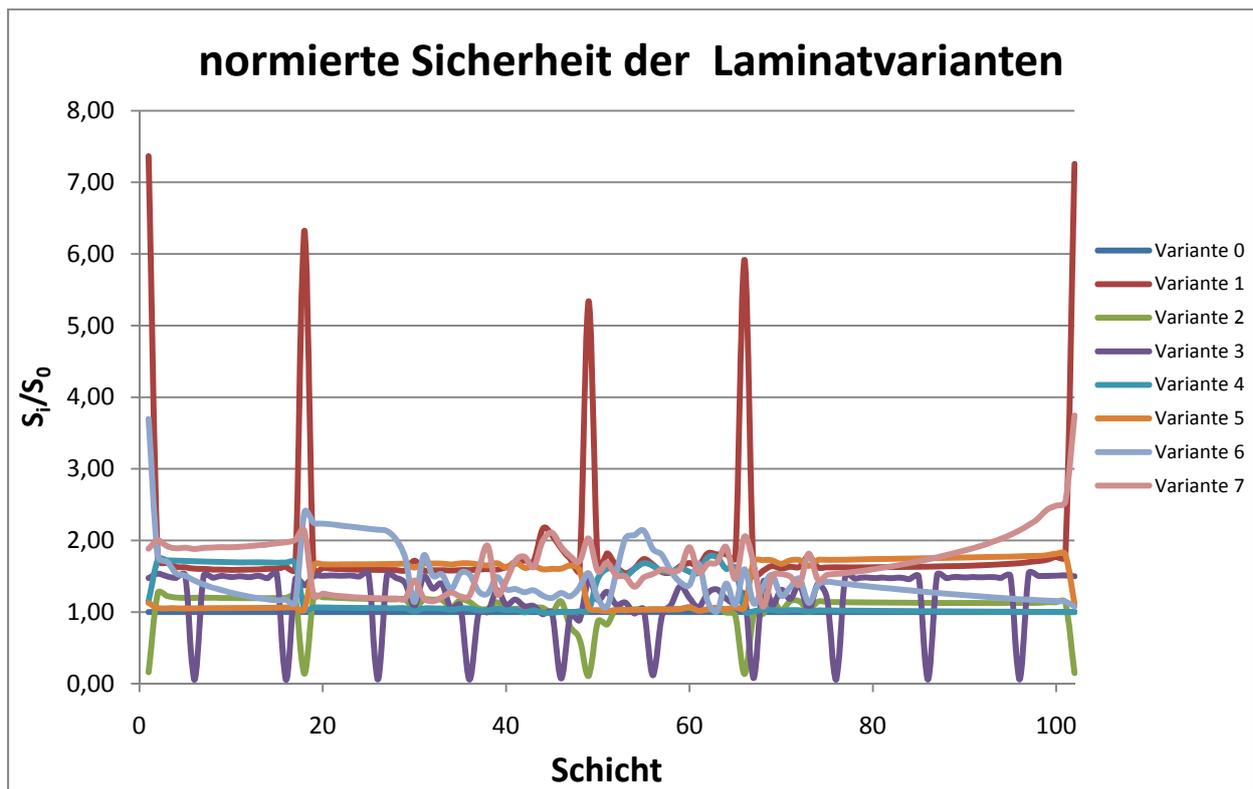


Abbildung 91. relative Sicherheit der einzelnen Laminatvariationen

In Abbildung 92 ist die relative Steifigkeit der verschiedenen Varianten aufgetragen. Diese ist für jede Schicht sichtbar. Für die Laminatvariante 6 und 7 ist ein deutlicher Anstieg in Teilbereichen sichtbar. Dies sind jeweils die Schichten, welche durch Carbonfaser-MAGs ersetzt wurden. Um einen homogenen Verlauf der Steifigkeit zu erlangen, wird empfohlen, die Verstärkungsfasern nicht konzentriert einzusetzen, sondern diese über den gesamten

Rotorblattanschluss gleichmäßig zu verteilen. Das bedeutet, es sollten MAGs mit verschiedenen Orientierungen gleichmäßig ersetzt werden und nicht entweder $0^\circ/\pm 30^\circ$ - oder $0^\circ/\pm 45^\circ$ -MAGs.

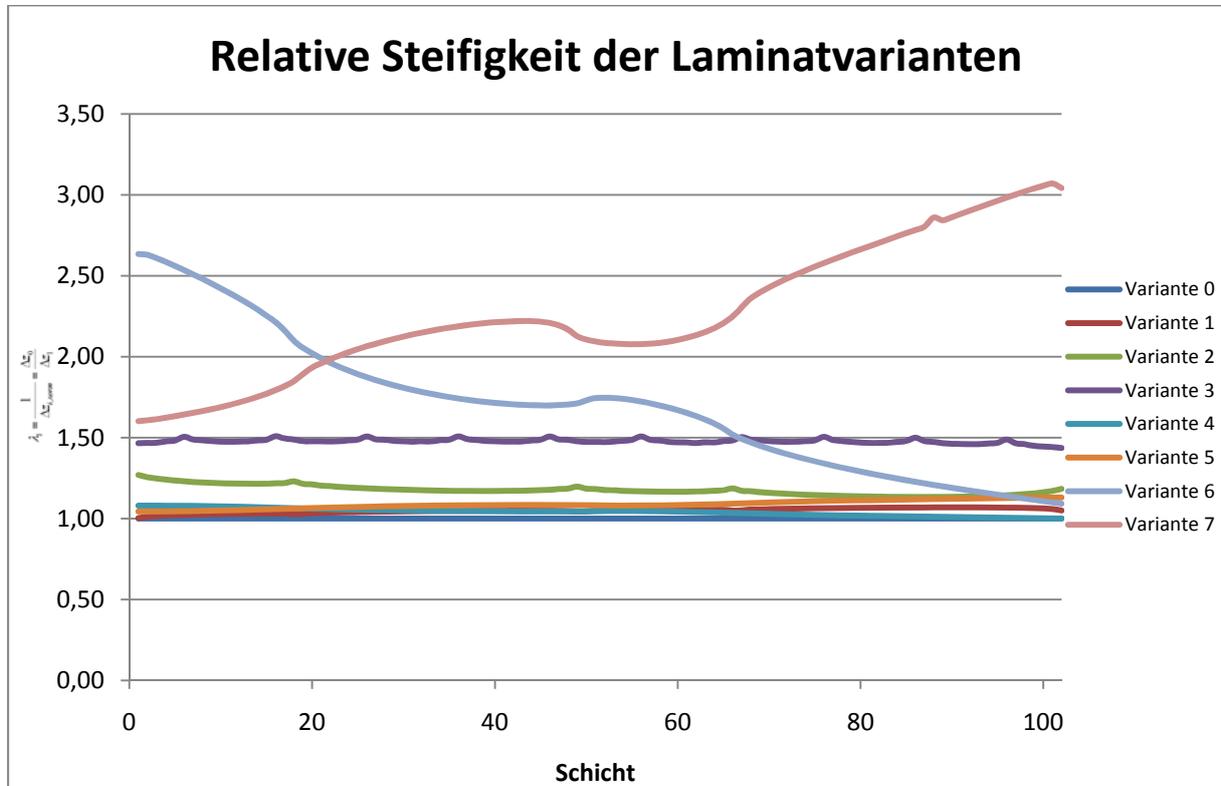


Abbildung 92: Relative Steifigkeit verschiedener Hybridlaminat

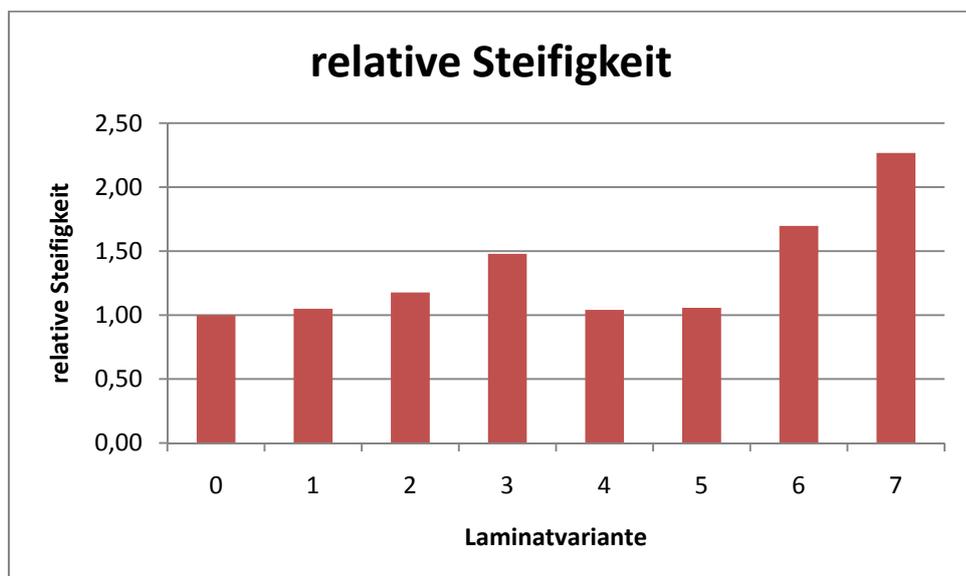


Abbildung 93: relative Steifigkeiten der Laminatvarianten

7 Fazit und Zukunftsausblick

Die Untersuchungen des Rotorblattanschlusses in Bezug auf die Anwendbarkeit von Hybridlaminaten hat Folgendes gezeigt:

- Die Verwendung des Quadratmaschengewebes, wie von Oliver Scheidt vorgeschlagen, hat keinen Vorteil gegenüber normalen S-Glas-Laminaten. Grund für die falsche Annahme war, wie es scheint, ein Tippfehler.
- Die Verwendung von einlamierten Stahlblechen hat zwar eine Steigerung der Steifigkeit zur Folge, jedoch sind die auftretenden Spannungen in diesen zu hoch, um genügend Sicherheit gegen Versagen zu gewährleisten. Zwar verfügen die Stahlbleche über ein sehr hohes Elastizitätsmodul, aber die Festigkeiten sind zu gering.
Prinzipiell sind zwar Werkstoffe vorhanden, welche die Spannungen ertragen könnten, die Kosten für diese sind jedoch so hoch, dass dies in keiner Relation zu den Kosten von Carbonfasern steht.
- Ein großes Problem wird weiterhin das Erfassen von Belastungsdaten einer Windenergieanlage sein. Dadurch ist es nur sehr schwer möglich, die Bauteile einer WEA optimal auszulegen. Somit ist es weiterhin zwingend notwendig, große Sicherheiten zu verwenden. Die Stahlbleche halten den statischen Belastungen stand, die hohe Zyklenzahl über eine Lebensdauer von 20 Jahren würden sie aber nicht überstehen.
- Das Kombinieren von Carbon- und Glasfasern brachte insgesamt die besten Ergebnisse. Durch das deutlich höhere Elastizitätsmodul, verschaffen die Carbonfasern dem Rotorblattanschluss eine höhere Steifigkeit. Durch ihre guten Festigkeitswerte, ist sichergestellt, dass es nicht zum Versagen im Bauteil kommt. Wichtig für das gute Abschneiden der Kombination aus Carbon- und Glasfaser ist, dass das Elastizitätsmodul des Carbonlaminats zwar höher ist als die der Lamine aus E-Glas, aber dieser Unterschied nicht zu stark wie bei den Stahlblechen ist. Ebenso verfügt das MAG aus Carbonfasern, trotz höherer Steifigkeit, über eine deutlich bessere Festigkeit als metallische Werkstoffe.
- Durch eine homogene Verteilung über den gesamten Rotorblattanschluss, sollte eine gleichmäßige Steifigkeit desselben möglich sein.
- Des Weiteren verfügen die Carbonfasern über eine „exzellente Ermüdungsfestigkeit“, weshalb diese für den Flugzeugbau besser geeignet sind als z.B. Aluminium.
[Schürmann, 2007]

Dadurch kann sichergestellt werden, dass es zu keinem Materialversagen des Hybridlaminats aus E-Glas und Carbonfasern kommt, da die weniger dauerfesten E-Glas-Lamine durch die Carbonfasern entlastet werden.

