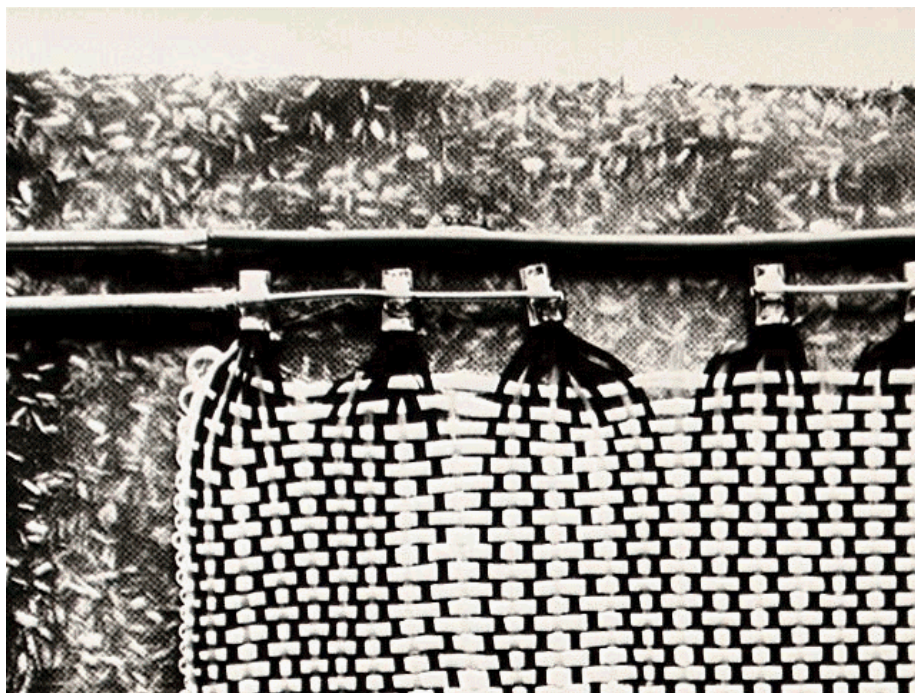




Entwicklung beheizbarer Leichtgewichtsformen



Konstruktion und Fertigung einer
formsteifen, beheizbaren
Leichtgewichtsform zur Herstellung
hochwertiger Faserverbund-
Kunststoffschalenelemente

Studienarbeit von J. Brandes und I. Gebauer
im Vertrieb von R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH, www.r-g.de

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung	1
2 Voraussetzungen	2
2.1 Begriffserläuterungen	2
2.1.1 Formen	2
2.1.2 Faserverbundwerkstoffe	2
2.1.3 Kunststoffschalenelemente	3
2.1.4 Das Prinzip der Sandwichbauweise	4
2.1.5 Tempern von Epoxyden	5
2.2 Festlegen des Versuchsprogramms	6
3 Ausführung	7
3.1 Die Fertigung der ersten beheizbaren Sandwichplatte	7
3.1.1 Die Voraussetzungen	7
3.1.2 Lagenaufbau der ersten Platte	7
3.1.3 Deckschicht und Isolierung	7
3.1.4 Verschalten des Heizgewebes	8
3.1.4.1 Theoretische Grundlagen für das Verschalten des Heizgewebes	8
3.1.4.2 Einfluß der Form auf die Verschaltung	10
3.1.5 Verschalten der ersten Platte	12
3.1.6 Einbettung der Temperaturfühler	13
3.1.7 Die Formversteifung	14
3.1.8 Tempern der ersten Platte	14
3.1.9 Testen und Messen	14
3.1.10 Inbetriebnahme der Heizung	16
3.1.11 Auswertung	16
3.1.11.1 Symmetrie von Laminaten	16
3.1.11.2 Harzauftrag und Harzverluste	17
3.2 Fertigung der zweiten Sandwichplatte	18
3.2.1 Die Voraussetzungen	18
3.2.2 Lagenaufbau der zweiten Versuchsplatte	20

3.2.3	Herstellung der Verschaltung	20
3.2.4	Eigentemperung der Versuchsplatte	20
3.2.5	Maßnahmen zur geeigneten Temperaturführung	21
3.2.6	Testen und Vermessen	21
3.2.7	Auswertung	21
3.2.7.1	Probleme der Beheizung	21
3.2.7.2	Widerstandsstreuung	22
3.2.8	Konsequenzen für den Formenbau	23
3.2.9	Fotoreihe vom Herstellungsprozeß der Probepplatten	24
4	Die zweigeteilte Realform	28
4.1	Auswahl des Urmodells	29
4.2	Fertigung des Urmodells	29
4.2.1	Werkstoffauswahl	29
4.2.2	Bau des Ausgangsmodells	30
4.3	Die Vakuumtechnik als Druckmittel	31
4.4	Konstruktive Gestaltung des Formenrandes	34
4.5	Bau der Realform	35
4.5.1	Trennebene und Formenrand	35
4.5.2	Lagenaufbau der Form	36
4.5.3	Deckschicht und Isolierung in Richtung der Formeninnenseite .	36
4.5.4	Das Heizgewebe	37
4.5.5	Isolierung und Versteifung	38
4.5.6	Bau der unteren Formenschale	38
4.5.7	Abriß des Fertigungsablaufes der Formenhalbschalen anhand der Fotoreihe 2	40
4.6	Meß- und Testversuchsprogramm	49
4.6.1	Die Meßwerte	49
4.6.2	Die Heizung im Testbetrieb	53
5	Zusammenfassung	54
6	Ausblick	55

7 Anhang	56
7.1 Meßwertprotokolle, Tabellen und Einzelteilzeichnungen	56
7.2 Literaturverzeichnis	67

1 Einführung

Kunststoffaserverbundwerkstoffe erlangen bei der Konstruktion hochbelastbarer Bauteile immer mehr an Bedeutung. Zudem bieten sie durch die bauteilbelastungsspezifische Wahl und Orientierung des jeweiligen Fasertyps und des Matrixsystems die Möglichkeit, für jeden Einsatzzweck den passenden Werkstoff zu entwickeln. Die daraus resultierende Kombinationsvielfalt eröffnet Gestaltungsmöglichkeiten, die mit konventionellen Werkstoffen nicht realisierbar sind. Im Sandwichaufbau erreichen Faserverbund-Kunststoffschalenelemente eine hervorragende Formsteifigkeit bei geringem Gewicht. Durch die Orientierung der Verstärkungsfasern in Kraftflußrichtung werden Form und Bauteil genau dort Festigkeit und Steifigkeit verliehen, wo sie benötigt werden.

Um Verbundwerkstoffe in die gewünschte Gestalt zu überführen, ist die Fertigung eines Formenwerkzeugs Voraussetzung. Die Ansprüche an die Beschaffenheit der Form ergeben sich sowohl aus dem Qualitätsanspruch an die Bauteile als auch aus der angestrebten Herstellungsmenge.

Einer dieser Qualitätsansprüche ist die Temperaturbeständigkeit der Polymermatrizen. Diese kann u. a. durch Wärmebehandlung der Bauteile in beheizbaren Formen erlangt werden. Gerade bei großen Bauteilen ist die konventionelle Wärmebehandlung im Temperofen, Autoklav etc. mit großem Aufwand und hohen Kosten verbunden.

Ein Nachteil duromerer Matrixwerkstoffe, zumindest für deren Eignung bei der Fertigung von Massenartikeln, ist der zur Aushärtung nötige Zeitaufwand. Beim Einsatz von Epoxydharzen als Matrix bedarf es in der Regel einiger Stunden des Aushärtens. Im Gegensatz dazu nehmen die im Metallbau üblichen Umformintervalle zur Bauteilherstellung nur einen Bruchteil der Zeit in Anspruch.

Bei geeigneter Temperaturführung mit einer formintegrierten Heizung reduziert sich der Zeitaufwand zur Aushärtung erheblich. Unproduktive Wartezeiten werden verringert. Durch die Verwendung beheizbarer Formen entstehen somit Vorteile, die den Einsatz von Faserverbundwerkstoffen für viele Anwendungsfälle noch attraktiver machen.

Ziel dieser Studienarbeit ist die Erprobung eines Hybridgewebes aus Kohle- und Glasfasern als Heizgewebe, das in den Lagenaufbau der Form eingebracht und mit elektrischem Strom betrieben wird. Die Gestaltung der Studienarbeit und die ausführliche Beschreibung der praktischen Tätigkeiten sollen dem im Umgang mit Faserverbundwerkstoffen vertrauten Leser Einblicke in die Fertigungsmethoden und Anreiz zum Einstieg in den Bau beheizbarer Formen geben.

Diese Studienarbeit bietet dem Laien sowie dem Fachmann eine ausführliche Dokumentation der bearbeiteten Aufgabenstellung, die durch reichhaltiges Bildmaterial unterstützt wird.

2 Voraussetzungen

2.1 Begriffserläuterungen

2.1.1 Formen

Faserverbundwerkstoffe sind im Ausgangszustand flexibel und formbar. Daher werden sie zum Aushärten in Formwerkzeugen abgelegt. Das Verbundbauteil reflektiert die Konturen und die Oberflächenbeschaffenheit des Formwerkzeugs. Die Qualität der Form entscheidet somit über die Güte des Endproduktes. Hierbei ist zu berücksichtigen, daß die Verbundbauteile jene Gestalt der Form annehmen, die diese bei Geliertemperatur des Harzes aufweist. Unter Umständen muß also auch die Wärmeausdehnung des Formenwerkzeugs berücksichtigt werden.

Das Formenmaterial sollte somit unter Berücksichtigung der Aushärtungstemperatur des Harzes, der angestrebten Bauteilqualität und der Menge der zu fertigen Bauteile gewählt werden.

Zum Bau einer Form ist in den meisten Fällen die Herstellung eines Ausgangsmodells erforderlich. Schon diesem Ausgangsmodell kommt große Bedeutung in bezug auf Maßhaltigkeit und Oberflächengüte zu. Das Ausgangs- oder Urmodell kann nach dem Abformen als Referenz zur Kontrolle der produzierten Bauteile genutzt werden.

2.1.2 Faserverbundwerkstoffe

Ein Faserverbundwerkstoff wird durch Zusammenfügen mehrerer Werkstoffe hergestellt: in den meisten Fällen sind dies hochfeste Fasern, die in einem Reaktionsharz eingebettet sind. Sind in einem Faserverbundwerkstoff zwei oder auch mehrere Fasertypen zur Verstärkung zusammengefügt, werden sie als Hybridverbundwerkstoffe bezeichnet [vgl. Bild 1]. Zu dieser Gruppe zählen auch die Sandwichkonstruktionen. In Bild 1 sind einige Beispiele zusammengefaßt:

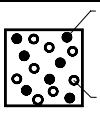
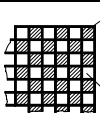
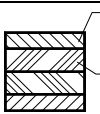
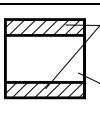
Mischverbund		Vermischung von verschiedenen Fasertypen (Compound)
Gewebeverbund		Verarbeitung von verschiedenen Fasertypen zu einem Gewebe
Schichtverbund		Einzellagen mit unterschiedlichen Fasertypen
Sandwich		Dünne Deckschichten mit dazwischenliegendem Kern (Wabenkern, Schaumkern)

Bild 1: Beispiele einiger Hybridverbundwerkstoffe [nach MICHAELI/WEGENER, 1989]

Zur Veranschaulichung diene der Vergleich mit Stahlbeton, bei dem ein relativ spröder Werkstoff (Beton) mit Stahleinlagen verstärkt wird. Die

mechanischen Eigenschaften der Formstoffe wie Zug- und Biegefestigkeit, Schlagfestigkeit und die Fähigkeit zur Arbeitsaufnahme werden überwiegend durch die Eigenschaften der Fasern bestimmt. Die Werkstoffbeschaffenheiten können durch Wahl der Fasererzeugnisse, des Fasergehalts und der Orientierung der Fasern beeinflusst und somit dem jeweiligen Verwendungszweck angepaßt werden.

Das Reaktionsharz als Bindemittel, im Faserverbund spricht man von der „Matrix“, hat die Aufgabe, die Fasern zu stützen und die auf das Formenteil einwirkenden Kräfte auf die Fasern zu verteilen. Dies setzt eine gute Haftung des Harzes auf den Fasern voraus.

Bei Glasfasergeweben kommen zu diesem Zweck Haftvermittler auf Silanbasis zum Einsatz. Bei Kohlenstofffasern werden Epoxydharzschichten verwendet.

Das Reaktionsharz bestimmt die Chemikalienbeständigkeit, die Alterungsbeständigkeit sowie die Oberflächengüte und die elektrischen Eigenschaften des Faserverbundes.

Zur Herstellung des Faserverbundes werden die Fasern in die flüssige Reaktionsharzmasse eingebettet und beim Härten des Harzes in den so entstehenden festen Formstoff verankert.

Das Härten ist der Übergang der flüssigen Reaktionsharzmasse in dreidimensional vernetzte Produkte. Im Verlauf dieser Studienarbeit werden als Reaktionsharze ausschließlich Epoxydharze verwendet. Der Übergang vom flüssigen in den festen Zustand vollzieht sich bei Epoxydharzen durch Polyaddition, einer Vernetzung der Moleküle der Ausgangskomponenten zu hochmolekularen Substanzen. Bei der Reaktion wird Wärme freigesetzt.

2.1.3 Kunststoffschalenelemente

Kunststoffschalenelemente bestehen zumeist aus einer Ober- und Unterschale, die miteinander verklebt werden und somit einen geschlossenen Torsionskasten bilden. Die Kunststoffbauweise unter Anwendung von faserverstärkten Kunststoffen ermöglicht die Anordnung der Fasern innerhalb der Bauteile entsprechend den Hauptbelastungsrichtungen.

Die Vorteile dieser Bauweise sind:

- Bauteilreduzierung aufgrund der Integralbauweise
- gute Reproduzierbarkeit und Formgenauigkeit
- hohe Flexibilität, Oberflächenfestigkeit und Beständigkeit
- gleichmäßige Gestaltfestigkeit
- hohe Belastbarkeit durch die Ausrichtung der Fasern entsprechend den Hauptbelastungsrichtungen

Da laut Zielsetzung dieser Studienarbeit hochwertige Faserverbund-Kunststoffschalenelemente in formsteifen Leichtgewichtsformen erstellt werden sollen, empfiehlt sich der Formenaufbau in Sandwichbauweise als gewichtsspezifisch günstigste Art der Formversteifung.

2.1.4 Das Prinzip der Sandwichbauweise

Sandwichbauweisen werden bevorzugt für Bauteile eingesetzt, deren Normalbelastungen gering sind, deren Biegebeanspruchung, Beul- und Knickgefahr hingegen eine gewisse Mindestwandstärke voraussetzen. Im Falle von beheizbaren Formen ist ein weiteres wichtiges Kriterium in bezug auf den Wärmeverlust der geschlossenen Form an die Umgebung die geringe Wärmeleitfähigkeit des Sandwiches.

Ein Sandwich besteht aus zwei äußeren Decklagen, die mit einem Stützstoff als Zwischenlage verklebt sind.

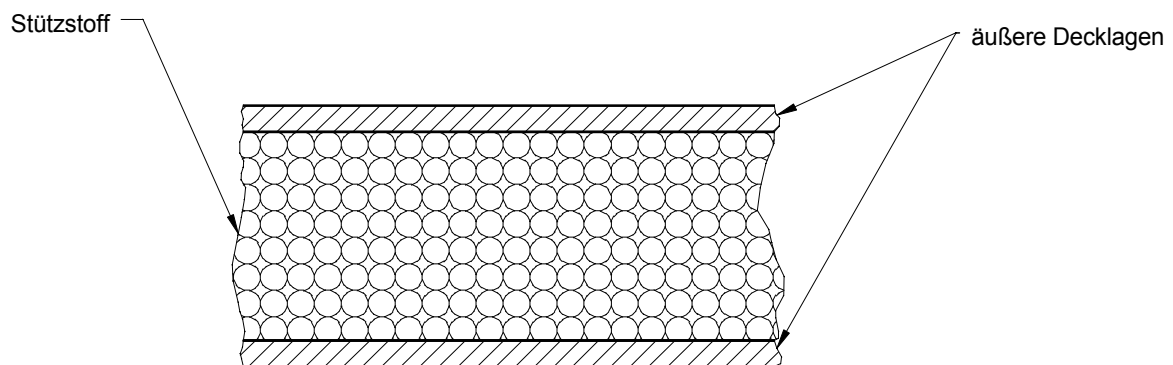


Bild 2: Prinzipieller Aufbau eines Sandwiches [Funke/Schröder, 1993]

Im Vergleich zu den Decklagen weist der Stützstoff im allgemeinen eine wesentlich größere Schichtstärke bei einer oft um mehr als eine Größenordnung geringeren Dichte auf.

Aufgabe des relativ druckfesten, aber sehr leichten Stützstoffes ist es, die Decklagen auf konstantem Abstand zu halten. Bei Biegebeanspruchung des Bauteils erfahren die dünnen Deckschichten des Sandwiches fast ausschließlich Normalspannungen, während die Stützschiicht auf Druck und Schub beansprucht wird.

Die Vorteile dieser Konstruktion werden beim Vergleich mit einem klassischen Biegeträger deutlich.

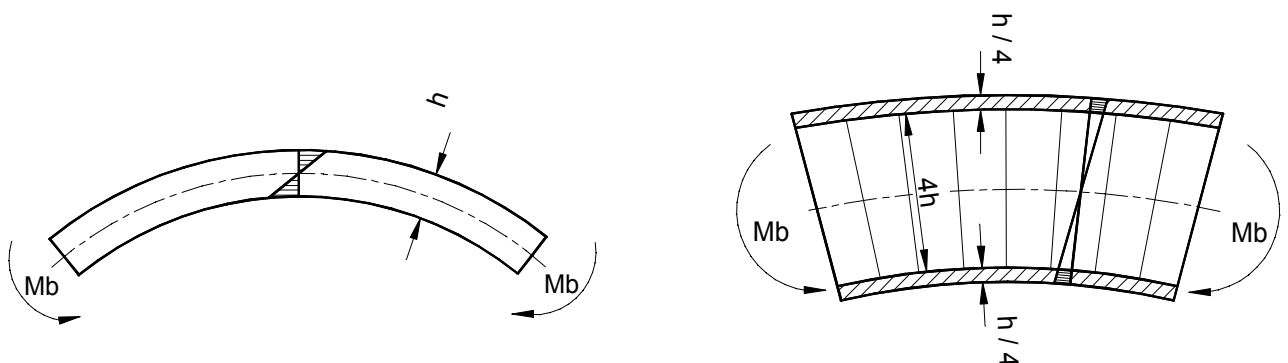


Bild 3: Dehnungsverläufe im klassischen Biegeträger und im Sandwichträger [FUNKE/SCHRÖDER, 1993]

Die Sandwichbauweise kann als krafteinleitungsoptimierte Konstruktion verstanden werden. Die hohen Randspannungen werden durch die Faserverbundwerkstoffe aufgenommen. Die in Richtung neutraler Faser immer geringer werdenden Belastungen bewältigt der Stützstoff.

Dank dieses Prinzips ist eine Steigerung des Widerstandsmomentes um 400 % bei gleichem Gewicht durchaus realisierbar. Die Reduzierung der Decklagenstärke ist jedoch auf Grund punktuell wirkender Lasten, wie Schlag oder Berührung begrenzt.

2.1.5 Tempern von Epoxyden

Bei den Epoxydharzen wird zwischen kalt- und warmhärtenden Systemen unterschieden. Kaltaushärtende Systeme erhalten bei Raumtemperatur nahezu ihre Endfestigkeit. Hierbei wird nach einigen Tagen Aushärtezeit eine Vernetzungsdichte von 90-95 % erreicht.

Warmmaushärtende Systeme härten bei Raumtemperatur nicht aus. Über größere Zeiträume ist lediglich eine Viskositätszunahme festzustellen, die für technische Anwendungen jedoch bedeutungslos ist. Diese Harzsysteme erreichen ihre Festigkeit erst durch Wärmezufuhr.

Durch Tempern werden aber auch bei kaltaushärtenden Systemen die Festigkeit und Steifigkeit sowie insbesondere die Wärmeformbeständigkeit verbessert. Bei systemgeeigneter Temperaturführung kann so die Vernetzungsdichte auf nahezu 100 % gesteigert werden. Während des Temperns darf die jeweilige Wärmeformbeständigkeit des Harzsystemes jedoch nicht überschritten werden. Aus diesem Grund wird die Temperaturerhöhung in mehreren Schritten vollzogen. Bei der gewünschter Endtemperatur werden die Bauteile 10-15 Stunden getempert.

Bei den meisten Harzsystemen ist durch Temperung ein Temperaturvorlauf zu verzeichnen, das heißt, die anschließende Wärmeformbeständigkeit liegt 10-30 °C über der Tempertemperatur.

Um eine exakte Temperaturführung über lange Zeiträume zu realisieren, kommen häufig Temperkammern oder Klimaschränke zum Einsatz. Die in vielen Anwendungsfällen sinnvollere Methode der Wärmeeinleitung ist die formintegrierte Heizung. Abgesehen von ihrer eigentlichen Aufgabe, der Wärmebehandlung von Bauteilen, bietet sie die Möglichkeit der Eigentemperung. Unter Eigentempeln versteht man, daß die Form mittels der formeigenen Heizung die erforderliche Wärmebeständigkeit erlangt.

2.2 Festlegung des Versuchsprogramms

Das Versuchsprogramm dieser Studienarbeit gliedert sich im wesentlichen in drei Teilbereiche:

- 1) Herstellung einer beheizbaren Sandwichplatte mit anschließender Fremdtemperung
- 2) Herstellung einer zweiten Platte mit nachfolgendem Eigentempern
- 3) Herstellung einer realen zweigeteilten beheizbaren Form

Die jeweiligen Bereiche unterteilen sich nach folgendem Schema:

1) Herstellung der Platte bzw. der Form

Hier werden Lagenaufbau des Sandwiches, Verfahrenstechniken sowie Problemlösungen bei der Fertigung geschildert.

2) Testen und Messen

Dieser Bereich enthält die eingehende Untersuchung der spezifischen Eigenschaften wie:

- Geradheit des Prüflings vor und nach dem Tempern
- Verzug durch Aufheizung
- Heizleistung in Abhängigkeit von der Aufheizrate
- stationäre Heizleistungen bei unterschiedlichen Verschaltungen und Formentemperaturen
- Temperaturverlauf in der Form
- Randeffekte
- diverse teilbereichbezogene Versuche und Messungen

3) Auswertung

Am Ende jedes Teilbereiches finden sich die ausführliche Dokumentation der Ergebnisse sowie die sich daraus ergebenden Forderungen für den weiteren Versuchsverlauf.

Über diesen Versuchsrahmen hinaus werden Erfahrungen zur Vakuumtechnik und Formenrandgestaltung dokumentiert.

3 Ausführung

3.1 Fertigung der ersten beheizbaren Sandwichplatte

3.1.1 Voraussetzungen

Die herzustellenden Platten sollen eine Größe von 650*650 mm aufweisen. Die Platten werden mit einem Kohlehybridgewebe, wobei die Kohlefaserstränge als Widerstandsheizelemente dienen, beheizt. Die Stromzufuhr erfolgt über einen Heizregler, der die angestrebte Temperatur mit Hilfe eines in die Form eingebetteten Temperaturfühlers regelt. Um eine zu Meßzwecken ebene Platte zu realisieren, wird als Träger eine 8 mm starke Glasplatte gewählt.

3.1.2 Lagenaufbau der ersten Platte

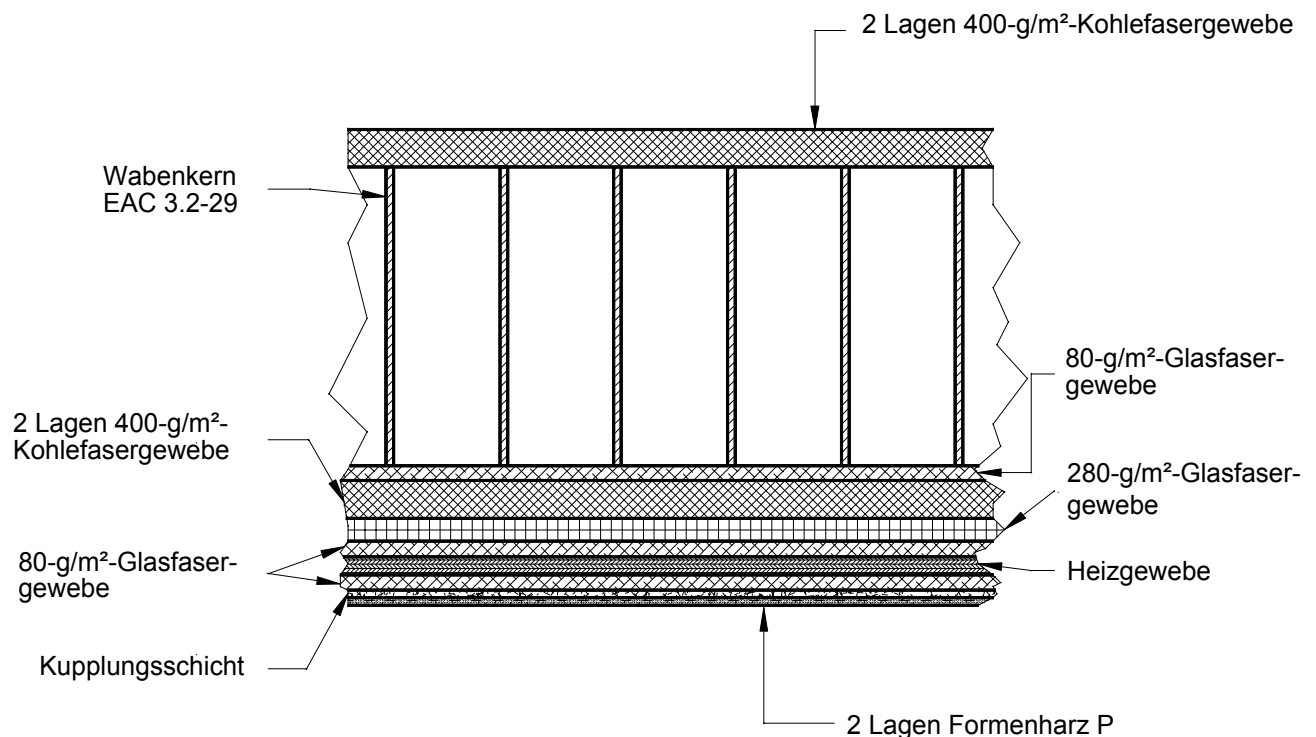


Bild 4: Lagenaufbau der ersten Versuchsplatte

3.1.3 Deckschicht und Isolierung

Nach mehrmaligem Wachsen der Glasplatte wird die Deckschicht aufgetragen. Das verwendete Formenharz P wird im vorgeschriebenen Verhältnis mit dem Härter VE3261 gemischt. Beide Komponenten wurden zuvor im Wasserbad erwärmt. Die so erzielte Viskosität gestattet ein problemloses Auftragen mit einem Breitpinsel. Das Formenharz P ist frei von metallischen Elementen und schließt somit eine elektrische Leitfähigkeit der Formenoberfläche aus. Ein weiterer Vorteil liegt in seiner höheren Temperaturbeständigkeit im Vergleich zu anderen Deckschichtharzsystemen.

Nach einer Gelierzeit von 1,5 Stunden wird die Harzschicht mit einem Gemisch aus Glasmehl und Glasschnitzeln abgestreut. Die folgende

Kupplungsschicht besteht aus Epoxydharz L20 mit Härter VE3261 und 40 Volumenprozent Füllstoff, einem Gemenge aus Baumwollflocken, Glasschnitzeln und Glasmehl in gleichen Volumenanteilen. Das genannte Harz-Härter-System wird darüber hinaus für den gesamten weiteren Aufbau verwendet. Nach weiteren 1,5 Stunden Gelierzeit wird ein 80-g/m²-Glasgewebe laminiert. Ein Abreißgewebe vollendet den Deckschichtaufbau und bietet nach der Aushärtung eine gute Oberfläche für die Auflage und Verschaltung des Kohlefaserhybridgewebes zur Heizung der Form.

3.1.4 Verschalten des Heizgewebes

Die direkte Beheizung der Platte erfolgt über das bereits erwähnte einlamierte Kohle-Glas-Gewebe, dessen Kohlefaserrovings als Widerstandsheizelemente dienen. Die Steuerung der Heizung erfolgt über einen Temperaturfühler, der in die Form eingebettet wird. Die Stromversorgung übernimmt ein Heizregler.

Durch Variation der Verschaltung des Heizgewebes besteht die Möglichkeit, die Heizleistung dem jeweiligen Verwendungszweck der Form anzupassen.

3.1.4.1 Theoretische Grundlagen für das Verschalten des Heizgewebes

Ein vom elektrischem Strom durchflossener Leiter erwärmt sich. Die Erwärmung des Leiters, im vorliegenden Fall sind es die Kohlefaserstränge des Heizgewebes, ist vom Widerstand des Leiters abhängig. Der elektrische

Widerstand R ist definiert als: $R = \frac{l}{A} \cdot \rho$, wobei ρ eine Materialkonstante,

l die Länge des Leiters und A die Leiterquerschnittsfläche sind. Messungen an zwei einen Meter langen Heizgewebechargen ergaben einen

mittleren Widerstand von $r_{Rov} = \frac{R}{l} = \frac{\rho}{A} = 79,3 \frac{\Omega}{m}$.

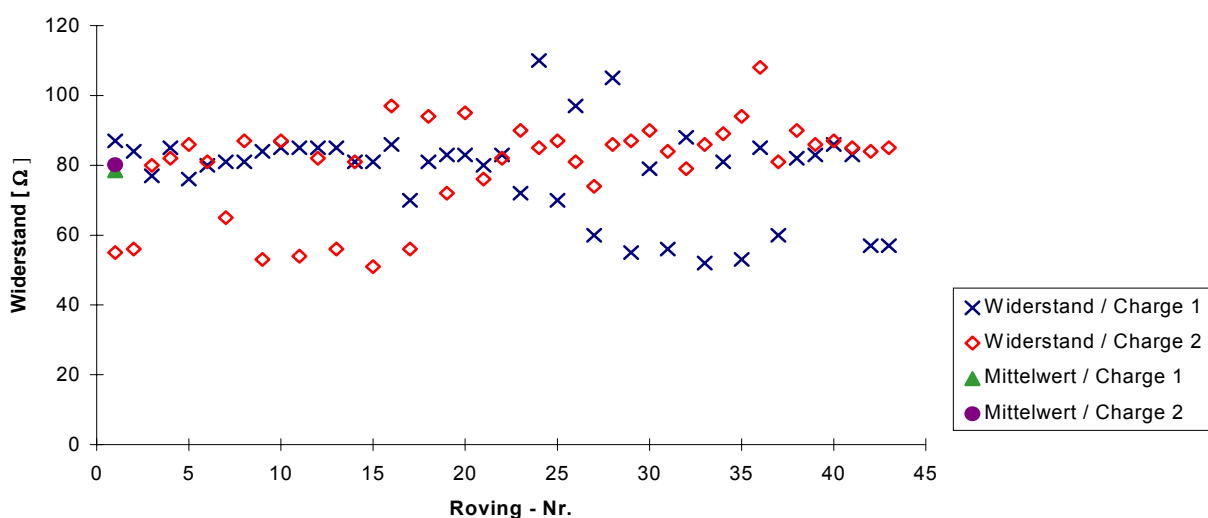


Bild 5: Widerstände der Doppelrovings aus den beiden Heizgewebechargen

Die einzelnen Meßwerte der Doppelrovings offenbaren eine breite Streuung der Widerstandswerte. Aus der obigen Grafik und dem zugehörigen

Meßwertprotokoll (Anhang S. 56) wird eine maximale Widerstandsdifferenz von 58Ω ersichtlich. Diese erheblichen Abweichungen sind auf unterschiedliche Rovingquerschnitte im Heizgewebe zurückzuführen.

