

1. Einleitung

Natürliche Komposite wie Perlmutter oder Knochen weisen hervorragende mechanische Eigenschaften auf, die die ihrer Einzelkomponenten übertreffen. Dies ist auf ihre komplexe Struktur zurückzuführen, bei der die Bausteine der harten Komponente in eine weiche Matrix eingebettet sind und so Festigkeit und Zähigkeit kombinieren. Eines der prominentesten Beispiele solcher natürlichen Komposite ist Perlmutter. Die Ziegelsteinstruktur des Perlmutter besteht aus Mineralplättchen, die durch ein Biopolymer zusammengehalten werden. Die Plättchen bestehen aus kleinen Aragonitpartikeln (~30 nm), die ebenfalls durch ein Biopolymer verbunden sind, sodass sich eine mehrhierarchische Struktur ausbildet (Abb. 1) (Wegst et al., 2015). Perlmutter ist unter anderem in Molluskenschalen zu finden, in denen die Perlmutter Schicht eine Biegefestigkeit von bis zu 220 MPa und eine Steifigkeit von 70 GPa aufweisen kann (Vincent, 2012). Die Kombination von hoher Festigkeit und Zähigkeit macht diese Materialien besonders interessant für verschiedene strukturelle Anwendungen wie z.B. kratzfeste, leichte und temperaturbeständige Beschichtungen sowie Zahn- und Knochenersatzmaterialien. Daher besteht großes Interesse an der Entwicklung skalierbarer Verfahren für die Herstellung künstlicher Verbundwerkstoffe mit außergewöhnlich guten mechanischen Eigenschaften (Wegst et al., 2015; Ritchie, 2011).

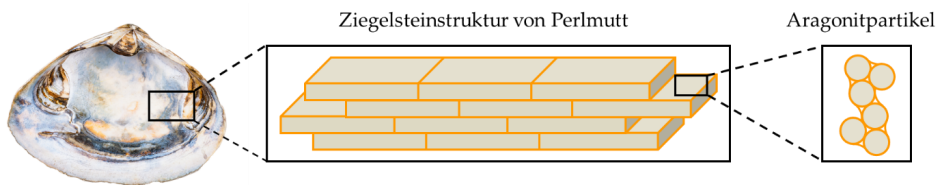


Abb. 1: Schematische Darstellung der Struktur von Perlmutter.

Obwohl in den letzten Jahren große Fortschritte erzielt und verschiedenste Methoden untersucht wurden, gibt es immer noch viele offene Fragen und Verbesserungsmöglichkeiten in Bezug auf die Herstellung von künstlichen Verbundwerkstoffen. Daher wurde 2012 von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) ein Sonderforschungsbereich (SFB 986) zu diesem Thema mit Sitz an der TU in Hamburg eingereicht. Ziel des SFB 986 ist die Herstellung und Untersuchung von multiskaligen Materialsystemen, die aus hierarchisch angeordneten, elementaren Funktionseinheiten aus harten Partikeln mit einer weichen Hülle bestehen. Die hier vorgestellte Arbeit ist Teil dieses Sonderforschungsbereichs und beschäftigt sich mit der Untersuchung von schnellen und skalierbaren Prozessen für die Beschichtung feiner Partikel mit einer Polymerhülle zur Herstellung solcher Kompositmaterialien.

In Vorarbeiten im Rahmen des SFB 986 wurde bereits eine Prozessroute zur Herstellung von mehrstufigen hierarchischen Kompositen identifiziert. Hierbei wurde eine Kombination aus Emulsionspolymerisation für die erste hierarchische Ebene und Wirbelschichtgranulation für die zweite Ebene untersucht und TiO₂-PMMA/PVB-Verbundwerkstoffe mit vielversprechender Struktur und mechanischen Eigenschaften hergestellt (Brandt et al., 2013).

