



KfK 4882  
Juli 1991

# **Thermische Ausdehnung von Faserverbunden bei tiefen Temperaturen**

**B. Schneider**  
**Institut für Material- und Festkörperforschung**

**Kernforschungszentrum Karlsruhe**



**KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE**

Institut für Material- und Festkörperforschung

**KfK 4882**

**THERMISCHE AUSDEHNUNG**

**VON**

**FASERVERBUNDEN**

**BEI TIEFEN TEMPERATUREN**

**B. SCHNEIDER**

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

Als Manuskript vervielfältigt  
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH  
Postfach 3640, 7500 Karlsruhe 1

ISSN 0303-4003

## A B S T R A C T

Mit Hilfe eines Laserdilatometers und eines optimierten Messablaufs konnte die integrale thermische Ausdehnung und der Ausdehnungskoeffizient von Carbon- und Kevlarfaserverbunden von 5K bis RT mit hoher Genauigkeit gemessen werden.

Die Abhängigkeit des Ausdehnungskoeffizienten  $\alpha$  vom Verbundwinkel  $\omega$  wurde an Proben mit 5 verschiedenen Faseranordnungen (UD 0°, +/-30°, +/-45°, +/-60° und UD 90°) bestimmt. Dabei zeigte sich eine starke Variierbarkeit von  $\alpha$  durch den Verbundwinkel. Bei Winkeln um +/-30° wurden sogar negative Ausdehnungskoeffizienten gefunden. Diese nahmen durch geeignete Auswahl der Verstärkungsfasern Absolutwerte von 30 - 100 % der positiven Ausdehnung von Metallen an.

Somit bieten sich solche Verbunde als Kompensationsmaterialien in Metallkonstruktionen mit störender thermischer Ausdehnung an.

Zur Überprüfung der Laminattheorie wurden theoretische Berechnungen der  $\alpha$ - $\omega$ -Abhängigkeit mit den Meßwerten verglichen. Dabei zeigte sich eine ausgezeichnete Übereinstimmung.

Man hat damit nun die Möglichkeit Voraussagen über das Ausdehnungsverhalten von Winkelverbunden zu treffen, wenn man die thermischen und elastischen Eigenschaften des UD-Verbundes kennt. Außerdem kann man Simulationsrechnungen durchführen, mit denen man den Einfluß eines einzelnen Parameters des UD-Laminates (z.B. G-Modul) auf die Ausdehnung des Winkelverbundes untersuchen kann.

### Thermal Expansion of Fibre-Reinforced Composites

The integral thermal expansion and the coefficient of thermal expansion (CTE) of carbon and Kevlar fibre-reinforced composites were measured with high accuracy from 5 K to room temperature. For this, a laser dilatometer and a sophisticated measuring procedure were used.

CTE dependence on the orientation angle  $\omega$  of angle-ply laminates was determined for samples with 5 different fibre alignments (UD 0°, +/-30°, +/-45°, +/-60° and UD 90°). A high variability of the CTE with the orientation angle was shown. At angles of approximately +/-30° even negative CTEs were found. With suitable reinforcing fibres being selected, their absolute values rose up to 30 - 100 % of the positive CTEs of metals.

Hence, composites of this type would be suitable as compensating materials in metal constructions where little thermal expansion is desired.

To check the lamination theory, theoretical computations of the CTE- $\omega$ -dependence were compared with the measured values. An excellent agreement was found.

Using the lamination theory, predictions about the expansion behaviour of angle-ply laminates can be made now, if the thermal and mechanical properties of the unidirectional (UD) laminate are known.

Furthermore, it is possible to carry out simulation computations aimed at investigating the influence of a single parameter of the UD-laminate (e.g. shear modulus) on the expansion of the angle-ply laminate.



# I N H A L T

|           |   |           |
|-----------|---|-----------|
| <b>1.</b> | <b>EINLEITUNG.....</b>  | <b>1</b>  |
| <b>2.</b> | <b>THEORETISCHE GRUNDLAGEN.....</b>   | <b>3</b>  |
| 2.1.      | Definition der thermischen Ausdehnung.....                                      | 3         |
| 2.2.      | Physikalische Grundlagen zur thermischen Ausdehnung von anisotropen Fasern..... | 3         |
| 2.2.1.    | Struktur von Kevlar-Fasern.....   | 4         |
| 2.2.2.    | Struktur von Carbon-Fasern.....   | 5         |
| 2.2.3.    | Ausdehnungsverhalten von Carbon- und Kevlar-Fasern.....                         | 6         |
| 2.3.      | Laminattheorie für die thermische Ausdehnung von Faserverbunden.....            | 8         |
| 2.3.1.    | UD-Schicht.....   | 8         |
| 2.3.2.    | "Off-axis" UD-Probe.....  | 10        |
| 2.3.3.    | Winkelverbund.....  | 11        |
| <b>3.</b> | <b>MESSAPPARATUR UND DURCHFÜHRUNG.....</b>                                      | <b>14</b> |
| 3.1.      | Meßprinzip.....   | 14        |
| 3.2.      | Probenform und Herstellung.....   | 15        |
| 3.3.      | Durchführung und Datenbearbeitung.....  | 18        |
| <b>4.</b> | <b>MESSERGEBNISSE.....</b>  | <b>22</b> |
| 4.1.      | Meßkurven ( $\Delta L/L_0$ und $\alpha$ ).....                                  | 22        |
| 4.2.      | Tabellarische Übersicht.....  | 40        |
| 4.3.      | Diskussion der Messergebnisse.....  | 41        |

|      |   |       |
|------|---|-------|
| 5.   | VERGLEICH DER MESSERGEBNISSE MIT BERECHNUNGEN AUS DER LAMINATTHEORIE..... | 51    |
| 5.1. | $\alpha$ - $\omega$ -Abhängigkeit bei Raumtemperatur.....                 | 51    |
| 5.2. | $\alpha$ - $\omega$ -Abhängigkeit bei verschiedenen Temperaturen.....     | 56    |
| 6.   | DREIDIMENSIONALE DARSTELLUNG DER $\alpha$ - $\omega$ -T-ABHÄNGIGKEIT..... | 64    |
| 7.   | ZUSAMMENFASSUNG / SUMMARY.....  | 68/69 |
| 8.   | LITERATUR.....  | 70    |
| 9.   | ANHANG.....   | 72    |
|      | Berechnung der thermischen Relaxationszeit.....                           | 72    |
|      | Fehlerbetrachtung.....  | 73    |
|      | Auswerteprogramme.....  | 76    |



## 1. EINLEITUNG

Das Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung des thermischen Ausdehnungsverhaltens verschiedener Faserverbunde in einem Temperaturintervall von ca. 5 K bis Raumtemperatur.

Im Gegensatz zu isotropen homogenen Festkörpern haben Faserverbunde einen schichtförmigen Aufbau. Die einzelnen Schichten bestehen aus einer Lage von parallel ausgerichteten Fasern<sup>1</sup>, die in einer Polymermatrix eingebettet sind. Dieser Schichtaufbau bestimmt entscheidend das von anderen Stoffen abweichende Eigenschaftsprofil der Faserverbunde.

Sind die einzelnen Lagen alternierend in einem Winkel  $+ \omega$  und  $- \omega$  geschichtet, so spricht man von einem Winkelverbund. Durch den Verbundwinkel werden nun viele Eigenschaften in gravierender Weise beeinflusst. Dies beruht unter anderem auf der Induktion von Kräften zwischen den einzelnen Schichten bei mechanischer oder thermischer Belastung. Dadurch kann das Eigenschaftsprofil des Verbundes nach außen hin zum Teil in unerwarteter Weise verändert werden.

Dies gilt auch für die thermische Ausdehnung. Durch Änderung von  $\omega$  kann der thermische Ausdehnungskoeffizient  $\alpha$  in weiten Bereichen variiert werden. Für Carbon- und insbesondere für Kevlarfaserverbunde ergeben sich bei Winkeln um  $\pm 30^\circ$  durch thermisch induzierte interlaminare Scherkräfte sogar negative Ausdehnungskoeffizienten. Diesem Phänomen sollte in der vorliegenden Arbeit besondere Beachtung geschenkt werden.

---

<sup>1</sup> Im Folgenden werden nur Faserverbunde mit Lagen aus unidirektionalen Endlosfasern, d.h. keine Gewebe oder Kurzfaserfliese behandelt.

Bei geeigneten Faserverbunden hat sich gezeigt, daß man negative Werte von  $\alpha$  erreichen kann, die in der Größenordnung der positiven thermischen Ausdehnung von Metallen liegen. Die Bedeutung dieses Effektes liegt in der Möglichkeit, solche Verbunde als Kompensationsmaterialien in Konstruktionen aus konventionellen Werkstoffen mit störender positiver Ausdehnung einzusetzen (z.B. Teile von Präzisionsmeßgeräten, Satellitenantennen, Strukturelemente von Supraleitungsmagneten für Linearbeschleuniger usw.).

Man könnte hierbei sozusagen von "Antiausdehnungsmaterialien" sprechen.

Für solche Zwecke müßte dann zusätzlich überprüft werden, ob die Verbunde ausreichende mechanische Eigenschaften aufweisen (E-Modul und Festigkeit hängen auch vom Verbundwinkel ab).

Zur Berechnung von Faserverbundeigenschaften dient die Laminattheorie. Sie basiert auf den Eigenschaften der Komponenten Faser bzw. Matrix und auf der Anordnung der Fasern im Verbund. Mit deren Kenntnis lassen sich dann thermische und mechanische Eigenschaften des Verbundes vorausberechnen.

Da aber die Eigenschaften der isolierten Faser nur schwer meßbar sind, beschränkt man sich darauf, die gut zugänglichen Eigenschaften von unidirektionalen (UD-) Verbunden in die Laminattheorie einzusetzen und damit Voraussagen für Winkelverbunde zu treffen. Außerdem kann dann auf die Faserkennwerte zurückgerechnet werden.

Die Ergebnisse dieser Untersuchung können als Grundlage zur Überprüfung der bestehenden Theorien hinsichtlich der thermischen Ausdehnung dienen.

## 2. THEORETISCHE GRUNDLAGEN

### 2.1 Definition der thermischen Ausdehnung

Den linearen thermischen Ausdehnungskoeffizienten  $\alpha$  definiert man aus der relativen Längenänderung pro Temperaturänderung :

$$\alpha = \frac{dL}{dT} \frac{1}{L_0} \quad \text{mit } L_0 = L(293 \text{ K})$$

Die primäre Meßgröße ist die integrale thermische Ausdehnung, die folgendermaßen definiert ist :

$$\frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L(T) - L(T_0)}{L(T_0)} = \int_{T_0}^T \alpha \, dT$$

Bei positivem  $\alpha$  ist also beim Abkühlen  $\Delta L/L_0$  negativ, was einer Kontraktion entspricht.

Den Ausdehnungskoeffizienten  $\alpha$  erhält man durch Differenzieren der Ausdehnungsmeßkurve nach der Temperatur.

Immer vorhandene Schwankungen bzw. Meßfehler in der  $\Delta L/L_0$ -Kurve wirken sich stark auf den Verlauf der Ableitungskurve aus. Dies bringt einige Probleme mit sich, wenn man das Differenzieren durch elektronische Datenverarbeitung automatisieren möchte. Hierauf wird im Kapitel 3.3 noch näher eingegangen.

### 2.2 Physikalische Grundlagen zur thermischen Ausdehnung von anisotropen Fasern

In einem isotropen homogenen Festkörper resultiert die thermische Ausdehnung aus einem asymmetrischen Bindungspotential zwischen den Atomen : bei einer Temperaturvariation verändert sich der mittlere Abstand der in thermischen Schwingungen befindlichen Atome.

Bei den hier betrachteten Fasern bestimmen mehrere Bindungspotentiale und mehrere Schwingungsmoden das Ausdehnungsverhalten. Dies soll anhand der Struktur der Fasern erläutert werden.

### 2.2.1 Struktur von Kevlar-Fasern

Kevlarfasern bestehen aus Aramid-Molekülketten, die beim Herstellungsprozeß bevorzugt bündelweise in Faserrichtung ausgerichtet werden.

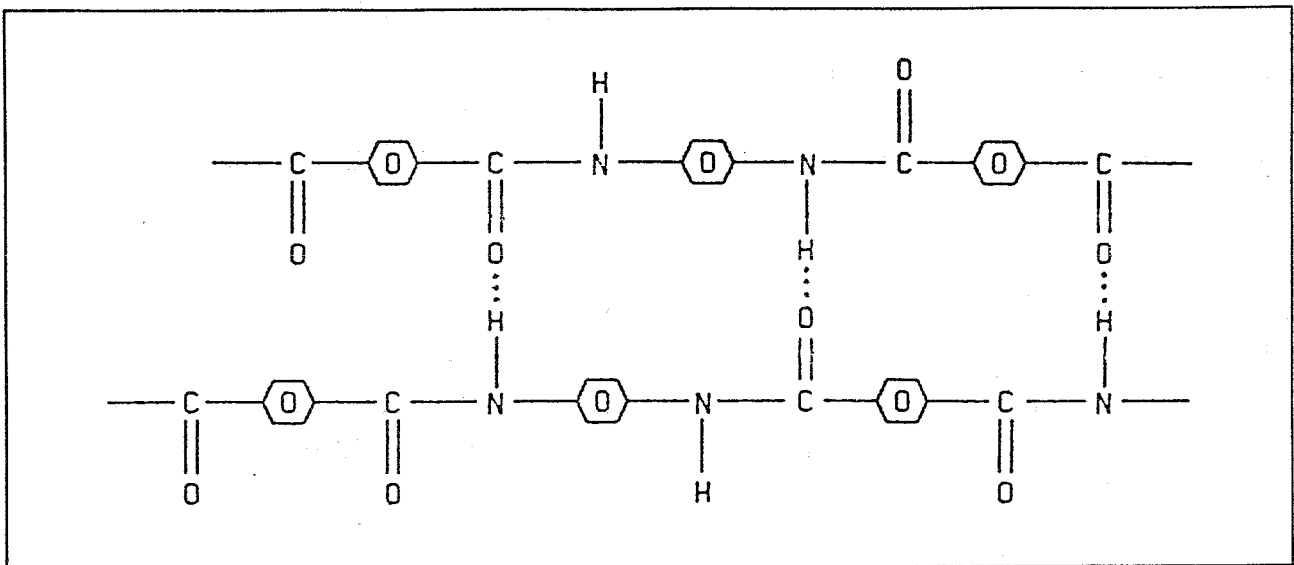


Abb.1 : Chemischer Aufbau von Kevlar

In Faserrichtung wirken starke kovalente Bindungen, wogegen senkrecht dazu nur die relativ schwachen Wasserstoffbrückenbindungen bzw. Van der Waals-Kräfte auftreten. Eine gewisse Verstärkung des Zusammenhalts quer zur Faserrichtung wird durch parakristalline Bereiche gegeben, d.h. Bereiche mit hochgradig paralleler Ausrichtung der Kettenmoleküle und geringerem Molekülabstand.

Die üblicherweise und auch hier verwendete Kevlar-49-Faser ist eine Hochmodulversion innerhalb der Klasse der Kevlarfasern.

## 2.2.2 Struktur von Carbon-Fasern

Carbonfasern können aus zwei verschiedenen Ausgangsmaterialien hergestellt werden.

Zum einen können sie durch Verspinnen von schmelzflüssigem Pech und zum anderen durch Wärmebehandlung und weiterer Verstreckung von organischen Ausgangsfasern, meist Polyacrylnitril (PAN), hergestellt werden.

Die dabei entstehende Struktur besteht in beiden Fällen aus einer Mischung von amorphem Kohlenstoff und graphitischem Kohlenstoff. Der schichtförmige graphitische Kohlenstoff ist dabei vor allem in Faserrichtung orientiert (konzentrisch oder unregelmäßig).

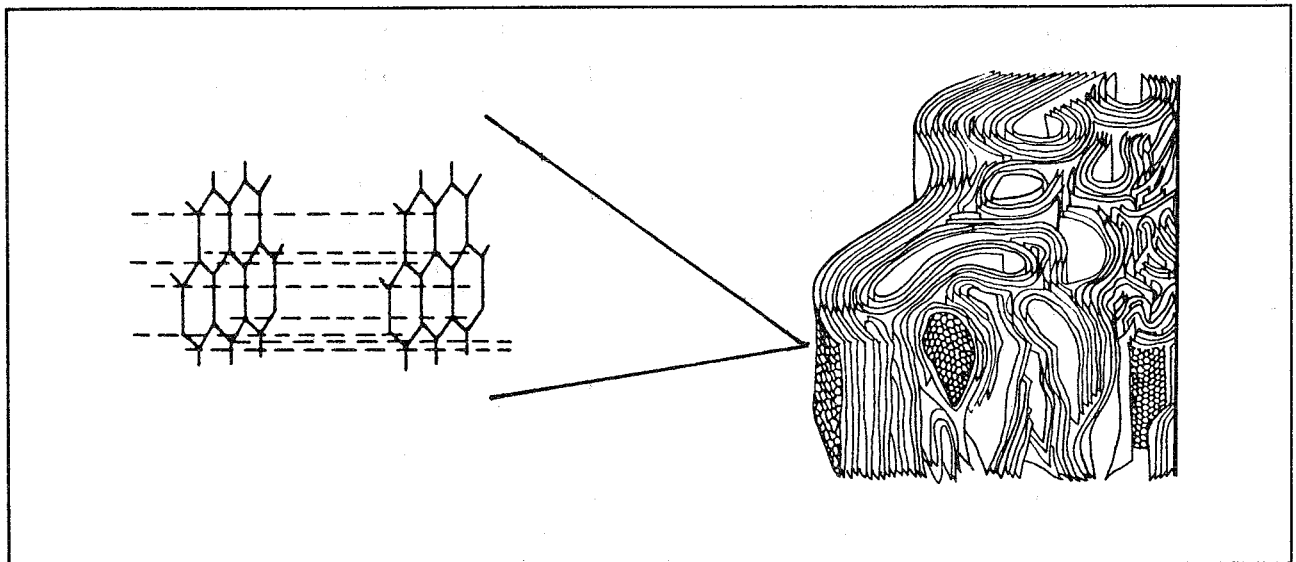


Abb.2 : Strukturmodell einer Carbonfaser nach Johnson [1],  
links: Van der Waals Bindungen zwischen den Graphitebenen

Auch hier sind wieder, analog wie bei Kevlar, in Faserrichtung die kovalenten Bindungen innerhalb einer Graphitschicht wirksam und senkrecht dazu Van der Waals-Kräfte zwischen den einzelnen Schichten.

### 2.2.3 Ausdehnungsverhalten von Carbon- und Kevlar-Fasern

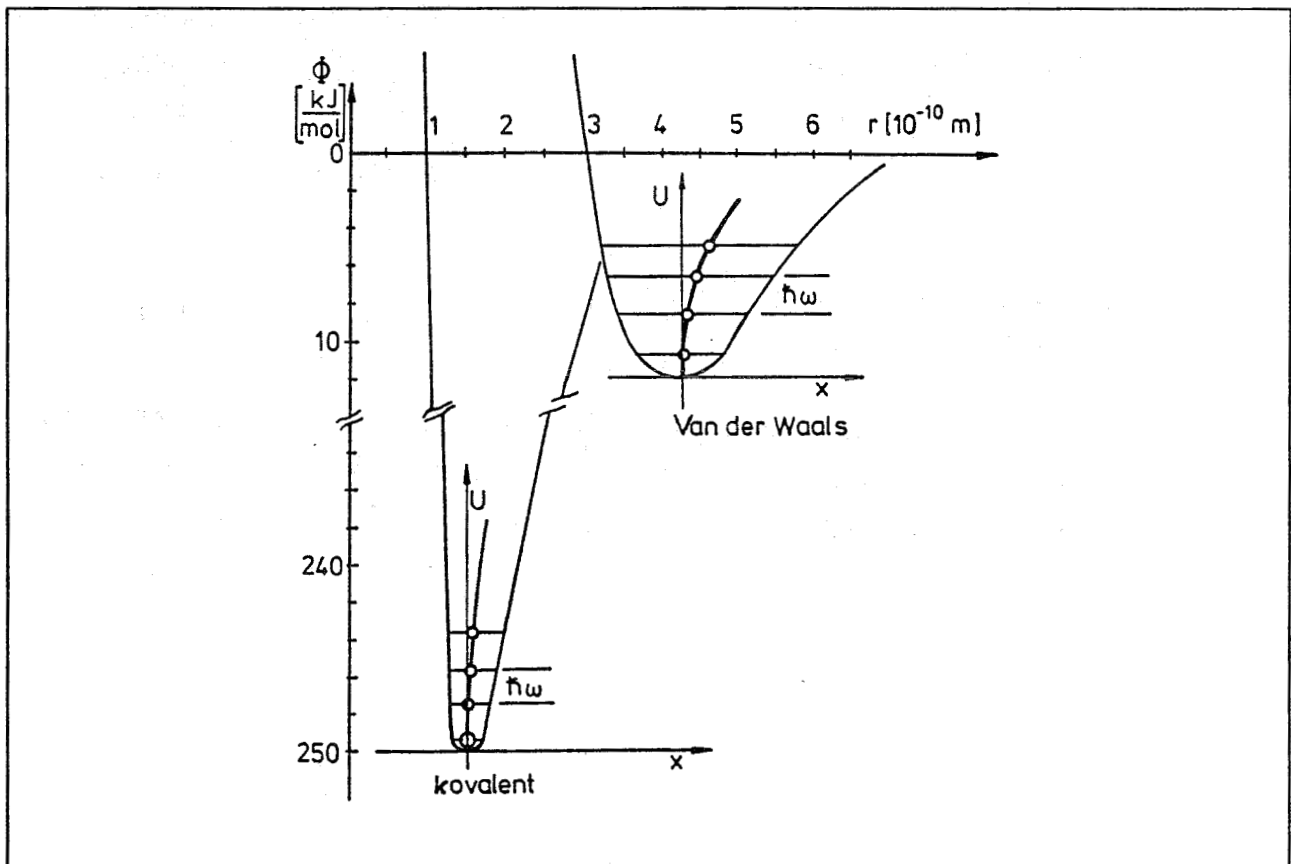
Wie im letzten Kapitel gezeigt wurde, folgt aus der Struktur dieser Fasern, daß in Faserrichtung kovalente Bindungen vorliegen und senkrecht zur Faserrichtung Van der Waals-Kräfte.

Für die anharmonischen Potentiale der beiden Bindungsarten, die in Abb.3 dargestellt sind, gilt wegen ihrer unterschiedlich starken Asymmetrie :

- Longitudinalschwingungen der Atome im kovalenten Bindungspotential bewirken eine relativ kleine positive Ausdehnung.
- Molekülkettenschwingungen im Van der Waals-Potential bewirken eine relativ große positive Ausdehnung.

Daraus folgt :

- in Faserrichtung : kleiner positiver Beitrag zur thermischen Ausdehnung
- senkrecht zur Faserrichtung : großer positiver Beitrag zur thermischen Ausdehnung



**Abb.3 :** Änderung der Atomabstände mit zunehmender Anregungsenergie in anharmonischen Potentialen

- Wegen des relativ großen Abstandes der Molekülketten in Kevlarfasern bzw. der Graphitflächenstücke in Carbonfasern, bietet sich der Platz für einen weiteren Schwingungsmodus: die Transversalschwingung.

Sie bewirkt eine negative Ausdehnung in Molekül- oder Schicht- richtung, wie aus nebenstehender Abbildung ersichtlich ist [2].

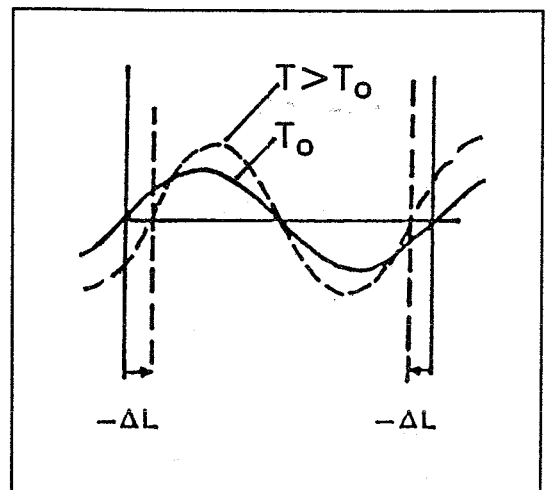


Abb.4 : Transversalschwingungen

Der Ausdehnungskoeffizient  $\alpha_{\parallel}$  in Faserrichtung ergibt sich somit aus der Summe der Beiträge der Longitudinal- und Transversalschwingungen<sup>2</sup>. Dabei können die Transversalschwingungen so dominant sein, daß bei Erwärmung eine Kontraktion der Faser auftritt.

Dieser negative thermische Ausdehnungskoeffizient kann durch bessere parallele Ausrichtung der Molekülbündel bzw. Graphitschichten verstärkt werden und bei den Carbonfasern zusätzlich durch großflächigere Graphitschichten<sup>3</sup>.

Der besonders starke negative Ausdehnungskoeffizient bei Kevlarfasern, läßt sich dadurch erklären, daß hier wegen der Eindimensionalität der Kevlarmolekülketten die Transversalschwingungen in zwei Richtungen auftreten, während bei Carbonfasern, mit ihren zweidimensionalen Graphitschichten, nur eine Richtung freisteht.

Somit nimmt in der Reihenfolge HT (high tenacity)-Carbon-Fasern, HM (high modulus)-Carbon-Fasern und Kevlar-Fasern der Absolutwert des negativen Ausdehnungskoeffizienten in Faserrichtung zu.

<sup>2</sup> Nahe dem Minimum sind alle Potentiale symmetrisch, was einer zeitlich mittleren Abstandsänderung von 0 entspricht. Dies steht im Einklang mit dem 3.Hauptsatz der Wärmelehre, der für  $T \rightarrow 0$  ein  $\alpha \rightarrow 0$  fordert.

<sup>3</sup> Bei beiden Fasertypen führt dies außerdem zu einer Erhöhung des E-Moduls in Faserrichtung und somit auch zu einer größeren Anisotropie.

## 2.3 Laminattheorie für die thermische Ausdehnung von Faserverbunden

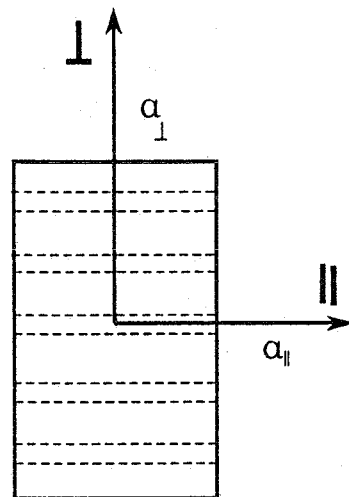
### 2.3.1 UD-Schicht

UD-Schichten haben einen heterogenen Aufbau aus parallel angeordneten Fasern, die in einer Polymermatrix eingebettet sind. Die Ausdehnungskoeffizienten in den Hauptachsenrichtungen müssen sich somit aus den Ausdehnungskoeffizienten der beiden Komponenten zusammensetzen.

Aus der Annahme, daß es sich bei einer Laminatschicht in Faserrichtung um ein einfaches verspanntes System Faser/Matrix handelt (es gilt die Kompatibilitätsbedingung  $\epsilon_f = \epsilon_m$  und das Kräftegleichgewicht), läßt sich für  $\alpha_{\parallel}$  folgende Beziehung herleiten [3] :

$$\alpha_{\parallel} = \alpha_{\parallel f} + \frac{\alpha_m - \alpha_{\parallel f}}{\left[ \frac{\phi}{1 - \phi} \frac{E_{\parallel f}}{E_m} + 1 \right]}$$

mit  $\phi$  = Faservolumengehalt  
 E = E-Modul  
 Index f...der Faser  
 Index m...der Matrix



Den Ausdehnungskoeffizienten  $\alpha_{\perp}$  senkrecht zur Faserrichtung kann man durch die vereinfachende Annahme einer Mischungsregel wie folgt berechnen :

$$\alpha_{\perp} \approx \phi \alpha_{\perp f} + (1 - \phi) \alpha_m$$

wobei ein Fehler  $< 10 \%$  angenommen werden kann.

$\alpha_{\parallel}$  und  $\alpha_{\perp}$  bezeichnet man als orthotrope Ausdehnungskoeffizienten.



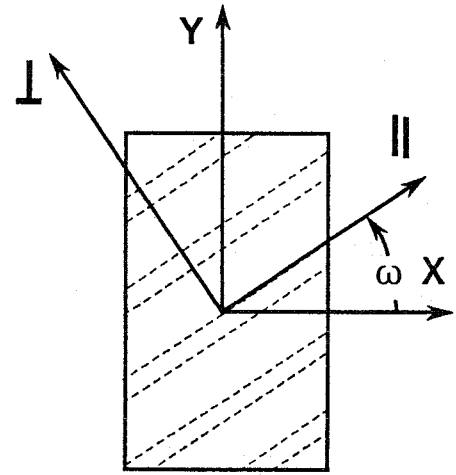
Für genauere Betrachtungen kann man Beziehungen von W.Schneider [3], Shapery [4] oder Chamberlain [5] heranziehen.

Ersterer geht dabei von dem Modell einer hexagonalen Anordnung zylindrischer Faser/Matrix-Elemente aus, berechnet die Wärmespannungen zwischen Faser und umgebender Matrix und aus den daraus resultierenden Dehnungen ergibt sich dann  $\alpha_{\perp}$ .

Shapery verwendet dazu die Gesetze der Thermoelastizität in Verbindung mit einer Minimierung der Differenzen zu möglichen oberen und unteren Grenzen.

### 2.3.2 "Off axis" UD-Probe

Befinden sich nun die Fasern in einem Winkel  $\omega$  zur Meßrichtung (off axis), können die thermischen Ausdehnungskoeffizienten in x- und y-Richtung ausgerechnet werden mit:

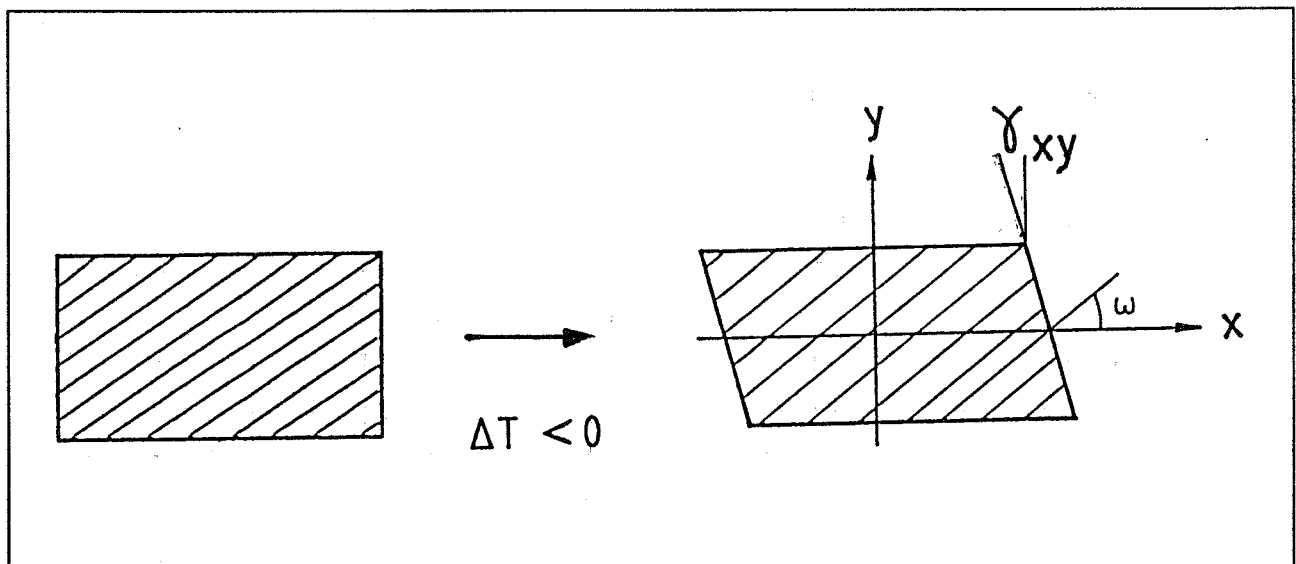


$$\{a\}_\omega = |T| \{a\}_{\text{ORTHO}}$$

$$\begin{Bmatrix} a_x \\ a_y \\ \Gamma_{xy} \end{Bmatrix}_\omega = \begin{bmatrix} \cos^2\omega & \sin^2\omega & \sin 2\omega \\ \sin^2\omega & \cos^2\omega & -\sin 2\omega \\ -\frac{1}{2}\sin 2\omega & \frac{1}{2}\sin 2\omega & \cos^2\omega - \sin^2\omega \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_{\parallel} \\ a_{\perp} \\ 0 \end{Bmatrix}_{\text{ORTHO}}$$

d.h. die bereits aus 2.3.1 bekannten orthotropen Ausdehnungskoeffizienten werden durch das Multiplizieren mit der Matrix T einer Winkeltransformation unterzogen.