In Zukunft wird wohl auch im Windenergieanlagenbau, ähnlich wie im Flugzeugbau, vermehrt die Carbonfaser verwendet werden. Ihre geringe Dichte, hohes Elastizitätsmodul, sowie die sehr gute Ermüdungsfestigkeit, machen sie zu einer hervorragenden Verstärkungsfasern.

8 Literatur- und Quellenangaben

- Betzches Gesetz* - Wikipedia. (24. 05 2011). Abgerufen am 23. 08 2011 von http://de.wikipedia.org/wiki/Betzches_Gesetz
- E-Glasgewebe- und Gelege*. (2007). Abgerufen am 08. 08 2011 von STM GmbH - Composite Technologie & Material: <http://www.ctmat.de/unterseite-fasern-eglas.htm>
- Ehrenstein, G. W. (2006). *Faserverbund-Kunststoffe: Werkstoffe - verarbeitung - Eigenschaften*. München: Carl Hanser Verlag.
- Ender, C. (2011). *Windenergie in Deutschland - Aufstellungszahlen für das erste Halbjahr 2011*. Wilhelmshaven: Deutsches Windenergie-Institut.
- Enercon* - Wikipedia. (15. 08 2011). Abgerufen am 21. 05 2011 von Wikipedia: <http://de.wikipedia.org/wiki/Enercon>
- Enercon. (2010). E-126 wird zur 7,5 MW-Anlage. *WINDBLATT - ENERCON Magazin für Windenergie*, 8.
- ENERCON. (2011). ENERCON errichtet erste E-101-Anlagen. *WINDBLATT - ENERCON Magazin für Windenergie*, 11.
- Faserverbundwerkstoffe*. (18. 06 2011). Abgerufen am 22. 06 2011 von Wikipedia: <http://de.wikipedia.org/wiki/Faserverbundwerkstoff>
- Gasch, R. (2011). *Windkraftanlagen: Grundlagen, Entwurf, Planung und Betrieb*. Wiesbaden: Vieweg + Teubner.
- Hau, E. (2008). *Windkraftanlagen - Grundlagen, Technik, Einsatz, Wirtschaftlichkeit*. Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Klein, B. (2010). *FEM: Grundlagen und Anwendungen der Finite-Element-Methode*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner.
- Liersch, J. (2010). Dynamisches Verhalten von Windenergieanlagen. *BWE-Fachseminar (S. Technik IV - Session 3)*. Berlin: Bundesverband WindEnergie e.V.
- Moser, K. (1992). *Faser-Kunststoff-verbund Entwurfs- und Berechnungsgrundlagen*. Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Nast, E. (2010). *Faserverbundtechnologie - Vorlesungsscript*.
- Rust, W. (2011). *Nichtlineare Finite-Elemente-Berechnungen: Kontakt, Geometrie, Material*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner.
- Scheidt, O. (2010). *Diplomarbeit: Alternative Konzepte für den Blattanschluss einer*. Hamburg.
- Schürmann, H. (2007). *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*. Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- SIMULIA. (2009). *Abaqus/CAE User's Manual*. Dessault Systemes.
- VDI 2014 Blatt 1*. (1989). VDI.

VDI Verlag. (2011). BWK - Das Energie Fachmagazin. 2011 (7/8).

Windenergie. (30. 07 2011). Abgerufen am 08. 08 2011 von Wikipedia:

<http://de.wikipedia.org/wiki/Windenergie>

Anhang

EUROS



Blade family EU 90 | 100

BLADE TYPE

Hand lamination	EU 90.2300-2	EU 100.2300-B
Vacuum infusion	EU 90.2300.4-D	EU 100.2300.4-D

GENERAL

Rotor diameter (approx.) (m)	90	100
Rated power (kW)	3000	3000
Power control	Pitch	Pitch
Nominal wind speed (m/s)	12.6	12.3
Nominal tip speed (m/s)	75	75
Materials	Glass/Epoxy	Glass/Epoxy
Mass (t)	11.2	12.2

AERODYNAMICS

Airfoils	EUROS, DU, NACA64	EUROS, DU, NACA64
Design tip speed ratio	7.3	8.2
Max. power coefficient	0.51	0.51

GEOMETRY

Blade length (m)	44.00	48.80
Max. Chord (m)	4.15	4.15
Twist (deg)	16.1	15.8
Blade area (m ²)	113.8	120.1

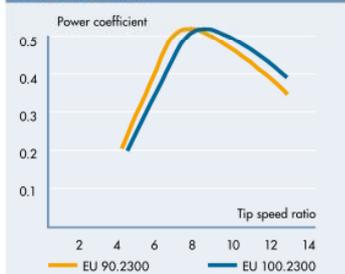
MOUNTING

Mounting diameter (mm)	2300	2300
No. of bolts	64	64
Bolt size	M36	M36

MISCELLANEOUS

Lightning protection	Aluminum receptor	Aluminum receptor
Erosion protection	PU-foil	PU-foil

POWER CURVE



EUROS DESIGN PHILOSOPHY

Blades are designed in families. Center section is identical within one family. Root and tip segments can be exchanged to meet customer specifications.

CONTACT

EUROS Entwicklungsgesellschaft
für Windkraftanlagen mbH
Falkenberger Straße 146 A/B
13088 Berlin, Germany
Phone: +49 (0) 30 854 01 09-00
Fax: +49 (0) 30 854 01 09-29
E-Mail: euros@euros.de | www.euros.de

Blades and more ...



Technical Data Sheet

CeTePox[®] AM 3325 A/B

Characteristics

Epoxy system for injection technology with long pot-life

Properties and Fields of Application

CeTePox AM 3325 A/B is an epoxy system designed for injection technologies like RI and SCRIMP. The mixing viscosity is very low, but it may be lowered to 120 mPas by heating the resin up to 30°C. This material combines long pot-life and high Tg even after short curing cycle at 70°C. It was shown that the peak exotherm even inside thick laminate can be limited during infusion and curing process. This epoxy system can be used for the production of high performance laminates for boat building and other marine applications, wind mill rotor blades and sport equipment. Due to its excellent mechanical properties this system is recommended for the production of composite parts with high static and dynamic load.

	Property	Unit	Comp A	Comp B
Typical Data	Viscosity @ 25°C	mPas	600 - 650	5 -10
	EEW	g/equiv.	168 -175	-
	Colour (Gardner)		0,1	0,1
	Density @ 23°C	g/cm ³	1.14 -1.16	0,92 - 0,94
Mixing Ratio	Parts by weight	pbw	100	20
System Properties	Viscosity of Mixture @ 25°C	Pas	0,25 - 0,30	
	Pot life 100g (Tecam 23°C)	h	10	
	Pot life 1000g (Tecam 23°C)	h	4	
	Tg DSC midpoint DIN EN 61006 (cure 6h@70°C)	°C	90	
Properties of cured resin	Curing conditions: 6 h @ 70 °C			
	tensile test DIN EN ISO 527-2, flexural test DIN EN ISO 178			
	Tensile strength	MPa	72	
	Ultimate tensile strength	MPa	63	
	Ultimate elongation	%	5	
	Elongation at tensile strength	%	4,4	
	Tensile modulus	MPa	4800	
	Flexural strength	MPa	104	
	Elongation at flexural strength	%	6	
	Ultimate flexural strength	MPa	103	
	Ultimate elongation	%	7	
Flexural modulus	MPa	2800		

Shelf Life & Storage

Store this material in a clean, dry environment in its tightly closed original container. These products are not considered especially temperature or moisture sensitive, but should ideally be stored at temperatures between 18-25°C and kept from moisture contamination. If the recommended storage conditions are observed the products will have a minimum shelf-life of 6 months from the date of shipment.

Remarks with Regard to Occupational Safety

Mandatory and recommended industrial hygiene procedures should be followed whenever these products are being handled and processed. For additional information please consult the corresponding material safety data sheets.