Aufbauend auf diesen Ergebnissen wird in dieser Arbeit das Wirbelschichtverfahren in einer eigens entwickelten miniaturisierten Anlage zur Herstellung von Kompositmaterialien charakterisiert. In der Wirbelschicht sollen möglichst feine Primärpartikel fluidisiert, mit einem Polymer beschichtet und anschließend mittels Warmkompaktierung zu Kompositpellets verpresst werden. Dabei soll die Primärpartikelgröße und der Polymergehalt möglichst klein sein, um die Struktur von Perlmutter nachzuahmen und eine optimale Kombination der mechanischen Compositeigenschaften zu erreichen. In dieser Arbeit wird die Fluidisierung von verschiedenen Materialien unterschiedlicher Größen untersucht, um die Eignung dieses Prozesses für die Produktion von Kompositmaterialien zu prüfen. Als Alternativprozess wird das Sprühtrocknungsverfahren untersucht. Die Sprühtrocknung ist ein einstufiger Prozess der Partikelbildung und -trocknung. Partikel-Polymer-Granulate werden dabei durch das Trocknen einer Suspension hergestellt. In dieser Arbeit werden zwei verschiedene Sprühtrockner zur Herstellung von Submikropartikeln eingesetzt. Es wird zum einen der Nano-Sprühtrockner B-90 von Büchi, in dem die Tröpfchen durch eine piezoelektrische Membran erzeugt werden, und zum anderen der NIRO-Atomizer-Mobile Minor Laborsprühtrockner von GEA, in dem die Suspension durch eine gängige Zweistoffdüse versprüht wird, verwendet.

Sowohl das Wirbelschichtverfahren als auch die Sprühtrocknung sind gängige Verfahren für die Beschichtung von feinen Partikeln, lassen sich leicht skalieren und sind daher vielversprechende Prozesse für die Kompositherstellung.

2. Stand der Technik

2.1 Verbundwerkstoffe: Bestandteile, Eigenschaften und Herstellungsverfahren

Verbundwerkstoffe, auch Komposite genannt, sind eine Klasse von Materialien, die aus mindestens zwei Komponenten bestehen, die nicht ineinander löslich sind und eine quasi-homogene Struktur bilden. Die kontinuierliche Phase, die als Matrix bezeichnet wird, zeigt im Allgemeinen elastisches Verhalten, während die eingebettete Phase feste Eigenschaften aufweist. Gängige Komponenten sind Polymere, Keramiken, Metalle oder Legierungen, die auf verschiedene Arten angeordnet werden können und unterschiedliche Kompositstrukturen ausbilden. Das hervorstechende Merkmal ist, dass ihre Eigenschaften die der Einzelkomponenten übertreffen können (Schulte und Fiedler, 2005). Daher kann durch die Kombination verschiedener Materialien ein Verbundwerkstoff mit maßgeschneiderten Eigenschaften hergestellt werden. Zu den wichtigsten Eigenschaften gehören die Festigkeit, Steifigkeit, geringe Dichte sowie Temperatur-, Oxidations- und Korrosionsbeständigkeit, Bruchzähigkeit und Wärmeleitfähigkeit (Roos, 2015). Bekannte Beispiele für Verbundwerkstoffe sind Beton, Leichtbaukonstruktionen, die in der Automobil-, Luft- und Raumfahrtindustrie zu finden sind (Yancey, 2016), oder Zahnfüllmaterialien (Rangreez und Mobin, 2019).

