

Hohlkugelkomposit – Charakterisierung thermischer und mechanischer Eigenschaften eines neuen Leichtbauwerkstoffes

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktor-Ingenieurin
(Dr.-Ing.)**

von Dipl.-Ing. Erika Baumeister

geb. am 22.09.1967 in Oradea

genehmigt durch die Fakultät für Maschinenbau
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Gutachter Prof. Dr.-Ing. habil. S. Klaeger
Prof. Dr.-Ing. habil. D. Regener
Dr.-Ing. G. Stephani

Promotionskolloquium am 23.04.2004

Vorwort und Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Fertigungstechnik und Qualitätssicherung der Otto-von-Guericke-Universität in Magdeburg.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. S. Klaeger bin ich für die wohlwollende Förderung der Arbeit und die damit verbundenen konstruktiven Diskussionen zu besonderem Dank verpflichtet. Mein Dank gilt auch Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. mult. F. Lierath und Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. M. Molitor als Instituttleiter sowie Frau Prof. Dr.-Ing. habil. D. Rege-ner und Herrn Dr.-Ing. Stephani für die sorgfältige Durchsicht der Arbeit.

Darüber hinaus möchte ich allen Mitarbeitern des Institutes für Fertigungstechnik und Qualitätssicherung sowie des Institutes für Werkstofftechnik und Werkstoffprüfung der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg danken, die durch ihre Arbeit und Fachgespräche zur Vollendung meiner Dissertation beigetragen haben. Insbesondere gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. H. Stroppe und Herrn Prof. Dr. rer. nat. habil. U. Wendt.

Sowohl bei der Firma Netzsch als auch beim Landesmaterialprüfamt Sachsen-Anhalt möchte ich mich für die Unterstützung bei der Durchführung spezieller Untersuchungen bedanken.

Die abschließende Danksagung widme ich meinen Eltern, die meine Arbeit und meine akademische Laufbahn stets unterstützt haben.

Magdeburg, im April 2004

Erika Baumeister

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Stand der wissenschaftlich-technischen Erkenntnisse.....	3
2.1	Leichtbau im Maschinenbau, speziell im Werkzeugmaschinenbau.....	3
2.2	Leichtbauweisen.....	5
2.3	Kriterien für die Auswahl von Leichtbauwerkstoffen.....	6
2.4	Trends in der Entwicklung ausgewählter Leichtbauwerkstoffe.....	8
2.4.1	Mineralguss.....	8
2.4.2	Werkstoffe mit zellulärer Struktur.....	10
2.4.3	Faserverbundwerkstoffe.....	15
2.4.4	Sandwich-Verbundwerkstoffe.....	16
3	Aufgabenstellung.....	17
4	Werkstoffkonzept.....	18
4.1	Bindemittelsysteme.....	19
4.1.1	Bindemittel Epoxydharz.....	19
4.1.2	Verwendete Bindemittelsysteme.....	20
4.2	Füllstoffe.....	22
4.2.1	Kugelige Füllstoffe.....	22
4.2.2	Verwendete kugelige Füllstoffe.....	24
4.2.2.1	Massive Kugeln.....	24
4.2.2.2	Hohlkugeln.....	26
4.2.2.3	Poröse Kugeln.....	31
4.2.3	Faserige Füllstoffe.....	33
4.2.4	Verwendete Fasern.....	33
4.3	Definition der Probenvariation.....	35
5	Verwendete Prüfmethode von Hohlkugelkomposit	39
5.1	Prüfung thermischer Eigenschaften.....	39
5.1.1	Differential-Scanning-Calorimetrie (DSC).....	39
5.1.2	Thermomechanische Analyse (TMA).....	40
5.1.3	Meßmethode zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit.....	41
5.2	Prüfung mechanischer Eigenschaften.....	42
5.2.1	Physikalisch-mechanische Eigenschaften.....	43
5.2.1.1	Dichte.....	43
5.2.2	Statisch-mechanische Eigenschaften.....	43
5.2.2.1	Zugversuch.....	43
5.2.2.2	Elastizitätsmodul und Querkontraktionszahl.....	44
5.2.2.3	Druckversuch.....	44
5.2.2.4	Zeitstandverhalten im Druckversuch.....	45
5.2.2.5	Biegeversuch.....	45

5.2.3	Dynamisch-mechanische Prüfung.....	46
5.2.3.1	Dynamisch-mechanische Analyse (DMA).....	46
5.2.4	Rasterelektronenmikroskopie (REM).....	47
6	Ermittlung des Eigenschaftsprofils von Hohlkugelkomposit.....	48
6.1	Charakterisierung der Aushärtung mittels DSC-Methode.....	48
6.2	Ermittlung thermischer Eigenschaften.....	53
6.2.1	Thermischer Längenausdehnungskoeffizient.....	53
6.2.2	Spezifische Wärmekapazität.....	58
6.2.3	Wärmeleitfähigkeit.....	64
6.3	Ermittlung mechanischer Eigenschaften.....	65
6.3.1	Physikalisch-mechanische Eigenschaften.....	65
6.3.1.1	Dichte.....	65
6.3.2	Statisch-mechanische Eigenschaften.....	67
6.3.2.1	Spannungs-Dehnungsverhalten bei Zugbeanspruchung.....	67
6.3.2.2	Spezifische Zugfestigkeit.....	71
6.3.2.3	Zug-Elastizitätsmodul, spezifische Steifigkeit und Dehnlänge.....	72
6.3.2.4	Querkontraktionszahl.....	74
6.3.2.5	Spannungs-Stauchungsverhalten bei Druckbeanspruchung.....	74
6.3.2.6	Druck-Elastizitätsmodul.....	79
6.3.2.7	Zeitstandverhalten bei Druckbeanspruchung.....	81
6.3.2.8	Spannungs-Dehnungsverhalten bei Biegebeanspruchung.....	83
6.3.2.9	In-situ-Biegeversuche.....	87
6.3.3	Dynamisch-mechanische Eigenschaften.....	93
6.3.3.1	Dynamisch-mechanische Analyse (DMA).....	93
7	Bewertung der werkstoffkundlichen Untersuchungen.....	96
8	Testung des Einsatzes von HKK-Strukturen an ausgewählten Baugruppen.....	104
8.1	Vorrichtung aus HKK-Verbund.....	104
8.2	Fräsmaschinentisch aus HKK-Verbund.....	107
8.3	Roboterarme aus HKK-Verbund.....	112
9	Zusammenfassung und Ausblick.....	125
10	Literatur.....	128

Abkürzungen, Formelzeichen und Einheiten

A	mm ²	Probekörpergrundfläche
a	mm	Kantenlänge
α	K ⁻¹ ; $\mu\text{m}/(\text{m}\cdot\text{K})$	thermischer Längenausdehnungskoeffizient
$\bar{\alpha}(t_1, t_2)$	K ⁻¹ ; $\mu\text{m}/(\text{m}\cdot\text{K})$	mittlerer Längenausdehnungskoeffizient
b	mm	Breite
Bas	-	Basislinie
C	J/K	Wärmekapazität
c	J/(kg·K); J/(g·K)	spezifische Wärmekapazität
C _P	J/(kg·K); J/(g·K)	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck
C _{PH}	J/(kg·K); J/(g·K)	spezifische Wärmekapazität des Harzes
C _{PF}	J/(kg·K); J/(g·K)	spezifische Wärmekapazität des Füllstoffes
d	mm	Dicke
d _m	m	Mittlere Dicke der Probe
d _K	mm	Größtkorn
DSC _{Pr} (T)	-	DSC-Signalwert bei Temperatur T aus Probenkurve
DSC _{Bas} (T)	-	DSC-Signalwert bei Temperatur T aus der Basislinie
DSC _{Sta} (T)	-	DSC-Signalwert bei Temperatur T aus der Saphirkurve
δ	-	Verlustwinkel
tan δ	-	Tangens des Verlustwinkels
E	MPa	Elastizitätsmodul
E'	MPa	Speichermodul
E''	MPa	Verlustmodul
E _D	MPa	Druckelastizitätsmodul
E _F	MPa	Elastizitätsmodul der Faser
E _M	MPa	Elastizitätsmodul der Matrix
E _Z	MPa	Zugelastizitätsmodul
E/ ρ	Nm/g	spezifischer Elastizitätsmodul
E/(g _E · ρ)	km	Dehnlänge
EP-Harze	-	Epoxydharze
ε	%	Dehnung
ε_b	%	Randfaserdehnung
ε_F	%	Dehnung der Faser
ε_M	%	Dehnung der Matrix
ε_l	%	Längsdehnung
ε_q	%	Querdehnung
F	N	Kraft
f	mm	Durchbiegung
FEM	-	Finite-Elemente-Methode
g _E	m/s ²	Erdbeschleunigung
Gew.-%	%	Gewichtprozent
GFK	-	glasfaserverstärkte Kunststoffe
h	mm	Höhe
HKK	-	Hohlkugelkomposit
I	kg·m ²	Flächenträgheitsmoment
Θ ($\Theta = 1 - \rho^*/\rho_s$)	-	Porosität
L	mm	Stützweite
l	mm	Länge

l_0	mm	Bezugslänge
l_1	mm	Länge des Probekörpers bei t_1
l_2	mm	Länge des Probekörpers bei t_2
λ	W/(m·K)	Wärmeleitfähigkeit
$\lambda, \lambda_s = l \cdot \sqrt{A/J}$	-	Schlankheitsgrad
M	-	Matrix
m	kg; g	Masse
m_{STA}	-	Masse der Kalibriersubstanz
m_{Pr}	-	Masse Probe
v	-	Querkontraktionszahl
Pr	-	Probe
p	MPa	Druck
ρ^*	g/cm ³	Dichte des zellularen Materials
ρ_s	g/cm ³	Dichte des massiven Materials
Q	J	Wärmemenge
ρ	g/cm ³	Dichte
$1/\rho$	cm ³ /g	spezifisches Volumen
SCARA	-	Selective Compliance Assembly Robot Arm
σ	MPa	Spannung
σ_B	MPa	Biegefestigkeit
σ_D	MPa	Druckfestigkeit
σ_F	MPa	Zugfestigkeit der Faser
σ_f	MPa	Biegespannung
σ_M	MPa	Zugfestigkeit der Matrix
σ_m/ρ	Nm/g	spezifische Zugfestigkeit
$\sigma_m/(\rho \cdot g_E)$	km	Reißlänge
σ_Z	MPa	Zugfestigkeit
T	°C	Temperatur
T_{km}	K	mittlere Temperatur der kalten Oberfläche
T_{wm}	K	mittlere Temperatur der warmen Oberfläche
t	s	Zeit
T_g	°C	Glasübergangstemperatur
t_1	°C	untere Temperatur bei der $\bar{\alpha}(t_1, t_2)$
t_2	°C	obere Temperatur bei der $\bar{\alpha}(t_1, t_2)$
ψ	%	Gewichtsanteil des Füllstoffes
V	cm ³	Volumen
Vol.-%	%	Volumenprozent
ϕ	W	Wärmestrom

1 Einleitung

Die Anwendung und der Einsatz neuer kreislauffähiger Materialien für mechanische Bauteilstrukturen im Maschinenbau sind grundsätzliche Forderungen an die Werkstoffentwicklung.

Durch die Anwendung neuer, teilweise unkonventioneller Werkstoffe lassen sich zusätzliche Effekte bezüglich Qualität und Kosten bei Erzeugnissen auch unter dem Aspekt der Senkung des Energieverbrauches und der Umweltbelastung erzielen [1].

Leichte Materialien, die in ihren Eigenschaften natürlichen Vorbildern gleichen, gewinnen zurzeit in vielen industriellen Anwendungen zunehmend an Bedeutung.

Insbesondere im Werkzeugmaschinenbau spielt die Reduzierung der Massen von schnellen Bewegungselementen eine wichtige Rolle [2, 3], um die heute geforderten Vorschubgeschwindigkeiten realisieren zu können. Die dafür verwendeten linearen Direktantriebe für Dreh- und Linearbewegungen zeichnen sich gegenüber konventionellen Antrieben durch ihr hohes Beschleunigungsvermögen aus. Sollen also hohe Beschleunigungen realisiert werden, besitzt der Leichtbau für Werkzeugmaschinen- und Roboterbaugruppen eine zentrale Bedeutung.

Mit dem Begriff „Leichtbau“ besteht allgemein im Maschinenbau noch immer die Vorstellung, leichte Werkstoffe wie Aluminium, Magnesium, Titan und faserverstärkte Kunststoffe einzusetzen.

In letzter Zeit werden in zunehmendem Maße jedoch auch Leichtbauwerkstoffe verwendet, die gegenüber metallischen Werkstoffen aus alternativen recycelbaren und neuen Werkstoffen bzw. Werkstoff-Verbunden bestehen. Solcher Art sind beispielsweise die Reaktionsharzbetone, auch als Mineralguss oder Polymerbeton bezeichnet, die bei Gestellen, Spindelkästen, Tischen und Supporten in Werkzeugmaschinen sowie im Vorrichtungsbau sowohl zu einer Verbesserung des thermodynamischen Verhaltens als auch zu einer wesentlichen Massenreduzierung beitragen.

Vor allem unter dem Aspekt der Recyclingfähigkeit bietet sich als eine mögliche Variante dieser alternativen Werkstoffe der Werkstoff „Hohlkugelkomposit“ (HKK) an. Er besteht größtenteils (über 60 Vol.-%) aus Hohlkugeln unterschiedlicher Schüttdichte und Korngröße als Füllstoff und aus einem Bindemittelsystem, im untersuchten Fall aus Reaktionsharz. Durch die vor allem in den Hohlkugeln eingeschlossenen Gasvolumina weisen die Hohlkugelkomposite, meist eine gleichmäßige und wohlgeformte geschlossenzellige Struktur auf, wobei bei einigen HKK-Varianten stellenweise auch offenzellige Porenstrukturen auftreten. Wegen der zelligen Mikrostruktur gehören sie in die Gruppe der zellularen Werkstoffe (Honigwabenstrukturen, Kunststoff- oder Metallschäume).

In der vorliegenden Arbeit soll dieser neue Leichtbauwerkstoff „Hohlkugelkomposit“ hinsichtlich seines Eigenschaftsprofils näher untersucht und charakterisiert werden.

Die auf dem Markt gegenwärtig verfügbaren Hohlkugeln werden in relativ großer Variation hinsichtlich ihrer Zusammensetzung, Kornklasse, Korngrößenverteilung, Kornroh-

dichte, ihrem Schüttgewicht und ihrer Druckfestigkeit angeboten. Daraus können unterschiedliche Hohlkugelkomposit-Varianten zusammengestellt werden, die sich in ihren Eigenschaften voneinander unterscheiden.

Nun bedeutet „Leichtbau“ nicht nur einen Austausch eines Werkstoffes mit höherer Dichte gegen einen mit niedrigerer Dichte, sondern er umfasst auch die funktionsgerechte Gestaltung des Produkts, die beanspruchungsgerechte Auswahl von Werkstoffkombinationen und die Anwendung technologisch und wirtschaftlich optimaler Bauweisen und Herstellungsprozesse.

Das heißt, dass die Gestaltung von Bauteilen und die Auswahl von Werkstoffen an den jeweiligen Belastungsfall anzupassen sind. Diese Leichtbaukomponenten müssen Kräfte aufnehmen und weiterleiten, die durch statische, dynamische Beanspruchungen in Form von Zug, Druck, Schub, Biegung und Torsion sowie Temperaturveränderungen verursacht werden.

Bezogen auf den Werkstoff „HKK“ muss festgestellt werden, dass noch viele Fragen bezüglich seines Verhaltens gegenüber diesen statischen, dynamischen und thermischen Belastungen offen sind und untersucht werden müssen.

Das Ziel der Arbeit besteht in der Ermittlung eines charakteristischen Eigenschaftsprofils des Werkstoffes Hohlkugelkomposit, um statistisch gesicherte Werkstoffkennwerte zu erhalten, die den Konstrukteur in die Lage versetzen, unter verschiedenen Belastungsfällen die optimale Werkstoffkombination auswählen zu können. Dabei wird exemplarisch auf die Anforderungen im Werkzeugmaschinen- und Vorrichtungsbau näher eingegangen.

2 Stand der wissenschaftlich–technischen Erkenntnisse

2.1 Leichtbau im Maschinenbau, speziell im Werkzeugmaschinenbau

Der Leichtbau ist die Schlüsselbauweise zur Verminderung von Massen- und Trägheitskräften in Maschinen, Anlagen, Handlingtechniken und Geräten [4]. Die Anforderungen an Leichtbaustrukturen sind gekennzeichnet durch eine optimale Werkstoffausnutzung, hohe Festigkeit und Steifigkeit sowie eine maximale Funktionsintegration und Wirtschaftlichkeit.

Insbesondere bei Maschinen für die Hochgeschwindigkeitsbearbeitung in der Zerspanntechnik und in der Lasermaterialbearbeitung stellt der Einsatz von Leichtbaukonstruktionen eine wichtige Rolle zur Reduzierung der bewegten Massen dar. Völlig neue Impulse und Ansätze gehen von der Direktantriebstechnik aus, die hinsichtlich des Beschleunigungsvermögens, der Achsgeschwindigkeiten und der Positioniergenauigkeiten sowie der Regeldynamik bisherigen Antriebssystemen überlegen ist. Der Einsatz von Linearmotoren, gekoppelt mit schnellen Steuerungen, ermöglicht z.B. Vorschubgeschwindigkeiten von 30 bis 80 m/min bei der Lasermaterialbearbeitung. Untersuchungen in [5] weisen aus, dass eine technologisch bedingte Verdopplung der Vorschubgeschwindigkeit bei gegebener Kreis- und Eckenkontur beim Laserschneiden bereits eine Vervierfachung des Beschleunigungsvermögens der zu bewegenden Massen erfordert. Das Beschleunigungsvermögen der Vorschubachsen kann ohne Überdimensionierung der Vorschubantriebe nur durch eine Massereduktion der bewegten Baugruppen gesteigert werden. Aus diesem Grunde sind die Massen von Bewegungselementen an Maschinen, Anlagen, Robotern und Transportsystemen durch geeignete Leichtbauweisen zu reduzieren.

Die Anwendung des Leichtbaus ist vor allem im Werkzeugmaschinenbau noch relativ gering [6], da bekannte Leichtbauweisen, deren Ursprünge im Flugzeugbau (festigkeitsorientierter Leichtbau) liegen, nur eingeschränkt auf den Werkzeugmaschinenbau (steifigkeitsorientierter Leichtbau) übertragbar sind. Während die Optimierung der Bauteileigenschaften durch Finite-Elemente-Methoden (FEM) in Einzelfällen zu einer Verbesserung des Beschleunigungs- und Schwingungsverhaltens geführt hat [7], befindet sich der Einsatz neuer alternativer Werkstoffe zur Massereduzierung im Werkzeugmaschinenbau noch in den Anfängen. Die Bauformen der heute am Markt verfügbaren Werkzeugmaschinen resultieren aus der Anwendung von Konstruktionsmethoden und –systematiken des klassischen Werkzeugmaschinenbaus. Diese Überlegungen basieren auf hohen Gestaltungsanforderungen an die Steifigkeit der Gesamtmaschine und bestimmen im Wesentlichen die Wahl des Werkstoffes, die Art der Achsanordnung (Kinematik) und Dimensionierung des Antriebssystems. Das Ergebnis sind relativ große Massen der Bewegungselemente. Bei Achsanordnungen mit langen kinematischen Ketten summieren sich die von den einzelnen Achsantrieben zu beschleunigenden Massen. Die Folgen sind relativ große zu installierende Antriebsleistungen.

Gegenwärtig geht ein großes Entwicklungspotenzial von der Direktantriebstechnik mit entsprechenden Steuer- und Regelungssystemen aus. Sowohl Linearantriebe als auch Antriebe auf Basis der Magnetschwebetechnik werden zu einem Innovationsschub bei der Neugestaltung von Führungsstrukturen in verschiedenen Maschinenbauerzeugnissen führen. Die Entwicklung von neuen Leichtbau-Verbundkonstruktionen für diese innovative Direktantriebstechnik ist deshalb von Bedeutung, weil wegen der fehlenden Kraftübersetzung beim Direktantrieb die für diese Beschleunigungen aufzubringenden Kräfte im Wesentlichen von den Massen dieser Baugruppen beeinflusst werden.

Steigende Erwartungen bezüglich höherer Genauigkeit und eines besseren Beschleunigungs- und Schwingungsverhalten werden auch an Industrieroboter gestellt. So ergeben sich Anforderungen an die Positionier- und Wiederholgenauigkeiten, an kürzere Anfahr- und Abbremsphasen und an das Schwingungsverhalten sowie an die thermische Steifigkeit dieser Handhabungssysteme [8,9]. Mit dem Einsatz von Faserverbundwerkstoffen gab es mehrere Versuche, solche Handhabungssysteme aus Stabwerkstrukturen aufzubauen [7,10-12]. Der Aufwand zur Herstellung von dünnwandigen kohlefaserverstärkten Rohren ist jedoch erheblich [13,14]. Nachteilig wirkten sich auch die Unterschiede der Wärmeausdehnungskoeffizienten der verwendeten Werkstoffe aus, die zu größeren thermischen Verlagerungen führen.

Mit dem weiteren Einsatz von ausschließlich monolithischen Werkstoffen können keine weiteren Massereduzierungen mehr erzielt werden. Die Anwendung alternativer Leichtbauwerkstoffe im Maschinenbau wird deshalb immer zwingender. Durchgeführte Voruntersuchungen über die Einsatzmöglichkeit von HKK-Werkstoffen [15, 16] zeigen erhebliches Potenzial, weil festzustellen ist, dass bei einer optimierten Geometrie und Lastverteilung die gewichtsbezogene Steifigkeit umso größer wird, je niedriger die Bauteilmasse ist.

Das Ziel des Konstruktionsleichtbaus im Werkzeugmaschinenbau besteht in der Gestaltung, Dimensionierung und Fertigung von leichteren Bauteilen unter Einbeziehung neuerer Nachweiskonzepte (Tragfähigkeits-, Restfestigkeits- und Schadenstoleranznachweise). Die Arbeitsschritte zur Realisierung solcher Leichtbaukonzepte sind:

1. Klärung der Aufgabenstellung mittels Beschaffung von Informationen über die Anforderungen an Leichtbaugruppen,
2. Lösungsfindung unter Berücksichtigung der wirkenden Kräfte, der Eigenschaften der einzusetzenden Werkstoffe sowie der Dimensionierung und Montierbarkeit,
3. Umsetzung in Entwürfe durch maßstäbliche Konkretisierung der Skizzen,
4. Ausarbeitung der Fertigungsunterlagen.

Bei der Auslegung komplizierter Leichtbauelemente werden numerische Lösungsverfahren (Finite–Elemente–Methoden) bevorzugt [17, 18]. Diese Methode ist jedoch bei der Bestimmung des Bauteilverhaltens nur einsetzbar, wenn auch die entsprechenden Materialkennwerte für den jeweils einzusetzenden Werkstoff dem Konstrukteur vorliegen.

2.2 Leichtbauweisen

Der Leichtbau ist eine interdisziplinäre Ingenieurwissenschaft, die auf Erkenntnissen der Festigkeitslehre, Rechentechnik, Werkstoffkunde und Fertigungstechnik basiert [17]. In der Entwicklung von Werkzeugmaschinen in Leichtbauweise zeichnen sich gegenwärtig folgende Strategien ab:

- Formleichtbau, charakterisiert durch eine bessere Kräfteverteilung und Formgebung von Bauelementen und eine optimale Ausnutzung des Werkstoffes zur Verbesserung des Funktionsverhaltens,
- Strukturleichtbau, dessen Bauteile unter Nutzung von neuen Werkstoffstrukturen leichter ausgeführt werden,
- Stoffleichtbau, der mittels Substitution schwerer Werkstoffe durch leichtere bei gleichzeitiger Gewährleistung der Festigkeits- oder Steifigkeitseigenschaften die Masse von Bauelementen verringert,
- Bedingungsleichtbau, in dem versucht wird, die überzogenen Sicherheitsanforderungen abzubauen und optimierte Komponenten in der Konstruktion zu verwenden.

Die Entwicklung von leichteren Maschinenbauelementen kann nur durch eine optimale Kombination aller Leichtbau–Strategien realisiert werden (**Bild 2.1**). Nur unter ganzheitlicher Betrachtungsweise und unter Berücksichtigung von werkstofftechnischen, gestalterischen und fertigungstechnischen Gesichtspunkten kann das Leichtbaupotenzial wirkungsvoll ausgeschöpft werden [6].

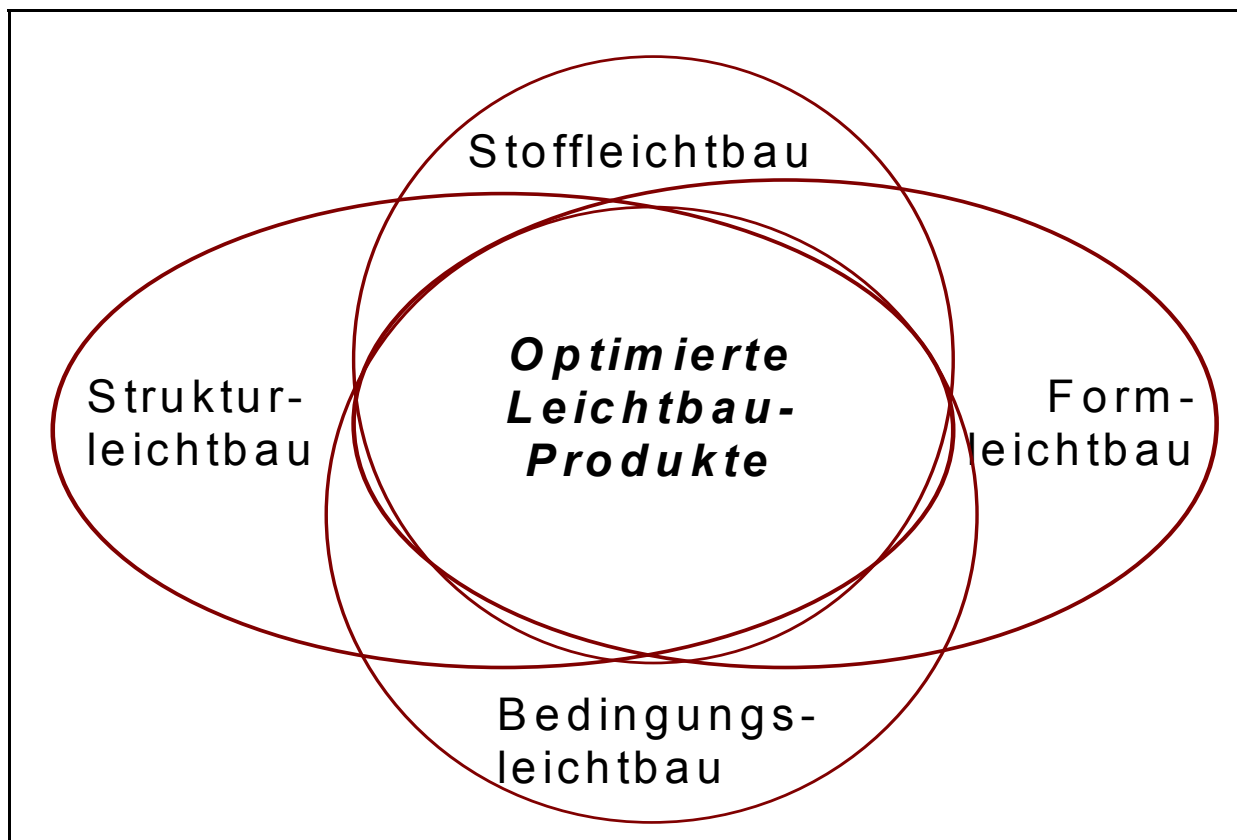


Bild 2.1: Prinzipien des Leichtbaus

Bei der Gestaltung von Leichtbaustrukturen müssen zusätzlich auch die herstellungstechnischen Gesichtspunkte verschiedener Bauweisen beachtet werden [19]:

- Differenzialbauweise ist das klassische Prinzip der konstruktiven Gestaltung, bei dem die Einzelteile durch Nieten, Schrauben oder Schweißen verbunden werden. Als Vorteil wird das Recyceln der einzelnen Werkstoffe angesehen. Probleme können jedoch durch die Kerbwirkung und die Korrosion auftreten.
- Bei der Integralbauweise wird eine Minimierung der Einzelteile angestrebt. Die Bauteile bestehen meistens aus einem Stück, die durch eine kostenintensive spanende Bearbeitung hergestellt werden, somit entstehen auch höhere Materialkosten.
- Bei der integrierenden Bauweise werden die Leichtbauteile aus Einzelelementen mittels Fügen zu einer Einheit verbunden. Der Vorteil dieses integrierenden Prinzips ist darin zu sehen, dass jeweils die positiven Merkmale der Addition und Integration lokal ausgenutzt werden, um den Problemen bezüglich Kerbwirkung, Korrosion und Rissausbreitung entgegenzuwirken.
- Die Verbundbauweise kombiniert optimal verschiedene Materialien entsprechend ihren spezifischen Eigenschaften. Probleme bereitet die Fertigung. Beispiele hierfür sind die Sandwich- und die Faserverbundbauweise.

Aus der Summe der Möglichkeiten wird deutlich, dass es keine Leichtbauweise gibt, die universell eingesetzt werden kann und dass sich die Entwicklung von Leichtbauanwendungen in der heute schon bestehende Breite auf konkrete Produkte weiter fortsetzen wird.

2.3 Kriterien für die Auswahl von Leichtbauwerkstoffen

Das statische, dynamische und thermische Verhalten einer Maschinenkonstruktion wird durch den Werkstoff, die geometrische Gestalt des Bauteils sowie die Art, Lage und Richtung der Krafteinleitung in das Bauteil bestimmt. Maßgebend für das Bauteilverhalten sind jedoch die Werkstoffeigenschaften des ausgewählten Werkstoffes.

Bei der Wahl des geeigneten Werkstoffes spielen im Leichtbau neben den klassischen physikalischen und mechanischen Kenngrößen der Werkstofftechnik auch die spezifischen Werkstoffeigenschaften eine wichtige Rolle. Bei den spezifischen Werkstoffeigenschaften werden die mechanischen Werkstoffeignungswerte auf die Dichte bzw. auf das Produkt der Dichte (ρ) und der Erdbeschleunigung (g_E) bezogen. Man erhält somit das spezifische Volumen ($1/\rho$, $1/(\rho \cdot g_E)$), den spezifischen Elastizitätsmodul (E/ρ), die spezifische Zugfestigkeit (σ_m/ρ), die Dehnlänge ($E/(\rho \cdot g_E)$) oder die Reißlänge ($\sigma_m/(\rho \cdot g_E)$). Ebenso können die Materialkosten oder der Energieaufwand auch auf die Dichte von Werkstoffen bezogen werden [20].

Der Bezug der Kennwerte auf die Dichte ist wichtig, um verschiedene Wertungen von Werkstoffen durchführen zu können. So wird das eingenommene Volumen eines Werkstoffes umso größer, je größer der Zahlenwert des spezifischen Volumens ist.

Der Zahlenwert für die spezifische Steifigkeit ist danach ein Maß für den Widerstand gegen Verformbarkeit bzw. bei der Reißlänge ein Maß für die festigkeitsmäßige Ausnutzbarkeit unter reiner Zugbeanspruchung [17].

Bei der konstruktiven Gestaltung von Bauteilen sind vor allem die Geometrie und die vorhandene Belastung bzw. die Höhe der Belastung von Bedeutung. Während bei kleinen Strukturelementen die spezifische Steifigkeit wichtig ist, zählt bei den ebenen Platten die Steifigkeit gegen Beulen und bei den Stäben die spezifische Steifigkeit gegen Biegen oder Knicken. Bei der Betrachtung von Knicklasten (F_K) für Rechteckprofile ist der Einfluss vom E-Modul (E), vom kleinsten axialen Trägheitsmoment (I_{min}) und der Knicklänge (l_K) zu berücksichtigen:

$$F_K = \pi^2 \cdot \frac{E \cdot I_{min}}{l_K^2} \quad (1)$$

Das Flächenträgheitsmoment errechnet sich aus:

$$I_{min} = \frac{b \cdot s}{12} \quad (2),$$

wobei b die Breite des Stabes und s die Flächenmasse $\frac{m}{A} = s \cdot \rho$ sind.

Werden konstruktive Größen als gleich angenommen, beispielsweise für zwei Varianten eingesetzter Werkstoffe bei gleicher Gesamtbelastung:

$$F_{K1} = F_{K2}; \quad (3)$$

$$E_1 \cdot I_1 = E_2 \cdot I_2; \quad (4)$$

$$E_1 \cdot s_1^3 = E_2 \cdot s_2^3 \quad (5),$$

ergibt sich demzufolge der Flächenmassenvergleich:

$$\frac{m_{A1}}{m_{A2}} = \sqrt[3]{\frac{E_2}{E_1} \cdot \frac{\rho_1}{\rho_2}} \quad (6)$$

Die Kenngröße $\sqrt[3]{E} \cdot \frac{1}{\rho}$ charakterisiert die Verformung oder die Stabilität eines Trägers gegen Knicken und ist als Knickgütezahlf definiert [18, 141, 142].

Die materialspezifische Steifigkeit bei der Biegebelastung wird ebenfalls als $\sqrt[3]{E} \cdot 1/\rho$ definiert.

Eine weitere Betrachtung kann beim Beulen von Platten vorgenommen werden, wenn der Stoffeinfluss durch die Beulgütezahlf $\sqrt{E} \cdot 1/\rho$ kennzeichnet wird.

Leichtbauwerkstoffe für den Werkzeugmaschinenbau sollen nach Möglichkeit ein höheres gewichtsbezogenes Steifigkeits- und Festigkeitsverhalten und höhere Materialdämpfungswerte sowie eine geringere Wärmeausdehnung gegenüber den bisher eingesetzten Eisenwerkstoffen besitzen.

2.4 Trends in der Entwicklung ausgewählter Leichtbauwerkstoffe

2.4.1 Mineralguss

Mineralguss (auch in der Literatur als Polymerbeton, Reaktionsharzbeton bezeichnet) ist ein reaktionsharzgebundenes Material, welches mit zumeist mineralischen Füllstoffen (Quarz, Granit etc.) verschiedener Korngrößen nach bestimmten Sieblinien hochgradig angereichert ist (**Bild 2.2**) [21-22].

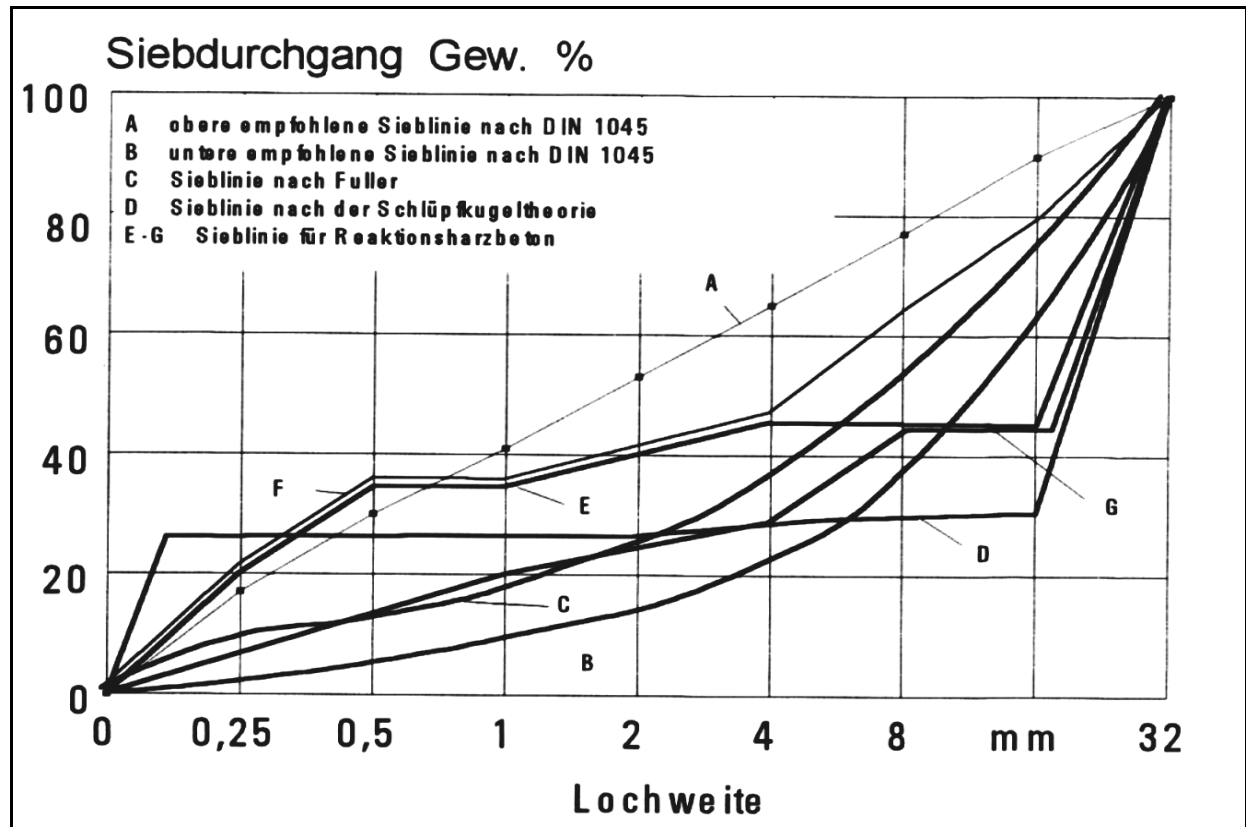


Bild 2.2: Sieblinien mit dem Größtkorn $d_K = 32 \text{ mm}$

Als Bindemittel fungieren Thermo- oder Duroplaste. Die Eigenschaften des Bindemittels, deren prozentuale Anteile 7 bis 20 % vom Gesamtanteil des Polymerversbands betragen, sind für das Eigenschaftsspektrum des Mineralgusses prägend. Aufgrund des geringeren Schwingungsverhaltens, der guten mechanischen und thermischen Eigenschaften und der guten Verarbeitbarkeit bevorzugt man kaltaushärtende Epoxydharze als Bindemittel.

Der Werkstoff Mineralguss ist seit den 50-er Jahren bekannt und als Werkstoff für Gestelle, Betten oder Ständer im Werkzeugmaschinenbau zuerst eingesetzt worden. In den 70-er Jahren wurde der Einsatz des Mineralgusses auch in Verbindung mit Stahl durch die von Universitäten durchgeführten Forschungsarbeiten [23-27] vorangetrieben.

Die ersten gültigen Normen zur Untersuchung der Eigenschaften von Mineralguss wurden erst Ende der 80-er Jahre erarbeitet und 1991 durch die gegenwärtige Fassung ersetzt [27-31]. Die Eigenschaften von Mineralguss im Vergleich zu Gusswerkstoffen und Stahl sind in der **Tabelle 2.1** [32-39] dargestellt.

Tabelle 2.1: Ausgewählte Kennwerte von Mineralguss im Vergleich zu Stahl und Gusswerkstoffen

Kennwert	Einheit	Mineralguss	Gusswerkstoffe	Stahl
Dichte	g/cm ³	2,1-2,4	7,2	7,8
Elastizitätsmodul	GPa	15-55	90-110	210
spezifischer E-Modul	10 ⁶ Nm/kg	15	15	27
Zugfestigkeit	MPa	10-30	200-800	350-1500
Streckgrenze	MPa	2	20	250
Poissonische Zahl	-	0,2-0,3	0,26	0,28
Materialdämpfung	10 ³ kg/(m·s)	0,02-0,04	0,003	0,002
Wärmeausdehnung	µm/(m·K)	10-20	9-10	12
Wärmeleitfähigkeit	W/(m·K)	1,3-3	50	45
Wärmekapazität c_p	kJ/(kg·K)	0,9-1,3	0,5	0,45-0,5
Kosten	DM/dm ³ (€/dm ³)	5 (2,56)	10 (5,11)	15 (7,67)
Energieaufwand	MJ/dm ³	25	120	160

Die Festigkeitswerte des Mineralgusses erscheinen im Vergleich zu denen von Stahl oder Guss relativ klein. Durch Einbau von Stahleinlegeteilen erhöht sich in einer Konstruktion die Steifigkeit. Der Widerstand gegen die Verformbarkeit wird durch die spezifischen Steifigkeitswerte charakterisiert. Eine Verbesserung kann beispielsweise durch Tempern erreicht werden.

Die ermittelten Dämpfungswerte von Mineralguss sind 10- bis 20-fach größer als die von Stahl und 7- bis 13-fach größer als die von Guss. Die aus Mineralguss hergestellten Bauteile dämpfen die Schwingungen wesentlich besser als die aus Stahl [40-42].

Durch die ungefähre Übereinstimmung der Wärmewerte von Mineralguss mit denen der übrigen Werkstoffe einer Maschine ergeben sich geringe thermische Verformungen. Eine hervorragende Eigenschaft der Reaktionsharzbetone im Vergleich zu den Eisenwerkstoffen ist ihre gute Korrosionsbeständigkeit und Recyclbarkeit, so dass sie auch in Pumpengehäusen der chemischen Industrie eingesetzt werden. Die Arbeiten von Fiedler, Wiele und König betrachten die ökologischen Aspekte und das Recyclen von Mineralguss [43-45].

2.4.2 Werkstoffe mit zellulärer Struktur

Die innere Struktur von zellularen Werkstoffen besteht aus zueinander identischen, geometrisch definierbaren Zellen (z.B. Honigwabenstruktur, poröse Hohlkugelstrukturen) bzw. aus einer porösen Struktur (z.B. offenzellige oder geschlossenzellige Kunststoff- und Metallschäume, syntaktische Schäume etc.), die sich nur allgemein in ihrer Gesamtheit beschreiben lässt [46]. Zelluläre Werkstoffe weisen eine relative Dichte von $\rho^*/\rho_s < 1$ auf, wobei ρ^* die Dichte des zellularen Materials und ρ_s die Dichte des massiven, monolithischen Körpers darstellt.

Honigwabenstruktur

Die Wabenstrukturen wurden zum ersten Mal vor etwa 2000 Jahren von Chinesen aus Papier gefertigt. Mit der Entwicklung der Luftfahrttechnik wurden sie 1940 wiederentdeckt. Seitdem werden die regelmäßigen, hexagonalen Zellen, die zwei dimensionale zelluläre Körperteile darstellen, aus nichtmetallischen Werkstoffen (Polyamid) oder aus Metallen (Aluminium) hergestellt [47-50].

Die Honigwabenstrukturen zeichnen sich durch gute Druckfestigkeiten und Schubfestigkeiten in Längsrichtung aus. Beispielweise hat eine Polyamid-Wabe mit der Dichte von $0,029 \text{ g/cm}^3$ und einem Zellendurchmesser von $3,2 \text{ mm}$ eine Druckfestigkeit von $0,54 \text{ N/mm}^2$, eine Schubfestigkeit in Längsrichtung von mindestens $0,56 \text{ N/mm}^2$ und eine Schubfestigkeit in Querrichtung von mindestens $0,25 \text{ N/mm}^2$ [49-50]. Diese Eigenschaften von Wabenstrukturen können in Abhängigkeit vom Matrixwerkstoff, Zellendurchmesser, von der Wanddickengröße und Wärmebehandlung variiert werden. Für höhere Belastungsfälle werden die Honigwabenstrukturen aus gewellten Blechen hergestellt, die durch Kleben oder Schweißen miteinander verbunden werden. Bei deren Anwendung wird eine zusätzliche Isolierung notwendig, um eine interne galvanische Korrosion zu vermeiden [47]. Probleme bereiten weiterhin die geringen Widerstände gegen Stoss- und Berührungslasten [51-52]. Von Nachteil ist der intensivere Energieaufwand, der eine Erhöhung der Herstellungskosten verursacht.

Schaumwerkstoffe

Schaumwerkstoffe (Schäume) werden als zelluläre Materialien mit einer Porosität $\Theta = 1 - \rho^*/\rho_s$ von mehr als 50% definiert. Die Porosität der Werkstoffe kann in Abhängigkeit vom Herstellungsverfahren unterschiedlich eingestellt werden. Dabei können unterschiedliche Zellmorphologien — von geschlossenzelligen über offenporigen mit perforierten Zellmembranen bis zu offenporigen Strukturen — entstehen [53].

Das Aufschäumen von *Polymeren thermoplastischer oder duroplastischer Natur* erfolgt selten durch Zufuhr eines Treibmittels von außen, sondern entwickelt sich meistens in der gemischten Grundsubstanz. Entweder wird in Gegenwart von Wasser aus einer Komponente ein Gas (CO_2) frei oder eine zugesetzte niedrigsiedende Flüssigkeit entwickelt das Gas. Kohlendioxidgetriebene Schäume sind meist offenporig und weich- bis zähelastisch. Geschlossenporige Schäume bieten einer Druckbelastung gegenüber

weit höheren Widerstand, weil nicht nur die Zellwände die Belastung tragen, sondern die kleinen eingeschlossenen Gasvolumina die Kräfte aufnehmen und verteilen. Diese Schäume mit meist geschlossenporiger Struktur werden als harte bis halb-harte bezeichnet [54-55]. Geschäumte Polymere werden in der Verpackungsindustrie, als Isolierwerkstoffe im Bauwesen oder zum Ausfüllen von Hohlräumen in der Fahrzeugindustrie eingesetzt. Im Maschinenbau haben sie bisher eine untergeordnete Bedeutung [56-62].

Die Herstellung *geschäumter Metalle* ist in der Patentliteratur seit den 50-er Jahren bekannt. Ihre Anwendung scheiterte bislang am schwierig zu kontrollierenden Herstellungsverfahren und an der geringen Reproduzierbarkeit der Ergebnisse [63]. Um diese Nachteile zu beseitigen, wurden in den letzten Jahren weltweit Herstellungsverfahren entwickelt, die sich in verschiedene Kategorien einteilen lassen: schmelzmetallurgische Verfahren, Abscheidetechniken und pulvermetallurgische Verfahren [64-70].

Ausgangswerkstoff bei pulvermetallurgischen Verfahren ist meistens eine Aluminiumschmelze, wie beim ALPORAS-Verfahren, wobei zunächst viskositätserhöhende Zusätze (Na, Ca) und anschließend Treibmittel (TiH_2) der Schmelze beigefügt werden. Das Abkühlen des geschlossenporigen Schaums erfolgt in einer geschlossenen Kokille, so dass kein Abgießen in Formen oder keine direkte Herstellung von Plattenmaterial möglich ist [71-72]. Durch verschiedene Zusätze, z.B. durch Einbringen von geringen Mengen (5-20%) stabilisierender keramischer Partikel (SiC oder Al_2O_3), kann der aufsteigende Schaum kontinuierlich von einem Förderband abgeschöpft werden. Diese als CYMAT bzw. ALCAN bekannten Prozesse finden Anwendung bei der Herstellung von großflächigen, plattenförmigen Materialien. Probleme bereiten die geringe Duktilität und die schlechte Bearbeitbarkeit der geschäumten MMC-Werkstoffe [73-89].

Offenporige Metallschäume mit kleinerer relativer Dichte können durch ERG DUOCEL-Verfahren hergestellt werden. Hierbei dient ein offenporiger Kunststoffschaum als Schablone, die mit einem hitzebeständigen Material gefüllt wird. Bei der Retikulation des PUR-Schaums erfolgt die Aushärtung des hitzebeständigen Materials, und es wird gleichzeitig der Kunststoffschaum eliminiert. So erhält man eine inverse Struktur des Kunststoffschlams als Gussform, die mit flüssiger Schmelze gefüllt werden kann. Nach Entfernung des hitzebeständigen Materials entsteht ein offenporiger Metallschaum, der dieselbe Form und Struktur wie die ursprüngliche PUR-Schablone hat [80-81].

Ein weiteres schmelzmetallurgisches Verfahren nutzt den eutektischen Zerfall einer mit Wasserstoff angereicherten Schmelze. Im Unterschied zu den bisherigen Verfahren erfolgt der Zerfall im GASARE-Verfahren nicht in zwei festen Phasen, sondern in einer festen und in einer gasförmigen Phase. Die erreichbare geschlossenzellige Porosität ist in Abhängigkeit von Gasdruck, Legierungswahl, Wasserstoffbehandlung, Richtung und Geschwindigkeit der Abkühlung zwischen 5 - 75% variierbar [82-83].

Bei den Abscheidetechniken z.B. im INCO-Verfahren wird ein retikuliertes, offenporiges Trägermaterial durch Physikal Vapor Deposition-Techniken metallisiert. Anschließend können die porösen Stege auf die gewünschte Dicke elektrochemisch aufgebaut werden [70]. Durch weitere thermische Nachbehandlung erhält man einen offenporigen Ni-

ckelschaum mit einer relativen Dichte von 0,02-0,05. Eine Herstellung von Aluminium- oder Titanschäumen ist mit dieser auch als RETIMET/CELMET genannten Prozedur nicht möglich [84].

Die erreichbaren mechanischen und thermischen Eigenschaften der kommerziell verfügbaren Metallschäume, die in den oben beschriebenen speziellen Verfahren hergestellt werden, sind in der **Tabelle 2.2** gegenübergestellt [70]. Die Metallschäume können in verschiedenen Dichtebereichen hergestellt werden. Somit variieren auch die entsprechenden Eigenschaften, weshalb die entsprechenden Grenzwerte in die Tabelle mit eingegeben wurden.

Tabelle 2.2: Einige ausgewählte Eigenschaften der kommerziellen Metallschäume

<i>Eigenschaften</i>	<i>Cymat</i>	<i>Alporas</i>	<i>ERG</i>	<i>Inco</i>
Werkstoff	Al-SiC	Al	Al	Ni
Relative Dichte	0,02-0,2	0,08-0,1	0,05-0,1	0,03-0,04
Dichte [g/cm ³]	0,07-0,56	0,2-0,25	0,16-0,25	0,26-0,37
Elastizitätsmodul [GPa]	0,02-2,0	0,4-1,0	0,06-0,3	0,4-1,0
Druckelastizitätsmodul [GPa]	0,02-3,2	0,9-1,2	0,06-0,3	0,4-1,0
Querkontraktionszahl	0,31-0,34	0,31-0,34	0,31-0,34	0,31-0,34
Druckfestigkeit [MPa]	0,04-7,0	1,3-1,7	0,9-3,0	0,6-1,1
Zugfestigkeit [MPa]	0,05-8,5	1,6-1,9	1,9-3,5	1,0-2,4
Spezifische Wärmekapazität [J/(kg K)]	830-870	830-870	850-950	450-650
Wärmeleitfähigkeit [W/(m K)]	0,3-10	3,5-4,5	6,0-11	0,2-0,3
Wärmeausdehnung [10^{-6} K^{-1}]	19-21	21-23	22-24	12-14

Ein pulvermetallurgisches Verfahren zur Herstellung von Aluminiumschäumen nutzt ein feines Aluminiumpulver und einen organischen Binder als Suspension in einer Trägerflüssigkeit. Dieser Schlicker wird durch Rühren oder durch Treibmittelzusatz zum Aufschäumen gebracht. Eine nachträgliche Wärmebehandlung führt zu geringfügiger Erhöhung der Festigkeit und zur Entfernung der Trägersubstanz. Die Bildung von stabilen Oxidschichten erzeugt schlechte metallische Bindungen zwischen den Pulverteilchen und einen relativ hohen elektrischen Widerstand des Aluminiumschaums [85].

Das von J. Baumeister 1990 entwickelte und patentierte Verfahren zur Herstellung metallischer Schäume basiert auf dem Aufschäumen eines vorher kompaktierten Metallpulver-Treibmittel-Gemisches [86]. Als Treibmittel wird pulverförmiges Titanhydrid verwendet, das mit pulverförmigem Metallpulver durch konventionelle Methoden zusammengemischt wird. Das Aufschäumen geschieht bei Erwärmung über der Liquidustemperatur des jeweiligen Metalls. Nach der Abkühlung entsteht ein geschlossenporiger

Metallschaum mit einer Porosität zwischen 60 bis 85 % [87-92]. Die Eigenschaften einiger Metallschäume sind der **Tabelle 2.3** zu entnehmen [53, 63, 93].

Tabelle 2.3: *Werkstoffdaten einiger ausgewählter Metallschäume*

Werkstoff	Al99,5	Al99,5	St37	GGG45
Dichte [g/cm ³]	2,7	0,4	1,5	2,7
Porosität [%]	-	85	80	64
Mittlerer Porendurchmesser [mm]	-	4	1 bis 10 einstellbar	
Druckfestigkeit [MPa]	-	3	20	120
Energieabsorption bei 30% Stauchung in [MJ/m ³] oder in [kJ/kg]	-	0,72	6	36
		1,8	4	13
E-Modul [MPa]	67	2,4	13	19
Thermische Leitfähigkeit [W/(m·K)]	235	12	5	7

Aufgrund des guten Energieabsorptionsvermögens können Metallschäume als passive Sicherheitselemente in den Front- und Seitenteilen von Automobilen fungieren. Das gute Dämpfungsverhalten, gepaart mit der reduzierten Wärmeleitfähigkeit, ermöglicht die Konstruktion von guten Wärme- und Schalldämmelementen [94-100].

Das Potenzial der vorteilhaften Kombination der positiven Eigenschaften von Metallschaum mit denen der monolithischen Stoffe wurde durch die Untersuchung der Einsatzmöglichkeiten in Werkzeugmaschinen und Handlungseinrichtungen demonstriert [46, 101].

Syntaktische Schäume

Schäume können auch durch das Einbetten gasgefüllter hohler Kugeln in einer Matrix entstehen. Diese aus zwei Phasen zusammengesetzten Materialien werden zur Unterscheidung von einphasigen Schäumen als syntaktische Schäume bezeichnet.

Als metallische Matrixwerkstoffe wurden bereits reines Magnesium und Aluminiumlegierungen sowie Selten-Erdlegierungen erprobt. Die dazu verwendeten Hohlkugeln mit den Durchmessern zwischen 1 und 5 mm bestanden aus Al₂O₃, Mullit oder TiO₂. Die Herstellung von syntaktischen Metallschäumen erfolgt durch Infiltrationsverfahren. Die mechanischen Eigenschaften der syntaktischen Magnesiumschäume sind zwar höher als die der einphasigen Aluminiumschäume, jedoch die erzielte Dichte liegt mit über 1 g/cm³ höher als die von Aluminiumschaum [102-105].

Aufgrund der aufwendigen Herstellungsverfahren von Metallschäumen ist mit hohen Herstellungs- und Materialkosten zu rechnen. Relativ einfacher und kostengünstiger

verläuft die durch Kaltaushärtung erfolgte Einbettung von Hohlkugeln in einem Reaktionsharzsystem. Obwohl man nichtmetallische Hohlkugeln seit den 70-er Jahren kannte, waren die Eigenschaften syntaktischer Harzschaüme nur wenig veröffentlicht und die Anwendungsfälle beschränkten sich bisher auf die Marine- und Tiefseeforschung [106-108]. Die Eigenschaften von syntaktischen Harzschaümen, bestehend aus 40 Vol.-% Harz, 7 Vol.-% Glas und 53 Vol.-% Luft, sind in der **Tabelle 2.4** angegeben [109-110]. Diese 60 Vol.-% Glaskugeln bewirken, dass die Druckfestigkeit des unverstärkten Epoxydharzes um 45 % herabgesetzt wird. Dasselbe Epoxydharz – mit 60 Vol.-% Hohlräumen konventionell aufgeschäumt – verliert dagegen mehr als 70 % seiner Druckfestigkeit [109].

Tabelle 2.4: *Eigenschaften einiger ausgewählter syntaktischer Schäume*

<i>Eigenschaft</i>	<i>Material</i>	<i>Einheit</i>	<i>Standard 44</i>	<i>High Standard-44</i>	<i>Standard 38</i>
Dichte		g/cm ³	0,71	0,71	0,62
Auftrieb im Meerwasser		kg/m ³	360	360	455
E-Modul (Druck)		MPa	3164	3000	2610
Zugfestigkeit		MPa	32	35	21
Biegefestigkeit		MPa	43	46	24,5
Hydrostatischer Berstdruck		MPa	112,5	134	77,5

Die neu entwickelten Hohlkugeltypen weisen, wie im **Kapitel 4** ausführlicher beschrieben, unterschiedliche Kugeldurchmesser, Wanddicken, Dichte, Schüttgewichte und Zusammensetzungen auf. Bisher wurde deren Einfluss auf die Eigenschaften von syntaktischen Schäumen nicht ausführlich betrachtet oder veröffentlicht.

Durch Kombination der unterschiedlichen Hohlkugeltypen verschiedener Durchmesser sind höhere Packungsdichten erzielbar und der Harzanteil kann reduziert werden. Die zusammengesetzten Werkstoffe, bestehend aus hochgradig mit Hohlkugeln gefüllten Reaktionsharzsystemen, werden als *Hohlkugelkomposite* bezeichnet [111-112].

Poröse Hohlkugelstrukturen

Ähnlich der Herstellung von keramischen Kugeln wurden in der Georgia Tech Arbeitsweise metallische Hohlkugeln produziert. Hierfür werden metallische Oxidpulver, wie z.B. Cr₂O₃ oder Fe₂O₃, in einem organischen Binder und Lösungsmittel zu einem Schlucker verarbeitet, der durch ein äußeres Rohr einer coaxialen Düse nach unten fließt, während in der Mitte ein Gas strömt. Der Schlucker verlässt die Düse als ein hohlzylinderförmiges Tröpfchen, das sich aufgrund der Oberflächenspannungen und des hydrostatischen Drucks in eine sphärische Form umwandelt. Beim freien Fliegen der herun-

terfallenden Sphären verdampfen die Lösungsmittel sowie der Binder und die Kugeln härten aus. Falls nicht Oxide, sondern z.B. Titanhydride, als Ausgangsmaterial verwendet wurden, müssen die Hydride durch weitere Behandlung eliminiert werden [113-116].

Bei dem in Dresden am Fraunhofer Institut für Angewandte Materialforschung entwickelten Verfahren werden aufgeschäumte Styroporkugeln in einer Wirbelbeschichtungsanlage mit einer Binder-Metallpulver-Suspension beschichtet und wärmebehandelt, wodurch die Pyrolyse des Styropor-Kerns mit dem Binder erfolgt. Nach der Pyrolyse entstehen entweder metallische Einzelkugeln oder gesinterte Hohlkugelstrukturen. Die Einzelkugeln können auch durch Verlöten zu einer festen Struktur gestaltet werden. Die gesinterten oder gelöteten metallischen Hohlkugelstrukturen weisen sowohl eine offene wie auch eine geschlossene Porosität auf. Die Durchmesser der in diesem Verfahren hergestellten metallischen Hohlkugeln variieren zwischen 0,5 bis 10 mm, und die Wanddicken können zwischen 20 und 1000 μm betragen [116-123]. Der Elastizitätsmodul, die Druckfestigkeit und das Energieabsorptionsvermögen von gesinterten Hohlkugelstrukturen sind in der **Tabelle 2.5** wiedergegeben. Die Ergebnisse beweisen eine Zunahme der mechanischen Eigenschaften mit der Erhöhung der Wanddicken bei gleichen Durchmessern [123].

Tabelle 2.5: *Eigenschaften einiger Hohlkugelstrukturen*

Durchmesser [mm]	Dichte [g/cm ³]	E-Modul [GPa]	σ_D [MPa]	Energieabsorption bei 25% Stauchung	
				[kJ/m ³]	[MJ/m ³]
1,89	0,65	0,255	4,3	1,2	1,8
1,74	1,18	0,659	9,1	2,9	2,4
2,65	0,77	0,252	6,8	1,9	2,4
2,62	1,45	0,531	11,7	3,3	2,2

2.4.3 Faserverbundwerkstoffe

Faserverbundwerkstoffe (FVW) entstehen durch Einlagerung von Fasern hoher Festigkeit und Steifigkeit in einen Grundwerkstoff, der die Lasten in die Fasern leitet sowie die geometrische Lage und Gestalt der Fasern im Laminat sichert. Fasern sind Einzelfäden (Filamente) und Fadenbündel mit endlicher Länge (Kurzfasern oder Langfasern) oder mit praktisch unbegrenzter Länge (Endlosfasern), wobei der Faserdurchmesser 5 bis 50 μm beträgt [124]. Die Verstärkungsfasern sind als aufgespulte Langfasern oder als Kurzfasern sowie als Vliese, Matten, Gewebe, Gestricke, Geflechte oder Gelege erhältlich.

Die Faserwerkstoffe haben in den letzten Jahren eine kontinuierliche Entwicklung erfahren und können nach unterschiedlichen Kriterien klassifiziert werden [124-127]. Zur Herstellung von Faserverbunden werden manuelle Verfahren (Handlaminieren) oder auch automatisierte Verfahren eingesetzt, wie z.B. Faserspritz-, Tapelege-, Press-, Wickel- oder Pultrusionsverfahren [128-131]. Laminat oder Lage wird als Schicht aus eingebetteten Fasern bezeichnet. Der Prozess des Zusammenfügens heißt Laminieren. Als Matrixmaterialien werden Gießharze oder Thermoplaste verwendet.

Die Werkstoffeigenschaften der Faserverbunde können entweder durch verschiedene Prüfmethode ermittelt oder mittels klassischer Laminattheorien berechnet werden [128-134]. Die Besonderheit der mit Langfasern verstärkten Verbundkunststoffe liegt in dem starken anisotropen Verhalten, d.h. die Kennwerte der mechanischen und thermischen Eigenschaften der in Längs- oder Querrichtung eingebetteten Fasern unterscheiden sich um mehrere Größenordnungen. Das führt zu einem Umdenken der Konstrukteure beim Umgang mit FVW.

Aufgrund der sehr guten spezifischen Eigenschaften haben sich die FVW als Leichtbauwerkstoff fest etabliert, sie konnten die Bereiche der Luft- und Raumfahrt und in den letzten Jahren die Fahrzeug- sowie Sportindustrie erobern [136-138]. Trotz erhöhter Material-, Konstruktions- und Herstellungskosten gelang es, einige schnellbewegte Teile von Industrierobotern bzw. Werkzeugmaschinen (z.B. Werkzeugmaschinenspinde, Vorschubschlitten oder Meßpinole) aus FVW zu gestalten [4, 20, 36, 140].

2.4.4 Sandwich-Verbundwerkstoffe

Unter Sandwich versteht man dreischichtige Verbundkonstruktionen mit tragenden Deckhäuten aus Blech oder Faserlaminat und einem spezifischen leichten Stützkern aus Schaumstoff oder in Wabenform [141-143]. Der Fügetechnik zwischen den Deckhäuten und dem Kernstoff kommt eine besondere Bedeutung zu; sie können durch Kleben oder Schweißen verbunden werden [6].

Durch die Auslegung der Kraffteinleitungselemente und durch die Wahl der Deck- und Kernwerkstoffe können den Anforderungen entsprechend die Eigenschaften, Material- und Herstellungskosten optimiert werden [144-147].

Die Bestimmung einiger Eigenschaften, wie z.B. Druck-, Zug- oder Schubspannungen, kann nach bestimmten Standards erfolgen [148-154].

Anwendung fanden bis jetzt die Sandwich-Honigwabenstrukturen in der Luft- und Raumfahrt, wo großflächige Teile, wie z.B. Tragwerke, konstruiert wurden [155]. Eine in der Literatur oft beschriebene mögliche Anwendung der mit Aluminiumschäumen ausgesteiften Rohrprofile ist als Crashabsorber in Kraftfahrzeugen vorhanden [95, 156].

3 Aufgabenstellung

Ausgehend vom wissenschaftlich-technischen Erkenntnisstand des Leichtbaues im Maschinenbau besteht die grundsätzliche Aufgabe, eine Reduzierung der Massen hochdynamischer Antriebsbaugruppen durch Einsatz von Leichtbauwerkstoffen zu erreichen.

Bezogen auf den Werkzeugmaschinenbau geht es um den Einsatz von leichten und kostengünstigen Werkstoff-Verbunden für Baugruppen zum Positionieren, Handhaben und Transportieren.

Während der Werkstoff Mineralguss sich bereits als Alternative zu den Eisenwerkstoffen für die Gestaltung und Herstellung von Grundbauelementen bei Werkzeugmaschinen (Ständer, Betten, Gestelle) in der Praxis bewährt hat, sind für den Leichtbau von schnell bewegenden Bauelementen (Tische, Supporte, Roboterarme) weitere Entwicklungen erforderlich.

Als eine mögliche Werkstoffvariante dafür bietet sich der Werkstoff Hohlkugelkomposit (HKK) an, der wesentlich zur Massenreduzierung beitragen kann [111, 157].

Zur Beurteilung von vorteilhafteren Anwendungsmöglichkeiten dieses Leichtbauwerkstoffes als Konstruktionswerkstoff bildet der Vergleich seiner Kennwerte mit denen der metallischen Werkstoffe die Grundlage. Im Gegensatz zu den Metallen, deren Werkstoffeigenschaften dem Konstrukteur bekannt sind, ist dies bei dem Werkstoff HKK nicht der Fall. Aus diesem Grunde müssen sie ermittelt werden.

Die Restriktionen zwischen Beanspruchung, Gestaltung, Werkstoff und Gewicht erfordern die Ermittlung von Kennwerten für einzelne Belastungsfälle wie Zug, Biegung, Knickung und Temperatur.

Die Aufgabenstellung dieser Arbeit besteht somit in der Ermittlung des Eigenschaftsprofils von HKK, um diesen Werkstoff als Leichtbauwerkstoff im Werkzeugmaschinenbau empfehlen zu können.

Die durchzuführenden Untersuchungen enthalten folgende Schwerpunkte:

- Definition des Werkstoffkonzeptes (Bindemittelsysteme, Füllstoffe, Probenvariationen),
- Auswahl geeigneter Prüfmethode zur Kennwertermittlung (Prüfung thermischer und mechanischer Eigenschaften),
- Bewertung der werkstoffkundlichen Untersuchungsergebnisse hinsichtlich einer Eignung von bestimmten HKK-Strukturen für eine konstruktive Anwendung,
- Testung des Einsatzes ausgewählter HKK-Strukturen an ausgewählten Maschinenbaugruppen des Werkzeugmaschinenbaues.

4 Werkstoffkonzept

Das Werkstoffkonzept orientiert ausschließlich auf die Untersuchung von nichtmetallischen Hohlkugelkompositen unterschiedlicher Struktur und definiert die bereits aus Voruntersuchungen ermittelte Zusammensetzung der einzelnen Komponenten, die für die werkstoffkundlichen Untersuchungen verwendet werden.

Der Werkstoff HKK ist ein Mehrphasensystem, von denen die meisten Volumenanteile, wie der Name bereits sagt aus Hohlkugeln, wo Poren mit Luft oder Inertgas eingeschlossen sind, bestehen und die in einem Bindemittelsystem eingebettet sind (**Bild 4.1**). Der Vorteil als Leichtbauwerkstoff bezieht sich nicht nur auf die Verringerung der Dichte, sondern aufgrund der runden Form der Kugeln auch auf die Erzielung größerer Packungsdichten, die eine weitere Reduzierung des Matrixvolumenanteils ermöglichen [158].

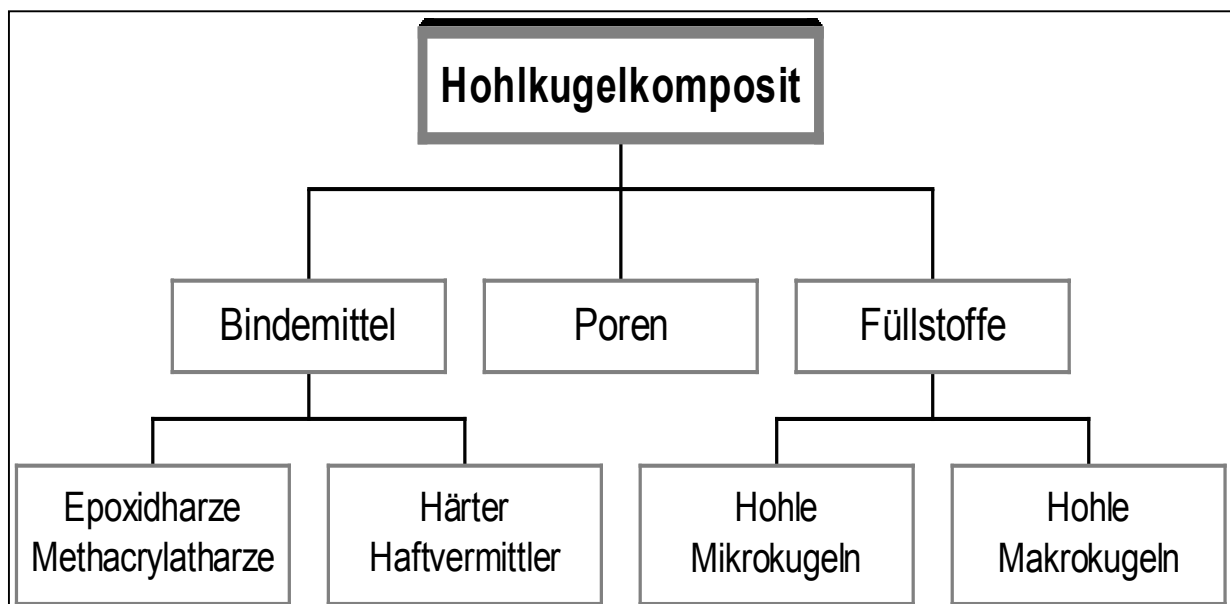


Bild 4.1: Werkstoffkomponenten von Hohlkugelkomposit

Zur Herstellung werden vorwiegend Epoxydharze eingesetzt. Auch andere Harzsysteme, wie z.B. Methacrylatharze, können verwendet werden. Zur Erhöhung der Haftung an der Grenzfläche Matrix/Kugeloberfläche werden verschiedene Haftvermittler (meist Silane) den Bindemitteln zugegeben. Die überwiegenden Volumenanteile bestehen aus hohlen Mikro- und/oder Makrokugeln, deren Korngrößen innerhalb festgelegter Grenzen in bestimmten Prozentanteilen variieren. Je nach Anteil von Bindemitteln und Füllstoffen können zwei oder drei Phasensysteme entstehen. Da die Reaktionsharze sich auch als Bindemittel für Laminat gut eignen, lassen sich auch Fasern ideal mit den Hohlkugelkompositen verbinden, die wesentlich zur Verstärkung beitragen.