Die gesamte Breite B des aus $n=43$ Kohledoppelrovings bestehenden Heizgewebes beträgt 250 mm.

Die Breite b_{Rov} , die ein Kohledoppelroving beheizt, resultiert aus:

$$b_{Rov} = \frac{B}{n} = \frac{250 \text{ mm}}{43 \text{ Strang}} = 5,814 \frac{\text{mm}}{\text{Strang}} = 0,005814 \frac{\text{m}}{\text{Strang}}.$$

Um die von einem Roving beheizte Fläche zu ermitteln, multipliziert man die durch den Roving beheizte Breite mit dessen Länge. Diese Rovinglänge ist formenabhängig und somit variabel.

Für den Grad der Erwärmung des Rovings ist, neben diesen material- und abmessungsspezifischen Werten, die anliegende Stromstärke I gemessen in Ampere entscheidend. Wieviel Ampere Strom durch einen Roving fließen, hängt von der Verschaltung des Heizgewebes ab. Die Kohlefaserdoppelstränge können sowohl parallel als auch in Reihe geschaltet werden. Der sich aus dieser Verschaltung ergebende Gesamtwiderstand R_{ges} bestimmt bei konstanter Spannung den Strom I , der durch einen Doppelroving fließt.

Für eine im jeweiligen Anwendungsfall geeignete Verschaltung ist vom Benutzer die Flächenheizleistung festzulegen. Die Flächenheizleistung $P_{Fläche} [W/m^2]$ bestimmt die erreichbare Temperatur an der Formoberfläche.

Ausgehend von einem Kohlefaserdoppelroving, dessen formenabhängige Heizfläche aus den abmessungsspezifischen Werten berechnet werden kann, ist es nun möglich, die erforderliche Heizleistung P_{Rov} des Doppelrovings zu bestimmen. Hierzu multipliziert man die Flächenheizleistung $P_{Fläche} [W/m^2]$ mit der Heizfläche des Doppelrovings:

$$P_{Rov} = A_{Rov} \cdot P_{Fläche} [W]$$

$$\text{mit } A_{Rov} = l \cdot 0,005814 \text{ m};$$

A_{Rov} = Fläche, die ein Kohledoppelroving beheizt;

$P_{Fläche}$ = Flächenheizleistung.

Der Zusammenhang zwischen Strom und Leistung ist in der Elektrotechnik wie folgt definiert:

$$P = R \cdot I^2$$

mit P = Leistung;

R = Widerstand;

I = Stromstärke

Der erforderliche Stromfluß durch einen Doppelroving ist somit:

$$I_{Rov} = \sqrt{\frac{P_{Rov}}{R_{Rov}}}.$$

3.1.4.2 Einfluß der Form auf die Verschaltung

Entscheidend für die Heizleistung der Form und daraus resultierend die erreichbare Temperatur ist die Anzahl der parallel geschalteten Kohledoppelrovings. Wie oft diese parallel geschalteten Stränge anschließend in Reihe geschaltet werden, ergibt sich aus der Formenbreite.

Die entscheidende Größe für die Verschaltung des Heizgewebes einer beliebigen Form ist deren Gesamtfläche A_{ges} .

Die Gesamtheizleistung P_{ges} einer Form ergibt sich aus: $P_{ges} = P_{Fläche} \cdot A_{ges}$.

Der Heizregler liefert eine Spannung U von 220 V. Die Gesamtleistung ist definiert als:

$$P_{ges} = U_{ges} \cdot I_{ges}. \text{ Daraus folgt für den Gesamtstrom: } I_{ges} = \frac{P_{ges}}{U_{ges}}.$$

Da der Strom sich nach den Kirchhoffschen Sätzen in einer Parallelschaltung verzweigt, ergibt sich für die Anzahl der parallel zu einem Block verschaltenden Doppelstränge:

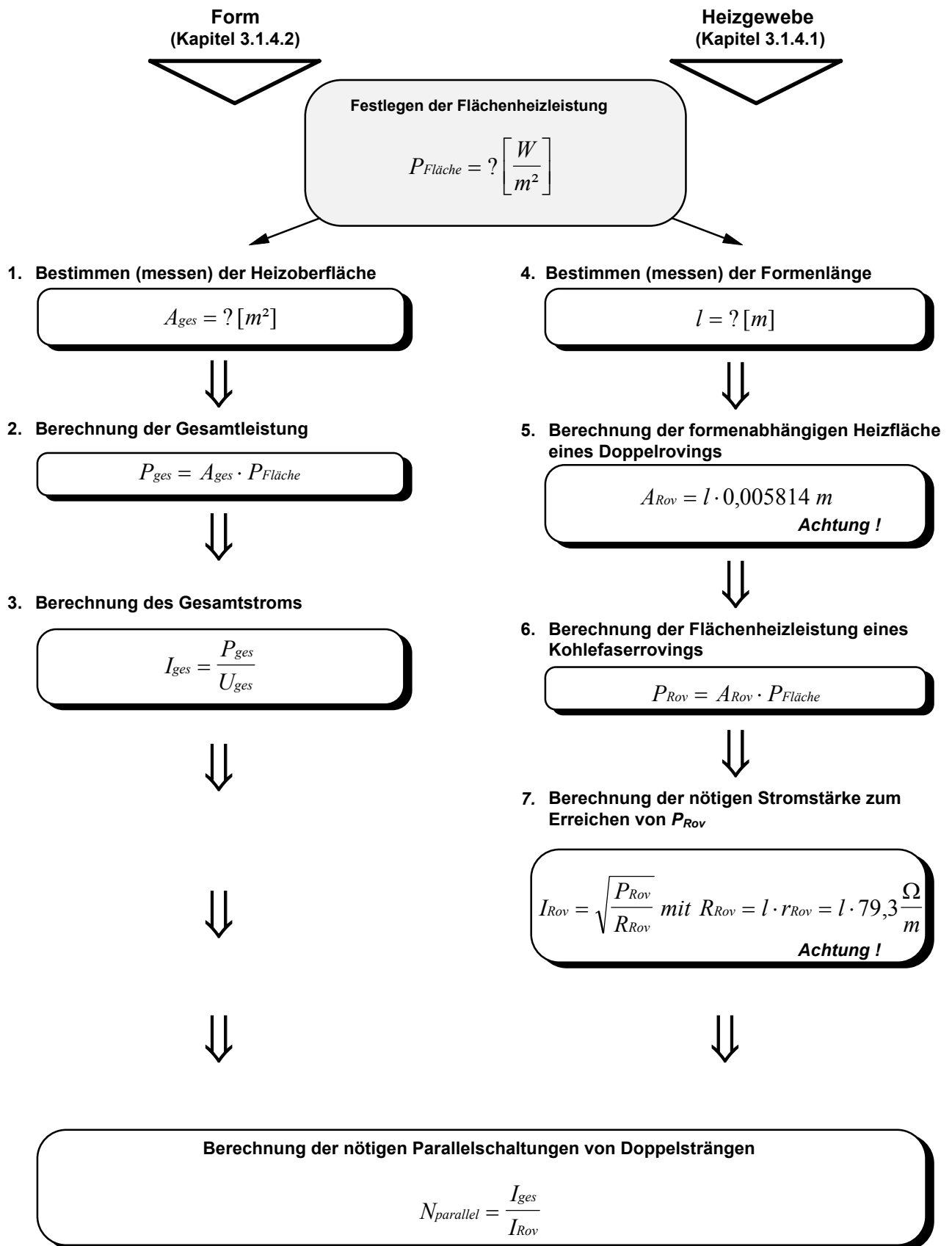
$$N_{parallel} = \frac{I_{ges}}{I_{Rov}}.$$

Zur Veranschaulichung der Rechenwege in diesem und dem vorangegangenen Kapitel (3.1.4.2 und 3.1.4.1) dient das Bild 6, Seite 11.

Da sich bei der Berechnung der Anzahl der parallel zu verschaltenden Doppelstränge $N_{parallel}$ nur selten einen ganzzahligen Wert ergeben, muß in der Praxis auf- oder abgerundet werden, wobei eine abgerundete Anzahl $N_{parallel}$ eine geringere Gesamtheizleistung zur Folge hat.

Wie viele der parallel verschalteten Doppelstränge in Reihe geschaltet werden müssen, ergibt sich durch Auflegen des Heizgewebes auf die Form: die gesamte Form wird bündig mit Heizgewebestreifen ausgelegt. Die Gesamtzahl der aufliegenden Doppelstränge $N_{ges, Stränge}$ dividiert durch $N_{parallel}$ ergibt die Menge der Reihenschaltungen M_{Reihe} :

$$M_{Reihe} = \frac{N_{ges, Stränge}}{N_{parallel}}.$$



Achtung!

Die Zahlenwerte gelten nur für das verwendete Heizgewebe. Andere Konfigurationen müssen nach Kapitel 3.1.4.1 berechnet werden.

Bild 6: Flußdiagramm des Rechengangs zur Ermittlung der Anzahl der nötigen Parallelschaltungen von Doppelsträngen

3.1.5 Verschalten der ersten Platte

Für die erste gefertigte Platte wird die Flächenheizleistung zu experimentellen Zwecken mit 5000 W/m^2 sehr hoch gewählt.

Mit den Maßen der Platte, abzüglich eines Randabstandes des Heizgewebes von etwa 2 cm zur sicheren Isolierung, ergibt sich eine Formenheizfläche von $A_{ges} = 0,6 \text{ m} \cdot 0,63 \text{ m} = 0,378 \text{ m}^2$.

Der in Bild 6 dargestellte Rechenweg führt zu der Anzahl von $n = 13$ parallel zu verschaltenden Doppelrovings.

Über die Breite der Platte (0,63 m) werden 108 Kohlefaserdoppelstränge angeordnet. Dieser Wert läßt sich auch leicht rechnerisch ermitteln: Die Breite des Heizgewebes beträgt 0,25 m, die der Form 0,63 m. Daraus folgt, daß 2,52 Bahnen des Heizgewebes die Platte abdecken. Multipliziert mit 43 Doppelsträngen ergeben sich 108 Doppelstränge für die Platte.

Die erforderliche Anzahl von seriellen Schaltungen ist somit $\frac{108}{13} = 8$.

Das Heizgewebe wird auf die in Kapitel 3.1.3 beschriebene Plattenoberfläche mit dem oben erwähnten Randabstand zugeschnitten. Nun werden auf etwa 3-5 cm die Kettfäden freigelegt. Die freigelegten Kohlefaserstränge werden mit Ader-Endhülsen verklemmt. Zur Gewährleistung einer sicheren Stromführung und um zu hohen Temperaturen an der Quetschstelle vorzubeugen, sollten maximal 4 Doppelstränge in einer Ader-Endhülse zusammengeführt werden. Im vorliegenden Fall von 13 parallel geschalteten Doppelsträngen ergibt sich daraus ein Verschaltungsschema von drei mal drei zusammengeführten Doppelsträngen sowie einer Ader-Endhülse mit vier Doppelsträngen. Die entstandenen, sorgfältig verquetschten vier Hülsen werden mittels eines circa 1,5 mm² starken Kupferdrahtes zu einer Parallelschaltung zusammengefaßt. Damit die Lötstellen nicht zu sehr auftragen, empfiehlt es sich, den Kupferdraht vor dem Verlöten mit dem Hammer flachzuschlagen. Als Brücken für die Reihenschaltung dient gleichfalls 1,5-mm²-Kupferdraht.

Um nach dem späteren Säumen der Form gebrauchsfähige Stromanschlüsse vorzufinden, werden Messinghülsen mit einem Innendurchmesser von 2 mm mit dem Draht verlötet und bis an den Formenrand geführt.

Das Heizgewebe wird mit einem wärmebeständigem und schnellhärtendem Epoxydharz (UHU plus schnellfest) punktuell fixiert.

Eventuell querliegende Kohlefasern werden durch kurzzeitige Inbetriebnahme der Heizung abgebrannt. Dabei wird das Heizgewebe einmal elektrisch angeschlossen, wobei diese einzelnen Kohlefasern unter Sauerstoffeinfluß verglühen. Vor dem Aufbringen einer Kupplungsschicht aus Glasschnitzeln, Glasmehl, Baumwollflocken und Harz zum Ausgleich der Lötstellen sollte der Gesamtwiderstand gemessen werden. Der Widerstand muß zur Kontrolle mit dem rechnerisch zu ermittelnden Gesamtwiderstand R_{ges} verglichen werden.

Das Heizgewebe wird mit dem bekannten Harzsystem laminiert. Es folgt je eine Lage 80 g/m² sowie 280-g/m²-Glasgewebe zur Isolierung des Heizgewebes. An den Lötstellen werden zusätzliche Streifen aus 280-g/m²-Glasgewebe aufgebracht, um sicherzustellen, daß keine

Metallkanten mehr durch die Isolierung ragen. Den Abschluß dieser Isolierungsschicht bildet ein Abreißgewebe. Nach 24stündigem Aushärten und Entfernen des Abreißgewebes bietet die entstandene Oberfläche die Möglichkeit, eine Sichtkontrolle der Isolierung vorzunehmen.

3.1.6 Einbettung der Temperaturfühler

Zu Meßzwecken werden neben dem zur Regelung des Heizgerätes dienenden Temperatursensor drei weitere NTCs an verschiedenen Stellen der Platte einlaminiert.

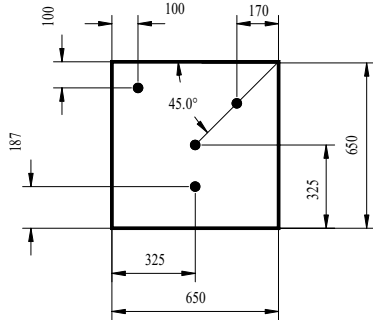


Bild 7: Position der Temperaturfühler in der Platte

NTC-Widerstände sind sogenannte Heißleiter: Widerstände, die bei Temperaturerhöhung ihren Widerstand verkleinern, das heißt, der Temperaturkoeffizient des Heißleiters ist negativ. Die verwendeten NTCs haben bei 20 °C einen Widerstand von etwa 100 kΩ. Um den im folgenden Bild dokumentierte Widerstandsverlauf zu können, werden die Widerstände in kochendem sowie in Eiswasser kalibriert. Mit einem

wärmebeständigem schnellhärtendem Epoxydharzsystem werden die Fühler auf der Platte fixiert. Ihre Einbettung erfolgt mit dem bereits verwendeten Gemisch aus Harz, Baumwollflocken, Glasschnitzeln sowie Glasmehl. Die Anschlüsse am Plattenrand gleichen denen der Stromversorgung des Heizgewebes. Zur Isolierung der Temperaturfühler werden zwei Lagen 280-g/m²-Glasgewebe laminiert.

(R,T)-Diagramm

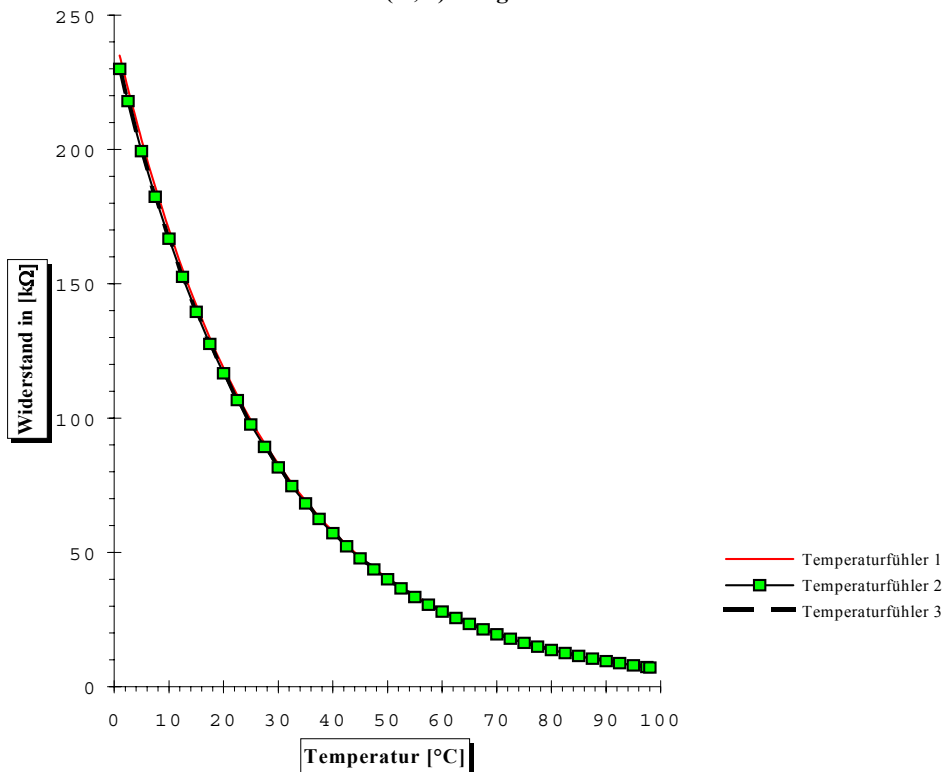


Bild 8: Widerstandskennlinie der NTCs

3.1.7 Die Formversteifung

Nach 2,5stündiger Gelierzeit werden zwei Lagen Kohlefasergewebe (400 g/m^2) quasi-isotrop laminiert. Diese multidirektionale Faserausrichtung (erste Lage $0^\circ/90^\circ$, zweite Lage unter $\pm 45^\circ$) bewirkt eine gleichmäßige Kraftaufnahme in alle Richtungen. Um ein Eindrücken des folgenden Wabenkerns in das Kohlefasergewebe zu vermeiden, wird eine 3,5stündige Gelierzeit eingehalten.

Beim Zuschneiden des Wabenkerns empfiehlt es sich, einen Klebebandstreifen entlang der Schnittkante auf den Wabenkern aufzubringen. Auf diese Weise wird eine glattere Schnittfläche erzielt. Zur Fasung der Kanten wird das Teppichmesser unter etwa 45° geführt.

Zunächst wird ein 80-g/m^2 -Glasgewebe auf die Kohlefaserschicht laminiert, das die Verbindung zwischen Laminat und Wabenkern verbessert. Der Randabstand zwischen Wabenkern und Formenrand beträgt etwa 25 mm . So ausgerichtet, wird der aufgelegte 8 mm starke Wabenkern im Vakuum verpreßt. Nach 24stündigem Aushärten werden die Erhöhungen im Wabenkern, hervorgerufen durch unter dem Wabenkern eingebettete Temperaturfühler etc., abgeschliffen.

Abschließend werden zwei Lagen Kohlefasergewebe (400 g/m^2) auf einer Folie quasi-isotrop laminiert und auf den Wabenkern aufgelegt. Diese Methode ermöglicht eine gleichmäßige Benetzung des Wabenkerns mit Harz und sorgt dadurch für eine gute Verbindung. Nach weiteren 24 Stunden im Vakuumschlauch wird die Platte getempert.

3.1.8 Tempern der ersten Platte

Der Startwert beim Tempern im Klimaschrank liegt bei 20°C . In jeder Stunde wird die Temperatur um 10°C erhöht, bis nach 8 Stunden eine Temperatur von 100°C erreicht ist. Weitere 8 Stunden Halten der Temperatur von 100°C und anschließendes langsames Abkühlen lassen eine hohe Vernetzungsdichte erwarten.

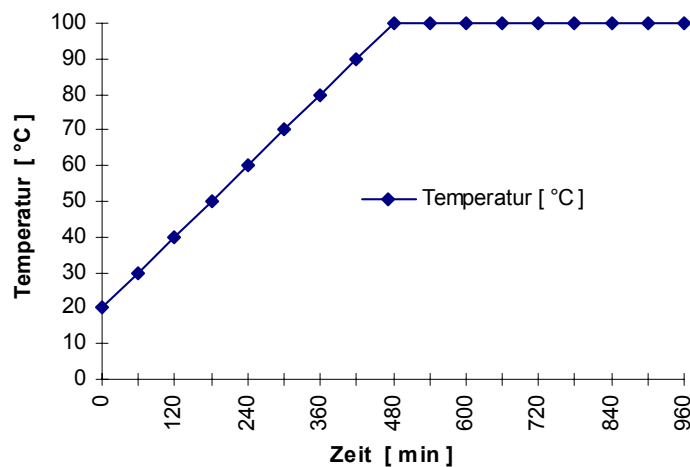


Bild 9: Temperaturverlauf beim Tempern im Klimaschrank

3.1.9 Testen und Messen

Das Gewicht der Platte nach dem Säumen beträgt 3145 g. Dies entspricht einem Flächengewicht von ca. 7444 g/m².

Die Vermessung der Platte mittels Haarlineal und Meßschieber ergibt einen in diesem Ausmaß nicht erwarteten Verzug.

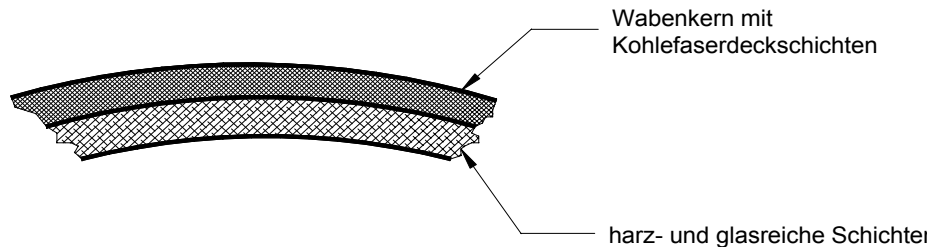


Bild 10: Schematische Darstellung des Verzugs

Der größte Abstand zur Ebene besteht nahe dem Plattenmittelpunkt und läßt sich mit 7,4 mm beziffern.

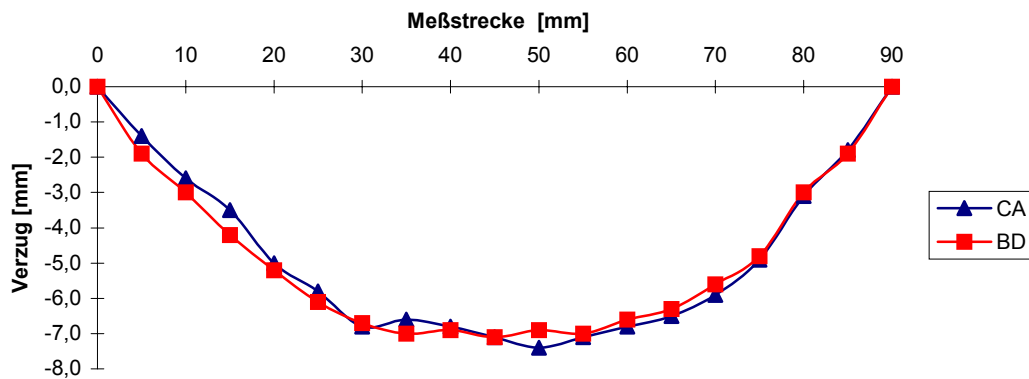


Bild 11: Verzug der ersten Sandwichplatte entlang der Diagonalen CA und BD (Meßwertprotokoll siehe Anhang S. 57)

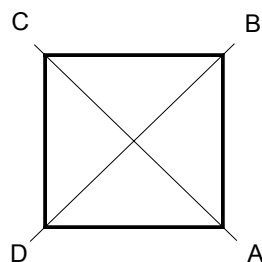


Bild 12: Meßstrecken CA und BD

Der nahezu identische Verlauf der Wölbung, gemessen über die Plattendiagonalen und Kantenlängen, führt zu dem Schluß, daß die unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten des Schichtaufbaus für den Verzug verantwortlich sind. Die Länge der Kohlefaser bleibt bei Wärmeeinwirkung nahezu konstant. Der Wärmeausdehnungskoeffizient ist, im Gegensatz zu den glas- und harzreichen ersten Schichten der Platte, leicht negativ: dies entspricht einer tendenziellen Verkürzung der Rovings.

Der positive Wärmeausdehnungskoeffizient der ersten Lagen bewirkt beim Tempern eine Ausdehnung, die das noch nicht vollständig ausgehärtete Harz gestattet. Im folgenden Abkühlungsprozeß entstehen durch das Bestreben dieser ersten Lagen, in ihren anfänglichen Zustand zurückzukehren, Spannungen im Schichtaufbau, die zum Verzug führen.

Weitere Messungen mit Vierpunktauflage und Mittelpunktsbelastungen bis 20 kg lassen auf eine ausgezeichnete Biegesteifigkeit beheizbarer Formen in Sandwichbauweise mit Wabenkern schließen.

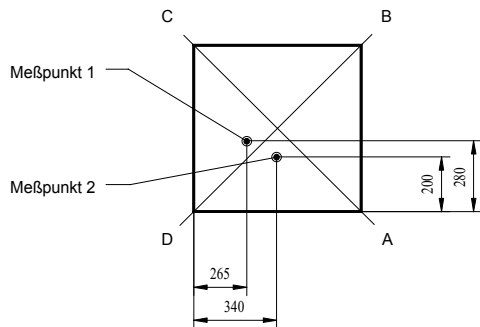


Bild 13: Position der Meßpunkte für den Durchbiegungsversuch und Kennzeichnung der Platteneckpunkte

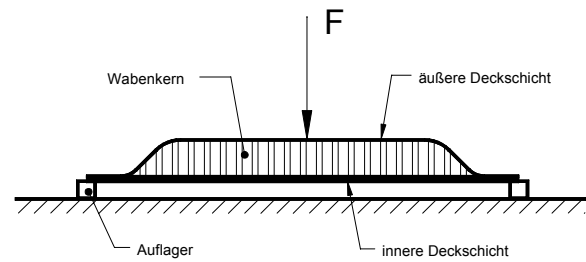


Bild 14: Schematische Anordnung des Durchbiegungsversuchs

3.1.10 Inbetriebnahme der Heizung

Bei einer Umgebungstemperatur von 25 °C erfolgt die Sollwerteneinstellung am Heizregler auf 30 °C. Nach einer ca. 10sekündigen Heizdauer tritt eine lokale Verflüssigung der Deckschicht unter Rauchentwicklung auf. Ein anfänglich angenommener Verschaltungsfehler im Heizgewebe konnte zu einem späteren Zeitpunkt ausgeschlossen werden.

Weitere Erfahrungen mit dem Heizregler-Heizgewebe-System zeigten, daß die Heizleistung dieser ersten Platte viel zu hoch gewählt war. Der verwendete Heizregler gibt die Netzspannung ungedämpft weiter. Bei Heizleistungen von 5000 W entstehen Temperaturen am Heizgewebe, die das Harzsystem überfordern.

Experimente mit vorgeschaltetem Spannungsregler an der zweiten Platte bestätigen die Notwendigkeit einer Dämpfung der Spannung gerade bei hohen Heizleistungen.

3.1.11 Auswertung

Die Ergebnisse beim Bau und der Erprobung der ersten Platte führten zu dem Entschluß, eine weitere Platte mit verändertem Lagenaufbau und verringerter Heizleistung zu realisieren.

3.1.11.1 Symmetrie von Laminaten

„Kohlenstoff ist ein anisotropes Material, die keramische Glasfaser hingegen verhält sich isotrop. Wie die Festigkeiten und Steifigkeiten, so sind auch die thermischen Ausdehnungskoeffizienten in Faserlängs- und Querrichtung bei Kohle- und Glasfasern stark unterschiedlich“ [MUSCH/SCHULZ, 1992]. Um verzugsfreie Formen und Bauteile herzustellen, müssen folglich, die verschiedenen Lagen gleicher Stärke und gleichen Werkstoffes winkelsymmetrisch zur Mittellinie angeordnet werden. Andernfalls verformt sich das Laminat bei sich ändernder Temperatur. Dies tritt vor allem bei der Fremdtemperatur ein.

3.1.11.2 Harzauftrag und -verluste

Faserverbundwerkstoffe im Aufbau mit Kunststoffmatrizen sind zweifellos umweltbelastend bei der Herstellung und Entsorgung. Die oftmals längere Einsatzdauer beispielsweise im Vergleich zu ABS-Bauteilen rechtfertigen ihren Einsatz für hochbelastete Bauteile.

Gleichwohl sollte der Verwender im Umgang mit Kunststoffharzen bestrebt sein, die Harzrestmengen in Rührbechern und Werkzeugen zu minimieren. Finanzielle Erwägungen unterstreichen diese Notwendigkeit.

Beim Laminieren der beiden Versuchsplatten ergab sich ein Verlust des Gesamtharzansatzes von 38,5 %.

63,5 % dieser Harzverlustmenge finden sich in den verwendeten Moltoprenwalzen wieder. Diese quellen bereits nach kurzer Gebrauchszeit auf, wobei der Schaumstoff durch erhöhten Druck während des Tränkvorgangs Risse bildet. Unter Berücksichtigung der extrem kurzen Standzeit von etwa zwanzig Minuten für Moltoprenwalzen empfiehlt es sich, auf Mohairwalzen auszuweichen. Durch Verwendung dieser kurzflorigen Walzen mit hoher Tränkfähigkeit und langer Lebensdauer ließ sich die Verlustmenge beim Bau der Realform auf 13 % senken.