Prüfprotokoll

10.03.10

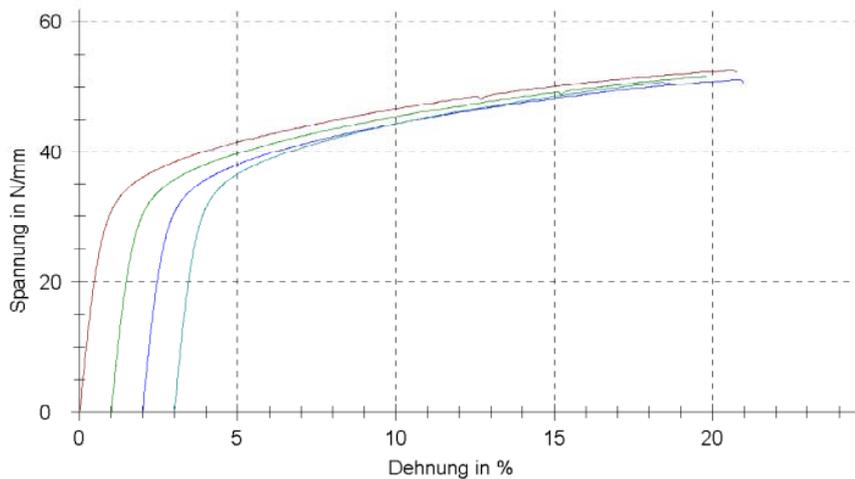
Parametertabelle:

Artikel/Article-No. : 10373180
 Fabr./ Ma. : 900919/251225
 Gew typ/Meshtype : Quadratmasche
 Werkstoff/Material : 1.4401 - AISI 316
 Prüfrichtung/Test Direction: Schuss/Weft
 Prüfer/Examiner : M.Krebs
 Bemerkung/Remark : Serie 1 Kette, Serie 2 Schuss

Ergebnisse:

Legende	Unterserie #2	Zugfestigkeit / Tensile strength (Rm)	Dehnung/ Elongation (Ag)	Höchstzugkraft/ max. tensile load
	Nr	N/mm	%	N
■	6	52,6	20,64	1576,73
■	7	51,6	18,76	1549,35
■	8	51,1	18,85	1533,75
■	9	50,7	15,43	1521,08

Seriengrafik:



Statistik:

Unterserie #2	Zugfestigkeit / Tensile strength (Rm)	Dehnung/ Elongation (Ag)	Höchstzugkraft/ max. tensile load	Breite/ Width	Dicke/ Thickness
n = 4	N/mm	%	N	mm	mm
x	51,5	18,42	1545,23	30	1
s	0,8	2,17	23,97	0,000	0,000
v	1,55	11,79	1,55	0,00	0,00

Prüfparameter:

Prüfgeschwindigkeit/ test speed : 100 mm/min
 Vorkraft/ pre-load : 5 N
 Kraftabschaltsschwelle : 20 %Fmax
 Einspannlänge/ clamping length : 200 mm



Prüfprotokoll

10.03.10

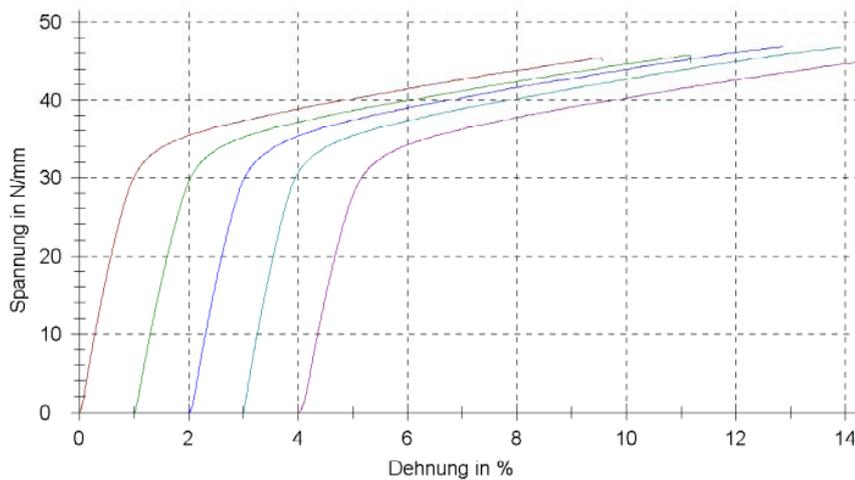
Parametertabelle:

Artikel/Article-No. : 10373180
 Fabr./ Ma. : 900919/251225
 Gew typ/Meshtype : Quadratmasche
 Werkstoff/Material : 1.4401 - AISI 316
 Prüfrichtung/Test Direction: Kette/Warp
 Prüfer/Examiner : M.Krebs
 Bemerkung/Remark : Serie 1 Kette, Serie 2 Schuss

Ergebnisse:

Legende	Unterserie #1	Zugfestigkeit / Tensile strength (Rm)	Dehnung/ Elongation (Ag)	Höchstzugkraft/ max. tensile load
	Nr	N/mm	%	N
■	1	45,5	9,55	1364,00
■	2	45,8	10,16	1373,76
■	3	46,8	10,85	1405,43
■	4	46,7	10,93	1402,38
■	5	44,8	10,21	1345,18

Seriengrafik:



Statistik:

Unterserie #1	Zugfestigkeit / Tensile strength (Rm)	Dehnung/ Elongation (Ag)	Höchstzugkraft/ max. tensile load	Breite/ Width	Dicke/ Thickness
n = 5	N/mm	%	N	mm	mm
x	45,9	10,34	1378,15	30	1
s	0,9	0,57	25,68	0,000	0,000
v	1,86	5,48	1,86	0,00	0,00

Prüfparameter:

Prüfgeschwindigkeit/ test speed : 100 mm/min
 Vorkraft/ pre-load : 5 N
 Kraftabschaltsschwelle : 20 %Fmax
 Einspannlänge/ clamping length : 200 mm

Schicht	Orientierung	φ_{Faser}	Material	σ_v^+	σ_v^-	σ_{max}	S _{Zug}	S _{Druck}	S _{gemittelt}	Δz_{max}
-	°	%	-	Mpa	Mpa	Mpa	-	-	-	mm
1	90+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	423,8	3,06	1,75	2,40	0,2204
2	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	116,7	11,10	6,34	8,72	0,2205
3	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	113,9	11,37	6,49	8,93	0,2205
4	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	113,5	11,41	6,52	8,96	0,2203
5	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	113,1	11,45	6,54	9,00	0,2201
6	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	111,8	11,59	6,62	9,10	0,2198
7	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	111,0	11,67	6,66	9,17	0,2195
8	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	109,9	11,79	6,73	9,26	0,2192
9	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	109,9	11,79	6,73	9,26	0,2188
10	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	109,7	11,81	6,74	9,28	0,2184
11	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	109,7	11,81	6,74	9,28	0,2181
12	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	110,0	11,78	6,72	9,25	0,2177
13	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	110,0	11,78	6,72	9,25	0,2173
14	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	110,7	11,70	6,68	9,19	0,2168
15	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	110,5	11,72	6,69	9,21	0,2163
16	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	112,7	11,49	6,56	9,03	0,2158
17	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	109,8	11,80	6,74	9,27	0,2153
18	90+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	358,0	3,62	2,07	2,84	0,2144
19	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	120,9	10,71	6,12	8,42	0,2139
20	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	123,6	10,48	5,98	8,23	0,2138
21	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	121,9	10,63	6,07	8,35	0,2134
22	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	121,4	10,67	6,09	8,38	0,2131
23	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	120,5	10,75	6,14	8,44	0,2127
24	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	119,9	10,80	6,17	8,49	0,2124
25	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	119,4	10,85	6,19	8,52	0,2120
26	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	118,9	10,89	6,22	8,56	0,2117
27	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	118,4	10,94	6,25	8,59	0,2113
28	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	118,0	10,98	6,27	8,62	0,2110
29	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	117,7	11,01	6,28	8,64	0,2106
30	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	141,6	9,15	5,22	7,19	0,2103
31	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	116,9	11,08	6,33	8,70	0,2099
32	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	116,6	11,11	6,34	8,73	0,2096
33	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	116,3	11,14	6,36	8,75	0,2092
34	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	121,6	10,65	6,08	8,37	0,2089
35	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	115,7	11,20	6,39	8,79	0,2085
36	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	115,4	11,22	6,41	8,82	0,2081
37	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	147,8	8,76	5,00	6,88	0,2078
38	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	177,3	7,31	4,17	5,74	0,2074
39	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	114,8	11,28	6,44	8,86	0,2070
40	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	129,8	9,98	5,70	7,84	0,2067
41	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	153,3	8,45	4,82	6,64	0,2063
42	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	156,7	8,27	4,72	6,49	0,2059
43	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	142,3	9,10	5,20	7,15	0,2055

44	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	172,2	7,52	4,29	5,91	0,2052
45	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	179,9	7,20	4,11	5,66	0,2048
46	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	160,8	8,06	4,60	6,33	0,2044
47	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	148,6	8,72	4,98	6,85	0,2040
48	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	140,8	9,20	5,25	7,23	0,2037
49	90+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	328,0	3,95	2,25	3,10	0,2030
50	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	144,8	8,95	5,11	7,03	0,2030
51	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	133,7	9,69	5,53	7,61	0,2030
52	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	193,7	6,69	3,82	5,25	0,2027
53	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	258,6	5,01	2,86	3,93	0,2026
54	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	267,0	4,85	2,77	3,81	0,2022
55	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	277,9	4,66	2,66	3,66	0,2020
56	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	246,5	5,25	3,00	4,13	0,2016
57	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	237,9	5,44	3,11	4,28	0,2013
58	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	209,2	6,19	3,54	4,86	0,2009
59	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	190,7	6,79	3,88	5,34	0,2005
60	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	187,2	6,92	3,95	5,44	0,2001
61	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	229,2	5,65	3,23	4,44	0,1997
62	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	158,8	8,16	4,66	6,41	0,1992
63	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	139,9	9,26	5,29	7,27	0,1988
64	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	194,2	6,67	3,81	5,24	0,1982
65	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	151,7	8,54	4,88	6,71	0,1977
66	90+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	348,4	3,72	2,12	2,92	0,1968
67	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	164,0	7,90	4,51	6,20	0,1962
68	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	117,5	11,02	6,29	8,66	0,1961
69	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	115,9	11,18	6,38	8,78	0,1957
70	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	118,0	10,98	6,27	8,62	0,1953
71	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	114,9	11,27	6,44	8,86	0,1949
72	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	114,7	11,29	6,45	8,87	0,1946
73	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	138,1	9,38	5,36	7,37	0,1941
74	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	114,2	11,34	6,48	8,91	0,1938
75	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	113,9	11,37	6,49	8,93	0,1934
76	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	113,8	11,38	6,50	8,94	0,1930
77	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	113,7	11,39	6,50	8,95	0,1926
78	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	113,5	11,41	6,52	8,96	0,1922
79	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	113,4	11,42	6,52	8,97	0,1918
80	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	113,4	11,42	6,52	8,97	0,1914
81	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	113,3	11,43	6,53	8,98	0,1909
82	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	113,2	11,44	6,53	8,99	0,1905
83	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	113,1	11,45	6,54	9,00	0,1901
84	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	113,0	11,46	6,55	9,00	0,1897
85	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	112,8	11,48	6,56	9,02	0,1893
86	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	112,7	11,49	6,56	9,03	0,1888
87	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	112,6	11,50	6,57	9,04	0,1884
88	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	112,5	11,51	6,57	9,04	0,1879
89	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	112,4	11,52	6,58	9,05	0,1875