2.1.1 Komponenten von Verbundwerkstoffen

Polymere

Polymere sind hochmolekulare organische Verbindungen, die aus Monomeren (niedermolekularen Bausteinen) durch eine Polymerisationsreaktion gebildet werden. Je höher der chemische Vernetzungsgrad der Makromoleküle ist, desto höher sind die thermische und mechanische Belastbarkeit des Kunststoffes. Daraus ergibt sich die Einteilung in Thermoplaste, Elastomere und Duroplaste. Elastomere sind schwach vernetzte Kunststoffe (Abb. 2), die bis zur Zersetzungstemperatur gummielastisch sind. Je nach Temperatur und Belastung sind oberhalb der Glasübergangstemperatur Bewegungen von Kettensegmenten und damit größere Verformungen möglich. Die Glasübergangstemperatur gibt im Allgemeinen den Übergang von einem harten oder spröden Zustand zu einer viskosen Flüssigkeit an. Duroplaste sind chemisch stark vernetzte Kunststoffe. Durch die starke Vernetzung werden Mikro-Brownsche Bewegungen (Drehung von Kettensegmenten) verhindert. Erst oberhalb der Glasübergangstemperatur sind eingeschränkte Bewegungen möglich, die zu Kriechvorgängen führen können, allerdings finden Fließvorgänge nach der Vernetzung nicht mehr statt. Thermoplaste sind nicht vernetzte, sondern verschlungene Makromoleküle (Abb. 2). Das Schmelzen bzw. Fließen erfolgt bei amorphen Thermoplasten (ohne periodische Anordnung) oberhalb des Erweichungspunkts bzw. bei teilkristallinen Thermoplasten oberhalb der Schmelztemperatur. Im fließenden oder schmelzenden Zustand kann das Polymer verarbeitet werden und die Formstabilität wird unter Abkühlung erreicht (Domininghaus, 2013).

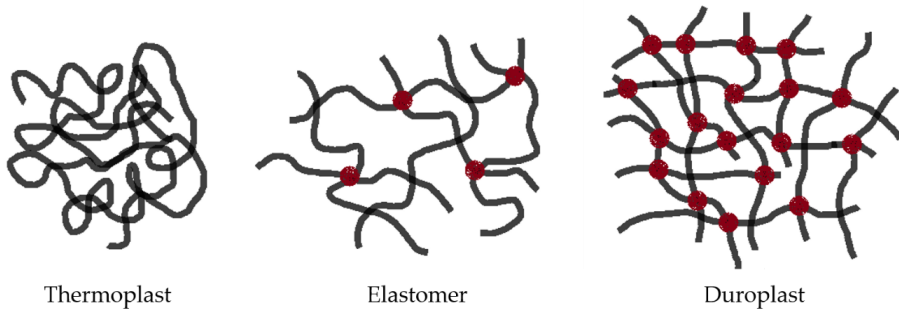


Abb. 2: Schematischer Überblick über die verschiedenen Polymerarten: amorphe Struktur von Thermoplasten, schwach vernetzte Elastomere und stark vernetzte Duroplaste (nach Dominghaus (2013)).

Das Schmelzen und Erstarren von Thermoplasten kann beliebig oft wiederholt werden. Weitere vorteilhafte Eigenschaften thermoplastischer Polymere sind ihr hohes Bruchdehnungsverhalten und ihre hohe Bruchzähigkeit. Außerdem ist keine Nachhärtung notwendig, und die Herstellung von Thermoplasten ist in der Regel kostengünstig (Schulte und Fiedler, 2005). Aufgrund der Verarbeitungsmöglichkeiten, der guten mechanischen Eigenschaften und der ausreichenden Löslichkeit in gängigen Lösungsmitteln sind Thermoplaste beliebte Komponenten für Verbundwerkstoffe, insbesondere als Matrixphase. In Tab. 1 sind die wichtigsten Eigenschaften der für diese Arbeit relevanten Thermoplaste aufgeführt:

Tab. 1: Eigenschaften der in dieser Arbeit verwendeten Thermoplaste als Matrixphase in den hergestellten Verbundwerkstoffen (Kuraray Europe GmbH, 2022; Mitsubishi Chemical Corporation, 2021).

Herstellername	Molekular- masse [-]	Zugfestigkeit [MPa]	Deformation [%]	E-Modul [GPa]	T _g [°C]
Mowital PVB 30H	30.000	45-70	4-7	2,3-2,4	68
Mowital PVB 75H	110.000				73
Gohsenol PVA EG-22P	26.400	40	130	2,283	85

Keramiken

Keramik besteht in der Regel aus nur einer Struktureinheit, die aus wenigen Atomen ohne metallische Bindungen besteht. Beispiele für natürliche Keramiken sind Stein und Sand, während Glas und Ziegelsteine typische künstliche Keramiken sind. Keramiken sind für viele Anwendungen sehr nützlich, da sie einige vorteilhafte Eigenschaften aufweisen. Vor allem die physikalischen und mechanischen Eigenschaften sind von großer Bedeutung. In Tab. 2 sind die wichtigsten Eigenschaften sowie die häufigsten Anwendungen von Keramik aufgeführt.

