

POTENTIALE VON FASERVERBUND- WERKSTOFFEN FÜR DEN EINSATZ ALS ROTORKAPPENWERKSTOFF IN TURBOGENERATOREN

Diplomarbeit

von

Robert ENDLWEBER, BSc

erstellt an der

Polymer Competence Center Leoben GmbH

eingereicht am

Lehrstuhl für Werkstoffkunde und -Prüfung der Kunststoffe
an der Montanuniversität Leoben



Betreuung: Dipl.–Ing. Dr.mont. Markus Wolfahrt

Begutachtung: Univ.-Prof. Dipl.–Ing. Dr.mont. Gerald Pinter

Leoben, März 2011

EIDESSTÄTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Diplomarbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Leoben, März 2011

DANKSAGUNG

Die aktuelle Diplomarbeit wurde an der Polymer Competence Center Leoben GmbH (PCCL, Leoben, A) in Zusammenarbeit mit der Fa. Andritz Hydro AG (Weiz, A) durchgeführt.

Mein Dank richtet sich in erster Linie an Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Gerald Pinter (Lehrstuhl für Werkstoffkunde und –Prüfung der Kunststoffe, Montanuniversität Leoben, Leoben, A), der das Zustandekommen dieser Diplomarbeit erst ermöglicht hat. Weiters möchte ich mich an dieser Stelle für seine Begutachtung sowie seiner beratenden Hilfestellung während der Arbeit bedanken.

Bei meinem Betreuer Dipl.-Ing. Dr. mont. Markus Wolfahrt (Polymer Competence Center Leoben GmbH, Leoben, A) möchte ich mich u.a. für die vielen Stunden bedanken, in denen er mir fachlich zur Seite gestanden ist und in denen er dank seiner Erfahrung an einem strukturierten Projektvorgang maßgeblich beteiligt war. Natürlich bedanke ich mich bei ihm auch für die Korrektur meiner Arbeit.

Danken möchte ich überdies der Fa Andritz Hydro AG (Weiz, A), insbesondere Herrn Dipl.-Ing. David Lerchbaum, für die Zusammenarbeit sowie für die Bereitstellung des Projekts. Bei Herrn Erich Pamminger (Fa. FACC, Ort im Innkreis, A) bedanke ich mich dafür, dass er sowohl in Projektbesprechungen als auch in einigen Telefonaten ein wichtiger fachlicher Ansprechpartner war. Hervorheben möchte ich an dieser Stelle auch das gute Klima am PCCL sowie die sehr engagierte Zusammenarbeit seitens der Mitarbeiter der Universitätsbibliothek.

Besonders bedanke ich mich bei meinen Eltern und Großeltern, die während meiner gesamten Studienzeit ein großer Rückhalt waren und die mir zu jeder Zeit viel Vertrauen und Zuversicht entgegengebracht haben.

KURZFASSUNG

Rotorendkappen sind eine Baugruppe bei elektrischen Generatoren und werden eingesetzt, um die Kupferspulen im beweglichen Rotor gegen auftretende Zentrifugalkräfte abzusichern. Obwohl aufgrund der hohen Drehzahlen und der damit verbundenen Fliehkräfte hohe gewichtsspezifische mechanische Eigenschaften von Vorteil sind, kam es bisher zum Einsatz von metallischen Werkstoffen als Rotorendkappenmaterial. Diese besitzen vergleichsweise geringe gewichtsspezifische Festigkeiten und führen zu einer hohen Eigenbeanspruchungen der Rotorendkappe, die mit zunehmender Rotorendkappengröße ansteigt und bei 1092 mm einen kritischen Wert erreicht. Eine Realisierung größerer Dimensionen ist nur mit Werkstoffen möglich, die größere gewichtsspezifische mechanische Eigenschaften aufweisen können, wie dies beispielsweise bei Faserverbundwerkstoffen der Fall ist.

Aufgabe dieser Arbeit war es nun die Eignung von Faserverbundwerkstoffen als potentiell Rotorkappenmaterial für Turbogeneratoren auf der Basis von Literatur-recherchen in Zusammenarbeit mit der Fa. Andritz Hydro AG (Weiz, A) zu untersuchen. Unter Berücksichtigung der im Lastenheft definierten mechanischen und physikalischen Anforderungen an die Rotorendkappe wurde zunächst eine umfassende Literaturstudie durchgeführt. Unter Einbeziehung der Ergebnisse der Literaturstudie sowie anhand erster rechnerischer Auslegungen der Rotorkappe konnte die grundsätzliche Eignung von kohlenstofffaser-verstärkten Epoxidharzen für den aktuellen Anwendungsfall festgestellt werden.

ABSTRACT

Retaining rings are an assembly of electric generators and find their application in supporting the copper coils against centrifugal forces. Even though the high rotational speed and the involved centrifugal forces would favor materials with high weight specific properties, metallic alloys are in use so far. These materials exhibit comparatively lower specific properties and cause a higher self loading of the retaining ring, which increases linearly with increasing size of the retaining ring. Hereby a diameter of 1092 mm is the critical level, and a realization of bigger dimensions is just possible by using materials with higher weight specific properties, such as fiber reinforced materials.

The aim of the current work was to explore the applicability of fiber reinforced materials in a retaining ring application for turbo generators based on literature researches in cooperation with Andritz Hydro AG (Weiz, A). Considering, defined in the technical specification, mechanical and physical requirements for the retaining ring, a widespread literature research was performed. Including the findings from the literature as well as first calculations concerning dimensioning a principal applicability of fiber reinforced epoxy resins for the existing application was found.

INHALTSVERZEICHNIS

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG.....	II
DANKSAGUNG.....	III
KURZFASSUNG.....	IV
ABSTRACT.....	V
INHALTSVERZEICHNIS.....	VI
SYMBOLE UND ABKÜRZUNGEN.....	VIII
ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	X
1	EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG..... 1
2	GRUNDLAGEN..... 3
2.1	SYNCHRONMASCHINEN..... 3
2.2	WESENTLICHE BAUGRUPPENELEMENTE VON TURBOGENERATOREN..... 5
2.3	AUFBAU VON FASERVERBUNDWERKSTOFFEN..... 8
2.3.1	FASERARTEN..... 10
2.3.2	DUROMERE MATRIXWERKSTOFFE..... 14
2.4	EIGENSCHAFTEN VON FASERVERBUNDWERKSTOFFEN 20
2.4.1	MECHANISCHE EIGENSCHAFTEN VON FASERVERBUNDWERKSTOFFEN 21
2.4.2	THERMO-MECHANISCHE EIGENSCHAFTEN VON FASERVERBUND-WERKSTOFFEN..... 22
2.4.3	EINFLUSS VON FEUCHTE AUF DAS EIGENSCHAFTSPROFIL VON FASER-VERBUNDWERKSTOFFEN 23
2.4.4	ERMÜDUNGSEIGENSCHAFTEN VON FASERVERBUNDWERKSTOFFEN 25
3	STAND DER TECHNIK ÜBER DEN EINSATZ VON FVW ALS ROTORENDKAPPENWERKSTOFF..... 27
4	ANFORDERUNGSPROFIL AN DEN ROTOREND- KAPPENWERKSTOFF..... 33

5	EIGENSCHAFTEN VON DUROMEREN FASER-VERBUNDEN FÜR DEN EINSATZ ALS ROTOR-ENDKAPPENWERKSTOFF	38
5.1	MECHANISCHE EIGENSCHAFTEN VON FVW IM TROCKENEN WERKSTOFFZUSTAND.....	38
5.2	THERMISCHE EINSATZGRENZEN VON FASER/MATRIX VERBUNDEN IM TROCKENEN WERKSTOFFZUSTAND.....	40
5.3	FEUCHTIGKEITSAUFNAHMEVERHALTEN VON POLYMEREN MATRIX-MATERIALIEN	41
5.4	EINFLUSS VON FEUCHTWARMEN UMGEBUNGSBEDINGUNGEN AUF DIE FASERVERBUNDEIGENSCHAFTEN	43
5.5	BEURTEILUNG DER FVW ANHAND VON MATERIALKOSTEN...	46
5.6	EIGENSCHAFTEN VON FASERVERBUNDWERKSTOFFEN HINSICHTLICH ZYKLISCHER BELASTUNG.....	47
5.7	RECHNERISCHE AUSLEGUNG UND KOSTENASPEKTE	49
6	SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK.....	54
7	LITERATURVERZEICHNIS.....	57

SYMBOLS UND ABKÜRZUNGEN

Kurzform	Bedeutung
AFRP	Aramidfaserverstärkter Kunststoff
BMI	Bismaleimid
CFRP	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
DDS	Diaminophenylsulfon
EP	Epoxidharz
FEM	Finite Elemente Methoden
FRP	Faserverstärkter Kunststoff
FVV	Faserverbundwerkstoff
GFRP	Glasfaserverstärkter Kunststoff
HST	High Strain and Tenacity
HT	High Tenacity
HM	High Modulus
IM	Intermediate Modulus
PAN	Polyacrylnitril
PEI	Polyesterimid
PF	Phenolformaldehyd
r.F.	relative Feuchtigkeit
T _g	Glasübergangstemperatur
TGDDM	4,4'-diamino-diphenyl methan
UD	unidirektional
UP	ungesättigter Polyester
VE	Vinylester
Vol.%	Volumsprozent
wt.%	Gewichtsprozent

Kurzform	Einheit	Bedeutung
$\zeta_{\text{Fliehkraft,Kappe}}$	MPa	Spannung aufgrund der Fliehkraft durch das Eigengewicht der Rotorkappe
$\zeta_{\text{Wickelkopf}}$	MPa	Spannung aufgrund der Fliehkraft des Wickelkopfes
ϵ_{abs}	[1]	absolute tangentielle Dehnung der Rotorkappe
$\zeta_{\text{tan,gesamt}}$	MPa	gesamte Tangentialspannung der Rotorkappe

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 2.1:	Prinzipdarstellung einer zweipoligen Vollpolmaschine (Dettmann, 1999)	4
Abb. 2.2:	Prinzipdarstellung einer vierpoligen Schenkelpolmaschine (Dettmann, 1999)	5
Abb. 2.3:	Konstruktionszeichnung eines 4-poligen Turbogenerators der Fa. Andritz Hydro AG, Weiz, A (Lerchbaum, 2009).....	6
Abb. 2.4:	Darstellung eines Läufers in einem 4-poligen Turbogenerator der Fa. Andritz Hydro AG (Lerchbaum, 2009).....	7
Abb. 2.5:	Auftretende Fliehkräfte bei einem 2-poligen bzw. einem 4-poligen Generator.....	7
Abb. 2.6:	Chemische Struktur (a) und REM-Aufnahme (b) von Glasfasern (Na...Natrium, K...Kalium, Ca...Calcium, O ₂ ...Sauerstoff, Si...Silizium (Ehrenstein, 2006).....	10
Abb. 2.7:	Ideale Graphitstruktur einer Kohlenstofffaser (Ehrenstein, 2006).....	12
Abb. 2.8:	Struktureller Aufbau der Aramidfaser (Ehrenstein, 2006).....	13
Abb. 2.9:	Chemische Reaktionsablauf bei der Herstellung einer Bisphenol-A und Epichlorhydrin basierenden Harzmasse (Flemming et al., 1995)	16
Abb. 2.10:	Chemische Prinzipdarstellung der Veresterung (Flemming et al., 1995)	17
Abb. 2.11:	Chemische Darstellung von Vinylester auf Epoxidbasis (Flemming et al., 1995)	18
Abb. 2.12:	Chemische Darstellung für die Herstellung von Novolaken (Flemming et al., 1995)	19
Abb. 2.13:	Chemische Darstellung für die Synthese von Bismaleimid (Flemming et al., 1995).	20
Abb. 2.14:	Modul- bzw. Festigkeitswerten von UD-FVW in Abhängigkeit zum Belastungswinkel α (Menges et al., 2002).....	22

Abb. 2.15:	Schematische Darstellung einer Speichermodul-Temperaturkurve zur Ermittlung der thermischen Einsatzgrenze (Wolfrum, 1999).....	23
Abb. 2.16:	Vergleichsdarstellung der Feuchtigkeitsaufnahme eines Reinharzes und des kohlenstofffaserverstärkten Verbundwerkstoffes bei einer Lagerung bei 70°C und 98% relativer Luftfeuchte (Flemming und Roth, 2003)	24
Abb. 2.17:	Gegenüberstellung der Ermüdungsfestigkeit von kohlenstoffglas- und aramidfaserverstärkten EP-Harz sowie des EP-Reinharzes bei Schwellbeanspruchung (Menges et al., 2002).....	26
Abb. 3.1:	Gegenüberstellung verschiedener Materialien hinsichtlich gewichts-bezogenen zulässigen Spannungswerten und deren Dichte, sowie maximal erreichbare Rotorkappendurchmesser (Meier et al., 1982).	28
Abb. 5.1:	Gegenüberstellung der Zugfestigkeitswerte verschiedener Faser/Matrix Kombinationen mit unidirektionalem bzw. biaxialem Lagenaufbau für unterschiedliche Faservolumsgehälter (Quelle: computerunterstützte Datenbankinformationen, Datenblattangaben des Herstellers)	39
Abb. 5.2:	Literaturdaten von Glasübergangstemperaturen verschiedener Matrixwerkstoffe im trockenen Werkstoffzustand (Ehrenstein, 2006, Catsman, 2005).....	41
Abb. 5.4:	Feuchtigkeitsaufnahme verschiedener polymerer Matrixmaterialien aufgrund einer Auslagerung bei 20 bzw. 23°C in Wasser (Oberbach, 2001, Karabahari, 2006, Chaplin et al., 1999)	42
Abb. 5.5	Feuchtigkeitsaufnahmeverhalten eines Epoxidharzmatrixwerkstoffes bei einer Auslagerung bei RT in Wasser sowie bei 70°C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 98% (Obermann, 2001, Ziegmann, 1984)	43
Abb. 5.3:	Gegenüberstellung der Materialkosten verschiedener Faser/Matrix Kombinationen mit unidirektionalem bzw. biaxialem Lagenaufbau für unterschiedliche Faservolumsgehälter (Quelle: computerunterstützte Datenbankinformationen)	47
Abb. 5.6	Gegenüberstellung der Ermüdungsfestigkeit bei Zugschwellbeanspruchung in Faserrichtung für 10 000 Zyklen und der Zugfestigkeit des monotonen Zugversuchs für kohlenstoff-, glas- und aramidfaserverstärkte Epoxidharzmaterialien sowie des Materials MAT_REF	49

Abb. 5.7:	Errechnete Sicherheit der Rotorendkappe bei vorgegebener Kappendicke für kohlenstoff-, glas- und aramidfaserverstärkte Epoxidharzverbunde sowie für das Material MAT_REF	52
Abb. 5.8:	Errechnete Materialkosten je Rotorendkappe bei vorgegebener Kappendicke für kohlenstoff-, glas- und aramidfaserverstärkte Epoxidharzverbunde	53
Abb. 5.9:	Errechnete Materialkosten je Rotorendkappe bei angepassten Wanddicken für eine Sicherheit von 2,5 für kohlenstoff-, glas- und aramidfaserverstärkte Epoxidharzverbunde	53

1 EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG

Turbogeneratoren, oder auch Vollpolmaschinen genannt, stellen eine Bauform der Synchronmaschinen dar, und sind somit eine spezielle Art von Generatoren. Je nach Bauform können Leistungen von bis zu 1200 Megawatt (MW), im Falle der 2-poligen Ausführungen, bzw. mittels 4-poligen Generatortypen 1700 MW erzeugt werden (Fischer, 2009). Das wesentliche Konstruktionsmerkmal ist die vergleichsweise hohe Drehzahl des Läufers (oder auch Rotor genannt) von 1800 U / min bei 2-poligen Generatoren bzw. 3600 U / min bei 4-poligen Generatoren, um in 50 Hz Stromversorgungsnetzen eingesetzt werden zu können (Fuest, 1989). Der Läufer stellt dabei im Generator den beweglichen Teil dar, und rotiert im sogenannten Stator (Spring, 1998). Die Kupferspulen, die für die Stromerzeugung benötigt werden, sind in Nuten des Rotors eingesetzt und müssen gegen die Fliehkräfte gesichert werden. Während dies am Rotorkörper durch entsprechende Keile realisiert werden kann, werden für die Endbereiche Rotorendkappen verwendet. Diese haben somit die Aufgabe eine Deformation von jenem Bereich der Kupferspulen zu vermeiden, der über den Rotorkörper herausragt. Dazu kommt es im Wesentlichen zu einer Beanspruchung durch die Fliehkräfte der Spulen sowie durch das Eigengewicht der Kappe. Die hohe Eigenbeanspruchung der Rotorendkappe durch den bisherigen Einsatz von metallischen Legierungen hatte zur Folge, dass die maximal realisierbaren Durchmesser der Endkappen auf 1092 mm beschränkt waren. Werkstoffe mit höheren gewichtsspezifischen mechanischen Eigenschaften wären diesbezüglich von Vorteil und würden den Bau von größeren Rotorendkappen ermöglichen.

Faserverstärkte Kunststoffe können die notwendige mechanische Anforderung an den Werkstoff im Generatorbau aufgrund ihrer günstigen spezifischen Eigenschaften erfüllen (Ehrenstein, 2006, Talreja und Manson, 2001). Der Lebenszyklus eines Generator erstreckt sich über 20 Jahre, so dass hier in Hinblick auf die langen Wartungsintervalle langfristige Aussagen über das Materialverhalten wichtig für eine Materialauswahl sind. Überlagert kommt es im konkreten Anwendungsfall zu einer Einwirkung elektromagnetischer Felder, potentiell aggressiver Anteile in der Atmosphäre, insbesondere Ozon, sowie zu

hohen thermischen Belastungen. Dabei hat nicht die Faser sondern die polymere Matrix einen wesentlichen Einfluß auf das Werkstoffverhalten.

Ziel der vorliegenden Arbeit war es daher, auf Basis einer umfassenden Literaturrecherche in Frage kommende faserverstärkte Verbundwerkstoffe zu evaluieren. Voraussetzung hierfür war die Erstellung eines Lastenheftes zu den mechanischen und physikalischen Anforderungen für die Rotorendkappe, welches einen wesentlichen Punkt für eine adäquate Werkstoffauswahl darstellt. Auf Basis von Literaturdaten wurde für ausgewählte Faser/Matrix-Kombinationen unter Berücksichtigung der geometrischen Randbedingungen die Sicherheit der Rotorendkappe unter Einsatz der jeweiligen Materialien aufgrund von mechanischen Berechnungen ermittelt und in Hinblick auf eine geforderte Mindestsicherheit eine Optimierung der Bauteildicke durchgeführt. Des weiteren wurde eine Kalkulation der Materialkosten für den möglichen Bau der Rotorendkappen vorgenommen.

2 GRUNDLAGEN

2.1 Synchronmaschinen

Die Synchronmaschine steht als Überbegriff für jene elektrische Einheit, die in Energieversorgungsnetzen mechanische Energie einer Turbine in elektrische Energie umwandelt (Spring, 1998). Dabei findet sie bei sehr großen Leistungen ihren größten Einsatzbereich. Je nach Bauform des Generators kann dieser von einigen 100 Megawatt, wie z.B. in Elektrizitätskraftwerken der öffentlichen Stromversorgung, bis zu 1,7 Gigawatt bei Kernkraftanwendungen variieren (Ose, 1999). Bedingt durch ihre konstruktive Lösung jener Komponente, die für die Erzeugung des Erregergleichfeldes verantwortlich ist, unterscheidet man zwei Bauformen der Synchronmaschine (Schröder, 2000).

Die **Vollpolmaschine**, oder auch Turbogenerator genannt, erhält ihren Namen durch die massive Ausführung ihres Läufers (Schröder, 2000). Prinzipiell ist ein Läufer ein sich drehender Magnet, welcher dauer- oder fremderregt sein kann. Im Falle der Vollpolmaschine entspricht dies einer massiven Stahlwalze, in die in axialer Richtung Nuten für die drei Erregerwicklungen eingefräst sind (Spring, 1998). Der Läufer mit seinen dazugehörigen Erregerwicklungen rotiert im Ständer. Dieser ist jene starre Komponente in der die Drehstromwicklungen untergebracht sind, die für das Drehfeld im Generator benötigt werden (Fischer, 2009). Um elektrische Verluste zu minimieren wird der Ständer aus dünnen Elektroblechen hergestellt (Aschenbrenner und Weiß, 2006). Turbogeneratoren werden als 2-polige und 4-polige Generatoren in Wärmekraftwerken eingesetzt, wobei die 2-polige Variante Leistungen von ca. 1200 MW bei 50 Hz und 21 kV Spannung liefert. Im Vergleich dazu sind im Falle des 4-poligen Generators mit ca. 1700 MW und 27 kV sogar noch höhere Leistungen als bei 2-poligen Typen üblich (Fischer, 2009). Eine Anwendung im 50 Hz Netz führt zu hohen Drehzahlen des Läufers. Im Falle der zweipoligen Maschine werden dabei Drehzahlen von bis zu 3000 U/min im Normalbetrieb erreicht (Vogt, 1996). Durch die hohen Drehzahlen, und den damit verbundenen hohen Fliehkräften, sind die Durchmesser der Läufer bei 2 poligen Generatoren auf 1,28 m begrenzt. Um trotzdem hohe Leistungen

garantieren zu können, kommt es daher oft zu konstruktiven Lösungen mit geringen Durchmessern und großen axialen Längen, die bis zu 9 m erreichen können (Fischer, 2009). Abbildung 2.1 stellt ein prinzipielles Schnittbild einer zweipoligen Vollpolmaschine dar. Der zylindrische Innenteil symbolisiert den Läufer mit der Erregerwicklung. U1, V1 und W1 sowie U2, V2 und W2 sind Bestandteile der Ständerwicklung, die sich im starren Ständer befindet.

