

Strukturintegration von Dehnungsmessstreifen

Prof. Dr.-Ing. Alexander Horoschenkoff

Dipl.-Ing. Sebastian Klein

Dr.-Ing. Karl-Heinz Haase

Besonderer Hinweis

Die in dieser Broschüre genannten oder empfohlenen Verfahren, Messmittel, Methoden und Stoffe sind nach Kenntnis und Erfahrung zuverlässig und geeignet für den beschriebenen Zweck und entsprechen dem Stand der Technik. Sie sind als Hilfe und Ratschläge für den Anwender von Dehnungsmessstreifen zu verstehen. Bei der Vielfalt der Anwendungen und der Komplexität der Bedingungen kann eine Garantie jedoch weder seitens der Firma Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, noch seitens der Autoren übernommen, noch können Haftungsansprüche irgendwelcher Art daraus abgeleitet werden. Für kritische Fälle wird deshalb ein die speziellen Bedingungen berücksichtigender Vorversuch empfohlen. Die Beachtung einschlägiger Sicherheits- und Betriebsvorschriften ist Sache des Anwenders.

Weder dem Herausgeber noch den Autoren sind Schutzrechte bekannt, welche durch die Ausführungen berührt würden, jedoch kann dies nicht mit Sicherheit ausgeschlossen werden.

Anmerkung:

Zahlen in eckigen Klammern (z.B. [1]) verweisen auf das Schrifttum.

2006

Gedruckt in Deutschland

Alle Rechte vorbehalten. Vollständige oder teilweise Vervielfältigung jeglicher Art sowie Übersetzungen bedürfen der schriftlichen Zustimmung der Autoren oder des Herausgebers. Das Fotokopieren von Auszügen für den persönlichen Bedarf ist erlaubt.

Strukturintegration von Dehnungsmessstreifen

Prof. Dr.-Ing. Alexander Horoschenkoff
Dipl.-Ing. Sebastian Klein
Dr.-Ing. Karl-Heinz Haase

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	6
1 Faserverbundwerkstoffe	8
1.1 Faserarten	8
1.2 Theoretische Grundlagen	9
1.3 Fertigungsverfahren	11
2 Faserverbundtheorie	14
2.1 Orthotropes Materialverhalten	14
2.2 Werkstoffmatrix der unidirektional orientierten Einzelschicht	14
2.3 Der Mehrschichtverbund	15
2.4 Thermoelastisches Verhalten	17
2.5 Steifigkeit der unidirektional verstärkten Einzelschicht	17
3 Berechnung der Steifigkeitsmatrix des Mehrschichtverbundes im globalen Koordinatensystem aus den Eigenschaften der Einzelschichten	19
3.1 Transformationsmatrizen $[T_1]$ und $[T_2]$:.....	19
3.2 Transformation der Steifigkeitsmatrix für die Einzelschicht:	19
3.2.1 Transformation für die 0° -Lage	20
3.2.2 Transformation für die 90° -Lage	20
3.2.3 Transformation für die $+45^\circ$ -Lage	20
3.2.4 Transformation der thermischen Ausdehnungskoeffizienten	22
3.3 Berechnung der Steifigkeitsmatrix für den Mehrschichtverbund im globalen System aus der Summe der Einzelschichten.....	22
3.4 Berechnung der Verformungen des Gesamtverbundes	24
3.5 Transformation von $[\epsilon]_{xy}$ in das lokale System der k-ten Einzellage	25
3.6 Berechnung der intralaminaren Spannungen in der k-ten Einzellage	25
3.7 Berechnung der Ausdehnungskoeffizienten des Mehrschichtverbundes	25
3.8 Ermittlung der intralaminaren Schubeigenschaften (G_{12} und τ_{12max}) an der Zugprobe mit der Faserorientierung $\pm 45^\circ$	25
4 Interlaminare Spannungen und Energiefreisetzungsrates im Mehrschichtverbund	27
5 Integration von Dehnungsmessstreifen	28
5.1 Strukturmechanische Aspekte.....	28
5.1.1 Einfluss der Integration auf die interlaminaren Eigenschaften des Verbundwerkstoffs	28
5.1.2 Einfluss der Orientierung benachbarter Lagen auf die Messgenauigkeit.....	30
5.1.3 Integrationstiefe des DMS zur Reduzierung des Dehnungsniveaus.....	30
5.1.4 Abhängigkeit des Messfehlers von der Orientierung des DMS	32
5.1.5 Einfluss der Wärmeentwicklung bei integrierten DMS	38
5.1.6 Temperaturkompensation bei Faserverbundwerkstoffen.....	38
5.1.7 Einfluss der Querempfindlichkeit	39

5.1.8	Einfluss der Empfindlichkeit von Dehnungsmessstreifen senkrecht zur Messgitterebene	42
5.2	Beschreibung des Dehnungsmessstreifens	42
5.2.1	Aufbau und Anbindung des Dehnungsmessstreifens	43
5.2.2	Funktion der Kontaktpins des Dehnungsmessstreifens	44
5.2.3	Technische Eigenschaften des DMS	45
5.3	Die Integration von DMS	46
5.3.1	Positionierung des Dehnungsmessstreifens	46
5.3.2	Fixierung des Dehnungsmessstreifens	47
5.3.3	Laminieren und Aufbringen weiterer Lagen	48
5.3.4	Kürzen und Abdecken der Pins	50
5.3.5	Hinweis zum Entformen	51
5.4	Anschließen der Messleitungen	52
5.4.1	Entfernung der Isolierung	52
5.4.2	Kontaktierung der Pins	53
6	Messtellenschutz.....	54
7	Literaturverzeichnis	55

Vorwort

Faserverbundwerkstoffe (FVW) haben in vielen Bereichen der modernen Industriegesellschaft Einzug gefunden und gewinnen aufgrund ihrer besonderen Eigenschaften ständig an Bedeutung. Innovative Anwendungen finden sich heute nicht nur in der Luft- und Raumfahrt oder dem Motorrennsport, sondern auch in Energie- und Medizintechnik, im Bauwesen sowie in Sport- und Freizeitgeräten. Mit zunehmendem Wissen über die vorteilhaften Eigenschaften der Verbundwerkstoffe und nicht zuletzt durch steigende Stahl- und Aluminiumpreise vergrößert sich die Anzahl an Applikationen dieser Materialien gravierend.

Genauere Kenntnisse über den Belastungszustand sind bei Verbundwerkstoffen ebenso bedeutsam, wie dies, im Sinne der Betriebsfestigkeit, auch bei herkömmlichen Materialien der Fall ist. Stellvertretend soll hier die Strukturmesstechnik zur systematischen Optimierung von Faserverbund-Bauteilen genannt werden. Auch hinsichtlich der Gewährleistungspflicht der Hersteller wird ein spezielles Augenmerk auf die Eigenschaften dieser Werkstoffe angepasst. Sensorik zur Belastungsanalyse und zur Überwachung des Bauteils im Betrieb immer wichtiger.

Berechnungsverfahren, wie sie bei metallischen Werkstoffen angewandt werden, können bei Verbundwerkstoffen nicht oder nur teilweise zum Ansatz gebracht werden.

Diese Broschüre soll sowohl theoretische als auch praktische Hinweise geben, wie Verbundwerkstoffe in ihrem mechanischen Verhalten experimentell bewertet werden können.

Derartige Untersuchungen sind neu und es ist davon auszugehen, dass Publikationen zur experimentellen Nachweisführung mechanischer Einflüsse und Beanspruchungen stark zunehmen werden. Ein Anspruch auf Vollständigkeit dieses Beitrages kann und soll dabei nicht erhoben werden.

Die Spannungsanalyse mit Dehnungsmessstreifen (DMS) ist eine gängige Methode zur experimentellen Ermittlung der Werkstoffspannungen bei allen fertigungstechnisch relevanten Materialien. Typisch lag der Fokus in der Historie vornehmlich auf metallischen Werkstoffen.

Faserverbundwerkstoffe weisen verschiedene Grundeigenschaften auf, die von Metallen wesentlich abweichen. Hohe Randfaserdehnungen von bis zu $\pm 20000 \mu\text{m/m}$ ($\pm 2\%$) und deren anisotropes Werkstoffverhalten sind charakteristische Indizien hierfür. Besonders das hohe Dehnungsvermögen ist für metallische DMS-Messgitter infolge der hier typischen Wechsellastbeständigkeit problematisch. Im DMS-Kraftaufnehmerbau etwa werden die metallischen Wandler Elemente, die Widerstands-Mäander um $\pm 1000 \mu\text{m/m}$ ($\pm 0,1\%$) ausgelenkt. Höhere mechanische Beanspruchungen können zum vorzeitigen Ausfall des DMS führen.

Die besondere Herstellung von Faserverbundbauteilen aus schichtweise aufeinander abgelegten Einzellagen ermöglicht das Einbetten von Dehnungsmessstreifen während der

Fertigung. Die Motivation für eine Integration ist oft unterschiedlich und hängt von der jeweiligen Anwendung ab. Bei hohen Biegedehnungen beispielsweise empfiehlt sich die Integration, um das Dehnungsniveau über die Integrationstiefe an das Dehnungsniveau des DMS anzupassen. Mit zunehmender Annäherung an die biege neutrale Zone des Bauteils reduziert sich auch die auf das elektrische Messgitter des DMS übertragene mechanische Spannung.

Auch können die DMS während der Fertigung an Stellen installiert werden, die später nicht mehr zugänglich sind. Dies erweitert den Bereich der Messpositionen und ermöglicht Messungen bei komplex aufgebauten Strukturen mit Hohlräumen oder zwischen Klebefügungen.

Darüber hinaus bieten Faserverbundbauteile mit integrierten Dehnungssensoren infolge der Strukturintegration a priori einen hohen Grad des Messstellenschutzes, welcher durch herkömmliche DMS-Schutzmaßnahmen, wie Abdeckmittel oft nicht gewährleistet werden kann.

Vorteilhaft ist die eingebettete Installation des DMS auch bei strömungstechnisch bzw. aerodynamisch sensiblen Bauteilen.

HBM betreibt im Rahmen einer Kooperation mit der Fachhochschule München, Fachbereich Maschinenbau, Fahrzeug- und Flugzeugtechnik unter Leitung von Prof. Dr. A. Horoschenkoff, Untersuchungen zum Festigkeitsverhalten und Fragen der räumlichen Elastizität von strukturintegrierten Applikationen. Anliegen dieser HBM-Applikationsschrift ist es, die relevanten Fragestellungen in Verbindung mit der Faserverbundtechnik dem Leser nahe zu bringen und über gewonnene Erkenntnisse und eigene Untersuchungen zu informieren. Es werden dabei Anwender der DMS-Messtechnik angesprochen, welche auf diesem Gebiet schon Erfahrungen besitzen. Grundlagen der DMS-Messtechnik (Wirkprinzipien, Verschaltungsarten etc.) werden dabei weitgehend vorausgesetzt. Hierzu ergänzende Literatur ist vielfältig verfügbar (z.B. K. Hoffmann „Eine Einführung in das Messen mit Dehnungsmessstreifen“, [7]).

1 Faserverbundwerkstoffe

Wie der Begriff „Faserverbund“ bereits verdeutlicht, bestehen diese Werkstoffe aus einem Verbund - aus den Verstärkungsfasern und einer Kunststoffmatrix, welche die Fasern bindet. Eine kurze Zusammenfassung der Faserarten und der Verarbeitungsverfahren soll zum Verständnis der weiteren Kapitel dienen.

1.1 Faserarten

In der Kunststofftechnik werden verschiedene Faserarten zur Verstärkung des Verbundes eingesetzt:

- Glasfasern (GFK)

Glasfasern sind ein weit verbreitetes Verstärkungsmaterial für Faserverbundwerkstoffe und besitzen ausgezeichnete mechanische, thermische, dielektrische und chemische Eigenschaften. Glasfasern sind unbrennbar, temperaturbeständig bis ca. 400 °C und gegen die meisten Chemikalien und Witterungseinflüsse beständig. Die Festigkeitseigenschaften der Fasern sind höher als die von vielen metallischen Werkstoffen. Die Steifigkeit (E-Modul) von Glaslaminaten ist gegenüber Metallen relativ niedrig, so dass bei einer steifigkeitsbezogenen Auslegung von Bauteilen durch die benötigte große Wandstärke der Gewichtsvorteil aufgehoben wird. Verbundwerkstoffe aus Glasfasern werden als GFK (glasfaserverstärkter Kunststoff) bezeichnet.

- Kohlenstofffasern, Carbonfasern (CFK)

Kohlenstofffasern (C-Fasern) finden heutzutage nicht nur auf Grund ihrer hervorragenden Eigenschaften sondern auch wegen der immer günstiger werdenden Preise und dem Verlangen nach immer leichteren Strukturen einen weiten Einsatzbereich. So ist die einst für Luft und Raumfahrt verwendete teure „High-Tech-Faser“ heute auch in Serienfahrzeugen und in der Sportartikelindustrie zu finden.

Hohe Festigkeit und hoher E-Modul, geringe Dichte und Materialermüdung, geringe Wärmeleitfähigkeit und Wärmeausdehnung aber auch elektrische Leitfähigkeit und chemische Beständigkeit zeichnen die Kohlenstofffasern aus. C-Fasern bestehen zu über 95 % aus reinem Kohlenstoff.

- Synthetische Fasern (SFK)

Unter Synthefasern versteht man Fasern aus synthetischen (nicht-natürlichen), organischen Polymeren, das heißt aus mehr oder weniger langkettigen Molekülen. Wichtige Vertreter dieser Fasern sind Polyamidfasern (Nylon), Polyesterfasern, Fasern aus Polypropylen und Aramidfasern. Aufgrund hoher kristalliner Anteile und Orien-

tierung der Molekülketten zeichnen sich synthetische Fasern durch sehr hohe Festigkeit und Bruchdehnung, hohe Zähigkeit und gutes Arbeitsaufnahmevermögen und geringe Materialermüdung aus. Durch die polymere Molekülstruktur weisen sie jedoch ein Alterungsverhalten auf und neigen zur Feuchtigkeitsaufnahme und zum Kriechen.

- Naturfasern

Diese unterscheiden sich sowohl in ihren mechanischen und chemischen Eigenschaften, als auch in ihrer Herstellung und ihren Einsatzbereichen.

Vertreter der Naturfasern sind Flachs-, Sisal- und Kokosfasern aber auch Spinnseide, Baumwolle und Jute. Sie zeichnen sich durch ihren natürlichen Stoffkreislauf - nachwachsender Rohstoff und CO₂ Rückführung bei der thermischen Verwertung - und durch ihren günstigen Preis aus. Nachteilige Eigenschaften der Naturfasern sind der hohe spezifische E-Modul bei geringer Festigkeit, hohe Feuchtigkeitsaufnahme (neigen zum Quellen) und starke Qualitätsschwankungen des Rohstoffs.