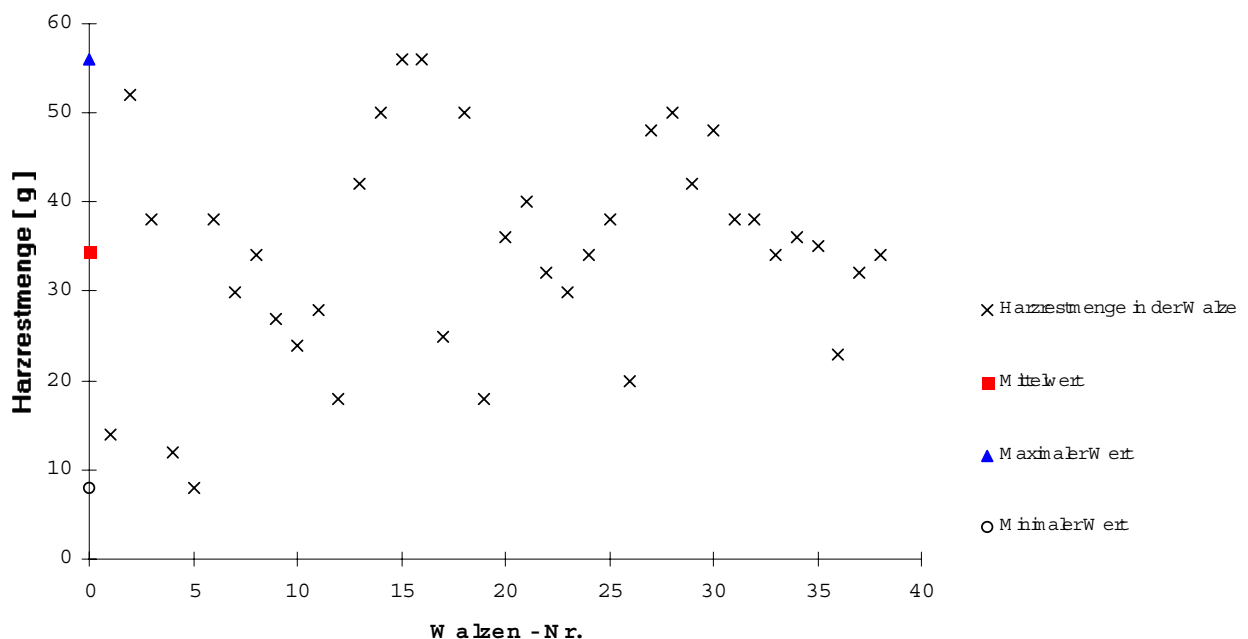


Bild 15: Harzrestmengen in den Moltoprenwalzen (Meßwertprotokoll vgl. Anhang S. 58-59)

3.2 Fertigung der zweiten Sandwichplatte

3.2.1 Die Voraussetzungen

Die zweite Versuchsplatte soll ihre Wärmeformbeständigkeit durch Eigentemperung erreichen. Bei diesem Verfahren wird die Formenheizung zum Erlangen der nötigen Temperatur genutzt. Dieser Umstand muß bei der Wahl des Lagenaufbaus berücksichtigt werden. Bei Fremdtemperung im Temperofen ist der symmetrische Aufbau für verzugsfreies Tempern vonnöten. Bei der Eigentemperung muß hingegen dem Ort der Wärmeeinleitung, nämlich der Lage des Heizgewebes, Rechnung getragen werden.

Für die Wärmeausdehnung von isotropen Werkstoffen gilt [nach SCHREYER, 1972]:

$$\varepsilon_T = \frac{\Delta l}{l} = \int_{T_0}^{T_1} \alpha(T) \cdot dT$$

mit ε = Dehnung,
 $\alpha(T)$ = temperaturabhängiger Ausdehnungskoeffizient,
 T = Temperatur,

woraus sich für den Anwendungstemperaturbereich mit einem nahezu konstanten α

$$\varepsilon_T = \alpha \cdot \Delta T \text{ ergibt.}$$

Für die Flächenausdehnung gilt analog: $\frac{\Delta A}{A} = 2 \cdot \alpha \cdot \Delta T$

Verbundwerkstoffe sind nun aber inhomogene anisotrope Materialien. Der Ausdehnungskoeffizient eines Schichtverbundes wird daher von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst. In der Berechnung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten seien [nach NIEDERSTADT in H. Heißler, 1986] berücksichtigt:

- Art der Verstärkungsfaser
- Orientierung der Faser
- Faservolumengehalt
- Schichtaufbau.

Die mikromechanischen Abläufe in einem mehrschichtigen Laminat unter Wärmeeinfluß verhalten sich äußerst komplex und „eignen sich nicht für eine analytische Behandlung“, wie NIEDERSTADT bemerkt [NIEDERSTADT in H. Heißler, 1986]. Kurz gesagt: In diesem Fall geht probieren über studieren.

Infolgedessen werden nur die grundsätzlichen Mechanismen der Wärmeausdehnung bei der Wahl des Lagenaufbaus der zweiten Versuchsplatte berücksichtigt.

Das Produkt aus Ausdehnungskoeffizient α und Temperaturänderung ΔT muß sich über den Verlauf der Sandwichlagen ausgleichen. Besondere Beachtung verdient hierbei die starke Isolierwirkung des verbauten Wabenkerns.

Im Sandwich betrachten wir die Wärmeausdehnung der beiden Decklagen getrennt. Um einem Wärmeverzug entgegenzuwirken, müssen $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$ werden.

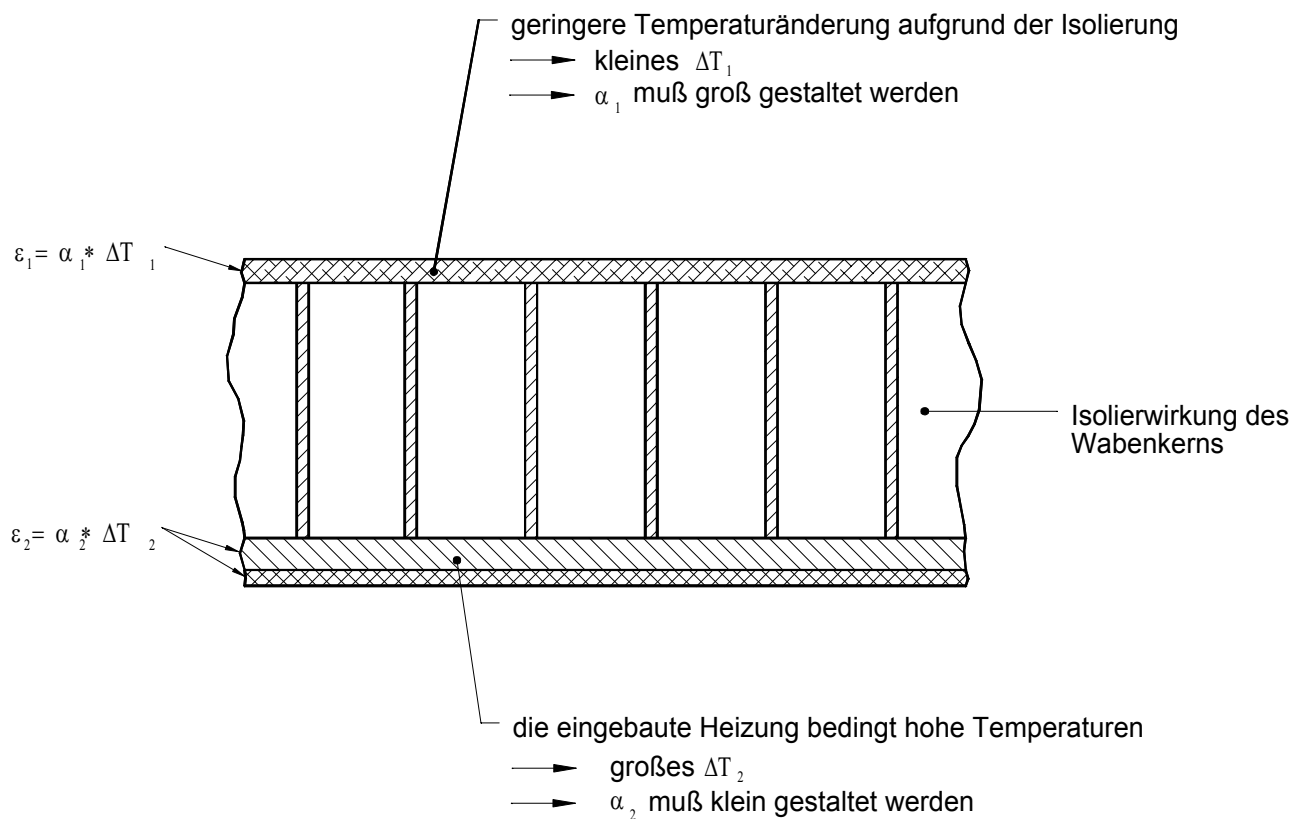


Bild 16: Wärmeausdehnung im Sandwich

Der Ausdehnungskoeffizient α von Glasfasern ist positiv, der von Kohlefasern hingegen annähernd gleich Null. Aus diesen Überlegungen ergibt sich der Lagenaufbau der zweiten Sandwichplatte.

3.2.2 Lagenaufbau der zweiten Versuchsplatte

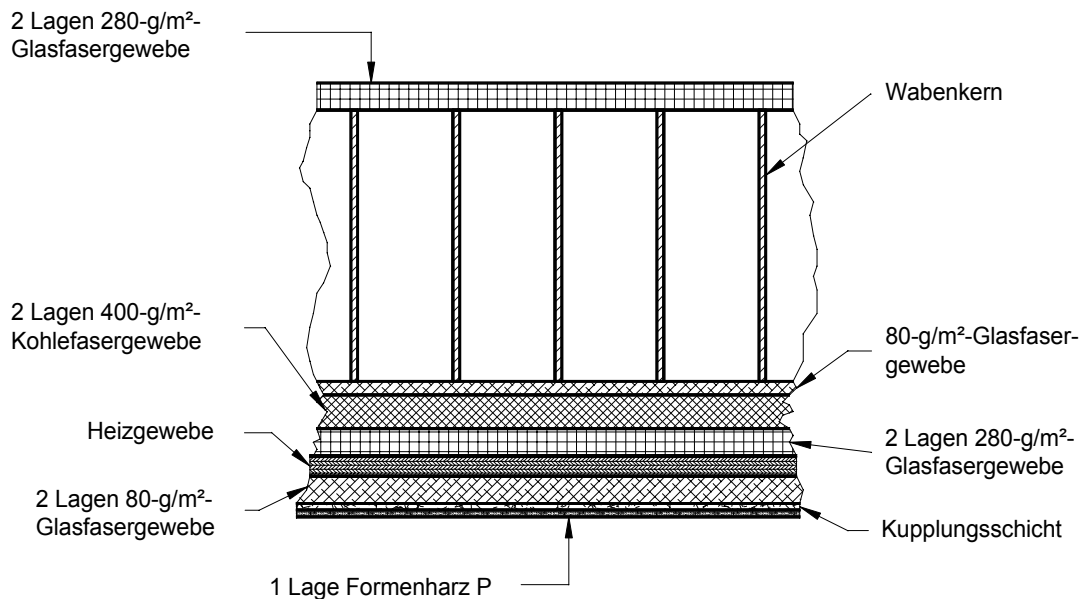


Bild 17: Lagenaufbau der zweiten Sandwichplatte

3.2.3 Herstellung der Verschaltung

Die einzelnen Arbeitsschritte zur Herstellung der zweiten Platte sind, abgesehen vom abweichenden Lagenaufbau, vergleichbar mit denen der ersten Versuchsplatte.

Durch Parallelschaltung von 8 Kohlefasersträngen sowie der seriellen Verschaltung von 16 Parallelschaltungen weist die zweite Platte eine Flächenheizleistung von 1200 W/m^2 auf.

3.2.4 Eigentemperatur der Versuchsplatte

Zu Kontrollzwecken und um den Wärmeverzug dokumentieren zu können, wird die Platte auf den vier Eckpunkten gelagert. Nach Anschluß des Heizreglers folgt eine schrittweise Erwärmung der Platte auf $45 \text{ }^\circ\text{C}$.

Bei Erreichen der jeweils eingestellten Temperatur schaltet der Regler ab. Wird die justierte Temperatur um etwa $2 \text{ }^\circ\text{C}$ unterschritten, schaltet der Regler eine erneute Heizphase.

Bei einem erneuten Aufheizen der Platte von $26 \text{ }^\circ\text{C}$ Umgebungstemperatur auf $47 \text{ }^\circ\text{C}$, mit einer stündlichen Temperatursteigerung von $4 \text{ }^\circ\text{C}$, entsteht auch an der zweiten Versuchsplatte eine lokale Zerstörung der Deckschicht. Die mittels Handmeßgerät ermittelte Temperatur im Bereich des verflüssigten Deckschichtharzes beträgt $70 \text{ }^\circ\text{C}$. In unmittelbarer Nähe des Heizgewebes liegt die Temperatur somit über der zulässigen Temperatur während der Heizphase. Das noch unvollständig polyaddierte Harz wird zerstört.

3.2.5 Maßnahmen zur geeigneten Temperaturführung

Es wird ein handelsüblicher Dimmer vor den Heizregler geschaltet, der die Temperaturen im Inneren der Form auf das Harzsystem abstimmt.

Bei der niedrigsten Regelstufe des Dimmers liegt eine Spannung von 127 V an, und es fließt ein Strom von 0,8 A. Die Formenheizleistung beträgt nun 102 W oder 282 W/m² Flächenheizleistung. Um bei dieser Einstellung und einer Umgebungstemperatur von 25 °C eine Temperatur von 40 °C zu halten, ist der Heizregler 7,45 Minuten in Betrieb. Um eine Temperatur von 50 °C zu realisieren, beträgt die Heizphase 13 Minuten. Die maximal erreichbare Temperatur bei der eingestellten Heizleistung von 282 W/m² ist mit 52 °C zu beziffern.

Die Erwärmung der Platte vollzieht sich aufgrund der verringerten Heizleistung wesentlich langsamer und gewährleistet somit die kontrollierte, zerstörungsfreie Temperaturführung beim Tempern.

3.2.6 Testen und Vermessen

Das Gewicht der Platte nach dem Säumen beträgt 3470 g, daraus ergibt sich ein Flächengewicht von rund 8200 g/m². Die Messungen zur Geradheit in Bezug auf die Ebene ergeben eine minimale Erhöhung der Eckpunkte. Die maximale Ungeradheit beträgt 1 mm. Während der Heizphase vergrößert sich der Verzug über die Plattendiagonale um ebenfalls 1 mm. In der Abkühlphase ist eine Verzugsreduktion gegen Null zu beobachten. Die Durchbiegung der Platte aufgrund ihres Eigengewichtes bei der gewählten Vierpunktlagerung wird nahezu vollständig kompensiert.

3.2.7 Auswertung

3.2.7.1 Probleme der Beheizung

Schwierigkeiten bei der Beheizung der zweiten Platte beruhen auf zwei Ursachen: auf der Beschaffenheit des Heizgewebes sowie auf der Ausstattung des verwendeten Heizreglers.

Zum ersten Problem:

Die stromführenden Kohlefaserdoppelstränge des Heizgewebes werden lediglich durch einen Glasfaseroving auf Abstand gehalten. Querliegende einzelne Kohlefasern verursachen aufgrund dieser Anordnung Kurzschlüsse. Das „Abbrennen“ dieser Kohlefasern vor dem Laminieren ist nicht ausreichend. Durch das Aufbringen des Epoxydharzes mit Laminierwalze oder Pinsel entstehen, bedingt durch die mechanische Einflußnahme, neue Kurzschlüsse im Heizgewebe. Die querliegenden Kohlefasern entwickeln im ausgehärteten Epoxydharz, vergleichbar mit einem Glühdraht im Vakuum einer Glühlampe, hohe Temperaturen. Aus diesem Grund ist es unerlässlich, nach dem Laminieren des Heizgewebes eine Kontrolle durch kurzfristige Inbetriebnahme der Heizung durchzuführen. Um das Harz vor einer Zerstörung zu bewahren, ist das Entfernen der kurzschließenden Kohlefasern mit einer Feile oder einem Fräser notwendig.

Das zweite Problem bei der Beheizung ist, daß der verwendete Heizregler keine Möglichkeit bietet, die Netzspannung zu verringern. In der Heizphase liegt so eine Netzspannung von 220 V am Heizgewebe an, bis der relativ träge und durch zwei Lagen Glasfaser isolierte Temperaturfühler die eingestellte Temperatur erreicht. Während dieser Zeit wirkt die verschaltungsspezifisch maximale Temperatur auf die unmittelbare Umgebung der Kohlefaserdoppelstränge des Heizgewebes. Die realisierbare Temperatur bei einer Heizleistung von 1200 W/m² liegt weit über der

Wärmebeständigkeit des verwendeten Harzsystems. Dieser Umstand erfordert die Spannungsregulierung durch eine Phasenanschnittsteuerung.

3.2.7.2 Widerstandsstreuung

Die einzelnen Kohlefaserrovings des Heizgewebes weisen aufgrund der variierenden Querschnitte der Rovings stark unterschiedliche Widerstandswerte auf. Durch die parallele Verschaltung verringern sich diese Widerstandsdifferenzen, aber das Problem der Temperaturschwankungen bleibt bestehen, denn in der Parallelschaltung verzweigen sich die Ströme. Der Roving mit dem geringsten Widerstand führt daher den meisten Strom und erfährt infolgedessen die stärkste Erwärmung. Um Sicherheit für das Harzsystem zu gewährleisten, ist es deshalb empfehlenswert, am Roving mit dem kleinsten Widerstandswert eine Temperaturmessung unter angestrebter Betriebslast durchzuführen. Die auftretende Temperatur darf die Wärmebeständigkeit des Harzsystems nicht überfordern. Im folgenden Diagramm sind die Temperaturen zweier 1 m langer nicht eingebetteter Rovings in Abhängigkeit vom Stromfluß aufgetragen. Hieran werden erste Größenordnungen ersichtlich.

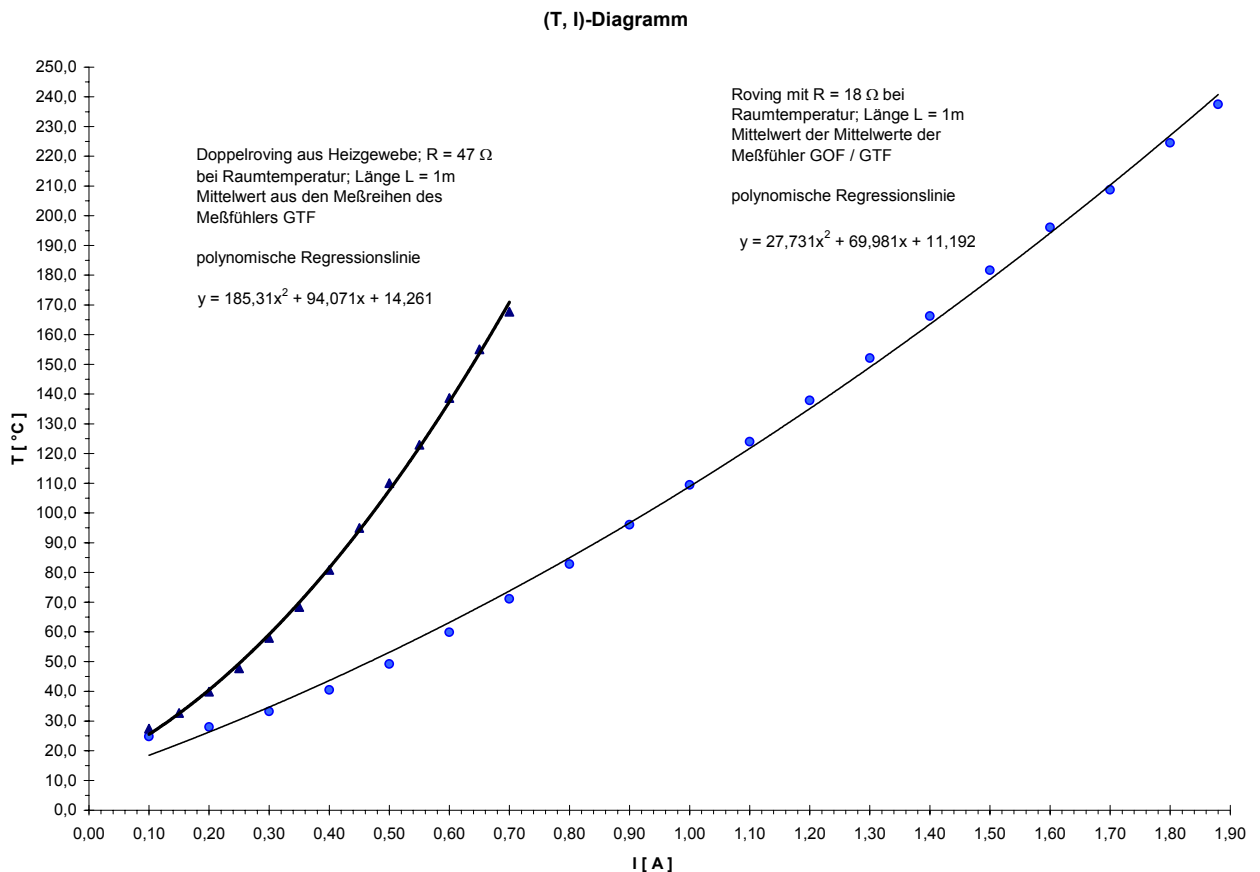


Bild 18: Erreichbare Temperaturen in Abhängigkeit von der Stromstärke, gemessen an nicht eingebetteten Einzelroving

Die Meßdaten für das obige Bild sind mit folgendem Versuchsaufbau gemessen worden (Meßwertprotokoll siehe Anhang S. 60-62):

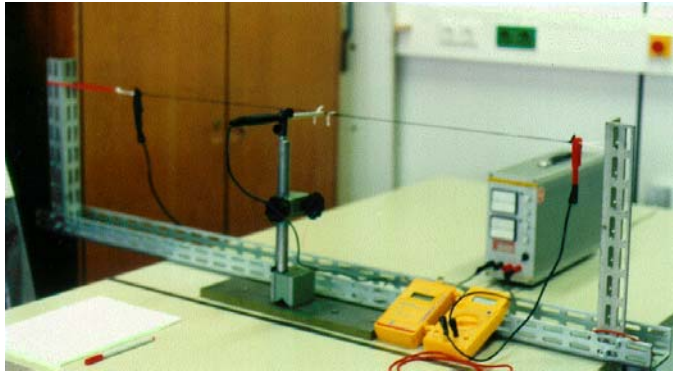


Foto 1: Versuchsaufbau der Temperaturmessung am Roving

Der Roving wird mit Ösen aus Kupferdraht verknotet. An diesen Ösen wiederum sind Baumwollfäden befestigt, mit deren Hilfe sich der Roving zwischen zwei Halterungen spannen läßt. Über die Kupferdrahtösen kann jetzt eine Spannung an die Kohlefaserfilamente angelegt werden. Die Temperaturmessung erfolgt durch ein Handtemperaturmeßgerät, dessen Temperaturfühler - durch ein

Stativ gehalten - leicht vor den Kohlefaserfaden gedrückt wird. Um ein Auseinanderziehen der Kohlefaserfilamente an der Meßstelle zu verhindern, sind zwei Baumwollfäden beidseitig der Meßstelle um den Kohlefaserfaden geknotet. Ein Multimeter mißt die Stromstärke bei angelegter Spannung. Abschließend sei in diesem Abschnitt gesagt, daß ein Selektieren der verwebten Kohlefaserrovings von seiten der Heizgewebehersteller Voraussetzung ist, um die gleichmäßige Erwärmung der Form zu erreichen und um die Grenzen des Harzsystems ausschöpfen zu können.

3.2.8 Konsequenzen für den Formenbau

Der Lagenaufbau der zweiten Versuchsplatte scheint für das Eigentemperverfahren geeignet gewählt zu sein. Ein Verzug von 1,4 mm pro Meter Formenlänge während der Heizphase ist für die meisten Anwendungsfälle tolerierbar. Demzufolge kommt ein ähnlicher Sandwichtaufbau auch für den Bau der realen, zweigeteilten Form zum Einsatz. Um eine ausgeprägtere Stromisolierung zur CFK-Lage im Sandwich zu gewährleisten, wird ein 2-mm-Abstandsgewebe auf das Heizgewebe laminiert. Aus Kostengründen und zur Vereinfachung der Handhabung kommt anstelle der verschiedenen Glasfaserqualitäten ein einziges 163-g/m²-Gewebe in Köperwebung zur Anwendung. Die ausgezeichnete Drapierfähigkeit dieses Gewebetyps erfüllt zudem die höheren Ansprüche einer ein- oder zweidimensional gewölbten Form. Der für die Versuchsplatten verwendete 8-mm-Wabenkern ECA3.2-29 wird durch den 27 mm starken Wabenkern EK4.8/48 ersetzt. Hieraus ergibt sich eine der Formengröße angepaßte größere Steifigkeit und eine bessere Wärmeisolierung.

Die Stromanschlüsse und -führungen der Versuchsplatten haben sich bewährt und werden unverändert beim Realformbau übernommen.

Die realisierbare Heizleistung der Formschalen soll 1200 W/m² betragen. Die erforderliche Verschaltung wird mit Hilfe des Rechenschemas (Bild 6, Seite 11) festgelegt. Um die bei der Beheizung der Versuchsplatten aufgetretenen Probleme zu vermeiden, ist die Verwendung einer Phasenanschnittsteuerung vorgesehen. Diese reduziert die Spannung auf jeden gewünschten Wert. Dadurch besteht die Möglichkeit, die Formenhälften langsam und gleichmäßig zu erwärmen und somit der lokalen Zerstörung der Harzschichten in der Form entgegenzuwirken.

3.2.9 Fotoreihe vom Herstellungsprozeß der Probplatten

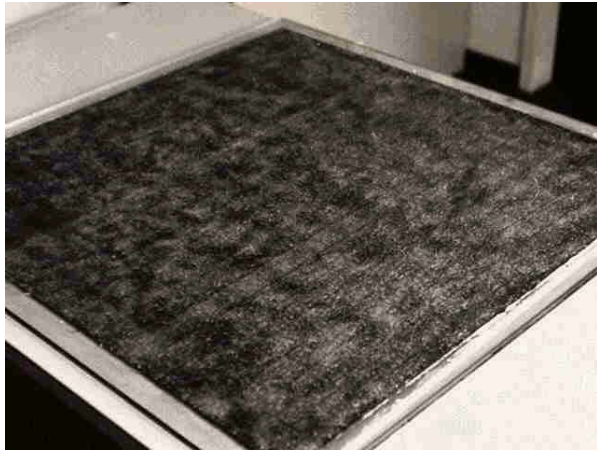


Foto 2: Deckschicht mit Isolierung und Abreißgewebe

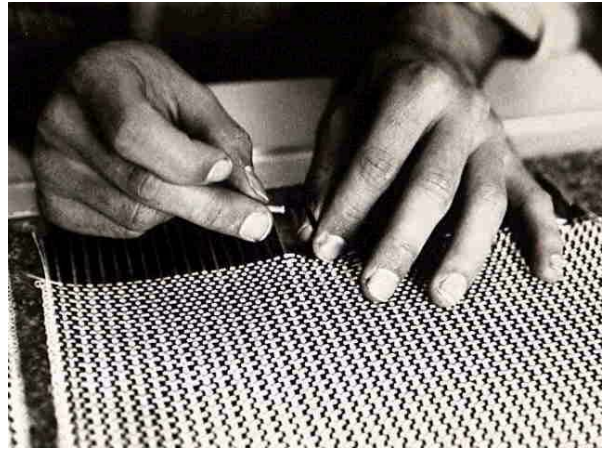


Foto 5: Ader-Endhülsen werden zum Verschalten aufgesteckt



Foto 3: Entfernen des Abreißgewebes

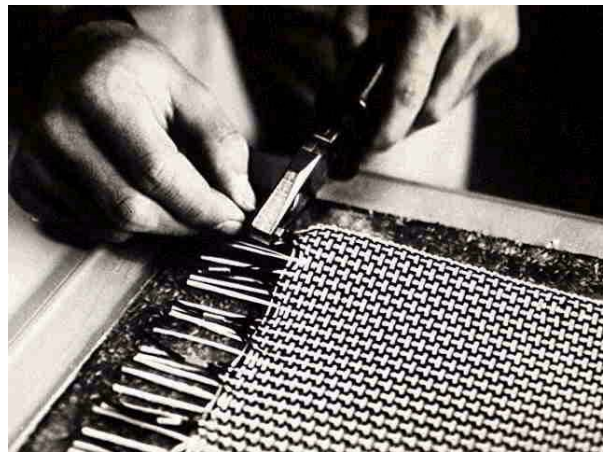


Foto 6: Verquetschen der Ader-Endhülsen



Foto 4: Das Heizgewebe wird aufgelegt und die Kohlefaserstränge 3 cm bis 5 cm freigelegt