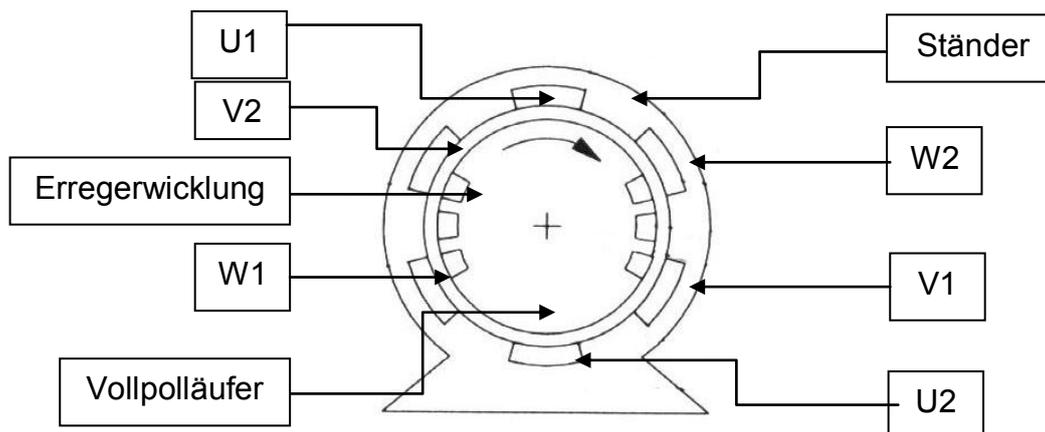


Abb. 2.1: Prinzipdarstellung einer zweipoligen Vollpolmaschine (Dettmann, 1999)

Schenkelpolmaschinen bilden die zweite Gruppe der Synchronmaschinen und sind für Anwendungen bei niedrigeren Drehzahlen vorgesehen. Dadurch ergeben sich geringere Fliehkräfte und es können Bauformen mit größeren Läuferdurchmessern von über 15 m bei geringeren axialen Längen realisiert werden. Auf diese Weise lassen sich maximale Einzelleistungen von mehr als 800 MW erreichen (Fischer, 2009). Mit einer erhöhten Anzahl an Polpaaren wird weiters bewirkt, dass trotz der geringen Drehzahlen, die für die Einspeisung in das Stromnetz benötigten 50 Hz sichergestellt werden können (Vogt, 1996). Konstruktiv unterscheidet sich die Schenkelpolmaschine zur Vollpolmaschine über die Läuferausführung, wie in Abb. 2.2 ersichtlich ist. Die Ständer sind bei beiden Arten der Synchronmaschine gleich aufgebaut (Schröder, 2000).

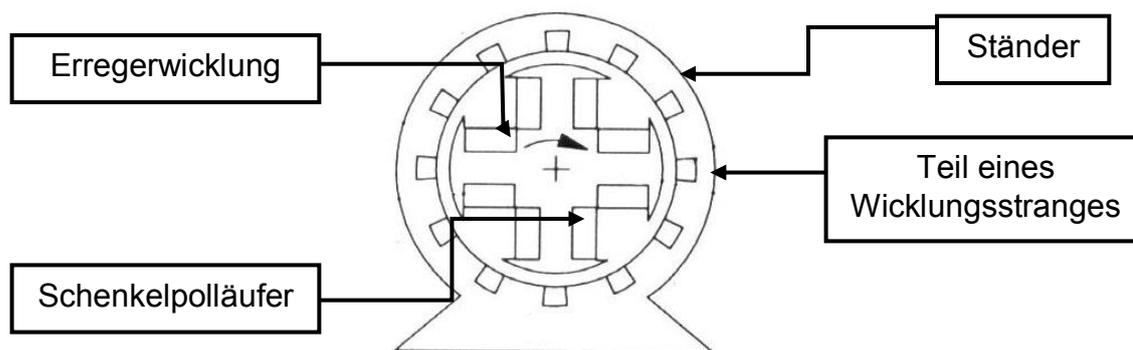


Abb. 2.2: Prinzipdarstellung einer vierpoligen Schenkelpolmaschine (Dettmann, 1999)

2.2 Wesentliche Baugruppenelemente von Turbogeneratoren

Im Folgenden wird der Fokus auf 4-polige Turbogeneratoren gelegt, da diese Generatorform den konkreten Anwendungsfall für die laufende Diplomarbeit darstellt. In Abb. 2.3 ist eine dreidimensionale Konstruktionszeichnung eines 4-poligen Turbogenerators mit einem Leistungsbereich von kleiner 10 MW der Fa. Andritz Hydro AG (Weiz, A) dargestellt. Die roten Windungen stellen die Erregerwicklungen dar. Diese sind im Bereich des Läufers in den dafür vorgesehenen Nuten geführt und über entsprechende Keile gegen radial gerichtete Kräfte gesichert. An beiden Enden verlassen sie jedoch die Führungsnuten, und werden in diesen Bereichen als „End Turns“ bezeichnet, wie in Abb. 2.3 Detail 1 gezeigt. Diese sogenannten End-Turns wären demnach in radiale Richtung nicht gesichert und würden, bedingt durch die hohen Fliehkräfte, hohen Belastungen ausgesetzt. Um dies zu verhindern wird der Wickelkopf bei der Endmontage durch unmagnetische Rotor- bzw. Läuferkappen abgedeckt (siehe Detail 2 in Abb. 2.3).

In Abb. 2.4 sind die Bauelemente eines Läufers für einen 4-poligen Turbogenerator mit einem Leistungsbereich von größer 10 MW dargestellt (Lerchbaum, 2009). Die Rotorkappen, hier als orange Ringe erkennbar, sind in dieser Darstellung bereits über die End Turns der Erregerwicklung geschoben und mittels Schrumpferbindung am sogenannten „Centerring“ verbunden. Der Centerring ist ein ringförmiges Bauelement, welches starr mit der Welle verbunden ist, und hat u.a. die Aufgabe eine axiale Bewegung der Rotorendkappe zu verhindern.

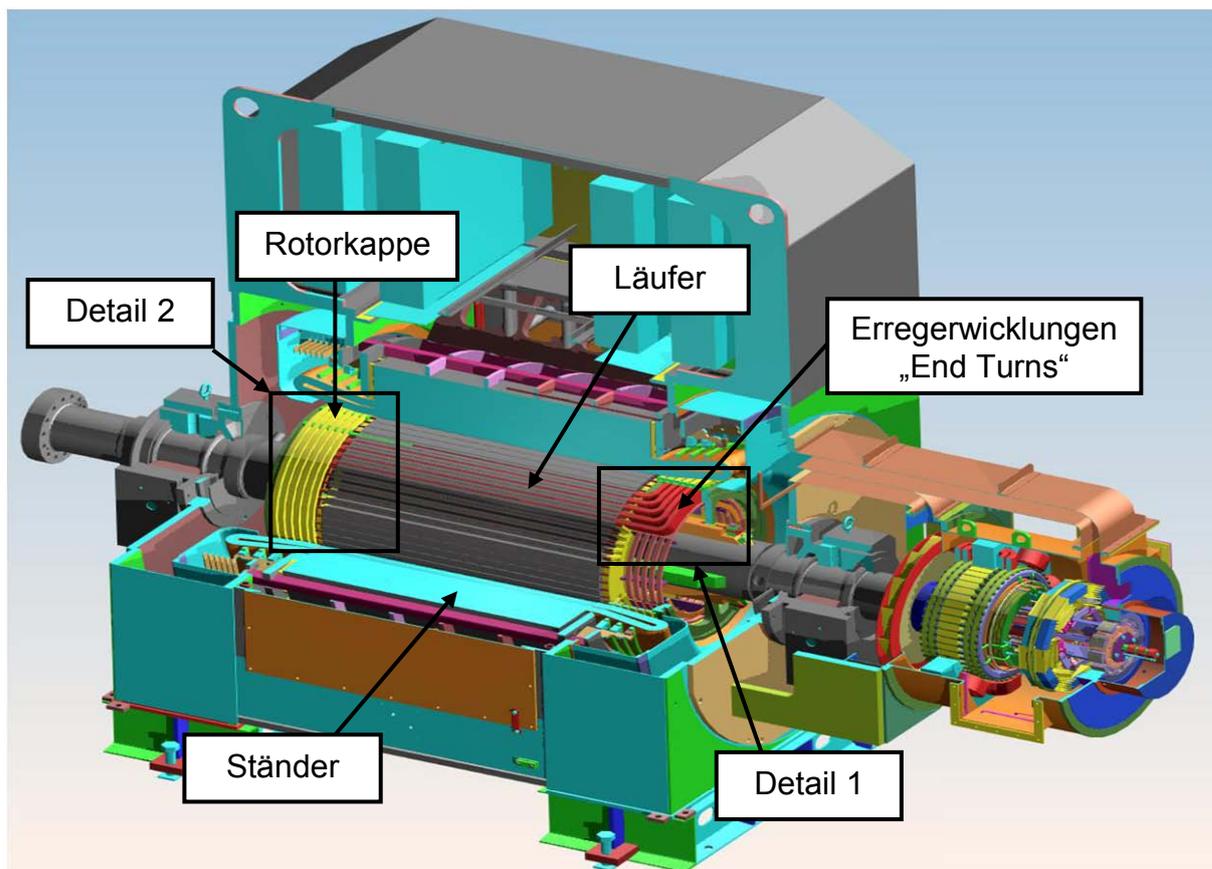


Abb. 2.3: Konstruktionszeichnung eines 4-poligen Turbogenerators der Fa. Andritz Hydro AG, Weiz, A (Lerchbaum, 2009)

Im Einsatz wird die Rotorendkappe, wie bereits erwähnt, hauptsächlich durch Fliehkräfte mechanisch beansprucht. Wie in Abb. 2.5a gezeigt überlagern sich die Kräfte, die durch das Eigengewicht entstehen, bzw. die durch die End Turns verursacht werden. Durch eine regelmäßige Anordnung der Erregerwicklungen wird die Rotorkappe von 4-poligen Generatoren gleichmäßig beansprucht (s. Abb. 2.5b). Im Gegensatz dazu ist bei einer 2-poligen Generatorausführung eine symmetrische Belastung nicht möglich. Dies kann zu weit komplexeren Belastungsszenarien führen, da sich durch diese asymmetrische Belastung eine ovale Verformung der Rotorkappe ergeben kann. Bedingt durch Querkontraktionseffekte kann es folglich zu zusätzlichen Axialkräften kommen (Meier et al., 1982). Neben der Aufgabe des Centerringes eine axiale Bewegung der Rotorendkappe zu verhindern, kann dieser im Falle der 2-poligen Generatoren auch dahingehend verwendet werden, um Ovalisierungseffekten der Rotorkappe entgegenzuwirken.

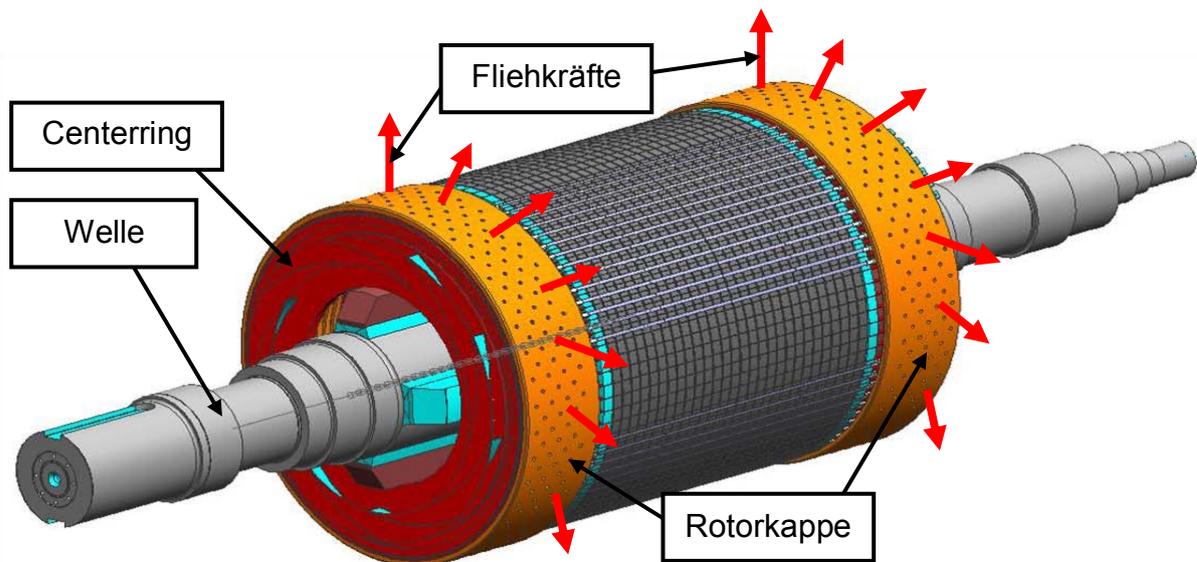


Abb. 2.4: Darstellung eines Läufers in einem 4-poligen Turbogenerator der Fa. Andritz Hydro AG (Lerchbaum, 2009)

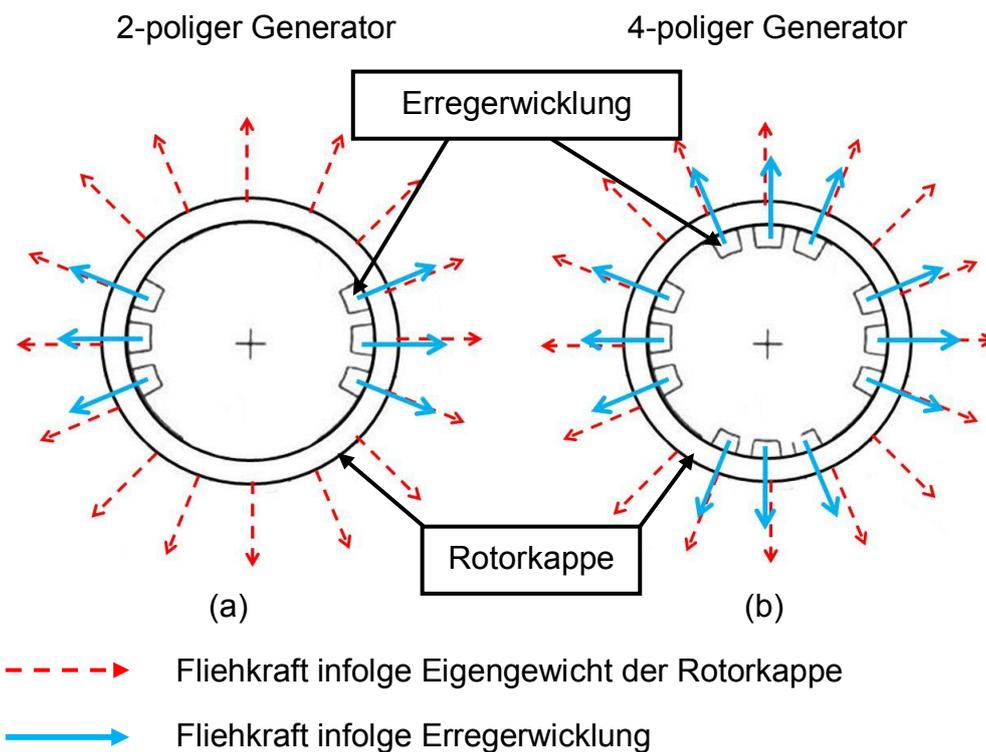


Abb. 2.5: Auftretende Fliehkräfte bei einem 2-poligen bzw. einem 4-poligen Generator

2.3 Aufbau von Faserverbundwerkstoffen

Faserverbundwerkstoffe (FVW) sind Werkstoffe, bei denen durch eine Kombination von mehreren Komponenten eine Ergänzung bzw. Optimierung von unterschiedlichen Materialeigenschaften ermöglicht wird. Generell werden die Eigenschaften von FVW durch die Verstärkungsfaser, die polymere Matrix sowie durch die Faser-Matrix-Grenzschicht bestimmt (Flemming und Roth, 2003). Durch Variation der Komponenten lassen sich eine große Anzahl an Faserverbundwerkstoffkombinationen herstellen, die sich in Ihren Eigenschaften teilweise stark voneinander unterscheiden können.

Was die Verstärkungsfaser anbetrifft, kann eine Gliederung hinsichtlich eingesetzter Faserlänge sowie Fasermaterial vorgenommen werden. So unterscheidet man grob FVW, die mit endlichen Einzelfasern mit einer Faserlänge von 0,1 – 5 mm (Kurzfaserverstärkung) bzw. mit unendlichen Fasern (Langfaserverstärkung) verstärkt werden (Ehrenstein, 2006). Die Verteilung der Verstärkungsfaser hat ebenfalls einen wesentlichen Einfluss auf die Eigenschaften eines FVW. Hierbei differenziert man zwischen einer statistischen Verteilung sowie einer gerichteten Anordnung. Statistische Faserverteilungen werden bei Faserlängen im Bereich von 1 bis 2 mm, sowie bei Fasermatten, die aus 5 bis 6 cm langen Fasern aufgebaut sind, angewendet. Fasern werden gerichtet angeordnet, wenn Endlosfasern, Endlosfaserstränge oder Fasergewebe eingesetzt werden (Janda, 1990). Die Materialien der Verstärkungsfaser kann man in folgende Gruppen einteilen (Ehrenstein, 2006):

- natürliche organische Fasern (z.B.: Jute, Sisal)
- natürliche anorganische Fasern auf mineralischer Basis
- synthetische organische Fasern (z.B.: Aramidfaser, Polyethylenfaser)
- synthetische anorganische Fasern (z.B.: Glasfaser, Kohlenstofffaser, Borfaser)

Im Hinblick auf den konkreten Anwendungsfall wird der Fokus auf gerichtet angeordnete, synthetische organische sowie synthetisch anorganische Endlosfasern gelegt. Im Speziellen sind damit Kohlenstoff-, Glas- und Aramidfasern gemeint, die derzeit in Hochleistungsverbundwerkstoffen ihre Anwendung finden (Wolfrum, 1999).

Polymere Matrixsysteme werden diejenige Komponente eines FVW genannt, in denen die Verstärkungsfasern eingebettet sind (Wolfrum, 1999). Im Beanspruchungsfall werden Kräfte über die Matrix in die Fasern eingeleitet sowie Kräfte zwischen den Fasern übergeleitet. Weiters wird durch die Matrix die geometrische Lage der Fasern im Faserverbund fixiert. Dadurch, dass im FVW die Verstärkungsfasern von der Matrix eingeschlossen sind, ergibt sich überdies eine Schutzfunktion vor Umgebungseinflüssen (Ehrenstein, 2006). Für FVW sind thermoplastische und duromere Matrixsysteme gebräuchlich, wobei Thermoplaste ihren Einsatz finden, wenn es gilt, die Bruchzähigkeit des FVW zu erhöhen sowie die chemischen Prozesse bei der Duromerverarbeitung zu umgehen. Sie werden u.a. im Spritzgussprozess für die Herstellung kostengünstiger, kurzglasfaser-verstärkter Bauteile verwendet (Zahnt, 2003). In polymeren Hochleistungsverbundwerkstoffen werden jedoch hauptsächlich Duromermatrixen eingesetzt (Wolfrum, 1999). Bei ihnen kommt es im Zuge des Herstellungsprozesses zu einer Härtung des Ausgangsproduktes, wobei je nach Bildungsreaktion der polymeren Makromoleküle eine weitere Einteilung in Polymerisate (z.B. ungesättigte Polyesterharze), Polykondensate (z.B. Phenolformaldehydharze) und Polyaddukte (z.B. Epoxidharze) vorgenommen werden kann (Flemming et al, 1995, Ehrenstein und Bittermann, 1997). Meist besitzen Harzsysteme, die, so wie die Polymerisate, mittels Additionsreaktion hergestellt wurden bessere thermische oder mechanische Eigenschaften, als jene, bei denen der Härtungsprozess durch eine radikalische Polymerisation erzielt wurde (Ehrenstein, 2006). In der aktuellen Diplomarbeit wurde der Fokus auf duromere Systeme, im Speziellen auf Epoxidharze, ungesättigte Polyesterharze, Vinylesterharze, Phenolformaldehydharze, sowie auf Polyimidharze und Bismaleimidharze, gelegt.

Die Schlichte, oder auch „Finish“ bzw. „Sizing“ genannt wird bei manchen Fasertypen angewendet (Elias, 2003). Durch deren Einsatz soll der chemische Kupplungs-effekt zwischen Fasern und Matrix erhöht, und somit die Haftung beider Komponenten verbessert werden (Heißler, 1986). Weiters hat die Schlichte eine Schutzfunktion, wodurch die teilweise empfindlichen Fasern u.a. bei der Verarbeitung geschützt werden (Wolfrum, 1999, Heißler, 1986).

2.3.1 Faserarten

Glasfasern fanden als erste Verstärkungsfaser eine breite Anwendung. Generell erfolgt die Herstellung über einen Schmelzvorgang von Quarzsand, Kalkstein, Kaolin, Dolomit, Borsäure und Flußspat. Die entstandene Schmelze wird durch Düsen gezogen, kontrolliert abgekühlt nach einem Verstreckungsvorgang zu Rovings zusammengefaßt (Ziegmann, 2007, Elias, 2003). Den Grundbaustein aller Glasfaserarten bildet Siliziumoxid. Dieses bewirkt durch den Anteil an kovalenten Bindungen zwischen Silizium und Sauerstoff relativ hohe Festigkeits- und E-Modulwerte. Die atomare Ausrichtung zu einem dreidimensionalen Netzwerk mit amorpher Struktur führt bei Glasfasern zu isotropen Eigenschaften (Ehrenstein, 2006, Wolfrum, 1999). In Abb. 2.6 a und b wird die chemische Struktur sowie eine Rasterelektronenmikroskop (REM)-Aufnahme der Glasfaser dargestellt. Der Einsatz von Metalloxiden und anderen Zuschlagstoffen ermöglicht bei der Herstellung eine starke Variation des Eigenschaftsspektrums, wodurch unterschiedlichste Glasfasertypen ermöglicht werden können (Ehrenstein, 2006, Flemming et al, 1995). Die Standardglasfaser ist mit einem Marktanteil von ca. 90% die E-Glasfaser, oder auch „electric“-Glasfaser. Die R- und S-Glasfasern (R steht für „Résistance“ und S für „strength“) besitzen eine höhere Festigkeit als E-Glas. C-Glas (C entspricht dem englischen Wort „chemical“) wurden für den chemischen Einsatz konzipiert (Ehrenstein, 2006, Flemming et al, 1995, Ziegmann, 2007, Elias, 2003).