Dabei ist hervorzuheben, daß durch Scherspannungen zwischen Fasern und Matrix ein Scherausdehnungskoeffizient  $\Gamma_{xy}$  auftritt, der in einem ursprünglich rechteckigen Probenkörper einen rhombischen Verzug erzeugt. Es gilt  $\Gamma_{xy} = \gamma_{xy} / \Delta T$



**Abb.5** : rhombischer Verzug einer off axis UD-Probe beim Abkühlen

### 2.3.3 Winkelverbund

Der rhombische Verzug unterbleibt, wenn man nun einen Laminatverbund herstellt bei dem, ausgehend von der Mittelebene, symmetrisch gleich viele Laminatschichten in  $+\omega$  und  $-\omega$  Richtung aufeinander folgen.

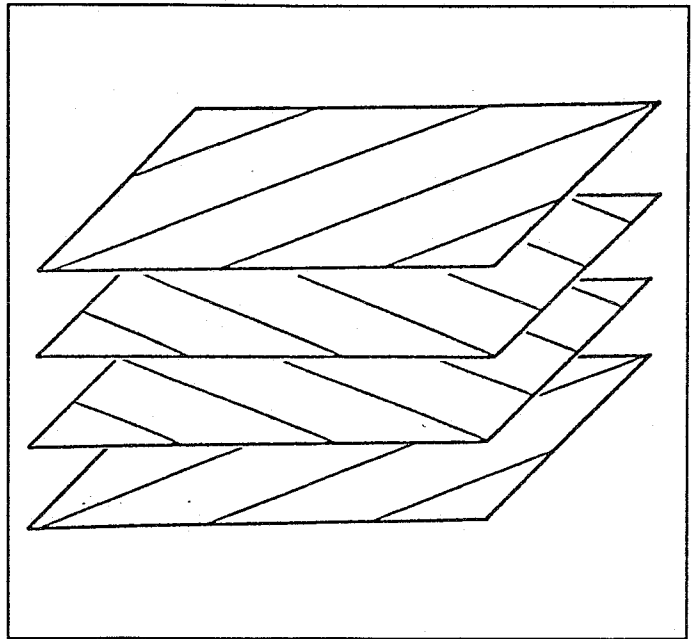


Abb.6 : Beispiel für einen ausgeglichenen, symmetrischen Winkelverbund

Die Scherspannungen werden dann durch interlaminare Scherkräfte zwischen den Schichten ausgeglichen.

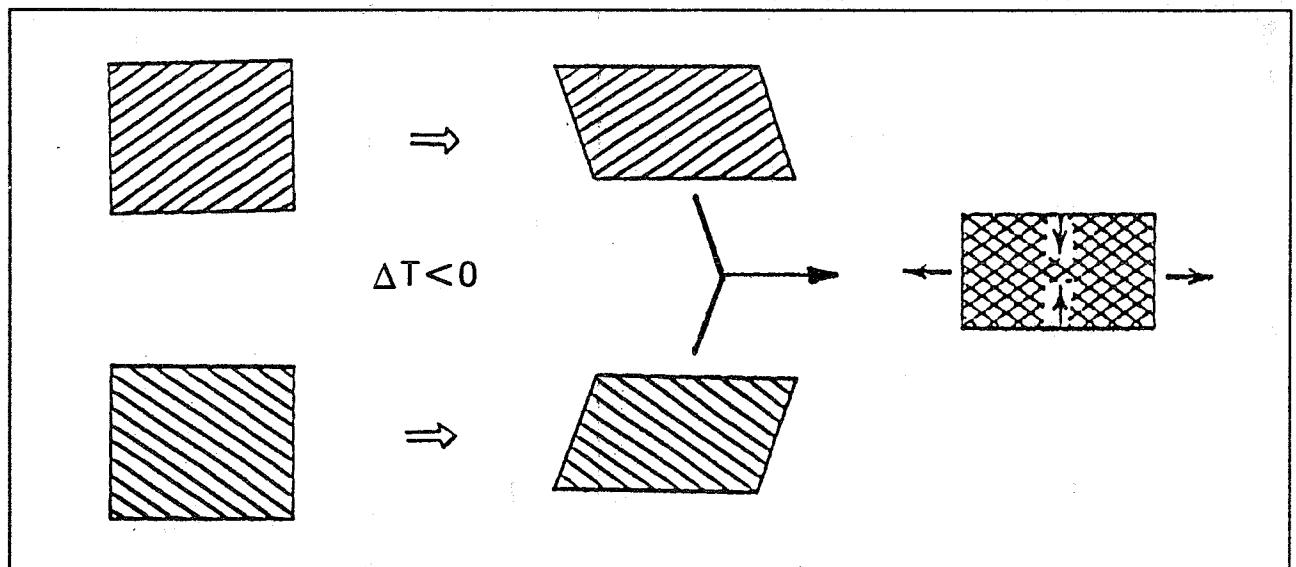


Abb.7 : Unterbleiben des rhombischen Verzugs in einem Winkelverbund (Kompatibilitätsbedingung)

Die thermische Ausdehnung eines solchen Winkelverbundes lässt sich berechnen, wenn man die Kompatibilitätskriterien und das

Kräftegleichgewicht auf die Spannungs-Dehnungs-Beziehungen der einzelnen Schichten  $n$  anwendet :

$$\{\epsilon\}_n = \{S\}_{\omega n} \{\sigma\}_{\omega n} + \{a\}_{\omega n} \Delta T$$

ausgeschrieben :

$$\epsilon_{xn} = S_{11n} \sigma_{xn} + S_{12n} \sigma_{yn} + S_{13n} \tau_{xyn} + a_{xn} \Delta T$$

$$\epsilon_{yn} = S_{12n} \sigma_{xn} + S_{22n} \sigma_{yn} + S_{23n} \tau_{xyn} + a_{yn} \Delta T$$

$$\gamma_{xyn} = S_{13n} \sigma_{xn} + S_{23n} \sigma_{yn} + S_{33n} \tau_{xyn} + \Gamma_{xyn} \Delta T$$

wobei  $S_{ijn}$  die Komponenten des Nachgiebigkeitstensors einer UD-Schicht  $n$  sind, die um den Winkel  $\omega$  in der x-y-Ebene gedreht ist.

Das Kräftegleichgewicht ergibt sich aus den Beiträgen der Einzelnen Schichten  $n$ , die jeweils eine Dicke  $t_n$  besitzen :

$$\sum_n \sigma_{xn} \cdot t_n = 0 \quad \sum_n \sigma_{yn} \cdot t_n = 0 \quad \sum_n \tau_{xyn} \cdot t_n = 0$$

und die Kompatibilitätsbedingung lautet :

$$\epsilon_{xn} = \epsilon_{xc} \quad \epsilon_{yn} = \epsilon_{yc} \quad \gamma_{xyn} = \gamma_{xyc} = 0$$

c : composite

n : einzelne Schicht

Daraus folgt für einen Winkelverbund mit +/-  $\omega$  der analytische Ausdruck :

$$a_{xc} = a_{xn} - \frac{S_{13n}}{S_{33n}} \Gamma_{xyn}$$

$a_{xn}$  : Ausdehnung der separaten Schicht

$\frac{S_{13n}}{S_{33n}} \Gamma_{xyn}$  : Dehnung durch interlaminare Scherspannungen

Die beiden Komponenten  $S_{13}$  und  $S_{33}$  des Nachgiebigkeitstensors berechnen sich wie folgt :

$$S_{13} = \left( \frac{1 + \mu_{\perp\parallel}}{E_{\perp}} \sin^2 \omega - \frac{1 + \mu_{\parallel\perp}}{E_{\parallel}} \cos^2 \omega + \frac{1}{2G} \cos 2\omega \right) \cdot \sin 2\omega$$

$$S_{33} = \left( \frac{1 + 2\mu_{\perp\perp}}{E_{\parallel}} + \frac{1}{E_{\perp}} \right) \cdot \sin^2 2\omega - \frac{1}{G} \cos^2 2\omega$$

G...Schubmodul  
der UD-Schicht  
 $\mu$ ...Poissonverhältnis  
der UD-Schicht

Dabei sind drei Fälle zu unterscheiden:

1.) für  $a_{xn} = \frac{S_{13n} \Gamma_{xyn}}{S_{33n}}$  ist  $a_{xc} = 0$

2.) für  $a_{xn} > \frac{S_{13n} \Gamma_{xyn}}{S_{33n}}$  ist  $a_{xc} > 0$

3.) für  $a_{xn} < \frac{S_{13n} \Gamma_{xyn}}{S_{33n}}$  ist  $a_{xc} < 0$

Fall 1.) und 3.) ist nur mit Faserverbunden realisierbar, bei denen schon die Faser einen sehr kleinen oder sogar negativen Ausdehnungskoeffizienten in Faserrichtung aufweist. Dies trifft zu für Kevlar- und Carbon-Fasern, nicht aber für Glasfasern.

### 3. MESSAPPARATUR UND DURCHFÜHRUNG

#### 3.1 Meßprinzip

Für die Messung der teilweise sehr kleinen thermischen Ausdehnung von Kohlefaserverbunden ist eine hohe Meßgenauigkeit erforderlich und deshalb wurde zu diesem Zweck ein Laserdilatometer gewählt. Dieses arbeitet berührungslos und somit entfallen Meßfehler durch die thermische Ausdehnung der Probenhalterung bzw. des Meßgestänges.

Das Meßprinzip beruht auf der Interferenz zweier kohärenter Laserstrahlen, von denen der eine von einem Spiegel unter der Probe und der andere von einem halbdurchlässigen Spiegel auf der Probe reflektiert wird.

Man verfolgt nun die Ausbreitung der entstehenden Interferenzringe, wobei einer Ausdehnung der Probe um 316 nm (1/2 Wellenlänge des Laserlichtes) ein Wandern eines Interferenzringes auf die Position eines Ringes höherer bzw. niedrigerer Ordnung entspricht. Die Ausbreitungsrichtung bestimmt dabei ob es sich um eine Kontraktion oder Expansion handelt.

Der Faktor 1/2 kommt dadurch zustande, daß der Laserstrahl die Probenlänge, und somit auch die Längenänderung  $\Delta L$ , zweimal durchläuft.

Nimmt man nur das Wandern der Interferenzmaxima als Meßereignis, so ist die maximale Auflösung der Meßapparatur festgelegt auf

$$\Delta L/L_0 = \frac{316 \cdot 10^{-9}}{5 \cdot 10^{-2}} = 6,3 \cdot 10^{-6} \text{ bzw. } 6,3 \cdot 10^{-4} \%$$

(bei einer Probenlänge von 5 cm). Werden aber außerdem die Interferenzminima oder zusätzlich noch die Halbwerte der Amplituden registriert, so kann die Auflösung nochmals halbiert bzw. geviertelt werden.

### 3.2 Probenform und Herstellung

Als Proben wurden Vierkantstäbchen mit einer Länge von ca. 50 mm und einem quadratischen Querschnitt mit einer Seitenlänge zwischen 10 und 14 mm verwendet (die Querschnittsfläche mußte nur so groß sein, daß die Probe gut auf dem Spiegel stand).

Die Probenlänge sollte hinsichtlich einer hohen Meßgenauigkeit möglichst groß sein. Zum anderen entsteht bei zu langen Proben ein Temperaturgradient im Probenraum, der die Temperaturgenauigkeit reduziert.

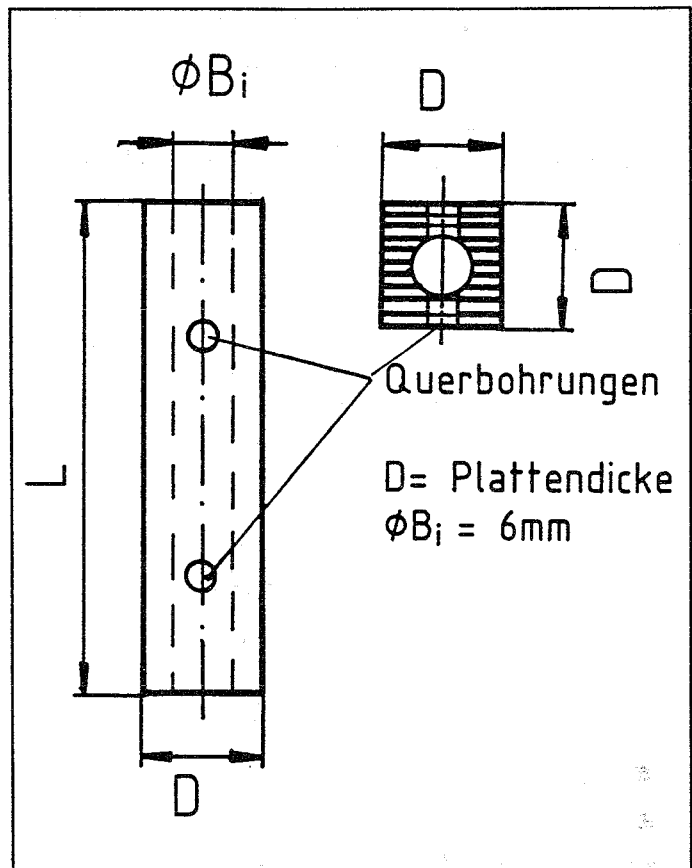


Abb. 8 : Probengeometrie

Deshalb wurden 50 mm lange Proben gewählt, bei denen der Temperaturgradient vernachlässigbar ist.

Ein wichtiger Punkt bei der Probenherstellung war die Planparallelität der Stirnflächen.

Nur wenn die Stirnflächen und damit auch die anliegenden Spiegel eine Abweichung von unter 5/100 mm hatten, konnte ein sauberes Interferenzbild eingestellt werden. Ansonsten traten störende Nebeninterferenzen auf, bzw. es war überhaupt kein Bild mehr detektierbar (die beiden rücklaufenden Laserstrahlen liefen auseinander). In einigen Fällen war eine Nachbearbeitung per Hand nötig um die geforderte Toleranz einzuhalten.

Die Proben wurden aus Platten herausgeschnitten, die bei Messerschmitt-Bölkow-Blohm, Werk Ottobrunn, hergestellt worden sind.

Für die Platten wurden je nach Dicke 81 bis 110 Lagen unidirektionales Prepregmaterial per Hand mit alternierendem Verbundwinkel in eine Aushärteform geschichtet.

Dann wurden die Prepregs bei 90 °C 40 min lang unter Druck vorverdichtet und schließlich das Laminat erst 2 h bei 80 °C und dann 1 h bei 135 °C ausgehärtet.

Um innere Spannungen abzubauen kamen die Proben nach dem Aushärten noch längere Zeit in einen Temperofen.

Es wurden drei Prepregmaterialien für die Messungen ausgewählt :

- V913/132/35/T800 H : HT Carbon-Faser T800 von Toray mit mitteltemperaturbeständigem (bis 80°C) Epoxidharz-System V913 von Vicotex.
- V913/35/135/M40 B-6K : HM Carbon-Faser M40 von Toray (mit 6000 Filamenten pro Faser) ebenfalls mit Epoxidharz-System V913 von Vicotex.
- F913/K-49-5-38 : Kevlar 49 - Faser von Du Pont in Epoxidharz-System F913 von Fiberite.

Aus diesen Materialien wurden jeweils Proben mit einer Fasernanordnung von UD 0°, +/-30°, +/-45°, +/-60°, UD 90° und [0°/90°] hergestellt.

Nach Angaben von MBB hatte der Faservolumenanteil (FVA) der einzelnen Proben folgende Werte (in Vol.%) :

#### T800/EP-Harz

|                   |        |
|-------------------|--------|
| UD 0°, UD 90°     | : 58 % |
| +/- 30°, +/- 60°  | : 57 % |
| +/- 45°, [0°/90°] | : 56 % |

#### M40/EP-Harz

|                   |        |
|-------------------|--------|
| UD 0°, UD 90°     | : 60 % |
| +/- 30°, +/- 60°  | : 58 % |
| +/- 45°, [0°/90°] | : 60 % |

#### Kevlar 49/EP-Harz

|                   |        |
|-------------------|--------|
| UD 0°, UD 90°     | : 60 % |
| +/- 30°, +/- 60°  | : 60 % |
| +/- 45°, [0°/90°] | : 60 % |



Bis zum Zeitpunkt der Messung wurden die Proben unter Vakuum in einem Exsikkator aufbewahrt, da ein Feuchtigkeitsgehalt zu einer Verfälschung der Messung führen kann [6].

### 3.3 Durchführung und Datenbearbeitung

Den prinzipiellen Aufbau des Laser-Dilatometers veranschaulicht das folgende Bild.

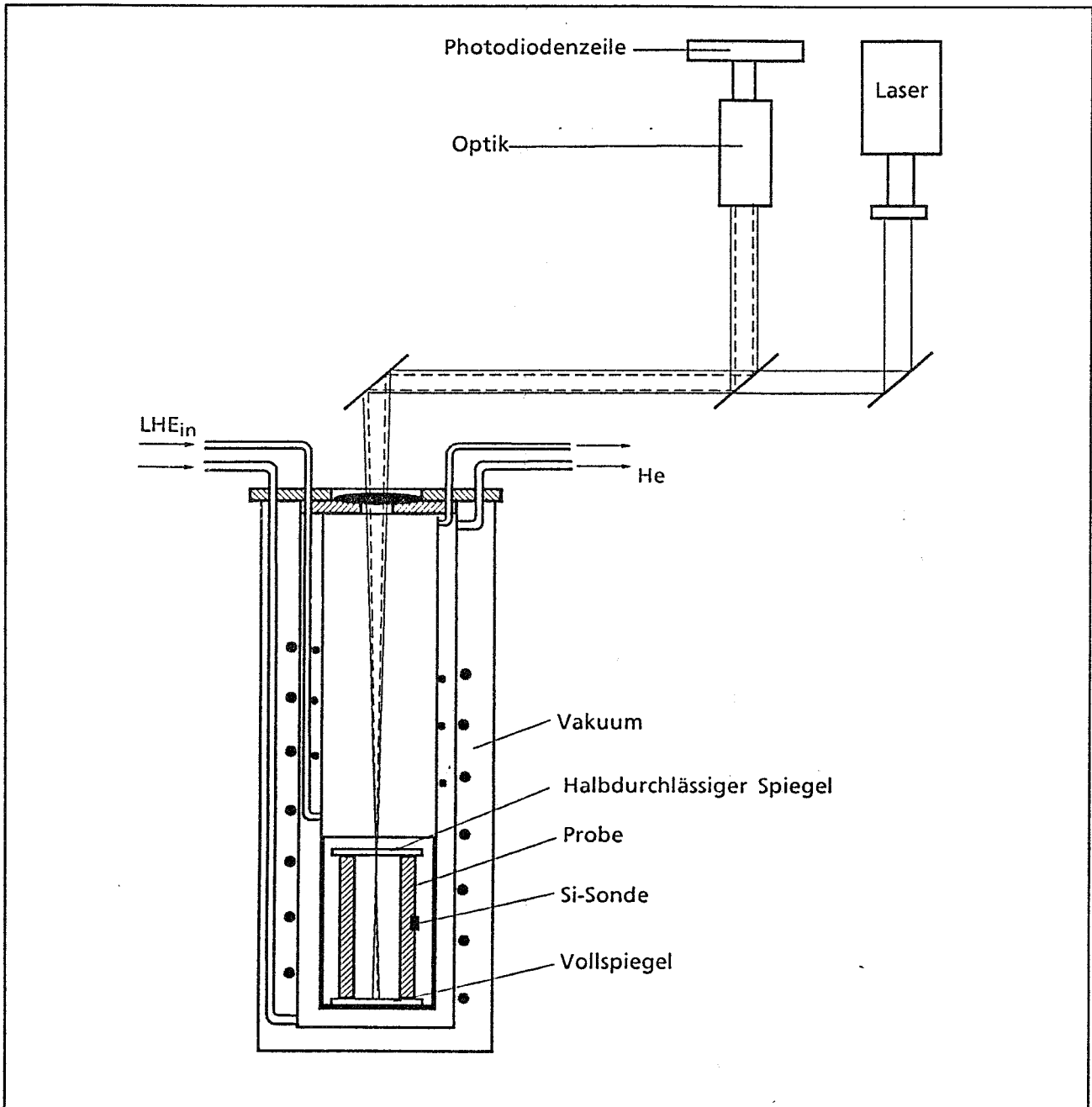


Abb.9 : Versuchsaufbau

Die vorher bei Raumtemperatur ausgemessene Probe befindet sich in einem Verdampferkryostat, der durch Verdampfen einer steuerbaren Menge von flüssigem Helium gekühlt wird.

Die Abkühlung der Probe geschieht ebenfalls mit Hilfe von Helium als Wärmeübertragungsgas im Probenraum.

Eine Komplikation der Messung bringt die Temperaturabhängigkeit des Brechungsindex von Heliumgas nahe seiner Verdampfungstemperatur mit sich. Die dadurch verursachte Verschiebung der Interferenzringe würde eine nicht existierende Ausdehnung vortäuschen.

Abhilfe schafft man, indem man nach dem Abkühlen auf LHe-Temperatur den Probenraum evakuiert.

Die Messung kann somit nur beim Aufheizvorgang erfolgen. (Das Abkühlen der Probe im evakuierten Probenraum nur durch Wärmestrahlung würde zu lange dauern und wäre somit mit einem unwirtschaftlich hohen LHe-Verbrauch verbunden.)

Die Probe einschließlich der Spiegel wird von einem beheizbaren Kupfermantel umgeben, der ursprünglich dazu konzipiert war, die Spiegel beim Aufheizen etwas wärmer zu halten als die Kryostatwand, um an ihnen ein Kondensieren von Restgasverunreinigungen zu vermeiden.

Da sich jedoch jedesmal das Vakuum bei ca. 40-50 K Kryostattemperatur deutlich verschlechterte und somit einen Meßfehler hervorrief, ging man nun dazu über, die Kryostatwand während der gesamten Messung auf Temperaturen unterhalb dieser 40 K zu halten und die Probe allein durch den Kupfermantel zu erwärmen.

Der Kupfermantel umhüllt die Probenlänge vollständig, wodurch ein longitudinaler Temperaturgradient vermieden wurde.

Das Aufheizen der Probe erfolgte mit durchschnittlich 2 K/min, um eine homogene radiale Temperaturverteilung zu gewährleisten.

Als charakteristische Größe für das Einstellen eines Temperaturgleichgewichtes kann die thermische Relaxationszeit  $\tau_T$  betrachtet werden.

Sie errechnet sich aus der Geometrie der Probe und dem thermischen Diffusionskoeffizienten  $a$  (siehe Anhang).

Bei 10 K und Wärmeleitung in Faserrichtung beträgt die Relaxationszeit ca. 7 Sekunden, bei Wärmeleitung senkrecht zur Faser ca. 9 Sekunden. Zu Raumtemperatur hin streben die Zeiten auseinander und betragen 1,6 bzw. 38 Sekunden.

Man kann bei der Temperaturmessung im ungünstigsten Fall bei RT von einem Fehler von 1,3 K durch den Verzögerungseffekt ausgehen<sup>4</sup>. Bei tieferen Temperaturen entsteht nur ein Fehler von 0,2 K bis 0,6 K.

Die Temperatur wurde mit einer Si-Sonde gemessen, die mit Vakuumschmelzpaste an der Probe kontaktiert war.

Um Fehler durch die Leitungswiderstände zu eliminieren, wurde die Sonde in üblicher Vierleiterschaltung verdrahtet.

Das Interferenzbild wurde über eine Fotodiodenzeile (CCD) als Punktquelle auf einem Oszilloskop dargestellt.

Das manuelle Auslösen eines Zählimpulses erfolgte nach Überschreiten einer Markierungslinie der Wellenberge bzw. -täler.

Die jeweiligen Spannungswerte der Si-Sonde wurden bei jedem Zählereignis automatisch vom Meßprogramm abgerufen und festgehalten.

Nach Erreichen der Endtemperatur von 293 K brach das Meßprogramm automatisch ab und mit Hilfe eines Auswerteprogrammes wurden die Spannungswerte in Temperaturwerte und die Zählimpulse in Dilatation umgerechnet.

Die weitere Auswertung erfolgte auf einem Personalcomputer. Mit den im Rahmen dieser Diplomarbeit erstellten Programmen konnten folgende Funktionen ausgeführt werden :

- die Daten können sofort auf dem Bildschirm grafisch dargestellt werden

- es können auch negative oder wechselnde Ausdehnungskoeffizienten dargestellt werden

- die Berechnung von  $\alpha$  beruht hier auf einer direkten numerischen Ableitung der integralen Dilatationskurve. Der Ablauf dabei ist wie folgt :

---

<sup>4</sup> bei einer Aufheizgeschwindigkeit von 2 K/min

Zuerst werden die Meßpunkte mit einer kubischen Spline-Funktion verbunden, um bei jeder beliebigen Temperatur eine Ableitung der Kurve bekommen zu können.

Dann wird die Ableitung der Kurve bei einer Temperatur  $T$  berechnet, indem die Steigung der Regressionsgeraden durch die Kurvenpunkte bei  $T-20$  K,  $T-10$  K,  $T$ ,  $T+10$  K und  $T+20$  K ermittelt wird (Glättung von meßgenauigkeitsbedingten Schwankungen).

Dieser Vorgang wird mit in 10-Grad-Schritten gesteigerten Temperaturen wiederholt.

Diese Vorgehensweise erklärt, warum das  $\alpha$  nur für einen um 20 K von oben und unten beschnittenen Temperaturbereich berechnet wurde.

Die  $\alpha$ -Werte der Wiederholungsmessungen wurden abschließend gemittelt und die so berechneten Werte noch mit einem Polynom 7.Grades gefittet, wobei bei diesem  $\alpha=0$  für  $T=0$  fixiert wurde.

Die so gefundene Kurve lieferte in allen Fällen eine sinnvolle Anpassungen an die berechneten Werte der einzelnen Messungen.

Die Ausdehnungskoeffizienten in der Meßwertetabelle für 293 K wurden durch Extrapolation der jeweiligen Fittkurve und gleichzeitiger Überprüfung der  $\Delta L/L_0$ -Kurve<sup>5</sup> ermittelt.

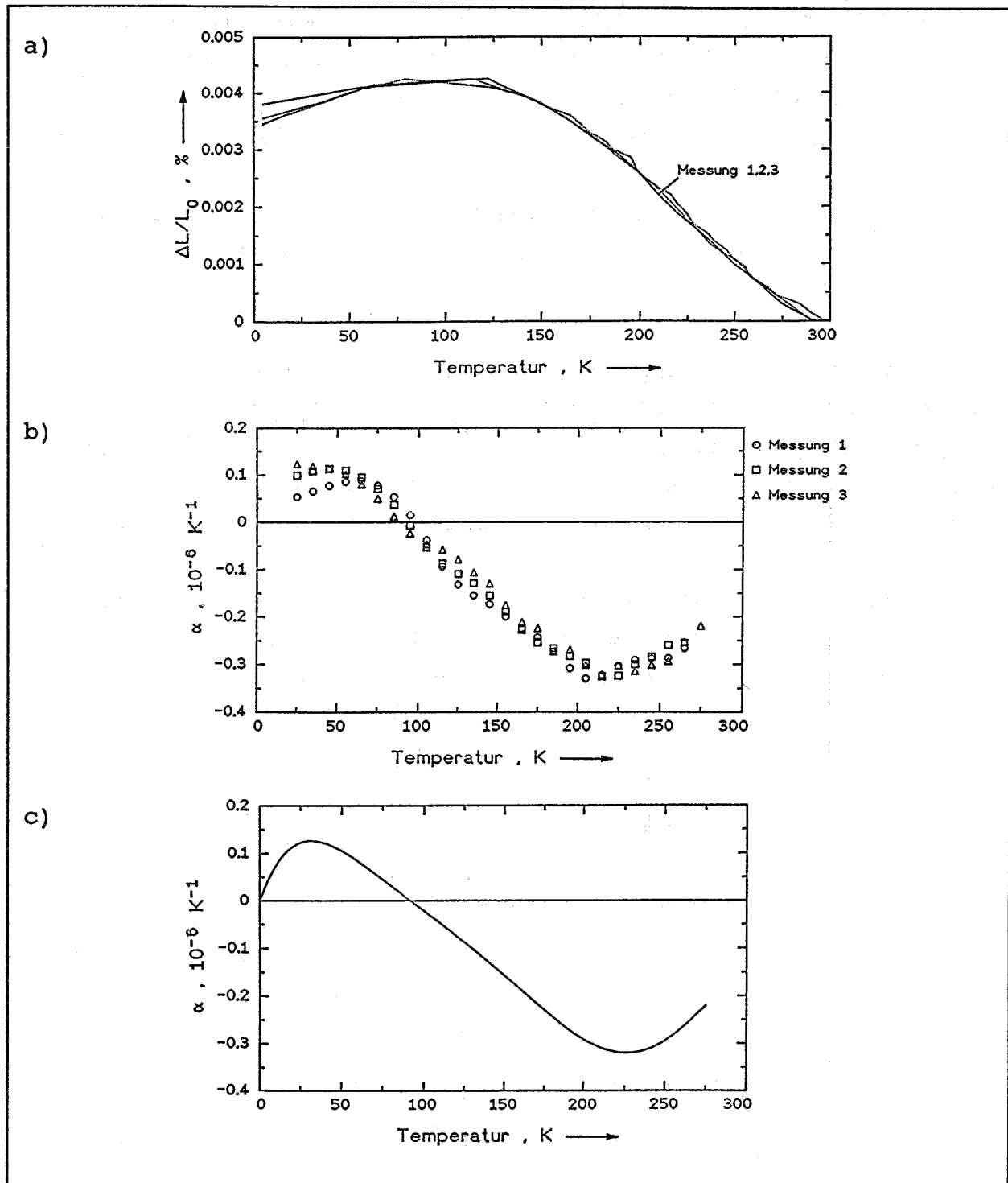
---

<sup>5</sup> es wurde überprüft, wie sich die Steigung zwischen 275 K und 293 K ändert.