90	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	112,2	11,55	6,59	9,07	0,1870
91	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	112,2	11,55	6,59	9,07	0,1866
92	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	112,0	11,57	6,60	9,08	0,1861
93	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	112,0	11,57	6,60	9,08	0,1857
94	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	111,8	11,59	6,62	9,10	0,1852
95	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	111,9	11,58	6,61	9,09	0,1847
96	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	111,7	11,60	6,62	9,11	0,1842
97	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	111,9	11,58	6,61	9,09	0,1837
98	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	111,9	11,58	6,61	9,09	0,1832
99	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	112,3	11,53	6,59	9,06	0,1827
100	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	113,7	11,39	6,50	8,95	0,1821
101	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	110,9	11,68	6,67	9,17	0,1816
102	90+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	375,2	3,45	1,97	2,71	0,1808

Tabelle 31: Auswertung des Ursprungsaufbaus (Laminatvariante 0)

Schicht	Orientierung	φ_{Faser}	Material	σ_v^+	σ_v^-	σ_{max}	S _{Zug}	S _{Druck}	S _{gemittelt}	Δz_{max}
-	°	%	-	Mpa	Mpa	Mpa	-	-	-	mm
1	90+-45	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	103,9	23,52	12,27	17,90	0,2197
2	0+-45	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	122,2	20,00	10,44	15,22	0,2181
3	0+-45	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	121,6	20,10	10,49	15,29	0,2170
4	0+-45	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	125,6	19,46	10,15	14,81	0,2162
5	0+-45	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	125,6	19,46	10,15	14,81	0,2155
6	0+-45	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	125,7	19,44	10,15	14,79	0,2149
7	0+-45	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	124,8	19,58	10,22	14,90	0,2142
8	0+-45	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	124,5	19,63	10,24	14,94	0,2137
9	0+-45	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	124,4	19,65	10,25	14,95	0,2131
10	0+-45	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	124,6	19,61	10,24	14,92	0,2125
11	0+-45	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	124,5	19,63	10,24	14,94	0,2119
12	0+-45	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	124,6	19,61	10,24	14,92	0,2114
13	0+-45	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	124,4	19,65	10,25	14,95	0,2109
14	0+-45	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	124,5	19,63	10,24	14,94	0,2104
15	0+-45	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	124,2	19,68	10,27	14,97	0,2098
16	0+-45	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	124,6	19,61	10,24	14,92	0,2094
17	0+-45	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	124,4	19,65	10,25	14,95	0,2088
18	90+-45	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	102,2	23,91	12,48	18,20	0,2087
19	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	138,2	17,68	9,23	13,46	0,2079
20	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	137,9	17,72	9,25	13,49	0,2068
21	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	137,2	17,81	9,30	13,55	0,2062
22	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	136,8	17,87	9,32	13,59	0,2055
23	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	136,3	17,93	9,36	13,64	0,2050
24	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	135,9	17,98	9,38	13,68	0,2044
25	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	135,5	18,04	9,41	13,72	0,2039
26	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	135,1	18,09	9,44	13,76	0,2033
27	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	134,7	18,14	9,47	13,81	0,2028
28	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	134,3	18,20	9,50	13,85	0,2023

29	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	134,1	18,22	9,51	13,87	0,2018
30	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	148,8	16,42	8,57	12,50	0,2014
31	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	133,2	18,35	9,57	13,96	0,2009
32	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	132,8	18,40	9,60	14,00	0,2004
33	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	132,4	18,46	9,63	14,05	0,2000
34	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	138,9	17,60	9,18	13,39	0,1995
35	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	131,6	18,57	9,69	14,13	0,1991
36	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	131,2	18,63	9,72	14,17	0,1987
37	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	167,4	14,60	7,62	11,11	0,1982
38	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	199,9	12,23	6,38	9,30	0,1978
39	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	130,1	18,79	9,80	14,29	0,1974
40	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	143,9	16,98	8,86	12,92	0,1970
41	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	165,2	14,79	7,72	11,26	0,1966
42	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	164,4	14,87	7,76	11,31	0,1962
43	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	150,0	16,29	8,50	12,40	0,1959
44	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	143,7	17,01	8,87	12,94	0,1955
45	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	156,5	15,62	8,15	11,88	0,1952
46	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	153,8	15,89	8,29	12,09	0,1948
47	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	154,0	15,87	8,28	12,08	0,1946
48	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	160,6	15,22	7,94	11,58	0,1945
49	90+-45	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	110,9	22,04	11,50	16,77	0,1945
50	0+-45	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	160,0	15,27	7,97	11,62	0,1943
51	0+-45	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	132,6	18,43	9,62	14,02	0,1935
52	0+-45	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	213,0	11,47	5,99	8,73	0,1932
53	0+-45	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	302,4	8,08	4,22	6,15	0,1927
54	0+-45	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	299,4	8,16	4,26	6,21	0,1924
55	0+-45	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	288,3	8,48	4,42	6,45	0,1919
56	0+-45	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	267,2	9,15	4,77	6,96	0,1915
57	0+-45	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	275,6	8,87	4,63	6,75	0,1910
58	0+-45	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	242,9	10,06	5,25	7,66	0,1906
59	0+-45	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	209,7	11,65	6,08	8,87	0,1901
60	0+-45	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	200,6	12,18	6,36	9,27	0,1898
61	0+-45	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	249,9	9,78	5,10	7,44	0,1893
62	0+-45	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	157,4	15,53	8,10	11,81	0,1889
63	0+-45	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	139,9	17,47	9,12	13,29	0,1884
64	0+-45	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	193,4	12,64	6,59	9,62	0,1880
65	0+-45	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	156,2	15,65	8,16	11,91	0,1874
66	90+-45	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	106,3	22,99	12,00	17,49	0,1874
67	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	195,4	12,51	6,53	9,52	0,1867
68	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	134,5	18,17	9,48	13,83	0,1856
69	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	127,3	19,20	10,02	14,61	0,1851
70	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	132,4	18,46	9,63	14,05	0,1844
71	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	127,0	19,24	10,04	14,64	0,1839
72	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	126,9	19,26	10,05	14,65	0,1833
73	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	139,9	17,47	9,12	13,29	0,1828
74	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	126,7	19,29	10,07	14,68	0,1822

75	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	126,5	19,32	10,08	14,70	0,1818
76	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	126,4	19,34	10,09	14,71	0,1813
77	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	126,3	19,35	10,10	14,72	0,1808
78	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	126,1	19,38	10,11	14,75	0,1803
79	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	126,0	19,40	10,12	14,76	0,1798
80	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	125,8	19,43	10,14	14,78	0,1794
81	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	125,7	19,44	10,15	14,79	0,1789
82	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	125,5	19,47	10,16	14,82	0,1784
83	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	125,2	19,52	10,19	14,85	0,1780
84	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	125,0	19,55	10,20	14,88	0,1775
85	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	124,7	19,60	10,23	14,91	0,1771
86	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	124,5	19,63	10,24	14,94	0,1766
87	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	124,2	19,68	10,27	14,97	0,1762
88	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	123,8	19,74	10,30	15,02	0,1757
89	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	123,5	19,79	10,33	15,06	0,1753
90	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	123,1	19,85	10,36	15,11	0,1749
91	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	122,7	19,92	10,39	15,16	0,1745
92	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	122,2	20,00	10,44	15,22	0,1740
93	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	121,7	20,08	10,48	15,28	0,1736
94	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	121,1	20,18	10,53	15,36	0,1732
95	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	120,5	20,28	10,58	15,43	0,1729
96	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	119,8	20,40	10,65	15,52	0,1725
97	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	119,0	20,54	10,72	15,63	0,1721
98	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	118,0	20,71	10,81	15,76	0,1718
99	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	117,1	20,87	10,89	15,88	0,1715
100	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	115,7	21,12	11,02	16,07	0,1713
101	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	113,0	21,63	11,29	16,46	0,1714
102	90+-45	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	93,4	26,18	13,66	19,92	0,1721

Tabelle 32: Auswertung Laminatvariante 1

Schicht	Orientierung	φ_{Faser}	Material	σ_v^+	σ_v^-	σ_{max}	S_{Zug}	S_{Druck}	$S_{\text{gemittelt}}$	Δz_{max}
-	°	%	-	Mpa	Mpa	Mpa	-	-	-	mm
1	90+-45	100	Stahlblech	215	215	604,9	0,35	0,35	0,35	1,74E-01
2	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	92,2	14,05	8,02	11,04	1,76E-01
3	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	92,99	13,93	7,95	10,94	1,77E-01
4	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	94,51	13,71	7,83	10,77	1,78E-01
5	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	94,4	13,72	7,83	10,78	1,78E-01
6	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	93,3	13,88	7,93	10,91	1,79E-01
7	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	92,6	13,99	7,99	10,99	1,79E-01
8	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	91,72	14,12	8,06	11,09	1,79E-01
9	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	91,8	14,11	8,06	11,08	1,79E-01
10	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	91,71	14,12	8,06	11,09	1,79E-01
11	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	91,79	14,11	8,06	11,08	1,79E-01
12	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	92,1	14,06	8,03	11,05	1,79E-01
13	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	92,06	14,07	8,03	11,05	1,79E-01

14	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	92,71	13,97	7,98	10,97	1,78E-01
15	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	92,21	14,05	8,02	11,03	1,78E-01
16	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	94,11	13,76	7,86	10,81	1,77E-01
17	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	91,11	14,22	8,12	11,17	1,77E-01
18	90+-45	100	Stahlblech	215	215	591,4	0,36	0,36	0,36	1,74E-01
19	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	100,4	12,90	7,37	10,13	1,76E-01
20	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	102,4	12,65	7,22	9,94	1,77E-01
21	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	101,4	12,77	7,29	10,03	1,77E-01
22	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	101,5	12,76	7,29	10,02	1,78E-01
23	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	101,1	12,81	7,32	10,06	1,78E-01
24	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	101	12,83	7,32	10,07	1,78E-01
25	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	100,7	12,86	7,34	10,10	1,78E-01
26	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	100,6	12,88	7,35	10,11	1,78E-01
27	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	100,4	12,90	7,37	10,13	1,78E-01
28	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	100,2	12,93	7,38	10,15	1,78E-01
29	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	100,1	12,94	7,39	10,16	1,78E-01
30	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	135,9	9,53	5,44	7,49	1,78E-01
31	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	99,7	12,99	7,42	10,21	1,78E-01
32	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	99,53	13,01	7,43	10,22	1,78E-01
33	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	99,37	13,04	7,44	10,24	1,78E-01
34	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	114,2	11,34	6,48	8,91	1,78E-01
35	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	99,04	13,08	7,47	10,27	1,78E-01
36	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	100,9	12,84	7,33	10,08	1,78E-01
37	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	140,6	9,21	5,26	7,24	1,77E-01
38	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	169,4	7,65	4,37	6,01	1,77E-01
39	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	100,9	12,84	7,33	10,08	1,77E-01
40	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	124,1	10,44	5,96	8,20	1,77E-01
41	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	146,4	8,85	5,05	6,95	1,76E-01
42	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	149,2	8,68	4,96	6,82	1,76E-01
43	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	134,1	9,66	5,52	7,59	1,75E-01
44	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	162,4	7,98	4,55	6,27	1,75E-01
45	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	181	7,16	4,09	5,62	1,74E-01
46	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	139,8	9,27	5,29	7,28	1,74E-01
47	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	187,5	6,91	3,94	5,43	1,73E-01
48	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	223,4	5,80	3,31	4,55	1,72E-01
49	90+-45	100	Stahlblech	215	215	696,3	0,31	0,31	0,31	1,70E-01
50	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	166,8	7,77	4,43	6,10	1,71E-01
51	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	161,9	8,00	4,57	6,28	1,72E-01
52	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	185	7,00	4,00	5,50	1,72E-01
53	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	252,2	5,14	2,93	4,03	1,72E-01
54	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	256,6	5,05	2,88	3,97	1,73E-01
55	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	268,7	4,82	2,75	3,79	1,73E-01
56	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	236,5	5,48	3,13	4,30	1,72E-01
57	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	229,3	5,65	3,23	4,44	1,72E-01
58	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	201,1	6,44	3,68	5,06	1,72E-01
59	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	182,4	7,10	4,05	5,58	1,72E-01