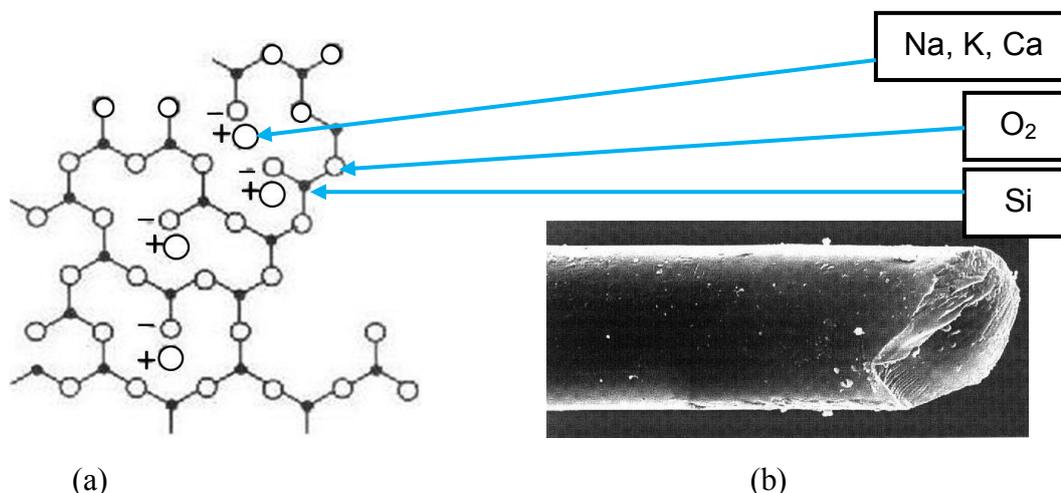


Abb. 2.6: Chemische Struktur (a) und REM-Aufnahme (b) von Glasfasern (Na...Natrium, K...Kalium, Ca...Calcium, O₂...Sauerstoff, Si...Silizium (Ehrenstein, 2006)

Kohlenstofffasern werden in Anwendungen eingesetzt bei denen eine höhere Steifigkeit und Festigkeit erforderlich ist als bei Glasfaseranwendungsfällen (Flemming et al., 1995, Wolfrum, 1999). Beim Herstellungsverfahren von qualitativ hochwertigen Kohlenstofffasern wird Polyacrylnitril (PAN) im ersten Schritt zu einem Precursor gereckt (Flemming et al., 1995, Elias, 2003). Dadurch wird eine hohe Orientierung der Moleküle entlang der Faserachse gewährleistet. Unter mechanischer Spannung und erhöhter Temperatur erfolgt eine Stabilisierungsbehandlung an Luft. Das PAN dehydriert und wird in ein Leiterpolymer umgewandelt (Ehrenstein, 2006). Der zweite Schritt besteht in einem Umlagerungsprozess des Leiterpolymers zu graphitischen Schichten bei Temperaturen von bis zu 1600°C unter Inertgasatmosphäre (Elias, 2003, Wörndle, 2008). Die auf diese Weise hergestellten HT- (High Tenacity) Kohlenstofffasern können Festigkeitswerte von über 5000 MPa erreichen (Wörndle, 2008). Durch eine zusätzliche Wärmebehandlung bei 3000°C und einer weiteren Verstreckung wird die Graphitstruktur der HT-Faser umgewandelt. Durch diesen Vorgang werden hochmodulige HM- (High Modulus) Kohlenstofffasern hergestellt, bei denen E-Modulwerte von über 400 GPa bei, im Vergleich zu HT-Fasern, etwas geringeren Festigkeiten erreicht werden (Ziegmann, 2007). Weitere Entwicklungen der Kohlenstofffasern führen zu HST- (High Strain and Tenacity) Typen. Diese Faserarten können Bruchdehnungen von über 2% erreichen und wurden speziell für ein größeres Energieaufnahmevermögen konzipiert (Ziegmann, 1995, Ehrenstein, 2006). Einen Kompromiss zwischen HM- und HT-Typen stellen IM- (Intermediate Modulus) Fasern dar (Menges et al, 2002, Ehrenstein, 2006).

Generell führt die starke Ausrichtung der Kohlenstoffschichten zu einer starken Anisotropie (Ziegmann, 2007). So lässt sich, bedingt durch die kovalente Bindungsenergien des Graphiteinkristalls in Schichtrichtung, die hohe Festigkeit sowie der hohe E-Modul in Faserlängsrichtung erklären (Ehrenstein, 2006). Normal zur Faserlängsachse sind diese Werte, aufgrund der fehlenden kovalenten Bindung, deutlich niedriger. Der thermische Ausdehnungskoeffizient wird ebenfalls durch das stark anisotrope Werkstoffverhalten beeinflusst (Ziegmann, 2007). In Abb. 2.7 ist eine ideale Graphitstruktur einer Kohlenstofffaser dargestellt.

Angedeutet ist darin ebenfalls die starke kovalente Bindung in Schichtrichtung sowie die schwache van der Waals Bindung quer dazu.

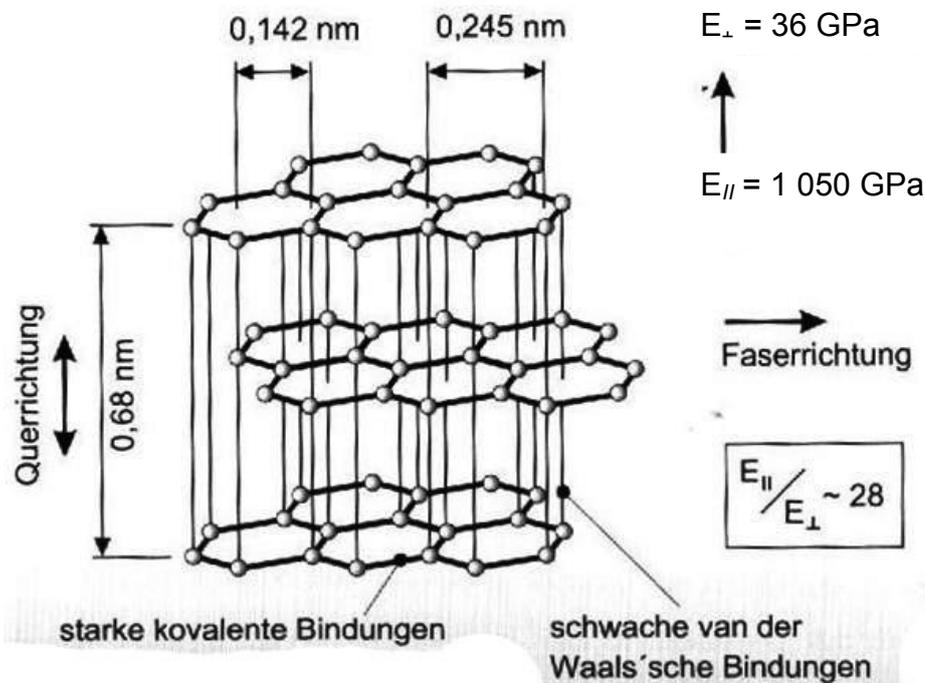


Abb. 2.7: Ideale Graphitstruktur einer Kohlenstofffaser (Ehrenstein, 2006)

Im Gegensatz zu den synthetischen, anorganischen Glas- und Kohlenstofffasern sind **Aramidfasern** lineare organische Polymere (Elias, 2003). Bei der Herstellung wird das monomere Ausgangsmaterial mit einem Lösungsmittel vermischt und daraus Einzelfäden gezogen. Diese werden zu Faserbündel versponnen und anschließend verstreckt (Flemming et al., 1995, Wörndle, 2006). Über die Variation der Prozessparameter können Fasern mit unterschiedlichen Eigenschaften hergestellt werden. Generell besitzen Aramidfasern aufgrund ihres molekularen Aufbaus hohe Eigenschaftskennwerte und eine hohe Wärmeformbeständigkeit (Brandbau, 1993, Wörndle, 2006). In Abb. 2.8 ist der Aufbau der Aramidfaser dargestellt. Die hohen Festigkeits- und Steifigkeitswerte der Aramidfaser werden durch kovalente Bindungen erzielt, welche entlang der Faserachse angeordnet sind. Zusätzlich bewirken die aromatischen Ringe eine Versteifung der Molekülketten, die untereinander über Wasserstoffbrückenbindungen verbunden sind (Flemming et al., 1995, Ehrenstein, 2006).

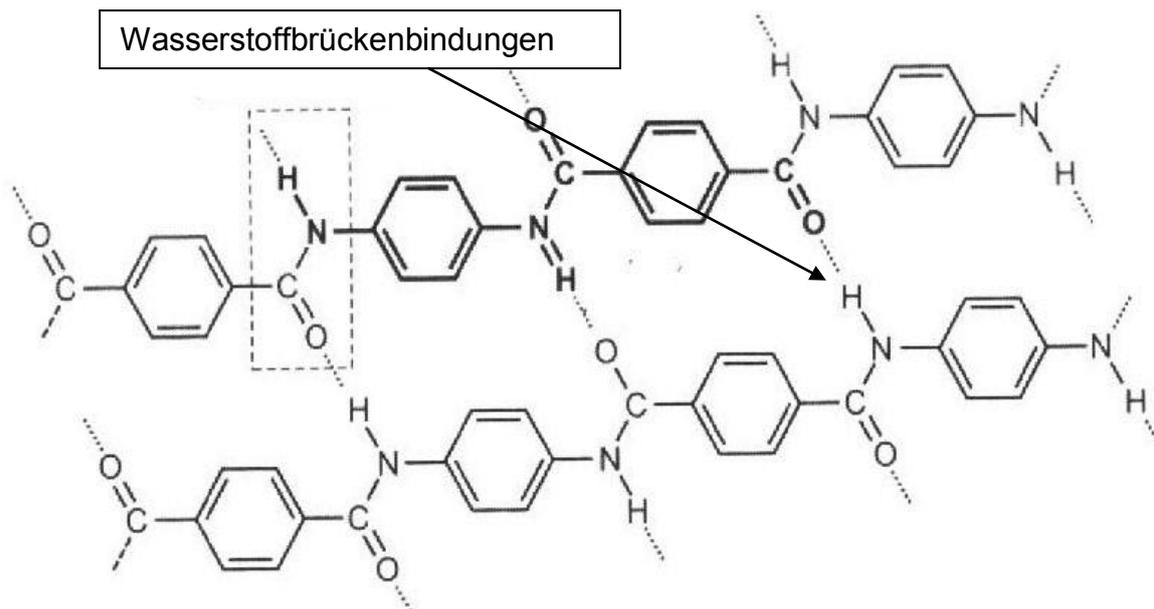


Abb. 2.8: Struktureller Aufbau der Aramidfaser (Ehrenstein, 2006)

In Tabelle 2.1 sind einige, für die vorliegende Arbeit relevante, Eigenschaften dargestellt. Angaben hinsichtlich Isotropie, E-Modul, Zugfestigkeit und Dichte beziehen sich auf den reinen Faserwerkstoff. Die angegebenen Informationen wurden aus der Literatur entnommen und gelten für Normbedingungen (Ehrenstein, 2006, Ziegmann, 2007, Flemming et al., 1995).

Tabelle 2.1: Gegenüberstellung relevanter Eigenschaften für Glas-, Kohlenstoff- und Aramidfasern (Ehrenstein, 2006, Flemming et al., 1995, Ziegmann, 2007)

	Fasertyp		
	Glasfaser	Kohlenstofffaser	Aramidfaser
Isotropes Verhalten	Ja	Nein	Nein
E-Modul [GPa]	70 - 88	230 - 700	80 - 186
ζ_{zug} [MPa]	2400 - 4400	2800 - 6200	2800 - 3800
ρ [g/cm ³]	2,6	1,6 - 2	1,45
Wärmeausdehnungskoeffizient (WAK) [K ⁻¹]	$5 \cdot 10^{-6}$	Parallel: -0,1 - -1,5 $\cdot 10^{-6}$	-2 $\cdot 10^{-6}$
		Normal: 15 $\cdot 10^{-6}$	70 $\cdot 10^{-6}$
Elektrische Leitfähigkeit [S/m]	$\sim 10^{-13}$	6,7 $\cdot 10^4$	2 $\cdot 10^{-13}$

Die Glasfaser hat als einzige Faser ein isotropes Werkstoffverhalten (Ehrenstein, 2006). Somit sind bei diesen Fasertypen die mechanischen Eigenschaften sowie die Wärmeleitfähigkeit parallel zur Faserausrichtung (symbolisiert durch: „//“) sowie normal zur Faserrichtung (symbolisiert durch: „⊥“) gleich groß. Glasfasern haben speziell im Vergleich zur Kohlenstofffaser einen sehr geringen E-Modul. Während Glasfasern eine Dichten von $2,6 \text{ g/cm}^3$ aufweisen liegt der Richtwert der Kohlenstofffasern mit $1,6 - 2 \text{ g/cm}^3$ auf einem niedrigeren Niveau. Die Dichte der Aramidfaser liegt mit $1,45 \text{ g/cm}^3$ deutlich unter den Werten der Kohlenstoff- und der Glasfaser. Bedingt durch das isotrope Werkstoffverhalten ist der Wärmeausdehnungskoeffizient bei der Glasfaser parallel und normal zur Faser gleich groß. Bei Kohlenstoff- und Aramidfasern unterscheidet man zwischen Werten, die normal bzw. parallel zur Faser gemessen wurden. Parallel zur Faser kommt es zu negativen WAK. Bezüglich Leitfähigkeit ist zu erwähnen, dass die Kohlenstofffaser im Vergleich zur Glas- und zur Aramidfaser eine hohe elektrische Leitfähigkeit besitzt (Ehrenstein, 2006). Weiters wird in der Literatur die Kohlenstofffaser, aufgrund des hohen E-Modulwertes in Faserrichtung, als dauerschwingfest klassifiziert (Ehrenstein, 2006). Auch weisen Kohlenstofffasern sehr hohe Festigkeitswerte auf. Aramidfasern sind druckempfindlich (Elias, 2003) und weisen, im Gegensatz zu Glas- und Kohlenstofffasern, ein hydrophiles Verhalten auf. Dadurch kann es zu einer erhöhten Feuchteaufnahme und zu einer negativen Beeinflussung der Faser /Matrix-Haftung kommen (Ehrenstein, 2006, Mengen et al, 2002, Wörndle, 2008, Ziegmann, 2007, Flemming et al., 1995).

2.3.2 Duomere Matrixwerkstoffe

Reaktionsharze stellen jenen Teil von duomeren Matrixmaterialien dar, die bei FVV zum größten Teil eingesetzt werden (Ehrenstein, 2006). Hierbei handelt es sich um Werkstoffe, die im Ausgangszustand sehr niedermolekular und oft bei Raumtemperatur flüssig sind (Oberbach, 2001, Menges et al. 2002). Auch wenn ein Aufschmelzvorgang notwendig ist, sind sie meist dünnflüssiger als Thermoplaste. Als Richtwert kann für Thermoplaste bei niedrigen Schergeschwindigkeiten eine Viskosität von 10^3 bis 10^5 Pascalsekunden (Pas) angenommen werden. Bei Gießharzen liegt die Viskosität bei mehreren 100 mPas (Flemming et al., 1995). Die niedrige Viskosität im Ausgangszustand ermöglicht

eine leichtere Verarbeitung von Duromeren. Weiters wird dadurch eine bessere Durchtränkung und Benetzung der Fasern ermöglicht (Ehrenstein, 2006).

Da die Verarbeitung bei wesentlich niederen Temperaturen stattfindet, ist im Vergleich zu Thermoplasten ein geringerer Energieaufwand für eine Faserimpregnierung notwendig. Die Härtung bei Duromeren erfolgt durch Zugabe von Härter und Beschleuniger sowie teilweise unter Einbringung von Energie durch Wärme oder Strahlung (Ehrenstein, 2006, Oberbach, 2001). Nach der Härtung, bei der sich ein dreidimensionales Netzwerk von engmaschig vernetzten Molekülen ausbildet, erhält der Werkstoff seine End Eigenschaften (Menges et al, 2002, Janda, 1990, Ashbee, 1989). Diese zeichnen sich durch eine hohe Steifigkeit und Festigkeit auf, weisen jedoch auch häufig ein sprödes Materialverhalten auf (Ehrenstein, 2006, Oberbach 2001, Janda, 1990). Duromere sind unerschmelzbar, bis zu ihrer thermischen Zersetzung fest und erweichen bei ihrer Glasübergangstemperatur wesentlich geringer als Thermoplaste. In der Regel weisen sie auch eine höhere Wärmeformbeständigkeit sowie eine höhere chemische Beständigkeit auf als Thermoplaste (Ehrenstein, 2006, Ehrenstein und Bittmann, 1997). Im Gegensatz dazu liegt der Vorteil bei Thermoplasten in ihrem zähem Werkstoffverhalten. Durch die vergleichsweise höhere Viskosität der Schmelze beim Herstellungsprozess ist der Imprägnierungsvorgang kritischer als bei den Duromeren (Ehrenstein, 2006).

Epoxidharze (EP-Harze) werden am häufigsten für moderne Hochleistungsverbunde eingesetzt. Amine, Phenole, Säuren, Säureanhydride sowie Dicyandiamine sind typische Härter für ihren Herstellungsprozess (Oberbach, 2001, Wöhrndle, 2006). Umsetzungsprodukte von Bisphenol-A und Epichlorhydrin sind die gebräuchlichsten EP-Harze. Der grundlegende Herstellungsprozess des Ausgangsproduktes für die Duroplastherstellung, die sogenannte Harzmasse (Ehrenstein und Bittmann, 1997), ist in Abb. 2.9 dargestellt. Dabei kommt es zur Reaktion der Ausgangsprodukte Bisphenol-A und Epichlorhydrin in alkalischer Umgebung. Die im ersten Schritt entstandene Chlorhydrinverbindung wird durch Natronlauge in eine Glycidyletherverbindung übergeführt. Das Produkt ist DGEBA (Diglycidether auf Bisphenol-A-Basis) (Flemming et al., 1995).

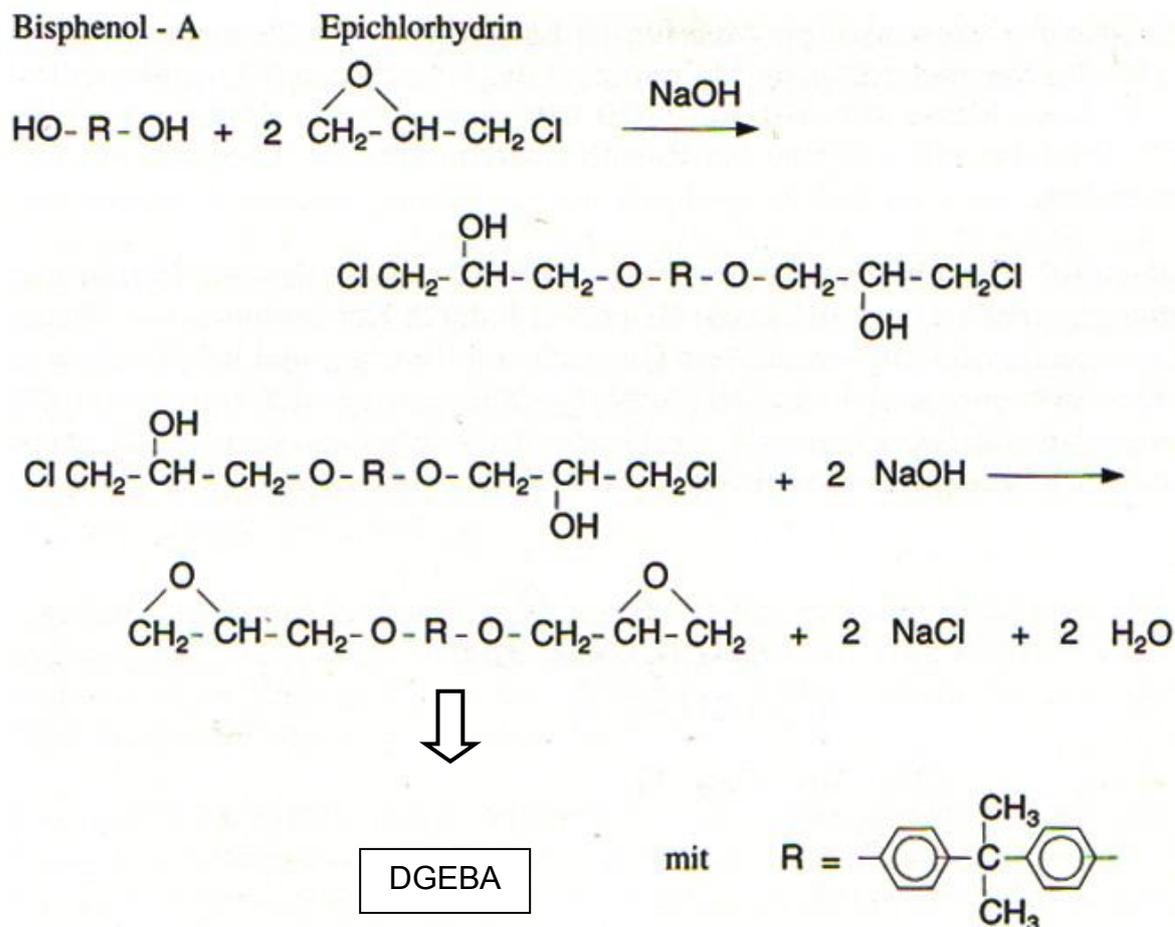


Abb. 2.9: Chemische Reaktionsablauf bei der Herstellung einer Bisphenol-A und Epichlorhydrin basierenden Harzmasse (Flemming et al., 1995)

Andere Arten von EP-Harzmassen sind Bisphenol-F-EP-Harze, epoxidierte Novolake, aliphatische Epoxidverbindungen, sowie cycloaliphatische und heterocyclische EP-Harze (Flemming et al., 1995). Auf Basis von Diaminodiphenylmethan-Tetraglycid beruhen Epoxidharze, bei denen eine hohe Temperaturbeständigkeit für Luft- und Raumfahrtanwendungen eine wesentliche Rolle spielt (Wolfrum, 2009). Beim anschließenden Härtingsprozess der Harzmassen kommt es zur Bildung des festen Werkstoffes, dem Harzformstoff. Als Härter kommen hierbei mehrere Systeme in Frage, wobei beispielsweise für die Anwendungen im Hochtemperaturbereich aromatische Diamine, wie m-Phenylen-diamid, DDS-Diaminodiphenylsulfon, eingesetzt werden. Weitere Härter basieren auf aliphatischen oder cycloaliphatischen Aminen, Polyaminoamiden, Anhydriden sowie Phenolen. Eine katalytische Härtung ist auch möglich (Flemming et al., 1995). Durch eine geringe Verarbeitungsschwindung von ca. 3% können maßgetreue Verbundbauteile mit niedrigen Eigenspannungswerten hergestellt

werden. Sehr gute Haft- und Klebeigenschaften führen dazu, dass Epoxidharze oft im Klebstoffsektor ihre Anwendung finden. Weiters können vor Allem im dynamischen Belastungsfall gute mechanische Eigenschaften sowie gute elektrische Eigenschaften angemerkt werden (Wörndle, 2008, Ehrenstein, 2006).

Ungesättigte Polyesterharze (UP-Harze) finden durch ihren niedrigen Preis ein breites Anwendungsfeld. Ihr Herstellungsprozess beruht auf einer Veresterung von ungesättigten Dicarbonsäuren mit niedermolekularen Diolen und einer anschließenden Lösung in Styrol. In Abb. 2.10 ist der generelle Veresterungsprozess dargestellt. Dabei reagieren die Ausgangsprodukte Säure und Alkohol zu Ester und Wasser.