#### 4. MESSERGEBNISSE

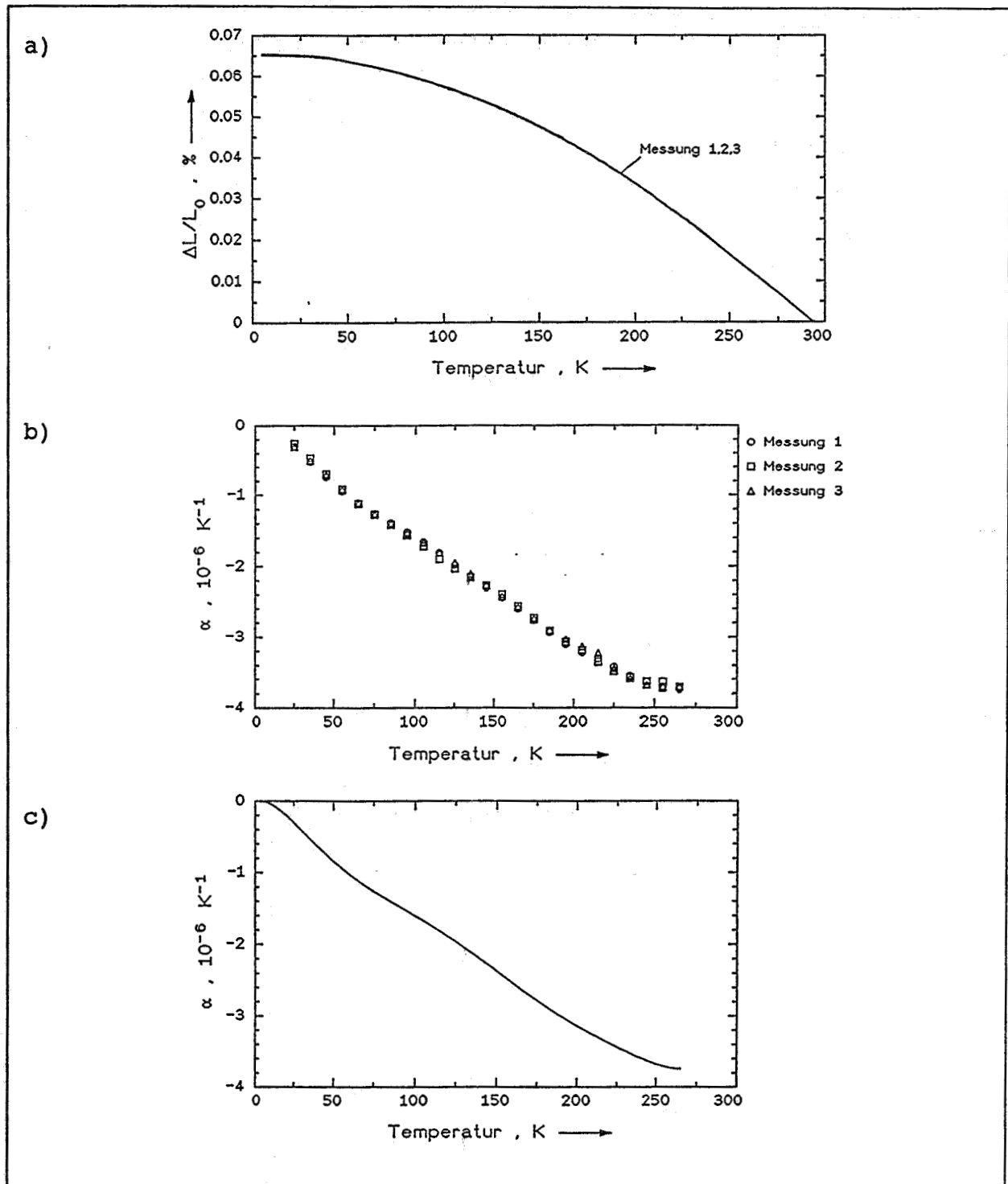
##### 4.1 Meßkurven ( $\Delta L/L_0$ und $\alpha$ )

### T800-Carbonfaser/EP-Harz : UD 0°



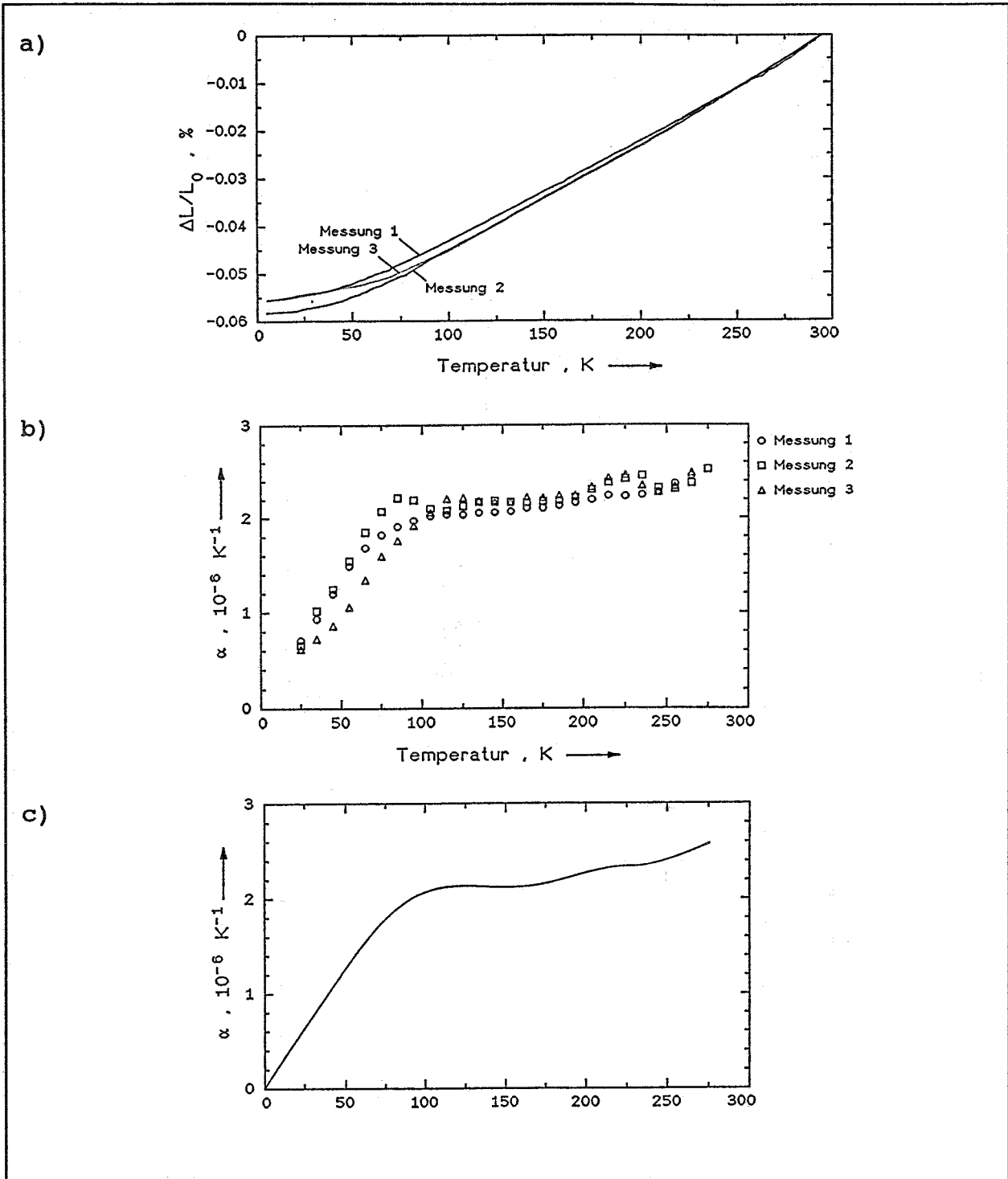
**Abb.10 :** a) Integrale thermische Ausdehnung (gemessen)  
b) Thermischer Ausdehnungskoeffizient (Kurven aus Abb.10a differenziert)  
c) Thermischer Ausdehnungskoeffizient (geglättete Mittelwertkurve aus Abb.10b)

## T800-Carbonfaser/EP-Harz : +/- 30°



**Abb.11 :** a) Integrale thermische Ausdehnung (gemessen)  
 b) Thermischer Ausdehnungskoeffizient  
 (Kurven aus Abb.11a differenziert)  
 c) Thermischer Ausdehnungskoeffizient  
 (geglättete Mittelwertkurve aus Abb.11b)

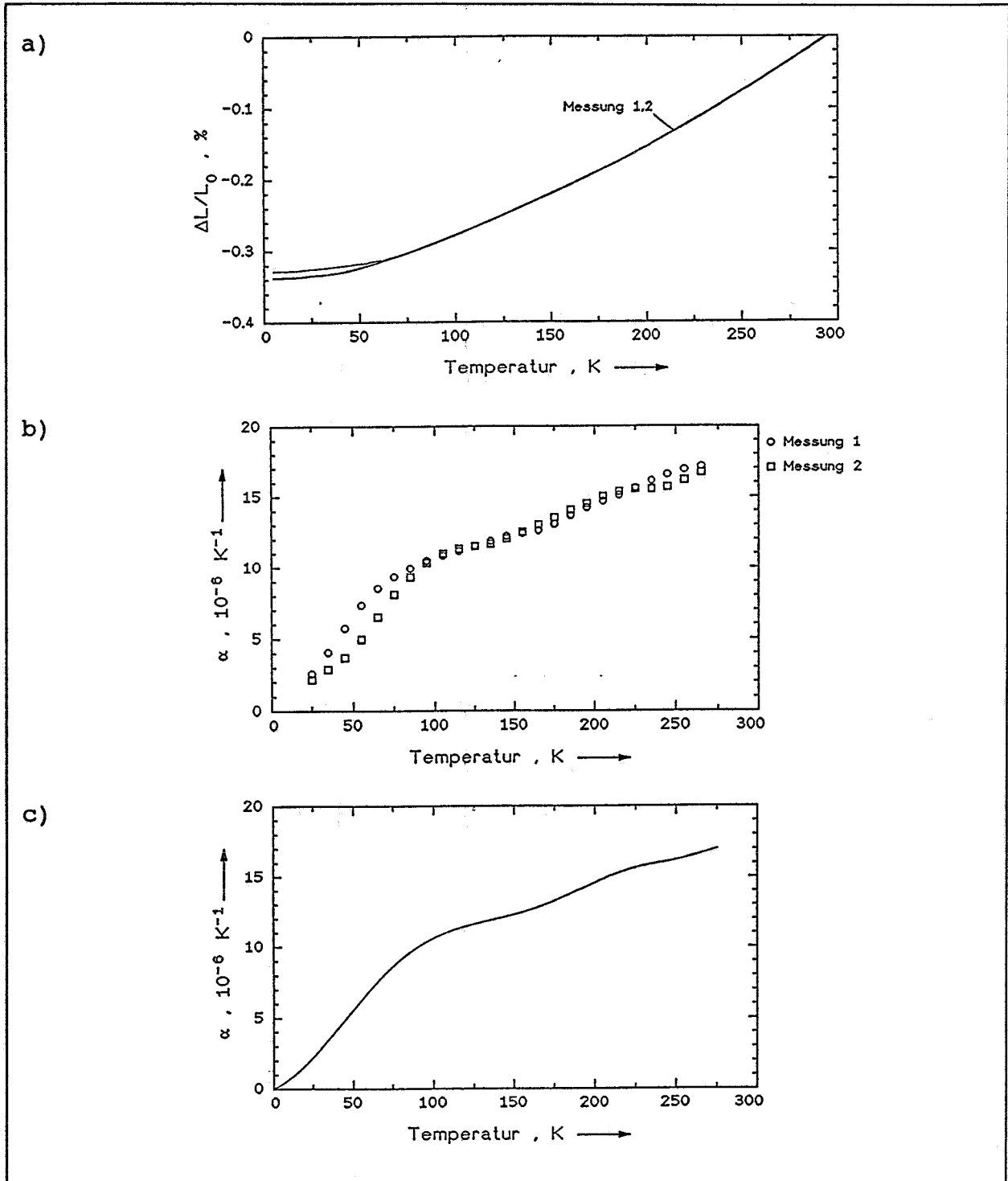
## T800-Carbonfaser/EP-Harz : +/- 45°



**Abb.12 :** a) Integrale thermische Ausdehnung (gemessen)  
 b) Thermischer Ausdehnungskoeffizient (Kurven aus Abb.12a differenziert)  
 c) Thermischer Ausdehnungskoeffizient (geglättete Mittelwertkurve aus Abb.12b)

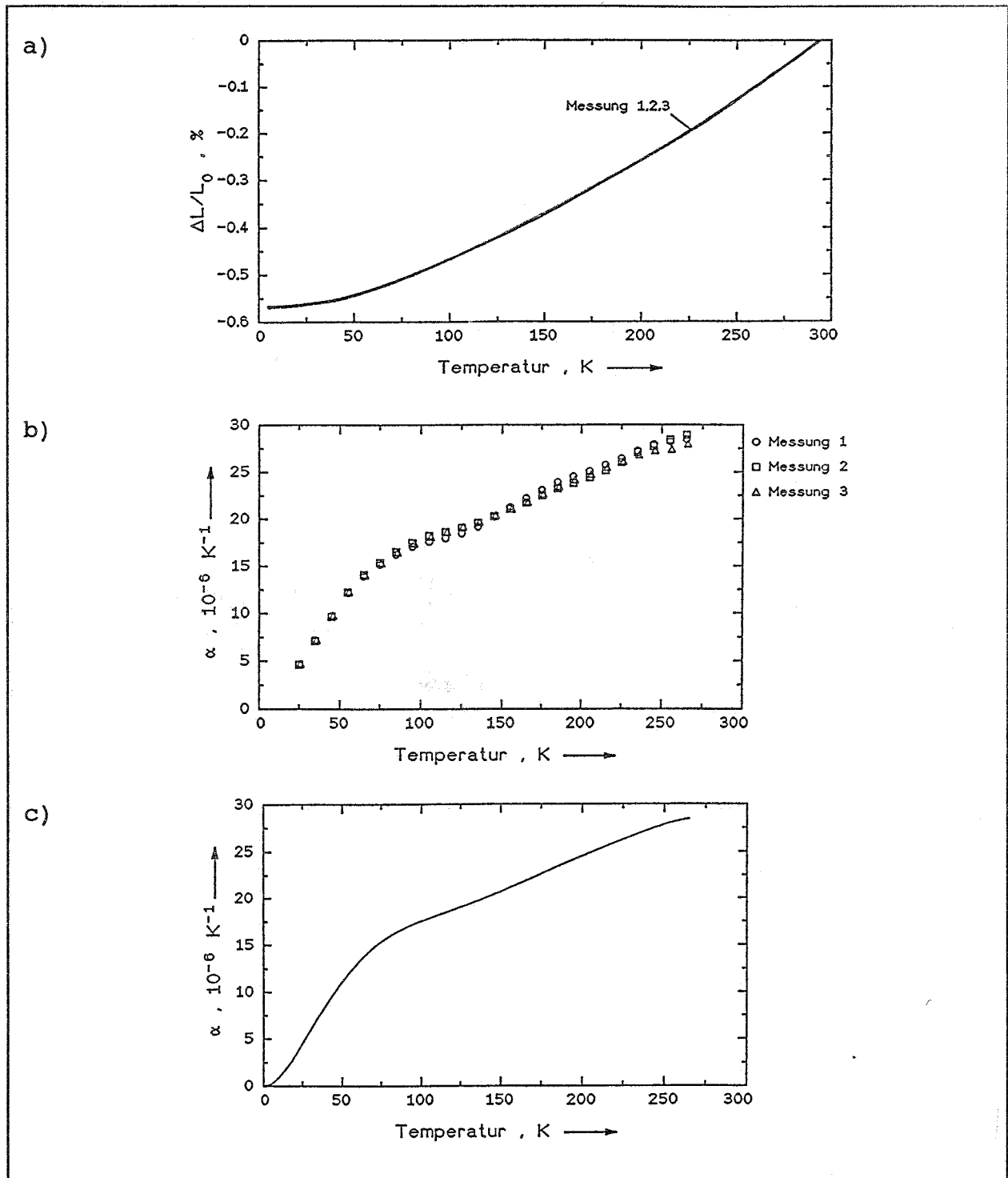


**T800-Carbonfaser/EP-Harz : +/- 60°**



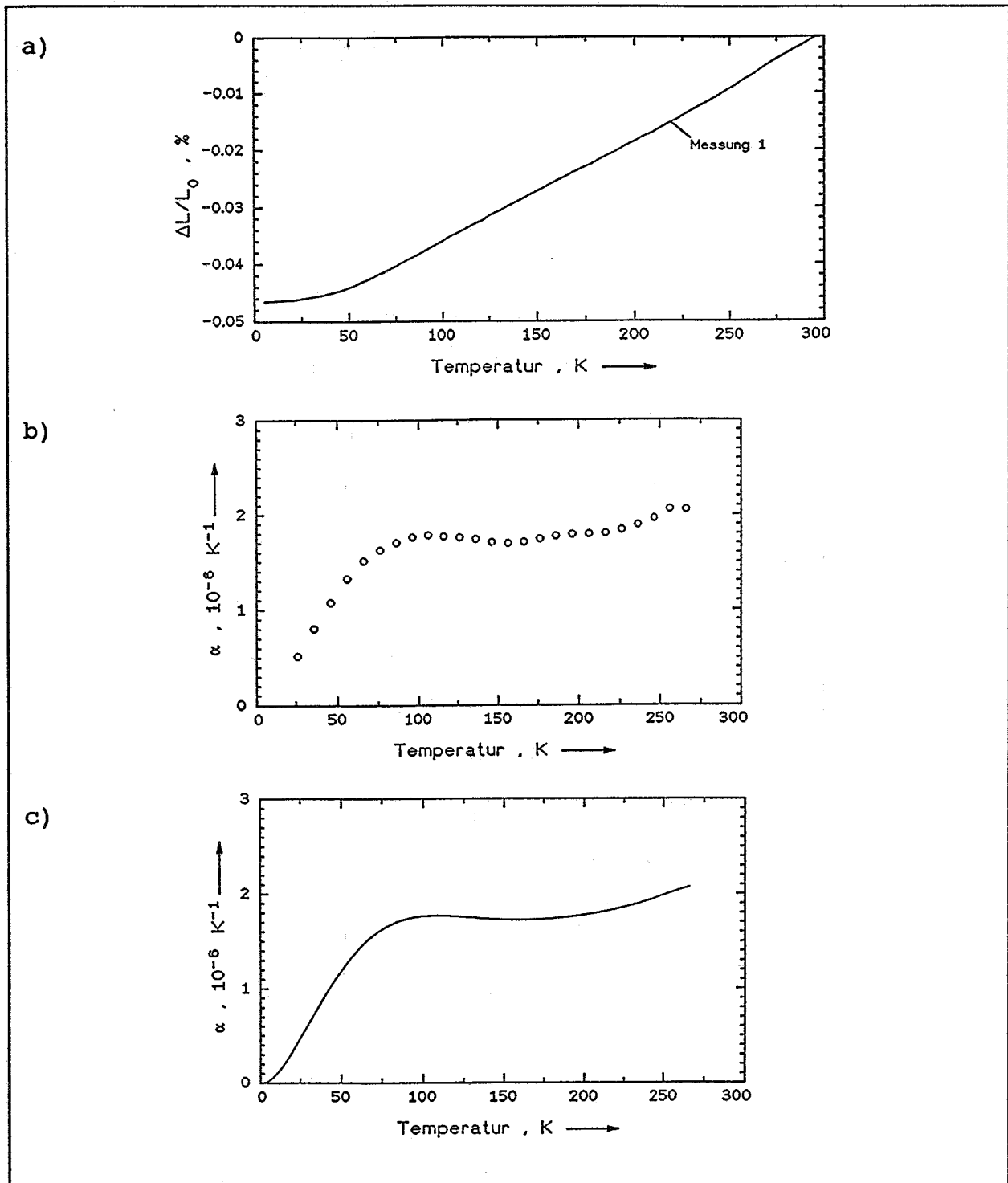
**Abb.13 :** a) Integrale thermische Ausdehnung (gemessen)  
 b) Thermischer Ausdehnungskoeffizient  
 (Kurven aus Abb.13a differenziert)  
 c) Thermischer Ausdehnungskoeffizient  
 (geglättete Mittelwertkurve aus Abb.13b)

## T800-Carbonfaser/EP-Harz : UD 90°



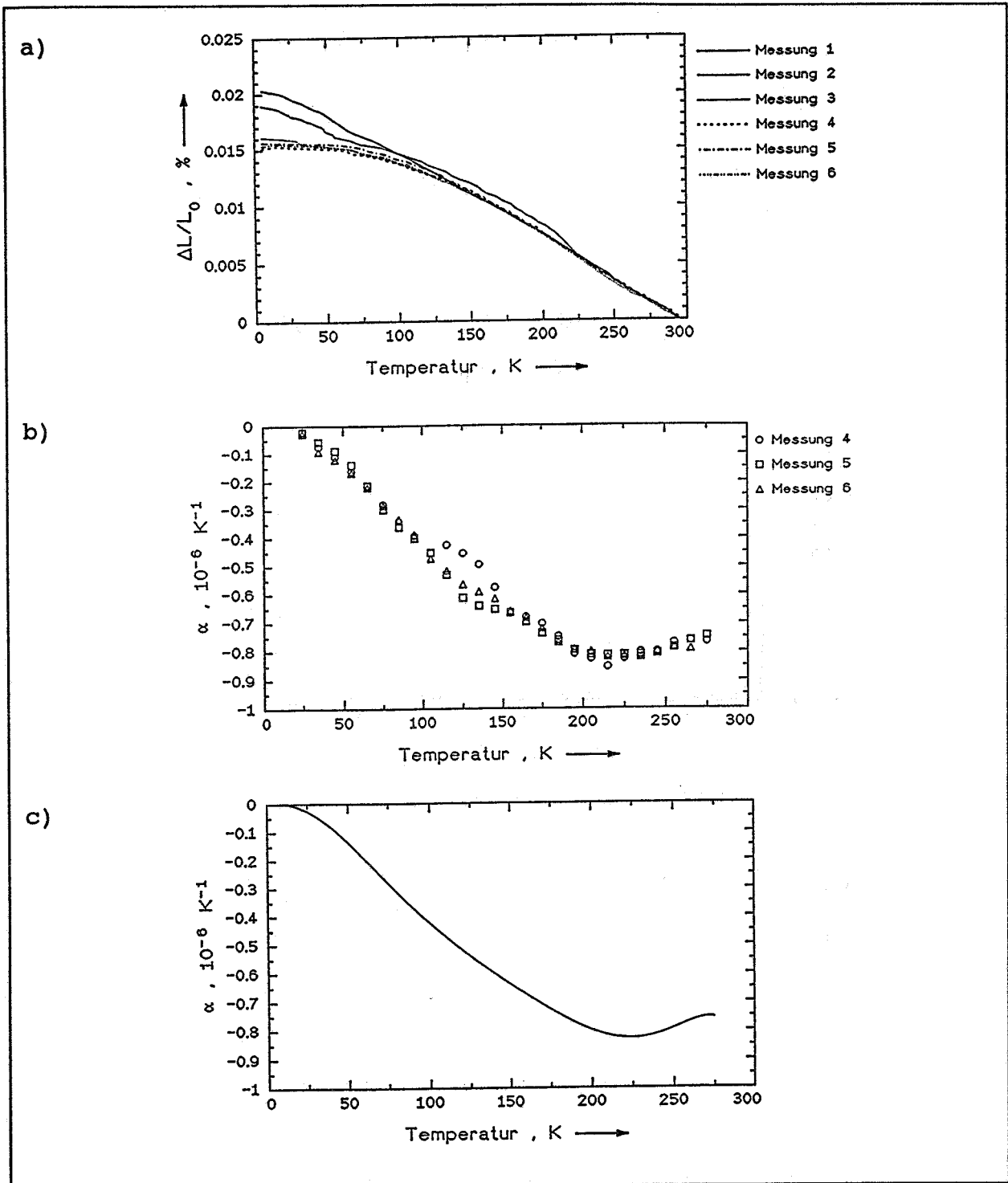
**Abb.14 :** a) Integrale thermische Ausdehnung (gemessen)  
 b) Thermischer Ausdehnungskoeffizient  
 (Kurven aus Abb.14a differenziert)  
 c) Thermischer Ausdehnungskoeffizient  
 (geglättete Mittelwertkurve aus Abb.14b)

## T800-Carbonfaser/EP-Harz : [0°/90°]



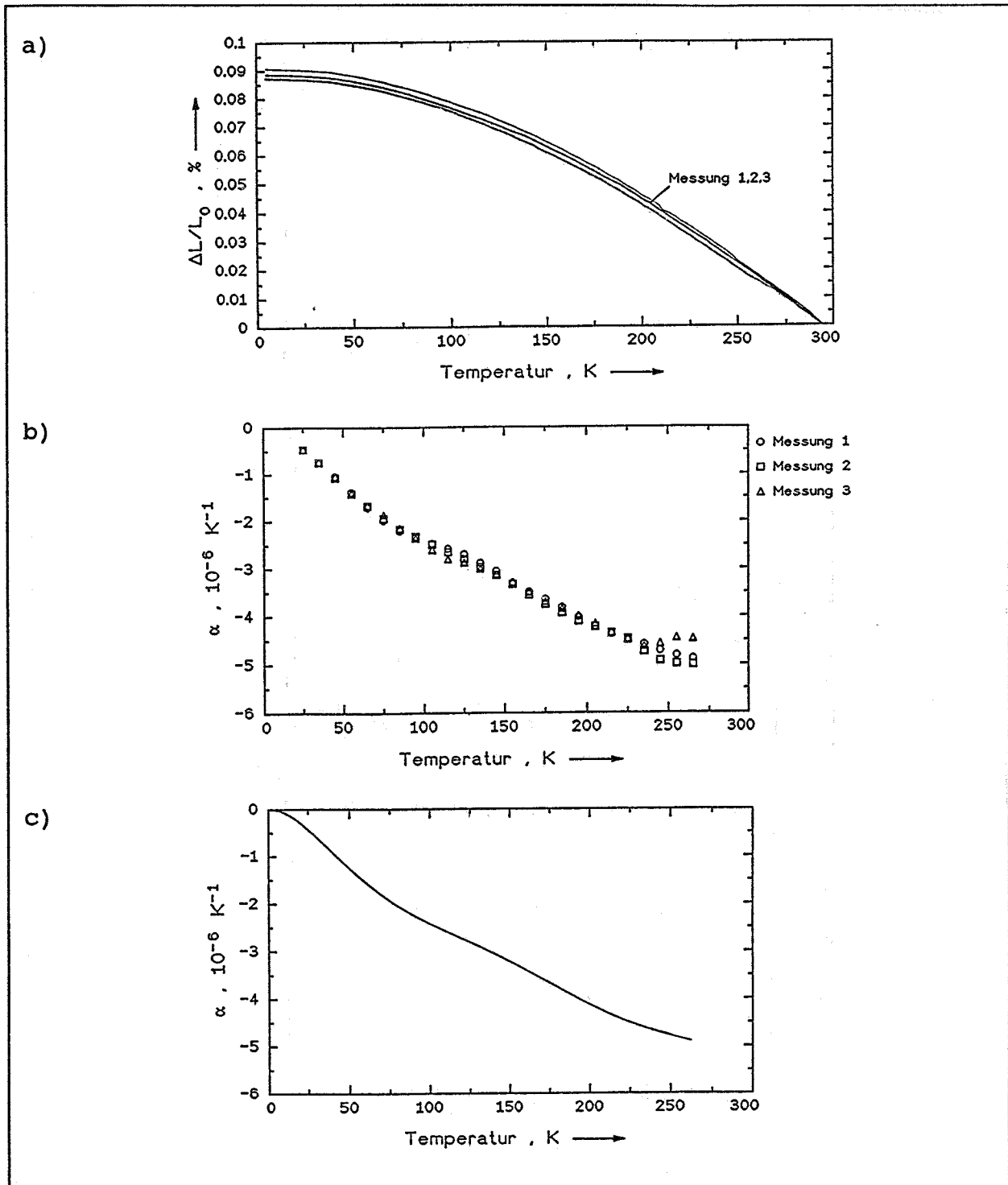
**Abb.15 :** a) Integrale thermische Ausdehnung (gemessen)  
b) Thermischer Ausdehnungskoeffizient  
(Kurven aus Abb.15a differenziert)  
c) Thermischer Ausdehnungskoeffizient  
(geglättete Mittelwertkurve aus Abb.15b)

## M40-Carbonfaser/EP-Harz : UD 0°



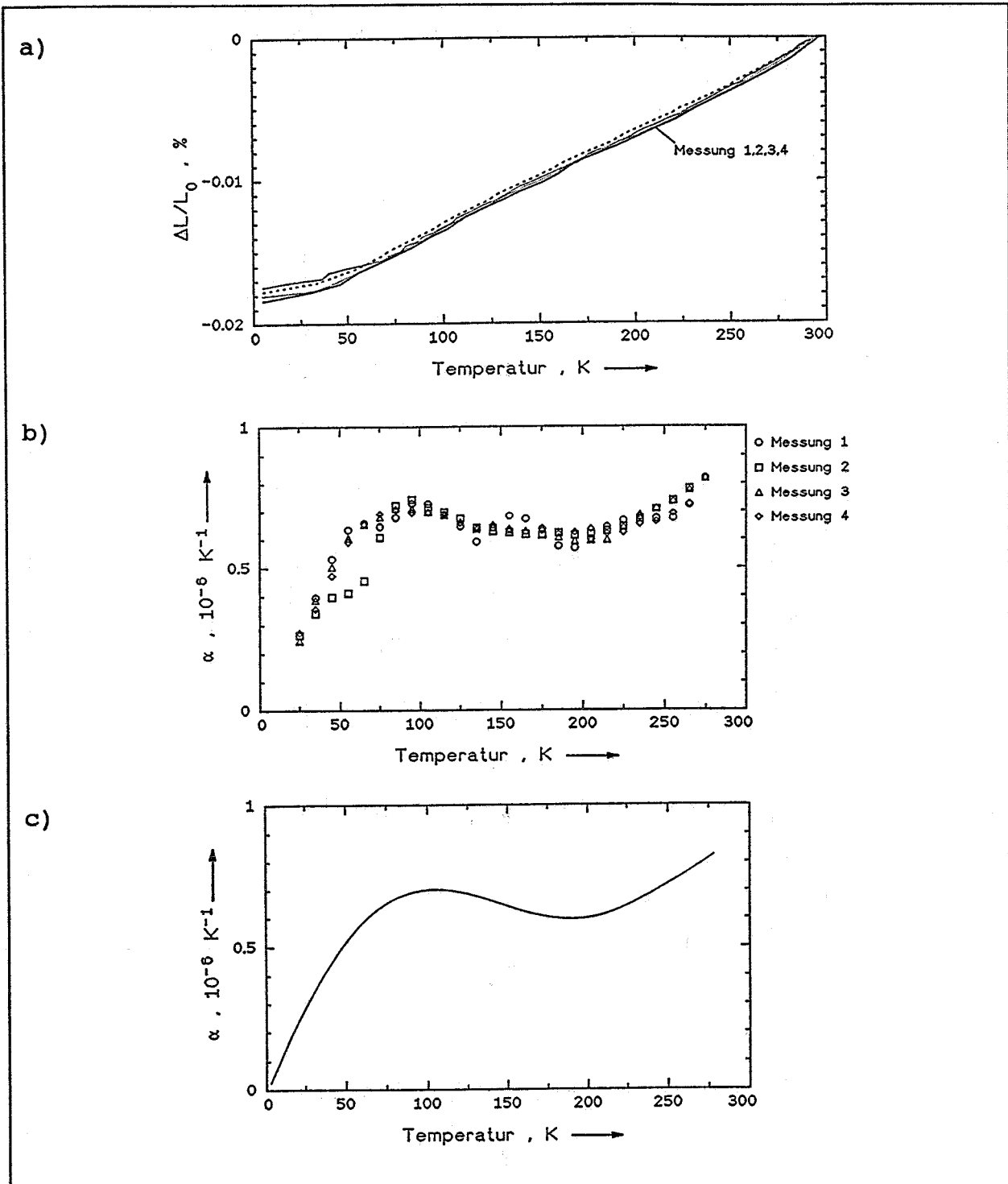
**Abb.16 :** a) Integrale thermische Ausdehnung (gemessen)  
 b) Thermischer Ausdehnungskoeffizient  
 (Kurven aus Abb.16a differenziert)  
 c) Thermischer Ausdehnungskoeffizient  
 (geglättete Mittelwertkurve aus Abb.16b)