		Kohlenstofffaser HT	Glasfaser E-Glas	Synthetische Faser Aramid LM	Naturfaser Flachs
Festigkeit σ [MPa]		3 600	2 400	2 800	7 500
E-Modul [MPa]	E ₁₁	240 000	73 000	65 000	30 000
	E ₂₂	15 000	73 000	5400	-
Wärmeausdehnungs- koeffizient α [$10^{-6}K^{-1}$]	α_{11}	-1	5	-2	-
	α_{22}	10	5	40	-
Dichte ρ [g/cm³]		1,78	2,6	1,44	1,48

Tabelle 1.1: Kennwerte unterschiedlicher Fasertypen

1.2 Theoretische Grundlagen

Die mechanischen Eigenschaften stehen in unmittelbarem Zusammenhang mit der Länge der Verstärkungsfasern. Man klassifiziert in Kurz-, Lang- und gerichteten Endlosfasern (Tabelle 1.2-1).

Bei der Verstärkung von Kunststoffen mit Kurz- und Langfasern erfolgt in der Regel keine Ausrichtung der Fasern. Der Kunststoff wird somit durch die ungeordnete Ausrichtung der Fasern in allen Richtungen gleichmäßig verstärkt, sodass isotrope Materialeigenschaften angenommen werden können.

Im Gegensatz dazu ist bei der Verstärkung durch gerichtete Endlosfasern grundsätzlich von einer richtungsabhängigen Verstärkung des Kunststoffs auszugehen. Kunststoffe mit gerichteten Endlosfasern haben anisotrope Materialeigenschaften. Die Richtungsab-

hängigkeit der Faseranordnung und die Ausrichtung des DMS-Messgitters sind bei der Dehnungsmessung an Faserverbundstrukturen zu berücksichtigen.

Neben der Faserlänge ist das Material der Fasern für die Verstärkungswirkung von entscheidender Bedeutung. Am häufigsten kommen Glas- und Kohlenstofffasern zur Anwendung.

Aufgrund des hohen spezifischen E-Moduls eignen sich Kohlenstofffasern zur Herstellung von Bauteilen mit hohen Steifigkeits- und Festigkeitsanforderungen.

Glasfasern haben hingegen einen geringen E-Modul bei hoher Festigkeit. Sie eignen sich dadurch zur Verstärkung von Bauteilen mit hohen Elastizitätsanforderungen (siehe Tabelle 1.2-1).



Eigenschaften	Reinharz	Glasfaserverstärkung		
		Kurzfaser	Langfaser	gerichtete Endlosfaser
Faserlänge [mm]	0	bis 5	100	endlos
Faservolumen [Vol. %]	0	30	40	60
Dichte [g/cm ³]	1,2	1,5	1,7	2,1
E-Modul [MPa]	3000	6000	13000	20000 - 40000
Festigkeit [MPa]	70	100	210	600 - 2000
Materialverhalten		isotrop		anisotrop

Tabelle 1.2-1: Einfluss der Faserlänge von Glasfasern auf die mechanischen Eigenschaften bei der Verstärkung von Kunststoffen [4]

Wie bereits erwähnt, werden neben Glas und Kohlenstofffasern auch synthetische Fasern und Naturfasern eingesetzt.

1.3 Fertigungsverfahren

Grundsätzlich ist die Verarbeitung von faserverstärkten Kunststoffen abhängig von der Art des Kunststoffes - Thermoplast oder Duroplast - und der Länge der Fasern.

Verarbeitungsverfahren von faserverstärkten Thermoplasten:

- Spritzgießen (kurzfaserverstärkt)
- Pressen - glasmattenverstärkter Thermoplast (GMT)
- Injektion vor der Polymerisation

Verarbeitungsverfahren von faserverstärkten Duroplasten:

- R-RIM (Reinforced RIM)
- Prepregverarbeitung und Autoklaventechnik
- Injektionsverfahren (RTM und Vakuuminjektion)
- Handlaminierverfahren
- Pressen – SMC (Sheet Moulding Compound)

Nachstehend werden das Injektionsverfahren, das Handlaminierverfahren und die Prepregverarbeitung im Autoklaven vorgestellt, da diese Fertigungstechniken das Verarbeiten von gerichteten Endlosfasern vorsehen.

- Resin Transfer Moulding (RTM):

Beim RTM-Verfahren wird zunächst das trockene Verstärkungsmaterial in eine zweischalige Form bzw. ein Werkzeug eingelegt. Die Imprägnierung mit Harz erfolgt erst nach dem Schließen der Form, indem die Matrix (Harz) in die Form eingespritzt oder eingesaugt wird. Als RTM (Resin Transfer Moulding) bezeichnet man das Verfahren, bei dem die Harz/Härter-Mischung aus einem Vorratsbehälter unter Druck in die Form eingebracht wird. Für die Herstellung komplizierter Bauteile ist es sinnvoll, vorgeformte Verstärkungsmaterialien zu verwenden. Hauptsächlich werden thermoplastisch gebundene Matten und Gewebe eingesetzt, die vorher durch Wärme vorgeformt wurden. Eine zweite Variante sind geflochtene oder gewickelte "Vorformlinge", die auf einem Formkern aufgebaut werden. Aufgrund der geringen Fließgeschwindigkeit des Harzes und der Fixierung der Fasern bleibt die vorgesehene Faserorientierung erhalten.

Als Matrix werden niedrigviskose Epoxid- und Polyesterharze verarbeitet. Zur Verstärkung eignen sich Glas-, Aramid- und Kohlefasern in Form von Geweben, Gelegen, Bändern, Vliesen und Matten. Mit diesem Verfahren können Bauteile bis zu einer Größe von ca. 3 m² hergestellt werden. Dies resultiert aus der Notwendigkeit eines zweischaligen Werkzeuges, welches für einen Injektionsdruck von ca. 10 bar ausgelegt ist, und somit Grenzen setzt. Die Zykluszeit beträgt je nach Harz einige Stunden.

- Prepregverarbeitung im Autoklaven:

Das Autoklav-Verfahren ist eines der teuersten und aufwendigsten Verarbeitungsverfahren. Es wird in der Regel nur beim Einsatz von Prepregs angewandt. Prepregs sind mit einem speziellen Harz vorimprägnierte (preimpregnated) und "angehärtete" Verstärkungsfasern, die von spezialisierten Firmen nach Kundenwunsch gefertigt werden. Aus Prepregs lassen sich komplizierte, mechanisch und thermisch hochbelastbare Bauteile pressen. Der Faservolumengehalt liegt bei ca. 60%, der Luftporengehalt ist äußerst gering. Aufgrund der hohen Kosten wird das Autoklav-Verfahren hauptsächlich zur Herstellung komplexer Bauteile mit höchsten Anforderungen z.B. in der Luft- und Raumfahrt sowie im Rennsport eingesetzt. Zur Herstellung von Prepreg-Laminaten werden die einzelnen Prepreg-Lagen manuell oder mittels Tapelege-Maschine in die Form gelegt und mit Lochfolie, Saugvlies und Vakuumfolie abgedeckt. Bevor der Aufbau in den Autoklaven gebracht wird, wird das Vakuum angelegt und auf Dichtheit überprüft. Bei einem Druck von bis zu 10 bar und einer Temperatur von bis zu 200°C härtet das Prepreg-Laminat über mehrere Stunden aus, und kann nach dem Abkühlen und Belüften entnommen werden.

- Vakuuminjektionsverfahren:

Das Vakuuminjektionsverfahren arbeitet gegenüber dem RTM- bzw. RIM-Verfahren mit einem Druck von 1 bar. Der wesentliche Unterschied besteht darin, dass bei diesem Verfahren ein einschaliges Werkzeug verwendet wird, bzw. bei Vorformlingen mit einem Formkern, auf ein Werkzeug komplett verzichtet werden kann. Dadurch werden die hohen Investitionskosten für das Werkzeug erheblich gesenkt.

Beim Vakuuminjektionsverfahren wird der Faservorformling in die Form eingelegt und mit einem Verteilersystem für das Harz und einer Vakuumfolie abgedeckt. Das Harz wird hier durch das Anlegen des Vakuums (ca. 1 bar) in die Form gezogen und verteilt sich zunächst oberflächlich auf dem Verteilersystem. Erst im zweiten Schritt verteilt sich das Harz senkrecht zur Laminebene und durchdringt es in Dickenrichtung. Die Aushärtung erfolgt je nach Harz bei Temperaturen von 20°C bis 80°C.

Dieses Verfahren eignet sich besonders für Bauteile, die größer als 3 m² sind. Für die verhältnismäßig kleinen Zugproben ist der Aufwand mit dem Verteilersystem zu groß und ist daher trotz der relativ geringen Investitionskosten nicht geeignet.

- Handlaminierverfahren:

Das Handlaminieren ist das älteste, einfachste und am weitesten verbreitete Verfahren. Es genügen minimale technische Voraussetzungen, weshalb es hauptsächlich für kleinere Serien (Prototypenbau), einfachere Bauteilgeometrien und für den Formenbau angewandt wird. Bei Verwendung von Formharzen lassen sich hohe Oberflächengüten erreichen. Die Aushärtung erfolgt fast immer drucklos bei Raumtemperatur. Erhöhte Temperaturen bei der Aushärtung sind nur dann erforderlich, wenn Formen und Bauteile später einer höheren Wärmebelastung ausgesetzt sind ($> \text{ca. } 60 \text{ } ^\circ\text{C}$).

Beim Handlaminieren wird auf die Oberfläche der Form ein Trennmittel aufgebracht. Anschließend werden die einzelnen Lagen nacheinander nass in die Form eingelegt. Zum Eintränken der Lagen mit Harz dienen vor allem Pinsel und Rillenroller als Werkzeuge. Den Abschluss bildet oft ein Abreißgewebe. Das aus Nylonfasern bestehende Gewebe lässt sich nach dem Aushärten des Harzes abschälen ("abreißen") und erzeugt dabei eine definiert raue und saubere Oberfläche. Die Aushärtung der Lamine erfolgt weitestgehend drucklos bei Raumtemperatur. Lediglich bei optimierten Leichtbauteilen wird unter Vakuum bei 1 bar Unterdruck ausgehärtet. Bestimmte Harzsysteme, vor allem Harze für den Flugzeugbau, benötigen zur optimalen Durchhärtung höhere Temperaturen. Die Bauteile werden entweder in der Form oder nach dem Entformen zusätzlich getempert. Die hierfür erforderlichen Temperaturen liegen, je nach Harzsystem, häufig bei $50 - 100 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Als Matrix werden flüssige Harze verarbeitet, vor allem Epoxid- und Polyesterharze. Die Verstärkungsmaterialien werden oft in Form von Rovings, Geweben, Gelegen und Matten verarbeitet und bestehen aus gerichteten Glas-, Aramid- und Kohlefasern.

2 Faserverbundtheorie

2.1 Orthotropes Materialverhalten

Während bei kurz- und langfaserverstärkten Kunststoffen die Verformungen des Materials über die üblichen Werkstoffgesetze für isotrope Materialien berechnet werden können, kommen bei Faserverbundwerkstoffen mit gerichteten Endlosfasern aufgrund der Anisotropie spezielle Werkstoffgesetze für orthotropes Materialverhalten zur Anwendung.

Bei Faserverbundwerkstoffen, die mit gerichteten Endlosfasern verstärkt sind, werden Einzellagen entsprechend der gewünschten Verstärkungswirkung aufeinander gelegt und so zu einem Laminat aufgebaut. Die Faserverstärkung in der Einzelschicht ist häufig in eine Richtung ausgerichtet (unidirektional verstärkte Einzelschicht oder UD-Einzelschicht). Materialien mit diesen Eigenschaften haben orthotrope Eigenschaften.

2.2 Werkstoffmatrix der unidirektional orientierten Einzelschicht

Zur Beschreibung der mechanischen Eigenschaften von Faserverbundwerkstoffen sind aufgrund des orthotropen Verhaltens für den 2-dimensionalen, ebenen Lastfall folgende Kennwerte notwendig:

E_{11} : E-Modul in Faserrichtung

E_{22} : E-Modul quer zur Faserrichtung

ν_{12} : Querdehnzahl (Belastung in 1-Richtung, Verformung in 2-Richtung)

ν_{21} : Querdehnzahl (Belastung in 2-Richtung, Verformung in 1-Richtung)

G_{12} : Schubmodul

Die Ingenieurkonstanten können an der unidirektional verstärkten Einzelschicht im Zugversuch ermittelt werden, in dem Kraft- und Faserrichtung entsprechend aufeinander abgestimmt werden. Dabei ist die 1-Richtung mit der Faserrichtung identisch und wird als 0° -Richtung bezeichnet.

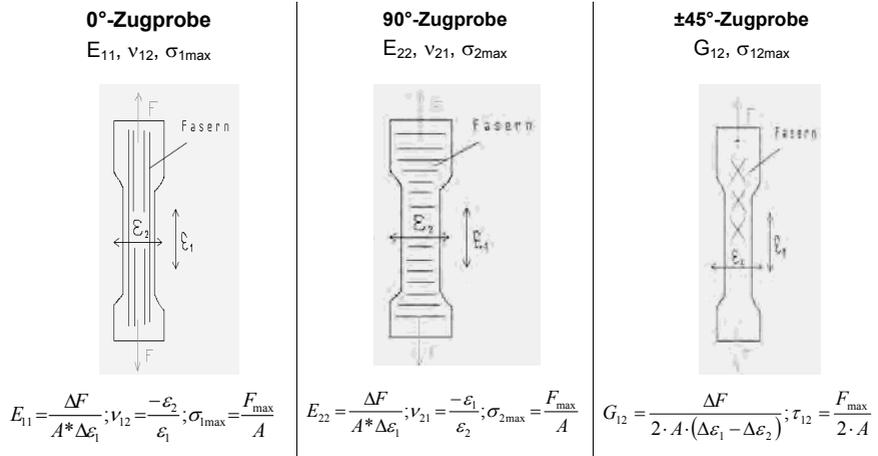


Bild 2.2-1: Ermittlung der Ingenieurskonstanten für Faserverbundwerkstoffe EN 6031 und EN ISO 527-4

	GFK	CFK
E₁₁ [MPa]	40000	160000
E₂₂ [MPa]	9000	9500
G₁₂ [MPa]	3500	5500
ν₁₂	0,21	0,28
α₁	6,24 · 10 ⁻⁶ 1/K	-4,35 · 10 ⁻⁶ 1/K
α₂	0,35 · 10 ⁻⁶ 1/K	0,32 · 10 ⁻⁶ 1/K

Tabelle 2.2-1: Typische mechanische Kennwerte der Einzelschichten von glas- und kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen

2.3 Der Mehrschichtverbund

Zur Beschreibung der Orientierung der Einzellege im Verbund wird ein lokales Koordinatensystem 1,2 und ein globales Koordinatensystem x, y eingeführt. Die 1-Richtung des lokalen Koordinatensystems der unidirektional verstärkten Einzelschicht ist in Faserichtung ausgerichtet. Der Faserwinkel θ beschreibt die Orientierung der Einzellege im globalen System, und wird dem Uhrzeigersinn folgend zwischen der 1-Richtung des lokalen Systems und der x-Richtung des globalen Systems angegeben.