Foto 7: Verschaltung mittels 1,5 mm²-Kupferdraht

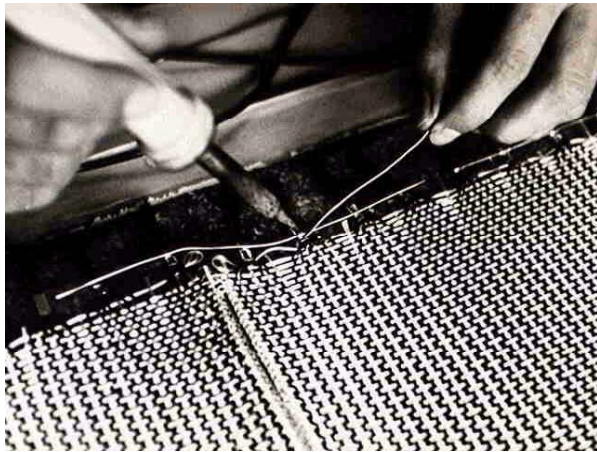


Foto 8: Sorgfältiges Verlöten der Ader-Endhülsen

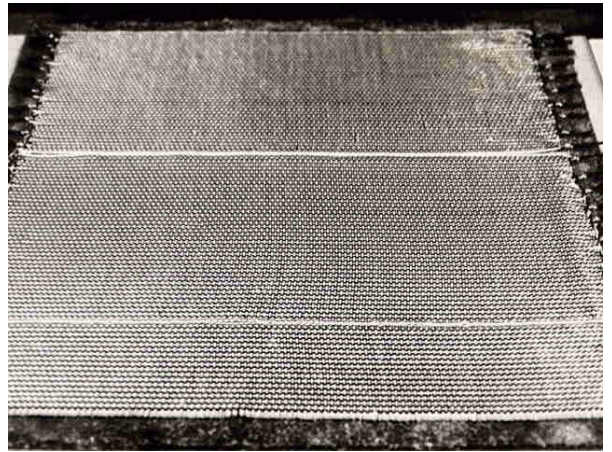


Foto 11: Fertig verschaltetes Heizgewebe

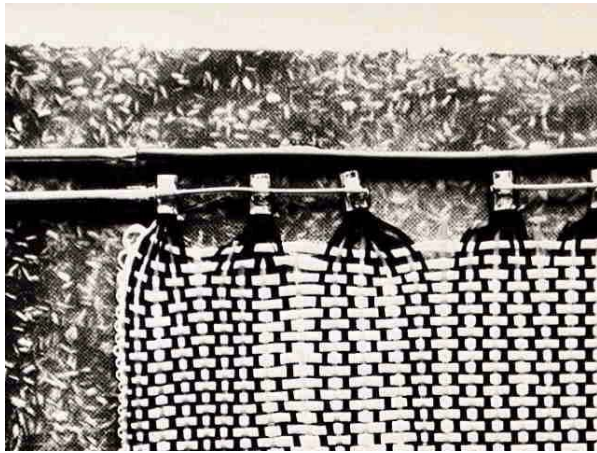


Foto 9: 2-mm-Messinghülsen für den späteren Stromanschluß

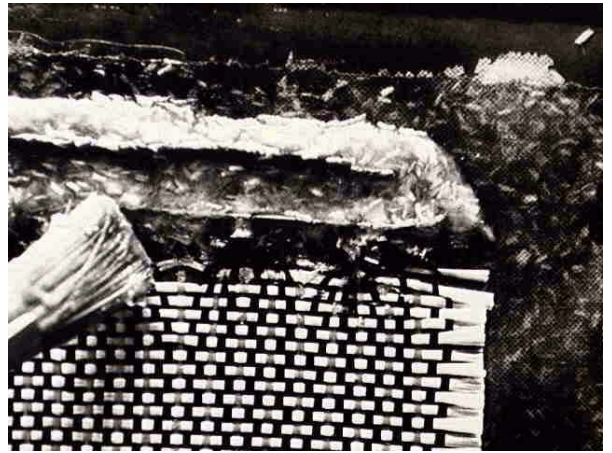


Foto 12: Einbettung der Lötstellen

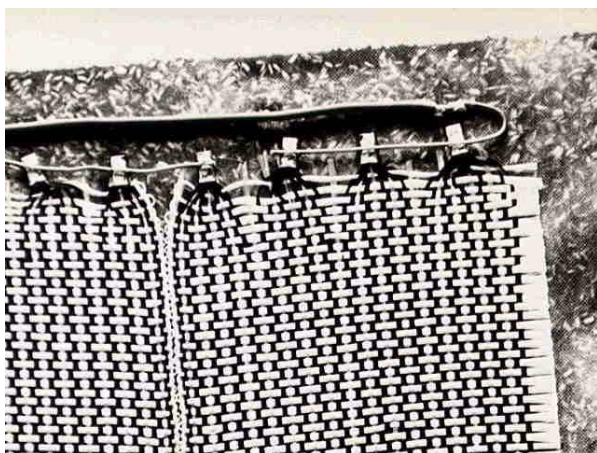


Foto 10: Stromführung am Formenrand

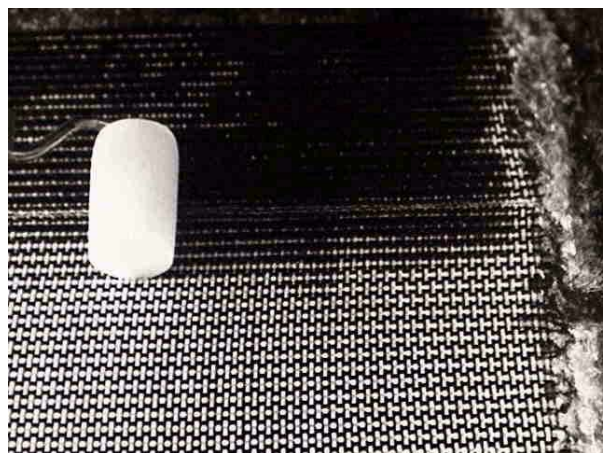


Foto 13: Laminieren des Heizgewebes



Foto 14: Zusätzliche Isolation an den Lötstellen

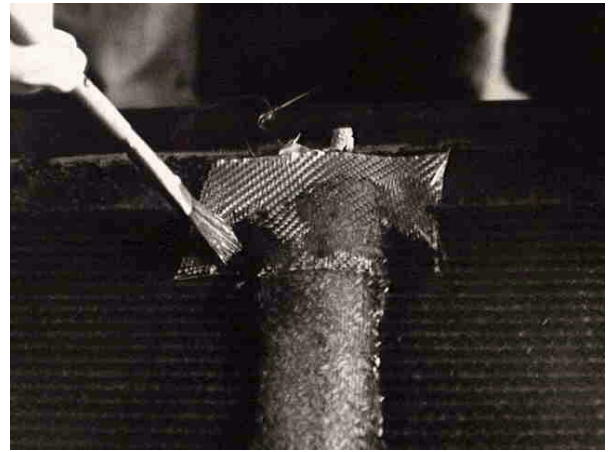


Foto 17: Isolierung der Temperaturfühler



Foto 15: Stromführung und Anschluß der Temperaturfühler

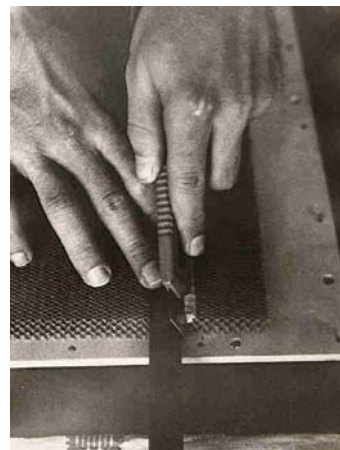


Foto 18: Zuschneiden des Wabenkerns; Klebestreifen ermöglichen sauber Schnittkanten

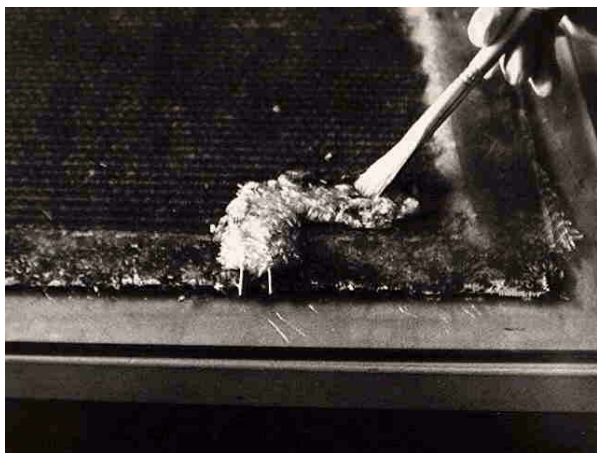


Foto 16: Einbetten der Temperaturfühler

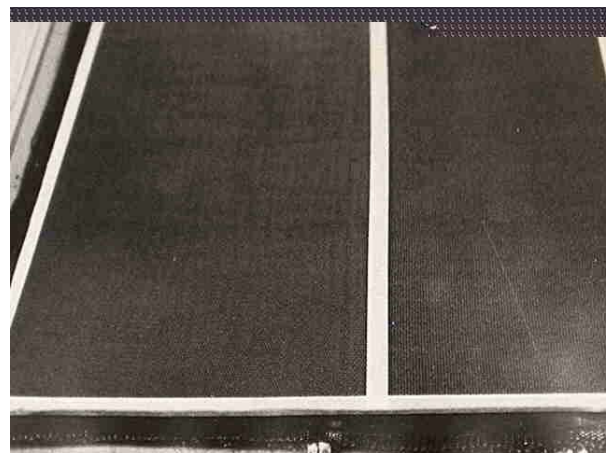


Foto 19: Der aufgelegte Wabenkern

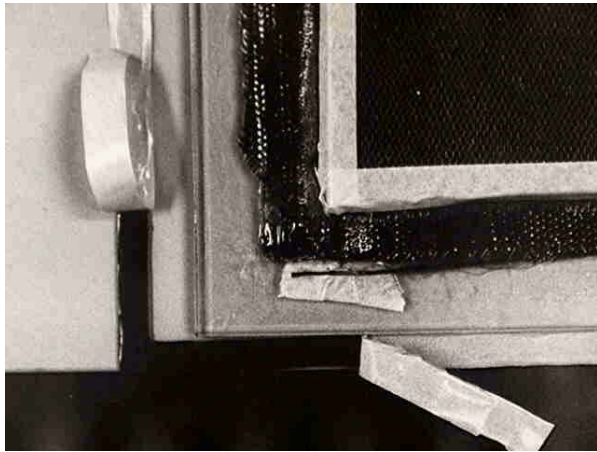


Foto 20: Vorbereitungen zum Vakuumziehen

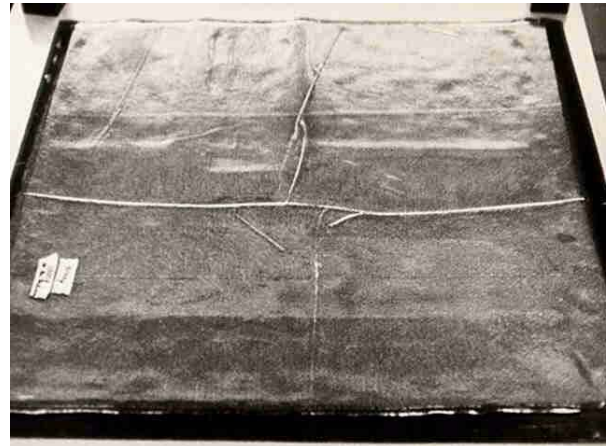


Foto 23: Die fertige Platte



Foto 21: Der Wabenkern wird unter Vakuum verpreßt

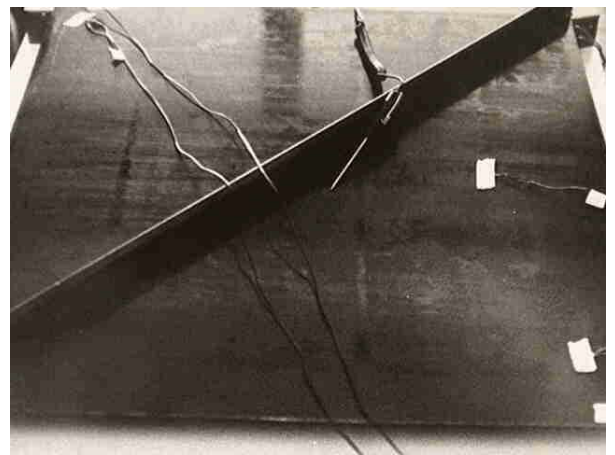


Foto 24: Platte im Betrieb mit zusätzlichen Temperaturfühlern und Haarlineal zum Messen des Verzugs in der Heizphase



Foto 22: Auflegen des Kohlefasergewebes

4 Die zweigeteilte Realform

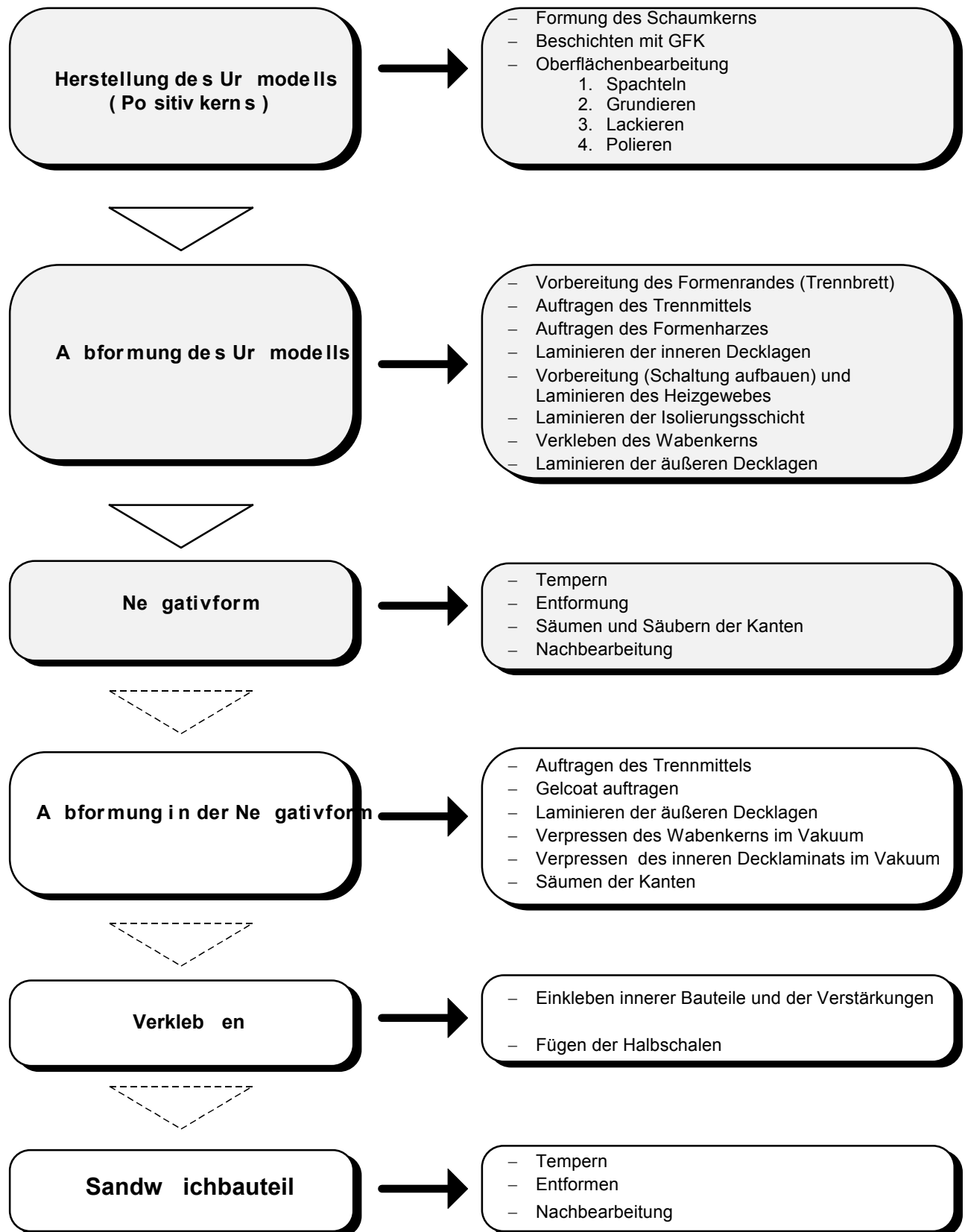


Bild 19: Der Weg vom Urmodell zum fertigen Bauteil

Der arbeitsreiche Weg vom Ausgangsmodell bis zum Sandwichbauteil ist hier in 6 Hauptabschnitte unterteilt, die ihrerseits wieder einzelne Arbeitsschritte aufzeigen. Hierdurch ist der Gesamtherstellungsprozeß aufgefächert dargelegt. In dieser Studienarbeit werden aber nur die ersten 3 Abschnitte - im Bild grau hinterlegt - bearbeitet.

4.1 Auswahl des Urmodells

An das Ausgangsmodell gestellte Grundbedingung ist laut Aufgabenstellung eine mindestens eindimensionale Wölbung. Es soll eine zweigeteilte Form entstehen, da bei deren Bau besondere Anforderungen zu berücksichtigen sind: es müssen Überlegungen zur Gestaltung des Formenrandes, der Zentrierung der Formschalen und zur Vakuumtechnik in den Bau der Form einfließen. Da am Konstruktionsinstitut der Universität Paderborn (LKL) zeitgleich ein theoretischer Beitrag zum Berblinger-Wettbewerb 1996 entsteht, fällt die Wahl auf ein Tragflügelsegment eines personentragenden Solarflugzeuges.

Der Berblingerpreis wird im Turnus von zwei Jahren vergeben. „Er würdigt besondere Leistungen, Entwicklungen und innovative Ideen bei der Konstruktion von Fluggeräten“ [Wettbewerbsausschreibung der Stadt Ulm, 1994].

Der theoretische Beitrag der Universität Paderborn, bearbeitet und eingereicht von Dipl.-Ing. Herbert Funke, weist als eine Besonderheit die Segmentierung der Tragflügel auf. Unter Segmentierung wird der konstruktive Aufbau der Tragflügel aus 18 identischen Bauteilen verstanden. Angesichts dieser Konstruktion läßt sich durch den Bau einer einzigen Form nahezu die gesamte Tragfläche herstellen. Die Ausführung als beheizbare Form beschleunigt den Fertigungsprozeß der einzelnen Segmente erheblich.

Eine geeignete Formenrandgestaltung ermöglicht, gemeinsam mit der Segmentbauweise, darüber hinaus den Verzicht auf die sonst übliche „Blindverklebung“ zweigeteilter Tragflächen. Die resultierenden Vorteile werden im Kapitel 4.4 (Konstruktive Gestaltung des Formenrandes) ausführlich erläutert.

4.2 Fertigung des Urmodells

4.2.1 Werkstoffauswahl

Die zum Einsatz kommenden Materialien richten sich nach der Geometrie des Positivmodells und der angestrebten Güte der Endprodukte. Die Herstellung auf computergesteuerten Fräsen und Drehmaschinen „aus dem Vollen“ bietet sich immer dann an, wenn höchste Maßhaltigkeit bei komplizierten Formen zu gewährleisten ist. Der Einsatz einer solchen kostenintensiven Herstellung rechtfertigt sich aber nur in Ausnahmefällen. Daher werden Herstellung des Tragflügelsegments der „SOL 1“ Sperr- und Balsaholz, Spanplatten sowie druckfester PE-Schaum und Faserverbundwerkstoffe verwendet. Diese Materialien zeichnen sich durch geringe Kosten und gute Bearbeitbarkeit aus.

4.2.2 Bau des Ausgangsmodells

Das Tragflügelsegment weist lediglich eine eindimensionale Wölbung auf. Daher ist eine einfache Bearbeitung des formgebenden Werkstoffes (PE-Schaum) möglich. Der Querschnitt des Flügelprofils FX66-S-196 V1 wird mit Hilfe eines Computerprogramms im Maßstab 1 : 1 ausgedruckt. Nach dieser Vorgabe werden Schablonen für die Ober- und Unterschale aus 2 mm starken Holzfaserplatten gefertigt.

Aus einem PE-Schaumblock werden daraufhin die Flügelhalbprofile durch Führung des Schneidedrahtes entlang des Schablonenverlaufs herausgearbeitet. Die 940 mm breiten Schaumkerne werden mit doppelseitigem Klebeband aufeinander fixiert und vermitteln so einen ersten Eindruck des Profils.

Den Nasenbereich des Flügelsegmentes bildet eine Leiste aus Balsaholz. Diese wird zunächst mit einem Hobel grob geformt, um im zweiten Bearbeitungsschritt mit Schleifpapier dem Profilverlauf exakt angepaßt zu werden. Den seitlichen Abschluß bilden zwei Wurzelrippen aus 5 mm-Sperrholz, die erst an der Bandsäge grob vorgeschnitten und anschließend auf Endmaß geschliffen werden. Um Befestigungsmöglichkeiten für die später benötigten Trennbretter zu gewährleisten, werden mehrere Einschlagmuttern, über die Fläche der Rippen verteilt, angebracht.

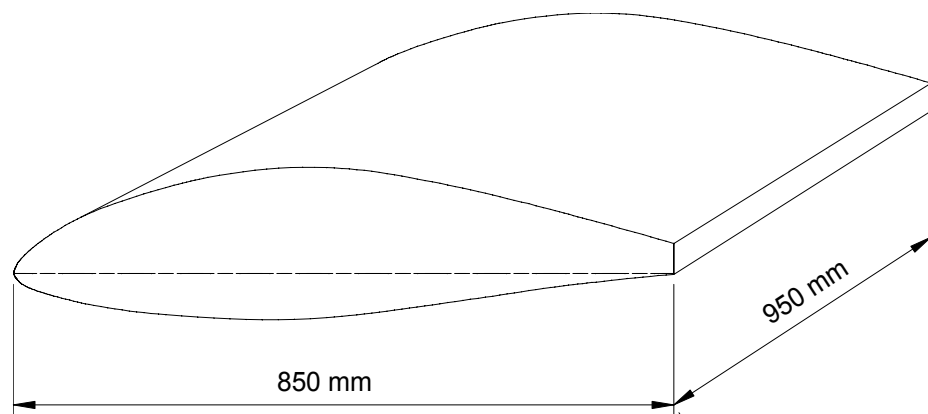


Bild 20: Abmessungen des Flügelsegments (Profil FX66-S-196-V1)

Als Endleiste des Urmodells fungiert eine paßgenau zugeschnittene, 19 mm starke Spanplatte. Angesichts der Materialübergänge und der Oberflächenbeschaffenheit des PE-Schaumes ist eine Oberflächenbeschichtung mit zwei Lagen 280-g/m²-Glasgewebe nötig. Um eine möglichst ebene Oberfläche zu schaffen, wird das Gewebe auf 1 mm, starkes gewachstes Acrylglas vorlaminiert und unter Vakuumeinfluß auf das Ausgangsmodell gepreßt. Das Acrylglas kann nach 24stündiger Aushärtezeit mühelos entfernt werden. Die entstandene Oberfläche erfüllt bereits weitestgehend die an das Ausgangsmodell gestellten Forderungen. Vorhandene Fehlstellen und Randübergänge werden in mehreren Spachtel- und Schleifgängen egalisiert, bevor zwei Schichten Füller aufgetragen werden. Die matte Fülleroberfläche enttarnt letzte Unebenheiten, die einen erneuten Spachtelauftrag notwendig machen. Um gute Lackiererergebnisse zu erzielen, muß die Oberfläche mit Naßschleifpapier feinsten Körnung vorbehandelt werden. Der 2K-Lack wird durch den Fachmann aufgetragen, um langwierige

Polierarbeiten zu reduzieren. Das fertig lackierte und auf Hochglanz polierte Positivmodell bietet beste Voraussetzungen zum Abformen.

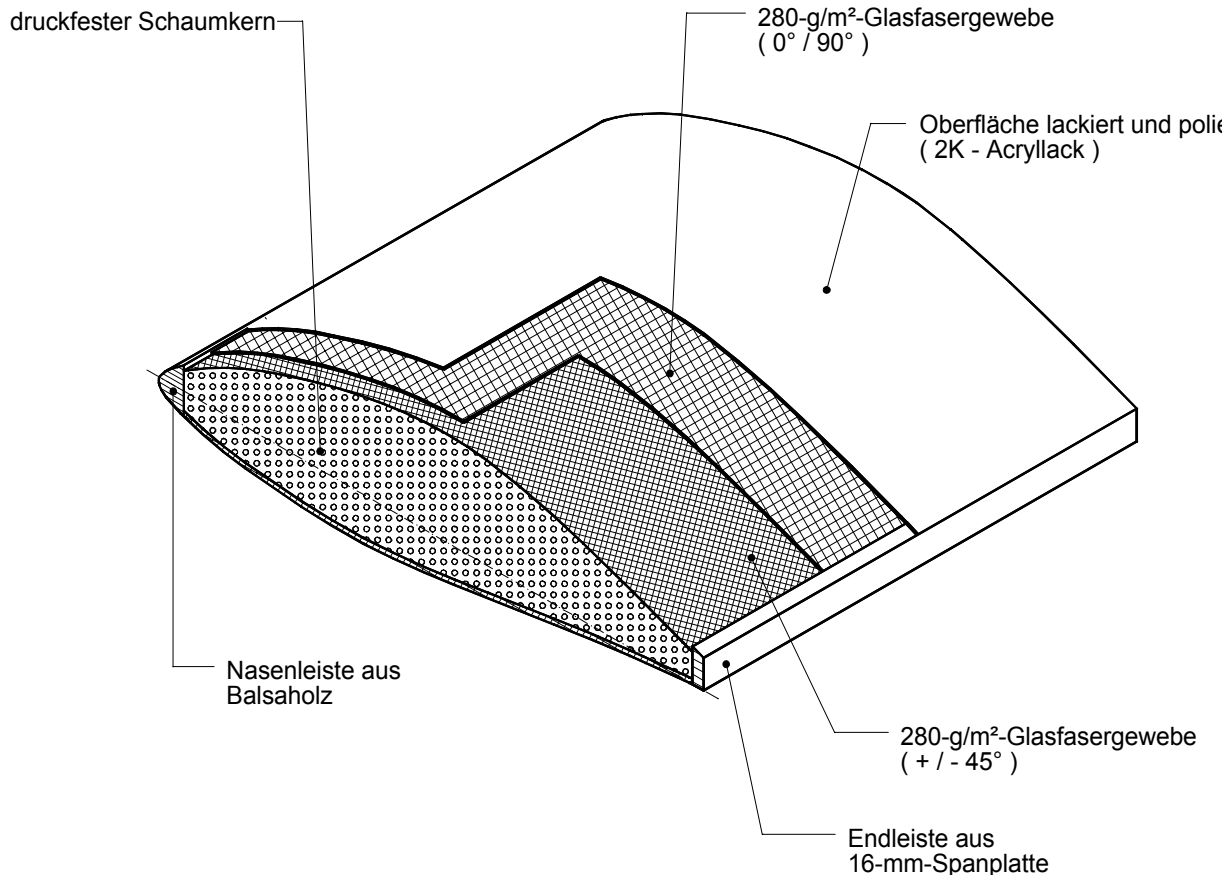


Bild 21:Aufbau des Urmodells

4.3 Die Vakuumtechnik als Druckmittel

Ziel der verschiedenen Vakuumverfahren ist das Verdichten des Schichtverbundes. Positiver Nebeneffekt ist die Beseitigung von Luft einschläüssen und eine Erhöhung des Faservolumenanteils.

Das Prinzip beruht darauf, daß die Luft zwischen Vakuumfolie und Form evakuiert wird. Auf das zwischen Folie und Form befindliche Bauteil wirkt nun der atmosphärische Druck. Um das Vakuum gleichmäßig aufzubauen, ist eine luftführende Schicht zwischen Folie und Laminat vorzusehen. Mehrere Lagen Abreißgewebe erfüllen diese Aufgabe und nehmen überdies überschüssiges Harz auf.

Der maximal mögliche Umgebungsluftdruck beträgt theoretisch 1 bar, wird aber auch mit größtem Abdichtungsaufwand nicht erreicht. In der Praxis sind zwei Verfahren des Vakuumziehens weit verbreitet. Kleine Bauteile werden meist mit Foliensäcken umgeben. Nach Einführung des Vakuumschlauches muß nun lediglich der Eingangsbereich des Foliensackes mit einem geeigneten Dichtmittel (Acryl, etc.) verschlossen werden, bevor die Luft evakuiert wird.

Bei größeren Formen mit entsprechend voluminösen Unterbauten finden Kunststofffolien Verwendung, deren Abdichtung über den Formenrand zu gewährleisten ist. Oft kommen doppelseitige Karosserieklebebänder in

Verbindung mit Acryl zum Einsatz. Der Aufwand zur Abdichtung des Systems steigt hierbei proportional mit der Formengröße. Ferner muß dieser Aufwand bei jedem Bauteil unter Umständen mehrmals betrieben werden (Verpressen des Wabenkerns etc.). Hinzu kommt, daß die Dichtmittelreste nach jedem Vakuumziehen in mühevoller Handarbeit zu beseitigen sind. Zur Verringerung dieses Zeit- und Arbeitsaufwandes kommt bei der angestrebten Flügelsegmentform eine andere Technik zum Einsatz.

Über die umlaufende Kante des Formenrandes wird ein gummiertes Metallklammerprofil mit anextrudiertem Moosgummischlauch geschoben. Das Dichtungsprofil stammt aus dem Karosserie- und Fensterbau und weist eine rundlich ausgeformte Gummidichtlippe auf. Anstelle einer zum einmaligen Gebrauch bestimmten Kunststoffolie wird ein Latextuch auf etwa 15 cm Übermaß zugeschnitten. Entlang des Tuchrandes werden im Abstand von 10 cm Messingösen eingeschlagen. Um ein Ausreißen des äußerst dehnfähigen Latextuches zu verhindern, hat es sich bewährt, vor dem Anbringen der Ösen den Tuchrand auf einer Breite von ca. 5 cm umzuschlagen und mit doppelseitigem Klebeband zu fixieren. Die Ösen werden mit Schlaufen aus elastischen Bändern versehen und die jeweils gegenüberliegenden Schlaufen sind zu diesem Zweck durch Metallhaken auf der Formenrückseite verbunden. Dadurch kann das Latextuch über die Dichtung am Formenrand gespannt werden. Bei großen Hinterbauten ist das Einlaminieren der Haken auf der Formenrückseite gleichfalls denkbar. Das Latextuch als Folienersatz hat die Vorteile einer etwa 500 %igen Dehnfähigkeit sowie einer langen Gebrauchsdauer.

Zum Etablieren des Vakuums ist eine Absaugvorrichtung notwendig. Bei der herkömmlichen Verfahrensweise wird hierfür das Ende des Vakuumschlauches auf einer Länge von ca. 20 cm perforiert und entlang des Formenrandes unter die Kunststoffolie eingebracht. Diese Vorgehensweise ist jedoch in mehrerer Hinsicht unzulänglich: Neben neuerlichen Abdichtungsproblemen muß auf der gesamten Schlauchlänge eine „Harzfalle“ vorgesehen werden. Eine elegantere Lösung wird aus Bild 22 ersichtlich.

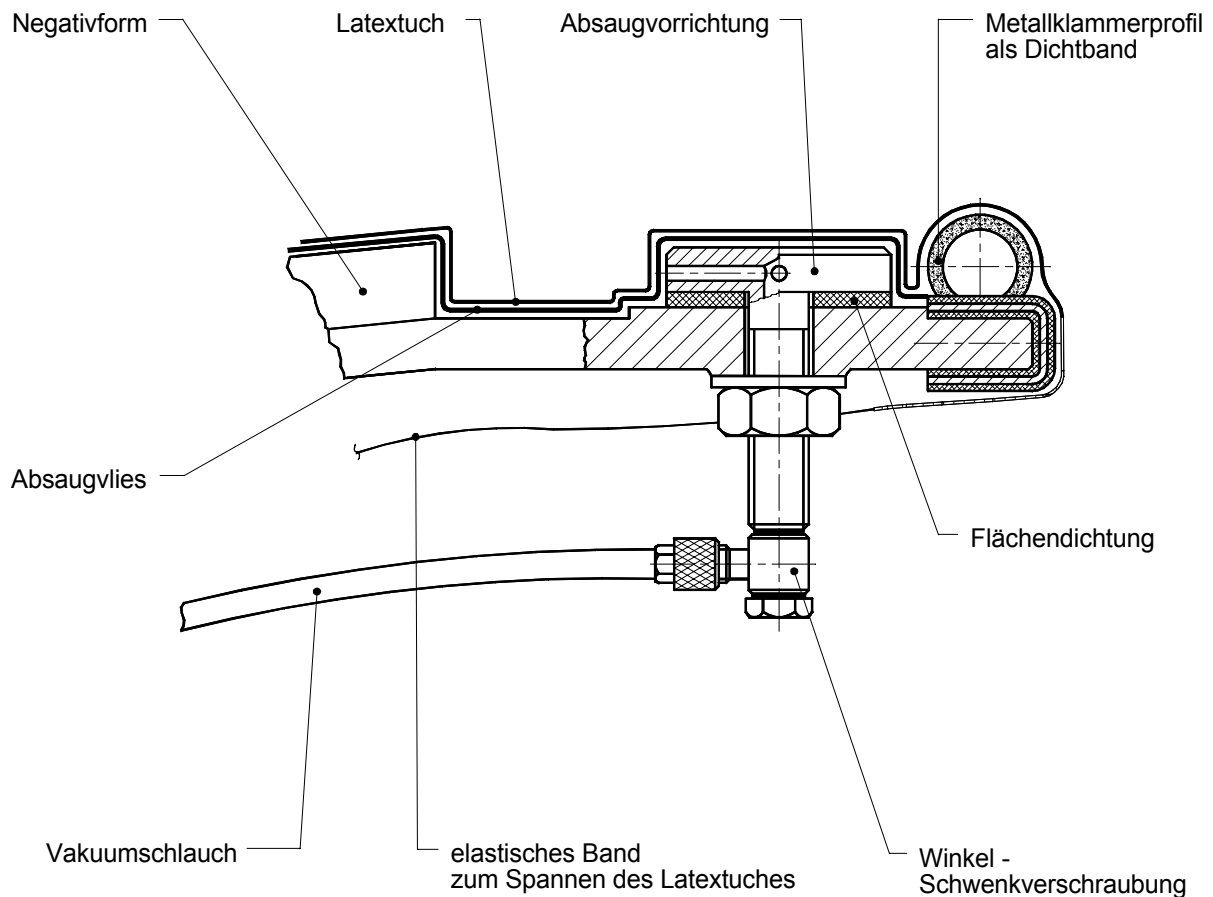


Bild 22: Wiederverwendbarer Aufbau zum Vakuumpressen (Einzelteilzeichnungen siehe Anhang S. 63)

Die Absaugvorrichtung wird durch eine 8-mm-Bohrung im Formenrand geführt und mit einer Mutter fixiert. Die Vorrichtung verbleibt während sämtlicher Arbeitsschritte im Formenrand. Bei Bedarf wird der Vakuumschlauch an den Schnellverschluß angeschlossen. Bei großen Formen bewirken mehrere dieser Absaugvorrichtungen, verteilt über den Formenrand, eine Dezentralisierung des Harzflusses.