60	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	176	7,36	4,20	5,78	1,72E-01
61	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	222,1	5,83	3,33	4,58	1,71E-01
62	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	153,5	8,44	4,82	6,63	1,71E-01
63	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	132,8	9,75	5,57	7,66	1,70E-01
64	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	195,3	6,63	3,79	5,21	1,69E-01
65	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	160,4	8,08	4,61	6,34	1,68E-01
66	90+-45	100	Stahlblech	215	215	589,3	0,36	0,36	0,36	1,66E-01
67	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	172,8	7,50	4,28	5,89	1,67E-01
68	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	120,7	10,73	6,13	8,43	1,68E-01
69	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	99,37	13,04	7,44	10,24	1,68E-01
70	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	115,4	11,22	6,41	8,82	1,68E-01
71	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	99,6	13,01	7,43	10,22	1,69E-01
72	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	99,75	12,99	7,41	10,20	1,69E-01
73	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	133,6	9,70	5,54	7,62	1,69E-01
74	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	99,78	12,98	7,41	10,20	1,69E-01
75	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	99,81	12,98	7,41	10,19	1,69E-01
76	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	99,84	12,97	7,41	10,19	1,69E-01
77	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	99,89	12,97	7,40	10,19	1,69E-01
78	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	99,91	12,97	7,40	10,18	1,69E-01
79	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	99,93	12,96	7,40	10,18	1,68E-01
80	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	99,94	12,96	7,40	10,18	1,68E-01
81	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	99,95	12,96	7,40	10,18	1,68E-01
82	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	99,95	12,96	7,40	10,18	1,68E-01
83	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	99,93	12,96	7,40	10,18	1,68E-01
84	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	99,92	12,96	7,40	10,18	1,67E-01
85	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	99,87	12,97	7,41	10,19	1,67E-01
86	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	99,84	12,97	7,41	10,19	1,67E-01
87	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	99,78	12,98	7,41	10,20	1,66E-01
88	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	99,74	12,99	7,42	10,20	1,66E-01
89	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	99,64	13,00	7,42	10,21	1,65E-01
90	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	99,61	13,00	7,42	10,21	1,65E-01
91	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	99,49	13,02	7,43	10,23	1,64E-01
92	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	99,46	13,02	7,44	10,23	1,64E-01
93	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	99,31	13,04	7,45	10,25	1,63E-01
94	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	99,32	13,04	7,45	10,24	1,62E-01
95	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	99,12	13,07	7,46	10,27	1,62E-01
96	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	99,2	13,06	7,46	10,26	1,61E-01
97	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	98,91	13,10	7,48	10,29	1,60E-01
98	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	99,18	13,06	7,46	10,26	1,59E-01
99	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	98,71	13,12	7,49	10,31	1,58E-01
100	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	100	12,95	7,40	10,17	1,57E-01
101	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	97,71	13,26	7,57	10,41	1,55E-01
102	90+-45	100	Stahlblech	215	215	578,7	0,37	0,37	0,37	1,53E-01

Tabelle 33: Auswertung Laminatvariante 2

Schicht	Orientierung	φ_{Faser}	Material	σ_v^+	σ_v^-	σ_{max}	S_{Zug}	S_{Druck}	$S_{\text{gemittelt}}$	Δz_{max}
-	°	%	-	Mpa	Mpa	Mpa	-	-	-	mm
1	90+-45	100	Stahlblech	215	215	604,9	0,35	0,35	0,35	1,74E-01
2	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	92,2	14,05	8,02	11,04	1,76E-01
3	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	92,99	13,93	7,95	10,94	1,77E-01
4	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	94,51	13,71	7,83	10,77	1,78E-01
5	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	94,4	13,72	7,83	10,78	1,78E-01
6	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	93,3	13,88	7,93	10,91	1,79E-01
7	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	92,6	13,99	7,99	10,99	1,79E-01
8	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	91,72	14,12	8,06	11,09	1,79E-01
9	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	91,8	14,11	8,06	11,08	1,79E-01
10	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	91,71	14,12	8,06	11,09	1,79E-01
11	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	91,79	14,11	8,06	11,08	1,79E-01
12	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	92,1	14,06	8,03	11,05	1,79E-01
13	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	92,06	14,07	8,03	11,05	1,79E-01
14	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	92,71	13,97	7,98	10,97	1,78E-01
15	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	92,21	14,05	8,02	11,03	1,78E-01
16	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	94,11	13,76	7,86	10,81	1,77E-01
17	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	91,11	14,22	8,12	11,17	1,77E-01
18	90+-45	100	Stahlblech	215	215	591,4	0,36	0,36	0,36	1,74E-01
19	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	100,4	12,90	7,37	10,13	1,76E-01
20	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	102,4	12,65	7,22	9,94	1,77E-01
21	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	101,4	12,77	7,29	10,03	1,77E-01
22	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	101,5	12,76	7,29	10,02	1,78E-01
23	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	101,1	12,81	7,32	10,06	1,78E-01
24	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	101	12,83	7,32	10,07	1,78E-01
25	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	100,7	12,86	7,34	10,10	1,78E-01
26	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	100,6	12,88	7,35	10,11	1,78E-01
27	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	100,4	12,90	7,37	10,13	1,78E-01
28	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	100,2	12,93	7,38	10,15	1,78E-01
29	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	100,1	12,94	7,39	10,16	1,78E-01
30	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	135,9	9,53	5,44	7,49	1,78E-01
31	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	99,7	12,99	7,42	10,21	1,78E-01
32	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	99,53	13,01	7,43	10,22	1,78E-01
33	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	99,37	13,04	7,44	10,24	1,78E-01
34	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	114,2	11,34	6,48	8,91	1,78E-01
35	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	99,04	13,08	7,47	10,27	1,78E-01
36	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	100,9	12,84	7,33	10,08	1,78E-01
37	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	140,6	9,21	5,26	7,24	1,77E-01
38	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	169,4	7,65	4,37	6,01	1,77E-01
39	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	100,9	12,84	7,33	10,08	1,77E-01
40	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	124,1	10,44	5,96	8,20	1,77E-01
41	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	146,4	8,85	5,05	6,95	1,76E-01
42	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	149,2	8,68	4,96	6,82	1,76E-01
43	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	134,1	9,66	5,52	7,59	1,75E-01

44	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	162,4	7,98	4,55	6,27	1,75E-01
45	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	181	7,16	4,09	5,62	1,74E-01
46	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	139,8	9,27	5,29	7,28	1,74E-01
47	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	187,5	6,91	3,94	5,43	1,73E-01
48	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	223,4	5,80	3,31	4,55	1,72E-01
49	90+-45	100	Stahlblech	215	215	696,3	0,31	0,31	0,31	1,70E-01
50	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	166,8	7,77	4,43	6,10	1,71E-01
51	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	161,9	8,00	4,57	6,28	1,72E-01
52	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	185	7,00	4,00	5,50	1,72E-01
53	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	252,2	5,14	2,93	4,03	1,72E-01
54	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	256,6	5,05	2,88	3,97	1,73E-01
55	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	268,7	4,82	2,75	3,79	1,73E-01
56	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	236,5	5,48	3,13	4,30	1,72E-01
57	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	229,3	5,65	3,23	4,44	1,72E-01
58	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	201,1	6,44	3,68	5,06	1,72E-01
59	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	182,4	7,10	4,05	5,58	1,72E-01
60	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	176	7,36	4,20	5,78	1,72E-01
61	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	222,1	5,83	3,33	4,58	1,71E-01
62	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	153,5	8,44	4,82	6,63	1,71E-01
63	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	132,8	9,75	5,57	7,66	1,70E-01
64	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	195,3	6,63	3,79	5,21	1,69E-01
65	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	160,4	8,08	4,61	6,34	1,68E-01
66	90+-45	100	Stahlblech	215	215	589,3	0,36	0,36	0,36	1,66E-01
67	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	172,8	7,50	4,28	5,89	1,67E-01
68	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	120,7	10,73	6,13	8,43	1,68E-01
69	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	99,37	13,04	7,44	10,24	1,68E-01
70	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	115,4	11,22	6,41	8,82	1,68E-01
71	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	99,6	13,01	7,43	10,22	1,69E-01
72	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	99,75	12,99	7,41	10,20	1,69E-01
73	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	133,6	9,70	5,54	7,62	1,69E-01
74	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	99,78	12,98	7,41	10,20	1,69E-01
75	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	99,81	12,98	7,41	10,19	1,69E-01
76	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	99,84	12,97	7,41	10,19	1,69E-01
77	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	99,89	12,97	7,40	10,19	1,69E-01
78	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	99,91	12,97	7,40	10,18	1,69E-01
79	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	99,93	12,96	7,40	10,18	1,68E-01
80	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	99,94	12,96	7,40	10,18	1,68E-01
81	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	99,95	12,96	7,40	10,18	1,68E-01
82	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	99,95	12,96	7,40	10,18	1,68E-01
83	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	99,93	12,96	7,40	10,18	1,68E-01
84	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	99,92	12,96	7,40	10,18	1,67E-01
85	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	99,87	12,97	7,41	10,19	1,67E-01
86	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	99,84	12,97	7,41	10,19	1,67E-01
87	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	99,78	12,98	7,41	10,20	1,66E-01
88	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	99,74	12,99	7,42	10,20	1,66E-01
89	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	99,64	13,00	7,42	10,21	1,65E-01