Abb. 2.10: Chemische Prinzipdarstellung der Veresterung (Flemming et al., 1995)

UP-Harze besitzen mäßige mechanische Eigenschaften sowie eine geringe chemische Resistenz (Wörndle, 2008). Die nicht gesättigte Doppelbindung führt zu einem kritischen Verhalten hinsichtlich hydrolytischem Abbau der Molekülstruktur (Flemming et al., 1995). Weiters weisen UP-Harze nur eine geringe Zwischenfaserbindung, einer geringen Temperaturbeständigkeit sowie eine hohen Verarbeitungsschwindigkeit von 6 bis 8 Vol.% vor (Oberbach, 2001, Wörndle, 2008, Ehrenstein, 2006).

Methacrylsäuren und Epoxide bilden die Grundbausteine für **Vinylesterharze** (VE-Harze). Ähnlich wie bei der Herstellung von UP-Harzen erfolgt auch hier ein Lösen in Styrol und die Härtung durch radikalische Polymerisation (Ehrenstein, 2006). In Abb. 2.11 ist die chemische Struktur von VE auf Epoxidbasis dargestellt.

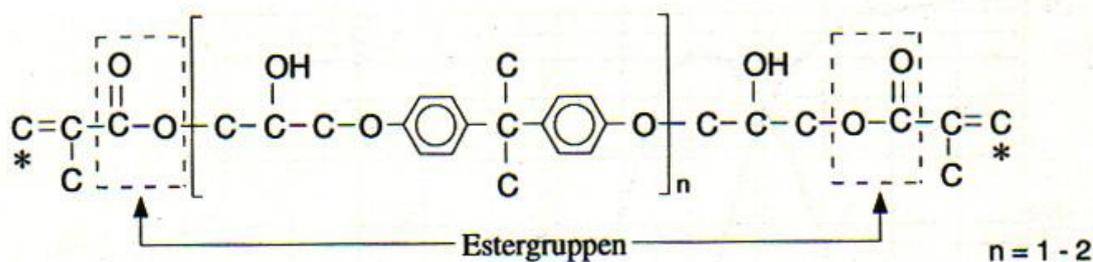


Abb. 2.11: Chemische Darstellung von Vinylester auf Epoxidbasis (Flemming et al., 1995)

Reaktionsfreudige Kohlenstoff-Kohlenstoff-Doppelbindungen sind, im Gegensatz zu UP-Harz, nur am Ende des Oligomers vorhanden. Dies verringert die Vernetzungsdichte, wodurch gleichzeitig die Schlagzähigkeit erhöht wird. Weiters wird aufgrund des niedrigeren Doppelbindungsgehaltes die mechanischen Eigenschaften, die Wärmeform-, Chemikalien- und Hydrolysebeständigkeit sowie die Faser/Matrix-Haftung verbessert (Flemming et al., 1995, Wörndle, 2008).

Phenol-Formaldehyd-Harze (PF-Harze) werden durch Reaktion von Phenolen mit Aldehyden, Kresol oder Xylenol hergestellt. In Abb. 2.12 ist der Herstellungsprozess dieses Harzsystems dargestellt. Durch Reaktion von Phenol mit Fomaldehyd wird im ersten Schritt ortho- bzw. para-Methylolphenol gebildet. Diese kondensieren in weiterer Folge mit Phenol zum Endprodukt, dem di-Hydroxydiphenylmethan (DPM) (Flemming et al., 1995). Der Härtingsprozess von PF-Harzen erfolgt unter Bildung von großen Mengen an Wasserdampf, wodurch ein erhöhtes Risiko der Riss- bzw. Lunkerbildung bei der Verarbeitung gegeben ist (Ehrenstein, 2006, Flemming et al., 1995). Auszeichnen können sich PF-Harze durch ein exzellentes Brandverhalten. Ihre thermische Beständigkeit ist mit bis zu 250°C hoch und die Chemikalienbeständigkeit gut. Verbundbauteile aus PF haben eine gute Oberflächenhärte, weisen jedoch ein sprödes Verhalten auf (Wörndle, 2008).

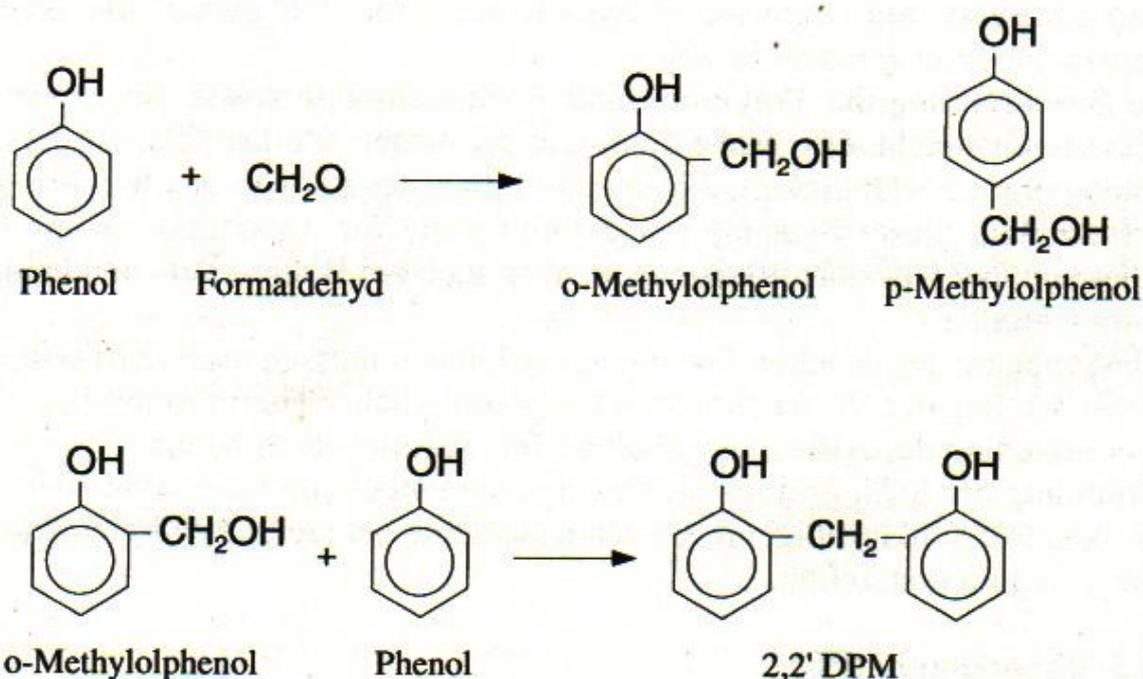


Abb. 2.12: Chemische Darstellung für die Herstellung von Novolaken (Flemming et al., 1995)

Imidharze (PI-Harze) bestehen in Hinsicht auf ihren chemischen Aufbau aus duromeren und thermoplastischen Bestandteilen. Beim Härtingsprozess kommt es in einer ersten Stufe, der Kondensationsphase, zur Vorhärtung. Anschließend folgt ein Abkühlen und ein Nachhärten in der Additionsphase. PI-Harze weisen eine hohe Temperaturbeständigkeit, gute mechanische Eigenschaften, eine geringe Feuchteabsorption sowie eine hohe Resistenz gegenüber organischen Lösungsmitteln auf. Unmodifiziert sind PI-Harze äußerst spröde und haben somit u. a. eine geringe Bruchdehnung (Wörndle, 2008, Talreja und Manson, 2001).

Bismaleinimid-Harze (BMI-Harze) zählen zu den ersten duromeren Polyimiden. Die Härtings- und Verarbeitungscharakteristik entspricht jener, von EP-Harzen. Die Synthese von BMI-Harzen ist in Abb. 2.13 dargestellt. Dabei wird in einem Zweistufenprozess zunächst aromatisches Diamin mit Malein-säureanhydrid zur Bismaleinamidokarbonsäure umgesetzt. Im zweiten Reaktions-schritt wird diese in Gegenwart von wasserfreiem Natriumacetat mit Essigsäure-anhydrid cyclisiert und so Bismaleinimid gewonnen (Flemming et al., 1995).

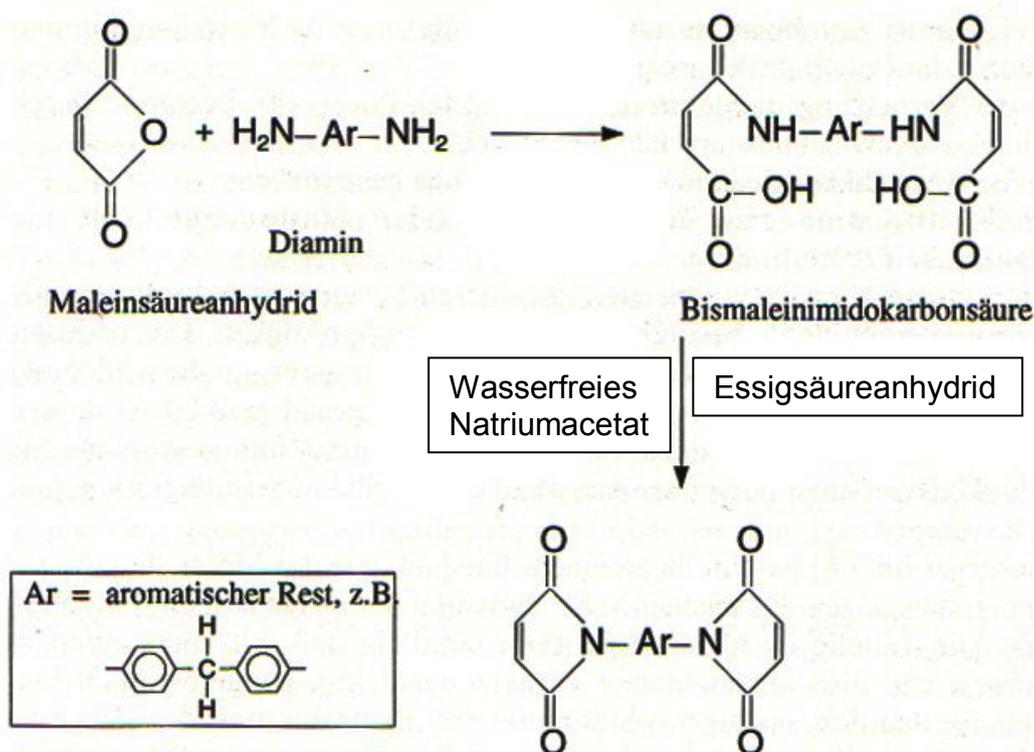


Abb. 2.13: Chemische Darstellung für die Synthese von Bismaleimid (Flemming et al., 1995).

BMI-Harze sind für einen Hochtemperatureinsatz geeignet. Aufgrund ihrer hohen Vernetzungsdichte haben sie ein sehr sprödes Verhalten. Bei hohem E-Modul ist die Festigkeit, Bruchdehnung sowie Schlagzähigkeit gering (Flemming et al., 1995). Durch diverse Modifikationen, wie beispielsweise den Einsatz von langkettigen Diaminen, die bei Härten relativ weitmaschige Vernetzungsstellen bilden, kann ein Kompromiss zwischen Vernetzungsgrad und Bruchdehnung erreicht werden (Wörndle, 2008, Flemming et al., 1995).

2.4 Eigenschaften von Faserverbundwerkstoffen

Im folgenden Abschnitt werden nur jene Aspekte der mechanischen und physikalischen Eigenschaften von FVW betrachtet, die für das Verständnis der nachfolgenden Kapitel von Bedeutung sind. Dem zugrunde liegt ein unidirektionaler (UD) Lagenaufbau, bei dem die „endlosen“ Verstärkungsfasern im Faserverbund ausschließlich in einer Richtung angeordnet sind.

2.4.1 Mechanische Eigenschaften von Faserverbundwerkstoffen

Für die vorliegende Arbeit ist hinsichtlich der mechanischer Eigenschaften speziell die Beanspruchung auf Zug von Interesse. Die Zugfestigkeit eines FVW wird, abhängig vom Belastungswinkel, mehr oder weniger stark von der Faser dominiert. Die größte Verstärkung ist gegeben, wenn die Beanspruchung in Faserrichtung auftritt. In diesem Fall spricht man von „faserdominiert“, da die Faser den größten Anteil an der Verstärkung beiträgt. Der E-Modul (E_{II}) und die Bruchspannung (ζ_{BII}) des Faserverbundes in Faserrichtung können in diesem Fall gemäß Gleichung 4.1 und Gleichung 4.2 errechnet werden (Ehrenstein, 2006, Flemming et al., 2003, Janda, 1990). φ_f und φ_m stehen für die Volumsanteile der Faser bzw. der Matrix. Da die Faser im Vergleich zur Matrix einen viel höheren E-Modulwert bzw. Bruchfestigkeit aufweist, kann unter Berücksichtigung für in technischen Anwendungen häufig eingesetzten Faservolumengehalt von 50 - 60 % insofern eine Vereinfachung vorgenommen werden, als dass der E-Modul bzw. die Zugfestigkeit des Verbundes über den Volumenanteil der Faser und dem Modul sowie bzw. der Festigkeit der Faser unter Vernachlässigung der Matrix errechnet wird (Heißler, 1986).

$$E_{II} = \varphi_f * E_f + \varphi_m * E_m \approx \varphi_f * E_f \quad (2.1)$$

$$\zeta_{II} = (\varphi_f * \zeta_f + \varphi_m * \zeta_m) \approx \varphi_f * \zeta_{fB} \quad (2.2)$$

In Abb. 2.14 ist der relative Modul bzw. die relative Festigkeitswerte einer UD-Einzelschicht in Abhängigkeit des Belastungswinkels eingezeichnet, wobei 0° in Faserrichtung und 90° normal zur Faserrichtung liegt. Erkennbar ist, dass es bereits bei recht geringen Belastungswinkel zu einem deutlichen Abfall des Moduls bzw. der Festigkeit kommt. Bei höheren Winkeln ist das mechanische Verhalten zunehmend matrixdominiert, wobei die betroffenen Werte noch unterhalb jener, des reinen Matrixwerkstoffes abfallen können. Dies lässt sich durch die hohen Unterschiede der Steifigkeiten zwischen Faser und Matrix, und der sich ergebenden Dehnungsüberhöhung der Matrix erklären (Menges et al., 2002).

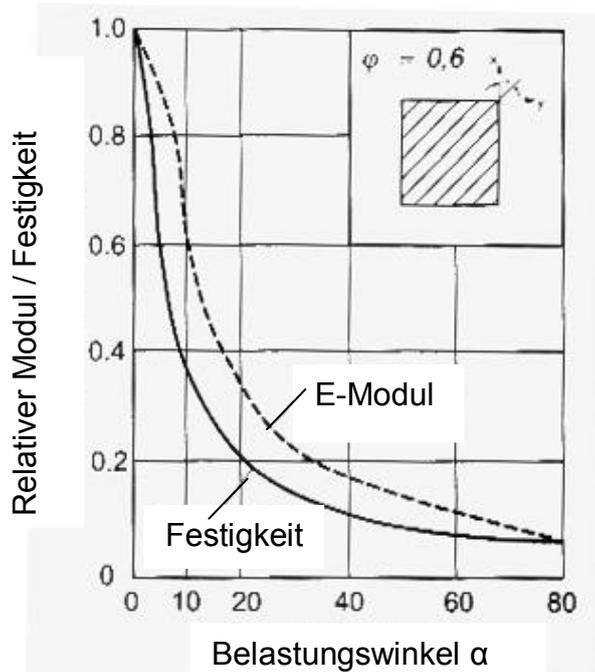


Abb. 2.14: Modul- bzw. Festigkeitswerten von UD-FRW in Abhängigkeit zum Belastungswinkel α (Menges et al., 2002).

2.4.2 Thermo-mechanische Eigenschaften von Faserverbundwerkstoffen

Thermo-mechanische Eigenschaften, insbesondere der Speichermodul ($E_{,,}$) und die Glasübergangstemperatur T_g , sind wesentliche Kennwerte für die thermische Einsatzgrenze von FVW, wobei hierbei der T_g des Matrixmaterials entscheidend ist. Die Bestimmung kann mittels dynamisch mechanischer Analyse (DMA) erfolgen, bei der die elastische ($E_{,,}$) und die nichtelastische Komponente des Moduls ($E_{,,,}$) über die Temperatur für den FVW bestimmt wird (Flaggl, 2004). Über die Phasenverschiebung zwischen $E_{,,}$ und $E_{,,,}$ kann weiters auf die mechanische Dämpfung $\tan\delta$ rückgeschlossen werden (Ehrenstein und Bittmann, 1997, Heißler, 1986, Flemming, 2003). Für die Ermittlung des T_g werden die Verläufe von $E_{,,}$ und $\tan\delta$ als Funktion der Temperatur dargestellt und beispielsweise hinsichtlich $T_{g,onset}$ bzw. $T_{g,tan\delta}$ ausgewertet, wobei die Onset-Methode in der Praxis häufig verwendet wird. Neben diesen Methoden gibt es noch weitere Möglichkeiten den T_g auszuwerten (Ehrenstein, 2006), auf diese soll jedoch an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden. In Abb. 2.15 ist der Verlauf von $E_{,,}$ und $\tan\delta$ als Funktion der Temperatur dargestellt. Im Bereich des Glasübergangsbereiches kommt es zum Lösen physikalischer Bindungen und zu einem starken Abfall von $E_{,,}$. Die

chemischen Vernetzungsstellen bleiben bei Duromeren jedoch erhalten (Ehrenstein, 2006). Bei der Auswertung der Onset-Glasübergangstemperatur $T_{g,onset}$ werden nun gemäß DIN 65 583 an der Modulkurve zwei Tangenten angelegt, wobei der Schnittpunkt dieser Tangenten als $T_{g,onset}$ definiert ist. Der $T_{g,tan\delta}$ ist repräsentativ für jene Temperatur, bei der die $\tan\delta$ -Kurve ihr Maximum erreicht (Wolfrum, 1999).

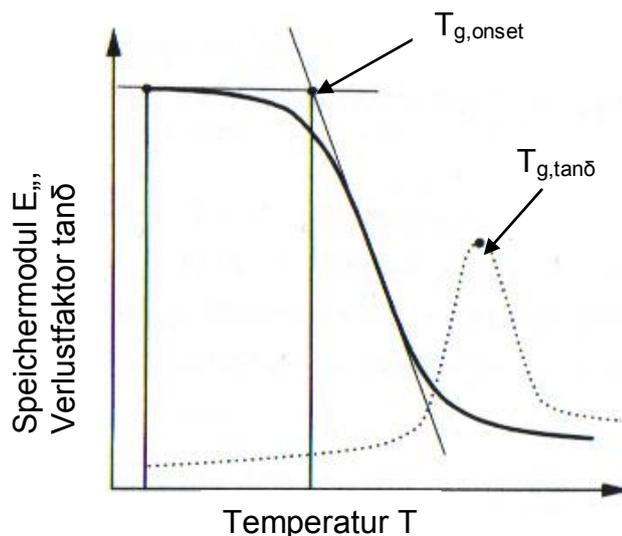


Abb. 2.15: Schematische Darstellung einer Speichermodul-Temperaturkurve zur Ermittlung der thermischen Einsatzgrenze (Wolfrum, 1999).

2.4.3 Einfluss von Feuchte auf das Eigenschaftsprofil von Faser-verbundwerkstoffen

Polymere Werkstoffe sind nicht diffusionsdicht und nehmen Feuchtigkeit aus der Umgebung auf. Im Falle von FVW führt eine Feuchtigkeitsaufnahme zu einer Veränderung der physikalischen und mechanischen Eigenschaften des Faserverbundes (Talreja und Manson, 2001, Ziegmann, 1984), wobei die größten Veränderungen bei Temperaturen im Bereich des T_g gegeben sind (Flemming et al., 2003). Das Diffusionsverhalten und die Sättigungskonzentration des FVW wird neben dem polymeren Werkstoffes auch durch die vorherrschende Umgebungsfeuchte und -Temperatur beeinflusst und kann mit Hilfe der Fick'schen Gleichung abgeschätzt werden (Cervenka et al., 1998). Generell bewirkt eine höhere Umgebungsfeuchte bzw. -Temperatur ein schnelleres Diffusionsverhalten und eine höhere Sättigungskonzentration im Werkstoff. Das Feuchtigkeitsaufnahmeverhalten ist durch mehrere physikalische Prozesse beschrieben. Feuchtigkeit

wird an der Oberfläche des FWW absorbiert und wird mittels Diffusion innerhalb der Matrix transportiert (Flemming et al., 2003). Die Feuchtigkeitsdiffusion erfolgt hierbei im feien Volumen des Polymers. Zusätzlich kann es zur Lockerung der Sekundärbindungen kommen, wodurch zusätzliches Volumen geschaffen werden kann. Dieser Vorgang wird Quellung genannt und kann zu einer Veränderung der Dimensionen des Bauteils führen (Heißler, 1986). Mikrorisse können aufgrund ihrer Kapillarwirkung ebenfalls einen Wassertransport gewährleisten. Weiters kann aufgrund von Diffusionsvorgängen Wasser in Poren und Lunker eingelagert sein (Flemming et al., 2003).

Die gewichtsbezogene Feuchtigkeitsaufnahme als Funktion der Lagerzeit ist in Abb. 2.16 beispielsweise sowohl für ein EP-Reinharz als auch für ein kohlenstofffaserverstärktes („carbon fiber reinforced“, CFR) EP-Harz mit einem Harzanteil von 32,95 wt,% für eine Lagerung bei 70°C bei 98 % relativer Luftfeuchte aufgetragen (Flemming et al., 2003). Während der Faserverbundwerkstoff nach einer Auslagerungszeit von ca. 100 Tagen einen gesättigten Zustand mit einem Feuchtegehalt von ca. 1,3 wt. % aufweist, liegt der Feuchtegehalt vom EP-Reinharz nach einer Auslagerungszeit von etwa 180 Tagen mit 5,1 wt.% wesentlich höher und hat den gesättigten Zustand noch nicht erreicht.