4.1 Bindemittelsysteme

Die organischen Bindemittel bestehen aus Harzkomponenten und je nach Reaktionsmechanismus aus einem Härter oder Katalysator.

Die Reaktionsharze sind im Allgemeinen flüssige oder verflüssigbare Stoffe, deren hohe relative Molekülmasse auf der vielfachen Wiederkehr eines oder mehrerer Grundmoleküle (Monomeren) beruht, die nach Zugabe von Reaktionsmitteln ohne Abspaltung flüchtiger Komponenten durch eine chemische Reaktion aushärten [162]. Als Harzkomponente kommen für die Anwendung im Maschinenbau entweder Plastomere (Polymethylmethacrylatharze) oder Duromere (ungesättigte Polyesterharze, Epoxydharze) in Frage, weil sie bei Raumtemperatur im Gegensatz zu Elastomeren und Thermoelasten kein reversibles gummielastisches Verformungsverhalten aufweisen.

4.1.1 Bindemittel Epoxydharz

Von den Bindemittelsystemen werden aufgrund ihrer guten mechanischen und thermischen Eigenschaften im Vergleich zu den anderen Harzarten meistens Epoxydharze (EP) verwendet. Das günstige Schrumpfungsverhalten ist ein weiterer Vorteil von Epoxydharz, somit können maßgenaue Bauteile hergestellt werden. Die bisherigen Untersuchungen im Bereich Polymerbeton zeigen, dass die Haftung zwischen Füll- oder Verstärkungsstoffen und Epoxydharz sich gut bewährt hat [38]. Deswegen sind Epoxydharze für hochpräzise Werkzeugmaschinenbauteile besonders gut geeignet und werden im Rahmen dieser Forschungsarbeit ausschließlich eingesetzt.

Epoxydharze zeichnen sich durch eine hohe Variationsbreite der Ausgangssubstanzen und damit gezielter Einstellungsmöglichkeiten unterschiedlicher Werkstoffeigenschaften aus. Epoxydharze sind meist oligomere Moleküle mit zwei oder mehreren endständigen Epoxydgruppen, die zur Reaktion mit wasserspendenden Substanzen, als Härter bezeichnet, neigen. Die technisch bedeutsamsten Epoxydharze bestehen aus Glycidethern, auf Basis von Bisphenol-A und Novolak, aliphatischen oder cycloaliphatischen Glycidethern sowie heterocyclischen Epoxiden. Für die Herstellung der technisch wichtigsten Epoxydharze ist die Polyadditionsreaktion von Bedeutung. Die Harze und Härter sind im stöchiometrischen Verhältnis miteinander zu vermischen.

Als geeignete Härter haben sich neben den Phenolen, Novolaken, Oligoestern und Dicyamidaminen vor allem die multifunktionellen Amine und Säureanhydride erwiesen. Die Härtung mit Aminen findet bei Raumtemperatur statt (kalthärtende Harzsysteme), während für die Aushärtung mit Säurehydriden Wärme bzw. höhere Temperaturen benötigt werden (warmhärtende Harzsysteme). Außer den Härtungsmitteln können den Epoxydharzen verschiedene Beschleuniger (auf Basis von Imidazolen), Lösungsmittel und/oder reaktive Verdünner zugegeben werden.

Im Unterschied zu den duroplastischen Polykondensaten verläuft die Polyaddition bei den EP-Harzen mit vergleichsweise weniger funktionellen Gruppen und mit mehreren

„Keimen“ gleichzeitig ab. Dadurch steigt die relative Molekülmasse sehr langsam an, der Gelpunkt liegt bei ca. 60-70%, die Härtung erfolgt relativ langsam. Die Auswirkungen sind, dass die Schwindspannungen aufgrund des geringeren Reaktionschwundes (ca. 4-5%) noch im flüssigen Zustand abgebaut werden. Alle diese Umstände beeinflussen positiv die Maßhaltigkeit und Oberflächenbeschaffenheit der mit Epoxydharzen gefüllten Bauteile [163].

Zur Verbesserung der Haftung zwischen Harz und Füllstoffoberfläche ist nicht nur eine Behandlung der Füllstoffe mit Silanen erforderlich, sondern die Haftvermittler können auch direkt zum Harz mit etwa 3 % Anteilen zugegeben werden. Kommt das mit Silanen versetzte Harz mit anorganischem Material in Kontakt, migrieren die funktionellen Gruppen an die anorganisch/organische Grenzfläche [110].

4.1.2 Verwendete Bindemittelsysteme

Da HKK für feste und steife Bauteile eingesetzt werden soll, ergeben sich Anforderungen hinsichtlich guter Festigkeit, Steifigkeit sowie guter Temperaturbeständigkeit an die auszuwählenden Bindemittelsysteme. Um den Einfluss der Temperatureinwirkung während der Aushärtung bei der Herstellung zu ermitteln, werden sowohl kalt-aushärtende als auch warm-aushärtende Reaktionsharzsysteme verwendet.

Im Ergebnis der Voruntersuchungen wurde von der Firma Ebalta Kunststoff GmbH das Harz AH 120 und der Härter TL aufgrund der hervorragenden Festigkeits- und Temperaturbeständigkeitseigenschaften ausgewählt (**Tabellen 4.1** und **4.2**) [164]. Dieses Harzsystem wird vorwiegend im Fahrzeug-, Flugzeug-, Boots- und Modellbau angewendet. Ebalta AH 120/TL ist ein sehr dünnflüssiges Zweikomponentenepoxydharz.

Tabelle 4.1: *Eigenschaften der Ebalta AH 120/TL (*-65% Glasgewebe)*

<i>Farbe Harz: AH 120</i> <i>Härter: TL</i>	<i>farblos-transparent</i> <i>gelblich-transparent</i>
Viskosität der Mischung [mPa·s]	700
Dichte der Mischung [g/cm ³]	1,05
Härte der Mischung bei 20°C *	89
Druckfestigkeit* [MPa]	400
Zugfestigkeit* [MPa]	385
Biegefestigkeit* [MPa]	450
Temperaturbeständigkeit* [°C]	120

Tabelle 4.2: Anwendungsbedingungen

Mischungsverhältnis: 100 25	Gewichtsteile Harz AH 120 Gewichtsteile Härter TL
Topfzeit 200 g bei 20°C	90 Minuten
Aushärtezeit (entformbar)	18-24 Stunden
Verarbeitungs- und Aushärtetemperatur	18-25°C
Lagerfähigkeit bei RT im verschlossenen Gebinde	1 Jahr

Zur Steigerung der Haftfestigkeit an der Grenzfläche Matrixwerkstoff / Füllstoff werden 3% flüssige γ -Glycidoxypropyltrimethoxysilane dem Ebalta 120/TL Harzsystem bei einer Probenvariation beigemischt. Diese Haftvermittler wurden von der Firma Witco bezogen und sind unter dem Produktnamen Silquest A-187-Silane bekannt.

Aufgrund der guten chemischen und mechanischen Eigenschaften laut Herstellerangaben wurden von der Firma UPCC-Vertriebs-GmbH das Harz Polypox E 260, der Härter Polypox H 415 und das Verdünnungsmittel Polypox R3 ausgewählt. Mit dem Verdünnungsmittel wird die Erstellung verschiedener Viskositäten der Mischung ermöglicht. Polypox E 260 ist ein mittelviskoses, kristallisationsfreies und universell einsetzbares Epoxydharz auf Basis von Bisphenol A/F. Die vom Hersteller angegebenen technischen Daten sind aus **Tabelle 4.3** zu entnehmen [165].

Tabelle 4.3: Technische Daten von Polypox E 260

Epoxyd-Äquivalent [g/Äquiv.]	180 ± 10
Epoxyd-Wert [Äquiv./100 g]	0,55 ± 0,02
Viskosität bei 25°C [mPa·s]	8500 ± 1500

Polypox H 415 ist ein Härter auf Basis von 3,3'-Dimethyl-4,4'-Diamino-Dicyclohexylmethan mit hoher Wärmeformbeständigkeit und sehr guter Chemikalienresistenz. Die technischen Daten sind in der **Tabelle 4.4** zusammengefasst [165].

Tabelle 4.4: Technische Daten von Polypox H 415

H-Äquivalent [g/Äquiv.]	60
Aminzahl [mg KOH/g]	477 ± 13
Viskosität 25°C [mPa·s]	100 ± 20

4.2 Füllstoffe

Füllstoffe sind bei Raumtemperatur feste Materialien, die der Kunststoffmatrix zugesetzt werden, um deren physikalische und chemische Eigenschaften sowohl im un-polymerisierten Zustand als auch im ausgehärteten Zustand zu verändern. Dabei bilden die Füllstoffe eine eigene, von der Matrix deutlich unterscheidbare Phase. Sie kommen in verschiedenen Formen (Kugeln, Splintern, Plättchen, Fasern oder Whisker) zur Anwendung [166]. Unterschiede zwischen den Fasern und den kugeli-gen Füllstoffen bestehen neben dem Verhältnis von Länge zu Dicke (Aspekt Ratio), das bei den Fasern $> 4:1$ ist, auch in ihrer Wirkung auf die mechanischen Eigen-schaften. Während die Füllstoffe den E-Modul, die Druck- und Biegefestigkeit, die Härte und die Formbeständigkeit erhöhen sowie die Schwindung und Reißdehnung verringern, verbessern die faserförmigen Verstärkungsstoffe die Zug- und Scherfes-tigkeit [160].

4.2.1 Kugelige Füllstoffe

Durch ihre runde Form unterscheiden sich die kugeligen Füllstoffe von allen anderen Füllstoffen, die stäbchenförmig, flach oder nur unsymmetrisch geformt sind. Sie be-sitzen das kleinste Verhältnis Oberfläche/Volumen von allen Partikeltypen, so dass sie die kleinste Kontaktfläche mit dem Harz aufweisen. Die Harzviskosität wächst re-lativ langsam mit der Zugabe von Mikrokugeln, so dass größere Volumenanteile ein-gesetzt werden können. Dies ist wichtig für die Bestimmung der kostenreduzierenden Effektivität des Füllstoffes.

Nach der Beschaffenheit der Kugeln kann in massive, hohle und poröse Kugeln klas-sifiziert werden. Die Kugeln unterhalb von 300 bis 500 μm werden Mikrokugeln ge-nannt. Die Mikrohohlkugeln, eingekapselt in Plastisolen oder Reaktionsharz, bilden einen speziellen Schaum, „Mikrokugeln Syntaktischer Schaum“ genannt [159, 167]. Außer den Mikrokugeln können auch Makrokugeln ab 0,5 mm bis zu einigen hund-ersteln von Millimetern als Füllstoffe zur Anwendung kommen und werden dann als „Makrokugeln Syntaktischer Schaum“ bezeichnet. Diese Produkte werden in ver-schiedenen Bereichen, wie z.B. Ölplattformen, synthetisches Holz oder Marmor, Werkzeuge, Kommunikationsgeräte, Schutzausrüstungen oder Freizeitartikel, einge-setzt.

Die Oberfläche der mit Mikrokugeln zugesetzten Polymere wirkt glatter als mit Fa-fern. Mikrokugeln sind isotrop, so dass die Eigenschaften regelmäßig über das ge-samte Volumen verteilt werden. Bei Polymeranwendungen verursachen Mikrokugeln gleiche Spannungen im Werkstoff.

In der **Tabelle 4.5** ist eine Gesamtübersicht über Zusammensetzung, Korndurch-messer, Dichte, Schüttdichte, Schmelztemperatur, Wärmeleitfähigkeit und Druckfes-tigkeit der am Markt beziehbaren Füllstoffe zusammengestellt [168, 170-176].

Tabelle 4.5: Zusammensetzung, Eigenschaften, Preis und Lieferanten von Kugeln, zusammengestellt aus Datenblättern

Klassifizierung	Massive Kugeln	Hohlkugeln				Poröse Kugeln	
		Mikrohohlkugeln			Makrohohlkugeln		
Produktname	Spheriglass®	Q-Cel®	Fillite®	E-Spheres®	Dualite®	Hohlkugelkorund	Poraver®
Zusammensetzung [%]	72,5 SiO ₂ 13,7 Na ₂ O 9,8 CaO 3,3 MgO 1 andere Oxide	Schale: Borosilikatglas Gasfüllung: Inertgas	Schale: 27-33 Al ₂ O ₃ 55-65 SiO ₂ max. 4 Fe ₂ O ₃ Gasfüllung: 70 CO ₂ , 30 N ₂	55 SiO ₂ 43,4 Al ₂ O ₃ 0,5 Fe ₂ O ₃ 1,7 TiO ₂ Quarz < 1	Schale: Acrylnitrilcopolymer Beschichtung: CaCO ₃	98,8 Al ₂ O ₃ , 0,8 SiO ₂ 0,08 MgO 0,09 Na ₂ O 0,04 Fe ₂ O ₃ 0,03 CaO	69 SiO ₂ 14 Na ₂ O 11 CaO 2 Al ₂ O ₃ 2 MgO 1 K ₂ O
Körnung [µm]	0,5-850	10-200	5-500	10-355	20-95	0,5-5000	25-16000
Schmelztemperatur [°C]	740	-	1200-1350	1200-1500	145-190	2100	ca. 700
Dichte [g/cm ³]	2,45-2,55	0,14-0,48	0,6-0,8	0,7-0,8	0,11-0,13	-	0,25-0,74
Schüttgewicht [g/cm ³]	-	0,08-0,29	0,35-0,45	0,39-0,42	-	0,45-1,1	0,14-0,43
Wärmeleitfähigkeit [W/m·K]	1,05	-	0,11	0,09	0,13	-	0,08
Druckfestigkeit [N/mm ²]	-	1,74-14	-	28	13,8	-	0,4-1,9
Lieferanten und Hersteller	Potters-Ballotini, PQ Corporation	PQ Corporation, Osthoff-Petrasch	Omya	Envirosphe-res, PQ Corporation	Lehm & Voss, Omya	Treibacher	Dennert Poraver
Verwendeter Produkttyp	Spheriglass® 1216, 1922, 2227	Q-Cel® 6042 S, Q-Cel® +300	Fillite® PG	E-Spheres® SL 350	Dualite® M 6050 AE	Alodur® KKW 0-0,5; 0,5-1; 1-2, Rhinalox	Poraver® 1-2 mm
Preis [DM/kg (€/kg)]	3 (1,5)	9-15 (4,6-7,7)	1-1,7 (0,5-0,8)	1-1,7 (0,5-0,8)	22 (11,2)	2,8 (1,4)	0,8 (0,4)

4.2.2 Verwendete kugelige Füllstoffe

Im folgenden Abschnitt werden die für die werkstofftechnischen Untersuchungen ausgewählten Kugeln aufgrund ihrer Korndurchmesser, ihres Schüttgewichtes, ihrer Druckfestigkeit oder ihrer Temperaturbeständigkeit charakterisiert.

4.2.2.1 Massive Kugeln

Das Werkstoffkonzept (im **Abschnitt 4.1**) enthält sowohl den Einsatz von leichten Hohlkugeln als auch von massiven Kugeln, um eine bessere Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Materialien auf der Basis desselben Matrixwerkstoffes zu ermöglichen.

Spheriglass

Spheriglass[®] ist der Produktname von massiven Kugeln, deren Zulieferer in Deutschland die Firma Potters-Ballotini ist [168]. Die **Tabelle 4.5** enthält die Zusammensetzung, Eigenschaften und den Preis von „Spheriglass“. Die bisherigen Polymerapplikationen von Spheriglass zeigten Vorteile in der Abriebfestigkeit, Schrumpfnegung, Gel- und Aushärtezeit, Fließfähigkeit, Glättung, Viskosität etc. Deshalb werden sie als Fliesenmörtel, Fugenmassen oder als Werkzeuggießharze verwendet. In der **Tabelle 4.6** wird die typische Analyse von Spheriglass[®] mit den chemischen Zusammensetzungen von einigen Alkali-Erdalkali-Silikatgläsern verglichen [168, 169].

Tabelle 4.6: Analyse von Spheriglass[®] im Vergleich mit der chemischen Analyse von Behälterglas und Apparateglas

Produkt	Chemische Zusammensetzung (Masse - %)				
	SiO ₂	Na ₂ O	CaO	MgO	Al ₂ O ₃ , FeO/Fe ₂ O ₃ ; K ₂ O
Spheriglass [®]	72,5	13,7	9,8	3,3	0,7
Behälterglas	72	15,5	8,5	2	1,8
Apparateglas	70	13	9	-	7,5

Die Vollglaskugeln Spheriglass sind in einem Durchmesserbereich von 0,5 bis 850 µm erhältlich. Die Bindung zwischen Polymer und Glaskugeln wird durch die Beschichtung der Kugeln mit unterschiedlichen Haftvermittlern verbessert. Die massiven Glaskugeln bestehen aus unregelmäßig geformten Partikeln und fließen bei hoher Temperatur in eine sphärische Form als Resultat der Oberflächenspannungen. Dies geschieht bei etwa 750°C für Kalk-Soda-Glas Gemische. Die Glasteilchen werden zerkleinert und gesintert. Die Mikroglaskugeln werden direkt aus der Schmelze hergestellt, in dem das Glas eine kleine Öffnung passiert. Die Strömung der mikroskopischen Teilchen wird unterbrochen und sie werden globulitisch [167].

Im Rahmen der Arbeit wurden 3 Spheriglass-Typen: Spheriglass 1216 (Körnung zwischen 450-850 μm), Spheriglass 1922 (Körnung zwischen 150-250 μm) und Spheriglass 2227 (Körnung zwischen 75-150 μm) untersucht. Die **Bilder 4.2** und **4.3** zeigen mikroskopische Aufnahmen der Spheriglass-Typen 1922 und 1216 bei 63-facher Vergrößerung. Die zuerst rund und transparent erscheinenden Kugeln sind mit kleinen Blasen im Inneren behaftet (**Bild 4.2**). Bei den größeren Spheriglass-Typen 1216 (**Bild 4.3**), deren mittlere Korngrößen von 425 μm bis 850 μm reicht, ist gut zu erkennen, dass mehrere runde Teilchen auf der Kugeloberfläche haften bzw. zusammengewachsen sind. Dies kann bei der Herstellung oder beim Beschichten auftreten, was zu einer schlechteren Packungsdichte und somit zu einer Erhöhung der Dichte des Verbundmaterials führt.

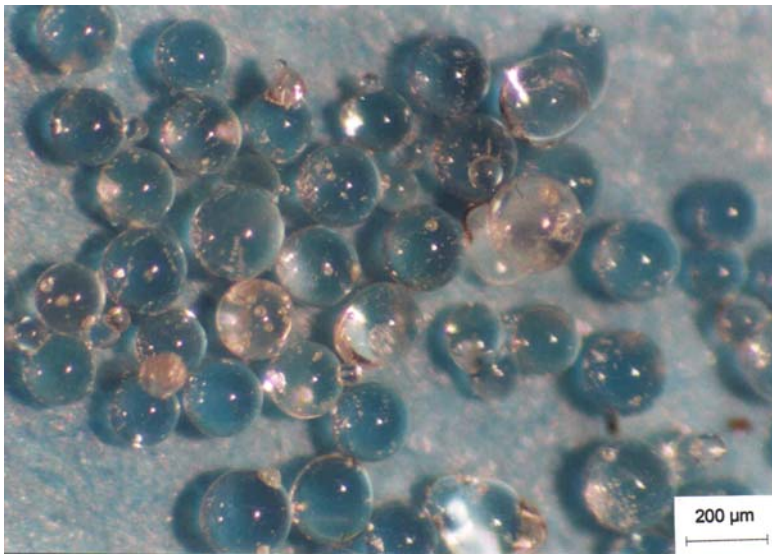


Bild 4.2: Spheriglass 1922; Lichtmikroskopie

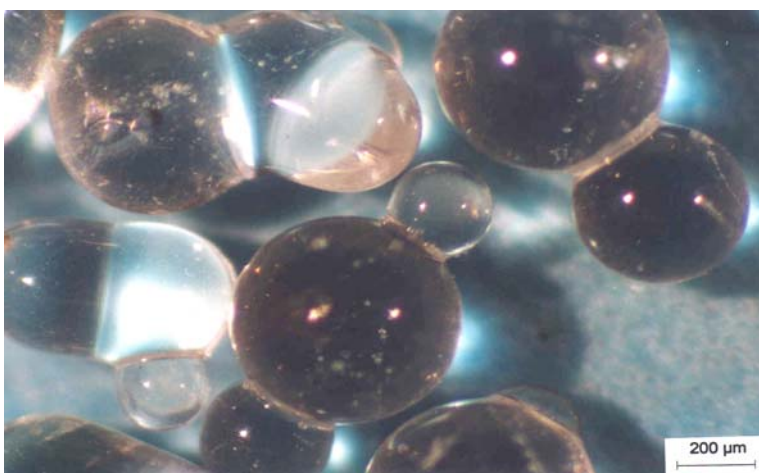


Bild 4.3: Spheriglass 1216; Lichtmikroskopie

4.2.2.2 Hohlkugeln

Mikrohohlkugeln Q-Cel

Q-Cel[®] Mikrokugeln sind winzige, weiße Hohlkugelchen (10-200 µm) aus Borosilikatglas, die ein Inertgas (70-92%) einschließen [170]. Sie sind ein Produkt der Firma PQ Corporation und in verschiedenen Qualitäten erhältlich. In Deutschland werden sie von den Firmen Osthoff-Petrasch und Gößl + Pfaff geliefert. Zur Herstellung wird eine Natriumborosilikat-Lösung, die ein Treibmittel beinhaltet, sprühgetrocknet. Beim Erwärmen wird das Treibmittel freigesetzt und es bilden sich runde hohle Kugeln.

Die verschiedenen Sorten unterscheiden sich in Dichte, Partikelgröße, Oberflächenbeschichtung und Festigkeit [170, 171]. Die effektive Dichte der Q-Cel-Typen variiert zwischen 0,14 und 0,48 g/cm³, die Schüttdichte liegt zwischen 0,08 und 0,29 g/cm³ (**Tabelle 4.5**). Sie führen bei den Anwendern zu erheblichen Massenreduzierungen und Kostenersparnissen. Aus diesen Gründen werden sie für die Herstellung syntaktischer Schäume, Reparaturspachtel, Unterbodenputz, Silikonschäume und Kunstmarmor verwendet. Die bisherigen Anwendungen der Füllstoffe haben gezeigt, dass sie die Viskosität erniedrigen und das Schwindmaß und den Verzug verringern. Durch Zusatz von Q-Cel zu den Kunststoffen konnte eine Verbesserung der Fließfähigkeit, Dispergierbarkeit, Benetzbarkeit, Steifigkeit, Schlagzähigkeit, Be- und Verarbeitungseigenschaften, Temperaturbeständigkeit und Isoliereigenschaften gegenüber den ungefüllten Kunststoffen festgestellt werden.

Wegen des geringen Schüttgewichtes kam Q-Cel[®]+300 und wegen der verbesserten Druckfestigkeit kam Q-Cel[®] 6042 S in den Untersuchungen zur Anwendung, deren Produktdaten in der **Tabelle 4.7** zusammengetragen sind [170].

Tabelle 4.7: Eigenschaften von Q-Cel[®]+300 und Q-Cel[®] 6042S

Eigenschaften	Q-Cel [®] +300	Q-Cel [®] 6042S
Farbe	weiß	weiß
Schüttgewicht [g/cm ³]	0,12	0,26
Schüttvolumen ml/100g	833	385
Dichte [g/cm ³]	0,21	0,42
Schmelzpunkt [°C]	ca. 350	ca. 350
Druckfestigkeit [MPa]	3,45	13,78
Korngröße ≤ 10% [µm]	30	20
Korngröße ≤ 90% [µm]	167	100
Oberflächenbeschichtung	Nein	Ja
Durchschnittliches Korn [µm]	92	56

Die Form und die Oberflächenbeschaffenheit der verwendeten Q-Cel-Kugeln sind in den **Bildern 4.4** und **4.5** zu sehen. Die **Bilder 4.6** und **4.7** zeigen die inneren Oberflächen bzw. die Bruchflächen der zerdrückten Kugeln von Q-Cel +300 und Q-Cel 6042S bei 1000-facher Vergrößerung. Die Wanddicke der Kugeln beträgt etwa 0,4-1,5 μm .

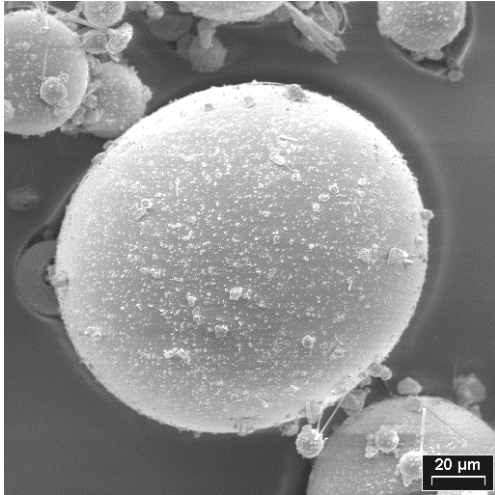


Bild 4.4: Q-Cel 300; REM

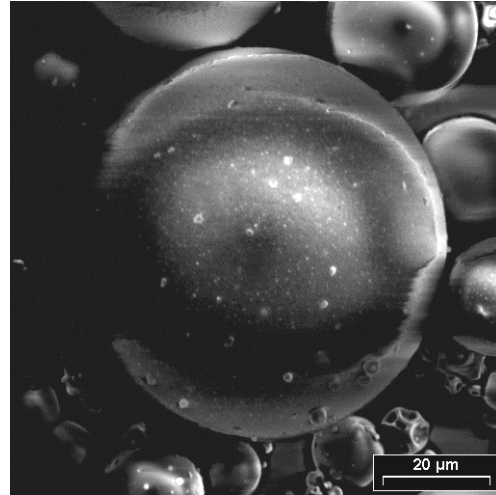


Bild 4.5: Q-Cel 6042S; REM

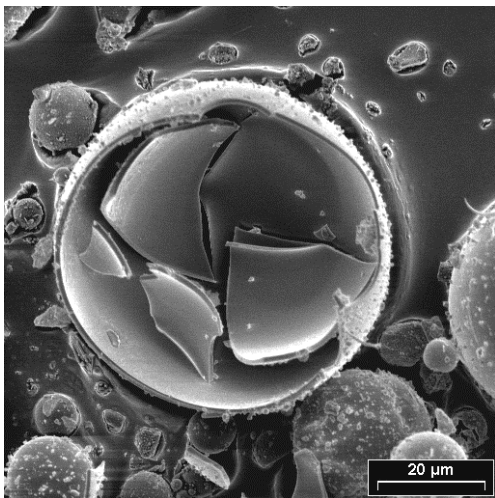
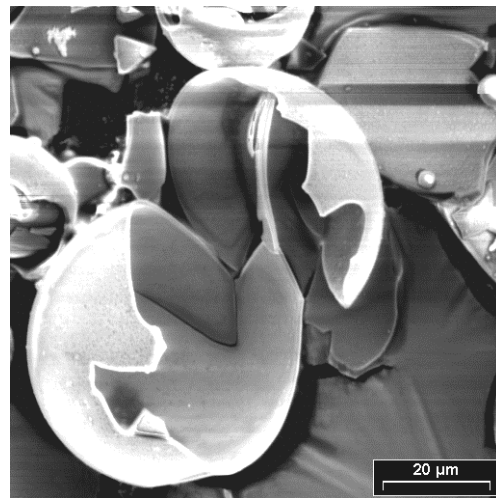


Bild 4.6: Gebrochene Q-Cel 300; REM **Bild 4.7:** Gebrochene Q-Cel 6042S;
REM



Mikrohohlkugeln Fillite

Die Firma Omya liefert aluminosilikatische Mikrohohlkugeln, als „Fillite“ bezeichnet, deren Schmelztemperaturen etwa 1200 bis 1350 $^{\circ}\text{C}$ betragen und deren Dichten zwischen 0,6 und 0,8 g/cm^3 liegen [172, 173]. Diese bestehen zu 55-65% aus SiO_2 , 27-33% aus Al_2O_3 , der Rest entfällt auf Eisenoxid. Die Fillite-Kugeln enthalten eine Gasfüllung, bestehend aus 70% CO_2 und 30% N_2 . Die Packungsdichte der Fillite-Kugeln beträgt nach Herstellerangaben etwa 60 bis 65%.

Sie werden bei der Herstellung von Flugasche gebildet, die während des Prozesses der Kohleverbrennung bei Dampfkraftwerken entsteht. Die Fillite werden als Mörtel, Polymerbeton, Beschichtungen, Unterbodenschutzmassen oder Acrylatprofile eingesetzt.

Für die Untersuchungen wurden Fillite PG verwendet. Das Schüttgut von Fillite PG ist hellgrau, bestehend aus Teilchen der Korngrößen zwischen 5 und 300 μm , deren überwiegender Anteil (40-60%) unterhalb von 150 μm liegt. Um die einzelnen Fillite PG Kugeln beobachten zu können, wurden rasterelektronenmikroskopische Untersuchungsmethoden verwendet. Wie in **Bild 4.8** festzustellen ist, besitzen die Fillite PG eine sehr glatte Außenfläche. Um Informationen über die innere Struktur und die Struktur der Wände zu erhalten, wurden die Fillite-PG-Kugeln zerdrückt (**Bild 4.9**). Die Wände der Kugeln, deren Wandstärke 5-10% des Kugeldurchmessers beträgt, sind durchgehend ohne Fehlstellen glatt gebrochen und weisen keine Poren auf, was zu einer besseren Belastbarkeit im Vergleich zu anderen Mikrokugel-Typen, die mit Poren behaftet sind, führt.

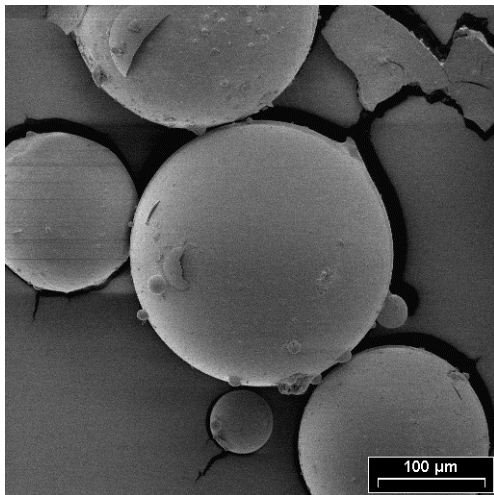


Bild 4.8: *Fillite-Mikrokugeln; REM*

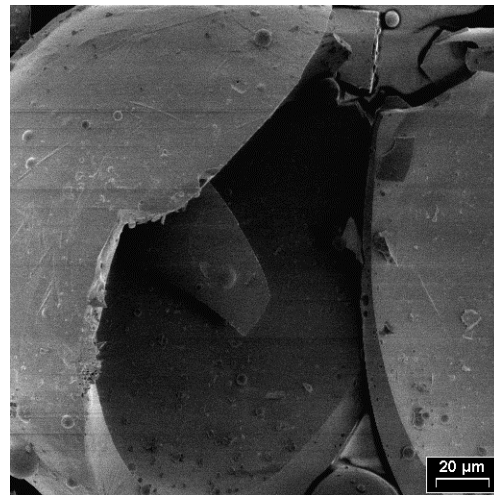


Bild 4.9: *Gebrochene Fillite-Kugeln; REM*

Mikrohohlkugeln Extendospheres bzw. E-Spheres

Die Firma Osthof - Petrasch in Deutschland ist Lieferant von keramischen Mikrohohlkugeln australischer Herkunft (E - Spheres) bzw. englischer Herkunft (Extendospheres) [170] (Vergl. **Tab. 4.5**).

Diese keramischen Mikrohohlkugeln entstehen als Nebenprodukt der Kohleverbrennung und werden in einem aufwendigen Verfahren extrahiert. Sie eignen sich nach den Lieferanten Angaben zum Einsatz in den verschiedensten Bereichen, wie Vollwärmeschutzsystemen, Spachtelmassen, Mörtel, Feuerfestmassen, Kokillenabdeckungen und Unterbodenschutz.

Das **Bild 4.10** zeigt das Schüttgut von E-Spheres 350, das für die Untersuchungen verwendet wurde. Die Korngröße von E-Spheres ist zwischen 50 und 350 μm verteilt

und die durchschnittliche Korngröße liegt zwischen 150-250 μm . Die rasterelektronenmikroskopische Aufnahme im **Bild 4.10** zeigt bei höherer Vergrößerung die Außenfläche dieser Kugeln, die uneben und mit vielen Löchern und geöffneten Poren behaftet ist und eine unregelmäßige Form besitzt. Wie aus **Bild 4.11** zu erkennen ist, sind die Kugeln undurchsichtig und schaumig. Solche Strukturen werden wahrscheinlich zu einer ungenügenden Festigkeit der mit diesen Füllstoff-E-Spheres gebildeten Kompositen führen. Aufgrund der ungleichmäßigen Oberfläche könnte die Verbundfestigkeit durch zusätzliche mechanische Verankerungsmechanismen positiv beeinflusst werden, die noch durch mechanische Prüfungen der HKK untersucht werden muss.

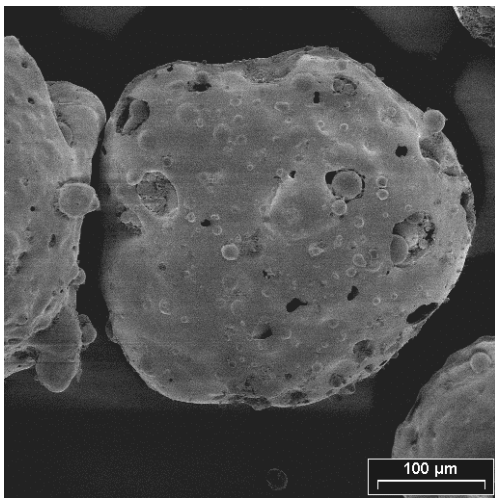


Bild 4.10: Außenfläche von E-Spheres 350; REM

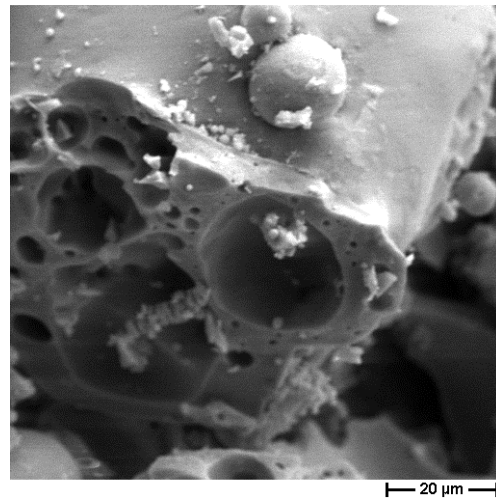


Bild 4.11: Innere Struktur von E-Spheres 350; REM

Mikrohohlkugeln Dualite

Dualite-Mikrohohlkugeln bestehen aus organischen Materialien (Acrylnitrilcopolymer), die mit CaCO_3 beschichtet wurden, um eine Agglomeration der Hohlkugeln zu vermeiden. Sie wurden bisher z.B. für Unterbodenschutz, Klebstoffe, Dichtungen und Farben angewendet.

Aufgrund ihrer besseren Chemikalien- und Temperaturbeständigkeit im Vergleich zu den anderen Dualite-Typen wurde der Füllstoff Dualite M 6050 AE für die Untersuchungen ausgewählt. Die Teilchengröße der Dualite M 6050 AE nach Herstellerangaben beträgt 95 μm [174].

Die CaCO_3 -Beschichtung ist auf der Oberfläche der rasterelektronenmikroskopisch untersuchten Dualite-Kugeln erkennbar (**Bild 4.12**). Im **Bild 4.13** ist die teilweise plastische Deformation gezeigt. Dies kann eine bessere Komprimierbarkeit der mit Dualite angereicherten HKK-Varianten zur Folge haben.

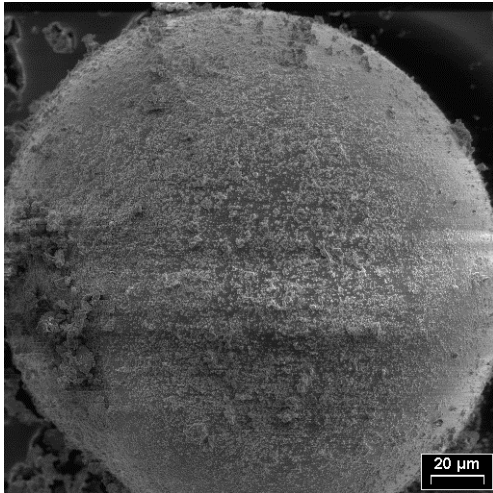


Bild 4.12: *Dualite-Kugel; REM*

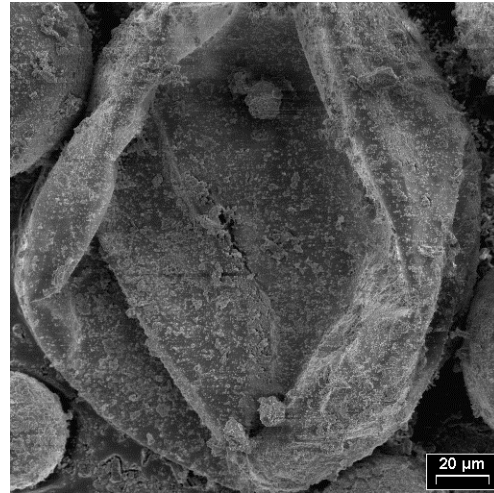


Bild 4.13: *Zusammengedrückte Dualite-Kugeln; REM*

Makrohohlkugeln Alodur bzw. Rhinalox

Die Firma Treibacher stellt Hohlkugeln aus Korund mit der Bezeichnung ALODUR® und RHINALOX® her [175]. Die keramischen Makrohohlkugeln haben eine höhere Temperaturbeständigkeit als die organischen Mikrohohlkugeln (Dualite) und die anorganischen Mikrohohlkugeln sowohl auf Borosilikatglasbasis (Q-Cel) als auch auf Aluminosilikatkeramikbasis (Fillite oder E-Spheres).

Hohlkugelkorund wird durch Schmelzen von hochreiner kalzinierter Tonerde und durch Verblasen dieser Schmelze in der Luft produziert. Die Makrohohlkugeln werden bevorzugt als Schleifmittel, Brennununterlagen oder als Filtermedium benutzt.

Für die Untersuchungen wurden verschiedene Sorten mit unterschiedlichem Korndurchmesser ausgewählt: Alodur Standard (KKW 0-0,5 mm und KKW 0,5-1 mm), Alodur mit reduziertem Schalenbruch (KKW Spezial 1-2 mm) und Rhinalox (KKW Spezial 1-2 mm). Diese Kugel-Typen werden sowohl einzeln als auch durch Kombination nach bestimmten Sieblinien in den Hohlkugelkompositen eingesetzt. Einige Kenndaten der verwendeten keramischen Kugeln sind in der **Tabelle 4.8** angegeben [175].

Tabelle 4.8: *Siebungen der verwendeten Makrohohlkugeln*

<i>Korngröße</i>	<i>Schüttdichte g/l</i>	<i>Qualität</i>
0-0,5 mm	800-1100	KKW
0,5-1 mm	650-850	KKW
1-2 mm	550-800	KKW Spezial

Das **Bild 4.14** zeigt eine Aufnahme der äußeren Oberfläche der Schale einer keramischen Hohlkugel des Korngrößenbereiches von 0,5-1mm. Die Außenfläche ist uneben und porös. Das **Bild 4.15** zeigt den vergrößerten Bereich einer Kugelschale. Der innere Hohlraum ist nicht mehr kugelförmig. Die Schale beinhaltet viele kleine Poren. Es gibt Stellen in der inneren Schale, die sehr dünnwandig sind. Deshalb kann angenommen werden, dass diese Stellen zur Entstehung von Löchern führen. Die Wanddicke der Schale ist ungleichmäßig ausgeprägt und zerklüftet.

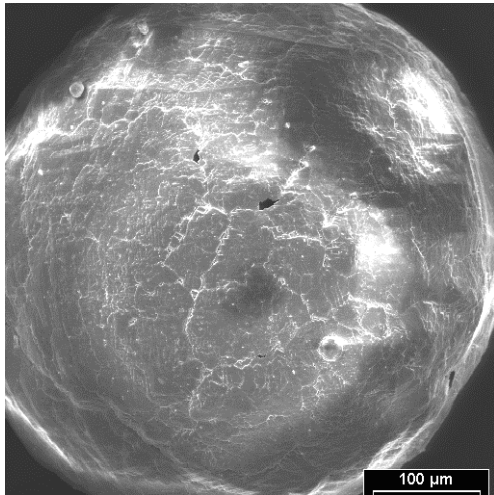


Bild 4.14: Äußere Oberfläche der Hohlkugel aus Korund (0,5-1 mm); REM

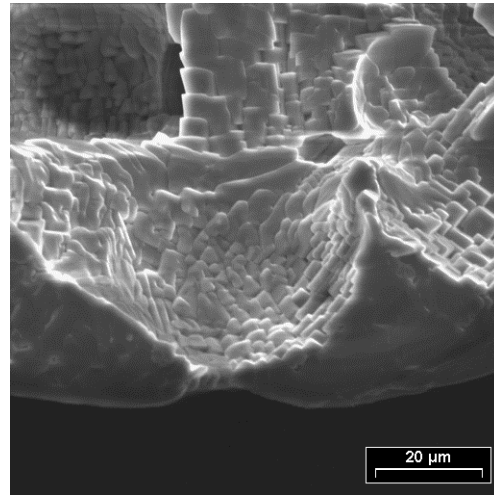


Bild 4.15: Innere Oberfläche der Hohlkugel aus Korund (0,5-1 mm); REM

4.2.2.3 Poröse Kugeln

Poröse Kugeln Poraver

Eine Zwischenstellung zwischen den hohlen und den massiven Kugeln nehmen die schaumigen Kugeln ein (Poraver „por“ porig, „ver“ Werkstoff). Sie sind ein feinporiges Rundgranulat der Firma Dennert Poraver, deren Dichte und Schüttgewicht zwischen den massiven und den hohlen Kugeln liegt (**Tabelle 4.5**).

Zur Herstellung benutzt man gereinigtes Recycling-Glas, das staubfein gemahlen, dann aufbereitet, granuliert und schließlich bei 1000°C aufgebläht wird [176]. Sie sind in 6 Kornklassen von 0,25 bis 25 mm erhältlich. Die Poraver-Kugeln sind nicht mehr so rund wie die Hohlkugeln Q-Cel, Fillite oder E-Spheres. Dank des strukturellen und chemischen Aufbaus weisen die Füllstoffe sehr gute wärme- und schalldämmende Eigenschaften auf. Sie sind chemikalien- und korrosionsbeständig und nicht brennbar. Auf diesen Gründen werden sie als Dämm-Material und Absorptionsmaterial in der Bauindustrie, in der Leichtbautechnik und in der Kunststoffindustrie angewandt [176].

Für die Untersuchungen wurden Poraver-Kugeln der Korngröße 1 bis 2 mm, Schüttgewicht $0,23 \text{ g/cm}^3$ und Kornrohichte von $0,4 \text{ g/cm}^3$ verwendet [176]. Das **Bild 4.16** zeigt, dass die äußeren Flächen der Poraver-Kugeln glatt und unregelmäßig geformt sind, die zu einer Erhöhung des Harzverbrauches führen. Im Inneren der Kugeln befinden sich viele kleine Poren, wie es im Bild 4.17 zu beobachten ist. Dies kann die Festigkeit herabsetzen.



Bild 4.16: Schüttgut Poraver; Lichtmikroskopie



Bild 4.17: Bruchfläche von Poraver-Kugeln; Lichtmikroskopie

4.2.3 Faserige Füllstoffe

Um eine Verstärkungswirkung mit Fasern zu erreichen, müssen grundsätzlich folgende Forderungen erfüllt werden:

$$\sigma_F > \sigma_M \quad , \quad E_F > E_M \quad , \quad \varepsilon_F < \varepsilon_M \quad ,$$

wobei σ = Zugfestigkeit, E = E-Modul, ε = Dehnung, F = Faser und M = Matrix bedeuten.

Die Verstärkungswirkung wird durch Gewichtsanteile der Fasern, Längen/Durchmesser Verhältnis, Orientierung, Verarbeitungsprozess, Aushärtung der Matrix sowie Verbundfestigkeit zwischen Fasern und Matrix beeinflusst. Die Verbundfestigkeit wird durch die Wahl eines gut haftenden Matrixsystems oder durch Behandlung der Fasern mit Schlichte gewährleistet. Die Schlichte besteht aus Filmbildner, Gleitmitteln oder Haftvermittlern [126].

4.2.4 Verwendete Fasern

Glasfasern

Glasfasern werden als Verstärkung oft benutzt wegen ihres günstigen Preis/Festigkeit Verhältnisses. Die Herstellung erfolgt hauptsächlich durch Schmelzspinnverfahren. Die dabei gewonnenen Filamente werden zu Fasern zusammengefasst. Sie lassen sich gut bearbeiten und sind gleichermaßen für Zug und Druck geeignet. Die Elastizitätsmodul- und Dichtewerte sind im Vergleich zu Kohlenstofffasern nicht so günstig. Die Eigenschaften von E-Glasfasern (Elektro-Glas), die zur Herstellung vom Glasgewebeband verwendet werden, sind der **Tabelle 4.9** zu entnehmen.

Tabelle 4.9: Eigenschaften der verwendeten Glas- und Kohlenstofffasern
(|| Faserlängsrichtung, \perp Faserquerrichtung)

<i>Eigenschaften</i>	<i>Einheit</i>	<i>Glasfasern (E-Glas)</i>	<i>Kohlenstofffasern (HT)</i>
Faserdichte	g/cm ³	2,6	1,78
Zugfestigkeit	MPa	3400	3400
Elastizitätsmodul	GPa	73	235
Elastizitätsmodul \perp	GPa	73	15
Bruchdehnung	%	3,5	1,4
Wärmeausdehnungskoeffizient	10 ⁻⁶ K ⁻¹	5	-0,1
Wärmeausdehnungskoeffizient \perp	10 ⁻⁶ K ⁻¹	5	10
Wärmeleitfähigkeit	W/(m · K)	1	17

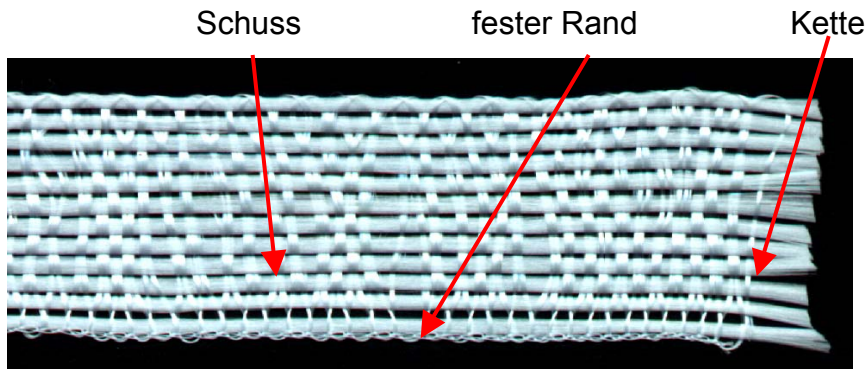


Bild 4.18: Verwendetes Glasgewebeband 220 g/m², 20 mm breit und 0,22 mm dick und unidirektionale Leinwandbindung (Kette = E-Glas 136 tex und Schuss = E-Glas 68 tex)

Bild 4.18 zeigt das verwendete unidirektionale Glasgewebeband 220 g/m² mit der horizontalen Kette und dem vertikalen Schuss aus E-Glas mit festem Rand [177]. E-Glas ist unbrennbar, hitzefest bis ca. 400°C und beständig gegen die meisten Chemikalien- und Witterungseinflüsse.

Kohlenstofffasern

Kohlenstofffasern werden meist in den Fällen angewendet, bei denen der E-Modul von Glasfasern nicht mehr ausreicht. Sie bestehen je nach Fasertyp aus 92 bis 100% reinem Kohlenstoff, der einen hohen Orientierungsgrad aufweist. Die Herstellung von Kohlenstofffasern erfolgt durch Verkohlung (Karbonisierung) entweder von Polyacrylnitril oder von Mesophasenpech. Durch unterschiedliche Glühtemperaturen können verschiedene Eigenschaften von Kohlenstofffasern erzielt werden. Die verwendeten Kohlefaserbänder werden auch aus HT-Fasern hergestellt (**Tabelle 4.9**).

Bild 4.19 zeigt das unidirektionale Kohlefaserband mit hoher Steifigkeit in Richtung des Faserverlaufs, der 13 Kohlefaserbündel (Kette) aus HT Kohle sowie dem Schuss aus E-Glas [177].

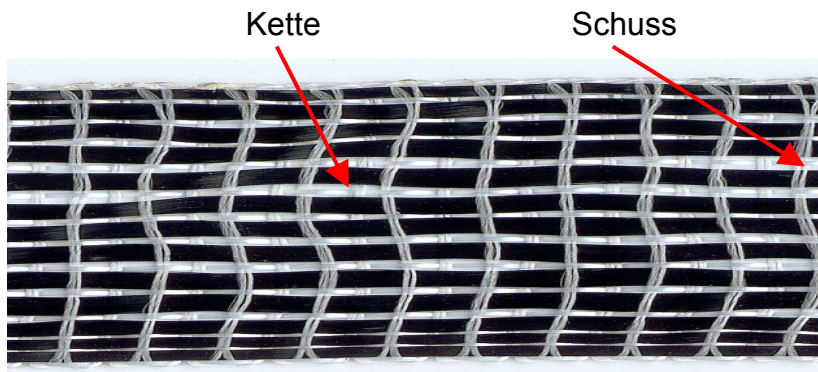


Bild 4.19: Verwendetes Kohlefaserband 125 g/m², 25 mm breit und 0,2 mm dick und unidirektionale Leinwandbindung (Kette = HT Kohle 200 tex und Schuss = E-Glas 22 tex)

4.3 Definition der Probenvariation

Bei der Wahl der Zusammensetzung von Harz und Härter ist anzustreben, gute spezifische Kennwerte sowie eine Reduzierung des Harzverbrauchs durch Erhöhung der Packungsdichte zu erzielen. Wie im **Abschnitt 2.4.1** erwähnt, erreicht man bei Mineralguss die hohe Packungsdichte (PD) durch die Wahl von mehreren Kornfraktionen, die nach bestimmten Sieblinien verteilt sind.

Dadurch, dass die Hohlkugeln eine perfekt kugelige Form gegenüber den anderen silikatischen und quarzitischen Füllstoffen besitzen, können auch geringste Zwischenräume und somit höhere Füllgrade bei HKK als bei Mineralguss erzielt werden. Mit zunehmender Abweichung von der Kugelform wird die Konzentration der Hauptspannungslinien im Korn erhöht und dadurch tritt ein Werkstoffversagen schon weit unterhalb der ermittelten Festigkeitswerte auf [40]. Bei Vorhandensein von nur einer Kugelgröße können diese Kugeln in einer hexagonalen Packung am dichtesten angeordnet werden ($PD=0,74$). Die Kugeln einer Kornklasse sind nach bestimmten Sieblinien angeordnet (**Abschnitt 4.2**), so dass die kleineren Kugeln die Plätze zwischen den größeren Kugeln einnehmen und folglich die Packungsdichte erhöhen ($PD > 0,74$) (**Bild 4.20**).

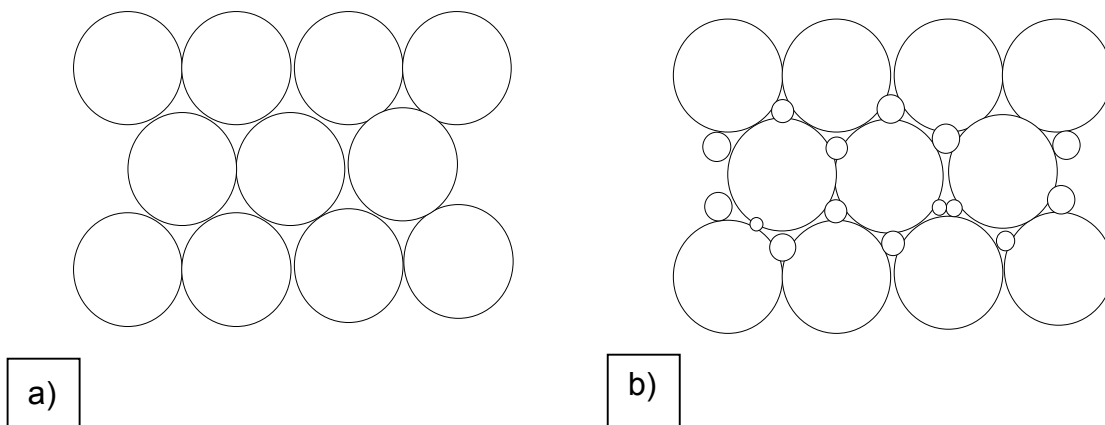


Bild 4.20: a) Hexagonal dichteste Packung ($PD=0,74$); b) Optimierung der Packungsdichte durch unterschiedliche Korngrößen ($PD > 0,74$)

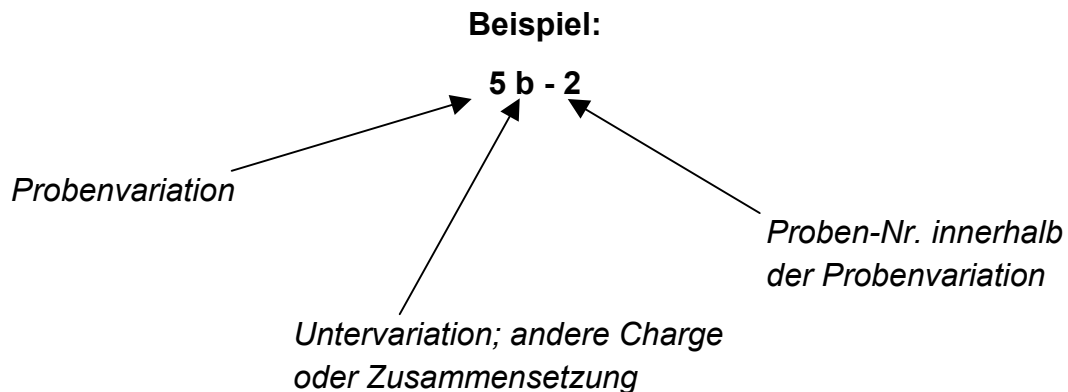
Bei Verwendung unterschiedlicher Kornklassen bestimmter Kornverteilung wird eine weitere Erhöhung der Packungsdichte erreicht. Die einzelnen Kugel-Sorten des Untersuchungsprogramms werden zu bestimmten Sieblinien so gemischt, dass ein 78 Vol.-% Anteil von Füllstoffen vorliegt. Eine Ausnahme der Zusammensetzung bildete die Werkstoffkombinationen 14, bei der auch höhere Bindemittelanteile verwendet wurden.

Um größere Wanddicken von Bauteilen mit kugeligen Füllstoffen zu füllen, werden keramische Hohlkugeln mit Korngrößen von 1 bis 2 mm im Untersuchungsprogramm verwendet.

In Anlehnung an die mit Harz-Härter-Gemischen bei Mineralguss gemachten positiven Erfahrungen und im Ergebnis durchgeführter Voruntersuchungen mit HKK-Proben [15, 111] wurde das Epoxydharz-Härter-System Ebalta AH 120-TL und Polylox E 260-H 415 für die Herstellung der Probenvariationen ausgewählt und verwendet (**Abschnitt 4.1**).

Um eine bessere Vergleichbarkeit der Eigenschaften von HKK mit anderen alternativen Werkstoffen zu erhalten, werden im Untersuchungsprogramm neben den HKK-Variationen auch die kalthärtenden und warmhärtenden Harz-Härter-Systeme sowie Vollkugelkomposit und eine Mineralgussorte untersucht. Die Korngrößen der mineralischen Füllstoffe des verwendeten Mineralgusses entsprachen den Korngrößen der hohlen Kugeln von HKK-Variationen. Das Mischungsverhältnis der Komponenten des Mineralgusses wurde von [177] übernommen.

Die Kennzeichnung der Proben erfolgte nach:



Zur Unterscheidung der Probenvariationen gleicher Füllstoffsorten unterschiedlicher Zusammensetzungen wird zusätzlich ein Buchstabe zu der Probenvariationsnummer hinzugefügt.

Eine ausführliche Erläuterung der Probenbezeichnungen mit den dazugehörigen Zusammensetzungen und Nummern beinhaltet die **Tabelle 4.10**. Für die Herstellung der Proben zur Ermittlung der thermischen und mechanischen Eigenschaften wurden Gießformen verschiedener Abmessungen angefertigt. Die Auswahl der Probenabmessungen und –geometrien wird im **Kapitel 5.2** erläutert.

Die Herstellung von HKK wird neben der physikalisch bestimmten Formgebung auch vom überwiegend chemisch ablaufenden Werkstoffentstehungsprozess beeinflusst. Die endgültige Form wird den Proben durch die bei Raumtemperatur (Kalthärtung) oder bei erhöhter Temperatur (Warmhärtung) erfolgte exotherme Härtingsreaktion verliehen. Durch die Härtung bei Raumtemperatur wird keine vollständige Aushärtung ermöglicht. Die Epoxydharze ändern noch bis zu einer Woche nach Entformung die mechanischen und thermischen Eigenschaften [163, 178, 179]. Deshalb sind die Proben erst nach mindestens 2 Wochen Lagerung bei Raumtemperatur geprüft worden. Die Nachvernetzungsreaktion kann durch kurzzeitige Ofenbehandlung (Nachhärtung) beschleunigt werden, jedoch ist dies nur bei großen Teilen erforderlich.

Tabelle 4.10: Bezeichnung der Probenvariationen

Nr.	Bezeichnung	Zusammensetzung der Probenvariationen
1	Harz-Härter-System Ebalta	Harz: AH 120, Härter: TL, ohne Füllstoffe
2	Vollglaskugeln (Spheriglass)	22 Vol.-% Harz-Härter-System Ebalta, 26 Vol.-% Spheriglass 1216 (425-850 µm), 26 Vol.-% Spheriglass 1922 (150-425 µm), 26 Vol.-% Spheriglass 2227 (75-150 µm)
2b	Vollglaskugeln (Spheriglass)	22 Vol.-% Harz-Härter-System Ebalta 78 Vol.-% Spheriglass 2227 (75-150 µm)
3	E-Spheres 350	22 Vol.-% Harz-Härter-System Ebalta 78 Vol.-% E Spheres SL 350 (50-355 µm)
4	Korund 1-2 mm	22 Vol.-% Harz-Härter-System Ebalta 78 Vol.-% Korund (1000-2000 µm)
5	Fillite PG	22 Vol.-% Harz-Härter-System Ebalta 78 Vol.-% Fillite (5-300 µm)
5b	Fillite PG mit Harz-Härter-System UPPC	22 Vol.-% Harz-Härter-System UPPC 78 Vol.-% Fillite (5-300 µm)
6	Q-Cel 300	22 Vol.-% Harz-Härter-System Ebalta 78 Vol.-% Q-Cel 300 (etwa 20-200 µm)
6b	Q-Cel 6042S	22 Vol.-% Harz-Härter-System Ebalta 78 Vol.-% Q-Cel 6042S (etwa 10-120 µm)
7	Korund 0-0,5 mm	22 Vol.-% Harz-Härter-System Ebalta 78 Vol.-% Korund (etwa 10-500 µm)
8	Korund 0,5-1,0 mm	22 Vol.-% Harz-Härter-System Ebalta 78 Vol.-% Korund (500-1000 µm)
9	Korund 0-2 mm (ohne Silan)	22 Vol.-% Harz-Härter-System Ebalta 78 Vol.-% Korund (etwa 10-2000 µm)
10	Korund 0-2 mm (mit Silan)	21,33 Vol.-% Harz-Härter-System Ebalta, 0,67 Vol.-% Silan, 78 Vol.-% Korund (10-2000 µm)
11	Mineralguss	18,7 Gew.-% Harz-Härter-System Ebalta, 18,7 Gew.-% Mehl (0-100 µm), 13 Gew.-% Sand (100-500 µm), 25,2 Gew.-% Sand (500-1000 µm), 23,17 Gew.-% Sand (1000-2000 µm)

Tabelle 4.10: Bezeichnung der Probenvariationen (Fortsetzung)

12	Fillite mit CFK	Wie 5 + CFK laminiert
13	Korund 0,5-1,0 mm mit CFK	Wie 8 + CFK laminiert
14	Korund 0,5-1,0 mm + Fillite	22 Vol.-% Harz-Härter-System Ebalta und Rest bestehend aus: 40 Vol.-% Korund (500- 1000 µm) und 60 Vol.-% Fillite (5-300 µm)
14b	Korund 0,5-1,0 mm + Fillite	35 Vol.-% Harz-Härter-System Ebalta und Rest bestehend aus: 40 Vol.-% Korund (500- 1000 µm) und 60 Vol.-% Fillite (5-300 µm)
14c	Korund 0,5-1,0 mm + Fillite	45 Vol.-% Harz-Härter-System Ebalta und Rest bestehend aus: 40 Vol.-% Korund (500- 1000 µm) und 60 Vol.-% Fillite (5-300 µm)
15	Korund 0,5-1,0 mm + Fillite + CFK	Wie 14 + CFK nicht laminiert
16	Glasschaum	22 Vol.-% Harz-Härter-System Ebalta 78 Vol.-% Poraver (1000-2000 µm)
17	E-Spheres+ GFK	Wie 3 + Glasfasern nicht laminiert
18	Korund 0,5-1,0 mm + Fillite + Glasfaser	Wie 14 + Glasfasern
19	Korund 0,5-1,0 mm + Fillite mit Polypox	22 Vol.-% Harz-Härter-System Polypox und Rest bestehend aus: 40 Vol.-% Korund (500-1000 µm) und 60 Vol.-% Fillite (5-300 µm)
20	Korund 0,5-1,0 mm + Fillite + CFK mit Polypox	Wie 19 + CFK nicht laminiert
21	Harz-Härter-System Polypox	Harz: Polypox E 260, Härter: Polypox H 415 ohne Füllstoffe
22	Dualite M 6050 AE	22 Vol.-% Harz-Härter-System Ebalta 78 Vol.-% Dualite M 6050 AE (10-150 µm)

5 Verwendete Prüfmethode von Hohlkugelkomposit

In den Konstruktions- und Simulationsberechnungen von Werkzeugmaschinenbauteilen fließen die physikalischen, mechanischen und thermischen Kennwerte der Werkstoffe, wie z. B. Dichte, E-Modul, Festigkeit oder Wärmeausdehnungskoeffizienten, ein. Dadurch, dass HKK als Leichtbauwerkstoff für die Anwendungen im Werkzeugmaschinenbau erst zu entwickeln ist, existieren bislang keine entsprechenden Normen oder Prüfvorschriften zur Prüfung dieses Werkstoffes.

Die Ermittlung optimaler Parameter (Prüfgeschwindigkeit) bei der Prüfung der geeigneten Probengeometrien stellt eine zusätzliche Herausforderung bei der Prüfung von HKK dar. Es müssen die vorhandenen Normen und Prüfvorschriften für die mechanischen und thermischen Prüfungen von Kunststoffen, Schaumwerkstoffen oder Reaktionsharzbeton modifiziert bzw. auf den reellen Werkstoff HKK bezogen werden. So darf – laut DIN 51290 Teil 3 – Prüfung von Reaktionsharzbeton im Maschinenbau - das kleinste Maß des Probenkörpers den dreifachen Größtkorndurchmesser (körnige Füllstoffe) bzw. die dreifache Höchstlänge (nichtkörnige Füllstoffe) der verwendeten Füllstoffe nicht unterschreiten [30]. Auf diese Empfehlung wurde bei der Auswahl der Probengeometrie in jedem Fall geachtet, so dass bei der Auswahl der Korundhohlkugeln von 2 mm keine der Probenabmessungen kleiner als 6 mm waren.

Die Charakterisierung der Aushärtung mittels Methoden der Thermischen Analyse liefert neben den Aussagen über das thermische Verhalten auch Aussagen über den mechanischen und chemischen Werkstoffzustand der auf duroplastischer Basis hergestellten Werkstoffe.

5.1 Prüfung thermischer Eigenschaften

5.1.1 Differential-Scanning-Calorimetrie (DSC)

Um Aussagen über die physikalischen und chemischen Vorgänge und Zustände der Hohlkugelkomposite und deren Ausgangswerkstoffe treffen zu können, dient als Untersuchungsmethode die Differential-Scanning-Calorimetrie (DSC).

Bei dem DSC-Verfahren wird die Differenz der Wärmeströme zwischen einem mit einer Probe gefüllten Behälter und einem Referenzbehälter in Abhängigkeit von der Zeit oder der Temperatur gemessen, wobei die Probe einem geregelten Temperaturprogramm in einer bestimmten Atmosphäre unterworfen wird [181]. Für die Durchführung einer DSC-Messung werden die zwei thermisch gut leitenden Probenbehälter in einem beheizbaren Raum, DSC-Messzelle genannt, eingebracht. Unterhalb eines jeden Probenbehälters befinden sich Thermoelemente zur Temperaturmessung. Die Messgröße ist die Temperaturdifferenz zwischen den beiden Messstellen, die nach einer sorgfältigen Kalibrierung in Wärmestromeinheiten umgerechnet wird. Beim Auftreten einer quantifizierbaren Umwandlung in der Probe wird eine Temperatur- bzw. Wärmestromdifferenz registriert [181-183]. Weitere physikalische Grundlagen des Messprinzips, der

Funktionsweise und der Auswertung können [181-185] entnommen werden. Die DSC-Messungen wurden mit einem Differential-Scanning-Kalorimeter DSC 200 (Firma Netzsch) durchgeführt [184].

Außerdem ermöglicht die DSC-Methode die Ermittlung der spezifischen Wärmekapazität bei konstantem Druck, die eine wichtige thermische Kenngröße ist. Der aus kalorimetrischen Untersuchungen bestimmbare stoffeigene Proportionalitätsfaktor c_p wird als die erforderliche Wärmemenge bezeichnet, die aufgebracht werden muss, um die Temperatur einer Substanz der Einheitsmasse bei konstantem Druck von 1 K zu erhöhen [163].

5.1.2 Thermomechanische Analyse (TMA)

Mit Hilfe der Thermomechanischen Analyse (TMA) können unter konstanter, meist geringer Auflast die thermischen Längenänderungen bei bestimmten Temperaturen ermittelt werden. Der lineare thermische Ausdehnungskoeffizient, auch thermischer Längenausdehnungskoeffizient oder Wärmedehnzahl genannt, gibt Auskunft über die relative Längenänderung eines Körpers in einem bestimmten Temperaturbereich. Gemessen wird meistens der mittlere Längenausdehnungskoeffizient:

$$\bar{\alpha}(t_1, t_2) = \frac{1}{l_0} \cdot \frac{l_2 - l_1}{t_2 - t_1} = \frac{1}{l_0} \cdot \frac{\Delta l_{th}}{\Delta t} \quad (1)$$

l_0 : Bezugslänge, l_1 : Länge des Probekörpers bei t_1 , l_2 : Länge des Probekörpers bei t_2 , t_1 : untere Temperatur bei der $\bar{\alpha}(t_1, t_2)$ und t_2 obere Temperatur bei der $\bar{\alpha}(t_1, t_2)$ ist. α wird in $\mu\text{m}/(\text{m K})$ oder meistens in K^{-1} angegeben.

Die temperaturabhängige Längenänderung besteht aus der reversiblen thermischen Längenänderung, der reversiblen Modifikationsänderung und/oder der irreversiblen Längenänderung.

Die reversible thermische Längenänderung ist die eigentlich zu bestimmende effektive Längenänderung. Sie lässt sich physikalisch betrachtet auf die thermisch bedingten Schwingungen der Atome und Moleküle zurückführen.

Zu den Modifikationsänderungen zählen die Umwandlungen 1. Ordnung — z.B. Schmelzen der kristallinen Anteile von teilkristallinen Kunststoffen, Struktur- und/oder Konzentrationsänderungen — und die Umwandlungen 2. Ordnung, wie z.B. Glasübergangstemperaturen von amorphen oder duroplastischen Kunststoffen oder andere Umwandlungen [182].

Die irreversiblen Längenänderungen können z.B. durch Stoffaustausch, Modifikationsänderung, Umkristallisation, Schmelzphasenbildung oder Kristallisationskondensation hervorgerufen werden [185].