Der Mehraufwand, der betrieben wird, um dieses System einzurichten, amortisiert sich bereits nach wenigen Bauteilen. Hinsichtlich der industriellen Fertigung ist die Zeitersparnis pro erstelltem Bauteil noch höher zu bewerten.

4.4 Konstruktive Gestaltung des Formenrandes

Der Formenrand zweigeteilter Formen muß mehreren Anforderungen genügen. Außer der notwendigen Zentrierung der beiden Schalen zueinander muß bei der Gestaltung berücksichtigt werden, daß über den Formenrand ein Vakuum abzudichten ist.

Einen weiteren Aspekt, der bei der Gestaltung des Formenrandes zu berücksichtigen ist, stellt die Problematik der Blindverklebung beim Fügen der Halbschalen dar. Gängige Praxis ist es, Tragflügel und andere geschlossene Bauteile, die zumeist aus zwei Schalenelementen bestehen, nach Anbringen von Spanten und Verstärkungsrippen mit großem Harzüberschuß an den Fügeflächen „blind“ zu verkleben. Nach dem Zusammenfügen kann weder der Harzüberschuß aus dem Bauteil entfernt, noch eine Sichtprüfung der Verklebung vorgenommen werden. Dies führt zu unnötigem Mehrgewicht und setzt extrem genaue Bearbeitung und Oberflächengüte der Bauteilhälften voraus. Für eine sichere Verklebung muß der Formenrand darüber hinaus gewährleisten, daß gleichmäßiger Druck auf die Bauteilschalen während der Aushärtung ausübbar ist. Diese Aufgabe können Verschraubungen oder Zwingen, entlang des Formenrandes angeordnet, übernehmen.

Trotz all diesen „Postulaten“ an den Formenrand sollte dessen Gestaltung vor allem einfach sein. Jeder zusätzliche Absatz oder verklebte Leiste vergrößert den Arbeitsaufwand, der nur durch Vorteile bei der Handhabung der Form zu rechtfertigen ist.

Die Zentrierung der Formenhalbschalen für das Tragflügelsegment der „SOL 1“ wird im Nasenleistenbereich von zur Hälfte im Trennbrett versenkten, abgeformten Kugellagerkugeln, am hinteren Formenrand von angeformten Abstandhaltern übernommen.

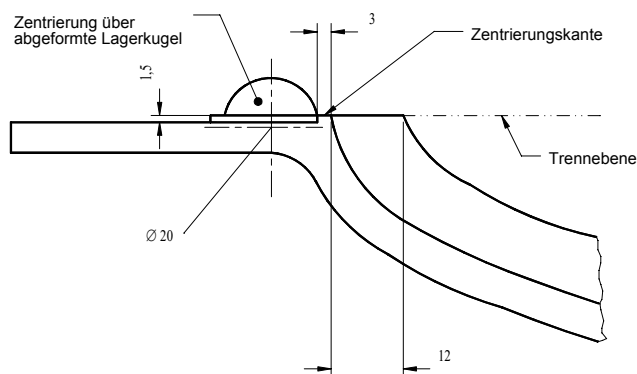


Bild 23: Zentrierung im Nasenbereich

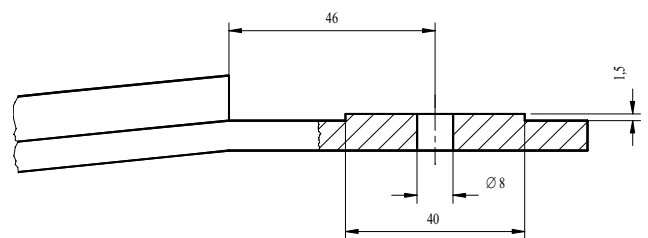


Bild 24: Angeformte definierte Erhöhung für die Abstandhalter am hinteren Formenrand

Für die in Kapitel 4.3 beschriebene Vakuumtechnik sind lediglich großzügige Eckradien und eine möglichst gleichbleibende Randlaminatstärke zum Anbringen des gummierten Metallklammerprofils erforderlich.

Um die Probleme der Blindverklebung zu umgehen, wird eine „offene“ Form konstruiert. Die beiden Formschalen kommen lediglich im Nasenbereich miteinander in Berührung. Im hinteren Bereich sorgen die Abstandhalter für gute Zugänglichkeit während der Bauteilverklebung. Durch den segmentierten Aufbau des Tragflügels ist auch ein guter seitlicher Zugang möglich.

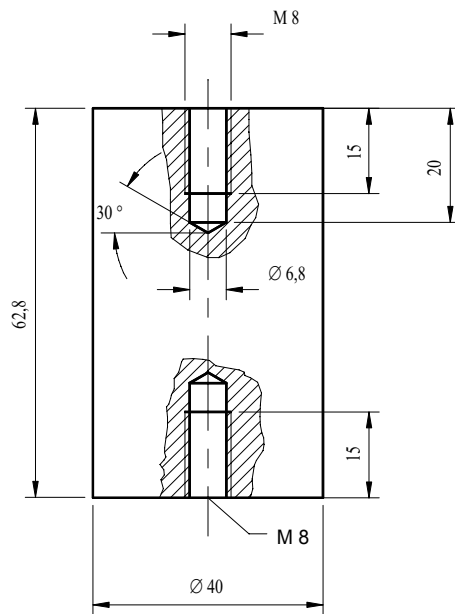


Bild 25: Abstandhalter aus Aluminium

Für alle zweigeteilten Formen gilt es, die Auflageflächen zwischen den Formhälften möglichst klein zu halten. Somit kann beim Fixieren der Bauteilhälften besser Druck über den Formenrand auf diese „Quetschkante“ aufgebracht werden. Breite Auflageflächen können außerdem den exakten Formschluß beeinträchtigen, wenn sie zum Beispiel durch Staub oder Harzreste verschmutzt sind.

4.5 Bau der Realform

4.5.1 Trennebene und Formenrand

Das lackierte und polierte Vollmodell des Tragflügelsegments wird auf einem stabilen Tisch abgelegt. Die Negativschale des Schaumblocks, aus dem die Urform geschnitten wurde, hilft bei der Fixierung und vermeidet Kratzer auf der Hochglanzoberfläche.

Zunächst entsteht das seitliche Trennbrett. Zu diesem Zweck werden drei Wurzelrippen aus 19-mm-Spanplatte an der Bandsäge gefertigt. Zwei dieser Rippen weisen ein Übermaß von 10 mm bezogen auf das Ausgangsmodell auf. Diese Übermaßrippen finden zu beiden Seiten der Form mit Hilfe der Einschlagmuttern am Urmodell Befestigung. Die beim Abformen entstehende Kante ermöglicht die exakte Bearbeitung der Bauteile auf das angestrebte Endmaß. Die dritte Wurzelrippe entsteht mit 2 mm Untermaß bezüglich des Ausgangsmodells. Einseitig zwischen Vollmodell und Übermaßrippe fixiert, entsteht nach dem Abformen ein Absatz, der den Formschluß der fertigen Tragflügelsegmente zueinander bildet. Die unter Maß zugeschnittene Spanplatte wird an den Schnittflächen mit Kantenumleimer versiegelt, um eine geeignete Abformoberfläche zu gestalten.

Auf dem 19 mm breiten Rand der über Maß geschnittenen Rippen läßt sich der spätere Formenrand anbringen, der aus 150 mm breiten und 2 mm starken Sperrholzstreifen geformt wird. Es empfiehlt sich, das Sperrholz vor dem Verleimen mit Wasser zu tränken, um einer Rißbildung im Sperrholz über den Wölbungsverlauf vorzubeugen.

Das hintere Trennbrett ist als Winkel aus einer beschichteten Spanplatte ausgebildet. Dieses Winkelprofil wird der seitlichen Unterkonstruktion

für den Formenrand hinsichtlich der Kantenhöhe von 10 mm angepaßt und mit Spaxschrauben an der Endleiste des Ausgangsmodells befestigt.

Charakteristisch für die „offene“ Gestaltung der Form ist, daß lediglich eine Trennfläche im konventionellen Sinn existiert, während alle anderen Formenrandflächen aus der Trennebene herausragen. Das einzige in dieser Ebene liegende Trennbrett befindet sich am vorderen Rand der Form und besteht aus einer beschichteten Spanplatte. Es wird exakt auf Höhe der Mittelsehne an der Flügelnase ausgelotet. Ein Unterbau aus Holzleisten ermöglicht seine Befestigung an den seitlichen Wurzelrippen. 25 mm von der Nasenleiste entfernt werden, verteilt über die Trennbrettlänge, vier Sacklöcher gebohrt, in denen Kugellagerkugeln Platz finden. Bezüglich der Abformung ist darauf zu achten, daß die Kugeln bis mindestens zur Hälfte im Trennbrett versenkt sind; andernfalls werden die Kugellagerkugeln untrennbar mit der Form verbunden. Die abgeformten Negativkugelsegmente dienen als Zentrierung der Formschalen zueinander.

Abschließend müssen sämtliche, durch den Formenrand und das Trennbrett entstandenen Fugen mit Kitt oder Knetgummi aufgefüllt und angeglichen werden. Jeder noch so kleine Spalt, in den Formenharz eindringen kann, bewirkt eine erheblich erschwerte Entformung.

4.5.2 Lagenaufbau der Form

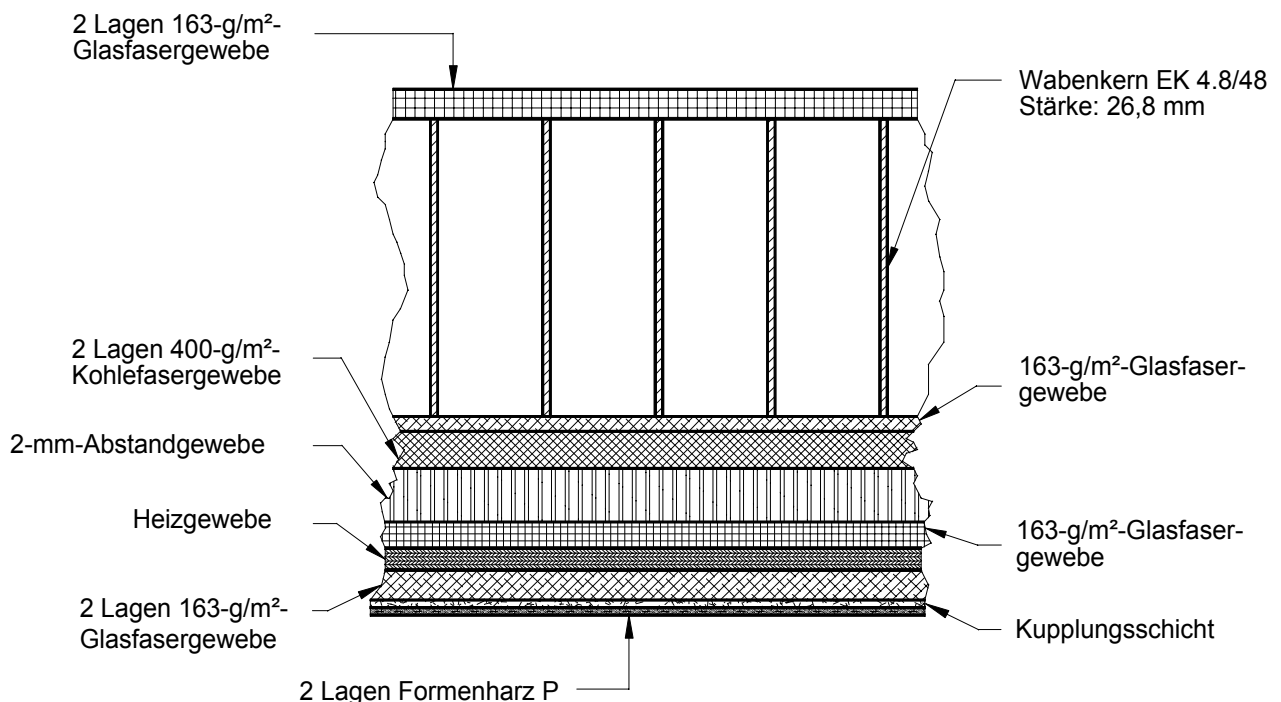


Bild 26: Der Lagenaufbau der Form

4.5.3 Deckschicht und elektrische Isolierung in Richtung der Forminnenseite

Zunächst wird das Ausgangsmodell penibel gereinigt. Aceton hilft bei der Beseitigung von Fett und Öl auf der Oberfläche. Dem folgenden Auftrag von Trennmitteln kommt größte Bedeutung zu. Ungeeignete Mittel oder fehler-

hafter Auftrag können dazu führen, daß sowohl die Form als auch das Urmodell nach dem Entformen unbrauchbar sind. Nach mehrmaligem Wachsen und Polieren wird ein PVA-Trennlack aufgetragen.

Polyvinylalkohol ist ein folienbildendes Trennmittel, das nach dem Trocknen einen hochglänzenden Lackfilm bildet. Der Auftrag mit Pinsel oder Moltoprenrolle muß naß in naß vollzogen werden, damit sich gebildeter Film nicht wieder an- oder ablöst. Verdünnt mit Wasser, sind PVA Trennlacke auch lackierfähig.

Das Formenharz P muß vor dem Aufbringen sorgfältig aufgerührt werden. Erwärmen im Wasserbad erleichtert die Handhabung auf ebenen Flächen. An Kanten und Ecken hingegen bringt die höhere Viskosität normaltemperierten Harzes Vorteile hinsichtlich der Haftfähigkeit mit sich.

Zwei Stunden Gelierzeit verhindern, daß das nachfolgend aufgestreute Gemisch aus Glasmehl, Glasschnitzeln und Baumwollflocken in das Formenharz absinkt. Eine Kupplungsschicht aus Epoxydharz mit 40 Volumenprozent Füllstoff stellt die Verbindung zu zwei Lagen 163-g/m²-Glasfasergewebe her. Um das Glasgewebe besser drapieren zu können, wird das Kupplungsgemisch an den Kanten zum Formenrand besonders großzügig aufgetragen. Im Kollektiv bilden diese ersten Schichten neben der Isolierung in Bauteilrichtung auch die Oberfläche zum Verschalten des Heizgewebes.

4.5.4 Das Heizgewebe

In Anbetracht der Ergebnisse aus den Plattenversuchen wird eine maximale Heizleistung von 1200 W/m² für jede Formenschale gewählt. Die darauf beruhende Verschaltung für das Heizgewebe stellt Bild 27 dar.

Das Heizgewebe wird nach bewährter Weise aufgelegt und verlötet. Die Längen der Heizgewebestreifen sind so gewählt, daß die Lötstellen und Drahtbrücken im ersten Drittel des Formenrandes platziert sind. So bleibt beim späteren Säumen genügend Sicherheitsabstand zur Verschaltung.

Die wiederholte kurzfristige Inbetriebnahme der Heizung führt dazu, daß sämtliche querliegenden Kohlefaserfäden abgebrannt werden. Nach dem „Abfackeln“ ist das Hybridgewebe disponibel für den Harzauftrag.

Abweichend von dem Verfahren bei den Versuchsplatten, wird das Heizgewebe nach dem Laminieren ausschließlich mit Abreißgewebe belegt und im Vakuum verpreßt. Das Resultat sind perfekt aufliegende Lötverbindungen und ein gut verdichtetes Laminat mit nur sehr wenigen Lufteinschlüssen. Neue Kurzschlüsse im Heizgewebe lassen sich am besten bei abgedunkelter Umgebung und im

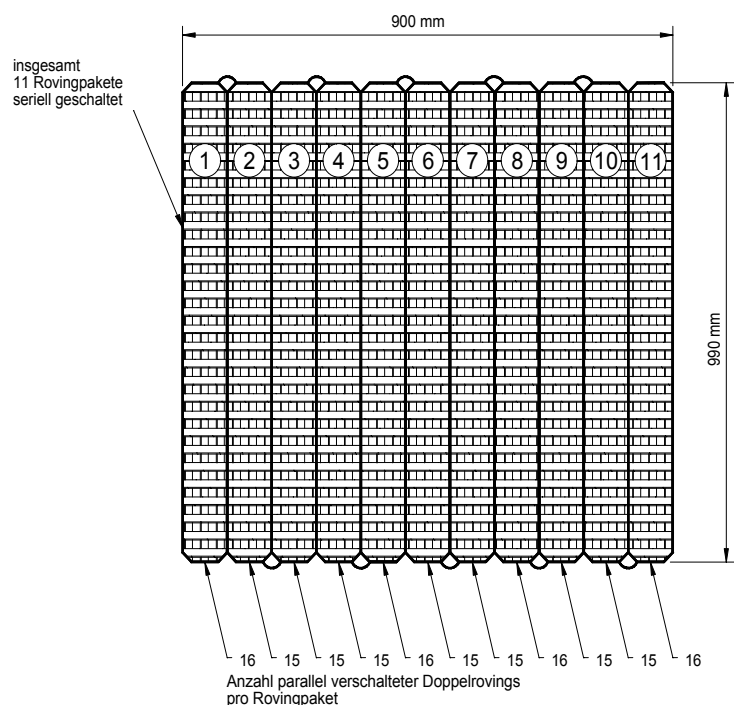


Bild 27: Verschaltung des Heizgewebes - mit 11 Rovingpaketen in Reihenschaltung - für die Formenoberschale

Betriebszustand der Heizung lokalisieren. Die benötigte Heizleistung, um querliegende Kohlefaserfäden zum Glühen zu bringen, ist sehr gering; dennoch sollte aufgrund der Verzugsgefahr die Heizung maximal 5 Sekunden in Betrieb sein. Die zuvor markierten Kurzschlüsse lassen sich mit einer schmalen Feile problemlos beseitigen.

Widerstandsmessungen, durchgeführt vor und nach dem Bearbeiten der Kurzschlüsse, ergaben eine Differenz von nahezu 1Ω . Der geringfügig herabgesetzte Gesamtwiderstand bewirkt einen marginalen Anstieg der Heizleistung, der jedoch keine Gefahr für die Form darstellt. Diese geht vielmehr von den hohen Temperaturen im Bereich der Kurzschlüsse aus.

4.5.5 Isolierung und Versteifung

Im nächsten Fertigungsschritt werden die Temperaturfühler fixiert. Anschließend werden diese sowie die Verkabelungen mit Kupplungsgemisch und mehreren Streifen Glasfasergewebe isoliert. Darauf wird eine Lage 163-g/m^2 -Glasgewebe laminiert. Um einen Kurzschluß über die Kohlefaserlagen auszuschließen, ergänzt ein 2-mm-Abstandsgewebe die Isolierung. Das aufgerichtete Gewebe muß aushärten, bevor die Kohlefaserlagen quasi-isotrop dem Schichtverbund hinzugefügt werden können. Andernfalls würden die senkrecht stehenden Glasfaserstege des Abstandgewebes durch den Rollendruck einknicken und der Isolierungseffekt ginge verloren.

Zur Vorbeugung gegen strukturelle Schäden durch den zu verpressenden Wabenkern gelieren die laminierten Kohlefaserlagen zwei Stunden an. Als Harzlieferant für den Wabenkern dient ein gut getränktes 163-g/m^2 -Glasgewebe. Der Wabenkern reicht bis an den Formenrand und wird analog zu den Versuchsplatten durch ein Vakuum niedergehalten. Dem Verkleben der Deckschicht, bestehend aus zwei Lagen Glasgewebe, ist ein An gleichen der umlaufenden Wabenkernkante mit dem bekanntem Kupplungsschichtgemenge vorzuordnen. Die Deckschichtlagen werden, wie schon bei den Versuchsplatten erfolgreich praktiziert, auf Folie vorlaminiert und im Vakuum mit dem Wabenkern verklebt. Nach 24stündiger Aushärtezeit sind die Arbeiten an der oberen Formenschale vollendet.

4.5.6 Bau der unteren Formenschale

Im Rahmen der Vorbereitungen zum Bau der zweiten Formenschale werden das vordere Trennbrett und der hintere Formenrand entfernt. Flache Keile, zwischen Form und Trennbrett gebracht, erleichtern diesen Arbeitsschritt. Die Kugellagerkugeln lassen sich mit Hilfe eines Körners und durch leichte Hammerschläge entfernen. Das seitliche Trennbrett wird analog zu dem der oberen Formenschale aufgebaut. In den fertigen hinteren Formenrand der Oberschale werden in gleichmäßigem Abstand drei Löcher gebohrt, um die Abstandhalter zu plazieren. Die Höhe der Abstandhalter ist so gewählt, daß beim Abformen ein Absatz an der Unterschale entsteht. Dieser Absatz stellt die Zentrierung der Formenschalen sicher.

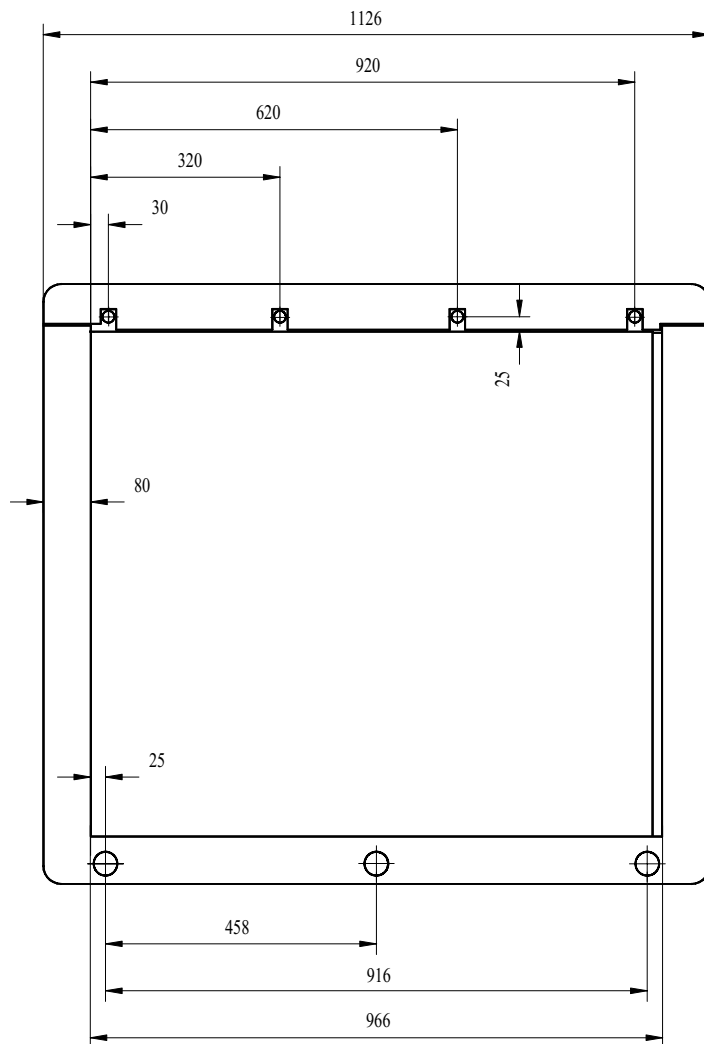


Bild 28:Plazierung der Abstandhalter und Kugellagerkugeln in der Form

Das hintere Trennbrett weist Aussparungen im Bereich der Abstandhalter auf, die - mit Knetmasse angeglichen - beim Abformen oben genannte Absätze auf dem Formenrand entstehen lassen.

Um die Berührungsfläche der Formschalen in der Trennebene auf ein sinnvolles Maß zu reduzieren, wird eine 1,5 mm starke Kunststoffplatte so zugeschnitten, daß beim Abformen eine etwa 3 mm breite „Quetschkante“ entsteht. Der Zuschnitt spart die abgeformten Kugellagermulden der Zentrierung aus und wird mit Hilfe von doppelseitigem Klebeband befestigt.

Die folgenden Arbeitsschritte, beginnend mit dem Trennmittelauftrag, stellen im wesentlichen eine Wiederholung der bereits geschilderten Vorgehensweise zur Herstellung der Formensochale dar und sind daher nicht weiter erläutert.

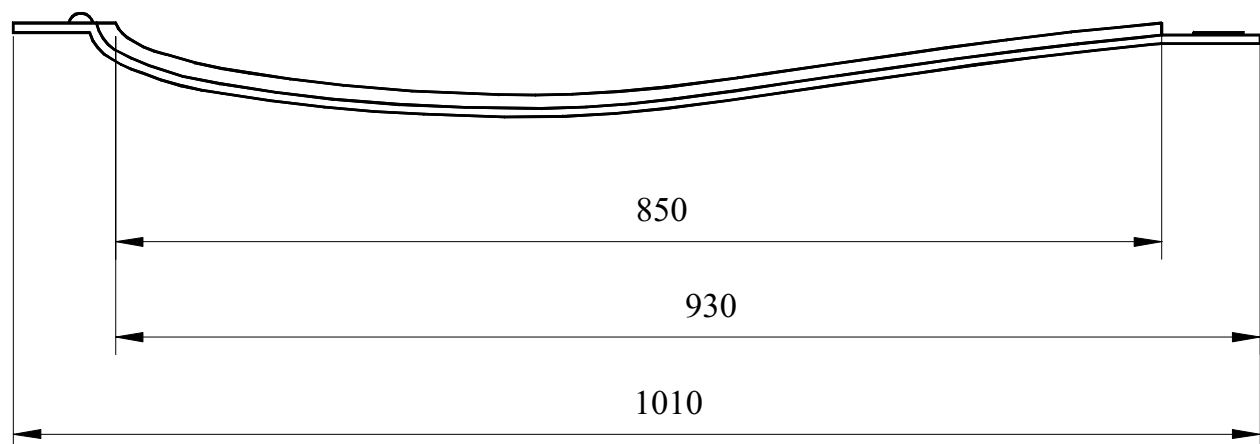


Bild 29:Die fertige Formenunterschale

Zur Verdeutlichung der einzelnen Bauschritte und zur Entspannung des Lesers diene die Fotoreihe 2.