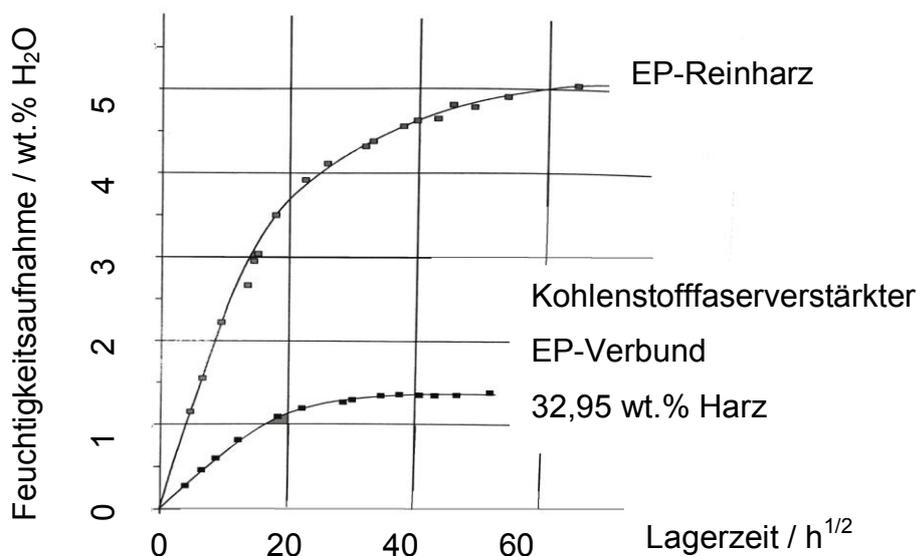


Abb. 2.16: Vergleichsdarstellung der Feuchtigkeitsaufnahme eines Reinharzes und des kohlenstofffaserverstärkten Verbundwerkstoffes bei einer Lagerung bei 70°C und 98% relativer Luftfeuchte (Flemming und Roth, 2003)

Die durch den FVW aufgenommene Feuchtigkeit kann sich an polare Gruppen, wie beispielsweise bei EP-Harzen die Hydroxid- (OH-) Gruppen, anlagern und dadurch einen Weichmachereffekt in der starren Molekülstruktur hervorrufen, wobei eine höhere Beweglichkeit der Moleküle eine Absenkung des T_g zur Folge hat (Ziegman, 1984). Beispielsweise führt beim EP-Reinharz bereits eine Feuchtigkeitsaufnahme von 1 Gewichts- (wt.) % zu einem Abfall des T_g um 20°C (Talreja und Manson, 2001, Flemming et al., 2003).

Der Einfluss von Feuchtigkeit bzw. das Einwirken von feuchtwarmen Umgebungsbedingungen führt, wie bereits früher in diesem Abschnitt erwähnt, zu Quell- und Weichmachereffekten. Während die Matrix alleine isotrop quellen würde kommt es in einem Faserverbund aufgrund der Überlagerung der Verstärkungsfaser zu einer richtungsabhängigen Quellung, und zu entsprechenden Spannungen. Es kann es in weiterer Folge zu Rißvergrößerungen, Faser/Matrix-Delamination, quellbedingte Oberflächenrisse oder Mikrorisse in der Matrix kommen (Wolfrum, 1999). Der Weichmachereffekt aufgrund der Feuchtigkeitsaufnahme führt zu einem Herabsetzen des Moduls der Matrix sowie zu einem Freisetzen von Eigenspannungen, die Beispielsweise durch die Herstellung entstanden sein können (Abdel-Magid et al., 2005). Im Bezug auf die mechanischen Eigenschaften des FVW führen Feuchteaufnahmeeffekte verstärkt zu einer Beeinflussung von matrix-dominierten Eigenschaften. So kommt es zu einer Abnahme der interlaminaren Schubfestigkeit, der Festigkeit normal zur Faserrichtung, des Druckmoduls und der Druckfestigkeit (Talreja und Manson, 2011).

2.4.4 Ermüdungseigenschaften von Faserverbundwerkstoffen

Das Verhalten von FVW in Hinsicht auf einen dynamischen Belastungsfall ist stark von der Art der ausgewählten Verstärkungsfaser abhängig. Generell weisen Kohlenstofffasern im Vergleich zu Glas- oder Aramidfasern ein besseres Ermüdungsverhalten auf (Ehrenstein, 2006). Versagensmechanismen während einer zyklischen Beanspruchung sind weiters von der Belastungsintensität abhängig. So führen hohe Spannungen zu Faserbruch sowie zur Rissfortpflanzung in der Matrix und bewirken ein katastrophales Versagen des FVW. Bei geringeren Belastungen dominieren hingegen Schädigungsmechanismen am

Faser/Matrix-Interface, die nicht zum unmittelbaren Versagen führen (Wu et al., 2010, Tai et al., 1994).

Das Materialverhalten bei einer Ermüdungsbelastung wird oft in Form von Wöhlerlinie oder S-N- (Spannung S bzw. Zyklenzahl N) Kurven dargestellt. In Abb. 2.17 ist die Ermüdungsfestigkeit eines kohlenstoff-, glas- und aramidfaser-verstärkten EP-Harzes sowie des EP-Reinharzes bei einem R-Verhältnis von 0, welches einer Zugschwellbeanspruchung entspricht, dargestellt. Auf der Ordinate ist die prozentuelle Festigkeit bezogen auf die Festigkeit aus dem monotonen Zugversuch aufgetragen. Angaben zur Prüffrequenz sowie zu Faservolumensanteilen wurde in der vorliegenden Literatur keine gemacht (Menges et al., 2002). Gut ersichtlich ist, dass durch den Einsatz von Kohlenstoff- bzw. Aramidfasern im Vergleich zu Glasfasern besonders bei hohen Zyklenzahlen ein gutes Ermüdungsverhalten des jeweiligen FWV gegeben ist wobei HM-kohlenstofffaserverstärkte Verbundwerkstoffe das beste Ermüdungsverhalten aufweisen (Ehrenstein, 2006).

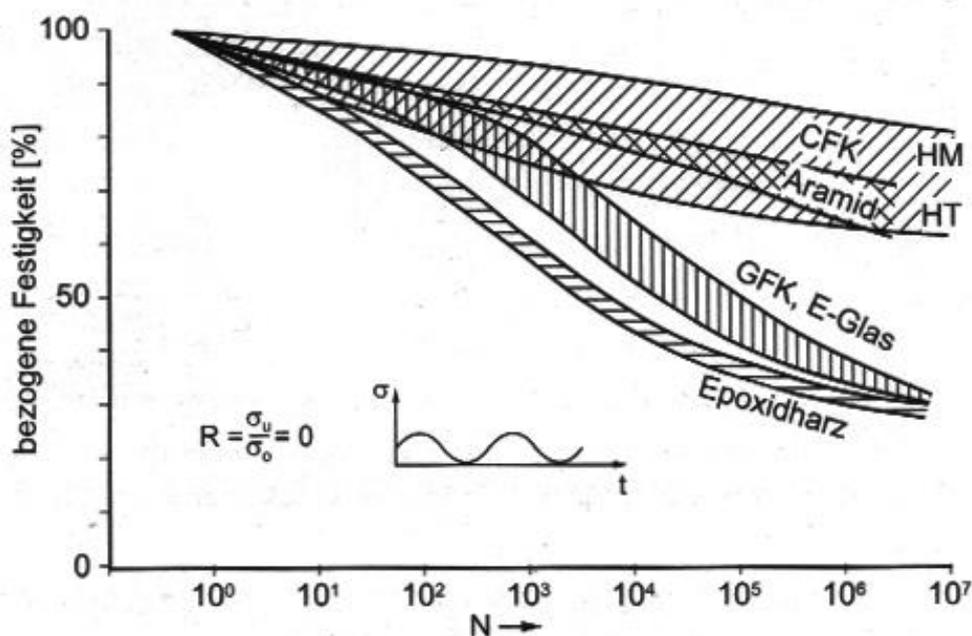


Abb. 2.17: Gegenüberstellung der Ermüdungsfestigkeit von kohlenstoff-, glas- und aramidfaserverstärkten EP-Harz sowie des EP-Reinharzes bei Schwellbeanspruchung (Menges et al., 2002).

3 STAND DER TECHNIK ÜBER DEN EINSATZ VON FASERVERBUNDWERKSTOFFEN ALS ROTORENDKAPPENWERKSTOFF

Meier et al. (1982) führte umfangreiche Untersuchungen zum Einsatz von FVW für die Anwendung als Rotorendkappenwerkstoff durch. Im Folgenden werden die Beweggründe, Anforderungen an den Werkstoff sowie die Werkstoffcharakterisierung einschließlich eines praxisnahen Schleuderversuchs näher beleuchtet. Anzumerken ist, dass auch Andritz Hydro AG (Weiz, A) eine auf kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff basierende Rotorendkappe für 4-polige Generatoren seit mehr als 20 Jahre in einem Kraftwerk erfolgreich im Einsatz hat. Ausgewählte Werkstoffdaten sind in Mußbacher (1993) zu finden. Das ist im Übrigen die einzige Literaturstelle, die dem Autor hierzu bekannt ist.

Im Jahre 1982 wurde von Westinghouse Electric Corporation ein Endbericht mit dem Arbeitstitel "Fibre-Composite Retaining Rings for Turbine-Driven Generators" veröffentlicht. In diesem insgesamt vierteilige Prüfbericht, der von der Fa. Epri (Pittsburgh, Pennsylvania, USA) in Auftrag gegeben wurde, wurde an einer Entwicklung eines CRF Epoxidharzmaterials für eine potentielle Anwendung als Rotorendkappenwerkstoff gearbeitet. Darüber hinaus war das Ziel solch eine Rotorendkappe in Form eines skalierten Modells herzustellen und daran Materialprüfungen durchzuführen. Als Motivation für dieses Projekt diente in erster Linie, dass die, zur Zeit der Durchführung des Projektes, aktuell im Einsatz befindlichen metallischen Legierungen aufgrund ihrer Streckgrenze die Durchmesser der Rotorendkappen auf 1092 mm begrenzten. Dies wird in Abb. 3.1 veranschaulicht, in dem die höchst zulässige spezifische Spannung über die Dichte verschiedener Werkstoffe aufgetragen ist. Des weiteren ist der maximal erreichbare Durchmesser der Rotorendkappe für die jeweiligen Materialien angegeben. Die durchgezogene Linie soll symbolisieren, welche spezifischen zulässigen Spannungswerte bzw. welche Dichte ein Material vorweisen müßte, um eine Rotorendkappe mit einem Durchmesser von 1321 mm aus mechanischer Sicht auslegen zu können. Für den Bau von Rotorend-

kappen mit Durchmessern von 1270 mm oder größer ist bereits, abgesehen von Titan und einer Boron/Al-Legierung, ein Einsatz von FVW aufgrund ihrer hohen gewichtsspezifischen Festigkeiten erforderlich. So setzt sich beispielsweise bei einem Stahlring die zentrifugale Beanspruchung zu zwei Drittel aus der eigenen Masse und nur zu einem Drittel aus der Masse der End Turns der Kupferspulen zusammen. Neben höheren gewichtsspezifischen Eigenschaften kann laut Literaturstelle eine Substituierung der sich bisher im Einsatz befindlichen metallischen Werkstoffe durch FVW Vorteile hinsichtlich Spannungsrisskorrosion, Elastizitätsmodulwerte, Designmöglichkeiten, Energieeinsatz bei der Produktion sowie Kosten mit sich bringen.

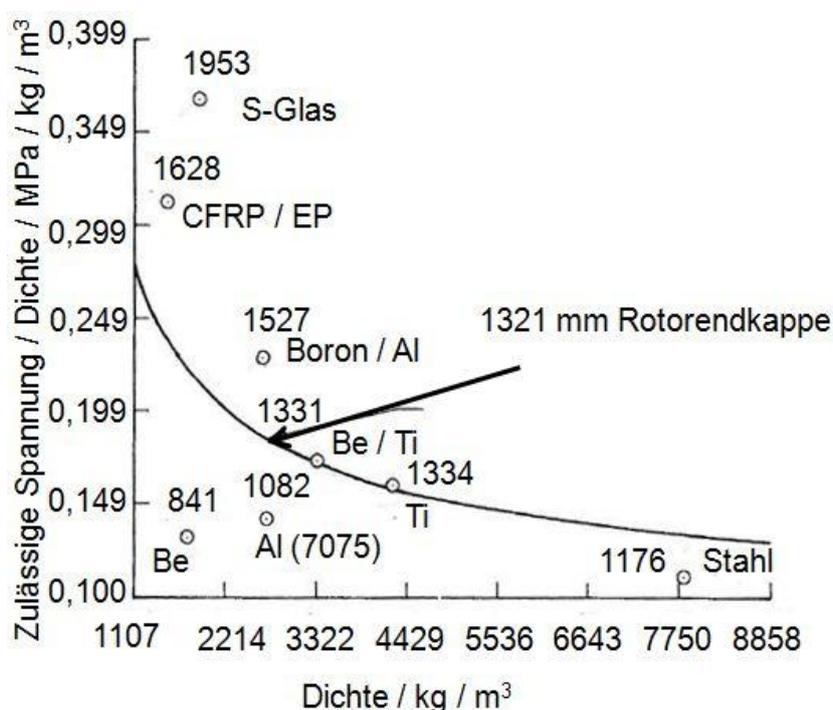


Abb. 3.1: Gegenüberstellung verschiedener Materialien hinsichtlich gewichts-bezogenen zulässigen Spannungswerten und deren Dichte, sowie maximal erreichbare Rotorkappendurchmesser (Meier et al., 1982)

Die Anforderungen an die Rotorkappe unterscheiden sich jeweils vom spezifischen praktischen Anwendungsfall. Konkret wurde dieser durch eine Anwendung an einem zweipoligen Turbogenerator festgelegt, der mit einer Betriebsdrehzahl von 3600 U/min bzw. einer um 20% erhöhten „Überdrehzahl“ von 4320 U/min betrieben werden soll. Die Einsatztemperatur wurde überdies

mit 80°C angenommen. Die Abmessungen der geplanten Rotorkappe betragen für den Innendurchmesser 1047 mm, für den Aussendurchmesser 1208 mm und für die Länge 600 mm. Jede Rotorendkappe erfährt im Laufe ihres Einsatzes mehrere Anwendungsfälle, die aufgrund geplanter Vorgänge, den Normalbetrieb sowie etwaigen Fehlverhalten geprägt sind. Um ein Bauteil adäquat auszulegen müssen diese Ereignisse so gut wie möglich in Erfahrung gebracht und quantifiziert werden. Die Arten der Ereignisse und die jeweilige Häufigkeit sind in Tabelle 3.1 zusammengefasst.

Tabelle 3.1: Anforderungen an die Rotorkappe während des Betriebseinsatzes (Meier et al., 1982)

Art des Ereignisse	Häufigkeit
Zusammenbau und Zerlegen	20
Start und Stopps	10 680
10% über Betriebsdrehzahl	400
20% über Betriebsdrehzahl	3
Bedeutende Laststöße (30 bis 100%)	12 370
Geringfügige Laststöße (50 bis 100%)	25 550
Erdungsfehler	118
Leitungsstörung	17
3 Phasen Fehler (elektrisch)	6
Schwerwiegender I ² t Fehler (Kurzschluss)	1
Biegung aufgrund Eigengewicht des Rotors	10“
Dauer- und Zentrifugalbelastung	40 Jahre

Die grundsätzliche mechanische Anforderung an den FVW wurde insofern festgelegt, dass sämtliche auftretende Kräfte, die in erster Linie durch die Eigenbelastung sowie Fremdbelastung entstehen, durch den FVW aufgenommen werden müssen. Eine Verbindung zum Rotorkörper muss hierbei bei allen Temperaturen und auftretenden Drehzahlen gewährleistet sein. Neben der, aufgrund der Zentrifugalkräfte hervorgerufenen, radial gerichteten Hauptbeanspruchung, kann es weiters zu Kräften in axialer Richtung sowie zu Biegekräften kommen. Letztere werden durch Verrutschen der Kupfer-Endturns

gegen die Rotorkappe bzw. durch den Einsatz unterschiedlicher Materialien, welche unterschiedliche Steifigkeiten zur Folge haben, gebildet.

Für eine bestmöglich Umsetzung all dieser grundlegenden Forderungen durch einen Faserverbundwerkstoff wurden Kriterien angegeben, nach denen Faser- und Matrixsysteme untereinander verglichen bzw. manche Materialkombinationen von vornherein ausgeschlossen werden können. Im vorliegenden Fall der Literatur waren für Verstärkungsfasern

- eine hohe Zugfestigkeit bzw. ein hoher Zugmodul
- eine gute Faser Konsolidierung,
- eine leichte Verarbeitbarkeit,
- eine Oberflächenbearbeitung für hohe Schubfestigkeiten
- sowie geringe Kosten

von wesentlicher Bedeutung. Matrixmaterialien hatten vorzugsweise folgende Eigenschaften:

- eine moderate Vernetzungstemperatur
- einen geringer thermischer Ausdehnungskoeffizient
- eine große Fläche unter der Spannungs/Dehnungs-Kurve bis zu einer Dehnung von 1,2%
- einen hoher E-Modulwert
- eine kleinstmögliche Feuchtigkeitsaufnahme
- eine gute Verarbeitbarkeit

Zur grundlegenden Charakterisierung der ausgewählten Faser/Matrix Kombination (nähere Angaben zu Fasertyp und zur Matrix sind nicht bekannt) wurde ein Prüfprogramm ausgearbeitet, dass mechanische Versuche im Temperaturbereich von 21 bis 150°C bei relativen Luftfeuchtigkeiten von 0 bis 100% zum Inhalt hat. Es wurden Zugversuche zur Bestimmung der Zugfestigkeit, des E-Moduls, der Querkontraktionszahl und der Bruchdehnung in das Prüfprogramm aufgenommen. Weiters waren mechanische Versuche zur

Erfassung des Schubmoduls vorgesehen. Andererseits wurden Versuche zur Ermittlung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten, Wärmeformbeständigkeit, Viskosität, Potzeit sowie spezifischer Gravimetrie durchgeführt. Für nähere Angaben zu den Prüfkörpergeometrien, Prüfkörperentnahme sowie zu den Prüfparametern sei an dieser Stelle auf die Literaturstelle verwiesen.

Auf Basis der Ergebnisse der durchgeführten Werkstoffcharakterisierung kamen die Autoren zum Schluss, dass ein Prepreg-System der Fa. Hercules, bestehend aus einer AS-4 Kohlenstofffaser mit einem EP-Harz mit der Bezeichnung 3501-6, für den, an einen FVW gestellten Anforderungen, am besten geeignet ist. Unter Verwendung dieses Werkstoffes wurden anschließend detaillierte Untersuchungen auf Prüfkörperebene durchgeführt, wobei einerseits das Druck-, Schub- und Ermüdungsverhalten bei unterschiedlichen Temperaturen und z.T. auch in unterschiedlichen Medien anhand von unidirektionalen Probekörper untersucht wurde. Andererseits wurden ähnliche Versuche an Prüfkörpern mit einem quasiisotropen Lagenaufbau gemacht. Den Abschluss des Versuchsprogrammes bildeten praxisnahe Schleuderversuche an Modellringen bei einer Prüftemperatur von 80°C. Diese wurden sowohl bezüglich geometrischen Abmessungen als auch mechanischer Belastungsintensität auf zwei Drittel der Originalwerte herunterskaliert und die Belastung mittels geeigneter Wahl der Drehzahl sowie durch eine zusätzliche zentrifugale Belastung mit „Dummy“-Gewichten realisiert. Der eigentliche Versuch bestand aus zwei Teilen. 3000 Lastzyklen mit Drehzahlen zwischen 6650 und 2100 U/min stellten den ersten Schritt dar, welcher laut Angaben repräsentativ für die Start/Stopp-Vorgänge einer 40-jährigen Einsatzdauer war. Im Anschluss an die zyklische Belastung wurde bei einem Ring zusätzliche Gewichte installiert und die Drehzahl für 5 Minuten auf 7870 U/min erhöht. Die auf diese Weise aufgebrachten Spannungen wurden als drei Mal so hoch, wie bei einem Normalbetrieb einer Rotorendkappe bei einer (Standard-) Drehzahl von 3600 U/min, angegeben.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass der ausgewählte Kohlenstofffaser / Epoxidharz-Verbundwerkstoff als Rotorendkappenwerkstoff eine mögliche Alternative zur Ausführung in Stahl darstellt. Designmöglichkeiten

für eine Ringanbindung am Rotorkörper sowie Analysen bezüglich Wirbelströmen wurden als vielversprechend bezeichnet, sind jedoch Gegenstand weiterer Untersuchungen der Autoren. Vor einem kommerziellen Einsatz wurden daher weiterführende Untersuchungen vorgeschlagen, die eine Optimierung des Rotorendkappendesigns, weitere Befestigungsmöglichkeiten am Rotorkörper sowie Auswirkungen durch Wirbelströme beinhalten sollten.

4 ANFORDERUNGSPROFIL AN DEN ROTOREND-KAPPENWERKSTOFF

Für den Anwendungsfall der aktuellen Diplomarbeit sollten FVW hinsichtlich einer Verwendung als Rotorkappenwerkstoff in Turbogeneratoren der Fa. Andritz Hydro AG (Weiz, A) untersucht werden, wobei aufgrund der erhöhten Komplexität bei 2-poligen Generatoren, wie beispielsweise Ovalisierungseffekte etc., der Fokus in diesem Projekt auf eine entsprechende Anwendung bei 4-poligen Typen gelegt wurde. Dennoch wurden im Hinblick auf mögliche zukünftige Untersuchungen betreffend der Erweiterung des Anwendungsgebietes des potentiellen Rotorendkappenwerkstoffes auf 2-polige Generatoren sowie Überlegungen, welche die technische Umsetzung durch den Bau der Rotorendkappen sowie den praktischen Einsatzfall betreffen, gewisse Punkte bereits vorab mitberücksichtigt.

Bezüglich einer umfassenden Werkstoffauswahl war zunächst die Definition eines umfassenden Lastenheftes zu den relevanten mechanischen und physikalischen Anforderungen für die Rotorendkappe zu definieren. Das erstellte Anforderungsprofil ist in Tabelle 4.1 zusammengestellt.

Tabelle 4.1: Lastenheft für den Einsatz von Faserverbundwerkstoffen als Rotorkappenwerkstoff in Turbogeneratoren.