Zur Messung der thermischen Längenausdehnungskoeffizienten von verschiedenen HKK-Varianten stand ein Thermomechanisches Analyse-Gerät TMA 402 zur Verfügung

[186]. Die Aufheizung der Proben erfolgte mit einem Hochtemperatur-Dreizonenofen, der im Temperaturbereich von 25°C bis 1000°C arbeitet. Die Regelung der Ofentemperatur erfolgte durch ein Thermoelement des Typs K (NiCr-Ni). Entsprechend den Temperaturvorgaben wurde die gleichbleibende Temperatur mit Hilfe eines Thermostaten geregelt [187].

Die Abmessungen der Proben hängen von den zu untersuchenden Werkstoffen und vom Arbeitsbereich des Gerätes ab. Für die Messungen mit dem TMA 402 können zylindrische und prismatische Proben mit einer Länge von 25 mm und mit einem maximalen Durchmesser bzw. mit einer maximalen Diagonale von 9 mm verwendet werden. Da der Werkstoff HKK aus verschiedenartigen Bestandteilen besteht, wurden Normen zur Bestimmung des Ausdehnungskoeffizienten von Glas, Keramik oder Kunststoff berücksichtigt [188-196]. Dementsprechend wurden zylindrische Proben mit einem Durchmesser von 6 mm gegossen und prismatische Proben mit Kantenlängen von etwa 6 mm verwendet. In den Normen sind die für den jeweiligen Werkstoff vorgeschriebenen Heizraten angegeben [188-196]. Da die Kunststoffe relativ schlecht die Wärme leiten, wurden die Proben mit einer Heizrate von 1 K/min aufgeheizt. Im Gegensatz dazu werden Glas oder Keramik mit höheren Aufheizraten (5 K/min) untersucht.

5.1.3 Messmethode zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit λ mit der Dimension $[W/(m \cdot K)]$ ist ein Maß für das thermische Leitvermögen eines Stoffes. Die Wärmeleitfähigkeit λ wird durch die Differentialgleichung der Wärmeleitung für einen homogenen isotropen Körper festgelegt:

$$dQ = - \lambda \cdot dA \cdot \text{grad } dT/dt \quad (2)$$

Danach fließt die Wärmemenge dQ in der Zeit dt durch die Fläche dA entlang und mit $\text{grad } T$ von der höheren zur tieferen Temperatur [197, 199].

Die Ermittlung der λ -Werte erfolgte mit einem Zweiplattengerät TAURUS TLP 800 nach DIN 52612 Teil 1 (**Bild 5.2.a**) [198]. Dieses Verfahren stellt im Prinzip ein stationäres Verfahren dar, wobei ein kontinuierlicher Kühl- und Wärmestrom zwischen zwei plattenförmigen Proben gewährleistet wird. Für die Messung der Werte mit dem Zweiplattengerät waren zwei Platten aus Probenvariation 14 mit den Abmessungen 800X800X25 in mm gefertigt. Die plattenförmigen Proben sind symmetrisch zu beiden Seiten der beheizten Platte (Heizplatte) angeordnet (**Bild 5.2.b**). Die äußeren Oberflächen werden durch zwei Kühlplatten gekühlt.

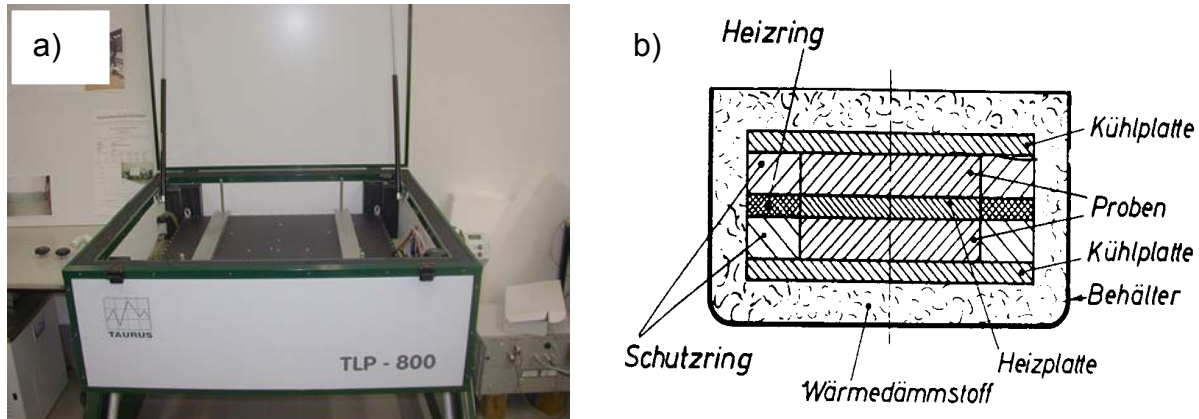


Bild 5.2: a) Zweiplattengerät Taurus TLP 800

b) Versuchsanordnung in einem Zweiplattengerät [198]

Aus den Temperaturen der Oberflächen der Proben 1 bzw. 2 wird eine mittlere Temperatur der warmen (T_{wm}) und kalten Oberfläche (T_{km}) ermittelt:

$$T_{wm} = \frac{1}{2} \cdot (T_{w1} + T_{w2}) \quad \text{bzw.} \quad T_{km} = \frac{1}{2} \cdot (T_{k1} + T_{k2}) \quad (3)$$

Die Wärmeleitfähigkeit wird mit dem Zweiplattengerät nach folgender Formel berechnet [198]:

$$\lambda = \frac{\dot{Q} \cdot d_m}{2 \cdot A \cdot (T_{wm} - T_{km})} \quad (4)$$

\dot{Q} (in W) Wärmestrom, der im stationären Zustand senkrecht zur Probenoberfläche durch die Probe strömt, A (in m^2) Fläche der Heizplatte, d_m (in m) mittlere Dicke der Probe, $d_m = 1/2 \cdot (d_1 + d_2)$ mit d_1, d_2 (in m) mittlere Dicke der Probe 1 bzw. 2. Der Wärmestrom wird aus der elektrischen Wärme bestimmt.

5.2 Prüfung mechanischer Eigenschaften

Für die Dimensionierung und für die konstruktive Auslegung eines Bauteils mittels FEM-Berechnungsmethoden sind neben den thermischen Eigenschaften vor allem die mechanischen Eigenschaften, wie Dichte, Elastizitätsmodul und Querkontraktionszahl besonders wichtig. Diese Kennwerte sind für die im Untersuchungsprogramm ausgewählten HKK-Varianten noch unbekannt und mussten ermittelt werden. Darüber hinaus, um eine möglichst umfangreichere Charakterisierung der HKK-Varianten zu ermöglichen, waren die Festigkeiten unter Zug-, Druck- und Biegebeanspruchung sowie die Elastizitätsmodule bei verschiedenen Frequenzen und Temperaturen in Biegeversuch mittels DMA zu ermitteln. Die dazu erforderlichen Versuchseinrichtungen und Untersuchungsmethoden werden im Folgenden erläutert.

5.2.1 Physikalisch-mechanische Eigenschaften

5.2.1.1 Dichte

Zur Charakterisierung und Auswahl der Leichtbauwerkstoffe ist die Dichte eine der wichtigsten Kennzahlen (siehe **Abschnitt 2.3**).

Die Dichte eines Stoffes ist der Quotient aus der Masse m und dem Volumen V [199]:

$$\rho = \frac{m}{g} \quad (5)$$

Dadurch, dass in der Struktur der HKK auch Poren enthalten sind, ist die eigentliche Kennzahl, die bestimmt wird, nicht die Reindichte, sondern die Rohdichte. Sie wurde aus der Masse und dem Volumen eines jeden Probekörpers bestimmt.

5.2.2 Statisch-mechanische Eigenschaften

5.2.2.1 Zugversuch

Die Zugversuche erfolgten nach DIN EN ISO 527-4 Typ 3 [200]. Der ausgewählte Probekörper hat die Abmessungen: Länge (L) 250 mm, Dicke (d) 10 mm und Breite (b) 25 mm. Um ein Schlupfen oder Brechen der Proben in der Aufnahme der Prüfmaschine zu vermeiden, wurden die Enden der Probekörper mit Kraffteinleitungselementen versehen. Die Kraffteinleitungselemente, bestehend aus Kohlefasern, wurden mittels des gleichen Epoxydharzes wie die des Grundmaterials Ebalta 120 /TL an die Probekörper geklebt (**Bild 5.3**). Die Gießform wurde aus Aluminiumplatten hergestellt und war mittels Schraubverbindungen montierbar und demontierbar. Die im **Bild 5.4** ersichtliche Gießform erlaubte die Anfertigung von maximal 8 Probekörpern.

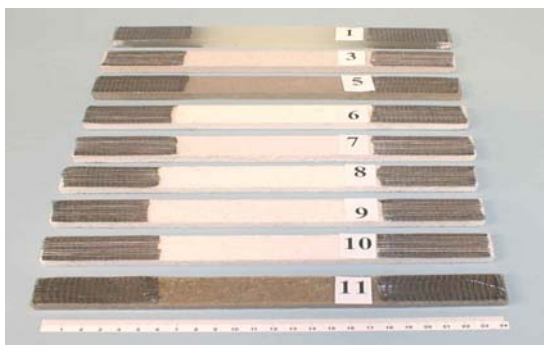


Bild 5.3: Verwendete Zugproben

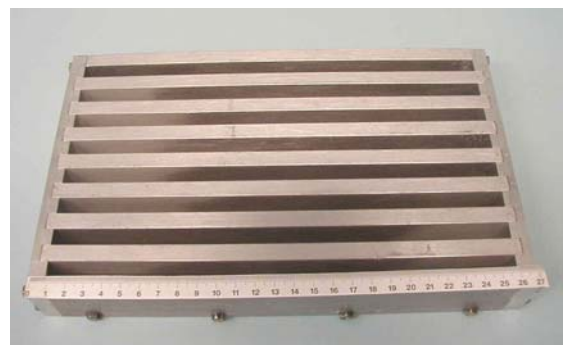


Bild 5.4: Gießform für Zugproben

Für die Ermittlung der mechanischen Kennwerte aus den Zugversuchen wurde eine Prüfmaschine mit einer Maximalkraft von 100 kN (Testatron 1288/100 kN/Wolpert) verwendet. Die Prüfgeschwindigkeit war mit 5 mm/min ausgewählt [200].

5.2.2.2 Elastizitätsmodul und Querkontraktionszahl

Die Bestimmung des Elastizitätsmoduls und der Querkontraktionszahl erfolgte sowohl im Zug- als auch im Druckversuch an einer Universalprüfmaschine (Zwick 1475) mit Ansatzdehnungsmesser. Die Prüfgeschwindigkeit betrug 2 mm/min. Die beiden Kennwerte, die das Verformungsverhalten eines Werkstoffes beschreiben, fließen in die Dimensionierungsberechnungen von Bauteilen ein. Die Querkontraktionszahlen stellen ein Bindeglied zwischen ein- und mehrachsiger Beanspruchung dar und fungieren als Proportionalitätsfaktor zwischen verschiedenen Modulen.

Die experimentelle Bestimmung der lastunabhängigen Materialkonstante (Querkontraktionszahl) ν erfolgte durch die Ermittlung der Quer- (ε_q) und Längsdehnung (ε_l) bei Zugbeanspruchung und durch die Berechnung nach der Beziehung:

$$\nu = \frac{|\varepsilon_q|}{|\varepsilon_l|} \quad (6)$$

Für die Durchführung der Messungen wurde eine Prüfmaschine mit externer Aufzeichnung der Kraft- und Verformungssignale und zusätzlichem Einsatz eines Querdehnungsextensoimeters verwendet.

5.2.2.3 Druckversuch

Um die maximal aufzubringende Kraft der Universalprüfmaschine (Testatron 1288/Wolpert) von 100 kN nicht zu überschreiten, mussten die Abmessungen nach folgender Formel berechnet werden:

$$\lambda_S = l \cdot \sqrt{A/I} \quad (7)$$

wobei λ_S den Schlankheitsgrad, l die Länge des Probekörpers, A die Probekörpergrundfläche und I das kleinste axiale Flächenträgheitsmoment kennzeichnen [201-204]. Um ein Ausknicken der Proben zu verhindern, wird ein Schlankheitsgrad λ_S von 10 bzw. mindestens 6 empfohlen. Dadurch, dass $A = a^2$ (a = Kantenlänge) und $I = a^4/12$ ist, folgt:

$$l = \lambda_S \cdot a / 3,46 \quad (8)$$

Aus diesen Überlegungen wurde als Form ein rechteckiges Prisma mit den Abmessungen 30X30X100 mm ausgewählt (**Bild 5.5**). Mittels der im **Bild 5.6** dargestellten Gießform konnten 5 Probekörper einer Probenserie in einem Gießvorgang hergestellt werden.

Die Prüfungen erfolgten laut DIN EN ISO 604 [203] mit einer Prüfgeschwindigkeit von 1 mm/min.

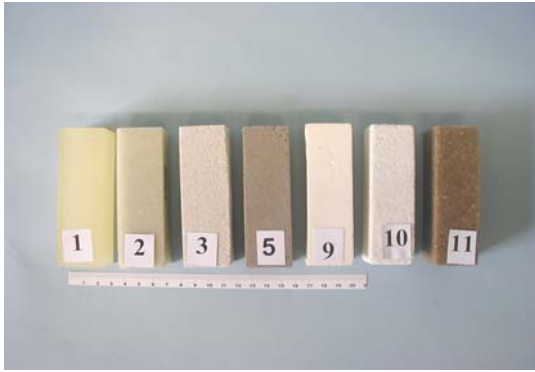


Bild 5.5: Verwendete Druckproben

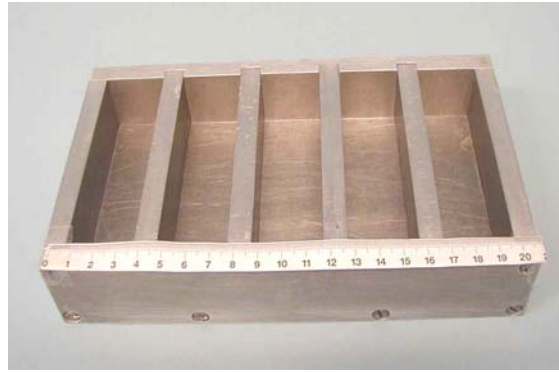


Bild 5.6: Gießform für Druckproben

5.2.2.4 Zeitstandverhalten im Druckversuch

Da die Polymere bereits bei niedrigen Beanspruchungen schon starke Abhängigkeiten ihres Verformungs- und Festigkeitsverhaltens von der Beanspruchungszeit aufweisen, müssen diese bei der konstruktiven Gestaltung berücksichtigt werden. Deswegen wurden für die Probekörper der Probenserien 1, 2, 9, 11, 14, 14b, 14c Zeitstandversuche an einer Universalprüfmaschine der Firma Zwick 1465 durchgeführt. Bei einem Zeitstandversuch wird die zunehmende Dehnung in Abhängigkeit von der Zeit unter konstanter Last gemessen. Die Ermittlung der Spannungen für die Langzeitversuche, mit denen die Probekörper unter konstanter Last gehalten werden, erfolgte in Kurzzeitversuchen.

5.2.2.5 Biegeversuch

Nach Überprüfung der Anwendbarkeit der in den Normen angegebenen Verfahren für HKK sowie unter Berücksichtigung der vorhandenen gerätetechnischen Bedingungen wurden die Biegeversuche in Anlehnung an DIN EN ISO 178 und DIN 51290, Teil 3 durchgeführt [30, 205]. Um die Abmessungen zu ermitteln, wurde zunächst von einer Höhe von 12 mm ausgegangen. Aus den Empfehlungen der DIN EN ISO 178 resultierte dann die Breite b von 20 mm. Das Verhältnis Länge/Höhe = 20 musste jedoch gewahrt bleiben, so ergab sich die Länge l von 240 mm. Die Stützweite wurde dann nach folgender Gleichung

$$L = (16 \pm 1) \cdot h \quad (9)$$

mit 192 mm ermittelt.

Bild 5.7 illustriert die Gießform zur Herstellung der Biegeprobekörper und **Bild 5.8** dokumentiert die Biegestäbe einiger Probenserien. In der Material-Prüfmaschine Testatron 1288/Wolpert liegen die Probestäbe flach, also um 90° gedreht. Die Prüfungsgeschwindigkeit, bei der in einer Minute die Durchbiegung dem 0,4-fachen der Probendicke am nächsten kam, betrug in diesem Fall 4,8 mm/min.

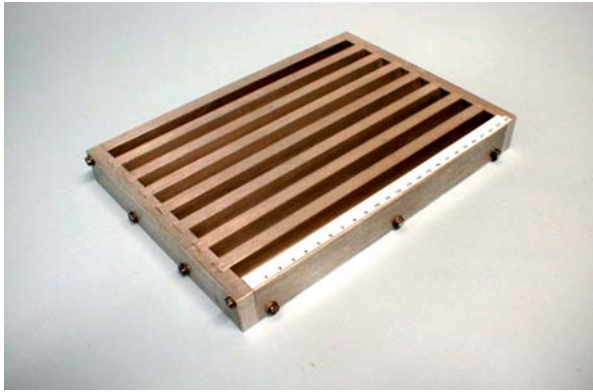


Bild 5.7: Gießform für Biegeproben

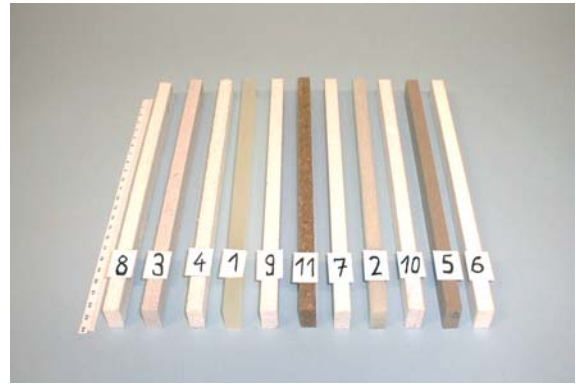


Bild 5.8: Biegeprobekörper

Da sowohl die Kraft als auch die Durchbiegung von der Form und Größe der verwendeten Probekörper abhängen, ist ein qualitativer Werkstoffvergleich bei den aufgezeichneten Kraft-Durchbiegungs-Diagrammen nicht möglich. Deshalb wurden sie in Biegespannungs-Biegedehnungs-Diagramme umgewandelt. Die Biegespannung wurde nach folgender Gleichung berechnet:

$$\sigma_f = \frac{3 \cdot F \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (10)$$

Die Randfaserdehnung ε_b ist der aus den absoluten Beträgen der relativen Längenänderung der Randfasern in der Zug- und Druckzone gebildete Mittelwert, unter der Voraussetzung, dass die Querschnitte eben bleiben. Sie berechnet sich nach der Gleichung:

$$\varepsilon_b = \frac{6 \cdot h \cdot f}{L^2} \quad (11),$$

wobei h die Dicke des Probekörpers in mm, f die Durchbiegung in der Mitte der Probe in mm und L die Stützweite in mm sind.

5.2.3 Dynamisch-mechanische Prüfung

5.2.3.1 Dynamisch-mechanische Analyse (DMA)

Dynamisch-mechanische Prüfungen wurden bei Epoxydharz (Probenvariation 1), bei HKK (Probenvariation 14) und bei Mineralguss (Probenvariation 11) mittels des Dynamisch-Mechanischen Analysators DMA 242 C durchgeführt. Hierfür waren Biegeproben der Länge 50 mm in der Biege-Probenhalterung eingespannt und mit Schwingungen der Frequenzen 1, 2, 5, 10 und 20 Hz ausgesetzt, während die Proben mit einer Heizrate von 1 K/min erwärmt wurden. Die Zeitamplitude betrug jeweils 30 μ m. Die dynamische Kraft wurde auf 5,4 N limitiert, wobei eine um 50 % höherer statische Kraft einen guten Sitz der Proben im Probenhalter gewährleistete.

Bei rein statischen Stoffen ist die resultierende Deformation der Spannung direkt proportional. Bei viskoelastischen Stoffen wird nur ein Teil der zugeführten Energie in der Probe wiedergewinnbar gespeichert. Der viskose Anteil wird dissipiert und führt durch innere Dämpfung zu einem Energieverlust der Probe. Die sinusförmige Kraft bewirkt eine resultierende Verformung der viskoelastischen Probe, die ebenfalls eine sinusförmige Schwingung jedoch mit Phasenverschiebung δ ergibt und messtechnisch erfasst wird. Der Tangens des Verlustwinkels δ , auch Verlustfaktor oder Dämpfungsfaktor genannt, ist ein Maß für die Energieverluste und ergibt sich aus dem Quotient von Speichermodul E' (elastische Komponente) und Verlustmodul E'' (nichtelastische Komponente):

$$\tan \delta = \frac{E''}{E'} \quad (12)$$

Der Speichermodul wird aus der Höhe der Anregungskraft ermittelt. Er kennzeichnet die Steifigkeit eines viskoelastischen Werkstoffs und ist proportional zur während der Belastungsperiode elastisch gespeicherten Arbeit [163, 178, 179].

Je kleiner die nichtelastische Komponente eines Stoffes ist, desto weniger unterscheidet sich der Speichermodul von dem komplexen Modul E^* , wobei der komplexe Modul E^* aus dem Quotienten zwischen Spannungs- und Verformungsamplitude ermittelt wird und die Materialsteifigkeit einer Probe kennzeichnet [206].

5.2.4 Rasterelektronenmikroskopie (REM)

Die rasterelektronenmikroskopischen Methoden können zur Untersuchung von HKK-Werkstoffen angewandt werden, um einerseits die Bruchflächen der Proben zu charakterisieren und andererseits Aufschluss über den Versagensmechanismus zu geben [199]. Es ist zwischen duktilem und sprödem Bruch zu unterscheiden. Bei einem Verbundwerkstoff kann der Bruchvorgang entweder durch das Versagen der Matrix oder das Brechen der Kugeln oder durch das Herauslösen der Kugeln aus der Matrix verursacht werden. Von Interesse sind auch die Untersuchungen von Füllstoffen hinsichtlich Kornform, innerer oder äußerer Oberflächenbeschaffenheit, Größenverteilung und Wanddicke.

Für die rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungen stand ein Rasterelektronenmikroskop DSM 960 der Firma Zeiss zur Verfügung.

Dieses Rasterelektronenmikroskop erlaubte außerdem durch Anschluss eines Biegeprüfgerätes, die In-situ-Durchführung von Biegeprüfungen bei gleichzeitiger Beobachtung des Bruchverlaufs. Die mikrofraktografischen Untersuchungen von Probekörpern waren notwendig, um den Einfluss mikrostruktureller Unterschiede der HKK-Varianten auf das mechanische Verhalten festzustellen. Da die maximal aufzubringende Kraft mit 500 N und die maximale Länge mit 45 mm festgelegt waren, mussten Biegeprobekörper angefertigt werden, deren Dicke 8 mm und Breite 15 mm betragen.

6 Ermittlung des Eigenschaftsprofils von Hohlkugelkomposit

6.1 Charakterisierung der Aushärtung mittels DSC-Methode

Das thermische Verhalten von HKK bei Raumtemperatur und höheren Temperaturen wird wesentlich von der Harz-Härter-Komponente beeinflusst, wie die folgenden DSC-Verläufe es für charakteristische Temperaturen (Glasübergangstemperatur, Nachhärtungstemperatur oder Starttemperatur der thermischen Zersetzung) demonstrieren. Die grüne DSC-Messkurve (**Bild 6.1**) eines kaltgehärteten Ebalta 120/TL Epoxydharzes lässt folgende Effekte erkennen:

- ein Abfall in endothermer Richtung, als Anfahrtauslenkung (Einschwingvorgang),
- es folgt ein endothermer Vorgang, der Glasübergangsbereich mit der dazugehörigen Glasübergangstemperatur (T_g),
- ein exothermer Effekt, charakteristisch für unvollständig ausgehärtete Reaktionsharze mit dazugehöriger Enthalpie (Aushärtungsenthalpie) und Peaktemperatur,
- anschließend ein kleiner Anstieg in exothermer Richtung, die den Beginn der thermischen Zersetzung charakterisiert.

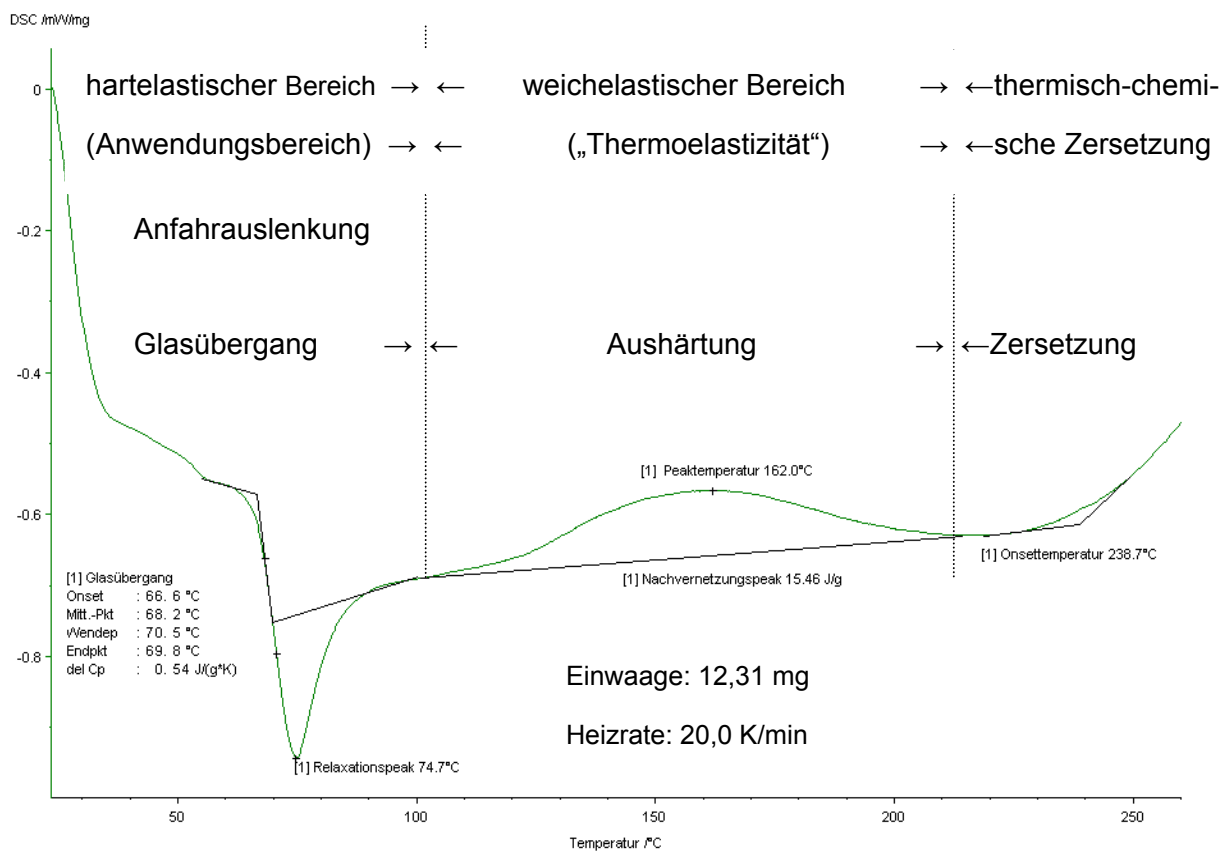


Bild 6.1: DSC-Messkurve von reinem Ebalta 120/TL Epoxydharzsystem

Die Anfahrtauslenkung — Anpassung des Messsignals an den Temperatursprung zu Beginn der dynamischen Messphase — ist proportional der Wärmekapazität der Probe. Danach tritt ein Bereich ohne thermische Effekte, als Basislinie bezeichnet, auf.

Der endotherme Sprung im Verlauf der DSC-Kurve wird als Glasübergangsbereich bezeichnet. In einigen Literaturstellen bezeichnet man den darunter liegenden Bereich als Anwendungsbereich oder Glaszustand [207]. Unterhalb T_g sind die Epoxydharze sehr hart und spröde. Die Makromoleküle sind energieelastisch verspannt und es findet kein Platzwechsel statt. Bei Zufuhr von Wärme wird dieser Zustand bei Erreichen des Glasübergangsbereiches aufgehoben und es tritt die mikrobrownsche Bewegung der Makromoleküle auf, wobei neue Formen von thermischer Beweglichkeit (Segmentenbewegung) erscheinen oder verschwinden. Durch Lagerung unmittelbar unterhalb der Glasumwandlungstemperatur (Tempern) oder weit unterhalb der Glasumwandlungstemperatur macht sich ein zusätzlicher endothermer Peak (Temperpeaks/scheinbare Umwandlung) im Glasübergangsbereich bemerkbar und ist der Glasumwandlung überlagert. Bei der Ebalta120/TL Probe im **Bild 6.1** wurde der Relaxationspeak mit $74,7^\circ\text{C}$ ermittelt.

Oberhalb des Glasumwandlungsbereiches ist das Harz in einem weichelastischen Zustand. In diesem Bereich kann es bearbeitet werden und es findet kein Fließen statt. Die EP-Harze, wie in diesem Fall Ebalta120 /TL, sind nicht schmelzbar und nicht schweißbar. Ein entropieelastischer Platzwechsel der Makromoleküle ist möglich. Die unvollständig vernetzten Bereiche erweichen und das Harz wird flexibler. Die nicht vollständig reagierten Molekülsegmente, die im Glaszustand unterhalb der Glasumwandlungstemperatur eingefroren sind, können oberhalb der T_g ihren Platz wechseln und können wieder in Reaktion treten. Die chemischen Reaktionen zwischen den Endgruppen der Harze und Härter sind exotherm, d.h. es wird Wärme freigegeben [208]. Die Reaktionswärme beträgt in diesem Fall $14,54 \text{ J/g}$. Der Nachvernetzungspeak kennzeichnet die Temperatur, bei der die Nachvernetzungsgeschwindigkeit maximal ist.

Der exotherme Anstieg oberhalb von 200°C charakterisiert den Beginn der irreversiblen thermisch-chemischen Zersetzung von Hauptvalenzketten des Makromolekülverbandes. Mit Hilfe der Onsettemperatur kann der Beginn des chemischen Abbaues bestimmt werden. Aufgrund der mechanisch-thermischen Untersuchungen von engmaschig vernetzten Duromeren sind die meisten Autoren der Kunststoff-Fachliteratur der Meinung, dass der Anwendungsbereich von EP-Harzen sich bis zur Zersetzungstemperatur erstreckt [179, 209, 210].

Die erhaltenen Ergebnisse aus der DSC-Messkurve von Reaktionsharzsystemen, wie z.B. die Lage der Glasumwandlungstemperatur, des Nachvernetzungspeaks oder die Größe der Nachvernetzungsenthalpie, können bestimmten Einflüssen der eingestellten gerätetechnischen Parameter unterliegen: Probeneinwaage, Heiz- oder Abkühlrate, Temperaturprogramm oder Atmosphäre. Durch die Wahl von dynamischen Aufheizphasen oder einer konstanten Atmosphäre bei den Messungen können diese Einflüsse weitgehend eliminiert werden.

Die Wirkung der Aufheizgeschwindigkeit auf das Niveau der charakteristischen Temperaturen bei Ebalta 120/TL wird im **Bild 6.2** verdeutlicht. Mit steigender Aufheizrate werden die Glasumwandlungs-, Relaxations-, Nachvernetzungs-, Anfangs- und Endtemperaturen der Reaktionswärme zu höheren Temperaturen verschoben. Die Reaktionswärme ist von der Aufheizrate weitgehend unabhängig, vielmehr wird sie von der Masse der Probe beeinflusst, da die bei einer chemischen Reaktion entwickelte Wärme der Masse des eingesetzten Harz-Härter-Systems direkt proportional ist. Deshalb ist es sehr wichtig, die Heizraten und Massen zu den ermittelten Resultaten einer DSC-Messung mit anzugeben. Um einen Kompromiss zwischen Auswertbarkeit der untersuchten charakteristischen Temperaturen und der Dauer einer Messung zu finden, wurden die nachfolgenden DSC-Messungen mit einer Aufheizgeschwindigkeit von 20 K/min durchgeführt.

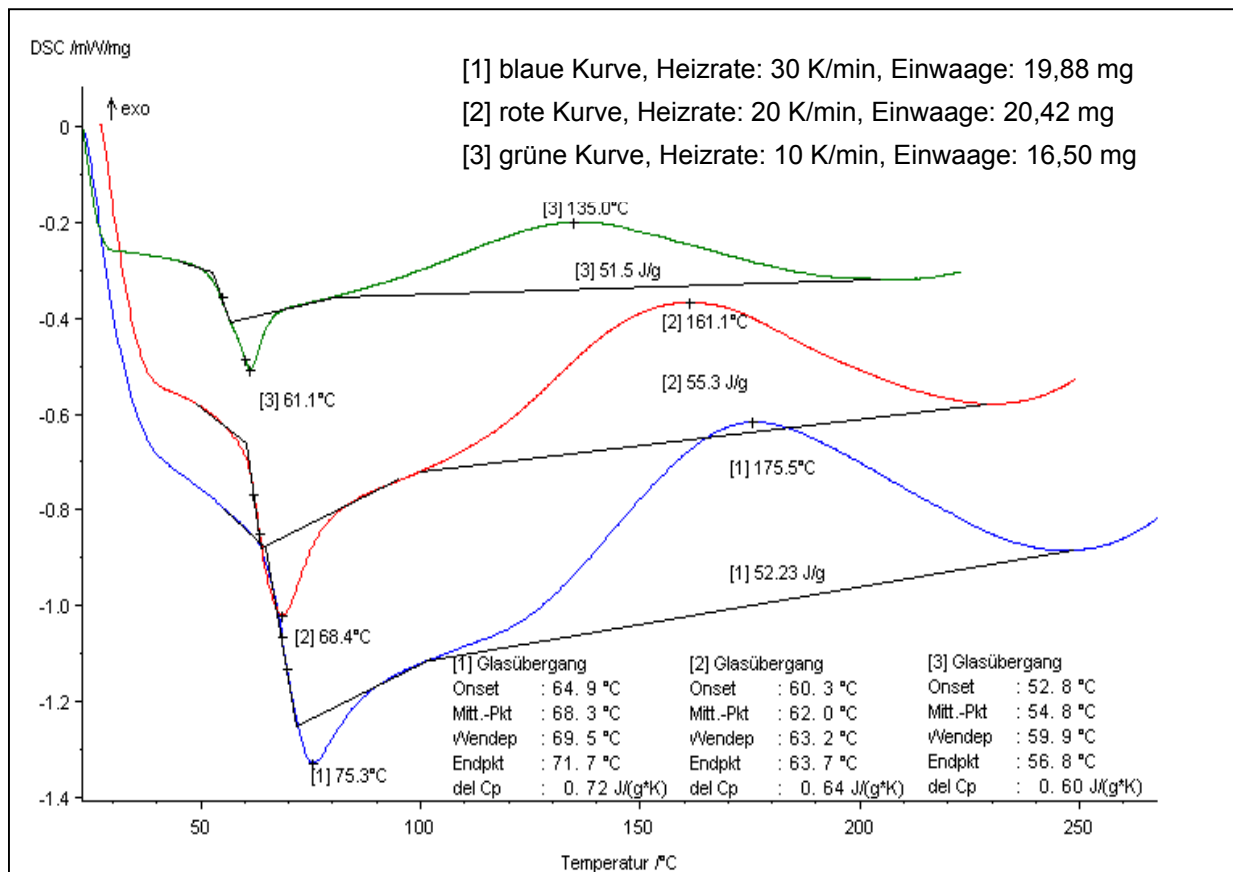


Bild 6.2: Einfluss der Aufheizrate auf die Lage der Glasübergangs- und der Nachvernetzungstemperaturen von Epoxydharz Ebalta120/TL

Es wurde schon erwähnt (**Abschnitt 4.4**), dass die entformten Gießteile einen Tag nach dem Gießen noch nicht vollständig ausreagiert sind und noch einige Zeit durch Lagerung bei Raumtemperatur nachhärten bzw. durch Zufuhr von Wärme (Tempern oder warmhärtende Harzsysteme) die Aushärtung beschleunigt werden kann [211-216]. Mit der DSC-Methode können diese Aussagen bewiesen werden.

Während das warmhärtende Reaktionsharzsystem Polypox E 260/ E 415 (grüne Kurve im **Bild 6.3**) eine Glasübergangstemperatur in der 1. Aufheizung bei 93,3 °C aufweist, konnte dies bei dem kalthärtenden Reaktionsharzsystem Ebalta AH 120/TL (rote Kurve im **Bild 6.3**) noch 4 Tage nach dem Entformen bei 61,6 °C festgestellt werden. Durch Vergleich der thermischen Effekte der kalthärtenden Reaktionsharzsysteme der Proben in **Bild 6.1**, die 6 Monate bei Raumtemperatur lagerten, mit denen der relativ frisch entformten Proben in **Bild 6.3** (rote Kurve) konnte nachgewiesen werden, dass die Lage von T_g bei längeren Aushärtezeiten zu höheren Temperaturwerten verschoben wird und der Reaktionsbeginn der Nachvernetzung sich später einstellt. Der Nachvernetzungsbereich in der 1. Aufheizung der frisch entformten Probe (rote Kurve in **Bild 6.3**) erstreckt sich über einen breiteren Temperaturbereich als bei der gelagerten Probe (grüne Kurve **Bild 6.1**). In der 2. Aufheizung der frisch entformten Probe (blaue Kurve in **Bild 6.3**) steigt das Niveau von T_g auf 106,5 °C. Dieser Wert liegt höher als bei der in der 1. Aufheizung ermittelten T_g der gleichen Probe (rote Kurve in **Bild 6.3**) und auch höher als bei der nach 6 Monaten entformten Probe (grüne Kurve in **Bild 6.3**). In der 2. Aufheizung konnte keine Nachvernetzungsreaktion oder kein Nachvernetzungspik mehr mittels DSC nachgewiesen werden.

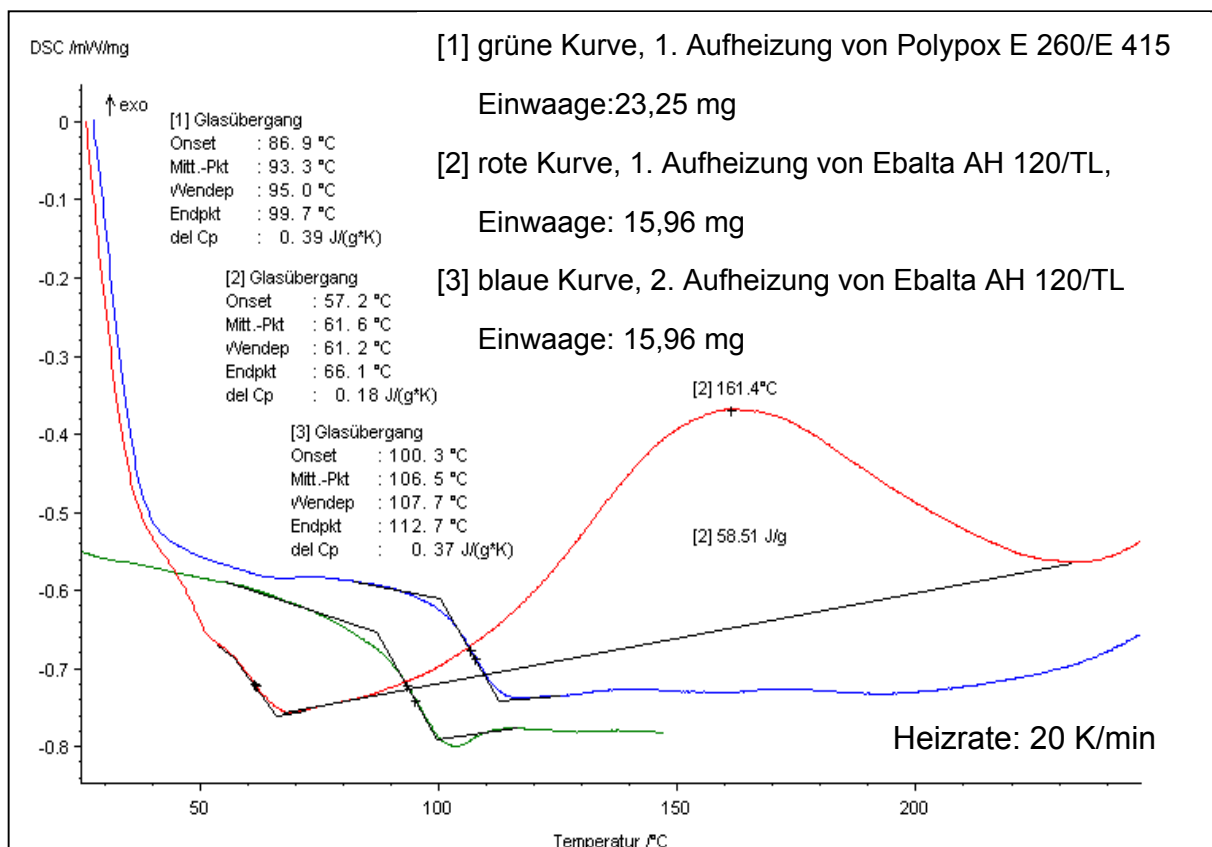


Bild 6.3: DSC-Messverlauf von kalthärtendem Epoxydharz Ebalta AH 120/TL und warmhärtendem Polypox E 260/ E 415

Das vorhandene Kalorimeter arbeitet in einem Regime von -170°C bis 530°C , die interessierenden thermischen Effekte von Glas oder Keramik liegen viel höher. Diesen hohen Temperaturen sind Hohlkugelkomposite nicht ausgesetzt, weil die Matrix „Harz-Härter-Gemisch“ sich thermisch zersetzen würde. Im **Bild 6.4** ist nachgewiesen, dass bei der Probenvariation 14 (grüne Kurve), bestehend aus 22 Vol.-% Harz Ebalta AH 120/TL, 46,8 Vol.-% Fillite und 31,2 Vol.-% Keramikhohlkugeln, die gleichen thermischen Effekte auftreten, wie bei dem reinen Harz-Härter-System Ebalta AH 120 /TL (blaue Kurve). Der Zusatz von Füllstoffen hat nur einen geringfügigen Einfluss auf die Lage der werkstoffspezifischen Kennwerte (Glasumwandlungstemperatur, Reaktionsbeginn oder thermische Zersetzung).

Bis zu 300°C treten bei HKK die gleichen thermischen Effekte auf wie bei der Komponente Harz, so dass im untersuchten Temperaturbereich der DSC-Messverlauf von den thermischen Effekten der Harzkomponenten geprägt wird. Da die Harz-Härter-Anteile im Hohlkugelkomposit nur 22 Vol.-% betragen, ist bei Hohlkugelkomposit die ermittelte Reaktionsenthalpie kleiner als bei einem reinen Harzsystem. Grund dafür ist, dass die Füllstoffe nicht so viel Wärme aufnehmen, im Gegenteil sie entziehen dem System diese Wärmemenge.

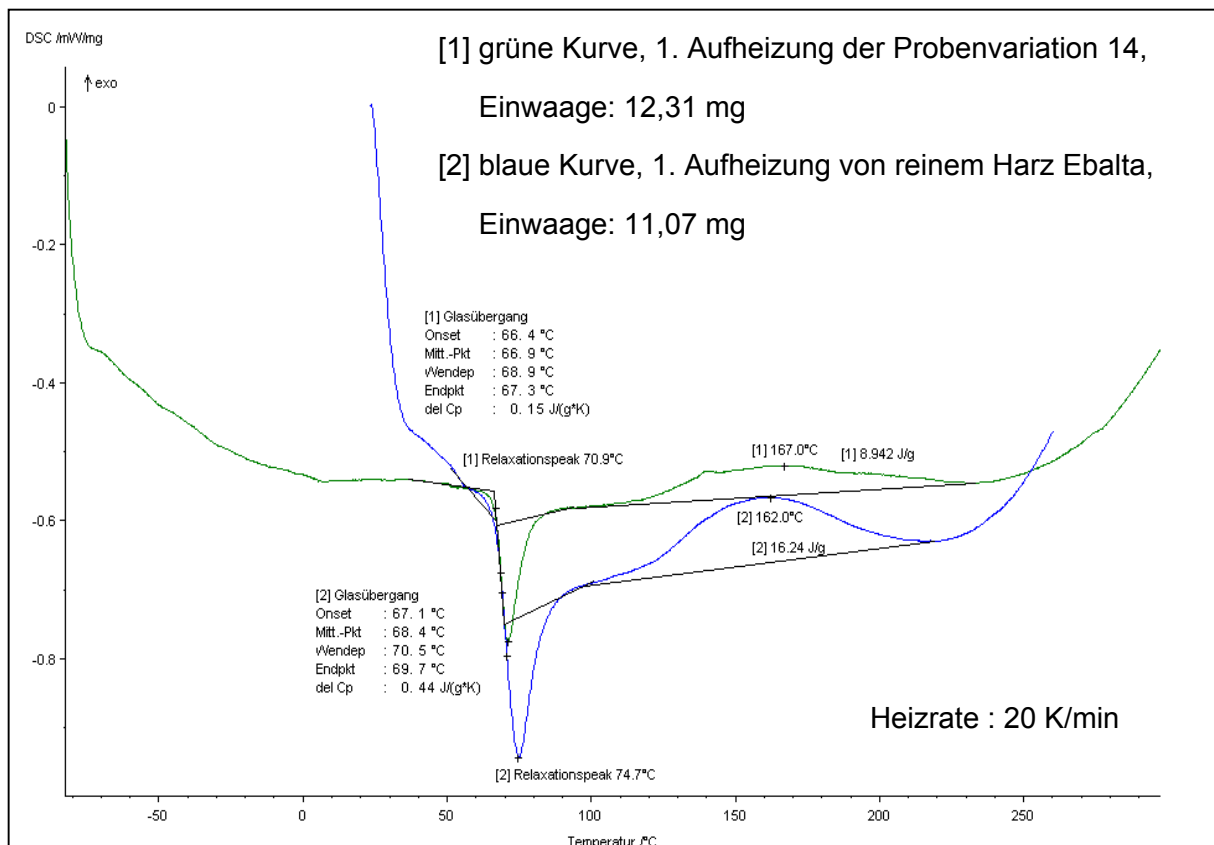


Bild 6.4: DSC-Messverläufe von Probenvariation 14 (grüne Kurve) und von reinem Harz-Härter Ebalta120/TL (blaue Kurve)

6.2 Ermittlung thermischer Eigenschaften

6.2.1 Thermischer Längenausdehnungskoeffizient

Für die Ermittlung der thermischen Längenänderungskoeffizienten von HKK gibt es keine Normen und die einzelnen Ausgangswerkstoffe werden mit unterschiedlichen Aufheizraten gemessen. Kunststoffe werden mit 1 K/min aufgeheizt, während Glas und Keramik mit 5 K/min untersucht werden. Zur Ermittlung der optimalen Parameter wurden Voruntersuchungen durchgeführt (**Bild 6.5**). Hierbei wurden die Längenänderungskurven der Probenvariation 2, die mit einer Heizrate von 1 K/min (rosa Kurve) und 5 K/min (blaue Kurve) beheizt waren, gegenübergestellt. Beide Längenänderungen zeigen zwar reversible thermische Längenänderungen und einen reversiblen Übergang (Glasübergang), jedoch die Glasübergangstemperaturen (T_g) werden mit höheren Heizraten zu höheren Temperaturen hin verschoben. Die geringeren Wärmedehnzahlen der mit höheren Aufheizraten untersuchten Proben sind mit der zeitlich später erfolgten Durchwärmung erklärbar. Im vorigen Abschnitt wurde auch demonstriert, dass das thermische Verhalten von HKK vom thermischen Verhalten der Kunststoffe in dem zu untersuchenden Temperaturbereich geprägt wird, so dass die Aufheizrate von 1 K/min für weitere Untersuchungen des Längenänderungskoeffizienten verwendet wurde.

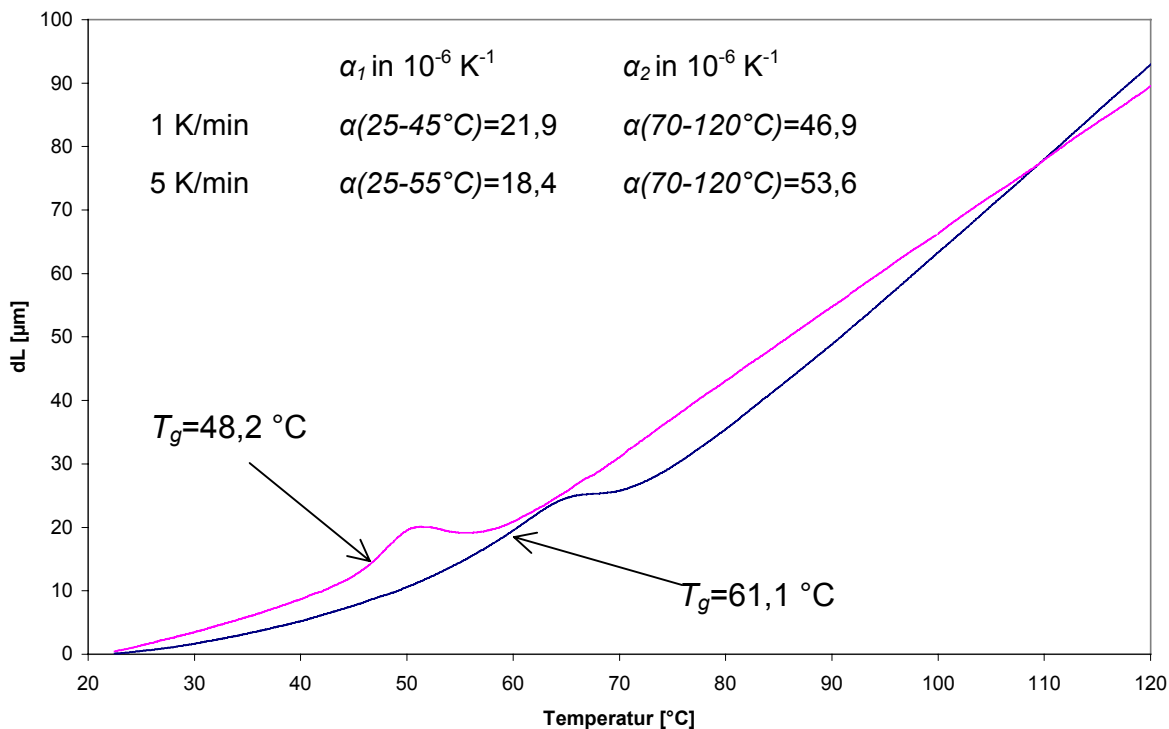


Bild 6.5: Einfluss der Heizraten auf die Lage von T_g und auf die α_1 - und α_2 -Werte von Probenvariation 2 (Vollglas); Heizrate von 1 K/min (rosa Kurve), Heizrate von 5 K/min (blaue Kurve); 1. Aufheizung

Nicht nur die Aufheizgeschwindigkeiten, sondern auch die Lagerungszeiten der Proben nach dem Gießvorgang beeinflussen die Lage von T_g und die Veränderung der α_1 -Werte und der α_2 -Werte (**Bild 6.6**). Wie im **Abschnitt 6.1** mittels DSC-Techniken aufgezeigt, haben die kalthärtenden EP-Harze die Eigenschaft, noch 18-24 Stunden nach dem Gießen bzw. der Aushärtung einen gewissen Anteil von unreaktierten Harz- und Härter-Anteilen zu besitzen, die durch Lagerung bei Raumtemperatur weiter in Reaktion treten. Das **Bild 6.6** visualisiert die Längenänderungskurven von Epoxydharz Ebalta 120/TL, die mit einer Heizrate von 1 K/min und mit verschiedenen Aushärtezeiten nach dem Gießen (11 Tage – rote Kurve, 30 Tage – blaue Kurve) bzw. mit einer höheren Heizrate von 5 K/min und 14 Tage nach dem Gießen (grüne Kurve) aufgenommen wurden.

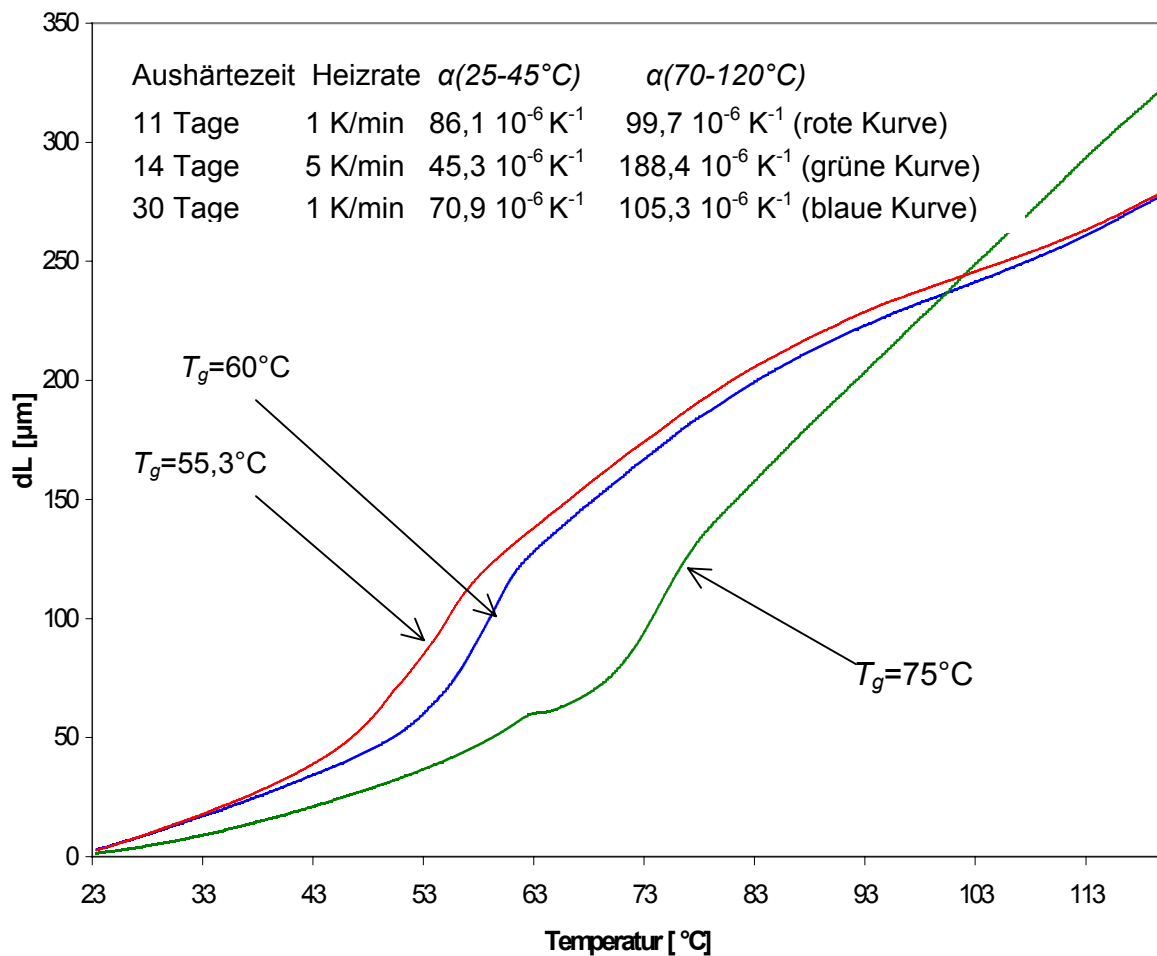


Bild 6.6: Einfluss der Aufheizraten und der Aushärtung auf die Lage von T_g und auf die α_1 - und α_2 -Werte von Epoxydharz Ebalta 120/TL; 1. Aufheizung

Am Vergleich der **Bilder 6.7** und **6.6** ist zu erkennen, dass der aus Epoxydharz und Hohlkugeln zusammengesetzte Werkstoff HKK im Temperaturbereich von 20 bis 120°C dieselben markanten reversiblen Modifikationsänderungen wie der Ausgangswerkstoff Epoxydharz aufweist.

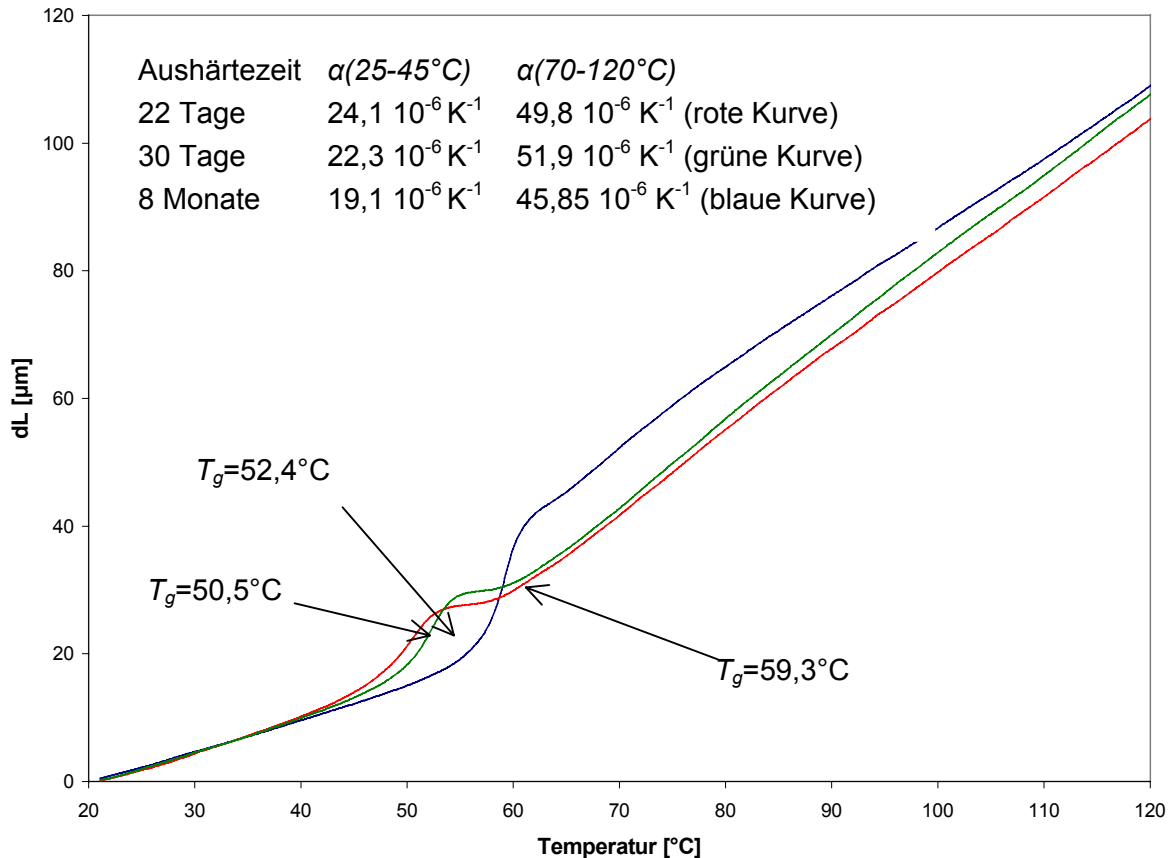


Bild 6.7: Einfluss der Aushärtung auf die Lage von T_g und auf die α_1 - und α_2 -Werte von Probenvariation 14 (Fillite+Korund) in der 1. Aufheizung

Die aus Glas oder Keramik hergestellten Hohlkugeln sind im untersuchten Messbereich thermisch inert, d.h. sie zeigen keine signifikanten reversiblen Modifikationsänderungen oder irreversible Längenänderungen, so dass das thermische Verhalten von HKK im Temperaturbereich von 20 bis 120°C von der Harzkomponente geprägt wird. In dem zu untersuchenden Messbereich weisen beide Ausgangswerkstoffe von HKK reversible thermische Längenänderungen auf, so dass sich das thermische Verhalten von HKK aus den einzelnen thermischen Längenänderungen beider Komponenten zusammensetzt. Da Glas und Keramik wesentlich kleinere Längenänderungen als die Kunststoffe besitzen, ist der α -Wert von HKK auch kleiner (Vergleich α_1 - und α_2 -Werte in den **Bildern 6.6** und **6.7**). Im **Bild 6.7** wurde der Einfluss der Aushärtung auf die Lage von T_g ebenfalls ausgewertet. Obwohl der Prozentanteil von Epoxydharz in der Probenvariation 14 nur 22 % beträgt, wird der Einfluss der Aushärtedauer auf die Lage von T_g und auf die α_1 - und α_2 -Werte erfasst.

Die gestiegenen Harz-Härter-Anteile führen zu höheren Werten der Längenausdehnung, wie im **Bild 6.8** für die Probenvariation 14, 14b und 14c deutlich herausgestellt wird. Dadurch, dass die hier untersuchten Werkstoffe im Maschinenbau eingesetzt werden, wo eine spätere Wärmebehandlung bei großen Bauteilen entfällt, wurden die thermischen Längenänderungskoeffizienten in der 1. Aufheizung ermittelt.

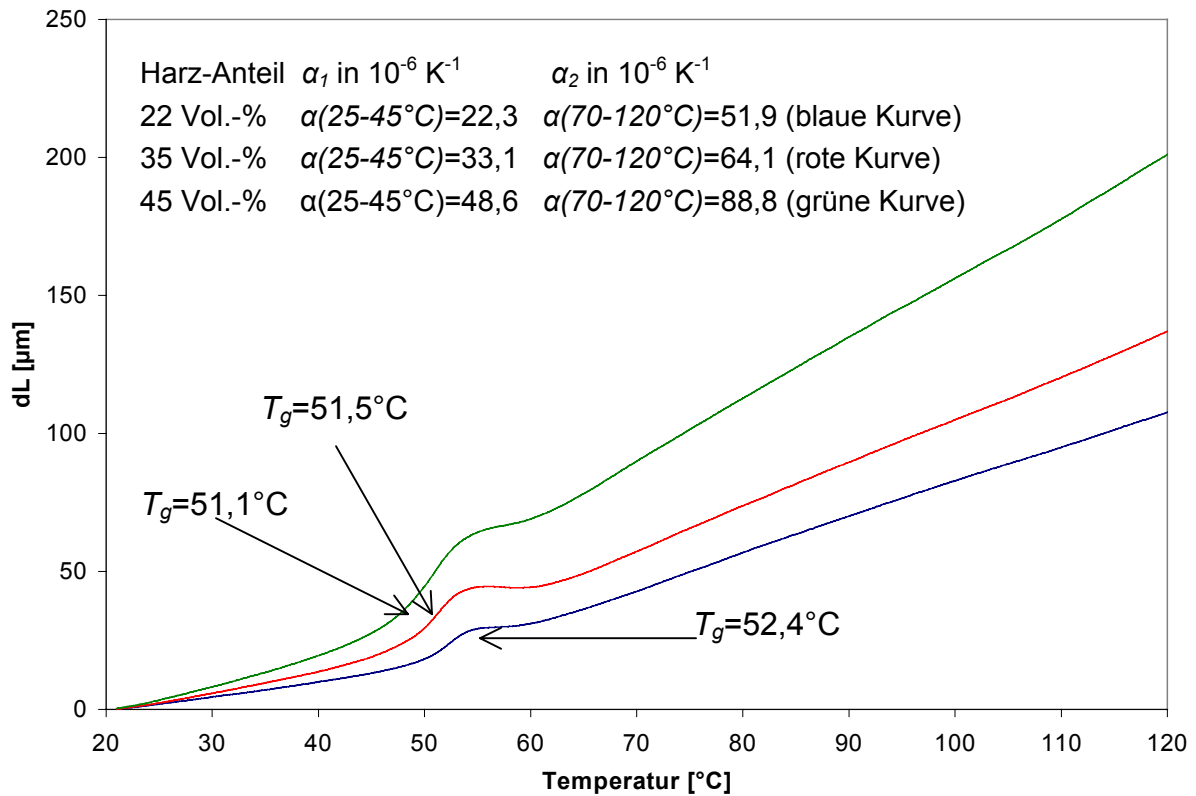


Bild 6.8: Einfluss des Harz-Härter-Anteils auf die Längenänderungskurve, 22 Vol.-% EP-Harz-Anteil (blaue Kurve), 35 Vol.-% EP-Harz-Anteil (rote Kurve) und 45 Vol.-% EP-Harz-Anteil (grüne Kurve)

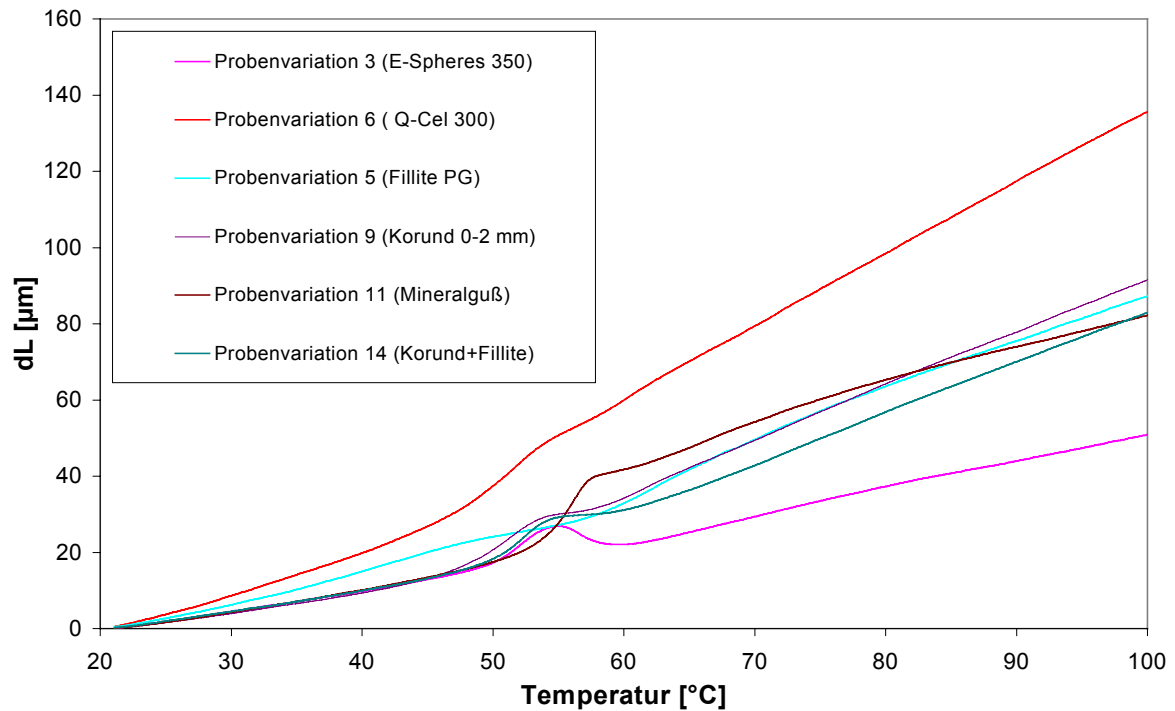


Bild 6.9: Längenänderung verschiedener HKK-Varianten

Bei der Betrachtung der Längenänderungskurven von verschiedenen HKK-Varianten im **Bild 6.9** ist erkennbar, dass mit Ausnahme der Probenvariationen 5 und 6, die sich stärker im betrachteten Bereich ausdehnen, die meisten HKK-Varianten ähnliche Längenänderungen unterhalb des Glasüberganges vorweisen. Die genauen α_1 - und α_2 -Werte der Auswertungen der im **Bild 6.9** dargestellten Längenänderungskurven sind in der **Tabelle 6.1** zusammengefasst. Es stellt sich heraus, dass die α_1 -Werte der Probenvariation 6 (Q-Cel 300) doppelt so groß als die der übrigen HKK-Varianten sind, die das gleiche Vol.-% Verhältnis vom Harzsystem aufweisen. Wenn man die thermischen Eigenschaften von Q-Cel mit den thermischen Eigenschaften von den anderen Kugel-Typen vergleicht (**Tabelle 4.5**), lässt sich feststellen, dass Q-Cel die geringste Schmelztemperatur aufweist. Die thermischen Längenausdehnungskoeffizienten können nach einem einfachen linearen Ansatz

$$\bar{\alpha} = \sum V_i \cdot \alpha_i \quad (13)$$

näherungsweise berechnet werden, wobei V_i Volumenanteile und α_i Wärmeausdehnung der Ausgangskomponenten sind. Anhand dieser Gleichung lassen sich α -Werte der Ausgangskomponenten berechnen, wonach Q-Cel und Fillite die höchsten α -Werte haben. Diese Feststellung lässt eine gewisse Ähnlichkeit mit kristallinen Werkstoffen zu, analog der geltenden Grüneisenseschen Regel, wonach ein Werkstoff mit höherer Schmelztemperatur kleinere Ausdehnungskoeffizienten aufweist.

Tabelle 6.1: Wärmedehnzahlen von einigen HKK-Varianten und Mineralguss

Proben- variation	Bezeichnung	$\alpha(25-45^\circ\text{C})$ 10^{-6} K^{-1}	T_g $^\circ\text{C}$	$\alpha(70-120^\circ\text{C})$ 10^{-6} K^{-1}	Aushärtezeit
3	E Spheres	22,4	52,5	30,8	15 Tage
5	Fillite	34,5	62,6	49,1	21 Tage
6	Q-Cel 300	46,1	51,6	74,8	22 Tage
9	Korund 0-2 mm	23,4	51,3	30,8	19 Tage
11	Mineralguss	23,5	56,2	38,1	19 Tage
14	Korund+Fillite	22,3	52,4	51,9	30 Tage

Welchen Einfluss die Poren auf die Ermittlung der α -Werte nach Gleichung (13) haben, wurde nicht untersucht. Die Wärmedehnung von Korund ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) wurde mit $9,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ definiert [221]. Wendet man dies mit 78 Vol.-% in Gleichung (13) und den Rest für Harz-Härter mit $70 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, erhält man $22,8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, das mit den gemessenen Werten übereinstimmt.