1, 2: Lokales Koordinatensystem
 x, y: Globales Koordinatensystem

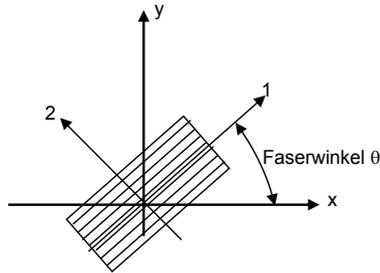


Bild 2.3-1: Definition des Faserwinkels

Bei der Anordnung der Lagen im Verbund sind verschiedene Grundregeln einzuhalten. Von entscheidender Bedeutung ist ein symmetrischer Aufbau, das heißt, dass die Lagen symmetrisch zur Mittelachse des Verbundes anzuordnen sind, um den Verzug des Laminats durch die bei der Fertigung eingebrachten thermischen Spannungen zu verhindern.

Von besonderer Bedeutung ist ein Verbund mit dem Aufbau $[+45^\circ, 0^\circ, -45^\circ, 90^\circ]_{\text{sym}}$, der auch als quasiisotroper Verbund bezeichnet wird. Dieser Verbund hat richtungsunabhängige Materialkonstanten. Tabelle 2.2-1 zeigt typische mechanische Eigenschaften für die unidirektional verstärkte Einzelschicht und den quasiisotropen Mehrschichtverbund.

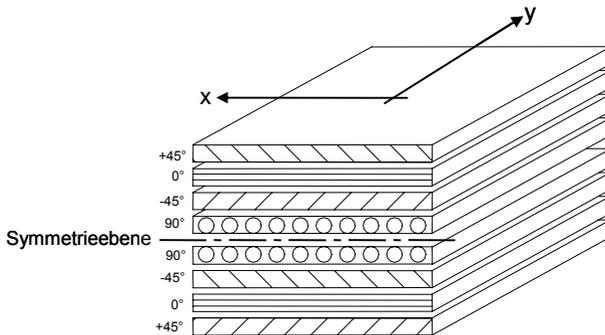


Bild 2.3-2: Symmetrischer Aufbau eines quasiisotropen Laminates $[+45^\circ, 0^\circ, -45^\circ, 90^\circ]_{\text{sym}}$

2.4 Thermoelastisches Verhalten

Bezüglich der Kompensation von thermischen Einflüssen bei Dehnungsmessungen an Faserverbundwerkstoffen müssen die richtungsabhängigen thermischen Ausdehnungskoeffizienten berücksichtigt werden. Für die unidirektional verstärkte Einzelschicht gilt:

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ 0 \end{pmatrix} \Delta T$$

α_1 = thermischer Ausdehnungskoeffizient in Faserrichtung

α_2 = thermischer Ausdehnungskoeffizient quer zur Faserrichtung

Die thermische Ausdehnung bei kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen ist in der Regel relativ klein (vgl. Tabelle 2.2-1).

2.5 Steifigkeit der unidirektional verstärkten Einzelschicht

Zur Bestimmung der Eigenschaften von Mehrschichtverbunden empfiehlt sich die Umrechnung mit Nachgiebigkeiten und Steifigkeiten. Es gilt folgender Zusammenhang zwischen E-Modul und Nachgiebigkeit J:

$$J_{11} = \frac{1}{E_{11}}; \quad J_{22} = \frac{1}{E_{22}}; \quad J_{66} = \frac{1}{G_{12}}$$

Über Energiebetrachtungen kann gezeigt werden

$$J_{12} = J_{21} = \frac{-\nu_{12}}{E_{11}} = \frac{-\nu_{21}}{E_{22}};$$

Somit ergibt sich eine Nachgiebigkeitsmatrix [J] für orthotropes Material.

$$[J] = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & 0 \\ J_{12} & J_{22} & 0 \\ 0 & 0 & J_{66} \end{bmatrix}$$

Für die Steifigkeitsmatrix gilt ($C_{12} = C_{21}$)

$$[C] = [J]^{-1} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & 0 \\ C_{12} & C_{22} & 0 \\ 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & 0 \\ J_{12} & J_{22} & 0 \\ 0 & 0 & J_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & 0 \\ C_{12} & C_{22} & 0 \\ 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

3 Berechnung der Steifigkeitsmatrix des Mehrschichtverbundes im globalen Koordinatensystem aus den Eigenschaften der Einzelschichten

Sind die Eigenschaften der unidirektional verstärkten Einzelschicht bekannt, können die Eigenschaften eines Verbundes bestimmt werden, der aus verschiedenen Einzellagen mit beliebiger Orientierung aufgebaut ist.

3.1 Transformationsmatrizen $[T_1]$ und $[T_2]$:

Voraussetzung sind zwei Transformationsmatrizen T_1 und T_2 , die für jede Einzellage entsprechend ihrem Faserwinkel θ bestimmt werden müssen:

$$[T_1] = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & 2mn \\ n^2 & m^2 & -2mn \\ -mn & mn & m^2 - n^2 \end{bmatrix} \quad [T_2] = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & mn \\ n^2 & m^2 & -mn \\ -2mn & 2mn & m^2 - n^2 \end{bmatrix}$$

Mit: $m = \cos \theta$; $n = \sin \theta$

3.2 Transformation der Steifigkeitsmatrix für die Einzelschicht:

Um die Steifigkeit des Gesamtverbundes bestimmen zu können, muss für jede Einzelschicht des Gesamtverbundes die Werkstoffmatrix in das globale Koordinatensystem transponiert werden.

$$\begin{bmatrix} \hat{C} \end{bmatrix} = [T_1]^{-1} * [C] * [T_2]$$

$[C]$ = Steifigkeitsmatrix im lokalen System 1-2

$\begin{bmatrix} \hat{C} \end{bmatrix}$ = Steifigkeitsmatrix im globalen Koordinatensystem x-y

Zur Berechnung der Eigenschaften eines quasiisotropen Laminataufbaus müssen die Eigenschaften der Einzellage für die Faserwinkel 0° , 90° und 45° bestimmt werden.

3.2.1 Transformation für die 0°-Lage

Transformation für die 0°-Lage

$$\sin 0^\circ = 0 ; \cos 0^\circ = 1$$

$$[T_1] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad [T_2] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \hat{C} \\ \hat{C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} * \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & 0 \\ C_{12} & C_{22} & 0 \\ 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & 0 \\ C_{12} & C_{22} & 0 \\ 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix}$$

3.2.2 Transformation für die 90°-Lage

$$\sin 90^\circ = 1 ; \cos 90^\circ = 0$$

$$[T_1] = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad [T_2] = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \hat{C} \\ \hat{C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}^{-1} * \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & 0 \\ C_{12} & C_{22} & 0 \\ 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{22} & C_{12} & 0 \\ C_{12} & C_{11} & 0 \\ 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix}$$

3.2.3 Transformation für die +45°-Lage

$$\sin +45^\circ = \frac{1}{2}\sqrt{2} \quad ; \quad \cos +45^\circ = \frac{1}{2}\sqrt{2}$$

$$[T_1] = \begin{bmatrix} 0,5 & 0,5 & 1 \\ 0,5 & 0,5 & -1 \\ -0,5 & 0,5 & 0 \end{bmatrix} \quad [T_2] = \begin{bmatrix} 0,5 & 0,5 & 0,5 \\ 0,5 & 0,5 & -0,5 \\ -1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \hat{C} \\ \hat{C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,5 & 0,5 & -1 \\ 0,5 & 0,5 & 1 \\ 0,5 & -0,5 & 0 \end{bmatrix}^{-1} * \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & 0 \\ C_{12} & C_{22} & 0 \\ 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0,5 & 0,5 & 0,5 \\ 0,5 & 0,5 & -0,5 \\ -1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\left[\hat{C} \right] = \begin{bmatrix} 0,25(C_{11}+C_{22})+0,5C_{12}+C_{66} & 0,25(C_{11}+C_{22})+0,5C_{12}-C_{66} & 0,25(C_{11}-C_{12}) \\ 0,25(C_{11}+C_{22})+0,5C_{12}-C_{66} & 0,25(C_{11}+C_{22})+0,5C_{12}+C_{66} & 0,25(C_{11}-C_{12}) \\ 0,25(C_{11}-C_{22}) & 0,25(C_{11}-C_{12}) & 0,25(C_{11}+C_{22})-0,5C_{12} \end{bmatrix}$$

Für die Transformation der Ingenieurskonstanten gilt:

$$\frac{1}{E_x} = \frac{1}{E_{11}} \cos^4 \varphi + \left(\frac{1}{G_{12}} - \frac{2\nu_{12}}{E_{11}} \right) \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi + \frac{1}{E_{22}} \sin^4 \varphi$$

$$\nu_{xy} = E_x \left[\frac{\nu_{12}}{E_{11}} (\sin^4 \varphi + \cos^4 \varphi) - \left(\frac{1}{E_{11}} + \frac{1}{E_{22}} - \frac{1}{G_{12}} \right) \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi \right]$$

$$\frac{1}{E_y} = \frac{1}{E_{11}} \sin^4 \varphi + \left(\frac{1}{G_{12}} - \frac{2\nu_{12}}{E_{11}} \right) \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi + \frac{1}{E_{22}} \cos^4 \varphi$$

$$\frac{1}{G_{xy}} = 2 \left(\frac{2}{E_{11}} + \frac{2}{E_{22}} + \frac{4\nu_{12}}{E_{11}} - \frac{1}{G_{12}} \right) \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi + \frac{1}{G_{12}} (\sin^4 \varphi + \cos^4 \varphi)$$

Die Bilder 3.2.3-1 und 3.2.3-2 verdeutlichen die Richtungsabhängigkeit der Laminat-kennwerte für verschiedene Aufbauten.

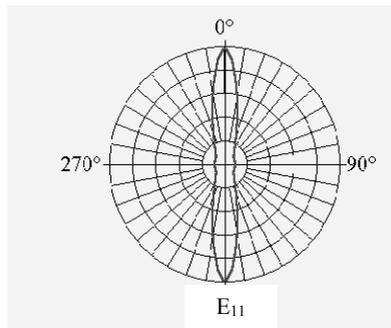


Bild 3.2.3-1: Abhängigkeit des E-Moduls vom Faserwinkel für die unidirektional verstärkte Einzelschicht

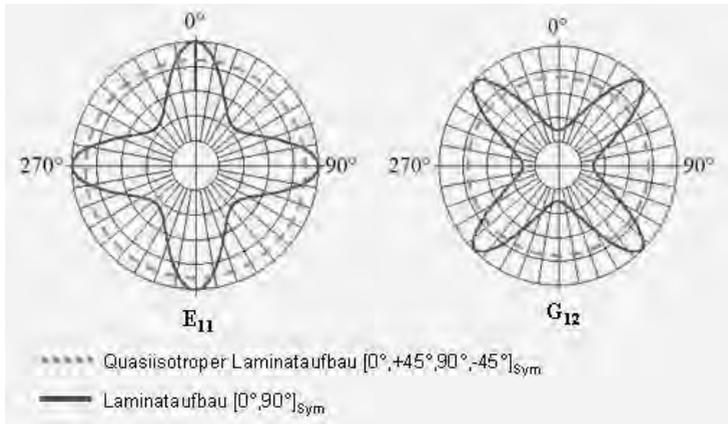


Bild 3.2.3-2: Abhängigkeit von E_{11} und G_{12} vom Faserwinkel für zwei verschiedene Laminataufbauten

3.2.4 Transformation der thermischen Ausdehnungskoeffizienten

Für die Transformation der thermischen Ausdehnungskoeffizienten zwischen lokalen und globalen Eigenschaften gilt:

$$(\alpha)_{12} = [T_2] \cdot (\alpha)_{xy} \quad \text{und} \quad (\alpha)_{xy} = [T_2]^{-1} \cdot (\alpha)_{12}$$

Somit kann das thermische Ausdehnungsverhalten für jeden Faserwinkel θ bestimmt werden.

3.3 Berechnung der Steifigkeitsmatrix für den Mehrschichtverbund im globalen System aus der Summe der Einzelschichten

Die Steifigkeitsmatrix des Gesamtverbundes lässt sich aus den Eigenschaften der Einzelschichten bestimmen, wenn die Einzelschicht entsprechend ihrer Orientierung in das globale System transponiert wurde. Es gilt:

$$[A] = \sum_{k=1}^n \begin{bmatrix} \hat{C} \\ \hat{C} \end{bmatrix} \cdot h_k$$

$[A]$ = Steifigkeitsmatrix des Verbundes im globalen System x, y

$[\hat{C}]$ = Steifigkeitsmatrix der k -ten Einzelschicht im globalem System x, y

- n = Anzahl der Schichten
- k = Laufindex (k = 1 bis n)
- h_k = Dicke der k-ten Einzelschicht

Bei symmetrisch aufgebauten Laminaten ergibt sich folgende Matrix:

$$[A] = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 \\ A_{12} & A_{22} & 0 \\ 0 & 0 & A_{66} \end{bmatrix}$$

Voraussetzung bildet die Kirchhoff-Hypothese für Platten und Schalen. Für den vorliegenden 2-dimensionalen Fall bei Beanspruchungen in der Laminebene (Schalentheorie) muss Dehnungskompatibilität vorliegen. Dies bedeutet, dass bei Zug- oder Druckbelastung in der Laminebene alle Einzlagen des Verbundes unabhängig von ihrer Orientierung gleichmäßig verformt werden. Im Gegensatz dazu wechseln die Spannungen in den Einzschichten (intralaminare Spannungen). Die Höhe der Spannungen in den Einzschichten ist abhängig von der Steifigkeit der Einzelschicht zur Krafrichtung. Lagen mit hoher Steifigkeit in Krafrichtung (Faserrichtung und Krafrichtung fallen zusammen) haben hohe intralaminare Spannungen. Lagen mit geringer Steifigkeit zur Krafrichtung (Fasern haben einen von 0 Grad abweichenden Winkel zur Krafrichtung) haben geringere intralaminare Spannungen.

Ebenso bildet sich bei Belastung durch ein Biegemoment ein linearer Verlauf der Dehnung mit zug- und druckbelasteten Bereichen und einer neutralen Achse aus. Die Bilder 3.3-1 und 3.3-2 zeigen beispielhaft die Dehnungs- und Spannungsverteilung für den quasiisotropen Verbund bei eindimensionaler Belastung.