Nr.	Merkmal	
1	Geometrie	
	Innendurchmesser:	≤ 1200 mm
	Kappenbreite:	≤ 600 mm
2	Kinematik	
	Bewegungsart:	Rotation
	(standard) Betriebsdrehzahl:	1500 - 3600U/min
	Überdrehzahl:	1800 - 4320 U/min
Anzahl der Start-Stop Vorgänge:	10 000 (bei Betriebsdrehzahl)	

3	Kräfte / festgelegte Mindestfestigkeiten	
	Art der Hauptbeanspruchung:	Zentrifugale Beanspruchung durch Eigen- gewicht sowie durch Kupferspulen bei (standard) Betriebsdrehzahl und um 20 % erhöhter Drehzahl
	Kraftrichtung der Hauptbeanspruchung:	Tangentialspannungen durch radial gerichtete Kräfte (Zentrifugalkräfte)
	Mindestzugfestigkeit der UD-Laminatlagen:	500 MPa
	Zeitfestigkeit für 10 000 Start / Stopp Vorgänge:	300 MPa
4	Thermische Einsatzgrenze	
	Einsatztemperatur	Klasse F (155°)
5	Umgebungseinflüsse	
	Medien	Lageröl, Ozon
	Feuchtigkeitsaufnahme:	Massenbezogene Feuchtegehalte eines glasfaserverstärkten Polyester – PEI basierenden Blends der Fa. Andritz Hydro AG (Weiz, A) sind als Referenzwerte anzusehen.
6	Instandhaltung	
	Austausch und Instandsetzung:	Nach Kurzschlussfall muss ein sicheres Herunterfahren des Generators möglich sein (thermischer Abbau des Matrix- werkstoffes)
7	Schadensfall	
	Kurzschlussfall: (Lichtbogenbeständigkeit)	Nach Kurzschlussfall muss ein sicheres Herunterfahren des Generators möglich sein (thermischer Abbau des Matrix- werkstoffes)
8	Fertigung, Kontrolle, Montage	

Im Punkt „Geometrie“ werden die geometrisch relevanten Abmessungen festgelegt, die für die Dimensionierung der Rotorendkappe von Bedeutung sind. Hierbei sind Innendurchmesser und Kappenbreite als charakteristische Größen enthalten. Der Innendurchmesser der Rotorendkappe ist so gewählt, dass eine entsprechende Verbindung mit dem Rotorkörper möglich ist, und die Funktion der

Rotorendkappe erfüllt werden kann. Für einen potentiellen Einsatz bei 4-poligen Generatortypen, sowie in Hinblick auf einen 2-poligen Generatortyp liegen die Innendurchmesser im Bereich von kleiner gleich 1200 mm, die Kappenbreiten im Bereich von kleiner gleich 600 mm.

Im Punkt „kinematische Anforderung“ wird die, während des Einsatzfalles einer Rotorendkappe, auftretende Bewegungsform beschrieben. Aufgrund der fixen Verbindung der Rotorendkappe am Rotor des Generators handelt es sich hierbei um eine rotatorische Bewegung, wobei die betreffende Drehzahl abhängig von der Bauform des Generators ist. Im Falle von 4-poligen Generatortypen beträgt die Betriebsdrehzahl im Normalbetrieb ((Standard-) Betriebsdrehzahl) 1500 U/min. Für eine mechanische Auslegung wurde jedoch eine um 20% höhere „Überdrehzahl“ von 1800 U/min berücksichtigt. Nachdem für Vergleichsdarstellungen in Hinblick zukünftiger Untersuchungen hinsichtlich einer Anwendung von FVW bei 2-poligen Generatoren auch entsprechende mechanische Berechnungen an einem 2-poligen Typ durchgeführt wurden, mussten für diesen Fall auch die Drehzahlen entsprechend angepasst werden. Diese betragen 3600 U/min für die (Standard-) Betriebsdrehzahl sowie 4320 U/min für die Überdrehzahl. Aufgrund diverser Vorkommnisse, wie beispielsweise Wartungsarbeiten, kommt es im Laufe der Einsatzzeit häufig zu Abschaltvorgängen des Generators, wobei die Drehzahl auf 0 reduziert wird und nach einer bestimmten Zeitdauer wieder auf die Standard-Betriebsdrehzahl erhöht wird. In diesem Zusammenhang sollen 10 000 dieser Start-Stopp Vorgänge für den Einsatzfall mitberücksichtigt werden, wobei dies im Hinblick auf eine Werkstoffcharakterisierung durch eine entsprechende zugschwellende Ermüdungsbelastung mit einem R-Verhältnis von 0 vereinfacht betrachtet wird.

Aufgrund der rotatorischen Bewegungsart der Rotorkappe ergeben sich radial gerichtete Zentrifugalkräfte, die sich aus dem Eigengewicht der Rotorkappe und dem Gewicht der Kupferspulen zusammensetzen. Diese verursachen sowohl bei den jeweiligen Betriebs- sowie Überdrehzahlen dementsprechende Tangentialspannungen im Rotorkappenwerkstoff und wurden unter „Kräfte / festgelegte Mindestfestigkeiten“ im Anforderungsprofil als Hauptbeanspruchung festgelegt. Aufgrund vorliegender Simulationsergebnisse seitens Andritz Hydro AG (Weiz, A)

sowie im Hinblick auf etwaige Anwendungen bei 2-polige Generatortypen wurde eine Mindestzugfestigkeit von 500 MPa für den Rotorkappenwerkstoff festgelegt. Repräsentativ für die oben genannten Start/Stopp Vorgänge während der 20-jährigen Einsatzzeit soll ein potentiell Rotorendkappenmaterial im zug-schwellenden Versuch bei einem R-Verhältnis von 0 bei einer beaufschlagten Oberspannung von 300 MPa eine Mindest-Zyklenzahl von 10 000 aufweisen können.

Die maximale Einsatztemperatur im vorliegenden Fall wird mit 155°C definiert. Um eine ausreichende thermische und mechanische Stabilität des potentiellen Rotorendkappenwerkstoffes sicherzustellen, ist speziell bei der Wahl des Matrixmaterials eine ausreichend hohe Glasübergangstemperatur von wesentlicher Bedeutung. Zu beachten sei, dass es im Laufe der Einsatzzeit zu Effekten kommen kann, die zu einer Absenkung des T_g führen können, wie dies beispielsweise aufgrund von Feuchtigkeitsaufnahme gegeben ist. Nachdem sich eine erhöhte Einsatztemperatur auf physikalische und mechanische Eigenschaften eines FVW auswirken kann, ist die Glasübergangstemperatur des Werkstoffes unter Einhaltung eines Sicherheitsfaktors um mindestens 25 K über dem T_E des polymeren Matrixwerkstoffes zu wählen.

Mediale Umgebungseinflüsse können durch Lageröl sowie durch Ozon in einer überschlagsmäßigen Konzentration von 1000 parts per billion (ppb) gegeben sein. Bezüglich Feuchtigkeitsaufnahmeverhalten sind entsprechend der Vorgabe von Andritz Hydro AG die massenbezogenen Feuchtegehalte für den glasfaser-verstärkten Polyester – PEI-basierenden Blend MAT_REF als Referenzwerte anzusehen.

Unter Schadensfall wird ein Kurzschlussfall definiert, bei welchem eine stark erhöhte Temperatur mit einem regionalen thermischen Abbau des Matrixwerkstoffes einher gehen kann. Ein sicheres Herunterfahren des Generators muss trotz einer etwaigen Schwächung des Rotorkappenwerkstoffes gewährleistet sein und mittels entsprechender Sicherheit berücksichtigt werden. Beeinträchtigungen von Faserverbundwerkstoffen durch Wirbelströme sind nach Angaben der Fa. Andritz Hydro AG (Weiz, A) nicht gegeben und werden aus

diesem Grund nicht weiter untersucht. Abschließend ist anzumerken, dass die Punkte Kontrolle, Montage sowie Instandhaltung nicht Teil der vorliegenden Arbeit waren, jedoch für zukünftige Untersuchungen im Anforderungsprofil angeführt wurden.

5 EIGENSCHAFTEN VON DUROMEREN FASER- VERBUNDWERKSTOFFEN FÜR DEN EINSATZ ALS ROTORENDKAPPENWERKSTOFF

Basierend auf dem Anforderungsprofil wurden zunächst FVW mit einer Mindest-Zugfestigkeit von 500 MPa im trockenen Werkstoffzustand bei Raumtemperatur ausgewählt. Aus den erhaltenen Materialkombinationen wurden im nächsten Schritt die Glasübergangstemperaturen (T_g) der Matrixwerkstoffe im trockenem Zustand gegenübergestellt und jene Materialien mit zu niedrigem T_g ausgeschlossen. Anschließend wurden basierend auf Literaturergebnissen das Feuchtigkeitsaufnahmeverhalten der noch in Frage kommenden Reinharze sowie der FVW gegenübergestellt, und deren Auswirkungen auf die mechanische Eigenschaften der FVW sowie die Verschiebung des T_g der Matrixmaterialien zu tieferen Temperaturen beschrieben. In Hinblick auf die festgelegte Anzahl der Start-Stopp Vorgänge wurden für Faserverbundwerkstoffen unter zyklischer Belastung Literaturwerte vergleichend gegenübergestellt und abschließend Festigkeitsberechnungen mit den ausgewählte Materialpaarungen durchgeführt.

5.1 Mechanische Eigenschaften von Faserverbundwerkstoffen im trockenen Werkstoffzustand

Aufgrund der radialen Hauptbeanspruchungsrichtung und der daraus resultierenden Tangentialspannung im Werkstoff bei einer Rotorendkappe wird für die vorliegende Arbeit ein unidirektionaler (UD) Lagenaufbau des FVW angenommen. Nachdem eine 20-jährige Nutzungsdauer geplant ist und der planmäßige Einsatz, mit Ausnahme von diversen Start-Stopp Vorgängen sowie Schwankungen der Drehzahl zwischen der (Standard) Betriebsdrehzahl und der Überdrehzahl, als eine dementsprechend lange konstante Beanspruchung betrachtet werden kann, liefern die Zugfestigkeitswerte jeweiliger Faserverbundwerkstoffe ein brauchbares erstes Auswahlkriterium. In Abb. 5.1 werden Festigkeitswerte diverser Materialkombinationen aufgrund von computerunterstützten Datenbankinformationen sowie Herstellerangaben dargestellt.

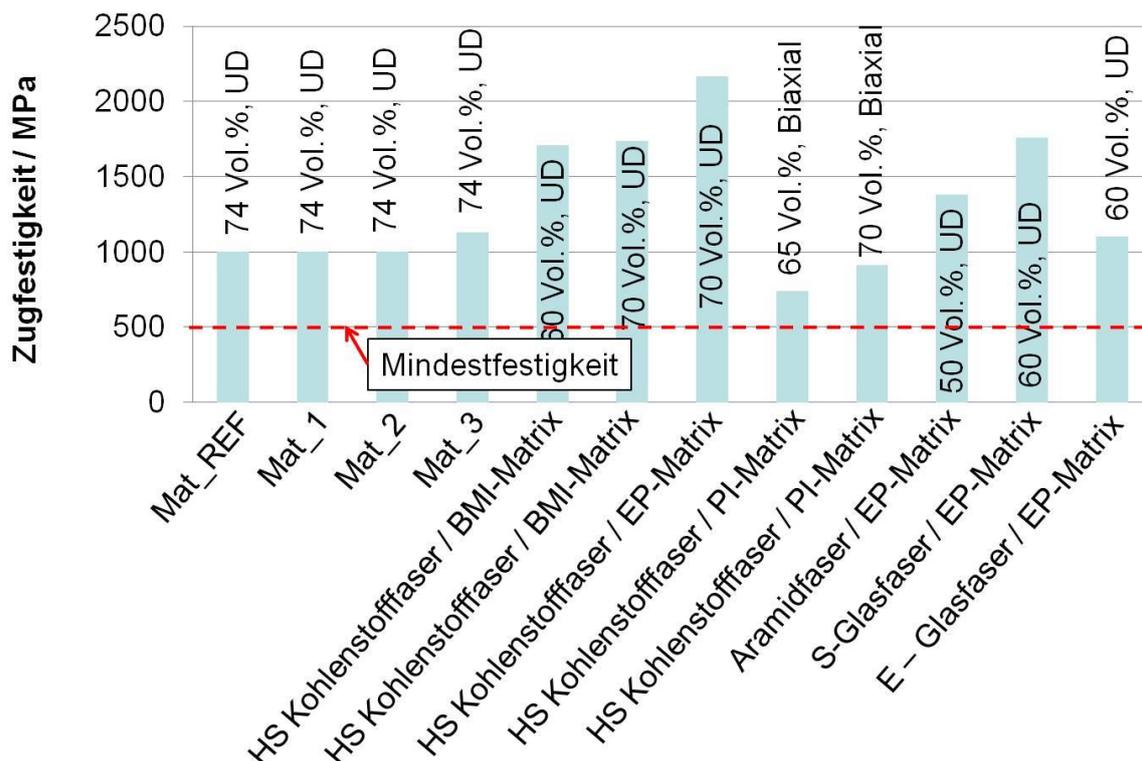


Abb. 5.1: Gegenüberstellung der Zugfestigkeitswerte verschiedener Faser/Matrix Kombinationen mit unidirektionalem bzw. biaxialem Lagenaufbau für unterschiedliche Faservolumsgehalte (Quelle: computerunterstützte Datenbankinformationen, Datenblattangaben des Herstellers)

Dabei wurden Informationen der Materialien MAT_REF, MAT_1, MAT_2 sowie MAT_3 den entsprechenden Datenblättern des Herstellers entnommen. Generell handelt es sich bei diesen FWW um Bandagierbänder aus einem faserverstärkten duromeren Polyester/PEI-basierendem Harz mit Glasfasern mit einem Fasergehalt von 74 Vol.%. Die Faserverstärkung von MAT_3 wurde mittels parallel angeordneter Kevlarfaser realisiert. Gemäß Datenblattangaben weisen diese Werkstoffe folgende Temperaturklassifizierung auf:

- MAT_REF: Klasse F (155°C)
- MAT_1: Klasse H (200°C)
- MAT_2, MAT_3: Klasse C (220°C)

Bezüglich der weiteren in Abb. 5.1 gezeigten Materialien variiert der Fasergehalt in einem Bereich von 50 bis 70 Vol.%.

Es ist gut ersichtlich, dass alle Materialien deutlich über der festgelegten Mindestfestigkeit von 500 MPa liegen. Die niedrigen Zugfestigkeitswerte der HS kohlenstofffaserverstärkten PI-Harze lassen sich durch den biaxialen Lagenaufbau erklären, bei dem sich, im Vergleich zur UD Faserverstärkung, aufgrund der 90° Faserlagen eine geringere Verstärkung in Zugrichtung ergibt. Entsprechende Ergebnisse für UD HS kohlenstofffaserverstärkte PI-Harze wurden in der einschlägigen Literatur nicht angegeben.

5.2 Thermische Einsatzgrenzen von Faserverbundwerkstoffen im trockenen Werkstoffzustand

Bezugnehmend auf das Anforderungsprofil hat die thermische Einsatzgrenze des auszuwählenden FWW mindestens eine Klasse F-Zertifizierung (155°C) aufzuweisen, bzw. muss die Glasübergangstemperatur des Matrixwerkstoffes, wie bereits in Abschnitt 4.4 festgelegt, mindestens 180°C betragen. In Abb. 5.2 sind die Glasübergangstemperaturen verschiedener Reinharze im trockenen Werkstoffzustand dargestellt. Während die untere strichlierte Linie die Grenze bezüglich der Einsatztemperatur T_E von 155°C definiert, soll die obere strichlierte Linie jenen T_g charakterisieren, der unter Einhaltung eines Sicherheitsfaktors von mindestens 25 K über der T_E erforderlich ist. Im Diagramm sind weiters die durch unterschiedliche Einsatzstoffe (Harz, Härter, Beschleuniger) begründeten breiten Spektren des T_g durch rote Balken gekennzeichnet.

Die in der Literatur dargelegten T_g -Werte für UP- und VE- Harze liegen beide unter den geforderten 180°C und erfüllen daher die Anforderung für eine Anwendung als polymere Matrix für die Rotorkappenanwendung nicht. Die hochtemperaturbeständigeren EP-Harze liegen oberhalb des geforderten T_g und würden daher für den vorliegenden Anwendungsfall in Frage kommen. PF-Harze weisen laut Literatur einen T_g von bis zu 200°C auf, welcher ebenfalls der Anforderung entsprechen würde, allerdings kommt es bei diesen Werkstoffen im Zuge der Kondensationspolymerisation bei der Verarbeitung zur Dampfbildung, die zu Dampfeinschlüssen und Lunkerbildung führen kann (Flemming et al., 1995). Was die BMI-, PI- und Polyesterimidharze anbetrifft weisen diese Werkstoffe einen

ausreichend hohen T_g im trockenen Werkstoffzustand auf und wären demzufolge als Rotorendkappenmaterial zulässig.

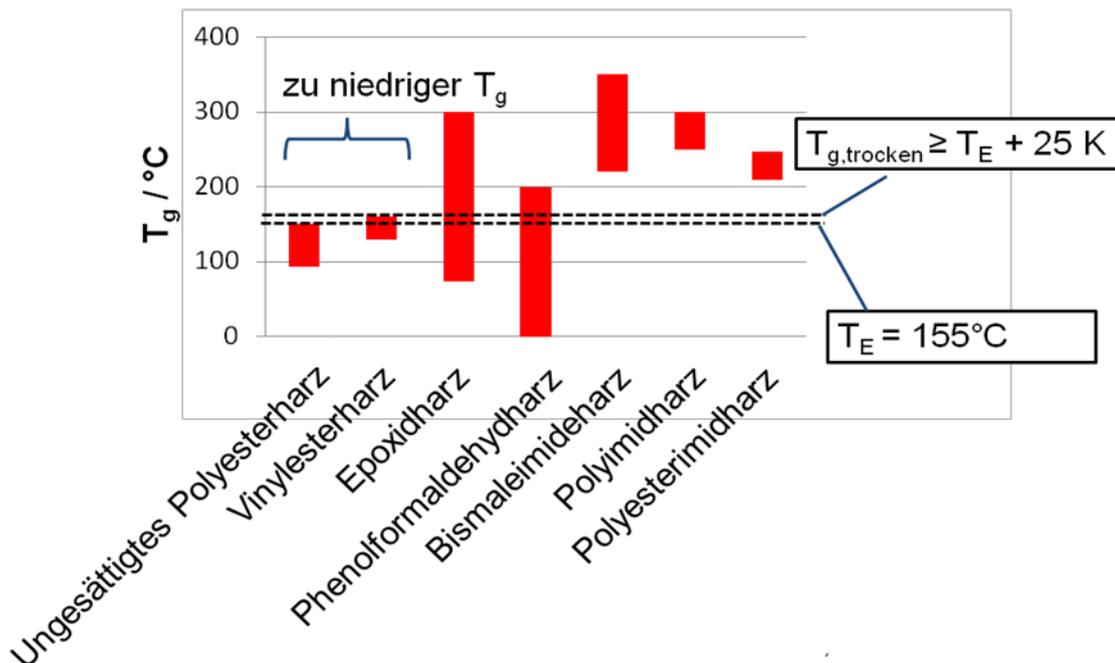


Abb. 5.2: Literaturdaten von Glasübergangstemperaturen verschiedener Matrixwerkstoffe im trockenen Werkstoffzustand (Ehrenstein, 2006, Catsman, 2005)

5.3 Feuchtigkeitsaufnahmeverhalten von polymeren Matrixmaterialien

Da laut Anforderungsprofil das Material MAT_REF hinsichtlich Feuchteaufnahmeverhalten als Referenz dienen sollte, diesbezüglich jedoch weder im Datenblatt des Herstellers noch von Herstellerseite selbst entsprechende Informationen verfügbar waren, wurde der Einfluss von feuchtwarmen (hot/wet) Umgebungsbedingungen auf die Eigenschaften der polymeren Matrix anhand von Literaturergebnissen betrachtet. In Abb. 5.3 sind die massenspezifischen Feuchteaufnahmewerte basierend auf Literaturwerten von UP-, VE-, EP-, BMI und PI-Harzen durch Auslagerung in Wasser angegeben. UP-, EP- und PI-Harze wurden dabei bei 23°C in Wasser ausgelagert. Nähere Angaben zur Auslagerungszeit, bzw. ob diese Angaben für einen gesättigten Werkstoffzustand vorliegen, waren in der Literatur nicht verfügbar (Oberbach, 2001). VE-Harze wurden bei 23°C 75 Wochen lang in Wasser ausgelagert. Angaben, ob sich nach der Auslagerungszeit

ein gesättigter Zustand eingestellt hat, lagen nicht vor (Karbahari, 2006). BMI-Harze wurden bei 20°C in Wasser ausgelagert, bis sich ein gesättigter Zustand eingestellt hat. Angaben hinsichtlich Auslagerungszeit wurden in der Literatur keine gemacht (Chapling et al., 1999). In Hinblick auf PF-Harze waren dem Autor der vorliegenden Arbeit keine relevante Literatur bekannt, in der das Feuchteaufnahmeverhalten aufgrund einer Auslagerung in Wasser angeführt gewesen wäre. Während der Feuchtegehalt für das UP-Harz 0,4 wt.% beträgt, weisen PI-Harze mit 3 wt.% den höchsten Wert der ausgewählten Harzsysteme auf. Im Vergleich dazu liegen Feuchteanteile der VE-, EP- und BMI- Harzen gegenüber jenen der UP-Harze auf einem teilweise deutlich höherem Niveau.

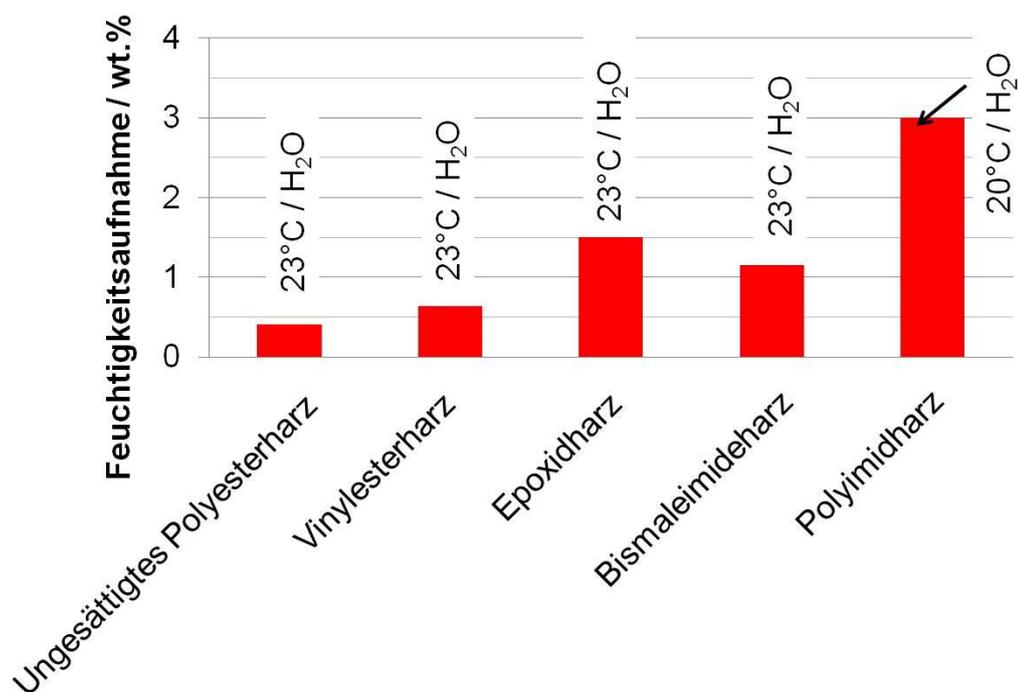


Abb. 5.3: Feuchtigkeitsaufnahme verschiedener polymerer Matrixmaterialien aufgrund einer Auslagerung bei 20 bzw. 23°C in Wasser (Oberbach, 2001, Karabahari, 2006, Chaplin et al., 1999)

Das Feuchteaufnahmeverhalten ist neben der Lagerungszeit auch von der Temperatur abhängig. Dies soll in Abb. 5.4 am Beispiel EP dargestellt werden. Bedingt durch die höhere Temperatur kommt es zu einem deutlich schnelleren Feuchteaufnahmeverhalten als bei niederen Temperaturen. Wenngleich die Auslagerung bei 70°C nicht in Wasser erfolgte, ist dennoch ersichtlich, dass höhere Temperaturen höhere Feuchtegehalte zur Folge haben.