Dadurch, dass die α -Werte von Aluminium $24 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ betragen, können sie mit HKK in einem Bauteil kombiniert werden, um die thermischen Verlagerungen zu minimieren.

6.2.2 Spezifische Wärmekapazität

Für die Ermittlung der kalorischen Kenngrößen wurde das im **Abschnitt 5.1.1** beschriebene DSC-Verfahren benutzt [217]. Das **Bild 6.10** zeigt die Auswertung der spezifischen Wärmekapazitäts-Messung (c_P -Messung) für Probenvariation 14 (Fillite+Korund). Die Darstellung der $c_{P(T)}$ -Funktion erfolgte automatisch nach Aufruf der Dateien mit den c_P -Daten für Saphir, Saphirmessung und Probenmessung und mittels der in Gleichung (13) angegebenen Formel:

$$c_{P,T(\text{Probe})} = \frac{m_{STA}}{m_{Pr}} \cdot \frac{DSC_{Pr}(T) - DSC_{BAS}(T)}{DSC_{STA}(T) - DSC_{BAS}(T)} \cdot c_{P,T}(STA) \quad (14)$$

m_{STA} = Masse der Kalibriersubstanz (Saphir)

m_{Pr} = Masse Probe

$DSC_{Pr}(T)$ = DSC-Signalwert bei Temperatur T aus der Probenkurve (rote Kurve)

$DSC_{Bas}(T)$ = DSC-Signalwert bei Temperatur T aus der Basislinie (blaue Kurve)

$DSC_{Sta}(T)$ = DSC-Signalwert bei Temperatur T aus der Saphirkurve (grüne Kurve)

Die Werte der spezifischen Wärmekapazität $c_{P,T}(STA)$ der Kalibriersubstanzen in Gleichung (13) wurden in Messdateien gespeichert und automatisch bei der Auswertung aufgerufen. Es sind die gleichen thermischen Effekte wie bei den eigentlichen DSC-Messungen erkennbar. Die spezifische Wärmekapazität variiert von 1,13 J/(g·K) bei -10°C bis 2,19 J/(g·K) beim Anstieg der c_P -Kurve auf $72,9^\circ\text{C}$ (lila Kurve).

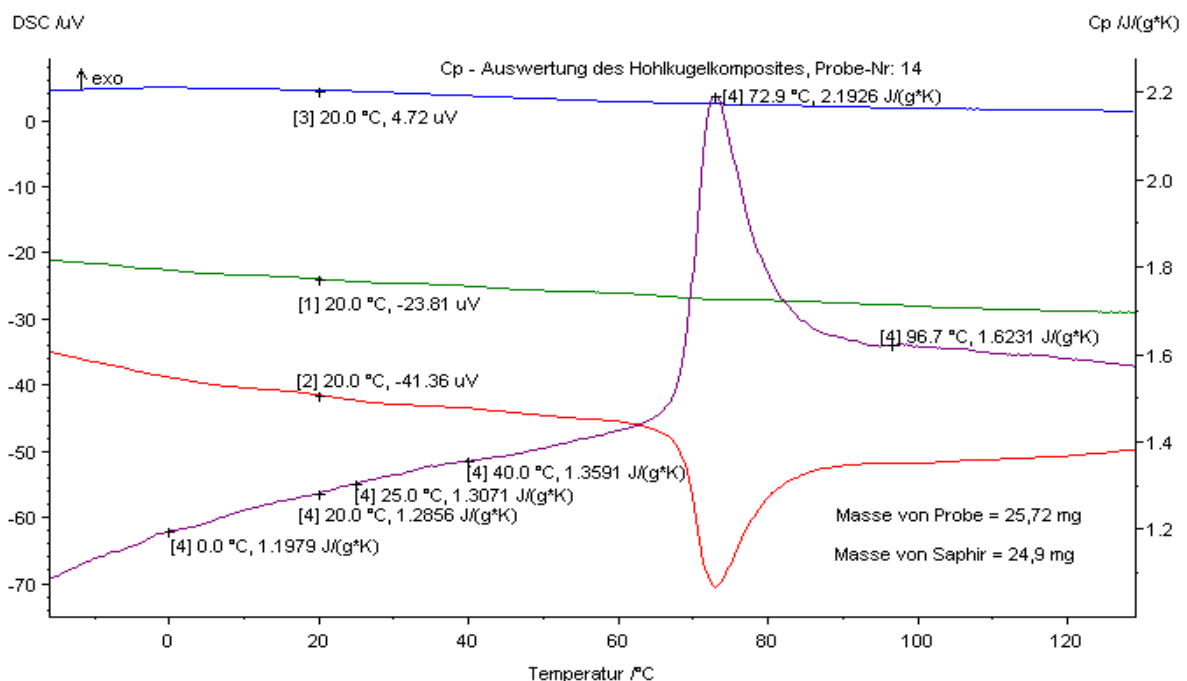


Bild 6.10: Ermittlung der spezifischen Wärmekapazität von Hohlkugelkomposit Probenvariation 14 (60% Fillite+40%Keramik) mittels DSC-200

Für die Ermittlung der spezifischen Wärmekapazität von Harz Ebalta AH 120/TL wurde ein Mittelwert von drei Messungen gebildet. Die c_P -Verläufe der einzelnen Messungen und der c_P -Verlauf des Mittelwertes sind im **Bild 6.11** in Abhängigkeit von der Temperatur dargestellt. Die c_P -Werte im Mittel von $1,55 \text{ J}/(\text{g}\cdot\text{K})$ bei 20°C entsprechen den in der Literatur angegebenen c_P -Werten von $1 \text{ J}/(\text{g}\cdot\text{K})$ bzw. $1,7\text{-}2,0 \text{ J}/(\text{g}\cdot\text{K})$ für Epoxydharze [48, 218].

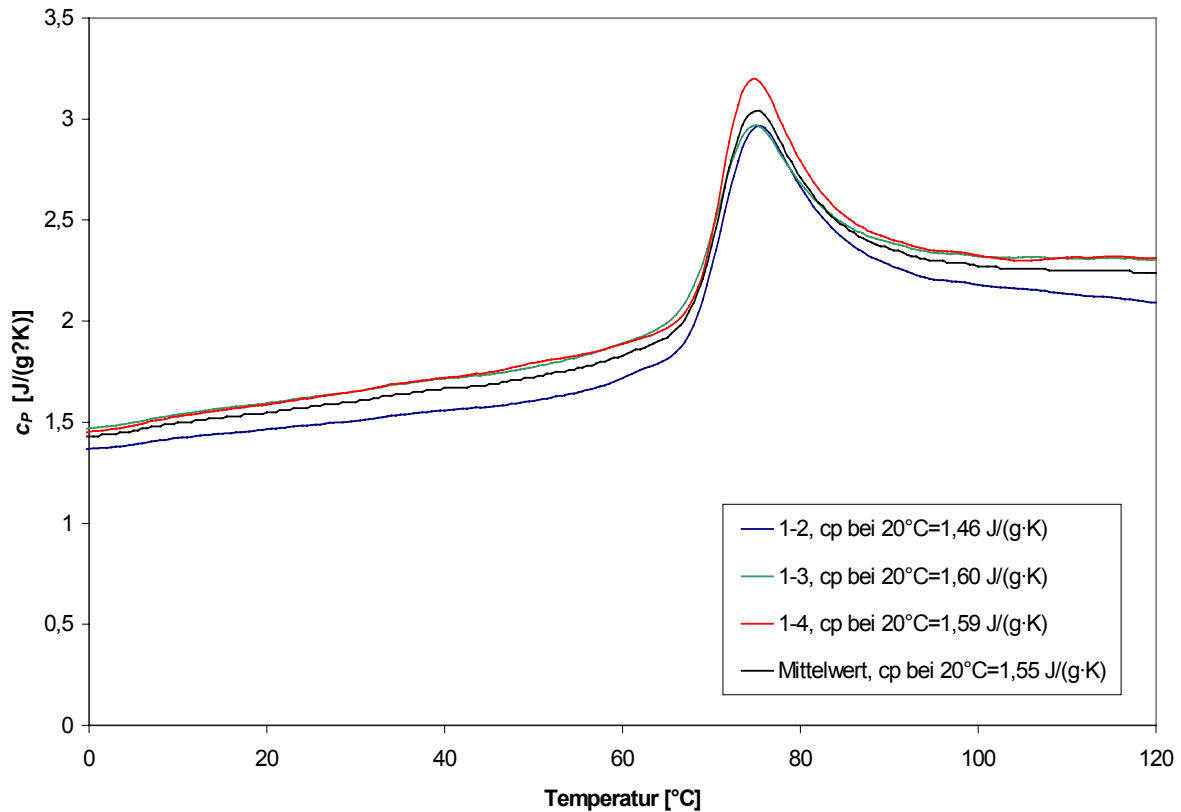


Bild 6.11: Verlauf der $c_{P(T)}$ -Funktion für reines Harz Ebalta AH 120/TL

Bild 6.12 zeigt die gemessenen c_P -Verläufe der Füllstoffe: Vollglaskugeln, E-Spheres 350 und Keramikugeln. Die spezifischen Wärmekapazitäten steigen mit zunehmenden Temperaturen an. Die c_P -Werte bei 0°C und 20°C sind im **Bild 6.12** zusammengefasst. Die ermittelten c_P -Werte der Vollglaskugeln, deren chemische Zusammensetzung mit dem des Kalk-Soda-Glases identisch ist, liegen zwischen $0,9$ und $1,0 \text{ J}/(\text{g}\cdot\text{K})$ im aufgezeigten Temperaturbereich bis 120°C . Laut Literaturangaben [169] liegen die spezifischen Wärmekapazitäten der meisten Gläser bei einer Raumtemperatur von 20°C zwischen $0,8$ und $1 \text{ J}/(\text{g}\cdot\text{K})$ und steigen mit der Temperatur allmählich bis auf $1,3$ oder $1,5 \text{ J}/(\text{g}\cdot\text{K})$ an. Die c_P -Werte der keramischen Hohlkugeln und der Hohlkugeln E-Spheres variieren von $0,94$ bis $1,15 \text{ J}/(\text{g}\cdot\text{K})$ im untersuchten Temperaturintervall zwischen -10°C bis 120°C . Sie entsprechen ebenfalls den Literaturangaben von $0,65$ bis $1,2 \text{ J}/(\text{g}\cdot\text{K})$ und bei Raumtemperatur für etwa im Mittel von $0,9 \text{ J}/(\text{g}\cdot\text{K})$ [169].

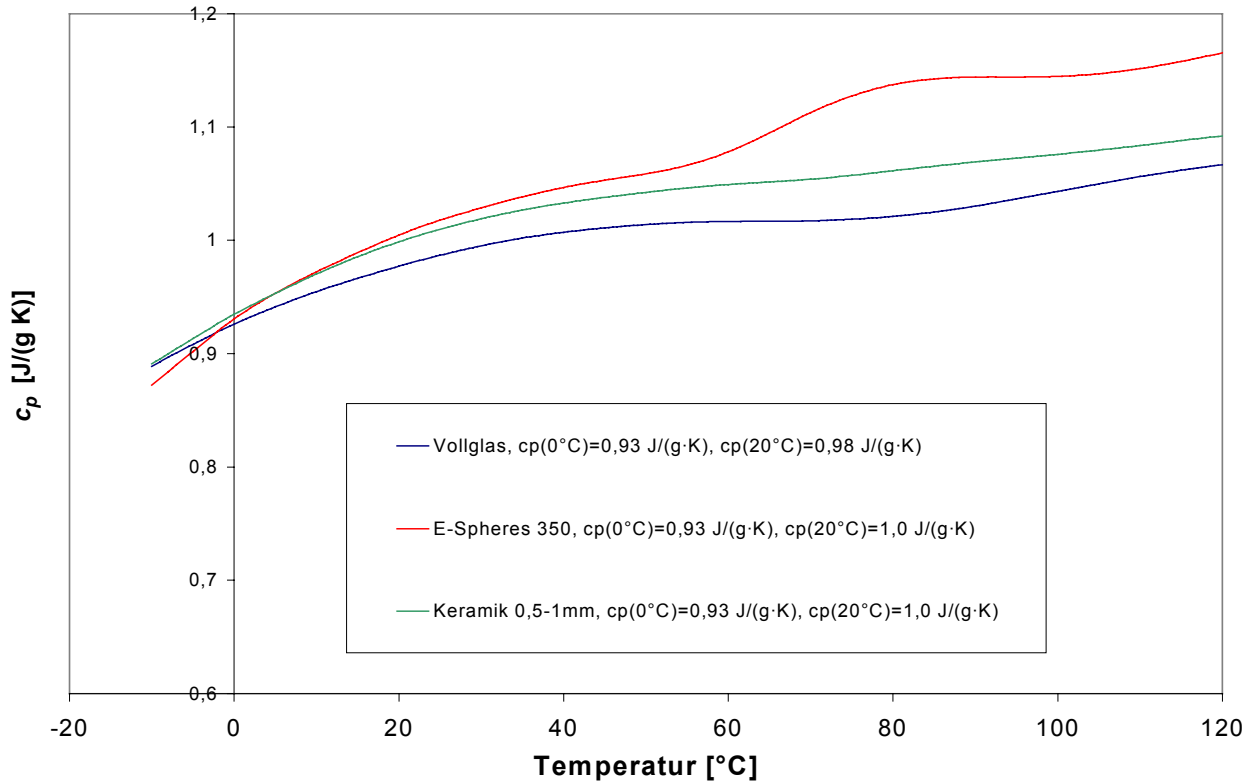


Bild 6.12: Spezifische Wärmekapazitätsverläufe von Hohlkugeln: Vollglas (dunkel blaue Kurve), E-Spheres 350 (rote Kurve) und Keramik (grüne Kurve)

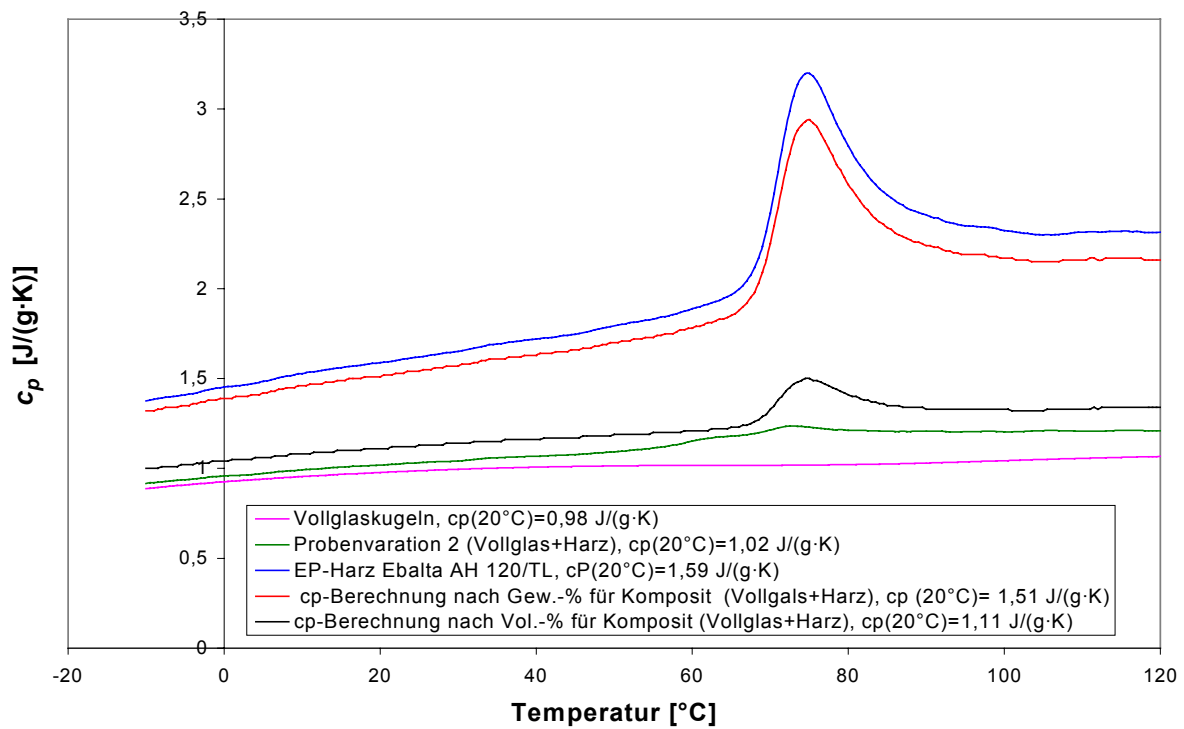


Bild 6.13: c_p -Verläufe von Vollglaskugeln (pinke Kurve), Vollglas+Harz (grüne Kurve), reinem EP-Harz Ebalta AH 120/TL (blaue Kurve), Probenvariation 2 mittels Berechnung nach Gew.-% (rote Kurve) und nach Vol.-% (schwarze Kurve)

Das **Bild 6.13** zeigt die c_p -Verläufe von Vollglaskugeln (blaue Kurve), reinem EP-Harz Ebalta 120/TL (gelbe Kurve) und Kugelkompositwerkstoff, bestehend aus 22 Vol.-% EP-Harz und 78% Vol.-% Vollglaskugeln. Für gefüllte Systeme aus Polymeren mit anorganischen, pulverförmigen Füllstoffen zur Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität hat sich bis 65 Gewichtsanteilen folgende Mischungsregel bewährt:

$$c_{p(T)} = (1 - \psi) \cdot c_{pH}(T) + \psi \cdot c_{pF}(T) \quad (15),$$

wobei ψ Gewichtsanteil des Füllstoffes, c_{pH} spezifische Wärmekapazität des Harzes und c_{pF} spezifische Wärmekapazität des Füllstoffes bedeuten [210, 237]. Werden in der Gleichung (13) statt Gewichtsanteile die entsprechenden Volumenanteile eingesetzt, erhält man eine gute Übereinstimmung mit den experimentell ermittelten c_p -Werten, wie für Probenvariationen 2, 3 und 7 in den **Bildern 6.13 bis 6.15** dargestellt.

Im **Bild 6.16** sind die $c_{p(T)}$ -Funktionen für verschiedene mit keramischen Makrohohlkugeln gefüllten Hohlkugelkomposit-Varianten im Vergleich zu den Ausgangskomponenten Harz-Härter-Systeme und Hohlkugeln aufgetragen. Die spezifischen Wärmekapazitätsverläufe und -werte liegen zwischen den Werten der Ausgangswerkstoffe $c_p(20^\circ\text{C})=1,55 \text{ J}/(\text{g K})$ für Harz-Härter Ebalta 120/TL und $c_p(20^\circ\text{C})=1,0 \text{ J}/(\text{g K})$ für Hohlkugelkorund (**Bilder 6.11** und **6.12**). Die mit keramischen Hohlkugeln der Korngröße 0 bis 2 mm mit und ohne Silan gefüllten HKK weisen unterhalb und oberhalb des Glasübergangsbereiches sehr ähnliche Werte auf und liegen in der Nähe der c_p -Werte vom Ausgangsfüllstoff. Eine Erklärung kann in der Reduzierung des Harzanteils wegen der größeren Packungsdichte, der aus verschiedenen Fraktionen zusammengesetzten Hohlkugeln des Komposites gesehen werden. Analog können die kleineren c_p -Werte, der aus kleinerem Hohlkugelkorund von 0-0,5 mm bestehenden Probenvariation 7 im Vergleich zu der Probenvariation 8, die aus größeren Körnern zusammengesetzt sind, zurückgeführt werden.

Der Einfluss des höheren Gehaltes vom Harz-Härter-System Ebalta auf die c_p -Werte wird im **Bild 6.17** verdeutlicht. Die zwei aus DSC-Messungen ermittelten c_p -Verläufe von HKK, bestehend aus 22 Vol.-% Epoxydharz und den Rest aus Hohlkugeln (60 Vol.-% Filliten+40 Vol.-% Keramik), sind nahezu identisch. Die Probenvariation 14-b mit einem größeren Gehalt von EP-Harz zeigt höhere c_p -Werte (schwarze Kurve) als die Probenvariation 14. Der Einfluss des Aushärtegrades auf die c_p -Werte wurde nicht direkt untersucht, jedoch ist aus der Fachliteratur bekannt, dass mit höherem Aushärtegrad die c_p -Werte kleiner werden [183]. Die c_p -Werte von Hohlkugelkompositen mit einem Harzanteil von 22 Vol.-% liegen zwischen 1,02 bis 1,28 J/(g·K).

Es ist deutlich zu erkennen, dass die EP-Harze höhere c_p -Werte als die Hohlkugeln aufweisen und dass die c_p -Werte von HKK zwischen den c_p -Werten der beiden Ausgangswerkstoffe Hohlkugeln und EP-Harz liegen. Die c_p -Werte von Kunststoffen wie auch von Dämmstoffen betragen 0,8 bis 2,7 J/(g·K) und somit sind sie höher als die von Metallen, deren c_p -Werte zwischen 0,13 bis 0,89 J/(g·K) variieren.

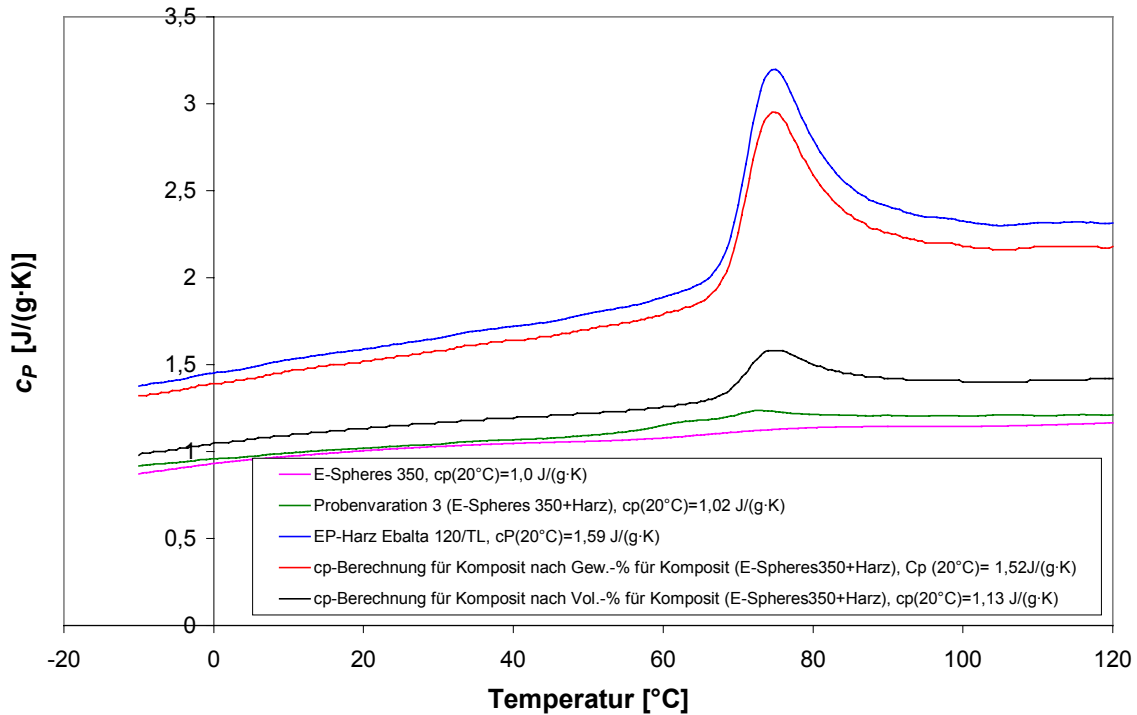


Bild 6.14: c_p -Verläufe von E-Spheres (pinke Kurve), Probenvariation 3 (grüne Kurve), reinem EP-Harz Ebalta AH 120/TL (blaue Kurve), Probenvariation 3 mittels Berechnung nach Gew.-% (rote Kurve) und nach Vol.-% (schwarze Kurve)

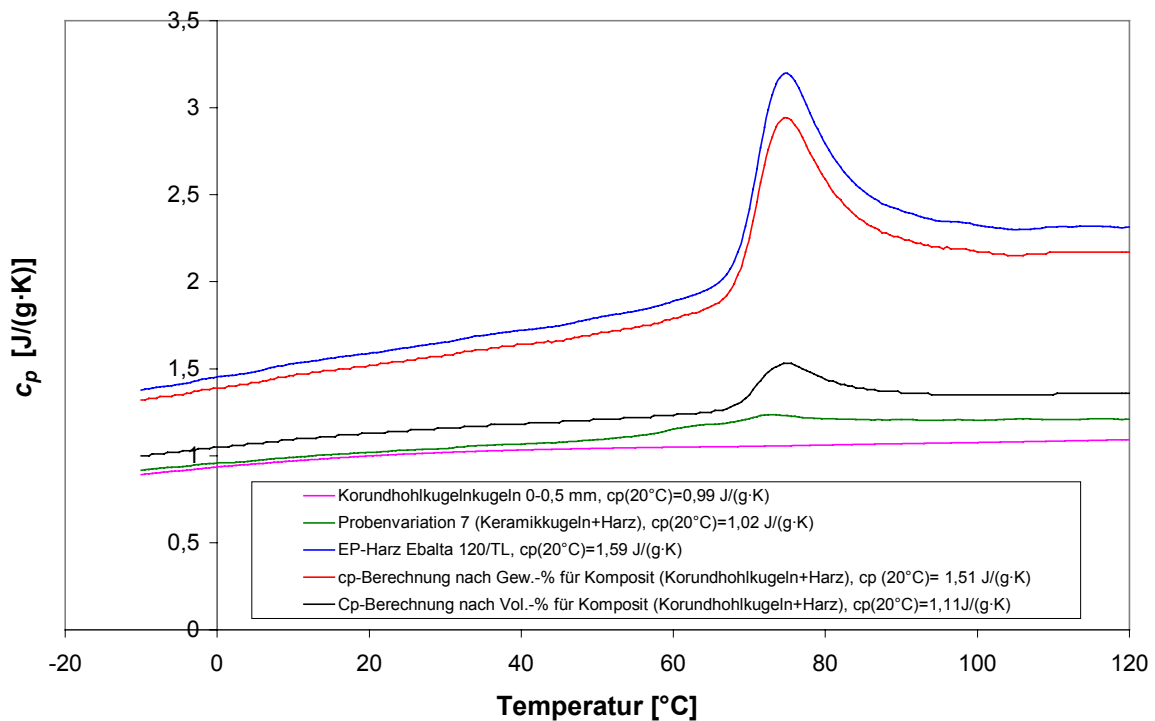


Bild 6.15: c_p -Verläufe von Keramikhohlkugeln 0-0,5 mm (pinke Kurve), Keramikhohlkugeln 0-0,5 mm+EP-Harz (grüne Kurve), reinem EP-Harz AH Ebalta 120/TL (blaue Kurve), Probenvariation 7 mittels Berechnung nach Gew.-% (rote Kurve) und nach Vol.-% (schwarze Kurve)

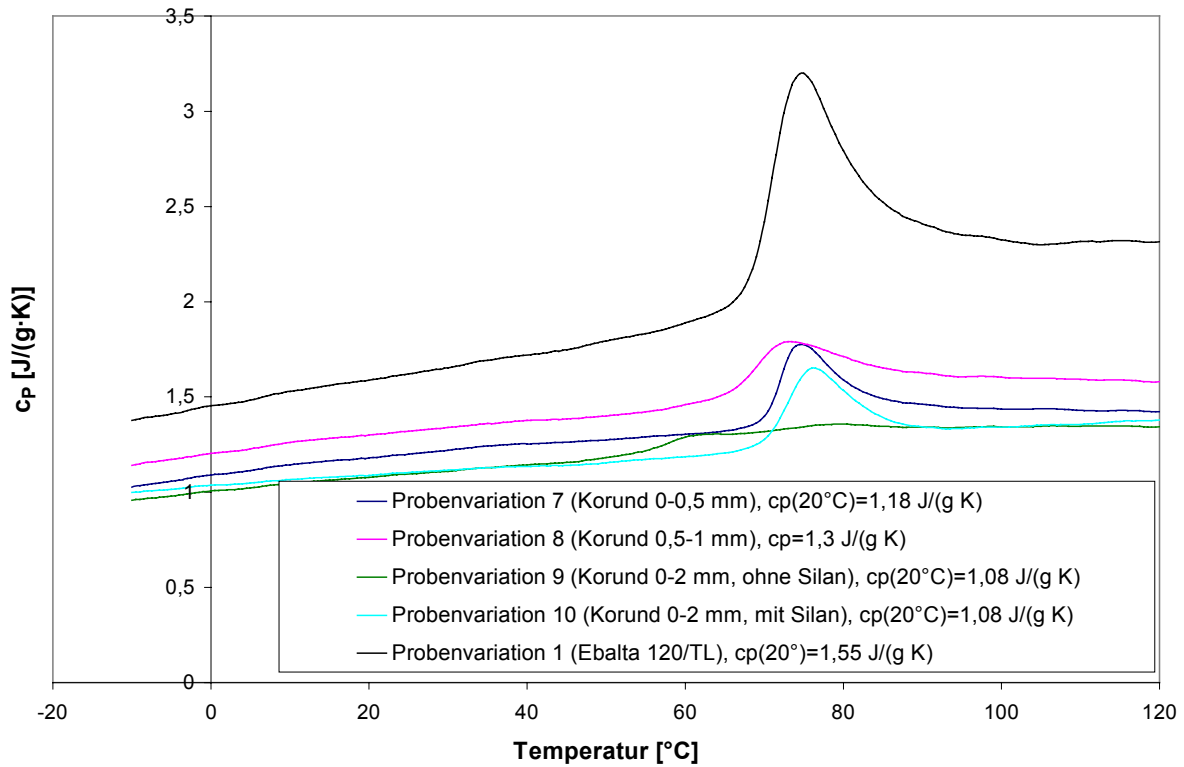


Bild 6.16: Darstellung der c_p -Verläufe von HCC mit verschiedenen keramischen Füllstoffen

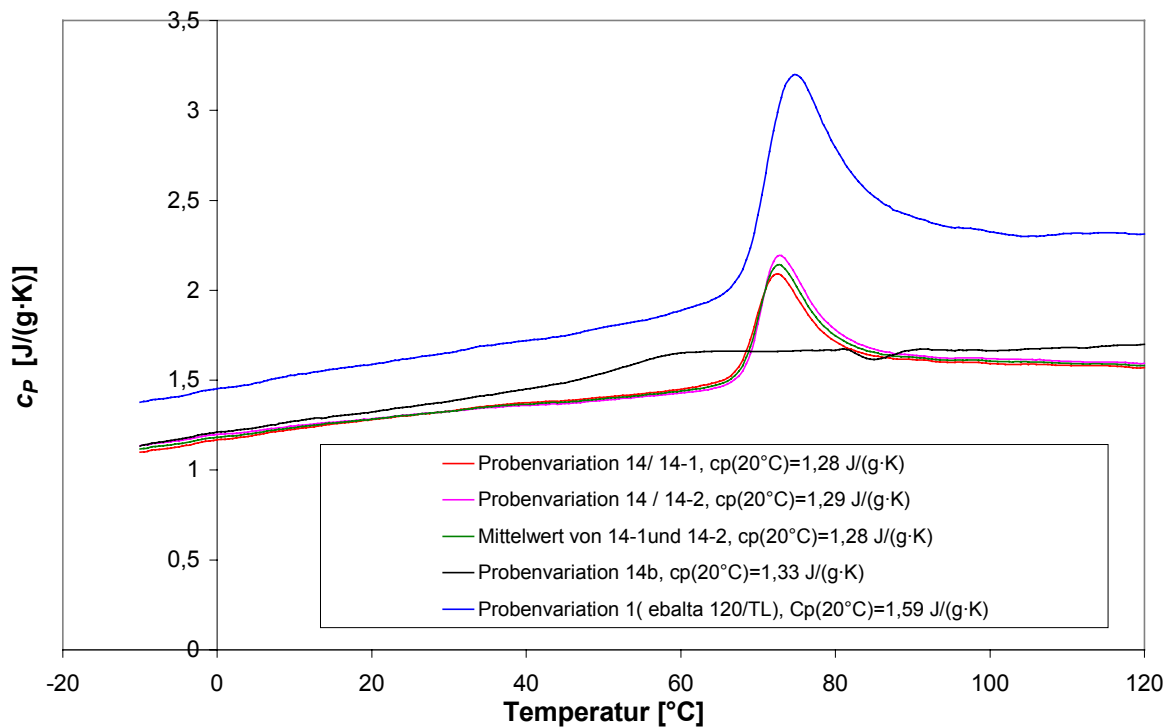


Bild 6.17: Darstellung der c_p -Verläufe von Probenvariationen 14 und 14b im Vergleich zu Epoxydharz

6.2.3 Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit ist je nach Zusammensetzung und Bindungsart des Festkörpers unterschiedlich. Aufgrund der eingeschlossenen Gasvolumina besitzen die Hohlkugeln kleinere Wärmeleitfähigkeiten als die massiven Kugeln oder die Feststoffe, aus denen sie hergestellt sind. Somit ist mit kleineren Wärmeleitfähigkeitswerten bei HKK gegenüber anderen Feststoffen oder Harz-Härter-Systemen zu rechnen. Die Ermittlung der λ -Werte ist wichtig zur Bestimmung des Einsatzfeldes von HKK.

Von den angefertigten Platten wurden die Wärmeleitfähigkeitsmessungen jeweils bei drei verschiedenen Temperaturen durchgeführt. Bei der ersten Messung wurde davon ausgegangen, dass die Wärmeleitfähigkeit des Werkstoffes nur $0,035 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ beträgt. Deshalb konnten die in den Normen [198] geforderten Mindestabweichungen zwischen den mittleren Temperaturen der Kalt- und Warmseite der Proben von $8 \text{ }^\circ\text{C}$ nicht eingehalten werden. Die erste Prüfung war hilfreich, um erste Orientierungswerte für die Wärmeleitfähigkeit zu bekommen. Die Wärmeleitfähigkeit der Probe bei 10°C betrug $0,31 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Mit diesem Wärmeleitfähigkeitswert konnte dann eine bessere Regelung der Temperaturdifferenzen zwischen den Warm- und Kaltseiten der Proben erreicht werden. Der ermittelte λ -Wert in der zweiten Messung lag bei $0,34 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Die Wärmeleitfähigkeit bei 10°C in der dritten Messung wurde mit $0,32 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ermittelt. Bei der zweiten und dritten Messung wurde mit einem korrekten Wärmeleitfähigkeitswert die Messapparatur eingestellt. Die Verläufe der Wärmeleitfähigkeitswerte in Abhängigkeit von der Probenmitteltemperatur und die ermittelten Werte sind im **Bild 6.18** dargestellt. Bei beiden Messungen ist eine Zunahme der λ -Werte mit der Temperatur zu beobachten, die auf die größere Beweglichkeit der Moleküle infolge zugeführter Energie zurückzuführen ist.

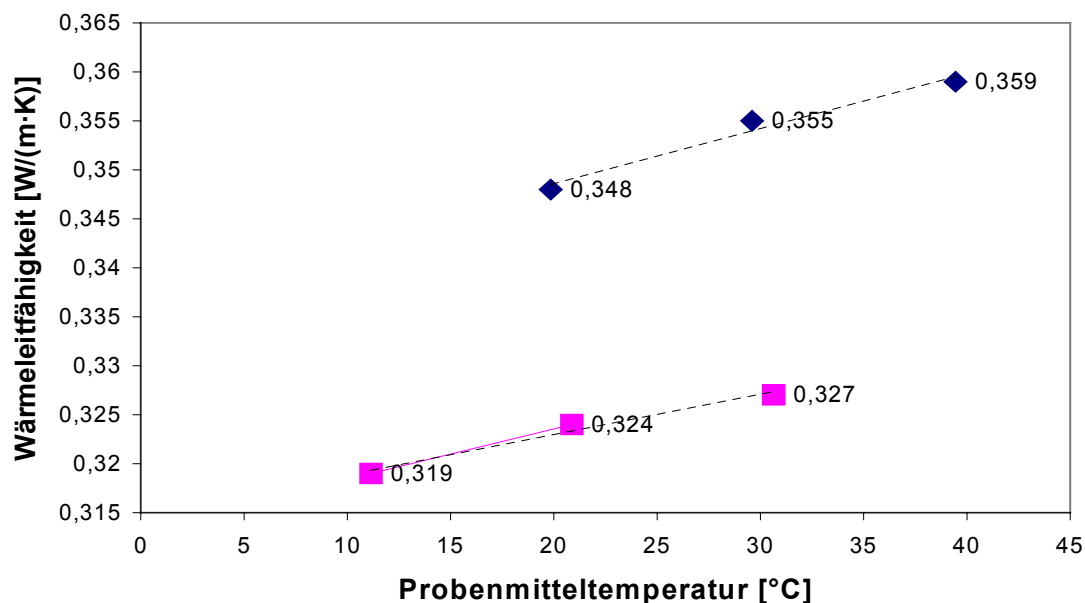


Bild 6.18: Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit von der Probenmitteltemperatur bei der Probenvariation 14

Aufgrund der ermittelten Wärmeleitfähigkeitswerte können die HKK in der Gruppe von thermischen Isolatoren eingruppiert werden. Selbst Mineralguss, dessen λ -Werte zwischen 1,3-3 laut Literaturangaben variieren, wird immer noch als Wärmeisolator bezeichnet. Im Gegensatz dazu leitet Stahl mit einem Wärmeleitfähigkeitswert von 45 W/(m·K) wesentlich schneller die Wärme. Die Wärmeleitfähigkeitswerte von einigen zellularen Werkstoffen sind im **Abschnitt 2.4.2** für die jeweiligen Metallschäume angegeben. Sie variieren in Abhängigkeit von der Dichte und dem Herstellungsprozess.

6.3 Ermittlung mechanischer Eigenschaften

Die im Folgenden dargestellten Festigkeits- und Elastizitätsmodulwerte sind Mittelwerte aus Messungen an 3-15 Proben. Die Standardabweichungen betragen 2-7 % des Mittelwertes. Kleinere Festigkeitswerte konnten bei den Proben mit kleineren Dichtewerten innerhalb einer Probenvariation beobachtet werden, da hier auch Poren in der Harz-Härter-Masse auftreten. Deshalb soll die Dichte bei den Proben als technologisches Qualitätsmerkmal ermittelt werden.

6.3.1 Physikalisch-mechanische Eigenschaften

6.3.1.1 Dichte

Die Dichtewerte der HKK-Probenvariationen im Vergleich zu den Harz-Härter-Systemen, Mineralguss und den mit massiven Kugeln gefüllten Duroplasten sind im **Bild 6.19** dargestellt.

Die mit Hohlkugeln gefüllten HKK-Variationen weisen kleinere Dichtewerte auf als die mit massiven Kugeln gefüllten Probenvariationen 2 oder Mineralguss. Die mit organischen Hohlkugeln (Dualite) und mit porösen Kugeln (Poraver) angereicherten HKK-Varianten führten zu einer Reduzierung der Dichtewerte unterhalb von 0,5 g/cm³. Die mit Silikat-Keramik-Mikrohohlkugeln (Fillite und E-Spheres) gefüllten Harz-Systeme wiesen alle höhere Schüttgewichtswerte im Vergleich zu den mit plastischen oder borosilikatischen Hohlkugeln gefüllten Systemen auf. Die Gründe liegen in den größeren Schüttgewichtswerten der Ausgangswerkstoffe (**Tabelle 4.5**).

Die Probenvariationen 4, 7, 8, 9 und 10, die Hohlkugelkorund als Füllstoff hatten, weisen die größten Dichtewerte von HKK-Varianten auf. Je größere Schüttdichten die Korund-Kugeltypen hatten, desto größere Dichtewerte wurden bei den keramischen HKK-Variationen erzielt (Vergleich **Tabelle 4.8** und Ergebnisse **Bild 6.19**). Die aus verschiedenartigen Hohlkugeln zusammengesetzten Probenvariationen 14, 14b und 14c weisen abweichende Dichtewerte gegenüber den Probenvariationen 5 und 8 (Fillite oder Korund 0,5-1 mm) auf. Der Grund dafür liegt in der vorteilhafteren Besetzung der Zwischenräume mit Mikrohohlkugeln kleinerer Dichten.

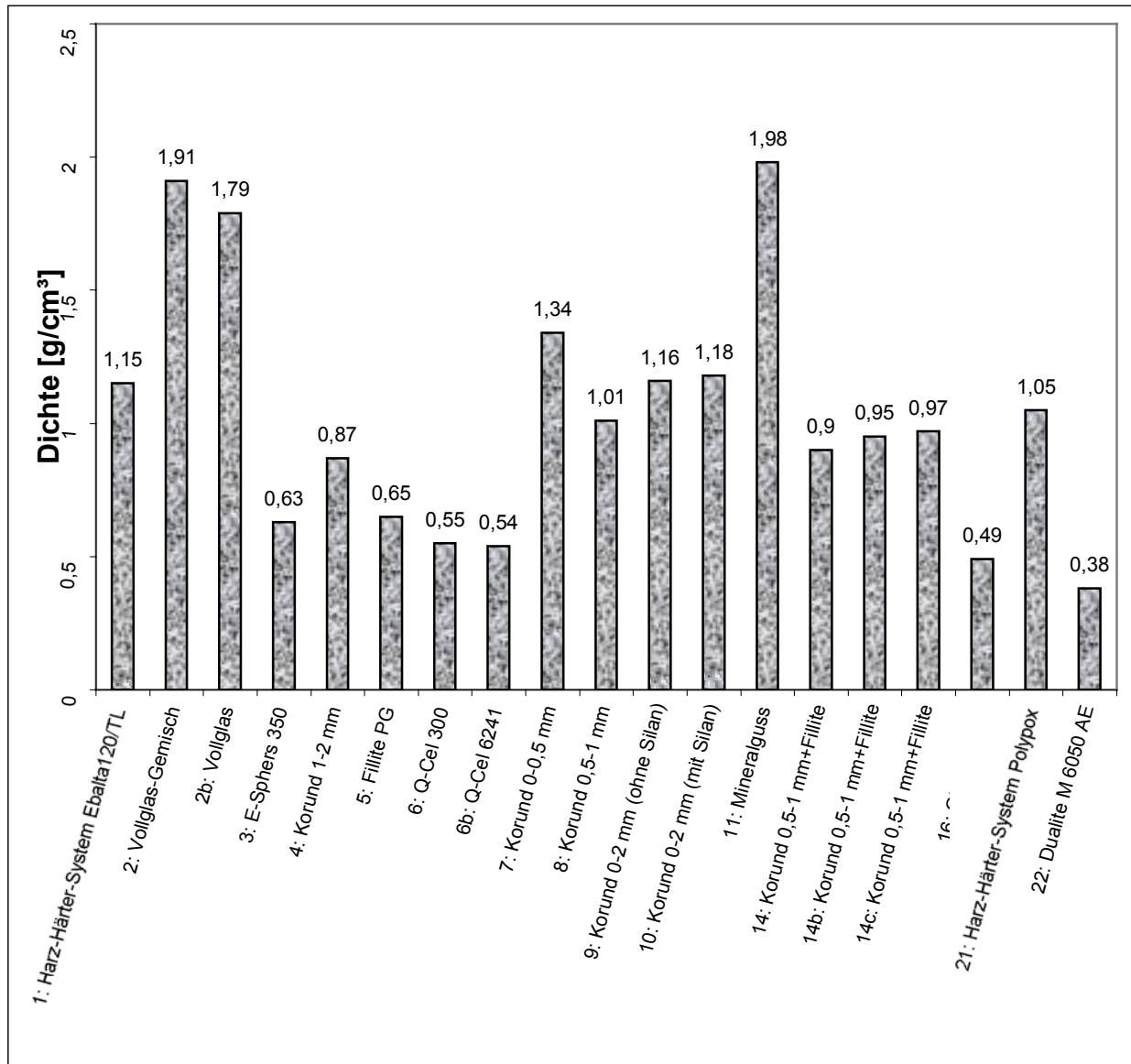


Bild 6.19: Dichtewerte von HKK-Variationen

Die erzielbare Dichte anderer zellulärer Werkstoffe wurde im **Abschnitt 2.4.2** in den **Tabellen 2.2-2.4** angegeben. Als leichteste Werkstoffe bewiesen sich die Metallschäume Cymat, Alporas, ERG und Inco. Die Dichte in diesen Fällen ist auch ein technologisch-qualitatives Merkmal, da die mechanischen Eigenschaften der in einem Herstellungsprozess gefertigten Werkstoffe in Abhängigkeit von der Dichte variieren.

Ein Kriterium zur Auswahl eines Leichtbauwerkstoffes für Maschinen-Strukturen ist u.a. eine niedrige Dichte. Für die statischen Bauteildimensionierungen spielen ebenfalls die mechanischen Kennwerte eine große Rolle. Die Werkstoffe müssen kleinere Dichtewerte und gute Elastizitätsmodul- oder Festigkeitswerte aufweisen, um den geforderten Belastungsanforderungen gerecht zu werden. Um das Leichtbaupotenzial der HKK-Werkstoffe zu ermitteln, werden in den nächsten Abschnitten die ermittelten Ergebnisse auch auf die Dichte bezogen diskutiert.

6.3.2 Statisch-mechanische Eigenschaften

6.3.2.1 Spannungs-Dehnungs-Verhalten bei Zugbeanspruchung

Das Spannungs-Dehnungs-Diagramm im **Bild 6.20** zeigt alle Probenvariationen, die oberhalb einer Belastung von 8,5 MPa gebrochen sind. Die farbigen Symbole (Quadrate, Kreise etc.) kennzeichnen die Durchschnittswerte der Probenserien von mindestens 5 Proben. Die dazugehörige Linie der gleichen Farbe zeigt die Probe auf, die dem Durchschnitt am nächsten kommt.

Die höchsten Zugfestigkeitswerte wies Mineralguss mit 17,8 MPa auf, jedoch sein Dehnungsverhalten war schlechter als bei allen anderen Hohlkugelkompositarten und den entsprechenden Harz-Härter-Systemen. Der ermittelte Zugfestigkeitwert von Mineralguss entspricht den in der Literatur angegebenen Werten (**Tabelle 2.1**) [32-39].

Die zwei unterschiedlich aushärtenden Harz-Härter-Systeme - kalthärtend (Ebalta AH 120/TL) und warmhärtend (UPPC Polypox E 260/ H 415) - sind in ihrem linearen Verlauf approximativ identisch. Der Durchschnittswert der Zugfestigkeit liegt bei dem warmhärtenden Harz-Härter-System (UPPC Polypox E 260/ H 415) mit 12,6 MPa etwas höher als der bei dem kaltaushärtenden Harz-Härter-System (Ebalta AH 120/TL), der nur 10,8 MPa beträgt. Die ermittelten Zugfestigkeitswerte entsprechen den in der Literatur angegebenen Werten für Epoxydharze [201].

Die Dehnungswerte der Harz-Härter-Systeme, die mit 0,27% für Ebalta AH 120/TL und mit 0,32% für UPPC ermittelt wurden, sind größer als bei den Verbundwerkstoffen der gleichen Harz-Härter-Systeme als Ausgangsmaterialien. Dies führt zu der Schlussfolgerung, dass der Zusatz von Füllstoffen zu EP-Harzen die Dehnbarkeit verschlechtert. Ein wesentlicher Unterschied zwischen den beiden EP-Harzen ergab sich während der Herstellung von HKK-Werkstoffen. Obwohl bei dem kaltaushärtenden System die Aushärtedauer länger als bei dem warmhärtenden Harzsystem war, erwies sich die Maßhaltigkeit von den z.B. mit Fillite gefüllten warmhärtenden Harzsystemen als unzureichend aufgrund der großen irreversiblen Volumenänderungen während der Aushärtung, so dass daraufhin die Probekörper aller Probenvariationen mit den kalthärtenden Harz-Härter-Systemen (Ebalta120/TL) angefertigt wurden.

Von den HKK-Variationen zeigten die besten Ergebnisse die Probenvariation 14, deren Füllstoffanteil aus 60 % Fillite- und 40% Keramikhohlkugeln der Korngröße 0,5-1 mm bestand. Die gestiegenen Zugfestigkeitswerte der Probenvariation 14 im Vergleich zu den anderen Probenvariationen, wo nur eine Korngröße verwendet wurde, können damit erklärt werden, dass mit den unterschiedlich großen Kugeln eine dichtere Packung erzielt wurde und so das gleiche Raumvolumen besser mit Füllstoffen ausgefüllt ist (**Bild 4.20**). Mit den Kugelsorten Fillite, deren Durchschnittsgröße 120 µm beträgt, und Keramik, deren Korngröße zwischen 0,5 und 1 mm liegt, kann separat nur bis zu einem bestimmten Prozentanteil ein bestimmtes Raumvolumen ausgefüllt werden, der Rest sollte mit EP-Harz-Anteilen besetzt sein.

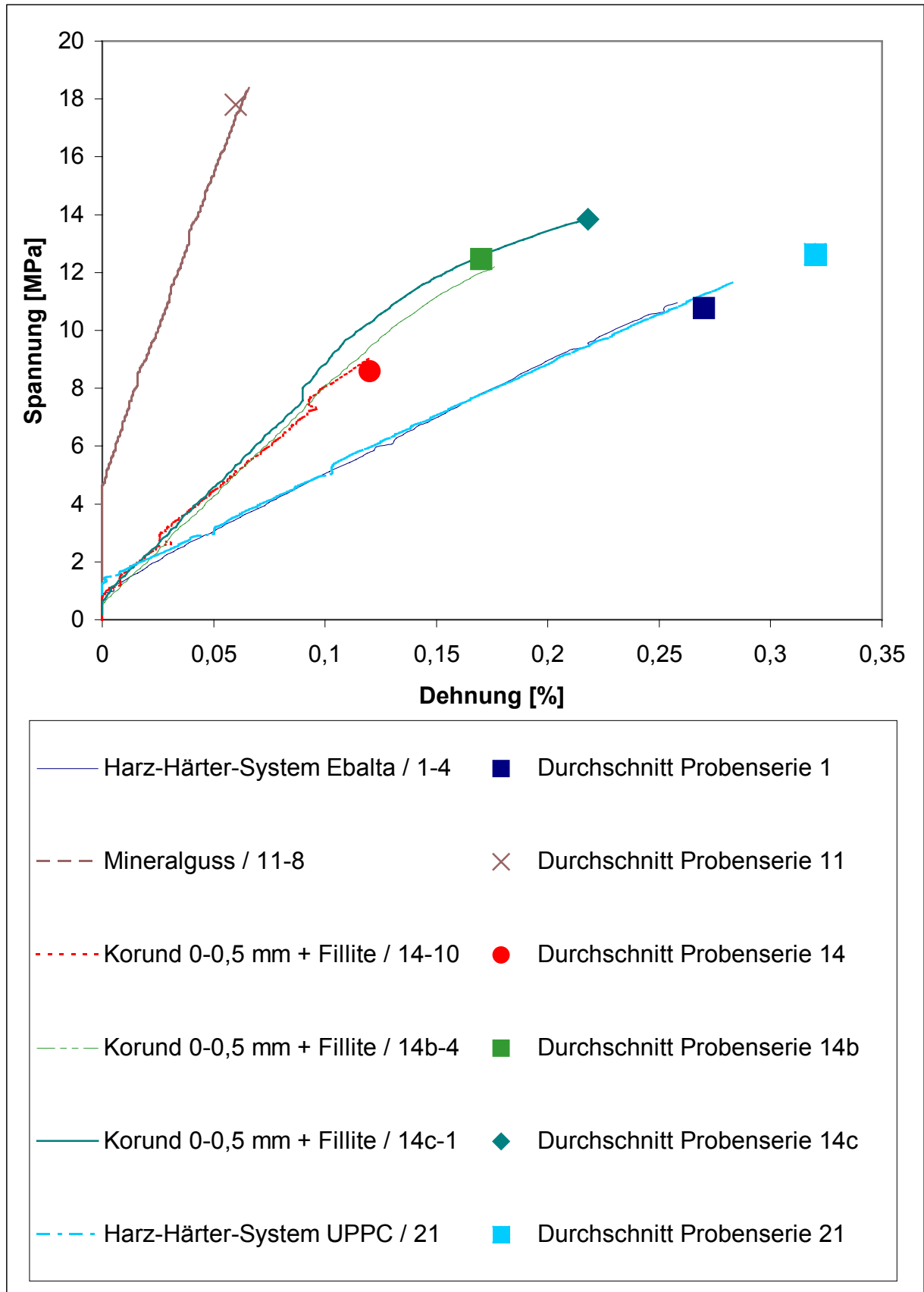


Bild 6.20: Spannungs-Dehnungs-Diagramme von Probekörpern mit einer durchschnittlichen Zugfestigkeit oberhalb von 8,5 MPa

Eine Steigerung der Werte wurde erreicht, wenn die Harz-Härter-Anteile insgesamt auf 35 Vol.-% und 45 Vol.-% erhöht wurden, wie es die Probenvariationen 14b (lila Kurve) und 14c (hellblaue Kurve) ausweisen. Hierbei ist zu bemerken, dass sich mit der Erhöhung der Harz-Härter-Anteile das Festigkeits- und Verformungsverhalten verbessert hat und neben dem linear-elastischen Teil auch ein plastischer Teil in der Spannungs-Dehnungskurve zu verzeichnen ist. Diese Tendenzen sind mit den Spannungswerten belegt, indem ein Anstieg der Spannung von 8,6 MPa bei der Probenvariation 14 (Fillite+Korund) auf 12,5 MPa und 13,8 MPa bei den Probenvariationen 14b bzw. 14c registriert wurde.

Im **Bild 6.21** sind die Spannungs-Dehnungs-Verläufe von den Probenvariationen dargestellt, die eine Spannungsbelastung unterhalb von 8,5 MPa aufweisen. Die farbigen Symbole (Kreise, Quadrate etc.) markieren den Mittelwert der Probenserie, während die Spannungs-Dehnungs-Kurven mit der gleichen Farbe eingezeichnet sind. Von den mit Korund-Hohlkugeln gefüllten HKK-Varianten wies die Probenvariation 7 die größten Zugfestigkeitswerte auf, infolge der besseren Füllung des Raumvolumens der Kugeln mit kleineren Keramikugeln. Die Probenserien 9 und 10, die beide aus einem Gemisch von Keramikhohlkugeln der Korngröße 0-0,5 mm, 0,5-1mm und 1-2 mm bestehen, unterscheiden sich nur dadurch, dass zu der Probenserie 10 zusätzlich Silan dem EP-Harz beigemischt war. Da die EP-Harze schon eine gute Haftfestigkeit besitzen, führte die Verwendung von Silan zu einem geringen Anstieg von 12 % der Zugfestigkeitswerte der Probenvariation 10 im Vergleich zu 9.

Der Spannungs-Dehnungs-Verlauf von Fillite PG (grüne Kurve) war flach und es trat nur ein elastischer Bereich auf, jedoch zeigte sich ein besseres Dehnungsverhalten als bei den Probenvariationen mit Korundhohlkugeln.

Bei der Probenvariation 6 (Q-Cel 300) ist zu bemerken, dass trotz des linearen Anstiegs der Spannungs-Dehnungs-Kurve die höchsten Dehnwerte mit 0,25 % erreicht wurden, die mit EP-Harzen vergleichbar waren. Der Grund dafür ist die bessere Haftung der Borosilikatkugeln zum Matrixwerkstoff.

Die Probenserie 8 mit Keramikugeln der Größe 0,5-1 mm zeigte kleinere Zugfestigkeits- und Dehnungswerte als die Probenserie 7 mit Keramikugeln der Korngröße 0-0,5 mm, deren Schüttgewicht größer war. Mit kleineren Partikelgrößen können bessere Packungsdichten erreicht werden, die sich in den Werten der Zugfestigkeit widerspiegeln. Um die Zielstellung zu erfüllen, HKK mit Korndurchmessern zwischen 10 µm und 1 bis 2 mm zusammenzustellen, wurden für die Probenvariation 14 Kugeln mit Korngrößen von 0,5 und 1 mm verwendet.

Die Probenvariation 3 (E-Spheres 350) wies eine Zugfestigkeit von 4,02 N/mm² aufgrund der durchgehend porösen Struktur und somit der schlechteren Qualität der Ausgangsmaterialien auf.

Ein Vergleich der Zugfestigkeitswerte von HKK zu den Literaturwerten kann nicht erfolgen, da keine Untersuchungen mit ähnlichen Zusammensetzungen von syntaktischen Schäumen bekannt sind.

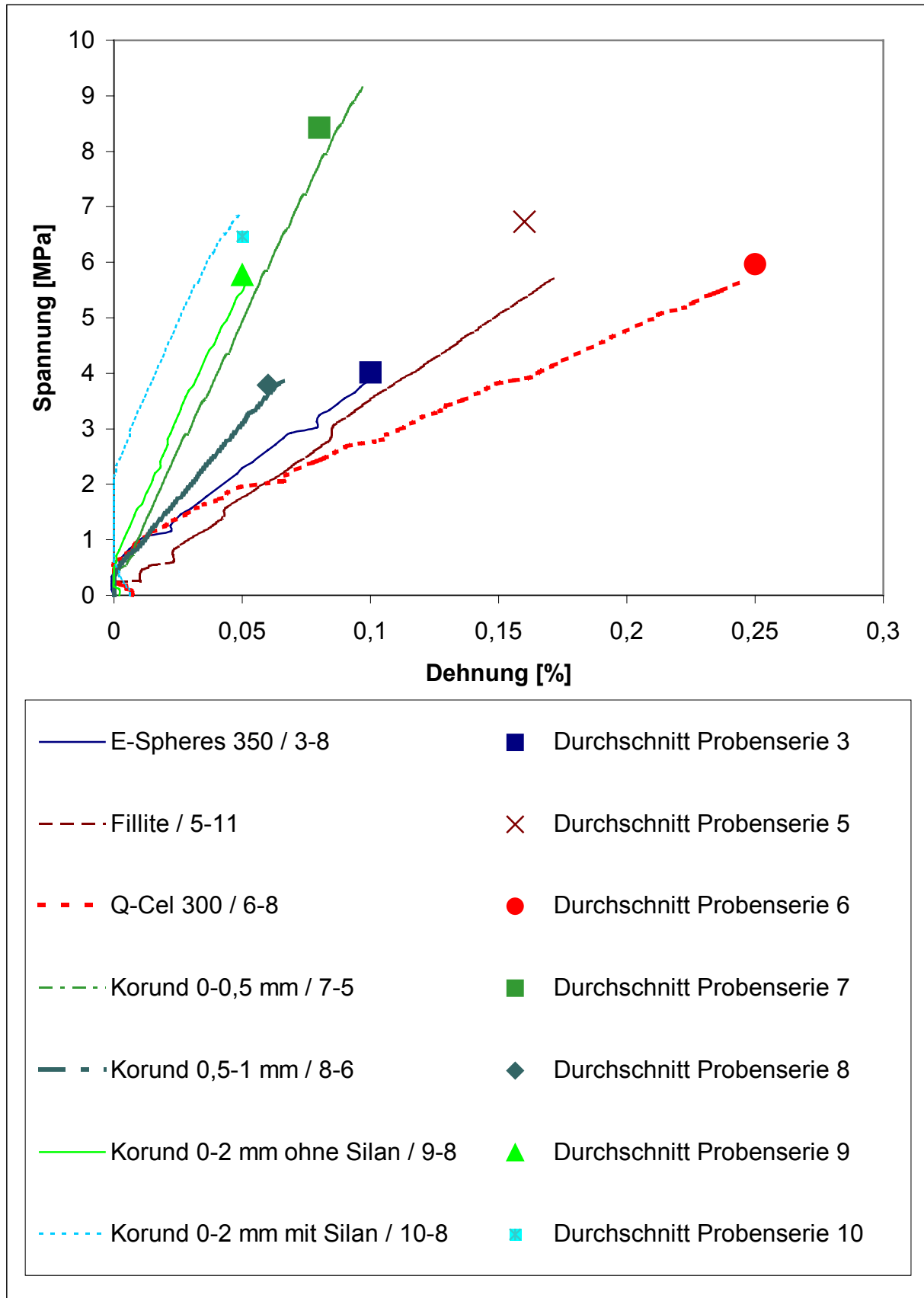


Bild 6.21: Spannungs-Dehnungs-Diagrammen von Probekörpern mit einer durchschnittlichen Zugfestigkeit unterhalb von 8,5 MPa

Die ermittelten Zugfestigkeitswerte von unterschiedlichen HKK-Probenvariationen sind 15- bis 40-fach höher als die von Polystyren- oder Phenolharz-Schaumstoffen [201]. Die Zugfestigkeitswerte von HKK sind im Vergleich zu den Metallschäumen, wie Cymat, Alporas, Alulight oder ERG, relativ höher bei vergleichbaren Dichtewerte [70].

6.3.2.2 Spezifische Zugfestigkeit

Für den Leichtbau spielen die spezifischen auf die Dichte bezogenen Kennwerte, wie die spezifische Zugfestigkeit (σ_m/ρ) und die Reißlänge ($\sigma_m/\rho \cdot g$) eine wesentliche Rolle (**Abschnitt 2.3**). Die Zugfestigkeitswerte im Vergleich zu den spezifischen Zugfestigkeitswerten sind im **Bild 6.22** veranschaulicht.

Im Säulen-Diagramm des **Bildes 6.22** wird deutlich, dass die HKK-Varianten 14 (60% Fillite+40% Keramikkugeln 0,5-1mm), 6 (Q-Cel +300) und 5 (Fillite) größere spezifische Zugfestigkeiten aufweisen als die Probenvariationen 1 (Harz-Härter Ebalta AH 120/TL) und 11 (Mineralguss).

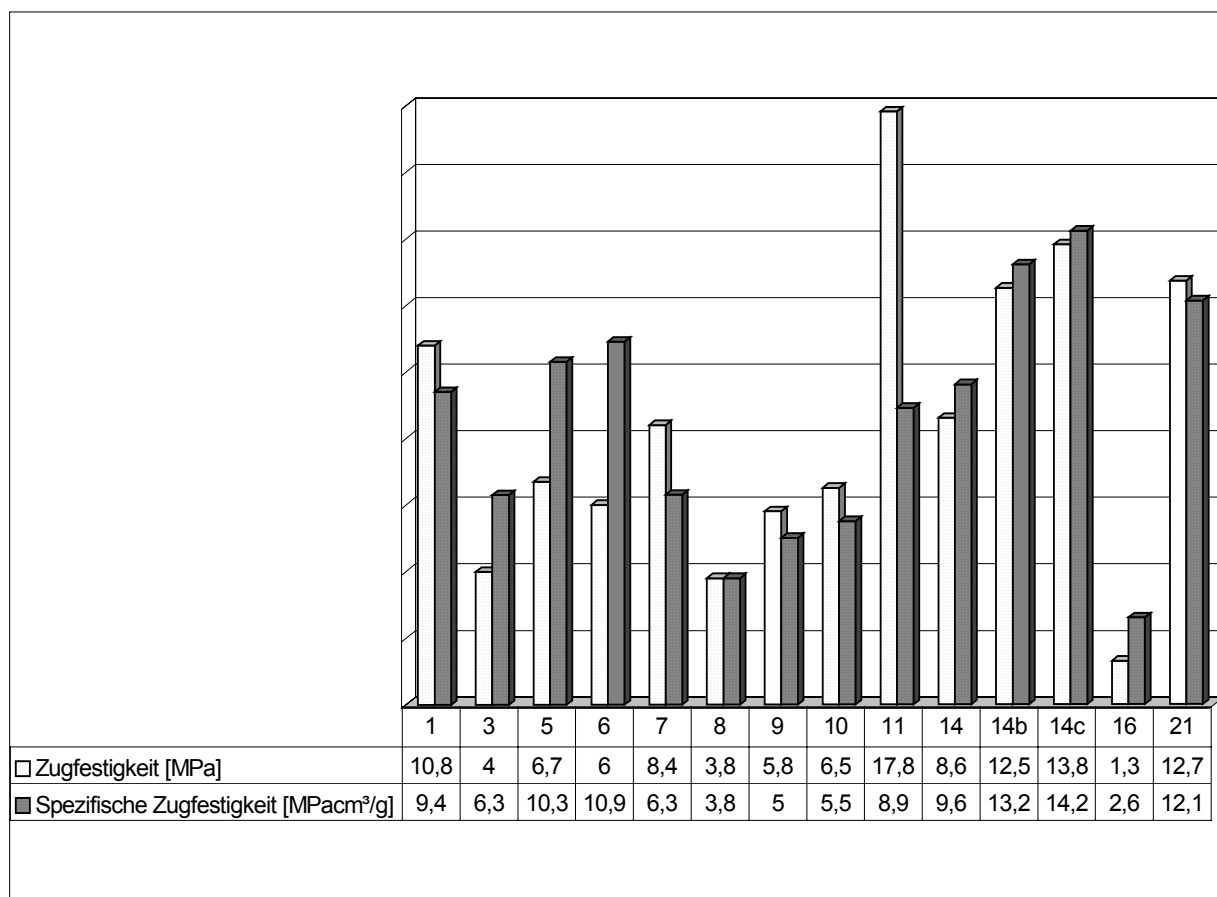


Bild 6.22: Zugfestigkeit und spezifische Zugfestigkeit von HKK, Mineralguss und reinem Harz-Härter-System EP-Harz Ebalta AH 120/TL

Trotz des höheren Harz-Härter-Anteils bei den Werkstoffen 14b und 14c, die auch in ihren höheren Dichtewerten erkennbar sind, werden die Werte der spezifischen Zugfestigkeit dieser HKK-Varianten von den anderen HKK-Varianten nicht übertroffen.

Obwohl die Zugfestigkeiten der Probenvariationen 5 (Fillite PG) und 6 (Q-Cel 300) kleiner als die von der Probenvariation 14 (Fillite + Korund) ausfallen, weisen sie jedoch im Verhältnis zu deren Dichten höhere spezifische Zugfestigkeiten auf.

Wie im **Bild 6.19** ersichtlich, zeigte die Probenvariation 16 (Poraver) die kleinsten Dichtewerte. Aufgrund der porigen Struktur, der aus recyceltem Glas hergestellten Poraver Kugeln wiesen sie keine ausreichenden Festigkeiten auf, die sich auch in den spezifischen Zugfestigkeitswerten widerspiegeln. Diese spezifischen Zugfestigkeitswerte konnten die spezifischen Zugfestigkeitswerte der anderen HKK-Probenvariationen nicht übertreffen.

6.3.2.3 Zug-Elastizitätsmodul, spezifische Steifigkeit und Dehnlänge

In **Bild 6.23** sind die E-Modulwerte, die spezifischen Steifigkeiten (E/ρ) und die Dehnlängen ($E/g \cdot \rho$) dargestellt.

Der Zugelastizitätswert von Epoxydharz beträgt 3495 MPa. Dieser Wert liegt in den zu erwartenden Elastizitätswerten von 4000 MPa nach den Literaturangaben [201] für Epoxyd-Gießharze.

Es ist ersichtlich, dass alle Zusatzstoffe eine Verbesserung der E-Modulwerte herbeiführen. Die Probenvariation 11 (Mineralguss) wies die höchsten Elastizitätswerte mit 25674 MPa auf. Je nach Zusammensetzung und Kornfraktionsanteil betragen diese Werte für Mineralguss 15 bis 55 GPA laut Literaturangaben (**Tab. 2.1**) [32-39]. Dies führt zu der Schlussfolgerung, dass die harten, quarzitischen Bestandteile des Mineralgusses einen positiven Einfluss auf die E-Modulwerte haben.

Die Probenvariation 2 zeigt von den mit massiven Kugeln gefüllten duroplastischen Werkstoffen den besseren Widerstand gegen Verformbarkeit als die Probenvariation 2b, da die in einem breiteren Spektrum von 75-850 μm variierenden Kugeln eine bessere Raumfüllung ermöglichen (**Bild 4.20**). Die bessere Raumverteilung mit Hohlkugeln führt auch bei den HKK-Variationen 9 und 14 zu besseren Steifigkeitswerten. Die Erhöhung des Harz-Härter-Anteils bei der Probenvariation 14b im Vergleich zu der Probenvariation 14 trägt zu einer Erhöhung der Steifigkeitswerte bei.

Ein Vergleich der ermittelten Zugelastizitätswerte von HKK mit denen von anderen syntaktischen Schäumen kann nicht erfolgen, da keine Werte bekannt sind. Obwohl nur die relativen Dichten von metallischen Schäumen, die in der Literatur [70] veröffentlicht sind, bekannt sind, kann aus einer näherungsweisen Umrechnung auf die Dichtewerte von metallischen Schäumen festgestellt werden, dass die Elastizitätswerte von HKK vergleichbar mit denen von metallischen Schäumen bei gleichen Dichtewerten sind.