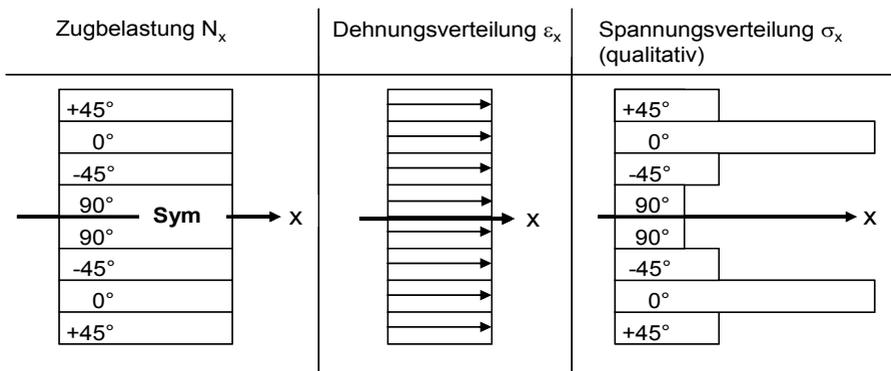


Bild 3.3-1: Dehnungen und Spannungen im quasiisotropen Verbund bei Zugbelastung

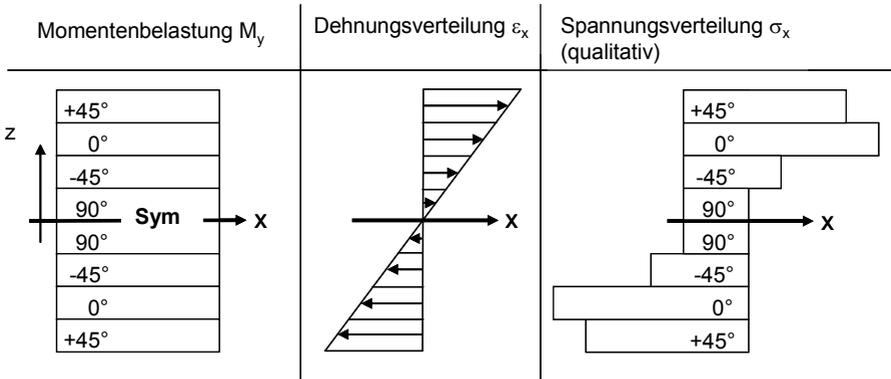


Bild 3.3-2: Dehnungen und Spannungen im quasiisotropen Verbund bei Momentenbelastung

3.4 Berechnung der Verformungen des Gesamtverbundes

Ist die Steifigkeitsmatrix des Gesamtverbundes bekannt, können die Verformungen des Gesamtverbundes berechnet werden. Für den ebenen Belastungsfall gilt.

$$[\varepsilon]_{xy} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{21} & A_{22} & A_{26} \\ A_{61} & A_{62} & A_{66} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix}$$

$[\varepsilon]_{xy}$ = Dehnung des Laminats im globalen System x-y

$$[N]_{xy} = \begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} \quad \text{Beanspruchungsvektor des Verbundes im globalen x-y-Koordinatensystem}$$

3.5 Transformation von $[\varepsilon]_{xy}$ in das lokale System der k-ten Einzellege

Um die Spannungen in der Einzelschicht berechnen zu können, müssen die globalen Verformungen in das lokale System jeder Einzellege transformiert werden.

$$[\varepsilon]_{12}^k = [T_2]^k [\varepsilon]_{xy}$$

3.6 Berechnung der intralaminaren Spannungen in der k-ten Einzellege

Nun können die lokalen Spannungen jeder Einzellege berechnet werden.

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix}^k = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{26} \\ C_{61} & C_{62} & C_{66} \end{bmatrix}^k \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix}^k$$

3.7 Berechnung der Ausdehnungskoeffizienten des Mehrschichtverbundes

Aus den thermischen Ausdehnungskoeffizienten der unidirektional verstärkten Einzelschicht, kann das thermische Ausdehnungsverhalten des Mehrschichtverbundes bestimmt werden.

$$[\alpha] = \frac{1}{[A]} \sum [C]^k \{\alpha\}_{xy}^k h^k$$

3.8 Ermittlung der intralaminaren Schubeigenschaften (G_{12} und τ_{12max}) an der Zugprobe mit der Faserorientierung $\pm 45^\circ$

Es kann nun gezeigt werden, dass mit dem Laminataufbau $\pm 45^\circ$ die intralaminaren Schubeigenschaften der Einzelschicht bestimmt werden kann.

$$[\sigma]_{12} = [T_1][\sigma]_{xy}$$

für +45°:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,5 & 0,5 & 1 \\ 0,5 & 0,5 & -1 \\ -0,5 & 0,5 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,5\sigma_x \\ 0,5\sigma_x \\ -0,5\sigma_x \end{bmatrix}$$

$$[\varepsilon]_{12} = [T_2][\varepsilon]_{xy}$$

für +45°:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,5 & 0,5 & 0,5 \\ 0,5 & 0,5 & -0,5 \\ -0,5 & 0,5 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,5(\varepsilon_x + \varepsilon_y) \\ 0,5(\varepsilon_x + \varepsilon_y) \\ -\varepsilon_x + \varepsilon_y \end{bmatrix}$$

somit:

$$G_{12} = \frac{\tau_{12}}{\gamma_{12}} = \frac{\sigma_2}{2 \cdot (\Delta\varepsilon_x - \Delta\varepsilon_y)} \quad \tau_{12 \max} = \frac{\sigma_x \max}{2}$$

4 Interlaminare Spannungen und Energiefreisetzungsrate im Mehrschichtverbund

Neben den bereits beschriebenen intralaminaren Spannungen, die in den einzelnen Schichten wirken, können zwischen den Schichten interlaminare Spannungen auftreten. Von besonderer Bedeutung ist die interlaminare Festigkeit (τ_{ILS}) des Verbundes bei Schubbeanspruchung.

Die Ermittlung der interlaminaren Schubfestigkeit erfolgt nach DIN EN 2563 an der Kurzbiegeprobe (Länge 20 mm) mit unidirektionalem Laminataufbau [0°]. Durch diesen Aufbau wird die Normalspannung aus der Biegebeanspruchung klein gehalten und es kommt zum Versagen zwischen den Lagen (Delamination).

Schubspannung aus der Querkraft $\tau_{ILS} = \frac{3 \cdot Q}{2 \cdot b \cdot h}$

Für den 3-Punkt Biegeversuch gilt: $Q = \frac{F}{2}$ und somit $\tau_{ILS} = 0,75 \cdot \frac{F}{b \cdot h}$

Eine weitere wichtige Kenngröße zur Bestimmung der Qualität des Verbundes hinsichtlich des Delaminationsversagens ist die interlaminare Energiefreisetzungsrate G_{1C} nach DIN 65 563. Hierbei wird die Energie gemessen, die zur Delamination des Verbundes beim Auseinanderziehen entsprechend Bild 4.1-1 benötigt wird. Die interlaminare Risszähigkeit errechnet sich aus der verbrauchten Energie w dividiert durch das Produkt aus Riss-fortschritt Δa und Probenbreite b :

$$G_{1C} = \frac{w}{\Delta a \cdot b} \text{ in [J/mm}^2\text{]}$$

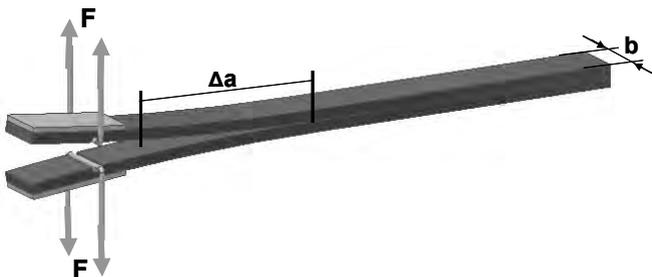


Bild 4.1-1: Bestimmung der interlaminaren Energiefreisetzungsrate G_{1C}

5 Integration von Dehnungsmessstreifen

Die Integration von Dehnungsmessstreifen setzt voraus, dass der DMS vom Aufbau und von der Funktion den speziellen strukturmechanischen Anforderungen der Faserverbundwerkstoffe und den messtechnischen Anforderungen der DMS-Messtechnik gerecht wird.

5.1 Strukturmechanische Aspekte

5.1.1 Einfluss der Integration auf die interlaminaren Eigenschaften des Verbundwerkstoffs

Untersuchungen zeigen, dass der Dehnungsmessstreifen an alle üblichen Matrixharze von Faserverbundwerkstoffen hervorragend anbindet:

- Handlaminatharze (Epoxidharz L20 mit Härter SL der Firma Bakelite)
- Prepregharze mit EP-Matrix (120 und 180°C härtend)

Die Anbindung erlaubt die volle Übertragung des Dehnungsniveaus des Verbundes auf die Messgitter des DMS.

Die Qualität der Anbindung des DMS an das Matrixharz wurde anhand der interlaminaren Scherfestigkeit ILS und der interlaminaren Energiefreisetzungsrates G_{1C} (siehe Kap. 4) bestimmt. Die Untersuchungen erfolgten in Anlehnung an die DIN 65563 und DIN EN 2563.

Die Proben wurden aus dem unidirektionalen CFK-Prepregmaterial (Hexply 6376C-HTA(12K)-10-35% 300MM) gefertigt und im Autoklav bei 180°C und 7bar Druck ausgehärtet.

In die Symmetrieebene der Prüfkörper wurden vorbehandelte Polyimidfolien eingebettet und mit Referenzproben ohne Folie verglichen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5.1.1-1 dargestellt.

	Energiefreisetzungsrates G_{1C} [J/m ²]	Scherfestigkeit ILS [MPa]
Referenzproben ohne Folie	275	120
Proben mit Folie (vorbehandelt)	1030	115

Tabelle 5.1.1-1: Ergebnisse der Untersuchungen zur Anbindung der Polyimidfolie mit dem Matrixharz 6376C-HTA

Diese Werte beziehen sich auf die Anbindung zwischen DMS-Trägerfolie bzw. DMS-Abdeckfolie und Faserverbund.

Untersuchungen zeigen, dass bei Laminaten mit geringen Risszähigkeiten, etwa Handlaminaten oder Laminaten, welche im Injektionsverfahren hergestellt wurden, kein Einfluss bzw. teilweise höhere Kennwerte gemessen wurden.

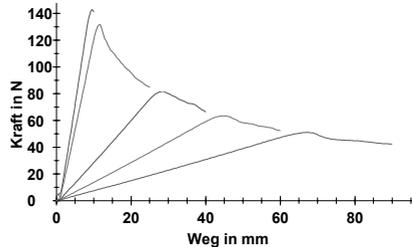
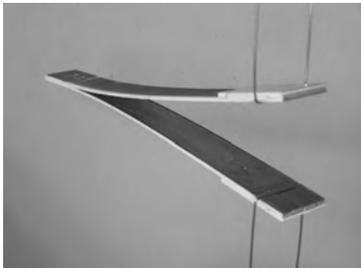


Bild 5.1.1-1: Bestimmung der interlaminaren Energiefreisetzungsrates G_{1C}

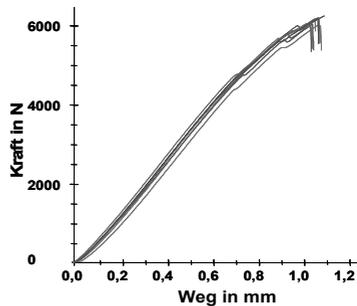


Bild 5.1.1-2: Bestimmung der interlaminaren Scherfestigkeit ILS

Durch das Integrationskonzept des DMS mit Kontaktpins ist die Störung des Verbundes auf ein Minimum reduziert, da die Verkabelung nicht mit eingebettet wird, sondern außerhalb des Werkstoffs erfolgt. Die interlaminaren Eigenschaften des Verbundes werden nur an der Integrationsstelle, die durch den Dehnungsmessstreifen messtechnisch erfasst wird, beeinflusst.

5.1.2 Einfluss der Orientierung benachbarter Lagen auf die Messgenauigkeit

Untersuchungen zeigen, dass die Messgenauigkeit des integrierten Dehnungsmessstreifens in Messgitterrichtung, nicht durch die Faserorientierung der angrenzenden Lagen beeinflusst wird. Dies bedeutet, dass der Dehnungsmessstreifen aus messtechnischer Sicht prinzipiell zwischen jeden beliebig orientierten Einzelschichten integriert werden kann.

Idealerweise wird der Dehnungsmessstreifen jedoch so integriert, dass dieser mit der Trägerfolie auf der Lage zu liegen kommt, deren Kraftfluss gemessen bzw. überwacht werden soll. Die Richtung des Messgitters fällt dann mit der Faserrichtung einer benachbarten Lage überein.

5.1.3 Integrationstiefe des DMS zur Reduzierung des Dehnungsniveaus

Das zulässige Dehnungsniveau von Faserverbundwerkstoffen und Dehnungsmessstreifen unterscheidet sich in Abhängigkeit vom Anwendungsfall teilweise erheblich. Während Faserverbundwerkstoffe auch bei hoher Lastwechselanzahl bis über $\pm 4000 \mu\text{m/m}$ beansprucht werden können, liegt das zulässige Dehnungsniveau bei Dehnungsmessstreifen deutlich tiefer.

Bei geringer Lastwechselanzahl (bis 100 Zyklen) kann ein DMS bis über $\pm 4000 \mu\text{m/m}$ belastet werden. Die zulässige Dehnung für Dauerfestigkeit liegt jedoch bei ca. $\pm 1500 \mu\text{m/m}$ (siehe Bild 5.1.3-2).

Bei biegebeanspruchten Bauteilen kann durch die Integration des Dehnungsmessstreifens dessen Dehnungsbelastung abgesenkt werden. Die Biegebeanspruchung bildet zur Aufnahme des Biegemoments eine zug- und druckbelastete Seite aus. Wie bei isotropen Werkstoffen ergibt sich auch bei Faserverbundwerkstoffen ein linearer Dehnungsverlauf über den Probenquerschnitt.

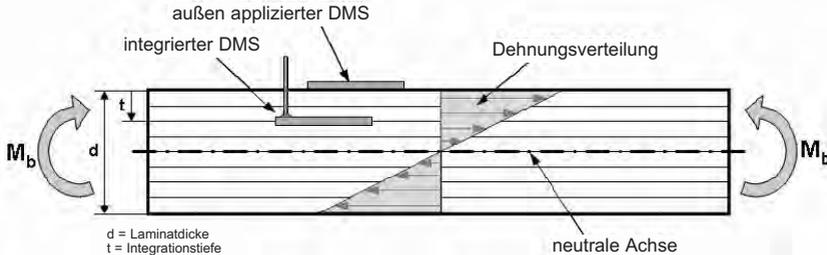


Bild 5.1.3-1: Dehnungsniveau von integrierten und außen applizierten DMS an biegebeanspruchten Bauteilen

Somit ergibt sich bei reiner Biegebelastung folgender Zusammenhang zwischen Integrationstiefe und Dehnungsniveau:

$$\frac{\mathcal{E}_{\text{außen}}}{0,5 * d} = \frac{\mathcal{E}_{\text{int}}}{0,5 * (d - t)} \quad d = \text{Bauteildicke}; t = \text{Integrationstiefe}$$

Zu berücksichtigen ist, dass die Struktur neben der Biegebeanspruchung auch durch Normalspannungen aus Zug- und Druckkräften belastet sein kann. Solche Normalbelastungen rufen Verformungen hervor, die sich mit den Dehnungen aus der Biegebelastung überlagern. Wird der DMS in der Symmetrieebene angeordnet, wird seine messbare, dehnungsabhängige Widerstandsänderung auch bei biegebelasteten Teilen vornehmlich durch Zug- und Druckkräfte bestimmt.

Die Höhe des zulässigen Dehnungsniveaus für den Dehnungsmessstreifen richtet sich nach der vorgegebenen möglichen Lastwechselanzahl in Abhängigkeit der daraus resultierenden Fehleranteile. Siehe hierzu auch [7].