90	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	99,61	13,00	7,42	10,21	1,65E-01
91	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	99,49	13,02	7,43	10,23	1,64E-01
92	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	99,46	13,02	7,44	10,23	1,64E-01
93	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	99,31	13,04	7,45	10,25	1,63E-01
94	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	99,32	13,04	7,45	10,24	1,62E-01
95	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	99,12	13,07	7,46	10,27	1,62E-01
96	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	99,2	13,06	7,46	10,26	1,61E-01
97	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	98,91	13,10	7,48	10,29	1,60E-01
98	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	99,18	13,06	7,46	10,26	1,59E-01
99	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	98,71	13,12	7,49	10,31	1,58E-01
100	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	100	12,95	7,40	10,17	1,57E-01
101	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	97,71	13,26	7,57	10,41	1,55E-01
102	90+-45	100	Stahlblech	215	215	578,7	0,37	0,37	0,37	1,53E-01

Tabelle 34: Auswertung Laminatvariante 3

Schicht	Orientierung	φ_{Faser}	Material	σ_v^+	σ_v^-	σ_{max}	S _{Zug}	S _{Druck}	S _{gemittelt}	Δz_{max}
-	°	%	-	Mpa	Mpa	Mpa	-	-	-	mm
1	90+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	367,7	3,52	2,01	2,77	2,04E-01
2	0+-45	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	122	20,03	10,45	15,24	2,04E-01
3	0+-45	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	119,3	20,49	10,69	15,59	2,04E-01
4	0+-45	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	119,3	20,49	10,69	15,59	2,04E-01
5	0+-45	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	119,2	20,50	10,70	15,60	2,04E-01
6	0+-45	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	118	20,71	10,81	15,76	2,04E-01
7	0+-45	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	117,5	20,80	10,85	15,83	2,04E-01
8	0+-45	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	116,4	21,00	10,96	15,98	2,03E-01
9	0+-45	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	116,8	20,92	10,92	15,92	2,03E-01
10	0+-45	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	116,6	20,96	10,94	15,95	2,03E-01
11	0+-45	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	116,9	20,91	10,91	15,91	2,03E-01
12	0+-45	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	117,1	20,87	10,89	15,88	2,03E-01
13	0+-45	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	117,3	20,84	10,87	15,85	2,03E-01
14	0+-45	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	118	20,71	10,81	15,76	2,02E-01
15	0+-45	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	118,1	20,69	10,80	15,75	2,02E-01
16	0+-45	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	120,2	20,33	10,61	15,47	2,02E-01
17	0+-45	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	117,9	20,73	10,82	15,77	2,02E-01
18	90+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	342,8	3,78	2,16	2,97	2,01E-01
19	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	113,6	11,40	6,51	8,96	2,02E-01
20	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	116,4	11,13	6,35	8,74	2,02E-01
21	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	114,8	11,28	6,44	8,86	2,01E-01
22	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	114,5	11,31	6,46	8,89	2,01E-01
23	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	113,8	11,38	6,50	8,94	2,01E-01
24	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	113,4	11,42	6,52	8,97	2,01E-01
25	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	112,9	11,47	6,55	9,01	2,01E-01
26	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	112,6	11,50	6,57	9,04	2,01E-01
27	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	112,2	11,55	6,59	9,07	2,01E-01
28	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	111,9	11,58	6,61	9,09	2,01E-01

29	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	111,7	11,60	6,62	9,11	2,00E-01
30	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	139,9	9,26	5,29	7,27	2,00E-01
31	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	111,1	11,66	6,66	9,16	2,00E-01
32	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	110,9	11,68	6,67	9,17	2,00E-01
33	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	110,7	11,70	6,68	9,19	2,00E-01
34	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	117,9	10,99	6,27	8,63	1,99E-01
35	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	110,2	11,75	6,71	9,23	1,99E-01
36	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	110	11,78	6,72	9,25	1,99E-01
37	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	144,3	8,98	5,13	7,05	1,99E-01
38	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	173,2	7,48	4,27	5,87	1,98E-01
39	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	109,6	11,82	6,75	9,28	1,98E-01
40	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	126,8	10,22	5,83	8,02	1,98E-01
41	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	148,5	8,72	4,98	6,85	1,98E-01
42	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	157,1	8,25	4,71	6,48	1,97E-01
43	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	138,9	9,33	5,32	7,33	1,97E-01
44	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	173,5	7,47	4,26	5,86	1,97E-01
45	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	181,8	7,13	4,07	5,60	1,96E-01
46	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	159,9	8,10	4,63	6,36	1,96E-01
47	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	148,9	8,70	4,97	6,83	1,95E-01
48	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	139,1	9,31	5,32	7,31	1,95E-01
49	90+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	318,5	4,07	2,32	3,19	1,94E-01
50	0+-45	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	178,1	13,72	7,16	10,44	1,94E-01
51	0+-45	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	150,7	16,22	8,46	12,34	1,94E-01
52	0+-45	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	218,4	11,19	5,84	8,51	1,94E-01
53	0+-45	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	310,5	7,87	4,11	5,99	1,94E-01
54	0+-45	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	300,8	8,12	4,24	6,18	1,93E-01
55	0+-45	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	298,2	8,20	4,28	6,24	1,93E-01
56	0+-45	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	270,5	9,03	4,71	6,87	1,93E-01
57	0+-45	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	272,7	8,96	4,68	6,82	1,93E-01
58	0+-45	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	241,9	10,10	5,27	7,69	1,92E-01
59	0+-45	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	212,8	11,48	5,99	8,74	1,92E-01
60	0+-45	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	216,4	11,29	5,89	8,59	1,92E-01
61	0+-45	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	266,8	9,16	4,78	6,97	1,92E-01
62	0+-45	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	162,4	15,05	7,85	11,45	1,91E-01
63	0+-45	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	143,1	17,08	8,91	13,00	1,91E-01
64	0+-45	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	218,6	11,18	5,83	8,51	1,91E-01
65	0+-45	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	169,4	14,43	7,53	10,98	1,91E-01
66	90+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	343,5	3,77	2,15	2,96	1,90E-01
67	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	161,9	8,00	4,57	6,28	1,90E-01
68	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	114,1	11,35	6,48	8,92	1,90E-01
69	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	112,5	11,51	6,57	9,04	1,90E-01
70	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	116	11,17	6,38	8,77	1,90E-01
71	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	111,9	11,58	6,61	9,09	1,90E-01
72	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	111,8	11,59	6,62	9,10	1,90E-01
73	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	137,4	9,43	5,38	7,41	1,89E-01
74	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	111,6	11,61	6,63	9,12	1,89E-01

75	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	111,5	11,62	6,63	9,13	1,89E-01
76	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	111,4	11,63	6,64	9,13	1,89E-01
77	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	111,4	11,63	6,64	9,13	1,89E-01
78	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	111,4	11,63	6,64	9,13	1,88E-01
79	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	111,4	11,63	6,64	9,13	1,88E-01
80	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	111,4	11,63	6,64	9,13	1,88E-01
81	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	111,4	11,63	6,64	9,13	1,88E-01
82	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	111,4	11,63	6,64	9,13	1,87E-01
83	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	111,4	11,63	6,64	9,13	1,87E-01
84	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	111,4	11,63	6,64	9,13	1,87E-01
85	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	111,4	11,63	6,64	9,13	1,87E-01
86	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	111,3	11,64	6,65	9,14	1,86E-01
87	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	111,3	11,64	6,65	9,14	1,86E-01
88	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	111,3	11,64	6,65	9,14	1,86E-01
89	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	111,3	11,64	6,65	9,14	1,85E-01
90	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	111,2	11,65	6,65	9,15	1,85E-01
91	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	111,2	11,65	6,65	9,15	1,85E-01
92	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	111,2	11,65	6,65	9,15	1,85E-01
93	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	111,2	11,65	6,65	9,15	1,84E-01
94	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	111,1	11,66	6,66	9,16	1,84E-01
95	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	111,3	11,64	6,65	9,14	1,84E-01
96	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	111,2	11,65	6,65	9,15	1,83E-01
97	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	111,5	11,62	6,63	9,13	1,83E-01
98	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	111,6	11,61	6,63	9,12	1,83E-01
99	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	112	11,57	6,60	9,08	1,82E-01
100	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	113,6	11,40	6,51	8,96	1,82E-01
101	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	110,8	11,69	6,67	9,18	1,81E-01
102	90+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	375	3,45	1,97	2,71	1,81E-01

Tabelle 35: Auswertung Laminatvariante 4

Schicht	Orientierung	φ_{Faser}	Material	σ_v^+	σ_v^-	σ_{max}	S_{Zug}	S_{Druck}	$S_{\text{gemittelt}}$	Δz_{max}
-	°	%	-	Mpa	Mpa	Mpa	-	-	-	mm
1	90+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	375,7	3,45	1,97	2,71	2,11E-01
2	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	110,5	11,72	6,69	9,21	2,11E-01
3	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	108,2	11,97	6,84	9,40	2,11E-01
4	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	107,9	12,01	6,85	9,43	2,11E-01
5	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	107,5	12,05	6,88	9,46	2,11E-01
6	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	106,3	12,19	6,96	9,57	2,10E-01
7	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	105,4	12,29	7,02	9,65	2,10E-01
8	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	104,3	12,42	7,09	9,76	2,09E-01
9	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	104,2	12,43	7,10	9,76	2,09E-01
10	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	104	12,46	7,11	9,78	2,08E-01
11	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	103,9	12,47	7,12	9,79	2,07E-01
12	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	104,1	12,44	7,10	9,77	2,07E-01
13	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	104	12,46	7,11	9,78	2,06E-01