Tab. 2: Liste der vorteilhaften und nachteiligen Eigenschaften für die genannten typischen Anwendungen von Keramiken (Munz und Fett, 1999).

Vorteile	Nachteile	Anwendungen
Geringe elektrische Leitfähigkeit	Geringe Zugfestigkeit	Thermische Isolierstoffe
Geringe Wärmeleitfähigkeit	Sprödigkeit	Elektroscher Isolator
Geringe Dichte	Große Streuung der Festigkeit	Wärmetauscher
Hohe Festigkeit	Unterkritische	Schneidwerkzeuge
Abriebsfestigkeit	Rissausbreitung	Knochenersatz
Korrosionsbeständigkeit		Dentalkeramik
Spezifische optische, elektrische und magnetische Eigenschaften		

Die Sprödigkeit von Keramik ist auf ihre starken Atombindungen zurückzuführen. Kleine Defekte führen zum direkten Materialversagen, bevor eine plastische Verformung eintritt. Die große Streuung der Festigkeit ergibt sich aus der unterschiedlichen Verteilung dieser Defekte im Material, während die unterkritische Rissausbreitung bei wiederholter mechanischer Belastung zum Bruch führt (Munz und Fett, 1999).

Keramiken eignen sich aufgrund ihrer geringen Dichte und ihrer hohen Festigkeit sehr gut als Bestandteil für Verbundwerkstoffe. Insbesondere in Kombination mit einer weicheren Matrixphase kann die Verwendung von Keramiken als eingebettete Verstärkerphase zu vorteilhaften mechanischen Eigenschaften z.B. für Leichtbaukomposite führen. In Tab. 3 sind die wichtigsten Eigenschaften der Keramiken für die in dieser Arbeit hergestellten Komposite aufgeführt.

Tab. 3: Eigenschaften der in dieser Arbeit als Verstärkerphase (in Matrix eingebettete festere Phase) verwendeten Keramiken (Chicot et al., 2011; Lanxess, 2021; Kuhmichel, 2021; Konstantiniuk et al., 2021).

	Dichte [g/cm ³]	E-Modul [GPa]	Härte [GPa]
Al ₂ O ₃	3,9-4,1	340-460	28-34
Fe ₃ O ₄	4,6	200	6,3

2.1.2 Arten von Verbundwerkstoffen

Die primäre Klassifizierung von Verbundwerkstoffen basiert auf ihrer Struktur. Es wird zwischen drei verschiedenen Typen unterschieden: Schichtverbundwerkstoffe, faserverstärkte Verbundwerkstoffe und partikelverstärkte Verbundwerkstoffe (Abb. 3).

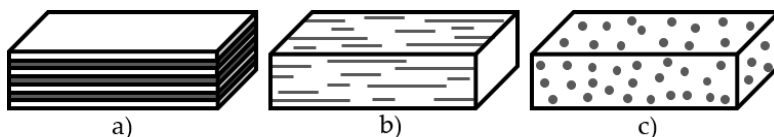


Abb. 3: Klassifizierung von Verbundwerkstoffen: a) Schichtverbundwerkstoffe, b) faserverstärkte Verbundwerkstoffe und c) partikelverstärkte Verbundwerkstoffe (nach Gobrecht et al. (2009)).