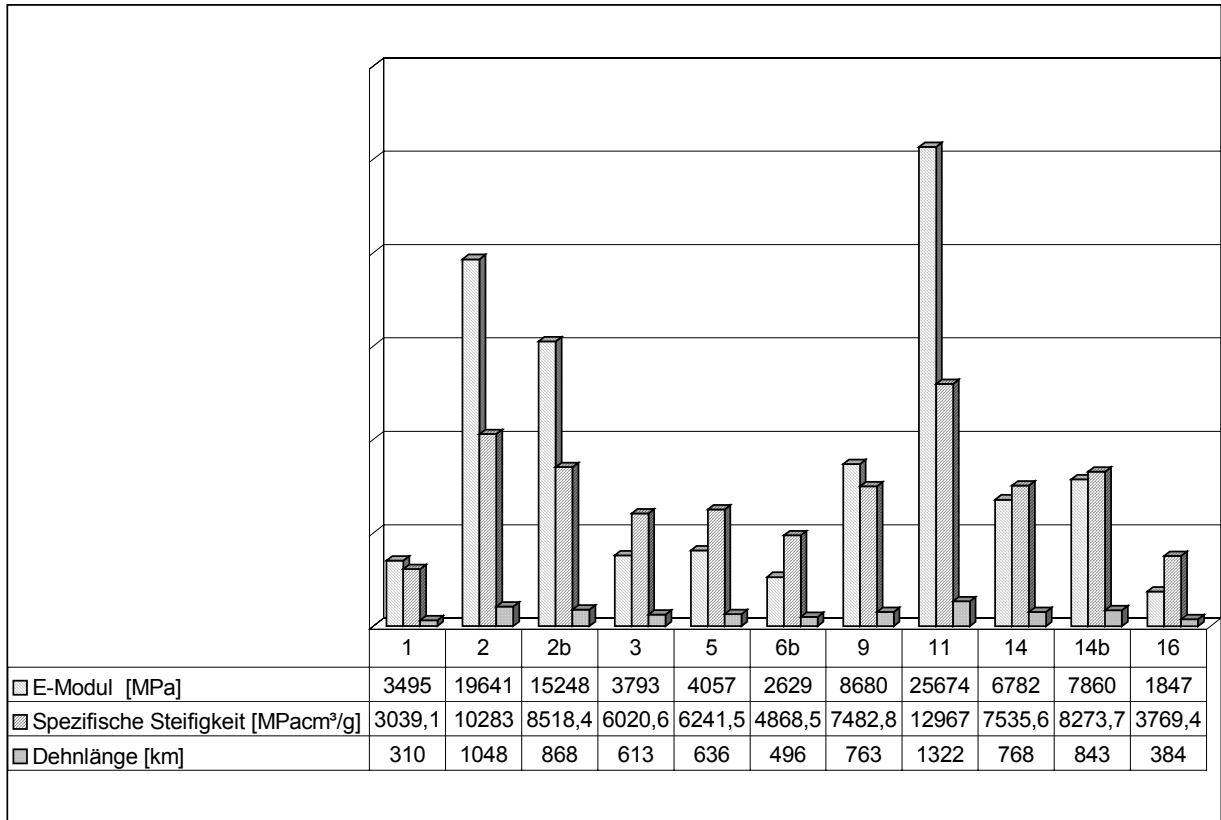


Bild 6.23: Zug-Elastizitätsmodul, spezifische Steifigkeit und Dehnlänge

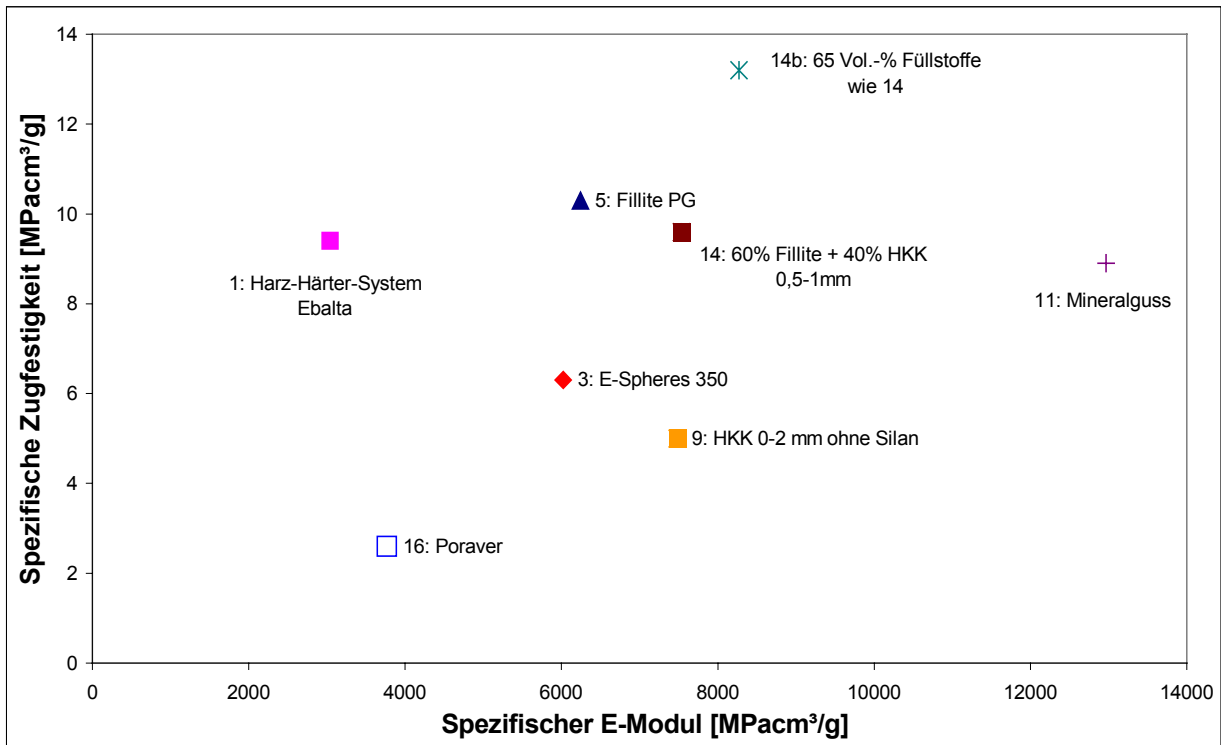


Bild 6.24: Spezifische Zugfestigkeit aufgetragen in Abhängigkeit vom spezifischen Elastizitätsmodul

Um die Vorteile eines Werkstoffes für Leichtbaukonstruktionen herauszustellen, ist es hilfreich, die spezifischen Zugfestigkeitswerte in Abhängigkeit von den spezifischen E-Modulwerten darzustellen, wie aus **Bild 6.24** ersichtlich. Die festigkeitsmäßige Ausnutzbarkeit unter reiner Zugbeanspruchung bei den Probenvariationen 14, 5 und 14b ist besser als beim reinen Harz-Härter-System Ebalta (Probenvariation 1) oder beim Mineralguss (Probenvariation 11).

6.3.2.4 Querkontraktionszahl

Aufgrund des relativ großen messtechnischen Aufwandes wurden die Querkontraktionszahlen nur an ausgewählten Probenserien, wie z.B. an den Probenvariationen 5 (Fillite), 11 (Mineralguss) und 14 (60% Fillite+40% Korund) gemessen. Die Zugprüfkörper, deren Elastizitätsmodulwerte den Mittelwerten der Serie am nächsten kamen, wurden zur Ermittlung der Querkontraktionszahl herangezogen. Die nachfolgende **Tabelle 6.2** enthält die Mittelwerte der Längs- und Querdehnungen sowie die Querkontraktionszahlen der geprüften Probenvariationen.

Tabelle 6.2: Längs- und Querdehnungen sowie Querkontraktionszahlen

Prüfkörper	Querdehnung in %	Längsdehnung in %	Querkontraktionszahl
5-12	0,0275	0,0646	0,395
11-13	0,0051	0,0161	0,316
14-15	0,0288	0,0750	0,384

Mineralguss weist die geringste Verformung oder Volumenverringerung in Querrichtung auf, auch seine Querkontraktionszahl ist am geringsten. Von den untersuchten Werkstoffen zeigt die Probenvariation 5 (Fillite) die gleichmäßigste Verformung in Quer- und in Längsrichtung. Dieses Merkmal ist zurückzuführen auf die gleichmäßige und homogene Verteilung der Spannungen der in einem engen Spektrum variierenden Korngrößen. Die γ -Werte der meisten Werkstoffe liegen zwischen 0,2 und 0,5. Der γ -Wert von EP-Harz beträgt 0,4, der von Stahl 0,25-0,3, der von Gusseisen 0,25-0,27 und der von Aluminium 0,31-0,34 [224]. Die ermittelten γ -Werte liegen in den üblichen Wertebereichen.

6.3.2.5 Spannungs-Stauchungs-Verhalten bei Druckbeanspruchung

Die Spannungs-Stauchungs-Kurven der Probenserien, deren Probekörper bei Druckfestigkeiten oberhalb 30 MPa lagen, sind im Diagramm des **Bildes 6.25** abgebildet. Das **Bild 6.25** beinhaltet auch die makroskopischen Aufnahmen der zugehörigen Probekörper.

Der Probekörper 1-5 des Harz-Härter-Systems Ebalta blieb ungebrochen bis zur maximalen Belastung durch die Prüfmaschine. Nach Literaturangaben [201] können die Epoxydharze Druckfestigkeiten bis zu 200 MPa standhalten. Die Probekörper 11-1 und 2-2 zeigten einen steileren linearen Spannungs-Stauchungs-Verlauf als der Probekörper 1-5. Der Probekörper 2-2 war nach Erreichen eines Spannungsmaximums in viele kleine Teile zersplittert, während der Probekörper 11-1 aus Mineralguss der maximalen Kraft von 100 kN der Prüfmaschine standhielt.

Die Stauchung der im **Bild 6.25** abgebildeten Druckkörper 6-4 erreichte bei einer Druckfestigkeit von 29,4 MPa den höchsten Wert von 2,7 %. Die Spannungs-Stauchungs-Kurven dieser Probenserien zeigten ein ausgeprägtes Spannungsmaximum, das von einem Spannungsabfall aufgrund des Auftretens von starken Längs- und Schrägrissen in den Proben geprägt war.

Von den Probenvariationen, deren Füllstoffanteile aus einer Mischung von Fillite und Korund-Hohlkugeln bestand, wies die mit höherem Harz-Härter-Anteil hergestellte Probe 14b-5 mit 2,1 % eine höhere Stauchung und mit 62,8 MPa eine höhere Druckspannung als die Probe 14-5 auf, deren Druckfestigkeit von 49,6 MPa bei einer 1,8 % Stauchung registriert wurde. Die Probenvariationen 14 und 14b wiesen auch unterschiedliche Stauchungsvorgänge auf. Während die Probe der Probenserie 14 nach dem Spannungsmaximum auch weiterhin nach dem Spannungsabfall belastet werden konnte, obwohl Längs- und Querrisse auftraten, versagten die Probekörper der Probenserie 14b nach Erreichen des Spannungsmaximums komplett und wurden teilweise zerrissen.

Im Unterschied zu den Probenvariationen 1, 2, 6, 11, 14 und 14b im **Bild 6.25** wiesen die Probenserien 3, 5, 7, 8, 9, 10 und 22, wie aus dem Diagramm der Spannungs-Stauchungs-Verläufe im **Bild 6.26** ersichtlich wird, Druckfestigkeitswerte unterhalb von 30 MPa auf. Das erzielte Spannungsmaximum konnte jedoch über mehrere Prozent Stauchung nahezu konstant gehalten werden.

Für Probekörper, die mit silikatkeramischen, keramischen und organischen Stoffen gefüllt waren (**Bild 6.26**), ist charakteristisch, dass sie einen nahezu linearen Spannungsanstieg im Anfangsbereich der Stauchung aufweisen, der nach prozentualer Erhöhung der Stauchung in einen ausgeprägten Plateaubereich übergeht. Dieses Verhalten ist typisch von zellularen Werkstoffen, wie z.B. Metallschäumen oder Kunststoffschäumen, die in der Literatur [63, 65, 66, 68-70, 104] beschrieben sind. Im Unterschied zu den in der Literatur beschriebenen Spannungs-Stauchungs-Kurven der porösen Werkstoffe sind die bei einer sehr großen Stauchung (über 80%) ansetzenden Wiederanstiege der Spannungs-Stauchungs-Kurven nicht mehr aufgezeichnet. Der wesentliche Unterschied einiger HKK-Werkstoffe im Vergleich zu den anderen porösen Werkstoffen ist, dass die HKK-Varianten höhere Druckfestigkeiten bei gleicher Dichte aufweisen [53, 63, 70, 93]. So weist die Druckprobe 5-3 bei 1,6 % Stauchung eine Druckfestigkeit von 29,2 MPa auf. Die Druckprobe 5-3 (**Bild 6.26**) zeigte am Ende der Messung kleinere Anrisse aufgrund von Schub- und Querspannungen.

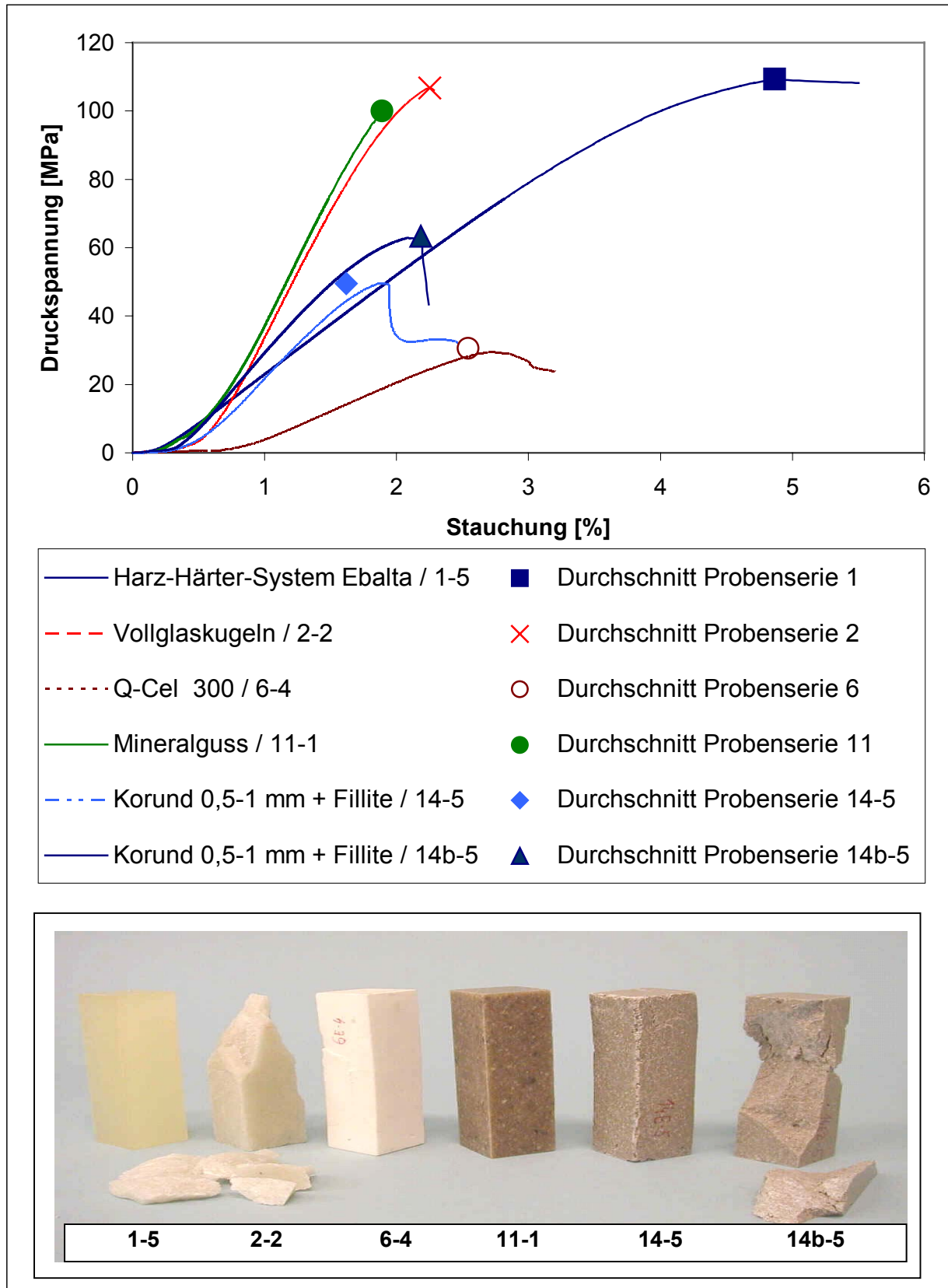


Bild 6.25: Spannungs-Stauchungskurven von Proben mit einer Druckspannung oberhalb von 30 MPa und die dazugehörigen Druckprobekörper

Von den HKK-Varianten, die auf Basis von Hohlkugelkorund hergestellt waren, weisen die Probenvariation 7, bestehend aus dem kleinsten Korndurchmesser (0-0,5 mm) und dem größten Schüttgewicht (0,85-1,1 g/l), den besseren Widerstand gegen Druckbeanspruchung auf. Die plastische Deformation der Probe 7-2 setzt beim Erreichen des ersten Spannungsmaximums von 22,7 MPa und 0,9 % Stauchung ein, die sich durch kleine quer und schräg verlaufende Risse in der Probe manifestieren. Aufgrund der größeren Porosität wiesen die Probekörper der Probenserie 8, deren Füllstoffanteile aus einer größeren Kornklasse von Korundkugeln bestanden (0,5-1 mm), eine kleinere mittlere Druckfestigkeit von nur 7,9 MPa bei einer Stauchung im Mittel von 0,9 % auf. Einige Probekörper, die eine kleinere Druckfestigkeit aufwiesen, zeigten eine Druckfließspannung. Im vorliegenden Fall wies der Probekörper 8-4 nach Erreichen einer Fließspannung bei 4,5 MPa einen Wiederanstieg der Stauchung von 0,7 % auf 0,8 % auf, ohne dass eine Zunahme der Spannung registriert wurde.

Die Probenserien, deren Füllstoffe aus verschiedenen Kornklassen (von 0 bis 2 mm im Durchmesser) zusammengemischt waren, wiesen Druckfestigkeitswerte zwischen den Werten der Probenserie 7 (Korund 0-0,5 mm) und 8 (Korund 0,5-1 mm) auf. Das Stauchen dieser Proben erfolgte unter einem hörbaren Knistern und Quietschen. Die Proben zeigten nur kleine Risse oder gebrochene Ecken bei mehreren Prozenten in der Stauchung. Sogar bei 12 % Stauchung blieb die Probe 9-4 unversehrt. Die Probe 10-2 (mit Silan) zeigte mit 15,9 MPa Druckfestigkeit bei 0,8 % Stauchung einen geringfügig besseren Widerstand gegen Druckbelastung als die Probe 9-4 (ohne Silan), deren Druckfestigkeitswerte bei 14,7 MPa und 1,2 % Stauchung lagen.

Aufgrund der stark ungleichmäßigen Form und der schlechten Oberflächen- und Innenstruktur der E-Spheres 350 Hohlkugeln (**Bilder 4.10-4.11**) wies die Probenvariation 3 von den nichtmetallisch-anorganisch gefüllten HKK-Varianten das schlechteste Spannungs-Dehnungs-Verhalten auf. Bei dem Probekörper 3-4 konnte nur eine Druckfestigkeit von 9,5 MPa bei einer Stauchung von 0,9 % festgestellt werden. Die Fließspannung wurde mit 5,3 % ermittelt.

Die mit Kunststoffhohlkugeln angereicherte HKK-Variante 22-2 hatte zwar einen geringeren Widerstand von 7,7 MPa gegen Druckbelastung, zeigte aber das beste viskose Verhalten, weil die Druckfestigkeit bei einer Stauchung von 4,7 % verzeichnet wurde. Ein besonderes Merkmal der Spannungs-Stauchungs-Kurve der Probe 22-2 ist, dass die Spannungen im Plateau Bereich völlig geradlinig verlaufen. Die Probe 22-2 im **Bild 6.26** wies außer einem kleinen Riss in der oberen Ecke der Probe keine schwerwiegenden Fehler auf.

Aufgrund der verbesserten Haftung zwischen Matrix und Kugeln bei dem mit Silan behandelten Harzsystem der Probenvariation 10-2 waren die Unterschiede zwischen den Spannungsmaxima und -minima nicht mehr so groß wie bei der Probenvariation 9-4, so dass die Risse weniger an den Kugelmembranen verlaufen. Es tritt ein Versagen der Matrix und/oder der Kugeln auf (Beweis über Bruchbilder in **Bildern 6.26**).

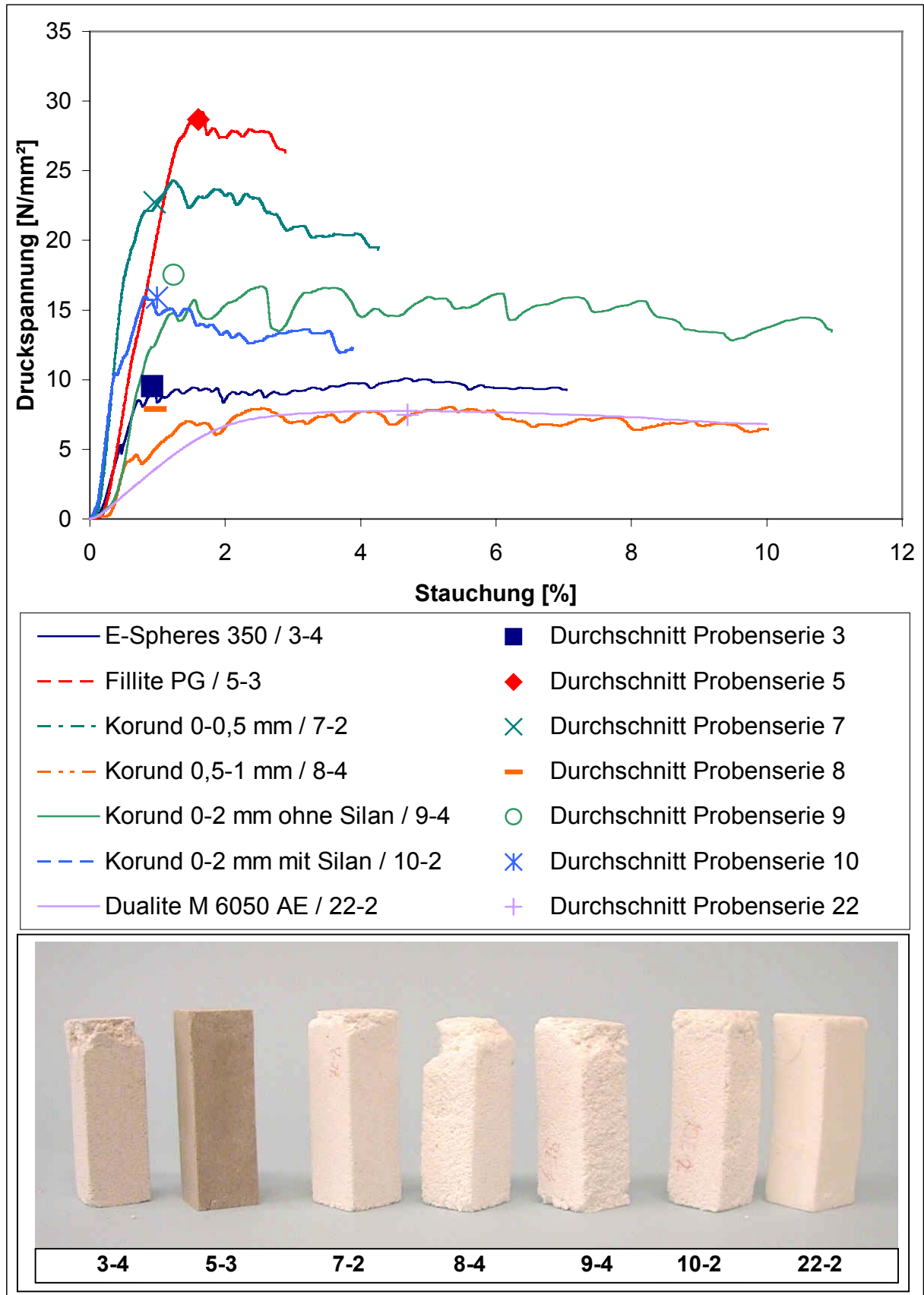


Bild 6.26: Spannungs-Stauchungs-Kurven von Proben mit einer Druckspannung unterhalb von 30 MPa und die dazugehörigen Bruchbilder

In den Spannungs-Stauchungs-Verläufen des plastischen Plateaubereiches kann ein Zusammenhang zwischen den Abweichungen des Spannungsmaxima und –minima und den Korndurchmessern festgestellt werden. Je kleiner der Korndurchmesser, desto geradliniger verlaufen die Spannungs-Stauchungs-Kurven im zweiten Bereich, so dass ein Riss bei den klein-körnigeren HKK-Varianten (22, 3, 5) schneller zwischen den Kugelmembranen abgelenkt wird, während er bei den grobkörnigen HKK-Varianten (7, 8, 9, 14 etc) einen längeren Weg durchlaufen muss, um auf ein Hindernis (Kugeln oder Poren) zu treffen und abgelenkt zu werden (**Bild 5.17**). Aus diesen Gründen treten mehr in Quer/Schräg-Richtung verlaufende Risse bei den feinkörnigen Varianten auf, während für die grobkörnigeren Varianten mehr Längsrisse spezifisch sind. Hinzu kommen auch die unterschiedlichen Haftfestigkeiten zwischen Matrix und Kugeln. Wenn die Festigkeit der Kugeln und die Haftfestigkeit die Festigkeit der Matrix übersteigen treten Risse in der Matrix auf, während bei einer schlechten Festigkeit der Kugeln gegenüber der Haftfestigkeit oder der Festigkeit der Matrix die Kugeln brechen.

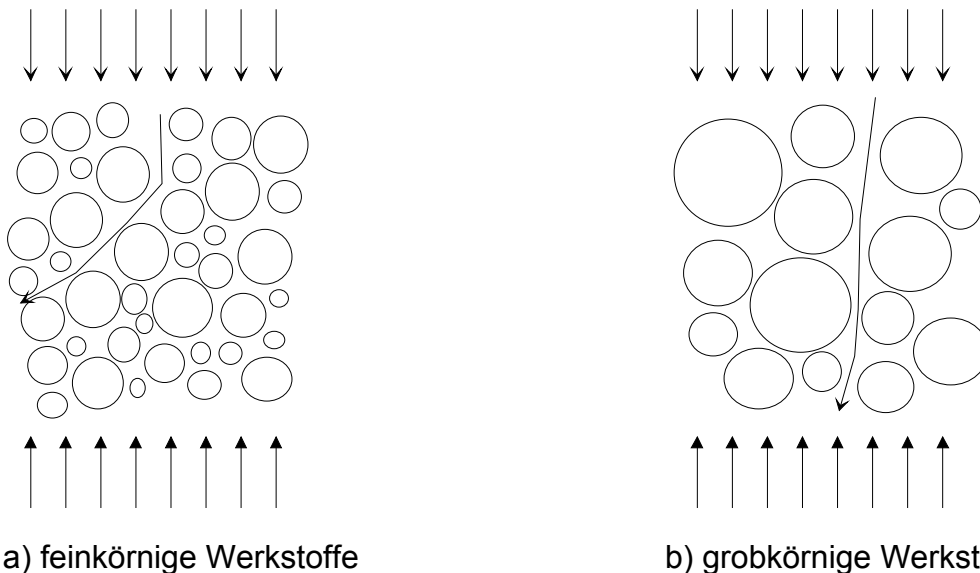


Bild 6.27 *Schädigungsverlauf bei feinkörnigen und grobkörnigen Werkstoffen unter Druckbeanspruchung*

6.3.2.6 Druck-Elastizitätsmodul

Die ermittelten Werte der Druck-Elastizitätsmodule sowie die auf die Dichte bezogenen spezifischen Druck-Elastizitätsmodule für einige ausgewählte Probenserien des Untersuchungsprogramms sind im **Bild 6.28** dargestellt. Durch Vergleich der Werte der Druck-Elastizitätsmodule mit den Werten der Zug-Elastizitätsmodule werden ersichtlich, dass für alle Probenserien die Druck-Elastizitätsmodule größer als die Zug-Elastizitätsmodule der gleichen Probenserien sind. Ebenfalls waren die Druckfestigkeitswerte immer größer als die Zugfestigkeitswerte der gleichen Probenserien. Dies ist damit zu erklären, dass die kleinen Poren oder die davon entstehenden kleinen Risse im Gegensatz zur Zugbeanspruchung unerheblich sind, da diese unter Druck schlie-

ßen. Andererseits entsteht beim Zug nur ein Maximum in einem Punkt, während beim Druck die Kräfte sich auf die Kugeloberfläche verteilen. Einige Kugeln sind auch komprimierbar und wenn sie trotzdem brechen, entsteht ein kleiner Riss, der wieder geschlossen werden kann, so dass beim Zug die Matrix bzw. die Haftung zwischen der Matrix und den Kugeln die dominierende Rolle spielt.

Im Säulen-Diagramm des **Bildes 6.28** ist deutlich zu erkennen, dass alle HKK-Varianten außer Probenvariation 6b (Q-Cel 6042 S) eine Verbesserung der Druck-Elastizitätsmodule bewirkt haben. Jedoch, wenn man die Entwicklung der auf die Dichte bezogenen spezifischen Druck-Elastizitätsmodule betrachtet, ist bei allen verschiedenartig gefüllten Probenserien eine Verbesserung im Vergleich zur Probenvariation 1 (Harz-Härter-System) eingetreten. Deutliche Verbesserungen sind bei den Probenvariationen 11 (Mineralguss) und 2 (Vollglaskugeln) zu verzeichnen.

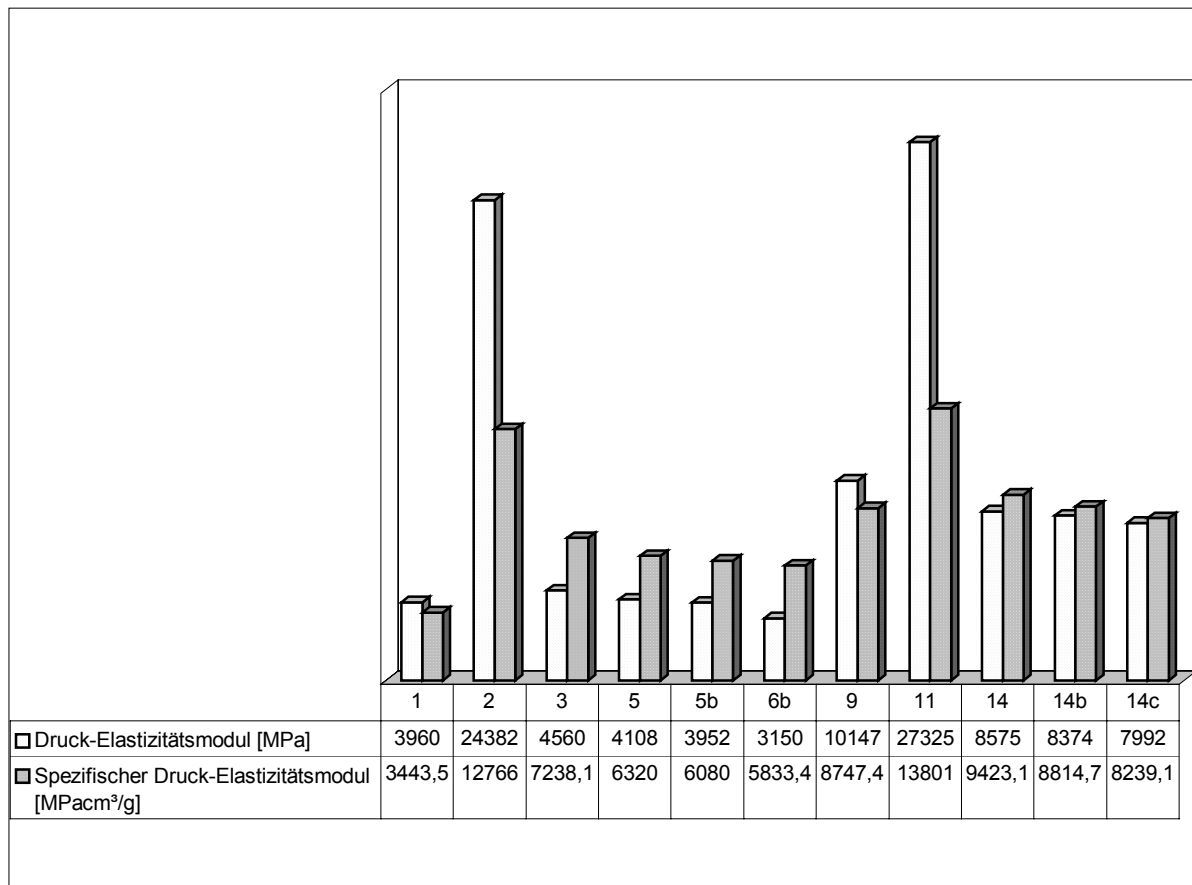


Bild 6.28: *Druck-Elastizitätsmodul und spezifischer Druck-Elastizitätsmodul*

Von den HKK-Varianten zeigten die Probenvariationen 9 (Korund 0-2 mm) und 14 (Korund 0,5-1 mm + Fillite) Erhöhungen der Druck-Elastizitätsmodul-Werte, die wiederum auf das verbesserte Arrangement der Kugeln, die aus verschiedenen Kornklassen bestehen, zurückzuführen sind. Die Erhöhung des Harz-Härter-Anteils führt jedoch zu einer Verschlechterung der Elastizitätsmodul-Werte.

6.3.2.7 Zeitstandverhalten bei Druckbeanspruchung

Die im **Bild 6.29** dargestellten im Kurzzeitversuch aufgenommenen Spannungs-Stauchungskurven verdeutlichen die unterschiedlichen Bereiche. Im Anfangsbereich erfolgt ein nichtlinearer Stauchungsvorgang (Bereich 1), der in ein lineares Spannungs-Deformationsverhalten (Bereich 2) übergeht. Im Bereich 3 endet mit dem Bruchvorgang. Der ausgewählte Kraftbereich der Langzeit-Druckversuche befindet sich im Bereich 3.

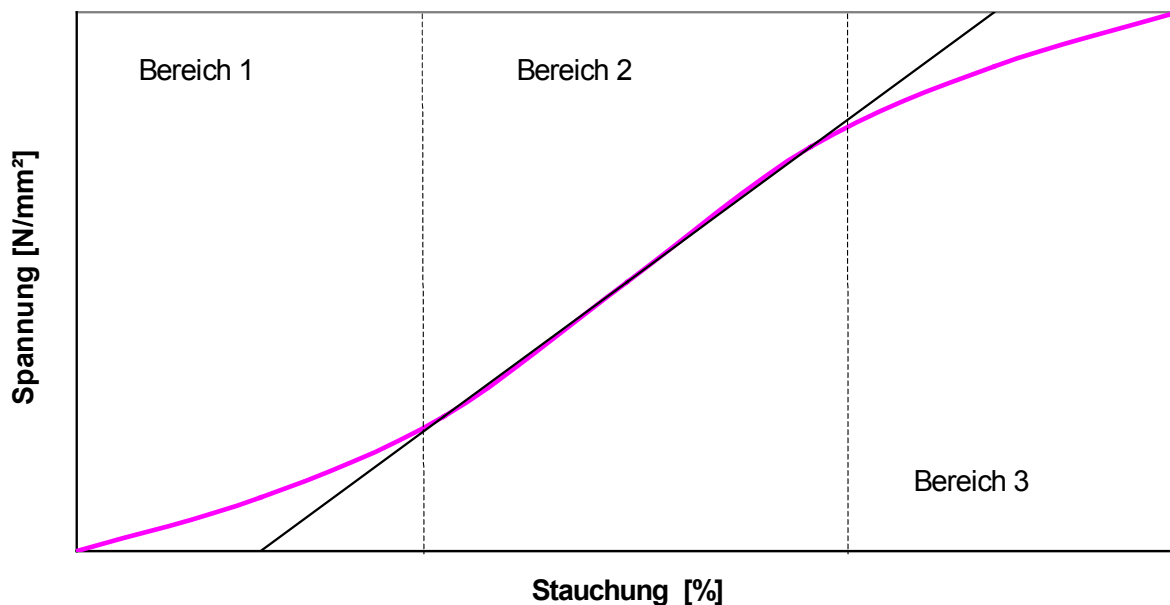


Bild 6.29: *Bereiche einer Spannungs-Stauchungs-Kurve*

Die Zeitstandkurve im **Bild 6.30** für den Prüfkörper 2-1, der mit 80% Bruchlast belastet ist, zeigt exemplarisch die kennzeichnenden Verläufe vom Aufbringen der Kraft bis zur Bruchauslösung. Für kurze Zeiten bei der Lastaufbringung wird eine extrapolierte Kriechkurve ermittelt. Nach dieser Vorgehensweise wurden die Kriechkurven aller Probenreihen, die in den **Bildern 6.31** und **6.32** dargestellt sind, bestimmt. Die Proben wurden dabei unter einer konstanten Last gehalten, die 80, 85 oder 90% der in Kurzzeitversuchen ermittelten Drucklasten betrug. Der Probekörper 1-2 (**Bild 6.31**) stauchte mehrere Prozente, ohne gebrochen zu werden. Die Messung wurde wegen Stabilitätsversagens des Probekörpers beendet. Die Mineralgussprobe 11-2, die unter einer Spannung von 93 MPa mehrere Stunden lang belastet war, versagte nach etwa 9 Stunden aufgrund des aufgetretenen Bruches des Probekörpers. Die mit Korund-Kugeln der Durchmesser 0 bis 2 mm gefüllte Probe 9-1 war im Messbereich nicht deformierbar, wie es der untere Linienverlauf im **Bild 6.31** demonstriert. Unter deutlichem Knacken und Knistern trat nur eine Deformation der Probe im Kräfteinleitungsbereich auf.

6 Ermittlung des Eigenschaftsprofils von Hohlkugelkomposit

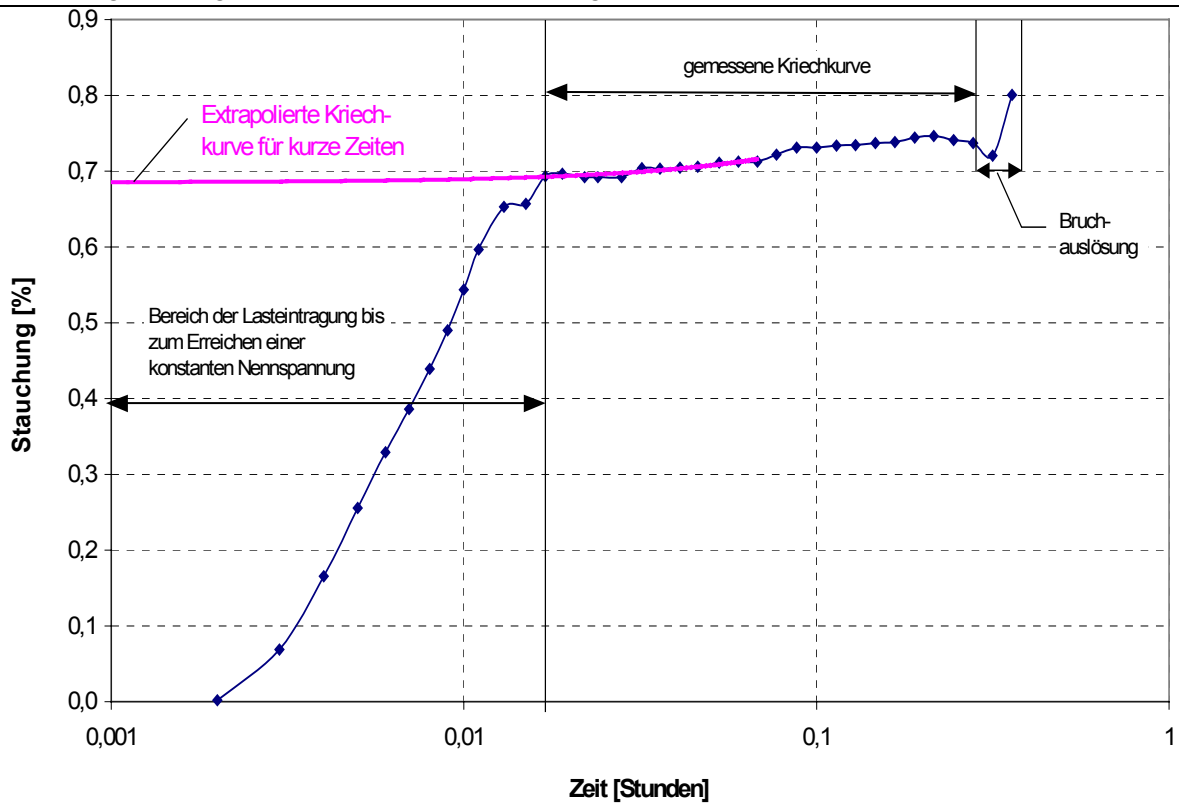


Bild 6.30: Exemplarischer Verlauf des Zeitstandbruches von Prüfkörper 2-1 aus Vollglaskugeln/Spherglass bei 80 % der Bruchlast

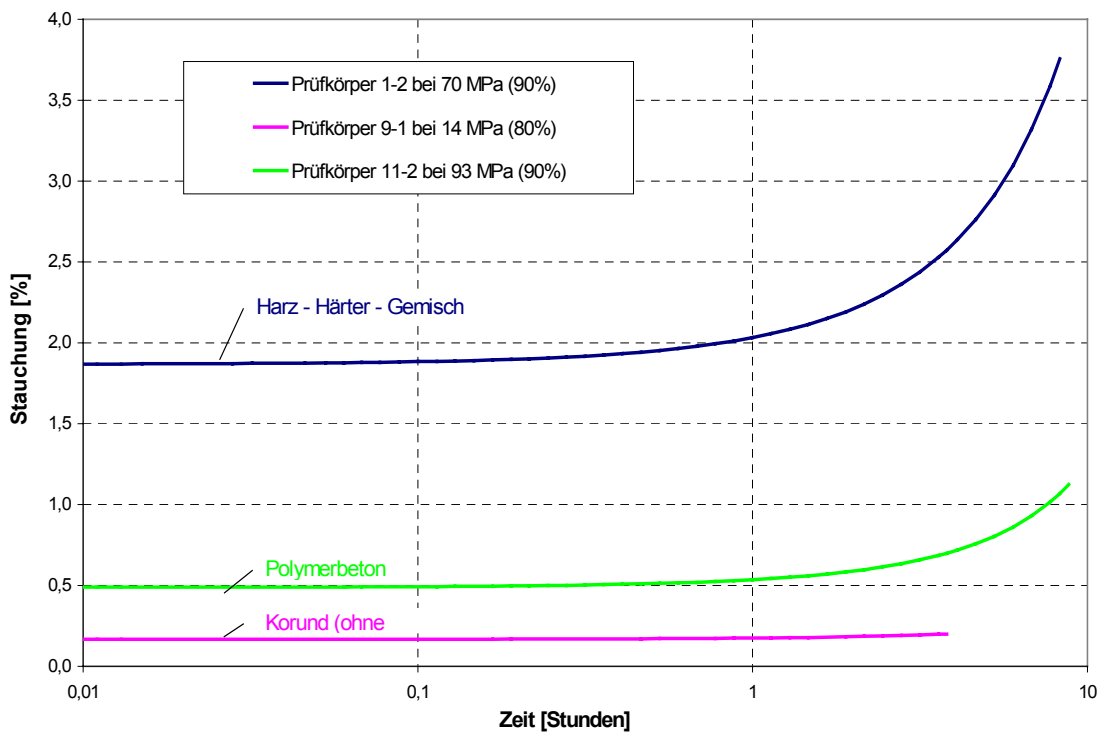


Bild 6.31: Vergleich des Zeitstandverhaltens von Proben aus Harz-Härter-Gemisch (1-2), Polymerbeton (11-2) und Korund (9-1)

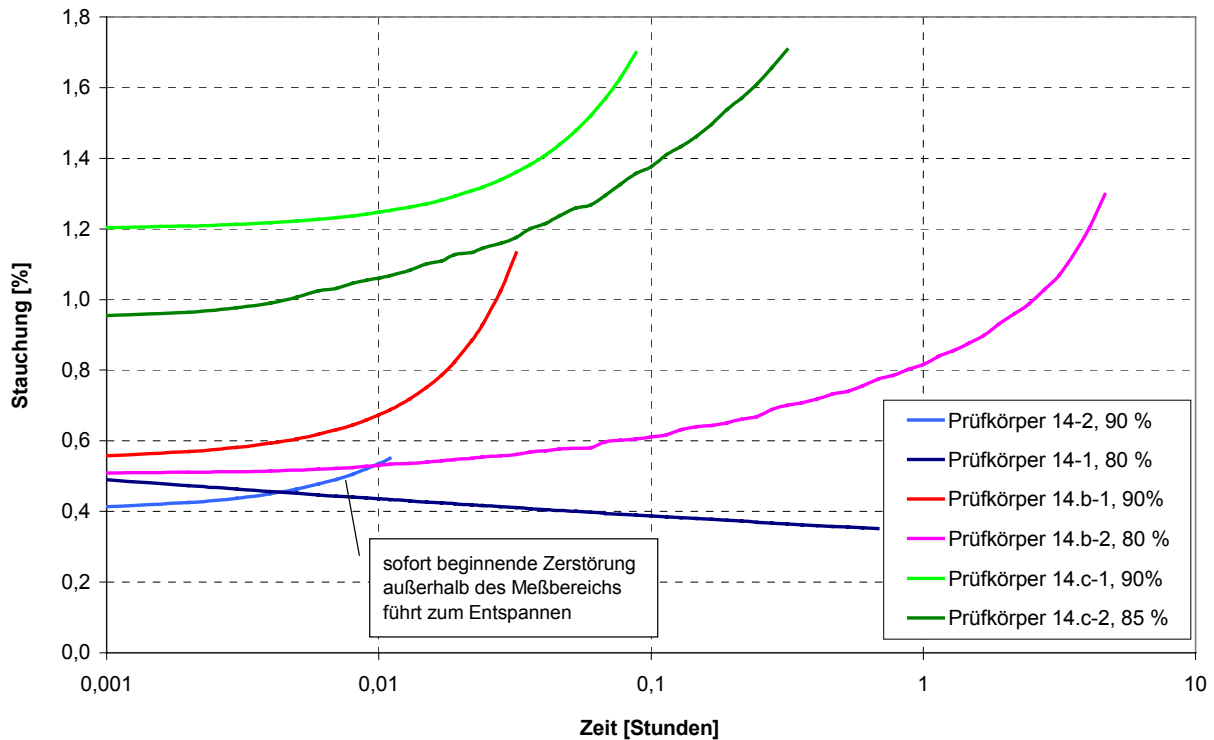


Bild 6.32: Zeitstandverhalten der Prüfkörper 14a, 14b und 14c bei 90, 80 bzw. 85 % der Bruchlast bis zur irreversiblen Zerstörung

Alle Proben der Probenserien 14a, 14b und 14c, deren Kriechverläufe im **Bild 6.32** abgebildet sind, versagten innerhalb einer Stunde, wenn die Nennlast 90% der Bruchlast betrug. Die Probe 14-2 versagte unter einer geringeren Last von nur 28 kN nach einer Stunde. Die Proben 14.b-1 und 14.c-1 mit höheren Harz-Härter-Anteilen hielten längere Zeit den Beanspruchungen von 90% der Bruchlast als die Probe 14-2 stand. Alle Proben der Probenserien im **Bild 6.32**, die unter einer geringeren Druckspannung belastet waren, haben den Beanspruchungen ohne Auftreten eines Bruchversagens längere Zeit standgehalten. Mit abnehmender Belastung steigt die Belastungsdauer, wie die Probe 14.b-2 es demonstriert, obwohl sie geringere Vol.-% von EP-Harz aufweist. Eine längere Zeit bei einer geringeren Belastung von 80% der Bruchlast ausgesetzt, kann die Probe 14.c-2, die einen höheren Vol.-% EP-Harz besitzt, einer Last von 85 % der Bruchlast trotzen. Mit abnehmender Belastung (50% oder 30%) nehmen die Belastungszeiten zu, für deren genaueren Ermittlungen weitere Untersuchungen notwendig sind.

6.3.2.8 Spannungs-Dehnungs-Verhalten bei Biegebeanspruchung

Das Spannungs-Dehnungs-Verhalten der Probekörper, die oberhalb einer Biegespannung von 35 MPa gebrochen sind, zeigt **Bild 6.34**. Die farbigen Symbole (Kreise, Quadrate etc.) kennzeichnen die aus 5 Messungen ermittelten Mittelwerte der Biegespannungen und Biegedehnungen [227].

An den Biegespannungs-Biegedehnungs-Verläufen der beiden Harzsysteme wird deutlich, dass sie sehr spröde sind, da bei beiden Harz-Systemen nur linear steile Anstiege bis zum Bruch registriert werden. Die Probenvariation 1 weist jedoch mit 47 N/mm^2 bessere Durchschnittswerte bei der Biegebeanspruchung auf als die Probenvariation 20, deren Durchschnittsbiegefestigkeit mit $45,6 \text{ MPa}$ ermittelt wurde. Die ermittelten Biegefestigkeitswerte von Epoxydharzen entsprechen den Literaturwerten, die in Abhängigkeit von der Herstellung, Zusammensetzung u.a. Werte zwischen 50 und 150 MPa aufzeigen [159, 201].

Ideal spröde verhalten sich die Probenvariationen 2 und 11, deren linear elastische Anstiege der Biegespannungs-Dehnungs-Kennlinien bei kleineren Biegedehnungswerten als bei der Probenvariation 1 enden. Somit war eine Bestimmung der Elastizitätsmodule unter Biegebeanspruchung nicht möglich.

Eine deutliche Steigerung der Biegefestigkeitwerte wurden bei den Probenvariationen 12, 13, 15, 17 und 18 erzielt, wo die Probekörper an den der aufgetragenen Kraft gegenüberliegenden Seite zusätzlich mit laminierten oder nicht laminierten Kohle- bzw. Glasfasern verstärkt wurden. Die Probenvariationen 15 und 18, deren gleiche HKK-Matrix-Varianten mit unterschiedlichen Fasern (Kohle bzw. Glas) verbunden waren, zeigten unterschiedliche Ergebnisse der Biegespannungs- und Biegedehnungswerte, die auf die Einzelwerte der Fasertypen zurückgeführt werden können (**Tabelle 4.9**). Die Kohlefasern weisen bessere Festigkeiten gegenüber den Glasfasern auf, während die Kohlefasern im Gegensatz zu den Glasfasern sehr spröde sind, die sich in den niedrigeren Bruchdehnungswerten der Probenvariation 15 widerspiegeln.

Zwischen den laminierten und nicht laminierten kohlefaserverstärkten Probestäben ist festzustellen, dass ab einer Korngröße von $0,5 \text{ mm}$ (z.B. Korund) die laminierten Probestäbe eine höhere Biegefestigkeit als die Probestäbe mit nicht laminierten Kohlefasern aufweisen. Die Begründung liegt darin, dass bei Korngrößen unterhalb von $0,5 \text{ mm}$ (z.B. Fillite) bei den einzelnen Korngrößen mehrere Berührungspunkte zwischen den einzelnen Körnern und zwischen dem Laminat vorliegen (**Bild 6.33**).



Bild 6.33: *Berührungspunkte zum Laminat in Abhängigkeit vom Korndurchmesser*

Im Gegensatz dazu können die größeren Körner besser zwischen den nicht laminierten Faserbündeln liegen und somit eine bessere Haftung und dadurch größere Festigkeiten erreichen. Auf die Kennwerte können außerdem die Aushärtung der Matrix, die Krümmungen oder Inhomogenitäten in den Fasern, die Ausrichtung der Faser oder die Füllstoffverteilung Auswirkungen haben. Unter dem Gesichtspunkt, dass zur Fertigung von Laminaten die Faserbündel ausgerichtet und parallel zueinander liegen, sind die Lamine besser als die nicht laminierten Fasern zur Kraftaufnahme geeignet.

Bei den laminierten Probekörpern der Probenvariation 12 konnten höhere Biegespannungen im Durchschnitt von $91,8 \text{ MPa}$ im Vergleich zu den nicht laminierten Probenvariation 12 erzielt werden, deren durchschnittliche Biegespannungswerte $86,2 \text{ N/mm}^2$ betragen. Im Gegensatz dazu zeigen die nicht laminierten Probenvariationen der Pro-

benserien 13 und 15 höhere Festigkeiten gegen Durchbiegen als die laminierten Probekörper der gleichen Probenserien. Bei den laminierten Probekörpern der Probenserie 13 trat ein komplettes Ablösen der Laminatlagen (Delamination) vom HKK-Verbund auf. Die Zugabe der Füllstoffe zum Polylox-System im Fall der Probenvariation 20 führt zu einer Verbesserung der mechanischen Werte.

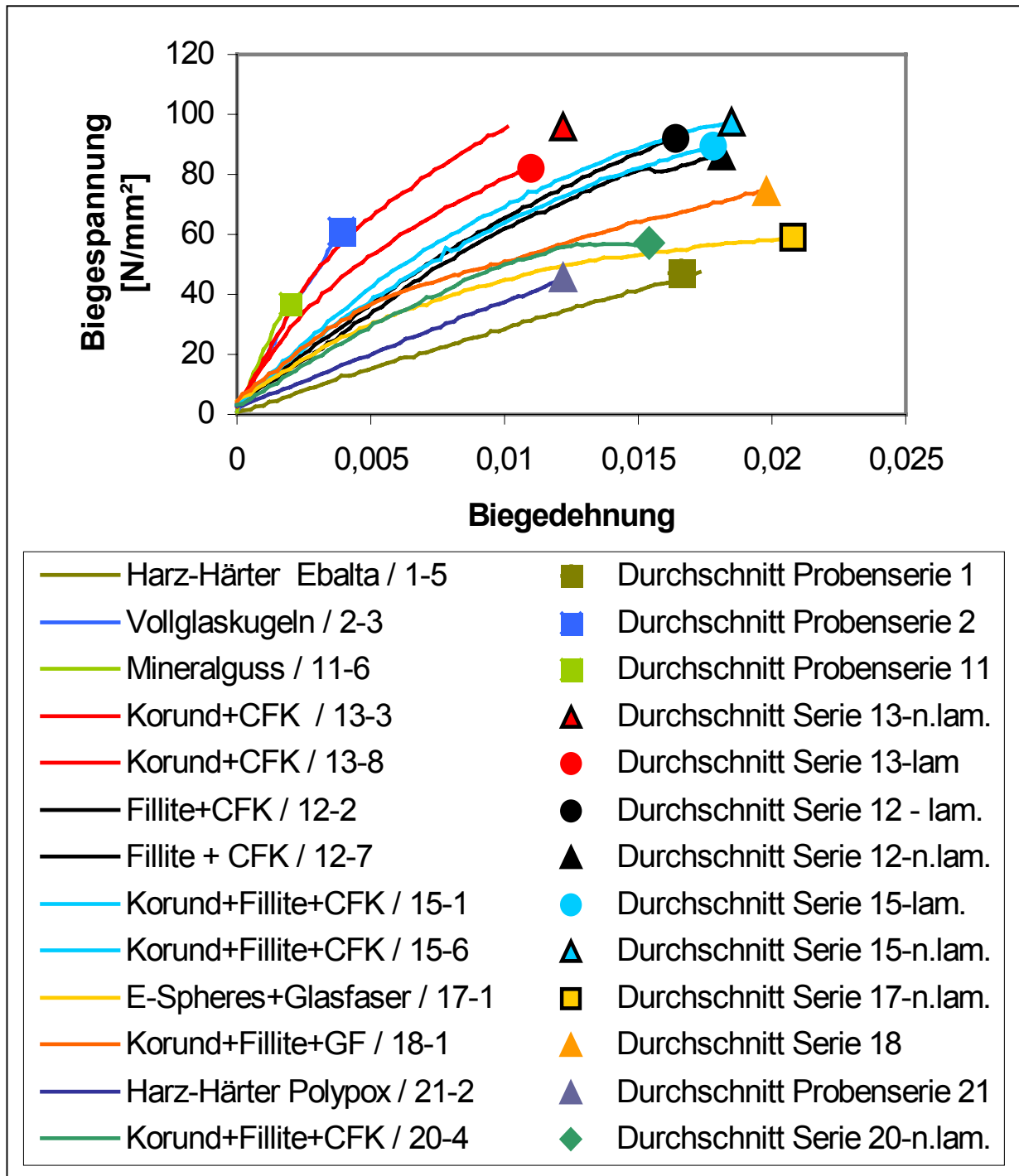


Bild 6.34: Biegespannungs-Dehnungs-Kurvenverläufe für eine Biegespannung oberhalb von 35 MPa

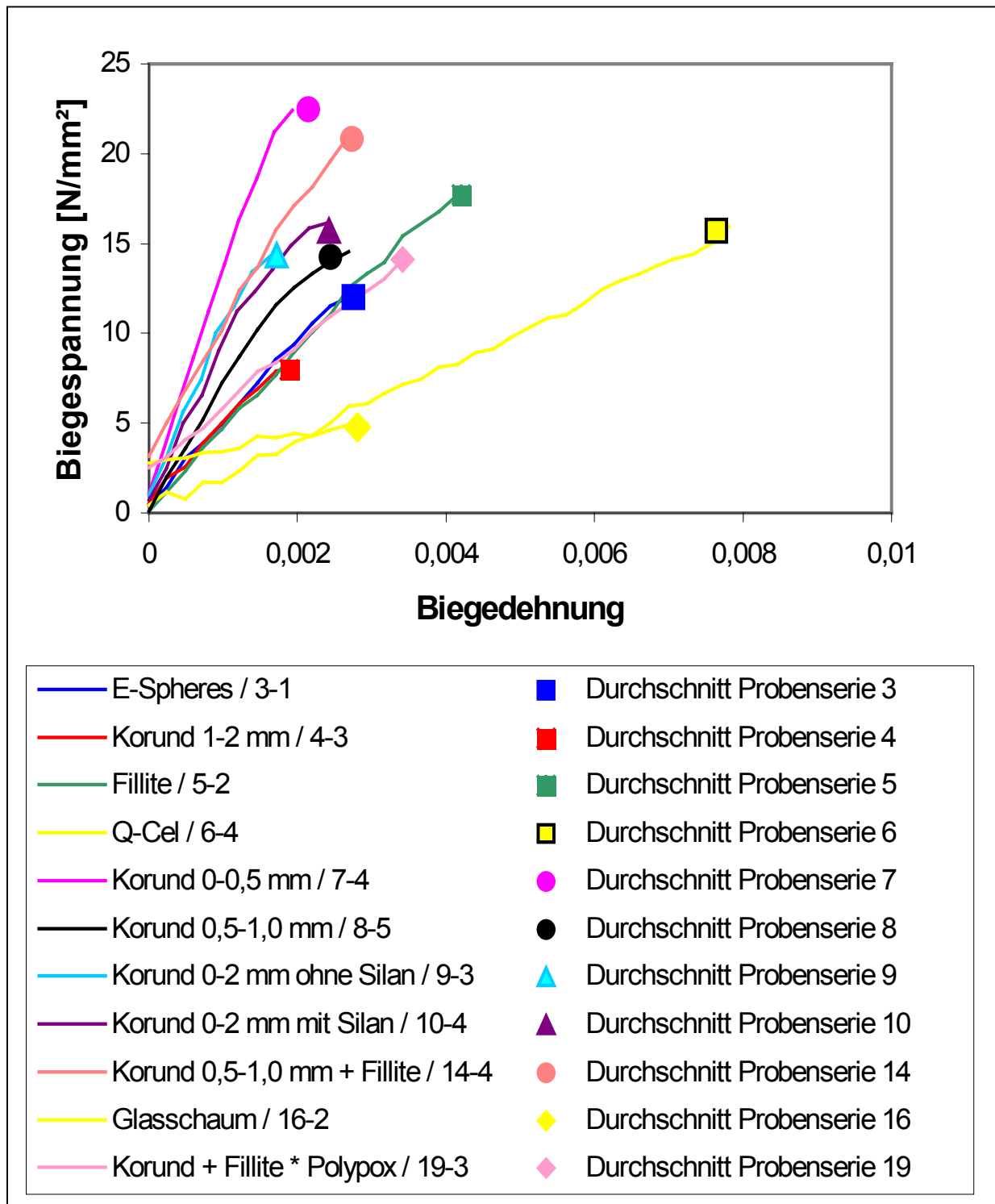


Bild 6.35: Biegespannungs-Dehnungs-Kurvenverläufe für eine Biegespannung unterhalb von 35 MPa

Das Biegespannungs-Dehnungs-Verhalten der Probenvariationen, deren Probekörper unterhalb von einer durchschnittlichen Biegespannung von 35 MPa durchgebrochen waren, ist im **Bild 6.35** aufgetragen. Die farbigen Quadrate, Kreise etc. markieren die Durchschnittswerte der entsprechenden Probenserien.

Die tendenziellen Unterschiede der HKK-Varianten, die schon bei den anderen Zug- oder Druckversuchen auftraten, sind auch bei den Biegeversuchen feststellbar. So zeigt die Probenvariation 6 (Q-Cel) im Vergleich zu den anderen HKK-Varianten eine größere Dehnbarkeit bei nur mäßiger Festigkeit. Die aus einer Mischung von Fillite und Korund-Kugeln unterschiedlicher Korngröße hergestellten Probekörper der Probenserie 14 zeigten ein besseres Verhalten gegenüber einer Biegung als die Probenvariationen 5 oder 8, die aus nur einer Kugelsorte bestanden. Die Gründe hierfür sind analog wie im **Abschnitt 4.3** zum **Bild 4.20** erläutert.

Die Probenserie 7 (Korund 0-0,5 mm) zeigt ein sprödes Verhalten und weist mit 22,5 MPa die höchste Biegefestigkeit von den HKK-Varianten, die mit keramischen Hohlkugeln gefüllt waren, auf.

Die Abweichungen zwischen den Literaturwerten (**Tab 2.3**) von syntaktischen Schäumen und den ermittelten Biegefestigkeitswerten von den HKK-Varianten liegen in den unterschiedlichen Zusammensetzungen und Prüfverfahren.

6.3.2.9 In-situ-Biegeversuche

Die ermittelten Biegefestigkeiten der In-situ-Proben im **Bild 6.36** waren kleiner als die in den **Bildern 6.34** und **6.35** ermittelten Biegefestigkeiten aufgrund der unterschiedlichen Probekörperabmessungen. Trotzdem sind auch bei den In-situ-Biegeversuchen die gleichen Unterschiede zwischen den einzelnen HKK-Varianten vorhanden, wie es bei den vorherigen mechanischen Untersuchungen festgestellt wurde.

Die In-situ-Biegeprobekörper waren nach Erreichen des Spannungsmaximums noch nicht komplett durchtrennt, deswegen sind im **Bild 6.36** allmählich abnehmende Biegespannungs-Biegedehnungs-Verläufe zu beobachten. Während die mit aluminosilikatkeramischen Hohlkugeln (Fillite) und die mit keramischen Mikrohohlkugeln (Korund 0-0,5 mm) gefüllten HKK-Varianten 5 und 7 bessere Festigkeitswerte als die mit borosilikatischen Hohlkugeln (Q-Cel 300) gefüllter Probenvariation 6 aufwiesen, waren die Dehnungswerte der Probenvariation 6 höher als bei den anderen HKK-Varianten. Grund dafür könnte in der unterschiedlichen Hohlkugelverteilung und einer besseren Haftung der Q-Cel-Kugeln zu der Matrix sein. Nähere Aussagen könnten nur nach den rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen des Schädigungsverlaufes und der Bruchflächen erfolgen.

Um das Schädigungsverhalten bei den In-situ-Proben beobachten zu können, waren die Seitenflächen in Richtung der einwirkenden Kraft geschliffen, poliert und für REM-Aufnahmen präpariert. **Bild 6.37** zeigt im Vergleich diese Oberfläche der Probenvariationen 6 (Q-Cel 300) und 14 (Korund+Fillite) im unbelasteten Zustand.

Nach Einsetzen der Belastung wurde eine stetige Zunahme der Biegespannungs-Dehnungs-Kurve im **Bild 6.36** der Probenvariationen beobachtet, während die Hohlkugeln bei genügender Haftung zu der Matrix von Mikroporen oder Mikrobeschädigungen Risse bekommen und plötzlich brechen (**Bilder 6.38.a** und **6.38.b**).

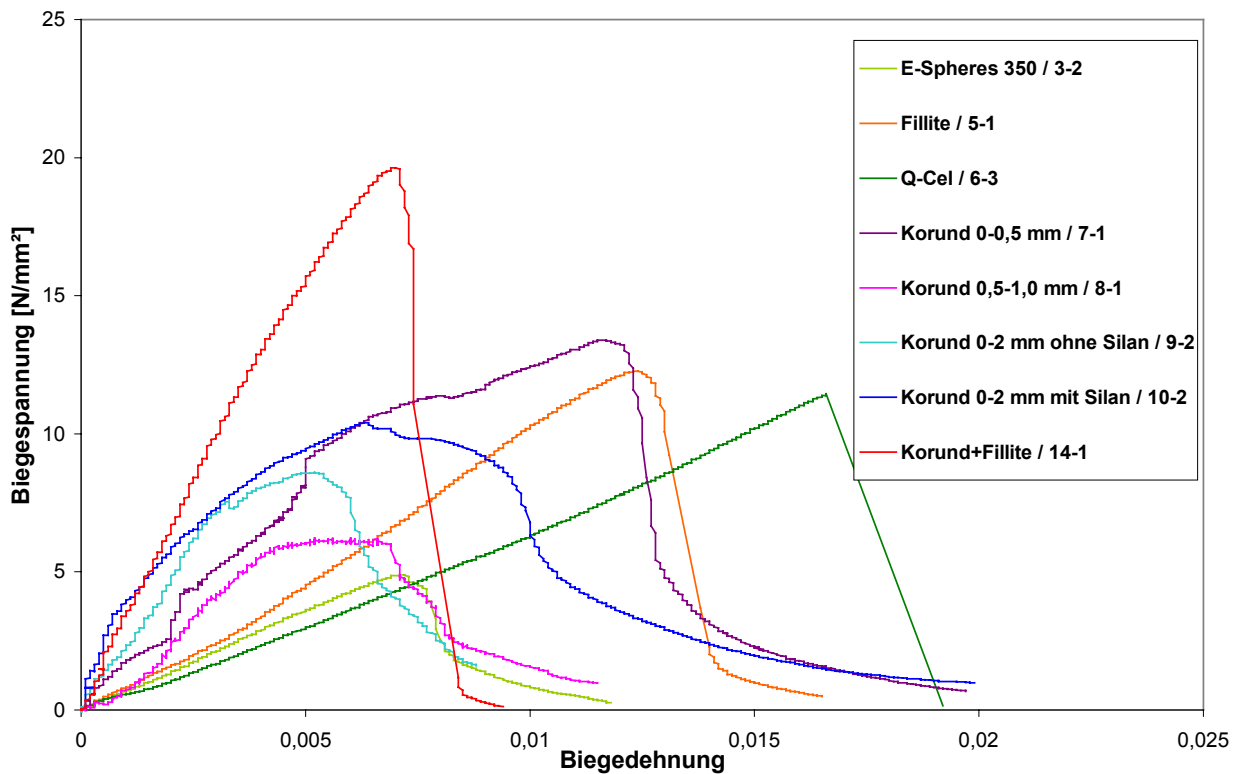
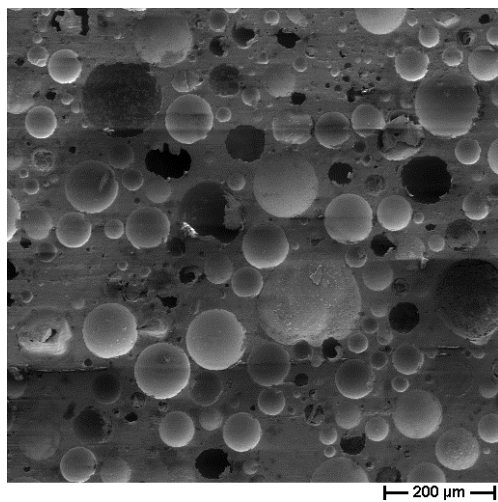
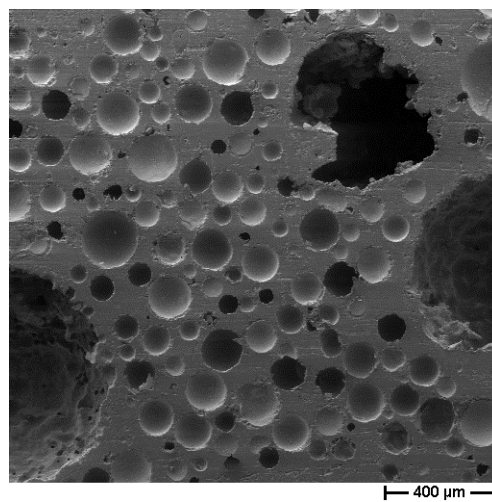


Bild 6.36: Spannungs-Dehnungs-Verläufe der In-situ-Biegeprobekörper



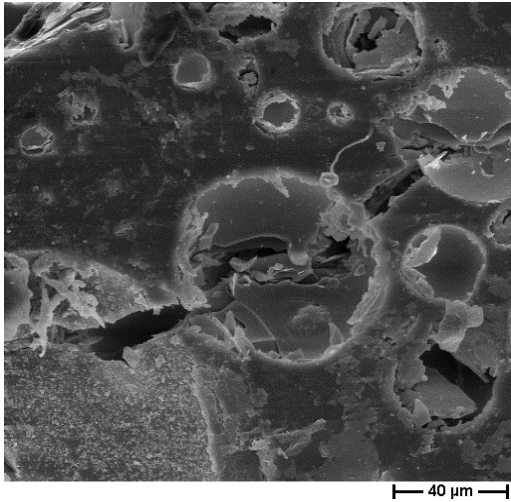
a) Probenvariation 6 (Q-Cel 300)



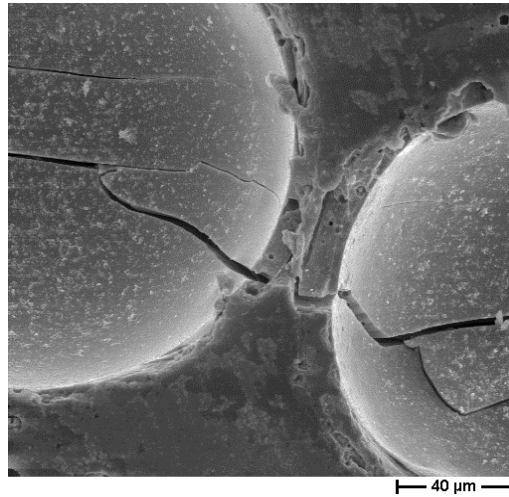
b) Probenvariation 14 (Fillite+Korund)

Bild 6.37: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen der präparierten Oberflächen der In-situ-Biegeproben im unbelasteten Zustand

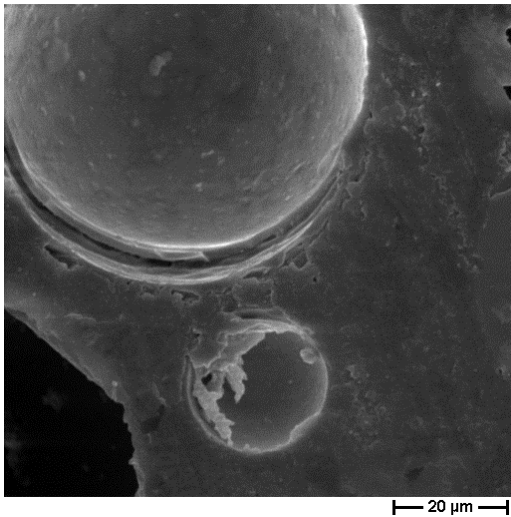
Ein anderer Schädigungsmechanismus aufgrund ungenügender Grenzflächenhaftung war auch vorhanden, wie die herausgerissenen Schalen aus der Matrix es demonstrieren (**Bildern 6.38.c und 6.38.d**).