14	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	104,5	12,40	7,08	9,74	2,06E-01
15	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	104,2	12,43	7,10	9,76	2,05E-01
16	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	106,1	12,21	6,97	9,59	2,04E-01
17	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	103	12,58	7,18	9,88	2,03E-01
18	90+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	345,2	3,75	2,14	2,95	2,02E-01
19	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	132,3	18,47	9,64	14,06	2,01E-01
20	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	133,8	18,27	9,53	13,90	2,01E-01
21	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	132,2	18,49	9,65	14,07	2,00E-01
22	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	131,5	18,59	9,70	14,14	1,99E-01
23	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	130,5	18,73	9,77	14,25	1,99E-01
24	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	129,9	18,81	9,82	14,32	1,98E-01
25	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	129,1	18,93	9,88	14,40	1,98E-01
26	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	128,5	19,02	9,92	14,47	1,97E-01
27	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	127,9	19,11	9,97	14,54	1,97E-01
28	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	127,4	19,18	10,01	14,60	1,96E-01
29	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	127	19,24	10,04	14,64	1,96E-01
30	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	157,6	15,51	8,09	11,80	1,95E-01
31	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	125,9	19,41	10,13	14,77	1,95E-01
32	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	125,5	19,47	10,16	14,82	1,94E-01
33	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	125,1	19,54	10,19	14,87	1,94E-01
34	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	131,9	18,53	9,67	14,10	1,93E-01
35	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	124,3	19,66	10,26	14,96	1,93E-01
36	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	123,9	19,73	10,29	15,01	1,92E-01
37	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	160,2	15,26	7,96	11,61	1,92E-01
38	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	193,8	12,61	6,58	9,60	1,92E-01
39	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	123,1	19,85	10,36	15,11	1,91E-01
40	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	144,5	16,91	8,83	12,87	1,91E-01
41	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	162,9	15,00	7,83	11,42	1,90E-01
42	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	174,8	13,98	7,30	10,64	1,90E-01
43	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	156,6	15,61	8,14	11,88	1,90E-01
44	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	194,6	12,56	6,55	9,56	1,89E-01
45	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	202,5	12,07	6,30	9,18	1,89E-01
46	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	180,7	13,52	7,06	10,29	1,89E-01
47	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	162,7	15,02	7,84	11,43	1,88E-01
48	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	160,3	15,25	7,96	11,60	1,88E-01
49	90+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	307,7	4,21	2,40	3,31	1,88E-01
50	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	140,9	9,19	5,25	7,22	1,88E-01
51	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	131,8	9,83	5,61	7,72	1,88E-01
52	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	188,5	6,87	3,92	5,40	1,88E-01
53	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	251,3	5,15	2,94	4,05	1,88E-01
54	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	259,2	5,00	2,85	3,93	1,87E-01
55	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	269,4	4,81	2,75	3,78	1,87E-01
56	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	238	5,44	3,11	4,28	1,87E-01
57	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	229,8	5,64	3,22	4,43	1,86E-01
58	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	201,5	6,43	3,67	5,05	1,86E-01
59	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	183,3	7,07	4,03	5,55	1,85E-01

60	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	175,2	7,39	4,22	5,81	1,85E-01
61	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	225,4	5,75	3,28	4,51	1,84E-01
62	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	152,2	8,51	4,86	6,69	1,84E-01
63	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	132,1	9,81	5,60	7,70	1,83E-01
64	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	186,4	6,95	3,97	5,46	1,82E-01
65	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	142,1	9,12	5,20	7,16	1,81E-01
66	90+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	326,3	3,97	2,27	3,12	1,80E-01
67	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	174,1	14,04	7,33	10,68	1,79E-01
68	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	122,9	19,89	10,38	15,13	1,79E-01
69	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	121,5	20,11	10,50	15,31	1,78E-01
70	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	127,2	19,21	10,03	14,62	1,78E-01
71	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	120,4	20,30	10,59	15,45	1,77E-01
72	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	120	20,37	10,63	15,50	1,76E-01
73	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	151,5	16,13	8,42	12,27	1,76E-01
74	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	119,4	20,47	10,68	15,57	1,75E-01
75	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	119	20,54	10,72	15,63	1,75E-01
76	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	118,7	20,59	10,74	15,67	1,74E-01
77	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	118,4	20,64	10,77	15,71	1,74E-01
78	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	118,1	20,69	10,80	15,75	1,73E-01
79	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	117,9	20,73	10,82	15,77	1,73E-01
80	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	117,7	20,76	10,84	15,80	1,72E-01
81	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	117,4	20,82	10,86	15,84	1,72E-01
82	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	117,2	20,85	10,88	15,87	1,71E-01
83	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	116,9	20,91	10,91	15,91	1,70E-01
84	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	116,7	20,94	10,93	15,94	1,70E-01
85	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	116,4	21,00	10,96	15,98	1,69E-01
86	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	116,1	21,05	10,98	16,02	1,69E-01
87	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	115,9	21,09	11,00	16,05	1,68E-01
88	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	115,6	21,14	11,03	16,09	1,68E-01
89	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	115,3	21,20	11,06	16,13	1,67E-01
90	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	115	21,25	11,09	16,17	1,67E-01
/91	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	114,8	21,29	11,11	16,20	1,66E-01
92	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	114,4	21,36	11,15	16,26	1,66E-01
93	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	114,2	21,40	11,17	16,28	1,65E-01
94	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	113,9	21,46	11,20	16,33	1,65E-01
95	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	113,7	21,49	11,22	16,36	1,64E-01
96	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	113,5	21,53	11,24	16,38	1,63E-01
97	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	113,2	21,59	11,27	16,43	1,63E-01
98	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	113,2	21,59	11,27	16,43	1,62E-01
99	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	112,9	21,65	11,30	16,47	1,62E-01
100	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	113,1	21,61	11,28	16,44	1,61E-01
101	0+-30	51,6/24,2	S-Glas	2.444	1.275	111	22,02	11,49	16,75	1,61E-01
102	90+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	338,7	3,82	2,18	3,00	1,60E-01

Tabelle 36: Auswertung Laminatvariante 5

Schicht	Orientierung	φ_{Faser}	Material	σ_v^+	σ_v^-	σ_{max}	S _{Zug}	S _{Druck}	S _{gemittelt}	Δz_{max}
-	°	%	-	Mpa	Mpa	Mpa	-	-	-	mm
1	90+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	114,7	11,29	6,45	8,87	8,37E-02
2	0+-45	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	136,5	13,18	15,01	14,09	8,39E-02
3	0+-45	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	138,8	12,96	14,76	13,86	8,45E-02
4	0+-45	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	153,1	11,75	13,38	12,56	8,52E-02
5	0+-45	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	156	11,53	13,13	12,33	8,59E-02
6	0+-45	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	161,5	11,14	12,68	11,91	8,67E-02
7	0+-45	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	166,5	10,80	12,30	11,55	8,75E-02
8	0+-45	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	170,7	10,54	12,00	11,27	8,83E-02
9	0+-45	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	174,8	10,29	11,72	11,00	8,92E-02
10	0+-45	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	179,6	10,01	11,41	10,71	9,02E-02
11	0+-45	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	183,7	9,79	11,15	10,47	9,12E-02
12	0+-45	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	188,1	9,56	10,89	10,23	9,22E-02
13	0+-45	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	191,7	9,38	10,69	10,03	9,33E-02
14	0+-45	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	195,4	9,20	10,48	9,84	9,45E-02
15	0+-45	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	197,7	9,10	10,36	9,73	9,59E-02
16	0+-45	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	200,2	8,98	10,23	9,61	9,74E-02
17	0+-45	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	201,6	8,92	10,16	9,54	9,96E-02
18	90+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	149,6	8,66	4,94	6,80	1,02E-01
19	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	53,8	24,08	13,75	18,91	1,04E-01
20	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	55,29	23,43	13,38	18,40	1,06E-01
21	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	54,79	23,64	13,50	18,57	1,07E-01
22	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	55,03	23,54	13,44	18,49	1,09E-01
23	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	54,91	23,59	13,47	18,53	1,10E-01
24	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	55,09	23,51	13,43	18,47	1,11E-01
25	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	55,15	23,49	13,41	18,45	1,12E-01
26	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	55,37	23,39	13,36	18,38	1,13E-01
27	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	55,53	23,33	13,32	18,32	1,14E-01
28	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	58,63	22,09	12,61	17,35	1,15E-01
29	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	67,08	19,31	11,03	15,17	1,16E-01
30	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	124,2	10,43	5,95	8,19	1,16E-01
31	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	65,33	19,83	11,32	15,57	1,17E-01
32	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	77,33	16,75	9,56	13,16	1,18E-01
33	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	76,24	16,99	9,70	13,35	1,18E-01
34	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	92,07	14,07	8,03	11,05	1,19E-01
35	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	75,09	17,25	9,85	13,55	1,19E-01
36	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	75,61	17,13	9,78	13,46	1,20E-01
37	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	114,6	11,30	6,45	8,88	1,20E-01
38	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	140,7	9,21	5,26	7,23	1,20E-01
39	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	77,17	16,79	9,58	13,18	1,20E-01
40	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	98,46	13,16	7,51	10,33	1,21E-01
41	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	116	11,17	6,38	8,77	1,21E-01
42	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	122,7	10,56	6,03	8,29	1,21E-01
43	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	109,1	11,87	6,78	9,33	1,21E-01

44	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	140,2	9,24	5,28	7,26	1,21E-01
45	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	150,3	8,62	4,92	6,77	1,21E-01
46	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	127	10,20	5,82	8,01	1,20E-01
47	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	121,8	10,64	6,07	8,35	1,20E-01
48	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	104,7	12,37	7,06	9,72	1,19E-01
49	90+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	212,8	6,09	3,48	4,78	1,19E-01
50	0+-45	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	251,8	7,14	8,14	7,64	1,17E-01
51	0+-45	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	258,6	6,95	7,92	7,44	1,16E-01
52	0+-45	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	261,9	6,87	7,82	7,34	1,16E-01
53	0+-45	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	265,3	6,78	7,72	7,25	1,16E-01
54	0+-45	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	267,6	6,72	7,65	7,19	1,16E-01
55	0+-45	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	270,2	6,66	7,58	7,12	1,17E-01
56	0+-45	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	272,6	6,60	7,51	7,06	1,17E-01
57	0+-45	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	275,2	6,54	7,44	6,99	1,18E-01
58	0+-45	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	277,6	6,48	7,38	6,93	1,18E-01
59	0+-45	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	280	6,42	7,32	6,87	1,19E-01
60	0+-45	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	282,4	6,37	7,25	6,81	1,20E-01
61	0+-45	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	284,5	6,32	7,20	6,76	1,21E-01
62	0+-45	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	289,6	6,21	7,07	6,64	1,22E-01
63	0+-45	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	287,8	6,25	7,12	6,68	1,23E-01
64	0+-45	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	288,9	6,23	7,09	6,66	1,25E-01
65	0+-45	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	285,4	6,30	7,18	6,74	1,27E-01
66	90+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	218	5,94	3,39	4,67	1,30E-01
67	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	146,3	8,85	5,06	6,95	1,32E-01
68	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	87,16	14,86	8,49	11,67	1,33E-01
69	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	76,36	16,96	9,69	13,32	1,35E-01
70	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	96,12	13,48	7,69	10,59	1,36E-01
71	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	85,3	15,19	8,67	11,93	1,38E-01
72	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	78,31	16,54	9,44	12,99	1,39E-01
73	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	122,4	10,58	6,04	8,31	1,41E-01
74	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	82,85	15,63	8,93	12,28	1,42E-01
75	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	80,09	16,17	9,23	12,70	1,43E-01
76	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	80,82	16,03	9,15	12,59	1,44E-01
77	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	81,58	15,88	9,07	12,47	1,45E-01
78	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	82,32	15,74	8,98	12,36	1,46E-01
79	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	83,08	15,59	8,90	12,25	1,47E-01
80	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	83,83	15,45	8,82	12,14	1,48E-01
81	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	84,57	15,32	8,75	12,03	1,49E-01
82	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	85,31	15,18	8,67	11,93	1,50E-01
83	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	86,03	15,06	8,60	11,83	1,51E-01
84	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	86,75	14,93	8,53	11,73	1,52E-01
85	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	87,45	14,81	8,46	11,63	1,53E-01
86	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	88,15	14,69	8,39	11,54	1,54E-01
87	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	88,83	14,58	8,33	11,45	1,55E-01
88	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	89,52	14,47	8,26	11,37	1,56E-01
89	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	90,17	14,37	8,20	11,28	1,56E-01