M40-Carbonfaser/EP-Harz : +/- 30°



**Abb.17 :** a) Integrale thermische Ausdehnung (gemessen)  
 b) Thermischer Ausdehnungskoeffizient (Kurven aus Abb.17a differenziert)  
 c) Thermischer Ausdehnungskoeffizient (geglättete Mittelwertkurve aus Abb.17b)

## M40-Carbonfaser/EP-Harz : +/- 45°



**Abb.18 :** a) Integrale thermische Ausdehnung (gemessen)  
 b) Thermischer Ausdehnungskoeffizient  
 (Kurven aus Abb.18a differenziert)  
 c) Thermischer Ausdehnungskoeffizient  
 (geglättete Mittelwertkurve aus Abb.18b)

M40-Carbonfaser/EP-Harz : +/- 60°

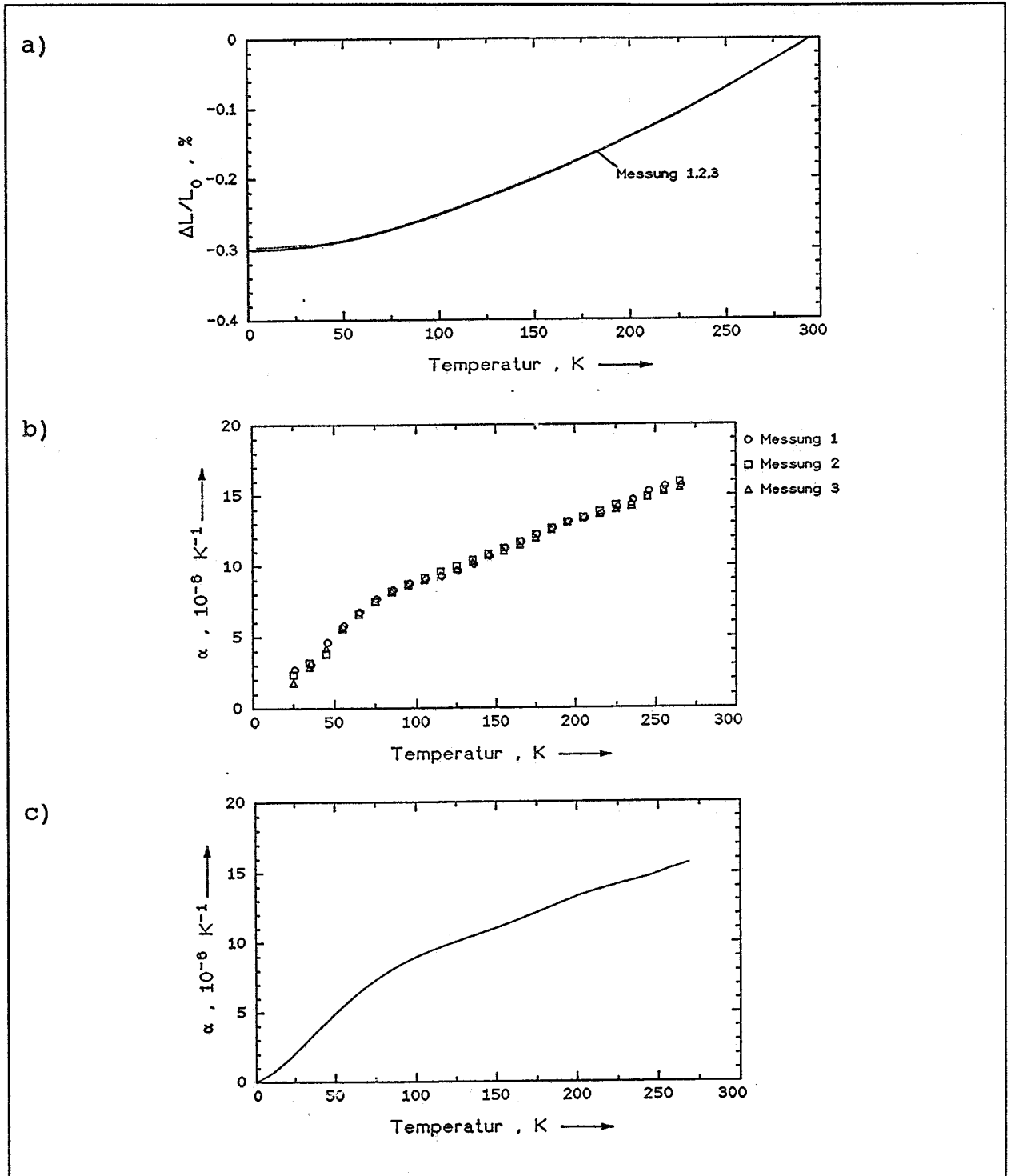
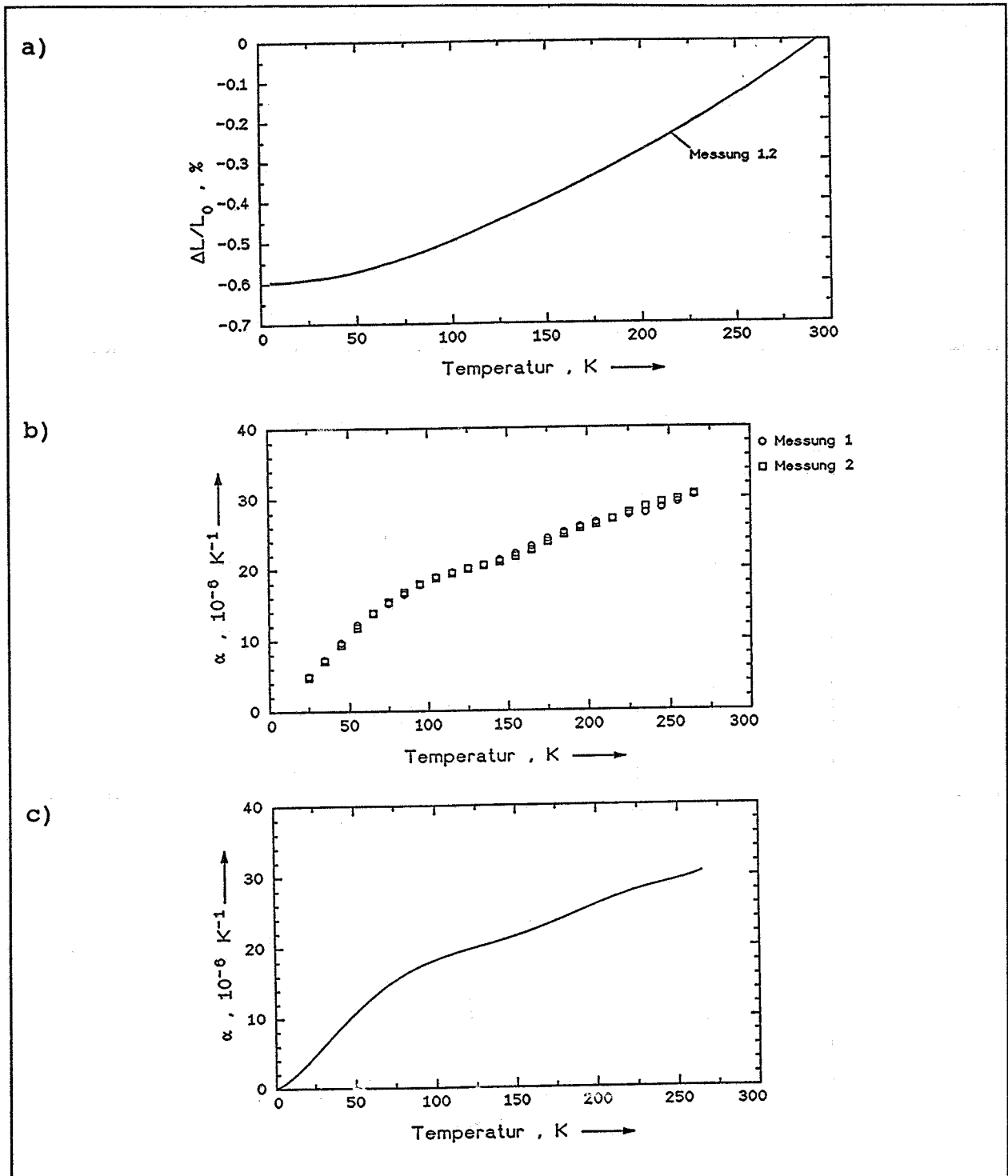


Abb.19 : a) Integrale thermische Ausdehnung (gemessen)  
 b) Thermischer Ausdehnungskoeffizient  
 (Kurven aus Abb.19a differenziert)  
 c) Thermischer Ausdehnungskoeffizient  
 (geglättete Mittelwertkurve aus Abb.19b)

## M40-Carbonfaser/EP-Harz : UD 90°



**Abb.20 :** a) Integrale thermische Ausdehnung (gemessen)  
 b) Thermischer Ausdehnungskoeffizient (Kurven aus Abb.20a differenziert)  
 c) Thermischer Ausdehnungskoeffizient (geglättete Mittelwertkurve aus Abb.20b)



M40-Carbonfaser/EP-Harz : [0°/90°]

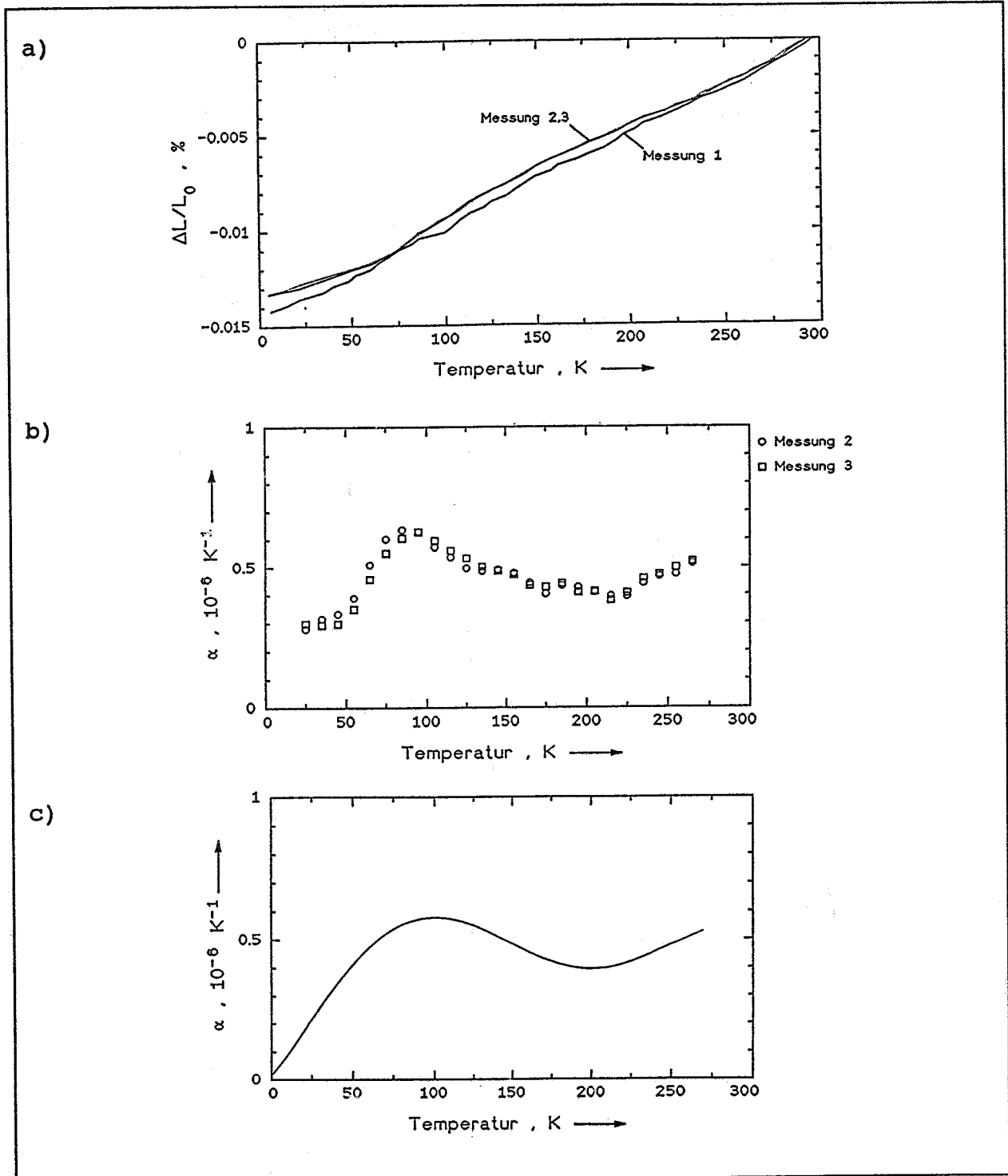
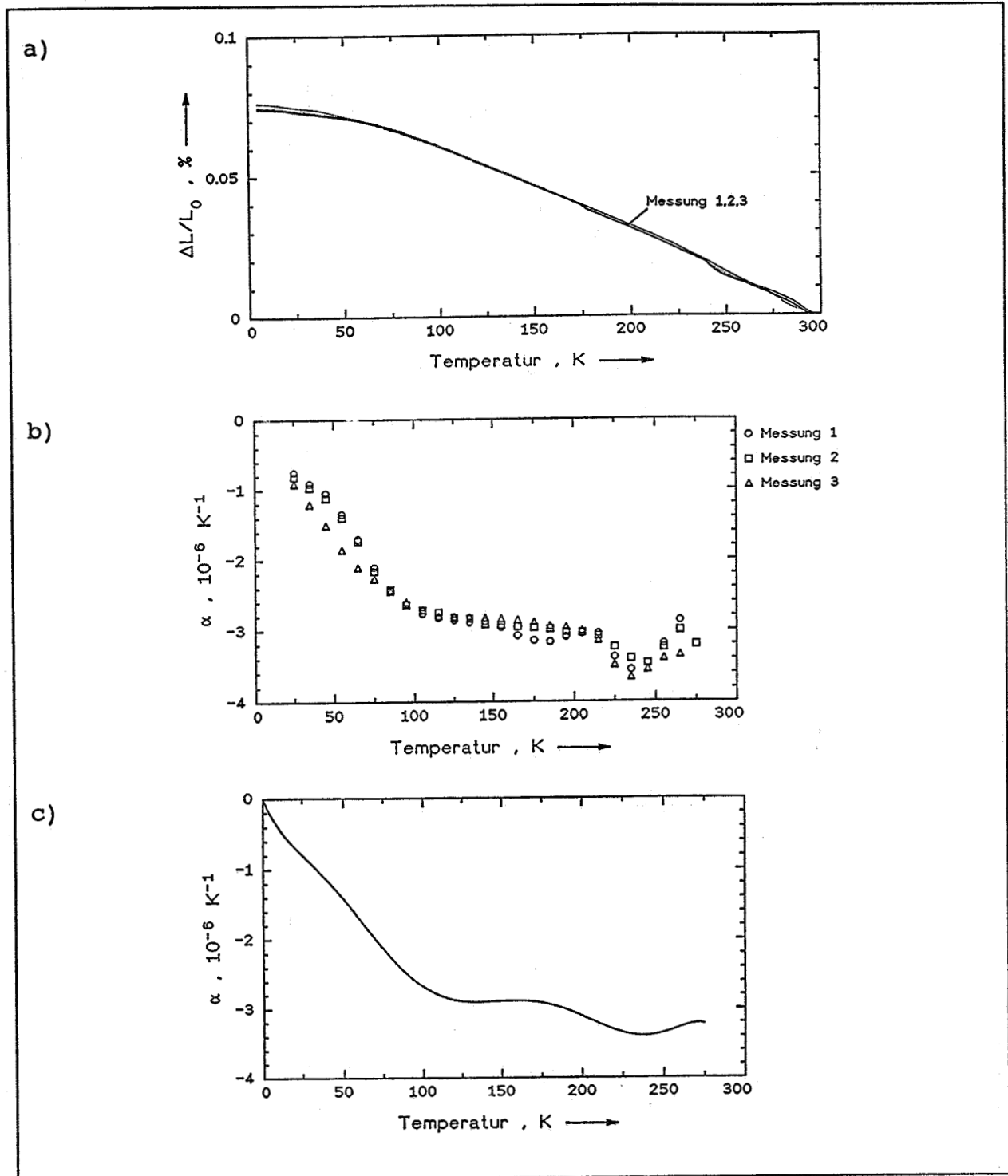


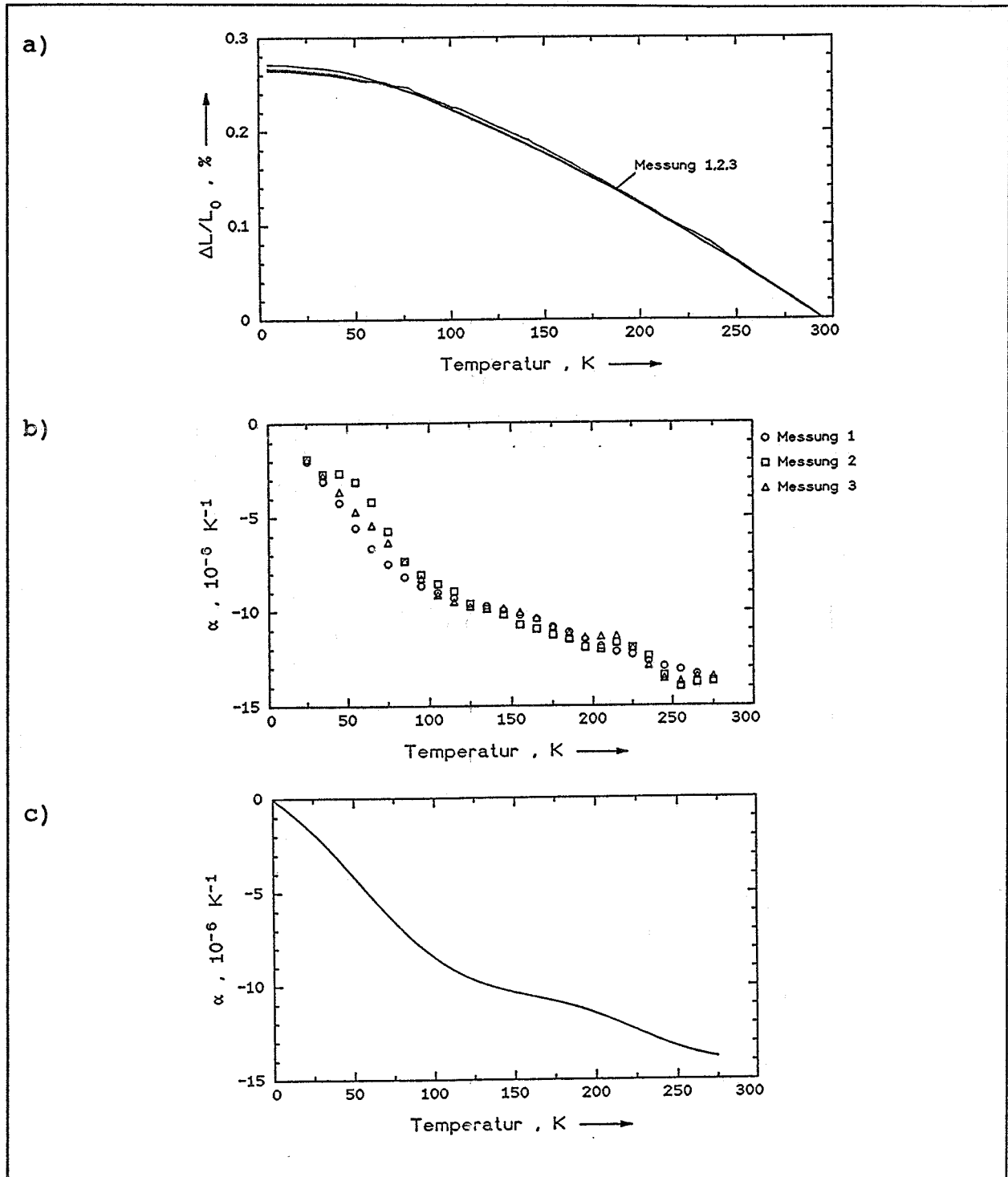
Abb.21 : a) Integrale thermische Ausdehnung (gemessen)  
 b) Thermischer Ausdehnungskoeffizient (Kurven aus Abb.21a differenziert)  
 c) Thermischer Ausdehnungskoeffizient (geglättete Mittelwertkurve aus Abb.21b)

## Kevlarfaser/EP-Harz : UD 0°



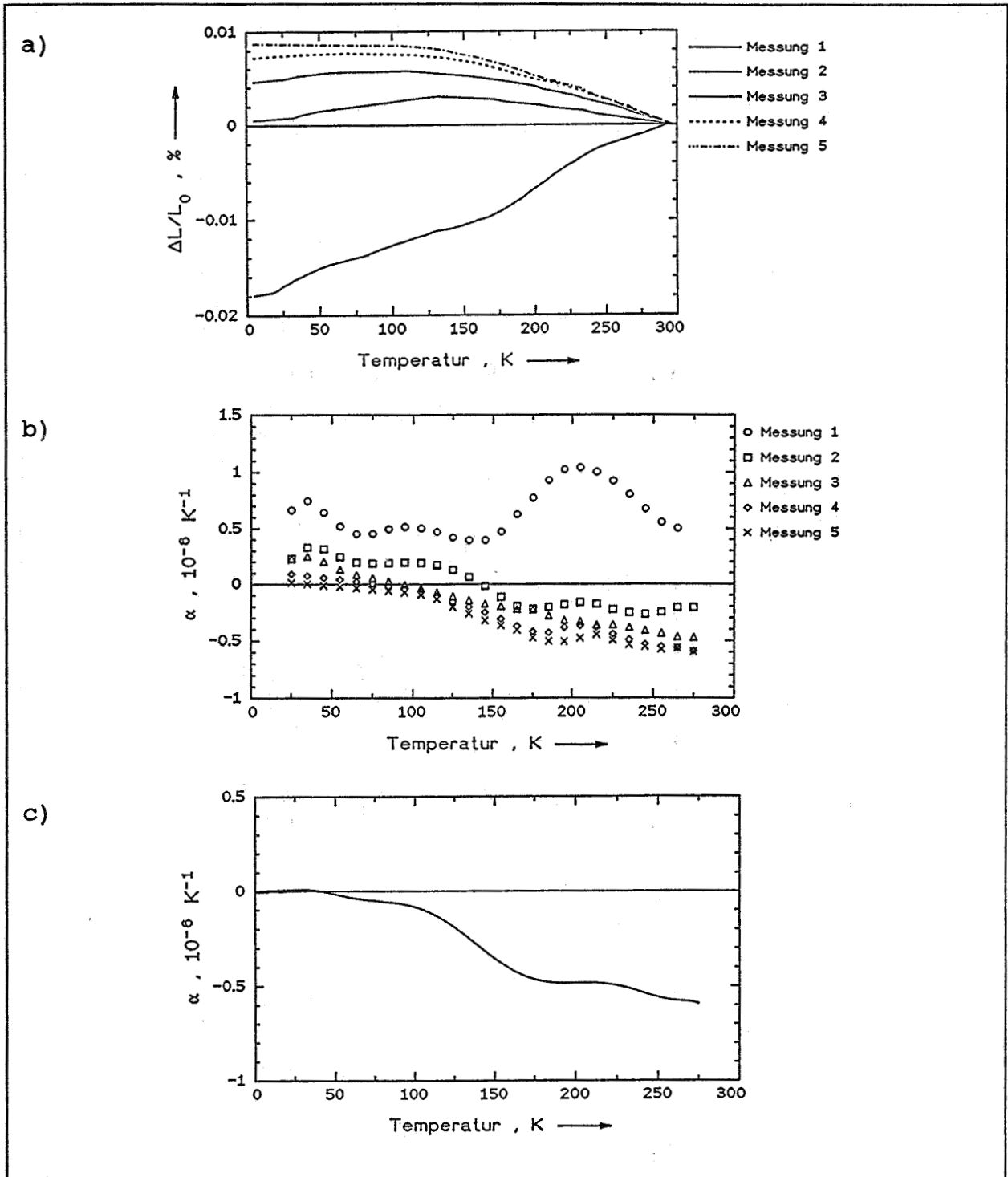
**Abb.22 :** a) Integrale thermische Ausdehnung (gemessen)  
 b) Thermischer Ausdehnungskoeffizient  
 (Kurven aus Abb.22a differenziert)  
 c) Thermischer Ausdehnungskoeffizient  
 (geglättete Mittelwertkurve aus Abb.22b)

Kevlarfaser/EP-Harz : +/- 30°



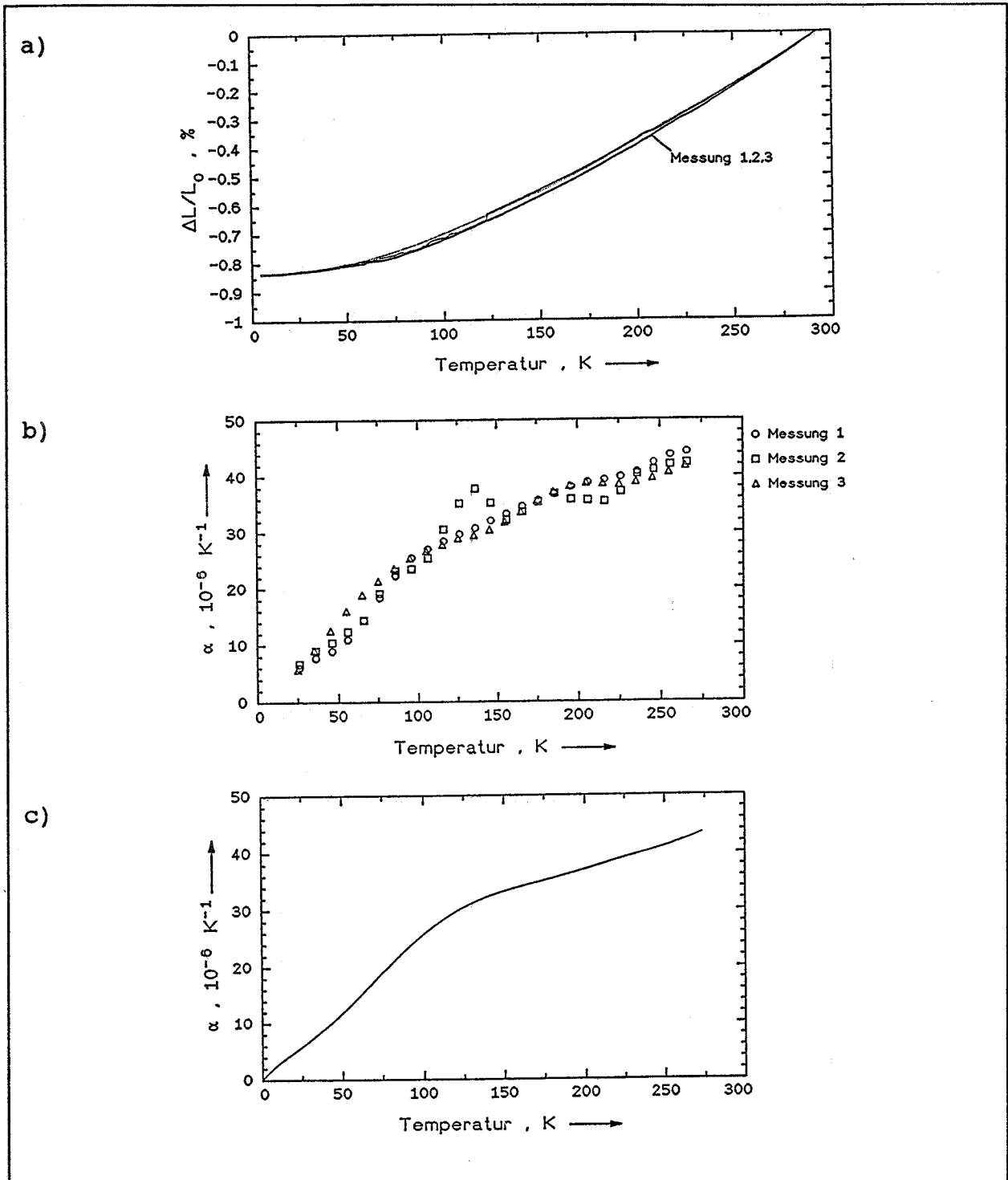
**Abb.23 :** a) Integrale thermische Ausdehnung (gemessen)  
 b) Thermischer Ausdehnungskoeffizient (Kurven aus Abb.23a differenziert)  
 c) Thermischer Ausdehnungskoeffizient (geglättete Mittelwertkurve aus Abb.23b)

## Kevlarfaser/EP-Harz : +/- 45°



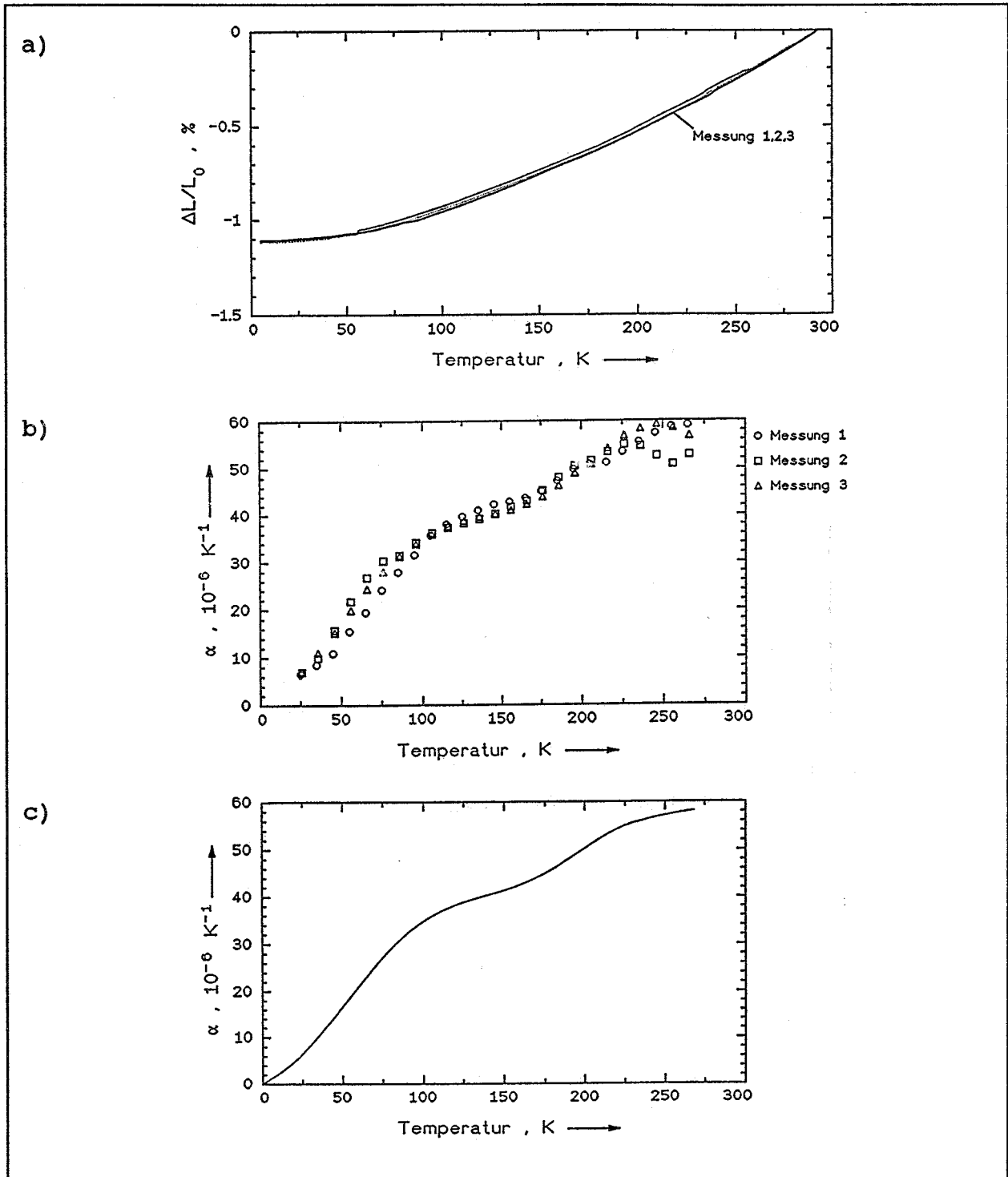
**Abb.24 :** a) Integrale thermische Ausdehnung (gemessen)  
 b) Thermischer Ausdehnungskoeffizient  
 (Kurven aus Abb.24a differenziert)  
 c) Thermischer Ausdehnungskoeffizient  
 (geglättete Mittelwertkurve aus Abb.24b)