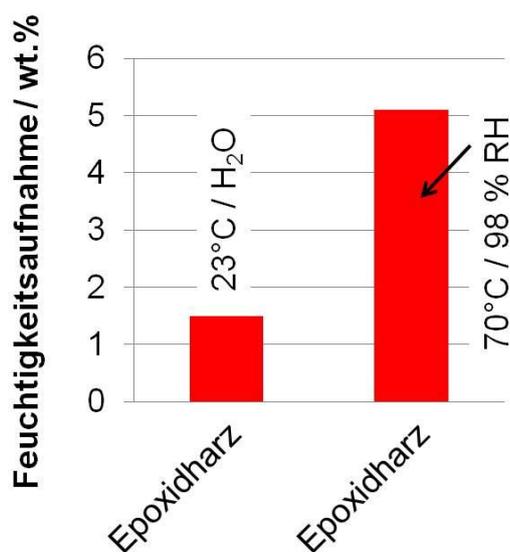


Abb. 5.4 Feuchtigkeitsaufnahmeverhalten eines Epoxidharzmatrixwerkstoffes bei einer Auslagerung bei RT in Wasser sowie bei 70°C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 98% (Obermann, 2001, Ziegmann, 1984)

5.4 Einfluss von feuchtwarmen Umgebungsbedingungen auf die Faserverbundeigenschaften

In welcher Art und in welchem Ausmaß eine Feuchtigkeitsaufnahme im FWW erfolgt, bzw. wie sich diese auf die Faserverbundeigenschaften auswirkt hängt von mehreren Faktoren ab. So kann beispielsweise ein hydrophiles Verhalten des Faserwerkstoffes, wie dies beispielsweise bei der Aramidfaser gegeben ist, zu einer drei- bis vierfach höheren Feuchteaufnahme des Faserverbundes führen, wie bei vergleichbaren Glas- oder Kohlenstofffaserverbundwerkstoffen (Wolfrum, 1999).

Glasfasern sind zwar nicht hydrophil, weisen jedoch dahingehend ein besonders kritisches Verhalten gegenüber Feuchtigkeit auf, als dass kovalente Bindungen zwischen der Siloxan-Grundstruktur der Schlichte und der Glasfaser durch Wasserstoffbrückenbindungen ersetzt werden, die sich zwischen Glasoberfläche, Wassermolekülen und Hydroxid-Gruppen der Schlichte ausbilden. Nachdem die Schlichte als Haftvermittler in einem Faserverbundwerkstoff fungiert, kann eine Beschädigung der kovalenten Bindung an der Faser/Matrix-Interphase eine Delaminierung zwischen Faser und Matrix zur Folge haben (Abdel-Magid et Al,

2005). Aufgrund des weitverbreiteten Wissens über das kritische Verhalten von glasfaserverstärkten („glass fiber reinforced“, GFR) Verbundwerkstoffen unter Feuchteinfluss (Karbhari, 2006), wurden speziell für solche Anwendungen entsprechende Produktstandards erstellt. Beispielsweise wird in den Llyd's Rules gemäß EN 13 121 empfohlen die Einsatztemperatur 30 bis 40°C unterhalb der Glasktemperatur anzusetzen. Dies wäre bei einer Auswahl von glasfaserverstärkten Matrixmaterialien entsprechend zu berücksichtigen. Die Kohlenstofffaser weist ein inertes Verhalten gegenüber Feuchtigkeitseinflüsse auf. Somit ist bei CFR FVW bei einer Konditionierung in feuchter Umgebung mit keiner Feuchtigkeitsaufnahme durch die Faser zu rechnen (Wolfrum, 1999).

Im Folgenden wird der Einfluss von feuchtwarmen Umgebungsbedingungen auf die mechanischen Eigenschaften von FVW erläutert. In einer Veröffentlichung von Kumar et al. (2008) wurde das Feuchteaufnahmeverhalten und die Veränderung von mechanischen Kennwerten von kohlenstoff-faserverstärkten Epoxidharzverbunden mit einem Faservolumenanteil von 64% untersucht. Dabei wurden unidirektional aufgebaute Prüfkörper bei 23°C und 100%iger Luftfeuchtigkeit für 168 Tage ausgelagert. Nach dieser Auslagerungszeit wurde bei nicht gesättigtem Zustand ein Feuchtegehalt von 1,2 wt.% bestimmt. Anschließend wurden an den Proben nach einer 48 stündigen Lagerung bei Laborbedingungen mechanische Prüfungen bei 23°C durchgeführt. Es wurde ein Zugfestigkeitsabfall von 1800 auf 1372 MPa und ein E-Modul-Abfall von 140 auf 126 GPa in Faserlängsrichtung dokumentiert.

Shen und Springer (1976) führten Untersuchungen durch, bei denen CFR Epoxidharzverbunde mit einem Faservolumenanteil von 68% bei 149°C und 100% relativer Luftfeuchtigkeit bis zum gesättigten Zustand, welcher sich bei einem massebezogenen Feuchtegehalt von 1,5 wt.% einstellte, ausgelagert wurden. Bei anschließenden Zugversuchen fiel die Zugfestigkeit bei diesen unidirektional aufgebauten Verbunden von 1700 MPa auf 935 MPa ab. Es wurden keine weiteren Angaben zu Prüfbedingungen oder hinsichtlich Veränderungen des E-Moduls gemacht (Shen und Springer, 1976).

Abdel-Magid et al. (2005) konditionierten kontinuierlich hergestellte glasfaserverstärkte Epoxidharzverbunde mit einem Fasergehalt von 52 Vol.% bei Raum-

temperatur sowie bei 65°C in destilliertem Wasser. Während der Konditionierung wurde eine Zugspannung in Längsrichtung aufgebracht, die 20% der Zugfestigkeit des Faserverbundes entsprach. Nach einer Auslagerungszeit von 3000 Stunden bei Raumtemperatur wurde ein Feuchtegehalt von 1,7 wt.% gemessen. Bei 65°C wurden die Proben zwar nur für 1000 Stunden ausgelagert, es wurde jedoch ein wesentlich höherer Feuchtigkeitsgehalt von 7,8 wt.% verzeichnet. Anschließend wurden die Probekörper im Exsikkator getrocknet und mechanische Untersuchungen bei Raumtemperatur durchgeführt. Jene Prüfkörper, die für 3000 Stunden unter Spannung bei Raumtemperatur in Wasser konditioniert wurden, zeigten einen deutlichen Abfall der Zugfestigkeit, von 767 auf 499 MPa, sowie der Bruchdehnung, von 2,2 auf 1,5%. Dieser Abfall wurde aufgrund von Rissfortpflanzung in der Matrix und in der Interphase erklärt. Weiters nahm der E-Modul von 36,5 auf 33,2 GPa ab. Bei kürzeren Auslagerungszeiten und höheren Temperaturen kam es zu Plastifizierungseffekten und zu einem Modulabfall von 36,1 auf 26,1 GPa. Die relativ geringe Zugfestigkeitsabnahme von 18% wurde dahingehend nachvollzogen, als dass es bei der Auslagerung zur Substitution von chemischen Bindungen durch physikalischen Bindungen kam, diese jedoch eine gute Spannungsübertragung am Interface gewährleisten konnten.

Der Temperatureffekt auf das mechanische Verhalten von glasfaserverstärkten Epoxidharzverbunden ohne Feuchteinfluss wurde von Aktas und Karakuzu (2009) untersucht. Es wurden Probekörper verwendet, die einen unidirektionalen Lagenaufbau und einen Faservolumenanteil von 65% hatten. Diese wurden auf 100°C vortemperiert und in einer Thermokammer bei 100°C geprüft. Bei der Zugfestigkeit wurde eine Abnahme von 780 auf 500 MPa gemessen. Der E-Modul war noch stärker betroffen und erreichte, von den ursprünglichen 40 GPa, bei 100°C lediglich 19 GPa.

Talreja und Manson (2001) veröffentlichten Ergebnisse, bei denen aramidfaserverstärkte Epoxidharzverbunde bei 71°C sowie bei 177°C ausgelagert wurden und anschließend bei diesen Temperaturen geprüft wurden. Es konnte keine signifikante Zugfestigkeitsabnahme und nur eine sehr geringe E-Modul-Abnahme von 4% nach der Auslagerung und Prüfung bei der niedrigeren Temperatur festgestellt werden. Bei der höheren Temperatur betrug die Abnahme

der Zug-festigkeit 32% und jene des E-Moduls 18%. Als Referenz dienten jeweils Prüfungen, die an trockenen Probekörpern bei Raumtemperatur durchgeführt wurden. Angaben hinsichtlich prozentueller Feuchtigkeitsaufnahme wurden nicht gemacht.

5.5 Beurteilung der FVW anhand von Materialkosten

In diesem Kapitel werden FVW, die im Hinblick auf den T_g der jeweiligen Matrixmaterialien die thermische Anforderung in Bezug auf den trockenen Werkstoffzustand erfüllen, hinsichtlich ihrer Materialkosten verglichen, wobei dem Autor der vorliegenden Arbeit keine Informationen über Materialkosten der Materialien MAT_REF, MAT_1, MAT_2 und MAT_3 vorliegen. In Abb. 5.5 sind die Materialkosten in USD pro kg verschiedener faserverstärkter BMI-, PI- und EP-Harze gemäß computerunterstützten Datenbankinformationen angegeben.

Während kohlenstofffaserverstärktes EP-Harz mit ca. 60 USD / kg angegeben wurde, liegen die Materialkosten der kohlenstofffaserverstärkten BMI-Harze mit 97 bis 112 USD / kg auf einem deutlich höheren Niveau. Kohlenstofffaserverstärkte PI-Harze weisen mit 139 bis 159 USD / kg, wie in Abb. 5.5 gezeigt den höchsten Materialpreis auf. Aramidfaserverstärkte EP-Harze sind mit 134 USD / kg, im direkten Vergleich mit kohlenstofffaserverstärkte EP-Harzen, bezüglich Materialkosten mehr als doppelt so teuer. Glasfaserverstärkte EP-Harzwirkstoffe zählen in diesem Vergleich mit 18 bis 38 USD / kg zu den günstigsten FVW.

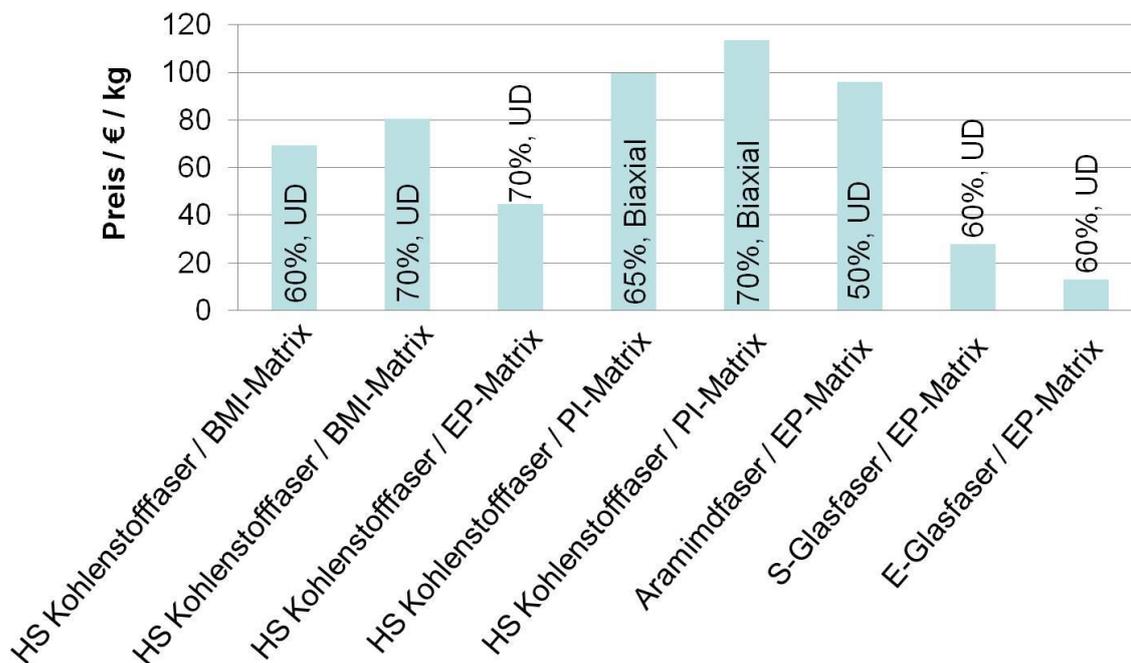


Abb. 5.5: Gegenüberstellung der Materialkosten verschiedener Faser/Matrix Kombinationen mit unidirektionalem bzw. biaxialem Lagenaufbau für unterschiedliche Faservolumenanteile (Quelle: computerunterstützte Datenbankinformationen)

5.6 Eigenschaften von Faserverbundwerkstoffen hinsichtlich zyklischer Belastung

Bedingt durch die auftretenden Start-Stopp-Vorgänge des Generators kommt es zu einer zyklischen Belastung des Rotorendkappenmaterials. Eine dementsprechende Auslegung mit einer erforderlichen Schwingspielzahl von 10000, die der Anzahl an Ein- und Ausschalten entspricht, ist daher laut Anforderungsprofil vorgesehen. Aufgrund der in den vorigen Abschnitten gewonnenen Erkenntnissen werden folglich Faserverbunde auf EP-Harzbasis weiterführend dargestellt, wobei das Referenzmaterial MAT_REF in die Betrachtungen miteinbezogen wird.

Wu et al. (2010) untersuchten das Verhalten von FVW bei zyklischer Beanspruchung. Dabei wurden unidirektional aufgebaute, kohlenstoff- und glasfaserverstärkte Epoxidharze mit einem Harzgehalt von 50 Vol.% mit einer Frequenz von 5 Hz und einem R-Verhältnis von 0,1 in Faserrichtung auf Zug belastet. Als Ergebnis wurde der Quotient aus Maximalkraft des zyklischen Versuchs und Maximalkraft des monotonen Zugversuchs ($F_{\max, \text{zyklisch}} / F_{\max, \text{monoton}}$)

in Relation zur Schwingenspielzahl aufgetragen. Ein Versagen kohlenstoffserverstärkter Verbundwerkstoffe bei 10^4 Zyklen wurde bei einem $F_{\max, \text{zyklisch}} / F_{\max, \text{monoton}}$ -Verhältnis von 0,89 festgestellt, bei Glasfaserverbunden lag dies bei 0,73.

In Roylance (1982) wurden Untersuchungen hinsichtlich Ermüdungsverhalten an unidirektional aufgebauten aramidfaserverstärkten Epoxidharzprüfkörpern mit einem Faservolumengehalt von 70% in Faserlängsrichtung durchgeführt. Die Versuche wurden im Zug/Zug-Modus bei einem R-Verhältnis von 0,1 und einer Prüffrequenz von 10 Hz vorgenommen. Im Bezug auf die Zugfestigkeit aus dem monotonen Zugversuch wurde bei der zugschwellenden Belastung ein Festigkeitsverlust von 6 – 7% pro Dekade dokumentiert. Ein Versagen bei 10^4 Zyklen wurde bei einem $F_{\max, \text{zyklisch}} / F_{\max, \text{monoton}}$ -Verhältnis von 0,75 dargelegt.

Gemäß Datenblattangaben und Informationen von Andritz Hydro AG (Weiz, A) liegt die Beanspruchungsobergrenze für den Werkstoff MAT_REF bei einer zugschwellenden Belastung für 10^4 Zyklen bei 43% der Zugfestigkeit des monotonen Zugversuchs. Detailliertere Angaben bezüglich Prüffrequenz oder R-Verhältnis waren dem Autor der vorliegenden Arbeit nicht bekannt.

Basierend auf den Ergebnissen aus der Literatur sind nun in Abb. 5.6 die Zugfestigkeitswerte bzw. die jeweilige Zugschwellfestigkeit für 10 000 Zyklen für verschiedene Materialien gegenübergestellt. Die Daten von kohlenstoff- und glasfaserverstärkten Epoxidharzen stammen aus der Veröffentlichung von Wu et al. (Wu et al., 2010), Ergebnisse für aramidfaserverstärkte Epoxidharze wurden aus (Roylance, 1982) entnommen; Angaben zu MAT_REF wurden in Anlehnung an Datenblattinformationen sowie aufgrund zusätzlicher Informationen (Lerchbaum, 2010) gemacht. Um einen direkten Vergleich leichter zu ermöglichen wurden alle Werte auf einen Faservolumenanteil von 70 % normalisiert.

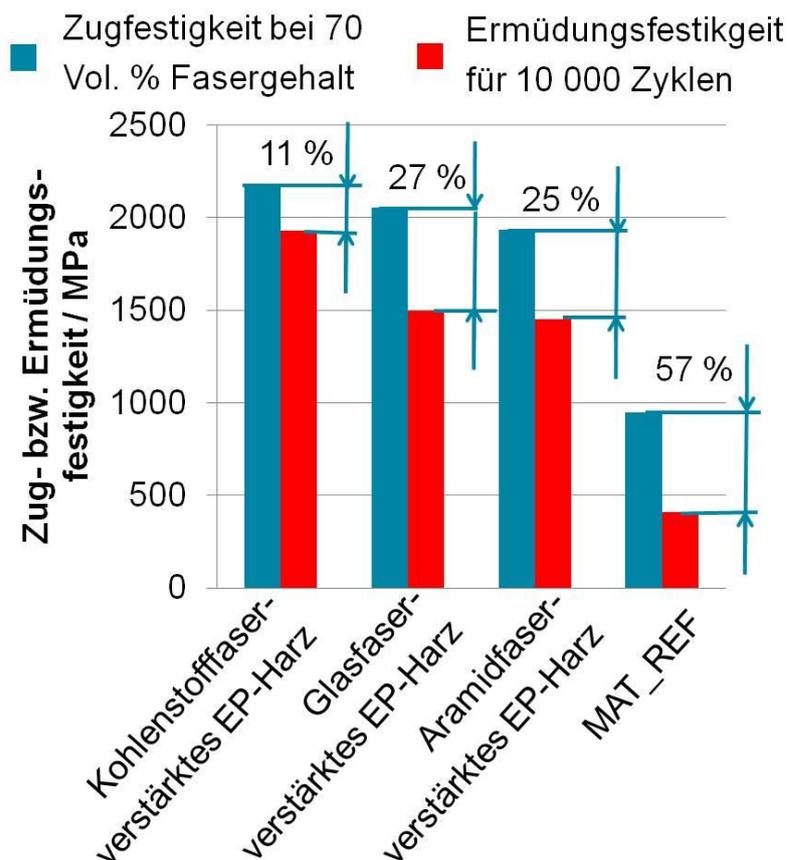


Abb. 5.6 Gegenüberstellung der Ermüdungsfestigkeit bei Zugschwellbeanspruchung in Faserrichtung für 10 000 Zyklen und der Zugfestigkeit des monotonen Zugversuchs für kohlenstoff-, glas- und aramidfaserverstärkte Epoxidharzmaterialien sowie des Materials MAT_REF

5.7 Rechnerische Auslegung und Kostenaspekte

Für einen direkten Vergleich der relevanten Faserverbundwerkstoffe wurden im letzten Schritt der Materialauswahl überschlagsmäßige Berechnungen hinsichtlich einer mechanischen und wirtschaftlichen Bauteilauslegung durchgeführt. Als Eingangsdaten wurden computerunterstützte Datenbankinformationen bzw., im Falle des Materials MAT_REF, vom entsprechenden Datenblatt verwendet. In Anlehnung an das Anforderungsprofil erfolgte die Auslegung in Hinblick auf den zyklischen Anwendungsfall, wobei die jeweiligen Zugfestigkeitswerte mit einer prozentuellen Abminderung (vgl. Abb. 5.6) korrigiert. An dieser Stelle sei anzumerken, dass sich im realen Anwendungsfall zusätzliche Effekte, wie z.B. eine 50 jährige Einsatzzeit, Feuchtigkeit und erhöhte Temperatur, überlagern

können und zu einer möglicherweise höheren Beeinträchtigung des mechanischen Verhaltens führen können. Der durchgeführten Auslegung lagen Formeln zu Grunde, die von der Fa. Andritz Hydro AG (Weiz, A) zur Verfügung gestellt wurden. Anhand Gleichung 5.1 wurde die Spannung der Rotorendkappe berechnet, die sich aufgrund ihres Eigengewichts ergibt ($\zeta_{\text{Fliehkraft,Kappe}}$). Diese wird durch die Dichte ρ des verwendeten FVW, der Überdrehzahl $n_{\text{über}}$ und der Kappengeometrie d_a und d_i bestimmt.

$$\sigma_{\text{Fliehkraft,Kappe}} = \rho * \left(\frac{n_{\text{über}}}{60} * 2 * \pi \right)^2 * \left(\frac{d_a + d_i}{2000} \right)^2 * 10^{-6} \quad (5.1)$$

Gleichung 5.2 galt als Berechnungsgrundlage für die Ermittlung derjenigen Spannungskomponente, die aufgrund der zentrifugalen Belastung des Wickelkopfes entsteht ($\zeta_{\text{Wickelkopf}}$). Einflussparameter hierfür sind die Masse des Wickelkopfes $m_{\text{Wickelkopf}}$, der radiale Schwerpunkt des Wickelkopfes SP_{rad} , die Drehzahl und die Rotorendkappengeometrie t_{Kappe} und b_{Kappe} .

$$\sigma_{\text{Wickelkopf}} = m_{\text{Wickelkopf}} * \frac{SP_{\text{rad}}}{1000} * \frac{\left(\frac{n_{\text{über}}}{60} * 2 * \pi \right)^2}{(2 * \pi) * (t_{\text{Kappe}} * b_{\text{Kappe}})} \quad (5.2)$$

Anhand Gleichung 5.3 konnte die absolute tangentielle Dehnung ε_{abs} ermittelt werden. Diese setzt sich aus den Spannungskomponenten aus Gleichung 5.1 und 5.2, dem E-Modul des Werkstoffes E und dem Aussendurchmesser d_a der Kappe zusammen.

$$\varepsilon_{\text{abs}} = \frac{(\sigma_{\text{Fliehkraft,Kappe}} + \sigma_{\text{Wickelkopf}})}{E} * \frac{d_a}{2} \quad (5.3)$$

Unter Zuhilfenahme von Gleichung 5.4 wurde die absolute tangentielle Spannung $\zeta_{\text{tan,gesamt}}$, welche einer Überlagerung der Spannungskomponenten aus Gleichung 5.1 und 5.2 entspricht, errechnet.

$$\sigma_{tan,gesamt} = \sigma_{Wickelkopf} + \sigma_{Fliehkraft,Kappe} \quad (5.4)$$

Schlussendlich konnte auf Basis von Gleichung 5.5. die mechanische Sicherheit der Rotorendkappe unter Verwendung des jeweiligen FVW bestimmt werden. Diese ergibt sich aus dem Quotienten der materialspezifische Ermüdungsfestigkeit ζ_{sch} und der auftretende absolute Tangentialspannung im Bauteil.

$$Sicherheit = \frac{\sigma_{sch}}{\sigma_{tan,gesamt}} \quad (5.5)$$

In Tabelle 5.1 sind jene Materialien und Kennwerte angegeben, die als Eingabedaten für die Berechnung dienen.