4.5.7 Abriß des Fertigungsablaufes der Formenhalbschalen anhand der Fotoreihe 2

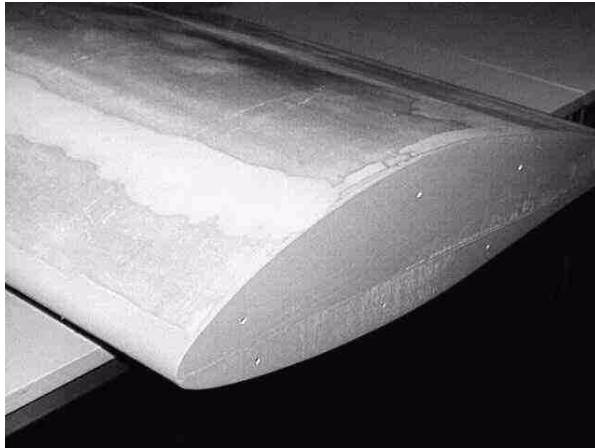


Foto 25: Das gespachtelte Urmodell

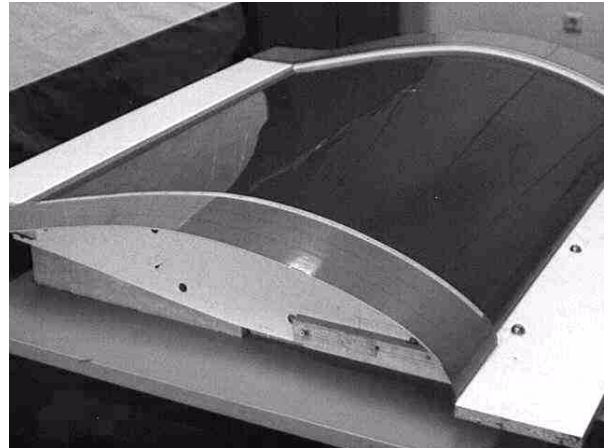


Foto 28: Trennbrettgestaltung

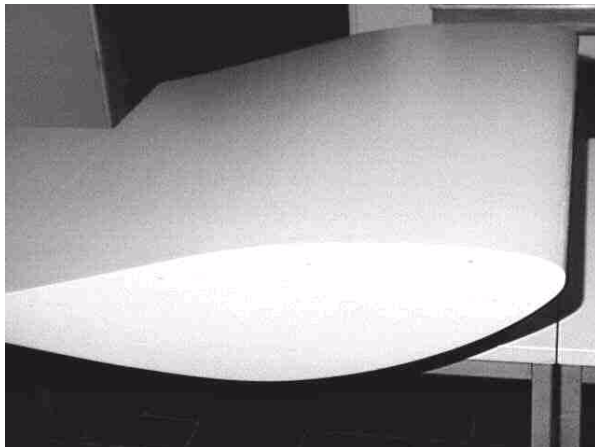


Foto 26: Grundiert und bereit zum Lackieren

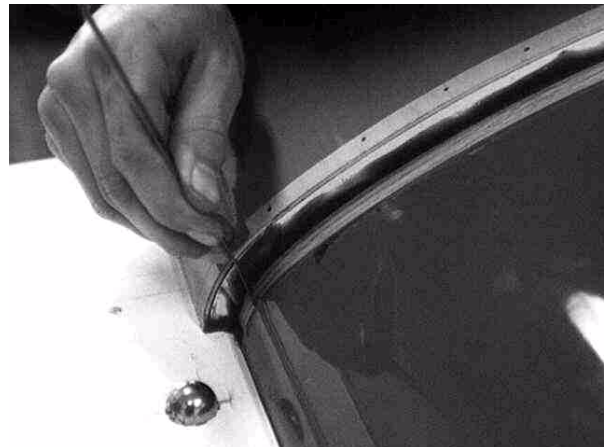


Foto 29: Sämtliche Fugen werden mit Kitt gefüllt

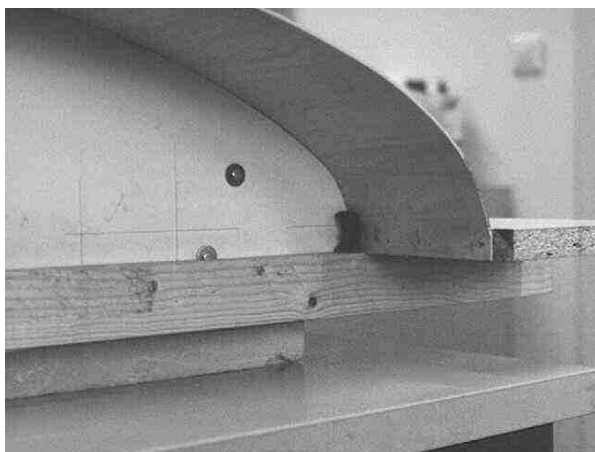


Foto 27: Trennbrettbefestigung für die

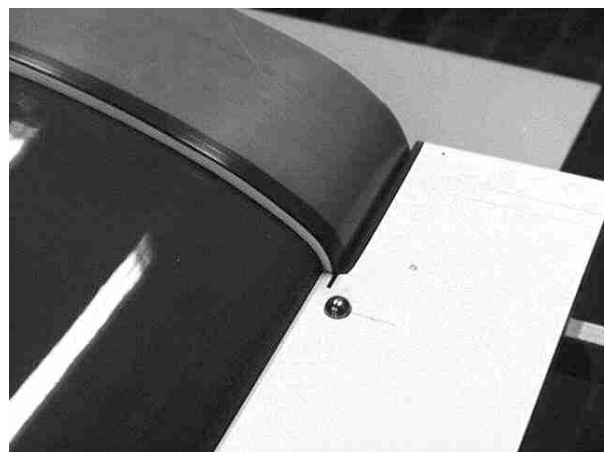


Foto 30: Fertig zum Abformen



Foto 31: Der Formenharzauftrag

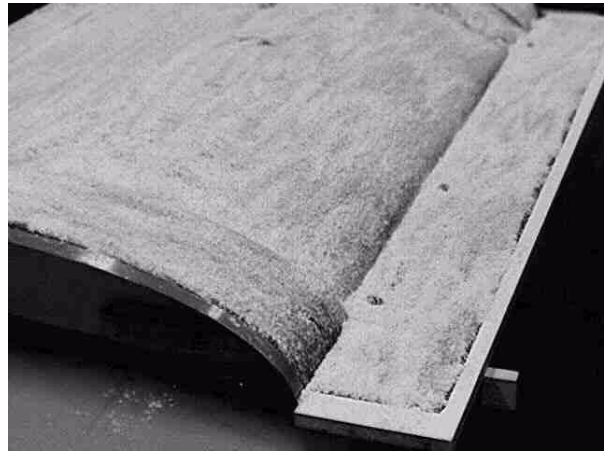


Foto 34: Überschüssiges Gemisch wird abgesaugt

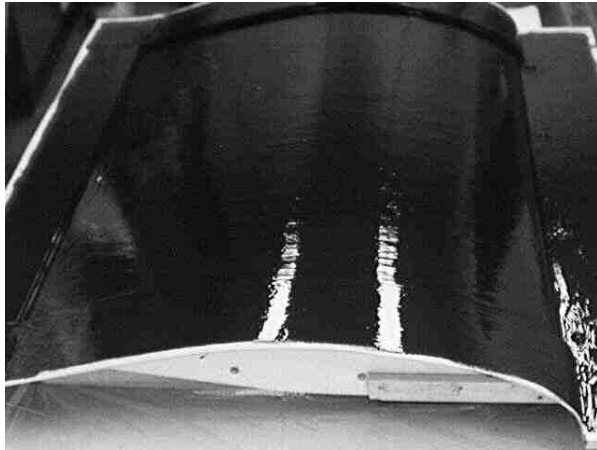


Foto 32: Das Formenharz geliert 2 h an



Foto 35: Die Kopplungsschicht wird aufgetragen



Foto 33: Abstreuen mit Glasmehl, - schnitzeln und Baumwollflocken

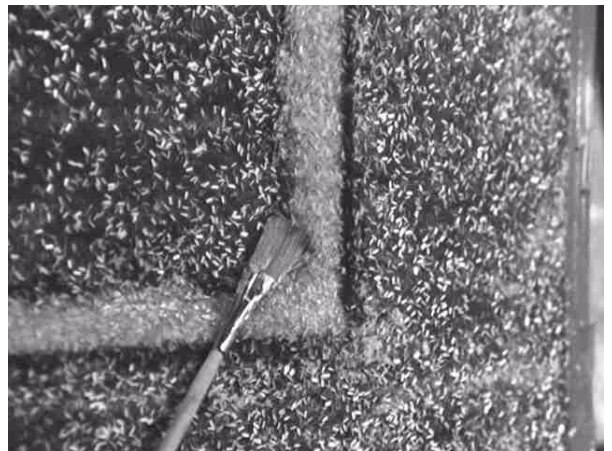


Foto 36: Große Mengen Kopplungsschicht für Kantenübergänge

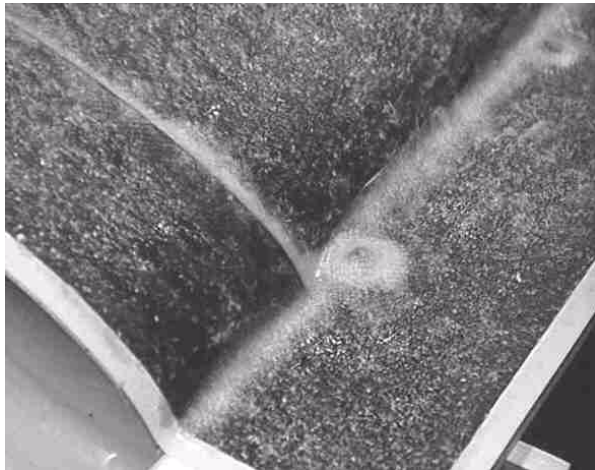


Foto 37: Die abgerundeten Kanten vor dem Laminieren der Isolierung

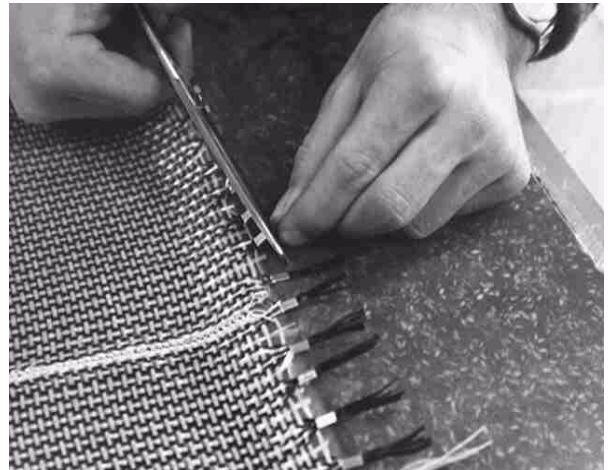


Foto 40: Überstehende Kohlefaserrovings werden nach dem Anbringen der Quetschhülsen entfernt



Foto 38: Das Abreißgewebe wird 24 h später entfernt

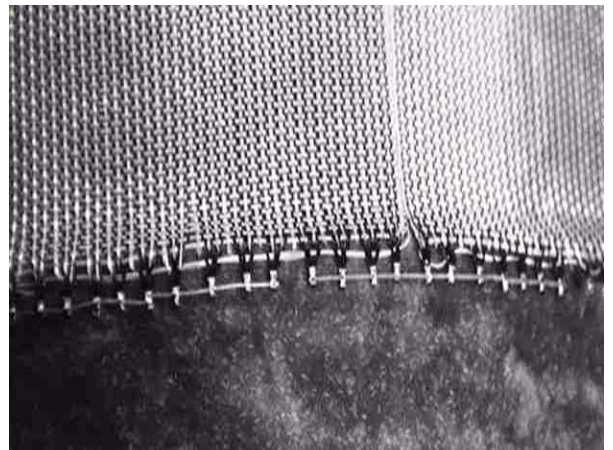


Foto 41: Die Verschaltung



Foto 39: Das aufgelegte Heizgewebe

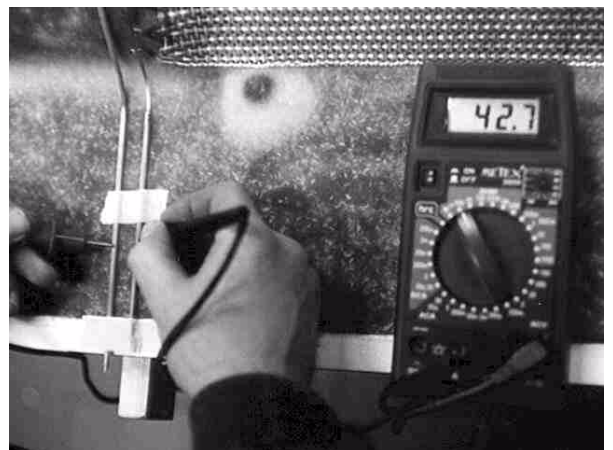


Foto 42: Der Gesamtwiderstand vor dem „Abfackeln“

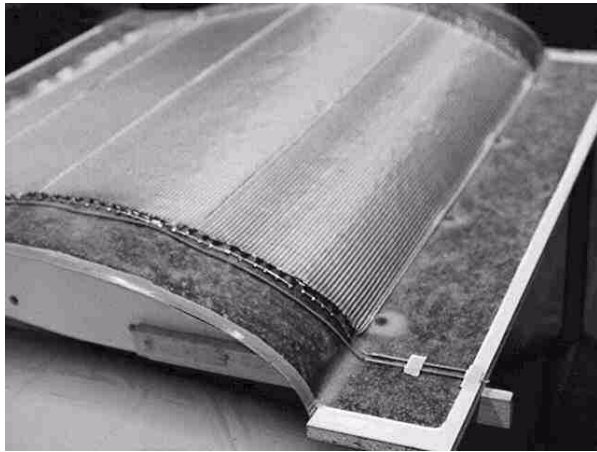


Foto 43: Die Verschaltung mit Stromführung

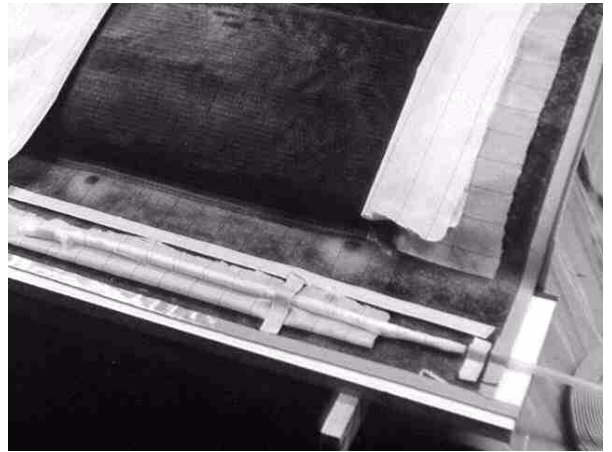


Foto 46: Vorbereitungen zum Vakuumziehen



Foto 44: Das laminierte Heizgewebe

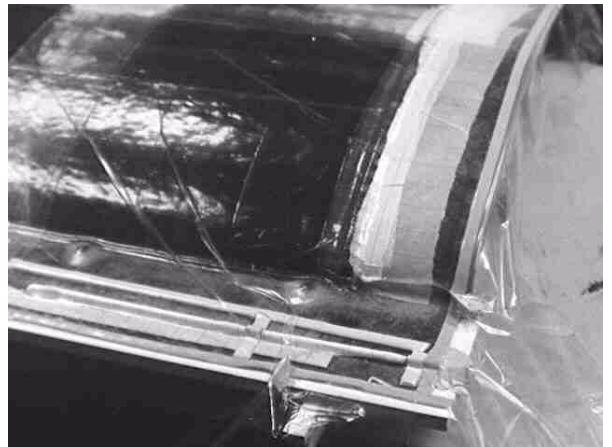


Foto 47: Die Verschaltung wird unter Vakuum verklebt

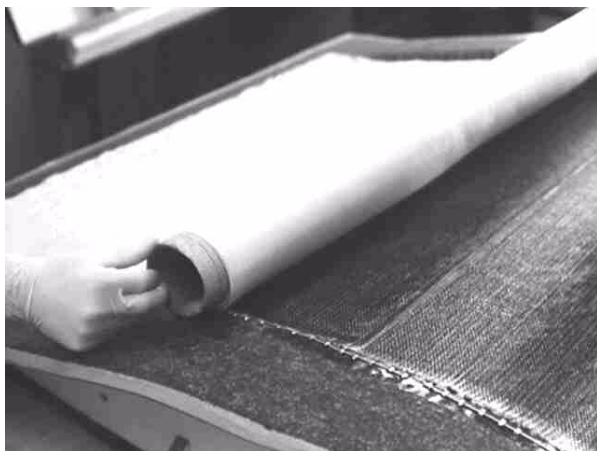


Foto 45: 163-g/m²-Glasgewebe als erste Isolierung

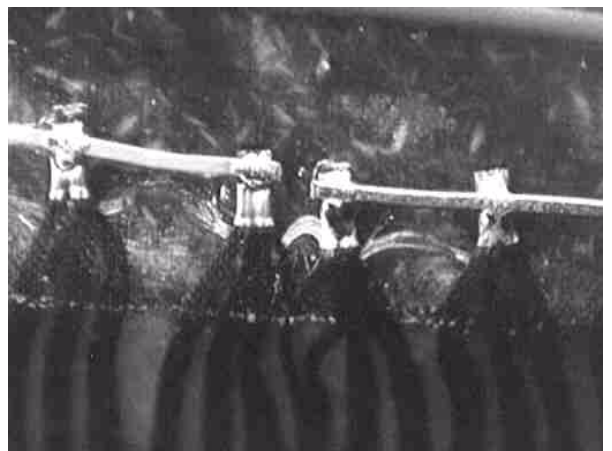


Foto 48: Kurzschluß zwischen zwei Parallelschaltungen und ...

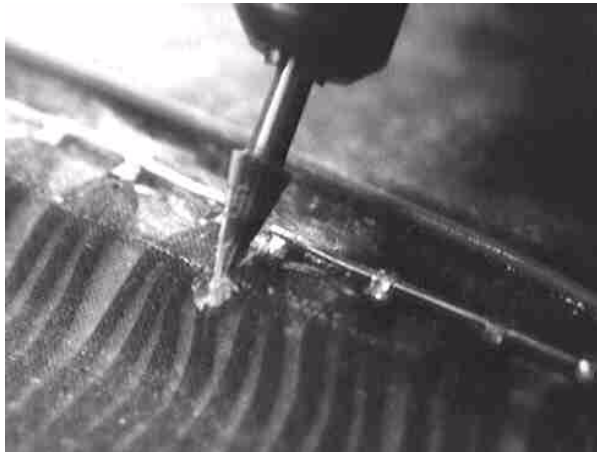


Foto 49: ... seine Beseitigung mit kleinem Fräskopf



Foto 52: Kopplungsschicht zur Isolierung der Verschaltung

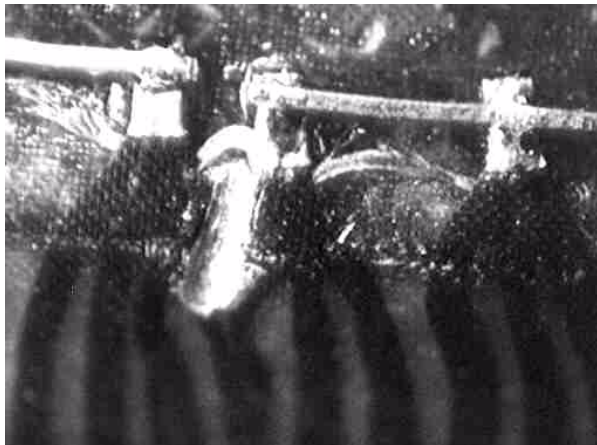


Foto 50: Der Kurzschluß ist beseitigt



Foto 53: Die Isolierung der Stromführung

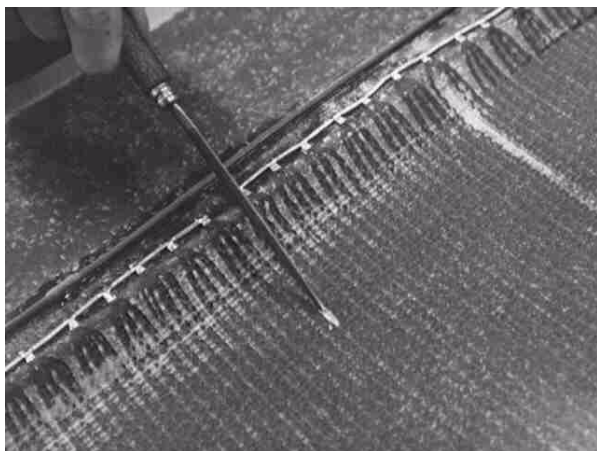


Foto 51: Eine querliegende Kohlefaser wird entfernt

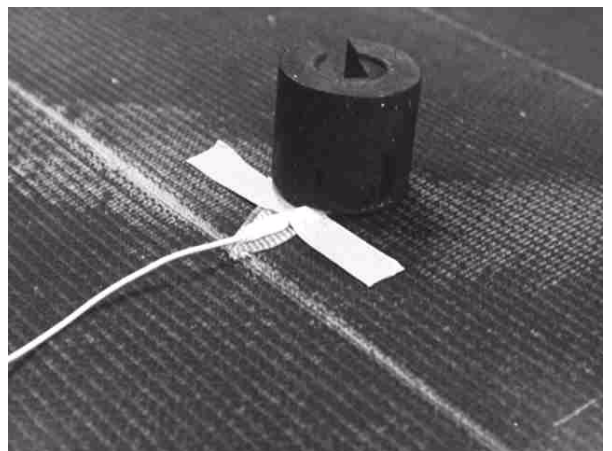


Foto 54: Der Temperaturfühler wird fixiert



Foto 55: Die Temperaturfühler werden mit Kopplungsschicht angeglichen, ...



Foto 58: ... richtete sich beim Laminieren auf

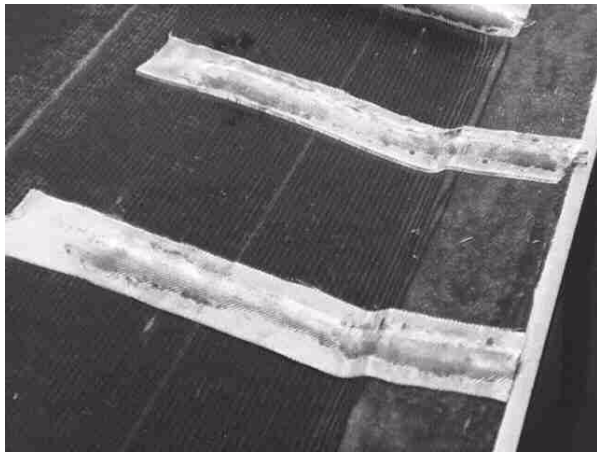


Foto 56: ... bevor Glasfaserstreifen die Isolierung vervollständigen



Foto 59: Nach 24 h wird das Kohlefasergerewebe laminiert - Faserrichtung 0°/90°

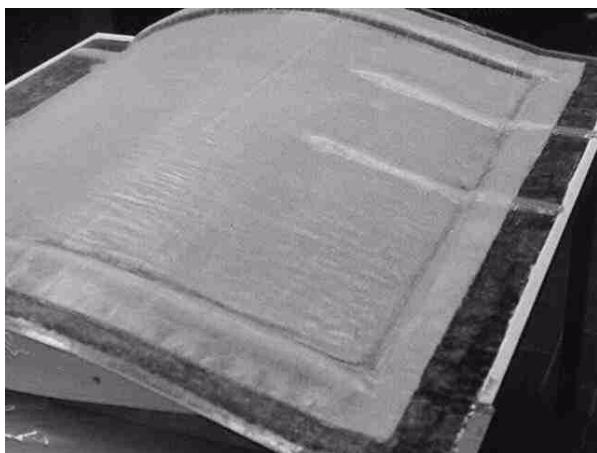


Foto 57: Das Abstandgewebe ...

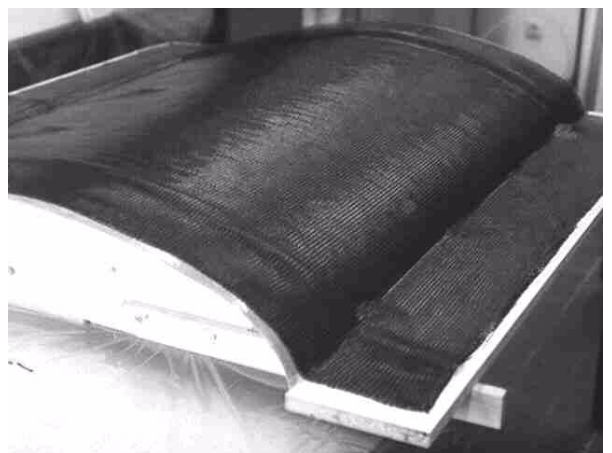


Foto 60: Eine zweite Schicht wird unter +/- 45° aufgebracht

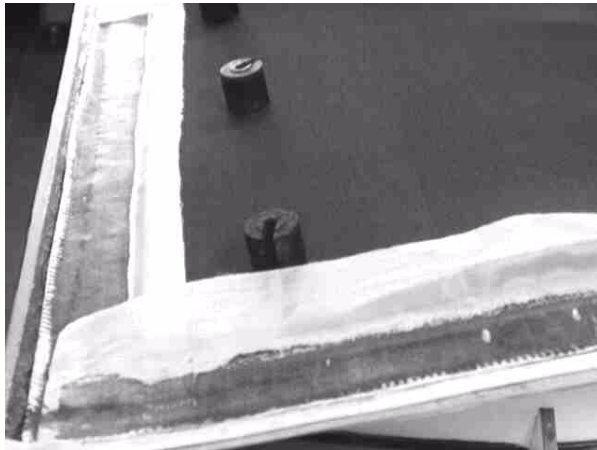


Foto 61: Vorbereitungen zum Verpressen des Wabenkerns

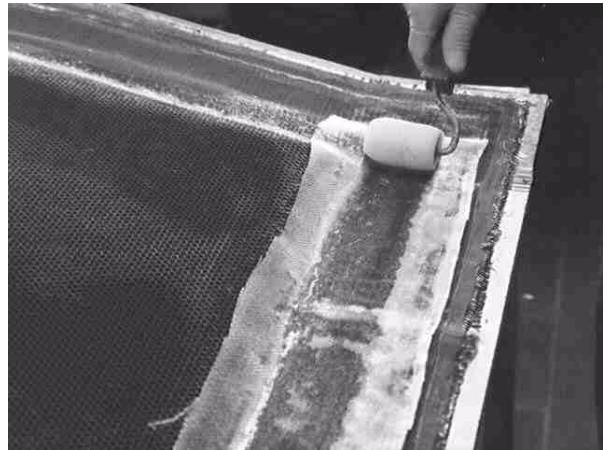


Foto 64: Der Formenrand wird vorlaminieren



Foto 62: Der Wabenkern wird unter Vakuum verklebt



Foto 65: Die Glasfasergewebe für die äußeren Decklagen werden auf Folie vorlaminieren, ...

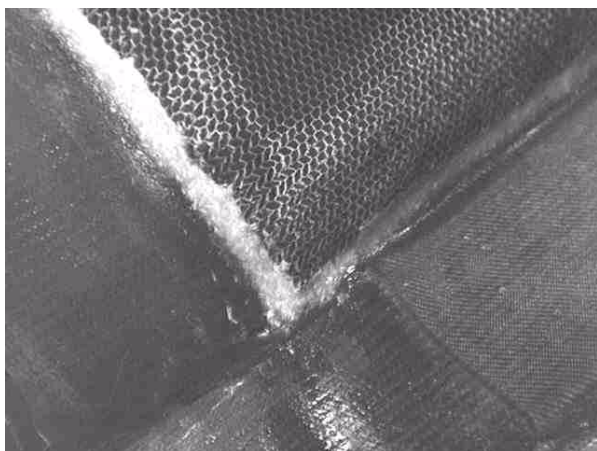


Foto 63: Der Übergang zum Formenrand wird mit Kopplungsgemisch aufgefüllt

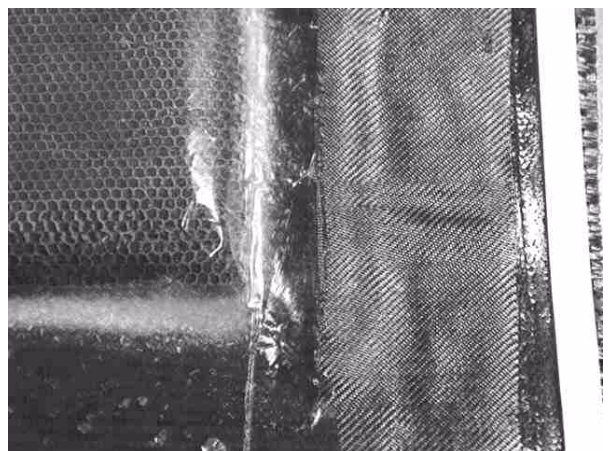


Foto 66: ... bevor sie ebenfalls unter Vakuum verklebt werden



Foto 67: Die fertige obere Formenschale



Foto 70: Die Kugellagerkugeln werden mit Hammer ...



Foto 68: Das Trennbrett wird abgenommen



Foto 71: ... und Körner entfernt

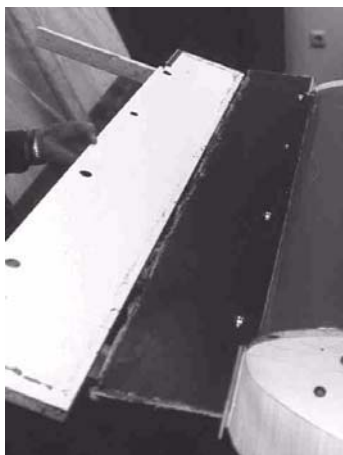


Foto 69: Der vordere Formenrand



Foto 72: Vor dem Anbau der seitliche Trennbretter

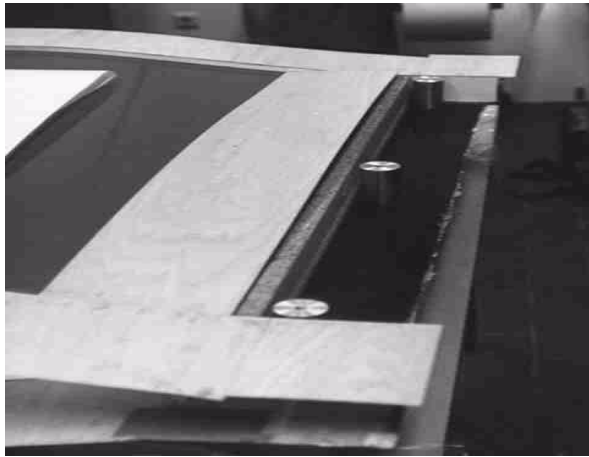


Foto 73: Die Abstandhalter müssen im hinteren Formenrand ausgespart werden

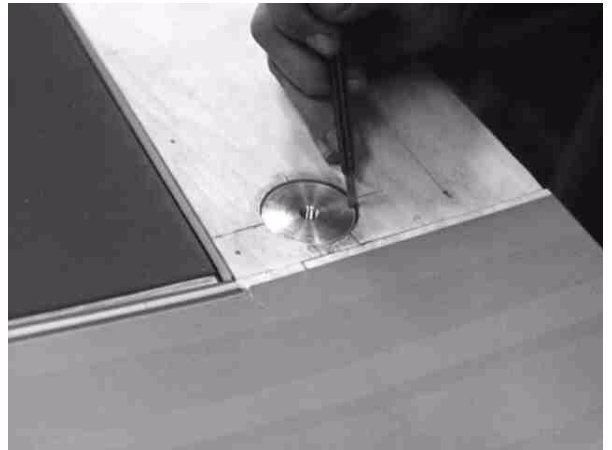


Foto 75: Die Fugen werden mit Kitt abgedichtet



Foto 74: Die „Quetschkante“ an der vorderen Trennfläche



Foto 76: Die fertige Form

4.6 Meß- und Testversuchsprogramm

4.6.1 Die Meßwerte

Nach dem Entformen werden die Schalenoberflächen zunächst vom Trennmittel gesäubert. Bei kleinen Fehlstellen in der Oberfläche besteht die Möglichkeit, diese mit Polierpaste zu bearbeiten. Das Gewicht der Formenunterschale beträgt gesäumt 7550 g, das der Oberschale 7800 g inklusive der Abstandhalter.

Der letzte, über die Güte der Form entscheidende Arbeitsschritt ist die Temperung. Im Eigentemperverfahren wird die Form zunächst auf 50 °C vortempert. Die behutsame Erwärmung der Formenhälften erfolgt in halbstündigen Zyklen: ausgehend von einer Umgebungstemperatur von 20 °C bedarf es dreier Stunden, um die Tempertemperatur in 5 °C Schritten zu erreichen. Zur Komplettierung des Vorgangs wird die Temperatur fünf Stunden gehalten. Im zweiten Tempergang wird eine Wärmebeständigkeit von 110° C angestrebt. Die Temperaturführung wird so gewählt, daß die Form alle 15 Minuten eine Temperaturerhöhung von 10 °C erfährt, bis die Endtemperatur von 90 °C erreicht ist. Weitere 5 Stunden bei Endtemperaturniveau vervollständigen den Eigentemperungsvorgang.

Die anschließend durchgeführte Verzugsmessung macht deutlich, daß die Eigentemperung kein probates Mittel zum Erlangen der Wärmefestigkeit der Formschalen darstellt. Offensichtlich ist die Wärmeisolierung des ca. 27 mm hohen Wabenkerns so effektiv, daß die äußere Deckschicht der Form nicht mit Hilfe der formintegrierten Heizung getempert werden kann. Dieses mündet in die Notwendigkeit, den Formschalen im Temperofen die nötige Wärmebeständigkeit zu verleihen.