Kevlarfaser/EP-Harz : +/- 60°



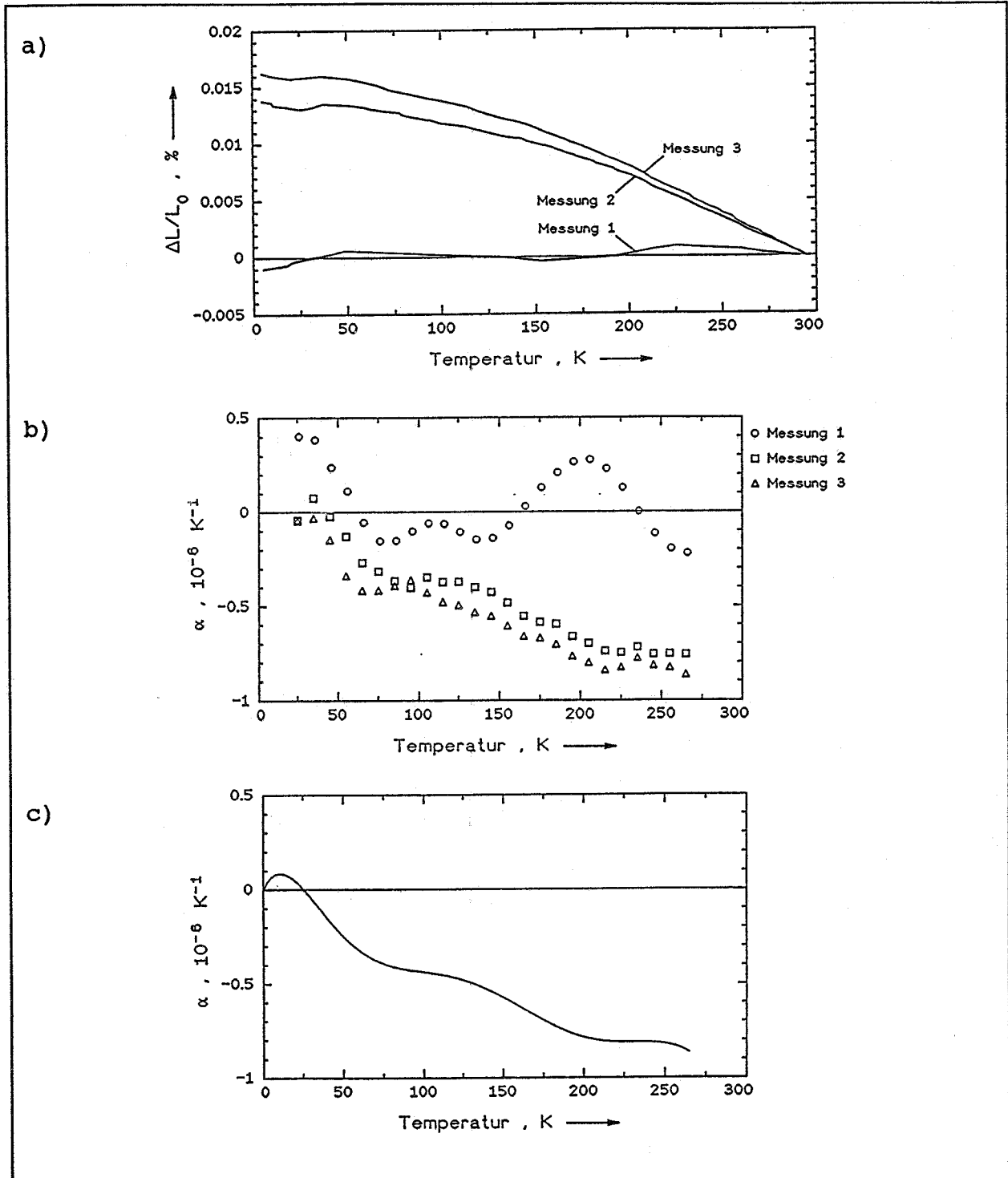
**Abb.25 :** a) Integrale thermische Ausdehnung (gemessen)  
 b) Thermischer Ausdehnungskoeffizient  
 (Kurven aus Abb.25a differenziert)  
 c) Thermischer Ausdehnungskoeffizient  
 (geglättete Mittelwertkurve aus Abb.25b)

## Kevlarfaser/EP-Harz : UD 90°



**Abb.26 :** a) Integrale thermische Ausdehnung (gemessen)  
 b) Thermischer Ausdehnungskoeffizient (Kurven aus Abb.26a differenziert)  
 c) Thermischer Ausdehnungskoeffizient (geglättete Mittelwertkurve aus Abb.26b)

## Kevlarfaser/EP-Harz : [0°/90°]



**Abb.27 :** a) Integrale thermische Ausdehnung (gemessen)  
 b) Thermischer Ausdehnungskoeffizient  
 (Kurven aus Abb.27a differenziert)  
 c) Thermischer Ausdehnungskoeffizient  
 (geglättete Mittelwertkurve aus Abb.27b)

## 4.2 Tabellarische Übersicht

$\alpha$  in  $10^{-6} \text{ K}^{-1}$

|           | 5 K     | 77 K  | 100 K | 150 K | 200 K | 250 K | 293 K |       |
|-----------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| T800/EP   | 0°      | 0,04  | 0,04  | -0,02 | -0,16 | -0,30 | -0,29 | -0,16 |
|           | +/- 30° | 0,0   | -1,3  | -1,6  | -2,3  | -3,1  | -3,7  | -3,8  |
|           | +/- 45° | 0,2   | 1,8   | 2,0   | 2,1   | 2,3   | 2,3   | 2,8   |
|           | +/- 60° | 0,5   | 8,5   | 10,5  | 12,0  | 14,5  | 16,0  | 18,0  |
|           | 90°     | 1,0   | 15,5  | 17,5  | 21,0  | 24,5  | 26,0  | 30,0  |
|           | 0°/90°  | 0,1   | 1,7   | 1,8   | 1,7   | 1,8   | 2,0   | 2,2   |
| M40/EP    | 0°      | 0,00  | -0,29 | -0,41 | -0,65 | -0,80 | -0,80 | -0,75 |
|           | +/- 30° | -0,01 | -2,0  | -2,4  | -3,2  | -4,2  | -4,8  | -5,2  |
|           | +/- 45° | 0,02  | 0,65  | 0,70  | 0,65  | 0,60  | 0,72  | 0,90  |
|           | +/- 60° | 0,2   | 7,2   | 8,9   | 11,0  | 13,2  | 15,0  | 16,8  |
|           | 90°     | 0,5   | 16,0  | 18,0  | 22,0  | 26,0  | 29,5  | 32,0  |
|           | 0°/90°  | 0,05  | 0,53  | 0,57  | 0,48  | 0,40  | 0,48  | 0,60  |
| Kevlar/EP | 0°      | -0,2  | -2,2  | -2,7  | -2,9  | -3,1  | -3,3  | -3,4  |
|           | +/- 30° | -0,4  | -6,8  | -8,5  | -10,5 | -11,5 | -13,5 | -14,0 |
|           | +/- 45° | 0,00  | -0,08 | -0,09 | -0,37 | -0,48 | -0,58 | -0,62 |
|           | +/- 60° | 1,5   | 19,5  | 25,0  | 33,0  | 37,0  | 41,0  | 47,0  |
|           | 90°     | 2,0   | 28,0  | 34,5  | 41,0  | 50,0  | 58,0  | 60,0  |
|           | 0°/90°  | -0,05 | -0,40 | -0,45 | -0,58 | -0,79 | -0,82 | -1,00 |



### 4.3 Diskussion der Messergebnisse

In der Darstellung der Messergebnisse folgten zuerst die Carbonfaser/EP-Verbunde mit T800- und M40-Faser und dann der Kevlarfaser/EP-Verbund.

Dabei wurden jeweils Proben mit folgender Faseranordnung untersucht : UD 0°, +/-30°, +/-45°, +/-60°, UD 90° und [0°/90°].

Nahezu alle Proben wurden mehrmals gemessen, um die Reproduzierbarkeit der Messung zu überprüfen.

Es zeigte sich, daß bei fast allen Proben die Wiederholungsmessungen sehr gut mit den vorangegangenen übereinstimmten, was auf einen kleinen statistischen Fehler (durch Fehler beim manuellen Auslösen der Zählereignisse) schließen läßt.

Besonders gut war die Reproduzierbarkeit bei Messungen mit großer positiver oder negativer Ausdehnung (z.B. UD 90°-Proben), da hier bei der großen Zahl der Meßereignisse (bis zu 1300!) einige Falschzählungen nicht so sehr ins Gewicht fielen.

Die Ergebnisse für eine Faseranordnung wurden zusammen in einer Abbildung (bestehend aus drei Einzelbildern) dargestellt.

Zuerst wurden die Meßkurven der Wiederholungsmessungen gemeinsam in einem Bild aufgetragen, im nächsten die daraus berechneten  $\alpha$ -Werte und im dritten Bild die gefittete Mittelwertkurve des Ausdehnungskoeffizienten.

Die Fitkurven lieferten immer eine befriedigende Anpassung an die Wiederholungsmessungen. Ihre Genauigkeit ist aus den Abweichungen der darüber abgebildeten Einzelkurven abzulesen.

Vier Versuchsreihen fielen jedoch aus diesem Gesamtbild, da sie asymptotisch zulaufende Änderungen der Meßkurven nach jedem Abkühl/Aufheiz-Zyklus zeigten. Es waren dies M40/EP-Proben mit 0° unidirektionalem und [0°/90°]-Kreuzverbundaufbau sowie Kevlar/EP-Proben mit +/- 45° und eben-falls [0°/90°]-Aufbau.

Mögliche Erklärungen dafür werden in den Diskussionspunkten zu den einzelnen Kurven gegeben. Es sei jedoch schon jetzt darauf hingewiesen, daß alle vier Proben eine sehr kleine Ausdehnung aufweisen ( $\alpha$  von -1,0 bis +0,6  $\cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ) und somit die zwar relativ gesehen großen Änderungen absolut gesehen keine große Bedeutung haben.

► Carbonfaserverbunde

zu Abb.10 : T800-Carbonfaser/EP-Harz UD 0°

Als Ausgangspunkt für die folgende Diskussion betrachten wir die in Abschnitt 2.3.1 behandelte Gleichung für  $\alpha_{\parallel}$  von UD-Laminaten :

$$\alpha_{\parallel} = \alpha_{\parallel f} + \frac{\alpha_m - \alpha_{\parallel f}}{\left[ \frac{\phi}{1 - \phi} \frac{E_{\parallel f}}{E_m} + 1 \right]}$$

Die zwei Terme der Gleichung können nun bei verschiedenen Temperaturen dominant sein.

Bei höheren Temperaturen wird die Ausdehnung vor allem vom  $\alpha_{\parallel}$  der Faser bestimmt. Der zweite Term ist deshalb klein, weil  $E_{\parallel}$  der Faser wesentlich größer ist als der E-Modul der Matrix.

Bei niedrigen Temperaturen kann sich das Verhältnis umkehren.

Wird das  $\alpha_{\parallel}$  der Faser gegen den Temperaturnullpunkt verschwindend klein, so wird der zweite Term dominant, wenn das  $\alpha$  der Matrix langsamer gegen 0 geht (Differenz im Zähler wird groß) oder der E-Modul des Harzes stärker ansteigt (Nenner wird klein).

Dadurch erklärt sich das Ausdehnungsverhalten der Probe :

Bei höheren Temperaturen ( $T > 100$  K) dominiert die negative Ausdehnung der Carbonfaser und zu tiefen Temperaturen hin die positive Ausdehnung des Harzes.

Der nochmalige Anstieg von  $\alpha$  zwischen 225 K und Raumtemperatur wurde auch von S.F.H.Parker et al [6] an einem UD 0°-Verbund aus Courtaulds-HTS-Carbonfasern und Fibredux-914C-Harz gefunden.

Er erklärt das lokale Maximum von  $\alpha$  bei RT durch molekulare Umordnungsprozesse im Harz.

Erst der starke Anstieg bei ca.200°C wird durch das Erweichen der Matrix verursacht.

Die Streuung der  $\alpha$ -Werte kommt dadurch zustande, daß wegen der sehr kleinen Ausdehnung der Probe die Auflösungsgrenze der Apparatur eine Rolle spielt.

Die Zählereignisse sind in der Darstellung der integralen Ausdehnung durch Linien verbunden und als Knicke in den Kurven zu erkennen.

zu Abb.11 : T800-Carbonfaser/EP-Harz  $\pm 30^\circ$

Die negative Ausdehnung über den gesamten Temperaturbereich kommt durch die Dominanz der thermisch induzierten interlaminaren Scherspannungen zustande.

Die Messung war ausgezeichnet reproduzierbar, die Kurven lagen fast deckungsgleich aufeinander.

zu Abb.12 : T800-Carbonfaser/EP-Harz  $\pm 45^\circ$

Die hier aufgetretenen Abweichungen von ca. 5 % können nicht von statistischen Fehlern herrühren, da diese sprunghafte und nicht kontinuierliche Abweichungen zufolge haben.

Die wahrscheinlichste Erklärung liegt darin, daß die Probe Feuchtigkeit aufnahm als sie nach der ersten Messung zur Durchführung anderer Messungen herausgenommen und nicht im Exsikkator aufbewahrt wurde (dies geschah nur mit dieser einen Probe). Wie schon von Parker et al [6] vermutet wurde, hat der Feuchtigkeitsgehalt einen Einfluß auf das Ausdehnungsverhalten.

Da sich die Probe bei der dritten Messung schon wieder einige Zeit im Vakuum des Probenraumes befand und beim Aufheizen während Messung 2 Feuchtigkeit abgeben konnte, nähert sich auch die Meßkurve 3 wieder dem Verlauf der ersten Messung an.

Der Verlauf der  $\alpha$ -Kurve bleibt dabei im großen und ganzen gleich.

zu Abb.13 : T800-Carbonfaser/EP-Harz  $\pm 60^\circ$

Für große Verbundwinkel wird das Ausdehnungsverhalten immer mehr von der stark positiven Ausdehnung des Harzes bestimmt.

zu Abb.14 : T800-Carbonfaser/EP-Harz UD  $90^\circ$

Hier gilt annähernd die Mischungsregel aus Abschnitt 2.3.1.

Die Ausdehnung des Verbundes entspricht ca. der halben Ausdehnung von reinem Epoxidharz, woraus folgt, daß das  $\alpha_1$  der Faser ca.  $1/6$  von  $\alpha_m$  beträgt (mit FVA 60 %).

zu Abb.15 : T800-Carbonfaser/EP-Harz  $[0^\circ/90^\circ]$

Von der Laminattheorie ausgehend müßte die Ausdehnung eines  $[0^\circ/90^\circ]$ -Verbundes identisch mit der eines  $\pm 45^\circ$ -Verbundes sein. Die  $\alpha$ -Kurven aus Abb.12 und Abb.15 haben auch tatsächlich einen ähnlichen Verlauf, nur daß die Werte der  $[0^\circ/90^\circ]$ -Probe um ca. 10 bis 20 % unter denen der  $\pm 45^\circ$ -Probe liegen.

Diese Abweichung kann auch bei den beiden anderen Verbundtypen festgestellt werden.

Die Ursache muß in einem Einfluß der Faserlänge auf das Ausdehnungsverhalten gesucht werden: bei den  $[0^\circ/90^\circ]$ -Proben gehen die  $0^\circ$ -Fasern über die gesamte Probenlänge, während die  $90^\circ$ -Fasern, über die Probenbreite gehend, nur relativ kurz sind. Dadurch beeinflussen auch die  $0^\circ$ -Fasern die Ausdehnung mehr und halten sie kleiner als beim  $\pm 45^\circ$ -Verbund. (siehe auch J.M.Gaitonde & M.V.Lowson [7])

Oder anders gesehen: die Wirkung der kurzen Querfasern wird durch Randeffekte an den Seitenflächen stärker vermindert.

Diese Randeffekte werden durch das Auftreten eines  $\tau_{yz}$  und  $\sigma_{zz}$  gekennzeichnet. Solche interlaminaren Spannungen entstehen in Laminaten durch das Mißverhältnis der Poissonzahlen der einzelnen Schichten. Sie können an den freien Kanten von Laminaten besonders

hoch sein. Die Größe und Art<sup>6</sup> der interlaminaren Spannungen hängt stark vom Lagenaufbau und den Materialeigenschaften ab [8]. Nimmt man nun an, daß die Zone in der Randeffekte auftreten an jeder freien Fläche gleich groß ist, so wird die Wirkung der kurzen Querfasern stärker beeinflußt als die der Längsfasern.

zu Abb.16 : M40-Carbonfaser/EP-Harz UD 0°

Die Meßkurven der aufeinanderfolgenden Messungen zeigten nach jedem Abkühl/Aufheiz-Zyklus eine asymptotisch verlaufende Änderung in Richtung positiverer (d.h. weniger negativer) Ausdehnung. Ab der vierten Messung trat keine große Änderung mehr auf, so daß die Messungen 4, 5 und 6 zur Bildung einer Mittelwertkurve von  $\alpha$  herangezogen werden konnten.

Erklärt werden kann das Verhalten durch thermisch bedingte Delamination von Faser und Harz an den Enden der Probenkörper. Das dadurch in seiner Ausdehnung nicht mehr behinderte Harz kann nun beim Aufheizvorgang einen positiven Beitrag zum  $\alpha$  des Verbundes leisten. Werden durch das thermische Zyklieren keine neuen Delaminationen mehr verursacht (alle Spannungsspitzen sind abgebaut), dann kommt auch die Änderung der Ausdehnung zum Stillstand.

Ebenfalls für diese Erklärung spricht der zackige Verlauf der ersten Meßkurven, der einen wiederholten plötzlichen Abbau von Spannungen suggeriert.

Optisch konnte jedoch mit einem Lichtmikroskop an den Probenenden keine Schädigung festgestellt werden. Vergleicht man die Ausdehnung des reinen Harzes (-1,1 % von RT bis 5 K) mit der Ausdehnungsänderung hier (ca.-0,005%), so sieht man, daß es sich auch nur um kleine Bereiche handeln kann. Erfolgversprechender wäre die Untersuchung eines Längsschliffs mit dem Rasterelektronenmikroskop.

---

<sup>6</sup>  $\tau_{yz}$  und  $\sigma_{zz}$  bei [0°/90°]-Laminaten oder  $\tau_{xz}$  bei +/-45° - Laminaten

Mit der C-scan-Methode konnten ebenfalls keine Schädigungen entdeckt werden. Hierbei wird ein fokussierter Ultraschallstrahl durch die Probe geschickt, an der Rückseite reflektiert und dann Intensitätsunterschiede des Echosignals durch Delaminationen oder Lufteinschlüsse gemessen. Das Problem bei der Untersuchung dieser Proben war, daß sich beim Abscannen das Echo an den Probenrändern erst aufbauen muß und somit gerade an den interessanten Stellen keine Delaminationen detektiert werden konnten.

zu Abb.17 : M40-Carbonfaser/EP-Harz +/- 30°

Dieser Winkelverbund zeigt eine stark negative Ausdehnung über den gesamten Temperaturbereich, die bei Raumtemperatur sogar ca. 1/3 der positiven Ausdehnung von Metallen beträgt.

Vergleicht man den M40-Verbund mit dem T800-Verbund gleichen Verbundwinkels, so kann man feststellen, daß der höhere E-Modul der M40-Faser einen noch stärker negativen Ausdehnungskoeffizienten zufolge hat (bei RT:  $\alpha_{M40} = -5,2 \cdot 10^{-6}$  statt  $\alpha_{T800} = -3,8 \cdot 10^{-6}$ ).

zu Abb.18 : M40-Carbonfaser/EP-Harz +/- 45°

Die leicht abweichenden  $\alpha$ -Werte der 2. Messung zwischen 50 und 75 K sind auf ein oder zwei Zacken der Meßkurve in diesem Temperaturbereich zurückzuführen. Diese können aber durchaus durch Fehlzählungen hervorgerufen worden sein, da die weiteren Wiederholungsmessungen keine Abweichungen mehr zeigten.

zu Abb.19 : M40-Carbonfaser/EP-Harz +/- 60°

Hier zeigte sich wieder die sehr gute Reproduzierbarkeit bei Verbunden mit großer Ausdehnung.

zu Abb.20 : M40-Carbonfaser/EP-Harz UD 90°

Der  $\alpha$ -Wert bei RT von  $32,0 \cdot 10^{-6}$  statt  $30,0 \cdot 10^{-6}$  beim äquivalenten T800-Verbund deutet darauf hin, daß auch der Ausdehnungskoeffizient der M40-Faser quer zur Faserrichtung etwas positiver sein muß als der der T800-Faser (Harz und Faservolumengehalt waren annähernd gleich).

zu Abb.21 : M40-Carbonfaser/EP-Harz [0°/90°]

Messung 1 zeigte einen ziemlich zackigen Ausdehnungsverlauf, wogegen Messung 2 und 3 glatter waren und sich gut deckten.

Die Abweichung der Messung 1 kann daraus erklärt werden, daß sich 0°-Schichten in der Probe befinden und hier thermische Delaminationen einen ähnlichen Effekt hervorrufen wie in der UD 0°-Probe (siehe Diskussionspunkt zu Abb.16).

Der prinzipiell ähnliche  $\alpha$ -Verlauf wie bei der +/- 45°-Probe kann auch hier wieder gefunden werden, nur daß hier die Werte 20 bis 30 % darunter liegen (siehe Diskussionspunkt zu Abb.15).

#### ► Kevlarfaserverbunde

zu Abb.22 : Kevlar-49-Faser/EP-Harz UD 0°

Die Ausdehnung wird über den gesamten Temperaturbereich vom stark negativen Ausdehnungskoeffizienten der Kevlarfaser bestimmt.

Hier nimmt schon das  $\alpha$  des UD 0°-Verbundes negative Werte an<sup>7</sup>, die von einem Verbund mit T800-Faser erst mit einem Verbundwinkel von +/- 30° erreicht werden.

---

<sup>7</sup> bei Raumtemperatur

zu Abb.23 : Kevlar-49-Faser/EP-Harz +/- 30°

Bei diesem Verbund erreicht die negative Ausdehnung bei RT Werte der positiven Ausdehnung von Metallen !

Dies kommt zum einen durch den schon stark negativen Ausdehnungskoeffizienten der Faser und zum anderen durch große interlaminare Scherspannungen zwischen den Schichten zustande. Letztere sind bei Kevlarverbunden wegen des relativ niedrigen Schubmoduls des Verbundes besonders hoch, wie Simulationsrechnungen auf der Basis der Laminattheorie gezeigt haben.

zu Abb.24 : Kevlar-49-Faser/EP-Harz +/- 45°

Hier traten bei aufeinanderfolgenden Messungen wieder asymptotisch verlaufende Änderungen der Ausdehnungswerte auf.

Diesmal verliefen die Änderungen jedoch nicht wie bei der M40-UD 0°-Probe in Richtung positiver, sondern negativer Ausdehnung. Es änderte sich dabei sogar das Vorzeichen des Ausdehnungskoeffizienten.

Eine Delamination als Ursache kommt also weder zwischen Faser und Matrix, noch zwischen den einzelnen Schichten in Frage, da für einen negativen Ausdehnungskoeffizienten eine intakte Scherübertragung zwischen den Schichten erforderlich ist.

Betrachtet man jedoch den Verlauf der Ausdehnung in Abhängigkeit vom Verbundwinkel (Abb.30 in 5.1), so sieht man, daß beim Kevlar/EP-Verbund gerade in der Nähe von +/- 45° der Nulldurchgang ist.

Eine kleine Abweichung des Verbundwinkels hat somit eine große Änderung von  $\alpha$  zufolge und kann sogar einen Vorzeichenwechsel bewirken.

Warum sich der Verbundwinkel während der Messungen ändert, kann nur vermutet werden: thermisch induzierte Spannungen bauen sich durch



Relaxation des Harzes ab und lassen die Fasern sich zueinander verschieben<sup>8</sup>.

Zu bemerken ist, daß nur eine sehr kleine Winkeländerung von  $0,4^\circ$  notwendig ist, um die gemessene Änderung von  $ca. 1,0 \cdot 10^{-6}$  (RT) bei  $\alpha$  zu bewirken!

Daß der Effekt bei den anderen Winkelverbunden nicht bemerkt wurde, liegt beim  $\pm 30^\circ$  Verbund daran, daß dort die  $\alpha$ - $\omega$ -Abhängigkeit nicht so steil ist, d.h. eine viel größere Winkelabweichung notwendig wäre und beim  $\pm 60^\circ$  Verbund, daß hier eine Abweichung von  $1,0 \cdot 10^{-6}$  nicht signifikant ist (im Rahmen der guten Meßgenauigkeit jedoch gefunden wurde!).

zu Abb.25 : Kevlar-49-Faser/EP-Harz  $\pm 60^\circ$

Die sowohl hier als auch bei der UD  $90^\circ$ -Probe aufgetretenen kleinen Sprünge in den Ausdehnungskurven können durch plötzlich freiwerdende thermische Spannungen erklärt werden.

Sie machen sich in den dazugehörigen  $\alpha$ -Kurven als größere Abweichungen bemerkbar (Messung 2 bei 125 K und 210 K).

Ansonsten waren die Messungen sehr gut reproduzierbar.

zu Abb.26 : Kevlar-49-Faser/EP-Harz UD  $90^\circ$

Zur Abweichung von  $\alpha$  bei Messung 2 siehe Kommentar zu Abb.25.

Der sehr hohe positive Ausdehnungskoeffizient kommt außer durch den Anteil des Harzes, durch die große Querausdehnung der Kevlarfaser selbst zustande.

Die integrale Ausdehnung für 5 bis 293 K ist genauso hoch wie die von reinem Harz!

---

<sup>8</sup> Eine gerichtete Kraft auf die Fasern tritt nur auf, wenn diese nicht genau im rechten Winkel zueinander liegen, was aber fertigungsbedingt auch auf jeden Fall zutrifft

zu Abb.27 : Kevlar-49-Faser/EP-Harz [0°/90°]

Hier ist wieder das gleiche asymptotische Verhalten der Wiederholungsmessungen wie bei der +/- 45°-Probe zu sehen und auch genauso zu erklären (siehe Diskussionspunkt zu Abb.24).

Außerdem liegen die  $\alpha$ -Werte, wie schon bei M40- und T800-Verbunden, unter denen der +/- 45°-Probe (30 bis 40 %).

## 5. VERGLEICH DER MESSERGEBNISSE MIT BERECHNUNGEN AUS DER LAMINATTHEORIE

### 5.1 $\alpha$ - $\omega$ -Abhängigkeit bei Raumtemperatur

Wie aus dem analytischen Ausdruck für das  $\alpha$  eines Winkelverbundes in 2.3.3. zu erkennen ist, müssen zur Berechnung folgende Kennwerte einer UD-Schicht bekannt sein:  $E_{\parallel}$ ,  $E_{\perp}$ ,  $G$ ,  $\mu_{\parallel\perp}$ ,  $\mu_{\perp\parallel}$ ,  $\alpha_{\parallel}$  und  $\alpha_{\perp}$  ( $E$ ...E-Modul,  $G$ ...Schubmodul,  $\mu$ ...Poissonverhältnis).

Diese wiederum ließen sich aus den Kennwerten der Komponenten Faser bzw. Matrix berechnen, also aus  $E_{\parallel f}$ ,  $E_{\parallel m}$ ,  $E_{\perp f}$ ,  $E_{\perp m}$ ,  $G_f$ ,  $G_m$ ... Die meisten der Faserkennwerte können jedoch nicht direkt gemessen werden (z.B.  $E_{\perp f}$ ,  $\alpha_{\parallel f}$ ,  $\alpha_{\perp f}$ ...), sondern werden aus den Werten der UD-Lamine zurückgerechnet.

Deshalb wird in den folgenden Berechnungen von den Kenndaten der UD-Schichten ausgegangen, da diese teilweise selbst gemessen oder aus gesicherten Quellen übernommen wurden.

Zu bemerken bleibt, daß bei einigen Kenndaten (z.B.  $G$ -Modul) deutlich abweichende Werte in der Literatur zu finden waren.

Zur Berechnung der  $\alpha$ - $\omega$ -Abhängigkeit wurde das Programm CAESAR mit Hilfe des mathematischen Tools MathCAD entwickelt. Als Grundlage zur  $\alpha$ -Berechnung dienten Tensorgleichungen aus [8].

Die verwendeten Kennwerte und die daraus berechneten  $\alpha$ - $\omega$ -Verläufe sind im folgenden dargestellt.

Die experimentell gemessenen  $\alpha$ -Werte der Winkelverbunde mit  $\pm 30^\circ$ ,  $45^\circ$  und  $60^\circ$  sind als Kreuze eingezeichnet und stimmen sehr gut mit den berechneten Kurven überein. (die  $\alpha$ -Werte der UD  $0^\circ$  und  $90^\circ$ -Verbunde wurden als Ausgangswerte zur Berechnung verwendet und liegen deshalb immer auf den Kurven).