Eine weitere Einteilung erfolgt nach der Art der Matrix in CMC, MMC und PMC (Keramik-, Metall- oder Polymer-Matrix-Verbundwerkstoff). Die Matrix fungiert hauptsächlich als

Bindemittel, das die Last auf das eingebettete verstärkende Material überträgt (Schulte und Fiedler, 2005). Während faser- und partikelverstärkte Verbundwerkstoffe am häufigsten verwendet werden, hängt die Wahl des Matrixmaterials in der Regel von der Anwendungstemperatur ab. Diese ist bei CMC am höchsten ($> 150\text{ °C}$) und bei PMC am niedrigsten. Eines der häufigsten Beispiele für künstlich hergestellte Verbundwerkstoffe sind glas- oder kohlenstoffverstärkte Duroplaste, die eine besondere Gruppe von Leichtbauwerkstoffen darstellen und in der Luft- und Raumfahrt, in der Elektrotechnik sowie in der Schiffstechnik oder bei der Herstellung von Freizeit- und Sportgeräten eingesetzt werden (Bergmann, 2009).

Verbundwerkstoffe kommen auch in der Natur vor, wo sie in der Regel aus einem großen Anteil an Mineralien (Keramik) und einem kleineren Anteil an Proteinen oder Polymeren bestehen. Wichtige Beispiele sind Knochen, Bambus und Perlmutter (Chen et al., 2008). Während Knochen und Bambus faserverstärkten natürlichen Kompositen zuzuordnen sind, da ihre Haupteinheiten Osteonlamellen (Knochen) und Zellulosefasern (Bambus) sind, hat Perlmutter eine Ziegelsteinstruktur aus Aragonitplättchen, die in einer biopolymeren Matrix eingebettet sind. In Perlmutter fungiert die organische Komponente als Klebstoff zwischen den mineralischen Bausteinen und überträgt die Last bei mechanischer Beanspruchung. Im kleinsten Maßstab bestehen die primären Bausteine von Perlmutter aus mineralischen Nanopartikeln, die durch Proteine und Chitin verbunden sind. Diese Struktur bildet die Bausteine (Plättchen) in der nächsten Größenskala, die wiederum durch eine Biopolymerschicht miteinander verbunden sind (Abb. 4). Dieser Aufbau wird als hierarchische Struktur bezeichnet, da sich der Aufbau auf mehreren Größenskalen wiederholt. Die hierarchische Struktur ist in vielen natürlichen Kompositen zu finden (Wegst et al., 2015). Typisch für natürliche Komposite ist der hohe Anteil der eingebetteten Phase. So besteht Perlmutter aus 95 Vol.-% mineralischer und nur 5 Vol.-% organischer Phase (Barthelat et al., 2006). Wegen ihrer komplexen Struktur und Zusammensetzung weisen natürliche Verbundwerkstoffe eine hohe Festigkeit und Steifigkeit auf (120 MPa und 40-70 GPa (Barthelat et al., 2007)). Diese Kombination von Eigenschaften ist in nur wenigen Materialien zu finden (Wegst et al., 2015). Dadurch sind natürliche Komposite für verschiedenste Anwendungen interessant, und ihre Nachbildung steht im Mittelpunkt zahlreicher Forschungsprojekte.

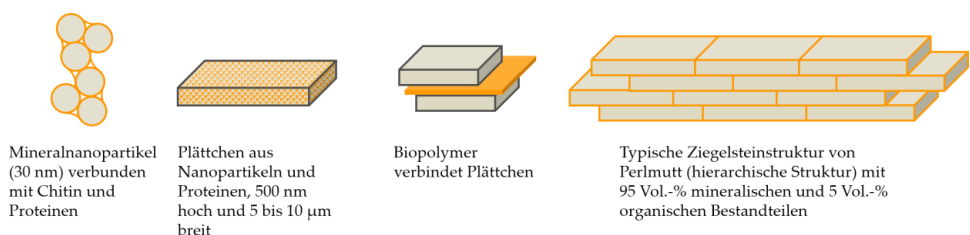


Abb. 4: Hierarchische Struktur von Perlmutter aus mineralischen Bestandteilen, die zur Festigkeit des Komposits beitragen, und organischen Bestandteilen als elastische Komponente (nach Wegst et al. (2015)).