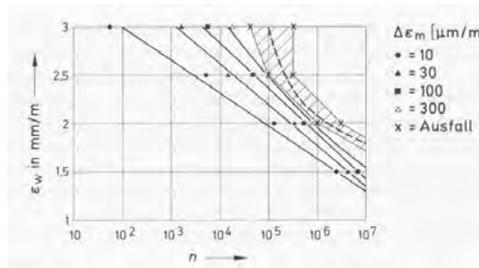


Bild 5.1.3-2: Dauerschwingverhalten von DMS auf Konstantan-Basis (aus [7])

5.1.4 Abhängigkeit des Messfehlers von der Orientierung des DMS

Im Folgenden soll untersucht werden, welche Auswirkung ein integrierter DMS, der um den Winkel φ zur optimalen Installationslage verdreht ist, auf die Messgenauigkeit hat. Dies ist deshalb von besonderem Interesse, da der integrierte DMS nach dem Aushärtevorgang des Laminats nicht mehr in seiner Lage verändert werden kann und somit eine Korrektur unmöglich ist. Sollte bei dem Aushärtprozess ein DMS verrutschen, können die zu erwartenden Messfehler errechnet und im Ergebnis kompensiert werden.

Bei einem einachsigen Spannungszustand treten die Dehnungen ε_1 und ε_2 auf. Aus der Abweichung φ des DMS in Bezug auf die Hauptnormalspannungsrichtung resultieren die Dehnung ε_x und ε_y im lokalen System des DMS.

Das Messgitter ist in x-Richtung orientiert. Es wirken in den Richtungen

1: E_{11} ; ν_{12} ; σ_{\max} ; ε_{\max}

2: E_{22} ; ν_{21} ; ε_q

x: $E_x = E_{11}(\varphi)$; $\nu_{12}(\varphi)$; $\sigma_x = \sigma_1(\varphi)$; ε_x ; ε_{qy}

y: $E_y = E_{22}(\varphi)$; $\nu_{21}(\varphi)$; $\sigma_y = \sigma_1(\varphi + 90^\circ)$.

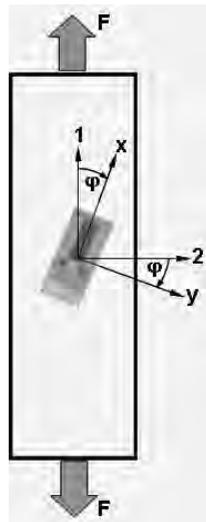


Bild 5.1.4-1: Einachsiger Spannungszustand am Beispiel einer Zugprobe

Durch die Spannung σ_x wird die Dehnung ε_x hervorgerufen.

Es gilt:

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E_x} = \frac{\sigma_1(\varphi)}{E_{11}(\varphi)}$$

Mit dem winkelabhängigen Anteil der Spannung

$$\sigma_1(\varphi) = \sigma_{\max} \cdot \cos^2(\varphi)$$

ergibt sich eine Dehnung ε_x im lokalen System des DMS

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_{\max}}{E_{11}(\varphi)} \cdot \cos^2(\varphi).$$

Die Spannung σ_y erzeugt in Richtung x eine Querdehnung ε_{qy} , die durch den E-Modul $E_{22}(\varphi)$ und die Querdehnrzahl $\nu_{21}(\varphi)$ bestimmt ist:

$$\varepsilon_{qy} = -\nu_{21}(\varphi) \cdot \frac{\sigma_y}{E_y} = -\nu_{21}(\varphi) \cdot \frac{\sigma_1(\varphi + 90^\circ)}{E_{22}(\varphi)}$$

Wird der winkelabhängige Anteil der Spannung

$$\sigma_1(\varphi + 90^\circ) = \sigma_{\max} \cdot \cos^2(\varphi + 90^\circ)$$

in obige Formel eingesetzt, so erhält man die Dehnung

$$\varepsilon_{qy} = -\nu_{21}(\varphi) \cdot \frac{\sigma_{\max}}{E_{22}(\varphi)} \cdot \cos^2(\varphi + 90^\circ).$$

Die beiden gleichgerichteten Dehnungen können addiert werden, da es sich um die Dehnung ε_x und die Querdehnung ε_{qy} in Richtung x im lokalen System x, y handelt:

$$\varepsilon(\varphi) = \varepsilon_x + \varepsilon_{qy}$$

Hieraus ergibt sich folgende Beziehung:

$$\varepsilon(\varphi) = \frac{\sigma_{\max}}{E_{11}(\varphi)} \cdot \cos^2(\varphi) - \nu_{21}(\varphi) \cdot \frac{\sigma_{\max}}{E_{22}(\varphi)} \cdot \cos^2(\varphi + 90^\circ)$$

Des Weiteren gilt der Zusammenhang (Maxwell-Betti-Beziehung) zwischen den E-Moduli und den Querdehnrzahlen (vergleiche Kapitel 2.5):

$$\frac{E_{11}(\varphi)}{\nu_{12}(\varphi)} = \frac{E_{22}(\varphi)}{\nu_{21}(\varphi)}$$

Dies führt zu

$$\varepsilon(\varphi) = \frac{\sigma_{\max}}{E_{11}(\varphi)} \cdot \cos^2(\varphi) - \nu_{12}(\varphi) \cdot \frac{\sigma_{\max}}{E_{11}(\varphi)} \cdot \cos^2(\varphi + 90^\circ)$$

mit dem trigonometrischen Zusammenhang $\cos(\varphi + 90^\circ) = \sin(\varphi)$ ergibt sich für $\varepsilon(\varphi)$

$$\varepsilon(\varphi) = \frac{\sigma_{\max}}{E_{11}(\varphi)} \cdot (\cos^2(\varphi) - \nu_{12}(\varphi) \cdot \sin^2(\varphi)).$$

Wird in der Klammer mit $\sin^2(\varphi)$ addiert und subtrahiert, so erhält man

$$\varepsilon(\varphi) = \frac{\sigma_{\max}}{E_{11}(\varphi)} \cdot (\cos^2(\varphi) + \sin^2(\varphi) - \sin^2(\varphi) - \nu_{12}(\varphi) \sin^2(\varphi))$$

bzw.

$$\varepsilon(\varphi) = \frac{\sigma_{\max}}{E_{11}(\varphi)} \cdot (\cos^2(\varphi) + \sin^2(\varphi) - (1 + \nu_{12}(\varphi)) \sin^2(\varphi)).$$

Um die Formel zu vereinfachen wird $\cos^2(\varphi) + \sin^2(\varphi) = 1$ eingesetzt. Man erhält somit die endgültige Formel für die vom DMS gemessene Dehnung $\varepsilon(\varphi)$.

$$\varepsilon(\varphi) = \frac{\sigma_{\max}}{E_{11}(\varphi)} \cdot (1 - (1 + \nu_{12}(\varphi)) \cdot \sin^2(\varphi))$$

Die tatsächliche Dehnung ε_{\max} in 1-Richtung lässt sich aus $\frac{\sigma_{\max}}{E_{11}}$ berechnen.

$$\varepsilon_{\max} = \frac{\varepsilon(\varphi) \cdot E_{11}(\varphi)}{E_{11} \cdot (1 - (1 + \nu_{12}(\varphi)) \cdot \sin^2(\varphi))}$$

Für den Messfehler ergibt sich daher:

$$f = \frac{\varepsilon(\varphi) - \varepsilon_{\max}}{\varepsilon_{\max}}$$

Die Richtungsabhängigkeit des Materialverhaltens (E_{11} , E_{22} , G_{12} , ν_{12}) der Faser-verbundwerkstoffe erfordert bei der Berechnung, insbesondere bei der Zusammenfassung der Steifigkeiten in multiaxialen Laminaten, ein häufiges Transformieren der Spannungen und Verzerrungen vom Materialhauptachsensystem 1,2 auf ein globales Koordinatensystem x, y und umgekehrt.

Zur Verdeutlichung der eben gewonnenen Erkenntnisse sollen Beispiele für typische Faserverbundmaterialien aus GFK und CFK herangezogen werden. Bei den Beispielen handelt es sich um Proben aus unidirektionalen Lagen, die alle eine Orientierung in 0° Richtung aufweisen $[0^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 0^\circ]_{\text{sym}}$. Dadurch erhält man eine sehr starke Richtungsabhängigkeit der E-Moduli und der Querkontraktionszahlen. Zum Vergleich wird ein quasiisotroper Laminataufbau $[+45^\circ, 0^\circ, -45^\circ, 90^\circ]_{\text{sym}}$ aus GFK und CFK gewählt. Um eine Aussage über den relativen Messfehler zu treffen, wird ein in der Praxis maximal auftretendes Dehnungsniveau von $\varepsilon_x = 0,5\%$ angenommen und die dazu maximale

Spannung σ_x berechnet. In den folgenden Bildern sind die Materialkonstanten der eben aufgeführten Beispiele in Polarkoordinaten dargestellt.

Die Grafik oben links im Bild 5.1.4-2 zeigt die starke Richtungsabhängigkeit des E-Moduls des anisotropen Laminats mit dem Aufbau $[0^\circ]_4$ sym. Nur genau in Faserrichtung, d.h. in 0° -Richtung, ist das maximale E-Modul vorhanden. Bereits bei geringen Abweichungen wird das E-Modul wesentlich kleiner – eine Abweichung von 10° hat eine Verringerung des E-Moduls um 50% zu Folge. Im Vergleich hierzu ist im Bild 5.1.4-4 deutlich zu erkennen, dass die Werkstoffeigenschaften bei quasiisotropen Laminaten in allen Richtungen gleich sind.

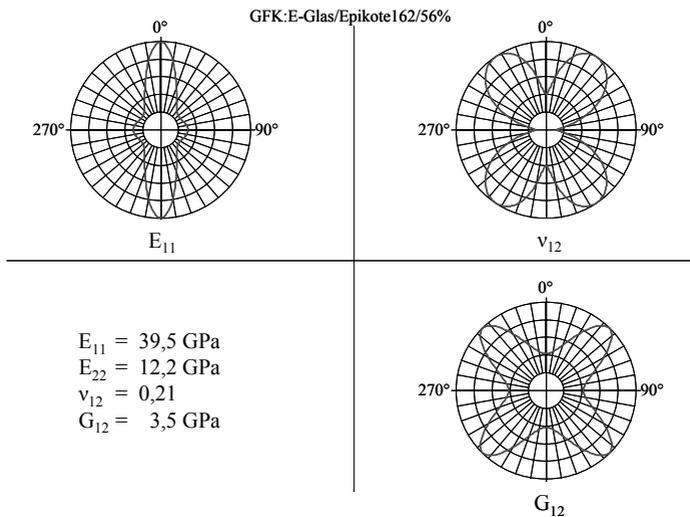


Bild 5.1.4-2: Materialkennwerte für den anisotropen Laminataufbau aus GFK $[0^\circ]_4$ sym

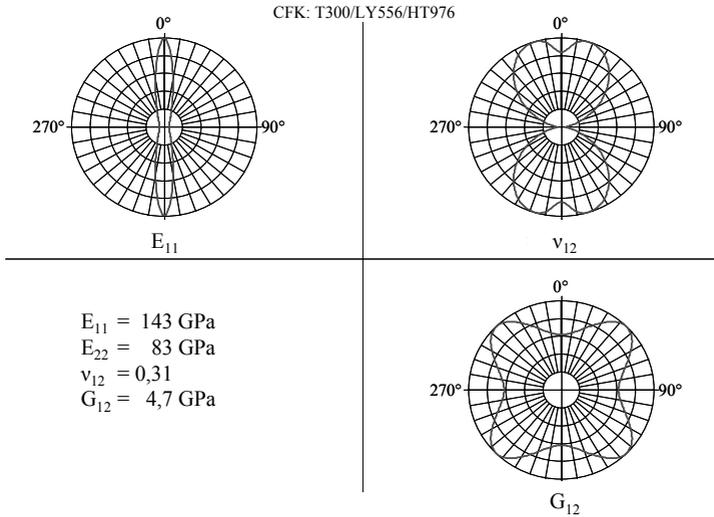


Bild 5.1.4-3: Materialkennwerte für den anisotropen Laminataufbau aus CFK $[0^{\circ}]_4$, sym

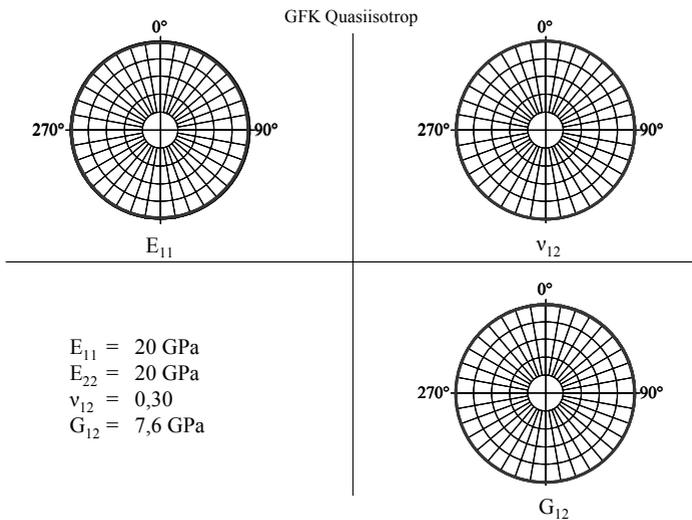


Bild 5.1.4-4: Materialkennwerte für den quasiisotropen Laminataufbau aus GFK $[+45, 0, -45, 90]_{\text{sym}}$

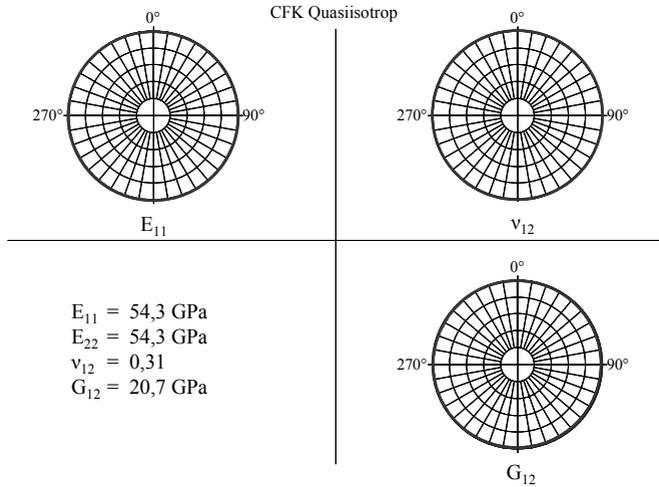


Bild 5.1.4-5: Materialkennwerte für den quasiisotropen Laminataufbau aus CFK [+45, 0, -45, 90]_{sym}

Im folgenden Diagramm (siehe Bild 5.1.4-6) ist der relative Messfehler ($f = \frac{\varepsilon(\varphi) - \varepsilon_{\max}}{\varepsilon_{\max}}$) über die Winkelabweichung des DMS zur Hauptspannungsrichtung aufgetragen. Dargestellt ist der für die Praxis interessanteren Bereich von 0° bis 5° Winkelabweichung.