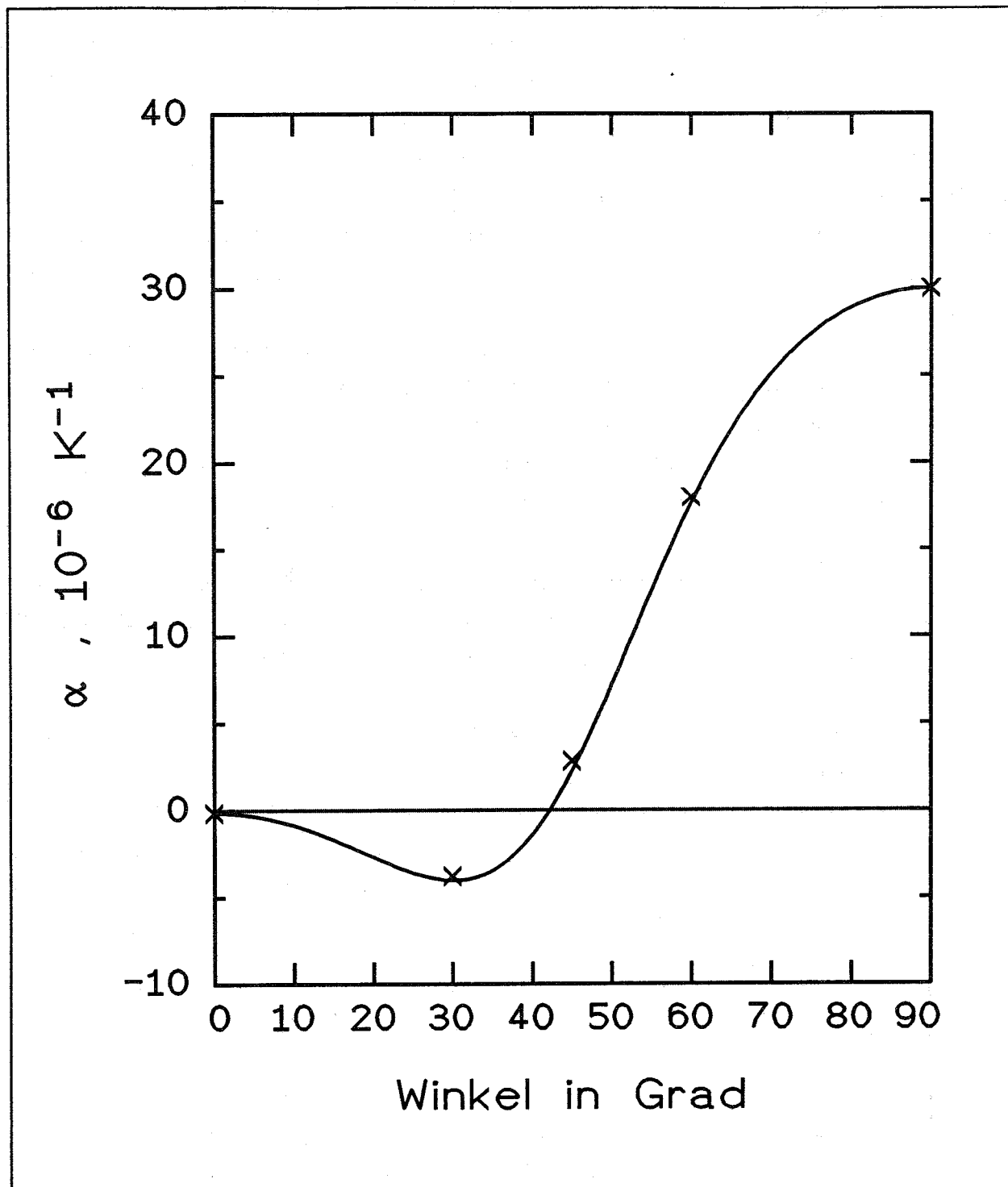
|           | $E_{\parallel}$ [GPa] | $E_{\perp}$ [GPa] | $G$ [GPa]         | $\nu_{12}$        | $\nu_{21}$         |
|-----------|-----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|
| T800/EP   | 165                   | 10,7              | 5,9*              | 0,38              | 0,12               |
| M40/EP    | 225 <sup>x</sup>      | 7,9 <sup>x</sup>  | 5,0 <sup>#</sup>  | 0,26 <sup>x</sup> | 0,008 <sup>x</sup> |
| Kevlar/EP | 77,8                  | 6,0 <sup>+</sup>  | 2,1 <sup>xx</sup> | 0,43              | 0,11               |

Werte ohne Kennzeichnung aus eigenen Messungen, \* aus [9],

<sup>x</sup> aus Datenblättern von MBB, <sup>#</sup> Mittelwert von <sup>x</sup> und [9]

<sup>+</sup> Mittelwert von <sup>x</sup> und eigenen Messungen, <sup>xx</sup> aus [10].

T800-Carbonfaser/EP-Harz : 293 K



**Abb.28 :** Abhängigkeit des Ausdehnungskoeffizienten  $\alpha$  vom Verbundwinkel bei Raumtemperatur

M40-Carbonfaser/EP-Harz : 293 K

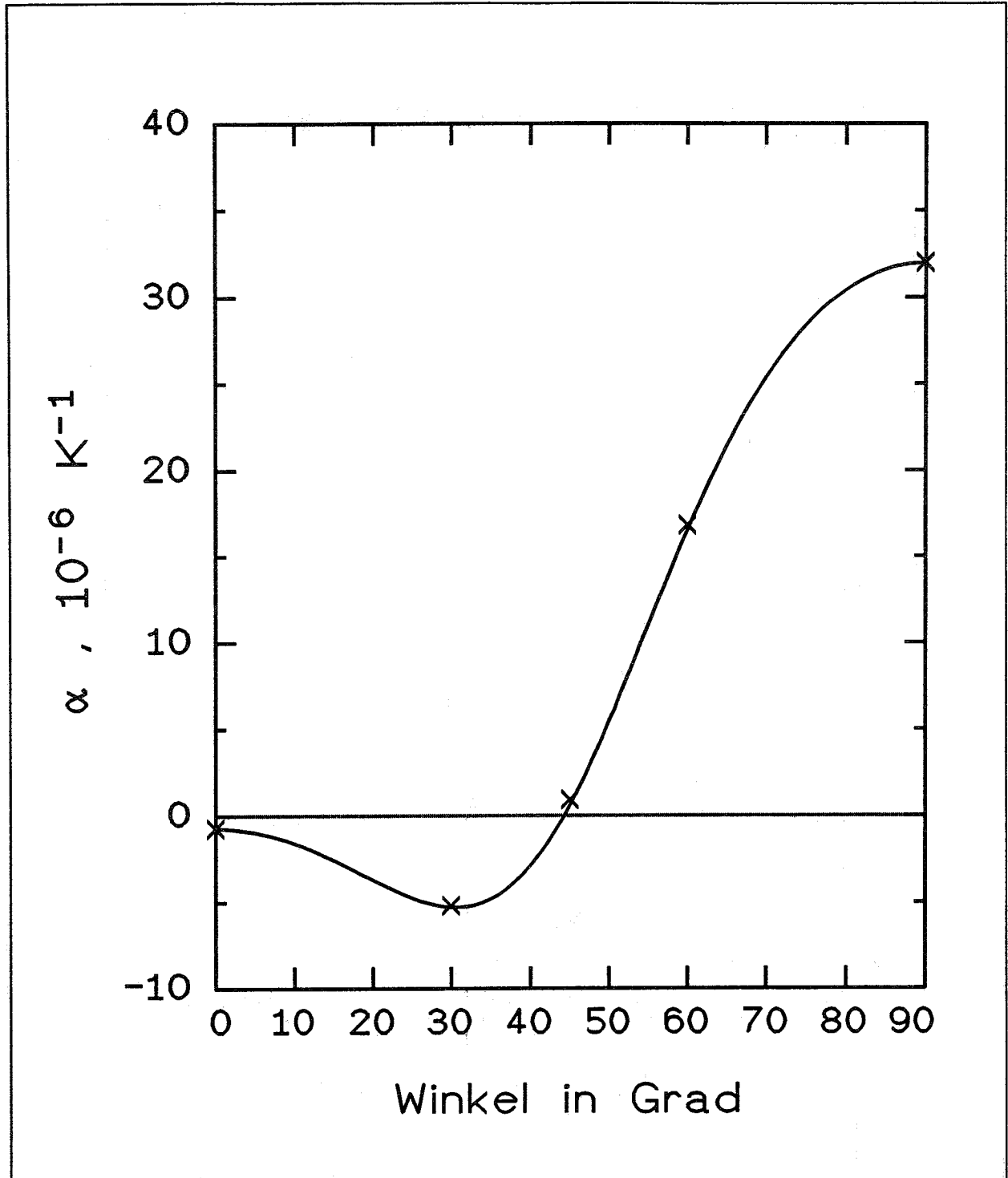
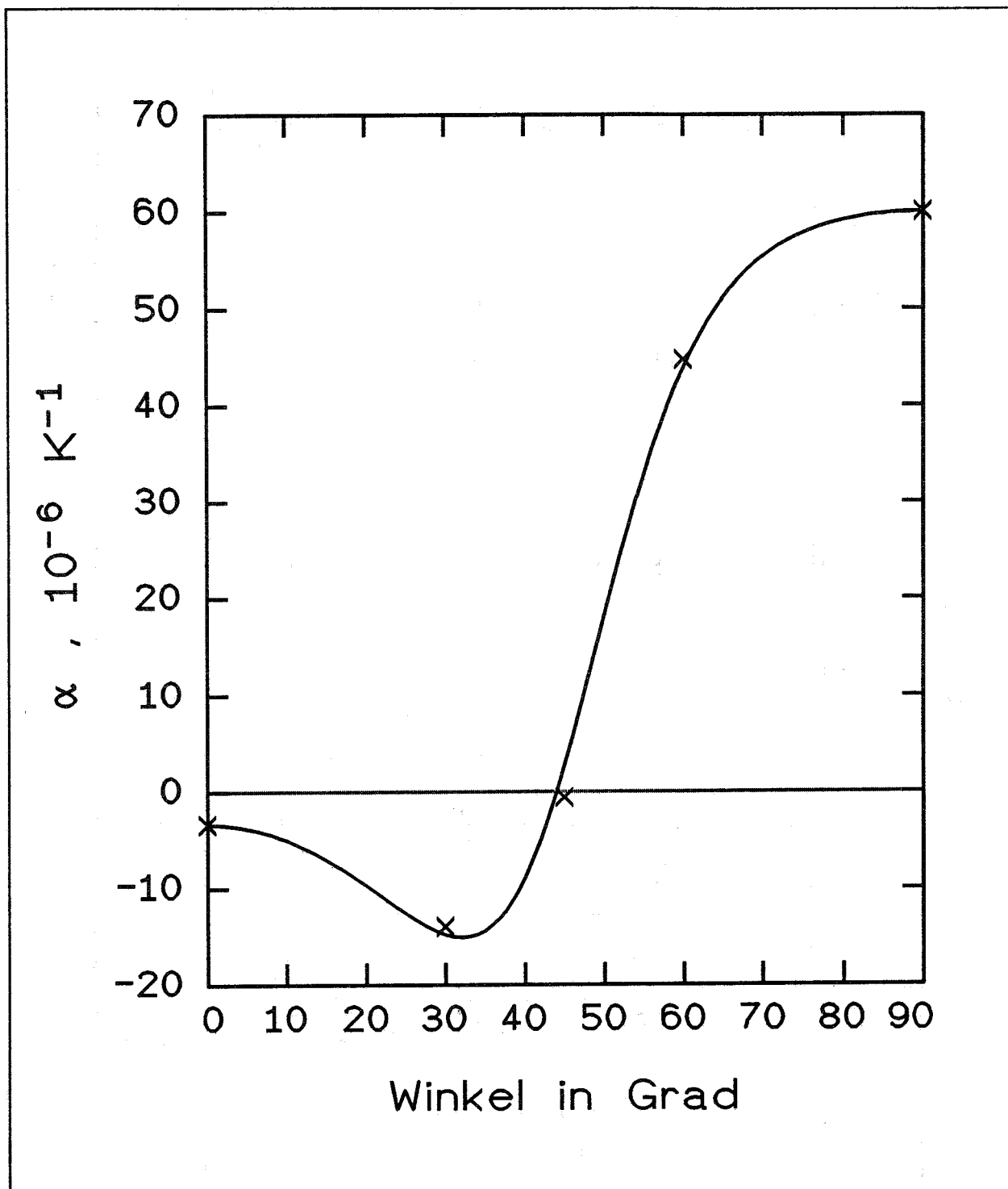


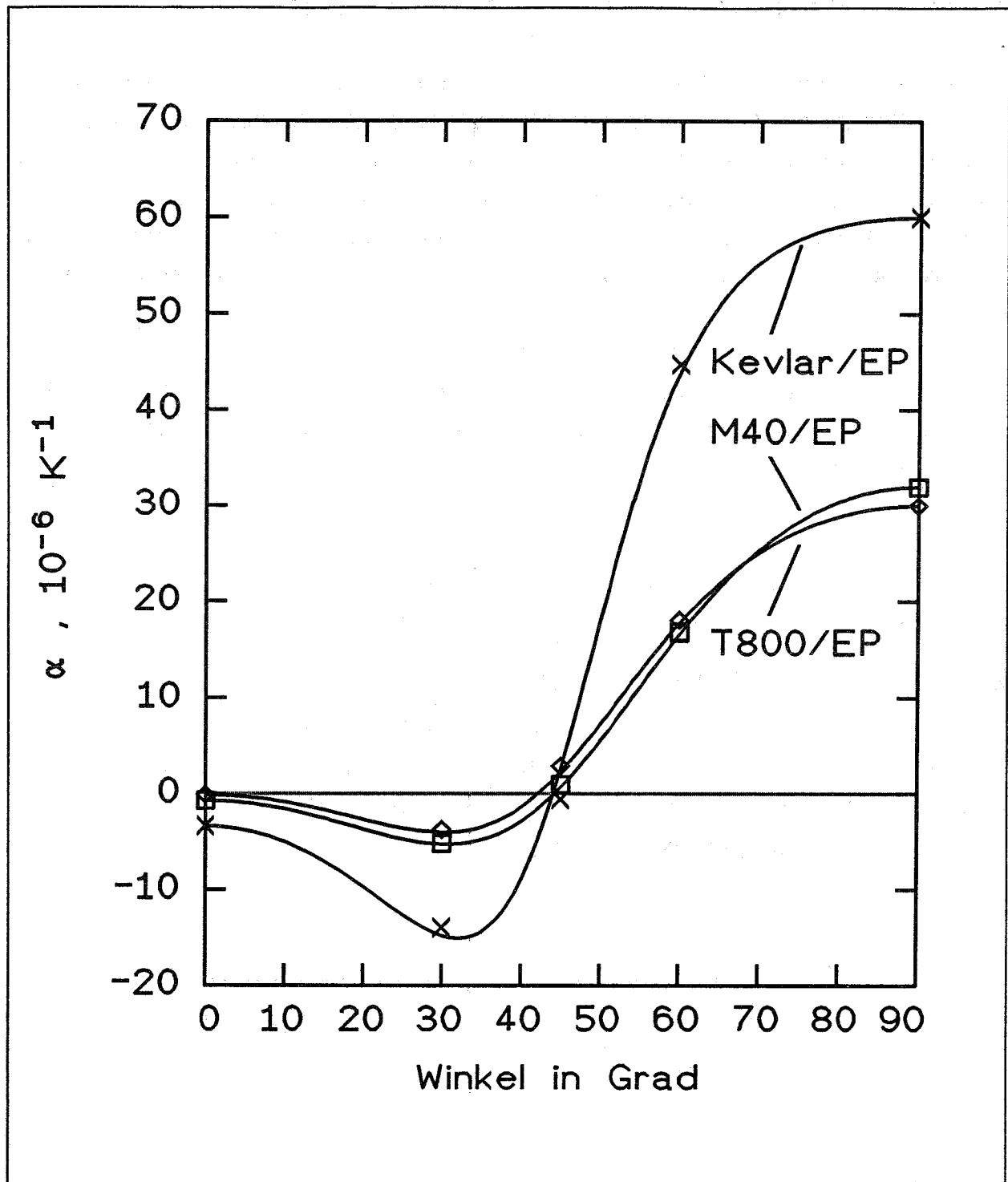
Abb.29 : Abhängigkeit des Ausdehnungskoeffizienten  $\alpha$  vom Verbundwinkel bei Raumtemperatur

Kevlarfaser/EP-Harz : 293 K



**Abb.30** : Abhängigkeit des Ausdehnungskoeffizienten  $\alpha$  vom Verbundwinkel bei Raumtemperatur

### Vergleich der drei Verbundarten bei 293 K



**Abb.31 :** Abhängigkeit des Ausdehnungskoeffizienten  $\alpha$  vom Verbundwinkel bei Raumtemperatur

## 5.2 $\alpha$ - $\omega$ -Abhängigkeit bei verschiedenen Temperaturen

Um eine Voraussage der  $\alpha$ - $\omega$ -Abhängigkeit für andere Temperaturen machen zu können, ist die Voraussetzung, daß man die gesamten thermischen und elastischen Kennwerte des UD-Laminates als Funktion der Temperatur kennt.

Da die meisten Tieftemperaturmessungen bei Flüssigstickstofftemperatur durchgeführt werden, sollten die Ergebnisse des CAESAR-Programms noch einmal bei 77 K überprüft werden, bevor man extrapolierende Voraussagen für weitere Temperaturen macht.

Die für 77 K verfügbaren elastischen Kennwerte für die verwendeten Verbunde waren jedoch sehr beschränkt, so daß einige abgeschätzt werden mußten.

Mit den aus den Tabellen zu entnehmenden Kennwerten war wieder eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Meßpunkten und berechneter Kurve zu sehen.

|           | $E_{\parallel}$ [GPa] | $E_{\perp}$ [GPa] | G [GPa]           | $\nu_{12}$ | $\nu_{21}$ |
|-----------|-----------------------|-------------------|-------------------|------------|------------|
| T800/EP   | 155                   | 13,2 <sup>*</sup> | 8,0 <sup>*</sup>  | 0,43       | 0,08       |
| M40/EP    | 200                   | 10,1              | 8,0 <sup>*</sup>  | 0,32       | 0,07       |
| Kevlar/EP | 94,2                  | 10,0 <sup>+</sup> | 3,5 <sup>**</sup> | 0,42       | 0,10       |

Werte ohne Kennzeichnung aus eigenen Messungen, <sup>\*</sup> Wert für T300 aus [11], <sup>\*</sup> abgeschätzt nach [11], <sup>+</sup> Mittelwert aus eigener Messung und [10], <sup>\*\*</sup> abgeschätzt nach [10].



T800-Carbonfaser/EP-Harz : 77 K

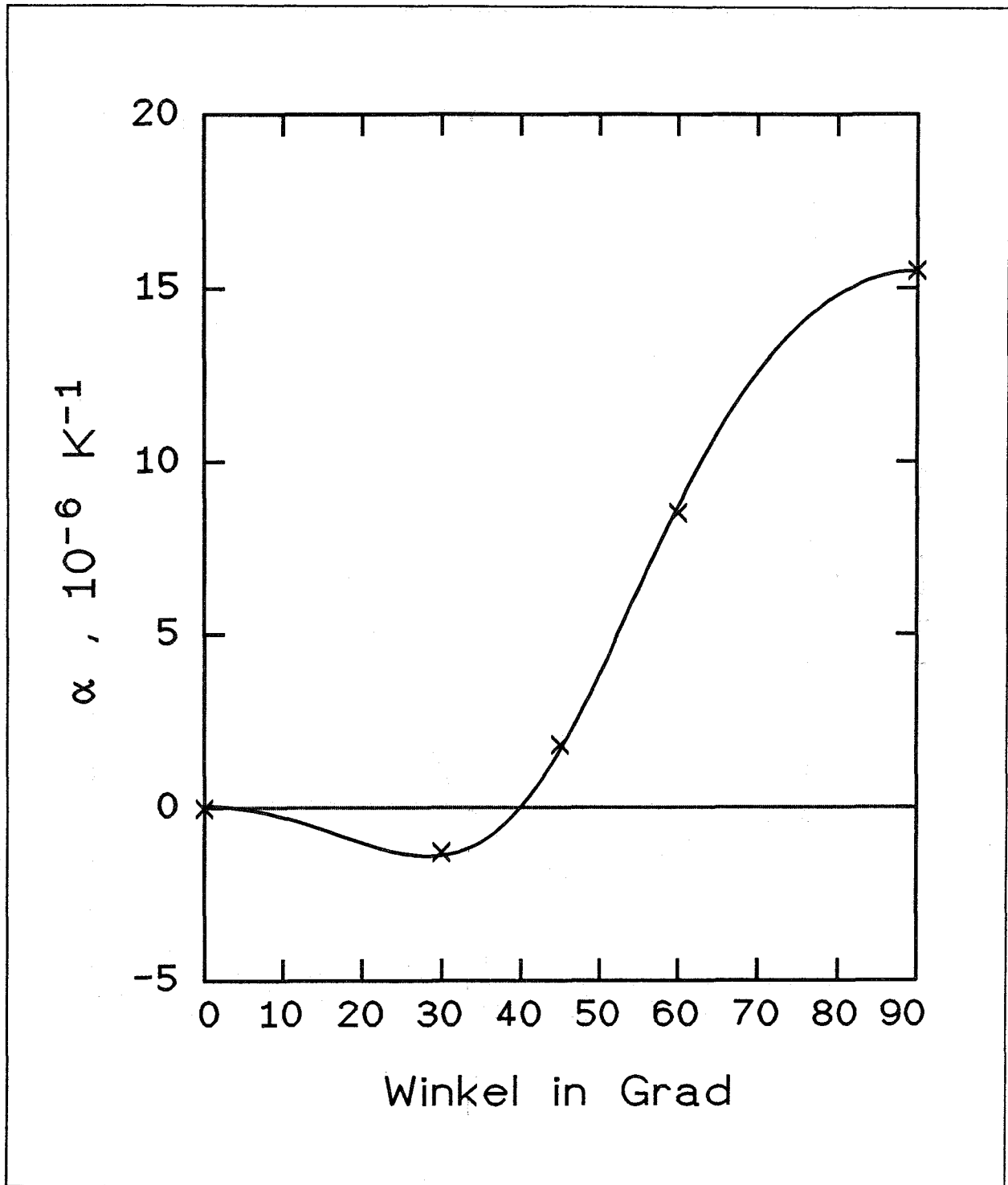
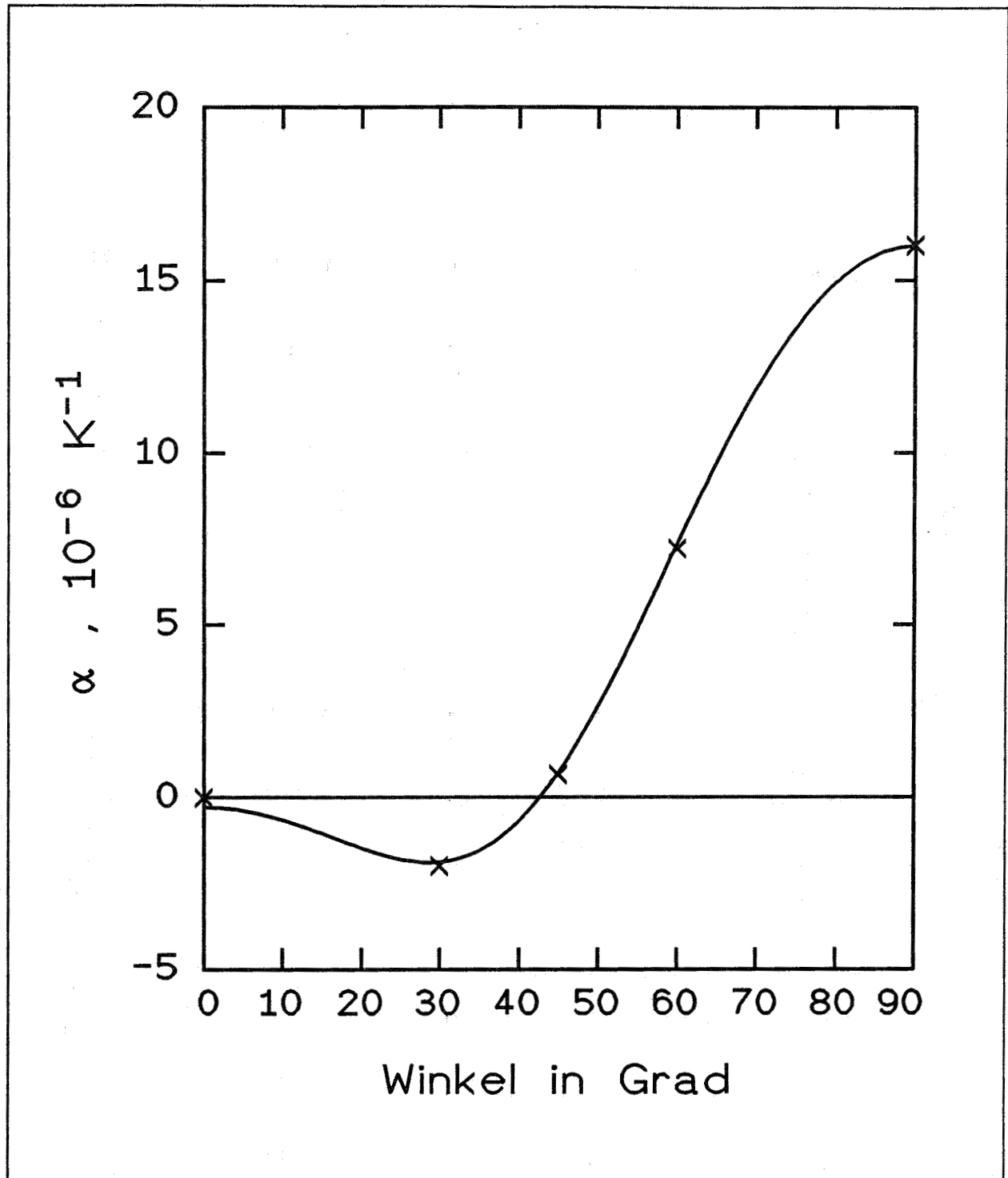


Abb.32 : Abhängigkeit des Ausdehnungskoeffizienten  $\alpha$  vom Verbundwinkel bei  $\text{LN}_2$ -Temperatur

M40-Carbonfaser/EP-Harz : 77 K



**Abb.33 :** Abhängigkeit des Ausdehnungskoeffizienten  $\alpha$  vom Verbundwinkel bei  $\text{LN}_2$ -Temperatur

Kevlarfaser/EP-Harz : 77 K

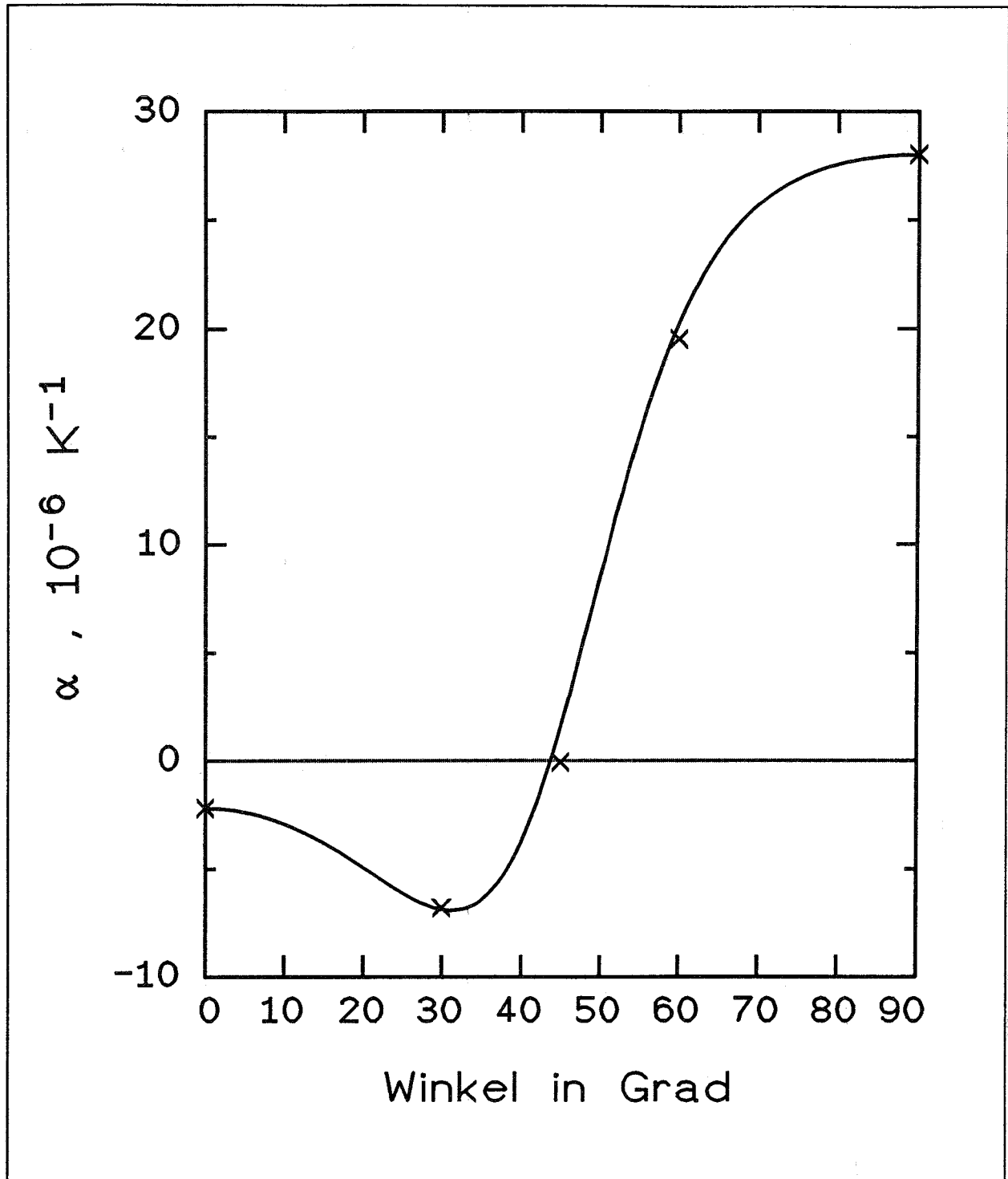


Abb.34 : Abhängigkeit des Ausdehnungskoeffizienten  $\alpha$  vom Verbundwinkel bei  $\text{LN}_2$ -Temperatur

Nun wurde das CAESAR-Programm abgewandelt, so daß es bei Vorgabe der Temperatur selbständig die Elastizitätsgrößen durch lineare Extrapolation errechnete (siehe Anhang CAESAR(T)-Programm). Die  $\alpha$ -Werte der UD-Lamine mußten für die entsprechenden Temperaturen eingegeben werden.

In der gemeinsamen Auftragung der Kurven für 5, 77, 100, 200 und 293 K zeigte sich, daß auch die Kurven mit extrapolierten Elastizitätsgrößen eine gute Näherung zu den Meßpunkten darstellen.