2.1.3 Grenzflächenwechselwirkungen in Verbundwerkstoffen

Die Art und Stärke der Grenzflächen zwischen den Bestandteilen haben einen wichtigen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften der Verbundwerkstoffe. Im Allgemeinen werden fünf verschiedene Arten von Adhäsionskräften unterschieden: kovalente Bindungen, elektrostatische Anziehung, van-der-Waals Wechselwirkungen, mechanisches Verhaken und Interdiffusion (Hull und Clyne, 2012). Diese Wechselwirkungen treten abhängig von den Komponenten in unterschiedlichem Maß auf und hängen auch von der Größe und Form der eingebetteten Phase und der Gesamtzusammensetzung ab. Je kleiner die Partikel der eingebetteten Phase sind und je größer das Seitenverhältnis ist, desto größer ist das Oberflächen-Volumen-Verhältnis und desto bedeutender sind die Eigenschaften der Grenzfläche in Bezug auf die Eigenschaften des Verbundwerkstoffes. Wenn Polymere mit langen Molekülketten als Matrixphase verwendet werden, kann es zu einer Verzahnung kommen, die die Grenzfläche verstärkt (durch mechanische Verzahnung oder Interdiffusion). Bestehen nur geringe Adhäsionskräfte zwischen den Komponenten, wie bei polaren Keramiken oder Metalloxiden und Polymeren mit eher geringer Polarität, können bifunktionelle Moleküle eingesetzt werden, um eine kovalente Bindung beider Phasen zu ermöglichen. Häufig werden dafür sogenannte Silan-Kopplungsmittel eingesetzt, die kovalent an die Hydroxylgruppen der Partikeloberfläche binden. Über ihre Amino- und Hydroxylgruppen ist eine kovalente Bindung mit der Polymermatrix möglich (Roy und Potiyaraj, 2019). Die Verwendung von Silan-Kopplungsmitteln zur Oberflächenmodifikation ist bereits gut etabliert und wird häufig zur Stabilisation von Nanopartikeln (Dispersion und Aggregation) oder für die Herstellung von Nanokompositen eingesetzt. Im Review von Ahangaran und Navarchian (2020) werden verschiedene Techniken und Beispiele für die Oberflächenmodifikation von Metalloxid-Nanopartikeln (NPs) diskutiert. Während die physikalische Oberflächenmodifikation auf schwachen Wasserstoffbrückenbindungen oder Van-der-Waals-Kräften basiert und die modifizierten NPs daher nicht thermisch- und lösungsmittelbeständig sind, basieren chemische Oberflächenmodifikationstechniken auf kovalenten Bindungen und führen damit zu einem stabilen Nanopartikelsystem (Ahangaran und Navarchian, 2020). Prado et al. (2010) beschreiben die Oberflächenmodifikation von Al_2O_3 -NPs mit einem Silan-Kopplungsmittel, einem epoxidhaltigen Alkoxysilan, wodurch sie die thermische Stabilität von Al_2O_3 erhöhen konnten. Die Oberflächenmodifikation von TiO_2 -NPs wurde in Sabzi et al. (2009) zur Verbesserung der Dispersion in einer Polymermatrix (Polyurethan) und der Interaktion mit dem Polymer für eine Klarlackanwendung durchgeführt. Die Autoren waren in der Lage, den NPs eine Modifikatormonoschicht hinzuzufügen und dadurch die Dispersion, die mechanischen Eigenschaften und den UV-Schutz der Beschichtung zu verbessern. In Tab. 4 ist der Effekt von Silan als Modifikator auf die mechanischen Eigenschaften eines hochgefüllten Ton-Kautschuk-Komposits aufgezeigt (van der Wal et al., 1965).

Tab. 4: Einfluss von Silan auf die mechanischen Eigenschaften eines Ton-Kautschuk-Komposits (80% Ton) (van der Wal et al., 1965).