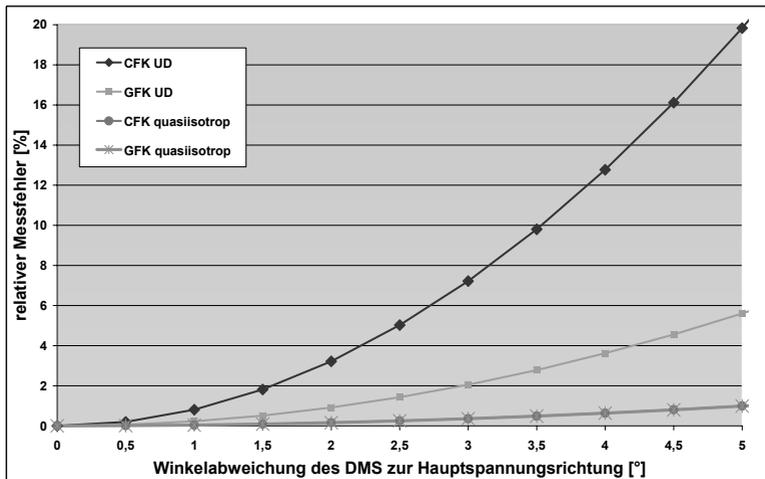


Bild 5.1.4-6: Relativer Messfehler bei unterschiedlichen Materialien und Laminataufbauten

Aus diesem Diagramm ist besonders gut zu erkennen, wie groß der Einfluss des Materials und dessen Orientierung auf den Messfehler ist. Der größte Fehler tritt bei CFK-Laminaten auf, die nur aus UD-Lagen aufgebaut sind. Bei GFK-Laminaten ist der Fehler bei gleichem Lagenaufbau wesentlich geringer. Die Fehlerkurven der beiden quasiisotropen Lamine verlaufen nahezu identisch. Dies lässt sich durch Vereinfachen der zuvor hergeleiteten Formel verdeutlichen. Die Formel für quasiisotrope Werkstoffe ($E_{11} = E_{11}(\varphi)$; $\nu_{12} = \nu_{12}(\varphi)$) lautet:

$$\varepsilon_1(\varphi) = \varepsilon_{\max} \left[1 - (1 + \nu_{12}) \cdot \sin^2(\varphi) \right]$$

Ausschlaggebend für den relativen Fehler bei quasiisotropen Werkstoffen ist die Querkontraktion ν_{12} . Das heißt der relative Fehler bei quasiisotropen Laminaten mit gleicher Querdehnzahl, ist bei gleicher Abweichung der DMS von der Hauptspannungsrichtung identisch. In diesem Fall betragen die Querkontraktionen für beide quasiisotropen Lamine 0,3.

Die Beispiele haben gezeigt, dass der relative Messfehler von zwei wesentlichen Faktoren abhängt, zum einen von der Wahl des Materials und zum anderen von dessen Laminataufbau. Dies spiegelt sich in den Quotienten $\frac{E_{11}}{E_{22}}$ und $\frac{\nu_{12}}{\nu_{21}}$ wieder. Zusammenfassend

bedeutet dies: je größer $\frac{E_{11}}{E_{22}}$ bzw. $\frac{\nu_{12}}{\nu_{21}}$ (Beispiel CFK UD), desto größer ist der relative

Messfehler bei Abweichung des DMS von der Hauptspannungsrichtung. Diese Untersuchungen beziehen sich alle auf den einachsigen Spannungszustand.

5.1.5 Einfluss der Wärmeentwicklung bei integrierten DMS

Faserverbundwerkstoffe haben eine sehr geringe thermische Wärmeleitfähigkeit. Um eine Erwärmung des integrierten Dehnungsmessstreifen zu minimieren, haben die Dehnungsmessstreifen, welche für die Integration zur Anwendung kommen, einen elektrischen Widerstand von 350 Ohm. Des Weiteren sollte die Speisespannung 2,5 V nicht überschreiten.

Um stationäre Bedingungen zu erzielen, empfiehlt es sich, bei erhöhten Genauigkeitsanforderungen die Meßstelle ähnlich lang wie die Nachfolgeelektronik (ca. 15 bis 30 Minuten) vor der eigentlichen Messung in Betrieb zu nehmen.

5.1.6 Temperaturkompensation bei Faserverbundwerkstoffen

Faserverbundwerkstoffe mit gerichteten Endlosfasern können richtungsabhängige thermische Ausdehnungskoeffizienten haben (vergleiche Kap. 2.4, 3.2.4 und 3.7). Diese Anisotropie ist bei der Temperaturkompensation zu berücksichtigen.

Der Kompensations-DMS muss daher auf dem Kompensationselement die gleiche Orientierung aufweisen, wie der zur Messung verwendete DMS auf dem Messobjekt.

Nur Laminare mit quasiisotropem Laminataufbau haben ein richtungsunabhängiges thermisches Ausdehnungsverhalten. In diesem Falle kann auf die identische Orientierung des zur Kompensation und zur Messung verwendeten DMS verzichtet werden.

5.1.7 Einfluss der Querempfindlichkeit

Dehnungsmessstreifen sind prinzipiell so aufgebaut, dass selbst bei überlagerter Beanspruchung nur die Dehnungen in Messgitterrichtung ε_l gemessen werden. Zu einem geringen Anteil wird das Messsignal durch eine Dehnung quer zur Messgitterrichtung ε_q beeinflusst. Dieser Anteil wird durch die Querempfindlichkeit q des Dehnungsmessstreifen beschrieben und liegt bei 0 bis 0,1%.

Dehnungsmessstreifen werden aus traditionellen Gründen für Werkstoffe mit einer Querdehnzahl ν_0 von 0,285 kalibriert. Werden Messungen an Werkstoffen mit dieser Querdehnzahl unter einachsiger Last durchgeführt, treten auch bei querempfindlichen DMS keine Messfehler auf.

Bei Faserverbundwerkstoffen können aufgrund der anisotropen Materialeigenschaften sehr unterschiedlichen Querdehnzahlen im Bereich von 0,01 bis über 0,7 auftreten. Während Laminare mit quasiisotropem Laminataufbau Querdehnzahlen im Bereich von 0,25 bis 0,35 haben, können die Querdehnzahlen bei Laminaten mit dem Aufbau $\pm 45^\circ$ Werte von 0,7 und Laminare mit dem Aufbau 90° Werte von 0,01 annehmen.

Der Messfehler f lässt sich nach folgender Formel berechnen [7]:

$$f = \frac{q}{1 - q \cdot \nu_0} \cdot \left(\frac{\varepsilon_q}{\varepsilon_l} + \nu_0 \right)$$

Damit kann die tatsächliche Dehnung ermittelt werden. Für sie gilt:

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_{mess}}{1 + f}$$

Wie folgende Beispiele zeigen, kann der Einfluss in der Regel vernachlässigt werden.

Beispiel 1:

Bestimmung des intralaminaren Schubmoduls G_{12} an der Zugprobe $\pm 45^\circ$ nach EN ISO 6031 mit Dehnungsmessstreifen.

Laminataufbau	[+45,-45,-45,+45]
Querempfindlichkeit der Dehnungsmessstreifen	$q = 0,1\% = 0,001$
Querdehnzahl des Laminats	$\nu_{12} = 0,7$
Querdehnzahl des Kalibrierbalkens	$\nu_0 = 0,285$
Gemessene Dehnung in Krafrichtung:	$\varepsilon_l = \varepsilon_{\text{mess}} = 2500 \mu\text{m/m}$
Querdehnung:	$\varepsilon_q = -1750 \mu\text{m/m}$

1.1 DMS in Krafrichtung

$$f = \frac{0,001}{1 - 0,001 \cdot 0,285} \cdot \left(\frac{-1750}{2500} + 0,285 \right) = -0,042\%$$

$$\varepsilon = \frac{2500 \frac{\mu\text{m}}{\text{m}}}{1 - 0,000415} = \underline{\underline{2501 \frac{\mu\text{m}}{\text{m}}}}$$

1.2 DMS quer zur Krafrichtung

$$f = \frac{0,001}{1 - 0,001 \cdot 0,285} \cdot \left(\frac{2500}{-1750} + 0,285 \right) = -0,11\%$$

$$\varepsilon = \frac{-1750}{1 - 0,00114} = \underline{\underline{-1752 \frac{\mu\text{m}}{\text{m}}}}$$

Für den Dehnungsmessstreifen in Längsrichtung (ε_l) ergibt sich ein Messfehler von 0,042%. Für den um 90° gedrehten Dehnungsmessstreifen zur Bestimmung der Querdehnung ergibt sich ein Messfehler von 0,11%. Der Fehler bei der Bestimmung des Schubmoduls mit der Formel nach Kapitel 2.2 ist in der Praxis vernachlässigbar.

Beispiel 2:

Bestimmung des E-Moduls E_{11} und der Querdehnung ν_{12} an der Zugprobe 0° nach EN ISO 527-4 mit Dehnungsmessstreifen.

Laminataufbau	[0,0,0,0]
Querempfindlichkeit der Dehnungsmessstreifen	$q = 0,1\% = 0,001$
Querdehnzahl des Laminats	$\nu_{12} = 0,3$
Querdehnzahl des Kalibrierbalkens	$\nu_0 = 0,285$
Gemessene Dehnung in Krafrichtung:	$\varepsilon_i = \varepsilon_{\text{mess}} = 2500 \mu\text{m/m}$
Querdehnung:	$\varepsilon_q = -750 \mu\text{m/m}$

2.1 DMS in Krafrichtung

$$f = \frac{0,001}{1 - 0,001 \cdot 0,285} \cdot \left(\frac{-750}{2500} + 0,285 \right) = -0,0015\%$$

$$\varepsilon = \frac{-750 \frac{\mu\text{m}}{\text{m}}}{1 - 0,000015} = \underline{\underline{-750,01 \frac{\mu\text{m}}{\text{m}}}}$$

2.2 DMS quer zur Krafrichtung

$$f = \frac{0,001}{1 - 0,001 \cdot 0,285} \cdot \left(\frac{2500}{-750} + 0,285 \right) = -0,3\%$$

$$\varepsilon = \frac{-750}{1 - 0,003} = \underline{\underline{-752 \frac{\mu\text{m}}{\text{m}}}}$$

Auch in diesem Fall ist der Messfehler deutlich geringer als die in der Praxis üblichen Materialstreuungen bei Faserverbundwerkstoffen durch Fertigungstoleranzen.

5.1.8 Einfluss der Empfindlichkeit von Dehnungsmessstreifen senkrecht zur Messgitterebene

Oberflächlich applizierte DMS werden im Allgemeinen durch die Längsdehnung ε_x und die Querdehnung ε_y , die in der Messgitterebene auftreten, verformt.

Im Gegensatz dazu werden integrierte DMS auch senkrecht zur Messgitterebene beansprucht [10]. Die Höhe der Beanspruchung hängt vom E-Modul des Werkstoffs in Dickenrichtung E_z und den entsprechenden Querdehnzahlen ν_{zx} und ν_{zy} ab.

Der E-Modul von Faserverbundwerkstoffe in Dickenrichtung E_z ist gegenüber den E-Modulen in der Laminebene gering. Bei unidirektional verstärkten Materialien mit gerichteten Endlosfasern wird E_z meist mit dem E-Modul der Einzelschicht quer zur Faserrichtung E_{22} gleichgesetzt (6000 bis 12000 MPa) (vergl. auch [11]). Die Querdehnzahlen ν_{zx} und ν_{zy} liegen je nach Laminataufbau im Bereich von 0,25 bis 0,35. Für die Verformungen in Dickenrichtung gilt ($\sigma_z = 0$):

$$\varepsilon_z = -\frac{\nu_{zx}}{\varepsilon_x} \cdot \sigma_x - \frac{\nu_{zy}}{\varepsilon_y} \cdot \sigma_y$$

Durch diese Beanspruchung erfährt der Dehnungsmessstreifen prinzipiell eine Widerstandsänderung, die sich dem Signal der Dehnungsmessung als Fehler überlagert. Je nach Belastungsart (Zug oder Druck) kann die Widerstandsänderung positiv oder negativ sein. Die Höhe des Messfehlers hängt von der Empfindlichkeit des DMS senkrecht zur Messgitterebene ab, die bei etwa $0,55 \pm 0,2 \mu\text{m}/(\text{mMPa})$ liegt [7, 10]. Im üblichen Dehnungsbereich liegt der Messfehler bei weniger als 0,2 % und ist daher für viele praktische Anwendungsfälle vernachlässigbar.

Wie in Kapitel 3 beschrieben, wurden im Rahmen der Entwicklung von integrierbaren DMS mit Kontaktpins vergleichende Untersuchungen mit oberflächlich aufgetragenen DMS durchgeführt. Dabei wurden unterschiedliche Laminataufbauten (0° , $\pm 45^\circ$, quasiisotrop) mit stark variierenden Werkstoffkennwerten geprüft. Bei allen Versuchen ergaben sich zwischen den integrierten DMS und den oberflächlich aufgetragenen DMS Messtoleranzen bis max. 3%.

5.2 Beschreibung des Dehnungsmessstreifens

HBM hat DMS entwickelt (siehe Beispiel Bild 5.2-1), welche für die Integration in Faserverbundwerkstoffe geeignet sind und sowohl den speziellen strukturmechanischen und fertigungstechnischen Anforderungen des Werkstoffs, als auch den messtechnischen Anforderungen der DMS-Messtechnik gerecht werden.

Das augenfälligste Merkmal dieses DMS sind die zwei senkrecht aufgebrachten Kontaktpins, die die Kontaktierung des im Werkstoff eingebetteten DMS ermöglichen. Die vergoldeten Pins sind mit einer speziellen Isolierung versehen, um eine Integration in die elektrisch leitfähigen Kohlenstofffasern zu ermöglichen.

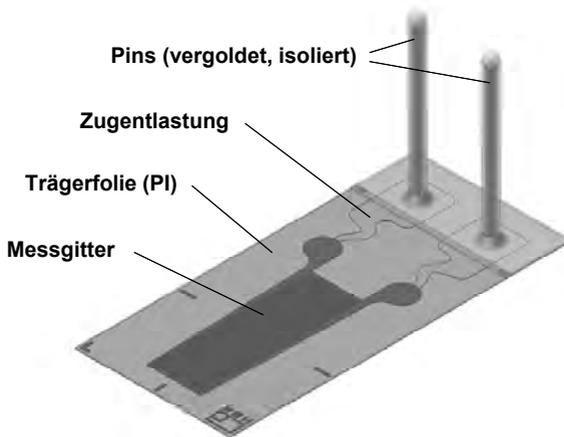


Bild 5.2-1: DMS mit Kontakt-Pins

Das spezielle Layout des DMS ist so gestaltet, dass die Bereiche, in denen die Fasern durch die Pins verdrängt werden, nicht im Bereich des Messgitters liegen. Damit wird eine homogene Materialverteilung über- und unterhalb des Messgitters erreicht.

Des Weiteren wird durch eine spezielle Zugentlastung der Lötstützpunkte verhindert, dass auf den Pin wirkende Kräfte auf das Messgitter übertragen werden.