T800-Carbonfaser/EP-Harz :

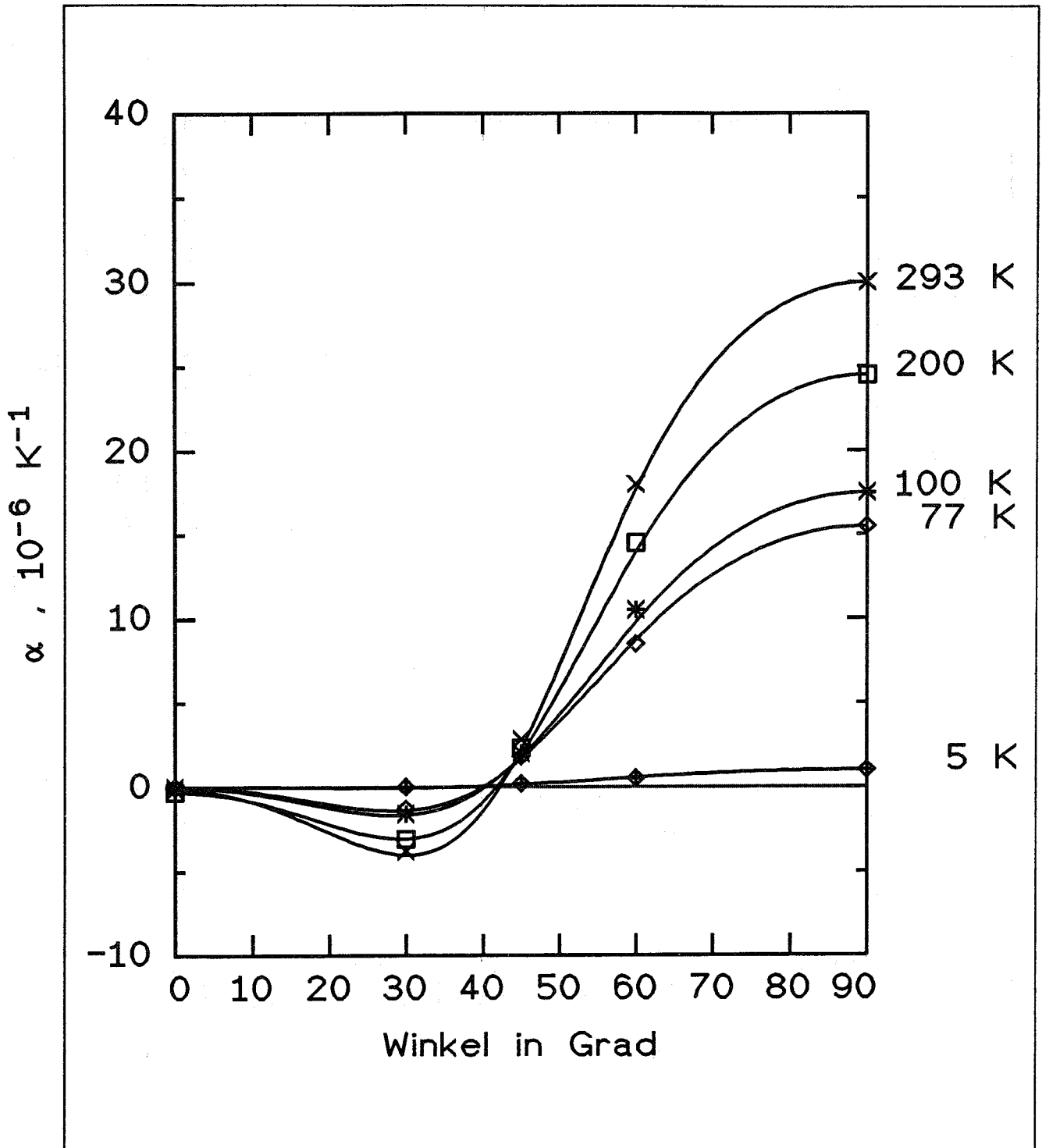


Abb.35 : Abhängigkeit des Ausdehnungskoeffizienten  $\alpha$  vom Verbundwinkel bei verschiedenen Temperaturen

M40-Carbonfaser/EP-Harz :

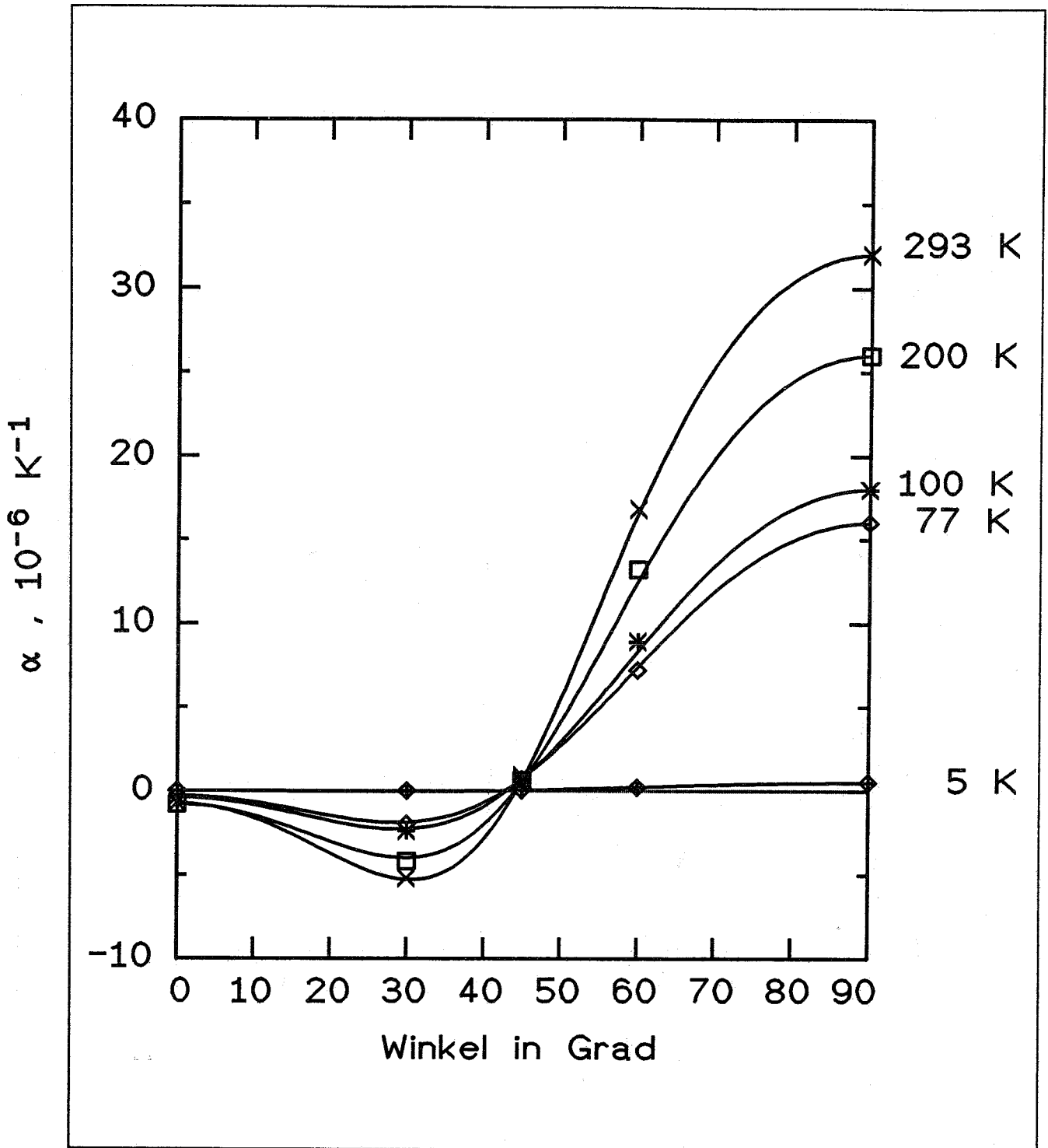


Abb.36 : Abhängigkeit des Ausdehnungskoeffizienten  $\alpha$  vom Verbundwinkel bei verschiedenen Temperaturen

Kevlarfaser/EP-Harz :

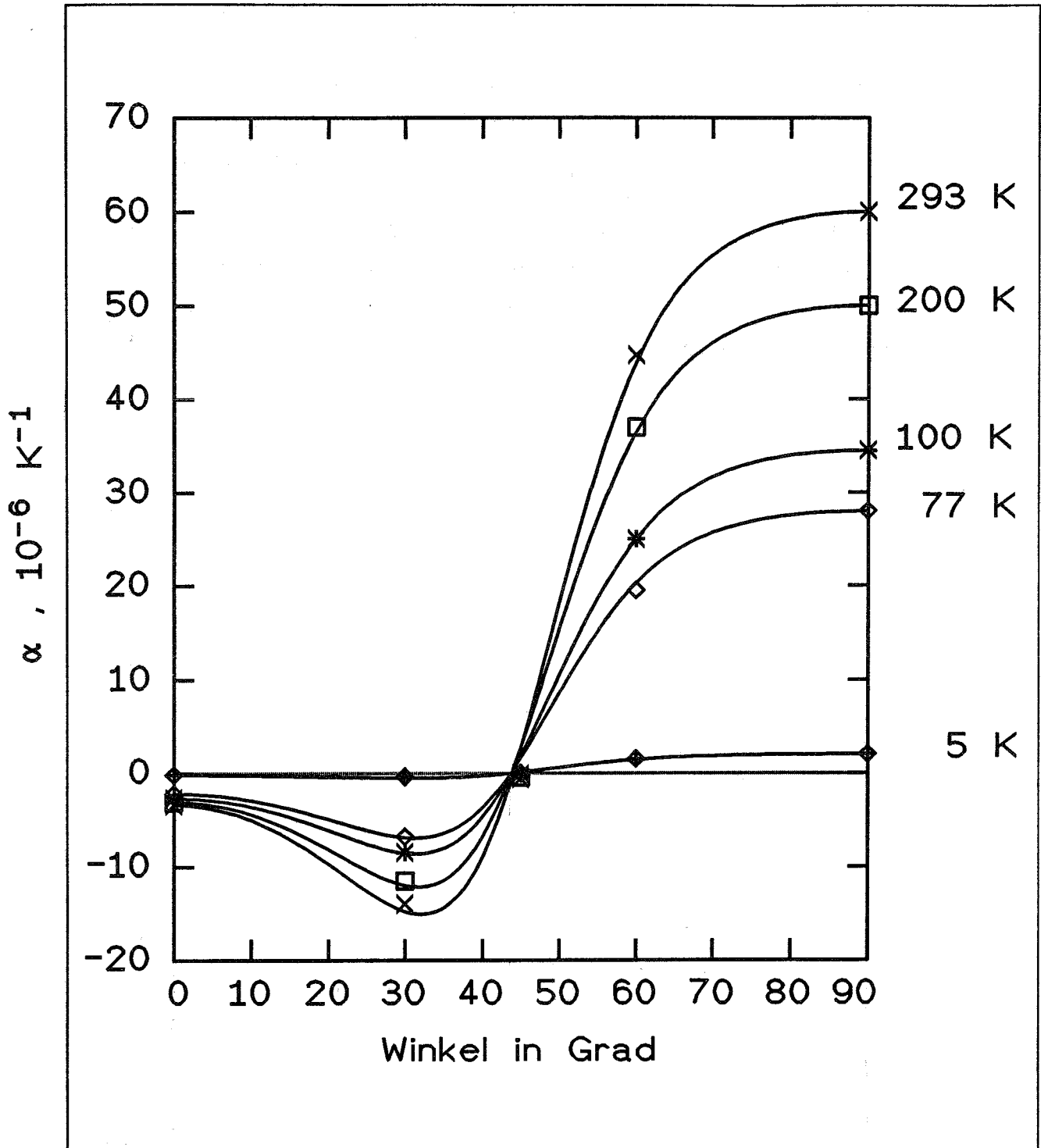


Abb.37 : Abhängigkeit des Ausdehnungskoeffizienten  $\alpha$  vom Verbundwinkel bei verschiedenen Temperaturen

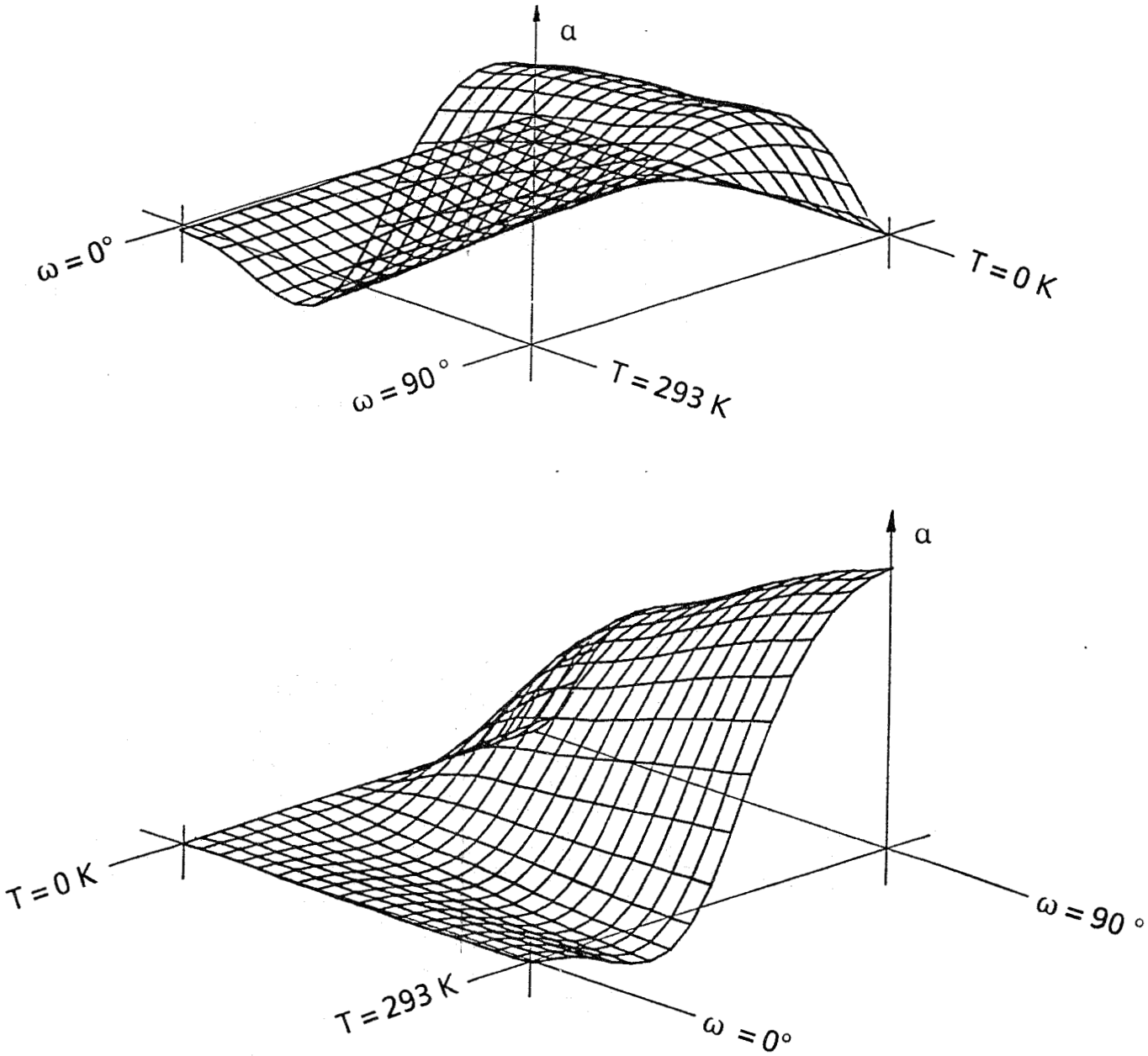
## 6. DREIDIMENSIONALE DARSTELLUNG DER $\alpha$ - $\omega$ -T-ABHÄNGIGKEIT

Um im 5.2. beschriebenen CAESAR(T)-Programm nicht immer die  $\alpha$ -Werte der UD-Laminat per Hand eingeben zu müssen, lag es nahe, nur die gemessenen  $\alpha$ -Kurven des 0°- und 90°-Verbundes als Datensätze vorzugeben und dem Programm die Berechnung bei der gewünschten Temperatur zu überlassen (siehe Anhang 3D-Programm).

Durch wiederholtes Durchführen der Berechnung in 19 äquidistanten Temperaturschritten wurde eine 19x19 Matrix erzeugt. Diese kann mit MathCAD in einem 3D-Plott dargestellt werden. Dabei entspricht ein Kästchen auf der Winkelachse 5° und auf der Temperaturachse ca.16,3 K. Der vertikale Maßstab ( $\alpha$ -Achse) ist für alle sechs Darstellungen gleich.

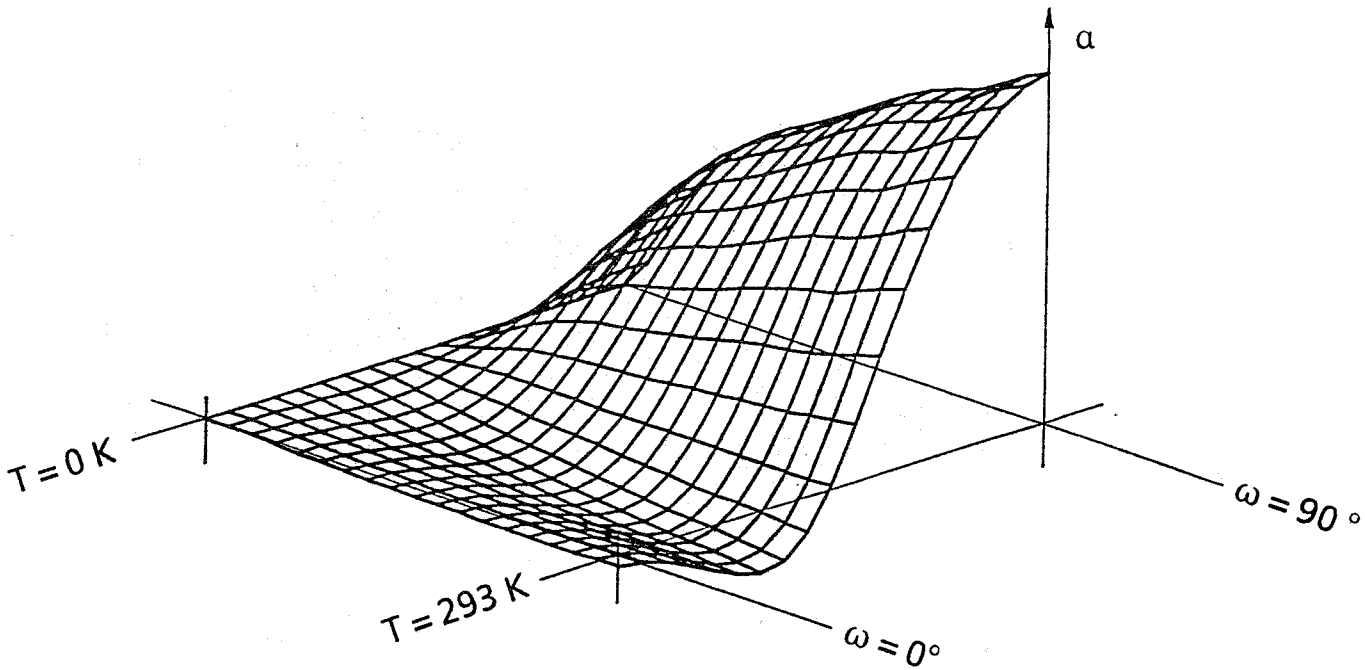
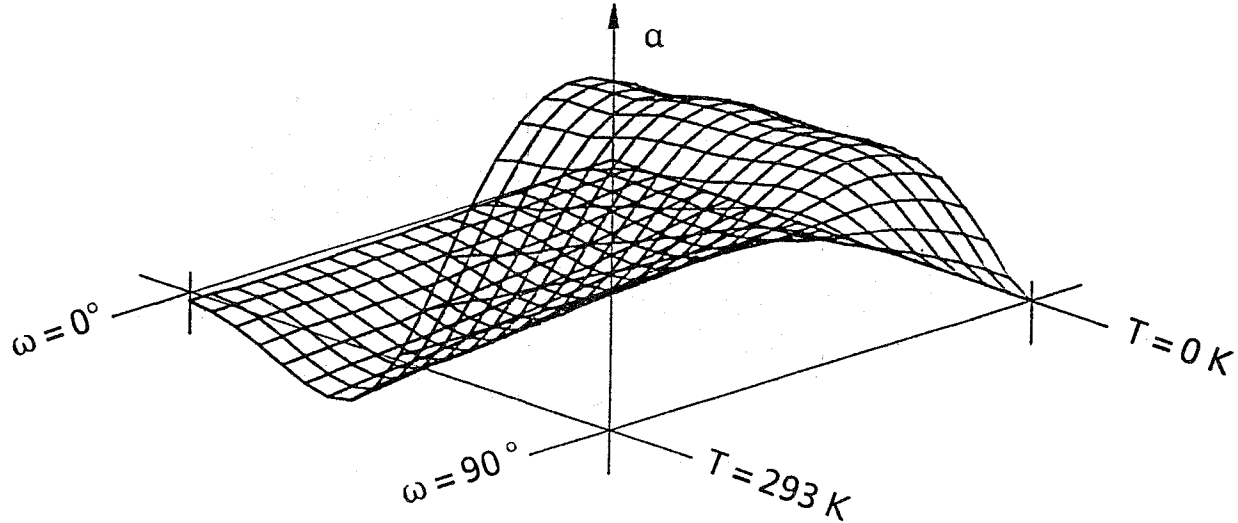


**T800-Carbonfaser/EP-Harz :**



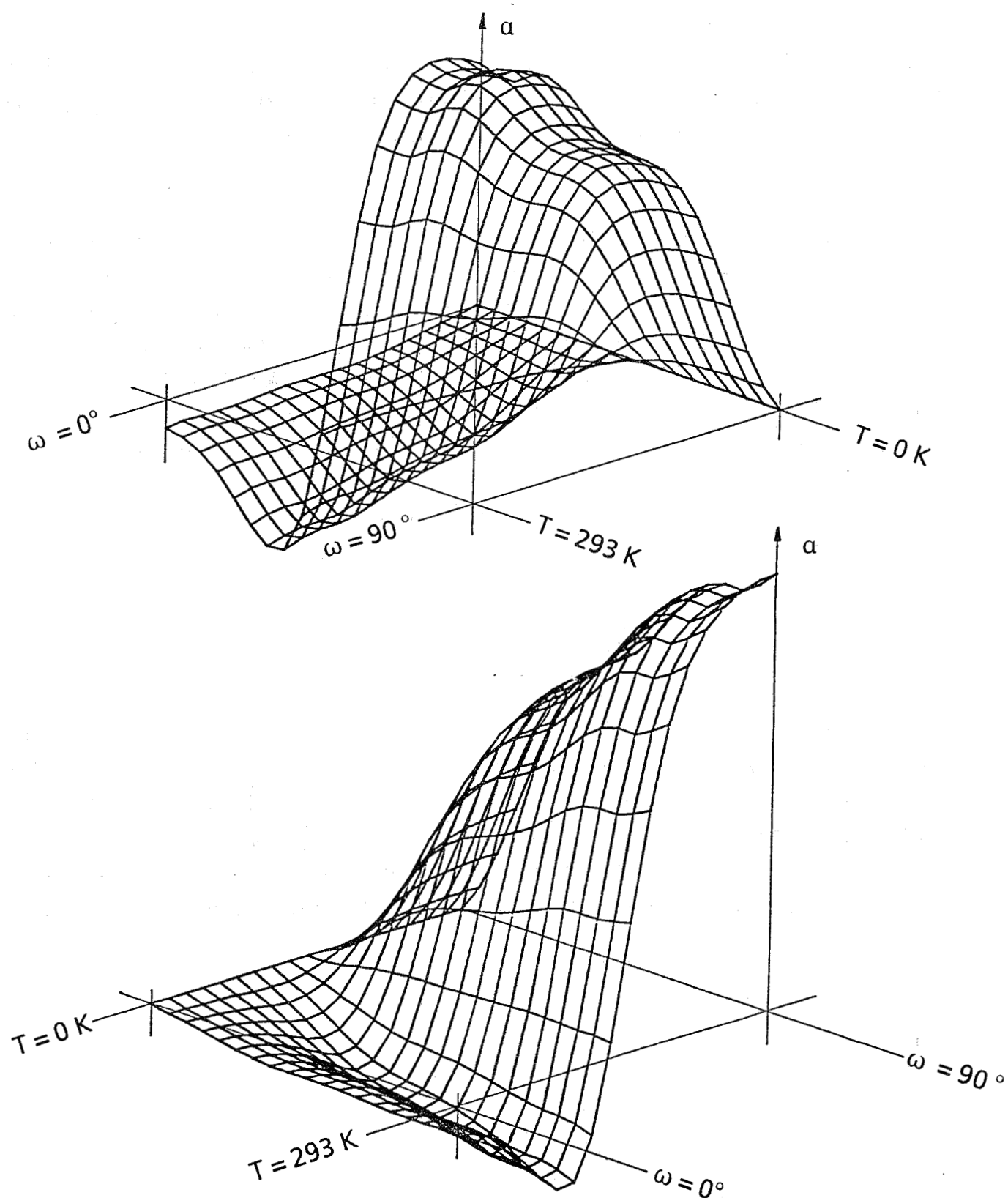
**Abb.38 :** Zwei Ansichten einer dreidimensionalen Darstellung der  $\alpha$ - $\omega$ - $T$ -Abhängigkeit

**M40-Carbonfaser/EP-Harz :**



**Abb.39 :** Zwei Ansichten einer dreidimensionalen Darstellung der  $\alpha$ - $\omega$ - $T$ -Abhängigkeit

**Kevlarfaser/EP-Harz :**



**Abb.40 :** Zwei Ansichten einer dreidimensionalen Darstellung der  $\alpha$ - $\omega$ - $T$ -Abhängigkeit

## 7. ZUSAMMENFASSUNG

Mit Hilfe des Laserdilatometers und eines optimierten Messablaufs konnte die integrale thermische Ausdehnung und der Ausdehnungskoeffizient der Carbon- und Kevlarfaserverbunde von 5 K bis RT mit hoher Genauigkeit gemessen werden.

Die Abhängigkeit des Ausdehnungskoeffizienten  $\alpha$  vom Verbundwinkel  $\omega$  wurde an Proben mit 5 verschiedenen Faseranordnungen (UD 0°, +/-30°, +/-45°, +/-60° und UD 90°) bestimmt. Dabei zeigte sich eine starke Variierbarkeit von  $\alpha$  durch den Verbundwinkel. Bei Winkeln um +/-30° wurden sogar negative Ausdehnungskoeffizienten gefunden. Diese nahmen durch geeignete Auswahl der Verstärkungsfasern Absolutwerte von 30 - 100 % der positiven Ausdehnung von Metallen an.

Somit bieten sich solche Verbunde als Kompensationsmaterialien in Metallkonstruktionen mit störender thermischer Ausdehnung an.

Zur Überprüfung der Laminattheorie wurden theoretische Berechnungen der  $\alpha$ - $\omega$ -Abhängigkeit mit den Meßwerten verglichen. Dabei zeigte sich eine ausgezeichnete Übereinstimmung.

Man hat damit nun die Möglichkeit Voraussagen über das Ausdehnungsverhalten von Winkelverbunden zu treffen, wenn man die thermischen und elastischen Eigenschaften des UD-Verbundes kennt. Außerdem kann man Simulationsrechnungen durchführen, mit denen man den Einfluß eines einzelnen Parameters des UD-Laminates (z.B. G-Modul) auf die Ausdehnung des Winkelverbundes untersuchen kann.

## 7. SUMMARY

The integral thermal expansion and the coefficient of thermal expansion (CTE) of carbon and Kevlar fibre-reinforced composites were measured with high accuracy from 5 K to room temperature. For this, a laser dilatometer and a sophisticated measuring procedure were used.

CTE dependence on the orientation angle  $\omega$  of angle-ply laminates was determined for samples with 5 different fibre alignments (UD  $0^\circ$ ,  $\pm 30^\circ$ ,  $\pm 45^\circ$ ,  $\pm 60^\circ$  and UD  $90^\circ$ ). A high variability of the CTE with the orientation angle was shown. At angles of approximately  $\pm 30^\circ$  even negative CTEs were found. With suitable reinforcing fibres being selected, their absolute values rose up to 30 - 100 % of the positive CTEs of metals.

Hence, composites of this type would be suitable as compensating materials in metal constructions where little thermal expansion is desired.

To check the lamination theory, theoretical computations of the CTE- $\omega$ -dependence were compared with the measured values. An excellent agreement was found.

Using the lamination theory, predictions about the expansion behaviour of angle-ply laminates can be made now, if the thermal and mechanical properties of the unidirectional (UD) laminate are known.

Furthermore, it is possible to carry out simulation computations aimed at investigating the influence of a single parameter of the UD-laminate (e.g. shear modulus) on the expansion of the angle-ply laminate.

## 8. LITERATUR

- [1] Johnson, D.J.  
J.Phys., D:Appl.Phys., 1987, (20), S.286-291
- [2] Hartwig, G.  
Thermal Expansion of Fibre Composites,  
Cryogenics, 1988, Vol.28, April, S.255 ff
- [3] Schneider, W.  
Wärmeausdehnungskoeffizienten und Wärmespannungen von  
Glasfaser/Kunststoffverbunden aus unidirektionalen Schichten,  
Kunststoffe, Bd.61, 1971, H.4, S.274 ff
- [4] Shapery, R.A.  
Thermal Expansion Coefficients of Composite Materials Based  
on Energy Principles,  
J.Composite Materials, Vol.2, No.3, July 1968, S.380 ff
- [5] Chamberlain, N.J.  
Derivation of Expansion Coefficients for a Fibre Reinforced  
Composite,  
BAC Report SON(P) 33, November 1968
- [6] Parker, S.F.H.; Chandra, M.; Yates, B.; Dootson, M.; Walters  
The Influence of Distribution between Fibre Orientations upon  
the Thermal Expansion Characteristics of Carbon Fibre-  
Reinforced Plastics,  
Composites, October 1981, S.281-287
- [7] Gaitonde, J.M.; Lowson, M.V.  
Low-temperature Thermal Expansion of PEEK, HTA and Some of  
Their Composites Reinforced with Carbon Fibres,  
Composites Science and Technology, 40, 1991, S.69-85

- [8] Mallik, P.K.  
Fibre Reinforced Composites,  
Marcel Dekker Inc., New York and Basel, 1988, S.153 ff
- [9] Rogers, K.F.; Phillips, L.N.; Kingston-Lee, D.M.  
The Thermal Expansion of Carbon Fibre-Reinforced Plastics,  
Part 1: The Influence of Fibre Type and Orientation,  
J.Materials Science, 12, 1977, S.718-734
- [10] Strife, J.R.; Prewo, K.M.  
The Thermal Expansion Behavior of Unidirectional and  
Bidirectional Kevlar/Epoxy Composites,  
J.Composite Materials, Vol.13, October 1979, S.264 ff
- [11] Ahlborn, K.  
Unveröffentlichter Bericht des KfK, September 1987

## 9. ANHANG

### Berechnung der thermischen Relaxationszeit

Für die Einstellung eines Temperaturgleichgewichtes innerhalb eines Festkörpers ist die thermische Relaxationszeit  $\tau_T$  eine charakteristische Größe. Die thermische Relaxationszeit wird als die Zeit betrachtet, innerhalb der eine Temperaturdifferenz  $\Delta T$  zwischen Körpermitte und Oberfläche auf den e-ten Teil (oder  $\Delta T/e$ ) abfällt.

Eine einfache Beziehung gilt für einen langen Stab mit Radius  $r$  :

$$\tau_T \approx 1,1 \frac{r^2}{a}$$

Dabei ist  $a$  der Wärmediffusionskoeffizient, der sich wie folgt berechnet:

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}$$

$\lambda$  ...Wärmeleitkoeffizient  
 $c$  ...Wärmekapazität  
 $\rho$  ...Dichte

Berücksichtigt man die Querschnittsflächenreduzierung durch die Zentralbohrung in den Proben, so reduziert sich  $\tau_T$  um etwa 30 %.

Damit berechnen sich die nebenstehenden Werte für einen M40-Carbonfaserverbund:

|                           |   | 10 K                       | 20 K                        | 293 K               |
|---------------------------|---|----------------------------|-----------------------------|---------------------|
| $\lambda$ , W/mK          |   | $6,0 \cdot 10^{-2} \times$ | $15,0 \cdot 10^{-2} \times$ | $28,0 \times$       |
|                           | ⊥ | $4,5 \cdot 10^{-2} \times$ | $7,0 \cdot 10^{-2} \times$  | $1,2 \times$        |
| $c$ , J/gK                |   | $9,4 \cdot 10^{-3} +$      | $30,2 \cdot 10^{-3} +$      | $1,1^*$             |
| $\rho$ , g/m <sup>3</sup> |   | $1,7 \cdot 10^{-6}$        | $1,7 \cdot 10^{-6}$         | $1,7 \cdot 10^{-6}$ |
| $a$ , m <sup>2</sup> /s   |   | $3,8 \cdot 10^{-6}$        | $2,9 \cdot 10^{-6}$         | $1,5 \cdot 10^{-5}$ |
|                           | ⊥ | $2,8 \cdot 10^{-6}$        | $1,4 \cdot 10^{-6}$         | $6,4 \cdot 10^{-7}$ |
| $\tau$ , s                |   | 9,3                        | 12,1                        | 2,3                 |
|                           | ⊥ | 12,4                       | 25,7                        | 54,5                |
| $\tau$ , s (mit Bohrung)  |   | 6,7                        | 8,6                         | 1,7                 |
|                           | ⊥ | 8,9                        | 18,4                        | 39,0                |

$\times$  aus Messungen Gruppe Hartwig, KfK

$+$  aus Advances in Cryogenic Engineering, Vol.24

$*$  aus Engineered Materials Handbook: Composites, Vol.1



## Fehlerbetrachtung

### 1. Temperaturmeßfehler

#### a.) systematische :

- Verzögerungseffekt durch thermische Relaxationszeit von ca. 7 Sekunden bei niedrigen Temperaturen bis 38 Sekunden bei höheren Temperaturen. Mit einer Aufheizgeschwindigkeit von 2 K/min folgt daraus ein Fehler von -0,2 K bzw. -1,3 K.
- Genauigkeit der Sonde bzw. der Umrechnung der gemessenen Spannungen in Temperaturwerte (nach Mitteilung von F.Krahn)  
< 2 % für 5-30 K, also +/- 0,6 K  
< 0,5 % für 30-293 K, also +/- 1,5 K

#### b.) statistische :

- Unsicherheit bei der Festlegung des Temperaturmessereignisses wegen manuellem Auslösen des Zählimpulses  
<  $\Delta T/2$  der benachbarten Messereignisse :  
für UD 0°-Proben z.B. +/- 16,8 K bei tiefen Temperaturen  
und +/- 2,5 K bei höheren Temperaturen  
für UD 90°-Proben z.B. +/- 5,4 K bei tiefen Temperaturen  
und +/- 0,02 K bei höheren Temperaturen

### 2. Längenmeßfehler

#### a.) systematische :

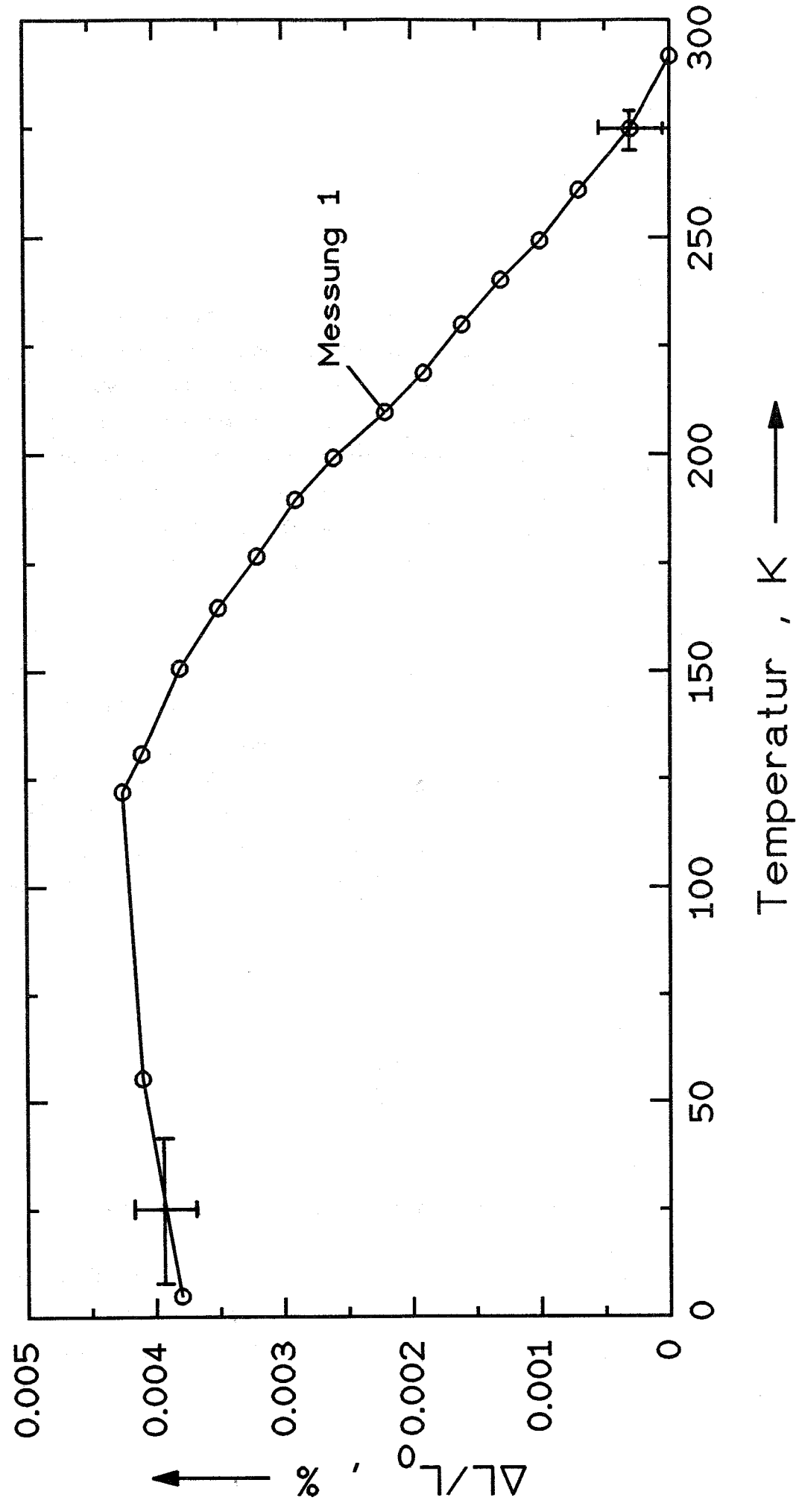
- $L_0$  Messung : < 0,1 %
- Genauigkeit von  $\lambda$  : < 1,0 %

#### b.) statistische :

- durch Auslassen eines Zählereignisses bei manueller Zählung  
bei UD 0°-Proben max. 2-3 Stück auf 40-60 Zählereignisse :  
< 5 %  
bei UD 90°-Proben ca. 1 Stück auf 100 Zählereignisse :  
< 1 %

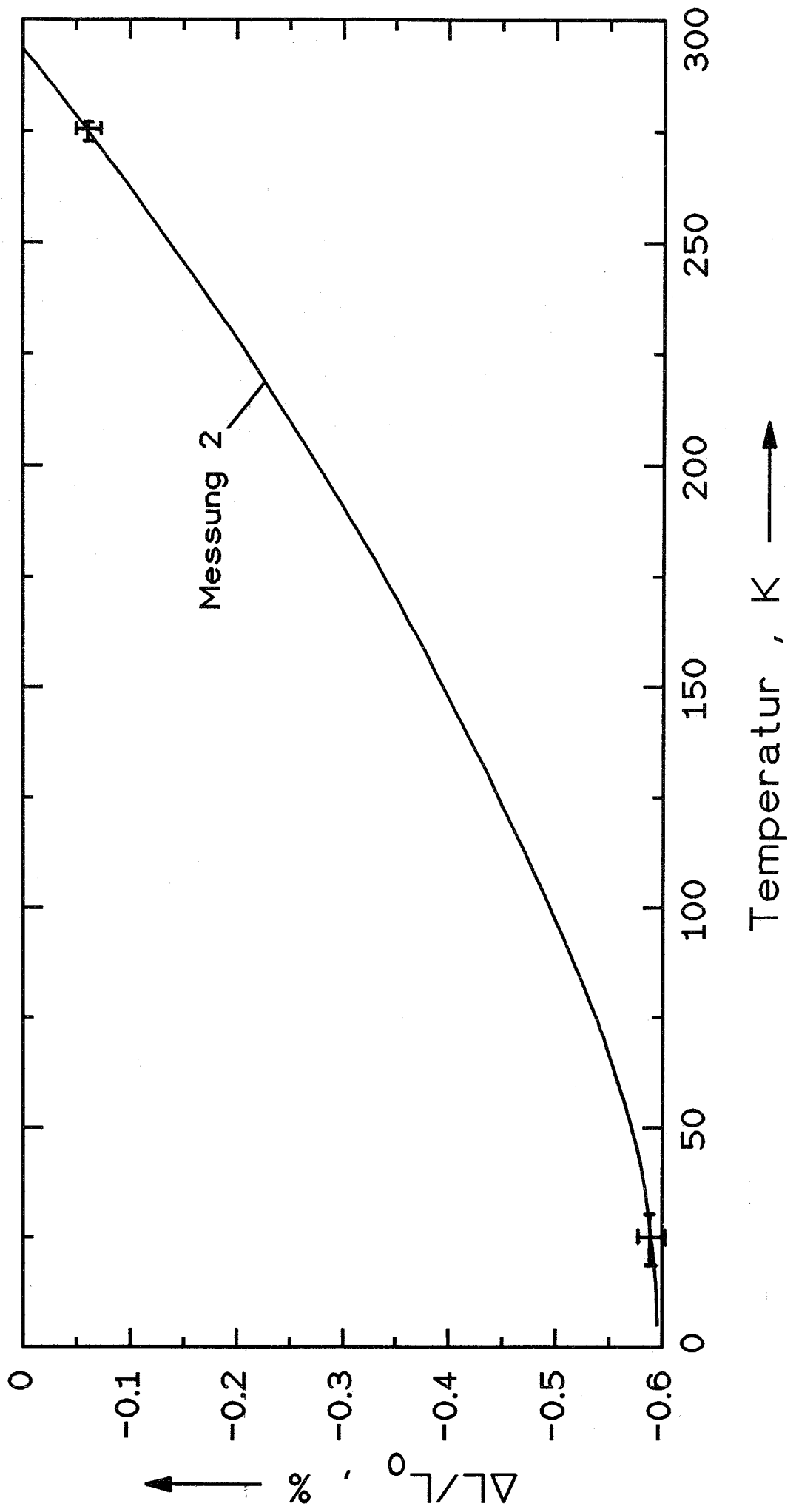
zur Fehlerbetrachtung : Beispiel für Fehlerkreuze in einem ungünstigen Fall

T800/EP-Harz UD\_0°



zur Fehlerbetrachtung : Beispiel für Fehlerkreuze in einem günstigen Fall

M40/EP-Harz UD\_90°



L I N P L O T  
-----

Dieses Programm liest Messwertedateien aus Unterverzeichnis /Mathcad/Daten ein und erstellt eine Grafik für die integrale Ausdehnung  $\delta L/L$ .

Geben Sie den Befehl : "Esc, filename Datei" ein und ändern Sie "Datei" auf den gewünschten Namen ab.

Achtung! (die Eingabedatei muß im ASCII-Code vorliegen !  
Es dürfen keine anderen Zeichen als Zahlen enthalten sein !  
Löschen Sie auch die 0 Zeile am Ende der Datei !)

Außerdem werden die umgerechneten Daten zum Ausdrucken in das Verzeichnis c:techplotdaten3out.dat übertragen. Geben Sie den Befehl : "ESC, filename out" ein und ändern Sie "out" auf den gewünschten Dateinamen.

Gehen Sie jetzt zum Dokumentende mit "Strg + Ende" und warten Sie

```
M := READPRN(datei)
```

```
ORIGIN ≡ 1
```

```

<1>
T := M          T := T · 10-2

```

```

<2>
y := M          f := 1
                d :=  $\frac{y \cdot 10^{-4}}{f}$ 

```

```
l := length(y)
```

für Messungen mit  $\lambda/2$  ist f=1 zu setzen  
für Messungen mit  $\lambda/4$  ist f=2 zu setzen

```
D := d - d1
```

```
i := 1 .. l
```

Hier werden jetzt die umgerechneten Daten zum Ausdrucken in das Verzeichnis c:techplotdaten3out.dat übertragen. Geben Sie den Befehl : "ESC filename out" ein und ändern Sie out auf den gewünschten Dateinamen.

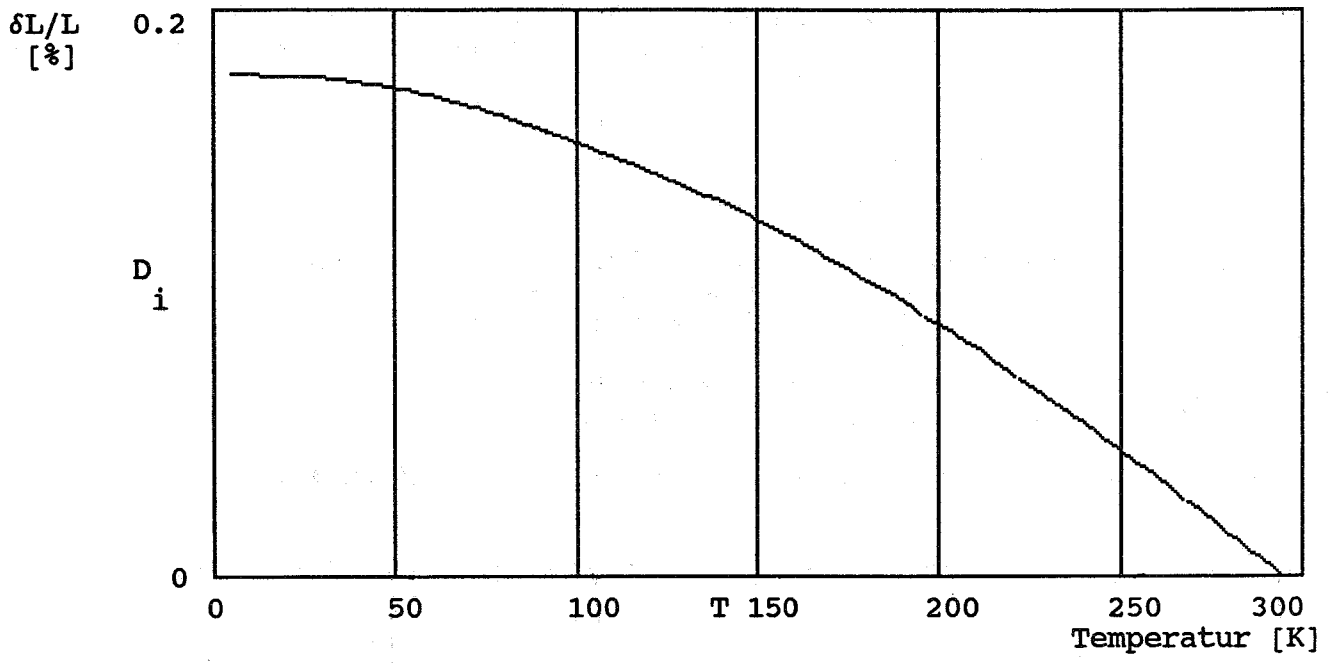
```
PRNCOLWIDTH := 15
```

```

Mi,1 := Ti      Mi,2 := Di      WRITEPRN(out) := M

```

# DILATATION



Dieses Programm liest Messwertedateien aus Unterverzeichnis /Mathcad/Daten ein und erstellt eine Grafik für die integrale Ausdehnung  $\delta L/L$  und für den geglätteten Ausdehnungskoeffizient  $\alpha$ .

Geben Sie den Befehl : "Esc, fil(ename) datei" ein und ändern Sie "Datei" auf de gewünschten Namen ab

Achtung ! Die Eingabedatei muß im ASCII-Code vorliegen und darf keine anderen Zeichen als Zahlen enthalten  
Die 0 Zeile am Ende der Datei muß gelöscht werden

Außerdem werden die berechneten  $\alpha$ -Werte zum Ausdrucken in das Verzeichnis TechplotDaten3 übertragen (in  $10^{-6}$  K<sup>-1</sup> !).

Geben Sie den Befehl : "Esc, fil(ename) out" ein und ändern Sie "out" auf den gewünschten Namen ab

Gehen Sie jetzt mit "Strg + Ende" zum Programmende und warten Sie

```
M := READPRN(datei)
```

```
ORIGIN ≡ 1
```

```
      <1>                -2  
T := M                T := T · 10
```

```
      <2>  
y := M
```

```
f := 1                für Messungen mit λ/2  
                        -4 ist f=1, mit λ/4 auf  
                        y · 10 f=2 zu setzen  
d :=  $\frac{y \cdot 10}{f}$ 
```

```
l := length(y)
```

```
D := d - d  
i := 1 .. l
```

Berechnung der Ableitung

( mit Mittelwerten von 5 Stellen (-20,-10,0,+10,+20) )  
(  $\alpha$  wird in 10 Grad-Schritten gezeichnet (ceil(T1)+30) siehe unten)

```
TD := pspline(T,D)      I(t) := interp(TD,T,D,t)
```

```
x(t) :=  $\begin{bmatrix} t - 20 \\ t - 10 \\ t \\ t + 10 \\ t + 20 \end{bmatrix}$       y(t) :=  $\frac{\quad}{\quad}$  I(x(t))
```

$$\alpha(t) := \frac{\text{slope}(x(t), y(t))}{100} \cdot 10^6$$

Übertragung der berechneten  $\alpha$ -Werte in das Verzeichnis  
c:TechplotDaten3out.dat :

$$lt := \text{ceil} \left[ \frac{\text{ceil}[T] - \text{ceil}[T] - 40}{10} \right]$$

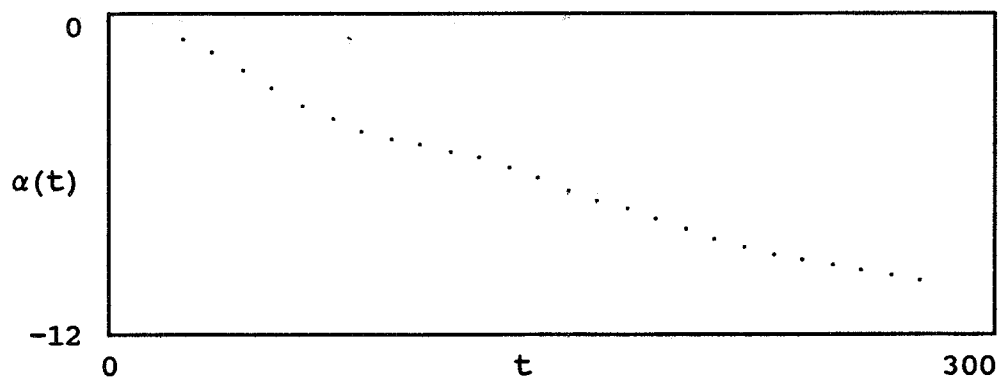
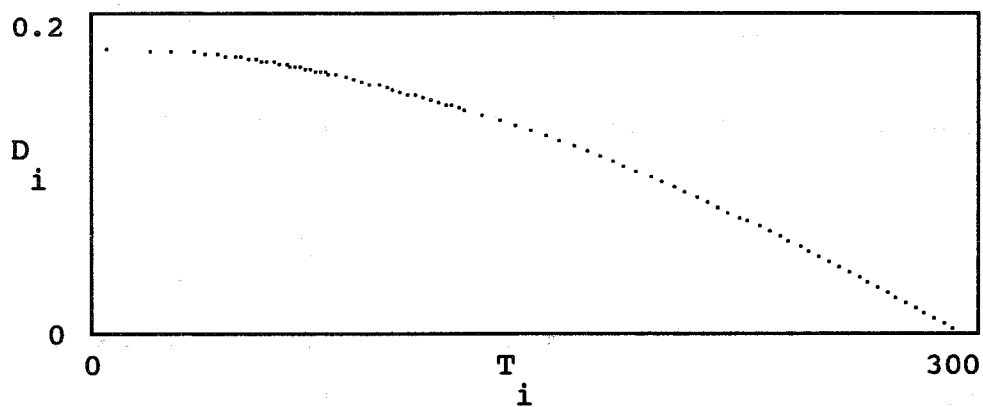
$$j := 1 .. lt \quad t_j := 10 \cdot j + \text{ceil}[T] + 10$$

$$A_{j,2} := \alpha[t_j] \quad A_{j,1} := t_j$$

PRNCOLWIDTH := 15      WRITEPRN(out) := A

Ende Datenübertragung

$$t := \text{ceil}[T] + 20, \text{ceil}[T] + 30 .. \text{ceil}[T] - 20$$







+/- Winkel in Grad (siehe rechts):

Anzahl der Lagen :

$$N := 82$$

Dicke der Lagen in m :

$$D := \frac{0.01}{82}$$

$\alpha$  einer Lage in Faserrichtung in m/mK :

$$\alpha_{11} := -0.72 \cdot 10^{-6}$$

$\alpha$  einer Lage senkrecht zur Faserrichtung :

$$\alpha_{22} := 31.5 \cdot 10^{-6}$$

1.1.) Berechnung der Elemente von Q :

$$Q_{11} := \frac{E_{11}}{1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21}} \quad Q_{22} := \frac{E_{22}}{1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21}} \quad Q_{12} := \frac{\nu_{12} \cdot E_{22}}{1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21}}$$

$$Q_{66} := G_{12}$$

1.2.) Berechnung der Elemente von Q1 und Q2 :

$$U_1 := \frac{1}{8} (3 \cdot Q_{11} + 3 \cdot Q_{22} + 2 \cdot Q_{12} + 4 \cdot Q_{66})$$

$$U_2 := \frac{1}{2} (Q_{11} - Q_{22})$$

$$U_3 := \frac{1}{8} (Q_{11} + Q_{22} - 2 \cdot Q_{12} - 4 \cdot Q_{66})$$

$$U_4 := \frac{1}{8} (Q_{11} + Q_{22} + 6 \cdot Q_{12} - 4 \cdot Q_{66})$$

$$\theta :=$$

0  
1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25  
26  
27  
28  
29  
30  
31  
32  
33  
34  
35  
36  
37  
38  
39  
40  
41  
42  
43  
44  
45  
46  
47  
48  
49  
50  
51  
52  
53  
54  
55  
56  
57  
58

59  
60  
61  
62  
63  
64  
65  
66  
67  
68  
69  
70  
71  
72  
73  
74  
75  
76  
77  
78  
79  
80  
81  
82  
83  
84  
85  
86  
87  
88  
89  
90

$$U := \frac{1}{5} \begin{bmatrix} U & -U \\ 1 & 4 \end{bmatrix}$$

$$U = \begin{bmatrix} 0 \\ 90.722 \\ 109.027 \\ 26.221 \\ 28.28 \\ 31.221 \end{bmatrix}$$

Umrechnung von  $\theta$  in rad :

$$\theta := \frac{2 \cdot \pi}{360}$$

$$Q111 := \begin{bmatrix} U_1 + U_2 \cdot \cos(2 \cdot \theta) + U_3 \cdot \cos(4 \cdot \theta) \end{bmatrix}$$

$$Q112 := \begin{bmatrix} U_4 - U_3 \cdot \cos(4 \cdot \theta) \end{bmatrix}$$

$$Q121 := Q112$$

$$Q122 := \begin{bmatrix} U_1 - U_2 \cdot \cos(2 \cdot \theta) + U_3 \cdot \cos(4 \cdot \theta) \end{bmatrix}$$

$$Q116 := \begin{bmatrix} 1 \\ -U_2 \cdot \sin(2 \cdot \theta) + U_3 \cdot \sin(4 \cdot \theta) \end{bmatrix}$$

$$Q126 := \begin{bmatrix} 1 \\ -U_2 \cdot \sin(2 \cdot \theta) - U_3 \cdot \sin(4 \cdot \theta) \end{bmatrix}$$

$$Q166 := \begin{bmatrix} U_5 - U_3 \cdot \cos(4 \cdot \theta) \end{bmatrix}$$

jetzt für  $-\theta$  :

$$\theta := (-\theta)$$

$$Q211 := \begin{bmatrix} U_1 + U_2 \cdot \cos(2 \cdot \theta) + U_3 \cdot \cos(4 \cdot \theta) \end{bmatrix}$$

$$Q212 := \overline{\begin{bmatrix} U & -U \cdot \cos(4 \cdot \theta) \\ 4 & 3 \end{bmatrix}}$$

$$Q221 := Q212$$

$$Q222 := \overline{\begin{bmatrix} U & -U \cdot \cos(2 \cdot \theta) + U \cdot \cos(4 \cdot \theta) \\ 1 & 2 \quad 3 \end{bmatrix}}$$

$$Q216 := \overline{\begin{bmatrix} 1 \\ -U \cdot \sin(2 \cdot \theta) + U \cdot \sin(4 \cdot \theta) \\ 2 \quad 2 \quad 3 \end{bmatrix}}$$

$$Q226 := \overline{\begin{bmatrix} 1 \\ -U \cdot \sin(2 \cdot \theta) - U \cdot \sin(4 \cdot \theta) \\ 2 \quad 2 \quad 3 \end{bmatrix}}$$

$$Q266 := \overline{\begin{bmatrix} U & -U \cdot \cos(4 \cdot \theta) \\ 5 & 3 \end{bmatrix}}$$

Gleichung für A :

$$A11 := \overline{\begin{bmatrix} N \\ - (Q111 + Q211) \cdot D \\ 2 \end{bmatrix}}$$

$$A12 := \overline{\begin{bmatrix} N \\ - (Q112 + Q212) \cdot D \\ 2 \end{bmatrix}}$$

$$A22 := \overline{\begin{bmatrix} N \\ - (Q122 + Q222) \cdot D \\ 2 \end{bmatrix}}$$

1.3.) Berechnung der Elemente von T :

zuerst wieder positives  $\theta$  :  $\theta := (-\theta)$

$$\alpha_{xx1} := \left[ \alpha_{11} \cdot (\cos(\theta))^2 + \alpha_{22} \cdot (\sin(\theta))^2 \right]$$

$$\alpha_{yy1} := \left[ \alpha_{11} \cdot (\sin(\theta))^2 + \alpha_{22} \cdot (\cos(\theta))^2 \right]$$

$$\alpha_{xy1} := \left[ 2 \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\theta) \cdot \begin{bmatrix} \alpha_{11} & -\alpha_{12} \\ & \alpha_{22} \end{bmatrix} \right]$$

und dann mit  $-\theta$  :  $\theta := (-\theta)$

$$\alpha_{xx2} := \left[ \alpha_{11} \cdot (\cos(\theta))^2 + \alpha_{22} \cdot (\sin(\theta))^2 \right]$$

$$\alpha_{yy2} := \left[ \alpha_{11} \cdot (\sin(\theta))^2 + \alpha_{22} \cdot (\cos(\theta))^2 \right]$$

$$\alpha_{xy2} := \left[ 2 \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\theta) \cdot \begin{bmatrix} \alpha_{11} & -\alpha_{12} \\ & \alpha_{22} \end{bmatrix} \right]$$

$$T1 := \left[ \begin{array}{c} N \\ - \\ 2 \end{array} \left[ \begin{array}{l} Q111 \cdot \alpha_{xx1} + Q112 \cdot \alpha_{yy1} + Q116 \cdot \alpha_{xy1} \dots \\ + Q211 \cdot \alpha_{xx2} + Q212 \cdot \alpha_{yy2} + Q216 \cdot \alpha_{xy2} \end{array} \right] \cdot D \right]$$

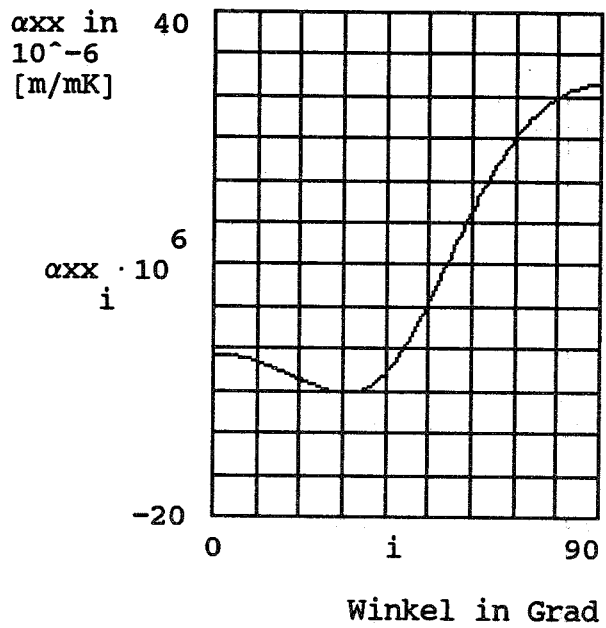
$$T2 := \left[ \begin{array}{c} N \\ - \\ 2 \end{array} \left[ \begin{array}{l} Q112 \cdot \alpha_{xx1} + Q122 \cdot \alpha_{yy1} + Q126 \cdot \alpha_{xy1} \dots \\ + Q212 \cdot \alpha_{xx2} + Q222 \cdot \alpha_{yy2} + Q226 \cdot \alpha_{xy2} \end{array} \right] \cdot D \right]$$

2.) Endberechnung von  $\alpha_{xx}$  :

$$\alpha_{xx} := \frac{A_{22} \cdot T_1 - A_{12} \cdot T_2}{A_{11} \cdot A_{22} - A_{12}^2}$$

i := 0 ..90

Thermischer Ausdehnungskoeffizient



PRNCOLWIDTH := 15

M<sub>i,0</sub> := i

M<sub>i,1</sub> :=  $\alpha_{xx} \cdot 10^6$   
i

WRITEPRN(out) := M

## C A E S A R (T)

Caesar(T) dient zur Berechnung der thermischen Ausdehnungskoeffizienten von +/-  $\theta$  Laminaten bei einer bestimmten Temperatur T.

Die Temperaturabhängigkeit der elastischen Konstanten wird durch eine lineare Extrapolation der bekannten Werte bei 293 K und 77 K nach folgender Gleichung abgeschätzt :

$$E(T) := \frac{E_1 - E_2}{T_1 - T_2} \cdot (T + 293) + E_1 \quad \square$$

Die passenden  $\alpha$ -Werte zur jeweiligen Temperatur müssen per Hand eingegeben werden.

.  
.  
.  
.  
usw. siehe 3D-Programm  
.  
.  
.  
.

3 D dient zur Berechnung eines dreidimensionalen  $\alpha$ - $\omega$ -T-Plotts auf der Basis des Caesar-Programms.

Die 19x19 Matrix wird dabei, beginnend bei 0 K, zeilenweise in 293/18 Gradschritten berechnet. Dazu muß am Ende des Programms in der Definition von T nur der Faktor von 0 in ganzzahligen Schritten auf 18 erhöht werden und die Berechnung durchgeführt werden. Die Neuberechnete Zeile wird dann an die Datei mit filename "out" = c: mathcad dateien X.dat angehängt.

Der  $\alpha$ -Verlauf der UD-Verbunde wird mit den Dateien "a1" = c: mathcad dateien Y.dat und "a2" = c: mathcad dateien Z.dat geladen und für die benötigte Temperatur interpoliert.

Die Temperaturabhängigkeit der elastischen Konstanten wird durch eine lineare Extrapolation der bekannten Werte bei 293 K und 77 K nach folgender Gleichung abgeschätzt :

$$\text{z.B. } E(T) := \frac{E_1 - E_2}{T_1 - T_2} \cdot (T + 293) + E_1 \quad \square$$

1.) Berechnung der Elemente von A :      Standartwerte in den Gleichungen für M40-Verbund !!!

$$\text{E-Modul in Faserrichtung in GPa : } E_{11} := \frac{225 - 200}{216} \cdot (T - 293) + 225$$

$$\text{E-Modul senkrecht zur Faserrichtung : } E_{22} := \frac{7.9 - 10.1}{216} \cdot (T - 293) + 7.9$$

$$\text{Hauptpoissonzahl : } \nu_{12} := \frac{0.26 - 0.32}{216} \cdot (T - 293) + 0.26$$

$$\text{Nebenpoissonzahl : } \nu_{21} := \frac{0.008 - 0.07}{216} \cdot (T - 293) + 0.008$$

$$\text{Schерmodul in GPa : } G_{12} := \frac{5 - 8}{216} \cdot (T - 293) + 5$$

+/- Winkel in Grad : (siehe rechts außen)

Laden der Temperaturabhängigkeit der  $\alpha$  :

```

A1 := READPRN(a1)           A2 := READPRN(a2)

T1 := A1 <0>            $\alpha_1$  := A1 <1>           T2 := A2 <0>            $\alpha_2$  := A2 <1>

T $\alpha_1$  := pspline(T1, $\alpha_1$ )           T $\alpha_2$  := pspline(T2, $\alpha_2$ )

 $\alpha_{11}(T)$  := interp(T $\alpha_1$ ,T1, $\alpha_1$ ,T)    $\alpha_{22}(T)$  := interp(T $\alpha_2$ ,T2, $\alpha_2$ ,T)

```

$\theta :=$

- 0
- 5
- 10
- 15
- 20
- 25
- 30
- 35
- 40
- 45
- 50
- 55
- 60
- 65
- 70
- 75
- 80
- 85
- 90

$\alpha$  einer Lage in Faserrichtung in m/mK :  $\alpha_{11} := \alpha_{11}(T)$

$\alpha$  einer Lage senkrecht zur Faserrichtung :  $\alpha_{22} := \alpha_{22}(T)$

Anzahl der Lagen : N := 82

Dicke der Lagen in m :  $D := \frac{0.01}{82}$

1.1.) Berechnung der Elemente von Q :

.  
 .  
 .  
 usw. wie Caesar  
 .  
 .  
 .

i := 0 ..18

$$T = \frac{293}{18} \cdot 0$$

```

M0,i :=  $\alpha_{xx}$ i           PRNCOLWIDTH := 15
APPENDPRN(out) := M

```

Thermischer Ausdehnungskoeffizient