Um eventuelle Verzugsunterschiede vor und nach der externen Wärmebehandlung zu dokumentieren, werden zunächst Messungen bei 17 °C, 40 °C und 60 °C an den Formenhälften vorgenommen.

Die Meßpunkte definieren sich alle 100 mm entlang der in Bild 30 dargestellten Meßstrecken.

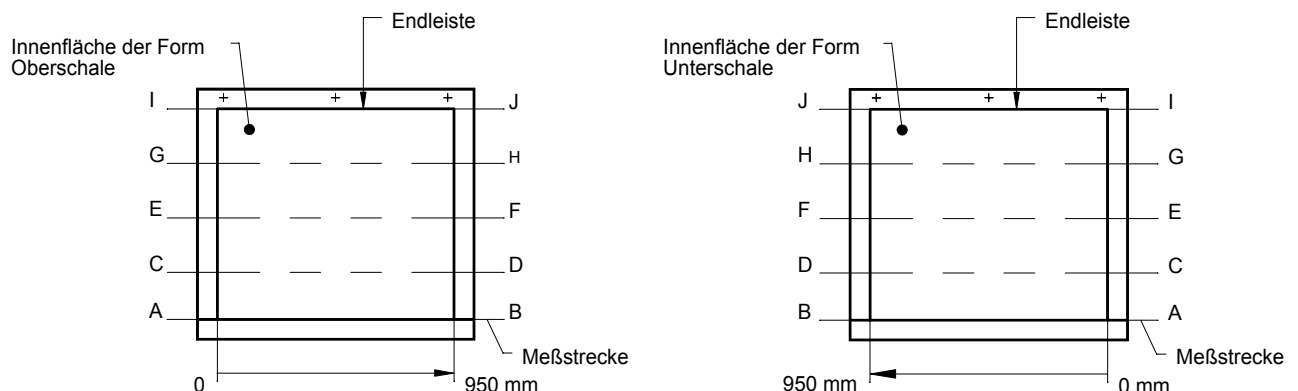


Bild 30: Verlauf der Meßstrecken an der Oberschale und Unterschale der Form

Aus dieser Anordnung ergeben sich 55 Meßpunkte je Formenhälfte.

Verglichen mit der Referenzmessung am Urmodell, stellt sich der Verzug an der Formenoberschale tendenziell als das erwartete negative Abbild dar.

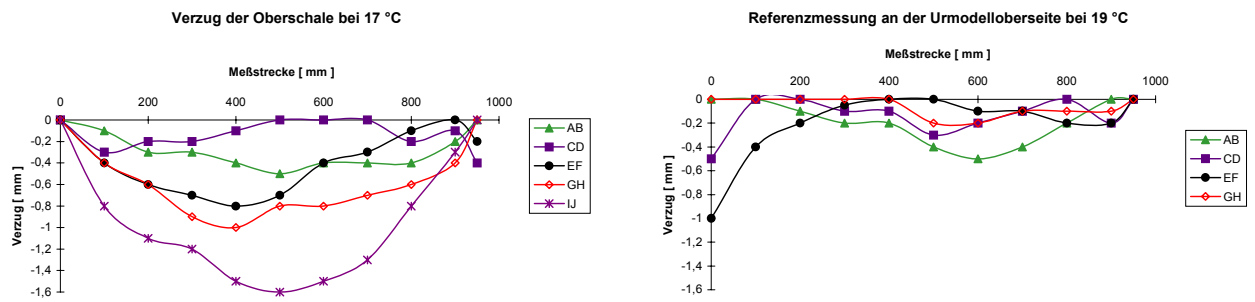


Bild 31: Verzug der Schale und des Urmodells

Das Aufheizen der Form verringert den Verzug.

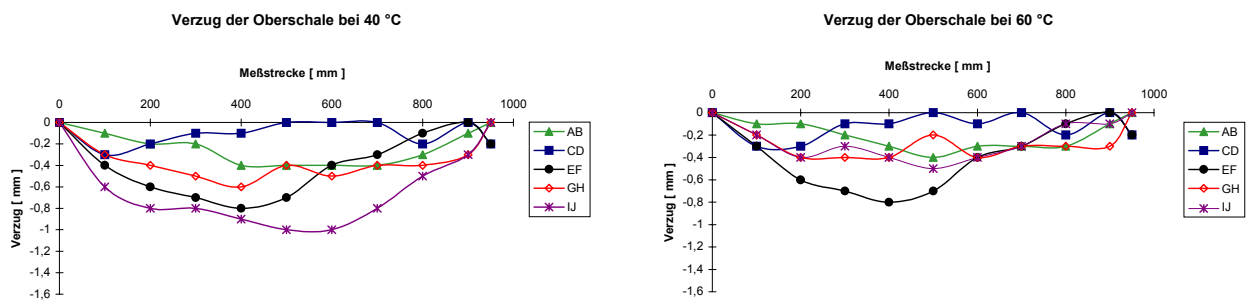


Bild 32: Verzugsreduktion durch Wärme an der Oberschale

Durch die Fremdtemperatur in der zuvor gebauten Styropor temperkammer „entspannt“ sich der Formenverzug.

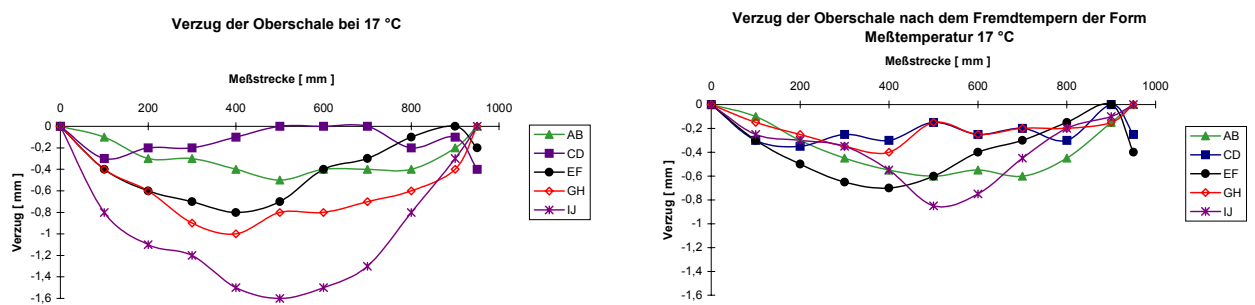


Bild 33: Verzugsreduktion durch externe Temperung

Die Vorgänge im Schichtverbund bei Wärmeeinwirkung sind, wie bereits angesprochen, sehr komplex. Selbst bei klaren Aussagen über das Verhalten der einzelnen Schichten, die bereits einen erheblichen Rechenaufwand voraussetzen, sind die Ergebnisse nicht ohne weiteres auf den Schichtverbund übertragbar. Dem Handlaminierverfahren mangelt es zudem an Reproduzierbarkeit, um exakte Berechnungen bezüglich des Quellverhaltens und partieller Schrumpfungen im Faserverbund anzustellen.

Aufgrund dieser Problematik läßt sich nur schwer vorhersagen, wie der Gesamtverbund auf Wärmeeinwirkung reagiert. Als Beispiel diene der Verzug der Unterschale: bei Umgebungstemperatur fällt der Verzug, verglichen mit dem der Oberschale, geringer aus. Die Verzugsreduktion beim Aufheizen auf 40 °C haben die beiden Schalen noch gemein, bei 60 °C hingegen tritt gegenläufig zur Oberschale eine Verzugszunahme an der Unterschale auf. Bemerkenswert ist außerdem, daß keinerlei Verzugsabbau der Unterschale durch die externe Temperatur nachweisbar ist.

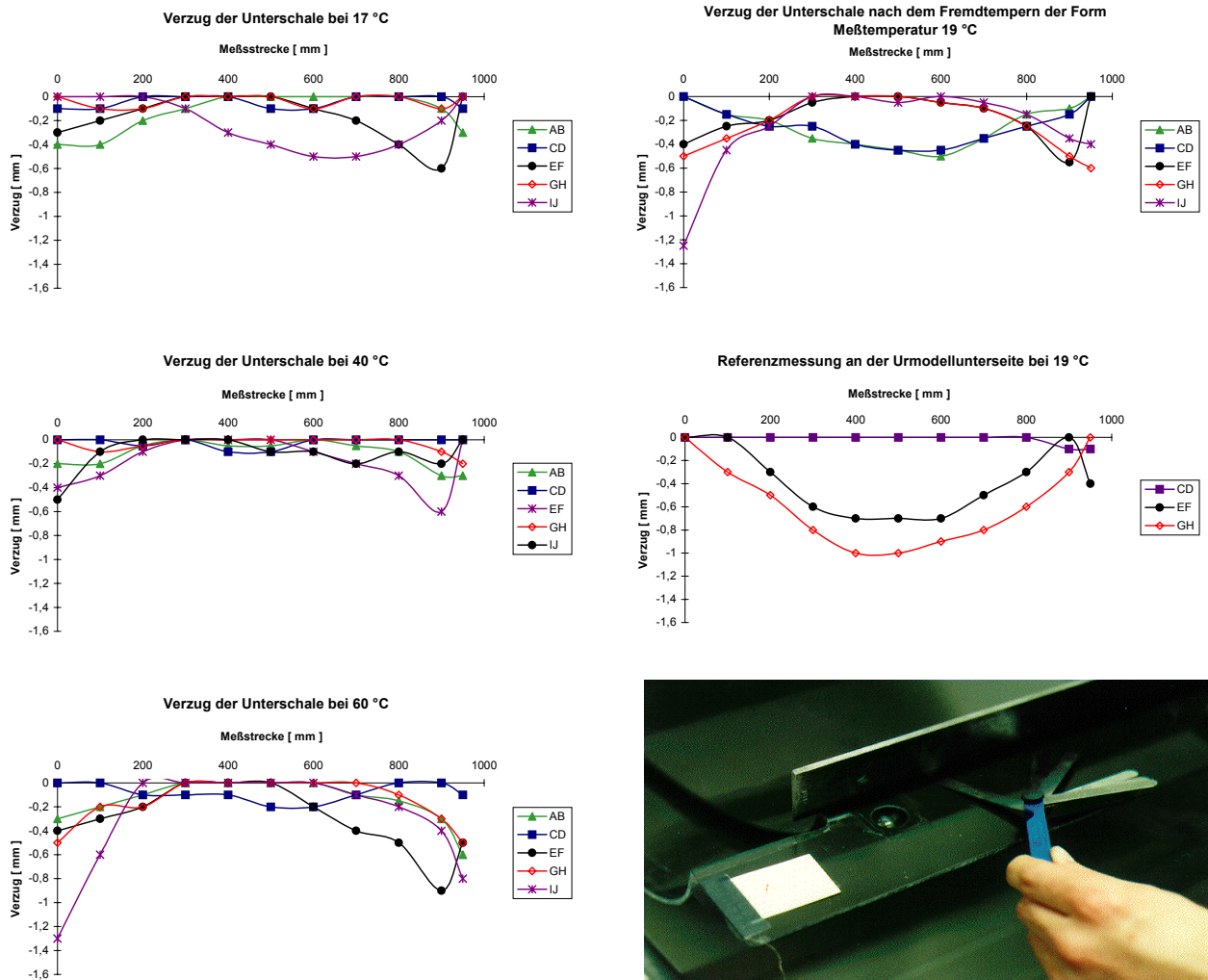


Bild 34: Verzugsmessungen an der Unterschale (Meßwertprotokolle siehe Anhang S. 64)



Foto 76: Messung des Verzugs am Formenrand

Ein völlig anderer, doch ebenso wichtiger Aspekt beim Betrieb der Formenheizung ist der Energiebedarf. Um Aufschluß über die Wirtschaftlichkeit

und die erreichbare Temperatur bei verschiedenen Stromleistungen zu erhalten, werden Leistungsmessungen an der Formenunterschale vorgenommen. Mit 200 W Leistung ist beispielsweise eine Temperatur von 39,2 °C an der Schalenoberfläche erreichbar. Beim Laminieren von Bauteilen erleichterte diese Temperatur die Harzverarbeitung und verringerte die Gelierzeit rapide.

Um den Forderungen der deutschen Luftfahrtvorschriften gerecht zu werden, ist die Wärmebeständigkeit bis 85 °C Voraussetzung. Bei einem Temperaturvorlauf von 30 °C heißt das, daß die Bauteile mit einer Temperatur von 55 °C getempert werden müssen, wobei auf diesem Temperaturniveau eine Heizleistung von ca. 450 W für die Form notwendig ist.

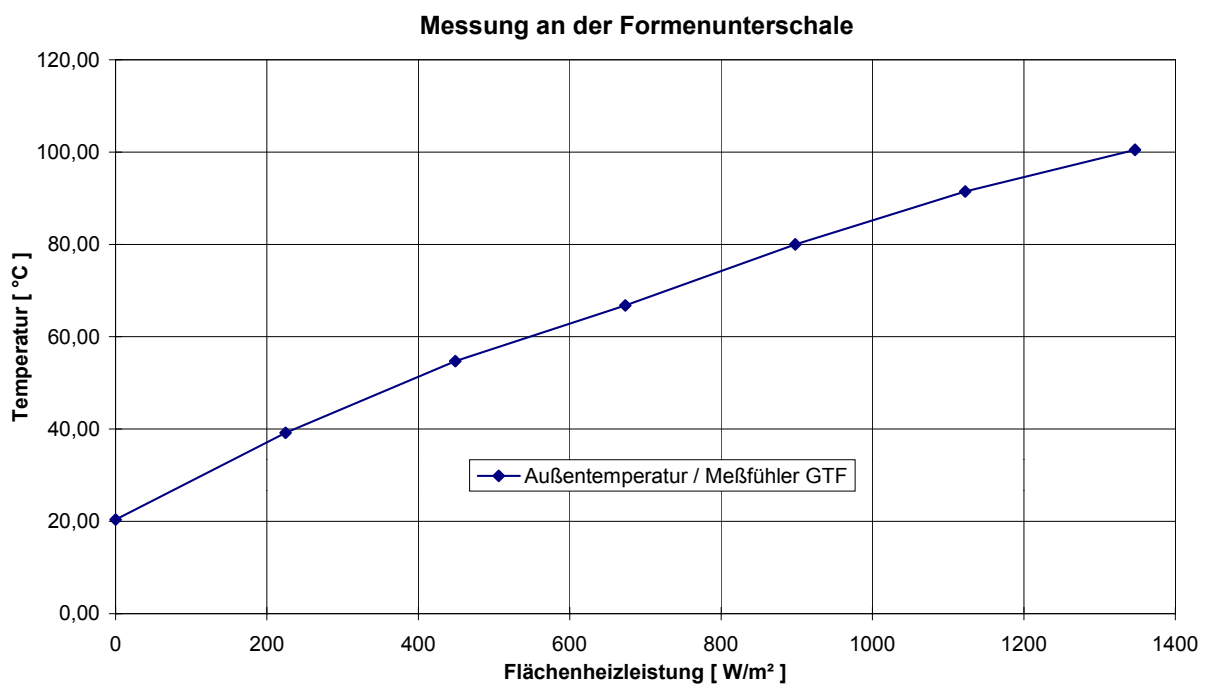


Bild 35: Zusammenhang zwischen Flächenheizleistung und Temperatur an der Formenunterschale

Bild 35 zeigt, wie Temperatur und Flächenheizleistung korrelieren.

Aus dem Meßwertprotokoll auf S. 65 des Anhangs wird außerdem die Temperaturdifferenz zwischen Formeninnenschale und Heizgewebe ersichtlich.



Abschließend sei bemerkt, daß die Messungen an der offenen Form vollzogen wurden. Bei der Bauteiltemperatur in der geschlossenen Form ist, aufgrund des Wärmestaus, eine geringere Energieaufnahme zu erwarten.

*Foto 77: Temperaturmessung an der Formenscha-
le*

Bild 36 stellt die Aufheizrate der Formenunterschale bei 450 W dar. Die anfänglich höhere Temperatur an der Formenoberfläche ist auf die trägeren Temperaturfühler in der Form zurückzuführen.

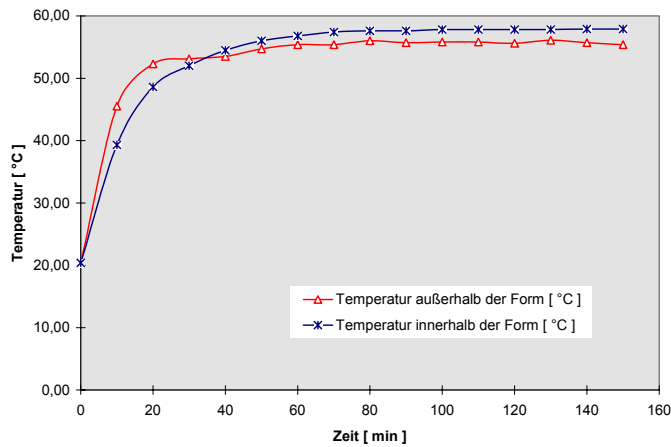


Bild 36: Aufheizrate der Formenunterschale bei 450 W

Messungen selektierter Heißeiter nebst Ausgleichskennlinien

Unter den Leiter-Widerstands-Thermometern ist in dem Temperaturbereich von -200 °C bis 600 °C das Pt-Widerstands-Thermometer besonders geeignet. Seine Vorzüge liegen in dem nahezu linearen Verlauf der Widerstandskennlinie in diesem Meßbereich und in der Präzision der Meßergebnisse.

Die jeweiligen Meßgeräte und die äußeren Bedingungen aller durchgeführten Messungen sind in den Meßwertprotokollen festgehalten und gewährleisten somit die Reproduzierbarkeit.

4.6.2 Die Heizung im Testbetrieb

Über allem steht das Faktum: „Es funktioniert!“

Entscheidend beim Bau der Realform ist im Unterschied zu den Versuchsplatten, die Beseitigung der Kurzschlüsse nach dem Laminieren des Heizgewebes. Diese Kurzschlüsse sind für die lokale Verflüssigung des Harzes an den Versuchsplatten verantwortlich. Unter der Voraussetzung, daß alle Kurzschlüsse beseitigt sind, besteht auch die Möglichkeit, auf das 2-mm-Abstandsgewebe zu verzichten. Zwei Lagen 163-g/m²-Glasgewebe reichen dann für die Isolierung zum CFK-Gewebe aus. Dies bewirkt eine beträchtliche Harzmengenreduzierung und läßt treffendere Vorhersagen hinsichtlich der möglichen Wärmereaktion der Form zu.

Der Betrieb der Heizung bis 100° C ist problemlos möglich. Über diesen Wert hinaus ist das Harzsystem wegen der bereits angesprochenen Streuung beim Kohlefaserquerschnitt des Heizgewebes partiell überfordert.

Andere Harzsysteme mit Temperaturbeständigkeiten bis 180° C, bei annähernd gleichen Verarbeitungsqualitäten und Toxizitätsgraden, ermöglichen mittlerweile die Steigerung der Tempertemperatur.

5 Zusammenfassung

Das Ziel dieser Arbeit, die Herstellung einer leichten, formsteifen und beheizbaren Form, konnte durch den Einsatz von Faserverbundwerkstoffen, der Sandwichbauweise sowie der Verwendung eines elektrisch betriebenen Heizgewebes erreicht werden.

Die Möglichkeit, durch die Kombination von Faserverbundwerkstoffen mit Wabenkernen Bauteile von ausgezeichneter Steifigkeit bei gleichzeitig geringem Gewicht herzustellen, ist unumstritten und in zahlreichen Publikationen belegt. Das Hauptaugenmerk galt daher der Gestaltung der formintegrierten Heizung und deren Auswirkungen auf den Schichtverbund. Wichtige Erkenntnisse im Umgang mit dem Heizgewebe führten zu mannigfachen Verbesserungen hinsichtlich des Lagenaufbaus, der Stromeinleitung und der Isolierung.

Bezüglich der Funktionsgewährleistung der beheizbaren Form ergaben sich zwei entscheidende Faktoren.

Zum einen sollte die Streuung der Rovingquerschnitte im Heizgewebe möglichst gering, und somit eine gleichmäßige Erwärmung der Formoberfläche gewährleistet sein. Zum anderen müssen bei der Erwärmung die unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten der verschiedenen Komponenten des Schichtverbundes Berücksichtigung finden.

Der Lagenaufbau der Form und die Wärmebehandlung entscheiden über den Verzug und somit über die Güte des Formenwerkzeugs.

Darüber hinaus wurden Untersuchungen bezüglich der Gestaltung des Formenrandes angestellt. Dessen Nebenfunktionen wird in vielen Fällen nur geringe Bedeutung beigemessen. Diese Anforderungen, wie die Zentrierung der Formschalen, die Möglichkeit, ein Vakuum über den Formenrand abzudichten und die gleichmäßige Druckaufbringung beim Zusammenfügen der Bauteile verlangen dagegen mehr Berücksichtigung bei der Konstruktion. Im Verlauf der Arbeit wurden vereinfachende Lösungen im Bereich der Vakuumtechnik und der Zentrierung von Formschalen erarbeitet.

Die vorliegende Dokumentation liefert eine ausführliche, anschauliche und reflektierte Darstellung der Entwicklung, Konstruktion und Herstellung einer beheizbaren Form zum Bau von Tragflügelsegmenten.

6 Ausblick

Dem Streben nach Gewichtsreduzierung wird in nahezu allen Bereichen der Industrie zentrale Bedeutung zugeschrieben. Der geringere Energiebedarf zu bewegender Bauteile und die verringerten Auflagerreaktionen dynamischer Kräfte sind Vorteile, die für den Leichtbau sprechen.

Dem vermehrten Einsatz von Kunststofffaserverbundbauteilen steht einzig der zeitintensive Herstellungsprozeß entgegen. Dies gilt vor allem für das Handlaminierverfahren. Neben der Entwicklung neuer Matrixwerkstoffe ist die Formenbeheizung ein probates Mittel, die Fertigungszeiten zu verkürzen.

Der Einsatz von Kohlefaserrovings als Widerstandsheizelemente verlangt nach weiteren Versuchsprogrammen. Eingehende Untersuchungen hinsichtlich des eingebetteten stromdurchflossenen Faserverbundes, der Wärmeentwicklung am Roving und im Matrixwerkstoff sind Beispiele für weitere Aufgabenstellungen. Darüber hinaus stellen sich Fragen auf den Gebieten der Temperaturmessung am laminierten Roving und des Energiebedarfs beheizbarer Formen.

Festzuhalten ist, daß die beschleunigte Herstellung von Faserverbundbauteilen durch formintegrierte Heizungen neue Impulse im Bereich von Konstruktion und Entwicklung setzen kann.

7 Anhang

7.1 Meßwertprotokolle, Tabellen, Einzelteilzeichnungen

Meßwertprotokoll / Auswertungstabelle										
Widerstandsmessung der Doppelrovings des Heizgewebes der Form										
Länge L = 1 m										
Roving - Nr.	Widerstand [Ω] / Charge 1	Minimalwert [Ω]	Maximalwert [Ω]	Mittelwert [Ω] / Charge 1	Standardabweichung [Ω]	Widerstand [Ω] / Charge 2	Minimalwert [Ω]	Maximalwert [Ω]	Mittelwert [Ω] / Charge 2	Standardabweichung [Ω]
1	87	52	110	78,5	12,9	55	51	108	80,1	13,4
2	84					56				
3	77					80				
4	85					82				
5	76					86				
6	80					81				
7	81					65				
8	81					87				
9	84					53				
10	85					87				
11	85					54				
12	85					82				
13	85					56				
14	81					81				
15	81					51				
16	86					97				
17	70					56				
18	81					94				
19	83					72				
20	83					95				
21	80					76				
22	83					82				
23	72					90				
24	110					85				
25	70					87				
26	97					81				
27	60					74				
28	105					86				
29	55					87				
30	79					90				
31	56					84				
32	88					79				
33	52					86				
34	81					89				
35	53					94				
36	85					108				
37	60					81				
38	82					90				
39	83					86				
40	86					87				
41	83					85				
42	57					84				
43	57					85				

Meßgerät: Digitales Multimeter

Meßwertprotokoll

Uni - GH Paderborn
Konstruktionslabor, 30.06.95

Verzug Plattenmodell 1 nach dem Fremdtempern

Verzug der inneren Deckschicht vermessen;
Messung entlang der Meßstrecke C - A

Messung entlang der Meßstrecke B - D

T = 25 °C	
Meßpunkte bei mm	Verzug [mm]
	<u>CA</u>
0	0,0
5	-1,4
10	-2,6
15	-3,5
20	-5,0
25	-5,8
30	-6,8
35	-6,6
40	-6,8
45	-7,1
50	-7,4
55	-7,1
60	-6,8
65	-6,5
70	-5,9
75	-4,9
80	-3,1
85	-1,8
90	0,0

T = 25 °C	
Meßpunkte bei mm	Verzug [mm]
	<u>BD</u>
0	0,0
5	-1,9
10	-3,0
15	-4,2
20	-5,2
25	-6,1
30	-6,7
35	-7,0
40	-6,9
45	-7,1
50	-6,9
55	-7,0
60	-6,6
65	-6,3
70	-5,6
75	-4,8
80	-3,0
85	-1,9
90	0,0

Messung der Durchbiegung unter Last F = 196 N (Gewicht von 20 kg);
Platte an den vier Eckpunkten gestützt;
Lage der Meßpunkte siehe Skizze

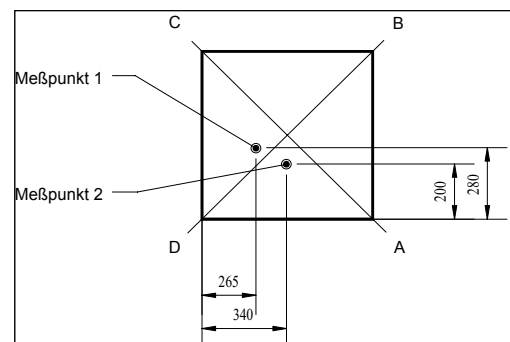
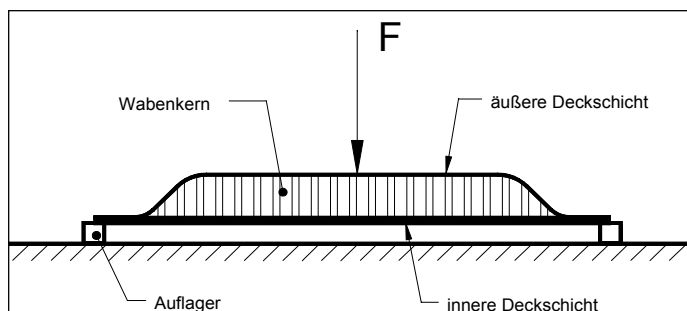
Gewicht auf die äußere Deckschicht gestellt

Gewicht auf die innere Deckschicht gestellt

Meßpunkte	Durchbiegung [mm]
1	1,8
2	2,0

Meßpunkte	Durchbiegung [mm]
1	2,4
2	2,7

Meßgeräte: Meßschieber, Haarlineal
Skizzen:



Walzen-Nr.	Harzrestmenge in der Waize	Mittelwert	Maximaler Wert	Minimaler Wert
0		34,421	56	8
1	14			
2	52			
3	38			
4	12			
5	8			
6	38			
7	30			
8	34			
9	27			
10	24			
11	28			
12	18			
13	42			
14	50			
15	56			
16	56			
17	25			
18	50			
19	18			
20	36			
21	40			
22	32			
23	30			
24	34			
25	38			
26	20			
27	48			
28	50			
29	42			
30	48			
31	38			
32	38			
33	34			
34	36			
35	35			
36	23			
37	32			
38	34			

Meßwertprotokoll																	
Harzrestmengen am Plattenmodell 1																	
Ifd. Nr.	Trockengewicht [g]					Naßgewicht [g]					Harzrestmengen [g]						
	Rührbecher	Moltroprenwalzen	Waize + Griff (ROT)	Waize + Griff (BLAU)	Harzwannen	Rührbecher	Moltroprenwalzen	Waize + Griff (ROT)	Waize + Griff (BLAU)	Harzwannen	Rührbecher	Moltroprenwalzen	Waize + Griff (ROT)	Waize + Griff (BLAU)	Harzwannen		
1	11	8	16	58	41	32	19	43	96	98	22	14	27	38	57	158	200,0
2	11	8	16	58	42	28	60	40	96	45	17	52	24	38	3	134	200,0
3	11	8		58	42	31	20		86	68	20	12		28	26	86	250,0
4	11	8		58	42	15	16		76	55	4	8		18	13	43	105,0
5	11	8			41	18	38			50	7	30			9	46	125,0
6	11	8			42	17	42			54	6	34			12	52	125,0
7	11	8			42	17	50			43	6	42			1	49	125,0
8	11	8				16	58				5	50				55	250,0
9	11	8				15	64				4	56				60	72,5
10	11	8				33	64				22	56				78	187,5
11	11	8				14	33				3	25				28	250,0
12	11					14					3					3	187,5
13	11					78					67					67	125,0
14	12					20					8					8	62,5
15	12					17					5					5	100,0
16	11					19					8					8	250,0
17	11					14					3					3	187,5
18	11					16					5					5	187,5
Gesamt																888	2990,0
Effektive Harzmenge																2102	
Verlust vom Gesamtansatz																30%	
Verlust durch Laminierwalzen vom Gesamtverlust																62%	

Meßwertprotokoll																	
Harzrestmengen am Plattenmodell 2																	
Ifd. Nr.	Trockengewicht [g]					Naßgewicht [g]					Harzrestmengen [g]						
	Rührbecher	Moltroprenwalzen	Waize + Griff (ROT)	Waize + Griff (BLAU)	Harzwannen	Rührbecher	Moltroprenwalzen	Waize + Griff (ROT)	Waize + Griff (BLAU)	Harzwannen	Rührbecher	Moltroprenwalzen	Waize + Griff (ROT)	Waize + Griff (BLAU)	Harzwannen		
1	11	8	16	58	42	63	40	52	108	50	52	32	36	50	8	178	175,5
2	11	8		58	43	20	56		76	46	9	48		18	3	78	250,0
3	11	8		58	43	17	58		98	46	6	50		40	3	99	250,0
4	11	8		58	44	56	50		88	46	45	42		30	2	119	177,5
5	12	8		58	43	15	56		92	61	3	48		34	18	103	62,5
6	11			58	44	17			96	47	6			38	3	47	125,0
7	11			58	43	22			78	48	11			20	5	36	187,5
8	12			58		16			96		4			38		42	188,0
9	11			58		17			96		6			38		44	26,0
10	11			58		16			92		5			34		39	250,0
11	12			58		15			94		3			36		39	187,5
12	11			58		15			93		4			35		39	187,5
13	11			58		18			81		7			23		30	187,5
14	12			58		18			90		6			32		38	125,0
15	11			58		20			92		9			34		43	62,5
16	12					19					8					8	189,0
17	11					49					38					38	250,0
Gesamt																1020	2881,0
Effektive Harzmenge																1861	
Verlust vom Gesamtansatz																35%	
Verlust durch Laminierwalzen vom Gesamtverlust																74%	