	Ohne Silan	Mit Silan
Zugfestigkeit [MPa]	16	24
Bruchdehnung [%]	700	230
E-Modul [MPa]	6,6	24

2.1.4 Mechanische Eigenschaften von Verbundwerkstoffen

Da sich die Forschung in dieser Arbeit auf partikelgefüllte Verbundwerkstoffe konzentriert, werden in diesem Kapitel nur deren mechanischen Eigenschaften diskutiert. Im Allgemeinen werden die Eigenschaften von Kompositen durch die mechanischen Eigenschaften ihrer Komponenten, der Form und Größe der eingebetteten Phase, der Porosität der partikulären Phase, einer möglichen Agglomeration der Partikel und durch die Grenzfläche zwischen den Komponenten (Kap. 2.1.3) bestimmt (Nielsen und Landel, 1994).

Elastizitätsmodul

Der Elastizitätsmodul, auch als E-Modul oder Steifigkeit bezeichnet, ist das Verhältnis zwischen Spannung und Dehnung in der elastischen Phase eines Zugversuchs. Bei Kompositen hängt diese Eigenschaft stark von den Einzelkomponenten ab. Mit zunehmendem Anteil der partikulären Phase, die in der Regel die verstärkende Komponente darstellt, ergeben sich höhere Werte für den E-Modul (Nielsen, 1967; Nielsen und Landel, 1994; Fu et al., 2008). Die Zugabe von starren Partikeln in eine Polymermatrix führt zu einer Erhöhung des E-Moduls, da die Steifigkeit anorganischer Füllstoffe im Allgemeinen viel höher ist als die von organischen Polymeren (Fu et al., 2008). In Wang et al. (1998) wurden HAPE-Komposite (mit Hydroxylapatit (HA) verstärkte Polyethylenkomposite), die als Knochen- und Zahnersatzmaterialien verwendet werden, mit unterschiedlichem Volumengehalt und HA hergestellt. In Abb. 5 ist der E-Modul verschiedener HAPE-Komposite mit verschiedenen Volumenanteilen an Hydroxylapatit aufgelistet. Mit steigenden Volumenanteil der anorganischen Phase steigt der E-Modul signifikant.

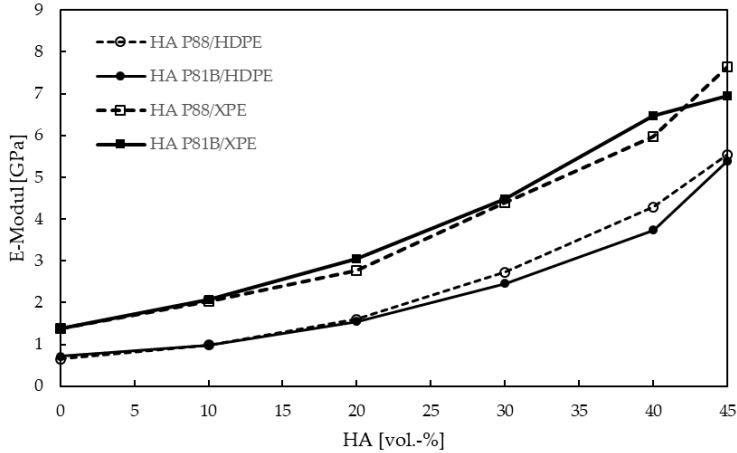


Abb. 5: E-Modul von mit Hydroxylapatit verstärkten Polyethylenkompositen. HA P88 hat eine mittlere Partikelgröße von 4,14 μm und P81B von 7,32 μm ; HDPE steht für *high density polyethylene* und XPE für *cross-linkable polyethylene* (Wang et al., 1998).

Die Partikelgröße der anorganischen Phase hat im Gegensatz zum Füllgrad des Komposits keinen signifikanten Einfluss auf den Elastizitätsmodul. Dies belegen zahlreiche Studien, in denen der Einfluss unterschiedlicher Partikelgrößen der anorganischen Komponente auf die mechanischen Eigenschaften untersucht wurde (Xie et al., 2005; Suprapakorn et al., 1998; Nakamura et al., 1992; Singh et al., 2002; Fu et al., 2008). So zeigt beispielsweise in Suprapakorn et al. (1998) die Partikelgröße von CaCO_3 (1, 5 und 20 μm) keinen Einfluss auf den E-Modul der CaCO_3 -Polybenzoxazine-Komposite. Allerdings zeigt sich bei Nanopartikeln ein anderes Verhalten. In Douce et al. (2004) wird eine starke Abnahme des E-Moduls bei zunehmender Partikelgröße von 15 auf 35 nm beschrieben. Somit scheint die Partikelgröße der Verstärkerphase im Mikro- und Submikrobereich keinen, aber im niedrigen Nanometerbereich durchaus einen Einfluss auf die Elastizität des Komposits zu haben.

Eine Abschätzung der Elastizität von Verbundwerkstoffen wird von Voigt (1966) und Reuss (1929) gegeben. Dabei wird davon ausgegangen, dass jede Komponente im Verbundwerkstoff der gleichen Dehnung ausgesetzt ist, was einer Analogie von parallel verbundenen Federn (Abb. 6 a)) entspricht (Voigt, 1966). Daraus ergibt sich der Längsmodul E_{\parallel} :

$$E_{\parallel} = E_m v_m + E_v v_v \quad (2.1)$$

mit E-Modul der Matrixphase E_m , dem Füllgrad der Matrix im Komposit v_m , dem E-Modul der Verstärkerphase E_v und dem Füllgrad der Verstärkerphase im Komposit v_v .

Reuss (1929) ging davon aus, dass jede Phase der gleichen Spannung ausgesetzt ist, woraus sich der Quermodul E_L in Analogie zu in Reihe geschalteten Federn (Abb. 6 b)) ergibt:

$$E_L = \frac{E_m E_v}{E_m v_v + E_v v_m} \quad (2.2)$$

Die aus den Modellen von Voigt und Reuss ermittelten Schätzwerte für die Verbundwerkstoffmodule stellen Extremwerte dar, und der E-Modul eines partikelverstärkten Verbundwerkstoffs (Abb. 6 c)) wird zwischen diesen beiden Werten erwartet (Cahn et al., 1993).

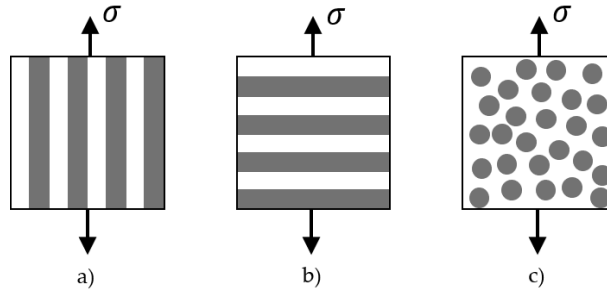


Abb. 6: Schema zur Veranschaulichung verschiedener Konfigurationen eines Verbundwerkstoffs: Parallele (a) und vertikale (b) Anordnung in Bezug auf die Belastungsrichtung; partikelverstärkter Verbundwerkstoff (c) (nach Hornbogen et al. (2017)).

Festigkeit

Die Festigkeit eines Stoffes ist die maximale Spannung, die das Material unter einachsiger Belastung aushält. Bei Verbundwerkstoffen hängt die Festigkeit von der Spannungsübertragung zwischen Matrix und partikulären Füllstoffen ab. Faktoren wie Partikelgröße, Partikel/Matrix-Grenzflächenfestigkeit (Kap. 2.1.3) und der Füllgrad der Partikel, die sich auf die Festigkeit des Verbundwerkstoffs auswirken, haben dabei einen besonders großen Einfluss. Zahlreiche Studien haben dabei gezeigt, dass größere Partikel bei gleichem Füllgrad die Festigkeit von Nano- und Mikrokompositen verringern (Pukanszky und VÖRÖS, 1993b; Nakamura et al., 1992; Radford, 1971; Buggy et al., 2005). In Abb. 7 a) ist dies für Polypropylen (PP)-CaCO₃-Komposite mit Partikelgrößen von 10 nm bis 58 µm gezeigt.