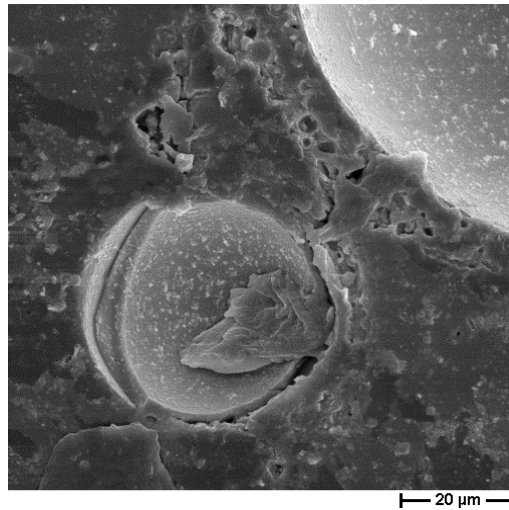
a) Probenvariation 6 (Q-Cel 300)



b) Probenvariation 14 (Fillite+Korund)



c) Probenvariation 6 (Q-Cel 300)



d) Probenvariation 14 (Fillite+Korund)

Bild 6.38: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen des Schädigungsverhaltens

Die rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen der Bruchflächen der Proben in den **Bildern 6.39** und **6.40** zeigen die Anordnung und Raumfüllung mit Kugeln und Epoxydharz sowie die Anbindung des Matrixmaterials an den Füllstoffen.

Die Haftung des Epoxydharzes ist auch von der Oberflächenbeschaffenheit der Kugeln abhängig. Bei der Probenvariation 3 (E-Spheres) wurde der Harz-Härter-Anteil aufgrund des schaumigen Charakters der Füllstoffe stärker in die Kugeln integriert, so dass Hohlräume und Clusterbildung zu verzeichnen sind (**Bild 6.39.a**).

Die größeren Durchmesserunterschiede der Fillite-Kugeln führen zu einer besseren Verteilung und Füllung mit Füllstoffen, so dass die Hohlräume reduziert werden konnten. Das mikrofraktografische **Bild 6.39.b** zeigt, dass der überwiegende Anteil der hohlen Kugeln gebrochen ist.

Ob bei der Probenvariation 6 (Q-Cel 300) im **Bild 6.39.c** die Q-Cel-Kugeln gebrochen waren oder ein Grenzflächenversagen auftrat, ist bei der 100-fachen Vergrößerung nicht erkennbar. Größe und Anzahl der Hohlräume sind gering, jedoch die Clusterbildung war unvermeidbar.

Die in einer Ebene liegenden Keramikugeln der Größe 0-0,5 mm (**Bild 6.39.d**) sind alle gebrochen. Aufgrund der größeren Durchmesserunterschiede sind im Hintergrund auch ungebrochene, jedoch gut benetzte Kugeln zu beobachten. Bei der Probenvariation 7 trat schließlich kein Grenzflächenversagen auf, sondern wurde der Bruch aufgrund des Versagens der Matrix und der gering belastbaren keramischen Kugeln ausgelöst. Durch die kristalline Struktur der keramischen Kugeln variieren deren Wanddicken und sie sind mit Poren behaftet (**Bilder 4.14** und **4.15**), so dass solche Stellen schneller zum Versagen führen. Deswegen ergeben sich auch unterschiedliche Höhen in den Bruchflächen, wie es **Bild 6.39.e** zeigt.

Die Packungsdichte der Probenvariation 14 (Fillite+Korund) wurde durch die unterschiedlichen Kornklassen der verwendeten Kugeln verbessert, die eine mengenmäßige Reduzierung der Fehlstellen zur Folge hatte (**Bild 6.39.f**). Darauf beruhen auch die verbesserten mechanischen Eigenschaften der Probenvariation 14 bei den experimentellen werkstofftechnischen Untersuchungen.

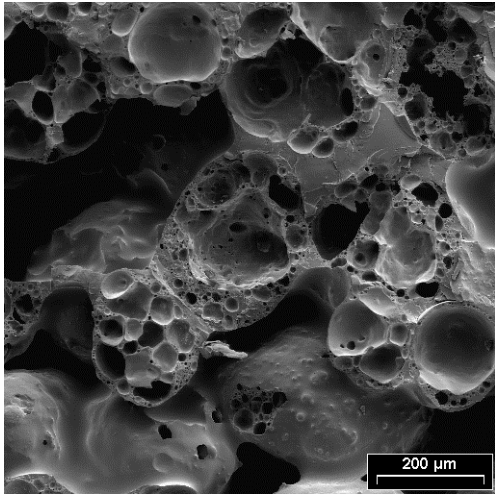
Die **Bilder 6.40.a bis f** zeigen noch detaillierter die Haftung an der Grenzfläche zwischen Kugeln und Harz-Matrix. **Bild 6.40.a** veranschaulicht, dass durch die extrem porösen E-Spheres die Harzmasse eindiffundierte. Die Kugeln sind zwar mit einer dünnen Schicht von Epoxydharz umhüllt, zwischen den Kugeln befinden sich viele Hohlräume.

Die mittig gebrochene Kugel im **Bild 6.40.b** weist zwar ein paar Poren in der Schale auf, im Inneren der Kugeln befinden sich keine Harzreste. Die gut mit Epoxydharz benetzten Fillite-Kugeln sind eng miteinander verbunden.

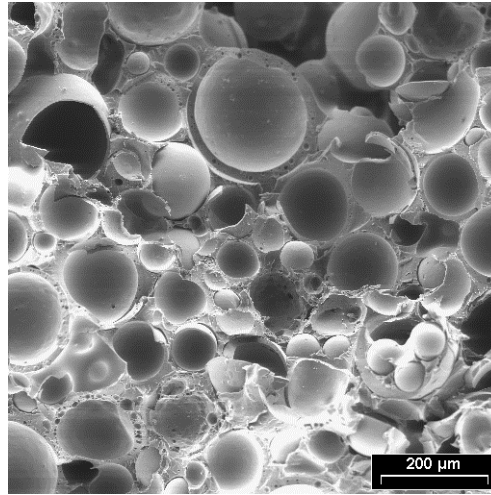
Im 500-fach vergrößerten mikrofraktografischen **Bild 6.40.c** stellt sich deutlicher heraus, dass die sehr dünnen Wanddicken der winzigen Q-Cel-Kugeln gebrochen sind, so dass kein Grenzflächenversagen auftrat. Die Harzmasse ist überall zwischen den Kugeln verteilt und weist reliefartige Stufen auf, was ein Kennzeichen eines spröden Bruches ist.

Die dünnen und porigen Stellen in den Wänden der keramischen Kugeln ergeben die Schwachstellen der Probenvariation 7, die der Ausgangspunkt für Risse sein können, falls nicht zuvor Epoxydharzmasse durch solche Stellen in das Kugellinnere eindiffundierte. So sind auch die Höhenunterschiede in der Bruchfläche erklärbar. Das **Bild 6.40.e** zeigt eine gebrochene keramische Hohlkugel, die mit Haftvermittlern (Silan) behalteter Harzmasse benetzt war.

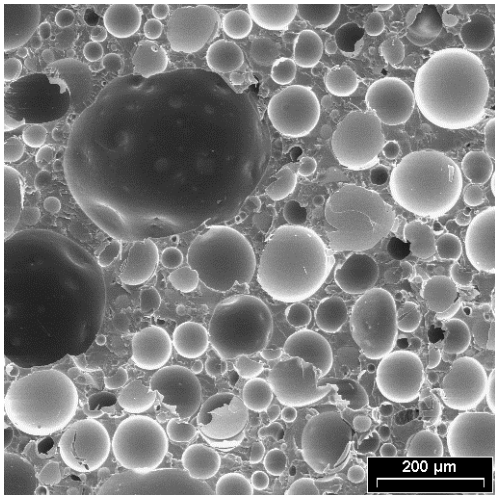
Im **Bild 6.40.f** ist ein Abschnitt der Bruchfläche der Probenvariation 14 wiedergegeben. Zwischen den beiden mit Epoxydharz benetzten keramischen Kugeln im **Bild 6.40.f** und mit silanisierendem Epoxydharz benetzten keramischen Kugeln im **Bild 6.40.e** sind keine Unterschiede erkennbar.



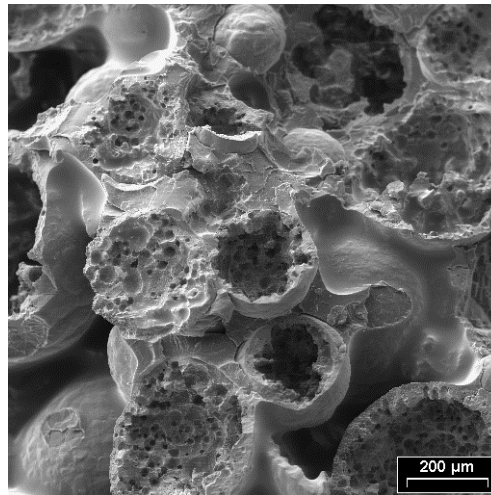
a) Probenvariation 3 (E-Spheres)



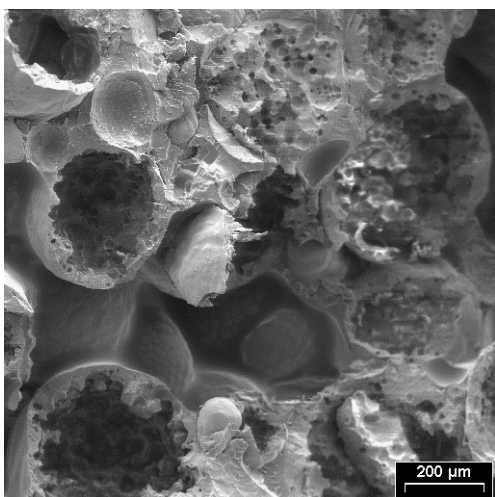
b) Probenvariation 5 (Fillite)



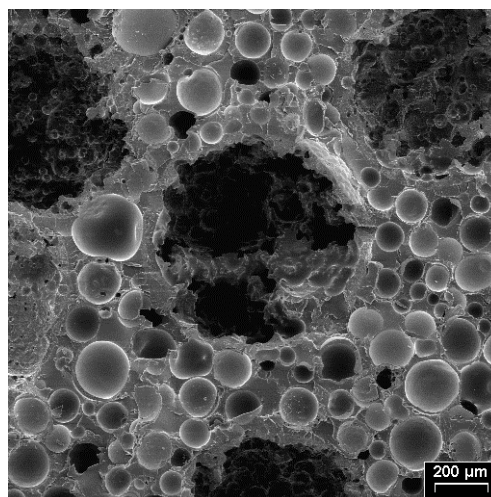
c) Probenvariation 6 (Q-Cel 300)



d) Probenvariation 7 (Korund 0-0,5 mm)

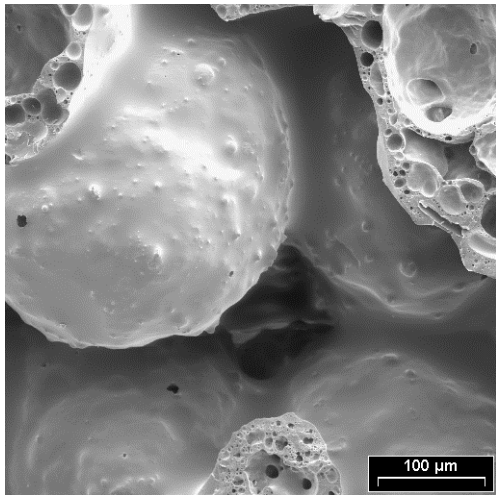


e) Probenvariation 9 (Korund 0-2 mm)

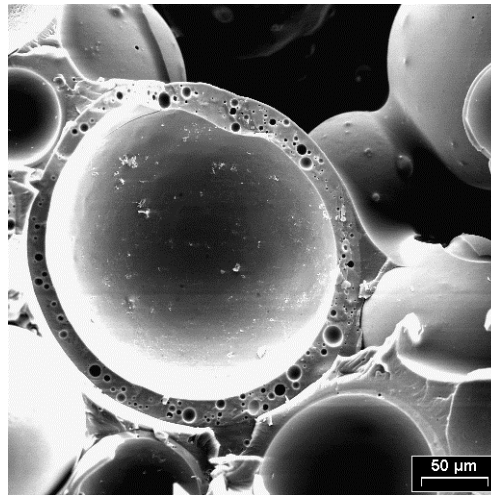


f) Probenvariation 14 (Fillite+Korund)

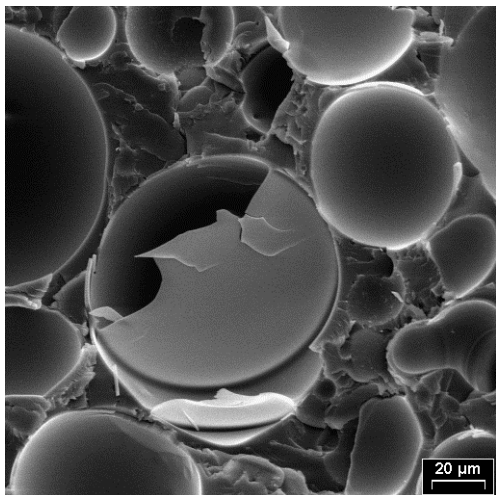
Bild 6.39: Rasterelektronenmikroskopische Übersichtsaufnahmen der Bruchflächen von einigen HKK-Varianten



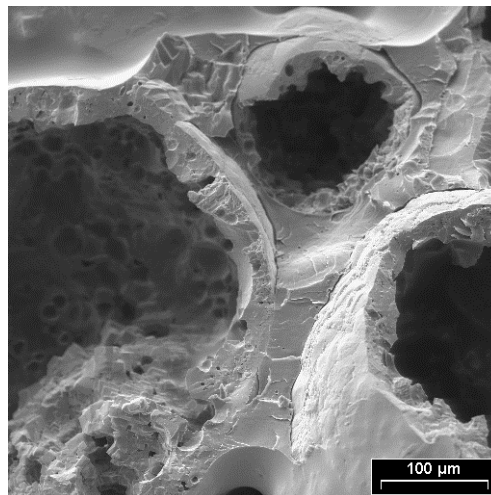
a) Probenvariation 3 (E-Spheres)



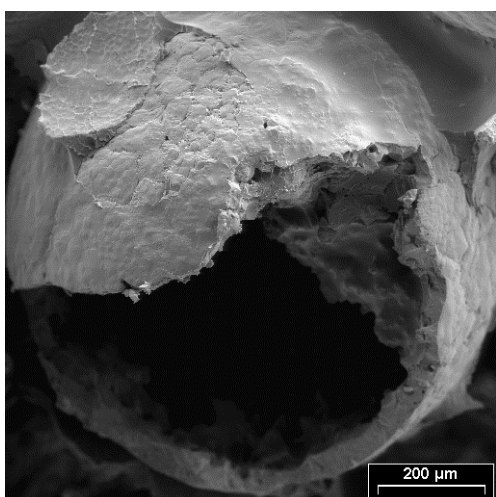
b) Probenvariation 5 (Fillite PG)



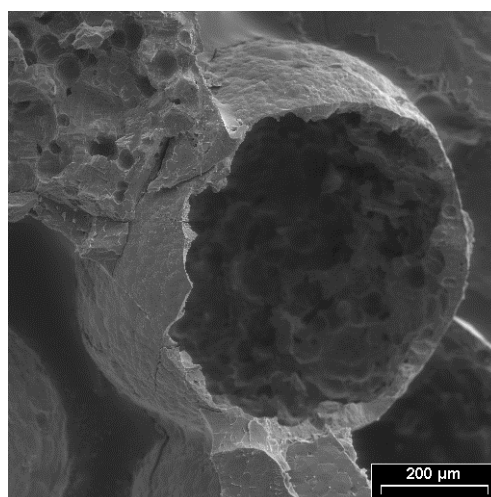
c) Probenvariation 6 (Q-Cel 300)



d) Probenvariation 7 (Korund 0-0,5 mm)



e) Probenvariation 10 (Korund 0-2mm)



f) Probenvariation 14 (Fillite+Korund)

Bild 6.40: *Detaillierte rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen der Bruchflächen von einigen HKK-Varianten*

6.3.3 Dynamisch - mechanische Eigenschaften

6.3.3.1 Dynamisch-Mechanische Analyse

Als Ergebnis der Dynamisch-mechanischen Analyse wurden die viskoelastischen Eigenschaften (Speichermodul G' , Verlustmodul G'' und Verlustfaktor $\tan \delta$) in Abhängigkeit von Prüffrequenz und Temperatur quantitativ ermittelt (**Bilder 6.41-6.42**) [220].

In **Bild 6.41.a** ist das viskoselastische Verhalten der Epoxydharz-Probe 1-9 dargestellt. Ähnlich der im **Abschnitt 6.1** beschriebenen DSC-Messungen können auch bei den DMA-Messungen verschiedene Bereiche in Abhängigkeit von der Temperatur unterschieden werden. Bei Raumtemperatur, im energieelastischen Zustand des Harzsystems sind die chemisch vernetzten Moleküle des Epoxydharzes unbeweglich, sodass sie den schwingend einwirkenden Belastungen kaum folgen können. Durch Zufuhr von Wärme setzen mikrobrownsche Bewegungen der Makromoleküle bei Erreichen des Glasübergangs ein, so dass pro Schwingungsbewegung das mögliche Maximum an innerer Reibung und nichtelastischer Verformung umgesetzt wird. Der Verlustmodul erreicht im Allgemeinen ein Maximum. Die DMA-Auswertung des Epoxydharzes in **Bild 6.41.a** ergab bei höheren Frequenzen zwei Peaks bei 59 °C und 64 °C, die auf unvollständig reagierte Moleküle hindeuten. Im Glasübergangsbereich fällt der Speichermodul ab. Der Einfluss der Frequenz auf den Speichermodul macht sich bei 20 Hz bemerkbar, wo zwei Peaktemperaturen von 58 °C und 64 °C auftreten. Da der Verlustfaktor durch Division von Verlustmodul und Speichermodul bestimmt wird, unterdrückt der Abfall des Speichermoduls zunächst den Anstieg des Verlustfaktors, so dass dieser sein Maximum erst bei höheren Temperaturen als der Verlustmodul erreicht [178]. Nach dem Glasübergangsbereich befinden sich die Makromoleküle im sogenannten entropieelastischen Zustand, wo die Elastizitätsmodule nur wenig von der Temperatur abhängen. Bemerkenswert ist in **Bild 6.41**, dass mit zunehmender Frequenz der Glasübergangsbereich zu höheren Temperaturen hin verschoben wird.

Erwartungsgemäß lagen die Peaktemperaturen des HKKs in **Bild 6.41.b** mit zunehmender Frequenz höher. Hier war auch kein homogener E' -Abfall zu beobachten, da zwei Peaks bei 47°C und 59°C auftraten. Die korrespondierende E'' -Effekte lagen bei 51°C (Schulter) und 62°C (Peak) bzw. die $\tan \delta$ -Effekte bei 51°C (Schulter) und 71°C (Peak).

In **Bild 6.42.a** ist die 1. Aufheizung der Mineralguss-Probe 11-5 bis 80°C bei 1 Hz ausgewertet. Als Glasübergang können E' -Onset bei 61°C, E'' -Peak bei 65°C und $\tan \delta$ bei 63°C herangezogen werden [220]. Die 2. Aufheizung ist im **Bild 6.42.b** dargestellt. Im Vergleich zu der 1. Aufheizung hat sich aufgrund der engmaschigeren Vernetzung der Glasübergangsbereich zu höheren Temperaturen hin in der 2. Aufheizung verschoben (E' -Onset bei 64°C, der E'' -Peak bei 74°C und der $\tan \delta$ -Peak bei 86°C) [220].

6 Ermittlung des Eigenschaftsprofils von Hohlkugelkomposit

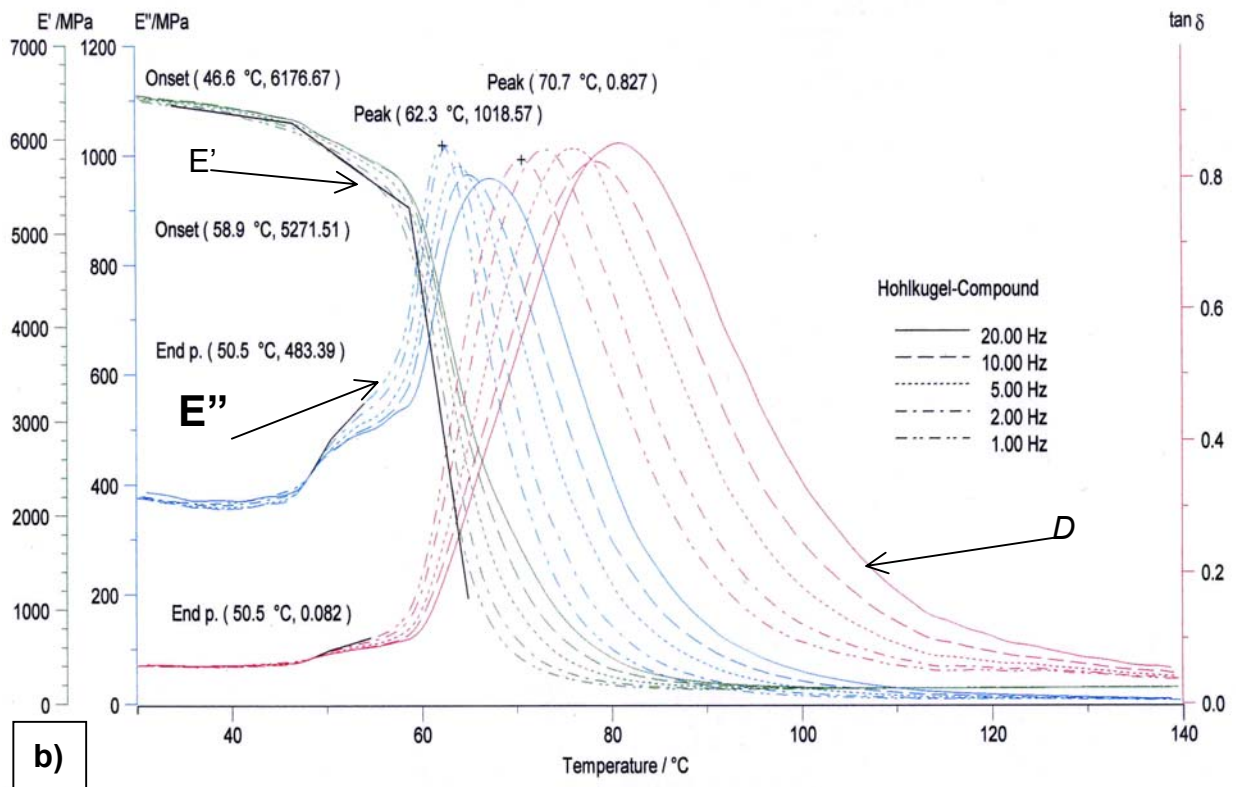
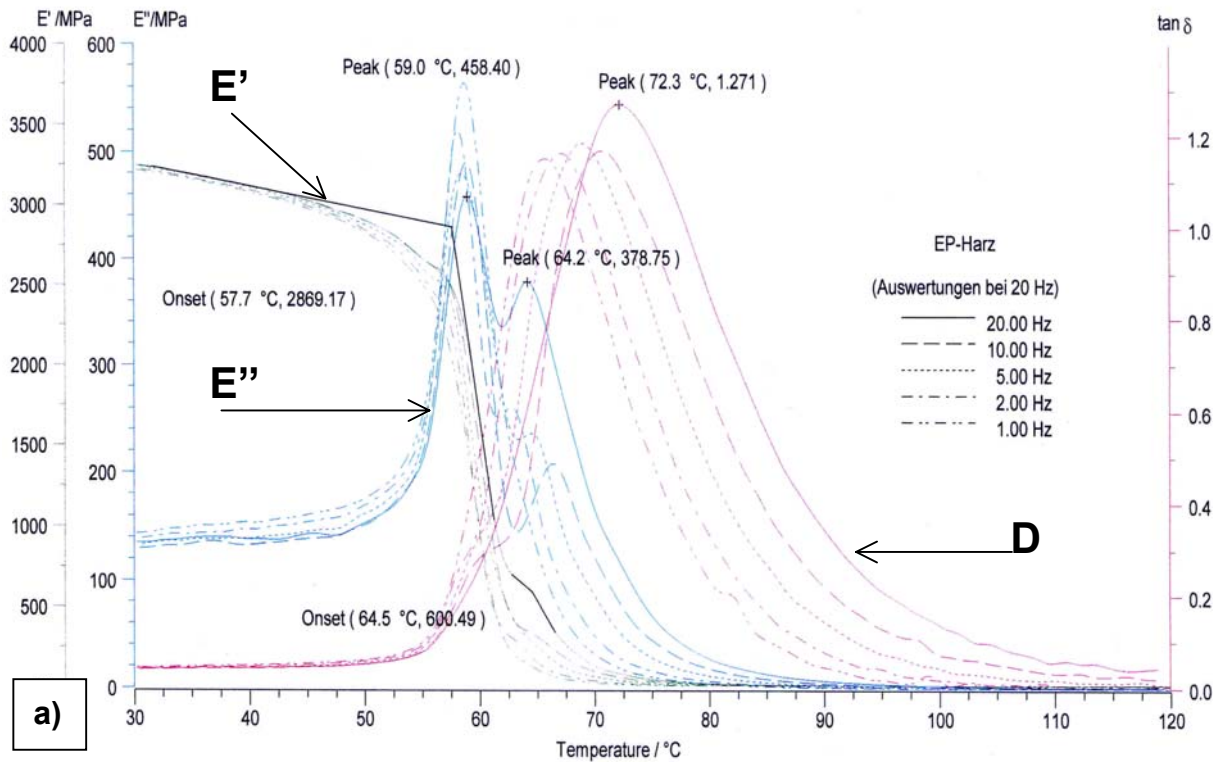


Bild 6.41: Speichermodul E' , Verlustmodul E'' und Verlustfaktor $\tan \delta$ in Abhängigkeit von der Temperatur und Frequenz, ermittelt durch DMA 242 (Netzsch) in 3-Punkt-Biegung in der 1. Aufheizung von **a)** Probenvariation 1 (EP-Harz Ebalta 120/TL) und **b)** Probenvariation 14 (Fillite+Korund)

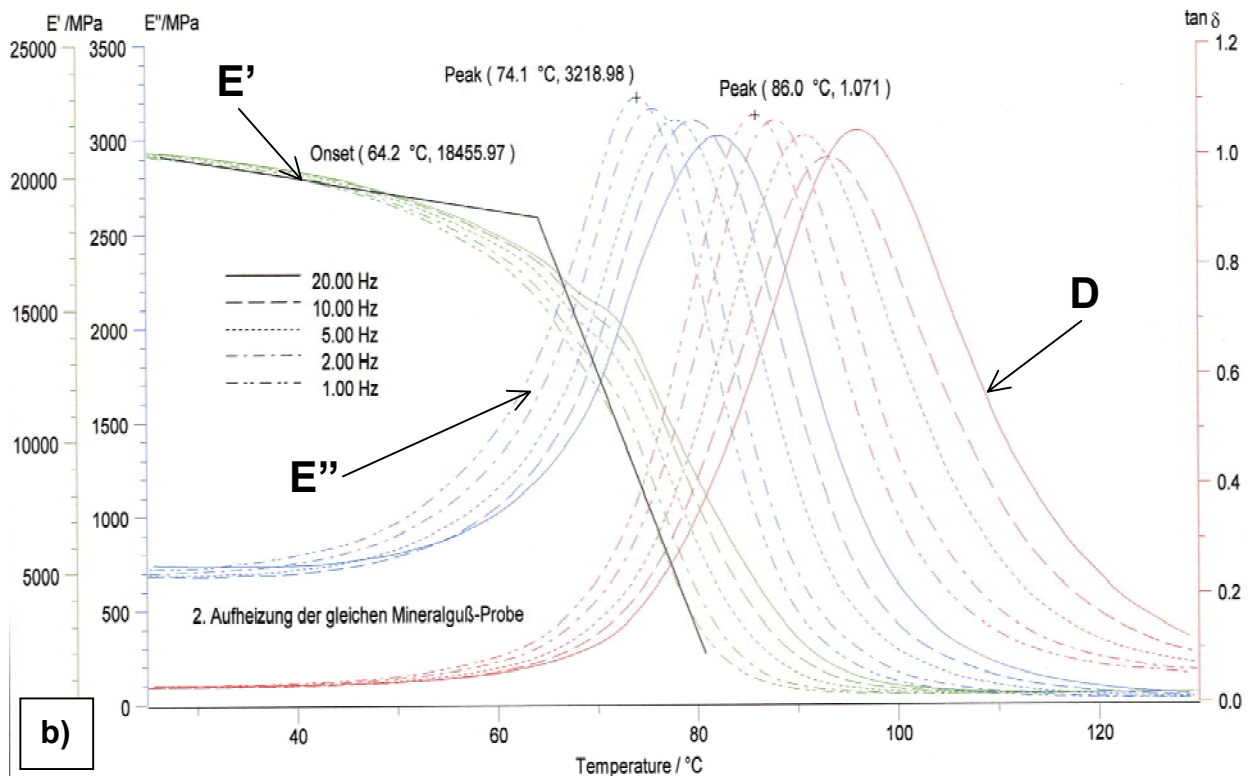
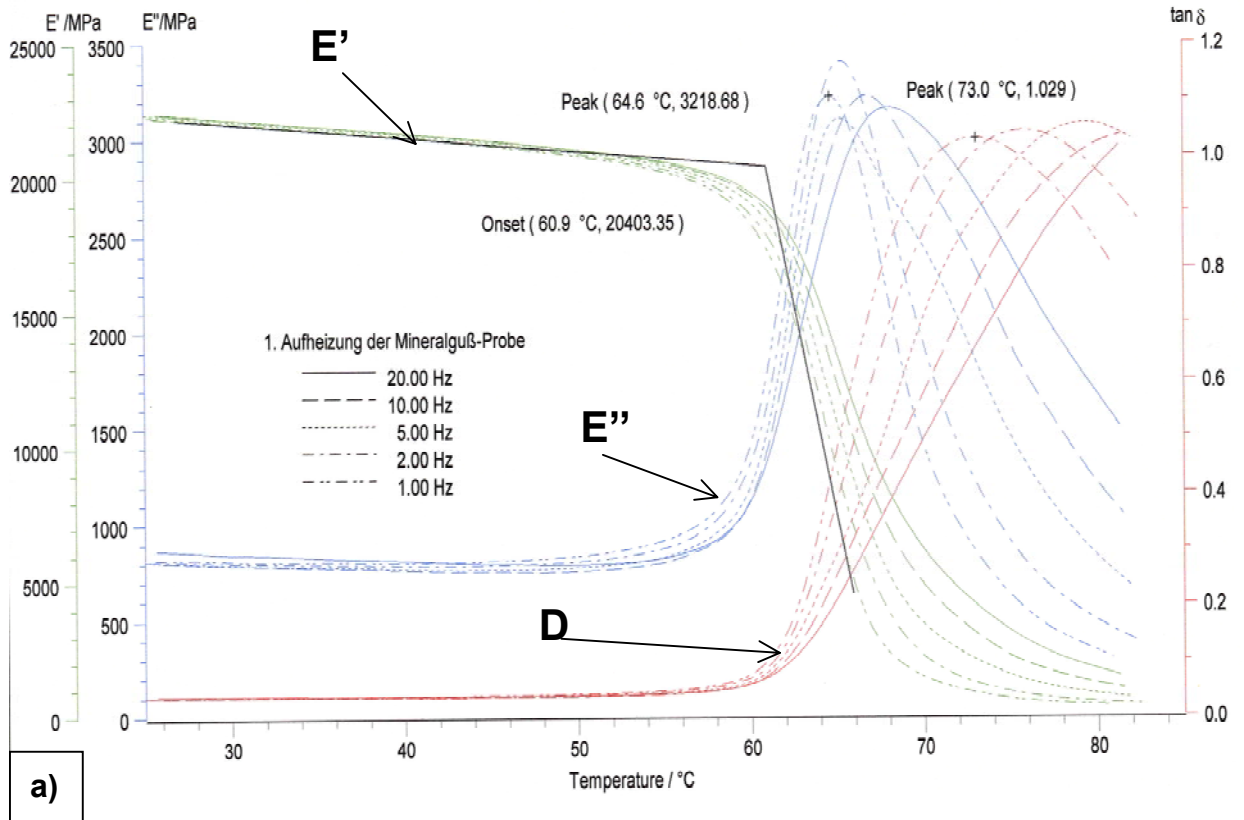


Bild 6.42: Speichermodul E' , Verlustmodul E'' und Verlustfaktor $\tan \delta$ in Abhängigkeit von der Temperatur und Frequenz, ermittelt durch DMA 242 (Netzsch) in 3-Punkt-Biegung von Probenvariation 11 (Mineralguss) in der a) 1. Aufheizung und b) 2. Aufheizung

7 Bewertung der werkstoffkundlichen Untersuchungen

Die werkstofftechnischen Untersuchungen zur Charakterisierung des Eigenschaftsprofils von HKK wurden mittels verschiedener Prüfeinrichtungen am Institut für Fertigungstechnik und Qualitätssicherung und am Institut für Werkstofftechnik und Werkstoffprüfung der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, am Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik der Technischen Universität Dresden, am Landesmaterialprüfamt des Landes Sachsen-Anhalt in Magdeburg und der Firma Netzsch in Selb durchgeführt, so dass eine breite Palette der thermischen und mechanischen Kennwerte experimentell und unabhängig voneinander ermittelt werden konnte.

Es standen 2 Harz-Härter-Systeme (kalthärtend und warmhärtend), 9 unterschiedliche Hohlkugeltypen verschiedener Zusammensetzung, Kornklassen, Schüttdichten und Druckfestigkeiten, 3 Vollglaskugeln gleicher Zusammensetzung mit verschiedener Körnung sowie 2 Faserarten (Glas- und Kohlebänder) zur Verfügung, die zu 27 unterschiedlichen Probenvariationen geführt haben. Die Eigenschaften der verwendeten Füllstoffe und Fasermaterialien wurden im **Kapitel 4** anhand der von den Lieferanten angegebenen Kenndaten beschrieben und mit metallografischen und rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen einzelner Kugeltypen ergänzt.

Die Eigenschaften der Harz-Härter-Systeme waren nicht vollständig bekannt, da die Hersteller und Lieferanten keine einheitlichen Daten der Werkstoffeigenschaften über ihre Produkte lieferten. Deswegen mussten die Eigenschaften der Harz-Härter-Systeme zusammen mit den HKK-Varianten ermittelt werden und dienten als Referenzwerte.

Die ermittelten thermischen und mechanischen Eigenschaften der in dieser Arbeit dargestellten HKK-Varianten sind in der **Tabelle 7.1** zusammengefasst. Aufgrund der Zusammensetzung und Kornverteilung der verwendeten Ausgangswerkstoffe wurden die untersuchten Probenvariationen in verschiedenen Werkstoffgruppen aufgeteilt.

Für die Ermittlung der thermischen und mechanischen Eigenschaften von HKK wurden verschiedene Prüftechniken herangezogen, beginnend von den mechanischen Untersuchungsmethoden bis hin zu den Prüfmethoden der Thermischen Analyse.

Die DSC-Analysemethode erlaubten nicht nur die Untersuchung des thermischen Verhaltens hinsichtlich Glasübergangsbereich, Aushärtung oder Beginn der thermischen Zersetzung von Reaktionsharzen, sondern erwies sich für die Ermittlung der thermischen Eigenschaften von HKK als geeignete Prüfungsmethode (**Bilder 6.1-6.4**). Der Aushärtegrad kennzeichnet auch die Lage von T_g als eine der wichtigsten Charakterisierungsmerkmale von Duroplasten und somit auch von HKK [222, 223]. Dies kann am schnellsten und mit geringem stofflichen Aufwand mit der DSC-Methode erkannt werden. Das **Bild 6.3** zeigt die Lage von T_g in der 1. und 2. Aufheizung des warmhärtenden Epoxydharzes Ebalta 120/TL. In der 2. Aufheizung treten keine chemische Reaktionen manifestierend durch exotherme Peaks im Kurvenverlauf auf, d.h. das System war vollständig ausgehärtet. Mit höher werdender Aushärtung verschieben sich die T_g

zu höheren Temperaturen und die Steifigkeit und die chemische Beständigkeit verbessern sich [178].

Mit der DSC-Technik konnten auch die spezifischen Wärmekapazitätswerte sowohl von den Ausgangswerkstoffen, Harz-Härter-Systemen und Füllstoffen, die bisher als unbekannt galten, als auch von den HKK-Varianten experimentell ermittelt werden. In der **Tabelle 7.1** sind die ermittelten c_p -Werte von HKK und Mineralguss zusammengefasst. Bei Vorhandensein der c_p -Werte der Ausgangswerkstoffe wurden dann nach Gleichung (15) die c_p -Werte nach Gewichtsanteilen berechnet und dargestellt. Die Berechnung der c_p -Werte nach Gewichtsanteilen hat nach Literaturangaben bis zu einem 65%-igen Gewichtsanteil der Füllstoffe geführt [210, 219]. Die Berechnungen der c_p -Werte von HKK nach Volumenanteilen ergaben bessere Näherungen an die experimentell ermittelten c_p -Werte (**Bilder 6.13-6.15**).

Die Änderung des Aushärtegrades von HKK macht sich auch im Verlauf der Längenänderungskurve bemerkbar, die mit TMA registriert wurde. Vor allem auf die Längenausdehnungskoeffizienten unterhalb der Glasübergangstemperatur (α_1) und auf die Lage der Glasübergangstemperatur (T_g) hat der Aushärtegrad einen Einfluss. **Bild 6.7** beweist, dass 10 Tage nach Fertigung eines Teiles aus Reaktionsharz immer noch chemische Reaktionen zwischen den Reaktionspartnern Harz und Härter stattfinden, so dass für die Prüfung von kalthärtenden HKK-Teilen eine längere Lagerzeit notwendig ist. Eine Reduzierung der Lagerzeit könnte durch Tempern erreicht werden. Die Ermittlung der Kennwerte von getemperten HKK-Varianten sollte das Ziel weiterer Forschungsarbeiten sein.

Die α_1 - und T_g -Werte der HKK-Varianten, die in der **Tabelle 6.1** zusammengefasst sind, waren in der 1. Aufheizung nach 15-20 Tagen ermittelt worden, wonach nur geringe Änderungen der Eigenschaften und Verschiebungen der T_g registriert wurden. Durch Vergleich der α_1 -Werte wird deutlich, dass die Probenvariationen 5 (Fillite) und 6 (Q-Cel) höhere α_1 -Werte besitzen (**Tabelle 7.1**). Die Ausgangswerkstoffe dieser Probenvariationen weisen auch niedrigere Schmelztemperaturen auf (**Tabelle 4.5**). Höhere EP-Harzanteile bei HKK führen zu höheren Wärmedehnzahlen, wie die α_1 -Werte der Probenvariation 14b im Vergleich zu 14 es bestätigen.

Die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit erfolgte nach dem Prinzip des stationären Verfahrens mit einem Zweiplattengerät. Die Wärmeleitfähigkeitswerte von 0,33 W/(m K) der Probenvariation 14 ergaben, dass diese Werkstoffe die Wärme nur relativ langsam leiten und sie als Wärmeisolatoren Anwendung finden können.

Mit der DMA-Methode können einerseits das thermische Verhalten und andererseits die viskoelastischen Kenngrößen (Speichermodul E' , Verlustmodul E'' , $\tan \delta$) in Abhängigkeit von der Temperatur und bei verschiedenen Prüffrequenzen sowohl von Duroplasten wie auch von HKK und Mineralguss ermittelt werden. Obwohl nur eine limitierte Anzahl von Messungen durchgeführt werden konnte, wurden die dynamischen Steifigkeitswerte für Epoxydharz, HKK und Mineralguss definiert.

Tabelle 7.1: Ergebnisse der thermischen und mechanischen Untersuchungen von Hohlkugelkomposit-Werkstoffen

Werkstoffgruppe	Pr.	Bestandteile	Kennwerte	ρ g/cm ³	σ_Z MPa	E_Z MPa	σ_D MPa	E_D MPa	σ_B MPa	α_1 10 ⁻⁶ K ⁻¹
Harz-Härter- Systeme	1	Harz-Härter-System Ebalta 120/TL		1,15	10,8	3495	>100	3960	47,1	70,9
	2	Harz-Härter-System Polypox		1,05	12,6	-	-	-	45,6	-
Mikrohohl- kugeln- komposite	3	E-Spheres 350		0,63	4,1	3793	9,3	4560	12,1	22,4
	5	Fillite PG		0,65	6,7	4057	28,7	4108	17,7	34,5
	6	Q Cel 300		0,55	5,9	-	30,5	-	15,7	46,1
	6b	Q Cel 6042 S		0,54	-	2629	-	3150	-	-
	7	Korund 0-0,5 mm		1,34	8,4	-	22,7	-	22,5	-
	22	Dualite M 6050 AE		0,38	-	538	7,7	542	-	-
Makrohohl- kugeln- komposite	4	Korund 1-2 mm		0,87	-	-	-	-	7,9	-
	8	Korund 0,5-1 mm		1,01	3,8	-	7,9	-	14,3	-
Mikro- und Makrohohl- kugeln- komposite	16	Glasschaum 1-2 mm		0,49	1,3	1847	-	-	4,8	-
	9	Korund 0-2 mm (ohne Silan)		1,16	5,8	8680	17,6	10147	14,3	-
	10	Korund 0-2 mm (mit Silan)		1,18	6,5	-	15,9	-	15,7	-
	14	Korund 0,5-1 mm + Fillite		0,9	8,6	6782	49,6	8575	20,8	22,3
	14b	Korund 0,5-1 mm + Fillite		0,95	12,5	7860	63,3	8374	24,3	33,1
	14c	Korund 0,5-1 mm + Fillite		0,97	13,8	-	-	7992	-	48,6
	19	Korund 0,5-1 mm + Fillite mit Polypox		0,78	-	-	-	-	14,1	-
HKK+Fasern	12	Fillite mit CFK n. laminiert		0,72	-	-	-	-	86,2	-
	13	Korund 0,5-1mm + CFK-n. laminiert		1	-	-	-	-	95,2	-
	15	Korund 0,5-1mm + Fillite+CFK		0,86	-	-	-	-	97,2	-
	17	E-Spheres+GFK		0,76	-	-	-	-	58,9	-
	19	Korund 0,5-1 mm +Fillite + GFK		1,05	-	-	-	-	74,3	-
	20	Korund 0,5-1 mm + Fillite + CFK mitPolypox		1,05	-	-	-	-	57,2	-
Massiv Kugeln- komposite	2	Vollgalskugeln (Spheriglass 75-850 μ m)		1,91	-	19641	>100	24384	60,8	21,9
	2b	Vollglaskugeln (Spheriglass 75-150 μ m)		1,79	-	15248	-	-	-	-
Mineralguss	11	Quarzitische Steine und Sand		1,98	17,8	25674	<100	27325	36,4	23,5

Die E' -Werte bei Raumtemperatur (**Bilder 6.41-6.44**) korrespondieren mit den E -Modulwerten, die durch andere mechanische Prüfverfahren ermittelt wurden. Ein weiterer Vorteil der DMA-Methode besteht darin, dass nur kleine Probekörperabmessungen notwendig sind, um genaue Werkstoffkennwerte von HKK zu erhalten.

Für die Festlegung der Abmessungen der DMA-Probekörper wie auch der Probekörper für die Zug-, Druck- und Biegeversuche wurden die Empfehlungen der DIN 51290 berücksichtigt, die vorschreibt, dass die kleinsten Abmessungen mindestens den dreifachen Wert des größten Korndurchmessers nicht unterschreiten sollen [30].

Bei der Auswahl der Dimensionen der Proben für Zug-, Druck- und Biegeversuche wurden die Vorschriften der deutschen Normen für die Prüfung von Kunststoffen, Keramik, Glas, Schaumstoffen und faserverstärkten Kunststoffen beachtet (**Abschnitt 5.2**).

Aus den mechanischen Untersuchungsergebnissen konnten Rückschlüsse über den Einfluss der Art des Harz-Härter-Systems, der Art der Füllstoffe und über den Anteil von Füllstoffen gezogen werden.

Die mechanischen Eigenschaften der beiden Harz-Härter-Systeme, kalthärtend (Ebalta 120/TL) und warmhärtend (UPPC), unterscheiden sich in nur wenigen Prozenten voneinander (**Bilder 6.20** und **6.34**). Die Verarbeitung des warmhärtenden Systems erwies sich jedoch zur Herstellung von HKK als ungeeignet, da während der Warmhärtung die Volumenzunahme der Gase erfolgte, die durch zu schnelles Härten im Werkstoff erstarrt waren und der Werkstoff insgesamt poröser wurde. Das ist der Grund der schlechteren Festigkeitswerte der mit dem warmhärtenden System gefertigten HKK-Probenvierungen 5 und 5b im **Bild 6.28**, 14 und 19 im **Bild 6.35** sowie 15 und 20 im **Bild 6.34**.

Die Füllstoffe üben durch ihre Art hinsichtlich Zusammensetzung, Korngröße, Dichte, Schüttgewicht, Festigkeit, Struktur, Oberflächenbeschaffenheit, Oberflächenspannung u.a. einen Einfluss auf die Eigenschaften von HKK aus. Aus der Literatur ist bekannt, dass zur Gewährleistung einer guten Haftung die Oberflächenspannungen der Harzsysteme kleiner als die der Füllstoffe sein sollten [38, 243]. Aus den Ergebnissen der mechanischen Prüfungen, die in der **Tabelle 7.1** zusammengefasst sind, und aus den rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen des Schädigungsverlaufes und der Bruchflächen (**Abschnitt 6.3.2.9**) können Rückschlüsse über den Einfluss der verschiedenen Füllstoffvarianten gezogen werden.

Gestiegene mechanische Kennwerte bei den Probenvariationen 5 und 6 waren wie folgt zu verzeichnen: Druckfestigkeit (σ_D) > Biegefestigkeit (σ_B) > Zugfestigkeit (σ_Z). Von den mit anorganischen Mikrohohlkugeln gefüllten HKK-Varianten wiesen die Probenvariationen 6 (Q-Cel) zwar die kleinsten Dichtewerte mit nur $0,55 \text{ g/cm}^3$ auf, aber die Probenvariation 5 (Fillite) zeigte deutlich bessere mechanische Eigenschaften. Der Grund der besseren Festigkeitswerte der mit Fillite gefüllten Probenvariationen liegt in der größeren Wanddicke von über $10 \mu\text{m}$ der Fillite-Kugeln im Vergleich zu der dünnen Schale der Q-Cel 300 Kugeln, die unter $2 \mu\text{m}$ liegt, wie es aus den REM Aufnahmen

der **Bildern 4.9** und **4.6** zu entnehmen ist. Außerdem traten bei der Probe 6 (Q-Cel) Dispersionsprobleme bei der Verarbeitung auf, die zu Koagulationen von Harz-Härter und Kugeln geführt haben (**Bild 6.39.c**).

Die geringen Festigkeitswerte der Probenvariation 3 (E-Spheres) im Vergleich zu den Festigkeitswerten der Probenvariation 5 und 6 sind auf die poröse Struktur der E-Sphere-Kugeln zurückzuführen (**Bilder 4.10, 4.11** und **6.39.a**). Trotz einer verbesserten mechanischen Verankerung und Haftung wiesen die E-Spheres (**Bild 5.40.a**) unterschiedliche Strukturen auf.

Die Probenvariation 22 (Dualite) hatte zwar die geringste Dichte, die spezifischen Kennwerte anderer HKK konnten nicht übertroffen werden.

Je kleiner die Korngröße der keramischen Kugeln war, desto dichtere HKK-Varianten mit besseren Eigenschaften konnten erzielt werden (Vergleich Probenvariation 7 und 8). Bei der Probenvariation 9 (Korund 0-2 mm) waren die Hohlräume zwischen den größeren Kugeln mit den kleineren Kugeln besser als bei der Probenvariation 8 (Korund 0,5-1,0 mm) ausgefüllt. Die Festigkeitswerte der Probenvariation 9 (Korund 0-2 mm) lagen auch zwischen den Festigkeitswerten der Probenvariation 7 (Korund 0-0,5 mm) und der Probenvariation 8 (Korund 0,5-1 mm).

Aus der Literatur ist bekannt, dass eine Steigerung der Festigkeitswerte durch Beschichtung der Füllstoffe mit Haftvermittlern (Silane) erzielt werden kann. Da sich unter Laborbedingungen eine Silanisierung der winzigen Kugeln als unmöglich erwies, wurden die Silane dem Harz-Härter-Gemisch zugesetzt. In diesem Fall war der Effekt der Silanisierung der HKK-Proben 10 im Vergleich zu den unsilanisierten Proben 9 unwesentlich, wie die Ergebnisse der mechanischen Untersuchungen demonstrieren.

Die bessere Raumfüllung mit Füllstoffen, aufgrund der verschiedenen Kornfraktionen mit besserer Kornverteilung, führte bei Probenvariation 14, bestehend aus 40 Vol.-% Keramikkugeln 0,5-1 mm und 60 Vol.-% Fillite-Kugeln, zur Steigerung der Festigkeit [158, 222, 223, 225]. Der höhere Zusatz von Harz-Härter bei den Probenvariationen 14b und 14c bewirkt eine weitere Verbesserung der Festigkeits-, nicht aber der Druckelastizitätswerte. Aufgrund der guten mechanischen und spezifischen Eigenschaften wird die Probenvariation 14 als Konstruktionswerkstoff zur Herstellung von Werkzeugmaschinenbauteilen empfohlen.

Die Verstärkung mit Fasern kann zu einer erheblichen Steigerung der mechanischen Eigenschaften führen (**Abschnitt 6.3.2.8**) [226]. Die HKK-Werkstoffe werden, wie Mineralguss, im Verbund mit metallischen oder faserigen Werkstoffen an Stellen größerer Belastung verstärkt.

Die höheren spezifischen Eigenschaften der Probenvariation 2 sind auf die verbesserte Festigkeit und Haftfestigkeit der beschichteten Kugeln zurückzuführen.

Aufgrund der besseren Raumfüllung der aus 4 verschiedenen Kornklassen zusammengesetzten Mineralgussprobe 11 sind bessere spezifische Steifigkeiten als bei HKK aufgetreten (**Bild 6.23**), jedoch die spezifische Zugfestigkeit von HKK war größer als die vom Mineralguss (**Bild 6.22**). Trotz veränderten Probekörpergeometrien als die in

DIN 51290 empfohlenen, ergaben die ermittelten Kennwerte von Mineralguss vergleichbare Werte mit der Literatur [32, 34, 43].

Für die Beurteilung eines Werkstoffes für Leichtbaukonstruktionen werden wie im Abschnitt **6.2.2.2**, **6.2.2.3** und **6.2.2.6** dargestellt, die Festigkeits- bzw. Elastizitätsmodulen auf die Dichte bezogen. Dabei stellte es sich heraus, dass die Probenvariationen 5, 14 und 14b eine höhere spezifische Zugfestigkeit als Mineralguss aufweisen (**Bild 6.24**), während die spezifischen Elastizitätsmodule der Probenvariation 14 von HKK die höchsten sind. Die Füllstoffe verbessern demnach die Steifigkeit von HKK, während die Harz-Matrix mehr zur Steigerung der Festigkeit beiträgt.

Die Eignung eines Werkstoffes für bestimmte Konstruktionen unterscheidet sich von der Geometrie eines Bauteils und von der Beanspruchungsart. Im **Abschnitt 2.3** wurde auf zwei Belastungsfälle unter Knickung und Biegung von Rechteckprofilen bzw. Platten hingewiesen. **Bild 7.1** stellt die Knickgütezahlen von Rechteckprofilen und die Beulgütezahlen von Platten von HKK-Werkstoffen im Vergleich zu einigen ausgewählten metallischen sowie anorganisch-nichtmetallischen Werkstoffen dar.

Die Knickgütezahlen, die durch Balken grafisch dargestellt sind, liegen bei den meisten HKK-Werkstoffen, bei Porzellan, bei Gläsern sowie bei syntaktischen Schäumen über einem Wert von $20 \text{ MPa}^{1/3} \text{ cm}^3/\text{g}$.

Von den Konstruktionswerkstoffen des Bauwesens weist Mineralguss bessere Verformungsstabilität gegen Knicken im Vergleich zu Zementbeton auf.

Die Glasfasern und vor allem die Kohlenstofffasern in Längsrichtung besitzen gute Verformungsstabilität, jedoch müssen sie immer in Verbundkonstruktionen verwendet werden, z.B. als kohlenstofffaserverstärkte Werkstoffe (CFK), wobei auf die Richtungsabhängigkeit geachtet werden muss, damit die Knickgütezahlen dann im moderateren Bereich liegen.

Die klassischen Konstruktionswerkstoffe Stahl und Gusswerkstoffe weisen hinsichtlich einer Knickbelastung eines Rechteckträgers die geringste Tragfähigkeit auf. Die Nicht-eisenmetalle Mg, Ti, Al und deren Legierungen zeigen geringere Leichtbaueignung in dieser Hinsicht als die HKK-Werkstoffe (**Bild 7.1**).

Von den Metallschäumen weist nur Aluminiumschaum aus AL 99,5 bessere Knickgütezahlen auf. Von technischer Bedeutung sind nicht die reinen Metalle, sondern deren Legierungen.

Die Knickgütezahlen der syntaktischen Schäume aus der Literatur [109] nähern sich denen von HKK-Werkstoffen an.

Die Knickgütezahlen metallischer Hohlkugeln mit einer Körnung von 1,89 mm bleiben im Bereich der anderen eisenhaltigen Werkstoffe.

Polyamid (PA) eignet sich den Auswertungen nach weniger für steife Konstruktionen. Deswegen ist es ein vielversprechender Werkstoff für elastische, flexible und leichte Konstruktionen.

Die Beulgütezahlen, die durch schwarze Rhomboedern im **Bild 7.1** gekennzeichnet sind, sind für biegesteife Platten geeignet.

Die Beulgütezahlen der meisten HKK-Werkstoffe sind größer als die von Aluminiumlegierungen, nur die Probenvariation 22 mit Dualite-Füllung zeigt kleinere Beulgütezahlen aufgrund der Komprimierbarkeit dieser Kugel-Typen.

Die Konstruktionen aus Mineralguss sind den Auswertungen nach sehr stabil gegen Biegebelastung.

Die nichtmetallischen-anorganischen Stoffe, aus denen auch die Ausgangswerkstoffe von HKK bestehen, zeigen hervorragende Stabilität gegen Biegung im Fall der Konstruktion von Platten, so dass die Dimensionierung solcher Platten für dünnwandigere Konstruktionen ausreichend ist. Im Gegensatz dazu haben die metallischen Werkstoffe die geringste Eignung für leichte biegesteife plattenförmige Konstruktionen. Von den nichteisenhaltigen metallischen Legierungen zeigen die Mg-Legierungen das höchste Leichtbaupotenzial. Von den Metallschäumen weist wieder der Aluminiumschaum Al99,5 den höchsten Beulgütezahlenwert mit 3,9 MPacm³/g auf.

Zur Konstruktion von Platten aus metallischen Hohlkugelstrukturen werden größere Wanddicken benötigt, um dieselben Steifigkeit zu erreichen wie eine Konstruktion aus Aluminiumlegierung.

Inwieweit das ermittelte Eigenschaftsprofil von HKK für konstruktive Anwendungen im Werkzeugmaschinenbau übertragen werden kann, soll anhand von ausgewählten Baugruppen nachfolgend demonstriert werden.

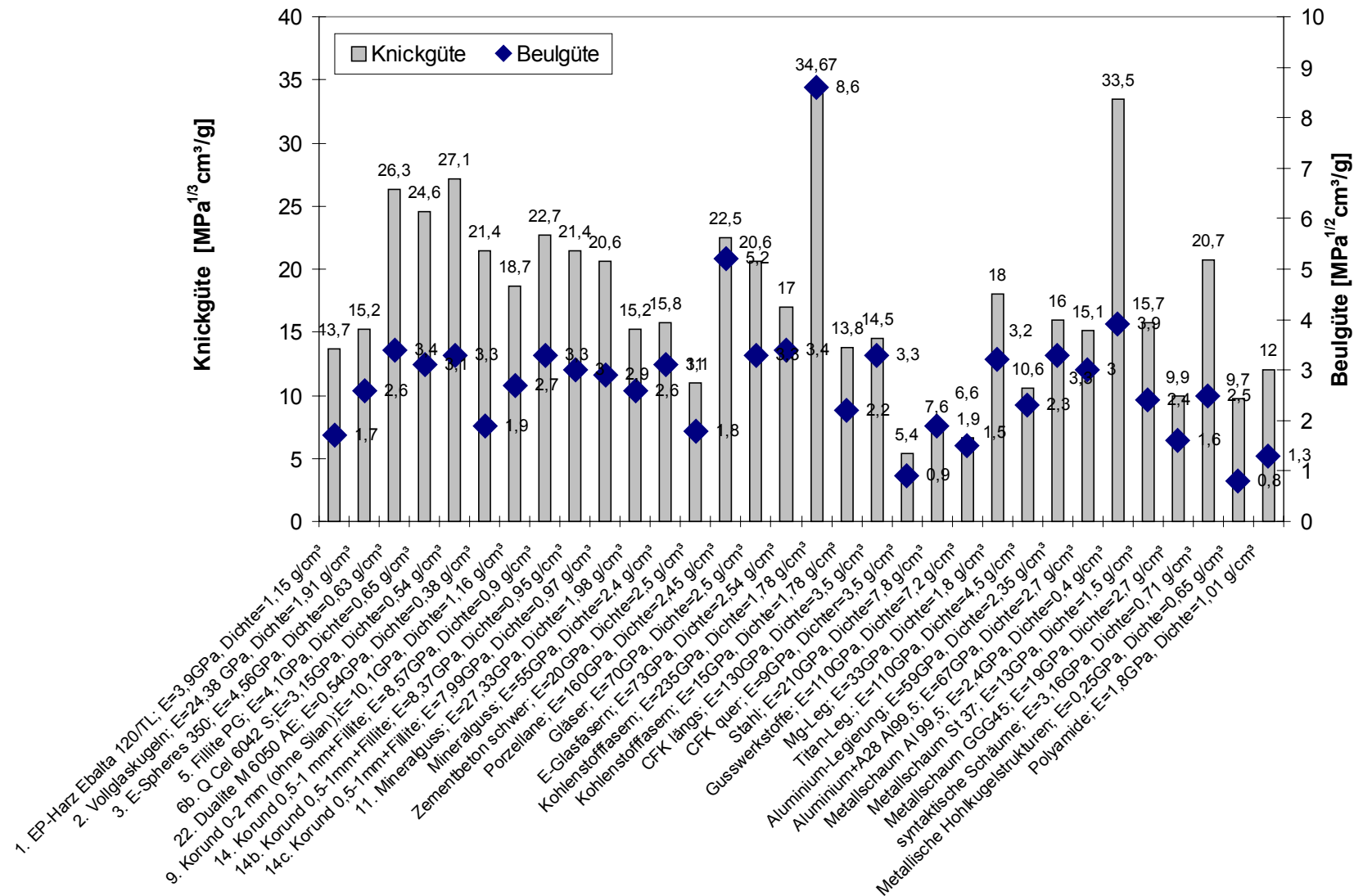


Bild 7.1: Leichtbaukennzahlen von HKK im Vergleich zu einigen ausgewählten Konstruktionswerkstoffen

8 Testung des Einsatzes von HKK-Strukturen an ausgewählten Baugruppen

Als Nachweis der Anwendbarkeit des Werkstoffes HKK im Werkzeugmaschinenbau wurden einige Prototypen, wie z.B. eine Vorrichtung [111], ein Fräsmaschinentisch [15], ein Arm eines Gelenkroboters [16] sowie ein Ober- und Unterarm eines SCARA-Roboters, hergestellt. Mittels des FEM-Programms COSAR wurden die Bauteile modelliert. Die experimentell ermittelte statische Steifigkeit, das Verformungsverhalten und das Schwingungsverhalten der HKK-Verbund-Bauteile wurden mit den mittels FEM ermittelten Ergebnissen der Modelle verglichen.

In Auswertung der werkstoffkundlichen Untersuchungen wurde als HKK-Werkstoff für diese Prototypen die Werkstoffkombination der Probenvariation 14 eingesetzt und getestet.

8.1 Vorrichtung aus HKK-Verbund

Zur Optimierung der Fertigungsaufgaben hinsichtlich Funktion, Genauigkeit, Kosten u.a. werden an Vorrichtungen hohe Forderungen bezüglich Steifigkeit und Schwingungsverhalten gestellt. So wurde von Klaeger [40] nachgewiesen, dass durch die Substitution des Grundwerkstoffes Stahl für eine Vorrichtung durch Mineralguss im Verbund mit Stahleinlegeteilen sich positive Auswirkungen auf die Erhöhung der Standzeit, des Dämpfungsverhaltens und auf die Verringerung der lokalen Nachgiebigkeiten zeigten. Diese Forschungsergebnisse können auch auf Konstruktionen aus HKK-Verbund übertragen werden. Zum Nachweis wurden zwei Vorrichtungen mit gleichen äußeren Abmessungen in Maßstab 2:1 aus Stahl und aus HKK-Verbund gefertigt (**Bild 8.1**). Die geschweißte Stahlvorrichtung bestand, wie die Originalvorrichtung, aus der Grundplatte, der Spannplatte und 2 Stützen aus 10 mm dickem Blech.



Bild 8.1: Vorrichtung aus HKK-Verbund (links in den Bildern) und aus Stahl (rechts in den Bildern)

Die HKK-Verbund-Vorrichtung wurde mittels FEM modelliert und mit einer fiktiven Schnittkraft belastet. Die FEM-Berechnungen ergaben, dass an der Spannfläche Zugspannungen und im hinteren Bereich Druckspannungen auftreten. Um diesen entgegenzuwirken, wurde die Spannfläche mit Glasfasern verstärkt und zusätzlich mit einer mittleren Rippe versehen, die aus HKK und Stahl mit einem Querschnitt von 12X30 mm² gefertigt war. Für die HKK-Verbundkonstruktion wurden 6 HKK-Teile gegossen und mit duroplastischem Grundmaterial verklebt, wobei der Stahlsteg mit dem HKK im Verbund vergossen wurde. Mit dieser Konstruktion konnte eine Gewichtsreduktion von ca. 65% gegenüber der Vorrichtung aus Stahl erzielt werden.

Die Untersuchungen der dynamischen Eigenschaften der Vorrichtungen erfolgten mittels Modalanalyse. Um bei der Modalanalyse ähnliche Bedingungen wie beim Fräsen zu simulieren, wurden die Vorrichtungen als Flächenmodelle abgebildet. **Bild 8.2.a** zeigt die Summenkurve der Schwingungen an den einzelnen Punkten im Frequenzbereich sowie die berechneten Pole (gekennzeichnet durch „s“). Bei den unteren Frequenzen treten Verlagerungen mit relativ großer Amplitude (max. 9 µm/N) um die untere Kante auf (**Bild 8.2.b**). Die Platte aus HKK biegt sich mit relativ geringer Nachgiebigkeit (0,2 µm/N) bei 2150 Hz (**Bild 8.2.c**). Alle anderen Modifikationen zeigen mehr oder weniger Verlagerungen mit 0,1-0,5 µm/N um diverse Achsen [110].

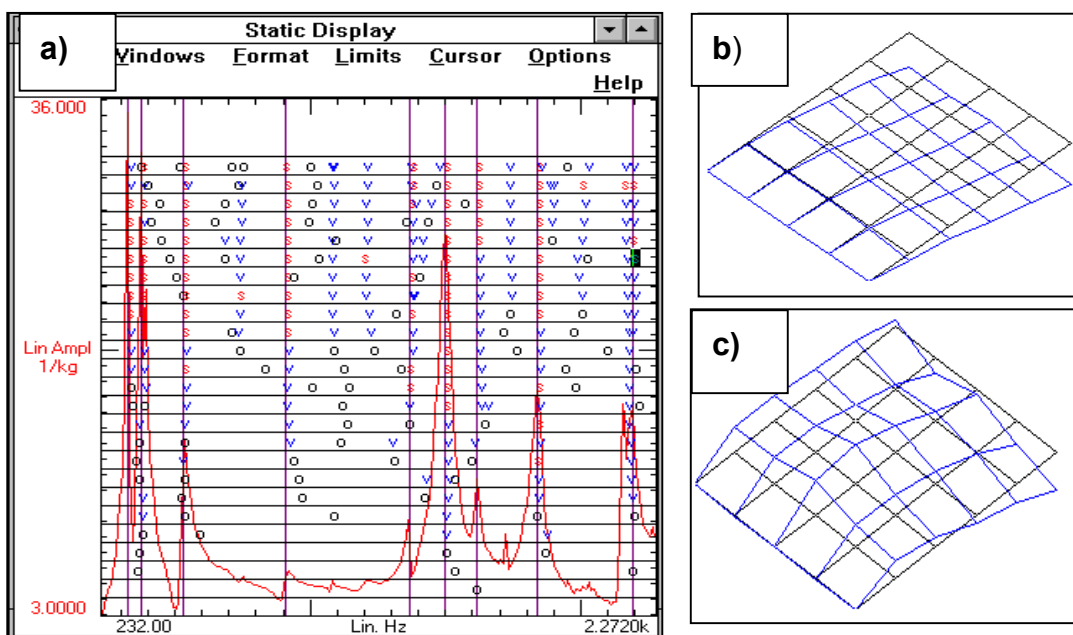


Bild 8.2: a) Frequenzgang an der Spannfläche, b) Schwingungsformen des HKK-Verbund Flächenmodells bei 380 Hz c) Schwingungsformen des HKK-Verbund Flächenmodells bei 2150 Hz [110]

Die Ergebnisse der Auswertungen der Modalanalysen hinsichtlich Eigenfrequenzen, Dämpfungen und dynamische Nachgiebigkeiten sind für die Flächenmodelle aus Stahl und HKK in der **Tabelle 8.1** dargestellt. Die Eigenfrequenzen der HKK-Verbund-Vorrichtung treten zeitlich verzögert und besser gedämpft auf als diejenigen der Stahlvorrichtung. Unterschiede in der Nachgiebigkeit beider Vorrichtungen sind relativ gering.