Tabelle 5.1: Eingangsdaten für die Bauteilauslegung

Material	Preis [€/kg]	Zugfestigkeit ζ_z [MPa]	E-Modul E [GPa]	Dichte ρ [kg/dm ³]	Ermüdungsfestigkeit ζ_{sch} [MPa]
E-Glasfaser / EP	13	1100	45	1,9	803
HS Kohlenstofffaser / EP	45	2165	154	1,6	1927
Aramidfaser / EP	96	1380	80	1,4	1035
MAT_REF	*)	1000	62	2,0	432

*) Materialkosten für das Material MAT_REF standen nicht zur Verfügung

In Abb. 5.7 sind die errechneten Sicherheiten für die Rotorendkappe aus von HS kohlenstoff-, E-glas- und aramidfaserverstärkten Epoxidharzmaterialien sowie aus dem Material MAT_REF dargestellt. Unter Einhaltung der angegebenen Bauteildicke wird mittels eines HS kohlenstofffaserverstärktem Epoxidharz mit 8,1 die höchste Sicherheit erreicht. E-glas- und aramidfaserverstärkte Epoxidharzverbunde liegen mit einer Sicherheit von 3,3 bzw. 4,4 auf einem deutlich niederen Niveau, befinden sich jedoch oberhalb der geforderten Mindestsicherheit von 2,5. Das Material MAT_REF unterschreitet mit einer Sicherheit von 1,8 den geforderten Mindestwert.

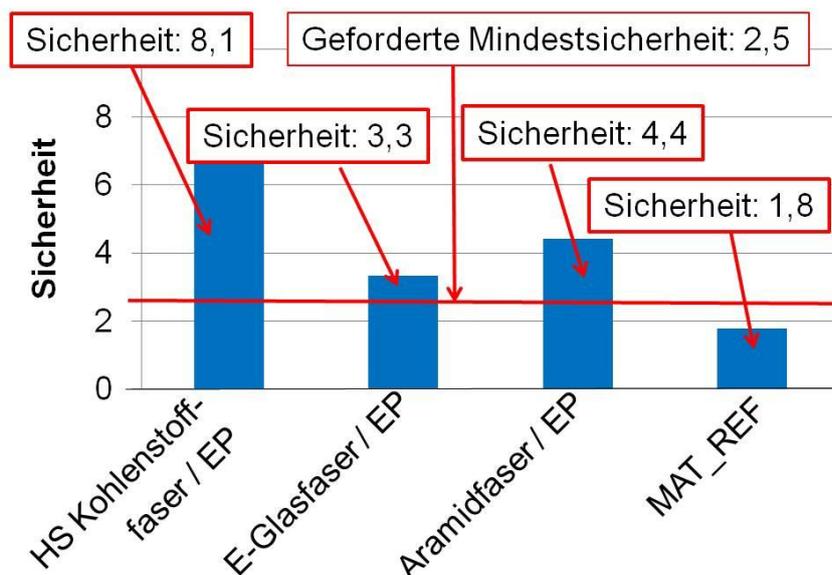


Abb. 5.7: Errechnete Sicherheit der Rotorendkappe bei vorgegebener Kappendicke für kohlenstoff-, glas- und aramidfaserverstärkte Epoxidharzverbunde sowie für das Material MAT_REF

In Abb. 5.8 sind auf Basis von volumetrischen Berechnungen die Materialkosten einer Rotorendkappe aus HS kohlenstoff-, E-glas- und aramidfaser-verstärkten Epoxidharzmaterialien dargestellt. Hierbei wurde unter Errechnung des Volumens der Rotorendkappe und unter Einbeziehung der Dichte des FWW das Gewicht der Rotorkappe ermittelt und mittels Materialkosten auf die Materialkosten der Rotorendkappe geschlossen. Aramidfaserverstärkte Epoxidharze weisen mit über 3100 € pro Kappe den höchsten Materialpreis auf, den niedrigsten haben E-glasfaserverstärkte EP-Harze mit etwa 590 €. Unter Einsatz eines HS kohlenstoff-faserverstärkten Epoxidharzverbundes betragen die Materialkosten für eine Rotorendkappe bei vorgegebener Kappendicke etwa 1660 €.

Im zweiten Schritt wurden die Dicken der Rotorendkappen insofern optimiert, sodass unter Verwendung des jeweiligen FWW eine Sicherheit von 2,5 erreicht werden konnte. Als Ergebnis sind sie Materialkosten für die Rotorendkappen mit angepasster Wanddicke auf Basis von volumetrischen Berechnungen in Abb. 5.9 dargestellt. Als wesentliche Veränderung ist das Verhältnis der Materialkosten zwischen Kohlenstoff- und Glasfaserverbunden hervorzuheben. Aufgrund der Möglichkeit die Wandstärke durch den Einsatz hochfester Kohlenstoffaserverstärkter EP-Harze deutlich zu reduzieren, wären die Rotorendkappen aus

diesem Werkstoff preislich fast mit jenen aus E-glasfaserverstärkten Epoxidharzverbunden gleichzusetzen.

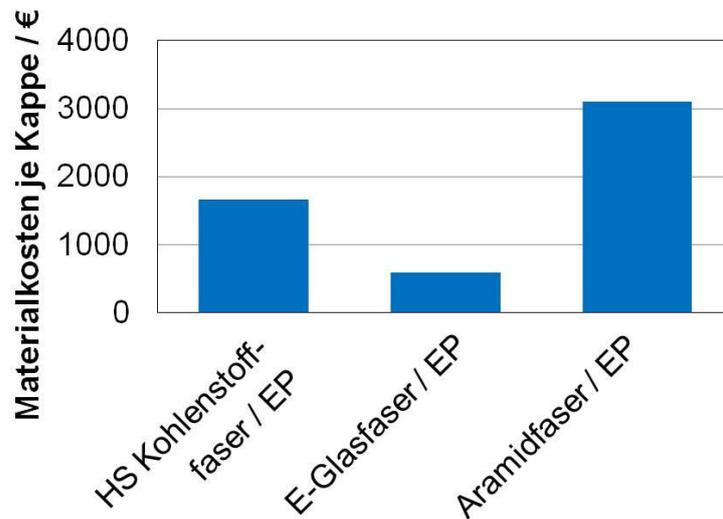


Abb. 5.8: Errechnete Materialkosten je Rotorendkappe bei vorgegebener Kappendicke für kohlenstoff-, glas- und aramidfaserverstärkte Epoxidharzverbunde

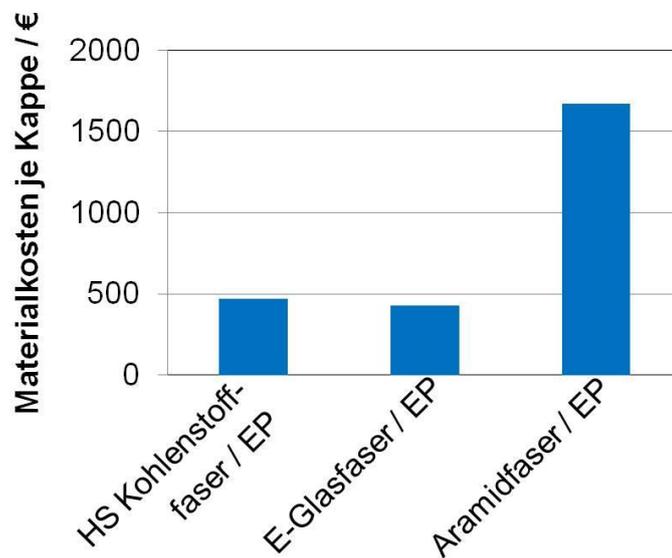


Abb. 5.9: Errechnete Materialkosten je Rotorendkappe bei angepassten Wanddicken für eine Sicherheit von 2,5 für kohlenstoff-, glas- und aramidfaserverstärkte Epoxidharzverbunde

6 SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK

Ziel dieser Arbeit war es, die Anwendbarkeit von Faserverbundwerkstoffen für einen Einsatz als potentiellen Rotorendkappenwerkstoff in Turbogeneratoren zu untersuchen. Dabei wurde der Fokus auf Lamine, bestehend aus einer Faserverstärkung mittels gerichtet angeordneter, synthetisch organischen (Kohlenstoff- und Glasfasern) sowie synthetisch anorganischen Endlosfasern (Aramidfasern), und aus einem duromeren Matrixmaterial, gelegt. Als Grundlage für eine Beurteilung der Anwendbarkeit der FVW diente ein Lastenheft, in welchem die physikalischen und mechanischen Rahmenbedingungen für den Anwendungsfall definiert wurden. Im ersten Schritt der Werkstoffwahl wurden jene FVW mit einer, gemäß im Vorfeld auf Basis von Simulationsergebnissen ermittelten, ausreichend hohen Zugfestigkeit von 500 MPa ausgewählt. Konkret waren dies Aramid-, Glas- und Kohlenstofffaserverbunde mit Vinylester-, ungesättigter Polyester-, Epoxid-, Phenolformaldehyd-, Bismaleimid-, Polyimid-, und Polyesterimid-Matrix. Im nächsten Schritt wurden die Glasübergangstemperaturen der Matrixwerkstoffe im trockenen Zustand gegenübergestellt und jene Materialien einem T_g unter 180°C nicht weiter behandelt. Matrixmaterialien, welche den thermischen Anforderungen gerecht werden konnten waren EP-, PF-, BMI-, PI- und PEI-Harze.

Anschließend wurde basierend auf Literaturergebnissen das Feuchtigkeitsaufnahmeverhalten der noch in Frage kommenden Reinharze, namentlich Epoxid-, Phenolformaldehyd-, Bismaleimid-, Polyimid-, und Polyesterimidharze, bei Raumtemperatur sowie der FVW dargestellt, und deren Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften der FVW sowie die Verschiebung des T_g der Matrixmaterialien zu tieferen Temperaturen beschrieben. Generell lag die Feuchteaufnahme der betrachteten Reinharze zwischen 0,4 und 1,5 wt. %. Lediglich Polyimidharze hatten mit einem Feuchtegehalt von 3 wt.% ein deutlich höheres Niveau. Am Beispiel des Epoxidharzes wurde gezeigt, dass höheren Umgebungstemperaturen ein deutlich schnelleres Feuchtigkeitsaufnahmeverhalten des Matrixwerkstoffes bewirken. In Bezug auf Faserwerkstoffe weisen Aramidfasern ein hydrophiles Feuchteaufnahmeverhalten auf, welches im

Faserverbund deutlich höhere Feuchtegehalte bewirken kann. Weiters wurde auf das kritische Verhalten von glasfaserverstärkten Verbundwerkstoffen in Hinblick auf Feuchtigkeitseinwirkung hingewiesen, wodurch eine Beschädigungen von kovalenten Bindungen am Faser/Matrix-Interphase auftreten kann. Die Kohlenstofffaser weist ein inertes Verhalten gegenüber Feuchtigkeitseinflüsse auf. Somit ist bei kohlenstofffaserverstärkten Verbundwerkstoffen bei einer Konditionierung in feuchter Umgebung mit keiner Feuchtigkeitsaufnahme durch die Faser zu rechnen. Hinsichtlich dem Einfluss von feuchtwarmen Umgebungsbedingungen auf die mechanischen Eigenschaften von Faserverbundwerkstoffen war erwartungsgemäß in den beobachteten Materialien ein Abfall der Zugfestigkeit und des E-Moduls in Faserlängsrichtung ersichtlich. Aufgrund von Plastifizierungseffekten kommt es in Matrixmaterialien durch die aufgenommene Feuchtigkeit zu einer Reduktion des T_g , wobei man für den vorliegenden Anwendungsfall mit einem Abfall von 50-70°C rechnen kann.

Im Bezug auf die festgelegte Anzahl von 10000 Start-Stopp Vorgängen wurden für Faserverbundwerkstoffen unter zyklischer Belastung Literaturwerte vergleichend gegenübergestellt und abschließend Festigkeitsberechnungen mit den ausgewählte Materialpaarungen im Hinblick auf den zyklischen Anwendungsfall durchgeführt. Ein Versagen bei 10^4 Zyklen tritt bei kohlenstofffaserverstärkten Epoxidharzen auf, wenn die Maximalkraft des zyklischen Versuchs 89% der Maximalkraft des monotonen Zugversuchs beträgt. Bei glas- und aramidfaserverstärkten Epoxidharzen liegt dieser Wert auf einen niederen Niveau und beträgt 73 bzw. 75%, das Material MAT_REF weist hier mit 43% den niedrigsten Wert auf.

Bei den durchgeführten Festigkeitsberechnungen wurden zunächst die mechanischen Sicherheiten der Rotorendkappen errechnet, die sich durch den Einsatz der unterschiedlichen Faserverbundmaterialien ergeben. Rotorendkappen aus kohlenstofffaserverstärkte Epoxidharzen erreichten mit einer Sicherheit von 8,1 den höchsten Wert, jene aus glas- und aramidfaserverstärkten Epoxidharzen waren mit 3,3 bzw. 4,4 niedriger anzusiedeln. Durch den Einsatz vom Material MAT_REF wurde mit einer Sicherheit von 1,8 die geforderte Mindestsicherheit von 2,5 nicht erreicht. Im zweiten Schritt der Berechnungen wurden die Dicken der Rotorendkappen insofern optimiert, sodass unter Verwendung des jeweiligen FVV

eine Sicherheit von 2,5 erreicht werden konnte. Aufgrund der Möglichkeit die Wandstärke durch den Einsatz hochfester HS kohlenstoffaserverstärkter EP-Harze deutlich zu reduzieren, wären Rotorendkappen aus diesem Werkstoff preislich fast mit jenen aus E-glasfaserverstärkten Epoxidharzverbunden gleichzusetzen. Rotorendkappen aus aramidfaserverstärkten Epoxidharz sind hinsichtlich Materialkosten deutlich höher anzusetzen.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass unter Bezugnahme auf das erstellte Anforderungsprofil sowie unter Einbeziehung der Literaturdaten derzeit kohlenstoffaserverstärkte Epoxidharzverbunde demnach als geeigneter Werkstoff für die Rotorendkappe erscheinen. Für eine umfassende Beurteilung wären aber folgende weiterführende Arbeiten erforderlich.

Eine Werkstoffcharakterisierung von MAT_REF im feuchten Werkstoffzustand ist in Hinblick auf die Anwendung dieses Faserverbundes als Referenzwerkstoff für das Feuchteaufnahmeverhalten anzustreben. Weiters sind in der einschlägigen Literatur keine Angaben betreffend dem Feuchteaufnahmeverhalten von Matrixwerkstoffen bzw. Faserverbundwerkstoffen bei Umgebungsbedingungen von 155°C und 100 % relativer Feuchte (r.F.) verfügbar und müssten entsprechend ergänzt werden. Um die Auswirkung von feuchtwarmen Umgebungsbedingungen des vorliegenden Anwendungsfalles auf das mechanische Verhalten von Faserverbundwerkstoffen beurteilen zu können, und diesbezüglich in der Literatur keine Angaben gemacht wurden, wären monotone Zugversuche bei einer Prüftemperatur von 155°C im trockenen und feuchten Werkstoffzustand sowie Ermüdungsversuche mit feuchtgelagerten Prüfkörpern (155°C/100%r.F.) bei Raumtemperatur durchzuführen. Schlussendlich wäre eine umfassende Werkstoffcharakterisierung von S-Glasfaserverbundwerkstoffen erforderlich, nachdem für diesen Werkstoff in der Literatur keine für die vorliegende Arbeit relevanten Informationen verfügbar waren.

7 LITERATURVERZEICHNIS

- Abdel-Magid, B. et al. (2005). *Composite Structures* **71**, 320.
- Adams, R., Singh M. (1996). *Composites Science and Technology* **56**, 977.
- Akay, M., Mun, S., Stanley, A. (1997). *Composite Science and Technology* **57**, 565
- Aktas, M., Karakuzu, R. (2009). *Polymer Composites* **10**, 1437, Society of Plastics Engineers
- Vassilopoulos, A. P. (2010), "Fatigue life prediction of composites and composite structures", Woodhead Publishing Limited, Oxford, Cambridge, New Delhi
- Aschenbrenner, F., Weiß, H. (2006), "Elektrotechnik I", Vorlesung an der Montanuniversität Leoben, Leoben
- Ashbee, K. (1989), "Fiber Reinforced Composites", Technomic Publishing Company, Lancaster, Pennsylvania
- Bao, L., Yee, A. (2002). *Polymer* **43**, 3987
- Bao, L., Yee, A., Lee, C. (2001). *Polymer* **42**, 7327.
- Barron, V., Buggy, M., McKenna, H. (2001). *Journal of Materials Science* **36**, 1755
- Bledzki, A. et al. (1998). *Die Angewandte Makromolekulare Chemie* **1**, 83
- Brandbau, E. (1993), „Duroplastwerkstoffe“, VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim, Deutschland
- Catsman, P. (2005). *Kunststoffe* **10/2005**, 143
- Cervenka, A. J. et al. (1998). *Composites Part A* **9-10**, 1137
- Chaplin, A. et al. (1999). *Polymer* **41**, 3945
- Ehrenstein, G. (2006), "Faserverbundwerkstoffe", Carl Hanser Verlag, München; Wien
- Ehrenstein, G., Bittmann E. (1997), „Duroplaste“, Hanser Verlag München; Wien
- Elias, H. G. (2003), „Makromoleküle“, WILEY-VCH Verlag, Weinheim

Fischer, R. (2009), „Elektrische Maschinen“, Carl Hanser Verlag, München; Wien

Flaggl, E.P. (2004), „Einfluss der Aushärtungsbedingungen auf die thermomechanischen Eigenschaften eines Epoxidharz-Matrixwerkstoffes für Verbundanwendungen“, Studienarbeit, Montanuniversität Leoben, Leoben

Flemming, M., Roth S. (2003), „Faserverbundbauweisen Eigenschaften“, Springer Verlag Berlin Heidelberg

Flemming et al. (1995), „Faserverbundbauweisen Fasern und Matrices“, Springer Verlag Berlin Heidelberg

Fuest, K. (1989), „Elektrische Maschinen und Antriebe“, Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig / Wiesbaden

Heißler, H. (1986), „Verstärkte Kunststoffe in der Luft- und Raumfahrttechnik“, Verlag W. Kohlhammer, Stuttgart

Janda, R. (1990), „Kunststoffverbundsysteme“, VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim, Deutschland

Karbhari, V. (2006). Journal of Reinforced Plastics and Composites **6**, 631

Kawagoe et al. (1998). Polymer **40**, 1373

Kumar, S., Sridhar I., Sicashanker S. (2008). Materials Science and Engineering A **498**, 174

Lang, R.W. (2008), „Werkstoffprüfung der Kunststoffe“, Vorlesung an der Montanuniversität Leoben, Leoben

Lerchbaum, D.(2009), Mitteilung Firma Andritz Hydro AG, Österreich

Lerchbaum, D. (2010): Persönliche Information von Hrn. Lerchbaum. Andritz Hydro AG (Weiz, A)

Ma, S., Lin H., Yu T. (1993). Polymer Journal **9**, 897

Meier, J. F. et al. (1982), Endbericht, EPRI-EL--2674

Menges, G. et al. 2002), „Werkstoffkunde Kunststoffe“, Carl Hanser Verlag, München; Wien

Müller, G. (1994), „Grundlagen elektrischer Maschinen“, VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim

Muthirakkal, S. et al. (2009). Iranian Polymer Journal **19**, 89

Mußbacher (1993), „Prüfbericht Nr. 32/93-E“, Prüfbericht Andritz Hydro AG,

Weiz

Oberbach, K. (2001), "Kunststofftaschenbuch", Carl Hanser Verlag, München; Wien

Ose, R. (1998), „Elektrotechnik für Ingenieure“, Carl Hanser Verlag, München; Wien

Raghavan, J., Meshii M. (1997). Composite Science and Technology **57**, 375

Roylance, M.E. (1982). Polymer Engineering and Science **15**, 988

Sala, G. (2000). Composites: Part B **31**, 357

Seidel, C., Friedrich J., Münstedt H. (2006). Kunststoffe **5/2006**, 92

Schröder, D. (2000), "Elektrische Antriebe- Grundlagen", Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg

Selzer, R., Friedrich K. (1997). Composite Part A **28A**, 595

Shen, Springer (1976). Composite Materials **1**, 2

Spring, E. (1998), "Elektrische Maschinen", Springer Verlag, Berlin Heidelberg

Tai, H. N. et al. (1995). Composites, Elsevier Science Limited **8**, 551

Talreja, R., Manson J. (2001), „Polymer Matrix Composites“, Elsevier Science Ltd., UK

Vogt, K. (1996), "Berechnung elektrischer Maschinen", VCH-Verlagsgesellschaft, Weinheim, Deutschland

Wardzinska, E., Penczek P. (2005). Journal of Applied Polymer Science **5**, 4066

Wolfrum, J. (1999), „Einfluß der Verarbeitung auf das Langzeitverhalten duroplastischer Hochleistungsverbundwerkstoffe“, Dissertation, Technische Fakultät, Universität Erlangen-Nürnberg

Wörndle, R. (2008), „Vorlesung zu Verbundwerkstoffe I und Verbundwerkstoffe II“, Lehrstuhl für Konstruieren in Kunst- und Verbundwerkstoffen, Montanuniversität Leoben, Leoben

Wu et al. (2010). Composites: Part B **5**, 396

Zahnt, B.-A. (2003), „Ermüdungsverhalten von diskontinuierlich glasfaserverstärkten Kunststoffen“, Dissertation, Montanuniversität Leoben,

Leoben

Ziegmann, G. (1984), "Einfluß der Feuchtigkeit auf den Erweichungsbereich von Epoxidharzen", *Kunststoffe*

Ziegmann, G. (2007). *Kunststoffe* **4/2007**, 106