Der DMS ist prinzipiell für alle gängigen Verarbeitungsverfahren und Materialien (Prepreg oder Trockenfasern) geeignet und bis zu einer Temperatur von 200°C beständig.

5.2.1 Aufbau und Anbindung des Dehnungsmessstreifens

Im Gegensatz zur üblichen DMS-Applikation auf der Oberfläche eines Bauteils, bei der der DMS mittels eines Spezialklebstoffs mit der entsprechenden Seite aufgeklebt wird, wird bei der Integration der DMS von beiden Seiten durch das Matrixharz mit dem Werkstoff im Fertigungsprozess verklebt.

Eine möglichst optimale adhäsive Anbindung zwischen DMS und Matrixharz (meist EP) ist erforderlich, um die Dehnungen möglichst verlustfrei auf das Messgitter zu übertragen. Durch eine spezielle Vorbehandlung der Abdeck- und Trägerfolie des DMS wird dies sichergestellt.

5.2.2 Funktion der Kontaktpins des Dehnungsmessstreifens

Im eingebetteten Zustand ist der DMS von außen nicht mehr zugänglich und somit eine Kontaktierung der Lötstützpunkte mit den Messleitungen nicht möglich. Daher sollte der DMS so ausgeführt sein, dass eine spätere Kontaktierung noch möglich ist.

Das Einbetten eines vollständig verdrahteten DMS, d.h. DMS mit entsprechenden Messleitungen, ist aus verschiedenen Gründen nicht empfehlenswert:

1. Auswirkungen auf die Messwerte und Störung des Verbundes

Durch das Einbetten der Messleitungen verkleben diese mit dem Laminat und die Strukturverformungen werden auf die Messleitungen übertragen. Die Dehnung der Messleitungen führt wiederum zu einer Widerstandsänderung, die sich auch auf den Messwert auswirkt. Um diesen Effekt zu vermeiden, besteht prinzipiell die Möglichkeit, teflonisierte Drähte zu verwenden, die nicht mit dem Harz verkleben. Jedoch ist hier die Störung des Verbundes durch die Drähte als kritisch zu bewerten, da hier im Prinzip eine „Fehlstelle“ eingebracht wird.

2. Einfluss auf die strukturmechanischen Eigenschaften des Laminats

Zur Spannungsanalyse einer Struktur sind oftmals mehrere Dehnungsmessstreifen notwendig, um eine Aussage über den Belastungszustand treffen zu können. Sinnvollerweise werden die DMS in Dreileiterschaltung kontaktiert, um Messfehler bedingt durch thermische Widerstandsänderung der Leitungen zu kompensieren [12]. Bereits bei einer geringen Anzahl von 3 DMS zur Messung in den Richtungen 0° , 90° und 45° entsteht somit schnell eine große Anzahl notwendiger Messleitungen (9 Stück bei 3-Leiterschaltung). Eine Integration der Messleitungen ist somit bereits bei einer geringen Anzahl an DMS aus strukturmechanischen Gesichtspunkten nicht akzeptabel, da das Laminat dadurch erheblich gestört wird.

Drähte sollten zumindest in einer definierten Richtung innerhalb der Struktur verlegt werden, z.B. in Faserrichtung, um einen möglichst gleichgerichteten Einfluss zu erhalten. Dies ist jedoch mit einem fertigungstechnisch hohen Aufwand verbunden.

Aus den oben genannten Gründen ist der DMS für die Integration so konstruiert, dass die Verdrahtung nach der Integration in das Laminat erfolgen kann. Dies wird durch zwei Kontaktstifte - so genannten Pins - erreicht, die senkrecht auf den Lötstützpunkten des DMS fixiert sind (siehe Bild 5.2-1). Die Pins erlauben die Trennung von Integration und Kontaktierung des DMS. Durch die senkrechte Anordnung der Pins ergeben sich einige entscheidende Vorteile:

- a) Die Kontaktelemente führen auf kürzestem Weg aus dem Laminat und reduzieren damit mögliche Störeinflüsse des Laminats auf ein Minimum. Die lasttragenden Fasern werden nicht durch die Pins beschädigt.
- b) Der DMS wird von den Pins fixiert, da die Pins durch die einzelnen Faserschichten stechen und durch die umschließenden Fasern gehalten werden.

- c) Das Handling während der Fertigung wird erheblich vereinfacht, da keine Drähte durch die Struktur geführt werden. Die Pins stechen durch die einzelnen Lagen und führen sofort nach außen an die Oberfläche.

Für die Integration der DMS in die elektrisch leitfähigen CFK-Materialien sind die Pins mit einer speziellen Isolierung beschichtet.

Je nach Anforderung kann der Anwender entscheiden, ob die Kontaktierung der Pins auf der Strukturinnenseite oder auf der Außenseite erfolgen soll. So können zum Beispiel bei Sandwichstrukturen die Messleitungen oder eine kundenspezifische Elektronik im Schaumkern eingebracht werden.

5.2.3 Technische Eigenschaften des DMS

Technische Eigenschaften des DMS am Beispiel des DMS-Typs LI66-10/350:

DMS:

Abmessungen (L x B):	22 x 10 mm
Träger- / Abdeckfolie:	Polyimid
Messgitterwerkstoff:	Konstantan
Messgitterlänge:	10 mm
Widerstand:	350 Ω
Ausdehnungskoeffizient:	$\alpha = 0,5 \cdot 10^{-6} [1/K]$

Pins:

Material:	Messing
Finish:	Gold über Nickel
Pinnlänge:	15 mm
Pinndurchmesser:	0,6 mm

Maximale Verarbeitungstemperatur: 200°C.

5.3 Die Integration von DMS

Die Integrationstechnik wird anhand von Gelegen mit Trockenfasern beschrieben. Die Verarbeitung von Prepreg unterscheidet sich nur geringfügig. An entsprechender Stelle wird auf diese Unterschiede hingewiesen.

5.3.1 Positionierung des Dehnungsmessstreifens

Die genaue Position und Ausrichtung des DMS ist entscheidend für die spätere Bewertung des Spannungszustands. Bei der Installation auf der Oberfläche erfolgt die Ausrichtung des DMS am fertigen Bauteil. Hierzu werden üblicherweise auf der Oberfläche Markierungen in Form von Anrisslinien angebracht und der DMS anschließend beim Installationsvorgang an diesen ausgerichtet.

Bei der Integration wird der DMS während der Fertigung auf dem Fasergelege ausgerichtet und installiert. (Da eine Markierung mittels Anreißnadel oder Stift auf dieser Oberfläche nicht angebracht werden kann, muss auf alternative Möglichkeit der einer Markierung zurückgegriffen werden.) Für kleine Strukturen ($<1 \text{ m}^2$) sind oftmals gewöhnliche Messmittel wie Winkellehre und Lineal ausreichend, um die Lage und Ausrichtung zu kontrollieren. Bei komplexen Strukturen oder bei der Integration mehrere DMS bietet es sich auch an, eine Installationsschablone anzufertigen, die während der Positionierung des DMS am Werkzeug fixiert bzw. mit in das Werkzeug eingelegt wird (siehe Bild 5.3.1-1a).

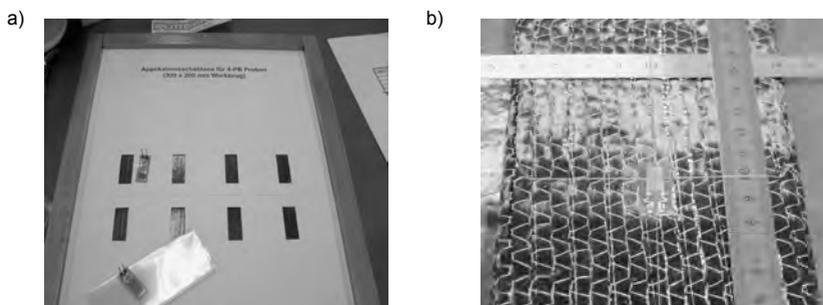


Bild 5.3.1-1: Positionierung und Ausrichtung des DMS

- a) im Werkzeug eingelegte Installationsschablone
- b) entlang der Struktur gespannte Fäden - präzise Ausrichtung mittels Lineal

Bei großen Bauteilen ($>1 \text{ m}^2$) ist eine Möglichkeit der Markierung das Spannen mehrere Fäden entlang der Struktur. Die so entstehenden Orientierungslinien helfen bei der exakten Ausrichtung mit Lineal und Winkellehre (siehe Bild 5.3.1-1b). Eine weitere

Möglichkeit ist der Einsatz von Laserprojektoren, welche ggf. bereits für den Fertigungsprozess eingesetzt werden. Diese können hochgenaue Abbildungen auf den Fasermatten darstellen und somit die exakte Position markieren.

5.3.2 Fixierung des Dehnungsmessstreifens

Während des Fertigungsprozesses besteht bei der Verarbeitung von Trockenfasermaterial die Gefahr, dass der DMS durch das Handling verrutscht. Um dies zu vermeiden, ist der DMS bis zur Fixierung durch den Abdeckschaum (siehe Kap. 5.3.4) anderweitig zu halten. Bei der Fixierung des DMS auf den trockenen Fasern mittels eines Klebstoffs ist zu beachten, dass in diesem Bereich weder die Fasern noch der DMS später mit dem Matrixharz imprägniert werden können. Daher bieten sich zwei alternative Möglichkeiten der Fixierung an:

a) Verwendung von Binderpulver

Eine in der Verarbeitung von Trockenfasermaterial gebräuchliche Methode zur Fixierung der Fasermatten untereinander ist die Verwendung von so genanntem Binderpulver. Dieses Binderpulver besteht aus einem thermoplastischen Material, welches zur Fixierung zwischen die Fasermatten gestreut und bei ca. 80°C aufgeschmolzen wird. Nach dem Erkalten des Pulvers sind die Matten miteinander „verschweißt“ und es entsteht so eine Art Preform.

Diese Methode kann auch zur Fixierung des DMS verwendet werden. Da sich die Verwendung des Binders auf bestimmte Fertigungstechniken beschränkt bzw. das Einbringen des Binders eventuell nicht immer erwünscht ist, kann das Aufstreuen des Pulvers auch sehr gut mittels einer Schablone lokal auf die Installationsstelle begrenzt werden (siehe Bild 5.3.2-1a)). Das Binderpulver sollte so aufgestreut werden, dass eine gleichmäßige Verteilung erreicht wird und dabei eine möglichst geringe Menge an Pulver zur Anwendung kommt. Eine geschlossene Pulverschicht ist unbedingt zu vermeiden. Mit einem Sieb lässt sich die Verteilung und Dosierung gut steuern.

Nach dem Aufstreuen des Binders wird der DMS auf das Fasermaterial gelegt und ausgerichtet. Zum Erhitzen des Binders wird ein beheizbares Werkzeug benötigt (z.B. Spezial-Bügeleisen der Firma Graupner), welches den Binder bei 80°C aufschmilzt. Der DMS sollte beim Verschweißen zusätzlich mit einer dünnen Teflonfolie abgedeckt werden. Dadurch wird der direkte Kontakt des Werkzeugs mit dem Binder verhindert und eine Verschmutzung vermieden. Unter leichtem Druck und einer Dauer von ca. 20 Sek. wird der Binder aufgeschmolzen und der DMS mit dem Fasermaterial verschweißt.

Ein wesentlicher Vorteil bei der Verwendung von Binderpulver ist das Aufschmelzen während des Aushärtprozesses des Laminats. Dadurch wird es möglich, dass die DMS-Folie und die Fasern, die mit dem Binder in Kontakt waren, mit dem Harz getränkt werden.

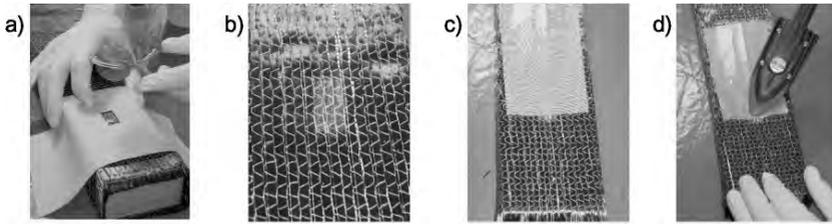


Bild 5.3.2-1: Fixierung des DMS mit Binderpulver

- a) lokales Aufbringen des Binders mittels Abdeckschablone und Sieb
- b) geringe Binderschicht im Bereich der Installation
- c) auf den DMS aufgelegte Teflonfolie
- d) Verschweißen des DMS mit einem speziellen Bügeleisen

b) Verwendung von speziellen Tack-Sprays

Eine weitere Methode zur Fixierung des DMS ist die Verwendung von speziellen Sprühklebstoffen (Tack-Spray), die für die Fixierung von Fasermatten und Abreißgeweben eingesetzt werden. Diese Klebstoffe erzeugen einen „Tack“ (Klebrigkeit) wie es bei Prepregmaterial bereits vorhanden ist. Ein bereits geringer Sprühnebel auf der Applikationsseite des DMS ist ausreichend, um diesen zu fixieren. Nach dem Aufsprühen des Tack-Sprays wird der DMS wie unter a) beschrieben auf der Fasermatte abgelegt.

Bei Prepregmaterialien ist eine Fixierung des DMS wie unter a) und b) beschrieben nicht notwendig, da der DMS durch den Tack des Materials bereits ausreichend fixiert wird. Der DMS kann somit direkt auf das Material appliziert werden.

Eine häufige Korrektur der Lage des DMS durch mehrfaches Abziehen und Neu-aufbringen während des Installationsprozesses ist prinzipiell zu vermeiden, um die Messeigenschaften des DMS nicht zu beeinträchtigen.

5.3.3 Laminieren und Aufbringen weiterer Lagen

Die weitere Fertigung der Struktur hängt vom Faseraufbau und der Integrationstiefe ab. Grundsätzlich gibt es zwei bevorzugte Möglichkeiten:

1. Der DMS wird mit den Pins nach oben auf die Fasern appliziert.

Das bedeutet, dass beim Ablegen der weiteren Lagen - Fasermatten, Abreißgewebe, Membranfolie usw. - die Pins jedes Mal die entsprechend hinzukommende Lage durchstechen. Je nach Art und Dicke der Lagen sollte hierbei darauf geachtet werden, dass die Pins nicht beschädigt werden. Bei dünnen Einzellagen (< 1mm) aus unidirektionalem Trockenfasermaterial ist das Durchstechen der Pins unproblematisch. Schwieriger wird es bei Prepregmaterial und multiaxialen Trockenfaserlagen mit

Schichtdicken größer 0,5 mm. Hier ist das Durchstechen der Pins mit einem geeigneten Werkzeug zu unterstützen, z.B. durch Vorstechen der Lage mit einer Nadel.

Das Ablegen der Fasermatten sollte senkrecht zu den Pins erfolgen, da es sonst unter Umständen zu Faseranhäufungen bzw. Faserdefiziten zwischen den Pins kommt. Eine Materialanhäufung zwischen den Pins bewirkt ein Auseinanderdrücken der Pins und umgekehrt ein Zusammendrücken bei Materialdefizit (siehe Bild 5.3.3-1). Dieser Effekt verstärkt sich mit jeder weiter abgelegten Lage und kann letztendlich zur Beschädigung der Pins und des DMS führen. Daher ist diese Installationsmethode besonders für geringe Integrationstiefen geeignet, bei der nur eine geringe Anzahl an Faserlagen aufgelegt wird.