Tabelle 8.1: Ergebnisse der Modalanalyse der Fräsvorrichtungen

Stahl			Hohlkugelkomposit		
Frequenz Hz	Dämpfung %	Nachgiebig. $\mu\text{m}/\text{N}$	Frequenz Hz	Dämpfung %	Nachgiebig. $\mu\text{m}/\text{N}$
300	1,99	6	330	2,82	7
351	1,93	7	380	2,72	9
700	1,24	0,3	540	3,61	1,5
1100	1,37	0,3	1800	1,16	0,3
2800	1,1	0,5	2150	0,62	0,2

Um die Funktionalität der HKK-Fräsvorrichtung nachzuweisen, wurde das Schwingungsverhalten mit dem der Stahlvorrichtung verglichen. Das Fräsen erfolgte mit einem Schrupp-Schaffräser mit 6 Schneiden, 48 mm Durchmesser, bei 355 Umdrehungen/min und 40 mm/min Vorschubgeschwindigkeit. Für eine Schnittbreite von 0,5 mm und einem Arbeitseingriff von 11 mm ergibt sich eine Zerspankraft von 1,14 kN. Eine Spannpratze spannt das Werkstück im oberen Bereich der Vorrichtung. Zur Messung der Schwingungen wurde ein piezoelektrischer Beschleunigungsaufnehmer zeitlich nacheinander in drei Richtungen am Werkstück angeordnet: in Vorschubrichtung an der Stirnfläche, in Richtung der Spannung und auf der bearbeiteten Fläche. In Vorschubrichtung bildet sich der Schneideingriff deutlich ab (**Bild 8.3.a** und **c**). Die **Bilder 8.3.b** und **d** stellen die Schwingungsbewegungen auf der Bearbeitungsfläche der Stahlvorrichtung und der Vorrichtung aus HKK-Verbund dar.

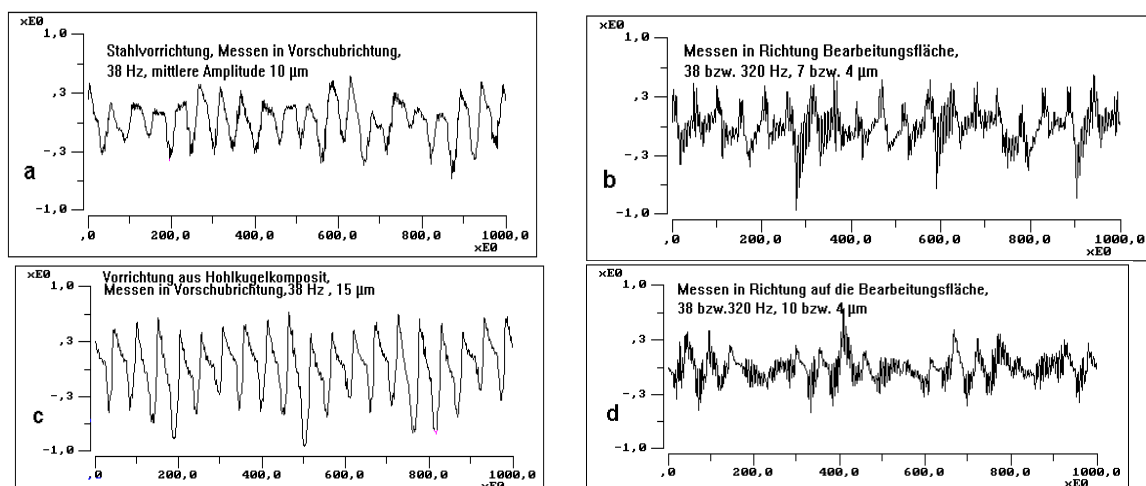


Bild 8.3: Schwingbewegungen beim Fräsen der Vorrichtungen aus Stahl und aus HKK-Verbund in Vorschubrichtung (a und c) sowie in Richtung der Bearbeitungsfläche [110]

Die Anwendbarkeit einer Fräsvorrichtung wird nicht zuletzt auch durch die Qualität der am Werkstück erzeugten Oberfläche bestimmt. Zu diesem Zweck wurden die Oberflächenprofile des mit einer Stahlvorrichtung und einer Vorrichtung aus HKK gefrästen Werkstückes untersucht (**Bild 8.4**). Der Mittelwert der Rauheitsmessungen für die Werkstücke, die mit der Stahlvorrichtung bearbeitet waren, beträgt $R_a=5,06 \mu\text{m}$ und für die mit der Vorrichtung aus HKK $R_a=5,29 \mu\text{m}$ [110]. Die einzelnen Absolutwerte variieren. Dies kann vom Werkzeug, von der Maschine und den Prozessbedingungen beeinflusst werden, so dass im Ergebnis etwa die gleiche Oberflächengüte mit beiden Vorrichtungen erzielt werden konnte.

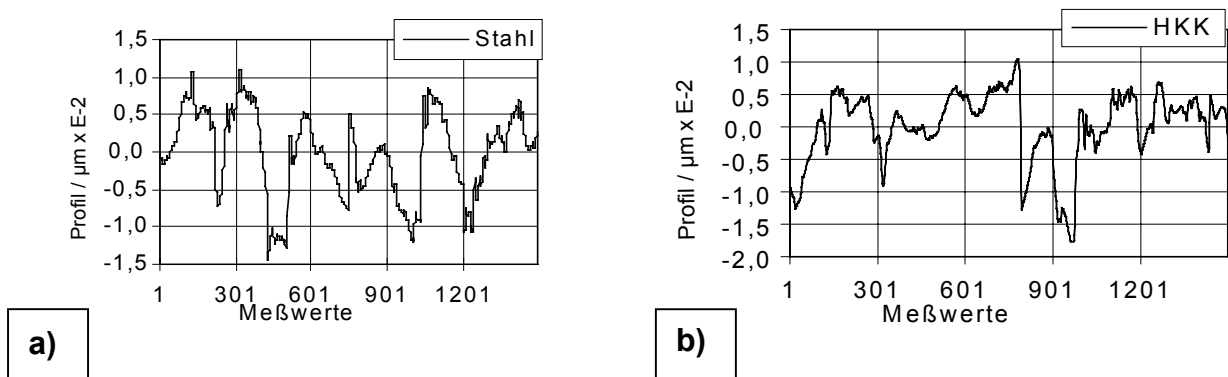


Bild 8.4: Oberflächenprofile der bearbeiteten Werkstücke mit einer Stahlvorrichtung und einer Vorrichtung aus HKK-Verbund [110]

8.2 Fräsmaschinentisch aus HKK-Verbund

Ausgangspunkt zur Herstellung des Fräsmaschinentisches aus HKK-Verbund war die Werkstattzeichnung des Original-Fräsmaschinentisches aus Stahl. Der Fräsmaschinentisch liegt in der Wirkkette der Prozesskräfte und beeinflusst die Arbeitsgenauigkeit der Maschine, deshalb ist es wichtig, die thermisch- und lastbedingten Deformationen gering zu halten. Aus diesen Gründen wurde der Fräsmaschinentisch vorrangig auf Bauteilsteifigkeit dimensioniert.

Durch numerische Berechnungen mittels des FEM-Programms COSAR wurden die statischen Steifigkeiten des Fräsmaschinentisches aus Stahl ermittelt. Der modellierte Stahltisch wurde senkrecht in der Mitte der Tischoberseite mit etwa 1000 N belastet. Um am realen Bauteil etwa gleiche Bedingungen herzustellen, wurde das durch FEM erzeugte Geometriemodell entlang der Führungen zur Tischmitte gegen Verschiebung in X_2 -Richtung fixiert (**Bild 8.5.a**). Wegen der Symmetrie des Modells genügt es, nur ein Quadrat des Tisches nachzubilden. Da in diesem Fall der Schnitt entlang der Symmetrieachse verläuft, werden alle Knotenpunkte auf den Schnittflächen senkrecht dazu in der Verschiebung gebunden (**Bild 8.5.b**).

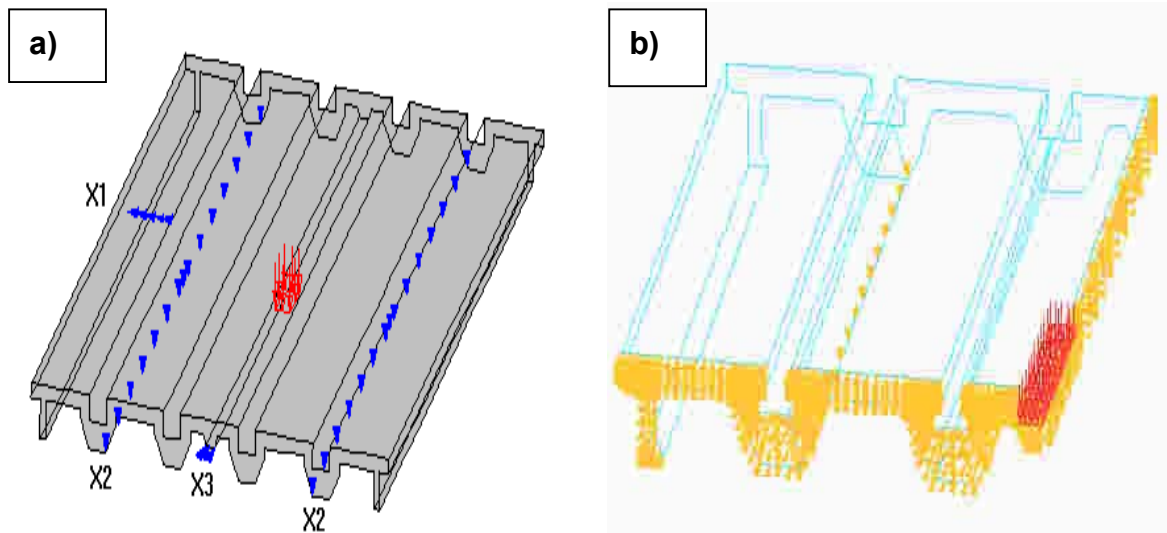


Bild 8.5: Randbedingungen und Belastung des Stahltisches (a) und des FE-Modells des Stahltisches (b)

Im Ergebnis der FE-Berechnungen wurden Verformungen und Spannungsverteilungen ermittelt (**Bild 8.6**). Unter Belastung treten auf der Unterseite des Tisches Zug- und auf der Oberseite Druckspannungen auf (**Bild 8.6.a**). Um diesen Spannungen entgegenzuwirken, wurde die HKK-Verbund-Konstruktion so modelliert, dass auf der Tischunterseite die Zugspannungen von den Kohlefasern aufgenommen werden, deren Längsrichtung in Richtung der größten Durchbiegung bzw. in Querrichtung des Tisches verlegt sind. Die Tischoberseite wurde mit Stahlplatten zur Behebung der Biegespannungen und mit metallischen Nuten ebenfalls aus Stahl zur Aufnahme von Spannkraften versehen.

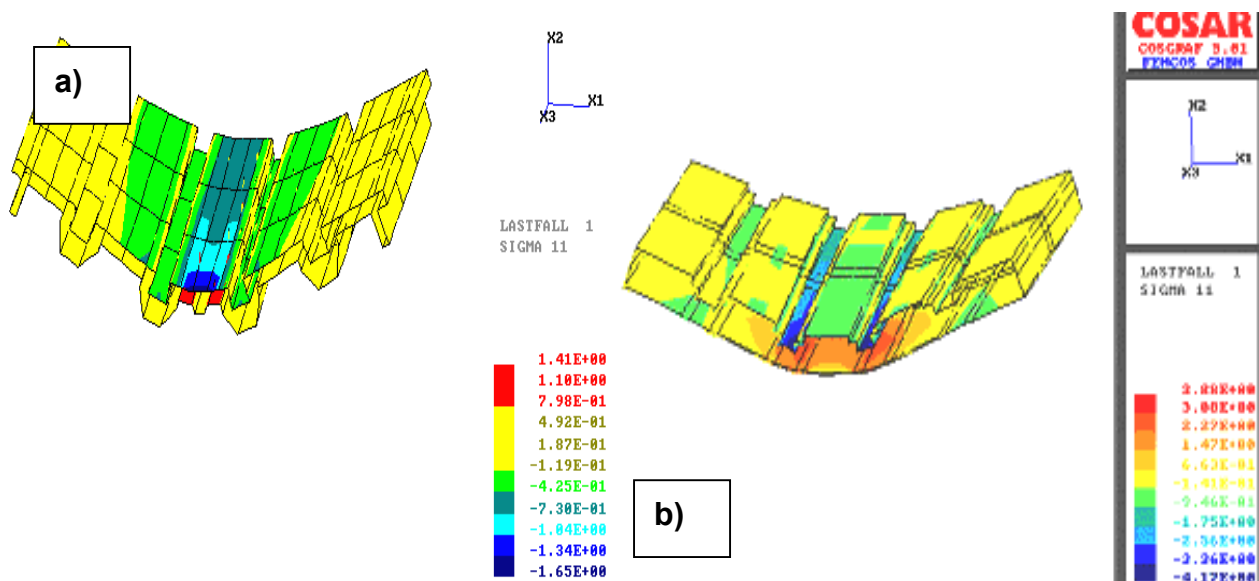


Bild 8.6: Verformungen der Tischmodelle aus Stahl (a) und aus HKK (b)

Für die Modellierung des HKK-Verbund-Tisches waren 5 Strukturen notwendig, die im **Bild 8.7** veranschaulicht sind. Der HKK-Verbund-Tisch war wie der Stahltisch fixiert (**Bild 8.7.b**).

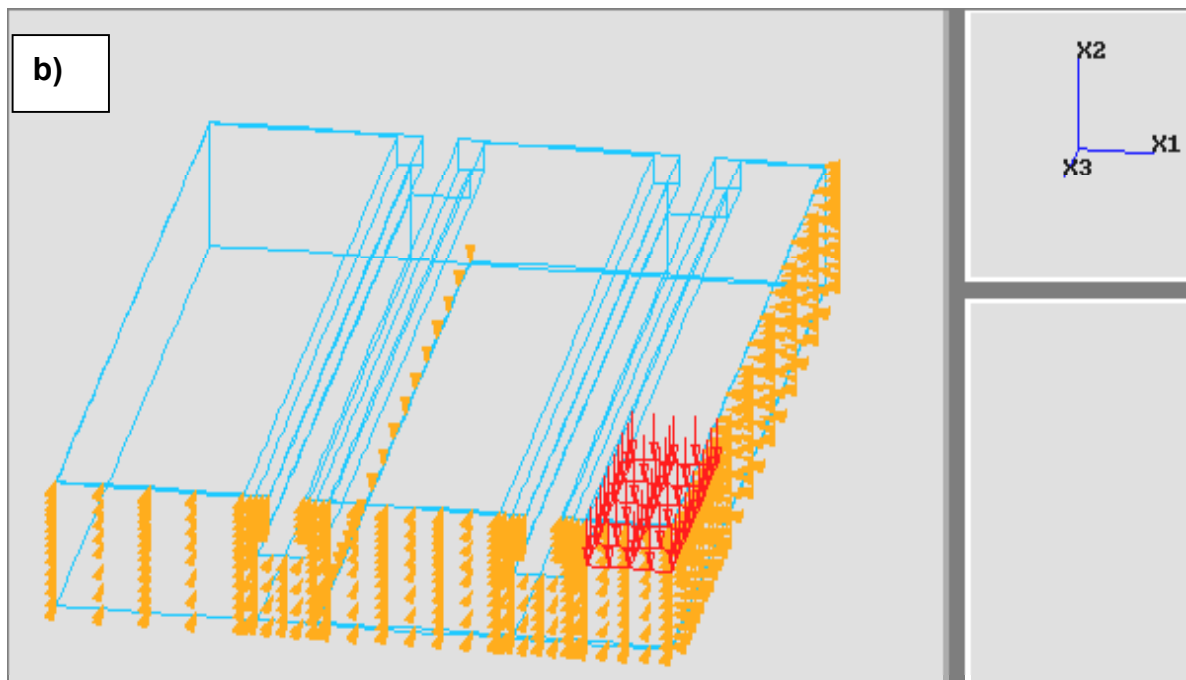
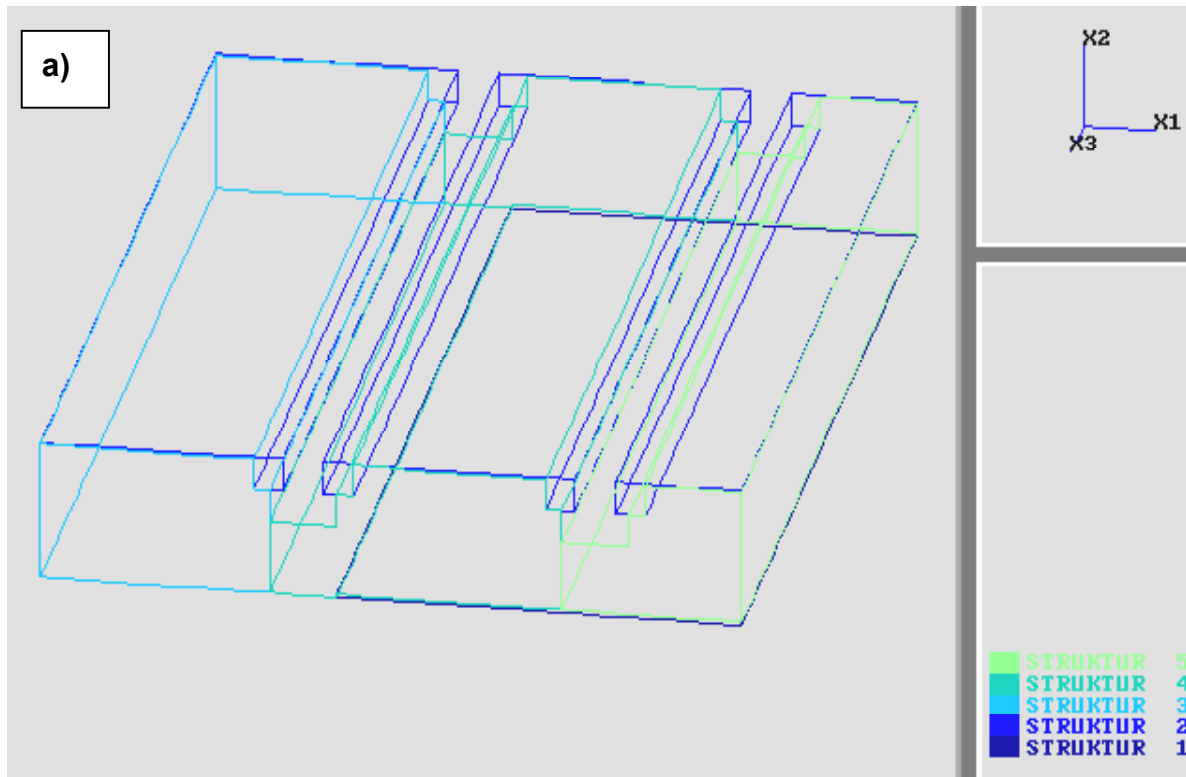


Bild 8.7: a) Darstellung aller Strukturen des FE-Modells aus HKK-Verbund, b) Randbedingungen und Belastung des FE-Modells aus HKK-Verbund

Die unter der Belastung entstehende Verschiebung in Richtung x_2 am Finite-Elemente-Modell des HKK-Verbund-Tisches zeigt **Bild 8.8.a**. Die Verformungen am Modell aller Strukturen sind im **Bild 8.8.b** visualisiert.

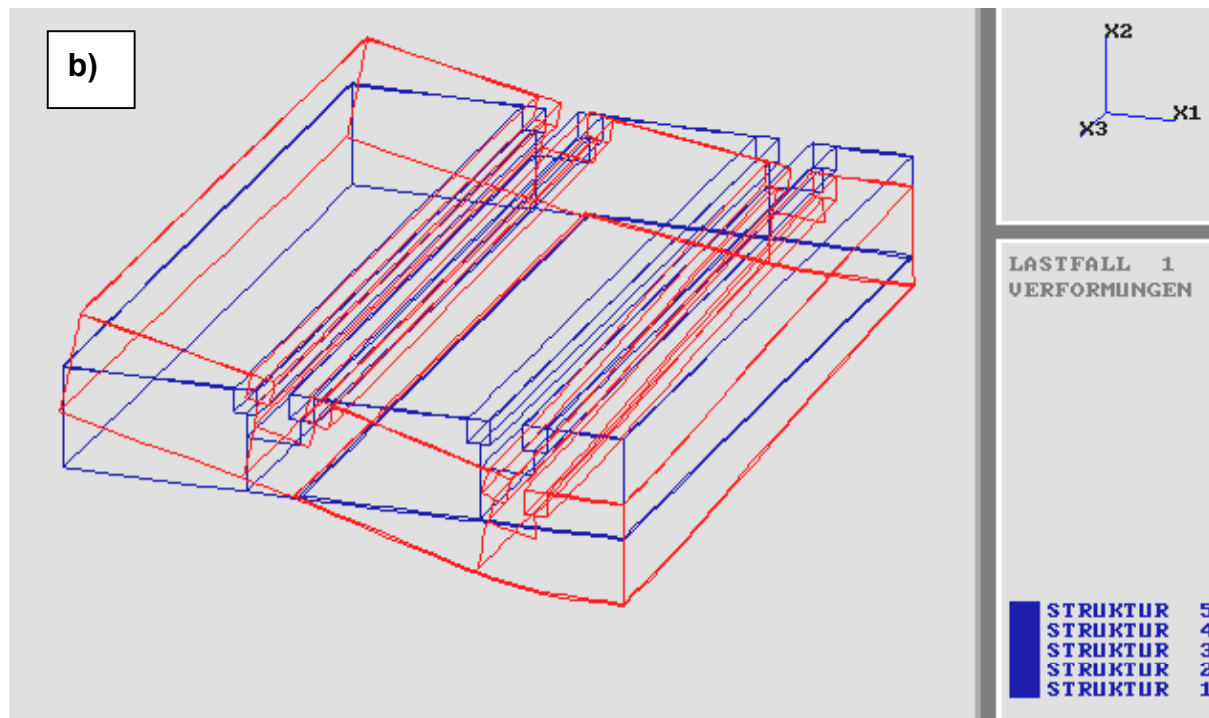
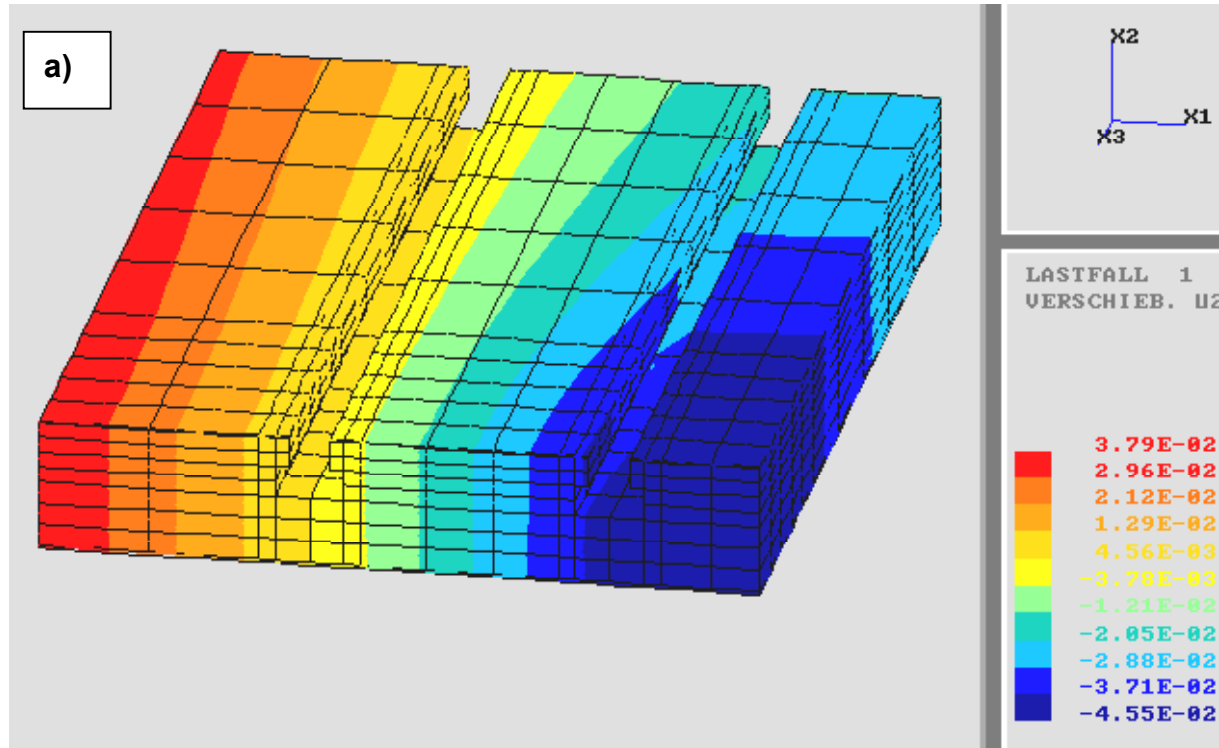


Bild 8.8: a) Verschiebung in Richtung x_2 am FE-Modell des HKK-Verbund-Tisches
b) Verformung des FE-Modells des HKK-Verbund-Tisches

Die unter der Belastung von 1000 N entstehenden Spannungen und Verformungen beider Tische sind somit wesentlich kleiner als die zulässigen Werte. Die vergleichende Bewertung der FE-Berechnungen beider Tische ergab eine um 40 % bessere Steifigkeit des Stahltisches gegenüber dem des HKK-Verbund-Tisches (**Tabelle 8.2**). Der HKK-Verbund-Tisch ist jedoch um 70 % leichter als der Stahltisch und somit besitzt der HKK-Verbund-Tisch ein um 30 % höheres Steifigkeits-Masse-Verhältnis.

Tabelle 8.2: Statische Parameter beider Tische

Parameter	Stahltisch	HKK-Verbund-Tisch
Tischmasse	54,1 kg	16,4 kg
Durchbiegung	17,8 μm	45,3 μm
statische Biegefestigkeit	56 N/ μm	22,1 N/ μm
Steifigkeits-Masse-Verhältnis	1,035 N/(μm kg)	1,347 N/(μm kg)

Die durch FEM-Analyse ermittelte statische Steifigkeit beider Modelle konnte von Bähring [15] durch experimentelle Biegeversuche an realen Bauteilen (**Bild 8.9**) bestätigt werden.



Bild 8.9: Fräsmaschinentisch aus Stahl (links im Bild) und aus HKK-Verbund (rechts im Bild)

Der hergestellte Fräsmaschinen-Prototyp aus HKK-Verbund besitzt einige geometrische Abweichungen vom realen Bauteil, die durch konstruktive und technologische Maßnahmen verbessert bzw. eliminiert werden können. Die Ergebnisse der Modalanalyse beider Tische zeigen qualitativ bessere Eigenschaften für den Tisch aus HKK-Verbund (**Tabelle 8.3**).

Tabelle 8.3: *Ergebnisse der Modalanalyse beider Tische*

Mode		1	2	3	4	5	6
St-Tisch	Eigenfrequenz [Hz]	251,6	459,3	568,3	650,4	833,8	1205,0
	Dämpfung	0,09	0,4	0,82	0,03	0,15	0,07
	Nachgiebigkeit [$\mu\text{m}/\text{N}$]	14,25	2,2	0,120	8	2,5	1,5
HKK-Verbund-Tisch	Eigenfrequenz [Hz]	309,7	466,6	737,8	840,8	1200	1310
	Dämpfung	0,6	0,52	0,38	0,46	0,48	0,35
	Nachgiebigkeit [$\mu\text{m}/\text{N}$]	14,13	1,0	0,8	3,8	0,4	0,42

Bei der HKK-Verbund-Konstruktion liegt die erste Eigenfrequenz 20 % höher als bei der Stahlkonstruktion, die das höhere Dämpfungsvermögen des HKK-Verbund-Tisches nachweist. Insbesondere die Dämpfungswerte und die Nachgiebigkeitswerte bei annähernd gleichen Eigenfrequenzen des HKK-Verbund-Tisches sind deutlich besser. Dies demonstriert eindeutig das gute Schwingungsverhalten der aus HKK-Verbund konstruierten Bauteile. Die fertiggestellte HKK-Verbundkonstruktion in Integralbauweise wurde gleichzeitig als Formleichtbaukonstruktion realisiert. Diese HKK-Verbundkonstruktion kann eindeutig im dynamischen Bauteilverhalten als qualitativ besser eingeschätzt werden.

8.3 Roboterarme aus HKK-Verbund

Roboter werden in zunehmendem Maße in der Industrie vor allem zur Beschickung von Werkzeugmaschinen eingesetzt [227, 228]. Im Vergleich zu den Automaten stellen die Roboter immer noch das relativ langsamste Glied in einer Automatisierungskette dar, obwohl in [8, 9, 229] nachgewiesen wurde, dass mit der Reduzierung der Masse der Arme bei den SCARA-Robotern die Reduzierung der Zykluszeiten und eine Verbesserung der Genauigkeiten und der Geschwindigkeit erzielt werden konnten.

Mit dem Ziel, weitere Verbesserungen in Bezug auf Leichtbau herbeizuführen, wurden der aus AlSi7Mg Legierung bestehende Äußere Arm (Arm 1) und Innere Arm (Arm 2) eines SCARA-ADEPT-Three-MV-Industrieroboters durch HKK-Verbund-Arme ersetzt. Die Anordnungen der Achsen des Roboters sind im **Bild 8.10** dargestellt.

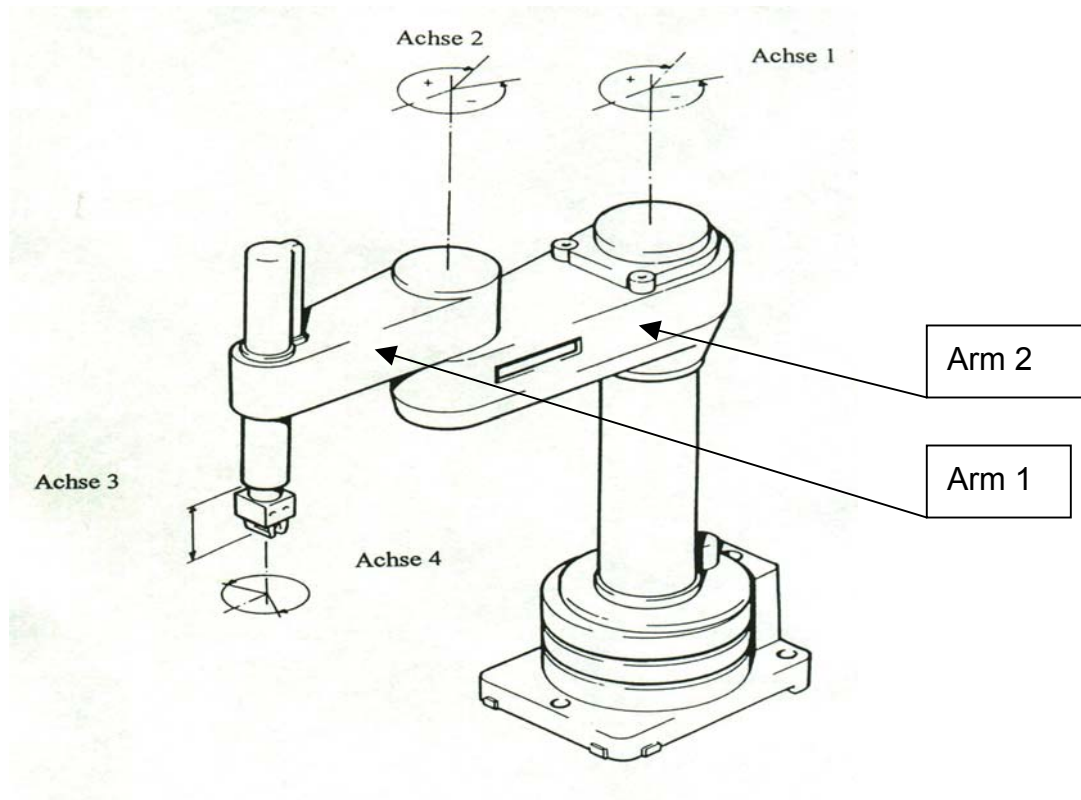


Bild 8.10: Schematische Darstellung des SCARA-Adept Three-MV Industrieroboters

Für die Berechnung der erforderlichen Wanddicken der aus HKK-Verbund Werkstoff strukturierten Roboterarme diente das Finite-Elemente-Programm COSAR. Zu diesem Zweck waren zwei Modelle, eins aus Aluminium und eins aus HKK-Verbund, entwickelt. Bei den statischen Berechnungen der HKK-Modelle wurden die Wanddicken sukzessive solange geändert, bis die unter der Belastung auftretenden Deformationen an den HKK-Modellen und denen der Aluminiummodelle annähernd gleich waren. Es wurde jedoch darauf geachtet, dass die äußeren Abmessungen der aus HKK zu fertigen Roboterarme identisch mit den äußeren Abmessungen der Originalarme sind.

Im **Bild 8.11** sind die Verschiebungen und die Spannungen des Modells des Roboterarmes 1 aus Aluminium (Modell Al) und des Modells aus HKK-Verbund (Modell HKK) dargestellt. Als Randbedingung galt, die untere Fläche im Bereich der größeren Öffnung als Festpunkt zu definieren. Im Lastfall 1 wurden die Modelle auf Biegebeanspruchung untersucht (**Bilder 8.11.a-f**). Die Belastung des Aluminiumarmes resultiert aus dem Eigengewicht, der Last des Motors und der Last des Werkstücks und beträgt insgesamt 700 N. Die Modelle wurden mit 4000 N belastet. Unter dieser Belastung bewegten sich die Enddeformationen auf 1,12 mm für das Modell aus Aluminium und 1,26 mm für das Modell aus HKK. Im Lastfall 1 traten im Bereich der größeren Öffnung (2. Achse) auf der Oberseite des Aluminium-Modells Druckspannungen von maximal -51 N/mm^2 auf (**Bild 8.11.c**), während sie auf der Unterseite -37 N/mm^2 betrug (**Bild 8.11.e**). Die Berechnungen ergaben eine erforderliche Wanddicke für Arm 1 aus HKK von 15 mm.

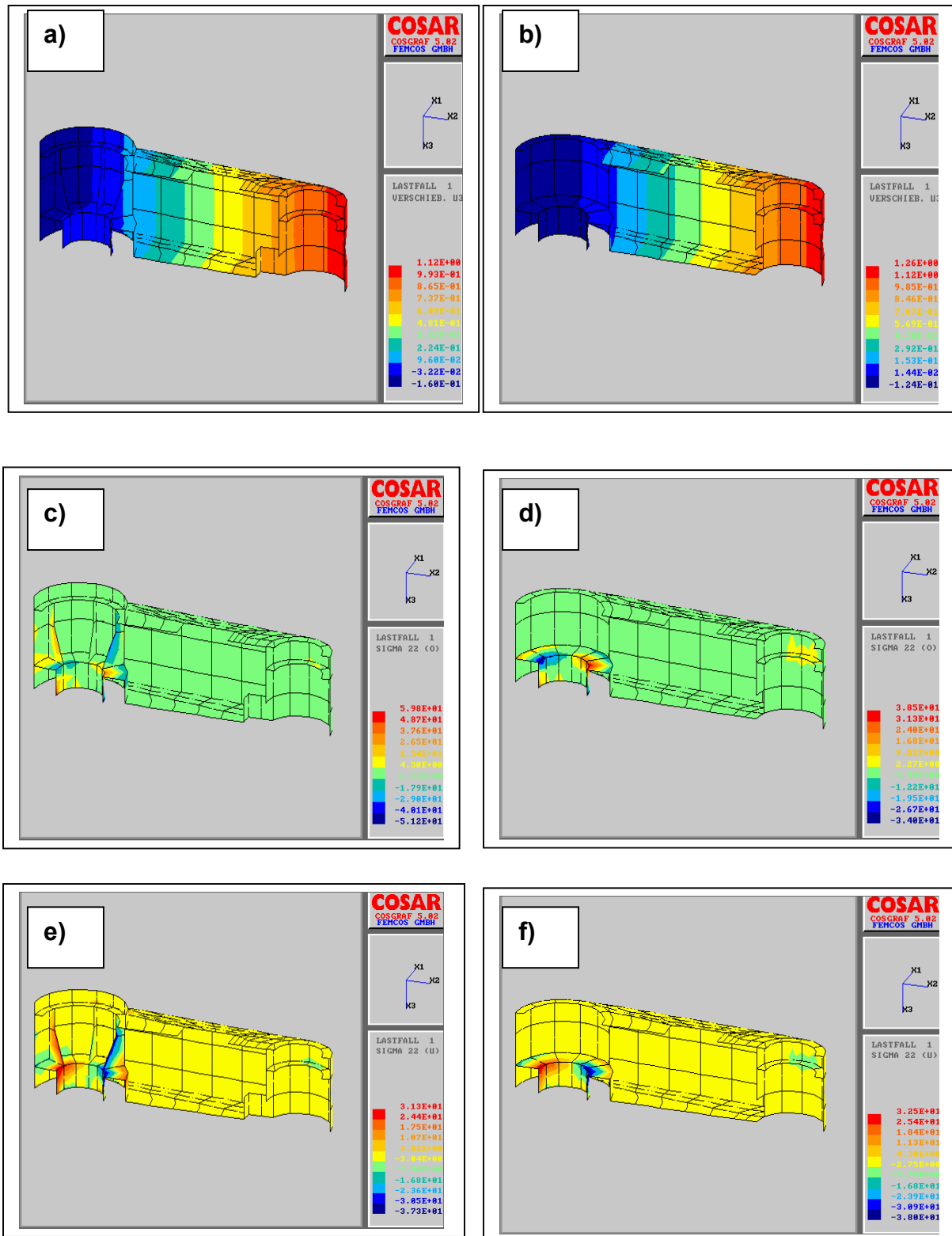


Bild 8.11: a) Verschiebung in x_3 -Richtung, Modell AI; b) Verschiebung in x_3 -Richtung, Modell HKK; c) Spannung in x_2 -Richtung Modell AI (σ_{220}); d) Spannung in x_2 -Richtung, Modell HKK (σ_{220}); e) Spannung in x_2 -Richtung, Modell AI (σ_{22u}); f) Spannung in x_2 -Richtung Modell HKK (σ_{22u})

Zur Fertigung des Armes 1 aus HKK-Verbund waren im Bereich der größeren Öffnung (2. Achse im **Bild 8.10**) eine Halbschale aus Aluminium und im Bereich der kleineren Öffnung (4. Achse im **Bild 8.10**) ein Kopfstück ebenfalls aus Aluminium in die Gießform eingebracht und mit HKK eingegossen. Zur Aufnahme der Zug- und Druckspannungen waren auf der Ober- und Unterseite Kohlefaserlaminare und zwei Aluminiumleisten eingegossen. Der Arm 1 aus HKK-Verbund besteht aus zwei Hälften, die mittig zusammengeklebt wurden. Seitlich in den vorgesehenen Nuten waren Kohlefaserbänder 3-lagig eingebracht (**Bild 8.12.a**).

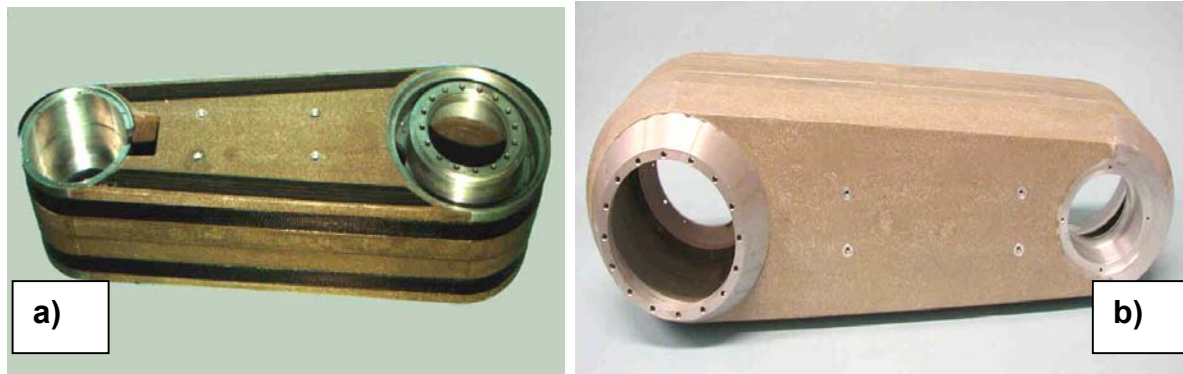


Bild 8.12: a) Arm 1 und b) Arm 2 aus HKK-Verbund

Die Anschlusselemente wurden beim Arm 2 aus HKK ebenfalls aus Aluminium gefertigt. Die Ober- und Unterseite des Kompositarmes wurde jeweils mit 2 Kohlefaserstäben von 16 mm im Durchmesser und mit zwei Rahmen aus Aluminium im Inneren verstärkt. **Bild 8.12.b** zeigt den Arm 2 aus HKK-Verbund. Mit diesen Maßnahmen konnte das Gewicht des Armes 2 aus Aluminium von 15,28 kg auf nur 11,35 kg beim Arm 2 mit der HKK-Verbund-Konstruktion reduziert werden. Die Gewichtsreduktion von 35 % beim Arm 2 wurde somit größer als beim Arm 1, die 10% betrug.

Für die Berechnung der Wanddicke des Armes 2 wurden zwei Lastfälle untersucht. Im Lastfall 1 wurde die statische Steifigkeit des Armes 2 auf Biegung und im Lastfall 2 auf Torsion ermittelt. Die Verschiebungen in der x_3 -Richtung sowie die Spannungen auf der Unter- und Oberseite in der x_1 -Richtung für den ersten Lastfall „Biegung“ sind in den **Bildern 8.13.a bis f** dargestellt. Im Bereich der kleinen Öffnung (2. Achse) traten Enddeformationen des Aluminiummodells von 0,53 mm und für das HKK-Modell bis 3,95 mm auf (**Bildern 8.13.a und b**). Im unteren Bereich der größeren Öffnung traten auf der Oberseite des Aluminiummodells Druckspannungen von 20,6 N/mm² (blau markiert) und Zugspannungen von 26,6 N/mm² (rot markiert) auf (**Bild 8.13.c**). Auf der Unterseite vergrößerten sich die Druckspannungen und es wurden Werte bis 48,7 N/mm² erreicht (**Bild 8.13.e**). Bei den HKK-Verbund-Modellen nehmen die Aluminiumschalen besser die Spannungen auf, so dass die Druckspannungen auf der Oberseite auf 25,4 N/mm² und auf der Unterseite auf 42,8 N/mm² reduziert werden konnten. Der Arm 2 aus HKK wurde auf 20 mm in der Wanddicke dimensioniert, während die Dicke der Wände des Originalarmes zwischen 6,3 bis 6,8 mm variierte.

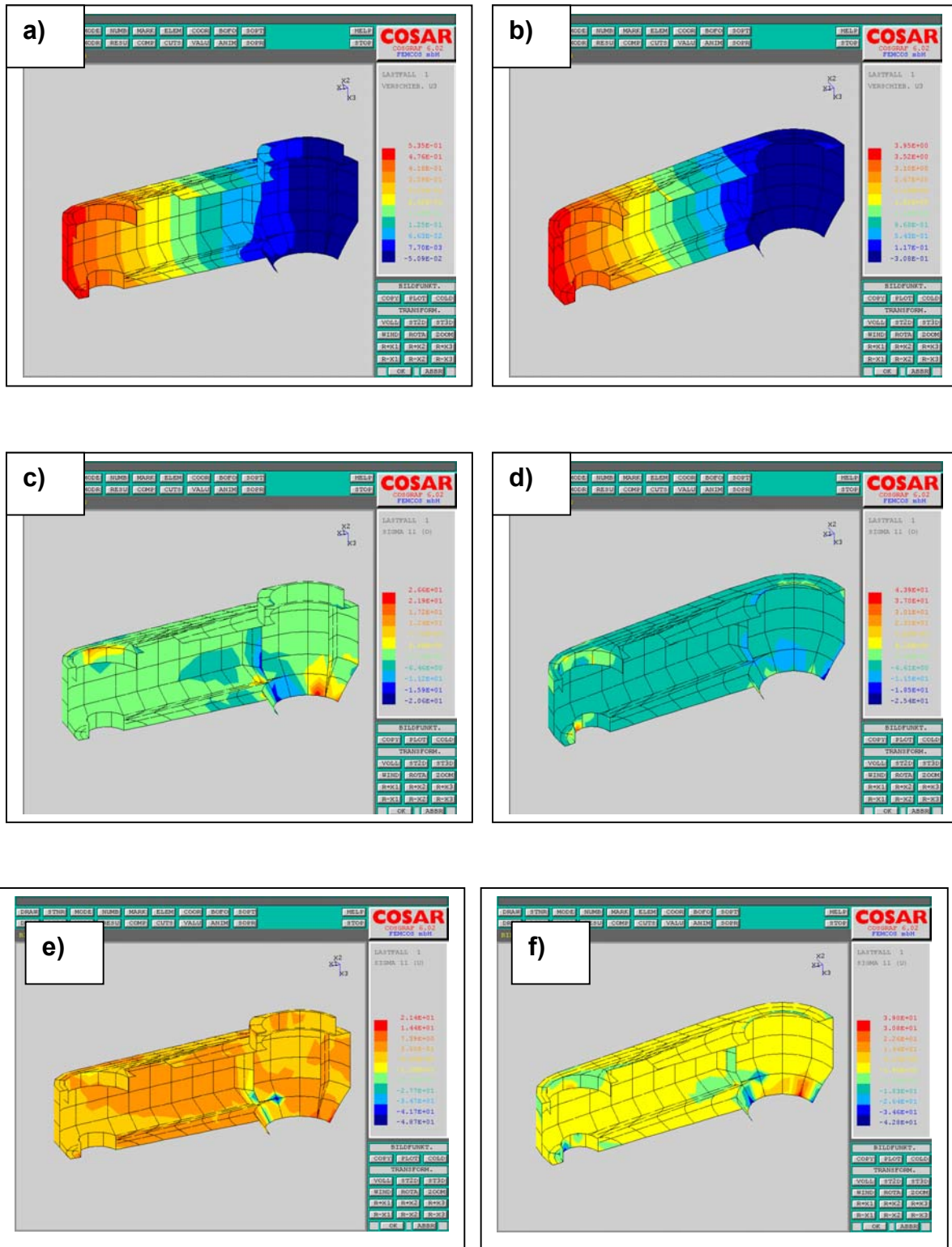


Bild 8.13: a) Verschiebung in Richtung der x_3 -Achse, Modell AI; b) Verschiebung in Richtung der x_3 -Achse, Modell HKK; c) Spannung in x_1 -Achse, Modell AI (σ_{110}); d) Spannung in x_1 -Richtung, Modell HKK (σ_{110}); e) Spannung in x_1 -Richtung, Modell AI (σ_{11u}); f) Spannung in x_1 -Richtung, Modell HKK (σ_{11u})

An den fertigen HKK-Verbund-Armen wurde das statische Verhalten experimentell ermittelt und mit den Ergebnissen der statischen Messungen der Originalarme verglichen. Die Platzierung der Messgeräte bei der Messung der statischen Steifigkeit am Arm 1 ist aus **Bild 8.14** ersichtlich. Diese Platzierung war identisch an beiden äußeren Roboterarmen aus HKK-Verbund und aus Aluminium. Die Verschiebungsverhinderung wurde durch ein System mit vorgespannten Schrauben erzeugt. Das entspricht der Einspannung des Armes unter realen Bedingungen.

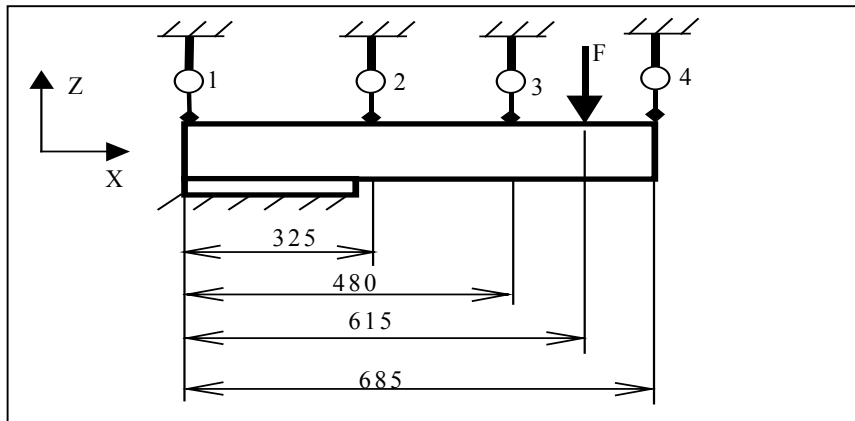


Bild 8.14: Platzierung der Messgeräte bei der Messung der statischen Steifigkeit in der z-Richtung am Arm 1 und die Art der Belastung

Die Verschiebungen in der z-Achse sind grafisch in Abhängigkeit von den Kraftbelastungen in den **Bildern 8.15.a** und **b** ausgewertet. Es zeigt sich eine mehr oder weniger lineare Abhängigkeit, die jedoch eine Hysterese aufweist. Die Abweichung der gemessenen Werte bei wiederholten Messungen lag unterhalb von 1 %. Die Hysterese ist durch die Feinzeiger verursacht und beträgt ungefähr 5 μm .

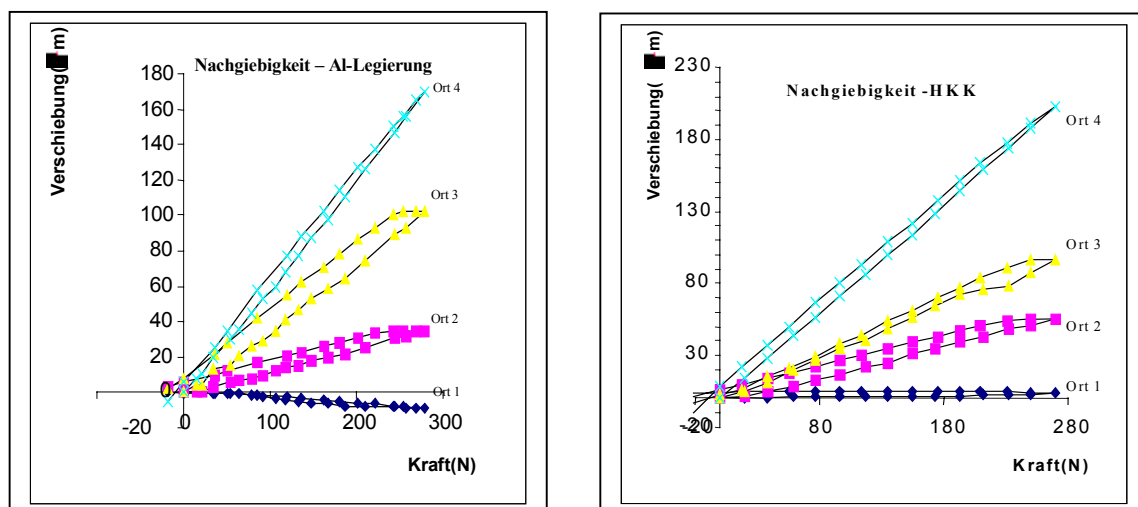


Bild 8.15: a) Nachgiebigkeit des Armes 1 aus Al-Legierung in z-Richtung;
b) Nachgiebigkeit des Armes 1 aus HKK in z-Richtung

Der Kraftwirkungsort am realen Bauteil befindet sich zwischen den Punkten 3 und 4 in einem Abstand von 615 mm vom Einspannungsort. Die Steifigkeitswerte k , $k=F/f$ (N/mm) betragen 1550 N/mm für den HKK-Verbund-Arm und 1640 N/mm für den Aluminium-Arm.

Die Messungen der Nachgiebigkeiten der äußeren Arme in der y-Achse (**Bild 8.16**) ergaben die gleiche Charakteristik wie die Messungen in der z-Achse. Der Verlauf der Steifigkeitslinie in der y-Achse zeigt Hysteresiserscheinungen (**Bild 8.17.a - b**). Die Nachgiebigkeit des HKK-Verbund-Armes ist jedoch größer als die des Aluminiumarmes. Die Steifigkeit beträgt somit bei Arm 1 aus HKK-Verbund 3982 N/mm und bei Arm 1 aus Aluminiumlegierung 6242 N/mm. Durch konstruktive Maßnahmen und durch Verstärkungselemente (Aluminiumleisten oder Faserverstärkung) kann die Steifigkeit in der y-Achse verbessert werden. Unter realen Bedingungen treten am äußeren Arm wesentlich öfter Biegebeanspruchungen in der z-Achse auf.

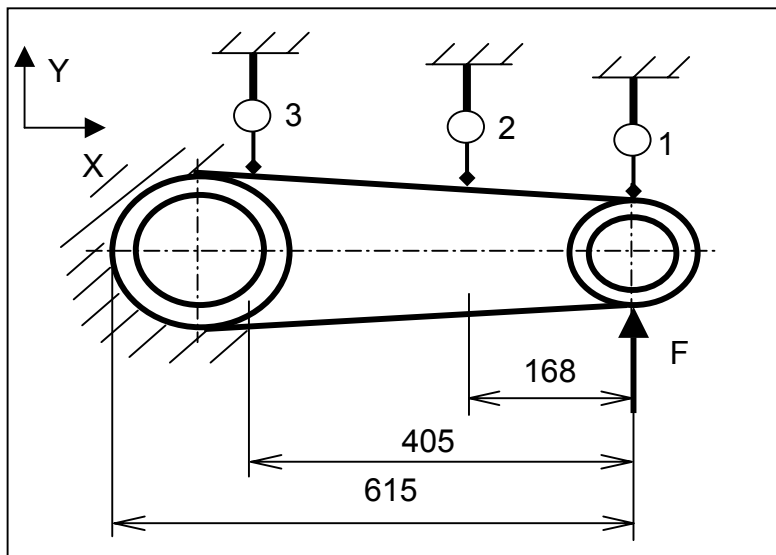


Bild 8.16: Platzierung der Messgeräte für die Messung der statischen Steifigkeit in der y-Achse beim Arm 1

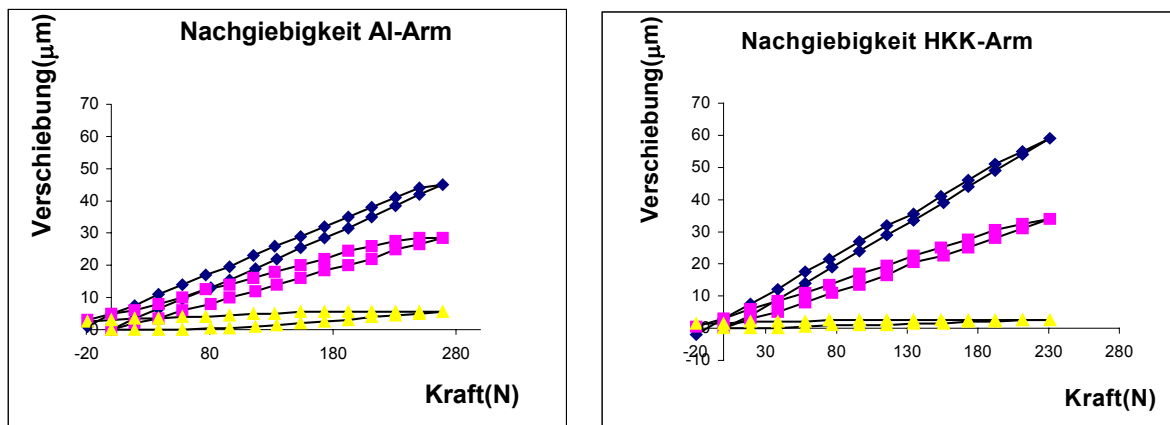


Bild 8.17: a) Nachgiebigkeit für Arm 1 aus Aluminiumlegierung in y-Richtung;
b) Nachgiebigkeit für Arm 1 aus HKK-Verbund in y-Richtung

Für die Messung der Verschiebung in der z-Achse des Armes 2 waren Messgeräte in bestimmten Abständen (**Bild 8.18**) angebracht. Es galt die gleichen Aufspannungsbedingungen wie bei der Messung des Armes 1.

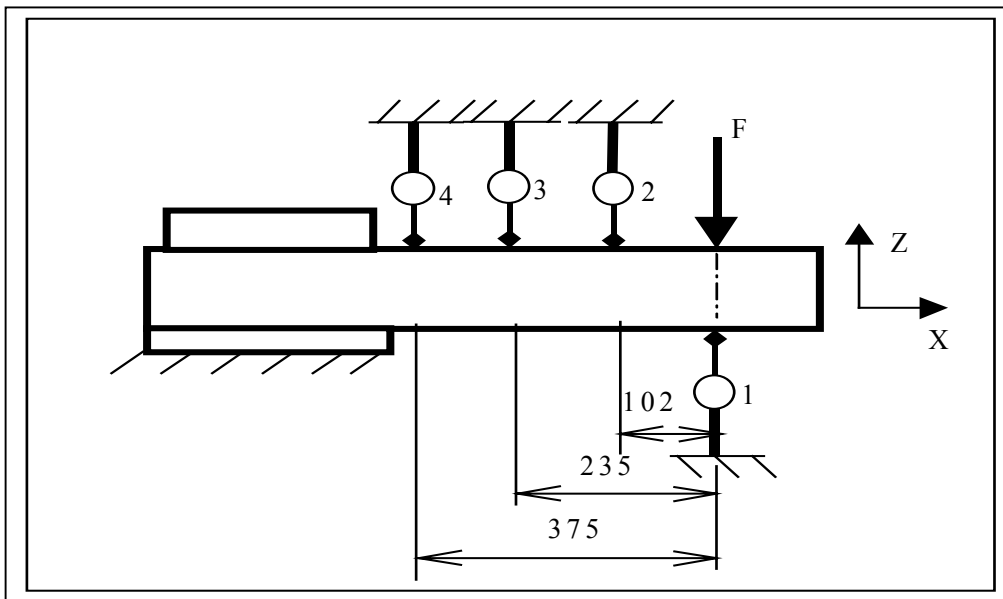


Bild 8.18: Platzierung der Messgeräte beim Messen der Steifigkeit in der z-Achse am Arm 2 aus Aluminiumlegierung

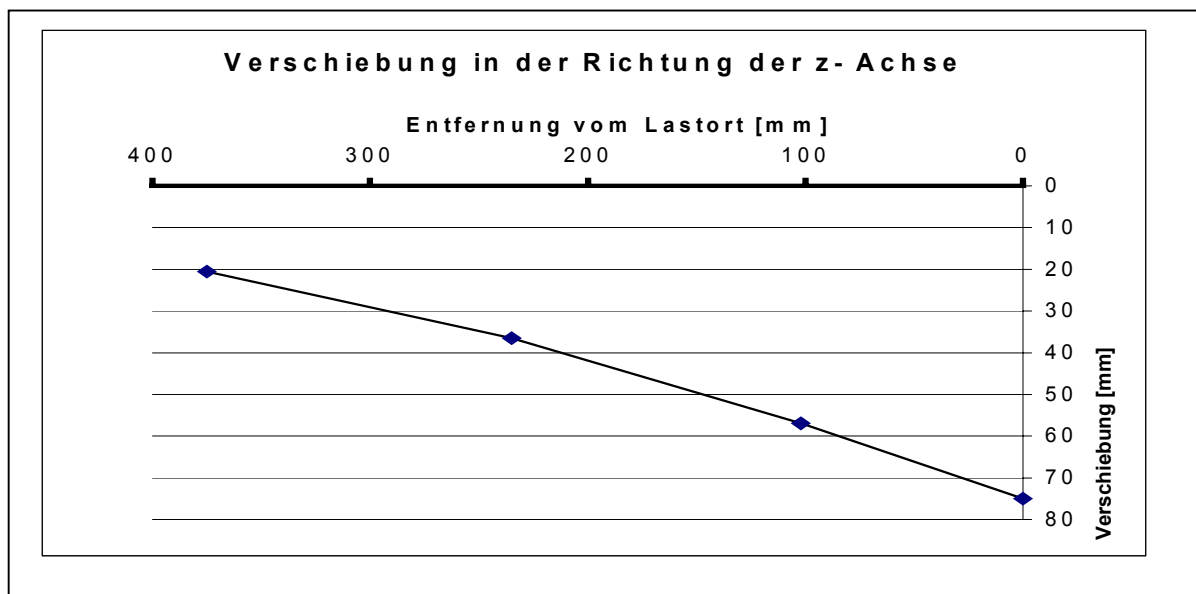


Bild 8.19: Verschiebungsverlauf des Armes 2 aus Aluminiumlegierung in der z-Achse

Die Verschiebung in **Bild 8.19** zeigt eine Unlinearität, die durch die Öffnungen im oberen Bereich des Armes verursacht wird. Die Steifigkeit des inneren Aluminiumarmes im Punkt 1 in z-Achsrichtung beträgt 6480 N/mm.

Die Belastung desselben Armes in y-Achsrichtung ist aus **Bild 8.20** ersichtlich.

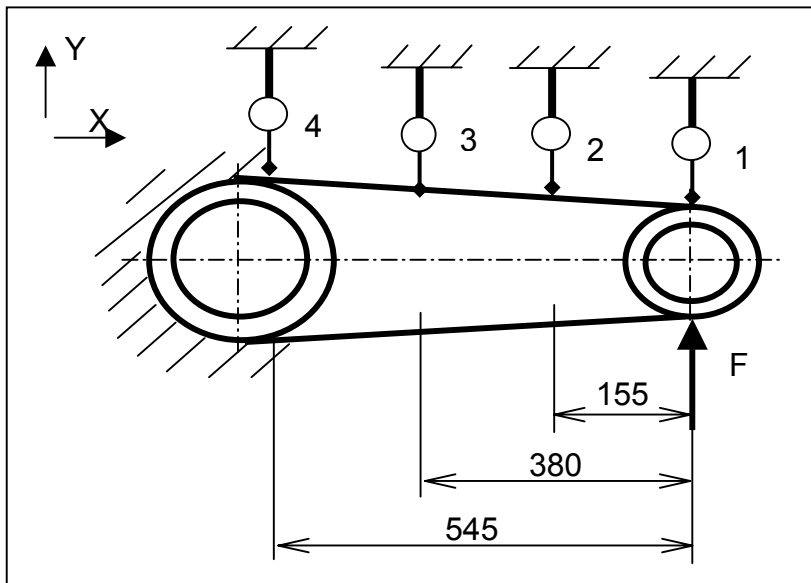


Bild 8.20: Platzierung der Messgeräte beim Messen der Steifigkeit in der y-Achse am Arm 2 aus Aluminium

Die gemessene Verschiebung ist im **Bild 8.21** dargestellt. Die Steifigkeit des Aluminiumarmes in der y-Achse im Punkt 1 beträgt 1923 N/mm.

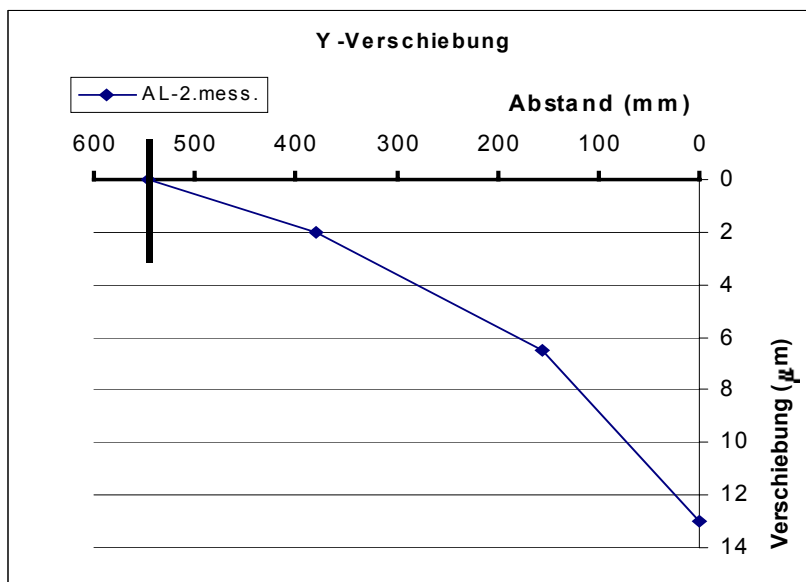


Bild 8.21: Verschiebungsverlauf des Armes 2 in der y-Achse

An den äußeren Roboterarmen wurden auch die Modalanalyse-Untersuchungen durchgeführt, um die Eigenfrequenzen, Eigenformen der Schwingungen und die Dämpfungseigenschaften komparativ an den beiden äußeren Armen zu ermitteln. Das **Bild**

8.22 zeigt das Frequenzspektrum des äußeren Roboterarmes aus AlSi7Mg-Legierung. Aus **Bild 8.22** werden ersichtlich, dass die größten Amplituden 1,436 mm und 1,64 μm bei Frequenzen von 1213 Hz und 1504 Hz entstehen. Bei einer Frequenz mit dem Wert von 823,54 Hz beträgt die Amplitude 876,67 nm.

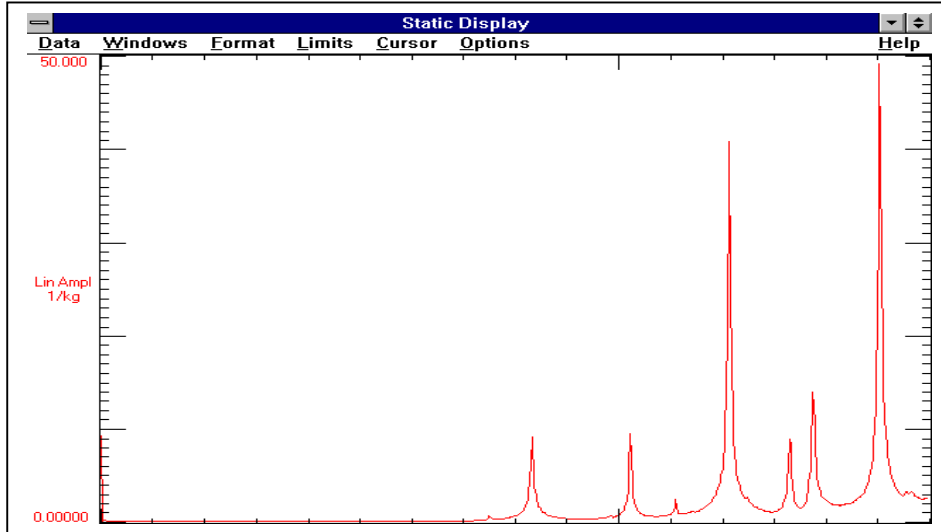


Bild 8.22: *Frequenzspektrum vom Arm 1 aus Aluminiumlegierung*

Bild 8.23 zeigt das Frequenzspektrum für den Kompositarm bis zu 7 kHz. Bis 1 kHz liegen nur geringe Amplitudenwerte beim Kompositarm vor (2,025 μm bei 711,7 Hz). Alle größeren Amplitudenwerte liegen bei höheren Frequenzen als 1 kHz. Der Kompositarm war besser gedämpft als der Arm aus Aluminium.

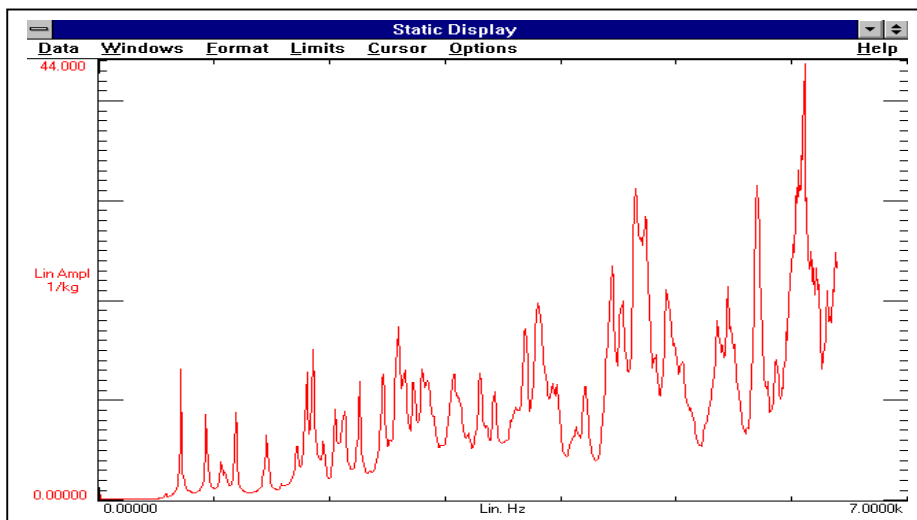


Bild 8.23: *Frequenzspektrum vom Arm 1 aus HKK-Verbund*

Die erste Frequenz des Originalarmes ist mit 580,6 Hz etwas kleiner als beim HKK-Arm mit 749,5 Hz. Die ersten Schwingungsformen der Kompositarme sind Torsionen

und Biegungen. **Bild 8.24** zeigt die Form der Schwingungen bei den größten Amplituden für den Originalarm und für den HKK-Arm.

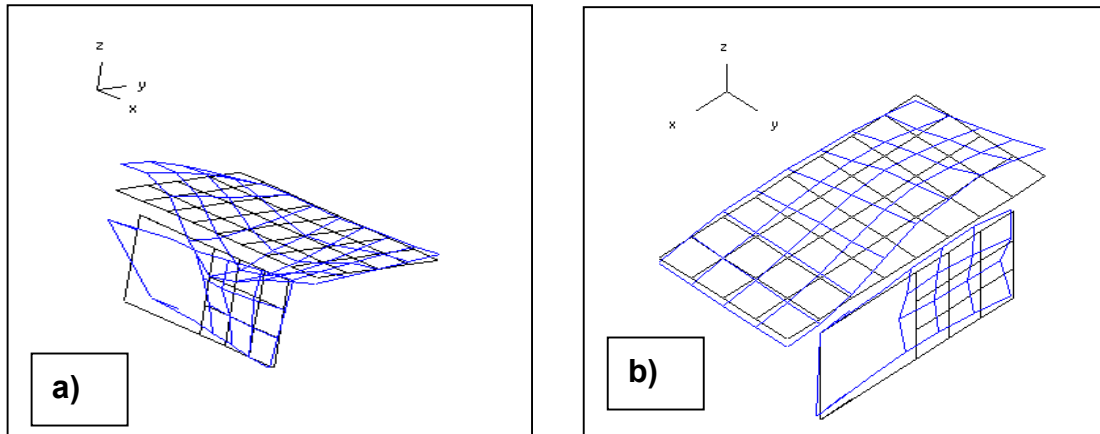


Bild 8.24: a) Form der Schwingung bei der größten Amplitude (876,67 nm) Originalarm; b) Form der Schwingung bei der größten Amplitude (2,021 µm)-HKK-Arm

In der **Tabelle 8.5** sind Werte der größten Frequenzen und die entsprechenden Eigen­dämpfungskoeffizienten für die beiden äußeren Roboterarme aus HKK-Verbund und aus Aluminium komparativ angegeben. In allen angegebenen ersten 6 Moden sind die Werte der Dämpfung für den Kompositarm kleiner als für den Originalarm.