Meßwertprotokoll				
Harzrestmengen an der Realform				
125 g - Ansätze sind zu größeren Mengen zusammengefaßt				
	Oberschale		Unterschale	
lfd. Nr.	Harzansatz [g]	Verlustmenge [g]	Harzansatz [g]	Verlustmenge [g]
1	500		234	
2	530		234	
3	1125		234	68
4	29		234	
5	875		234	
6	62,5	427	234	19
7	500	200	625	
8	375	145	500	61
9	250		625	146
10	62,5		250	
11	125	58	65	34
12	625	347	500	155
13	625	190	1500	
14	1000	266	125	231
15	375	64	375	46
16	250		500	98
Summe	7309	1697	6469	858
Verlust		23%		13%

Meßwertprotokoll										
Temperaturmessung mit Meßfühler GTF						Uni - GH Paderborn Konstruktionslabor, 25.04.1996				
Roving: Länge L = 1m; nicht eingebettet; Widerstand R = 18 Ω										
Bemerkung : T _{Raum} = 21,3 °C; pro 30 Sekunden einen Meßwert abgelesen, MR: Meßreihe										
MB 1 (-65,0...199,9 °C)										
:= MB 2 (-65.....1150 °C)										
	MR 1	MR 2	MR 3	MR 4	MR 5	MR 6	MR 7	MR 8	MR 9	MR 10
I [A]	T [°C]									
0,10	24,0	24,6	24,3	24,1	24,9	24,6	23,6	24,8	24,3	24,9
0,20	26,9	27,4	27,7	27,7	27,8	28,0	27,5	28,2	27,5	28,1
0,30	32,5	33,2	32,7	33,0	33,1	33,2	32,8	33,8	32,5	32,8
0,40	40,5	39,2	39,1	40,8	39,9	40,1	40,3	41,1	39,8	41,1
0,50	49,5	49,2	49,3	48,5	48,8	48,7	48,9	49,4	48,1	49,0
0,60	59,1	60,3	59,8	60,3	59,7	60,5	59,8	61,5	59,4	61,6
0,70	70,1	71,3	70,6	73,8	68,1	70,7	71,6	72,6	72,2	71,0
0,80	81,1	85,3	85,1	84,7	84,7	82,2	81,2	82,4	80,9	85,0
0,90	94,7	96,5	97,2	97,8	98,4	96,1	96,0	99,2	97,5	95,5
1,00	112,2	110,3	111,4	110,3	109,2	110,3	113,8	112,7	106,6	112,7
1,10	123,5	127,1	122,5	127,3	124,5	125,3	126,3	122,6	126,8	124,1
1,20	138,7	139,5	143,1	143,5	138,5	142,3	139,7	137,3	137,8	137,4
1,30	153,3	152,1	152,5	154,1	151,4	157,3	154,6	154,9	156,2	150,9
1,40	168,4	167,7	169,0	167,9	167,9	170,3	167,4	166,7	168,0	170,4
1,50	185,1	182,4	181,0	181,3	184,4	188,8	188,4	183,1	183,9	180,6
1,60	199,0	192,8	202,0	194,7	198,1	198,9	197,1	195,6	202,0	203,0
1,70	216,0	212,0	210,0	210,0	210,0	214,0	212,0	207,0	211,0	210,0
1,80	230,0	226,0	227,0	227,0	226,0	233,0	224,0	223,0	225,0	227,0
1,88	238,0	237,0	238	238,0	235,0	251,0	241,0	244,0	237,0	241,0
Meßgeräte: Temperaturmeßgerät GTH 1200 / Fa. Greisinger										
Auflösung: MB 1 von 0,1 °C; MB 2 von 1 °C; Genauigkeit: < 1,5 % + 1 Digit										
Meßfühler GTF 300 Typ K (NiCr - Ni); MB: -65...300 °C										
Genauigkeit: 1/2 DIN - Toleranz										
Digitalmultimeter DT 3800 zur Strommessung										
Zentro-elektrik Gleichspannungsquelle 30 V / 5 A; Inv. - Nr.: EMT 591										

Meßwertprotokoll										
Temperaturmessung mit Meßfühler GOF						Uni - GH Paderborn Konstruktionslabor, 24.04.1996				
Roving: Länge L = 1m; nicht eingebettet; Widerstand R = 18 Ω										
Bemerkung : T _{Raum} = 24 °C; pro 30 Sekunden einen Meßwert abgelesen; MR: Meßreihe										
MB 1 (-65,0...199,9 °C)										
:= MB 2 (-65.....1150 °C)										
	MR 1	MR 2	MR 3	MR 4	MR 5	MR 6	MR 7	MR 8	MR 9	MR 10
I [A]	T [°C]									
0,10	25,0	26,0	24,4	25,6	25,3	24,9	25,2	25,1	25,0	25,4
0,20	27,4	29,0	27,7	29,0	28,6	28,3	28,4	28,1	28,1	28,7
0,30	33,5	33,8	33,0	34,0	33,9	33,7	33,7	32,5	33,4	33,5
0,40	41,2	41,0	40,4	41,1	41,0	40,5	40,3	40,2	40,7	40,8
0,50	50,2	48,8	49,1	50,0	50,1	49,7	49,3	49,1	49,2	48,8
0,60	59,4	59,3	58,5	60,1	59,3	60,7	59,5	59,3	59,8	60,2
0,70	71,1	70,0	71,1	71,5	71,6	70,2	72,3	70,2	71,5	70,5
0,80	81,5	82,3	83,8	82,5	82,4	82,0	82,2	81,3	82,9	82,5
0,90	94,3	96,7	95,2	95,2	96,5	95,5	95,6	93,2	94,8	94,7
1,00	107,8	107,3	110,6	108,4	107,5	109,5	107,8	108,4	108,7	103,3
1,10	122,7	122,9	122,9	123,1	123,8	121,0	124,3	125,2	122,2	122,0
1,20	135,4	139,7	137,1	136,5	129,8	138,4	135,9	135,3	136,2	135,1
1,30	151,1	149,1	151,3	150,2	148,9	152,8	149,1	153,7	150,0	148,4
1,40	167,0	164,0	164,0	163,6	162,1	164,6	164,8	163,8	163,6	163,7
1,50	179,6	176,5	177,9	180,4	182,1	178,2	178,4	181,5	181,9	178,5
1,60	194,8	195,9	193,5	198,6	193,5	193,2	192,5	191,5	190,3	194,9
1,70	208,0	208,0	207,0	209,0	208,0	207,0	203,0	206,0	203,0	204,0
1,80	224,0	222,0	223,0	225,0	222,0	223,0	218,0	221,0	224,0	221,0
1,88	236,0	236,0	235,0	236,0	237,0	234,0	229,0	235,0	239,0	233,0
Meßgeräte: Temperaturmeßgerät GTH 1200 / Fa. Greisinger										
Auflösung: MB 1 von 0,1 °C; MB 2 von 1 °C; Genauigkeit: < 1,5 % + 1 Digit										
Meßfühler GOF 130 Typ K (NiCr - Ni); MB: -65...900 °C										
Genauigkeit: 1/2 DIN - Toleranz										
Digitalmultimeter DT 3800 zur Strommessung										
Zentro-elektrik Gleichspannungsquelle 30 V / 5 A; Inv. - Nr.: EMT 591										

Mittelwert der Mittelwerte / Roving R = 18 Ω							
I [A]	Mittelwert/GTF [°C]	Mittelwert/GOF [°C]	Mittelwert der Mittelwerte GTF/GOF [°C]	Standardabweichung [°C]	Standardabweichung des Mittelwerts der Mittelwerte GTF/GOF [°C]	$t_{0,99}$ / Studentfaktor	Vertrauensbereich u [°C]
0,10	24,410	25,190	24,800	0,579	0,129	2,878	0,372
0,20	27,680	28,330	28,005	0,558	0,125		0,359
0,30	32,960	33,500	33,230	0,496	0,111		0,320
0,40	40,190	40,720	40,455	0,611	0,137		0,393
0,50	48,940	49,430	49,185	0,534	0,119		0,344
0,60	60,200	59,610	59,905	0,772	0,173		0,497
0,70	71,200	71,000	71,100	1,185	0,265		0,762
0,80	83,260	82,340	82,800	1,446	0,323		0,931
0,90	96,890	95,170	96,030	1,476	0,330		0,950
1,00	110,950	107,930	109,440	2,487	0,556		1,601
1,10	125,000	123,010	124,005	1,818	0,406		1,170
1,20	139,780	135,940	137,860	3,117	0,697		2,006
1,30	153,730	150,460	152,095	2,514	0,562		1,618
1,40	168,370	164,120	166,245	2,484	0,555		1,599
1,50	183,900	179,500	181,700	3,281	0,734		2,112
1,60	198,320	193,870	196,095	3,632	0,812		2,338
1,70	211,200	206,300	208,750	3,401	0,760		2,189
1,80	226,800	222,300	224,550	3,348	0,749		2,155
1,88	240,000	235,000	237,500	4,490	1,004		2,890

Meßwertprotokoll		Uni - GH Paderborn Konstruktionslabor, 27.04.1996								
Temperaturmessung mit Meßfühler GTF										
Roving: Länge L = 1m; nicht eingebettet; Widerstand R = 47 Ω										
Bemerkung : T _{Raum} = 23 °C; pro 30 Sekunden einen Meßwert abgelesen; MR: Meßreihe										
MB 1 (-65,0...199,9 °C)										
:= MB 2 (-65.....1150 °C)										
	MR 1	MR 2	MR 3	MR 4	MR 5	MR 6	MR 7	MR 8	MR 9	MR 10
I [A]	T [°C]									
0,10	28,2	28,8	28,2	28,8	25,8	26,8	27,1	27,0	26,6	27,1
0,15	33,5	33,7	34,6	35,2	31,2	32,2	31,7	32,6	30,9	31,3
0,20	41,6	41,5	42,2	41,4	37,4	39,1	38,8	39,5	38,8	38,5
0,25	50,6	49,5	48,9	49,1	44,9	48,2	47,0	45,0	47,4	46,8
0,30	60,1	59,1	60,1	60,2	58,4	56,7	56,1	55,1	56,3	57,2
0,35	70,2	71,2	72,4	72,2	66,0	67,2	66,7	67,8	65,5	64,8
0,40	84,2	82,5	86,2	81,8	79,4	79,5	79,4	79,4	78,9	77,2
0,45	100,1	101,3	101,7	98,3	89,2	92,3	91,8	91,7	90,5	92,8
0,50	112,6	118,3	115,8	118,3	104,8	104,0	108,3	107,6	105,1	105,5
0,55	128,4	131,6	131,5	131,6	113,3	119,3	118,9	117,8	117,4	119,5
0,60	145,1	149,1	150,3	143,1	134,5	133,4	133,5	133,0	132,1	132,8
0,65	156,8	170,1	163,2	161,3	147,6	150,3	149,8	153,3	150,1	147,7
0,70	176,4	188,1	178,3	176,2	157,9	159,8	160,7	160,5	159,3	160,3
Meßgeräte: Temperaturmeßgerät GTH 1200 / Fa. Greisinger										
Auflösung: MB 1 von 0,1 °C; MB 2 von 1 °C; Genauigkeit: < 1,5 % + 1 Digit										
Meßfühler GTF 300 Typ K (NiCr - Ni); MB: -65...300 °C										
Genauigkeit: 1/2 DIN - Toleranz										
Digitalmultimeter DT 3800 zur Strommessung										
Zentro-elektrik Gleichspannungsquelle 30 V / 5 A; Inv. - Nr.: EMT 591										

Auswertungstabelle Roving R = 47 Ω						
Meßfühler GTF 300; (MB: -65...300 °C)						
I [A]	Mittelwert [°C]	Durchschnittliche absolute Mittelwertabweichung [°C]	Standardabweichung [°C]	Standardabweichung des Mittelwertes [°C]	t _{0,99} / Studentfaktor	Vertrauensbereich u _z [°C]
0,10	27,440	0,848	1,005	0,502	3,250	1,632
0,15	32,690	1,248	1,498	0,749		2,435
0,20	39,880	1,436	1,647	0,824		2,676
0,25	47,740	1,520	1,880	0,940		3,055
0,30	57,930	1,650	1,892	0,946		3,075
0,35	68,400	2,480	2,855	1,427		4,639
0,40	80,850	2,260	2,763	1,382		4,490
0,45	94,970	4,304	4,815	2,407		7,823
0,50	110,030	4,976	5,717	2,858		9,289
0,55	122,930	6,276	7,028	3,514		11,420
0,60	138,690	6,568	7,354	3,677		11,949
0,65	155,020	6,264	7,618	3,809		12,378
0,70	167,750	9,600	10,858	5,429		17,643

Einzelteildarstellung: g:	Absaugstutzen
Werkstoff:	Al

Meßwertprotokoll Verzug der Oberschale / Unterschale						Uni - GH Paderborn Konstruktionslabor, 20.03.1996														
Messungen an der Oberschale bei den Temperaturen 17, 40 und 60 °C																				
T = 17 °C		Verzug [mm]					T = 40 °C		Verzug [mm]					T = 60 °C		Verzug [mm]				
Meßpunkte		Meßstrecken					Meßpunkte		Meßstrecken					Meßpunkte		Meßstrecken				
bei mm		AB	CD	EF	GH	IJ	bei mm		AB	CD	EF	GH	IJ	bei mm		AB	CD	EF	GH	IJ
0		0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0
100		-0,1	-0,3	-0,4	-0,4	-0,8	100		-0,1	-0,3	-0,4	-0,3	-0,6	100		-0,1	-0,3	-0,3	-0,2	-0,2
200		-0,3	-0,2	-0,6	-0,6	-1,1	200		-0,2	-0,2	-0,6	-0,4	-0,8	200		-0,1	-0,3	-0,6	-0,4	-0,4
300		-0,3	-0,2	-0,7	-0,9	-1,2	300		-0,2	-0,1	-0,7	-0,5	-0,8	300		-0,2	-0,1	-0,7	-0,4	-0,3
400		-0,4	-0,1	-0,8	-1	-1,5	400		-0,4	-0,1	-0,8	-0,6	-0,9	400		-0,3	-0,1	-0,8	-0,4	-0,4
500		-0,5	0	-0,7	-0,8	-1,6	500		-0,4	0	-0,7	-0,4	-1	500		-0,4	0	-0,7	-0,2	-0,5
600		-0,4	0	-0,4	-0,8	-1,5	600		-0,4	0	-0,4	-0,5	-1	600		-0,3	-0,1	-0,4	-0,4	-0,4
700		-0,4	0	-0,3	-0,7	-1,3	700		-0,4	0	-0,3	-0,4	-0,8	700		-0,3	0	-0,3	-0,3	-0,3
800		-0,4	-0,2	-0,1	-0,6	-0,8	800		-0,3	-0,2	-0,1	-0,4	-0,5	800		-0,3	-0,2	-0,1	-0,3	-0,1
900		-0,2	-0,1	0	-0,4	-0,3	900		-0,1	0	0	-0,3	-0,3	900		-0,1	0	0	-0,3	-0,1
950		0	-0,4	-0,2	0	0	950		0	-0,2	-0,2	0	0	950		0	-0,2	-0,2	0	0
Messungen an der Unterschale bei den Temperaturen 17, 40 und 60 °C																				
T = 17 °C		Verzug [mm]					T = 40 °C		Verzug [mm]					T = 60 °C		Verzug [mm]				
Meßpunkte		Meßstrecken					Meßpunkte		Meßstrecken					Meßpunkte		Meßstrecken				
bei mm		AB	CD	EF	GH	IJ	bei mm		AB	CD	EF	GH	IJ	bei mm		AB	CD	EF	GH	IJ
0		-0,4	-0,1	-0,3	0	0	0		-0,2	0	-0,4	0	-0,5	0		-0,3	0	-0,4	-0,5	-1,3
100		-0,4	-0,1	-0,2	-0,1	0	100		-0,2	0	-0,3	-0,1	-0,1	100		-0,2	0	-0,3	-0,2	-0,6
200		-0,2	0	-0,1	-0,1	0	200		-0,05	-0,05	-0,1	-0,05	0	200		-0,1	-0,1	-0,2	-0,2	0
300		-0,1	0	0	0	-0,1	300		0	0	0	0	0	300		0	-0,1	0	0	0
400		0	0	0	0	-0,3	400		-0,05	-0,1	0	0	0	400		0	-0,1	0	0	0
500		0	-0,1	0	0	-0,4	500		-0,05	-0,1	0	0	-0,1	500		0	-0,2	0	0	0
600		0	-0,1	-0,1	-0,1	-0,5	600		0	0	-0,1	0	-0,1	600		0	-0,2	-0,2	0	0
700		0	0	-0,2	0	-0,5	700		-0,05	0	-0,2	0	-0,2	700		-0,1	-0,1	-0,4	0	-0,1
800		0	0	-0,4	0	-0,4	800		-0,1	0	-0,3	0	-0,1	800		-0,15	0	-0,5	-0,1	-0,2
900		-0,1	0	-0,6	-0,1	-0,2	900		-0,3	0	-0,6	-0,1	-0,2	900		-0,3	0	-0,9	-0,3	-0,4
950		-0,3	-0,1	0	0	0	950		-0,3	0	0	0	-0,2	950		-0,6	-0,1	-0,5	-0,5	-0,8
Meßgeräte: Haarlineal, Fühlerlehre																				

Meßwertprotokoll Urmmodell / Form nach Fremdtemperatur						Uni - GH Paderborn Konstruktionslabor, 20.03.1996							
Messung an der Urmmodellunterseite						Messung an der Urmmodelloberseite							
T = 19 °C		Verzug [mm]				T = 19 °C		Verzug [mm]					
Meßpunkte		Meßstrecken				Meßpunkte		Meßstrecken					
bei mm		CD	EF	GH	bei mm		AB	CD	EF	GH			
0		0	0	0	0		0	-0,5	-1	0			
100		0	0	-0,3	100		-0,1	0	-0,4	0			
200		0	-0,3	-0,5	200		-0,2	0	-0,2	0			
300		0	-0,6	-0,8	300		-0,2	-0,1	-0,05	0			
400		0	-0,7	-1	400		-0,4	-0,1	0	0			
500		0	-0,7	-1	500		-0,5	-0,3	0	-0,2			
600		0	-0,7	-0,9	600		-0,4	-0,2	-0,1	-0,2			
700		0	-0,5	-0,8	700		-0,2	-0,1	-0,1	-0,1			
800		0	-0,3	-0,6	800		0	0	-0,2	-0,1			
900		-0,1	0	-0,3	900		0	-0,2	-0,2	-0,1			
950		-0,1	-0,4	0	950		0	0	0	0			
am Trennbrett gemessen													
Messungen an der Unterschale nach Fremdtemperatur						Messungen an der Oberschale nach Fremdtemperatur							
T = 17 °C		Verzug [mm]				T = 17 °C		Verzug [mm]					
Meßpunkte		Meßstrecken				Meßpunkte		Meßstrecken					
bei mm		AB	CD	EF	GH	IJ	bei mm		AB	CD	EF	GH	IJ
0		0	0	-0,4	-0,5	-1,25	0		0	0	0	0	0
100		-0,15	-0,15	-0,25	-0,35	-0,45	100		-0,1	-0,3	-0,3	-0,15	-0,25
200		-0,2	-0,25	-0,2	-0,2	-0,25	200		-0,3	-0,35	-0,5	-0,25	-0,3
300		-0,35	-0,25	-0,05	0	0	300		-0,45	-0,25	-0,65	-0,35	-0,35
400		-0,4	-0,4	0	0	0	400		-0,55	-0,3	-0,7	-0,4	-0,55
500		-0,45	-0,45	0	0	-0,05	500		-0,6	-0,15	-0,6	-0,15	-0,85
600		-0,5	-0,45	-0,05	-0,05	0	600		-0,55	-0,25	-0,4	-0,25	-0,75
700		-0,35	-0,35	-0,1	-0,1	-0,05	700		-0,6	-0,2	-0,3	-0,2	-0,45
800		-0,15	-0,25	-0,25	-0,25	-0,15	800		-0,45	-0,3	-0,15	-0,2	-0,2
900		-0,1	-0,15	-0,55	-0,5	-0,35	900		-0,15	0	0	-0,15	-0,1
950		0	0	0	-0,6	-0,4	950		0	-0,25	-0,4	0	0
Meßgeräte: Haarlineal, Fühlerlehre													

Meßwertprotokoll

Uni - GH Paderborn

Leistungsmessung an der Formenunterschale

Konstruktionslabor, 03.05.1996

Messung an der Unterschale; Fläche der Form: $F = 0,891 \text{ m}^2$

Wirkleistungsmeßgerät LVM 210 vor Phasenanschnittsteuerung geschaltet

Widerstand R mit LVM 210 ohne Phasenanschnittsteuerung gemessen

P [W]	P / F [W/m ²]	T _{innen} [°C] / Meßfühler 1	T _{innen} [°C] / Meßfühler 2	T _{außen} [°C] / Meßfühler GTF	R in [Ω] / Wirkwiderstand	Phasenwinkel cos φ	Zeit [min]
0	0	19,80	20,30	20,40	43,29	0,995	0
200	224	38,30	38,80	39,20			40
400	449	54,70	55,20	54,70			70
600	673	69,60	70,10	66,80			100
800	898	82,70	83,10	80,00			130
1000	1122	95,00	95,40	91,50			160
1200	1347	104,30	104,70	100,50	42,71		180

Meßgeräte: Wirkleistungsmeßgerät LVM 210 / Fa. WSE

Temperaturmeßgeräte: GTH 1200 / Fa. Greisinger

Auflösung: MB 1 von 0,1 °C; Genauigkeit: <1,5 % + 1 Digit

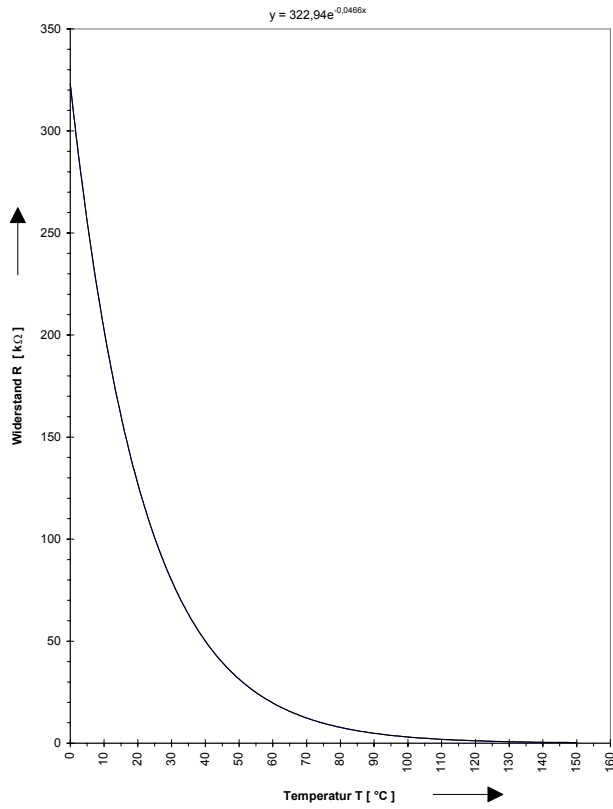
Meßfühler GTF 300 Typ K (NiCr - Ni); MB: -65...300 °C

Genauigkeit: 1/2 DIN - Toleranz

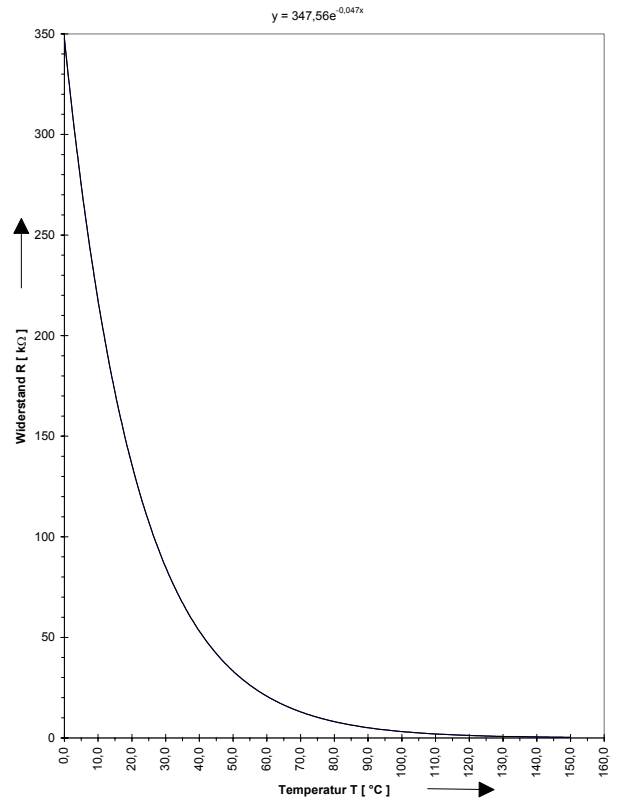
Temperaturmeßeinheit Fa. R&G mit abgestimmten Meßfühlern

zur Messung der Innentemperatur

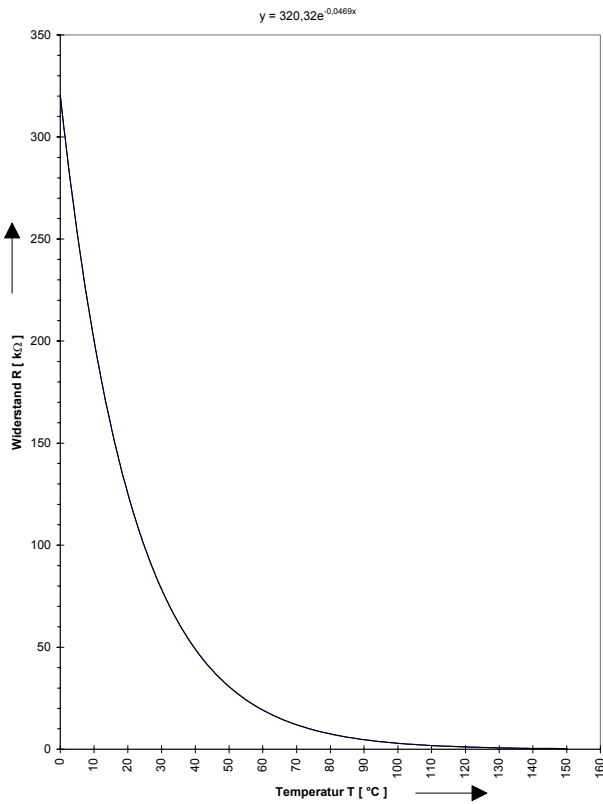
Heißeiter 1 / Widerstandskennlinie



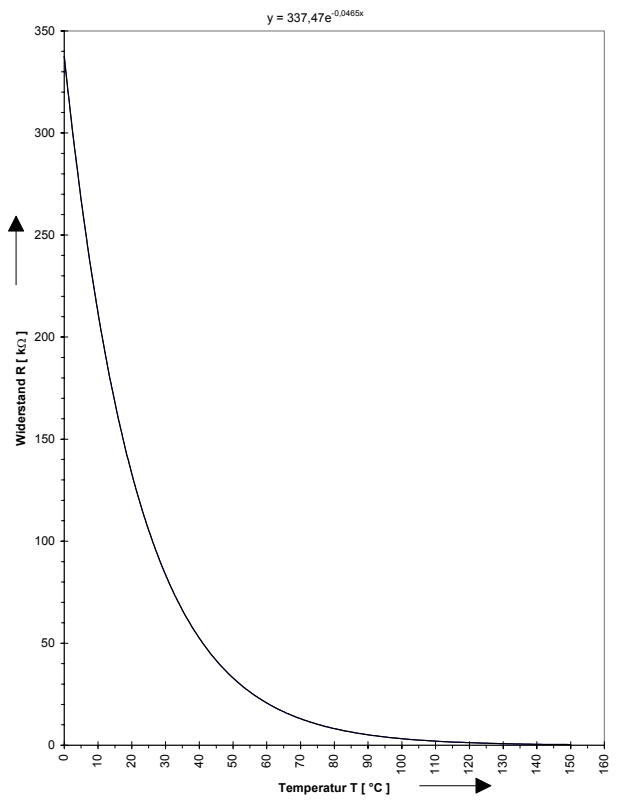
Heißeiter 2 / Widerstandskennlinie



Heißeiter 3 / Widerstandskennlinie



Heißeiter 4 / Widerstandskennlinie



7.2 Literaturverzeichnis

- Michaeli, W.; Wegener, M.: Einführung in die Technologie der Faserverbundwerkstoffe.
München, Wien: Hanser, 1989.
ISBN 3-446-15786-7
- Michaeli, W.; Huybrechts, D. Dimensionieren mit Faserverbundkunststoffen. Einführung und praktische Hilfen.
Wegener, M.: München, Wien: Hanser, 1995.
ISBN 3-446-17659-4
- Niederstadt, G.: Wärmedehnung/Quellung.
In: Heißler, H: Verstärkte Kunststoffe in der Luft- und Raumfahrttechnik.
Stuttgart, Berlin, Köln, Mainz: Kohlhammer, 1986.
- Funke, H.; Eichstetter, J.: Sandwich-Leichtbauteile in Wabenbauweise.
R&G GmbH, Faserverbundwerkstoffe.
Postfach, D-71107 Waldenbuch
- Stadt Ulm: Ausschreibung der Stadt Ulm zur Förderung innovativer Entwicklungen auf dem Gebiet der Allgemeinen Luftfahrt.
Stadt Ulm, Neue Straße 45
- Schulz, M.; Musch, G.: GFK-Technik im Modellbau.
Villingen-Schwenningen: Neckar-Verlag, 1992.
ISBN 3-7883-1107-x
- Michaeli, W.: Einführung in die Kunststoffverarbeitung.
München, Wien: Hanser, 1992.
ISBN 3-446-15635-6
- Hering, M.; Martin, R.; Physik für Ingenieure.
Stebrer M.

- Stohrer, M.: Düsseldorf: VDI-Verlag, , 1989.
ISBN 3-18-400916-5
- Funke, H.; Schröder, R.: Entwicklung der Tragflügel für das
Ultra-Leichtflugzeug HPK 12 in
Kunststoffschalenbauweise.
Unveröffentlichte Diplomarbeit am LKL
der Uni-GH Paderborn, 1993.
Betreuer: Prof. h.c. Dr.-Ing. J.
Schlattmann
- Bergmann, H. W.: Konstruktionsgrundlagen für
Faserverbundbauteile.
Springer Verlag, 1992.
ISBN 3-540-54628-6
- Schreyer, G.: Konstruieren mit Kunststoffen.
Teil 1/2, München: Carl Hanser 1972.