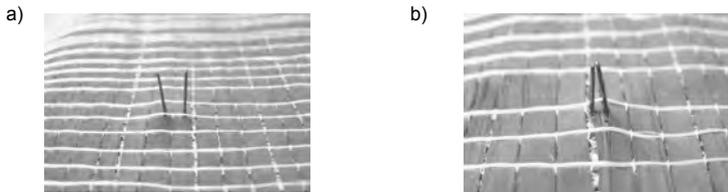


Bild 5.3.3-1: Fehlerhafte Integration durch unregelmäßige Materialverteilung zwischen den Pins
a) auseinander gedrückte Pins bedingt durch Materialüberschuss zwischen den Pins
b) zusammen gedrückte Pins bedingt durch Materialdefizit zwischen den Pins

2. Der DMS wird mit den Pins nach unten appliziert

Bei dieser Fertigungsvariante wird der DMS so appliziert, dass die Pins in das bereits abgelegte Material (siehe Bild 5.3.3-2) stechen. Dies setzt jedoch voraus, dass das Fasermaterial auf einem Untergrund abgelegt wurde, in den die Pins eindringen können. Hier ist in jedem Fall mit einer Nadel oder mit einem entsprechenden Werkzeug ein Durchgang für die Pins vorzubereiten.

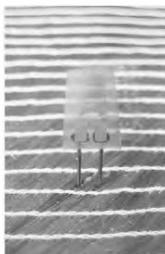


Bild 5.3.3-2: Umgekehrte Applikation des DMS

Nach dem der DMS appliziert wurde, können die weiteren Faserlagen aufgelegt werden. Diese Fertigungsmethode ist für tiefe Integrationen zu bevorzugen, da hier nicht die nachfolgenden Faserlagen einzeln über die Pins gelegt werden.

5.3.4 Kürzen und Abdecken der Pins

Vor dem Abdecken der Pins werden diese auf 2 mm gekürzt, da diese Länge für die spätere Kontaktierung ausreichend ist (siehe Bild 5.3.4-1). Die Pins sollten erst nach dem Auflegen des Abreißgewebes gekürzt werden, da die Spitze so abgerundet ist, dass beim Durchstechen der Faserplatten ein Verhaken der Filamente vermieden wird. Am Ende des gekürzten Pins entsteht durch das Kürzen eine scharfkantige raue Oberfläche, an der filamentartige Gewebe beim Durchstechen hängen bleiben.

Zum Kürzen ist ein Werkzeug, das nach dem Scher-Prinzip arbeitet nicht geeignet, da sich durch das Abscheren der Pin verbiegen kann. Besser eignen sich feine Seitenschneider, wie sie in der Elektronik verwendet werden.



Bild 5.3.4-1: Kürzen der Pins mit einem Seitenschneider

Nach dem Kürzen sollten die Pins abgedeckt werden. Hierfür ist ein spezieller Silikon-schaum vorgesehen, der mehrere Funktionen erfüllt:

1. Schutz der Membran- bzw. Vakuumfolie vor Beschädigung durch die Pins bei Fertigungsverfahren mit einschaligen Werkzeugkonzepten.
2. Fixierung des DMS

Durch das Eindringen der Pins in den Silikon-schaum, werden die Pins und somit der gesamte DMS an seiner Position fixiert. Dies ist sehr wichtig, da die im Kapitel 5.3.2 erwähnte Fixierung während der Aushärtung aufgrund der niedrigen Viskosität des Harzes nicht mehr ausreichend ist.

3. Schutz vor Verharzen der Pins

Der weiche Abdeckschaum wird durch das Vakuum verdichtet und an die Pins gepresst. Dadurch wird verhindert, dass das Harz an den Pins hochsteigt. Wird ein hartes Schaummaterial verwendet, so verkleben die Pins mit dem Schaum durch das aufsteigende Harz und werden beim Entformen abgerissen.

Je nach Größe der Struktur kann entweder das gesamte Laminat oder nur der Bereich, an dem die Pins herausstehen, abgedeckt werden. Bei großen Strukturen ist eine

lokale Abdeckung meist erforderlich, wobei die Pinabdeckung so ausgeführt sein sollte, dass die Dicke des Schaums vom Zentrum ausgehend allseitig nach außen hin abnimmt. Dies kann auf zwei Arten erfolgen:

Aus einer 12 mm dicken Silikonschaumplatte wird ein ca. 60 x 60 mm großes Stück herausgetrennt und so bearbeitet, dass ein wie im Bild 5.3.4-2a) dargestellter pyramidenförmiger Körper entsteht.

Aus einer 0,5 mm dicken Silikonfolie werden 5 - 6 unterschiedlich große quadratische Stücke herausgeschnitten (z.B. 50 x 50 mm, 40 x 40 mm, usw.) und so aufeinander gestapelt, dass wiederum ein pyramidenförmiger Körper entsteht (siehe Bild 5.3.4-2b)).

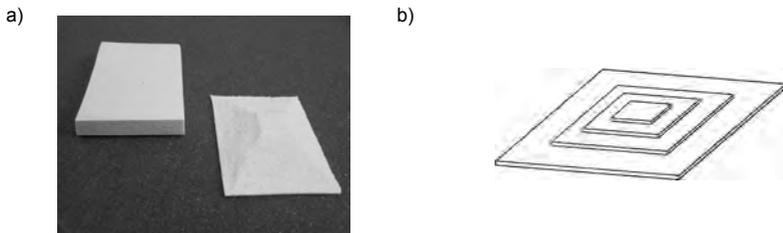


Bild 5.3.4-2: Varianten zur Gestaltung der Pinabdeckung
a) Abdeckung geformt aus einer Silikonplatte
b) Abdeckung aus aufeinander geschichteten Silikonlagen

Nur durch einen fließenden Übergang von der Pinabdeckung hin zum Laminat kann dafür gesorgt werden, dass die Pinabdeckung keine Abdrücke auf dem Laminat hinterlässt.

5.3.5 Hinweis zum Entformen

Während das Entfernen von Vakuumfolie und Saugvlies unproblematisch ist, da die Pins durch den Abdeckschaum geschützt sind, ist das Abziehen des Abreißgewebes besonders vorsichtig durchzuführen. Vor allem muss beim Entfernen des Abreißgewebes im Bereich der Pins behutsam gearbeitet werden, da durch das ruckartige Lösen des Gewebes die Pins abreißen können.

Tipp: Durch gezielte Schnitte im Abreißgewebe im Bereich der Pins (siehe Bild 5.3.5-1) werden die Pins beim Abziehen des Gewebes entlastet.

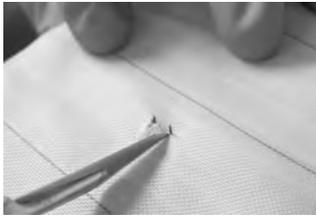


Bild 5.3.5-1: Einschneiden des Abreißgewebes im Bereich der Pins

5.4 Anschließen der Messleitungen

5.4.1 Entfernung der Isolierung

Bevor die Pins kontaktiert werden können, ist die Isolierung zu entfernen. Dies sollte auf keinen Fall durch Abbrennen mittels eines Lötkolbens geschehen, da durch die hierfür erforderlichen hohen Temperaturen (Temperaturbeständigkeit der Isolierung ca. 300°C) und die Wärmeleitfähigkeit der Pins die Gefahr besteht, dass die gesamte Isolierung abbrennt (Kurzschlussgefahr in CFK-Laminaten!). Bei längerer Temperatureinwirkung verbrennt das Matrixharz auch lokal. Des Weiteren besteht die Gefahr einer kalten Lötstelle im Laminat, da bei Temperaturen > 310°C die Lötverbindung zwischen Pin und Lötstützpunkt aufschmelzen kann.

Empfehlenswert ist die Entfernung der Isolierung durch mechanisches Abschaben mit einem Skalpell oder einer Abisolierzange. Wie im Bild 5.4.1-1 dargestellt, sollten ca. 0,5 - 1 mm der Isolierung bis zur Oberfläche des Laminats bestehen bleiben.

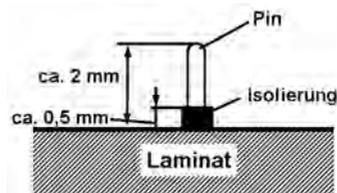


Bild 5.4.1-1: Isolierung am Pin

5.4.2 Kontaktierung der Pins

Die beste Art der elektrischen Verbindung zwischen Pin und Messleitung ist das Löten. Je nach Anwendung gestaltet sich die Kontaktierung unterschiedlich und es ist zwischen statisch und dynamisch beanspruchten Bauteilen zu unterscheiden.

Bei statischer Beanspruchung können die Messleitungen direkt an den Pin angelötet werden. Um eine saubere Lötverbindung zu erreichen, werden die Messleitungen senkrecht zum Pin angelötet (siehe Bild 5.4.2-1). Zum Schutz der Pins vor Beschädigung durch Zug an den Messleitungen, sollten die Messleitungen am Bauteil fixiert werden. Hierzu eignet sich zum Beispiel der HBM-Schnellklebstoff X60 oder ein Schmelzklebstoff.

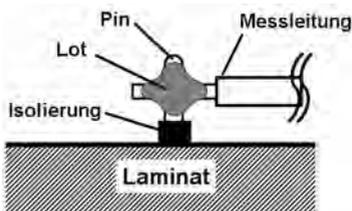


Bild 5.4.2-1: Anlöten der Messleitungen an die Pins

Bei dynamischer Beanspruchung ist von einem direkten Anlöten der Messleitungen an die Pins abzuraten, da diese durch die Bewegung der Messleitungen belastet werden. Durch Zwischenschalten eines Lötstützpunkts werden die Pins entlastet und die Ausführung einer einwandfreien Lötstelle erleichtert. Der Lötstützpunkt kann mit einem Schnellklebstoff (z.B. Z70) oder durch ein doppelseitiges Klebeband aufgeklebt werden. Für dynamisch belastete Bauteile mit hohen Randfaserdehnungen ($> 0,1\%$) ist das Aufkleben der Lötstützpunkte mit doppelseitigem Klebeband zu bevorzugen, da das „weiche“ Klebeband die Dehnungen nicht auf die Lötstellen übertragen kann.

Des Weiteren ist die Verbindung zwischen Pin und Lötstützpunkt nachgiebig zu gestalten. Dazu führt man einen einzelnen Draht vom Pin in einem Entlastungsbogen zum Lötstützpunkt (siehe Bild 5.4.2-2). Bei dynamisch beanspruchten Bauteilen mit hohen Lastspielzahlen ist zusätzlich die Messleitungen mit einem Zugentlastungsbogen an die Lötstützpunkte zu führen und das Kabel durch Festkleben am Bauteil zu fixieren.

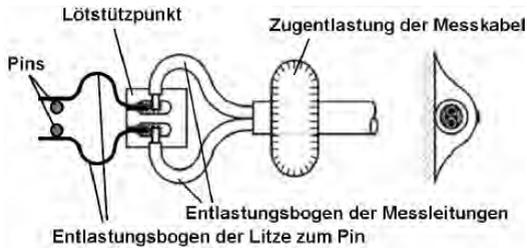


Bild 5.4.2-2: Kontaktierung der Pins bei dynamisch beanspruchten Bauteilen

6 Messstellenschutz

Die Maßnahmen zum Schutz der Messstelle richten sich nach der Art der mechanischen und chemischen Einwirkungen und nach der Austrittsseite der Pins aus der Struktur.

Treten die Pins auf der Strukturaußenseite an die Oberfläche, so empfiehlt es sich nach dem Anlöten der Messleitungen (siehe Kap. 5.4) die Lötverbindung und die Pinaustrittsstelle vor den einwirkenden Umgebungsbedingungen entsprechend zu schützen. Eine ausführliche Beschreibung zum Schutz von Messstellen können dem Sonderdruck „Hinweise zur Installation von Dehnungsmessstreifen (DMS)“ (Kapitel 5, [16]) entnommen werden.

Für den Fall, dass die Pins in das Strukturinnere führen, ist individuell zu klären, ob ein zusätzlicher Schutz der Pins und der Lötverbindung notwendig ist.

7 Literaturverzeichnis

- [1] Robert M. Jones, *Mechanics of Composite Materials*, Hemisphere Publishing Corporation, New York
- [2] Manfred Flemming, Siegfried Roth, *Faserverbundbauweisen – Eigenschaften*, Springer-Verlag 2003, ISBN 3-540-00636-2
- [3] Gottfried W. Ehrenstein, *Faserverbund-Kunststoffe*, Carl Hanser Verlag, München, 2006, ISBN 3-446-22716-4
- [4] Alexander Horoschenkoff, Skripte zur Vorlesung „Kunststofftechnik“
- [5] DIN EN 2563
- [6] DIN 65563
- [7] Karl Hoffmann, *Einführung in die Technik des Messens mit Dehnungsmessstreifen*, Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, 1987
- [8] Stephan Keil, *Beanspruchungsermittlung mit Dehnungsmessstreifen*, Cuneus, 1995, ISBN 3-9804188-0-4
- [9] Thomas Kleckers, Dirk Eberlein: *Bestimmung des einachsigen Spannungszustandes*, Vortrag anlässlich „HBM on Tour“, 2002
- [10] Augusto Ajovalasit: „Embedded Strain Gauges: Effect of the Stress Normal to the Grid“ *Dipartimento di Meccanica, Università di Palermo, Strain* (2005) 41, 95-103
- [11] Gerhard Scharr: „Experimentelle Bestimmung des kompletten Stoffgesetzes von anisotropen faserverstärkten Kunststoffen“ *Messtechnische Briefe* (1985), 21, Heft 1
- [12] Sebastian Klein, *Entwicklung eines Konzeptes zur Strukturintegration von Dehnungsmessstreifen in Faserverbundwerkstoffen*, Diplomarbeit August 2003
- [13] Carsten Hecker, *Numerische und experimentelle Untersuchung des Spannungszustandes an Kontaktelementen bei strukturintegrierten DMS*, Diplomarbeit Januar 2004
- [14] Thomas Kabilka, *Entwicklung und Untersuchung von Konzepten zur Integration von Dehnungsmessstreifen in Faserverbundwerkstoffe*, Diplomarbeit März 2004
- [15] Hotline 1/2001, Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH
- [16] Karl Hoffmann, *Hinweise zum Applizieren von Dehnungsmessstreifen*, Sonderdruck VD 84005

© Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH.
Änderung vorbehalten. Alle Angaben beschreiben
unsere Produkte in allgemeiner Form. Sie stellen keine
Beschaffenheits- oder Haltbarkeitsgarantie im Sinne
des § 443 BGB dar und begründen keine Haftung.

HBM Test and Measurement

www.hbm.com/de

Tel. +49 6151 803-0

E-Mail: info@hbm.com

Fax +49 6151 803-9100

measure and predict with confidence