Tabelle 8.5: Ergebnisse der Modalanalyse

	Mode	1	2	3	4	5	6
Originalarm	Eigenfrequenz [Hz]	749,5	832,5	1022	1109	1213	1330
	Dämpfung	0,3	0,29	0,16	0,14	0,2	0,2
HKK-Arm	Eigenfrequenz [Hz]	580,6	711,7	929,4	1053	1095	1186
	Dämpfung	0,43	0,33	0,63	1,09	1,74	0,42

Mittels des FEM-Programms COSAR wurden auch die Eigenfrequenzen der äußeren Roboterarme ermittelt (**Tabelle 8.6**). Die Schwingungsformen bei den ersten zwei Eigenfrequenzen sind in den **Bildern 8.25.a** bis **d** dargestellt.

Tabelle 8.6: Mittels FEM-Programm COSAR berechnete Werte der Eigenfrequenzen

Frequenz	1.F	2. F	3. F	4. F	5 F	6 F
Modell AL	939,6Hz	998,8Hz	1093,3Hz	1430Hz	1586Hz	1725Hz
Modell HKK	634,5Hz	694,2Hz	872,0Hz	977,2Hz	1365Hz	1899Hz

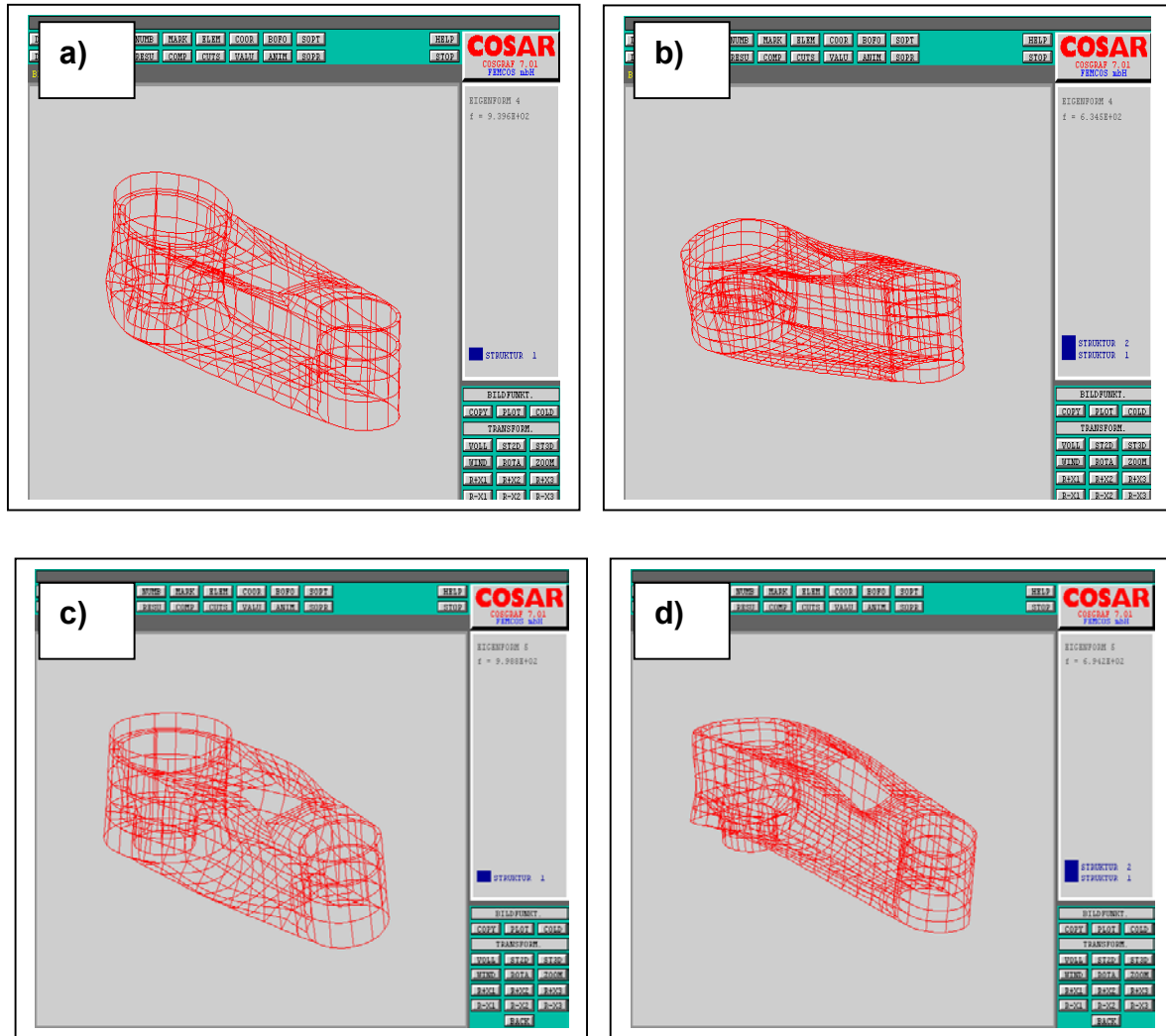


Bild 8.25: Form der Schwingungen a) für Aluminium-Modell bei der Frequenz von 939 Hz; b) für HKK-Modell bei der Frequenz von 634 Hz; c) für Aluminium-Modell bei der Frequenz von 998 Hz; d) für HKK-Modell bei der Frequenz von 694 Hz

Im **Bild 8.26** ist das Frequenzspektrum des inneren Originalarmes wiedergegeben, die mit der Modalanalyse ermittelt wurde. **Tabelle 8.7** beinhaltet die wichtigsten Frequenzen und die dazugehörigen Dämpfungswerte, die beim inneren Arm festgestellt wurden. Die größten Amplituden lagen bei einer Frequenz von 859,58 Hz. Die Werte der Amplituden betragen 575,98 nm. Dies deutet darauf hin, dass der Arm 2 aus dynamischer Sicht mit einem fast doppelten Gewicht ein besseres Verhalten während der dynamischen Untersuchungen aufwies, als der Arm 1.

Tabelle 8.7: Ergebnisse der Modalanalyse

Frequenz [Hz]	670	859	907	1044	1385	1517
Dämpfung [%]	2,28	0,78	1,5	1,77	1,34	2,55

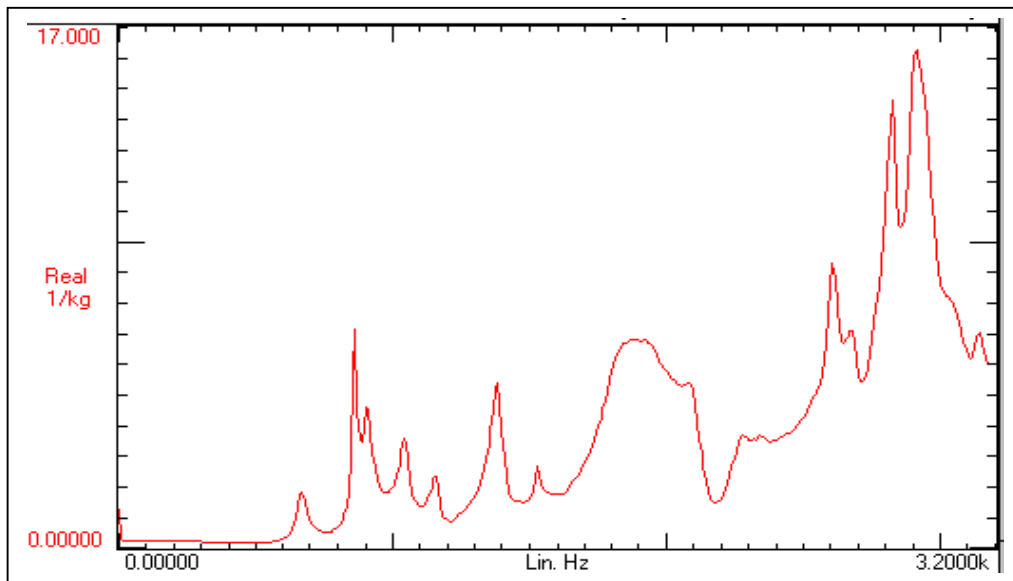


Bild 8.26: *Frequenzspektrum vom Arm 2 aus Aluminiumlegierung*

Bild 8.27 zeigt die montierten Roboterarme aus Hohlkugelkomposit mit der Zusammensetzung entsprechend der Probenvariation 14.



Bild 8.27: *Roboter mit den montierten HKK-Verbund-Armen*

9 Zusammenfassung und Ausblick

Um kostengünstiger und umweltfreundlicher zu produzieren, sind die Werkzeugmaschinenhersteller bestrebt, Leichtbaukonstruktionen auf Basis neuer alternativer Werkstoffe zu entwickeln. Die Grundlage dieser innovativen Entwicklungen bilden die aus der Luft- und Raumfahrt übernommenen Prinzipien des Leichtbaues, wonach für eine optimale Realisierung von Leichtbauprodukten eine kombinierte und angepasste Anwendung mehrerer Leichtbaustrategien notwendig ist [230-238]. Aus den zukünftigen Anforderungen des Maschinenbaus und spezifisch des Werkzeugmaschinenbaues resultiert das Ziel, den Einsatz von alternativen recycelbaren neuen Werkstoffen voranzubringen.

Der im Rahmen dieser Arbeit untersuchte Werkstoff „Hohlkugelkomposit“ setzte sich größtenteils aus 22 Volumenprozenten Epoxydharz und 78 Volumenprozenten verschiedener organischer (Kunststoffe) oder anorganischer (Glas oder Keramik) Hohlkugeln unterschiedlicher Kornklasse zusammen.

Die Bestrebung, einen geringen Anteil von Matrixmaterial bei HKK zu verwenden, lässt eine gewisse strukturelle Ähnlichkeit mit den hochgradig aus silikatischen und quarziti-schen Stoffen bestehenden Mineralguss erkennen. Aus diesem Grunde wurden die Erfahrungen der Konstruktion von Werkzeugmaschinenbauteilen aus Mineralguss auch auf die aus HKK hergestellten Bauteile übernommen.

Um den Werkstoff HKK in Werkzeugmaschinenbauteile einsetzen zu können, ist die Ermittlung der Werkstoffkennwerte notwendig. Eine Auswertung der in den Untersuchungen erzielten Ergebnisse beinhaltet **Kapitel 7**.

Zusammenfassend kann über den Einfluss der Ausgangskomponenten auf die Eigenschaften von HKK eingeschätzt werden:

- Die Art der Mikrokugeln hinsichtlich Wanddicke, Festigkeit, Oberflächeneigenschaften etc. beeinflusst die mechanischen Eigenschaften. Der mit Fillite-Mikrohohlkugeln angereicherte HKK (Probenvariation 5) zeigte günstigere mechanische Eigenschaften und war auch preiswerter als Q-Cel (Probenvariation 6).
- Die Korngrößen des aus gleichartigen Keramikmaterialien zusammengesetzten HKK-Werkstoffes spielen eine wichtige Rolle bei der Raumausfüllung mit Kugeln (Probenvariationen 7 und 8). Je kleiner der Kugeldurchmesser ist, desto größere Schüttdichten werden erzielt.
- Die Füllung der Hohlräume zwischen den Makrokugeln mit Mikrokugeln führte zur Reduzierung des Matrixvolumenanteils und gleichzeitig zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften (Probenvariationen 9, 10 und 14).
- Der Zusatz von verschiedenartigen Füllstoffen, z.B. bei der Probenvariation 14 ermöglicht eine weitere Verbesserung der mechanischen Eigenschaften im Vergleich zur Probenvariation 9. Dies kann auf die verbesserte Sieblinie und auf die Oberflächenspannungen der Bestandteile zurückgeführt werden.

- Der Zusatz eines Haftvermittlers zum Matrixmaterial Epoxydharz bewirkte keine wesentlichen Verbesserungen der Eigenschaften (Probenvariationen 9 und 10).

In Auswertung der werkstoffkundlichen Untersuchungen wurde auf Grund der erzielten Eigenschaftswerte die Zusammensetzung der Werkstoffkombination der Probenvariation 14 für die Testung in Werkzeugmaschinen-Bauteilen ausgewählt. Zur Kennwertermittlung von HKK kann erläutert werden:

- Durch den Einsatz von Füllstoffen verschiedener Kornklasse und Korngröße ergibt sich eine Random-Verteilung der Hohlkugeln, so dass die Eigenschaften nicht aus mathematischen Modellen, sondern aus experimentellen Untersuchungen ermittelt worden sind, obwohl eine sehr homogene und gleichmäßige Dispersion der Füllstoffe und somit Poren in der Matrix ermöglicht wurden.
- Aus der Literatur ist bekannt, dass die Eigenschaften der Verbundwerkstoffe sich aus den Eigenschaften der einzelnen Ausgangswerkstoffe zusammensetzen. Damit können die Kennwerte von HKK aus den Kennwerten der einzelnen Ausgangswerkstoffe berechnet werden, falls diese Kennwerte bekannt sind. Die mechanischen Eigenschaften der Füllstoffe waren jedoch nicht bekannt. Deswegen konnten nur die thermischen Kennwerte der HKK aus den einzelnen Kennwerten der Ausgangswerkstoffe ermittelt werden. Die Unterschiede zwischen den experimentellen und berechneten Kennwerten sind im Wesentlichen auf die poröse Struktur zwischen den Kugeln der HKK und auf die Beschaffenheit der Kugeln zurückzuführen.
- Die Festigkeitswerte der HKK-Probenvariationen steigen in folgender Reihenfolge: $\sigma_Z < \sigma_B < \sigma_D$ an.
- Die Elastizitätswerte im Druckmodus sind größer als im Zugmodus: $E_D > E_Z$
- Der Verlauf der Druckspannungs-Stauchungs-Kurven der HKK-Varianten zeigt Ähnlichkeiten mit den Druckspannungs-Stauchungs-Bildern von zellularen Werkstoffen.
- Die Dämpfungswerte mit der DMA konnten nicht bei Raumtemperatur ermittelt werden. Bei Temperaturen um etwa 30°C liegen sie für die untersuchten Varianten unterhalb von 0,1.
- Die spezifischen Leichtbaukennwerte hinsichtlich Knickgüte- und Beulgütezahlen sind mit denen von Aluminiumlegierungen vergleichbar (**Abschnitt 7**), was das gute Leichtbaupotenzial dieser Werkstoffe demonstriert.

Die im Rahmen dieser Arbeit dargestellten Untersuchungsergebnisse beweisen, dass die spezifischen Kennwerte des Werkstoffes HKK mit denen von Mineralguss oder metallischen Schäumen vergleichbar sind. Der Vorteil von HKK im Vergleich zu den Metallschäumen liegt in der viel einfacheren und kostengünstigeren Fertigung, die den Konstrukteuren bei der Gestaltung und Optimierung der Bauteile eine beanspruchungs- und konstruktionsgerechtere Gestaltungsfreiheit gestattet und zusätzliche sowie aufwendige Nachbearbeitungsprozesse erübrigt. Das Einbringen von Befestigungselementen, wie Schrauben oder Stützen etc., werden wie bei den aus Metallschäumen hergestellten Bauteilen mittels Klebetechniken unter Verwendung von Epoxydharzen erreicht, so dass die Temperaturbeständigkeit von diesen Bauteilen von den verwendeten Eigenschaften der Harzkomponente bestimmt wird. Demgegenüber werden die Befestigungselemente bei Fertigung von Werkzeugmaschinenbauteilen aus

festigungselemente bei Fertigung von Werkzeugmaschinenbauteilen aus Mineralguss oder aus HKK gleichzeitig in die Gießformen integriert.

Für die Optimierung der mechanischen Eigenschaften von HKK im Verbund mit anderen Materialien, wie z.B. Fasern oder Metallteile, sind weitere Untersuchungen zur Ermittlung der Eigenschaften von Sandwichstrukturen nach DIN-Vorschriften, wie im Druckversuch nach DIN 53291, im Biegeversuch (DIN 53293), im Schubversuch (DIN 53294) oder im Schälversuch (DIN 53281 und 30670), notwendig.

Eine weitere Erhöhung der mechanischen Eigenschaften könnte durch die Wahl und die Kombination weiterer Kugeln verschiedener Kornklassen, die enger an der idealen Sieblinie liegen, erreicht werden. Durch den Zusatz von metallischen Kugeln könnten sich weitere Veränderungen der Eigenschaften ergeben.

Der Werkstoff HKK eignet sich grundsätzlich im Werkzeugmaschinenbau für die Masereduzierung von Bauteilen, müsste aber in Abhängigkeit des jeweiligen Belastungsfalles modifiziert werden. Die Applikation von HKK im Werkzeugmaschinenbau im Verbund mit anderen Materialien wurde im **Kapitel 8** exemplarisch demonstriert. Die dargestellten Untersuchungen zur Fertigung und Testung der Anwendbarkeit von HKK-Verbunden für eine Vorrichtung, einen Fräsmaschinentisch bzw. einen äußeren und einen inneren Roboterarm liefern erste Ergebnisse für eine Anwendbarkeit.

Für die Erweiterung des Einsatzfeldes von HKK im Werkzeugmaschinenbau sind in weiterführenden Forschungsarbeiten die Erprobung und Testung von HKK-Variationen für schnell bewegte Maschinenbauteile vorzusehen.

Durch die weiterführende Forschung und Optimierung der Eigenschaften von HKK sind auch andere Anwendungsfelder nicht nur im Werkzeugmaschinenbau denkbar. Durch das gute schall- und wärmedämmende Verhalten könnten HKK als Isolator oder als Konstruktionsmaterial in der Bauindustrie zum Einsatz kommen. Eine weitere Erforschung des Druckverhaltens und des Energieabsorptionsverhaltens von mit HKK gefüllten Blech-Strukturen oder Rohren könnte deren Anwendung als Crashabsorber fördern.

Aus dem Vergleich der ermittelten Werkstoffkennwerte ist ersichtlich, dass die Anwendung des Werkstoffes HKK nicht allein nur auf die Dichte bezogen werden kann. Werkstoffe mit niedriger Dichte führen nicht zwangsläufig auch zu leichten Bauweisen. Nur in Verbindung mit dem jeweiligen Anwendungsfall muss der Einsatz sorgfältig aufeinander abgestimmt werden. Die Beanspruchung eines Bauteils, seine Gestalt und sein Gewicht bedingen, werkstoffbezogene Kennzahlen für einzelne Belastungsfälle wie Zug, Biegung, Druck, Stauchung u.a. sowie das thermodynamische Verhalten zu erforschen.

Die bisherigen Untersuchungen zeigen die ersten Ergebnisse der Ermittlungen des Eigenschaftsprofils von HKK, die noch weiter mit neueren Varianten vervollständigt und optimiert werden müssen, um zu anwendungssichernden Lösungen zu kommen.

10 Literaturverzeichnis

- 1 *Harig, H.; Langenbach, C. J.:* Neue Materialien für innovative Produkte. Band 3: Entwicklungstrends und gesellschaftliche Relevanz, Schriftenreihe der Europäischen Akademie zur Forschung von Folgen wissenschaftlich-technischer Entwicklungen, Springer Verlag, Berlin/Heidelberg, 1999
- 2 *Tönshoff, H. K.; Kaak, R.; Lapp, C.:* Mit Leichtigkeit zur Geschwindigkeit. Werkstatttechnik 90, 2000, S. 235-238
- 3 *Tönshoff, H. K.; Lapp, C.:* Vordringliche Aktion „Innovativer Leichtbau“. Werkstatttechnik 90, 2000, H. 6, S. 231-234
- 4 *Autorenkollektiv:* Dynamik Leichtbau-Werkstoff, Gestalt und Fertigung. Wettbewerbsfaktor Produktionstechnik, AWK, Aachen, 1999
- 5 *Gringel, M.; Heisel, U.:* Konstruktive Merkmale hochdynamischer Laserbearbeitungsmaschinen. Berichte des Industriekolloquiums des Sonderforschungsbereiches 349 der Universität Stuttgart vom 04.07.1996
- 6 *N.N.:* Abschlußbericht der Vordringlichen Aktion: Innovativer Leichtbau, Universität Kassel, Juli, 2000
- 7 *Schröder, R.; Funke, H.:* Entwicklung eines Roboterarmes aus Hochleistungs-Faserverbundwerkstoffen. Studienarbeit, Universität Paderborn, 1991
- 8 *Gerstmann, U.; Livotov, P.:* Systemverhalten von Industrierobotern mit massenreduzierten Strukturen. VDI-Z 135, Nr. 4, Düsseldorf, 1993, S. 99- 104
- 9 *Hohlman, N.; Livtov, P.:* Wirtschaftliche Leichtbaustrukturen auf Basis von Faserverstärkten Kunststoffhalbzeugen. VDI-Berichte Nr. 1080, VDI-Gesellschaft Werkstofftechnik, Werkstofftag: Leichtbaustrukturen und leichte Bauteile, Duisburg, VDI Verlag, Düsseldorf, 1994, S. 323-343
- 10 *Michaeli, W.; Menges, G.; Burkhard, G.:* Faserverbundwerkstoffe für Industrieroboter, ZWF 83, Nr. 12, 1988
- 11 *Hold, H.; Kocian, F.:* Gitterstrukturen aus CFK – ein extremes Leichtbaupotential für einen Roboterarm. VDI-Berichte 1080, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1994, S. 345-353
- 12 *In Shirai, Y.; Hirose, S.:* Robotics Research. The Eighth International Symposium, Springer Verlag, London/ / Tokio, 1998
- 13 *Arendts, F. J.; Pritschow, G.; Nohr, M.; Wurst, K.-H.:* Der Einsatz von Faserverbundwerkstoffen im Rahmen eines Roboterbaukastensystems. Roboter-systeme 4, Springer Verlag, 1988, S. 73-86
- 14 *Weck, M.:* Portalroboter aus kohlenstoffaserverstärktem Kunststoff. Industrie-Anzeiger 83, 1990, S. 32-33
- 15 *Bährend, L.:* Maschinenbauteile aus HKK-Verbund. Studienarbeit, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 1997

10. Literatur

- 16 *Kollanyi, T.*: Roboterarm aus Komposit-Werkstoff. Diplom-Arbeit, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg und Universität Miskolc, 1997
- 17 *Klein, B.*: Leichtbau-Konstruktion. Berechnungsgrundlagen und Gestaltung. 5., Auflage, Vieweg Fachbücher der Technik, Braunschweig/Wiesbaden, 2002
- 18 *Rammerstopfer, F. G.*: Repetitorium Leichtbau. R. Oldenburger Verlag, Wien/München, 1992
- 19 *Klingel, H.*: Innovationen auf dem Gebiet des Werkzeugmaschinenbaus. Konferenzbericht, FTK 97, Stuttgarter Fertigungstechnisches Kolloquium, 11. u. 12.11.97, S.66
- 20 *Zepf, H.-P.*: Faserverbundwerkstoffe mit thermoplastischer Matrix. Hochleistungswerkstoffe für rationelle Verarbeitung. Kontakt & Studium, Band 529, expert Verlag, 1997
- 21 *DIN 1045*: Beton, Stahlbeton, Bemessung und Ausführung. Juli, 1988
- 22 *Dou, K.*: Thermisch bedingtes Deformationsverhalten von Metall-Mineralguss-Verbundkonstruktionen im Werkzeugmaschinenbau. Dissertation, Otto-von-Guericke-Universität, Magdeburg, 1994
- 23 *N.N.*: Werkzeugmaschinengestell aus Epoxydharzbeton. Werkstatt und Betrieb 112, Nr. 9, 1979, S. 609-610
- 24 *Weck, M.; Lachenmayer, S.; Recktenwald, J.*: Getriebegehäuse aus Reaktionsharzbeton. Industrie Anzeiger, Nr. 53 v.3.7, Jahrg. 107, 1985
- 25 *Weck, M.; Grund, P.; Sahm, D.*: Reaktionsharzbeton – Alternative zum Gusseisen für Maschinengestelle? VDI-Zeitung, Band 127, Nr. 5, 1985
- 26 *Rauer, J.*: Modellierung des thermischen Systems von Spindeleinheiten unter der Bedingung des Polymereinsatzes, Dissertation, TU Magdeburg, 1991
- 27 *Wiele, H.; Gropp, H.; Kahle, W.; Klaeger, W.*: Einsatz von Reaktionsharzbeton im Vorrichtungsbau. Fertigungstechnik und Betrieb 49, Nr. 9, 1991
- 28 *DIN 52190*: Prüfung von Reaktionsharzbeton. Teil 1: Begriffe. Mai, 1991
- 29 *DIN 52190*: Prüfung von Reaktionsharzbeton. Teil 2: Prüfung von Bindemittel, Füllstoffe und verarbeitungsfähigen Mischungen, Mai, 1991
- 30 *DIN 52190*: Prüfung von Reaktionsharzbeton. Teil 3: Prüfung gesondert hergestellter Probekörper, Mai, 1991
- 31 *DIN 52190*: Prüfung von Reaktionsharzbeton, Teil 4: Prüfung in der Produktion und am Bauteil, Mai, 1991
- 32 *Sahm, D.*: Reaktionsharzbeton für Gestellbauteile spanender Werkzeugmaschinen. Werkstoffseitige Möglichkeiten zur Verbesserung der Fertigungstechnik und des Betriebsverhalten. Dissertation, TH Aachen, 1987
- 33 *Groche, F.*: Materialeigenschaften und Anwendungsmöglichkeiten von Polymerbeton. VDI-Bericht 384, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1980
- 34 *Prößler, E.-K. und 8 Mitautoren*: Mineralguss im Maschinenbau. Eine technische ...

10. Literatur

- nisch und wirtschaftlich interessante Werkstoffalternative. expert Verlag, Band 327, Kontakt und Studium, Ehningen bei Böblingen, 1991
- 35 *Weck, M.:* Werkzeugmaschinen und Fertigungssysteme 1: Maschinenarten und Anwendungsbereiche. 5., überarbeitete Auflage, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1998
- 36 *Weck, M.:* Werkzeugmaschinen und Fertigungssysteme 2: Konstruktion und Berechnung. 6., überarbeitete Auflage, Springer Verlag, Berlin, 1997
- 37 *N.N.:* Mineralguss ABC. Firmenschrift. ACO Severin Ahlmann GmbH & Co. KG
- 38 *Etmanski, B.:* Zum Eigenschaftsprofil hochgefüllter Reaktionsharzverbundwerkstoffe. Dissertation, Universität GH Kassel, 1992
- 39 *Ortmann, J.-P.:* Maschinenentwicklung zum Hochgeschwindigkeitsschleifen von Zahnrädern. Dissertation, RWTH Aachen, 1995
- 40 *Klaeger, U.:* Untersuchungen zum Einsatz von Mineralguss für Werkstückspannvorrichtungen in der spanende Fertigung. Dissertation, Otto-von-Guericke-Universität, Magdeburg, 1995
- 41 *Neugebauer, D.; Hupfer, P.; Doege, E.; Menz, R.:* Schwingungs- und lärmarme Umform- und Schneidwerkzeuge. EFB-Forschungsbericht, Europäische Forschungsgemeinschaft für Blechverarbeitung, Univ. Hanover, Band 134, 1999
- 42 *Orak-Sezan:* Investigation of vibration damping on polymer concrete with polyester resin. Advanced cement based materials, Band 30, 2000
- 43 *Fiedler, D.:* Recycling von Mineralguss im Maschinenbau. Dissertation, Otto-von-Guericke-Universität, Magdeburg, 1998
- 44 *König, H.-J.; Schuster, J.:* Polymerbeton - neuer Baustoff zum ökologischen Bauen und Gestalten. Technische Textilien. Band 42, Nr.3, 1999
- 45 *Wiele, W.; Gropp, H.; Geßler, W.; Fiedler, D.:* Mineralguss - ein umweltgerechter Werkstoff. VDI-Z Integrierte Produktion, Band 140, Nr. ¾, 1998, S. 57-59
- 46 *Neugebauer, R.:* Einsatzmöglichkeiten von Metallschaum in Werkzeugmaschinen und Handlingeinrichtungen. Neue Werkstoffe ermöglichen Leichtbau bei hoher Dämpfung. Dima, Nr. 1-2, 1996, S. 40-58
- 47 *Clarke, J. L.:* Structural Design of Polymer Composites. EUROCOMP design Code and Handbook. The European Structural Polymeric Composites Group, E & FN Spon, London/.../Madras, 1996
- 48 *Gibson, L. J.; Ashby, M. F.:* Cellular Solids. Structure and Properties. Second Edition, Cambridge, 1997
- 49 *Funke, H.; Jorden, W.:* Sandwich-Leichtbauteile in Wabenbauweise. Eine all-gemeingültige Einführung in die Leichtbauweise mit Aramid-Waben. R&G GmbH, Faserverbundwerkstoffe, 1999

10. Literatur

- 50 *Arendts, F.-J.; Drechsler, K.*: Dreidimensional verstärkte Faserverbundwerkstoffe. Hochleistungs-Verbund-Werkstoffe für neue Systeme, Vulkan-Verlag, Essen, 1993
- 51 *Silva, M., J.; Gibson, L., J.*: The Effects of Non-Periodic Microstructure and Defects on the Compressive Strength of the two-dimensional Cellular Solids. International Journal of Mechanical Sciences, Band 39, Nr. 5, Cambridge, 1997, S. 549-563
- 52 *Wu, E.; Jiang, W.-S.*: Crush of Honeycombs Contact and Impact Loads. Konferenz-Einzelbericht, The 10th Internat. Conf. on Composite Materials, Proc. Vol. 5: Structures, Whistler, Band 5, Abington, 1995, S. 567-574
- 53 *Weber, M.*: Metallschaum - eine neue Werkstoffklasse mit Zukunft. Zahlreiche Anwendungen durch neuartige Eigenschaftskombinationen. Transfer, Nr. 20, 1996, S.32-34
- 54 *Greif, H.*: Schäume, Gieß- und Klebstoffe und ihre Anwendung. Vogel Buchverlag, Würzburg, 1986
- 55 *DIN 7726*: Schaumstoffe. Begriffe und Einteilung. Mai, 1982
- 56 *Eleftheriadis, G.*: Dämmung haustechnischer Anlagen. Gesetzgebung und geeignete Dämmstoffe. KU Kunststoffe, Jahrg. 89, Nr. 11, Carl Hanser Verlag, München, 1999, S. 137-142
- 57 *Bauer, G.; Kugler, M.; Chakrabarti, R., S.*: Recycling von Weichschaumstoffen aus PUR. Solvolyse mit Karbonsäuren schließt die Lücken. KU Recycling, Jahrg. 89, Nr. 2, 1999, S. 85-88
- 58 *Schulz-Sluka, L.*: PUR-Weichschaumstoffe in der Wärmealterung. Kunststoffe, Jahrg. 89, Nr. 3, Carl Hanser Verlag, München, 1999, S. 108-110
- 59 *Steinbichler, G.; Schwertberg, K.; Pierick, D.; Jacobsen, K.*: Spritzgießen von Strukturschaum. Ein neues Verfahren für feine Zellstrukturen. Kunststoffe, Jahrg. 89, Nr. 9, Carl Hanser Verlag, München, 1999, S. 50-54
- 60 *Petersen, M.; Kleba, I.*: PUR-er Leichtbau. Leichtbaukonzepte mit Polyurethanen im Automobilbau. Kunststoffe, Jahrg. 90, Nr. 3, Carl Hanser Verlag, München, 2000, S. 136-143
- 61 *N. N.*: Materialreduzierung bei Kunststoffverpackungen. Schäume sorgen für Leichtigkeit. Neue Verpackungen 5/ 94
- 62 *Nagata, S.; Koyama, K.*: A New Method for Estimating the Cellular Structure of Plastic Foam Based on Dielectric Anisotropy. Polymer Engineering and Science, Band 39, Nr. 5, Greenwich, 1999, S. 896- 903
- 63 *Bahnart, J.; Baumeister, J.; Weber, M.*: Metallschaum – ein Werkstoff mit Perspektiven. Aluminium, Jahrg. 70, Nr. ¾, 1994, S. 209-212
- 64 *Baumeister, J.*: Überblick – Verfahren zur Herstellung von Metallschäumen. Werkstoffe, Technische Mitteilungen 92, Nr. 2, 1999, S. 94-99
- 65 *Weber, M.; Baumeister, J.; Bahnart, J.*: Aluminiumschäume und ihre Eigen-

10. Literatur

- schaften. VDI - Gesellschaft Entwicklung Konstruktion Vertrieb, Fortschritt mit Gusskonstruktionen, VDI Berichte 1324, 1997, S. 75-89
- 66 *Bahnart, J.*: Metallschäume. Beiträge zum Symposium Metallschäume, Bremen, 6.-7-3.1997, Verlag Metall Innovation Technologie, Bremen, 1997
- 67 *Weaire, D.; Bahnart, J.*: Foams and Films. International Workshop on Foams and Films, Leuven, 5th-6th March, 1999, Verlag Metal Innovation Technologies MIT, Bremen, 1999
- 68 *Bahnart, J.; Ashby, M., F.; Fleck, N., A.*: Metal Foams and Porous Metal Structures, International Conference on Metal Foams and porous Metal Structure, 14th- 16th June, 1999, Verlag Metal Innovation Technologies, Bremen, 1999
- 69 *Degischer, H., P.*: Metallschäume. DGM Deutsche Gesellschaft für Materialkunde e. V., Wiley-VCH, Weinheim/.../Toronto, 2000
- 70 *Ashby, M., F.; Evans, A.; Fleck, N., A.; Gibson, L., J.; Hutchinson, J., W.; Wadley, H., N., G.*: Metal Foams: A Design Guide. Butterworth Heinemann, Boston/.../New Delhi, 2000
- 71 *Akiyama, S.; Ueno, H.; Imaga, K.; Kitara, A.; Nagata, S.; Moritomo, K.*: Foamed metal and method of producing same. Europäisches Patent 0 210 803, 1989
- 72 *Miyoshi, T.; Itoh, M.; Akiyama, S.; Kitahara, A.*: Aluminium Foam, „ALPORAS“: The Production Process, Properties and Application. Konf.-Bericht in Bahnart, J. et al. : Metal Foam and Porous Metal Structures. MIT Verlag, Bremen, 1999
- 73 *Ruch, W.; Kirkewag, B.*: A process of Manufacturing Particle Reinforced Metal Foam and Product. Patent Norsk Hydro: WO 01387, 1991
- 74 *Jin, I.; Kenny, L.; Sang, H.*: Lightweight foamed metal and its production. Patent ALCAN: WO 91/ 01387, 1991
- 75 *Jin et al.*: Method of producing lightweight foamed metal. US Patent Nr. 4, 973,358, 1990
- 76 *Jin et al.*: Stabilized metal with isolated pores and its production. US Patent Nr. 5, 221, 324, 1992
- 77 *Jin et al.*: Lightweight metal with isolated pores and its production. US Patent Nr. 5, 221, 324, 1993
- 78 *Gergely, V.; Clyne, T., W.*: A novel melt-based route to aluminium foam Production. Konf.-Bericht, Metal Foams and Porous Metal Structures, Verlag Metall Innovation Technologie, Bremen, 1999, S.83-91
- 79 *Kaptay, G.*: Interfacial criteria for ceramic particle stabilised metallic foams. Konf. – Bericht, Metal Foams and Porous Metal Structures, International Conference on Metal Foams and Porous Metal Structure, 14th- 16th June, 1999, Verlag Metal Innovation Technologies, Bremen, 1999, S. 141-147
- 80 ERG Duocel aluminium foam. ERG Corporate Literature and Reports,

10. Literatur

- <<http://ergaerospace.com/lit.html>>, 1998
- 81 ERG Duocel physical properties. ERG Corporate Literature and Reports, <<http://ergaerospace.com/lit.html>>, 1998
- 82 *Shapolov, V.*: Method for Manufacturing Porous Articles. US-Patent, 5, 181, 549, 1993
- 83 *Shapolov, V.,I.*: MRS-Bulletin, April, 1994, S. 24-28
- 84 *Babjak et al.*: Method of forming nickel foam. US Patent, Nr. 4,957,543, 1990
- 85 *Kulkarni, S. B.; Ramakrishnan, P.*: Foamed Aluminium. Int. Journal of Powder Metallurgy 9, Nr. 1, 1973, S. 41-45
- 86 *Baumeister, J.*: Verfahren zur Herstellung poröser Metallkörper. DE 40 18 360.2, 1990
- 87 *Baumeister, J.; Schrader, H.*: Verfahren zur Herstellung aufschäumbarer Metallkörper. EP 0 460 392 A1, 1991
- 88 *Baumeister, J.; Bahnhart, J.; Weber, M.*: Metallischer Verbundwerkstoff und Verfahren zu seiner Herstellung, DE 43 25 539.6, 1994
- 89 *Baumeister, J.; Bahnart, J.; Weber, M.*: Poröser metallischer Werkstoff mit anisotropen Eigenschaften, DE 43 25 538.8, 1994
- 90 *Baumeister, J.*: Production technology for aluminium foam/steel sandwiches. Metal Foams and Porous Metal Structures, Verlag Metall Innovation Technologie, Bremen, 1999, S. 113-119
- 91 *Weber, M.*: Herstellung von Metallschäumen und Beschreibung der Werkstoffeigenschaften. Dissertation, Clausthal, 1995
- 92 *Rausch, G.; Weber, M.; Knüwer, M.*: Neue Entwicklungen zur Herstellung von Stahlschäumen. Mat.-wiss. u. Werkstofftechnik 31, Wiley Verlag, Weinheim, 2000, S. 424-427
- 93 *Knüwer, M.*: Herstellung von Eisenschäum nach dem pulvermetallurgischen Treibmittelverfahren. Dissertation, Bremen, 1999
- 94 *Bahnart, J.; Baumeister, J.; Weber, M.*: Geschäumte Metalle: Vielseitig einsetzbar. Herstellung vereinfacht. Industrie Anzeiger 37, 1993, S. 48-49
- 95 *Siebels, J. E.*: Anwendungen von Aluminiumschaum. Aspekte zur Umsetzung von Energieabsorptionsanforderungen in Materialeigenschaften (passive PKW-Sicherheit). Werkstoffe, Technische Mitteilungen 2, 1999, S. 100-106
- 96 *Kalke, S.*: Aluminiumschaum im Wettbewerb zu anderen energieabsorbierenden Systemen im Automobil. Metallschäume. Beiträge zum Symposium Metallschäume, Bremen, 6.-7-3.1997, Verlag Metall Innovation Technologie, Bremen, 1997S. 103-116
- 97 *Endler, F.; Lahner, S.; Hoffmann, M.*: Aluminiumschaum aus der Sicht potentieller Anwender. Beiträge zum Symposium Metallschäume, Bremen, 6.-7-3.1997, Verlag Metall Innovation Technologie, Bremen, 1997S. 177-124

10. Literatur

- 98 *Bahnart, J.; Baumeister, J.; Weber, M.*: Damping properties of aluminium foams. *Material Science and Engineering A* 205, Elsevier Science, 1996, S. 221-228
- 99 *Bahnart, J.; Baumeister, J.; Weber, M.*: Geschäumte Metalle als neue Leichtbauwerkstoffe. VDI-Berichte Nr. 1021, 1993, S. 277-284
- 100 *Honsel, H.- D.*: Neue Werkstoffentwicklungen. Aluminium bietet weiteres Innovationspotential durch maßgeschneiderte Lösungen. *Ingenieur - Werkstoffe* 9, Nr. 1, 2000, S. 21-22
- 101 *Hipke, Th.*: Analyse, Bewertung und Eignung von Aluminiumschäumen für die Werkzeugmaschinenkonstruktion. Fakultät für Maschinenbau und Verfahrenstechnik der Technischen Universität Chemnitz, 2001
- 102 *Hartmann, M.; Singer, R. F.*: Herstellung und Eigenschaften syntaktischer Magnesiumschäume. Konf.-Einzelbericht, Bahnart, J.: Metallschäume. Beiträge zum Symposium Metallschäume, Bremen, 6.-7-3.1997, Verlag Metall Innovation Technologie, Bremen, 1997
- 103 *Hartmann, M.; Reindel, K.; Singer, R. F.*: Fabrication and properties of syntactic magnesium foams. MRS Spring Symposium, Porous and Cellular Materials for Structural Applications, Materials Research Society Symposium-Proceedings, Band 521, Warendale, 1998, S. 211-216
- 104 *Hartmann, M.*: Syntaktische Schäume auf Magnesiumbasis. *Aluminium*, Jahrg. 75, Nr. 3, 1999
- 105 *Hartmann, M.; Crößmann, I.; Reindel, K.; Singer, R.F.*: Microstructure and Mechanical Properties of Cellular Magnesium Matrix Composites. Bahnart, J.; Ashby, M., F.; Fleck, N., A.: *Metal Foams and Porous Metal Structures*, Verlag Metall Innovation Technologie, Bremen, 1999
- 106 *Puterman, M.; Narkis, M.*: Syntactic Foams I. Preparation, Structure and Properties. *Journal of Cellular Plastics*, 16, 1980, H.4, p. 223-229
- 107 *Narkis, M. u.a.*: Syntactic Foams III. Three-Phase Materials Produced from Resin Coated Microballoons. *Journal of Cellular Plastics*, 18, 1982, H.4, p. 230-232
- 108 *Kocetkow, V.A.*: Berechnung der elastischen und wärmephysikalischen Eigenschaften von Mehrphasen-Komposit mit Bestandteilen oder Hohlkörpern. *Mechanika kompositnich Materialow*. 1994, T30, Nr. 4, S. 512-519
- 109 *Schröder, K. F.*: Neuere Entwicklungen bei verstärkten Epoxydharzen. *Kunststoffe*, Band 60, 1970, H. 12, S. 905-910
- 110 *Janda, R.*: *Kunststoffverbundsysteme. Grundlagen, Anwendung, Verarbeitung, Prüfung*. VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim, 1990
- 111 *Menz, P.*: Hohlkugelkomposit – ein neuer Werkstoff für den Maschinenbau. *Werkstattechnik*, Band 87, 1997, H. 6, S. 325-329
- 112 *Menz, P.*: Maschinenbaugruppen aus Kompositmaterial. Dt.-Pat. Nr. 1952367, 1999

- 1996
- 113 *Nagel, A.R.; Uslu, C.; Lee, K. J.; Cochran, J. K.; Sanders, Jr. T. H.:* Steel Closed Foams from Direct Oxide Reduction. Konf. - Einzelbericht: TMS Annual Meeting Synthesis/Processing of Lightweight Metallic Materials, Minerals, Metals & Materials Soc. (TMS), Warrendale, 1997, S. 395-406
- 114 *Baxter, N. E.; Sanders, Jr. T. H.; Nagel, A. R.; Lee, K. J.; Cochran, J. K.:* Metallic Foams from Alloy Hollow Spheres. Synthesis/Processing of Lightweight Metallic Materials II, The Minerals, Metals & Materials Society, Warrendale, 1997
- 115 *Sypeck, D. J.; Parrish, P. A.; Wadley, H. N. G.:* Novel hollow powder porous structures. MRS Spring Symposium, Porous and Cellular Materials for Structural Applications, Materials Research Society Symposium-proceeding, Band 521, San Francisco, 1998, S. 205-210
- 116 *Hurysz, K.-M.; Clark, J.-L.; Nagel, A.-R.; Hardwicke, C.-U.; Lee, K.-J.; Cochran, J.-K.:* Steel and Titanium hollow spheres foams. MRS Spring Symposium, Porous and Cellular Materials for Structural Applications, Materials Research Society Symposium-Proceedings, Band 521, San Francisco, 1998, S. 191-203
- 117 *Stefani, G.; Waag, U.; Löthman, P.; Andersen, O.; Schneider, L.; Bretschneider, F.:* New light weight structures based on low-cost metallic hollow spheres. Fraunhofer Institute for Manufacturing and Advanced Materials
- 118 *Waag, U.; Schneider, L.; Loethman, P.; Stefani, G.:* Metallic hollow spheres – materials for the future. Metal Powder Report, Band 55, Nr. 1, 2000, p. 29-33
- 119 *Waag, U. u.a.:* Metallische Hohlkugeln verbessern Werkstoffstruktur von Leichtbauteilen. Maschinenmarkt, Band 105, Nr. 45, Würzburg, 1999, S. 62-65
- 120 *Andersen, B.; O.; Waag, U.; Schneider, L.; Stephani, G.; Kieback, B.:* Novel Metallic Hollow Spheres Structures. Advanced Engineering Materials, Band 2, Nr. 4, 2000, S. 192-195
- 121 *Böhme, C.:* Maßgeschneiderte Leichtigkeit. Metallische Hohlkugeln verringern die ursprüngliche Material-Dichte und sparen so Gewicht. Der Zuliefermarkt, Nr. 1, 1998, S. 50-52
- 122 *Waag, U.; Schneider, L.; Stefani, G.; Andersen, O.; Kieback, B.:* Metallische Hohlkugelstrukturen für innovative Leichtbaustrukturen. Vorsprung durch fertigungsgerechte Leichtbauweisen, Band 730, Düsseldorf, 1999, S. 9.1-9.5
- 123 *Waag, U; Stephani, G.; Bretschneider, F; Venghaus, H:* Cellular structures on metallic hollow spheres-processing and properties. Proceedings of the 2002 World Congress on Powder Metalurgy & Particulate Materials (PM²TEC), June 16-21, Orlando, Florida, 2002
- 124 *Ehrenstein, G. W.:* Faserverbund-Kunststoffe. Werkstoffe – Verarbeitung - Eigenschaften. Carl Hanser Verlag. München/Wien, 1992

10. Literatur

- 125 *Schnegelsberg, G.*: Handbuch der Faser. Theorie und Systematik der Faser. Deutscher Fachverlag, Frankfurt am Main, 1999
- 126 *Flemming, M.; Ziegmann, G.; Roth, S.*: Faserverbundbauweisen. Fasern und Matrices. Springer Verlag, Berlin/Heidelberg, 1995
- 127 *Malick, P. K.; Newman, S.*: Composite Materials Technology. Process and Properties. Hanser Publishers, Munich/.../New York, 1990
- 128 *Bergmann, H. W.*: Konstruktionsgrundlagen für Faserverbundbauteile. Springer-Verlag, Berlin/.../Budapest, 1992
- 129 *Wegener, W.; Wegener, M.*: Einführung in die Technologie der Faserverbundwerkstoffe. Carl Hanser Verlag, München/Wien, 1990
- 130 *Neitzel, M.; Breuer, U.*: Die Verarbeitungstechnik der Faser-Kunststoff-Verbunde. Carl Hanser Verlag, München/Wien, 1997
- 131 *Rosenbaum, U.*: Kohlenstoffaserverstärkte Kunststoffe. Eigenschaften und Anwendung eines modernen Werkstoffes. Die Bibliothek der Technik, Band 93, Verlag moderne Industrie AG, Landsberg/Lech, 1994
- 132 *Scharr, G.*: Messungen der Elastizitätszahlen und Wärmeausdehnungskoeffizienten von faserverstärkten Kunststoffen. Diss. RWTH Aachen, 1984
- 133 *Baron, C.*: Mechanische Eigenschaften kohlenstoffaserverstärkter Kunststoffe (CFK) bei Variation der Matrixduktilität und der Bruchdehnung der Faser. Dissertation, Universität Bremen, 1990
- 134 *Moser, K.*: Faser-Kunststoff-Verbund. Entwurfs- und Berechnungsgrundlagen. VDI Verlag, Düsseldorf, 1992
- 135 *Michaeli, W.; Huybrechts, D.; Wegener, M.*: Dimensionieren mit Faserverbundkunststoffen. Einführung und praktische Hilfen. Carl Hanser Verlag, München/Wien, 1995
- 136 *Niederstadt, G. u.a.*: Ökonomischer und ökologischer Leichtbau mit faserverstärkten Polymeren. Gestaltung, Berechnung und Qualifizierung. 2., völlig neubearbeitet Auflage, expert verlag, Renningen-Malmsheim, 1997
- 137 *Haldenwager, H.-G.*: Hochleistungs-Faserverbund-Werkstoffe im Automobilbau. Entwicklung, Berechnung, Prüfung, Einsatz von Bauteilen. VDI Verlag, Düsseldorf, 1993
- 138 *N.N.*: Borfaserverstärkte Composites. Nicht nur in der Flugzeugindustrie. Ingenieur - Werkstoffe 5, Nr. 7/8, 1993
- 139 *Ziegmann, G.; Hintermann, M.*: Faserverbund-Mountainbike. Beispiel für eine Entwicklung hochintegrierter Strukturen. Verbundwerkstoffe KU, Jahrg. 89, Nr. 2, 1999
- 140 *Kärger, J. C.; Voder Mayer, A. M.*: Maßgeschneiderte Hochleistungscomposi- te. Halbzeuge auf Basis von thermoplastischen Hochleistungsfaser- Verbundwerkstoffen. Kunststoffe KU, Jahrg. 89, Nr. 11, 1999

10. Literatur

- 141 *Knauer, B.; Wende, A.:* Konstruktionstechnik und Leichtbau. Methodik-Werkstoff-Gestaltung-Bemessung. Akademie Verlag, Berlin, 1988
- 142 *Wiedemann, J.:* Leichtbau 2: Konstruktion. 2., neubearbeitete Auflage, Springer Verlag, Berlin/.../Tokio, 1996
- 143 *Bitzer, T.:* Honeycomb Technology. Materials, design, manufacturing, applications and testing. Chapman & Hall, London/ .../Madras, 1997
- 144 *Bregenzer, R.:* Schichtverbundwerkstoffe für strukturelle Anwendungen in der Bautechnik. VDI Berichte Nr 1080, 1994, S. 595-608
- 145 *Dyckhoff, J.; Michaeli, W.:* Energie- und Rohstoffeinsparung durch den Einsatz von Faserverbundkunststoffen am Beispiel eines Integralbauteils. VDI Berichte Nr 1080, 1994, S. 677- 684
- 146 *Meteer, C.-L.:* Development of mouldable, structural, low density core material for sandwich composites. Konf.-Einzelbericht: Advanced Composites Conf., Proc. USA, 1995, S. 431-436
- 147 *Hohe, J.; Becker, W.:* Elastische Effektiveigenschaften kommerzieller Sandwich-Kerne – eine vergleichende Analyse. Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde, Herausgegeben von Schulte, K. u. Kainer, K.U., Wiley-VCH, Weinheim/.../Toronto, 1999, S. 24-29
- 148 *Hagen, H., V.; Hatzfeld, D.; Weber, M.; Baumeister, J.; Paschen, M.:* Werkstoffprüfung an neuartigen Sandwich-Verbundwerkstoffen aus Stahldeckblechen mit Aluminiumschaumkern. S. 169- 176
- 149 *DIN 53293:* Prüfung von Kernverbundwerkstoffen. Vierpunkt-Biegeversuch. 1982
- 150 *DIN 53292:* Prüfung von Kernverbundwerkstoffen. Zugversuch senkrecht zur Deckschichtebene. 1982
- 151 *DIN 53291:* Prüfung von Kernverbundwerkstoffen. Druckversuch senkrecht zur Deckschichtebene. 1982
- 152 *Enboa, W.; Shung-Jiang, W.:* Crush of honeycombs under contact and impact loads. Konf.-Einzelbericht, Vol. 5: Structures, Whistler, CDN, Band 5, Abington, 1995, S. 567-574
- 153 *Scarponi, C.; Briotti, G.; Barboni, R.; Marcone, A.; Iannone, M.:* Impact testing on composites laminates and sandwich panels. Journal of Composite Materials, Band 30, Heft 17, 1996, S. 1873-1911
- 154 *Böllinghaus, T., Hagen, H. von; Bleck, W.:* Ermüdung von Sandwichverbunden aus Aluminiumschaum mit Stahldeckblechen. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik 31, 2000, S. 488-492
- 155 *Funke, H.; Jorden, W.:* Sandwich-Leichtbauteile in Wabenbauweise. Wissen aus erster Hand, Eine allgemeingültige Einführung in die Leichtbauweise mit Aramid-Waben, R&G GmbH, Faserverbundkunststoffe, 1999
- 156 *Cohrt, H.; Baumgärtner, F.; Brungs, D.; Gers, H.; Wiessler, U.; Baumeister, J.:*

10. Literatur

- Pulvermetallurgische Herstellung von Bauteilen aus Aluminiumschäumen. Symposium 2: Werkstoffe für Verkehrstechnik. Werkstoff – Informationsgesellschaft, Weinheim/.../Toronto, 1999, S. 159-171
- 157 *Menz, P.; Klaeger, S.:* Mineralguss und Hohlkugelkomposit – alternative Werkstoffe im Maschinenbau. MPK, Otto-von-Guericke-Universität, Magdeburg, 1999
- 158 *Baumeister, E.; Menz, P.:* Alternative Werkstoffe im Maschinenbau. International Conference on Manufacturing Systems, ICTM, Bucharest, October, 2000, S. 281-286
- 159 *Dominghaus, H.:* Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften. 5., völlig neubearbeitete und erweiterte Auflage, Springer Verlag, Berlin/New York, 1997
- 160 *Gnauck, B.; Fründt, P.:* Einstieg in die Kunststoffchemie. 3., neubearbeitete Auflage, Carl Hanser Verlag, München/Wien, 1991
- 161 *Habenicht, G.:* Kleben. Grundlage, Technologie, Anwendungen. 3., neubearbeitete und erweiterte Auflage, Springer Verlag, Berlin/Tokio, 1997
- 162 *DIN 16945:* Reaktionsharze, Reaktionsmittel und Reaktionsharzmassen, Prüfverfahren. Beuth Verlag, Berlin/Köln, 1976
- 163 *Ehrenstein, G. W.; Bittmann, E.:* Duroplaste. Aushärtung – Prüfung - Eigenschaften. Carl Hanser Verlag, Wien, 1997
- 164 *N.N.:* Firmendatenblätter Ebalta
- 165 *N.N.:* Firmenschrift UPPC
- 166 *Janda, R.:* Kunststoffverbundsysteme: Grundlagen, Anwendung, Verarbeitung, Prüfung. VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim, 1990
- 167 *Lee, S. M.:* Handbook of Composite Reinforcements. VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim, 1993
- 168 *N.N.:* Firmenprospekte der Firma Potters-Ballotini an affiliate of the PQ Corporation, 1999
- 169 *Petzold, A.:* Anorganisch-nichtmetallische Werkstoffe. Charakteristik-Eigenschaften-Anwendungsverhalten. 3.überarbeitete Auflage, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig/Stuttgart, 1992
- 170 *N.N.:* Firmenblätter Osthoff-Petrasch, 1999
- 171 *N.N.:* Firmenprospekte Gößl+Pfaff, 1999
- 172 *N.N.:* Firmenblätter Omya, 1999-2001
- 173 *Murphy, J.:* Additives for plastics. Handbook, Elsevier Science LTD, 1996
- 174 *N.N.:* Firmenblätter Lehman & Voss & Co
- 175 *N.N.:* Firmenblätter Treibacher, 1999
- 176 *N.N.:* Firmenblätter Poraver, 1999
- 177 *N.N.:* Faserverbundwerkstoffe. Neue Technologien. Neue Werkstoffe. Hand-

10. Literatur

- buch. R& G GmbH, D-71111 Waldenbuch, Internet: www.r-g.de
- 178 *Ehrenstein, G. W.*: Polymer-Werkstoffe. Struktur-Eigenschaften-Anwendung. 2., völlig überarbeitete Auflage, Carl Hanser Verlag, München/ Wien, 1999
- 179 *Ehrenstein, G. W.; Riedel, G.; Trawiel, P.*: Praxis der Thermischen Analyse von Kunststoffen. Carl Hanser Verlag, München/ Wien, 1998
- 180 *Geßler, W.*: Zusammenstellung der Füllstoff- und Harz-Härter-Anteile für Mineralguss, unveröffentlicht, 1999
- 181 *Baumeister, E.-E.*: Untersuchung des thermischen Verhaltens verschiedener Werkstoffe mit Hilfe der Differential-Scanning-Calorimetrie. Diplomarbeit, Otto-von-Guericke-Universität, Magdeburg, 1996
- 182 *Hemminger, W. F.; Cammenga, H.K.*: Methoden der Thermischen Analyse, Springer-Verlag, Heidelberg/.../New York, 1989
- 183 *Turi, E. A.*: Thermal Characterisation of Polymeric Materials. Second Edition, Vol. 1, Academic Press, San Diego/.../Toronto, 1997
- 184 *N.N.*: Netzsch Gerätehandbuch, Selb, 1995
- 185 *DIN 51005*: Thermische Analyse (TA), Begriffe, August, 1993
- 186 Handbuch zur TMA; Firma Netzsch Gerätebau GmbH (Selb/ Bayern), 1994
- 187 *Baumeister, E.*: Dilatometrische Untersuchungen an verschiedenen Werkstoffen mit der TMA 402. Studienarbeit, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 1994
- 188 *DIN 53752*: Prüfung von Kunststoffen. Bestimmung der thermischen Längenänderungskoeffizienten. 1980
- 189 *DIN 51045, Teil 2*: Bestimmung der Längenänderung fester Körper unter Wärmeeinwirkung. Prüfung gebrannter feinkeramischer Werkstoffe, 1976
- 190 *DIN 51045, Teil 5*: Bestimmung der Längenänderung fester Körper unter Wärmeeinwirkung. Prüfung ungebrannter grobkeramischer Werkstoffe, 1976
- 191 *DIN V ENV 1159*: Hochleistungskeramik. Keramische Verbundwerkstoffe. Thermophysikalische Eigenschaften. Teil 1: Bestimmung der thermischen Ausdehnung, 1993
- 192 *DIN 50456, Teil 1*: Prüfung von Materialien für die Halbleitertechnologie. Verfahren zur Charakterisierung von Umhüllungspressmassen für elektronische Bauelemente. Bestimmung des thermomechanischen Ausdehnungsverhaltens von Epoxydharz-Pressmassen. 1991
- 193 *DIN 52324*: Prüfung von Glas. Bestimmung der Transformationstemperatur. 1984
- 194 *EN ISO 10545-3*: Keramische Fliesen und Platten. Teil 8: Bestimmung der linearen thermischen Dehnung. 1996
- 195 *DIN 51909*: Prüfung von Kohlenstoffmaterialien: Bestimmung des linearen thermischen Ausdehnungskoeffizienten. Feststoffe. 1998

10. Literatur

- 196 *DIN ISO 7991*: Glas. Bestimmung des mittleren thermischen Längenausdehnungskoeffizienten. 1998
- 197 Grigull, U.; Sandner, H.: Wärmeleitung. 2., Auflage, Springer Verlag, Berlin, 1990
- 198 DIN 52 612, Teil 1: Wärmeschutztechnische Prüfungen, Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit mit dem Plattengerät, Durchführung und Auswertung, September 1979
- 199 *Blumenauer, H.*: Werkstoffprüfung. 6., stark überarbeitete und erweiterte Auflage, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, Stuttgart, 1994
- 200 *DIN EN ISO 527-4*: Kunststoffe. Bestimmung der Zugeigenschaften. Teil 4: Prüfbedingungen für isotrop und anisotrop faserverstärkte Kunststoffverbundwerkstoffe, 1997
- 201 *Schmiedel, H.*: Handbuch der Kunststoffprüfung. Carl Hanser Verlag, München / Wien, 1992
- 202 *DIN 53457*: Prüfung von Kunststoffen; Bestimmung des Elastizitätsmoduls im Zug-, Druck- und Biegeversuch.
- 203 *DIN EN ISO 604*: Kunststoffe - Bestimmung von Druckeigenschaften. 1997
- 204 *DIN 53241*: Prüfung von harten Schaumstoffen – Druckversuch. 1984
- 205 *DIN EN ISO 178*: Bestimmung der Biegeeigenschaften – Kunststoffe. 1996
- 206 *DIN EN ISO 672-1*: Bestimmung dynamisch-mechanischer Eigenschaften. Allgemeine Grundlagen, Dezember 1996
- 207 *Frank, A.*: Kunststoff-Kompendium. Herstellung, Aufbau, Verarbeitung, Anwendung, Umweltverhalten und Eigenschaften der Thermoplaste, Polymerlegierungen, Elastomere und Duroplaste, 4., neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Vogel Buchverlag, 1996
- 208 *DIN 53756*: Prüfung von Kunststoffen und Elastomeren; Thermische Analyse; Dynamische Differenzkalorimeter (DDK), 1994
- 209 *Hellerich, N.*: Kunststoffpraxis: Eigenschaften. WEKA-Fachverlag für technische Führungskräfte, Deutsches Kunststoff-Institut, Darmstadt, 1999
- 210 *Heine, B.*: Einführung in die Polymertechnik. Leitfaden für Studium und Praxis, expert Verlag, Renningen - Malusheim, 1998
- 211 *Kaisersberger, E.; Möhler, H.*: Netzsch-Jahrbuch für Wissenschaft und Praxis. Band 1, DSC an Polymerwerkstoffen, Würzburg, Selb, 1991
- 212 *DIN EN 6064*: Luft und Raumfahrt. Nichtmetallische Werkstoffe. Analyse von nichtmetallischen Werkstoffen (gehärtet) zur Bestimmung des Vernetzungsgrades durch Dynamische Differenzkalorimetrie (DSC), 1996
- 213 *DIN EN 6061*: Luft und Raumfahrt. Nichtmetallische Werkstoffe. Analyse von nichtmetallischen Werkstoffen (ungehärtet) zur Bestimmung des Vernetzungsgrades durch Dynamische Differenzkalorimetrie (DSC), 1996

10. Literatur

- 214 *DIN EN ISO 11409*: Kunststoffe. Phenolharze, Bestimmung der Reaktionswärmern und –temperaturen durch dynamische Differenzkalorimetrie, 1998
- 215 *DIN 65467*: Luft- und Raumfahrt. Prüfung von Reaktionsharzsystemen mit und ohne Verstärkung. DSC-Verfahren, 1999
- 216 *Ehrenstein, G. W.*: Kunststoff-Schadensanalyse. Methoden und Verfahren, Carl Hanser Verlag, München, Wien, 1992
- 217 *DIN V ENV 1159-3*: Hochleistungskeramik. Keramische Verbundwerkstoffe, thermophysikalische Eigenschaften. Teil 3: Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität, 1995
- 218 *VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen*: VDI-Wärmeatlas. Berechnungsblätter für den Wärmeübergang, 8., überarbeitete und erweiterte Auflage, Springer Verlag, 1997
- 219 *Menges, G.*: Werkstoffkunde Kunststoffe, 4. Auflage, 4., korrigierte und aktualisierte Auflage, Carl Hanser Verlag, München/Wien, 1998
- 220 *Knappe, S.*: Bericht und Messungen an DMA 242 von der Firma Netzsch
- 221 *Salmang, H.; Scholze, H.*: Keramik. Teil 1: Allgemeine Grundlagen und wichtige Eigenschaften. Sechste, verbesserte und erweiterte Auflage, Springer-Verlag, Berlin/.../ New York, 1982
- 222 *Baumeister, E.; Klaeger, S.*: Properties of hollow-sphere-composites as lightweight-materials. MicroCAD, Miskolc, 2002
- 223 *Lierath, F.; Menz, P.; Baumeister, E.*: Investigations with regard to the thermal and mechanical properties of hollow-sphere-composites Technical University of Cluj-Napoca, Annals of MTeM for 2001 & Proceedings of the 5Th International MTeM Symposium, (Editor: Gyenge, Cs.), October 2001, p. 303-306
- 224 *Ehrenstein, G. W.*: Mit Kunststoffen Konstruieren. Eine Einführung. Carl Hanser Verlag, München, Wien, 1995
- 225 *Lierath, F.; Klaeger, S.; Menz, P.; Baumeister, E.*: Hohlkugelkomposit – ein neuer Werkstoff für den Leichtbau. Deutsche Gesellschaft für Materialkunde e.V. „Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde“, (Herausgegeben: Wielage, B; Leonhardt, G.), Willey-VCH Verlag, Weinheim / New York / Chichester / Brisbane / Singapore / Toronto, (2001), S. 75-81
- 226 *Dölle, G.*: Untersuchungen des Biegebruchverhaltens von Hohlkugelkomposit zur Applikation des Materials für Werkzeugmaschinen und Industrieroboter. Diplomarbeit, Otto-von-Guericke-Universität, Magdeburg, 2000
- 227 *Baumeister, K.*: Industrieroboter in der metallverarbeitenden Industrie. Metall (Berl.), Band 40, 1986, Heft 8, S. 798-802
- 228 *Warnecke, H.-J.; Baumeister, K.*: Kommissionierung aus der Sicht der Handhabungstechnik. Schweiz. Maschinenmarkt, Band 86, Heft 9, 1986, S. 39-43
- 229 *Dai Gil Lee, Ki Soo Kim & Joon Keun Kwak*: Manufacturing of a scara type direct-drive robot with graphite fiber epoxy composite material. Robotica, Vol. 9,

- 1991, pp. 219-229
- 230 *Baumeister, E.*: Könyü-szerkezetek es anyagok alkalmazasa a szerszamgepgyartasban. (Deutsch: Anwendung von Leichtbauwerkstoffen und – konstruktionen im Werkzeugmaschinenbau.), MicroCAD, (Hsg. Patko, Gy.), Miskolc, 2002, S. 1-7
- 231 *Lierath, F.; Menz, P.; Baumeister, E.*: Lightweight construction for machine tools and robots. Technical University of Cluj-Napoca, Annals of MTeM for 2001 & Proceedings of the 5Th International MTeM Symposium, (Editor: Gyenge, Cs.), October 2001, p. 303-306
- 232 *Baumeister, E.*: Hollow-Sphere-Composites- As new Light-Weight Material for Mechanical Engineering. European Congress on Advanced Material and Progresses “Materials Week” in München Oktober 2002, Werkstoff - Informationsgesellschaft mbH, Frankfurt, 2003
- 233 *Baumeister, E.*: Thermische und mechanische Eigenschaften von Holhkugel-Komposit als Leichtbauwerkstoff. Internationale Fachtagung Polymerwerkstoffe, Halle (Saale), Martin-Luther-Universität, (Hsg. Radusch, H.-J.; Fiedler, L.), September 2002, S. 480-483
- 234 *Klaeger, S.; Baumeister, E.*: Untersuchungen von Hohlkugel-Komposit als Leichtbauwerkstoff im Werkzeugmaschinenbau. Internationale Fachtagung „Polymerwerkstoffe“, Halle (Saale), Martin-Luther-Universität, (Hsg. Radusch, H.-J.; Fiedler, L.), September 2002, S. 112-113
- 235 *Baumeister, E.; Klaeger, S.; Kaldos, A.*: Hollow-Sphere-Composites (HSC) as new lightweight materials for mechanical engineering applications. International Conference on Advances in Materials and Processing Technologies AMPT, Dublin, 2003
- 236 *Baumeister, E.; Klaeger, S.; Kaldos, A.*: Lightweight, Hollow-Sphere-Composite (HSC) materials for mechanical Engineering Applications. Journal of Materials Processing Technology, (Edited by: Olabi, A. G.; Hashmi, M., S., J.), Dublin, 2003, p. 296-299
- 237 *Baumeister, E.; Klaeger, S.*: Advanced New Lightweight Materials - Hollow-Sphere-Composites (HSC) for Mechanical Engineering Applications. Advanced Engineering Materials, WILEY-VCH, Weinheim, 2003
- 238 *Baumeister, E.; Klaeger, S.; Lierath, F.*: Reactive resin bonded light-weight materials for mechanical engineering applications. Technical University of Cluj-Napoca, Annals of MTeM for 2003 & Proceedings of the 6Th International MTeM Symposium, (Editor: Gyenge, Cs.), Cluj-Napoca, 2003

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Baumeister
Vorname: Erika-Enikö
Geburtsdatum: 22.09.67
Geburtsort: Großwardein / Oradea / Nagyvárad
Familienstand: ledig
Nationalität: Deutsch
Staatsangehörigkeit: Deutsch



Ausbildung

1974-1982 Grundschule in Großwardein
1982-1986 Gymnasium in Großwardein; Abschluss: Abitur
1991-1996 Studium an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
Studiengang: Werkstofftechnik
Abschluss: Diplom-Ingenieurin
1996-1997 Ergänzungsstudium an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
Studiengang: Sicherheitstechnik
Abschluss: Sicherheitsingenieurin

Berufliche Tätigkeit

1991-1992 Näherin in „Büngener Mode Bekleidungswerk“ Magdeburg
1993-1995 Studentische Hilfskraft im Labor für nichtmetallische Werkstoffe des Institutes für Werkstofftechnik und Werkstoffprüfung Magdeburg
1996-1998 Hilfskraft mit Hochschulausbildung am Institut für Werkstofftechnik und Werkstoffprüfung
1998-1999 Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Werkstofftechnik und Werkstoffprüfung der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
1999-2004 Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Fertigungstechnik und Qualitätssicherung der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg