

**Das Verhalten von Kunststoffen unter  
dem Einfluss wechselnder Umgebungsfeuchte  
und -temperatur**

von

Karin Lutterbeck

**RAM-Verlag  
2016**

# INHALTSVERZEICHNIS

<b>1</b>	<b>Einführung und Zielsetzung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen zum Sorptionsverhalten von Kunststoffen</b>	<b>3</b>
2.1	Unverstärkte Kunststoffe	3
2.2	Experimentelle Ergebnisse zum Sorptionsverhalten	6
2.2.1	Ungesättigte Polyesterharze	6
2.2.2	Polycarbonat und Polyamid 6	7
2.3	Sorptionsverhalten glasfaserverstärkter Kunststoffe	8
2.4	Experimentelle Ergebnisse zum Sorptionsverhalten von glasfaserverstärkten Kunststoffen	11
2.4.1	Glasfaserverstärkte UP-Harze	11
2.4.2	Glasfaserverstärktes Polycarbonat und Polyamid 6	15
<b>3</b>	<b>Diffusionsverhalten von unverstärkten und verstärkten Kunststoffen</b>	<b>20</b>
3.1	Experimentelle Ergebnisse zum Diffusionsverhalten von Kunststoffen	21
3.1.1	Unverstärkte Kunststoffe	21
3.1.2	Glasfaserverstärkte Kunststoffe	23
3.2	Die Temperaturabhängigkeit des Diffusionskoeffizienten	27
3.3	Bedeutung des Diffusionswiderstandes	29
3.4	Sorptionszyklen	30
<b>4</b>	<b>Temperaturenwechsel in Zeitzyklen</b>	<b>35</b>
4.1	Glasfaserverstärkte UP-Harze	35
4.2	Unverstärktes und verstärktes Polycarbonat und Polyamid 6	38
<b>5</b>	<b>Schädigungsmechanismen glasfaserverstärkter Kunststoffe durch Feuchte- und Temperatureinfluss</b>	<b>39</b>
5.1	Glasfaserverstärkte UP-Harze	39
5.2	Verstärktes Polycarbonat und Polyamid 6	48
<b>6</b>	<b>Untersuchungen zum mechanischen Verhalten von Kunststoffen unter Feuchte- und Temperatureinfluss</b>	<b>49</b>
6.1	Kurzzeitzugversuche bei unterschiedlichen Feuchtegehalten der Kunststoffe in Abhängigkeit von der Temperatur	49
6.1.1	UP-Harzlaminate	49
6.1.2	Unverstärktes und verstärktes PC	56
6.1.3	Unverstärktes und verstärktes PA 6	60
6.2	Kurzzeitzugversuche nach zyklischem Temperaturwechsel	62

<b>7</b>	<b>Verformungsverhalten von Kunststoffen unter Last-, Feuchte- und Temperatureinfluss</b>	<b>64</b>
7.1	Last- und Feuchteeinfluß	64
7.2	Temperaturwechselbeanspruchung bei unterschiedlichen Gleichgewichtsfeuchtegehalten der Kunststoffe	68
7.3	Verformungsverhalten bei Feuchtewechselbeanspruchung unter konstanter Last	73
7.4	Theoretische Grundlagen zum Zeit-Temperatur-Superpositionsprinzip	74
7.4.1	Beispiel zur Dehnungsermittlung mit dem Prinzip der Zeit-Temperaturverschiebung	76
<b>8</b>	<b>Folgerungen für die Praxis</b>	<b>79</b>
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>80</b>
<b>10</b>	<b>Abkürzungen und Formelzeichen</b>	<b>82</b>
<b>11</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>85</b>
<b>12</b>	<b>Anhang</b>	<b>96</b>
12.1	Herstellung der Thermoplaste und Lamine	96
12.2	Aufbau der Lamine	98
12.3	Angaben zur Versuchsdurchführung	100
12.4	Berechnung der durch Feuchte und Temperaturwechsel hervorgerufenen Eigenspannungen in GF-UP	100

# 1 Einführung und Zielsetzung

Kunststoffe finden in immer stärkerem Maße Verwendung als Konstruktionswerkstoffe. Daher müssen Dimensionierungskriterien geschaffen werden, die den spezifischen Eigenschaften dieser Werkstoffe gerecht werden.

Die Dimensionierung nach maximal zulässigen Spannungen oder Dehnungen sind zum Beispiel solche Konzepte / 1-6 /. Ein wesentlicher Gesichtspunkt für diese Dimensionierungskonzepte ist die Betrachtung von Umgebungseinflüssen auf den Werkstoff, die dessen Eigenschaftsbild erheblich verändern können.

Welche Umgebungs- oder Umwelteinflüsse wirksam sind, hängt von den Einsatzbedingungen des Materials ab. Es können Flüssigkeiten, Dämpfe und Gase sein, die Alterungs- und Korrosionserscheinungen im Kunststoff hervorrufen, denen bei der Dimensionierung Rechnung getragen werden muß.

In allen Einsatzfällen muß jedoch mit dem Einfluß von Wasser, entsprechend der vorliegenden Luftfeuchte, gerechnet werden / 7-15 /. Da Kunststoffe nicht diffusionsdicht sind, nehmen sie in Abhängigkeit ihres Sorptionsvermögens, der relativen Luftfeuchte und der herrschenden Temperatur mehr oder weniger viel Wasser auf / 7-15 /.

Bei der Dimensionierung von Kunststoffbauteilen werden die aus Wasseraufnahme bzw. -abgabe resultierenden Verformungen nur selten beachtet, obwohl die dadurch im Bauteil hervorgerufenen Eigenspannungen eine deutliche Verlagerung der effektiven Belastungshöchstwerte bewirken können / 16, 17 /. Völlig vernachlässigt werden bisher Auswirkungen von Feuchteschwankungen auf Kunststoffe, denen sie im praktischen Einsatz unterworfen sind. Diese können z.B. durch Änderung der relativen Luftfeuchte oder Temperaturschwankungen (z.B. Jahreszeiten- oder Tag- und Nachtwechsel) bedingt sein.

Als weitere Einflußgröße in Verbindung mit wechselnder Feuchte muß die Temperatur berücksichtigt werden. In der Literatur werden dabei zum Teil aus Zeitraffergründen oder in Anlehnung an den Praxiseinsatz (z.B. Flugzeugbau / 8-24 /) hohe Temperaturspitzen gewählt, die hinsichtlich des Einflusses kritischer als niedrige Temperaturen gewertet werden. Unter normalen Einsatzbedingungen, z.B. jahreszeitlich bedingt (Herbst - Winter, Frostnächte), treten im Außeneinsatz von Kunststoffbauteilen mehr oder weniger kurze Zyklen zu Temperaturen unter dem Gefrierpunkt auf.

Trotz der relativ niedrigen Temperaturleitfähigkeit der Kunststoffe laufen Temperatenausgleichsvorgänge bei realen Dicken im Vergleich zu Diffusionsvorgängen schnell ab. Gleichzeitig werden mit fallender Temperatur auch die die Geschwindigkeit des Ausgleichsvorgangs beschreibenden Diffusionskoeffizienten sehr klein. Ein Werkstoff mit hohem Feuchtegehalt kann innerhalb einer kurzen Zeitspanne tiefer Temperatur kaum einen Konzentrationsausgleich in Richtung eines neuen Gleichgewichtszustandes mitmachen.

Das absorbierte Wasser muß entsprechend der Schmelzdruckkurve / 25 / einen Phasenwechsel zum festen Zustand vollziehen. Die mit dem Phasenwechsel verbundene zusätzliche Volumenzunahme des Wassers vom flüssigen zum festen Zustand beeinflusst aber das Schädigungsverhalten der Kunststoffe.

Aus neueren Erkenntnissen zum Sorptions-, Diffusions- und Dimensionsänderungsverhalten von Kunststoffen / 16, 17, 26 / liegen Erkenntnisse vor, die eine Klärung des Einflusses der wechselnden Feuchte- und Temperaturbedingungen auf das Werkstoffverhalten gestatten. Die Ergebnisse der in der Literatur häufig in Anlehnung an flugtechnische Bedingungen durchgeführten Untersuchungen (z.B. / 19-24 /) zeigen, dass Einflüsse von Feuchtewechseln und Hochtemperaturzyklen vorliegen.

Systematische Untersuchungen mit Einbeziehung von Temperaturwechseln zu Temperaturen unter 0 °C fehlen jedoch.

Die vorliegende Arbeit zielt darauf ab, das Materialverhalten unterschiedlicher Kunststoffe unter dem Einfluß von Feuchte und Temperaturwechseln systematisch zu erfassen und ihre Auswirkungen auf das Schädigungsverhalten verschiedener Kunststoffe zu beschreiben.

Es soll der Einfluß wechselnder Umgebungsbedingungen sowohl auf die Kurzzeiteigenschaften als auch auf die Langzeiteigenschaften untersucht werden. Die Ergebnisse sollen dem Konstrukteur Hilfen bei der Dimensionierung von Kunststoffbauteilen liefern.

Die in den folgenden Kapiteln vorgestellten Untersuchungen wurden an unterschiedlich aufgebauten Laminaten und unverstärktem und verstärktem Polyamid 6 und Polycarbonat durchgeführt. Alle Werkstoffe kommen zum Außeneinsatz, z.B. im Apparate-, Rohrleitungsbau und im Automobil- und Flugzeugbau. Es wurden von jeder Kunststoffgruppe je ein wenig sorbierender Kunststoff (Bisphenol-A-UP-Harz (Vinylester-Harz) und Polycarbonat) und sehr stark wasseraufnehmender (Standard-UP-Harz (Orthophthalsäure-Harz) und Polyamid 6) gewählt.