90	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	90,85	14,26	8,14	11,20	1,57E-01
91	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	91,49	14,16	8,08	11,12	1,58E-01
92	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	92,16	14,06	8,03	11,04	1,59E-01
93	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	92,79	13,96	7,97	10,97	1,59E-01
94	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	93,46	13,86	7,91	10,89	1,60E-01
95	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	94,09	13,77	7,86	10,81	1,61E-01
96	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	94,74	13,67	7,81	10,74	1,62E-01
97	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	95,35	13,59	7,76	10,67	1,62E-01
98	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	95,99	13,49	7,70	10,60	1,63E-01
99	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	96,83	13,38	7,64	10,51	1,64E-01
100	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	98,52	13,15	7,51	10,33	1,65E-01
101	0+-30	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	96,95	13,36	7,63	10,49	1,65E-01
102	90+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	347,6	3,73	2,13	2,93	1,66E-01

Tabelle 37: Auswertung Laminatvariante 6

Schicht	Orientierung	φ_{Faser}	Material	σ_v^+	σ_v^-	σ_{max}	S_{Zug}	S_{Druck}	$S_{\text{gemittelt}}$	Δz_{max}
-	°	%	-	Mpa	Mpa	Mpa	-	-	-	mm
1	90+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	224,8	5,76	3,29	4,53	1,38E-01
2	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	58,34	22,20	12,68	17,44	1,37E-01
3	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	59,31	21,84	12,47	17,16	1,37E-01
4	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	60,08	21,56	12,31	16,94	1,36E-01
5	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	59,57	21,75	12,42	17,08	1,35E-01
6	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	59,44	21,79	12,44	17,12	1,34E-01
7	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	58,56	22,12	12,63	17,37	1,33E-01
8	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	57,81	22,41	12,79	17,60	1,32E-01
9	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	57,64	22,47	12,83	17,65	1,31E-01
10	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	57,62	22,48	12,84	17,66	1,29E-01
11	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	57,33	22,59	12,90	17,75	1,28E-01
12	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	57,33	22,59	12,90	17,75	1,27E-01
13	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	56,9	22,77	13,00	17,88	1,25E-01
14	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	57,04	22,71	12,97	17,84	1,24E-01
15	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	56,28	23,02	13,14	18,08	1,22E-01
16	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	57,09	22,69	12,95	17,82	1,20E-01
17	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	54,68	23,69	13,53	18,61	1,18E-01
18	90+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	167,8	7,72	4,41	6,06	1,16E-01
19	0+-30	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	204,2	8,81	10,03	9,42	1,13E-01
20	0+-30	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	204,5	8,79	10,02	9,41	1,11E-01
21	0+-30	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	205,3	8,76	9,98	9,37	1,09E-01
22	0+-30	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	206,4	8,71	9,92	9,32	1,07E-01
23	0+-30	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	206,9	8,69	9,90	9,30	1,06E-01
24	0+-30	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	207,3	8,68	9,88	9,28	1,05E-01
25	0+-30	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	207,4	8,67	9,88	9,27	1,04E-01
26	0+-30	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	207,2	8,68	9,89	9,28	1,03E-01
27	0+-30	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	206,8	8,70	9,91	9,30	1,02E-01
28	0+-30	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	206,1	8,73	9,94	9,33	1,01E-01

29	0+-30	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	205,5	8,75	9,97	9,36	9,98E-02
30	0+-30	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	204,3	8,80	10,03	9,42	9,90E-02
31	0+-30	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	203,1	8,86	10,09	9,47	9,82E-02
32	0+-30	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	210,6	8,54	9,73	9,13	9,75E-02
33	0+-30	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	200,4	8,97	10,22	9,60	9,69E-02
34	0+-30	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	198,8	9,05	10,30	9,68	9,62E-02
35	0+-30	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	197,2	9,12	10,39	9,75	9,57E-02
36	0+-30	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	195,3	9,21	10,49	9,85	9,51E-02
37	0+-30	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	193,3	9,30	10,60	9,95	9,46E-02
38	0+-30	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	191,7	9,38	10,69	10,03	9,42E-02
39	0+-30	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	189,8	9,48	10,79	10,13	9,37E-02
40	0+-30	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	187,9	9,57	10,90	10,24	9,34E-02
41	0+-30	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	185,9	9,67	11,02	10,35	9,31E-02
42	0+-30	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	183,7	9,79	11,15	10,47	9,28E-02
43	0+-30	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	181,7	9,90	11,27	10,59	9,26E-02
44	0+-30	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	179,4	10,03	11,42	10,72	9,24E-02
45	0+-30	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	177,5	10,13	11,54	10,84	9,24E-02
46	0+-30	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	174,9	10,28	11,71	11,00	9,26E-02
47	0+-30	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	173,6	10,36	11,80	11,08	9,29E-02
48	0+-30	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	171,5	10,49	11,94	11,22	9,39E-02
49	90+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	161,8	8,01	4,57	6,29	9,55E-02
50	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	92,08	14,07	8,03	11,05	9,64E-02
51	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	79,19	16,36	9,34	12,85	9,69E-02
52	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	128	10,12	5,78	7,95	9,72E-02
53	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	172,9	7,49	4,28	5,88	9,73E-02
54	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	197,3	6,57	3,75	5,16	9,73E-02
55	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	187,4	6,91	3,95	5,43	9,73E-02
56	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	161,1	8,04	4,59	6,32	9,70E-02
57	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	149,3	8,68	4,95	6,81	9,68E-02
58	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	133,4	9,71	5,54	7,63	9,63E-02
59	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	118,8	10,90	6,23	8,56	9,58E-02
60	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	98,29	13,18	7,52	10,35	9,51E-02
61	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	147,3	8,79	5,02	6,91	9,43E-02
62	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	94,86	13,66	7,80	10,73	9,34E-02
63	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	82,59	15,68	8,95	12,32	9,23E-02
64	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	101,7	12,74	7,27	10,00	9,11E-02
65	0+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	103,7	12,49	7,13	9,81	8,96E-02
66	90+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	169,5	7,64	4,36	6,00	8,76E-02
67	0+-30	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	203,8	8,82	10,05	9,44	8,51E-02
68	0+-30	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	227,2	7,92	9,02	8,47	8,30E-02
69	0+-30	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	160,4	11,21	12,77	11,99	8,17E-02
70	0+-30	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	160,4	11,21	12,77	11,99	8,04E-02
71	0+-30	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	159,7	11,26	12,83	12,04	7,93E-02
72	0+-30	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	171,9	10,46	11,92	11,19	7,83E-02
73	0+-30	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	158,2	11,37	12,95	12,16	7,74E-02
74	0+-30	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	163	11,03	12,57	11,80	7,65E-02

75	0+-30	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	156	11,53	13,13	12,33	7,57E-02
76	0+-30	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	154,6	11,63	13,25	12,44	7,48E-02
77	0+-30	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	153	11,76	13,39	12,57	7,41E-02
78	0+-30	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	151,3	11,89	13,54	12,71	7,33E-02
79	0+-30	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	149,6	12,02	13,69	12,86	7,26E-02
80	0+-30	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	147,7	12,18	13,87	13,02	7,19E-02
81	0+-30	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	145,7	12,34	14,06	13,20	7,12E-02
82	0+-30	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	143,7	12,52	14,26	13,39	7,05E-02
83	0+-30	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	141,6	12,70	14,47	13,58	6,98E-02
84	0+-30	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	139,4	12,90	14,69	13,80	6,91E-02
85	0+-30	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	137,2	13,11	14,93	14,02	6,85E-02
86	0+-30	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	135	13,32	15,17	14,25	6,78E-02
87	0+-30	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	132,7	13,55	15,44	14,50	6,72E-02
88	0+-30	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	130,4	13,79	15,71	14,75	6,57E-02
89	0+-30	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	128	14,05	16,00	15,03	6,59E-02
90	0+-30	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	125,6	14,32	16,31	15,31	6,53E-02
91	0+-30	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	123	14,62	16,65	15,64	6,47E-02
92	0+-30	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	120,5	14,93	17,00	15,96	6,41E-02
93	0+-30	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	117,7	15,28	17,40	16,34	6,35E-02
94	0+-30	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	114,9	15,65	17,83	16,74	6,29E-02
95	0+-30	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	111,8	16,09	18,32	17,20	6,23E-02
96	0+-30	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	108,6	16,56	18,86	17,71	6,17E-02
97	0+-30	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	104,9	17,15	19,53	18,34	6,12E-02
98	0+-30	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	101	17,81	20,28	19,04	6,06E-02
99	0+-30	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	96,08	18,72	21,32	20,02	6,01E-02
100	0+-30	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	95,05	18,92	21,55	20,24	5,96E-02
101	0+-30	51,6/24,2	C-Faser	1.799	2.048	90,67	19,84	22,59	21,21	5,91E-02
102	90+-45	51,6/24,2	E-Glas	1.295	740	100,2	12,93	7,38	10,15	5,94E-02

Tabelle 38: Auswertung Laminatvariante 7

Erklärung

hiermit versichere ich, Andreas Julian Wendy, dass ich die vorliegende Bachelorthesis mit dem Thema „Auslegung eines Hybrid-Laminat-Blattanschlusses einer Windenergieanlage in Bezug auf Steifigkeit und Festigkeit mittels FEM,, ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

Hamburg, 14.09.2011

.....
Ort, Datum

.....
Unterschrift